T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BUĞDAY KEPEĞİNİN ULTRASES VE MİKROBİYAL PROSES İLE MODİFİKASYONU, MODİFİYE KEPEKLERİN BESİNSEL, TEKNOLOJİK VE EKMEKLİK KALİTE ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Esra ŞIK

DOKTORA TEZİ

Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Gıda Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. Görkem ÖZÜLKÜ

Şubat, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BUĞDAY KEPEĞİNİN ULTRASES VE MİKROBİYAL PROSES İLE MODİFİKASYONU, MODİFİYE KEPEKLERİN BESİNSEL, TEKNOLOJİK VE EKMEKLİK KALİTE ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Esra ŞIK tarafından hazırlanan tez çalışması 26/02/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Gıda Mühendisliği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Görkem ÖZÜLKÜ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Görkem ÖZÜLKÜ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Osman SAĞDIÇ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Hamit KÖKSEL, Üye
İstinye Üniversitesi _____

Prof. Dr. Salih KARASU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Kerem İLASLAN, Üye
Bahçeşehir Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Görkem ÖZÜLKÜ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan **"Buğday Kepeğinin Ultrases ve Mikrobiyal Proses ile Modifikasyonu, Modifiye Kepeklerin Besinsel, Teknolojik ve Ekmeklik Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi"** başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Esra ŞIK

İmza

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 122O874 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Hayatımın en değerli parçaları olan biricik çocuklarıma

ve

her zaman yanımda olan sevgili eşime

TEŞEKKÜR

Bu tez, uzun bir yolculuğun ürünü ve bu süreçte bana destek olan herkese gönülden teşekkür etmek istiyorum.

Öncelikle, danışman hocam Doç. Dr. Görkem ÖZÜLKÜ'ye, bilgi birikimi, rehberliği ve sabrı için sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tezin her aşamasında gösterdiğiniz özen ve yapıcı katkılar, çalışmamın şekillenmesinde çok değerli oldu.

Tez izleme komitemin değerli üyeleri Prof. Dr. Osman SAĞDIÇ ve Prof. Dr. Hamit KÖKSEL, eleştirileriniz, rehberliğiniz ve teşvik edici yorumlarınızla bu çalışmanın yönünü şekillendirdiğiniz için minnettarım.

Bu çalışmada kullandığım buğday kepeklerinin temininde sağladığı değerli destek için Dr. Turhan KAHRAMAN'a içten teşekkür ederim. Çalışmamın deneysel tasarımında rehberlik eden ve katkılarıyla sürecin daha verimli ilerlemesine olanak sağlayan Dr. Öğr. Üyesi Necattin Cihat İÇYER'e de ayrıca minnettarım.

Eğitim hayatım boyunca beni her zaman destekleyen, sevgisi ve emeğiyle yanımda olan annem Elif KOKLAMAZ'a gönülden teşekkür ederim. Her zaman yanımda olduğunu bilmek, bu süreçte en büyük gücüm oldu.

Tez çalışmalarım boyunca sabrıyla, sevgisiyle ve anlayışıyla beni destekleyen sevgili eşim Yasin ŞIK'a; varlıklarıyla beni güçlü kılan can parçalarım, çocuklarım Umay ve Aybars ŞIK'a teşekkür ederim. Sizlerin desteği ve sevgisi, bu süreçte en büyük motivasyon kaynağım oldu. Hepinize yürekten tekrar teşekkür ederim.

Şubat, 2025

ESRA ŞIK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii
KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ xi
TABLO LİSTESİ xii
ÖZET xiii
ABSTRACT xv
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Araştırmanın Amacı 3
1.3 Hipotez 4
2 GENEL BİLGİLER 5
2.1 Buğday Kepeği 5
2.2 Buğday kepeğinin ekmeklerde teknolojik ve besinsel kalite üzerine etkileri 7
2.3 Kepek Modifikasyonu 11
2.3.1 Fiziksel Metotlar 12
2.3.2 Kimyasal Metotlar 14
2.3.3 Biyolojik Metotlar 16
2.4 Mikrobiyal Biyoproses 19
2.5 Ultrases teknolojisi 23
3 MATERYAL VE YÖNTEM 26
3.1 Materyaller 26
3.2 Yöntemler 27
3.2.1 Buğday Tanelerine Uygulanan Analizler 28
3.2.2 Buğdayların Öğütülmesi 28
3.2.3 Modifikasyon İşlemi 29
3.2.4 Buğday Kepeklerine Uygulanan Analizler 33
3.2.5 Ekmek Üretim Prosedürü 39

3.2.6 Ekmeklere Uygulanan Analizler 41
3.2.7 İstatistiksel Analiz 42
4 ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 43
4.1 Buğday Kepeğinin Seçimine Yönelik Araştırma Sonuçları 43
4.1.1 Buğday Örneklerinin Kalite Analizleri 43
4.1.2 Buğday Kepeklerinin Kimyasal Kompozisyonu 47
4.1.3 Buğday Kepeklerinin Fonksiyonel Özellikleri 50
4.1.4 Buğday Kepeklerinin Toplam Fenolik İçeriği ve Antioksidan Aktivitesi 52
4.1.5 Buğday Kepekleri ile Hazırlanan Un Karışımlarının Farinograf Sonuçları 54
4.1.6 Buğday Kepeklerinin Ekmek Özelliklerine Etkisi 58
4.2 Ultrasonik Modifikasyon Koşullarının Optimizasyonu ve Doğrulama Analizi 66
4.2.1 Ultrasonik İşlem Parametrelerinin Yanıtlar Üzerine Etkileri 69
4.2.2 Optimizasyon 75
4.3 Mikrobiyal Biyoproses ile Modifikasyonun Değerlendirilmesi 78
4.4 Modifikasyon İşlemlerinin Buğday Kepeği Üzerine Etkileri 80
4.4.1 Diyet Lifi İçeriği 80
4.4.2 Fitik Asit İçeriği 85
4.4.3 Teknofonksiyonel Özellikler 87
4.4.4 Toplam Fenolik İçerik ve Antioksidan Aktivite 92
4.5 Modifikasyon Yöntemlerinin Ekmek Özelliklerine Etkileri..... 99
4.5.1 Ekmeklerin Kalite Özellikleri 99
4.5.2 Ekmeklerin Diyet Lifi ve Fitik Asit İçeriği 109
4.5.3 Ekmeklerin Toplam Fenolik Madde İçeriği ve Antioksidan Aktivitesi ……111
5 SONUÇ 114
KAYNAKÇA 118
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 137

SİMGE LİSTESİ

%	Yüzde
L∗	Renk parlaklığı değeri
a∗	Kırmızı-yeşil renk yönü
b∗	Mavi-sarı renk yönü
ΔE	Toplam renk değişimi
L_{ref}	Referans numunenin L değeri
a_{ref}	Referans numunenin *a*∗ değeri
b_{ref}	Referans numunenin b∗ değeri
°C	Santigrat derece

KISALTMA LİSTESİ

µg	Mikrogram
µl	Mikrolitre
µm	Mikrometre
a/h	Ağırlık/hacim
AA	Antioksidan aktivite
AAS	Antioksidan aktivite salınımı
BDA	Bin dane ağırlığı
BF	Bağlı fenolik madde miktarı
cm	Santimetre
DPPH	2,2-diphenyl-1-pcyrylhydrazyl
FBS	Fenolik bileşiklerin salınımı
FU	Farinograf birimi
g	Gram
g^{-1}	1/gram
GAE	Gallik asit eşdeğeri
G-STK	Güçlü su tutma kapasitesi
h/h	Hacim/hacim
HA	Hektolitre ağırlığı
HM	Hibrit modifikasyon
HM-E	HM kodlu kepekle üretilen ekmek
IDF	Çözünmez diyet lifi
kg	Kilogram
kHz	Kilohertz
kob	koloni oluşturan birim
LAB	Laktik asit bakterileri
log	Logaritma
m	Metre
MB	Mikrobiyal biyoproses

MB29	*Lacp. plantarum* LABE 29 ve *S. cerevisiae* TGM 55 *kombinasyonu*
MB29-E	MB29 kodlu kepek ile üretilen ekmek
MB32	*Levl. brevis* LABE 32 ve *S. cerevisiae* TGM 55 *kombinasyonu*
MB32-E	MB32 kodlu kepek ile üretilen ekmek
mg	Miligram
ml	Mililitre
N	Newton
nm	nanometre
p	significance; anlamlılık değeri
R-E	%100 rafine un kullanılarak üretilen, kepek içermeyen referans ekmek
RH	Bağıl nem
RK	Rumeli çeşit buğdaydan elde edilen kepek
RK-E	Rumeli çeşit kepek ile üretilen ekmek
rpm	Dakikada Gerçekleşen Dönüş (Devir) Sayısı
s	Saniye
s^{-1}	1/saniye
SDF	Çözünür diyet lifi
SF	Serbest fenolik madde miktarı
SV	Süspansiyon viskozitesi
TDF	Toplam diyet lifi
TE	Trolox eşdeğeri
TF	Toplam fenolik madde miktarı
TK	Tekirdağ çeşit buğdaydan elde edilen kepek
TKC-E	İşlem görmemiş Tekirdağ çeşit kepek ile üretilen ve modifiye edilmiş kepekler ile üretilen ekmeklerin referansı olan kontrol ekmeği
TPA	Tekstür profili analizi
T-STK	Toplam su tutma kapasitesi
UM	Ultrasonik modifikasyon
UM-E	UM kodlu kepekle üretilen ekmek
W	Watt
YYM	Yanıt yüzey metodu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların özet gösterimi…...…..28

Şekil 3.2 İşlem görmüş buğday kepeklerinin kurutma öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri……...29

Şekil 3.3 Kepek numunelerinin süspansiyon viskozitesinin ölçümü……..35

Şekil 3.4 Serbest ve bağlı fenolik madde miktarı tespiti için gallik asit cinsinden standart kalibrasyon eğrisi……..39

Şekil 4.1 Buğday kepeği süspansiyonlarının tipik viskozite grafikleri…….52

Şekil 4.2 Ekmek üretiminde kullanılan baz un (a), ağırlıkça %15 Tekirdağ çeşidi kepek karışımlı un (b) ve %15 Rumeli çeşidi kepek karışımlı unun (c) farinogramları…….57

Şekil 4.3 Ekmek örneklerinin görüntüleri ve spesifik hacimleri(mL/g)…….59

Şekil 4.4 Depolama süresi boyunca ekmeklerin TPA parametrelerinin değişimi ……..……...…….....60

Şekil 4.5 Süspansiyonların tipik viskozite grafikleri……..68

Şekil 4.6 Yanıtlar ve bağımsız değişkenler arasındaki etkileşimleri gösteren kontur grafikleri……..…76

Şekil 4.7 İşlenmemiş ve modifiye edilmiş kepeklere ait süspansiyonların 10-100 s^{-1} kesme hızı aralığındaki viskozite değişimi grafiği……92

Şekil 4.8 Modifikasyon tekniklerinin buğday kepeklerinin toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite özelliklerine etkisi……...……..95

Şekil 4.9 Ekmeklere ait görseller ve spesifik hacim değerleri……..102

Şekil 4.10 Modifikasyon uygulamalarının ekmeklerin toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite özellikleri üzerine etkisi…….112

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Ultrasonik modifikasyon (UM) sürecinde incelenen deneysel parametreler ve gözlemlenen yanıt değerleri 31

Tablo 4.1 Edirne'de 2019, 2020 ve 2021 yıllarında aynı deneme ve iklim koşulları altında iki farklı lokasyondan alınan buğday örneklerinin kalite sonuçları 44

Tablo 4.2 Tekirdağ ve Rumeli buğday kepeklerine ait kimyasal analiz sonuçları 48

Tablo 4.3 Buğday kepeklerinin fonksiyonel özellikleri 50

Tablo 4.4 Buğday kepeklerinin fenolik içerik ve antioksidan özellikleri 53

Tablo 4.5 Baz un ve kepek karışımlı unların Farinograf özellikleri 55

Tablo 4.6 Ekmeklerin depolama süresi boyunca elde edilen TPA sonuçları 60

Tablo 4.7 Ekmek örneklerinin renk analizi sonuçları 62

Tablo 4.8 Ekmek örneklerinin diyet lifi analizi sonuçları 64

Tablo 4.9 Ekmek örneklerinin toplam fenolik içerik ve antioksidan aktivite analizi sonuçları 65

Tablo 4.10 %60 genlikte 10 dakika süreyle ultrases uygulanan süspansiyonların viskozite sonuçları 68

Tablo 4.11 Ultrasonik Modifikasyon (UM) işlemi için Tam Faktöriyel Tasarımın ANOVA analizi sonuçları 71

Tablo 4.12 Parametrelerin optimizasyonu ve deneysel tasarımın doğrulanması . 77

Tablo 4.13 Mikrobiyal biyoproses sırasında buğday kepeği süspansiyonlarında mikroorganizma gelişimi 79

Tablo 4.14 Modifikasyon tekniklerinin buğday kepeklerinin bazı besinsel özellikleri üzerine etkisi 81

Tablo 4.15 Modifikasyon tekniklerinin buğday kepeklerinin bazı fonksiyonel özellikleri üzerine etkisi 88

Tablo 4.16 Modifikasyon tekniklerinin buğday kepeklerinin toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite özelliklerine etkisi 95

Tablo 4.17 Modifikasyon uygulamalarının ekmeklerin tekstürel özellikleri üzerine etkisi 103

Tablo 4.18 Modifikasyon uygulamalarının ekmeklerin renk özellikleri üzerine etkisi 107

Tablo 4.19 Modifikasyon uygulamalarının ekmeklerin diyet lifi ve fitik asit içeriği üzerine etkisi 110

Tablo 4.20 Modifikasyon uygulamalarının ekmeklerin toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite özellikleri üzerine etkisi 112

ÖZET

Buğday Kepeğinin Ultrases ve Mikrobiyal Proses ile Modifikasyonu, Modifiye Kepeklerin Besinsel, Teknolojik ve Ekmeklik Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi

Esra ŞIK

Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Gıda Mühendisliği Programı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Görkem ÖZÜLKÜ

Bu çalışmada, buğday kepeği ultrases ve mikrobiyal proses ile modifiye edilerek besinsel, fonksiyonel ve biyoaktif özellikleri geliştirilmeye çalışılmış ve ekmek yapımında kullanım potansiyelinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, Türkiye'nin Trakya bölgesinde yetiştirilen 2 farklı buğday çeşidinin (Tekirdağ ve Rumeli) kepekleri kimyasal, fonksiyonel, biyoaktif özellikleri ve ekmek kalitesine etkileri açısından karşılaştırılmıştır. Rumeli buğday kepeği (RK) daha yüksek oranda çözünmez diyet lifi (IDF) içermektedir (%45,89±0,05). Tekirdağ buğday kepeği (TK), RK'ye göre daha düşük toplam su tutma kapasitesi (T-STK) göstermiş (3,82±0,08 mL/g) ve TK kullanıldığı durumda daha yüksek spesifik hacme (2,65 ± 0,02 mL/g) sahip ekmekler üretmiştir ($p<0,05$). RK ve TK ile üretilen ekmekler toplam fenolik (TF) içeriği ve antioksidan özellikler bakımından benzer olsa da ($p>0,05$), kepek çeşitleri kendi aralarında TF ve antioksidan aktivite bakımından önemli farklılıklar göstermiştir ($p<0,05$). Toplam fenolik içerik ve antioksidan aktivitesinin daha düşük olması ile daha yüksek fitik asit içeriğine sahip olması ($p<0,05$) nedeniyle çalışmanın bir sonraki aşaması olan modifikasyon kısmına TK ile devam edilmiştir.

Çalışmanın 2. aşamasında, mikrobiyal biyoproses (MB), ultrasonik modifikasyon (UM) ve bunların birlikte uygulandığı hibrit modifikasyon (HM) ile buğday

kepeğinin fonksiyonel ve besinsel olarak iyileştirilmesi hedeflenmiş ve ekmek kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. MB, *Levilactobacillus brevis* ve *Lactiplantibacillus plantarum* ile *Saccharomyces cerevisiae* kullanılarak gerçekleştirilmiştir. MB32 (*Levl. brevis* ve *S. cerevisiae* kültür kombinasyonu), işlem görmemiş kepek (kontrol) ile karşılaştırıldığında çözünür diyet lifini (SDF) önemli ölçüde arttırmış ($p<0,05$) ve fitik asit içeriğini %25,7 oranında azaltmıştır. UM uygulaması fitik asidi %52,2 oranında azaltmış ve fenolik bileşik salınımını arttırarak antioksidan aktivitenin (DPPH) gelişmesine katkıda bulunmuştur. HM uygulaması ise her iki yöntemin avantajlarını birleştirerek fitik asidi %95 oranında azaltmış ve bağlı antioksidan aktivitede (bağlı-AA) 2,4 kat artış sağlamıştır. Ayrıca, HM uygulaması TF ve antioksidan aktivite açısından en güçlü etkiyi göstermiştir.

Modifiye edilmiş kepeklerin ekmek yapımında kullanımı, spesifik hacim, tekstürel özellikler ve besinsel bileşim açısından önemli iyileşmeler sağlamıştır. Örneğin, HM uygulamasıyla üretilen ekmek, kontrolden yaklaşık %10 daha yüksek spesifik hacim sunmuş (2,92±0,02 mL/g) ve en parlak kabuk rengini ($L*$ değeri = 68,08±1,20) göstermiştir ($p<0,05$). UM ve HM ile işlem görmüş kepekler, ekmekte TDF içeriğini artırmış ($p<0,05$) ve en yüksek TDF içeriği HM ile işlem görmüş kepekli ekmeklerde (%12,17±0,07) elde edilmiştir. MB32 ve UM teknikleriyle modifiye edilen buğday kepeği, fitik asit azalmasında etkili olmuştur ve ilgili kepeklerle üretilen ekmeklerin fitik asit içeriğinde de anlamlı bir azalma sağlamıştır ($p<0,05$). MB29 (*Lacp. plantarum* ve *S. cerevisiae* kültür kombinasyonu), MB32 ve HM uygulamaları, ekmeklerin TF kontrol ekmeğine kıyasla (4,01±0,11 mg GAE/g) sırasıyla 4,52±0,09; 4,79±0,01 ve 4,53±0,03 mg GAE/g seviyelerine yükseltmiş, böylece üretilen ekmeklerin besinsel kalitesinde belirgin bir iyileşme sağlamıştır. Bu sonuçlar, MB ve UM tekniklerinin kombinasyonundan oluşan hibrit modifikasyonun (HM), buğday kepeğinin çözünür diyet lifi içeriğini artırma, fitik asit seviyelerini düşürme ve antioksidan aktiviteyi (DPPH) yükseltme konularında etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Bu iyileşmeler, HM uygulanmış buğday kepeğinden üretilen ekmekte de tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Buğday kepeği modifikasyonu, optimizasyon, ekmek özellikleri, besinsel özellikler

ABSTRACT

Modification of Wheat Bran Using Ultrasound and Microbial Process: Determination of Nutritional, Technological and Bread Quality Characteristics of Modified Brans

Esra SIK

Department of Food Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Gorkem OZULKU

In this study, wheat bran was modified using ultrasonic and microbial processes to enhance its nutritional, functional, and bioactive properties, with the aim of improving its potential for bread-making applications. In the first stage of the study, the bran of two different wheat varieties (Tekirdağ and Rumeli) grown in the Thrace region of Turkiye were compared in terms of their chemical, functional, and bioactive properties, as well as their effects on bread quality. Rumeli wheat bran (RK) contained a higher proportion of insoluble dietary fiber (IDF) (45.89±0.05%). Tekirdağ wheat bran (TK) exhibited a lower total water retention capacity (T-STK) (3.82±0.08 mL/g) compared to RK and produced bread with a higher specific volume (2.65±0.02 mL/g) ($p<0.05$). Although breads made with RK and TK had similar total phenolic (TF) content and antioxidant properties ($p>0.05$), significant differences were observed between the bran types in terms of TF and antioxidant activity ($p<0.05$). Based on these findings, TK was identified as a promising candidate for modification due to its lower TK and antioxidant activity and higher phytic acid content. Despite offering superior technological bread-making properties, TK was selected for further investigation in the next phase of the study due to its relatively lower nutritional properties.

In the second stage of the study, microbial bioprocessing (MB), ultrasonic modification (UM), and hybrid modification (HM) (a combination of both techniques) were applied to enhance the functional and nutritional properties of wheat bran and to evaluate their effects on bread quality. MB was performed using *Levilactobacillus brevis*, *Lactiplantibacillus plantarum*, and *Saccharomyces cerevisiae*. MB32 (a culture combination of *Levl. brevis* and *S. cerevisiae*) significantly increased soluble dietary fiber (SDF) compared to untreated bran (control) ($p<0.05$) and reduced phytic acid content by up to 25.7%. UM reduced phytic acid by 52.2% and enhanced antioxidant activity (DPPH) by increasing the release of phenolic compounds. HM combined the advantages of both techniques, reducing phytic acid by 95% and increasing bound antioxidant activity (bound-AA) by 2.4 times. Additionally, HM had the most substantial impact on TP and antioxidant activity.

The incorporation of modified brans into bread formulations resulted in significant improvements in specific volume, textural properties, and nutritional composition. For instance, bread produced using HM-treated bran exhibited a 10% higher specific volume (2.92±0.02 mL/g) than the control and showed the brightest crust color ($L*$ value = 68.08±1.20) ($p<0.05$). Brans treated with UM and HM increased the total dietary fiber (TDF) content in bread ($p<0.05$), with HM-treated bran yielding the highest TDF content (12.17±0.07%). MB32 and UM treatments effectively reduced phytic acid levels, resulting in a significant reduction in the phytic acid content of breads made with these brans ($p<0.05$). MB29 (*Lacp. plantarum* and *S. cerevisiae* culture combination), MB32, and HM treatments increased the TF content of bread compared to the control bread (4.01±0.11 mg GAE/g), reaching 4.52±0.09, 4.79±0.01, and 4.53±0.03 mg GAE/g, respectively, thereby enhancing the nutritional quality of the bread. These findings suggest that hybrid modification (HM), which combines MB and UM techniques, is an effective approach for increasing soluble dietary fiber content, reducing phytic acid levels, and enhancing antioxidant activity (DPPH) in wheat bran. These improvements were also observed in bread produced with HM-treated wheat bran.

Keywords: Wheat bran modification, optimization, bread characteristics, nutritional properties

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Un öğütmenin bir yan ürünü olan buğday kepeği, buğday tanelerinden (*Triticum aestivum L.*) elde edilen ve besinsel açıdan zengin bir bileşendir. Buğday dünya çapında tüketilen temel bir ürün olsa da, tahılın %13-22'sini oluşturan kepek, insanlar için bir gıda kaynağı olarak uzun süre göz ardı edilmiş, tarihsel olarak bakıldığında büyük bir bölümü hayvan yemi olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte, yüksek besin yoğunluğu, fonksiyonel özellikleri ve biyoaktif bileşikleri, fonksiyonel gıda geliştirmede değerli bir bileşen olarak tanınmasını sağlamıştır [1]. Sahip olduğu büyük potansiyele rağmen buğday kepeğinin, son ürünlerde hem teknolojik açıdan fonksiyonelliği hem de duyusal nitelikleri etkileyen karmaşık yapısal ve kimyasal bileşimi nedeniyle gıda sistemlerinde kullanımında önemli zorluklarla karşılaşılmaktadır. Böylece, kullanılabilirliğini artırmak ve sağlık açısından faydalarını en üst düzeye çıkarmak için yenilikçi stratejiler gerekmektedir [2].

Buğday kepeğinin besinsel profili oldukça etkileyicidir. Özellikle diyet lifleri, biyoaktif bileşikler, vitaminler ve mineraller açısından zengindir. Bu bileşenler, bağırsak sağlığının iyileştirilmesi, kardiyovasküler hastalık riskinin azaltılması, daha iyi glisemik kontrol ve potansiyel antikanser özellikleri dahil olmak üzere çok sayıda sağlık yararına katkıda bulunur [3]. Kepeğin kuru ağırlığının yaklaşık %50'sini oluşturan diyet lifleri, hem arabinoksilanlar ve lignin gibi çözünmeyen fraksiyonlardan hem de β-glukanlar gibi çözünür fraksiyonlardan oluşur [4]. Bu lifler, faydalı bağırsak mikrobiyotasının büyümesini teşvik ederek ve kısa zincirli yağ asitleri üreterek bağırsak sağlığını geliştirir [5]. Ayrıca buğday kepeği, güçlü antioksidan ve anti-inflamatuar özellikler kazandıran fenolik asitler, alkilresorsinoller ve lignanlar içerir [6]. Bununla birlikte, düşük hamur kalitesi, pürüzlü doku ve tüketici tarafından kabul edilebilirliğin azalması gibi zorluklar

nedeniyle besinsel faydaları gıda sistemlerinde genellikle yeterince kullanılmamaktadır [7].

Buğday kepeği, unlu mamullerin, özellikle de ekmeğin teknolojik ve besinsel kalitesini önemli ölçüde etkiler. Gluten proteinleri ile etkileşimi gluten ağını bozarak hamurun elastikiyetini ve uzayabilirliğini bozar [8]. Ayrıca buğday kepeğindeki çözünmeyen diyet lifleri hamur içinde fiziksel bariyer görevi görerek yapısal bütünlüğünü daha da zayıflatır [9]. Sonuç olarak, buğday kepeğinin ekmek formülasyonlarına dahil edilmesi genellikle spesifik hacmin azalmasına, daha yoğun ve sıkı bir ekmek içi yapısına ve tekstürel zorluklara yol açmaktadır [10]. Bu sorunlar, buğday kepeğinin fırıncılık uygulamalarındaki fonksiyonelliğini optimize etmek için hedefe yönelik müdahalelere duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır.

Bu sınırlamaları ele almak ve buğday kepeğinin teknolojik ve besinsel özelliklerini geliştirmek için çeşitli modifikasyon teknikleri araştırılmıştır. Bu yöntemler genel olarak fiziksel, kimyasal ve biyolojik yaklaşımlar olarak kategorize edilebilir. Öğütme, mikronizasyon ve ekstrüzyon yoluyla partikül boyutunun azaltılması gibi fiziksel yöntemler, istenmeyen çözünmeyen fraksiyonları azaltırken yüzey alanını ve çözünürlüğü artırarak kepeğin fonksiyonel özelliklerini geliştirir [11]. Kimyasal modifikasyon yöntemleri, buğday kepeği bileşenlerinin, özellikle de diyet liflerinin yapısal ve fonksiyonel özelliklerini değiştirmeyi amaçlamaktadır. Asit ve alkali işlemleri veya karboksimetilasyon gibi teknikler, hidrasyon özelliklerini iyileştirmek ve çözünürlüğü artırmak için çözünmeyen diyet liflerini hedef alır [12].

Enzimatik işlemler ve mikrobiyal fermentasyon dahil olmak üzere biyolojik yöntemler, buğday kepeği modifikasyonu için en umut verici stratejilerden bazılarıdır [13]. Laktik asit bakterileri ve/veya *Saccharomyces cerevisiae* gibi maya türü mikroorganizmaların kullanıldığı mikrobiyal fermentasyon, biyoaktif bileşikleri serbest bırakarak, fitik asit gibi antinutrisyonel faktörleri azaltarak ve sindirilebilirliği artırarak buğday kepeğinin besin profilini geliştirir [14]. Fermente buğday kepeği ayrıca gelişmiş antioksidan aktivite ve prebiyotik potansiyel sergileyerek fonksiyonel gıda uygulamaları için cazip bir bileşen haline gelir [15].

Çevre dostu olması ile tanınan ultrases teknolojisi, gıdaların fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirmek için yüksek frekanslı ses dalgaları kullanır.

Buğday kepeğinde, ultrases işleminin biyoaktif bileşiklerin ekstraksiyonunu artırdığı, antioksidan aktiviteyi iyileştirdiği ve su absorpsiyonu ile viskozite gibi fonksiyonel özellikleri geliştirdiği gösterilmiştir [16].

Buğday kepeğinin insan sağlığını olumlu yönde etkileme potansiyelinin fark edilmesinden bu yana, ekmek gibi yaygın olarak tüketilen gıdalara dahil edilmesini geliştirmek için önemli çabalar sarf edilmiştir. İlerlemeye rağmen, kepeğin hamur reolojisi ve nihai ürün kalitesi üzerindeki olumsuz etkilerinin arkasındaki mekanizmalar tam olarak anlaşılamamıştır. Konuya ilişkin genel kanı, ilgili alanda daha fazla araştırma yapılması gerektiği yönündedir. Bu tezde, buğday kepeğinin ekmek özellikleri üzerindeki olumsuz etkilerini azaltırken besin profilini iyileştirmek için yenilikçi yaklaşımlar uygulanmıştır.

1.2 Araştırmanın Amacı

Bu çalışmada, mikrobiyal biyoproses ve ultrases teknolojisinin bireysel ve kombine uygulamalarıyla buğday kepeğinin besinsel, fonksiyonel ve biyoaktif özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Özellikle bu modifikasyon tekniklerinin, buğday kepeğinin ekmek gibi ürünlere dahil edilmesindeki teknolojik zorlukların aşılmasında sağlayabileceği katkılar incelenmiştir. Çalışma hem kepek hem de kepekten üretilen ekmekler üzerinde gerçekleştirilmiş; modifiye edilmiş kepeğin gıda endüstrisinde uygulanabilirliği ve ekmek gibi nihai ürünlerdeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Ayrıca bu çalışma; mikrobiyal biyoproses, ultrases teknolojisi ve bu iki yöntemin hibrit uygulamasının buğday kepeğinin kimyasal ve yapısal özelliklerine etkilerini ortaya koyarak, modifiye edilmiş kepek kullanımının ekmeklerin besinsel kalitesini nasıl etkileyebileceğine dair literatüre katkı sağlamayı da hedeflemektedir. Bu hedefler doğrultusunda modifikasyon uygulamalarının diyet lifi içeriği, fenolik madde salınımı, fitik asit azalması ve antioksidan aktivite gibi parametreler üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

1.3 Hipotez

Bu çalışmada, şu hipotezler test edilmiştir:

- **Mikrobiyal Biyoproses (MB)**: Mikrobiyal biyoproses sırasında *Levilactobacillus brevis* LABE 32 ve *Lactiplantibacillus plantarum* LABE 29 laktik asit bakteri türlerinin *S. cerevisiae* TGM 55 ile kombinasyonunun buğday kepeği üzerinde belirgin kompozisyonel değişikliklere neden olacağı varsayılmaktadır. Bu süreçte, mikrobiyal gelişme ve asitleşme seviyelerinin buğday kepeğinin hücre yapısını etkileyerek fitik asit içeriğini azaltacağı, çözünür diyet lif oranını artıracağı ve fenolik bileşiklerin daha kolay salınmasını sağlayacağı öngörülmektedir. Bu değişimlerin kepekli ekmeklerin antioksidan aktivitesine ve besinsel kalitesine olumlu katkı yapması beklenmektedir.
- **Ultrasonik Modifikasyon (UM):** Ultrases teknolojisinin genlik ve süre parametrelerinin optimize edilmesi yoluyla, buğday kepeğinin fenolik bileşik salınımının artırılacağı ve fitik asit seviyelerinin azaltılacağı öngörülmektedir. Bu sürecin, fenolik bileşiklerin daha yüksek oranda serbest bırakılmasını teşvik ederek kepeğin biyoaktif özelliklerini geliştireceği ve bu değişimlerin kepekli ekmeklerin besinsel kalitesini olumlu yönde etkileyeceği varsayılmaktadır.
- **Hibrit Modifikasyon (HM):** Ultrases teknolojisinin ve mikrobiyal biyoprosesin hibrit uygulamasının sinerjik bir etki yaratarak, buğday kepeğinin teknolojik ve besinsel özelliklerini daha kapsamlı bir şekilde geliştireceği hipotez edilmektedir. Bu yöntemin, fitik asidin daha etkili bir şekilde parçalanmasına, çözünür diyet lif içeriğinin daha fazla artmasına ve fenolik bileşiklerin serbest bırakılmasında daha yüksek bir etkinlik sağlamasına neden olacağı varsayılmaktadır. Hibrit modifikasyonun bu etkilerinin, kepekli ekmeklerin spesifik hacim, tekstür ve besinsel kalite parametreleri üzerinde belirgin iyileştirmelerle sonuçlanması beklenmektedir.

Bu hipotezler, buğday kepeği ve bu kepeklerin ilavesi ile üretilen ekmeklerin kalite özelliklerinin geliştirilmesine yönelik yöntemlerin daha iyi anlaşılmasını sağlayarak gıda endüstrisine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

2
GENEL BİLGİLER

2.1 Buğday Kepeği

Buğday (*Triticum aestivum L.*), yaygın olarak yetiştirilen bir gıda mahsulüdür ve birçok ülkede temel gıda olarak önemli bir rol oynar. Buğday tanesi kabaca üç temel kısma ayrılabilir: endosperm, embriyo ve perikarp [1]. Buğday tanesinin en dış katmanını oluşturan buğday kepeği, rafine un üretimi sırasında öğütme işleminin bir yan ürünü olarak ortaya çıkar. Buğday tanesinin %13-22'sini oluşturur ve perikarp, testa, alöron ve hiyalin tabakaları dahil olmak üzere birden fazla tabakayı kapsar [17, 18]. Ancak unun elde edilmesinde çıktı oranı öğütme yöntemine, buğday çeşidine ve yetiştirme koşullarına bağlı olarak değiştiğinden; buğday kepeği, buğday tohumu ve endosperm parçaları gibi diğer bileşikleri içeren yan ürünler öğütme çıktısının yaklaşık %23-27'sini oluşturmakta ve tamamına yakını buğday kepeğinden meydana gelmektedir [19]. Tarihsel olarak hayvan yemi olarak kullanılan buğday kepeği, besin yoğunluğu, işlevsel özellikleri ve biyoaktif bileşikleri nedeniyle gıda endüstrisinde tanınırlık kazanmış ve onu insan beslenmesi ve fonksiyonel gıda geliştirme için önemli bir kaynak haline getirmiştir [19, 20]. Diyet lifi, biyoaktif bileşikler ve besinler açısından zengin olan kepek insan sağlığı için önemli bir bileşendir ve son yıllarda tahıl kepeğine olan ilgi artmıştır. Ancak buğday kepeğinin gıda sistemlerinde kullanımında bir takım teknolojik zorluklar bulunduğu ve duyusal sorunlar ortaya çıktığı için yenilikçi çözümler gerekmektedir [2, 7, 21].

Buğday kepeğinin histolojik katmanları (perikarp, testa, hiyalin ve aleuron katmanı) selüloz, lignin ve hemiselülozun belirgin dağılımlarıyla kepeğin karmaşık kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip olmasına neden olur [17, 22]. Örneğin perikarp esas olarak selüloz ve ligninden oluşan en dış katman olup ve yapısal sertlik sağlarken, testa ve hiyalin katmanları alkilresorsinoller (resorsinolik lipidler) ve fenolik asitler açısından zengindir ve buğday kepeğinin antioksidan özelliklerine katkıda bulunur [20, 23]. Aleuron tabakası ise tek hücreli bir katmandır ve yüksek konsantrasyonda diyet lifi, proteinler, mineraller ve ferulik asit gibi biyoaktif bileşikleri içerdiğinden dolayı besinsel olarak en değerli olanıdır [3, 24].

Buğday kepeğinin kuru ağırlığının yaklaşık %50 kadarını diyet lifleri oluşturmaktadır. Lif içeriği hem çözünmeyen (örneğin arabinoksilanlar ve lignin) hem de çözünür liflerden (örneğin β-glukanlar) oluşmaktadır [23]. Arabinoksilanlar buğday kepeğinin %20-25'ini oluşturmakta ve fonksiyonel özelliklerinde önemli rol oynamaktadırlar [4]. Baskın hemiselüloz olan arabinoksilanlar ayrıca su bağlama özellikleri ve bağırsak mikrobiyotasını düzenleme yetenekleriyle bilinmektedirler [5]. Bir yandan da bağırsak mikrobiyotasını olumlu yönde etkileyerek kısa zincirli yağ asitleri üretimini teşvik eder ve bağırsak sağlığını desteklerler [25]. Yapısal destek sağlayan karmaşık bir polimer olan lignin ise, buğday kepeğinin antioksidan kapasitesine de katkıda bulunmaktadır [23]. β-Glukanlar görece daha az miktarda (%2,2-2,7) mevcut olmalarına rağmen [26] klinik çalışmalarla kanıtlanmış kan total ve LDL-kolesterolünü azaltması ve insülin duyarlılığını artırması nedeniyle değerlidir [3].

Buğday kepeği diyet liflerine ek olarak sağlık geliştirici özelliklerine katkıda bulunan çok sayıda biyoaktif bileşik de içermektedir. Bu bileşenlerden en önemlileri fenolik asitler, fitokimyasallar, vitaminler ve minerallerdir [20]. Buğday kepeğinde en bol bulunan fenolik asit olan ferulik asitler arabinoksilanlara esterifikasyonla bağlıdır ve buğday kepeğinin antioksidan potansiyelini kuvvetli bir şekilde artırmaktadır [6]. Alkilresorsinoller ve lignanlar gibi bileşikler ise buğday kepeğinde yaygın bulunan fitokimyasallar olup, anti-inflamatuar ve anti-kanserojen özellikler gösterdiği belirtilmiştir [3, 17]. Aleuron tabakası önemli miktarda B vitaminleri, E vitamini gibi vitaminler ile magnezyum ve çinko gibi temel minerallerin de zengin bir kaynağıdır [27].

Yukarıda özetlenen besinsel bileşimi nedeniyle, buğday kepeğinin tüketimi çok sayıda sağlık faydası ile ilişkilendirilmektedir. Buğday kepeğindeki çözünmeyen lifler dışkı hacmini artırarak geçiş süresini iyileştirmekte, kabızlığı hafifletmekte ve kolorektal kanser riskini azaltmaktadır [6, 28]. Bunun yanında buğday kepeğinin düzenli tüketiminin, lipid profillerini ve glisemik kontrolü iyileştirme yeteneği sayesinde kardiyovasküler hastalıklar, tip 2 diyabet ve bazı kanser risklerini azalttığı bildirilmiştir [19, 29]. Ayrıca bağırsak mikrobiyotasını da modüle etmekte, yararlı bakterilerin büyümesini teşvik eden ve kısa zincirli yağ asidi üretimini artıran bir prebiyotik görevi görmektedir [3, 30]. Tokluk hissini

artırarak kalori kontrolüne ve kilo yönetimine katkıda bulunması da önemli sağlık faydaları arasında yer almaktadır [1, 28].

Buğday kepeğinin özetlenen besinsel bileşimine ek olarak, aleuron tabakası için moleküler bir marker olan fitik asit de içermektedir. Fitik asit mikro besinleri (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Fe^{2+}, Zn^{2+}, amino asitler vb.) şelatladığı için antinutrient olarak kabul edilen fosforun depo formudur. Buğday kepeğinde 50 ila 62 mg/g (kuru ağırlık temelinde) civarındadır [31]. Fitik asit ekmeğin tekstürel özelliklerini etkiler, bu nedenle azaltılması kepek ile yapılan ekmek gibi fırıncılık ürünlerinin besinsel ve tekstürel profilini iyileştirebilir [32].

Buğday kepeği, diyet lifi içeriğini artırmak için fırın ürünlerinde, kahvaltılık gevreklerde ve atıştırmalıklarda giderek daha fazla kullanılmaktadır [17, 23]. Ancak bahsedilen tüm faydalarına rağmen, buğday kepeğinin gıda ürünlerine dahil edilmesinde kaba tekstürel özellikler, duyusal kalitede düşüş ve azalan hamur kalitesi gibi zorluklar ortaya çıkmaktadır. Bu sorunların üstesinden gelmek için de çeşitli yenilikçi buğday kepeği işleme yöntemleri araştırılmaktadır [33].

Sonuç olarak buğday kepeği, insan beslenmesinde muazzam bir potansiyele sahip besin açısından yoğun bir yan üründür. Yüksek diyet lifi içeriği ve biyoaktif bileşikleri onu sağlığı desteklemek ve kronik hastalıkları önlemek için işlevsel bir bileşen haline getirmektedir. Buğday kepeğiyle ilişkili duyusal ve teknolojik zorlukların üstesinden gelmek, gıda sistemlerinde daha geniş bir uygulama alanı için çok önemlidir.

2.2 Buğday kepeğinin ekmeklerde teknolojik ve besinsel kalite üzerine etkileri

Buğday kepeğinin gluten proteinleriyle fiziksel ve kimyasal etkileşimleri gluten ağının bozulmasına neden olan bir takım olayları beraberinde getirmektedir: Kepek partikülleri, hamurun elastikiyetini ve uzayabilirliğini azaltarak ve hamur matrisi içinde fiziksel bariyerler olarak hareket ederek kohezif bir gluten matrisinin oluşumuna fiziksel olarak müdahale eder [8]. Söz konusu bu etkiler buğday kepeğinin yüksek su tutma kapasitesi nedeniyle daha da kötüleşir. Kepek hidrasyon için gluten ve nişasta ile rekabet etmekte, optimum gluten gelişimi için yeterli su bulunmamasına neden olmakta ve bu durum da gluten ağını daha da zayıflatarak

[34, 35] daha kuru ve daha sert hamur oluşumuna neden olmakta ve uzayabilirlik azalmaktadır [10].

Çalışmalar, özellikle buğday kepeğindeki arabinoksilanlar ve lignin başta olmak üzere çözünmeyen besinsel liflerin gluten proteinlerine bağlanarak hamurun yapısal bütünlüğünü tehlikeye atan daha zayıf bağlar oluşturduğunu da ortaya koymaktadır. Bu etkinin fermentasyon sırasında gazı yakalama ve tutma yeteneğinin azalmasına yol açtığı bildirilmiştir [9, 10]. Ayrıca kepek ilavesi hamurun elastikiyetini ve uzayabilirliğini azaltarak viskoelastik davranışını bozmaktadır [36] ve bu durumun da hamurun gaz tutma kapasitesini azaltarak ekmek hacmini düşürdüğü bildirilmiştir. Glutenin kepek tarafından seyreltilmesi, hamurun gaz tutma kapasitesini daha da tehlikeye atarak daha küçük hacimlere ve daha yoğun ekmek içi dokusuna yol açar [37]. Yine Cheng ve ark. [23] kepekteki çözünmeyen liflerin (örneğin arabinoksilanlar) hamurun su için rekabet eden ana bileşenler olduğunu ve bu durumun hamurun daha fazla su absorbe etmesine yol açarken gluten proteininin yeterli hidrasyona ulaşamamasına neden olduğunu ifade etmiştir. Bir başka çalışmada ise kepeğin hamura dahil edilmesiyle su absorpsiyonunun %50 oranında artabildiği belirtilmiştir [2]. Bu tekstürel değişiklikler özellikle kepek yüksek seviyelerde eklendiğinde belirginleşmekte ve ekmek formülasyonlarında kullanımının optimize edilmesinin gerekliliği daha belirgin ortaya çıkmaktadır.

Ekmeğin duyusal özellikleri de buğday kepeği ilavesinden etkilenmektedir. Kepekle zenginleştirilmiş ekmek, kepekte bulunan fenolik bileşikler nedeniyle genellikle daha kaba bir dokuya, daha koyu bir renge ve kendine özgü acı bir tada sahiptir [6]. Bu özellikler sağlık bilincine sahip tüketicilere hitap etse de, özellikle beyaz ekmeğin daha hafif dokusuna ve daha yumuşak lezzetine alışkın bireyler arasında daha geniş kabul görmesinin önünde bir engel olabilir [38]. Kepekle zenginleştirilmiş ekmeğin duyusal kalitesini iyileştirme stratejileri arasında kepeği rafine unla karıştırmak ve acılığı azaltmak için lezzet maskeleyici maddeler kullanmak da yer almaktadır [2].

Teknolojik olarak yarattığı olumsuz etkilere rağmen buğday kepeği eklendiği fırıncılık ürünlerinin besinsel içeriğinde önemli gelişmeler sağlamaktadır. Özellikle temel gıda maddesi olan ve günlük diyette kritik bir yere sahip olan ekmeğe eklenmesi değerli vitamin ve minerallerden zenginleşmesini

sağlamaktadır. Kepek özellikle B-kompleks vitaminleri, magnezyum, çinko ve fosfor açısından zengindir ve bunların hepsi insan sağlığını korumak için gereklidir [36].

Sidhu ve ark. [39] kepek ilave miktarının yüksek lifli tost ekmeğinin kimyasal bileşimi üzerine etkisini araştırdıkları çalışmalarında, yüksek lifli ekmeklerin kimyasal bileşimi, mineraller, protein, yağ ve diyet lifi içerikleri açısından, kontrol ekmek örneğinden çok daha üstün bulduklarını ifade etmişlerdir. Campbell ve ark. [40] hamur formülasyonlarına farklı seviyelerde ve farklı partikül büyüklüğü aralıklarında öğütülmüş buğday kepeği eklenmesinin karıştırma sırasında havalandırma ve hamur gelişimi, mayalama sırasında genleşme ve son pişmiş ürün özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kepek ilavesinin büyük ölçüde artan su emilimi nedeniyle karıştırma sonunda hamurun yoğunluğunun azalmasına neden olduğunu, %7,5'tan %15'e kadar ilave oranlarının pişmiş ürün hacimlerinin daha düşük olmasına neden olduğunu bildirmişlerdir. Mayalama genleşmesi (%7,5 ilave oranı için) ve pişmiş ürün hacmi arasında düşük korelasyon bulunmuş, düşük oranlarda buğday kepeğinin ekmek formülasyonlarındaki etkilerinin görece pişirme esnasında meydana geldiği ifade edilmiştir. Anil [41]; buğday kepeğinin farklı seviyelerinin buğday unu ile karışımından yapılan pidenin (geleneksek Türk yassı ekmeği) reolojik ve duyusal özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada kullanılan kepek oranları %0, 10, 15, 20 şeklinde olup, kepek ilaveli pide örneklerinin tüm ilave seviyelerinde daha düşük L∗ değerlerine ve daha yüksek a∗ ve b∗ değerlerine sahip olduğu ancak duyusal analiz sonuçlarına göre kabul edilebilir kalitede pide ekmekleri üretildiği rapor edilmiştir. Schmiele ve ark. [42]; formülasyona %5, %10, %20, %30 ve %40 oranında buğday kepeği ilavesinin hamur reolojik özellikleri ve tava ekmeği kalite özellikleri üzerindeki etkisini analiz ettikleri çalışmalarında, hamurun su absorpsiyonunu ve uzamaya karşı direnci artırırken, stabiliteyi ve uzayabilirliği azalttığını, daha yüksek ilave miktarının bu olumsuz etkileri daha da artırdığını bulmuşlardır. Ekmek örneklerinin ise nem içeriğini, sıkılığını ve sertliğini arttırdığı ve spesifik hacmi azalttığını belirtmişlerdir. Bir başka çalışmada farklı partikül boyutuna sahip kepek fraksiyonların ekmek özelliklerine etkisi araştırılmıştır [43]. Çalışmaya konu olan tüm kepek miktarları ve fraksiyon büyüklüklerinde; kepeğin çözünür protein ve diyet lifi de dahil olmak üzere çözünür bileşenlerinin hamurdaki

nişasta – gluten – su etkileşimlerini ve dinamiklerini etkilediğini moleküler hareketliliği inceleyerek tespit etmişlerdir. Ayrıca farklı bileşime sahip kepek fraksiyonlarının eklenmesinin daha küçük ve daha sert ekmekler ile sonuçlandığını bildirmişlerdir. Le Bleis ve ark. [44] buğday kepeği ilavesinin ve ilave oranın Fransız ekmeklerinin reolojik özelliklerini ne şekilde etkilediğini ortaya koymak için ekmek formülasyonlarına %20'ye kadar değişen çeşitli miktarlarda kepek ilavesi gerçekleştirmişlerdir. Özellikle %10'un üzerindeki kepek ilave oranlarında gluten ağının eksik oluşumuna bağladıkları hamur stabilitesinde kayıpların meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca kepek partiküllerinin hamur gluten ağı oluşumunda etkili olan gaz kabarcıklarının oluşumu üzerindeki negatif etkisinin, hamur özelliklerini ve dolayısıyla da ekmek reolojik özelliklerini olumsuz etkilediği belirtilmiştir. Ortaya çıkan ekmeklerin daha sert kabuk, daha sıkı bir dokuya neden olduğunu bildirmişlerdir. Boita ve ark. [45] farklı seviyelerde kepek katılmış buğday unlarının fizikokimyasal özelliklerini araştırmışlar ve hamurdaki performansları ile ekmeklerin teknolojik özellikleri üzerine etkilerini değerlendirmişlerdir. Çalışmada un buğday kepeği ile %0; %6,25; %12,5; %18,75 ve %25 oranlarında ikame edilmiştir. Kepeğin gluten ağı ile etkileşimin hamur kalitesi üzerindeki negatif etkinin ana nedeni olduğu, gluten matrisinin inceldiği ve zayıfladığı bildirilmiştir. Ayrıca daha yüksek kepek konsantrasyonlarının (%18,75 ve %25) besinsel olarak özellikle de diyet lifi açısından daha fonksiyonel ekmekler üretmesine rağmen, daha düşük spesifik hacim, nem, su aktivitesi ve daha fazla sertliğe sahip ekmekler ortaya çıkmasına neden olduğu ifade edilmiştir. Ekmek yapım süreci boyunca buğday kepeğinin etkisini analiz etmeye odaklanılan bir çalışmada [46] buğday ununa ağırlıkça %0, %8, %16 ve %24 oranında kepek ilavesi yapılmıştır. Yapışkanlık ve uzayabilirlik gibi hamur özelliklerinin kepek ilave oranındaki artışa bağlı olarak azaldığı bildirilen çalışmada, hamur havalanması ve fermentasyon sırasındaki genleşmede artış olduğu vurgulanmıştır. Ancak bu sonuca rağmen nihai ürünün hacminin en yüksek kepek ilave seviyesinde %10,81 oranında azaldığı rapor edilmiştir. Ayrıca ekmek gözenekliliğin arttığı ancak gözenek dağılımının homojenitesinin azaldığı da elde edilen sonuçlar arasında listelenmiştir. Seo ve ark. [47] ekmeklerin besinsel özelliklerini geliştirmek amacıyla ekmeklik unu mor renkli buğday kepeği ile farklı oranlarda ikame etmişlerdir. Kepek oranı arttıkça su absorpsiyonunun ve hasarlı nişasta katkısının orantılı olarak arttığını, gluten mukavemetinin bozulduğunu

bildirmişlerdir. Genel olarak ekmek örneklerinin toplam fenolik ve antosiyanin içeriği ile antioksidan aktivitelerinin kepek oranı arttıkça orantılı olarak arttığını ancak ekmek yapma performansının düştüğünü vurgulamışlardır.

Sonuç olarak, fırıncılık ürünleri, özellikle de ekmek, birçok toplumda temel bir beslenme unsuru olup, sağlık bilincinin artmasıyla birlikte diyet lifi ve besleyici özellikler açısından zenginleştirilmiş ürünlere olan talep giderek artmaktadır. Bu bağlamda, buğday kepeği ilavesiyle üretilen ekmekler hem fonksiyonel hem de besinsel faydaları nedeniyle önemli bir ilgi odağı haline gelmiştir. Bununla birlikte, yukarıda özetlendiği gibi literatürdeki bulgular buğday kepeği ilavesinin unlu mamullerin duyusal özellikleri üzerinde genellikle olumsuz etkiler yarattığını ortaya koymaktadır. Bu tür ürünlerde, özellikle renk homojenliğinde bozulma, pürüzlü bir doku ve düşük hacim gibi sorunların ortaya çıktığı sıklıkla rapor edilmiştir. Bu sorunların üstesinden gelmek amacıyla, araştırmacılar buğday kepeği içeren fermente unlu mamullerin duyusal kalitesini artırmaya yönelik çeşitli teknolojik çözümler geliştirmeye odaklanmaktadır.

2.3 Kepek Modifikasyonu

Bölüm 2.1'de vurgulanan değerli besleyici profiline rağmen buğday kepeğinin gıda formülasyonlarında kullanımını sınırlayan önemli teknolojik engeller ve Bölüm 2.2'de izah edilen zorluklar göz önüne alındığında, kullanılabilirliğini artırmak için literatürde çeşitli yenilikçi modifikasyon yöntemleri araştırılmıştır. Bu yöntemler özellikle buğday kepeğinin fırıncılık ürünlerindeki gluten ağı oluşumuna zararlı etkileri nedeniyle zayıf gaz tutma becerisini iyileştirmeyi, çözünmeyen diyet lifinin tekstür ve hacim üzerindeki olumsuz etkisini minimize etmeyi ve formülasyonlara dahil edilmesini engelleyen diğer teknolojik kısıtlamaları ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Bu modifikasyonlarla amaç sadece bu sınırlamaları hafifletmek değil, aynı zamanda buğday kepeğinin fonksiyonel potansiyelini ortaya çıkarmak ve vurgulamak, gıda sistemlerinde daha geniş bir uygulama alanı sağlamak ve fonksiyonel ve besinsel olarak zenginleştirilmiş gıda ürünlerinde değerli bir bileşen olarak rolünü teşvik etmektir. Literatürde şu ana kadar buğday kepeğini modifiye etmede kullanılan yöntemler en genel haliyle fiziksel, kimyasal ve biyolojik uygulamalar olarak sınıflandırılmıştır [28].

2.3.1 Fiziksel Metotlar

Bu bölümde buğday kepeğini modifiye etmede kullanılan fiziksel yöntemlerden ilk olarak mekanik işlemler ele alınmıştır. Buğday kepeğinin öğütülmesi ve parçacık boyutunun küçültülmesi yaygın araştırılan fiziksel modifikasyon yöntemlerinden biridir. Kepek parçacık boyutunun küçültülmesi amacıyla öğütme işlemi dışında mikroakışkanlaştırma, mikronizasyon, buhar işlemleri ve ekstrüzyonlar da sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin temel modifiye edici etkilerinden biri de yüzey alanının artmasına katkıda bulunarak besin maddelerinin biyolojik erişilebilirliğini artırmaktır. Daha küçük parçacık boyutu sağlayan bu yöntemlerin literatürde; daha düşük hidrasyon özellikleri sağladığını [48], toplam fenolik içerik ve antioksidan aktiviteyi önemli ölçüde ($p<0,05$) arttırdığını [11, 49], kepeğin olumsuz etkilerinin atfedildiği çözünmez diyet liflerini (IDF) azaltırken çözünür diyet liflerini (SDF) arttırdığını [50], fitik asit miktarını azalttığını [51, 52] ifade eden çalışmalar mevcuttur. Bir çalışmada nemli öğütme işleminin işlem görmemiş kepeğe göre daha yüksek yüzey alanı, daha güçlü su tutma kapasitesi sağladığı ve böylece buğday kepeğinin gluten gelişimi üzerindeki zararlı etkisinin hafifletildiği rapor edilmiştir [53]. Buğday kepeğinin mikronizasyonunun, daha iyi istiflenen kepek partikülleri nedeniyle mikro gözenek kaybına neden olduğu ve dolayısıyla toplam su bağlama kapasitesin düştüğü bildirilmektedir [50].

Termomekanik bir yöntem olan ekstrüzyon buğday kepeğini modifiye etme amacıyla literatürde araştırılan bir diğer fiziksel yöntemdir. Ekstrüzyonun modifiye edici etkileri; antibesinsel faktörleri yok etmesi; nişasta jelatinizasyonu sağlaması, SDF içeriğini artırması, enzim hidrolizi sağlaması ve lipid oksidasyonunu azaltması şeklindedir [54] ve buğday kepeği üzerinde de tek başına ya da farklı tekniklerle kombine halde kullanımı araştırılmıştır [55-57]. Aktas-Akyildiz ve ark. [55] buğday kepeğinin çözünür besinsel lif içeriğini artırmaya yönelik ekstrüzyon işlemini kullanmışlar ve tüm ekstrüzyon koşulları için çözünür lif içeriğinin arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca söz konusu işlem, minerallerin biyoyararlılığını engelleyen anti-besinsel faktör olan fitik asit miktarını da azaltmıştır. Buharda patlatma ve akabinde enzim uygulamasının da buğday kepeğinin ekmeklik kalitesini iyileştirdiği ve ekmekte besinsel liflerin çözünürlüğünü artırdığı bildirilmiştir [58]. Ekstrüde edilmiş buğday kepeğinin, nişastanın ekstrüzyon işlemi

sayesinde jelatinize olmasından kaynaklı olarak normal buğday kepeğine göre daha fazla su absorbe ettiği bildirilmiştir.

2008 yılında yapılan bir çalışmada, kepeğin fonksiyonelliğini artırmak üzere değiştirilmesinden ziyade farklı bir uygulama ile diyet lifi içeriğini artırmak ancak bunu yaparken de nihai üründe diyet lifinin tekstürde yol açtığı sorunları hafifletmek için buğday kepeği peynir altı suyu izolatları ve kazein emülsiyonu ile püskürtülerek kaplanmıştır. Unu ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında ikame ettikleri kurabiye ve keklerin kalite özelliklerini inceledikleri çalışmada, ürünlerde su tutma özelliklerin 2,5 kata kadar iyileştiği, renkte bir miktar koyulaşma ortaya çıkmasına rağmen ürün hacminin %12 ile %60'a kadar arttığı tespit edilmiştir [59].

Mikroakışkanlaştırma da buğday kepeğinin modifiye edilmesi amacıyla araştırmalara konu olmaktadır. Örneğin; De Bondt ve ark. [60] mikroakışkanlaştırma işlemi ile buğday kepeğinin teknofonksiyonel ve besleyici özelliklerini geliştirmeyi amaçlamışlardır. Yöntemin sağladığı su tutma kapasitesindeki artışın, buğday kepeği süspansiyonunun viskozitesindeki stabilizasyon artışının, küçülen partikül boyutunun (pütürlülüğü azaltarak) kepeğin kullanım oranlarının (fırıncılık ürünlerinde, içeceklerde vb.) artırılabileceği ve diyet lif alımının artmasıyla beslenmeye katkı sunabileceği vurgulanmıştır. Kaynatma, fırınlama ve otoklavlama, termal ve hidrotermal uygulamalar olarak kepek modifikasyonunda karşımıza çıkan diğer fiziksel tekniklerdir. Bu uygulamaların kepeğin kimyasal ve fiziksel özelliklerini belirgin şekilde etkilediği bildirilmiştir. Örnek olarak; buharda pişirme, otoklavlama ve fırınlamanın, buğday kepeği ve ununda oluşan hamur sisteminin Farinograf su absorbsiyon değerini ve karıştırma süresini artırdığı, hamurun uzamaya karşı direncini ise azalttığı tespit edilmiştir [2]. Buğday kepeğini otoklavlamanın ise ekmek hacmini artırdığı bildirilmiş, bu durum ise buğday kepeğinde bulunan indirgen bileşenlerin otoklavlama ile inaktivasyonu şeklinde açıklanmıştır [61]. Kepeğin otoklavlama işlemi aynı zamanda etkili bir defitinizasyon ve lif modifiye etme işlemi olarak da kullanılmıştır [62]. Aynı çalışmada ayrıca bağlı ve toplam fenolik madde miktarının önemli düzeyde arttığı bulunmuştur. Otoklavlamanın buğday kepeğinde toplam fenolik madde miktarını azalttığını ortaya koyan çalışmalar da bulunmaktadır [63]. Çalışmada bu durumun bir nedeninin otoklavlama işlemi sırasında uygulanan yüksek sıcaklığın fenolik asit yapısını bozmuş olabileceği belirtilmiştir.

Araştırmalar ayrıca, bireysel modifikasyon tekniklerinin avantajlarını güçlendirmeye veya kombine yöntemlerle sınırları ortadan kaldırmaya giderek daha fazla odaklanmaktadır. Araştırmacılar, mikroakışkanlaştırma ile ekstrüzyon veya enzim muamelesi ile buhar patlaması gibi birden fazla fiziksel yöntemi (ya da sonraki bölümlerde literatürü verilen kimyasal ve biyolojik yöntemleri) entegre ederek, her bir tekniğin dezavantajlarını azaltırken olumlu etkileri en üst düzeye çıkarmayı amaçlamaktadır. Tekniklerin birleştirilmesine yönelik bu eğilim, sadece buğday kepeğinin gıda ürünlerine daha iyi dahil edilmesi için teknolojik özelliklerinin optimize edilmesini değil, aynı zamanda sağlık açısından faydalarının artırılmasını ve özellikle fırıncılık ürünleri olmak üzere birçok gıda uygulamasında daha uygulanabilir ve değerli bir bileşen haline getirilmesini amaçlamaktadır.

2.3.2 Kimyasal Metotlar

Buğday kepeğine uygulanan modifikasyon teknikleri arasında fiziksel ve biyolojik teknikler kadar olmasa da kimyasal yöntemler de bulunmaktadır. Bu yöntemler buğday kepeği kompozisyonunda neredeyse %50'lere varan yüksek oranlarda bulunan diyet liflerini yapısal olarak değiştirmeyi amaçlamaktadır. Özellikle çözünmeyen forma sahip diyet lifi fraksiyonunun (IDF) kepeğin eklendiği gıdalarda yarattığı hidrasyon özelliklerine bağlı olumsuz değişimlerin etkisi düşürülmeye çalışılmaktadır. Nitekim kimyasal uygulamalar diyet liflerindeki safsızlıkları gidermenin, IDF'nin saflığını artırmanın ya da yüzeyindeki fonksiyonel grupları açığa çıkarmanın ve gözenekliliğini artırmanın etkili yolarından biridir [12].

Wang ve ark. [64] çalışmalarında buğday kepeğinden IDF'yi ekstrakte ederlerken bir çeşit asit – baz yöntemi kullanmayı denemiştir. Farklı konsantrasyonlarda sülfürik asit uygulamasının IDF mikroyapısında ve bileşiminde yarattığı değişimleri incelemiş; hücre duvarı parçalanması nedeniyle çözünür diyet lif (SDF) içeriğinin arttığını, buğday kepeğinin su tutma ve suda şişme özelliklerini geliştirdiğini tespit etmiştir. Bir başka çalışmada buğday kepeği IDF'sinin endüstriyel uygulamasını geliştirmek amacıyla aralarında karboksimetilasyonun da bulunduğu üç farklı yöntemle buğday kepeği modifiye edilmiştir [65]. Karboksimetilasyon uygulaması ile kepeğin su tutması, suda şişme ve glukoz adsorpsiyon kapasitelerinin etkili bir şekilde geliştiği, ayrıca toplam fenol içeriği, toplam antioksidan kapasitesi, DPPH radikal süpürme kapasitesi gibi özelliklerinin

de iyileştiği belirlenmiş ve buğday kepeğinin besleyici kalitesinin karboksimetilasyon uygulaması ile geliştirilebileceği önerilmiştir. Huang ve ark. [66] soya fasulyesi posasındaki IDF'nin Na_2HPO_4 ile muamelesi sonucunda soya fasulyesi posasının SDF oranını artırarak fonksiyonel özelliklerini geliştirmiştir.

Pirinç kepeğini asidik işlemle modifiye eden bir çalışmada diyet lifinin gözeneklilik, kristallik ve yağ tutma kapasitesinin arttığı bildirilmiştir. Ayrıca diyet lifi bileşimindeki ve mikro yapısındaki değişimin anti-diyabetik ve kolesterol düşürücü fonksiyonel bir bileşen olarak gıda endüstrisinde uygulanması için uygun olabilecek önemli fizikokimyasal değişiklikler sağladığı önerilmiştir [67]. Ek olarak çalışmada elde edilen modifiye kepeklerin toksisite analizlerinin de gerekliliği vurgulanmış, ilgili çalışmaların sürdüğü ifade edilmiştir. Farklı bir çalışmada işlenmemiş ve alkali hidrojen peroksit ile işlenmiş buğday kepeğinin buğday ununa katılarak kalite olumsuz etkilenmeden daha yüksek diyet lif içeriğine sahip unlu mamul elde edilmesi amaçlanmıştır. Buğday ununu %5, 10, 15 ve 20 oranlarında işlenmemiş ve işlenmemiş buğday kepeği ile ikame ederek karışım unlarda proksimat analizi gerçekleştirilmiştir. İşlenmiş unların nem ve karbonhidrat içeriği düşerken (lignin ve hemiselülozun uzaklaşmasına bağlı olarak), diyet lifi bileşimini değiştirmiş ve %20'ye kadar olan modifiye kepek ilave seviyelerinin kabul edilebilir duyusal özelliklere sahip olduğu bulunmuştur [68].

Nemes ve ark. [69] yaptıkları çalışmada buğday kepeğinin kimyasal işlemlerle modifikasyonunun fenolik profil üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Asidik ön işlem sonucunda toplam fenolik madde içeriğinde %41,95 oranında bir artış gözlemlenmiştir. Bu artış, asidik işlemin buğday kepeğindeki biyoaktif bileşiklerin salınımını önemli ölçüde teşvik ettiğini göstermektedir. Ayrıca, kimyasal ön işlemlerin buğday kepeğindeki toplam 13 fenolik bileşiği, özellikle avenantramidler ve sinnamik asit türevleri üzerinde anlamlı bir etkisi olduğu rapor edilmiştir. Çalışma, buğday kepeğinin kimyasal işlemlerle modifikasyonu yoluyla antioksidan özelliklerinin artırılabileceğini vurgulamaktadır.

Kimyasal modifikasyon yöntemleri, buğday kepeğinin diyet lifi bileşimindeki olumsuz etkileri azaltarak besleyici ve fonksiyonel özelliklerini geliştirme potansiyeline sahip olmakla birlikte, özellikle asit ve alkali uygulamalara bağlı toksisite endişeleri nedeniyle literatürde diğer tekniklere kıyasla daha az yer

bulmaktadır. Ancak bu yöntemler, kepeğin su tutma, şişme, glukoz adsorpsiyonu ve antioksidan kapasitesini artırarak, gıda endüstrisinde daha verimli ve sağlıklı ürünlerin üretimine katkı sağlayabilir.

2.3.3 Biyolojik Metotlar

Biyolojik yöntemlerle kepek modifikasyonu, kepek özelliklerini iyileştirmek için en güvenli ve etkili yöntemlerden biri olarak enzimler ve mikroorganizmalarla yapılan hidroliz veya fermentasyon işlemleriyle uygulanmaktadır. Bu bölümde sadece enzimler aracılığıyla kepek modifikasyonu uygulamalarına yer verilmiştir. Fermentasyon yoluyla kepek modifikasyonu Bölüm 2.4'te kapsamlı olarak ele alınmıştır.

Buğday kepeği gibi kompleks hücre duvarına sahip materyallerin enzimatik modifikasyonu hem teknolojik hem de besinsel işlevlerini geliştirmek üzere sıklıkla araştırılan bir konu olmasına rağmen, saflaştırılmış enzimlerin ekonomik açıdan uygun olmaması, buğday kepeğinde istenen enzimi üreten mikroorganizmaların ıslahını, uygulanabilir ve ekonomik bir alternatif olarak ön plana çıkarmaktadır. Kepeğin farklı enzimlerle biyoişlenmesi, mekanik ve ısıl işlemlerle karşılaştırıldığında daha etkili bir modifikasyon yöntemi olarak öne çıkmakta ve özellikle fırıncılık ürünlerinin tekstür ve lezzet iyileştirmesi açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır.

Buğday kepeğinin enzimatik modifikasyonu, fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirmek ve çeşitli gıda uygulamalarında işlevselliğini artırmak için spesifik enzimlerin kullanılmasını içermektedir. Literatürde enzim kullanılarak buğday kepeğini modifiye etmenin çeşitli etkilerinin araştırıldığı çalışmalar mevcuttur. Örneğin, buğday kepeğinin düşük nemli bir proseste enzimatik modifikasyonunun, gevrekliği artırdığı, ekstrüdat sertliğini ve parça yoğunluğunu azalttığı bildirilmiştir [70]. Bunun nedeninin, sudan ekstrakte edilebilir arabinoksilanların artan miktarı ve su tutma kapasitesinin azalmasına bağlı olarak mekanik özelliklerin gelişmesi olduğu bildirilmiştir. Bir başka çalışmada enzimatik olarak modifiye edilmiş buğday kepeği kullanılarak üretilen ekmeklerde spesifik hacim, sertlik ve elastikiyetin arttığı, aromanın geliştiği ve ekmeğin glisemik indeksinin düştüğü bildirilmiştir [71]. Bu araştırmaların sonuçları enzimatik ön işleme ya da modifikasyonun buğday kepeklerinde ve bu kepeklerden üretilen

fırıncılık ürünlerinde teknolojik performansı artırabileceğini ortaya koymaktadır. Enzimatik işlemler aynı zamanda diyet lifinin mikro yapısını değiştirmek suretiyle daha gözenekli hale getirerek fonksiyonel özelliklerini geliştirebilmektedir [72].

Enzimatik işlemler buğday kepeğindeki çözünür diyet lifi içeriğini artırabilmektedir. Örneğin, ekstrüzyon ve enzimatik hidroliz kombinasyonu çözünür lif oranını önemli ölçüde artırarak kepeğin su tutma kapasitesi ve şişme gücü gibi işlevsel özelliklerini iyileştirmiştir [73]. Ayrıca endojen enzimlerin aktivasyonu ve karbonhidraz enzimlerinin eklenmesi, buğday kepeğinde protein çözünürlüğünü ve sindirilebilirliğini artırarak onu değerli bir protein kaynağı haline getirebilir [74]. Böylece modifikasyonda enzimatik uygulamaların kepek besleyici özelliklerini iyileştirdiği değerlendirilebilir.

Enzimatik işlemler buğday kepeğinin antioksidan özelliklerini de geliştirmektedir. Örneğin, bir çalışmada ksilanaz ve arabinofuranosidaz enzimlerinin birlikte kullanımının etkileri araştırılmıştır. Kepeğin antioksidan kapasitesi, su ve yağ tutma kapasitesi, çözünür ksiloligosakkarit ve çözünür fenolik asit içeriğinin arttığı; %15 oranında ekmek formülasyonuna eklenen modifiye kepeğin daha yüksek spesifik hacim, esneklik ve kohesivlik ve daha düşük çiğnenebilirlik değerlerine sahip ekmekler ürettiği bildirilmiştir [75]. Bu sonuçlar, enzimatik modifikasyon yönteminin kepeğin antioksidan özellikleri üzerine pozitif etkilerini ortaya koymaktadır. Ksilanazlar ve endoglukanazların birlikte kullanıldığı bir çalışmada bu enzimlerin buğday kepeğindeki diyet lifinin çözünür hale getirilmesinde, çözünmeyen materyal içeriğinin azaltılmasında ve arabinoksilanların çözünürlüğünün artırılmasında etkili olduğu bildirilmiştir [76]. Ayrıca enzimatik olarak modifiye edilmiş kepeğin partikül boyutu küçülmekte, kaba kepeğe kıyasla daha iyi mekanik özellikler sergilemektedir [70].

Yukarıdaki literatür bilgilerinin derlendiği çalışmalardan bazılarının geniş özetleri aşağıda verilmiştir:

Santala ve ark. [70] buğday kepeğinin teknolojik performansını artırmak için kepek partikül boyutunun azaltılmasının yanı sıra enzimatik modifikasyonunu araştırmışlardır. Elde ettikleri bulgular, hidrolitik enzimlerle yapılan enzimatik modifikasyonun buğday kepeğinin crispiness değerini önemli ölçüde artırırken, sertliklerini ve parça yoğunluğunu azalttığını ortaya koymuştur. Bu değişikliklerin

ekstrakte edilebilir arabinoksilan içeriğinin artması ve kepeğin su tutma kapasitesinin azalması ile önemli ölçüde ilişkili olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca enzimatik modifikasyondan sonra kepeğin fırında veya dondurularak kurutulması yönteminin ekstrüde özellikleri üzerinde minimum etkisi olmuştur. Bu çalışma ile buğday kepeğinin teknolojik özelliklerinin enzimatik modifikasyon ve kepeğin partikül boyutunun azaltılması yoluyla etkili bir şekilde geliştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

Çalışmalar enzimatik yolla modifiye edilen buğday kepeğinin daha yüksek su tutma özelliğine sahip olduğunu göstermektedir, bu da hamur hidrasyonunu ve ekmek dokusunu olumlu yönde etkileyebilmektedir. Örneğin bir çalışmada, enzimatik hidroliz ve ardından otoklavlama ile modifiye edilen buğday kepeğinin, ekmeklerin yapısı ve sindirilebilirliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Modifiye buğday kepeğinin lipaz aktivitesinin 0'a düşmesi, çözünmeyen diyet lifi içeriğinin %37,38'den %15,64'e düşmesi ve su tutma oranının %41,26 artması gibi önemli bileşimsel ve fonksiyonel değişiklikler sergilediği bulunmuştur. Ekmek kalitesi açısından, modifiye buğday kepeğinin eklenmesi aromayı geliştirmiş ve doğal buğday kepeği içeren ekmeğe kıyasla spesifik hacim, sertlik ve elastikiyette kayda değer iyileşmelere yol açtığı tespit edilmiş, beslenme açısından ise modifiye buğday kepeği ilavesinin dirençli nişasta içeriğini arttırdığı ve nişasta hidroliz oranını azaltarak ekmekte daha düşük bir glisemik indekse katkıda bulunduğu rapor edilmiştir. Yazarlar tüm bu gelişmeleri dayanarak kepeğin enzimatik yöntemle modifikasyonunun nihai üründe hem teknolojik hem de besinsel niteliklerini geliştirmede etkili bir yöntem olduğunu değerlendirmiştir [71].

Xue ve ark. [77] ksilanaz ve arabinofuranosidaz kullanarak buğday kepeğini modifiye etmiş ve modifiye kepeği %15 un ağırlığı bazında buharda pişirilmiş ekmeklere eklemiştir. Kepeğin antioksidan kapasitesi, su ve yağ tutma kapasitesi ve çözünür fenolik asit içeriğinin arttığını bildirmişlerdir. İki enzimin birlikte kullanımının, ekmeklerin uzamaya karşı direnç, yumuşama derecesi, su absorpsiyon ve gelişme süresini azaltmada ve uzayabilirlik, stabilite süresi, porozite ve duyusal özelliklerini artırmada daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca iki enzim uygulamasının tek enzim uygulamasına kıyasla önemli ölçüde ($p< 0.05$) daha yüksek spesifik hacim, esneklik ve kohesivlik ve daha düşük çiğnenebilirlik değerlerine sahip ekmekler ürettiği bildirilmiştir. Yazarlar, ksilanaz ve

arabinofuranosidaz kombinasyonunun buğday kepeğinin hidroliz derecesini ve üretilen çözünür arabinoksilan ksiloligosakkaritlerini iyileştirebileceğini ve ekmeğin hamur reolojisi ve besinsel ve kalite özellikleri üzerinde olumlu sinerjik bir etkiye sahip olduğunu önermiştir.

Sonuç olarak buğday kepeğinin enzimatik modifikasyonunun, fonksiyonel, besinsel ve teknolojik özelliklerini önemli ölçüde geliştirerek onu gıda ürünlerinde kullanılabilmesi için değerli bir bileşen haline getirebileceği değerlendirilebilir.

2.4 Mikrobiyal Biyoproses

Mikrobiyal fermentasyon, buğday kepeğinin besinsel özelliklerini geliştirmek ve anti-besinsel faktörleri azaltmak için modifiye edilmesinde oldukça etkili bir yöntemdir. Buğday kepeğinin mikrobiyal fermentasyonunun, diyet lifinin yapısını değiştirerek, antibesinsel unsurları (fitik asit vb.) azaltarak ve biyoaktif maddelerin salınımını teşvik ederek besinsel kaliteyi ve farklı gıdalardaki kullanılma potansiyelini artırdığı gösterilmiştir. Literatürde bu amaçla sıklıkla *Lactiplantibacillus plantarum, Lactocaseibacillus rhamnosus, Pediococcus pentosaceus, Lentilactobacillus buchneri, S. cerevisiae* ve *Bacillus subtilis* dahil olmak üzere çok çeşitli mikrobiyal türler kullanılmıştır [13, 78, 79]. Her suş, fermentasyon sürecine ve bunun sonucunda ortaya çıkan besinsel iyileştirmelere farklı şekilde katkıda bulunmaktadır. Fermentatif etki, buğday kepeğini bir substrat olarak kullanan faydalı mikroorganizmaların kompleks karbonhidratları basit şekerlere parçalamasını içeren süreç ile ortaya çıkmaktadır. Fermentasyon vasıtasıyla gelişen asitlik, modifiye edici etkinin temel mekanizmasını oluşturmaktadır. Gelişen asitlik, kepeğin hücre duvarını, karbonhidrat parçalayan enzimler tarafından erişilebilir hale getirir. Böylece kepeğin besinsel özellikleri (çözünür besinsel lif, antioksidan aktivite vb.) ve teknolojik özellikleri (hidratasyon, viskozite vb.) değişir [33, 80]. Bazı çalışmalar fermentatif prosesin fenolik bileşikler, çözünür diyet lifi ve ekstrakte edilebilir arabinoksilanlar gibi biyoaktif maddelerin seviyelerini artırdığını [14, 15, 78, 79] ve böylece modifiye kepeğin oksidatif strese ve ilgili hastalıklara karşı koruyabilen daha yüksek antioksidan aktiviteler sergilediğini bildirmiştir [78, 79]. *Aspergillus niger* ile gerçekleştirilen fermentasyonun, buğday kepeğinin ham protein içeriğini önemli

ölçüde artırarak onu daha değerli bir yem kaynağı haline getirebileceği rapor edilmiştir [81].

Mikrobiyal biyoproses yoluyla modifikasyonun yarattığı yapısal ve fonksiyonel etkilerden en önemlisi, diyet liflerinin yapısını değiştirerek onları daha çözünür ve sindirimi daha kolay hale getirmesidir. Böylece biyoaktif maddelerin salınımı artmakta ve buğday kepeğinin genel besin kalitesi iyileşmektedir [15, 78, 82]. Ayrıca *S. cerevisiae* ve *Bacillus subtilis* gibi belirli mikroorganizmalarla gerçekleştirilen fermentasyonun, polisakkaritlerin biyoaktivitesini artırdığı, antioksidan özelliklerini geliştirdiği ve moleküler ağırlığını azalttığı için fonksiyonel özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir [79]. Fermente buğday kepeğinin sağlık üzerine faydalı etkilerini araştıran bazı çalışmalarda ise faydalı bağırsak bakterilerinin büyümesini teşvik ettiği, bağışıklık fonksiyonunu geliştirdiği ve bağırsak sağlığını iyileştirdiği önerilmiştir. Bu etkinin ana nedeni olarak kısmen kısa zincirli yağ asitlerinin üretiminin artması ve enflamatuar belirteçlerin azalması olduğu gösterilmiştir [78, 83, 84]. Fermentasyon prosesi bir yandan da kompleks karbonhidratları ve proteinleri parçalayarak buğday kepeğinin sindirilebilirliğini artırmakta ve besin maddelerini daha erişilebilir hale getirmektedir [14, 74]. Lei ve ark. [82] buğday kepeğinin fermente edilerek hamurun besinsel kalitesini ve fermentasyon özelliklerini iyileştirmek, hamur yüksekliği, gaz üretimi ve hava tutma kapasitesi gibi özellikleri geliştirmek için kullanılabileceğini bildirmiştir.

Bu bölümde; literatürde yer alan ve mikrobiyal biyoprosesin buğday kepeğini modifiye etmek amacıyla kullanıldığı çok sayıda araştırmanın kapsamlı sonuçları özetlenmiştir:

Fermentasyon, buğday kepeğinin antioksidan özelliklerini geliştirmekte, fitaz aktivitesini, peptit ve serbest amino asit içeriğini artırmaktadır. Coda ve ark. [33] biyoprosesin farklı partikül boyutlarındaki buğday kepeğinin besin kalitesi ve sağlık etkileri üzerindeki etkisi değerlendirmiştir. Çalışmada enzim destekli ya da enzim desteği olmaksızın *Lactobacillus brevis* ve *Kazachstania exigua* kullanılarak gerçekleştirilen modifikasyon prosesinde buğday kepeğinin mikroyapısının, kimyasal bileşiminin ve besinsel özelliklerinin önemli ölçüde etkilendiği tespit edilmiştir. Antioksidan aktivitede 3,7 kata kadar artış tespit edilirken, peptid ve serbest aminoasit içeriğinin ise %40'a kadar arttığı tespit edilmiştir. Yazarlar,

biyoproses ile muamele edilen buğday kepeğinin işlenmemiş kepeğe kıyasla daha yüksek potansiyel gösterdiğini ve gıda preparatları için uygun bir bileşen olarak değerlendirilebileceğini önermiştir. Bir başka çalışmada buğday kepeği *Lactiplantibacillus plantarum, Lacticaseibacillus rhamnosus, Pediococcus pentosaceus* ve *Lactobacillus buchneri* kullanılarak fermente edilmiştir. Buğday kepeği fermentasyonu sırasında 8 saatlik periyotlarla çözünür diyet lifi, ham protein, nişasta, toplam fenolik içerik, fitik asit ve DPPH serbest radikal süpürme kapasitesinin değişimlerinin takip edildiği çalışmada; çözünür diyet lifinin 24 saatlik proses sonunda *L. buchneri* tarafından 1,4 kat artırıldığı, *L. plantarum* tarafından polifenol içeriğinin 2,9 kat artırıldığı, tüm laktik asit bakterilerinin fitik asitte önemli miktarda düşüş sağladığı belirlenmiştir [13].

Buğday kepeğinin fermentasyon yoluyla modifikasyonu sonucunda çözünür diyet lifinin çözünmeyen diyet lifine oranı artmakta, bu da kepeğin besin profilini iyileştirmektedir. Zhang ve ark. [85] buğday kepeğinin gluten ağı üzerindeki tahribatını azaltmak için, buğday kepeği maya ve laktik asit bakterileri ile birlikte fermentasyon ve/veya ksilanaz hidrolizi ile biyoprosese tabi tutmuştur. Biyoproses işleminin buğday kepeğinin besin değeri, hamurun bazı termomekanik özellikleri, gluten proteininin mikroyapısı gibi özellikleri ne yönde etkilediği araştırılmıştır. Sonuçlar oldukça dikkat çekicidir: fermentasyon ve enzimatik hidrolizin kombine kullanıldığı buğday kepeğindeki polifenolik bileşiklerin ve çözünür arabinoksilan içeriğini artırdığı ve çözünür diyet lifi (SDF)/çözünmez diyet lifi (IDF) oranının da işlem görmemiş buğday kepeği grubuna kıyasla yaklaşık %8,1 arttığı bulunmuştur. Biyoproses işleminin, buğday kepeğinin gluten ağına verdiği zararı etkili bir şekilde azalttığı değerlendirilirken, bu durumun olası nedeninin SDF/IDF oranının artışının olabileceği belirtilmiştir ve biyoişlemenin buğday kepeğinin hamura verdiği zararı ve gluten polimerizasyonunu engelleyebileceği önerilmiştir. Messia ve ark. [86] buğday kepeği arabinoksilanlarının hamur gelişimi ve nihai ekmeğin kalitatif özellikleri üzerindeki etkisini araştırmayı amaçladıkları çalışmalarında %20 oranında işlenmiş (enzim uygulaması ile, fermentasyon ile, ekşi hamur kullanımı ile ya da bu uygulamaların kombinasyonu ile) ya da işlenmemiş kepek ile unu ikame ederek ekmekler üretmiştir. Ön fermente kepek kullanımının (enzim işlemiyle beraber starter kültür fermentasyonu) arabinoksilanların çözünürlüğünü artırdığı, ekmek yapım kalitesi,

hidratasyon özellikleri ve nihai ekmeklerin genel özellikleri üzerinde olumlu etkileri olduğu rapor edilmiştir.

Fermente edilerek modifiye edilmiş buğday kepeği kullanımının, işlenmemiş kepeğin ekmek hacmi ve ekmek tekstürü üzerindeki olumsuz etkilerini giderdiğini, modifiye buğday kepeği ile yapılan ekmeklerin genellikle daha güçlü bir aromaya ve daha yumuşak bir doku ve hoş bir lezzet de dahil olmak üzere daha iyi duyusal niteliklere sahip olduğunu öneren çalışmalarda sıklıkla laktik asit bakterilerinin kullanıldığı görülmektedir. Örneğin, bir çalışmada, maya (*Saccharomycopsis fibuligera*) ve 8 farklı laktik asit bakterisi ile ortak kültür fermentasyonunun buğday kepeğinin biyoaktivitesi ve lezzeti üzerindeki etkileri araştırılmış ve modifiye kepek Çin buharda pişmiş ekmeğinde kullanılmıştır. *S. fibuligera* + *L. fermentum* kombinasyonu daha yüksek asitlik ve fitat hidrolizinin yanında, ekmeklerinin de daha yüksek spesifik hacim, yumuşak doku, hoş aroma ve yüksek duyusal puanlara sahip olduğu bulunmuştur. *S. fibuligera* ve *L. curvatus* kombinasyonunun ise en güçlü antioksidan aktivite sergilediği ve ekmeklerinin de paralelinde daha güçlü antioksidan aktivite özelliklerine sahip olduğu rapor edilmiştir [87]. Mao ve ark. [88] ise buğday kepeğini fermente etmek için *Enterococcus faecalis* kullanmıştır. Modifiye kepekte çözünür diyet lifi içeriğinin yaklaşık 4 kat arttığı ve ferulik asit içeriğinin 5,5 kat artış göstererek fenoller, flavonoidler, alkilresorsinoller ve ferulik asit seviyelerinin önemli ölçüde yükseldiği bulunmuştur. Ayrıca antioksidan kapasite ve serbest radikal süpürme aktivitesinin de belirgin şekilde iyileştiği, fitik asit içeriğininse azaldığı rapor edilmiştir. LAB kullanılarak buğday kepeğinin özelliklerinin modifiye edildiği başka bir çalışmada *Lactobacillus acidophilus*'un en önemli gelişmeleri gösterdiği belirlenmiş; modifiye kepeğin en yüksek toplam fenolik içeriğe ve antioksidan aktiviteye sahip olduğu rapor edilmiştir. Yazarlar, LAB ile fermente edilmiş buğday kepeğinin (özellikle *L. acidophilus* ile), fonksiyonel gıda uygulamalarında kullanım potansiyelinin yüksek olduğunu önermiştir [89].

Zhao ve ark. [63] maya ve laktik asit bakterileri (LAB) ile katı hal fermentasyonu kullanarak buğday kepeğinin besinsel, fiziksel ve lezzet özelliklerini geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu yöntemin buğday kepeğinin bazı temel özelliklerini önemli ölçüde geliştirdiğini bulmuşlardır. Örneğin, ekstrakte edilebilir arabinoksilanlar ham kepeğe kıyasla 3-4 kat artarken, toplam ve çözünür

diyet lifi içerikleri de önemli ölçüde artmıştır. Fermentasyon süreci, kepeğin mikro yapısında ve protein bileşiminde gözlemlenebilir değişikliklerle birlikte fitik asidin %20'sinden fazlasının parçalanmasına yol açmıştır. Ayrıca, fermente kepeklerin su tutma kapasiteleri artarak sürecin işlevsel faydalarını vurgulamıştır. Çalışma, fermentasyon yoluyla buğday kepeği modifikasyonunun kepeğin besinsel ve fonksiyonel niteliklerini etkili bir şekilde yükselttiği ve gıda sistemlerinde kullanımı için umut verici bir yaklaşım olduğu sonucuna varmıştır. Bir başka çalışmada buğday kepeğini modifiye etmek amacıyla *Lacticaseibacillus rhamnosus*'un kullanımı araştırılmıştır. İşlemin fitik asit içeriğini %37 oranında önemli ölçüde azalttığını ve ekstrakte edilebilir arabinoksilan seviyelerinin üç katına çıktığını bildirmişlerdir. Ayrıca, fermentasyon buğday kepeğini biyoaktif fenolik asitlerle zenginleştirmiş, antioksidan aktiviteyi geliştirmiş ve çeşitli mikrobiyal metabolitler ve karmaşık bir aroma profili üretmiştir [90].

Bu bölümde detaylandırılan ve literatürde yer alan ancak burada değinilmeyen diğer çalışmalar genel olarak fermentasyon teknolojisinin (özellikle de LAB ile fermentasyonun) buğday kepeğinin besinsel, fonksiyonel ve duyusal özelliklerini geliştirmek için etkili bir yöntem olduğunu ve onu gıda uygulamaları için daha değerli bir bileşen haline getirdiğini göstermektedir. Yazarlar, buğday kepeğinin fermentasyon yoluyla modifikasyonunun kepeğin teknolojik, fonksiyonel ve besleyici özellikleri üzerine etkisinin ve ekmek gibi ürünlere modifiye kepeğin dahil edilmesine dair daha kapsamlı araştırmalar yapılması gerektiği üzerine durmaktadırlar.

2.5 Ultrases teknolojisi

Ultrases teknolojisi, gıda işleme endüstrisinde çok yönlü ve etkili bir araç olarak ortaya çıkmıştır ve yıllar içerisinde çok sayıda farklı uygulama alanı araştırılarak önemli fayda sağladığı ortaya koyulmuştur. Ayrıca ultrases teknolojisinin çevre-dostu bir yöntem olması nedeniyle yeşil teknoloji olarak değerlendirilmektedir [16]. Ses dalgalarını duyulabilir aralığın ötesinde (>20 kHz) kullanan ultrases teknolojisinin etki mekanizması, bir ortam içinde değişen yüksek

basınç (sıkıştırma) ve düşük basınç (seyrelme) döngüleri yaratan ses dalgalarının yayılması yoluyla ortaya çıkmaktadır. Bu süreç, mikroskobik kabarcıkların hızlı oluşumu ve çöküşü olan kavitasyon olgusuna yol açmakta, kabarcıkların patlaması lokalize yüksek sıcaklıklar ve basınçlar oluşturarak hücre duvarlarını bozabilen, karıştırmayı artırabilen ve çeşitli kimyasal reaksiyonları kolaylaştırabilen yoğun kesme kuvvetlerine neden olmaktadır [91].

Gıda endüstrisinde ultrases uygulamaları, ses gücü (W) ve ses yoğunluğu (W/m^2) göre düşük enerjili ve yüksek enerjili ultrases olarak sınıflandırılmaktadır. Düşük enerjili uygulamalarda, genellikle 100 kHz üzerindeki frekanslar ve 1 W/cm^2'nin altındaki yoğunluk değerleri tercih edilmektedir [92]. Bu tür uygulamalar, malzemelerin fiziksel veya kimyasal özelliklerini değiştirmemekle birlikte, meyve ve sebzelerin fizikokimyasal özelliklerinin, bileşimlerinin, olgunluk düzeylerinin, sertliklerinin, şeker içeriklerinin ve asitliklerinin analitik olarak belirlenmesinde kullanılmaktadır [93]. Yüksek enerjili ultrases uygulamalarında ise 20-100 kHz frekans aralığında ve 10-1000 W/cm^2 yoğunluk değerleri kullanılır ve bu tür bir işlem uygulandığı materyalin fizikokimyasal özelliklerini ve yapısını değiştirebilme potansiyeli gösterir. Enzim inaktivasyonu, kurutma ve dondurma gibi işlemlerin iyileştirilmesi, uçucu yağların ekstraksiyonu ve kristalizasyon süreçlerinin kontrolü gibi çeşitli endüstriyel işlemlerde etkin bir şekilde kullanılabilmektedir [93, 94].

Ultrases teknolojisi gıda işlemede ayrıca pişirme kalitesi, fizikokimyasal özellikler, mikrobiyal inaktivasyon ve gıda atıklarındaki akrilamidin azaltılması gibi çeşitli faydalar sunmaktadır [95, 96]. Ayrıca, düşük sıcaklık koşullarında enzimleri ve mikroorganizmaları inaktive ederek pastörizasyon ve muhafaza gibi gıda kalite güvencesi uygulamalarında da kullanılmaktadır [92, 97]. Çevre dostu ve toksik olmayan bu teknoloji, enerji tüketiminin ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunmaktadır [98]. Ancak ultrasesin protein gibi yoğun ve karmaşık gıda matrislerinin işlenmesi amacıyla kullanımında bazı sınırlamalar söz

konusu olmakta ve bu da büyük ölçekte kullanımını engellemektedir [96, 99]. Yüksek ton ölçekli üretim için güvenilir ekipman eksikliği, gıda endüstrisinde ultrases teknolojilerinin kullanımını bu alanlarda sınırlayan temel etken olmuştur [100].

Literatürde ultrases teknolojisi ile buğday kepeğini birleştiren çeşitli araştırmalar bulunmaktadır. Bu araştırmalar genellikle biyoaktif bileşiklerin ekstraksiyonu [101-104], fonksiyonel özelliklerin geliştirilmesi [105, 106], antioksidan aktivitenin geliştirilmesi [107], raf ömrünü uzatma ve stabilitenin artırılması [108] gibi konular odağında gerçekleştirilmiştir. 2015 yılında yapılan bir çalışmada ise ultrases destekli teknoloji kullanılarak üretilen "buğday kepeği sulu özütleri" ile takviye edilen makarnanın değişen özellikleri incelenmiş ve ultrasesle muamele edilen kepeğin bir gıda ürününde kullanımına ilişkin orijinal bir araştırma örneği teşkil etmiştir. Çalışmada duyusal özelliklerden ödün vermeden antioksidan aktivitenin ve fenolik içeriğin artırıldığı bildirilmiştir [109].

Sonuç olarak, ultrases teknolojisi gıda işleme uygulamaları için önemli bir potansiyele sahip çok yönlü ve çevre dostu bir araçtır. Bu teknoloji, benzersiz kavitasyon temelli mekanizmalarından yararlanarak sadece biyoaktif bileşiklerin ve fonksiyonel özelliklerin ekstraksiyonunu geliştirmekle kalmaz, aynı zamanda gıda kalitesi, güvenliği ve sürdürülebilirliğinin korunmasındaki temel zorlukları da ele alır. Bununla birlikte, ultrasonik parametreleri optimize etmek ve sağlam işleme sistemleri geliştirmek için devam eden araştırmalar, buğday kepeği temelli ürünlerde ve ötesinde uygulamayı genişletmek için bir fırsat sunmaktadır ve fonksiyonel ürün geliştirmede yenilikçi bir yaklaşım olarak bu tez çalışmasının merkezinde yer almaktadır.

3
MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyaller

Tez çalışmasında modifiye edilecek buğday kepeğinin seçimi amacıyla kullanılan iki farklı ekmeklik buğday çeşidi (Tekirdağ ve Rumeli), Haziran 2022 tarihinde Trakya Tarımsal Araştırma Enstitüsü (Edirne, Türkiye) 'nden temin edilmiştir. Tekirdağ çeşidi, ıslah çalışmaları sonucunda geliştirilmiş olup kırmızı renkli, sert-yarı sert yapıya sahip bir kışlık buğdaydır. Bu çeşit, soğuklara karşı yüksek dayanıklılık göstermesi nedeniyle Marmara Bölgesi ile kışlık ekim yapılan diğer bölgelerde, farklı alan ve toprak tiplerinde başarıyla yetiştirilebilmektedir. Rumeli çeşidi ise Tekirdağ çeşidinden farklı olarak hem düşük sıcaklık koşullarına hem de kuraklığa karşı dirençli bir ekmeklik buğday çeşidi olarak öne çıkmaktadır.

Mikrobiyal biyoproses (MB), *Levilactobacillus brevis* LABE 32 ve *Lactiplantibacillus plantarum* LABE 29 olmak üzere iki laktik asit bakterisi (LAB) ve bir maya *S. cerevisiae* TGM 55 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu mikroorganizmalar Yıldız Teknik Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü'nün ekşi maya kültür koleksiyonundan temin edilmiştir.

Diyet lifi analizinde Sigma-Aldrich (TDF100A, Sigma-Aldrich Inc., Bornem, Belçika) marka analiz kiti kullanılmıştır. Fitik asit içeriğini belirlemek için bir fitik asit analiz kiti aracılığıyla enzimatik prosedür kullanılmıştır (K-PHYT, Megazyme, İrlanda). LAB'nin (MRS agar, MRS broth) ve mayanın (sabouraud dekstroz agar ve sabouraud dekstroz broth) ekimi için kullanılan besiyerleri Merck'ten (Darmstadt, Almanya) temin edilmiştir. Tez çalışmasının diğer tüm kimyasalları ve reaktifleri analitik sınıftır. Modifiye kepeklerin kurutulmasında bir etüvden (Memmert UF110, Almanya) yararlanılmıştır.

Ekmek yapımında kullanılan rafine un (%13,24 nem, %11,5 protein, %10,4 gluten, %60,1 su absorbsiyonu) ticari olarak temin edilmiştir (Söke un, Aydın, Türkiye). İyotsuz rafine tuz (Billur, İzmir, Türkiye) ve instant kuru maya (Pakmaya, İzmit, Türkiye) yerel marketlerden satın alınmıştır.

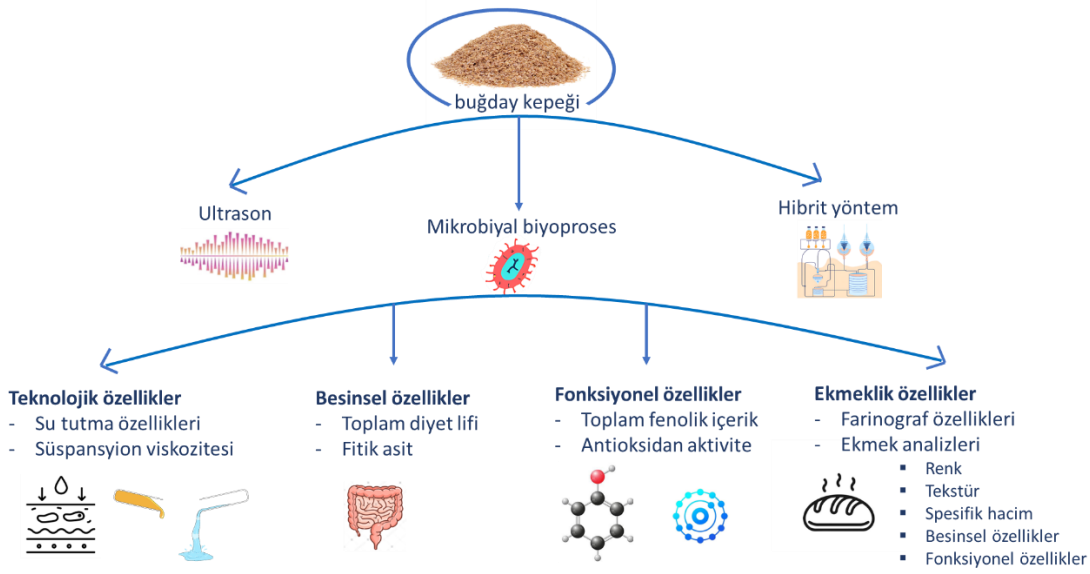
3.2 Yöntemler

Bu tez çalışmasında öncelikle modifikasyonda kullanılacak buğday kepeğinin belirlenmesi amacıyla iki farklı ekmeklik buğday çeşidinin kalite özellikleri değerlendirilmiş ve bu buğdayların kepeklerinin kalite ile ekmeklik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu analizler sonucunda fonksiyonel ve ekmek yapım özellikleri açısından üstün olan kepek çeşidi seçilmiş ve çalışmanın diğer aşaması olan modifikasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Modifikasyon işlemleri, ultrases teknolojisi ve mikrobiyal biyoproses olmak üzere iki temel tekniği kapsamaktadır. İlk aşamada, ultrasonik modifikasyonunun (UM) uygulanacağı optimum proses parametrelerini belirlemek için Yanıt Yüzey Metodu (YYM) kullanılmış ve optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Optimizasyon aşamasından sonra yapılan diğer çalışmalar aşağıda belirtildiği şekilde gerçekleştirilmiştir.

- Optimum işlem koşullarında ultrasonik modifikasyon (UM),
- Mikrobiyal biyoproses (MB) yöntemiyle modifikasyon ve hibrit modifikasyon (HM) için kullanılacak mikrobiyal suşların belirlenmesi,
- Ultrasonik uygulamanın ve mikrobiyal biyoprosesin birleştirildiği hibrit modifikasyon (HM),
- Modifiye edilmiş kepeklerin analizleri ile bu kepeklerin bazı fonksiyonel ve besinsel özelliklerinin değerlendirilmesi.

Tez çalışmasının son aşamasında, modifiye edilmiş kepeklerin ekmeklik performansları incelenmiştir. Modifiye kepek kullanılarak üretilen ekmeklerin kalite ve besinsel özellikleri, işlenmemiş kepek kullanılarak üretilen ekmeklerle karşılaştırılmıştır. Tez kapsamında yürütülen çalışmaların şematik özeti Şekil 3.1'de sunulmuştur.



Şekil 3.1 Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların özet gösterimi

3.2.1 Buğday Tanelerine Uygulanan Analizler

3.2.1.1 Buğday Örneklerinin Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi

Tekirdağ ve Rumeli çeşit buğdayların hektolitre ağırlığı (HA) ve bin dane ağırlığı (BDA) Özkaya ve Kahveci [110] tarafından belirtilen metodolojiye uygun olarak hesaplanmıştır. HA un verimini etkileyen bir özellik olup, 100 litre buğdayın kg cinsinden ağırlığıdır. BDA ise çeşide, iklime ve toprak koşullarına göre değişen bir kalite özelliğidir ve safsızlık unsurlarından arındırılmış buğdayın sayıldıktan sonra tartılması ile belirlenmektedir.

Gluten (%) ve gluten indeksi AACC Yöntem 38-12, ICC Standart No: 137'ye göre belirlenmiştir [111]. Buğday örneklerinin Zeleny sedimentasyon değerleri ICC Standart No: 116'ya göre belirlenmiştir [112].

Buğday örneklerinin protein içeriği, Kjeldahl yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Analizde öğütülmüş numuneler kullanılmış olup, kuru madde temelinde %protein oranının hesaplanmasında 6,25 faktörü dikkate alınmıştır.

3.2.2 Buğdayların Öğütülmesi

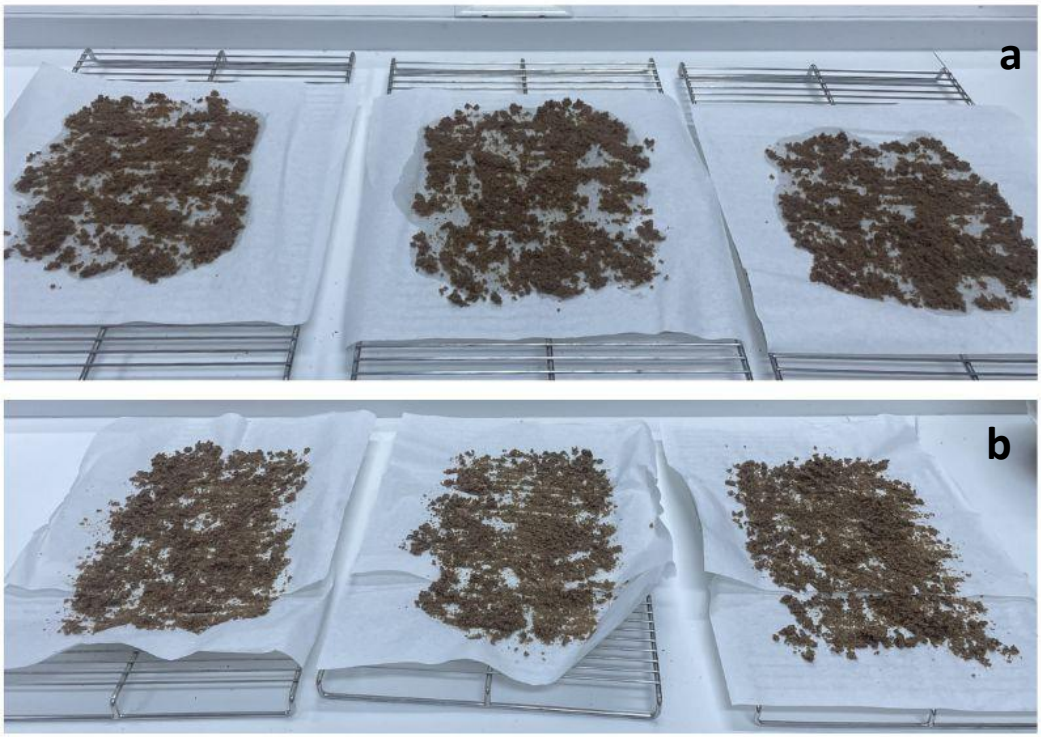
Buğday kepekleri, laboratuvar tipi bir değirmende (Prodigy 2, Tekpa, Türkiye) %66-67 öğütme verimliliği ile öğütülerek elde edilmiştir. Öğütme işlemi sonucunda elde edilen kaba buğday kepeğinin ortalama partikül boyutu 900 µm olarak ölçülmüştür. Kepek örnekleri, analizler gerçekleştirilene ve tez

çalışmalarının sonraki aşamalarında kullanılana kadar kapalı kaplarda, karanlık bir ortamda, +4 °C'de muhafaza edilmiştir.

3.2.3 Modifikasyon İşlemi

3.2.3.1 Ultrasonik Modifikasyon

Buğday kepeği süspansiyonları 250 mL'lik beherler kullanılarak 1,0 g buğday kepeği/7,5 mL deiyonize su oranında hazırlanmıştır. Süspansiyonlara ultrasonik olarak (Hielscher UIP1000-1000W-20kHz, Teltow, Almanya) 22 mm çapında bir prob (Hielscher sonotrode BS4D22) ve bir akış hücresi (Hielscher FC100L1K-1S) ile muamele edilmiştir. Ultrases cihazı 24 kHz frekansta, 400 W çıkış gücünde ve %20 ile %100 genlik aralığında çalışmaktadır. Ultrasonik işlem süresi sonunda süspansiyonlardan sıvı kısım ayrılarak kaba filtre kağıdı üzerine ince bir katman oluşturacak şekilde serilmiş ve pelet kısım etüvde 40 °C'de yaklaşık %14-15 nem değeri aralığına ulaşıncaya kadar 2-3 saat süresince kurutulmuştur. Kurutulmuş örnekler analiz edilinceye ve çalışmanın sonraki aşamalarında kullanılıncaya kadar 4 °C'de buz dolabı koşullarında muhafaza edilmiştir.



Şekil 3.2 İşlem görmüş buğday kepeklerinin kurutma öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri

- **Deneysel Tasarım**

Bu çalışmada deneysel tasarım, Design Expert yazılımı (sürüm 13.0.5.0, State-Ease Inc., ABD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel koşulların seviye aralıkları, kapsamlı bir literatür taramasına dayalı olarak belirlenmiş ve bağımsız değişkenler ön deneylerle tanımlanmıştır. Bölüm 2.5 belirtildiği gibi, literatürde buğday kepeği üzerinde ultrasonik işlemler sıklıkla çeşitli bileşenlerin ekstraksiyonu amacıyla kullanılmıştır. Ancak, ultrasonik işlemin buğday kepeğini modifiye etme amacıyla kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu tez kapsamında, ultrasonik modifikasyon adımının işlem koşullarının optimizasyonu için tam faktöriyel deneysel tasarım kullanılmıştır. Bu tasarımda bağımsız değişkenler olarak genlik (amplitüde, şiddet) seviyesi (%20, %40, %60, %80 ve %100) ve işlem süresi (5, 10 ve 15 dakika) belirlenmiştir. Bu tasarım yedi bağımlı değişkenli 15 deneysel nokta içermektedir. Yanıt değişkenleri şu şekilde tanımlanmıştır: süspansiyon viskozitesi (SV), serbest fenolik içerik (SF), bağlı fenolik içerik (BF), fenolik bileşiklerin salınım yüzdesi (%), serbest antioksidan aktivite (serbest-AA), bağlı antioksidan aktivite (bağlı-AA) ve antioksidan aktivitenin salınım yüzdesi (AA salınımı, %). Bu değişkenler, bağımsız değişkenlerin etkilerinin kapsamlı bir şekilde incelenmesi amacıyla ölçülmüştür. Deneysel doğruluk sağlamak için her deneysel koşul üç tekrarla gerçekleştirilmiştir. Deney noktaları ve bunlara karşılık gelen yanıt değerleri Tablo 3.1 de sunulmaktadır. Optimizasyon işlemiyle elde edilen optimum proses koşulları altında doğrulama analizleri gerçekleştirilmiştir. Ultrases ile buğday kepeği modifikasyon işlemi için optimum işlem parametreleri belirlendikten sonra söz konusu koşullarda “ultrases tekniği ile modifiye edilmiş buğday kepeği” üretilmiş ve bu örnekler hem çalışmanın ultrases ile gerçekleştirilen buğday kepeği modifikasyonun bağımsız uygulaması (UM) aşamasında hem hibrit modifikasyon (HM) işleminde kullanılmıştır.

Tablo 3.1 Ultrasonik modifikasyon (UM) sürecinde incelenen deneysel parametreler ve gözlemlenen yanıt değerleri

Deneme noktası	Bağımsız değişkenler		Yanıtlar						
	Genlik seviyesi (%)	İşlem süresi (dakika)	SV (mPa.s)	SF (GAE mg/g)	BF (GAE mg/g)	Fenolik bileşiklerin salınımı (%)	Serbest-AA (mg TE/100 g)	Bağlı -AA (mg TE/100 g)	AA Salınımı (%)
1	20	5	1,26	2,37	10,41	22,73	2,6	204,4	1,27
2	20	10	1,61	2,39	9,96	23,95	11,1	209,7	5,29
3	60	5	1,25	2,31	9,41	24,59	19,8	234,7	8,45
4	100	10	1,47	2,43	10,05	24,19	28,3	239,4	11,83
5	40	15	1,71	2,32	9,68	23,95	12,1	217,7	5,55
6	100	5	1,28	2,41	10,27	23,43	24,5	243,3	10,05
7	60	10	1,34	2,34	9,33	25,05	12,3	214,9	5,74
8	20	15	1,92	2,42	9,78	24,79	12,1	203,6	5,94
9	40	5	1,19	2,12	10,15	20,92	18,8	225,4	8,35
10	100	15	2,03	2,45	9,93	24,66	30,8	243,9	12,63
11	80	5	1,18	2,31	10,12	22,82	21,1	235,2	8,96
12	60	15	1,56	2,40	9,36	25,61	18,0	230,2	7,80
13	80	15	1,66	2,50	9,75	25,63	29,8	250,4	11,91
14	40	10	1,50	2,28	9,49	23,98	11,3	207,9	5,45
15	80	10	1,36	2,45	9,64	25,43	24,1	232,9	10,33

3.2.3.2 Mikrobiyal Biyoproses

- **Bakteriyel Suşların ve Mayanın Aktivasyonu**

YTÜ kültür koleksiyonuna ait *Levl. brevis* LABE 32, *Lacp. plantarum* LABE 29 ve *S. cerevisiae* TGM 55 fermentasyonda starter olarak kullanılmıştır. *Levl. brevis* LABE 32 ve *Lacp. plantarum* LABE 29 anaerobik koşullarda MRS agar (Merck, Almanya) üzerinde 37 °C'de 48 saat, *S. cerevisiae* TGM 55 ise sabouraud dextrose agar (Merck, Almanya) 30 °C'de 48 saat boyunca yetiştirilmiştir. Agar üzerindeki tek koloniler her bir mikroorganizma için uygun sıvı besiyerlerine (laktik asit bakterileri için MRS Broth, maya için Sabouraud Dextrose Broth) inoküle edilmiş, büyümenin üstel fazına ulaşıldıktan sonra (yaklaşık 12 saat) hücreler santrifüj edilerek geri kazanılmış ve steril şartlarda iki kez yıkanarak steril saf su ile yeniden süspanse edilmiştir. Özetle, fermentasyon süspansiyonu LAB ve maya süspansiyonlarının eşit hacimlerde (1:1, h/h) birleştirilmesiyle hazırlanmıştır.

- **Fermentasyon**

Buğday kepeği ve steril deiyonize su 1,0 g/7,5 mL oranında karıştırılmış ve kültürler LAB için yaklaşık 8 log kob g^{-1} ve maya için 7,5 log kob g^{-1} nihai hücre konsantrasyonu ile karışıma dahil edilmiştir. Mikrobiyal biyoproses (MB) yoluyla modifikasyon amacıyla buğday kepeklerine aşağıdaki kombine kültürler ile muamele edilmiştir:

  - **MB32:** *Levl. brevis* LABE 32 ve *S. cerevisiae* TGM 55
  - **MB29:** *Lacp. plantarum* LABE 29 ve *S. cerevisiae* TGM 55

Fermentasyon 30 °C'de 24 saat boyunca gerçekleştirilmiştir. Fermentasyonun ardından, kepekler 40 °C'de nihai nem yaklaşık %14 değerine ulaşıncaya dek kurutulmuş ve kepek karakterizasyonu yapılmıştır. Ayrıca her iki kültürel kombinasyon ile modifiye edilen kepek örnekleri kullanılarak üretilen ekmeklerde de kalite ve besinsel özellikler belirlenmiştir. Kepek örneklerinin fiziksel ve fonksiyonel özelliklerinde daha etkili modifiye edici etki sağlayan ve daha kaliteli ve besinsel değeri yüksek ekmekler üreten kültür kombinasyonu belirlenmiş ve hibrit modifikasyon (HM) işleminde söz konusu mikroorganizma kombinasyonu kullanılmıştır.

3.2.3.3 Hibrit Modifikasyon

Bu modifikasyon adımında, optimum ultrasonik koşullarda modifiye edilen buğday kepeğine "mikrobiyal biyoproses işlemi sonucu diyet lif içeriği, fitik asit miktarı ve fonksiyonel özellikler açısından daha ön plana çıkan kültür kombinasyonu" ile muamele edilerek hibrit modifikasyon (HM) işlemi gerçekleştirilmiştir.

3.2.4 Buğday Kepeklerine Uygulanan Analizler

3.2.4.1 Toplam su tutma kapasitesi

Mikrobiyal modifikasyon (MB), ultrases ile modifikasyon (UM), hibrit yöntem ile modifikasyon (HM) teknikleri kullanılarak modifiye edilmiş ve işlem görmemiş (kontrol) kepek örneklerinin su tutma kapasitesi Jacobs ve ark. [113] tarafından belirtilen metodun çalışmanın örneklerine uyarlanması ile belirlenmiştir. Çalışmalar üç paralel ve iki tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla kepek örneklerinden süspansiyon hazırlanarak (50 mL'lik falkon tüplerinde 1.0 g kepek/30 mL deiyonize su olacak şekilde) 150 rpm'de 30 dk çalkalama işlemi yapılmış, ardından tüpler 4000×g' de 10 dakika süresince santrifüj edilmiştir. Falkon tüpleri zemine 45° açıyla yerleştirilerek 10 dakika süzülmesi sağlanmış ve süpernatan kısım ayrılmıştır. Kalıntı tartılmış ve bir gece boyunca etüvde 90 °C'de kurutulmuştur. Kurutma sonrası tekrar tartım alınarak toplam su tutma kapasitesi çözünmeyen materyal tarafından tutuklanan su miktarı olarak aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır:

$$\mathrm{T-STK}\left(\frac{\mathrm{ml}}{\mathrm{g}}\right)=\frac{\mathrm{M_C}-\mathrm{M_D}}{\mathrm{M_D}} \tag{3.1}$$

M_C : Santrifüj sonrası kalıntı kütlesi

M_D : Kurutma sonrası kalıntı kütlesi

3.2.4.2 Güçlü Su Tutma Kapasitesi

Kepek örneklerinin güçlü su tutma kapasitesi, De Bondt ve ark. [60] tarafından kullanılan santrifüjleme metoduna göre belirlenmiştir. Çalışmalar üç paralel ve iki tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaç için spin kolon kullanılmıştır. 50 mg kepek örneği spin kolon içerisine tartılarak üzerine 700 µL saf su ilave edilmiş ve kepek süspansiyonu hazırlanmıştır. Hazırlanan kepek süspansiyonu, 15000×g'de 10 dakika santrifüj edilerek tartılmış 90 °C'de bir gece

boyunca kurutulmuştur. Güçlü su tutma kapasitesi, aşağıdaki formüle göre çözünmeyen materyal tarafından tutuklanan su miktarı cinsinden hesaplanmıştır:

$$G - STK\ (\frac{ml}{g}) = \frac{m_{centr} - m_{dry} - m_{column} * m_{filter}}{m_{dry}} \quad (3.2)$$

m_{centr} : santrifüjlemeden sonra kolondaki materyalin kütlesi

m_{dry} : kurutmadan sonra kolondaki materyalin kütlesi

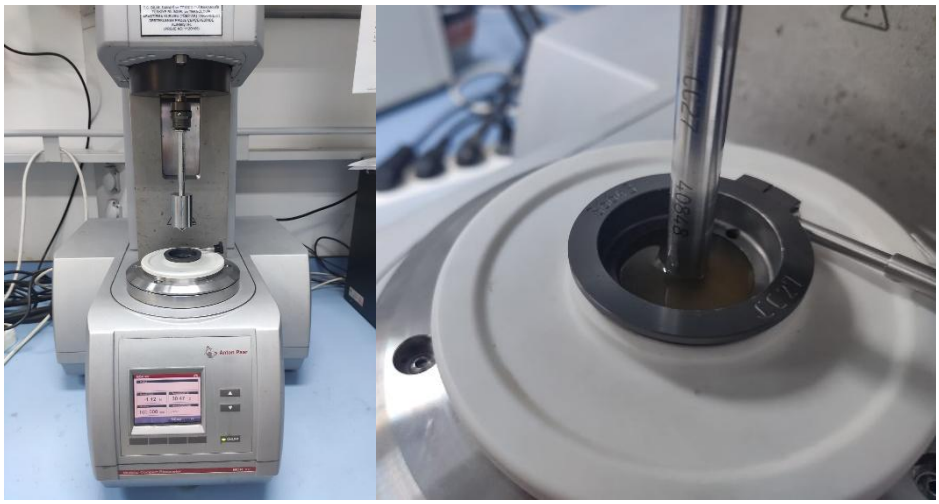
m_{column} : kolonun kütlesi

m_{filter} : filtre tarafından tutulan su kütlesi

3.2.4.3 Süspansiyon Viskozitesi (SV)

Kepek süspansiyonlarının viskozitesi, basınç ve gerinim kontrollü bir rotasyonel reometre (Anton Paar, MCR 302, Avusturya) kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla De Bondt ve ark. [60] tarafından kullanılan yöntem bu tez çalışmasının örneklerine uyarlanmıştır. Çalışmalar üç paralel ve iki tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiştir.

4 gram kepek numunesi ±0,01 gram hassasiyetle 50 ml'lik falkon tüplere tartılmış ve üzerine 30 mL deiyonize su eklenmiştir. 150 rpm'de 30 dakika çalkalama işlemi sonrası 4000×g de tüpler santrifüj edilmiş ve supernatan ile kalıntı ayrılmıştır. Supernatanın viskozitesi (süspansiyon viskozitesi, SV) sıcaklık kontrollü eşmerkezli silindirik DIN rotorlu bir sistem (Şekil 3.3) kullanılarak; 20 °C'de $10\ s^{-1} - 100\ s^{-1}$ arasında kayma hızının bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Sonuçlar farklı kesme hızlarında üç paralelin ortalama viskoziteleri şeklinde verilmiş, modifiye kepekler ve kontrol numunesi için belirgin fark 75 s^{-1}'de elde edilmiş ve ultrases tekniğinin optimizasyonunda söz konusu kayma hızı değerindeki viskozite değerleri kullanılmıştır.



Şekil 3.3 Kepek numunelerinin süspansiyon viskozitesinin ölçümü

3.2.4.4 Diyet Lifi

Kepek örneklerinin toplam besinsel lif, çözünür besinsel lif ve çözünmeyen besinsel lif miktarları, enzimatik-gravimetrik yöntem vasıtasıyla ticari olarak satılan bir besinsel lif analiz kiti (Sigma Aldrich, TDF-100A Total Dietary Fiber Assay Kit) kullanılarak AACCI Metot No: 32-07.01'e göre belirlenmiştir. Analiz sırasıyla aşağıdaki işlem adımlarını kapsamaktadır:

- 1 g örnek üzerine 40 ml fosfat tampon çözeltisi (pH 6.0, 24 °C'de) eklenmiştir.
- 10 µl α-amilaz ilave edilerek 95-100 °C'deki su banyosunda 15 dakika bekletilmiştir.
- Süre sonunda oda sıcaklığına soğutulan karışımların üzerine 10 ml 0.275 N NaOH eklenmiş (pH 7.5) ve fosfat tamponu içinde taze olarak hazırlanan 50 mg/ml proteaz konularak 60 °C'deki su banyosunda 30 dakika tutulmuştur.
- Su banyosundan alınan örnekler oda sıcaklığına soğutulduktan sonra 10 ml 0.325 M HCl çözeltisi (pH 4.0-4.6) eklenmiştir.
- Üzerlerine 100 µl amiloglukozidaz konulan örnekler tekrar 60 °C'deki su banyosunda 30 dakika bekletilmiştir.
- Süre sonunda filtrasyon yapılmış ve gooch krozelerine (40-100 µm por büyüklüğü) 70 °C'deki 10 ml su konularak kroze üzerinde kalan materyal yıkanmıştır.
- Krozeden geçen filtrat ve yıkama suyu üzerine 4 hacim %95'lik etil alkol (60 °C'de) ilave edilerek 1 saat çökelme gerçekleşmesi sağlanmıştır.

- Süreç sonunda filtrasyon uygulanarak, kroze üzerinde kalan kısım sırasıyla 3 kez 20 ml %78'lik etanol, 2 kez 10 ml %95'lik etanol ve 2 kez de 10 ml aseton ile yıkanmıştır.
- Hem çözünen lif hem de çözünmeyen lif bulunan krozeler 103 °C'deki etüvde kurutularak tartılmış, protein ve kül miktarları belirlenmiştir.
- Tortu ağırlığından protein ve kül miktarları çıkarılarak çözünen ve çözünmeyen diyet lif miktarları hesaplanmıştır.

3.2.4.5 Fitik Asit

Kepek örneklerinin fitik asit içeriği ticari olarak satılan fitik asit analiz kiti (Megazyme, ABD) kullanılarak AOAC Metot No: 986.11'e göre belirlenmiştir.

- **Örnek ekstraksiyonu**

1 gram örnek 75 ml hacimli bir cam beher içerisine tartılarak üzerine 20 ml 0.66 M HCl eklenmiş ve üç saat süresince manyetik bir karıştırıcı üzerinde kuvvetlice çalkalama yapılmıştır. Süre sonunda ekstraktlardan 1,0 ml alınarak 1,5'lik mikrosantrifüj tüpüne aktarılmış ve 13000 rpm de 10 dakika süresince santrifüj edilmiştir. Santrifüj sonunda 0,5 ml örnek yeni bir mikrosantrifüj tüpüne alınmıştır. Her örneğe 0,5 ml 0,75 M NaOH eklenerek nötralize edilmiştir. Nötralize örnekler enzimatik defosforilasyon aşamasında kullanılmıştır.

- **Enzimatik defosforilasyon**

Serbest fitik asit ve toplam fitik asit içeriği için ayrı ayrı olacak şekilde santrifüj tüplerine aşamalı olarak prosedürde belirtilen miktarlarda distile su, tampon çözelti, örnek ekstraktı ve fitaz enzimi eklenmiş, 40 °C'de 10 dakika inkübasyona bırakılmış ve ardından vortekslenmiştir. Yine serbest fitik asit ve toplam fitik asit içeriği için prosedürde listelendiği şekilde distile su, tampon çözeltisi ve alkalin fosfataz enzimi eklenmiş ve 40 °C'de 15 dakikalık inkübasyonun sonunda tüplere reaksiyonun durdurulması amacıyla 0,30 ml trikloroasetik asit eklenmiştir. Tüpler 13000 rpm de 10 dakika santrifüj edilmiş süpernatant kısım ayrılmıştır.

- **Fosforun kolorimetrik tanımlanması**

Yeni santrifüj tüplerine enzimatik defosforilasyon aşamasından elde edilen örnek ekstraktları ve fosfor standartlarından (analiz kiti prosedüründe belirtildiği şekilde hazırlanmış ve fosfor kalibrasyon eğrisinin hazırlanmasında kullanılmıştır)

1,0 ml alınarak, renk reaktifinden (analiz kiti prosedüründe belirtildiği şekilde hazırlanmıştır) 0,5 ml eklenmiştir. Vorteksle karıştırılıp 40 °C ye set edilmiş bir su banyosunda 1 saat süresince inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon sonunda örnekler vortekslenmiş ve 655 nm de absorbans ölçümü yapılmıştır.

3.2.4.6 Toplam (Serbest ve Bağlı) Fenolik Madde Miktarı ve Antioksidan Aktivitenin Tayini

Kepek numunelerinin fenolik madde içerikleri ve antioksidan aktiviteleri belirlenirken sırasıyla aşağıdaki işlem basamakları uygulanmıştır [114].

- **Örneklerden Yağın Uzaklaştırılması (Defatting)**

- Örneklere 1:5 (a/h) oranında hekzan eklenerek vorteksle karıştırılmıştır. 10 dakika boyunca çalkalayıcıda 200 rpm'de çalkalama yapıldıktan sonra 2500×g de 5 dakika santrifüj edilmiştir.
- Üstte kalan hekzan pipet yardımıyla alınarak yeniden hekzan eklenmiş ve işlem tekrar edilmiştir (toplam 3 kez).
- Yağı alınmış örnekler 12 saat boyunca çeker ocak altında kurutulmuştur.

- **Serbest Fenoliklerin Ekstraksiyonu**

- Ekstraksiyon işlemi için 0,5 g yağı alınmış örnek üzerine 5 ml aseton-su karışımı (1:1, h/h) eklenmiş, vorteksle karıştırılmış ve 1 saat boyunca çalkalayıcıda 200 rpm çalkalama hızında ekstrakte edilmiştir.
- Süre sonunda örnekler 2500×g de 10 dakika (+4°C) santrifüj edilmiş ve süpernatantlar (sıvı kısım) pipet yardımı ile alınarak bir falkon tüpüne alınmıştır.
- Bu işlemler 3 kez tekrarlanmıştır. İçinde serbest fenolikleri bulunduran süpernatantlar falkon tüpünde birleştirilmiş ve sonraki aşamaya kadar folyoya sarılı şekilde +4°C de bekletilmiştir.
- Pelet (katı kısım) etüve ağzı açık şekilde bırakılarak bir gece etüv kapalı şekilde bekletilmiştir.
- Süpernatantlardan çözücülerin uzaklaştırılabilmesi için rotary evaporatör kullanılmıştır (evaporatörün su banyosu sıcaklığı 40 °C, dönüş hızı 60 rpm ve basınç 65 mbar dır).
- Çözücülerin tamamen uzaklaştırılmasından sonra balonlara 2 ml metanol eklenerek serbest fenolik maddelerin çözünmesi sağlanmış (ağzı kapalı olarak

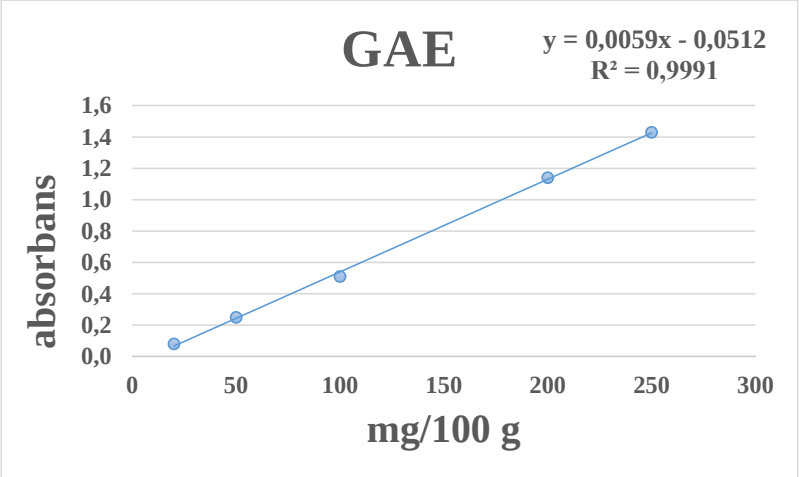
10 – 15 dakika beklenmiştir) ve amber renkli viallere alınmıştır. Bu ekstraktlar serbest fenolik madde miktarlarının ve serbest antioksidan aktivite değerlerinin belirlenmesinde kullanılmak üzere analizlere kadar -18 °C de saklanmıştır.

- **Bağlı Fenoliklerin Ekstraksiyonu**

- Santrifüj tüplerindeki kalıntı (pelet) üzerine 20 ml 2 N NaOH konularak 4 saat süresince çalkalayıcıda tutulmuş ve alkali hidroliz gerçekleştirilmiştir (200 rpm).
- Ardından 6M HCl kullanılarak pH 1,8 – 2,2 olacak şekilde ayarlanmıştır.
- Kalan serbest yağ asitlerinin uzaklaştırılabilmesi amacıyla 5 kez hekzan uygulaması yapılmıştır. Her seferinde 10 ml hekzan kullanılmış ve 10 dakika 200 rpm çalkalayıcı hızında çalkalama sonrası 10 dakika 2500×g de santrifüj edilmiştir. Her hekzan uygulaması sonrası bir pipet yardımıyla hekzan uzaklaştırılmıştır.
- Bağlı fenoliklerin ekstrakte edilebilmesi için 10 ml dietileter- etil asetat (1:1, h/h) eklenmiş, vorteksle karıştırılmış ve 15 dakika 200 rpm de çalkalama işleminin ardından 10 dakika boyunca 2500×g de santrifüj edilmiştir.
- Üstte kalan dietileter- etil asetat kısmı pipet yardımıyla alınmış, bir falkon tüpüne aktarılmıştır. Ekstraksiyon 6 kez tekrar edilmiş ve tüm dietileter- etil asetat fraksiyonları birleştirilmiştir.
- Toplanan süpernatantlar rotary evaporatörde kurutularak, 2 ml metanol içerisinde çözündürülmüş ve amber renkli viallere alınmıştır. Bu ekstraktlar bağlı fenolik madde miktarlarının ve bağlı antioksidan aktivite değerlerinin belirlenmesinde kullanılmak üzere analizlere kadar -18 °C de saklanmıştır.

- **Fenolik Madde Miktarının Belirlenmesi**

Fenolik madde miktarının belirlenmesi için 100 µl ekstrakt üzerine 500 µl Folin Ciocalteu çözeltisi ve 1,5 ml Na_2CO_3 (%20'lik) çözeltisi konulmuş, saf su ile hacim 10 ml'ye tamamlanarak 2 saat karanlıkta inkübasyona bırakılmıştır. Süre sonunda örnekler santrifüj edilerek (4000×g, 5 dk), bir UV- görünür spektrofotometre ile (Shimadzu UV-1800, Japonya) 765 nm'de köre karşılık gelen absorbans değerleri ölçülmüştür. Gallik asit standart kurvesinden absorbans değerlerine karşılık gelen fenolik madde miktarı belirlenerek, sonuçlar GAE mg/g olarak verilmiştir.



Şekil 3.4 Serbest ve bağlı fenolik madde miktarı tespiti için gallik asit cinsinden standart kalibrasyon eğrisi

- **DPPH (2,2-diphenyl-1-pcyrylhydrazyl) Yöntemi ile Antioksidan Aktivitenin Belirlenmesi**

Antioksidan aktivite değerlerinin belirlenmesi için 100 µl ekstrakt üzerine 3,9 ml DPPH çözeltisi (25 mg DPPH/1000 ml metanol) ilave edilerek 2 saat karanlıkta inkübasyona bırakılmış, inkübasyon sonunda 517 nm'de absorbans ölçülmüştür. Trolox standart kurvesinden absorbans değerlerine karşılık gelen antioksidan aktivite değerleri belirlenmiştir.

3.2.5 Ekmek Üretim Prosedürü

3.2.5.1 Ekmek Üretiminde Kullanılan Baz Unun Yaş Gluten, Kuru Gluten ve Gluten İndeksi Analizi

Tez çalışmasında ekmek üretiminde kullanılan baz unun yaş gluten, kuru gluten ve gluten indeks değerleri AACC Metot No: 38-12 ye göre belirlenmiştir. Un ve saf suyun karıştırılmasıyla elde edilen hamur, gluten yıkama cihazı (Glumatic System 2200, Perten, Huddinge, İsveç) kullanılarak tuzlu su çözeltisiyle yıkanmıştır. Elde edilen yaş gluten, gluten indeks cihazında (Gluten Index 2015, Perten, Huddinge, İsveç) santrifüj edilerek gluten indeks değeri hesaplanmıştır. Yaş gluten glutork cihazı (Glutork 2020, Perten, Huddinge, İsveç) kullanılarak kurutulmuş ve kuru gluten değeri belirlenmiştir.

3.2.5.2 Farinograf Analizleri

Ekmek üretiminde kullanılan baz unun, kepek ilaveli un karışımlarının farinogram özellikleri (su absorbsiyonu (%), hamur gelişme süresi (dk), yumuşama

derecesi (FU), hamur stabilite değeri (dk)) AACC Metot No:54-21 e göre Farinograf cihazı (Brabender Farinograph-TS, Almanya) kullanılarak test edilmiştir.

3.2.5.3 Ekmek Üretimi

Tez çalışmasının "kepek seçimi" aşamasında referans olarak üretilen kepek içermeyen ekmek (%100 rafine un kullanılarak elde edilmiştir), Tekirdağ çeşit kepek (TK) kullanılarak üretilen ekmek, Rumeli çeşit kepek (RK) kullanılarak üretilen ekmek ve modifiye kepekler kullanılarak üretilen ekmek çeşitleri olmak üzere, tez çalışmasının toplam yedi ekmek örneği bulunmaktadır. Numuneler, kullanılan un veya kepek türüne bağlı olarak tez sunumu boyunca aşağıdaki şekilde kodlanmıştır:

R-E : %100 rafine un kullanılarak üretilen, kepek içermeyen referans ekmek

TKC-E : İşlem görmemiş Tekirdağ çeşit kepek (TK) ile üretilen, modifiye edilmiş kepekler ile üretilen ekmeklerin referansı olan kontrol ekmeği.

RK-E : Rumeli çeşit kepek ile üretilen ekmek.

MB32-E : MB32 kodlu kepek ile üretilen ekmek.

MB29-E : MB29 kodlu kepek ile üretilen ekmek.

UM-E : UM kodlu kepekle üretilen ekmek.

HM-E : HM kodlu kepekle üretilen ekmek.

Ekmek yapımında AACCI Metot No: 10-10B yöntemi kullanılmıştır. Bu kapsamda, ekmek örneklerinin üretimi için ekmeklik buğday unu (baz un-Söke marka ticari un), ağırlıkça %15 oranında (15 g kepek + 85 g baz un şeklinde) kepek örnekleri ile paçal yapılmıştır. Ön çalışmalarda %20 ve %30 oranında kepek katkılı un paçallarının ekmek yapım özellikleri de incelenmiş, Farinograf analizlerinde tekrarlanabilir ve güvenilir sonuçlar elde edilemediği için çalışmaların tüm ekmek örnekleri için ağırlıkça %15 kepek oranı ile sürdürülmesine karar verilmiştir.

Ekmek hamurları aşağıdaki şekilde formüle edilmiştir:

- 100 gram rafine un (referans ekmek için) veya 100 gram %15 kepek içeren un-kepek karışımı (işlenmemiş kepek ile üretilen kontrol ekmeği ve modifiye kepek kullanılarak üretilen ekmekler için)
- 2 gram kuru maya
- 1,5 gram tuz
- Farinografta her bir karışım için belirlenen miktarda su

Yoğurma işlemi bir mikser (Öztiryakiler, Türkiye) kullanılarak her bir un karışımı için Farinografta belirlenen gelişme süresine göre gerçekleştirilmiştir. Şekillendirilen hamur daha sonra bir fermentasyon kabininde (Nuve TK 252, Ankara, Türkiye) %85 bağıl nem (RH) ve 30 °C'de fermentasyona tabi tutulmuştur. Birinci ve ikinci havalandırma 30 dakikalık aralıklarla uygulanmış ve bu sürenin sonunda, hamura şekil verilerek tavalara yerleştirilmiştir. Aynı fermentasyon koşulları (%85 nem, 30 °C) altında 55 dakika boyunca tekrar fermente edilmiştir. Pişirme işlemi 25 dakika 235 °C 'de taş tabanlı bir fırında (Fimak, Türkiye) yapılmıştır.

3.2.6 Ekmeklere Uygulanan Analizler

3.2.6.1 Spesifik hacim tayini

Ekmek örneklerinin hacimlerinin belirlenmesinde kolza tohumu yer değiştirme yöntemi kullanılmıştır (AACC Metot No: 10-05.01). Bu amaçla üretimden 2 saat sonra ölçüm alınmış ve sonuçlar iki paralelin ortalaması hesaplanarak verilmiştir.

3.2.6.2 Tekstür Profili Analizi (TPA)

Ekmek örneklerinin tekstürel özellikleri bir tekstür analiz cihazı (TA-XT Plus, Stable Micro Systems, UK) kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla 36 mm çapında bir alüminyum prob kullanılmıştır. Tekstür analizi için numuneler 1,25 cm kalınlığında kesilerek dilimlerin orta kısmından proba uygun bir kalıpla dairesel kesitler çıkarılmış ve 2 dilim üst üste gelecek şekilde cihaza yerleştirilmiştir. 5 kg'lık bir yük hücresi kullanılarak, 1,7 mm/saniyelik bir test hızında %30 sıkıştırma için gereken kuvvet (N) ölçülmüştür. Tez çalışmasının modifiye edilmek üzere seçilecek buğday kepeğinin belirlenmesi aşamasında tekstürel özellikler

5 depolama günü süresi boyunca takip edilmiş ve pişme sonrası 2. saatin sonunda (0. Gün), 1. gün, 3. gün ve 5. gün ölçümler alınmıştır.

3.2.6.3 Renk Analizi

Ekmek numunelerinin kabuk ve iç kesit renk değerleri, otomatik bir renk analiz cihazı (CR-400 Konica Minolta Sensing, Inc., Osaka, Japonya) kullanılarak L∗, a∗ ve b∗ cinsinden ifade edilmiştir. ΔE (toplam renk değişimi) değeri Eşitlik 3.3 e göre hesaplanmıştır. Hem kabuk hem de ekmek içi için dört tekrarlı ölçüm alınarak sonuçların ortalamaları verilmiştir.

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_{ref})^2 + (a - a_{ref})^2 + (b - b_{ref})^2} \quad (3.3)$$

3.2.6.4 Diyet Lifi Miktarının Tayini

Ekmek örneklerinde diyet lifi analizi, AACCI Yöntem No: 32 07.01'e göre, ticari olarak satılan diyet lifi analiz kitleri kullanılarak, buğday kepeği örneklerinde olduğu gibi (Bölüm 3.2.4.4) enzimatik gravimetrik yöntem ile gerçekleştirilmiştir.

3.2.6.5 Fitik Asit Miktarının Tayini

Ekmek örneklerinin fitik asit içeriği ticari olarak satılan fitik asit analiz kiti (Megazyme, ABD) kullanılarak AOAC Metot No: 986.11'e göre Bölüm 3.2.4.5de belirtildiği şekilde belirlenmiştir.

3.2.6.6 Toplam Fenolik İçerik ve Antioksidan Aktivitenin Tayini

Ekmek örneklerinin fenolik madde içerikleri ve antioksidan aktiviteleri belirlenirken Bölüm 3.2.4.6'da verilen yöntem kullanılmıştır.

3.2.7 İstatistiksel Analiz

Tez çalışmasının ultrasonik modifikasyon adımının optimizasyonunda, değişkenlerin ana etkileri ve etkileşimlerinin önem düzeyi ANOVA yöntemiyle değerlendirilmiş ve anlamlılık düzeyi için p-değeri eşiği 0,05 olarak belirlenmiştir. Modelin uyumu, Design Expert V. 13.0.5.0 yazılımı kullanılarak R^2 katsayısı ve Fisher'ın F-testi ile doğrulanmıştır. Şekiller, OpenAI'nin ChatGPT yapay zeka modeli aracılığıyla oluşturulmuştur. Çalışmada gerçekleştirilen diğer tüm analizler SPSS versiyon 24.0 yazılımı kullanılarak yapılmış ve farklı buğday kepekleri ile ekmek örnekleri arasındaki anlamlı farklılıklar, Duncan'ın çoklu karşılaştırma testi ile belirlenmiştir ($p<0,05$).

4
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının ilk aşamasında, Türkiye'nin Trakya Bölgesi'nde ıslah çalışmaları sonucunda yetiştirilen kışlık ekmeklik buğday çeşitlerinden Tekirdağ ve Rumeli buğdaylarının kalite özellikleri değerlendirilmiştir. Bu buğdaylardan, laboratuvar tipi bir değirmende öğütülerek elde edilen kepek örnekleri, tez kapsamında odaklanılan çeşitli özellikler (besinsel özellikler, hidrasyon özellikleri, antioksidan kapasite vb.) açısından incelenmiştir. Ayrıca, bu kepeklerin kullanımıyla üretilen ekmeklerin kalite ve besinsel özellikleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, tez çalışmasının sonraki aşamasında (buğday kepeği modifikasyonu) kullanılacak buğday kepeği çeşidine karar verilmiştir.

Seçilen buğday kepeği üzerinde iki farklı teknik kullanılarak modifikasyon gerçekleştirilmiştir: mikrobiyal biyoproses (MB) ve ultrasonik modifikasyon (UM). Bunun yanı sıra, bu iki teknik birleştirilerek hibrit modifikasyon (HM) ile kombine etkiler incelenmiştir. Modifiye edilmiş kepeklerle üretilen ekmeklerin kalite ve besinsel özellikleri karşılaştırılarak, kepek modifikasyonunun ekmek gibi bir fırıncılık ürünü üzerindeki etkileri de değerlendirilmiştir. Tüm bu çalışmalar ve elde edilen sonuçlar sistematik bir şekilde sunulmuştur.

4.1 Buğday Kepeğinin Seçimine Yönelik Araştırma Sonuçları

4.1.1 Buğday Örneklerinin Kalite Analizleri

Çalışmanın bu bölümünde Tekirdağ ve Rumeli buğday çeşitlerinin bin tane ağırlığı (g), hektolitre ağırlığı (kg), protein ve gluten içeriği (%), gluten indeksi ve Zeleny sedimentasyon değeri (mL) analiz edilmiştir. Edirne'de üç yıl boyunca aynı lokasyonlardan alınan buğday örneklerinin kalite parametreleri değerlendirilmiş ve minimum, maksimum ile ortalama değerler Tablo 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.1 Edirne'de 2019, 2020 ve 2021 yıllarında aynı deneme ve iklim koşulları altında iki farklı lokasyondan alınan buğday örneklerinin kalite sonuçları

Çeşit	Bin Tane Ağırlığı BDA (g) (>35)			Hektolitre Ağırlığı HA (kg) (>77)			Protein (%) (10,5-12) (>12)			Gluten (%) (20-27) (>27)			Gluten indeks % 50 - 85 (60 - 90)			Zeleny Sedimentasyon değeri >25 mL (>36 mL çok iyi)		
	Min.	Maks.	Ort±ss	Min.	Maks.	Ort±ss	Min.	Maks.	Ort±ss	Min.	Maks.	Ort±ss	Min.	Maks.	Ort±ss	Min.	Maks.	Ort±ss
Tekirdağ çeşidi buğday	37,7	46,7	41,0±4,9[a]	76,4	80,4	78,6±2,0[a]	11,2	11,8	11,5±0,3[a]	33,8	38,2	35,9±2,2[a]	46,8	66,9	59,6±11,1[b]	41,0	54,0	45,7±7,2[b]
Rumeli çeşidi buğday	32,3	39,5	36,8±3,9[a]	79,5	83,9	81,2±2,36[a]	12,2	14,5	13,1±1,2[a]	33,9	40,7	36,9±3,5[a]	91,8	97,5	94,1±3,0[a]	64,0	71,0	68,0±3,6[a]

Bin tane ağırlığı (BDA) buğdayda 1000 tanenin ağırlığını temsil eden kritik bir verim bileşeni olup, tahıl verimi ve kalitesinin önemli bir belirleyicisidir [115]. BDA'nın genetik ve çevresel faktörlerle önemli ölçüde etkileşim içinde olduğu belirtilmektedir [116]. Bunun yanı sıra, buğdaydaki çözünür karbonhidratlar ve nişasta gibi bileşenlerle de ilişkili olduğu rapor edilmiştir [117]. Tez çalışmasının incelenen iki buğday örneği, aynı lokasyonda ve iklim koşullarında yetiştirilmiş olup, farklı çeşitlere ait olmalarına rağmen BDA değerleri açısından anlamlı bir fark göstermemiştir. 2024 yılında Edirne'de ıslah edilen beş farklı buğday çeşidi üzerinde yapılan bir çalışmada, yedi farklı çevresel koşul test edilmiş ve çeşitlerin BDA değerlerinin 39,7–45,8 g arasında değiştiği rapor edilmiştir. Aynı çalışmada, BDA değerlerindeki varyasyonların %70,9'unun çevresel etkilerden, yalnızca %3,46'sının ise genotipik farklılıklardan kaynaklandığı bildirilmiştir [118].

Hektolitre ağırlığı (HA), standart bir hacimdeki tahılın ağırlığı olarak tanımlanır. Aynı zamanda yığın yoğunluğunu ölçmek için kullanılan bir parametredir. Buğdayın un verimi hakkında bilgi sunması ve taşıma ile depolama verimliliğini etkilemesi nedeniyle buğday için kritik bir özellik olarak kabul edilir [119]. HA'nın, kantitatif bir kalıtsal özellik olduğu ve hem genotip hem de dane dolum döneminde toprak tipi, yağış ve sıcaklık gibi çevresel faktörlerden etkilendiği rapor edilmiştir [120]. Çalışmada incelenen Tekirdağ ve Rumeli buğday çeşitlerinin üç yılın ortalamaları bazında HA değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır. Ancak Rumeli çeşidinin, her periyodik yılda Tekirdağ çeşidine kıyasla yaklaşık %4 daha yüksek HA değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Her iki buğday çeşidinin de HA değerlerinin kabul edilebilir aralıkta olduğu değerlendirilmiştir (Tablo 4.1).

Buğdaydaki protein içeriği, diğer kalite özelliklerinde olduğu gibi hem genetik çeşitliliğe hem de çevresel koşullara bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Araştırmalar, buğdayların protein oranlarının %6 ile %20 arasında değişebildiğini rapor etmektedir [121]. Protein içeriği ve kalitesi, özellikle stres toleransı ve yüksek verim hedefleyen ıslah programlarından da etkilenmektedir [122]. Ayrıca coğrafi konum da buğday protein miktarı ve bileşimi üzerine etkilidir. Türkiye'deki ekmeklik buğday çeşitleri üzerine yapılan bazı araştırmalar, protein oranlarını %10,63 ile %15,30 arasında rapor etmiştir [123, 124]. Öztürk [118] ise Edirne'de ıslah edilen beş farklı buğday çeşidinin protein miktarını %11,0 ile %12,9

arasında bildirmiştir. Protein içeriği, gluten içeriği, sedimentasyon hacmi ve pişirme kalitesi gibi diğer kalite özellikleriyle yakından ilişkilidir. Ayrıca, yüksek protein içeriğinin genellikle daha iyi pişirme kalitesi ve daha yüksek gluten içeriği ile bağlantılı olduğu vurgulanmaktadır [125]. Bu çalışmada incelenen her iki buğday çeşidinin protein değerleri, literatürde bildirilen sonuçlarla uyumlu bulunmuş olup, çeşitler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmemiştir.

Gluten, buğdaydaki birincil protein bileşenidir ve ekmek yapımı ile diğer fırıncılık ürünleri için gerekli olan hamurun benzersiz viskoelastik özelliklerinden sorumludur [126]. Gluten indeksi ise gluten proteinlerini oluşturan gliadinlerin gluteninlere oranından etkilenen bir ölçüt olup, gluten kalitesini ve gücünü değerlendirmede kullanılır. Dengeli bir gliadin-glutenin oranı, optimum ekmek yapım performansı için gereklidir [127]. Gluten indeksinin ekmek spesifik hacmi ile pozitif, hamur gelişim süresi ve stabilitesi ile ise negatif ilişkili olduğu rapor edilmiştir [127, 128]. Tez çalışmasında, Tekirdağ ve Rumeli buğday çeşitlerinin gluten miktarları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmazken, Rumeli çeşidinin gluten indeksi değerinin belirgin şekilde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Sedimentasyon değeri, buğday kalitesini değerlendirmede önemli bir parametredir. Değerlendirmeye göre, 36 ml'den yüksek sedimentasyon değerine sahip buğdaylar "çok iyi", 25–36 ml aralığındaki buğdaylar "iyi", 16–24 ml aralığındakiler "kötü", 15 ml'den düşük olanlar ise "çok kötü" gluten kalitesine sahip olarak sınıflandırılmaktadır [129]. Tez çalışmasının buğday çeşitleri arasında sedimentasyon değeri açısından istatistiksel olarak anlamlı farklar tespit edilmiştir (Tablo 4.1). Bununla birlikte, her iki buğday çeşidi de Elgün ve ark. [129] tarafından belirlenen sınıflamaya göre sedimentasyon değeri açısından "çok iyi" gluten kalitesine sahip olarak değerlendirilmiştir. Tez çalışmasının buğday örneklerinin sedimentasyon değerleri, Öztürk [118] tarafından Edirne'de ıslah edilen beş farklı buğday çeşidi için rapor edilen sedimentasyon değerleri ile uyumludur. Sonuç olarak, literatürde yer alan veriler ve bu çalışmada elde edilen bulgular doğrultusunda, Tekirdağ ve Rumeli buğday çeşitlerinin iyi bir ekmek yapım potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmiştir.

4.1.2 Buğday Kepeklerinin Kimyasal Kompozisyonu

Buğday kepeklerinin kimyasal ve besinsel bileşimi, buğdayın işlendiği üretim hattındaki farklılıklar ile yetiştirme koşulları ve çevresel faktörlerden kaynaklı olarak değişiklik göstermektedir [34, 130]. Ayrıca, kepek katmanları arasındaki kimyasal bileşenlerin farklı dağılımı, bu bileşimde etkili olan önemli bir değişken olarak ifade edilmiştir [2].

Tekirdağ ve Rumeli buğday kepeklerinin kimyasal analiz sonuçları Tablo 4.2'de sunulmuştur. Her iki buğday kepeği çeşidinin nem ve protein içerikleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır. Ancak kül ve yağ içerikleri bakımından çeşitler arasında belirgin farklılıklar tespit edilmiştir. Rumeli çeşidi kepeğin (RK) kül içeriği, Tekirdağ çeşidi kepeğe (TK) kıyasla önemli derecede daha yüksek bulunmuştur (Tablo 4.2). Buğday kepeğindeki kül içeriği, mineral miktarının bir göstergesi olup, hamur mukavemeti ile pozitif bir korelasyon göstermektedir. Daha yüksek kül içeriği, hamurun yapısal bütünlüğünü artırabilir [131]. Ayrıca, kül içeriğinin artışı, hamur gelişim süresi ve ekmek hacmini etkileyen artan su tutma kapasitesi ile ilişkilendirilmiştir [34]. Literatür bilgilerinden yola çıkarak, RK'nin daha yüksek kül içeriği nedeniyle daha yüksek mineral miktarına sahip olduğu değerlendirilebilir. Ancak, yüksek kül içeriğinin artan su absorpsiyonu ve daha uzun yoğurma süreleri nedeniyle hamurun işlenmesini zorlaştırabileceği ve pişirme işlemlerinin verimliliğini olumsuz etkileyebileceği de rapor edilmiştir [132]. Bu durum, yüksek kül içeriğine sahip kepeklerin ekmek formülasyonuna eklenmesi konusunda dikkatli bir değerlendirme yapılmasını gerektirmektedir.

TK'nin yağ ve fitik asit içeriği, RK'ye kıyasla daha yüksek bulunurken, toplam diyet lifi (TDF) içeriği RK'de daha yüksek tespit edilmiştir ($p<0,05$). Tez çalışmasının kepek örnekleri için elde edilen kül ve yağ içerikleri, Hossain ve ark. [130] altı farklı buğday kepeği üzerinde yaptığı çalışmada rapor edilen kül (%3,31–5,41) ve yağ (%2,35–4,08) değer aralıkları ile uyum göstermektedir. Buğday kepeğindeki daha yüksek yağ içeriği, öğütme sürecinde daha fazla aleurone tabakası ve/veya ruşeym kontaminasyonu içerdiğini gösterebilir [133]. Ayrıca, Hemdane ve arkadaşlarının (2015) değirmencilik yan ürünlerinin kimyasal bileşimlerini inceleyen çalışmasında, farklı kaba kepekler arasında protein içerikleri açısından önemli bir farklılık tespit edilmemiştir. Bu durum, protein

içeriğinin diğer kimyasal bileşenlerle veya kepek özellikleriyle ilişkili olmamasından kaynaklanabileceği şeklinde açıklanmıştır.

Tablo 4.2 Tekirdağ ve Rumeli buğday kepeklerine ait kimyasal analiz sonuçları

Analiz / Çeşit	TK	RK
Nem (%)	12,15±0,93[a]	12,14±0,93[a]
Kül (%)	4,66±0,24[b]	5,59±0,28[a]
Protein (%)	15,10±1,38[a]	15,70±1,43[a]
Yağ (%)	4,69±0,33[a]	3,47±0,25[b]
SDF (%)	3,26±0,09[a]	2,60±0,02[b]
IDF (%)	41,04±0,21[b]	45,89±0,05[a]
TDF (%)	44,29±0,31[b]	48,49±0,03[a]
Fitik Asit (g/100 g)	2,72±0,02[a]	2,31±0,05[b]

Veriler üç tekrarın ortalama ± standart sapması olarak ifade edilmiştir. Aynı satırda farklı küçük harflere sahip ortalamalar, buğday kepeği çeşitleri için önemli farklılıkları ($p < 0,05$) göstermektedir. TK: Tekirdağ buğday kepeği; RK: Rumeli buğday kepeği; SDF: Çözünür diyet lifi; IDF: Çözünmez diyet lifi; TDF: Toplam diyet lifi.

Tablo 4.2, diyet lifinin buğday kepeği içerisindeki diğer bileşenlere kıyasla en yüksek seviyeye sahip bileşen olduğunu göstermektedir. Çözünür diyet lifi (SDF), kan glikoz tepkisini düzenlemek ve kolesterol seviyelerini düşürmek gibi önemli fizyolojik işlevlere sahiptir [23]. Öte yandan, çözünmez diyet lifi (IDF), bağırsak düzenliliği sağlanması ve gastrointestinal sağlığın iyileştirilmesi ile ilişkilidir [134]. Bununla birlikte, bazı çalışmalar, SDF'nin IDF'ye kıyasla daha yüksek antioksidan kapasiteye ve radikal süpürme yeteneklerine sahip olduğunu ve bu nedenle daha yüksek fizyolojik aktivite gösterdiğini bildirmektedir [135, 136]. Tez çalışmamızda, TK'nin SDF içeriği daha yüksek bulunurken; RK, IDF açısından daha üstün tespit edilmiştir. Toplam diyet lifi (TDF) içeriği ise Rumeli çeşidinde (RK) daha yüksek olarak saptanmıştır (Tablo 4.2). Sharanappa ve arkadaşları, sekiz buğday kepeği çeşidinde yürüttükleri çalışmalarında; SDF içeriğinin %3,96 - %7,92; IDF içeriğinin %17,8 - %44,5; TDF içeriğinin %21,74 - %52,47 arasında değiştiğini tespit ederek genotipik farklılıkların diyet lifi üzerindeki etkisini açıkça göstermişlerdir [137]. Seyer ve Gélinas [138] dört farklı buğday çeşidinin

kepeklerinde çözünebilir ve çözünmez diyet liflerini incelemiş ve IDF için %37,6–46,2, SDF için %5,2–6,0, TDF için ise %43,6–51,7 aralığını rapor etmiştir. Başka bir çalışmada, buğday kepeğinin ağırlıkça %36,5-52,4 oranında toplam diyet lifi içerebileceği belirtilmiştir [139]. Yukarıda özetlenen literatür bilgileri, diyet lifi kompozisyonunun ve miktarının, buğday kepeğinin elde edildiği buğday çeşidine bağlı olarak önemli ölçüde değişebileceğini göstermektedir.

Fitik asit, tahıl yan ürünlerinde bulunan bitki bazlı bir anti-besinsel bileşen olup, kalsiyum, magnezyum, çinko, bakır ve demir gibi bazı minerallerin biyoyararlanımını azaltan güçlü bir şelatlama aktivitesine sahiptir [140]. Bu bakımdan gıdaların içerdiği fitik asit miktarının düşük olması arzu edilmekte, fitik asit içeriği yüksek olan gıdalarda ise bu bileşenin miktarı çeşitli yöntemlerle azaltılmaya çalışılmaktadır. Bununla birlikte, fitik asidin antimikrobiyal ve antioksidan aktivite gibi faydalı etkileri de rapor edilmiştir [141]. Çalışmamızda, Tekirdağ buğday kepeğinin (TK), Rumeli çeşidine (RK) kıyasla daha yüksek miktarda fitik asit içerdiği tespit edilmiştir (Tablo 4.2). García-Estepa ve ark. [142], dokuz ticari markadan elde edilen buğday kepeklerinin fitik asit içeriklerinin geniş bir aralıkta (%2,5–5,8) değiştiğini ve bu farklılıkların kullanılan buğday çeşitlerinden kaynaklandığını bildirmiştir. TK'nin fitik asit içeriği, bu çalışmada bildirilen aralıklarla uyum göstermektedir. Fitik asit içeriği sadece genetik çeşitlilikle sınırlı kalmayıp, çevresel faktörler ve lokasyon [143], kepek partikül boyutu [144] ve öğütme parametreleri de [145] gibi faktörlerden de etkilenmektedir. Bu durum, fitik asit seviyelerindeki çeşitliliklerin sadece genotipe değil, aynı zamanda çevresel koşullara ve işleme yöntemlerine de bağlı olduğunu göstermektedir.

4.1.3 Buğday Kepeklerinin Fonksiyonel Özellikleri

Tablo 4.3'te Tekirdağ ve Rumeli kepek çeşitlerinin bazı fonksiyonel özellikleri, Şekil 4.1'de ise buğday kepeği süspansiyonlarının 10-100 s^{-1} aralığındaki tipik viskozite-kayma hızı grafiği verilmiştir.

Dış bir kuvvete maruz bırakıldığında, hidratlanmış lifin bağladığı su miktarı su tutma kapasitesi (STK) olarak tanımlanır. Buğday kepeklerinin su tutma kapasitesi, hücre duvarı nano gözeneklerinde hidrojen bağları yoluyla güçlü bir şekilde bağlanan suya (güçlü su tutma kapasitesi, G-STK) veya mikro gözeneklerde ya da partiküller arasında zayıf bir şekilde bağlanan suya (toplam su tutma kapasitesi, T-STK) atfedilmektedir [113]. Güçlü su tutma kapasitesi (aynı zamanda güçlü su bağlama kapasitesi olarak da adlandırılmaktadır), kepeğin sulu süspansiyonuna bir santrifüj kuvveti uygulandıktan sonra kepeğe bağlı kalan ve kepek-su temasının engellenmesi durumunda yapıya bağlı halde kalmaya devam eden su miktarı olarak tanımlanır [146, 147].

Tablo 4.3 Buğday kepeklerinin fonksiyonel özellikleri

Özellik / Çeşit	T-STK (ml/g)	G-STK (ml/g)	SV (mPa.s)	Ekstrakte edilebilirlik (%)
TK	3,82±0,08^{b}	1,152±0,015^{b}	1,57±0,05^{b}	17,8±0,9^{b}
RK	4,38±0,16^{a}	1,337±0,013^{a}	2,11±0,27^{a}	20,8±0,4^{a}

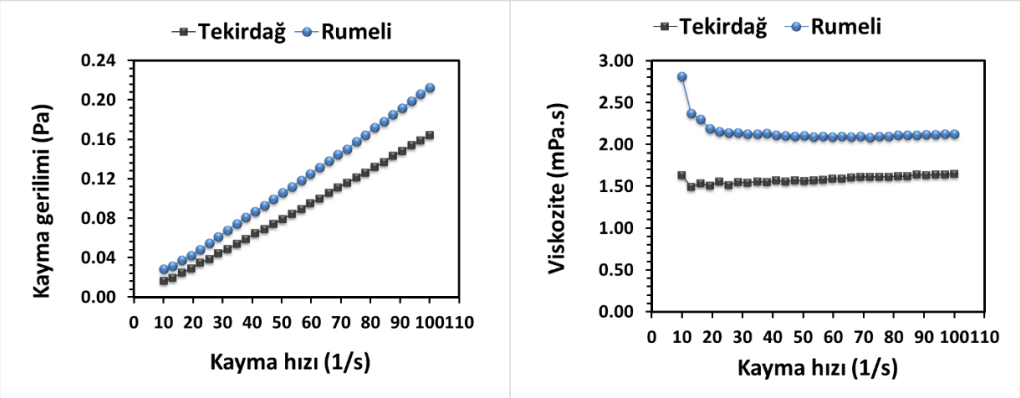
Sonuçlar üç tekrarın ortalama ± standart sapması olarak ifade edilmiştir. Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip ortalamalar, buğday kepekleri için önemli farklılıkları ($p<0,05$) göstermektedir. TK: Tekirdağ buğday kepeği; RK: Rumeli buğday kepeği T-STK: Toplam su tutma kapasitesi; G-STK: Güçlü su tutma kapasitesi; SV: 50 s^{-1} kayma hızında süspansiyon viskozitesi

Yüksek STK, kepeğin gıda sistemlerine dahil edilmesinde tekno-fonksiyonel bir zorluk olarak kabul edilmektedir [60]. Çalışmamızda, RK'nin istatistiksel olarak anlamlı derecede daha yüksek T-STK ve G-STK değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Daha yüksek G-STK, hidrojen köprüleri yoluyla daha fazla su bağlama kapasitesine bağlanabilir. Cai ve ark. [34] tarafından yapılan bir çalışmada, STK ile IDF ve TDF arasında pozitif bir korelasyon olduğu rapor edilmiştir. Bu çalışmayı destekler şekilde, Rumeli buğday kepeğinin (RK) daha yüksek IDF ve TDF içeriği (Tablo 4.2), Tablo 4.3'te gösterildiği gibi daha yüksek STK değerlerine sebep olmuştur.

Buğday kepeğinin ekstrakte edilebilirlik değeri, tekno-fonksiyonel, fizyolojik ve besinsel özellikler açısından önemli bir kriterdir. Çalışmamızda, Rumeli çeşidinin (RK) Tekirdağ çeşidine (TK) kıyasla daha yüksek ekstrakte edilebilirlik değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, RK'nin suda daha yüksek miktarda ekstrakte edilebilir bileşen içerdiğini göstermektedir [60, 113].

Buğday kepeği süspansiyonlarının viskozitesi, gıda sistemlerine entegrasyon açısından kritik bir parametredir. Hamur viskozitesini etkileme potansiyeli nedeniyle, bu parametrenin, formülasyonlara eklenecek kepek miktarlarının belirlenmesinde önemli bir rol oynayabileceği belirtilmektedir [60]. Daha yüksek viskozite değerleri, daha fazla çözünür molekül ve daha yüksek ekstrakte edilebilirlik ile ilişkilendirilmektedir [148]. Ayrıca bu parametre literatürde sıklıkla bir modifikasyon sonrası yapı bozulması ve moleküllerin çözünür hale getirilmesinin bir göstergesi olarak kullanılmıştır [148]. Şekil 4.1'de sunulan kayma gerilimi-kayma hızı ve viskozite-kayma hızı grafikleri, TK ve RK için karakteristik akış davranışlarını ortaya koymaktadır. Kayma gerilimi ile kayma hızı arasındaki doğrusal ilişki, her iki numunenin de Newtonian akışkan özelliğine yakın bir davranış sergilediğini göstermektedir. Ancak viskozite-kayma hızı grafiğinde, özellikle RK'de başlangıçta belirgin bir düşüş gözlenmekte, ardından viskozitenin sabit bir seviyeye yaklaştığı görülmektedir. Bu durum, kesme incelmesi (shear-thinning) eğilimli bir akış karakteristiğine işaret edebilir. İki buğday kepeği süspansiyonunun 25 s^{-1} ve üzeri kayma hızlarında viskozite değerleri (SV) açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar gösterdiği görülmektedir. RK'nin, 50 s^{-1} kayma hızında daha yüksek SV değerine sahip olduğu belirlenmiştir (Tablo 4.3). Bu durum, daha yüksek ekstrakte edilebilirlik değerinden kaynaklanıyor olabilir. Literatürdeki çalışmalar da bu iki değişken arasında pozitif bir korelasyon olduğunu ortaya koymaktadır [60, 148, 149].

Sonuç olarak Tekirdağ ve Rumeli buğday kepeklerinin su tutma kapasitesi, ekstrakte edilebilirlik ve viskozite gibi fonksiyonel özellikleri, farklı kompozisyonları doğrultusunda belirgin farklılıklar sergilemiştir. Ancak, bu özellikler, kepeklerin kullanım amacına ve gıda formülasyonlarındaki rolüne bağlı olarak avantaj veya dezavantaj oluşturabilmektedir.



Şekil 4.1 Tekirdağ ve Rumeli buğday kepeği süspansiyonlarının tipik viskozite grafikleri

4.1.4 Buğday Kepeklerinin Toplam Fenolik İçeriği ve Antioksidan Aktivitesi

Fenolik bileşikler, bitkisel kaynaklı gıdalarda bulunan başlıca ikincil metabolitlerdir ve buğday tanesinde önemli miktarda yer almaktadır [150]. Buğdaydaki fenolik bileşiklerin büyük bir kısmı kepekte yoğunlaşmış olup, kepekteki fenolik asitlerin önemli bir bölümü bağlı formda bulunmaktadır. Ayrıca, bu bileşiklerin miktarı ve formu, buğdayın genetik kökenine bağlı olarak önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Tablo 4.4, Tekirdağ ve Rumeli buğday çeşitlerinden elde edilen kepeklere ait fenolik içerik ve antioksidan aktivite değerlerini göstermektedir.

Bağlı fenolik içerik (BF) açısından buğday kepekleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark gözlenmemiştir ($p>0,05$). Ancak, RK daha yüksek toplam fenolik içerik (TF) ve serbest fenolik içerik (SF) değerleri göstermiştir. Rumeli çeşit kepeğin (RK) daha yüksek TF değerinin, daha yüksek ekstrakte edilebilirlik değeri ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir (Tablo 4.3). Bağlı fenolik bileşiklerin miktarı, serbest fenoliklere kıyasla Tekirdağ kepeğinde (TK) 2,8 kat, Rumeli kepeğinde (RK) ise 2,0 kat daha yüksek bulunmuştur. Bağlı fenoliklerin, hücre duvarı bileşenleri ile birlikte üst gastrointestinal sindirimden kaçınabildikleri ve bağırsak mikroorganizmasının sindirimi sırasında emildikleri için sağlığı daha etkili bir şekilde iyileştirdiği düşünülmektedir [151]. Ayrıca, bu tez çalışmasında elde edilen toplam fenolik içerik değerleri, literatürde sunulan buğday kepeği fenolik içerik sonuçlarına kıyasla [150, 152, 153] daha yüksek bulunmuştur.

Tablo 4.4 Buğday kepeklerinin fenolik içerik ve antioksidan özellikleri

Özellik / Çeşit	SF (µg GAE/g)	BF (µg GAE/g)	TF (µg GAE/g)	Serbest-AA (mg TE/100 g)	Bağlı-AA (mg TE/100 g)
TK	2216,89±22,03^{b}	6152,82±421,23^{a}	8370,34±425,55^{b}	51,05±1,89^{b}	174,76±6,59^{b}
RK	2855,34±82,00^{a}	5796,79±461,50^{a}	8652,14±379,51^{a}	74,28±3,52^{a}	233,95±2,51^{a}

Sonuçlar üç tekrarın ortalama ± standart sapması olarak ifade edilmiştir. Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip ortalamalar, buğday kepekleri için önemli farklılıkları ($p<0,05$) göstermektedir. TK: Tekirdağ buğday kepeği; RK: Rumeli buğday kepeği; SF: Serbest fenolik madde miktarı; BF: Bağlı fenolik madde miktarı; TF: Toplam fenolik madde miktarı; Serbest-AA: Serbest fenolik ekstraktlarının DPPH radikali süpürme aktivitesi; Bağlı-AA: Bağlı fenolik ekstraktlarının DPPH radikali süpürme aktivitesi

Verma ve ark. [150] Batı Kanada'dan 51 buğday çeşidinin kepeğini kapsamlı bir şekilde incelemiş ve toplam fenolik içerik (TF) değerlerinin 3406,4 ± 32,3 ile 6702,7 ± 19,6 µg GAE/g arasında değiştiğini bildirmiştir. Lin ve ark. [152] ise Çin kökenli 12 farklı buğday çeşidinin kepeklerinde toplam fenolik içerik değerlerinin yaklaşık 4470,37 ile 5521,30 µg GAE/g arasında olduğunu rapor etmiştir. Bu farklılıkların, genetik çeşitlilikten ve yetiştirme koşulları gibi faktörlerden etkilendiği belirtilmiştir [153].

DPPH yöntemiyle belirlenen antioksidan aktiviteler açısından, RK hem serbest hem de bağlı formda Tekirdağ çeşidine göre anlamlı derecede daha yüksek antioksidan aktivite göstermiştir ($p<0,05$). Buğday kepeklerinin serbest fenolik (SF) içerikleri ile serbest antioksidan aktivite (serbest-AA) değerleri benzer bir eğilim sergilerken, bağlı fenolik (BF) içerikleri ile bağlı antioksidan aktivite (bağlı-AA) değerleri aynı eğilimi göstermemiştir. BF miktarları açısından iki buğday kepeği arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamasına rağmen, RK'nin bağlı-AA değerinin TK'ye kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Tablo 4.4). Benzer bir gözlem, farklı partikül boyutlarına sahip buğday kepeklerini inceleyen Brewer ve ark. [154] tarafından da rapor edilmiştir. Lu ve ark. [155], fenolik madde miktarı ile antioksidan aktivite arasında mutlak bir korelasyon bulunmadığını ve bu ilişkinin karmaşık faktörlerden etkilendiğini belirtmiştir. Zhu ve ark. [156] ise toplam fenolik içerik ile DPPH· yöntemiyle belirlenen serbest radikal süpürme aktivitesi arasındaki ilişkinin karmaşık olduğunu vurgulamıştır.

4.1.5 Buğday Kepekleri ile Hazırlanan Un Karışımlarının Farinograf Sonuçları

Her iki buğday kepeği çeşidinin ekmeklik kriterlerinin belirlenmesi amacıyla Farinograf analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları Tablo 4.5'te, ilgili farinogramlar ise Şekil 4.2'de sunulmuştur. Buğday kepeklerinin hamur formülasyonlarına eklenebilecek maksimum miktarları ve diğer Farinografik ölçütlerin belirlenmesi için, baz un olarak kullanılan Söke marka ticari una ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında kepek eklenerek un karışımları hazırlanmıştır. Bu karışımların farinogramları incelenerek çalışmada kullanılacak kepek yüzdesine karar verilmiştir. Yapılan ön denemelerde, %20 ve üzeri kepek katkısı ile farinogram eğrisinin çizilemediği ve tekrarlanabilir, güvenilir sonuçların elde edilemediği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, her iki buğday kepeği çeşidi için de baz

una ağırlıkça %15 oranında kepek katkısı yapılması uygun bulunmuş ve çalışmalara bu oran ile devam edilmiştir.

Tablo 4.5 Baz un ve kepek karışımlı unların Farinograf özellikleri

Farinografik parametre	Baz Un (Söke Geleneksel Un)	%15 TK katkılı un	%15 RK katkılı un
Kepek katkı oranı (%)	0	15	15
Su absorpsiyonu (%)	60,10±0,21^{c}	62,40±0,14^{b}	63,8±0,18^{a}
Gelişme süresi (saniye)	90±5^{c}	631±55^{a}	465±2^{b}
Stabilite (saniye)	117±13^{c}	693±41^{a}	568±16^{b}
Yumuşama derecesi (FU)	93,0±9,9^{a}	9,5±2,1^{b}	9,0±0,0^{b}

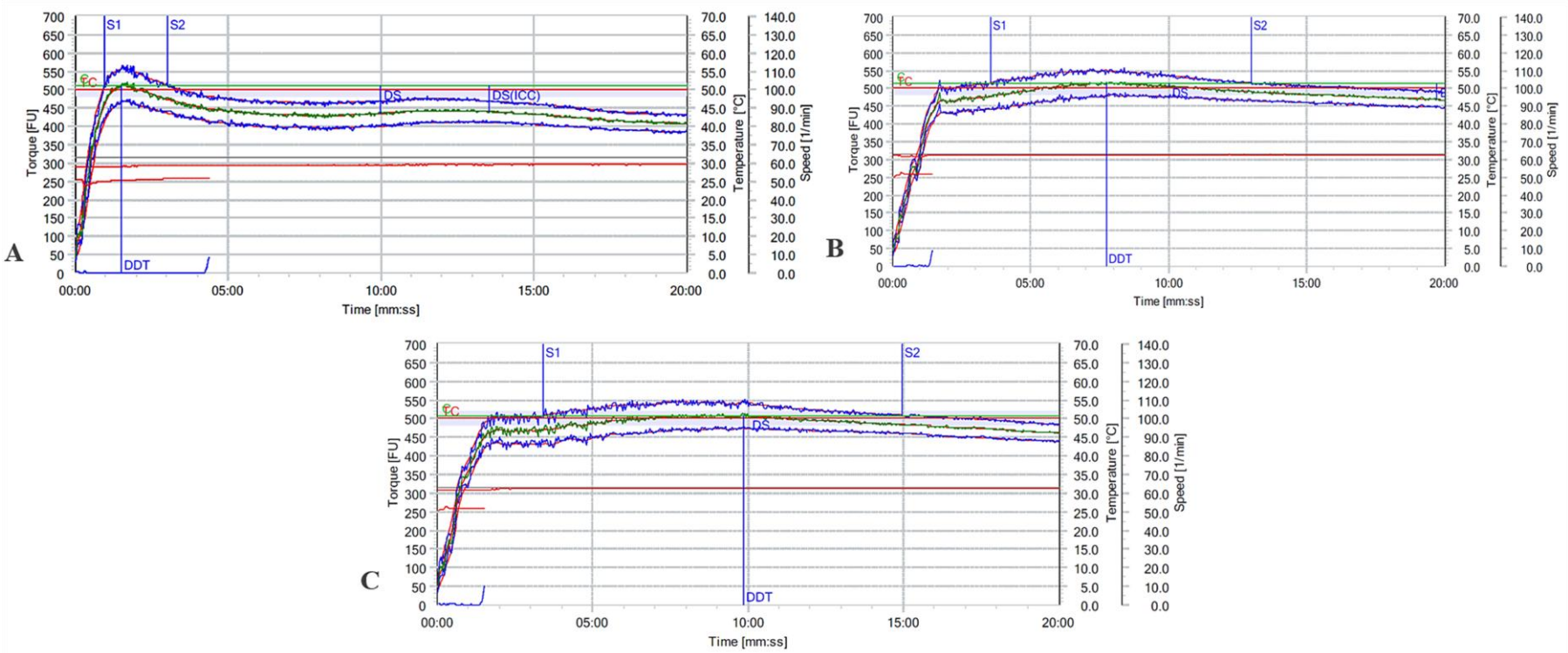
Sonuçlar üç tekrarın ortalama ± standart sapması olarak ifade edilmiştir. Aynı satırda farklı küçük harflere sahip ortalamalar, un karışımları için önemli farklılıkları ($p<0,05$) göstermektedir.

Tablo 4.5'te sunulan verilere göre, RK katkılı un karışımına ait su absorpsiyonu değeri, TK katkılı un karışımına göre daha yüksektir. Bu durum, Tablo 4.2'de gösterildiği üzere, Rumeli çeşit kepeğin (RK) toplam diyet lifi (TDF) içeriğinin Tekirdağ çeşidine (TK) kıyasla yaklaşık %8,7 daha yüksek olması ile ilişkilendirilebilir. Lif içeriği artışının unun su absorbe etme potansiyelini artırdığı literatürde de doğrulanmaktadır (Fan ve ark., 2016). Baz unda su absorpsiyonu değerinin daha düşük olduğu ve lif içeriği ile su bağlama kapasitesi arasındaki ilişkiyi desteklediği görülmektedir.

Kepek ilavesinin hamur gelişme süresini önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir. TK katkılı un karışımında bu süre 631 saniye olarak ölçülürken, RK katkılı un karışımında 465 saniye olarak ölçülmüştür. Literatürde "gluten dilüsyonu" olarak adlandırılan bu durum, kepek ilavesiyle gluten miktarının azalması ve buna bağlı olarak hamur matrisinin reolojik özelliklerinde değişiklik

meydana gelmesiyle ilişkilendirilmektedir [157]. Ayrıca kepek ilavesinin neden olduğu daha yüksek su emilimi, kepek partikülleri tarafından daha fazla su emilmesi ihtiyacı nedeniyle hamur gelişim süresinin uzamasına yol açmaktadır [40]. Bununla birlikte, hamur gelişme süresinin yüksek oluşunun gluten kalitesi ile ilişkilendirilebileceğini öneren çalışmalar da vardır [158, 159].

Hamurun yoğurmaya toleransını ifade eden stabilite [160] açısından, Tekirdağ çeşit kepek katkılı un karışımının daha yüksek stabilite gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, TK'nin gluten matrisi ile daha uyumlu bir yapıya sahip olabileceğini göstermektedir. Kepek ilavesi ile ayrıca hamur yumuşama derecelerinde önemli ölçüde azalma meydana gelmiştir (Tablo 4.5). Hamura kepek ilavesi oranındaki artışın hamur yumuşamasını istatistiksel olarak önemli ölçüde azalttığı Cai ve ark., [161] tarafından da gösterilmiştir. Li ve ark. [162] göre, kepek eklendikten sonra hamur özelliklerinde meydana gelen değişikliklerin nedeni, hidrojen bağları ile etkileşime giren çok sayıda hidroksil grubu içeren kepekteki büyük miktarda liftir, böylece daha fazla su bağlar, bu da su emilimini artırır ve hamurun fiziksel özelliklerini etkiler. Ayrıca, Tufail ve ark. [163] da kepek ilavesi ile hamurun yumuşamasındaki azalmayı, yeni hücre duvarlarının eklenmesi ile açıklamıştır.



Şekil 4.2 Ekmek üretiminde kullanılan baz un (a), ağırlıkça %15 TK karışımlı un (b) ve %15 RK karışımlı unun (c) farinogramları

4.1.6 Buğday Kepeklerinin Ekmek Özelliklerine Etkisi

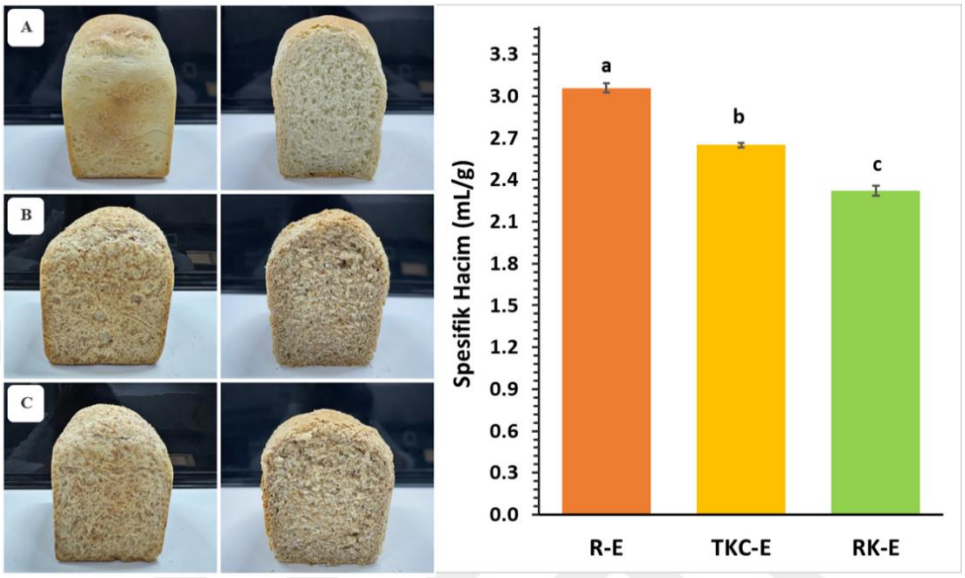
4.1.6.1 Spesifik Hacim

Şekil 4.3'te, Tekirdağ (TKC-E) ve Rumeli (RK-E) çeşit buğday kepeği ilaveli ekmekler ile kepek ilavesi olmaksızın %100 rafine unla üretilen referans ekmeğin (R-E) görüntüleri ve spesifik hacimleri sunulmuştur. R-E, TKC-E ve RK-E ekmeklerinin spesifik hacimleri sırasıyla 3,06 ± 0,03; 2,65 ± 0,02 ve 2,32 ± 0,04 mL/g olarak ölçülmüştür. Beklendiği üzere, referans ekmek (R-E), en yüksek spesifik hacim değerine sahip olmuştur. Bu durum, kepek ilavesinin gluten matrisi üzerinde olumsuz etkiler yarattığı ve hamurun gaz tutma kapasitesini düşürdüğü yönündeki literatür bulguları ile tutarlıdır [138, 164]. TKC-E'in spesifik hacmi, RK-E'den önemli derece yüksektir. Bu fark, kepek türleri arasındaki kompozisyonel farklılıklara dayandırılabilir. Literatürde, buğday kepeğinin IDF (çözünmez diyet lifi) ve TDF (toplam diyet lifi) içeriğinin ekmek hacmiyle negatif korelasyon gösterdiği bildirilmiştir [34]. Tablo 4.2'de sunulduğu üzere, Rumeli buğday kepeği (RK), Tekirdağ kepeğe (TK) kıyasla daha yüksek IDF ve TDF değeri sergilemiştir. Bu durum, RK-E'nin daha düşük spesifik hacim göstermesine neden olmuştur. Ayrıca, Tablo 4.3'te gösterildiği üzere, Rumeli çeşidi kepeğin daha yüksek su tutma kapasitesine sahip olması da bu sonucu açıklayan bir diğer faktördür. Yüksek su tutma özellikleri, kepeğin gıda sistemlerine dahil edilmesinde tekno-fonksiyonel bir zorluk olarak değerlendirilmektedir [60]. Bu durum, ekmek üretiminde kullanılan su miktarının ve hamurun reolojik özelliklerinin olumsuz yönde etkilenmesine neden olmaktadır. Liu ve ark. [165] çalışmalarında formülasyona %5-15 arasında değişen buğday kepeği ilavesinin, ilave miktarı arttıkça ekmek hacminde önemli düşüşe neden olduğunu bildirmiştir. Benzer şekilde, Hemdane ve ark. [166] de kepek ilavesi ile ekmek hacmi arasındaki bu negatif ilişkiyi doğrulamış ve kepeğin gluten matrisi üzerindeki etkisinin ekmek hacmini sınırladığına dikkat çekmiştir.

4.1.6.2 Tekstür Profili Analizi (TPA)

Ekmeğin tazelik algısı, özellikle sertlik gibi dokusal özellikleriyle yakından ilişkilidir. Tekstür profil analizi (TPA), ekmeğin kalite özelliklerini objektif olarak değerlendirmek ve raf ömrü boyunca meydana gelen fiziksel değişiklikleri belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [167]. Ekmek örneklerinin sertlik, esneklik ve kohesivlik gibi tekstürel özellikleri Tablo 4.6 ve Şekil 4.4'te

sunulmuş ve depolama süresi boyunca (0, 1, 3 ve 5 gün) izlenmiştir. Tez çalışmasının kepek katkılı ekmeklerinin (TKC-E ve RK-E) sertlik değerlerinin, referans ekmeğe kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, sertlik ile spesifik hacim arasındaki negatif korelasyon ile açıklanabilir; daha düşük spesifik hacme sahip ekmek örnekleri, daha yüksek sertlik değerleri sergilemiştir [168].

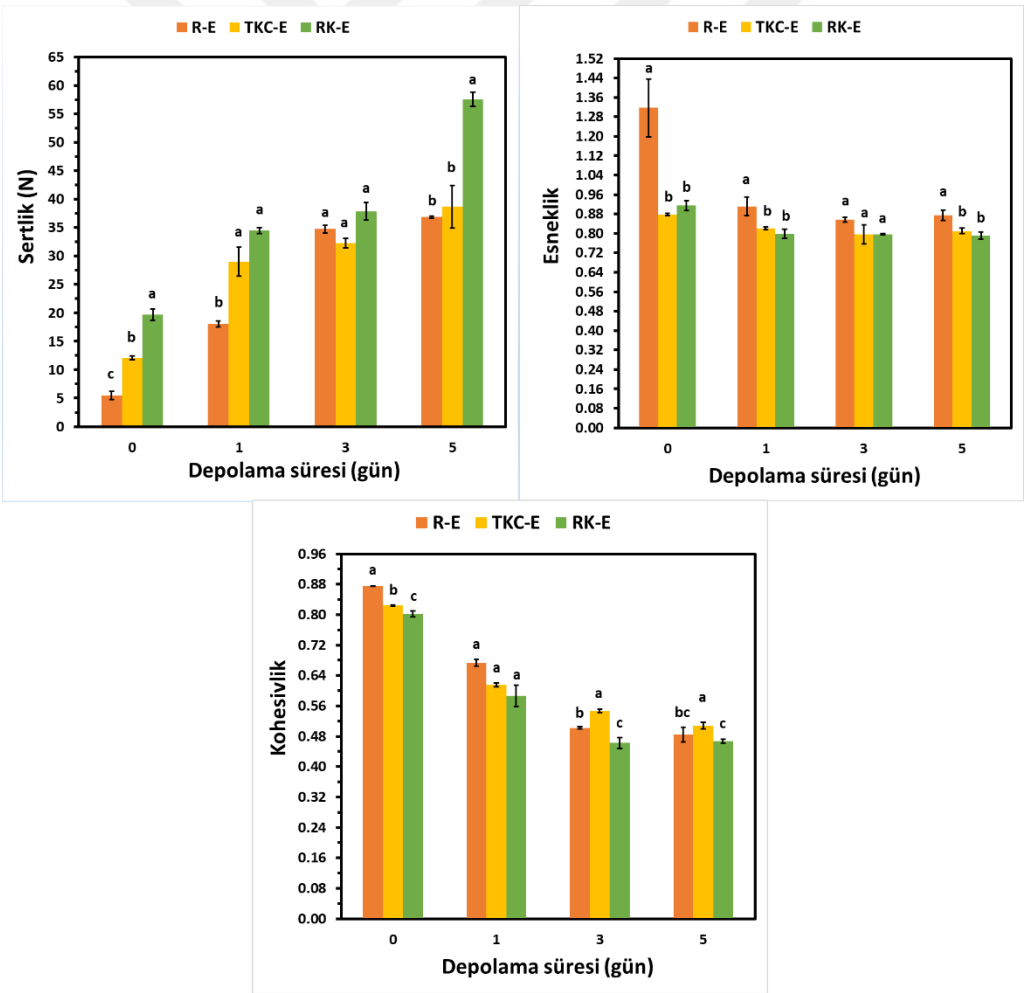


Şekil 4.3 Ekmek örneklerinin görüntüleri ve spesifik hacimleri (mL/g)
Farklı küçük harfler ekmek örnekleri arasında istatistiksel olarak anlamlı farkı göstermektedir ($p<0,05$). A: R-E, Kepek ilavesi olmadan üretilen referans ekmek; B: TKC-E, %15 TK ile üretilen ekmek; C: RK-E, %15 RK ile üretilen ekmek.

Buğday kepeği ilavesi, ekmek sertliğini anlamlı derecede artırmıştır ($p<0,05$). Gómez ve ark. [169] kepek liflerinin hava kabarcıkları üzerindeki kalınlaştırıcı etkisi nedeniyle daha kompakt bir yapı oluşturduğunu ve bunun sertlik değerini artırdığını bildirmiştir. Bu olumsuz etki, RK-E ekmeğinde daha belirgin şekilde gözlenmiştir (Şekil 4.4). Depolama süresi boyunca ekmek sertliğinde gözlemlenen artış, genellikle bayatlama sürecinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir [170]. En yüksek sertlik değeri, depolamanın 5. gününde RK-E ekmeğinde tespit edilmiştir. Bu durum, RK-E'de nişasta retrogradasyon oranının daha yüksek olduğunu göstermektedir [171].

Tablo 4.6 Ekmeklerin depolama süresi boyunca elde edilen TPA sonuçları

Örnek	Depolama	Sertlik (N)	Esneklik	Kohesivlik
R-E	0	5,483±0,692	1,317±0,119	0,876±0,001
	1	18,048±0,553	0,911±0,038	0,674±0,009
	3	31,269±5,607	0,857±0,011	0,502±0,003
	5	36,873±0,197	0,875±0,022	0,485±0,019
TKC-E	0	12,102±0,315	0,878±0,004	0,825±0,002
	1	31,042±5,361	0,820±0,006	0,616±0,005
	3	32,305±0,817	0,796±0,039	0,547±0,004
	5	40,715±6,581	0,810±0,011	0,508±0,008
RK-E	0	17,966±3,475	0,915±0,021	0,803±0,008
	1	34,460±0,528	0,798±0,019	0,578±0,028
	3	37,904±1,578	0,797±0,003	0,463±0,014
	5	57,591±1,257	0,792±0,015	0,467±0,004



Şekil 4.4 Depolama süresi boyunca ekmeklerin TPA parametrelerinin değişimi
Aynı gün içindeki farklı küçük harfler ekmek örnekleri arasındaki istatistiksel olarak anlamlı farkı göstermektedir ($p<0,05$). R-E: Kepek ilavesi olmadan üretilen referans ekmek; TKC-E: %15 TK ile üretilen ekmek; RK-E: %15 RK ile üretilen ekmek

Depolama sırasında sertlik değerindeki artış incelendiğinde, 1. günden 5. güne kadar referans ekmekte (R-E) sertlik oranında yaklaşık %104'lük hızlı bir artış gözlenmiştir. Benzer şekilde, RK-E örneğinde sertlik artışı yaklaşık %67 olarak tespit edilirken, TKC-E ekmeğinde bu artış yalnızca %33 seviyesinde gerçekleşmiştir. Buğday kepek ilaveli ekmeklerde sertlik artışının daha düşük olması, kepeğin yüksek su tutma kapasitesine bağlanabilir. Bu özellik, su kaybını bir ölçüde engelleyerek depolama sırasında sertlik artışını nispeten yavaşlatmaktadır [172].

Esneklik, ekmeğin sıkıştırıldıktan sonra orijinal formuna dönme kabiliyeti ile ilgili bir özelliktir [173]. Pişmenin ardından 2. saatin sonunda (0. gün), R-E (kepek ilavesiz ekmek) en yüksek esneklik değerine sahip ekmek olmuştur. Esneklik değeri bakımından Tekirdağ (TKC-E) ve Rumeli (RK-E) ekmekleri arasında önemli bir fark tespit edilmemiştir ($p>0,05$; Şekil 4.4). Yüksek esneklik değeri ekmeğin tazeliği ve esnekliği ile ilişkilendirilmektedir [174]. Depolama boyunca, esneklik özelliği tüm ekmek örneklerinde azalmıştır. Depolamanın son gününde, R-E, TKC-E ve RK-E'den daha yüksek bir esneklik değerine sahip olmuştur ($p<0,05$).

Kohesivlik (kohezyon da denmektedir) değeri ise taze örneklerde referans ekmek (R-E) örneğine (0,88) kıyasla RK-E'de (0,80) ve ardından TKC-E'de (0,83) önemli ölçüde daha düşük olarak bulunmuştur. Bu azalma depolama sırasında tüm ekmekler için gözlenmiştir (Tablo 4.6 ve Şekil 4.4). Daha yüksek kohesivlik, çiğneme sırasında kırılma veya ufalanma yerine bir bolus oluşumunu göstermektedir ve bu durum tüketici tarafından arzu edilir. Düşük kohesivlik ise ekmeğin kırılma veya parçalanmaya karşı artan duyarlılığını göstermektedir [175]. TKC-E depolamanın 3. ve 5. günlerinde önemli ölçüde daha yüksek kehezyon değeri göstermiştir (Şekil 4.4).

4.1.6.3 Renk

Tablo 4.7, Tekirdağ ve Rumeli çeşit kepek içeren ekmek örnekleri ile kepek ilavesi yapılmamış referans ekmek (R-E) için kabuk ve iç rengini ifade eden Hunter renk parametrelerini ($L*$, $a*$ ve $b*$) ve toplam renk değişimini (ΔE) sunmaktadır. TKC-E ve RK-E örneklerinin $L*$ değerlerindeki daha düşük değerlerden de anlaşılacağı üzere, kepek ilavesi kabuk renginin daha koyu olmasına neden

olmuştur. Ancak, TKC-E ve RK-E arasındaki L∗ değer farkı istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Ekmek içi rengi açısından değerlendirildiğinde, hem TKC-E hem de RK-E örneklerinin iç renginin, %100 rafine unla üretilen referans ekmek (R-E) örneğine kıyasla daha koyu olduğu belirlenmiştir. TKC-E ve RK-E arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark gözlenmemiştir; bu da farklı buğday kepeği çeşitlerinin hem kabuk hem de iç rengi üzerindeki etkilerinin benzer olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, literatürde kepek ilavesinin ekmek rengi üzerindeki etkileriyle uyumludur. Özkaya ve ark. [176] buğday kepeği ilavesiyle hem kabuk hem de iç rengi için önemli ölçüde daha düşük L∗ değerleri bildirmiştir. Benzer şekilde, Ahmed ve Gamil [177] %0–30 arasında farklı oranlarda kepek ilave edilen ekmeklerde kepek konsantrasyonu arttıkça hem kabuk hem de iç renk için L∗ değerlerinin azaldığını tespit etmiştir.

Tablo 4.7 Ekmek örneklerinin renk analizi sonuçları

Örnek	Kabuk rengi				İç renk			
	L∗	**a∗**	**b∗**	**Δ*E***	**L∗**	**a∗**	**b∗**	**Δ*E***
R-E	62,6±1,3^{a}	8,5±0,9^{a}	30,2±3,2^{a}	-	70,6±1,6^{a}	0,9±0,2^{c}	15,6±1,8^{b}	-
TKC-E	58,8±0,9^{b}	7,8±1,2^{a}	25,3±2,1^{b}	6,4±1,8^{a}	58,9±1,1^{b}	5,0±0,2^{a}	18,3±0,4^{a}	13,4±0,9^{a}
RK-E	59,7±1,6^{b}	6,9±1,1^{a}	23,2±1,6^{b}	7,9±1,2^{a}	57,7±0,8^{b}	4,5±0,3^{b}	16,5±0,4^{ab}	14,1±0,8^{a}

Sonuçlar dört ölçümün ortalama ± standart sapması olarak ifade edilmiştir. Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip ortalamalar gruplar için önemli farklılıkları ($p<0,05$) göstermektedir. R-E: Kepek ilavesi olmadan üretilen referans ekmek; TKC-E: %15 TK ile üretilen ekmek; RK-E: %15 RK ile üretilen ekmek

Hunter Lab renk uzayında, a∗ değerleri kırmızı ve yeşil arasındaki geçişi ifade etmektedir. Kepek içeren ekmekler ile referans ekmek (R-E) arasında kabuk rengi (a∗ değeri) açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmemiştir. İç renk açısından yapılan değerlendirmelerde, kırmızılık özelliği Tekirdağ çeşidi kepek içeren ekmekte (TKC-E) en yüksek, Rumeli çeşidi kepek içeren ekmekte (RK-E) daha düşük, referans ekmekte (R-E) ise en düşük olarak ölçülmüştür. b∗ değerleri ise, sarılık veya mavilik derecesini göstermektedir. Tez çalışmasında, Rumeli ve Tekirdağ kepek içeren ekmeklerin kabuk renginin, R-E örneğine kıyasla daha mavi olduğu ancak TKC-E ile RK-E arasında fark bulunmadığı belirlenmiştir.

İç renk değerlendirmesinde ise TKC-E örneği en yüksek b∗ değerine sahipken, RK-E ile arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

Referans ekmek (R-E) ile kepek içeren ekmekler (TKC-E ve RK-E) arasındaki toplam renk farkı (ΔE), hem kabuk hem de iç renk için istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Ancak, örneklerin ΔE değerlerinin 3'ten yüksek olması, renk farklarının insan gözü tarafından algılanabilir seviyede olduğunu göstermektedir. Nitekim, Bodart ve ark. [178] tarafından yapılan sınıflandırmaya göre:

- $\Delta E < 1$: Renk farkları insan gözü tarafından algılanamaz.
- $1 < \Delta E < 3$: Renk farkları insan gözü tarafından kolayca ayırt edilemez.
- $\Delta E > 3$: Renk farkları insan gözü için algılanabilir düzeyde belirgindir.

Bu sınıflandırmaya göre, çalışmada elde edilen ΔE değerleri renk farklarının algılanabilir seviyede olduğunu doğrulamaktadır.

4.1.6.4 Diyet Lifi

Tekirdağ ve Rumeli çeşit buğday kepeği ilavesiyle üretilen ekmeklerin diyet lif içerikleri Tablo 4.8'de sunulmaktadır. Rumeli çeşidi kepek ilaveli ekmek (RK-E), kepeğinde olduğu gibi, daha yüksek toplam diyet lifi (TDF) ve çözünmez diyet lifi (IDF) içeriği göstermiştir (Tablo 4.2). Bununla birlikte, örneklerin çözünür diyet lifi (SDF) içerikleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık bulunmamıştır. Tekirdağ çeşidi kepeğin (TK) daha yüksek SDF içeriğine sahip olmasına rağmen, bu farkın ekmeklere yansımamış olması, ekmek yapım sürecinde buğday kepeğindeki çözünür ve çözünmez diyet lifi fraksiyonlarında meydana gelen bileşimsel değişikliklerden kaynaklanıyor olabilir. Literatürde, hamur fermentasyonu sırasında çözünür diyet liflerinin, *Saccharomyces cerevisiae*'nin endojen invertaz enzimi tarafından kısmen parçalanabildiği ifade edilmektedir [179]. Messia ve ark. [86] ekmeklik buğday ununa %20 oranında buğday kepeği ilavesiyle elde edilen ekmeğin toplam diyet lifi içeriğini %9,8; çözünür diyet lifi içeriğini %2,1; çözünmez diyet lifi içeriğini ise %7,7 olarak bildirmiştir. Benzer şekilde, Cingöz ve ark. [180] de %20 oranında buğday kepeği ilaveli ekmeklerde SDF, IDF ve TDF içeriğini sırasıyla %1,94, %10,32 ve %12,26 olarak tespit etmişlerdir. Çalışmamızda, %15 kepek ilavesine rağmen örneklerin TDF içerikleri

literatürde bildirilen değerlerin üzerinde bulunmuştur. Bu durum, kullanılan buğday kepeği çeşitlerinin diyet lifi kompozisyonundaki farklılıklarla açıklanabilir. Sonuç olarak, Rumeli çeşidinden üretilen ekmeğin diyet lifi içeriği bakımından Tekirdağ çeşidinden üretilen ekmeğe göre üstün olduğu söylenebilir.

Tablo 4.8 Ekmek örneklerinin diyet lifi analizi sonuçları

Örnek	SDF (%)	IDF (%)	TDF (%)
TKC-E	1,34±0,03[a]	7,54±0,16[b]	8,89±0,13[b]
RK-E	1,23±0,08[a]	10,42±0,13[a]	11,65±0,21[a]

Sonuçlar üç tekrarın ortalama ± standart sapması olarak ifade edilmiştir. Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip ortalamalar gruplar için önemli farklılıkları ($p<0,05$) göstermektedir. TKC-E: %15 TK ile üretilen ekmek; RK-E: %15 RK ile üretilen ekmek

4.1.6.5 Toplam Fenolik İçerik ve Antioksidan Aktivite

Farklı buğday kepeği çeşitlerinin ekmek yapımında kullanımı, ekmeklerin toplam fenolik içeriği (TF) ve antioksidan aktivitesi (AA) üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etki göstermemiştir (Tablo 4.9). Rumeli çeşidi kepeğin (RK), Tekirdağ çeşidine (TK) kıyasla daha yüksek TF ve AA değerlerine sahip olmasına rağmen (Tablo 4.4), bu fark ekmek örneklerine yansımamış, her iki ekmek örneği arasında TF ve AA açısından anlamlı bir farklılık tespit edilmemiştir. Bu durum, gıda matris etkisi ve TF ile AA arasındaki ilişkinin karmaşıklığı ile açıklanabilir.

Li ve ark. [181] buğday kepeği ve kepek eklenerek elde edilen ürünlerde, toplam fenolik içerik (TF) ve antioksidan aktivite (AA) arasında mutlak bir korelasyon olmadığını ifade etmiştir. Çalışmalarında, TF'nin AA'nin tek belirleyicisi olmadığı ve matristeki diğer bileşenlerin (örneğin, enzimler, serbest amino asitler ve peptitler gibi) de AA'ya önemli katkılar sağladığı vurgulanmıştır. Bu bulgular, çalışmamızda kepek ve ekmek örnekleri arasında TF ve AA arasındaki ilişkiye dair elde edilen sonuçlarla uyumludur.

Tablo 4.9 Ekmek örneklerinin toplam fenolik içerik ve antioksidan aktivite analizi sonuçları

Örnek	SF (GAE mg/g)	BF (GAE mg/g)	TF (GAE mg/g)	Serbest-AA (TE mg/100 g)	Bağlı-AA (TE mg/100 g)
TKC-E	2,03±0,03[a]	1,97±0,07[a]	4,01±0,10[a]	29,70±1,59[a]	67,53±3,18[a]
RK-E	2,04±0,02[a]	2,15±0,10[a]	4,19±0,08[a]	38,19±7,24[a]	76,15±0,88[a]

Sonuçlar üç tekrarın ortalama ± standart sapması olarak ifade edilmiştir. Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip ortalamalar gruplar için önemli farklılıkları ($p<0,05$) göstermektedir. TKC-E: %15 TK ile üretilen ekmek; RK-E: %15 RK ile üretilen ekmek; SF: Serbest fenolik madde miktarı; BF: Bağlı fenolik madde miktarı; TF: Toplam fenolik madde miktarı; Serbest-AA: Serbest fenolik ekstraktlarının DPPH radikali süpürme aktivitesi; Bağlı-AA: Bağlı fenolik ekstraktlarının DPPH radikali süpürme aktivitesi

Farklı oranlarda kepek ilavesinin ekmeğin fenolik madde içeriği ve antioksidan özellikleri üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışmada, %10–30 aralığında kepek ilaveli unlarla yapılan ekmeklerin toplam fenolik madde içeriğinin 2,99–4,87 mg GAE/g arasında, toplam DPPH radikal süpürme aktivitelerinin ise 30,26–52,36 mg TE/100 g arasında değiştiği bildirilmiştir [47]. Çalışmamızda elde edilen değerler, bu aralıklarla uyumlu olmakla birlikte, gıda matris etkisinin AA üzerindeki belirleyici rolünü de ortaya koymaktadır.

Fenolik bileşiklerin ekmek yapım sürecinde AA üzerinde doğrudan bir etki göstermemesinin birkaç olası nedeni bulunmaktadır. Öncelikle, fenolik bileşikler gıda matrisindeki proteinler, lipitler veya nişasta gibi diğer bileşenlerle kompleks oluşturabilir ve bu, fenoliklerin serbest radikal süpürme kapasitesini sınırlayabilir. Bunun yanı sıra, hamur yoğurma ve pişirme sırasında oluşan ısı ve mekanik işlemler fenolik bileşiklerin yapısında bozulmalara veya dönüşümlere neden olabilir. Özellikle fermentasyon sürecinde kullanılan maya enzimlerinin çözünür diyet liflerini ve fenolik bileşikleri kısmen parçalayabildiği bildirilmiştir [179].

Bu çalışmada, Rumeli çeşidi kepeğin fenolik madde ve AA açısından daha yüksek değerlere sahip olmasına rağmen, bu farkın ekmek örneklerine yansımaması, ekmek yapım sürecinin ve gıda matrisinin AA üzerindeki karmaşık etkilerinin bir göstergesidir. Fenolik bileşiklerin ekmek yapım sürecindeki davranışlarının daha iyi anlaşılması için daha kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu bölümde yapılan kapsamlı analizler, Tekirdağ ve Rumeli buğday kepeklerinin kalite, besinsel ve fonksiyonel özelliklerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. Çalışmanın bulguları, Rumeli çeşidinin (RK) daha yüksek toplam diyet lifi (TDF), su tutma kapasitesi (STK) ve fenolik madde içeriği gibi bazı üstün özelliklere sahip olduğunu ortaya koysa da Tekirdağ çeşidi kepeğin özellikle ekmek üretiminde sergilediği reolojik özellikler ve ekmeklerin depolama sürecindeki tekstürel özellikleri açısından daha dengeli sonuçlar sunması nedeniyle modifikasyon çalışmaları için daha uygun bir aday olduğunu göstermiştir. TK'nin, daha yüksek çözünür diyet lifi (SDF) içeriği ve fenolik bileşiklerin işlevselliğini artırabilecek yapısal potansiyeli, modifikasyon uygulamaları ile geliştirilmeye açık yönlerini ortaya koymaktadır. Ayrıca, hamur gelişme süresi, stabilite ve ekmek spesifik hacmi gibi kalite parametreleri açısından daha avantajlı sonuçlar sunması, TK'nin seçimini destekleyen diğer önemli bulgular arasında yer almaktadır. Bu nedenle, bu tez çalışmasının sonraki aşamalarında, Tekirdağ çeşit buğday kepeği (TK) üzerinde mikrobiyal biyoproses (MB), ultrasonik modifikasyon (UM) ve hibrit modifikasyon (HM) teknikleriyle gerçekleştirilen çalışmalarla, bu kepeğin ekmek üretimindeki fonksiyonel ve besinsel faydalarının artırılması hedeflenmiştir.

4.2 Ultrasonik Modifikasyon Koşullarının Optimizasyonu ve Doğrulama Analizi

Önceki bölümde, modifiye edilmek üzere Tekirdağ çeşit buğday kepeği (TK) seçilmiş ve detaylı analizlerle bu kepeğin özellikleri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu bölümde, Tekirdağ kepeğinin ultrasonik modifikasyona tabi tutulmasında optimum işlem parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bölüm 3.2.3.1'de açıklandığı üzere, regresyon analizi ve model optimizasyonu için Design Expert yazılımı 13.0.5.0 (State-Ease Inc., ABD) kullanılmış ve tam faktöriyel deneysel tasarım uygulanmıştır. Bu yaklaşım, ultrasonik modifikasyonun etkili bir şekilde gerçekleştirilmesi ve elde edilen sonuçların güvenilirliğinin artırılması amacıyla tercih edilmiştir.

Tez çalışmasının ultrasonik modifikasyon (UM) adımında kullanılacak optimum işlem parametrelerinin belirlenmesinden önce, genlik ve süre gibi değişkenlerin deneysel kapsamını daraltmak amacıyla literatürde yaygın olarak

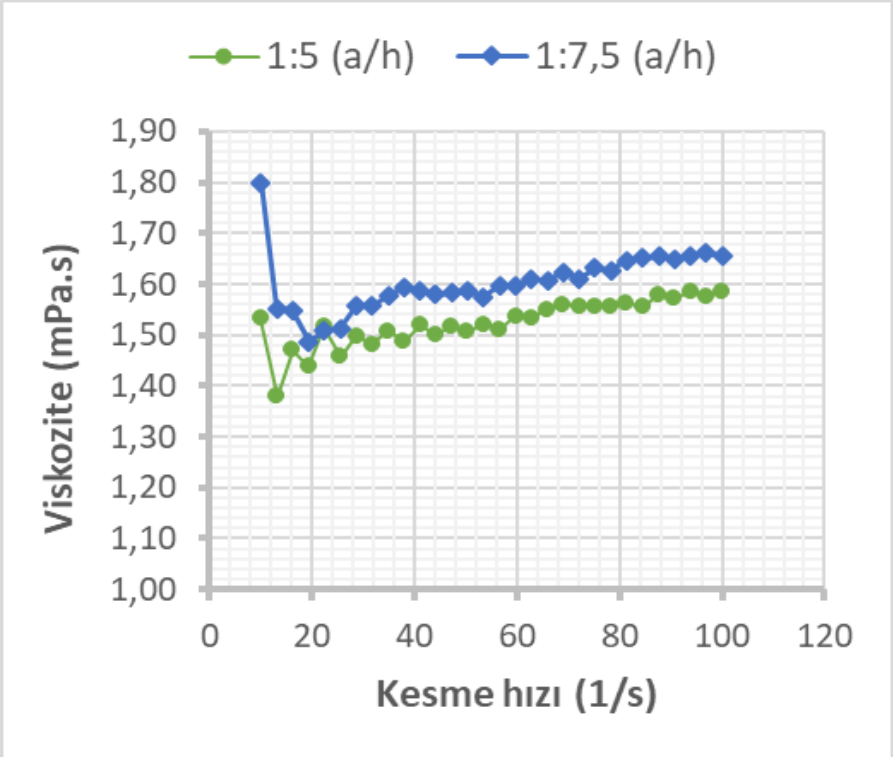
kullanılan iki farklı süspansiyon konsantrasyonu üzerinde ön denemeler gerçekleştirilmiştir. Bu çerçevede, 1:5 (a/h) ve 1:7,5 (a/h) oranlarında hazırlanan kepek süspansiyonları ile çalışılmış ve bu süspansiyonların kuru madde içerikleri sırasıyla %2,49 ve %1,97 olarak tespit edilmiştir.

Viskozite, bir numunedeki besinsel liflerin su absorbe etme kapasitesini yansıtan önemli bir özellik olmasının yanı sıra, ultrasonik bir uygulama sonrasında liflerin parçacık boyutundaki değişim ve buna bağlı olarak oluşan yüzey alanı hakkında değerli bilgiler sunabilir. Bu nedenle, süspansiyon konsantrasyonunun belirlenmesi sürecinde viskozite analizi kritik bir parametre olarak incelenmiştir. Literatürde, daha fazla moleküller arası etkileşim bölgesinin, süspansiyonun akışına karşı daha yüksek direnç oluşturarak viskozitenin artmasına neden olduğu bildirilmektedir [182]. Ultrasonik işlemin etkinliği üzerinde kepek süspansiyonu konsantrasyonunun etkisini belirlemek amacıyla, tam faktöriyel deneysel tasarım modelinde belirlenen faktörlerin orta seviyelerinde (10 dakikalık işlem süresi ve %60 ultrasonik şiddet) çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ortalama ± standart sapma şeklinde Tablo 4.10 ve Şekil 4.5'te sunulmuştur.

Bu ön çalışma sonucunda, buğday kepeğinin ultrasonik modifikasyonunda kullanılacak sulu süspansiyonların hazırlanmasında tercih edilecek kepek:su oranı, viskozite artışı üzerindeki daha belirgin etkisi nedeniyle 1 gram kepek:7,5 mL deiyonize su olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.10 %60 genlikte 10 dakika süreyle ultrases uygulanan süspansiyonların viskozite sonuçları

		Viskozite (mPa.s)	
No	**Kesme hızı (s^{-1})**	**1:5 (g/mL)**	**1:7,5 (g/mL)**
1	10	1,532±0,404[b]	1,799±0,234[a]
4	19,3	1,437±0,211[b]	1,487±0,279[a]
8	31,7	1,482±0,196[b]	1,557±0,111[a]
11	41	1,520±0,215[b]	1,588±0,041[a]
14	50,3	1,506±0,203[b]	1,586±0,074[a]
17	59,7	1,538±0,166[b]	1,597±0,057[a]
20	69	1,559±0,154[b]	1,624±0,044[a]
24	81,4	1,564±0,117[b]	1,646±0,072[a]
27	90,7	1,573±0,151[b]	1,651±0,081[a]
30	100	1,584±0,145[b]	1,655±0,068[a]



Şekil 4.5 Süspansiyonların tipik viskozite grafikleri

4.2.1 Ultrasonik İşlem Parametrelerinin Yanıtlar Üzerine Etkileri

Buğday kepeğinin ultrasonik modifikasyonu sırasında kullanılan bağımsız değişkenlerin, yani işlem süresi (dakika) ve genlik seviyesi (%), bağımlı değişkenler üzerindeki etkileri Tablo 4.11'de kapsamlı bir şekilde sunulmuştur. İncelenen bağımlı değişkenler; süspansiyon viskozitesi (SV), serbest fenolik madde miktarı (SF), bağlı fenolik madde miktarı (BF), fenolik bileşiklerin salınımı (FBS), serbest antioksidan aktivite (serbest-AA), bağlı antioksidan aktivite (bağlı-AA) ve antioksidan aktivite salınımı (AAS) olarak tanımlanmıştır. Bu değişkenler, ultrasonik işlem parametrelerinin buğday kepeğinin fonksiyonel özellikleri üzerindeki etkilerini anlamak ve optimize etmek açısından önemlidir. Çalışmada istatistiksel analizler için 0,05 düzeyinde anlamlılık kriteri baz alınmıştır. Bu eşik değerin altındaki p-değerleri, modelin ilgili yanıt değişkenindeki varyasyonu yeterli düzeyde açıklayabildiğini ifade etmektedir. R^2 değerleri, modelin bağımsız değişkenlerin etkisini ne derece iyi açıkladığını gösteren bir uyum ölçütü olarak değerlendirilmiştir. R^2 değerinin 1'e yakın olması, modelin verilerle güçlü bir uyum içinde olduğunu ve değişkenler arasındaki ilişkileri doğru bir şekilde yansıttığını ifade etmektedir. Ayrıca, Şekil 4.6'da sunulan kontur grafikleri, yanıt değişkenler ile bağımsız değişkenler arasındaki etkileşimlerin görsel olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu grafikler, her bir bağımlı değişkenin farklı genlik ve işlem süreleri altında nasıl bir eğilim sergilediğini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Kontur grafikleri, bağımsız değişkenlerin etki derecelerini görselleştirmenin yanı sıra, optimum işlem koşullarının belirlenmesine yönelik önemli ipuçları sunmaktadır.

Süspansiyon viskozitesi (SV), buğday kepeğinin ultrasonik modifikasyonu sırasında işlem süresinin artışıyla istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde artış göstermiştir ($<0,0001$). Bu bulgu, daha uzun süre ultrasonik muameleye maruziyetin kepekteki çözünür lif içeriğini artırarak viskozitenin yükselmesine neden olduğunu göstermektedir. Çözünür lif miktarındaki artış, süspansiyonun moleküler etkileşimlerini güçlendirmekte ve bu durum reolojik özellikler üzerinde doğrudan bir etki yaratmaktadır. Buna karşılık, genlik seviyesinin SV üzerindeki etkisi anlamsız bulunmuştur ($p=0,0851 > 0,05$). SV yanıtı için hesaplanan R^2 değeri 0,9137 olup, bu değer modelin bağımsız değişkenler ile SV arasındaki varyasyonu

yüksek bir doğrulukla açıklayabildiğini ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, ultrasonik modifikasyon işleminin kepek süspansiyonlarının reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini anlamak açısından önemli bir bilgi sağlamaktadır.

Serbest fenolik madde miktarının (SF), ultrasonik modifikasyon sırasında her iki bağımsız değişkenden (işlem süresi ve genlik seviyesi) önemli ölçüde etkilendiği tespit edilmiştir. Kısa işlem süreleri ve düşük ultrasonik yoğunluklar SF seviyelerinin düşük olmasına neden olurken, işlem süresinin 10 dakika veya daha uzun olduğu ve ultrases yoğunluğunun %60 veya daha yüksek seviyelere ulaştığı koşullarda SF değerlerinde anlamlı artışlar gözlenmiştir. Ultrasonikasyonun bitki materyallerinden fenolik bileşiklerin salınımını kolaylaştırdığı literatürde iyi bilinen bir durumdur [183]. Bu çalışmanın sonuçları da benzer şekilde uygulanan işlem koşulları altında buğday kepeğindeki fenolik bileşiklerin bir kısmının serbest hale geçtiği göstermektedir. Bu yanıt için hesaplanan R^2 değeri 0,8843 olup, modelin bağımsız değişkenlerle SF arasında güçlü bir ilişkiyi başarıyla açıkladığını ortaya koymaktadır.

Bağlı fenolik madde miktarı (BF) için, her iki bağımsız değişkenin de istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olmuştur. Genlik seviyesi, %60'a kadar, fenolik bileşik içeriğinde bir azalmaya yol açmıştır, bunun nedeni potansiyel olarak ekstraksiyon sırasında fenolik bileşiklerin bozulmasına neden olan kavitasyon etkileridir. Bazı fenolik bileşikler serbest kalırken, diğerleri bozunmuş olabilir. Ultrasonik şiddet %60'ı aştığında, fenolik bileşiklerin ekstraksiyonu artmış; ancak işlem süresi arttıkça ekstraksiyon oranı yeniden azalmıştır. İşlem süresinin uzatılması fenolik bileşik içeriğinde bir azalmaya yol açarken, 10 dakikadan sonra işlem süresinin etkisi azalmıştır. En yüksek BF değerleri düşük işlem süresi ve yüksek genlik seviyesi ile elde edilmiştir. Bu bağımlı değişken için R^2 değeri 0,8956'dır.

Tablo 4.11 Ultrasonik Modifikasyon (UM) işlemi için Tam Faktöriyel Tasarımın ANOVA analizi sonuçları

Süspansiyon viskozitesi (mPa.s)					
Kaynak	**Kareler toplamı**	**DF**	**Kareler ortalaması**	**F değeri**	**p-değeri**
Model	0,8750	6	0,1458	14,12	*0,0007*
X_1	0,1253	4	0,0313	3,03	*0,0851*
X_2	0,7497	2	0,3749	36,29	*<0,0001*
Kalıntı	0,0826	8	0,0103		
Düzeltilmiş toplam	0,9576	14			
R^2 = 0,9137; Düzeltilmiş R^2 = 0,8490					
Serbest Fenolik Madde Miktarı (GAE mg/g)					
Kaynak	**Kareler toplamı**	**DF**	**Kareler ortalaması**	**F değeri**	**p-değeri**
Model	105600	6	17603,53	10,19	*0,0022*
X_1	72328,72	4	18082,18	10,47	*0,0029*
X_2	33262,44	2	16646,22	9,64	*0,0074*
Kalıntı	13817,51	8	1727,19		
Düzeltilmiş toplam	119400	14			
R^2 = 0,8843; Düzeltilmiş R^2 = 0,7975					
Bağlı Fenolik Madde Miktarı (GAE mg/g)					
Kaynak	**Kareler toplamı**	**DF**	**Kareler ortalaması**	**F değeri**	**p-değeri**
Model	1635000	6	272500	11,44	*0,0015*
X_1	903500	4	225900	9,48	*0,0040*
X_2	731500	2	365800	15,35	*0,0018*
Kalıntı	190600	8	23829,89		
Düzeltilmiş toplam	1826000	14			
R^2 = 0,8956; Düzeltilmiş R^2 = 0,8173					

Tablo 4.11 Ultrasonik Modifikasyon (UM) işlemi için Tam Faktöriyel Tasarımın ANOVA analizi sonuçları (Devamı)

Fenolik Bileşiklerin Salınımı (%)					
Kaynak	**Kareler toplamı**	**DF**	**Kareler ortalaması**	**F değeri**	**p-değeri**
Model	19,47	6	3,25	8,58	*0,0039*
X_1	7,94	4	1,99	5,25	*0,0225*
X_2	11,53	2	5,76	15,24	*0,0019*
Kalıntı	3,02	8	0,38		
Düzeltilmiş toplam	22,50	14			
R^2 = 0,8655; Düzeltilmiş R^2 = 0,7647					
Serbest-AA (mg TE/100 g)					
Kaynak	**Kareler toplamı**	**DF**	**Kareler ortalaması**	**F değeri**	**p-değeri**
Model	785,34	6	130,89	7,19	*0,0069*
X_1	752,05	4	188,01	10,33	*0,0030*
X_2	33,29	2	16,64	0,9143	*0,4389*
Kalıntı	145,63	8	18,20		
Düzeltilmiş toplam	930,96	14			
R^2 =0,8436; Düzeltilmiş R^2 = 0,7263					
Bağlı-AA (mg TE/100 g)					
Kaynak	**Kareler toplamı**	**DF**	**Kareler ortalaması**	**F değeri**	**p-değeri**
Model	829,04	6	136,51	7,19	*0,0069*
X_1	677,44	4	166,86	8,79	*0,0050*
X_2	151,60	2	75,80	3,99	*0,0628*
Kalıntı	151,90	8	18,99		
Düzeltilmiş toplam	970,94	14			
R^2 = 0,8482; Düzeltilmiş R^2 = 0,7343					

Tablo 4.11 Ultrasonik Modifikasyon (UM) işlemi için Tam Faktöriyel Tasarımın ANOVA analizi sonuçları (Devamı)

Antioksidan Aktivite Salınımı (%)					
Kaynak	**Kareler toplamı**	**DF**	**Kareler ortalaması**	**F değeri**	**p-değeri**
Model	111,76	6	18,63	5,95	*0,0123*
X_1	106,76	4	26,69	8,52	*0,0055*
X_2	4,99	2	2,50	0,80	*0,4834*
Kalıntı	25,05	8	3,13		
Düzeltilmiş toplam	136,81	14			
R^2 = 0,8169; Düzeltilmiş R^2 = 0,6795					

X_1: Genlik seviyesi (ultrasonik şiddet, %), **X_2:** İşlem süresi (dakika), DF: serbestlik derecesi

Fenolik bileşiklerin salınımı (%), toplam fenolik madde içeriğine (serbest + bağlı) göre ultrasonik işlemden sonra salınan serbest fenoliklerin (SF) yüzdesini temsil etmektedir. Tablo 4.11 incelendiğinde fenolik bileşiklerin salınımı (FBS) için deneysel tasarımın F değerinin 8,58 ve p-değerinin ise 0,0039 ($p < 0,05$) olması, uygulanan tasarımın önemli olduğunu göstermektedir. Her iki bağımsız değişkenin, yani işlem süresi ($p = 0,0019$) ve genlik seviyesinin ($p = 0,0225$), FBS üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkileri olduğu belirlenmiştir. Tasarımın bu bağımlı değişkeni, ultrasonik işlemin fenolik bileşiklerin hücresel matristen serbestleşmesini nasıl etkilediğine dair önemli bilgiler sunmaktadır. İşlem süresi arttıkça ve genlik seviyesi yükseldikçe, fenolik bileşiklerin serbestleşme oranında bir artış gözlenmektedir. Bunun nedeni, ultrasonik kavitasyon etkilerinin hücre duvarlarının bozulmasını teşvik ederek bağlı fenoliklerin serbestleşmesini kolaylaştırması olabilir. Ancak, işlem süresinin aşırı uzaması veya genlik seviyesinin belirli bir eşik değeri aşması durumunda fenolik bileşiklerin bozunması gibi istenmeyen etkiler de meydana gelebilmektedir. Bu bağımlı değişken için R^2 değeri 0,8655 olarak belirlenmiştir, bu da modelin FBS ile bağımsız değişkenler arasındaki varyasyonu yüksek bir doğrulukla açıkladığını göstermektedir. Elde edilen bu bulgular, ultrasonik işlemin fenolik bileşiklerin salınımı üzerindeki etkisini anlamak ve işlem parametrelerini optimize etmek açısından değerli bilgiler sağlamaktadır.

Serbest antioksidan aktivite (Serbest-AA) için yapılan analizler, işlem süresinin bu parametre üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olmadığını ($p = 0,4389$), ancak genlik seviyesinin anlamlı bir etkiye sahip olduğunu ($p = 0,0030$) ortaya koymuştur. Modelin genel uygunluğunu değerlendiren p-değerinin 0,0069 olması, modelin Serbest-AA üzerindeki varyasyonu açıklamada yeterli olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek Serbest-AA değerleri, yüksek işlem süresi ve yüksek genlik seviyesi koşullarında gözlenmiştir. Buna karşılık, en düşük Serbest-AA değerleri, düşük işlem süresi ve düşük genlik seviyesinde elde edilmiştir. Bu bulgular, ultrasonik işlemin genlik seviyesindeki artışın, buğday kepeğindeki antioksidan bileşiklerin bir kısmının serbestleşmesini teşvik ettiğini göstermektedir. Ultrasonik kavitasyonun neden olduğu hücresel yapıdaki bozulmaların, bağlı antioksidan bileşiklerin serbestleşmesine yol açabileceği değerlendirilmektedir. Bu bağımlı değişken için R^2 değeri 0,8436 olarak belirlenmiştir ve bu değer, modelin Serbest-AA ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi yüksek bir doğrulukla açıklayabildiğini göstermektedir. Sonuç olarak, genlik seviyesinin Serbest-AA üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, ancak işlem süresinin bu etkide belirgin bir rol oynamadığı anlaşılmıştır.

Benzer şekilde, bağlı antioksidan aktivite (bağlı-AA) için yapılan analizler, işlem süresinin bu parametre üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olmadığını ($p = 0,0628$), ancak ultrasonik genlik seviyesinin istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğunu ($p = 0,0050$) ortaya koymuştur. Modelin genel uygunluğunu değerlendiren p-değerinin 0,0069 olması, modelin bağlı-AA üzerindeki varyasyonu açıklamada yeterli olduğunu göstermektedir. Sonuçlar, en yüksek bağlı-AA içeriğinin yüksek işlem süresi ve yüksek ultrases yoğunluğu koşullarında elde edildiğini göstermiştir. Buna karşılık, en düşük bağlı-AA içeriği 10 dakikalık işlem süresi ve düşük ultrases yoğunluğu koşullarında gözlenmiştir. Bu bulgular, ultrasonik işlem sırasında genlik seviyesindeki artışın, buğday kepeğindeki bağlı antioksidan bileşiklerin daha etkili bir şekilde serbestleşmesine ve toplam antioksidan aktivitenin artmasına katkıda bulunduğunu göstermektedir. Bağlı-AA yanıtı için R^2 değeri 0,8432 olarak belirlenmiştir. Bu değer, modelin bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi yüksek bir doğrulukla açıklayabildiğini ifade etmektedir.

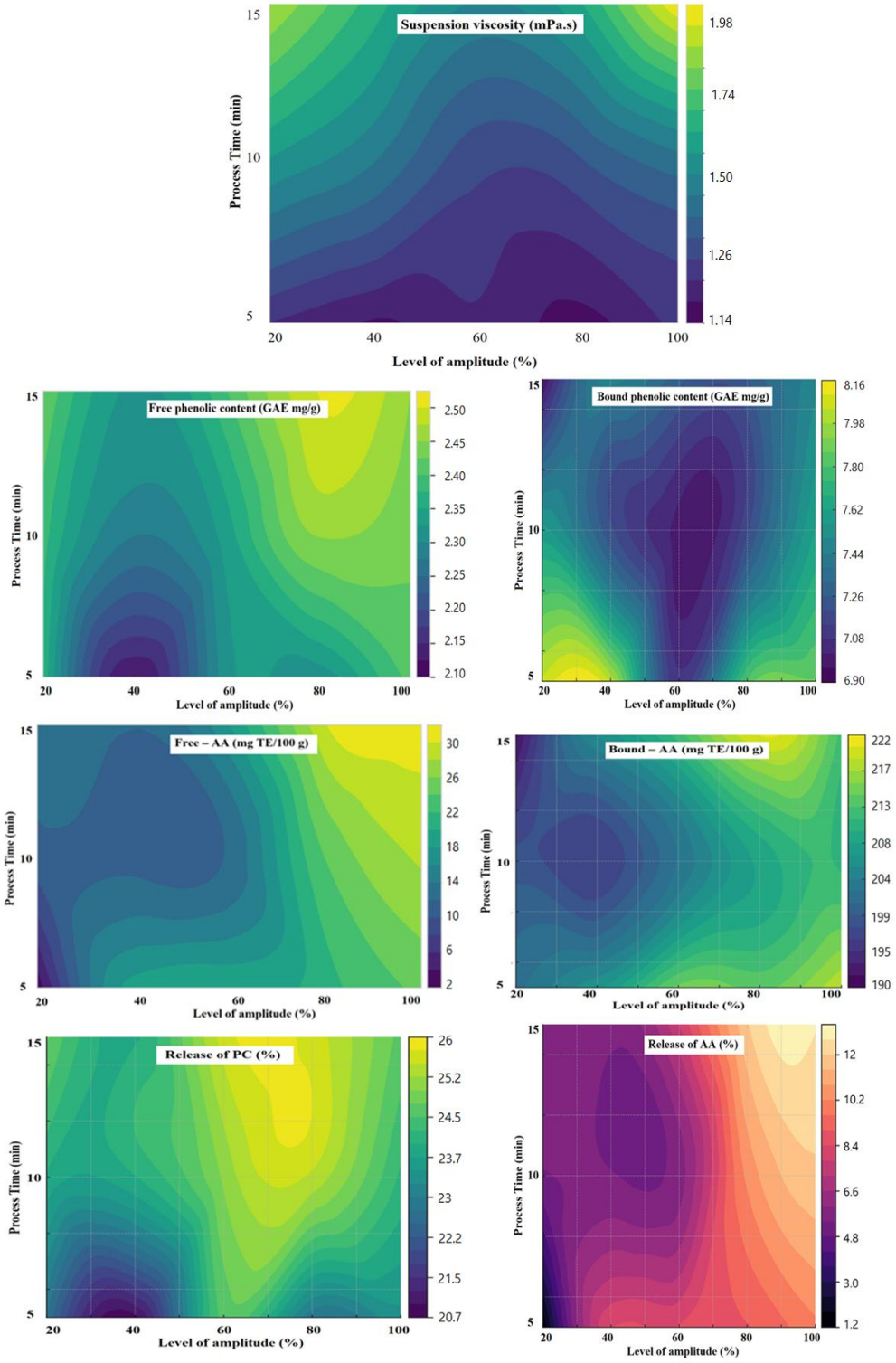
Antioksidan aktivite salınımı (AA salınımı, %), ultrasonik işlem sonrasında serbestleşen antioksidan aktivitenin toplam antioksidan aktiviteye oranını ifade etmektedir. Bu metrik, uygulanan ultrasonik işlem koşullarının antioksidan bileşiklerin salınımı üzerindeki etkisini değerlendirmek için kritik bir göstergedir. Deneysel tasarım sonuçlarına göre, genlik seviyesinin AA salınımı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olduğu tespit edilmiştir ($p = 0,0055$), ancak işlem süresinin bu değişken üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığı bulunmuştur ($p = 0,4834$). Bu sonuçlar, genlik seviyesindeki artışın, antioksidan bileşiklerin salınımını daha etkili bir şekilde artırabileceğini göstermektedir. Modelin AA salınımı için R^2 değeri 0,8655 olarak belirlenmiştir. Bu yüksek uyum derecesi, modelin bağımsız değişkenler ile AA salınımı arasındaki ilişkiyi doğru bir şekilde açıklayabildiğini göstermektedir. Bulgular, genlik seviyesinin optimizasyonunun, antioksidan aktivite salınımını maksimize etmek için önemli bir parametre olduğunu vurgulamaktadır.

4.2.2 Optimizasyon

Tam faktöriyel tasarımdan elde edilen verilerin optimizasyon süreci, serbest fenolik madde miktarı (SF), fenolik bileşiklerin salınımı (FBS), serbest antioksidan aktivite (Serbest-AA) ve antioksidan aktivitenin salınımı (AAS) yanıtlarının "maksimize et" hedefi doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Diğer bağımlı değişkenler için yanıtlar, "aralıkta" hedefiyle optimize edilmiştir. Bu süreçte tüm parametrelere ve yanıtlara eşit derecede önem atfedilmiş ve her birine "3" ağırlık değeri verilmiştir.

Model, tüm hedef yanıtları en üst düzeye çıkarmak için en uygun ultrasonik modifikasyon (UM) koşullarını %100 genlik ve 15 dakikalık işlem süresi olarak belirlemiştir. Desirability değeri 0,933 olarak tespit edilmiştir; bu değer, optimum noktada elde edilen verilerin doğruluğunu ve modelin öngörme potansiyelini yansıtmaktadır. Desirability değerinin 1'e yakın olması, belirlenen koşullarda yüksek bir optimizasyon düzeyi sağlandığını göstermektedir. Belirlenen optimum UM koşullarına göre, doğrulama analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Tablo 4.12'de sunulmuştur. Deneysel analiz sonuçlarının, deneysel tasarımın öngördüğü değerlerle büyük ölçüde uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu, modelin verilen işlem koşulları altında UM yanıtlarını öngörmede güvenilir ve

doğru bir şekilde çalıştığını kanıtlamaktadır. Optimizasyon süreci, ultrasonik modifikasyonun en etkili koşullarının belirlenmesinde rehberlik sağlayarak, süreç parametrelerinin hassasiyetini ve uygulama etkinliğini artırmıştır.



Şekil 4.4 Yanıtlar ve bağımsız değişkenler arasındaki etkileşimleri gösteren kontur grafikleri

Tablo 4.12 Parametrelerin optimizasyonu ve deneysel tasarımın doğrulanması

Bağımlı Değişken	İşlem süresi (dakika)	Genlik seviyesi (%)	Optimizasyon değerleri	Doğrulama değerleri	Desirability
Süspansiyon viskozitesi (mPa.s)	15	100	1,88	1,79±0,05	0,933
SF (GAE mg/g)			2,48	2,47±0,01	
BF (GAE mg/g)			7,49	9,98±0,05	
FB'lerin salınımı (%)			24,90	24,74	
Serbest – AA (mg TE/100 g)			29,97	30,69±0,88	
Bağlı – AA (mg TE/100 g)			214,83	234,02±33,55	
AA'ların salınımı (%)			12,29	11,60	

4.3 Mikrobiyal Biyoproses ile Modifikasyonun Değerlendirilmesi

Çalışmamızın mikrobiyal biyoproses (MB) yoluyla buğday kepeğini modifiye etmeyi amaçlayan aşamasında, starter kültür olarak laktik asit bakterilerinin (LAB) maya ile birlikte kullanımının etkileri incelenmiştir. Bu yaklaşım, bileşik suş fermentasyonunun sunduğu çeşitli avantajlar nedeniyle tercih edilmiştir. Bileşik suş fermentasyonu, metabolik yükü suşlar arasında iş bölümü yoluyla dağıtarak karmaşık substratların daha etkili bir şekilde dönüşümünü sağlama ve sinerjik etkiler gerçekleştirme potansiyeline sahiptir [184]. Literatürde, LAB ve maya kombinasyonlarının bireysel mikroorganizma uygulamalarına kıyasla daha etkin sonuçlar verdiği çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir [185]. Bu sinerjistik etki, fermentasyon sürecinin verimliliğini artırmak ve modifiye edilen buğday kepeğinin fonksiyonel özelliklerini optimize etmek için önemli bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

Tez çalışmasında MB uygulaması 30 °C'de 24 saat süreyle gerçekleştirilmiş olup, işlem başlangıcında, 6. saatte ve 24. saatin sonunda örneklerin pH değerleri ve mikrobiyal yükleri Tablo 4.13'te sunulmuştur. *Levl. brevis* LABE 32 (MB32) kullanılarak gerçekleştirilen uygulamada 24 saatin sonunda laktik asit bakterileri (LAB) ve *S. cerevisiae* popülasyonlarında sırasıyla 1,30 ve 1,23 log kob/mL düzeyinde artış gözlemlenmiştir. Buna karşın, *Lacp. plantarum* LABE 29 (MB29) kullanılarak gerçekleştirilen mikrobiyal biyoproses işlemi, LAB için 2,38 log kob/mL ve maya için 1,44 log kob/mL düzeyinde daha yüksek mikrobiyal gelişme oranları ile sonuçlanmıştır.

Fermentasyon süresince her iki mikrobiyal kombinasyonda da belirgin bir pH düşüşü tespit edilmiş olup, asitlikteki artış MB32 kombinasyonunda daha belirgin olmuştur. Prückler ve ark. [186] tarafından yapılan çalışmada, *Lacp. plantarum* ve *Levl. brevis* de dahil olmak üzere farklı LAB türlerinin buğday kepeği gibi kompleks matrisler üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, fermentasyon prosedürlerinin, *Levl. brevis* hücre sayısında 0,85 log kob/g ve *Lacp. plantarum* hücre sayısında 0,94 log kob/g artış sağladığı rapor edilmiştir. Çalışmamız, MB29'un LAB büyümesini teşvik etmede MB32'ye

kıyasla daha etkili olduğunu ortaya koyarak bu bulguları desteklemektedir (Tablo 4.13).

Tablo 4.13 Mikrobiyal biyoproses sırasında buğday kepeği süspansiyonlarında mikroorganizma gelişimi

Süre / Kültür		0. saat		6. saat	24. saat	
		Mikroorganizma sayısı (log kob/mL)	pH	pH	Mikroorganizma sayısı (log kob/mL)	pH
MB32	**LAB**	7,87	7,70	6,76	9,17	4,86
	Maya	5,91			7,14	
MB29	**LAB**	7,03	7,92	6,65	9,41	5,14
	Maya	5,76			7,20	

MB32: *Levl. brevis* LABE 32 ve *S. cerevisiae* TGM 55; MB29: *Lacp. plantarum* LABE 29 ve *S. cerevisiae* TGM 55

Lacp. plantarum ve *Levl. brevis* ile *S. cerevisiae* nin birlikte buğday kepeğini modifiye etmedeki sinerjistik etkileri, literatürde Ma ve ark. [187], Wang ve ark. [188], Wang ve ark. [189], Zhang ve ark. [85] ve Zhao ve ark. [63] tarafından rapor edilmiştir. Bununla birlikte, bu çalışmalarda fermentasyon süreci sonucunda mikrobiyal gelişim oranları veya pH değişimlerine ilişkin spesifik bulgular sunulmamıştır. Ancak Coda ve ark. [190] tarafından yapılan bir çalışmada *Levl. brevis* ve *Kazachstania exigua*'nın birlikte kullanımıyla mikrobiyal gelişmenin, özellikle parçacık boyutlarına bağlı olarak önemli ölçüde etkilendiği bildirilmiştir. Çalışmada, fermentasyonun 8. saatinde kaba buğday kepeği örneklerinde mikrobiyal gelişim yaklaşık 1 log artış göstermiştir. Ayrıca, fermentasyonun 8. saatinde kültürlere proteolitik bir enzimin eklenmesiyle, 24. saatin sonunda LAB ve maya popülasyonlarında sırasıyla 2,0 ve 1,8 log artış tespit edilmiştir. Bu bulgular, mikrobiyal biyoproses sırasında kullanılan kültürlerin ve eklenen enzimlerin fermentasyon verimliliği üzerindeki etkisini vurgulamaktadır.

Çalışmamızda elde edilen sonuçlar, literatürdeki bu bulgularla uyumlu olup, MB29'un LAB büyümesini teşvik etmede daha etkili olduğunu ancak MB32'nin ise fermentasyon sırasında daha hızlı bir pH düşüşü sağladığını göstermektedir. Ancak, fermentasyon süresi, başlangıç mikrobiyal yoğunlukları ve fermentasyon ortamının

bileşimi gibi faktörler, farklı çalışmalardaki sonuçlar arasında görülen varyasyonları açıklayabilir.

Tez çalışmasının hibrit modifikasyon (HM) aşamasında kullanılacak mikrobiyal kombinasyonun seçiminde etkili olan faktörler, Bölüm 3.2.3.3'te de belirtildiği üzere, MB32'nin diyet lif modifikasyonu, fitik asit azaltımı ve süspansiyon viskozitesindeki artış gibi parametrelerde daha umut verici sonuçlar sergilemesidir. MB29 uygulaması ise, MB aşamasında farklı mikrobiyal kombinasyonların buğday kepeği üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmede önemli katkılar sağlamıştır. Bu nedenle, hibrit modifikasyon sürecinde MB32'nin seçimi stratejik bir karar olarak öne çıkmıştır.

4.4 Modifikasyon İşlemlerinin Buğday Kepeği Üzerine Etkileri

4.4.1 Diyet Lifi İçeriği

Tablo 4.14'te işlem görmemiş referans kepeğin ve modifiye edilmiş kepek örneklerinin besinsel lif içerikleri sunulmuştur. Çalışmanın bu bölümünden itibaren, herhangi bir modifikasyon işlemine tabi tutulmamış Tekirdağ çeşit buğday kepeği (TK), referans numune olarak "kontrol" adıyla anılacaktır. Bu, farklı modifikasyon tekniklerinin etkilerinin daha net bir şekilde karşılaştırılabilmesi için bir temel oluşturmayı amaçlamaktadır.

Tüm uygulamalar, buğday kepeğinin çözünür diyet lifi (SDF) içeriğini anlamlı düzeyde artırmıştır. MB32 uygulaması (*Levl. brevis* LABE 32 ve *S. cerevisiae* TGM 55 kombinasyonu), kontrol örneğine kıyasla SDF içeriğini 2,12 kat artırarak en yüksek değeri sağlamış ve diğer tüm uygulamalardan istatistiksel olarak farklı bir sonuç vermiştir ($p<0,05$). MB29 uygulaması (*Lc. plantarum* LABE 29 ve *S. cerevisiae* TGM 55 kombinasyonu) ise SDF içeriğini 1,69 kat artırmış, ancak MB32 kadar etkili olmamıştır. Hibrit modifikasyon (HM) uygulaması da SDF değerinde 1,89 kat artış sağlayarak anlamlı bir değişim yaratmıştır. Ultrasonik modifikasyon (UM) uygulaması ise SDF içeriğinde MB29 ile benzer bir artış oranı (1,62 kat) sağlamıştır. Bu sonuçlar, MB işleminin, özellikle MB32 kombinasyonunun, çözünmeyen diyet liflerini mikrobiyal enzimler aracılığıyla çözünebilir forma dönüştürme kapasitesinin daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. HM uygulaması ise MB ve UM işlemlerinin etkilerini

birleştirerek benzer bir başarı elde etmiştir. Bu bağlamda, MB32'nin çözünür diyet liflerini artırmada daha üstün bir modifikasyon yöntemi olduğu değerlendirilebilir.

Tablo 4.14 Modifikasyon tekniklerinin buğday kepeklerinin bazı besinsel özellikleri üzerine etkisi

Örnek	SDF (%)	IDF (%)	TDF (%)	Fitik asit (g/100 g)
Kontrol	3,26±0,09^{d}	41,04±0,21^{ab}	44,29±0,31^{b}	2,72±0,02^{a}
MB29	5,52±0,38^{bc}	39,64±0,30^{bc}	45,16±0,69^{b}	2,39±0,05^{b}
MB32	6,92±0,28^{a}	38,16±0,99^{c}	45,08±0,72^{b}	2,02±0,02^{c}
UM	5,27±0,06^{c}	42,89±1,08^{a}	48,16±1,02^{a}	1,30±0,01^{d}
HM	6,16±0,24^{ab}	43,08±0,51^{a}	49,23±0,75^{a}	0,13±0,00^{e}

Sonuçlar üç tekrarın ortalama ± standart sapması olarak ifade edilmiştir. Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip ortalamalar gruplar için önemli farklılıkları ($p<0,05$) göstermektedir. Kontrol: İşlem görmemiş buğday kepeği; MB29: *Lc. plantarum* LABE 29 ve *S. cerevisiae* TGM 55 kombinasyonu ile MB uygulaması; MB32: *Levl. brevis* LABE 32 ve *S. cerevisiae* TGM 55 kombinasyonu ile MB uygulaması; UM: ultrasonik modifikasyon; HM: hibrit modifikasyon

Örneklerin çözünmez diyet lifi (IDF) değerleri arasında farklılıklar daha az belirgin şekilde ortaya çıkmıştır. Kontrol örneğinde IDF değeri %41,04±0,21 iken, UM (%42,89±1,08) ve HM (%43,08±0,51) uygulamaları IDF içeriğinde bir miktar artışa neden olmuştur. Ancak söz konusu bu artış istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. MB29 ve MB32 uygulamaları ise kepeklerin IDF değerlerinin düşmesine neden olmuş ve sırasıyla %39,64±0,30 ve %38,16±0,99 IDF içeriğine sahip kepekler üretmiştir. MB modifikasyon ile IDF içeriğindeki bu düşüş, SDF içeriğinin en belirgin şekilde yükselmesine neden olan MB32 uygulamasında istatistiksel olarak anlamlıdır.

Örnekler toplam diyet lifi (TDF) miktarı açısından değerlendirildiğinde ise en yüksek değer HM (%49,23±0,75) ve UM (%48,16±1,02) uygulamalarının örneklerinde gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar MB32 (45,08±0,72%), MB29 (45,16±0,69%) uygulamalarından ve kontrol örneğinden (44,29±0,31) istatistiksel anlamlı şekilde daha yüksektir. Tablo 4.14'ten belirgin şekilde görülebileceği üzere, tez çalışmasının LAB ve maya kombinasyonu ile modifiye edildiği her iki uygulamada da SDF içeriğinin önemli düzeyde arttığı ve paralel olarak ilgili örnekte IDF değerinin azaldığı tespit edilmiştir.

Aslında MB işleminden sonra IDF içeriğindeki azalma beklenen bir durumdur. Literatürde çeşitli çalışmalar buğday kepeğini fermentasyon yoluyla modifiye etmenin diyet lifi kompozisyonuna olan etkisini araştırmıştır:

Tu ve ark. [191] *Fomitopsis pinicola* mantar türü ile fermente ettikleri buğday kepeğinin lif yapısında ve bileşiminde belirgin değişiklikler gözlemlemiştir. Çalışmada, fermentasyon sürecinde çözünmeyen diyet liflerinin (IDF) parçalanarak çözünen diyet liflerine (SDF) dönüştüğü ve bu dönüşümün SDF içeriğini önemli ölçüde artırdığı rapor edilmiştir. Ayrıca fermentasyon sonucunda sıkı yapının gevşek ve gözenekli bir hale geldiği ve bu durumun kepeğin su absorbe etme kapasitesini artırdığı belirtilmiştir. Benzer şekilde, Lu ve ark. [192] tarafından yapılan bir başka çalışmada *Eurotium cristatum* adlı potansiyel probiyotik mantar kullanılarak buğday kepeğinin fonksiyonel özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma, *E. cristatum* ile gerçekleştirilen fermentasyonun IDF içeriğini %46,61'den %43,43'e azalttığını, buna karşılık SDF içeriğini %3,07'den %7,27'ye çıkardığını ortaya koymuştur.

Liao ve ark. [193] *S. cerevisiae* ve *Bacillus subtilis* ile fermentasyon sonucunda buğday kepeğinde meydana gelen selüloz ve hemiselüloz hasarının, çözünür diyet lifi (SDF) içeriğinin artışına ve kepeğin su tutma kapasitesinin iyileşmesine neden olduğunu rapor etmiştir. Zhao ve ark. [63]) ise laktik asit bakterileri ve maya kullanarak fermente ettiği buğday kepeğinde, SDF içeriğinin %4,43'ten %7,54'e yükseldiğini, IDF içeriğinde ise anlamlı bir fark oluşmadığını tespit etmiştir. Aynı çalışmada, toplam diyet lifi (TDF) içeriğinde %52,36'dan %53,68'e minimal bir artış gözlemlenmiş, ancak bu değişim istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

Ye ve ark. [52] ise altı farklı modifikasyon türü uyguladıkları buğday kepeğinin kimyasal kompozisyonunu inceledikleri çalışmalarında maya ile fermente ettikleri kepeğin işlenmemiş kepeğe göre SDF içeriğinin %2,91'den %4,44'e arttığını, IDF içeriğinin istatistiksel olarak değişmediğini, TDF açısından da değişimin anlamlı olmadığını bulmuşlardır.

Du-qin ve ark. [194], *S. cerevisiae* ve *L. plantarum*'u ayrı ayrı ve birlikte kullanarak fermente ettikleri buğday kepeğinin fizikokimyasal özelliklerindeki ve

diyet lif içeriğindeki değişimleri analiz etmişlerdir. Çalışmada, SDF içeriğinin %40,6 oranında arttığı, kepek yapısının sağlam ve kompakt bir yapıdan gevşek ve dağınık bir yapıya dönüştüğü belirtilmiştir. Bu değişimin, kepeğin biyoaktif bileşiklerinin salınımına katkı sağladığı ifade edilmiştir. Bununla birlikte, IDF ve TDF içeriğinde herhangi bir değişim gözlemlenmediği bildirilmiştir. Bir başka çalışmada ise, *Basidiomycota, Candida utilis* ve *Lactobacillus plantarum* kullanılarak buğday kepeği diyet lifi fermentasyona tabi tutulmuş ve çözünmeyen diyet lifinin (IDF) parçalanarak çözünür diyet lifi (SDF) içeriğinin artırıldığı tespit edilmiştir. Fermentasyon sonucunda IDF içeriği %19,194 oranında azalmış, SDF içeriği ise %3,91'den %7,47'ye yükselmiştir. Bu değişimin, fermentasyon sırasında liflerin fiziksel yapısının daha gözenekli ve parçalı hale gelmesiyle ilişkili olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca, yüzey yapısının hasar görmesinin ve bu dönüşümün liflerin işlevselliğini artırdığı ifade edilmiştir [195].

Yukarıdaki literatür bulgularına dayanarak, mikrobiyal biyoproses (MB) uygulanmış buğday kepeği ile ilgili genel kanı, çözünmeyen diyet liflerinin (IDF) mikrobiyal enzimlerin etkisiyle parçalanarak çözünür diyet liflerine (SDF) dönüştüğü ve bu dönüşümün diyet lifi kompozisyonunda belirgin bir değişim yarattığı yönündedir. MB işleminin, özellikle kullanılan mikroorganizma türü ve fermentasyon koşullarına bağlı olarak, kepek yapısını gevşek ve gözenekli hale getirdiği, bu sayede liflerin su absorbe etme kapasitesinin ve fonksiyonel özelliklerinin iyileştiği bildirilmektedir. Bununla birlikte, bazı çalışmalarda bu dönüşümün yetersiz kaldığı veya IDF ve TDF içeriklerinde istatistiksel olarak anlamlı bir değişim gözlemlenmediği ifade edilmiştir. Bu durumun, fermentasyon süresi, mikroorganizma kombinasyonu, işlem sıcaklığı ve kullanılan kepek matrisi gibi faktörlere bağlı olduğu değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, MB'nin diyet lifi kompozisyonu ve işlevselliği üzerindeki etkilerinin tam anlamıyla anlaşılabilmesi için, süreç parametrelerinin daha sistematik bir şekilde optimize edilmesi ve bu süreçlerin mekanizmalarının detaylı bir şekilde incelenmesi gerektiği açıktır.

Özetle; Tablo 4.14'ün incelenmesi, UM ve HM uygulamalarının diyet lifi içeriği üzerinde MB işleminden farklı bir etki yarattığını ortaya koymaktadır. Her iki uygulamanın da (UM ve HM) çözünür diyet lifi (SDF) içeriğinde artış sağladığı gözlenirken, kontrol örneğine kıyasla çözünmeyen diyet lifi (IDF) içeriğindeki

değişimin istatistiksel olarak anlamlı bulunmaması dikkat çekicidir. Bu durum, UM ve HM uygulamalarının toplam diyet lifi (TDF) içeriğinde anlamlı bir artışa yol açması ile sonuçlanmıştır. UM ve HM'nin diyet lifi bileşimi üzerindeki bu etkileri, kullanılan modifikasyon tekniklerinin yapısal ve kimyasal dönüşüm mekanizmalarını anlamak açısından önemli veriler sunmaktadır.

Literatürde buğday kepeğine ultrases ile muamele edilmesine yönelik çalışmalar bulunmakla birlikte, bu araştırmaların buğday kepeğini modifiye etme amacıyla değil; kepekten diyet lifi, antioksidan maddeler gibi biyoaktif bileşiklerin ekstraksiyonunda etkinliği artırma [135, 196, 197] ya da oksidatif stabilitenin artırılarak raf ömrünün uzatılması gibi amaçlarla [108] uygulandığı görülmektedir. Ultrasonik işlemin doğrudan bir tahıl kepeği üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışmada, 1:10 oranında su ile süspanse edilen karabuğday kepeği, 30 dakika boyunca 150 W gücünde ultrasonik işlemle muamele edilmiştir. Bu uygulama sonucunda, çözünür diyet lifi (SDF) içeriği %6,38'den %8,5'e, çözünmeyen diyet lifi (IDF) içeriği %38,1'den %49,2'ye ve toplam diyet lifi (TDF) içeriği %44,9'dan %57,7'ye yükselmiştir [198]. Bu bulgular, ultrasonik modifikasyonun diyet lifi bileşimini değiştirme potansiyeline dikkat çekmektedir.

Elde edilen sonuçlar, buğday kepeğinin diyet lifi kompozisyonunun modifikasyon tekniklerine bağlı olarak farklı biçimlerde değiştiğini açıkça ortaya koymaktadır. Mikrobiyal biyoproses (MB) uygulamaları, özellikle MB32 kombinasyonu, çözünmeyen diyet liflerinin (IDF) çözünür diyet liflerine (SDF) dönüşümünde oldukça etkili olmuştur. Bu dönüşüm, mikrobiyal enzimlerin çözünmeyen lifleri parçalayarak daha kolay çözünür hale getirmesiyle ilişkilendirilmiştir. MB uygulamaları, SDF içeriğinde önemli artışlar sağlarken, IDF içeriğinde azalma ve diyet lifi bileşiminin yeniden düzenlenmesiyle dikkat çekmiştir. Böylece, MB32 gibi spesifik mikrobiyal kombinasyonların fonksiyonel özellikleri iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Ultrasonik modifikasyon (UM) ve hibrit modifikasyon (HM) uygulamaları ise diyet lifi kompozisyonu üzerinde farklı bir etki mekanizması sergilemiştir. UM, ses kavitasyonu yoluyla lif yapısında fiziksel ve kimyasal dönüşümlere neden olmuş, bu da toplam diyet lifi (TDF) içeriğinde belirgin artışlarla sonuçlanmıştır. Bununla birlikte ultrasonik uygulamanın IDF ve SDF içerikleri üzerindeki etkileri

daha sınırlı kalmıştır (Tablo 4.14). HM uygulaması, UM ve MB tekniklerinin etkilerini birleştirerek, SDF içeriğinde MB'ye benzer şekilde anlamlı artışlar sağlamış, ancak IDF içeriğini değiştirmeden TDF miktarını yükseltmiştir.

Literatürde yer alan çalışmalar, mikrobiyal biyoproses ve ultrasonik modifikasyonun buğday kepeği diyet lifleri üzerindeki etkilerini destekler niteliktedir. MB'nin enzimatik aktivite yoluyla lif dönüşümünü hızlandırdığı, UM'nin ise fiziksel yapıyı etkileyerek diyet liflerinin su tutma kapasitesini artırdığı değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, diyet lifi kompozisyonunda gözlemlenen değişimlerin, mikroorganizma türü, modifikasyon süresi ve kepek matrisinin başlangıç özellikleri gibi birçok faktöre bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Açıklanan bulgular ve verilen literatür özetleri temelinde, MB ve UM gibi farklı modifikasyon tekniklerinin, kepek diyet lifi bileşiminde spesifik değişimler yaratmada etkili olduğu görülmektedir. Kepeğin besin değeri ve fonksiyonelliğini artırmada bu tekniklerin farklı avantajları bulunmakta olup, hedeflenen etkiye göre yöntem seçimi gerçekleştirilmelidir.

4.4.2 25,7 İçeriği

İşlem görmemiş referans kepek ile modifikasyona tabi tutulmuş kepek örnekleri fitik asit miktarı açısından değerlendirildiğinde hem MB hem de UM uygulamaları tek başlarına ve kombinasyon halinde fitik asit içeriğinde önemli bir azalma sağlamıştır (Tablo 4.14). En düşük fitik asit değeri, HM uygulamasıyla (0,13±0,00 g/100 g) elde edilmiştir; bu durum, HM'nin fitik asidin parçalanmasında üstün bir performans sergilediğini ve sinerjistik etkiler sunduğunu göstermektedir. UM uygulaması (1,30±0,01 g/100 g) ve MB32 uygulaması (2,02±0,02 g/100 g) da fitik asit miktarını kayda değer ölçüde azaltmada etkili olmuştur. Bununla birlikte, MB29 uygulaması fitik asit içeriğini yalnızca %12 oranında azaltarak 2,39±0,05 g/100 g seviyesine düşürmüş ve kontrol grubuna kıyasla daha sınırlı bir etki göstermiştir. Tekniklerin bireysel uygulamaları değerlendirildiğinde, ultrasonik modifikasyonun fitik asidin parçalanmasında mikrobiyal biyoprosese kıyasla daha belirgin bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Ancak iki tekniğin kombinasyonu, fitik asit degradasyonunda önemli bir sinerjistik etki yaratmış ve en etkili sonuçlar bu uygulama ile elde edilmiştir. Bu bulgular, HM'nin fitik asit

içeriğini azaltma konusunda hem mikrobiyal hem de ultrasonik modifikasyonun güçlü yönlerini birleştirdiğini ortaya koymaktadır.

Literatürde buğday kepeğinin fitik asit içeriğinin fermentasyon yoluyla azaltıldığı çalışmalara rastlamak mümkündür. Liu ve Ding [199] çalışmalarında buğday kepeğini *Saccharomyces boulardii* ile fermente edip, fitik asit içeriğinin %74,67'lik bozunma oranı ile önemli ölçüde azalttıklarını rapor etmiştir. Bir başka çalışmada fırıncı mayası ile 30°C'de 8 saat fermentasyon sonucunda fitik asit içeriği %96,9 oranında azaltmıştır [200]. Majzoobi ve ark. [201] parçacık boyutu küçültme ve fermentasyon uygulamalarını birleştirerek buğday kepeğinin fitik asit miktarını %76,4 oranında düşürmeyi başarmıştır.

Ultrasonik uygulamaların da çeşitli tahıl kepeklerindeki fitik asit miktarı üzerindeki azaltıcı etkisinin araştırıldığı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda tahıl kepeklerine doğrudan bir ultrasonikasyon uygulanmasa da, tahılların ya da kepeklerin yıkanması sırasında kullanımının dolaylı etkileri araştırılmıştır. Örneğin; bir çalışmada, ultrasonik yıkama ile birlikte dişli valsli değirmen kullanımının buğday kepeğindeki fitik asit içeriğini %62,98 oranında azalttığı bulunmuştur. Bu çalışmada ultrasonik yıkama, dişli valsli değirmen tarafından yok edilen kırık hücrelerden aleurone hücre içeriğinin yıkanmasına yardımcı olmuştur [202]. Yine Mohammadi ve ark. [203] çalışmalarında pirinç kepeğindeki bazı ağır metalleri ve antibesinsel unsur olan fitik asit içeriğini asidik yıkama işlemini ultrasonik uygulama ile kombinleyerek düşürmeyi amaçlamıştır. Kombine uygulamanın örneklerin fitik asit içeriğini $1{,}745 \pm 0{,}028$ g/kg'den 0.718 ± 0.005 g/kg'ye kadar düşürmeyi başardığı rapor edilmiştir. Başka bir çalışmada yüksek yoğunluklu ultrasesin doğrudan uygulamasının yulaf ve arpa kepeği üzerindeki etkileri araştırılmış ve ultrasonikasyonun fitik asit içeriğini yulaf kepeğinde %17, arpa kepeğinde ise %39 oranında azalttığı gösterilmiştir. Bu, ultrasesin fitik asit içeriğini etkili bir şekilde azaltabileceğini göstermektedir [204].

Bu kısımda, çalışmamızda buğday kepeğine uygulanan farklı modifikasyon tekniklerinin fitik asit içeriği üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. HM uygulaması, fitik asit içeriğini en etkili şekilde azaltarak sinerjistik bir etki yaratmış ve mikrobiyal ve ultrasonik modifikasyonların güçlü yönlerini birleştirmiştir. Bu bulgu HM'nin fitik asit degradasyonunda etkin bir

yöntem olduğunu göstermektedir. Literatürle karşılaştırıldığında hem MB hem de UM tekniklerinin fitik asit içeriğini azaltmada etkili olduğu ve bu sonuçların mikrobiyal enzimatik aktivite (MB) ile ultrasonikasyonun fiziksel ve kimyasal etkilerine (UM) dayandığı görülmektedir. Termal olmayan bir teknoloji olarak ultrasesin çevre dostu olmasının yanında ses kavitasyon özelliğinin çok çeşitli amaçlarla kullanılabileceği çalışmalarla ortaya konmaktadır. Ultrasonikasyonun başarılı uygulamalarından biri de fitik asit azaltımıdır [205]. Ultrasonik uygulamalar, özellikle tahıl kepeklerinde fitik asit içeriğini azaltma potansiyeli ile dikkat çekerken, mikrobiyal biyoprosesin fermentasyon yoluyla fitik asidin bozunmasını teşvik ettiği literatürde geniş bir karşılık bulmaktadır. Bu çalışmada farklı tekniklerin tek başlarına ve kombinasyon halinde kullanılarak fitik asit içeriğinin azaltılabileceği ve böylece buğday kepeğinin besin değerinin artırılabileceği kanıtlanmıştır.

4.4.3 Teknofonksiyonel Özellikler

Tablo 4.15'te, modifikasyon tekniklerinin buğday kepeklerinin toplam su tutma kapasitesi (T-STK), güçlü su tutma kapasitesi (G-STK) ve süspansiyon viskozitesi değerleri üzerine etkisi gösterilmiştir.

Toplam su tutma kapasitesi değeri (literatürde "water retention capacity" olarak anılmaktadır) Bölüm 4.1.3'te de açıklandığı üzere, bir dış kuvvete maruz bırakılan besinsel lifin mikro gözeneklerde bağladığı suyun miktarı ile ilişkilidir ve gıda işleme, besin değeri ve ürün kalitesini önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir [206].

Tablo 4.15 Modifikasyon tekniklerinin buğday kepeklerinin bazı fonksiyonel özellikleri üzerine etkisi

Örnek	T-STK (ml/g)	G-STK (ml/g)	SV (mPa·s)
Kontrol	3,82±0,08^{c}	1,152±0,015^{bc}	1,57±0,05^{c}
MB29	5,98±0,16^{a}	1,076±0,034^{c}	1,69±0,07^{bc}
MB32	5,35±0,21^{ab}	1,039±0,019^{c}	2,71±0,22^{a}
UM	4,73±0,66^{bc}	1,496±0,142^{a}	1,79±0,05^{bc}
HM	5,50±0,47^{ab}	1,270±0,020^{b}	2,08±0,06^{b}

Sonuçlar üç tekrarın ortalama ± standart sapması olarak ifade edilmiştir. Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip ortalamalar gruplar için önemli farklılıkları ($p<0,05$) göstermektedir. Kontrol: İşlem görmemiş buğday kepeği; MB29: *Lc. plantarum* LABE 29 ve *S. cerevisiae* TGM 55 kombinasyonu ile MB uygulaması; MB32: *Levl. brevis* LABE 32 ve *S. cerevisiae* TGM 55 kombinasyonu ile MB uygulaması; UM: ultrasonik modifikasyon; HM: hibrit modifikasyon; T-STK: Toplam su tutma kapasitesi; G-STK: Güçlü su tutma kapasitesi; SV: 50 s^{-1} kayma hızında süspansiyon viskozitesi

Tüm modifikasyon uygulamalarının, buğday kepeğinin toplam su tutma kapasitesi (T-STK) üzerinde önemli bir artış sağladığı, UM uygulamasındaki artışın istatistiksel olarak anlamlı olmadığı belirlenmiştir. MB29 örneği, en yüksek T-STK değerine sahip örnek olarak öne çıkmıştır. MB32 uygulaması, MB29'a kıyasla daha düşük bir T-STK artışı sağlamış, ancak kontrol örneğinden anlamlı ölçüde daha yüksek bulunmuştur. Literatürde, fermentasyon yoluyla buğday kepeğini modifiye eden çalışmalarda, artan T-STK değerleri birkaç temel faktörle açıklanmaktadır:

- Mikroyapısal değişiklikler: Laktik asit bakterileri (LAB) ve mayaların dahil olduğu fermentasyon süreçleri, buğday kepeğinde proteinlerin bozulması ve hücre duvarlarının parçalanması gibi önemli mikroyapısal değişikliklere yol açmaktadır. Bu durum, daha fazla su tutabilen gözenekli bir yapı ile sonuçlanmaktadır [63].
- Yüzey özellikleri: *Lactobacillus plantarum, Lactobacillus acidophilus ve Bacillus subtilis* gibi bakterilerin tek başına veya kombinasyon halinde kullanıldığı çalışmalarda, taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri, fermente buğday kepeğinin parçalı ve gözenekli bir yüzey sergilediğini göstermiştir. Bu özellik, su tutma kapasitesinin artışını açıklamaktadır [193].

- Çözünebilir diyet lif içeriği: Fermentasyon, çözünmeyen diyet liflerinin mikrobiyal bozunmaya (selüloz ve hemiselüloz hasarlanması vb.) uğrayarak çözünebilir formlara dönüşmesini sağlamaktadır. Çözünebilir lifler, su için daha yüksek afiniteye sahip olduğundan, T-STK değerinde önemli bir artışa neden olmaktadır [63, 193].
- Ekstrakte edilebilir arabinoksilan: Fermentasyon, su bağlama kapasitesine önemli katkı sağlayan ekstrakte edilebilir arabinoksilan seviyelerini artırmaktadır. Literatürde, bu bileşenin fermentasyon sonrası seviyesinin 3-4 kat artabileceği belirtilmiştir[14, 63].
- Fitik asit azalması: Fermentasyon süreçleri sırasında fitik asit içeriği azalmaktadır. Fitik asidin su ve besin maddelerine bağlanarak kullanılabilirliğini sınırladığı bilinmektedir. Fermentasyon sırasında bu bileşiğin parçalanması, daha fazla su bağlayıcı bölgenin serbest kalmasına olanak tanımakta ve T-STK artışına katkı sağlamaktadır [14, 63].

Çalışmamızda, MB uygulanan modifiye kepeklerde gözlemlenen artan T-STK değerinde yukarıda belirtilen tüm faktörlerin etkili olduğu değerlendirilmektedir. Buna karşın, ultrasonik modifikasyon (UM) uygulanan örneklerde, T-STK artışı MB örneklerine kıyasla daha sınırlı olmuştur. UM uygulaması, kontrol örneğine kıyasla su tutma kapasitesinde bir miktar artış sağlamış olsa da bu artış istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p>0,05$). Öte yandan, hibrit modifikasyon (HM), yani optimum ultrasonik koşullarda modifiye edilen örneklerin MB32 ile işlenmesi, MB32 uygulamasına eşdeğer bir etki yaratmış ve toplam su tutma kapasitesinde belirgin bir artış sağlamıştır ($p<0,05$).

Örnekler, dış bir santrifüj kuvvetiyle muamele edildiğinde nano gözeneklerde tutuklanan suya atfedilen [53] güçlü su tutma kapasitesi (G-STK) bakımından değerlendirildiğinde, UM uygulaması, G-STK üzerinde kontrol örneğine kıyasla anlamlı bir artış sağlamış ve en yüksek G-STK değerini sergilemiştir ($p<0,05$). Ayrıca hem UM hem de HM uygulamaları G-STK üzerinde artış yaratırken, MB32 ve MB29 uygulamaları bu parametreyi azaltıcı bir etki göstermiş olsa da bu etki istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p>0,05$). Literatürde G-STK değeri üzerine MB'nin etkilerini ele alan araştırmalara rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu parametre için literatürle doğrudan bir kıyaslama

yapılamamaktadır. UM uygulaması, kontrol ve diğer uygulamalara kıyasla daha yüksek G-STK değeri sağlamıştır. G-STK değerinin buğday kepeğinin yüzey alanıyla ilişkili olduğu bilinmektedir [53, 207]. UM'nin yüksek yoğunlukta (%100 genlik) uygulanması, kepek hücrelerinin yüzey alanında önemli bir artışa neden olmuş ve bu artış, nano ölçekli su tutma bölgelerini genişletmiştir. Bu bağlamda, UM'nin partikül boyutunu küçülterek [208] ve lif ile protein ayrımını teşvik ederek su bağlama bölgelerini artırdığı ve dolayısıyla G-STK üzerinde artırıcı bir etki yarattığı değerlendirilebilir [209].

Modifikasyon işleminin, buğday kepeğindeki diyet liflerinin çözünmez formlarının çözünebilir formlarına dönüşümünü ve böylece ekstrakte edilebilirliğinin artmasını sağladığı Bölüm 4.4.1'de detaylı olarak ele alınmıştır. Bu dönüşüm, kepek süspansiyonunun viskozitesinin yükselmesiyle sonuçlanmaktadır (SDF değeri ve süspansiyon viskozitesi arasında yüksek bir korelasyon bulunmaktadır). Ek olarak, modifikasyon sırasında nişasta yapısında meydana gelen hasar, polimerizasyon derecesinin azalmasına yol açmakta ve bu durum da süspansiyonun reolojik özelliklerinde önemli bir artışa neden olmaktadır. Artan viskozite, modifikasyon işleminin kepek matrisi üzerindeki fiziksel ve kimyasal etkilerinin bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir [60, 146, 147]. Tablo 4.15 incelendiğinde, MB32 uygulamasının süspansiyon viskozitesi (SV) üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğu (2,71±0,22 mPa·s) ve kontrol örneğinden istatistiksel olarak anlamlı bir fark gösterdiği görülmektedir ($p<0,05$). Bu sonuç, MB'nin kepek matrisinde önemli mikroyapısal değişikliklere neden olduğunu ve reolojik özellikleri geliştirdiğini ortaya koymakta ve Tablo 4.14'ten de görülebileceği üzere MB32 uygulamasının en yüksek SDF değerine sahip kepekleri üretmesi ile de desteklenmektedir. MB29 uygulaması ise SV değerinde kontrol örneğine kıyasla anlamlı bir artış sağlayamamış ve kontrol grubuyla istatistiksel olarak benzer sonuçlar üretmiştir ($p>0,05$). Bunun aksine, hibrit modifikasyon (HM) uygulaması, MB32 uygulamasına benzer bir şekilde SV değerinde bir artış sağlamış ve 2,08±0,06 mPa·s ile kontrol örneğinden istatistiksel olarak farklı bir viskozite değeri elde edilmiştir (Şekil 4.7). Ultrasonik modifikasyonun tek başına uygulaması (UM) ise, MB29 uygulamasında olduğu gibi, SV üzerinde anlamlı bir artış yaratmamıştır. UM, SV üzerinde anlamlı bir değişim yaratmada yetersiz kalmışken; MB, özellikle MB32 kombinasyonu, kepek süspansiyonlarının reolojik

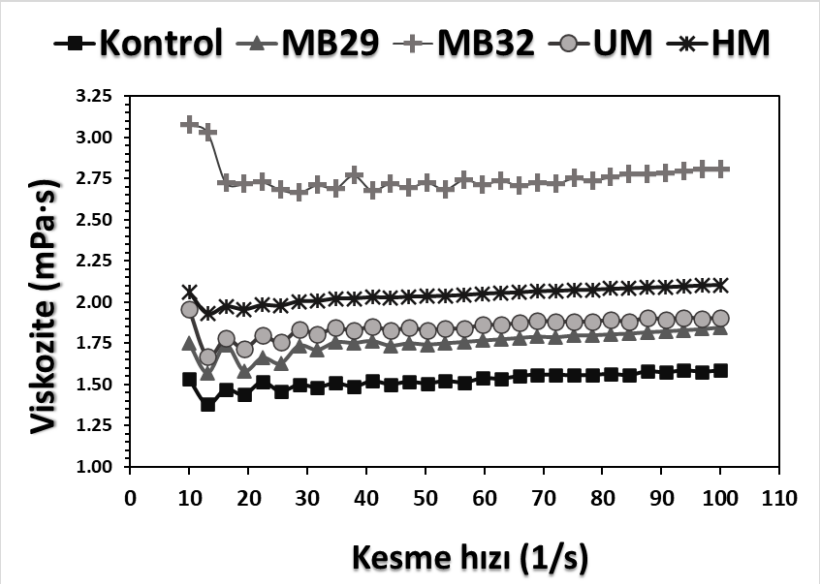
özelliklerini en etkili şekilde geliştiren yöntem olmuştur. Bu sonuçlar, hibrit modifikasyonun reolojik özellikler üzerindeki olumlu etkilerini ve UM'nin bu parametre üzerindeki görece sınırlı katkısını ortaya koymaktadır.

Literatürde, çeşitli yöntemlerle modifiye edilen buğday kepeğine ait süspansiyonların viskozite özelliklerini inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan birinde, buğday kepeğinin mikroakışkanlaştırılması (mikrofludizasyon) işleminin, süspansiyonların viskozitesini ve stabilitesini anlamlı düzeyde artırdığı rapor edilmiştir. Bu artış, partikül boyutunun küçülmesi ve yüzey alanının genişlemesi ile ilişkilendirilmiş; böylelikle kepek süspansiyonunun su tutma kapasitesinin (STK) artması ve daha yüksek ekstrakte edilebilirlik ile sonuçlandığı belirtilmiştir [60]. Yine bir başka çalışmada, mikrofludizasyon tekniği kullanılarak modifiye edilen buğday kepeği süspansiyonlarının viskozitesindeki artış, kepek partiküllerinin daha iyi homojenizasyonu ve değişime uğramış mikro yapısına atfedilmiştir. Bu teknikle uygulanan yüksek basınç, partikül boyutunu küçültmüş ve hücre yapısında meydana gelen fiziksel değişiklikler ile kepeğin su bağlama kapasitesini artırmıştır. Sonuç olarak, süspansiyonun viskozitesi önemli ölçüde iyileşmiştir [182].

Zhang ve ark. [210], ekstrüzyon ve enzimatik hidroliz yöntemlerini birleştirerek buğday kepeğini modifiye ettikleri çalışmalarında, çözünür diyet lifi içeriğinde kayda değer bir artış gözlemlemişler ve bunun süspansiyonların viskozitesini artırdığını rapor etmişlerdir. Ayrıca, modifikasyon sonucunda daha gevşek bir mikro yapı oluştuğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde, Roye ve ark. [148] ekstrüzyon pişirme yöntemiyle muamele ettikleri buğday kepeğinde, proses koşullarına bağlı olarak meydana gelen önemli yapısal bozunmaların, hem viskoziteyi hem de su tutma kapasitesini artırdığını bildirmiştir.

Yukarıda özetlenen çalışmalara karşın, bu parametrenin mikrobiyal biyoproses (MB) yoluyla modifiye edilen kepeklerde araştırıldığı bir çalışma bulunmamaktadır. Ancak bu tezde elde edilen bulgular, mikrobiyal biyoproses (MB) uygulamasının özellikle MB32 kombinasyonu ile buğday kepeğinin reolojik özelliklerini geliştirme potansiyelini ortaya koymaktadır. MB işleminin, liflerin mikroyapısını değiştirdiği, çözünmeyen diyet liflerinin çözünür formlara dönüşümünü teşvik ettiği ve böylece kepek süspansiyonlarının viskozitesini

anlamlı ölçüde artırdığı görülmüştür. Bu durum, mikrobiyal enzimlerin lif matrisi üzerindeki etkisiyle açıklanabilir. Ayrıca, hibrit modifikasyonun (HM), MB ve UM tekniklerinin avantajlarını birleştirerek reolojik özelliklerde önemli iyileşmeler sağladığı belirlenmiştir.



Şekil 4.5 İşlenmemiş ve modifiye edilmiş kepeklere ait süspansiyonların 10-100 s^{-1} kesme hızı aralığındaki viskozite değişimi grafiği

Kontrol: İşlem görmemiş buğday kepeği; MB29: *Lc. plantarum* LABE 29 ve *S. cerevisiae* TGM 55 kombinasyonu ile MB uygulaması; MB32: *Levl. brevis* LABE 32 ve *S. cerevisiae* TGM 55 kombinasyonu ile MB uygulaması; UM: ultrasonik modifikasyon; HM: hibrit modifikasyon

Elde edilen sonuçlar MB'nin buğday kepeğinin reolojik özelliklerinin iyileştirilmesinde etkili bir araç olduğunu göstermektedir. Bu proseslerin optimize edilmesi ve farklı mikrobiyal kombinasyonların etkilerinin daha kapsamlı araştırılması hem teorik hem de pratik anlamda daha derin bilgiler sağlamak için gereklidir.

4.4.4 Toplam Fenolik İçerik ve Antioksidan Aktivite

Tablo 4.16, modifiye edilen buğday kepeklerinin fenolik içerik ve antioksidan aktivitelerindeki değişiklikleri özetlemektedir. MB29 ve MB32 işlemleri, serbest fenolik içerik (SF) değerlerini sırasıyla %24,3 ve %28,8 oranında artırmıştır. Bununla birlikte, her iki mikrobiyal kombinasyon, bağlı fenolik içerik (BF) değerlerinde SF'deki artışa kıyasla daha belirgin bir azalmaya yol açmış ve sonuç olarak MB uygulamasını takiben kontrol örneğine kıyasla toplam fenolik

içeriklerde (TF) genel bir azalma gözlemlenmiştir. Benzer bir şekilde, fermentasyon sonrası toplam fenolik içeriğin (TF) azalması Zhao ve Guo tarafından da rapor edilmiştir [63]. Uygulamalar arasındaki fark ise SF değeri için istatistiksel olarak anlamsız bulunmuştur. Serbest fenolik içeriğin artışı, literatürde fermentatif etkinin bu tür bileşiklerin yapıdan salınımını artırması ile ilişkilendirilmektedir. Bağlı fenolik içerik (BF) ise fermentasyon sırasında çözünmekte, ayrışmakta ve matriks bileşimi değişmektedir [90]. Ayrıca buğday kepeğinde bulunan yüksek polimerizasyon derecesine sahip diyet liflerinin fenolik asitleri kovalent olarak bağladığı ve bu bileşiklerin depolimerizasyonunun fenolik bileşiklerin çözünmez formdan çözünür forma geçmesine neden olduğu anlamına gelebileceği bildirilmiştir [211]. Çalışmamızda da bağlı fenolik içeriğin mikrobiyal fermentasyon ile azaldığı ve bu azalmanın verilen literatürle de desteklendiği söylenebilir. Ancak bu çalışmada dikkat çekici bir bulgu, serbest ve bağlı fenolik içeriklerin oranı (S/B) olmuştur. MB ile muamele edilen örneklerde bu oran, kontrol örneğine kıyasla anlamlı ölçüde daha yüksek bulunmuştur. Bu durum, Spaggiari ve ark. [90] tarafından LAB'nin konjuge fenolik bileşikleri metabolize etme kapasitesine ve hücre duvarı polisakkaritlerine bağlı fenoliklerin bağlarının koparılmasına bağlanmıştır.

Toplam fenolik madde miktarı (TF) değerlendirildiğinde; işlenmemiş kepeğe göre MB ile modifiye edilen kepeklerin TF içeriğinde azalma söz konusudur (Tablo 4.16). Literatürde buğday kepeğine fermentatif etkinin araştırıldığı çalışmalarda toplam fenolik madde miktarının fermentasyon süresine bağlı olarak düştüğü ifade edilmiştir [212]. Özellikle fermentasyonun sonlarına doğru salınan fenoliklerin oksijen ve su varlığında, fermentatif sıcaklıkların eşlik ettiği koşullarda kinona oksitlenebileceği belirtilmektedir. Çalışmamızda da benzer bir durum söz konusu bu azalmanın nedeni olabilir.

MB uygulamaları, buğday kepeğinin antioksidan aktivitesini hem serbest-AA hem de bağlı-AA fraksiyonlarında artırmıştır (Tablo 4.16). Özellikle MB32, bağlı-AA fraksiyonunda sağladığı artış ile dikkat çekmiş ve bu artış istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Ancak, MB uygulanmış örneklerde fenolik madde miktarı ile antioksidan aktivite arasında anlamlı bir korelasyonun bulunmadığı görülmüştür. Fenolik madde miktarı ile AA arasındaki

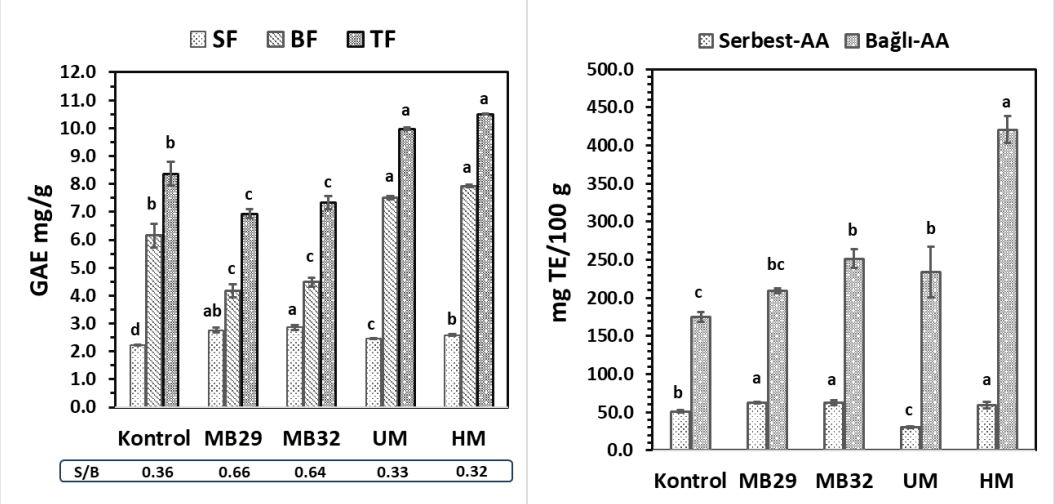
bu korelasyon eksikliği, farklı örneklerdeki fenolik profillerin karmaşıklığına, özellikle de mevcut fenoliklerin türleri ve nispi miktarlarında görülen niteliksel ve niceliksel farklılıklara bağlanabilir [213]. Ayrıca, bir örneğin toplam antioksidan potansiyeli yalnızca bireysel fenolik bileşiklerin aktiviteleriyle değil, bu bileşikler arasındaki sinerjistik, antagonistik veya katkısal etkileşimlerle de şekillenmektedir [214]. Bu durum, toplam antioksidan aktivitenin fenolik madde miktarıyla doğrusal bir ilişki göstermemesine yol açabilir. Farklı fenolik bileşikler arasındaki etkileşimlerin, fenoliklerin varlığına rağmen genel antioksidan aktiviteyi azaltarak negatif bir etkiye yol açabileceği bildirilmiştir [215].

Maya ve farklı LAB türlerinin kombinasyonlarının fermente buğday kepeğinin biyoaktivitesi üzerindeki etkilerini araştıran bir çalışmada, *Saccharomycopsis fibuligera* ve sekiz farklı LAB türüyle gerçekleştirilen ko-kültür fermentasyonunun, tüm kombinasyonlarda toplam fenolik içerikte anlamlı bir artış sağladığı bildirilmiştir. Ko-kültür fermentasyonunun, tek kültür fermentasyonuna kıyasla daha etkili olduğu vurgulanırken, *W. cibaria* ile yapılan fermentasyonda fenolik bileşiklerin polisakkaritlerle kompleks oluşturması nedeniyle toplam fenolik içerik ve antioksidan aktivitenin zamanla azaldığı belirtilmiştir [87].

Tablo 4.16 Modifikasyon tekniklerinin buğday kepeklerinin toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite özelliklerine etkisi

Örnek	SF (GAE mg/g)	BF (GAE mg/g)	TF (GAE mg/g)	S/B	Serbest-AA (mg TE/100 g)	Bağlı-AA (mg TE/100 g)
Kontrol	2,22±0,02^{d}	6,15±0,42^{b}	8,37±0,42^{b}	0,36	51,1±1,9^{b}	174,8±6,6^{c}
MB29	2,76±0,09^{ab}	4,17±0,24^{c}	6,93±0,16^{c}	0,66	62,8±0,9^{a}	209,7±3,2^{bc}
MB32	2,86±0,08^{a}	4,48±0,15^{c}	7,34±0,23^{c}	0,64	62,5±3,1^{a}	251,2±12,4^{b}
UM	2,47±0,01^{c}	7,51±0,05^{a}	9,98±0,04^{a}	0,33	30,7±0,9^{c}	234,0±33,6^{b}
HM	2,58±0,10^{b}	7,93±0,04^{a}	10,5±0,01^{a}	0,32	58,9±4,4^{a}	420,5±17,7^{a}

Sonuçlar üç tekrarın ortalama ± standart sapması olarak ifade edilmiştir.
Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip ortalamalar, buğday kepekleri için önemli farklılıkları ($p<0,05$) göstermektedir. Kontrol: İşlem görmemiş buğday kepeği; MB29: *Lc. plantarum* LABE 29 ve *S. cerevisiae* TGM 55 kombinasyonu ile MB uygulaması; MB32: *Levl. brevis* LABE 32 ve *S. cerevisiae* TGM 55 kombinasyonu ile MB uygulaması; UM: ultrasonik modifikasyon; HM: hibrit modifikasyon; SF: Serbest fenolik madde miktarı; BF: Bağlı fenolik madde miktarı; TF: Toplam fenolik madde miktarı; S/B: Serbest fenoliklerin miktarının bağlı fenoliklerin miktarına oranı; Serbest-AA: Serbest fenolik ekstraktlarının DPPH radikali süpürme aktivitesi; Bağlı-AA: Bağlı fenolik ekstraktlarının DPPH radikali süpürme aktivitesi



Şekil 4.8 Modifikasyon tekniklerinin buğday kepeklerinin toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite özelliklerine etkisi

Aspergillus awamori suşları kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada, buğday kepeğinin fermentasyonu sonrası fenolik bileşenlerin serbest form içeriklerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Çalışmada, buğday kepeğinde fenolik bileşenlerin %80'inin bağlı formda bulunduğu, ancak fermentasyonun bu bağlı formları serbest bırakarak serbest fenolik bileşenlerin içeriğini ve antioksidan aktivitesini önemli ölçüde artırdığı rapor edilmiştir. Özellikle ferulik asit, kafeik asit ve siringik asit gibi fenolik bileşenlerin serbest formda daha yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu ve bu bileşenlerin antioksidan aktiviteye kayda değer katkı sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, bağlı formdaki bazı spesifik fenolik asitlerin antioksidan aktiviteye daha yoğun katkı sunduğu ifade edilmiştir. Bu bulgular, fermentasyonun fenolik bileşenlerin biyoyararlılığını artırmada etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir ve çalışmamızdaki bazı örneklerde fenolik madde miktarı ile antioksidan aktivite arasında korelatif bir ilişkinin bulunmamasını açıklayabilir [216]. Bir başka çalışmada, *Bacillus subtilis* ve *Saccharomyces cerevisiae*'nin karışık fermentasyonunun, buğday kepeğindeki çözünür polifenol içeriğini %294,41 oranında artırdığı rapor edilmiştir. Bununla birlikte, mikrobiyal fermentasyonun hidroksil radikal süpürme oranını azalttığı belirtilmiştir [217]. Bu bulgular, buğday kepeğindeki polifenollerin hem içerik hem de kompozisyon bakımından dönüşüm geçirdiğini ve bu dönüşümün antioksidan aktivite üzerinde önemli etkiler yarattığını göstermektedir.

UM ve HM uygulamaları ile modifiye edilen buğday kepeklerinde serbest fenolik (SF) içeriği, işlem görmemiş kepeğe kıyasla sırasıyla %11,3 ve %16,2 oranında artış göstermiştir (Tablo 4.16). Bu artışlar, hem SF hem de bağlı fenolik (BF) içeriğindeki anlamlı yükselme ile birleşerek toplam fenolik madde (TF) içeriğinde UM için %19,2 ve HM için %25,5 oranında bir artışa neden olmuştur. Habuš ve ark. [106], yüksek yoğunluklu (%80 genlik) ultrasonikasyonun 15 dakika süreyle uygulanmasının buğday kepeğinin toplam fenolik madde içeriğinde %11'lik bir artış sağladığını rapor etmiştir. Literatürde, fenolik bileşiklerin genellikle çözünür konjugatlar ya da hücre duvarı yapılarına bağlı çözünmez formlar şeklinde bulunduğu bildirilmektedir [218]. Bu bağlamda, ultrases destekli hidroliz, bağlı fenolik bileşiklerin serbest hale getirilmesi amacıyla yaygın olarak araştırılan bir yöntemdir.

Tez çalışmasında, UM uygulaması doğrudan buğday kepeği süspansiyonuna uygulanmış ve bunu takiben standart fenolik içerik belirleme yöntemleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. UM uygulamasının, fenolik bileşiklerin matris içerisindeki erişilebilirliğini artırarak bu bileşiklerin tespit edilme potansiyelini geliştirdiği değerlendirilmektedir. Ancak, UM işleminin serbest serbest-AA üzerinde yıkıcı bir etkisi olduğu, buna karşılık bağlı-AA değerini artırarak AA üzerinde genel bir artış sağladığı görülmüştür. Bu durum, UM'nin, işlem görmemiş kepekte halihazırda erişilebilir durumda olan fenolik bileşiklerin antioksidan aktivitelerini olumsuz etkilerken, hücre duvarı yapılarına bağlı fenolik bileşikleri serbest bırakarak antioksidan potansiyeli artırdığı şeklinde yorumlanabilir. Ancak UM, bağlı fenoliklerin erişilebilirliğini artırdığı için kontrole kıyasla AA'yı genel olarak artırmıştır. UM uygulaması genel anlamda AA değerlerinde bir artış sağlamakla birlikte, bu etkilerin altında yatan mekanizmaların daha iyi anlaşılabilmesi için buğday kepeğinin fenolik asit bileşiminde meydana gelen değişikliklerin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Özellikle, farklı fenolik bileşiklerin niteliksel ve niceliksel değişimlerinin yanı sıra, bu bileşiklerin antioksidan aktiviteye katkılarının araştırılması, elde edilen bulguların daha kapsamlı bir şekilde yorumlanmasına olanak tanıyacaktır.

Tablo 4.16'da sunulan verilere göre, MB32 uygulaması, serbest fenolik madde içeriğinde (SF) artışa önemli ölçüde katkı sağlamış, ancak UM ve HM uygulamalarının kontrol örneğine kıyasla SF değeri üzerinde daha sınırlı bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Bununla beraber, UM ve HM uygulamaları bağlı fenolik madde (BF) içeriği üzerinde de belirgin bir artış sağlamış ve bu durum toplam fenolik madde (TF) içeriğinde anlamlı bir iyileşmeye yol açmıştır. Bu sonuçların altında yatan mekanizmalar, MB ve UM uygulamalarını ayrı ayrı ele alan önceki paragraflarda detaylı olarak tartışılmıştır. Bununla birlikte, HM uygulaması, buğday kepeğinin fenolik madde içeriğini artırmada tek başına ultrasonik modifikasyona kıyasla ek bir avantaj sağlamamış gibi görünmektedir.

Öte yandan, HM uygulamasının kepeğin antioksidan özellikleri üzerinde kayda değer bir etkisi olduğu görülmektedir. Hem serbest-AA hem de bağlı-AA değerlerinde önemli artışlar sağlanmıştır. Özellikle bağlı-AA fraksiyonu, kontrol örneğine kıyasla HM uygulamasında yaklaşık 2,4 kat artış göstererek bu parametre

için en etkili yöntem olmuştur. Karşılaştırmalı olarak, bağlı-AA'da MB32 yaklaşık 1,4 kat, UM ise 1,3 kat artış sağlamıştır. Serbest-AA açısından, MB32 ve HM uygulamaları UM'ye göre daha üstün performans sergilemiştir. UM uygulamasında serbest-AA değerlerinde, işlem görmemiş kepeğe kıyasla bir düşüş gözlemlenirken, bu durumun HM ve MB32 uygulamaları için geçerli olmadığı, aksine serbest-AA'nın anlamlı şekilde artırıldığı belirlenmiştir. Bu bulgular, hibrit modifikasyonun (HM), bağlı fenolik bileşikleri serbest bırakma ve antioksidan aktiviteyi artırma potansiyelini ortaya koymakla birlikte, serbest fenolik bileşikler üzerindeki etkisinin daha sınırlı olduğunu göstermektedir. HM'nin farklı fenolik bileşikler ve antioksidan aktivite üzerindeki etkilerinin daha kapsamlı bir şekilde araştırılması, bu uygulamanın faydalarının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayabilir.

Özetle, buğday kepeği üzerinde uygulanan modifikasyon teknikleri, fenolik içerik ve antioksidan aktivite bakımından farklı etkilere yol açmıştır. MB32 uygulaması, serbest fenolik madde (SF) içeriğinde en yüksek artışı sağlayarak kepeğin fenolik profilini olumlu yönde değiştirmiştir. Buna karşın, UM ve HM uygulamaları SF içeriği üzerinde daha sınırlı bir etki yaratmıştır. Ancak, UM ve HM'nin bağlı fenolik madde (BF) içeriğini artırdığı ve bu artışın toplam fenolik içerik (TF) üzerinde anlamlı iyileşmelere yol açtığı görülmüştür. HM uygulamasının TF değerini artırmada en etkili yöntem olduğu belirlenmiştir.

Antioksidan aktivite açısından değerlendirildiğinde, hem serbest-AA hem de bağlı-AA fraksiyonlarında artış gözlemlenmiştir. HM uygulaması, özellikle bağlı-AA'da sağladığı 2,4 kat artış ile bu parametre için en etkili yöntem olarak öne çıkmıştır. MB32, serbest-AA ve bağlı-AA fraksiyonlarında dikkate değer artışlar sağlarken, UM'nin serbest-AA üzerinde yıkıcı bir etkisi olduğu, ancak bağlı fenoliklerin erişilebilirliğini artırarak genel antioksidan aktiviteyi iyileştirdiği görülmüştür.

Bu bulgular, mikrobiyal biyoproses ve ultrasonik modifikasyonun kepeğin fenolik profili ve antioksidan aktivitesi üzerindeki etkilerinin farklı mekanizmalarla gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. MB uygulamalarının, fenolik bileşiklerin bağlı formlarını serbest bırakarak biyoyararlılığı artırdığı anlaşılmaktadır. UM'nin ise fenolik bileşiklerin fiziksel ve kimyasal erişilebilirliğini artırdığı, ancak serbest-AA üzerindeki sınırlı etkisi nedeniyle genel fenolik profilde farklılıklar yarattığı

değerlendirilmiştir. Hibrit modifikasyon (HM), özellikle antioksidan aktiviteyi artırma potansiyeli ile dikkat çekmiş, ancak serbest fenolik bileşiklerin miktarını artırmada tek başına ultrasonik modifikasyona kıyasla belirgin bir avantaj sağlamamıştır.

Sonuç olarak, her bir modifikasyon tekniğinin buğday kepeğinin fenolik içeriği ve antioksidan aktivitesi üzerindeki etkileri, bu tekniklerin fenolik bileşiklerin bağlanma ve serbest bırakılma mekanizmalarına dayalı olarak farklılık göstermektedir. Bu durum, kepek bileşenlerinin daha etkin kullanımı ve fonksiyonel özelliklerinin geliştirilmesi için süreçlerin optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır.

4.5 Modifikasyon Yöntemlerinin Ekmek Özelliklerine Etkileri

4.5.1 Ekmeklerin Kalite Özellikleri

4.5.1.1 Spesifik hacim

Şekil 4.9, işlenmemiş ve farklı modifikasyon teknikleriyle işlenmiş buğday kepekleri kullanılarak üretilen ekmeklerin görsellerini ve spesifik hacim değerlerini sunmaktadır. TKC-E (işlenmemiş Tekirdağ kepeği ile üretilen referans ekmek), MB29-E (MB29 ile işlenmiş buğday kepeği kullanılarak üretilen ekmek), MB32-E (MB32 ile işlenmiş buğday kepeği kullanılarak üretilen ekmek), UM-E (UM ile işlenmiş buğday kepeği kullanılarak üretilen ekmek) ve HM-E (HM ile işlenmiş buğday kepeği kullanılarak üretilen ekmek) örneklerinin spesifik hacimleri sırasıyla 2,65±0,01; 2,59±0,03; 2,73±0,03; 2,63±0,08 ve 2,92±0,02 ml/g olarak ölçülmüştür. Hibrit modifikasyon (HM) sonucunda elde edilen kepek ile üretilen ekmek, referans ekmeğe kıyasla yaklaşık %10 daha yüksek hacim değeri göstermiş ve tüm ekmek örnekleri arasında en yüksek spesifik hacme sahip ekmek örneği olmuştur.

MB uygulanmış kepekler kullanılarak üretilen ekmeklerin değerlendirilmesi sonucunda, MB32-E'nin spesifik hacim değerinin MB29-E'den istatistiksel olarak anlamlı derecede daha yüksek olduğu belirlenmiştir ($p<0,05$). Bu farklılığın olası bir nedeni, kullanılan kepeklerin diyet lifi kompozisyonundaki farklılıklar olarak değerlendirilebilir. Nitekim, Bölüm 4.4.1'de sunulan Tablo 4.14'te görüldüğü üzere, MB32 uygulaması buğday kepeğinin çözünmeyen diyet lifi (IDF) içeriğini daha etkili bir şekilde azaltmış ve bunu çözünebilir diyet

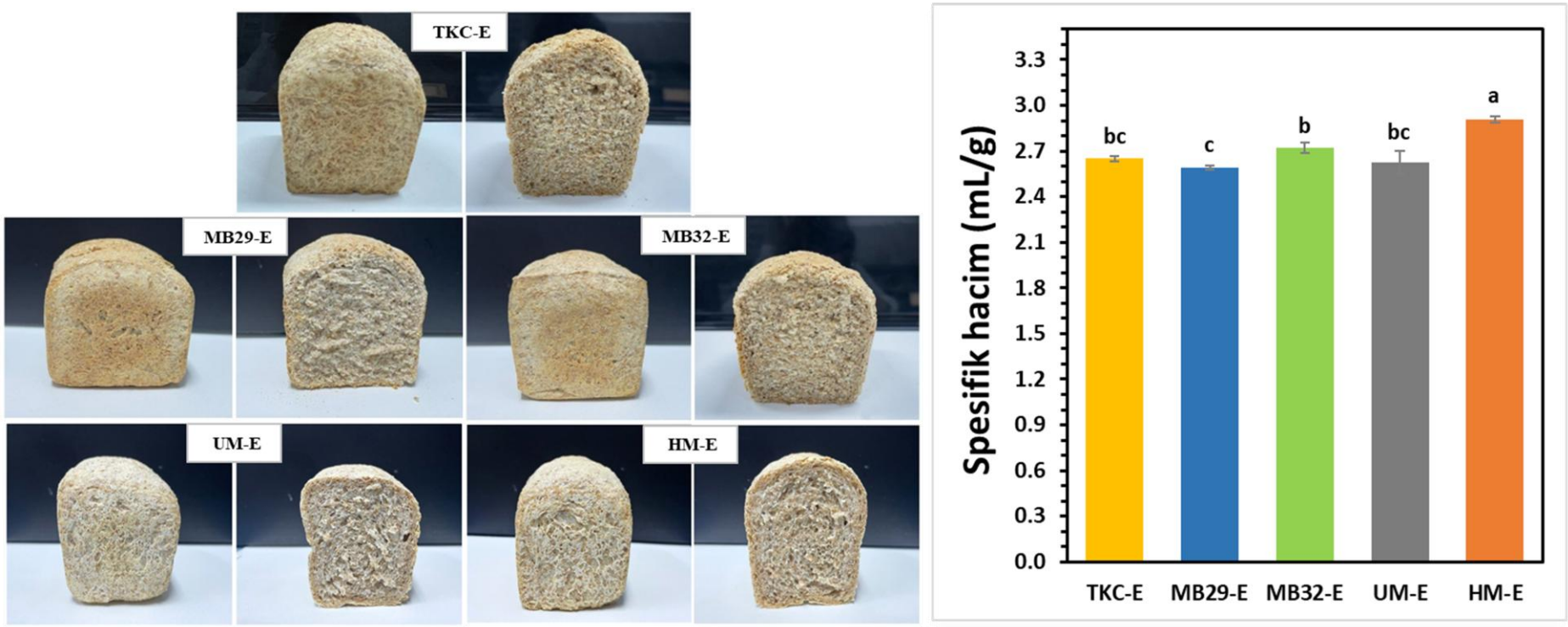
lifine (SDF) dönüştürmüştür. Literatürde, çözünmeyen diyet liflerinin gluten ağı oluşumunu engelleyerek ekmek hacmini olumsuz etkilediği rapor edilmiştir [34]. Bununla beraber, fermentasyon ile muamele edilen buğday kepeği eklenmiş ekmeklerde spesifik hacim değerlerindeki iyileşme SDF içeriğinin artışı ile ilişkilendirilmiştir [86, 219].

MB29 ile işlenmiş kepek kullanılan ekmekler (MB29-E), spesifik hacim bakımından en düşük değeri göstermiştir. Bu durum, MB29 uygulamasının kepek T-STK'sini (toplam su tutma kapasitesini) daha etkin bir şekilde artırmasıyla ilişkilendirilebilir (Tablo 4.15). Daha yüksek T-STK, hamur içerisinde suyun daha fazla tutulmasına yol açarak ekmek üretimi sırasında daha yoğun ve ağır bir yapı oluşmasına neden olmuştur. Bunun sonucunda, birim ağırlık başına düşen hacim (spesifik hacim) azalmış ve MB29-E en düşük hacimli ekmek olarak öne çıkmıştır.

Ultrasonikasyonun doğrudan buğday kepeğine uygulandığı çalışmalara ilişkin literatürün sınırlı olması, ultrases muamelesiyle modifiye edilmiş kepek kullanılarak üretilen ekmeklere dair bilimsel verilere de rastlanamaması ile paralellik göstermektedir. Bu nedenle, çalışmamızın UM-E örneğine ilişkin spesifik hacim bulgularına yönelik bir literatür desteği sunulamamaktadır. Ancak, literatürde fermentasyon yoluyla modifiye edilen buğday kepeğinin ekmek spesifik hacmi üzerindeki etkileri geniş bir şekilde ele alınmıştır. Örneğin, Tang ve ark. [87], maya ve laktik asit bakterileri (LAB) ile gerçekleştirilen ortak kültür fermentasyonunu inceledikleri çalışmalarında, bazı bakteriyel kombinasyonların işlenmemiş kepekten üretilen ekmeklere kıyasla spesifik hacimde anlamlı artış sağladığını (*S. fibuligera* ve *L. fermentum*), bazılarının ise spesifik hacimde istatistiksel olarak anlamlı bir azalmaya neden olduğunu (*S. fibuligera* ve *P. pentosaceus*) rapor etmişlerdir. Tez çalışmamızda elde edilen MB32-E ve MB29-E örnekleri için de benzer bir durum gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, çalışmamızda %15 kepek ilavesiyle elde edilen ekmeklerin spesifik hacim değerlerinin, Tang ve ark. tarafından %10 kepek ilavesiyle bildirilen spesifik hacim değerlerine kıyasla (1.90-2.08 ml/g) daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bir çalışmada, buğday kepeğinin *Lactobacillus plantarum* ve *Saccharomyces cerevisiae* ile fermentasyonunun, spesifik hacmi fermente edilmemiş kepeğe kıyasla 1,24 kat artırdığı bildirilmiştir [220].

Buğday kepeğini fermente etmek için *Aspergillus niger* ve *Lactobacillus plantarum* kullanılan bir çalışmada artan spesifik hacim, fermentasyonla muamele sonucunda buğday kepeğinde fermente edilebilir polisakkaritlerin miktarındaki artışla ilişkilendirilmiş ve hamur fermentasyonu sırasında CO_2 gazı üretiminin teşvik edilmesi ile açıklanmıştır [221].

Sonuç olarak, farklı modifikasyon teknikleri, buğday kepeğinin spesifik hacim değerleri üzerinde belirgin etkiler yaratmıştır. Hibrit modifikasyon (HM), tüm örnekler arasında en yüksek spesifik hacim değerine sahip ekmeğin üretilmesini sağlamıştır. MB32 uygulaması, gluten ağının korunmasına olanak tanıyan diyet lifi dönüşümleriyle spesifik hacmi olumlu etkilerken, MB29 uygulaması, su tutma kapasitesindeki artış nedeniyle daha yoğun bir yapı oluşturmuş ve spesifik hacim değerini düşürmüştür. Bu bulgular, diyet lifi kompozisyonundaki değişimlerin, ekmek yapısının ve hacminin şekillenmesinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Çalışmamızın sonuçları, modifiye edilmiş buğday kepeğinin spesifik hacim üzerindeki etkilerine dair literatürde mevcut bilgilerle uyumlu olup, gelecekteki uygulamalar için yol gösterici niteliktedir.



Şekil 4.9 Ekmeklere ait görseller ve spesifik hacim değerleri

Sonuçlar üç tekrarın ortalama ± standart sapması olarak ifade edilmiştir. Farklı küçük harflere sahip ortalamalar gruplar için önemli farklılıkları ($p<0,05$) göstermektedir. TKC-E: İşlem görmemiş Tekirdağ çeşit kepek ile üretilen ve modifiye edilmiş kepekler ile üretilen ekmeklerin referansı olan kontrol ekmeği; MB29-E: MB29 kodlu kepek ile üretilen ekmek; MB32-E: MB32 kodlu kepek ile üretilen ekmek; UM-E: UM kodlu kepekle üretilen ekmek; HM-E: HM kodlu kepekle üretilen ekmek

4.5.1.2 Tekstür Profili Analizi (TPA)

Tablo 4.17, işlenmemiş ve modifiye edilmiş kepekler kullanılarak üretilen ekmeklerin tekstür profili analizine ilişkin sonuçları sunmaktadır. Sertlik açısından, en yüksek değer 17,49 ± 0,19 N ile MB29-E örneğinde tespit edilmiştir. Bu bulgu, MB29 işleminin ekmek yapısında daha yoğun ve kompakt bir doku oluşturduğunu göstermektedir. Nitekim, ekmek görselleri incelendiğinde (Şekil 4.9), MB29-E örneğinin gözenekler arası boşluklarının diğer örneklere kıyasla daha küçük olduğu açıkça gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, MB29-E ekmeği spesifik hacim açısından da en düşük değeri sergileyen örnek olmuştur (Şekil 4.9). Literatürde, spesifik hacim ile sertlik arasında negatif bir korelasyon olduğu belirtilmiştir [168]. Bu bağlamda, MB29-E ekmeğinde elde edilen yüksek sertlik değerinin, düşük spesifik hacim ile uyumlu olduğu görülmektedir. En düşük sertlik değeri ise 11,69 ± 0,79 N ile HM-E örneğinde kaydedilmiştir. Bu bulgu, hibrit modifikasyonun ekmek yapısında daha yumuşak bir doku sağlama potansiyeline işaret etmektedir. Diğer yandan, TKC-E, MB32-E ve UM-E örnekleri arasında sertlik değerleri açısından istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık bulunmamıştır ($p > 0,05$).

Tablo 4.17 Modifikasyon uygulamalarının ekmeklerin tekstürel özellikleri üzerine etkisi

Örnek	Sertlik (N)	Esneklik	Kohesivlik	Çiğnenebilirlik
TKC-E	$12,77\pm0,63^{bc}$	$0,90\pm0,00^{a}$	$0,82\pm0,01^{a}$	$9,37\pm0,31^{b}$
MB29-E	$17,49\pm0,19^{a}$	$0,82\pm0,03^{a}$	$0,76\pm0,00^{a}$	$10,95\pm0,48^{a}$
MB32-E	$12,68\pm0,73^{bc}$	$0,82\pm0,01^{a}$	$0,79\pm0,01^{a}$	$8,22\pm0,52^{bc}$
UM-E	$15,31\pm1,06^{ab}$	$0,93\pm0,04^{a}$	$0,83\pm0,04^{a}$	$11,78\pm0,91^{a}$
HM-E	$11,69\pm0,79^{c}$	$0,93\pm0,00^{a}$	$0,80\pm0,01^{a}$	$8,16\pm1,47^{c}$

Sonuçlar üç tekrarın ortalama ± standart sapması olarak ifade edilmiştir. Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip ortalamalar gruplar için önemli farklılıkları ($p<0,05$) göstermektedir. TKC-E: İşlem görmemiş Tekirdağ çeşit kepek ile üretilen ve modifiye edilmiş kepekler ile üretilen ekmeklerin referansı olan kontrol ekmeği; MB29-E: MB29 kodlu kepek ile üretilen ekmek; MB32-E: MB32 kodlu kepek ile üretilen ekmek; UM-E: UM kodlu kepekle üretilen ekmek; HM-E: HM kodlu kepekle üretilen ekmek

Ekmeğin esneme kabiliyeti, sıkıştırıldığında eski formuna dönme kapasitesi ve süngerimsi yapı ile ilişkilendirilen esneklik değeri, tez çalışmasının tüm örneklerinde 0,82–0,93 aralığında tespit edilmiştir. Elde edilen veriler, tüm örnekler arasında esneklik değeri açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığını göstermektedir ($p>0,05$). Bu bulgu, uygulanan modifikasyon türlerinin esneklik parametresi üzerinde minimal bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Çiğneme sırasında hissedilen yapışkanlık hissi ile ilişkilendirilebilecek kohesivlik (kohezyon) değerleri bakımından, en yüksek değer 0,83 ± 0,04 ile UM-E örneğinde tespit edilmiştir. Buna karşılık, MB29-E örneği 0,76 ± 0,00 ile en düşük kohezyon değerine sahip olmuştur. MB29 uygulamasının gluten yapısını zayıflatarak hamurun bütünlüğünü azalttığı düşünülebilir. Bununla birlikte, kohesivlik değerlerindeki bu farklılıklar istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p>0,05$). Literatür incelemeleri, bu bulgularla uyumlu olarak, sertlik ve esneklik [170] ile sertlik ve kohesivlik [222] arasında farklı eğilimler bildiren çalışmaların varlığını ortaya koymaktadır.

Kepek ilavesiyle birlikte gluten dilüsyonu nedeniyle gaz tutma kabiliyeti azalan ekmeklerin elastikiyetinde azalma meydana gelmekte ve bu durum, çiğnemeye karşı direncin düşmesine bağlı olarak çiğnenebilirlik değerlerinin artmasına neden olabilmektedir [43]. Literatürde yüksek çiğnenebilirlik değerlerinin ekmeğin yapısal bütünlüğüne katkıda bulunarak daha az ufalanmasını ve daha yapışkan bir dokuya sahip olmasını sağladığı belirtilmiştir [223]. Ancak, yüksek çiğnenebilirlik her zaman tüketici tercihi açısından olumlu bir özellik olarak değerlendirilmemektedir. Çiğnenebilirliği yüksek ekmekler, tüketiciler tarafından çok sert veya yoğun olarak algılanabilir ve bu durum genel kabul edilebilirliği olumsuz etkileyebilir [224]. Bunun aksine, çiğnenebilirliği daha düşük olan ekmekler, daha hoş bir ağız hissi sağlayarak tüketici kabulünü artırabilmektedir [225]. Tez çalışmamızda elde edilen sonuçlar, çiğnenebilirlik değerlerinin sertlik ile uyumlu bir şekilde, UM-E ve MB29-E örneklerinde diğer örneklere kıyasla daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu durum, özellikle bu iki örneğin hamur ve ekmek yapısında daha yoğun ve sıkı bir yapıya sahip olması ile ilişkilendirilebilir.

Literatürde, farklı modifikasyon teknikleriyle işlenmiş buğday kepeklerinin ekmek özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır.

Örneğin, *Lactobacillus plantarum* ve *Saccharomyces cerevisiae* ile 36 saat boyunca fermente edilen kepek kullanılarak üretilen ekmeklerde, sertlik ve çiğnenebilirlik değerlerinde anlamlı bir azalma gözlemlenmiş ve bu durum ekmeğin daha yumuşak bir dokuya sahip olmasına katkı sağlamıştır [220]. Bir başka çalışmada ise, *S. cerevisiae* ve *L. plantarum*'un farklı oranlarda kullanımı ile fermente edilen buğday kepeği ve bu kepekle üretilen ekmeklerin özellikleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, maya:LAB oranının 2:1 olarak kullanıldığı ekmeklerde en düşük sertlik ve en yüksek esneklik değerlerinin elde edildiği rapor edilmiştir. Bu durumun, daha yüksek spesifik hacim ve daha iyi bir gözeneklilik yapısına bağlandığı belirtilmiştir [226].

Ultrasonik ön işlem ya da ultrasonik modifikasyon kullanılarak buğday kepeğinden ekmek üretimini doğrudan ele alan özel bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle çalışmamızın UM-E ve HM-E örneklerinin tekstürel özelliklerine ilişkin karşılaştırmalı bir literatür desteği sunulamamaktadır. Ancak, ultrasonik işlemlerin genel etkilerini ele alan bazı çalışmalar, bu yöntemlerin ekmek ve diğer gıda ürünlerinin yapısal ve reolojik özelliklerini etkileyebileceğini ortaya koymaktadır. Örneğin, ultrasonikasyonun pirinç unu ile ekmek yapımındaki etkilerini araştıran bir çalışmada, bu yöntemin un partikül boyutunu küçülterek nişasta parçalanmasına ve fermentasyon kabiliyetinin artmasına neden olduğu, bu sayede spesifik hacim ve ekmek kalitesinde iyileşme sağladığı rapor edilmiştir. Aynı çalışmada, ultrasonik muamelenin ekmeklerin sertlik değerinde düşüş yarattığı, ancak esneklik değerini değiştirmediği belirtilmiştir [227]. Bu bulgular, çalışmamızdaki UM-E ve HM-E örneklerinin tekstürel özelliklerinde gözlemlenen değişimlerin açıklanmasına katkı sağlayabilir. Ancak, bahsi geçen çalışmada kullanılan örneğin glutensiz bir un örneği olduğu gerçeği göz önünde bulundurulmalıdır.

Çalışmamızda farklı modifikasyon teknikleriyle işlenmiş buğday kepeklerinin ekmeklerin tekstürel özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğu tespit edilmiştir. HM-E örneği daha yumuşak bir doku sağlayarak en düşük sertlik değerine sahip örnek iken, MB29-E örneği daha sıkı bir profile sahip olmasıyla öne çıkmıştır. UM-E ve HM-E örneklerine ilişkin literatür kaynaklarının sınırlı olmasına rağmen, ultrasonik işlemlerin buğday kepeği içeren ekmeklerin spesifik

tekstürel özelliklerini etkileyebileceği görülmektedir. Bu bağlamda, tekstürel parametreler üzerinde modifikasyon türüne bağlı olarak farklı trendlerin ortaya çıktığı, bu eğilimlerin kepek kaynaklı gluten dilüsyonu, diyet lifi kompozisyonu ve su tutma kapasitesi gibi faktörlerle ilişkili olduğu değerlendirilmektedir.

4.5.1.3 Renk

Tablo 4.18, işlenmemiş ve modifiye edilmiş kepek ilaveli ekmek örneklerinin kabuk ve iç rengini ifade eden Hunter renk parametrelerini (L∗, a∗ ve b∗) ve toplam renk değişimini (ΔE) göstermektedir.

Ekmek örnekleri kabuk rengi özellikleri bakımından değerlendirildiğinde; kontrol örneğinin (TKC-E) L∗ değeri en düşük olarak tespit edilmiştir. L∗ değerinin açıklığı ve koyuluğu ifade ettiği göz önünde bulundurulduğunda tüm modifikasyon uygulamalarının ekmeğin parlaklığını artırdığı söylenebilir. Ancak bu artış MB29-E ve MB32-E'de istatistiksel olarak anlamlı olmamıştır ($p>0,05$). Ancak UM-E ve HM-E ekmeklerine ait L∗ değerleri, kabuğun daha açık ve parlak bir görünüme sahip olduğunu göstermiştir. Bu durum, ultrasonikasyonun buğday kepeği pigmentleri üzerindeki polifenol oksidazı inaktive edici etkisi ile açıklanabilir [228]. Daha koyu bir ekmek görüntüsünün tüketici kabulünü olumsuz etkilediği düşünüldüğünde [12], ultrasonik muamelenin daha kabul edilebilir bir renk sağladığı değerlendirilebilir.

a∗ değerleri, kabuğun kırmızı-yeşil yönünü temsil etmektedir ve daha yüksek a∗ değerleri kırmızılığın daha belirgin olduğu anlamına gelmektedir. TKC-E örneği 7,80 ± 1,21'lik a∗ değeri ile en yüksek kırmızı tonuna sahip ekmek olmuştur. MB uygulanmış kepeklerden üretilen ekmekler her ne kadar a∗ değerinde bir miktar düşüşe neden olsalar da kontrol örneğine kıyasla istatistiksel olarak anlamlı bir fark ortaya çıkmamıştır ($p>0,05$). Buna karşın, UM-E ve HM-E örnekleri ise kontrol örneği ve MB uygulanmış kepeklerden üretilen ekmeklere kıyasla daha düşük a∗ değerine sahiptir ve bu durum ultasonikasyonun kabukta kırmızı tonunu önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Özellikle HM işlemi, ekmek örneğinde kabuğun daha nötr bir tona yaklaşmasına neden olmuştur.

Tablo 4.18 Modifikasyon uygulamalarının ekmeklerin renk özellikleri üzerine etkisi

Örnek	Kabuk rengi				İç renk			
	L*	a*	b*	ΔE	L*	a*	b*	ΔE
TKC-E	58,78±0,96^{b}	7,80±1,21^{a}	25,27±2,13^{a}		58,94±1,05^{a}	5,03±0,21^{a}	18,28±0,37^{a}	
MB29-E	58,44±2,49^{b}	7,09±0,36^{a}	19,32±1,08^{bc}	6,37±1,19^{c}	57,25±0,86^{a}	4,09±0,32^{b}	13,63±0,21^{bc}	5,09±0,37^{ab}
MB32-E	61,09±1,62^{b}	6,65±0,89^{a}	19,31±0,94^{bc}	6,59±1,59^{c}	59,27±0,58^{a}	4,00±0,31^{b}	14,37±0,43^{b}	4,08±0,50^{b}
UM-E	67,02±1,33^{a}	4,30±0,18^{b}	20,39±0,84^{b}	10,25±0,99^{b}	57,51±3,19^{a}	4,04±0,54^{b}	13,91±0,83^{bc}	5,39±1,36^{ab}
HM-E	68,08±1,20^{a}	2,66±0,21^{c}	17,06±0,91^{c}	13,46±1,02^{a}	57,56±1,59^{a}	3,19±0,41^{c}	13,13±0,29^{c}	5,81±0,31^{a}

Sonuçlar üç tekrarın ortalama ± standart sapması olarak ifade edilmiştir. Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip ortalamalar gruplar için önemli farklılıkları ($p<0,05$) göstermektedir. TKC-E: İşlem görmemiş Tekirdağ çeşit kepek ile üretilen ve modifiye edilmiş kepekler ile üretilen ekmeklerin referansı olan kontrol ekmeği; MB29-E: MB29 kodlu kepek ile üretilen ekmek; MB32-E: MB32 kodlu kepek ile üretilen ekmek; UM-E: UM kodlu kepekle üretilen

b∗ değeri Hunter renk skalasında sarı-mavi yönü ifade etmektedir ve daha yüksek b∗ değerleri sarı tonun örnekte daha belirgin olduğu anlamına gelmektedir. Kontrol ekmeği kabukta 25,27 ± 2,13'lik b∗ değeri ile en yüksek sarı tonunu sergilemiştir. Tüm modifikasyon işlemleri, b∗ değerlerini anlamlı derecede düşürmüş ve HM uygulanmış kepek ile üretilen ekmek en düşük sarı tonuna sahip olmuştur.

ΔE, referans örnek ile diğer örnekler arasındaki toplam renk farkını göstermekte ve insan gözü tarafından algılanan genel renk farkını ölçmektedir. Bu fark değeri için: $\Delta E < 1$ göz ile ayırt edilemez; $1 < \Delta E < 3$ hafif derecede ayırt edilebilir ve $\Delta E > 3$ fark edilebilir anlamına gelmektedir [229]. UM-E ve HM-E örnekleri, kabuk rengi açısından en büyük farklılıkların ortaya çıktığı ekmekler olmuştur. Şekil 4.9'te verilen ekmek görselleri incelendiğinde de gözle tayin edilebilir bir renk değişimi olduğu görülmektedir.

Ekmekler iç rengi özellikleri bakımından değerlendirildiğinde ise kabuktaki belirgin farklılıkların ortaya çıkmadığı tespit edilmiştir. L∗ değerleri için kontrol örneği ile modifiye edilmiş örnekler arasında önemli bir fark bulunmamıştır ($p>0,05$). HM-E diğer örneklere kıyasla en düşük a∗ değerine sahiptir ve iç rengin kırmızı tonunun belirgin şekilde azaldığını göstermektedir. b∗ özelliği bakımından kontrol örneği en yüksek sarılık değerine sahipken ($b^*=18,28\pm0,37$), HM-E sarı tonun en düşük tespit edildiği örnek olmuştur. Bu sonuç, HM uygulamasının kabukta olduğu gibi ekmek içi renginin de sarı tonunu azalttığını göstermektedir. Örnekler arasında MB32-E, TKC-E örneğine kıyasla en düşük iç renk değişimi sergilerken ($\Delta E = 4,08 \pm 0,50$), HM-E en yüksek iç renk değişimine sahip örnek olmuştur.

Literatürde, çeşitli amaçlarla biyoişlenmiş buğday kepeğinin ekmek rengi özelliklerine etkilerinin değerlendirildiği çalışmalarda, fermentasyonun ekmek iç ve kabuk renginde daha koyu renk oluşumuna neden olduğu rapor edilmiştir [176, 190, 219, 220]. Tez çalışmasının MB uygulamalarında kullanılan her iki mikrobiyal kombinasyonda da benzer bir renk değişimi gözlemlenmemiştir. MB ile işlenmiş kepekle üretilen ekmekler ile işlenmemiş kepek kullanılan referans ekmek arasında iç ve kabuk renk değerleri açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmemiştir. Ultrasonik uygulamanın doğrudan buğday kepeği üzerinde yarattığı

değişimlere odaklanan çalışmalarda, genellikle kepeğin fiziksel, kimyasal ve fonksiyonel özellikleri incelenmiş, ancak bu işlemden geçirilmiş kepekten ekmek üretimine ve ekmek rengi üzerindeki etkilerine yönelik bir değerlendirme yapılmamıştır. Bu nedenle, çalışmamızda incelenen UM-E ve HM-E ekmek örneklerine ilişkin renk bulgularını destekleyecek bir literatür bulunmamaktadır. Bununla birlikte, genel olarak tüm modifikasyon uygulamalarının ekmeklerin iç ve kabuk rengini daha parlak hale getirdiği, ultrasonik uygulamanın kırmızılık değerini azalttığı belirlenmiştir. Ultrasonik muamelenin mikrobiyal biyoprosesten daha belirgin bir renk değişimine yol açtığı; her iki tekniğin kombinasyonu olan hibrit modifikasyonun ise görsel olarak dahi fark edilebilecek derecede maksimum renk değişimine neden olduğu tespit edilmiştir.

4.5.2 Ekmeklerin Diyet Lifi ve Fitik Asit İçeriği

İşlem görmemiş kepek ve modifiye kepeklerden üretilen ekmeklerin diyet lifi ve fitik asit içeriği Tablo 4.19'da sunulmuştur.

İşlem görmemiş ve farklı tekniklerle (MB, UM ve HM) modifiye edilmiş kepeklerin diyet lifi kompozisyonunun, bu kepekler kullanılarak üretilen ekmeklerin diyet lifi bileşimiyle tutarlı bir eğilime sahip olduğu tespit edilmiştir (Tablo 4.2). Tüm modifikasyon uygulamaları, karşılık gelen ekmeklerin toplam diyet lifi (TDF) içeriğini artırmış olsa da en belirgin artış kepeğinde olduğu gibi HM uygulaması ile elde edilen kepekle üretilen ekmekte (HM-E) ortaya çıkmıştır. Bölüm 4.4.1'de açıklandığı üzere ultrasonik kavitasyonun buğday kepeğinin diyet lifi üzerindeki etkisi hem tek başına uygulandığında (UM) hem de mikrobiyal biyoproses tekniğiyle ile kombinlendiğinde (HM) TDF'yi artırıcı yönde olmuştur. Bu durum ekmek örneklerine de yansımış ve en yüksek toplam diyet lifi miktarı HM-E ve sonrasında sırasıyla UM-E ve MB uygulanmış örneklerde ortaya çıkmıştır.

SDF içeriği, MB32-E örneğinde en yüksek seviyede tespit edilmiş olup, HM-E ile benzer şekilde ($p>0,05$), kontrol örneğine (TKC-E) kıyasla anlamlı bir artış göstermiştir. UM ve MB29 uygulamalarında üretilen ekmeklerin SDF içeriğindeki artışın ise daha sınırlı olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 4.19 Modifikasyon uygulamalarının ekmeklerin diyet lifi ve fitik asit içeriği üzerine etkisi

Örnek	SDF (%)	IDF (%)	TDF (%)	Fitik asit (mg/100 g)
TKC-E	1,34±0,03^{c}	7,54±0,16^{c}	8,89±0,13^{d}	49,40±0,24^{a}
MB29-E	2,24±0,04^{b}	7,15±0,10^{cd}	9,39±0,14^{c}	41,05±0,31^{b}
MB32-E	2,67±0,11^{a}	7,04±0,18^{d}	9,72±0,28^{c}	38,08±1,15^{c}
UM-E	2,08±0,05^{b}	8,87±0,04^{b}	10,95±0,09^{b}	28,86±0,33^{d}
HM-E	2,55±0,09^{a}	9,63±0,16^{a}	12,17±0,07^{a}	23,21±0,94^{e}

Sonuçlar üç tekrarın ortalama ± standart sapması olarak ifade edilmiştir. Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip ortalamalar gruplar için önemli farklılıkları ($p<0,05$) göstermektedir. TKC-E: İşlem görmemiş Tekirdağ çeşit kepek ile üretilen ve modifiye edilmiş kepekler ile üretilen ekmeklerin referansı olan kontrol ekmeği; MB29-E: MB29 kodlu kepek ile üretilen ekmek; MB32-E: MB32 kodlu kepek ile üretilen ekmek; UM-E: UM kodlu kepekle üretilen ekmek; HM-E: HM kodlu kepekle üretilen ekmek

Messia ve ark. [86], *Lactobacillus brevis* ile ön fermentasyon uyguladıkları buğday kepeğinin ekmek özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Çalışmada, fermentasyonun işlenmemiş kepeğe kıyasla SDF içeriğini 4,4 kat artırdığı ve IDF içeriğini %32 oranında azalttığı belirtilmiştir. Referans ekmekte (%20 işlenmemiş kepek içeren) SDF, IDF ve TDF değerleri sırasıyla %2,1, %7,7 ve %9,8 olarak ölçülmüş; %20 oranında ön fermente kepek kullanılarak üretilen ekmekte ise bu değerlerin %3,6, %6,1 ve %9,7 olduğu rapor edilmiştir. Çalışmamızda, modifiye kepek ile üretilen ekmeklerin (%15 kepek katkı oranı) toplam diyet lifi içeriğinin, Messia ve ark. tarafından %20 kepek oranı ile üretilen ekmeklerle benzer değerler göstermesi dikkat çekicidir. Ayrıca, çalışmamızda gözlemlenen kepek diyet lifi kompozisyonu ile bu kepekten üretilen ekmeklerin diyet lifi bileşimi arasındaki tutarlı eğilimin, Messia ve ark. tarafından bildirilen bulgularla paralellik göstermesi, sonuçlarımızın literatürle uyumlu olduğunu göstermektedir.

Çalışmamızın sonuçları, MB tekniği, UM ve bunların birlikte uygulanmasının nihai ürünün diyet lifi bileşimini önemli ölçüde değiştirdiğini açıkça göstermiştir. Özellikle, SDF içeriği TKC-E örneğine kıyasla M32-E'de 2 kat ve HM-E'de 1,9 kat artmış ve ekmeklerdeki TDF içeriğinde önemli bir artış sağlamıştır. (Tablo 4.19).

Modifikasyon uygulamalarının kepeklerde sağladığı fitik asit azalması (Tablo 4.2) ile uyumlu olarak, bu kepeklerle üretilen ekmeklerin de fitik asit içeriği anlamlı ölçüde azalmıştır (Tablo 4.19). HM-E, UM-E, MB32-E ve MB29-E örneklerinin fitik asit içeriği, kontrol örneği TKC-E ile karşılaştırıldığında sırasıyla yaklaşık %53, %42, %23 ve %17 oranında daha düşük bulunmuştur. Kepekteki fitik asit azalmasına ek olarak, ekmeklerde gözlemlenen bu belirgin düşüşün bir diğer nedeni, hamur fermentasyonu sırasında fitaz aktif bir maya olan *Saccharomyces cerevisiae*'nin, geriye kalan fitik asidi degradasyona uğratmasıdır [230].

Bölüm 4.4.2'de açıklandığı gibi, literatürde ultrasonikasyonun buğday kepeğinin fitik asit içeriği üzerindeki etkisini araştıran çalışmalar bulunmakla birlikte, ultrasonik muamele ile modifiye edilmiş kepeğin ekmek üretiminde kullanımını ele alan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Tez çalışmasında elde edilen ekmek fitik asit içeriği sonuçları literatür desteği ile doğrudan karşılaştırılamasa da Tablo 4.14'te gösterildiği gibi, UM uygulanmış kepekte fitik asit miktarındaki belirgin azalmanın ekmeğe yansıması beklenen bir sonuçtur.

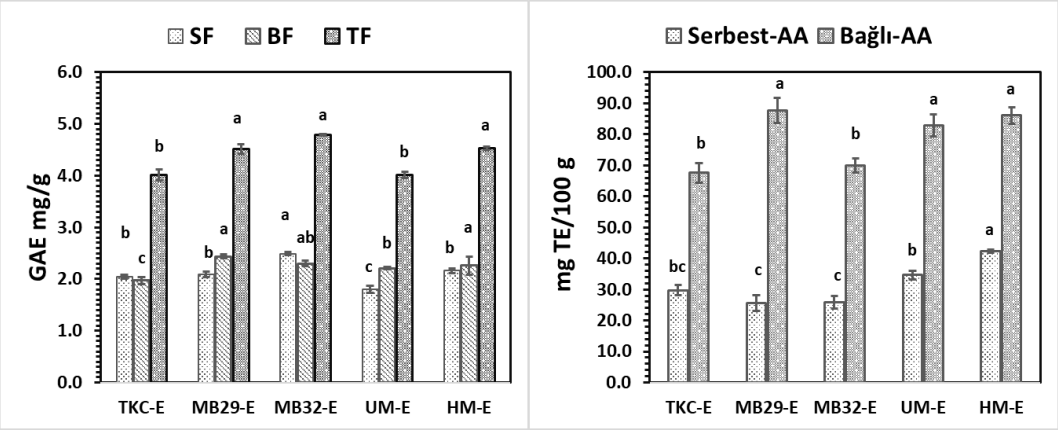
4.5.3 Ekmeklerin Toplam Fenolik Madde İçeriği ve Antioksidan Aktivitesi

Tablo 4.20, işlenmemiş ve modifiye edilmiş kepeklerden üretilen ekmek örneklerinin serbest ve bağlı fenolik içerikleri ile antioksidan aktivitelerini özetlemektedir. En yüksek SF değeri MB32-E'de (2,49±0,03 mg GAE/g) tespit edilmiş olup, bu değer referans ekmeğe (TKC-E) kıyasla yaklaşık %22'lik bir artışı göstermektedir. Bu bulgu MB32 modifikasyonunun serbest fenolik bileşiklerin salınımını teşvik etme potansiyelini ortaya koymaktadır. MB32-E, MB29-E ve HM-E'nin toplam fenolik içerikleri (TF) açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark ortaya çıkmamıştır ($p>0,05$). Ancak bu örneklerin toplam fenolik değerleri işlem görmemiş kepekle üretilen kontrol ekmeğinden (TKC-E) istatistiksel olarak anlamlı şekilde daha yüksektir ($p<0,05$). TKC-E ve UM-E arasındaki fark ise istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur.

Tablo 4.20 Modifikasyon uygulamalarının ekmeklerin toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite özelliklerine etkisi

Örnek	SF (GAE mg/g)	BF (GAE mg/g)	TF (GAE mg/g)	Serbest-AA (mg TE/100 g)	Bağlı-AA (mg TE/100 g)
TKC-E	2,04±0,04^{b}	1,97±0,07^{c}	4,01±0,11^{b}	29,7±1,6^{bc}	67,5±3,2^{b}
MB29-E	2,09±0,06^{b}	2,44±0,04^{a}	4,52±0,09^{a}	25,6±2,5^{c}	87,6±4,1^{a}
MB32-E	2,49±0,03^{a}	2,30±0,05^{ab}	4,79±0,01^{a}	25,8±2,1^{c}	69,9±2,3^{b}
UM-E	1,80±0,07^{c}	2,21±0,02^{b}	4,01±0,06^{b}	34,6±1,4^{b}	82,9±3,5^{a}
HM-E	2,16±0,05^{b}	2,26±0,18^{a}	4,53±0,03^{a}	42,2±0,5^{a}	86,1±2,6^{a}

Sonuçlar üç tekrarın ortalama ± standart sapması olarak ifade edilmiştir. Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip ortalamalar, ekmekler için önemli farklılıkları ($p<0,05$) göstermektedir. TKC-E: İşlem görmemiş Tekirdağ çeşit kepek ile üretilen ve modifiye edilmiş kepekler ile üretilen ekmeklerin referansı olan kontrol ekmeği; MB29-E: MB29 kodlu kepek ile üretilen ekmek; MB32-E: MB32 kodlu kepek ile üretilen ekmek; UM-E: UM kodlu kepekle üretilen ekmek; HM-E: HM kodlu kepekle üretilen ekmek; SF: Serbest fenolik madde miktarı; BF: Bağlı fenolik madde miktarı; TF: Toplam fenolik madde miktarı; Serbest-AA: Serbest fenolik ekstraktlarının DPPH radikali süpürme aktivitesi; Bağlı-AA: Bağlı fenolik ekstraktlarının DPPH radikali süpürme aktivitesi



Şekil 4.10 Modifikasyon uygulamalarının ekmeklerin toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite özellikleri üzerine etkisi

Biyoproses uygulamalarının, nişasta ve nişasta olmayan polisakkaritlerin yanı sıra proteinlerin parçalanmasını kolaylaştırarak indirgen şeker, çözünür diyet lifi, peptitler ve amino asit seviyelerinin artmasına neden olduğu bilinmektedir. Bu süreç, aynı zamanda hücre duvarı polisakkaritlerine kovalent olarak bağlanan çözünmeyen fenolik bileşiklerin serbest bırakılmasını teşvik ederek fenolik içeriğin artmasına katkı sağlar [231]. Çalışmamızda MB modifikasyonu ile üretilen ekmeklerde (MB32-E ve MB29-E) toplam fenolik değerlerindeki artış ve buna bağlı olarak serbest-AA ve bağlı-AA aktivitelerinin yükselmesi, verilen

literatürdeki mekanizma ile ilişkilendirilebilir. Buna karşın UM modifikasyonu ile üretilen ekmek örneği (UM-E), serbest fenolik (SF) içeriği açısından kontrol ekmeğine (TKC-E) kıyasla yaklaşık %11,8 daha düşük bir değere sahiptir. UM uygulamasının fenolik bileşiklerin salınımını MB uygulamasına kıyasla sınırladığı veya serbest fenoliklerin yapısal değişimlerle bozunmasına neden olduğu değerlendirilebilir. Bu durum UM-E'nin toplam fenolik içeriğini (serbest ve bağlı) diğer modifikasyon yöntemleri ile karşılaştırıldığında daha düşük bir seviyeye taşımış olsa da antioksidan aktivitesinin örnekler arasındaki en düşük profili sergilemediği belirlenmiştir.

Ekmek örneklerinin antioksidan aktiviteleri değerlendirildiğinde, referans ekmek (TKC-E) için serbest-AA ve bağlı-AA değerleri sırasıyla 29,7±1,6 ve 67,5±3,2 mg TE/100 g olarak ölçülmüştür. Bu bulgular, kepek örneklerinde olduğu gibi, bağlı fenolik bileşiklerin ekmeklerde de antioksidan aktiviteye daha önemli bir katkı sunduğunu göstermektedir. UM-E örneği, SF değeri en düşük olmasına rağmen serbest-AA değeri açısından MB ile modifiye edilmiş ekmeklerden daha yüksek bir performans sergilemiştir. Önceki çalışmalar da ultrases teknolojisinin serbest fenolik içerik üzerindeki azaltıcı etkisini rapor etmiştir [232]. Daha önce de tartışıldığı üzere, fenolik asit profili ve bu asitlerin toplam antioksidan aktiviteye bireysel katkıları, ultrasonik işlemin fenolik bileşiklere erişimi kolaylaştırması gibi faktörler bu korelasyon eksikliğini açıklayabilir. Ayrıca, UM uygulamasının, ekmek üretimi sırasında daha iyi korunan ve daha yüksek antioksidan kapasiteye sahip fenolik asitlerin ortaya çıkmasını teşvik etmiş olması da mümkündür. Bu da UM-E'nin gelişmiş antioksidan aktivitesini açıklayabilir. Sonuç olarak, HM-E işlenmemiş kepekle üretilen kontrol ekmeğine (TKC-E) kıyasla %32'lik bir artışla en yüksek toplam antioksidan aktiviteyi sergilemiştir. Bu örneği sırasıyla %21 ve %16'lık artışlarla UM-E ve MB29-E takip etmiştir. Bu bulgular, ultrasonik uygulama ve mikrobiyal biyoprosesin hibrit kullanımının fenolik bileşiklerin biyoyararlılığını artırarak antioksidan aktivitesi yüksek nihai ürünler üretilebileceğini ortaya koymaktadır.

5
SONUÇ

Bu çalışmada buğday tanesinden ekmeğe uzanan süreç boyunca gerçekleştirilen çalışmaları, buğday kepeğinin modifikasyonunu ve etkilerini detaylı olarak ele alınmıştır. Buğday kepeğinin mikrobiyal biyoproses (MB), ultrasonik modifikasyon (UM) ve hibrit modifikasyon (HM) teknikleriyle modifiye edilerek fenolik içerik, antioksidan aktivite, diyet lifi kompozisyonu ve tekstürel özellikler açısından nasıl değiştiğini kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir. Daha sonra modifiye edilmiş buğday kepeğinin ekmek üretiminde kullanılmasıyla elde edilen ürünlerin teknolojik ve besinsel özellikleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Çalışma literatürdeki bilgilerle uyumlu ve özgün katkılar sunarak buğday kepeği araştırmalarında yeni bir bakış açısı sağlamıştır.

Araştırmanın temel amacı, buğday kepeğinin farklı modifikasyon teknikleriyle hem teknolojik hem de besinsel açıdan iyileştirilesi ve bu modifikasyonların nihai ürün üzerindeki etkilerini anlamak yoluyla daha avantajlı olan modifikasyon seçeneğini belirleyebilmektedir. Çalışmada buğday kepeği gibi yüksek besinsel profil sergileyen ancak fonksiyonel gıda üretiminde kullanımında kısıtlamalar bulunan bir yan ürünün bazı modifikasyonlarla değer kazanabileceği somut göstergelerle gösterilmiştir. Bu kapsamda, modifiye edilmiş kepeklerin ekmek üretiminde kullanılmasının, ürünün gerek besinsel gerek tekstürel kalitesini nasıl etkilediği ele alınmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında buğday çeşit farklılıklarının buğday kepeğinin kompozisyonel ve biyoaktif özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilerek, çeşit farklılığın tez çalışmasında değerlendirilen kepek özelliklerini ne yönde etkilediği ortaya koyulmuştur. Bu aşamada elde edilen bulgular doğrultusunda, hangi buğday çeşidine ait kepeğin bir sonraki aşamada farklı modifikasyon uygulamaları yoluyla muamele edilerek çalışmaya devam edileceğine karar verilmiştir. Trakya, Türkiye menşeili iki farklı ekmeklik çeşit olan Tekirdağ ve Rumeli çeşit buğdaylar özelinde yapılan çalışmalar sonucunda, çeşit farklılıklarının protein içeriği hariç buğday kepeğinin bileşimsel özelliklerini önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Ayrıca, bu kepekleri içeren ekmekler üretilerek kepeğin ekmek yapımında hangi

özelliklerini koruduğu belirlenmiştir. Buğday kepeğinin su tutma kapasitesi ve toplam diyet lifi içeriği, ekmeğin spesifik hacmi ve tekstürü üzerindeki etkilerini göstermiştir. Öte yandan, daha fazla antioksidan aktivite ve çözünür diyet lifi gösteren buğday kepeği, bu özellikleri ekmek ürününe taşıyamamış ve ekmek üretim prosesinin bir etkisi sonucu benzer antioksidan özellikler sergileyen ekmek ürünleri ortaya çıkmıştır. Tekirdağ çeşit buğday kepeği, reolojik uyumu, tekstürel stabilitesi, yüksek çözünür diyet lifi içeriği ve modifikasyona uygun yapısal özellikleri nedeniyle modifikasyon çalışmaları için kullanılacak kepek örneği olarak seçilmiştir.

Mikrobiyal biyoproses, kepeğin fenolik içerik ve antioksidan aktivite açısından zenginleştirilmesinde etkili olmuştur. Çalışma, özellikle *Lactiplantibacillus plantarum* (MB29 uygulamasının laktik asit bakterisi suşu) ve *Levilactobacillus brevis* (MB32 uygulamasının laktik asit bakterisi suşu) suşlarının, buğday kepeğinin diyet lifi kompozisyonunda belirgin dönüşümler yarattığı ortaya koyulmuştur. Özellikle MB32 kombinasyonu, çözünmeyen diyet liflerini (IDF) çözünebilir diyet liflerine (SDF) dönüştürmede en etkili yöntem olarak öne çıkmış ve en yüksek SDF içeriğini sağlamıştır. Bu durum, mikrobiyal enzimlerin besinsel lif matrisini parçalayarak biyoyararlanabilirliği daha yüksek formlar oluşturmasıyla ilişkilendirilmiştir. HM yöntemi, UM ve MB'nin etkilerini birleştirerek SDF artışında anlamlı bir başarı sergilemiş, IDF değerlerini sabit tutarak toplam diyet lifi (TDF) miktarını artırmıştır. UM ise kavitasyon etkisi ile fiziksel dönüşümler sağlamış, ancak SDF artışında anlamlı olsa da daha sınırlı bir başarı göstermiştir. Mikrobiyal biyoprosesin, kepek hücre duvarlarına bağlı çözünmeyen fenolik bileşikleri serbest bıraktığı ve bunun hem fenolik içerik hem de antioksidan kapasitede önemli artışlarla sonuçlandığı da önemli bulgular arasındadır. Ultrasonik modifikasyonun ise fenolik içerik üzerinde daha sınırlı bir etki yaratmış olsa da yöntemin fiziksel özellikler üzerindeki etkisi dikkat çekicidir. Ultrasonikasyon kepek matrisinden fenolik bileşiklerin serbest kalmasını kolaylaştırmıştır. Bununla birlikte, ultrasonik modifikasyonun ekmek üretiminde kullanımıyla ilgili literatürde sınırlı bilgi bulunmaktadır. Tez çalışması bu yönüyle bu alana özgün katkılar sunmaktadır. Hibrit modifikasyon, ultrasonikasyonun fiziksel etkileri ile mikrobiyal biyoprosesin biyokimyasal etkilerini birleştirerek sinerjik bir etki yaratmıştır. HM uygulanmış kepeklerde toplam fenolik içerik ve

antioksidan aktivite değerleri, tek başına UM ve MB uygulamalarına kıyasla daha yüksek bulunmuş ve bu sonuçlar, hibrit modifikasyonun buğday kepeği iyileştirmede umut vadeden bir yöntem olarak değerlendirilebileceğini göstermiştir.

Buğday kepeğine uygulanan modifikasyonların ekmeklerin teknolojik özellikleri üzerindeki etkileri, spesifik hacim, renk ve sertlik, esneklik, çiğnenebilirlik gibi tekstürel özellikler yönünden değerlendirilmiştir. HM uygulanmış kepeklerle üretilen ekmekler, en yüksek spesifik hacim ve en düşük sertlik değerleri ile öne çıkmıştır. Mikrobiyal biyoprosesin, özellikle MB32 uygulamasının, ekmekte hacim artışına katkı sağladığı tespit edilmiştir. Ancak, MB29 ile işlenmiş kepekler kullanılan ekmeklerde, kepek T-STK'sinin yüksek olması nedeniyle daha yoğun ve sıkı bir yapı oluşmuş ve bu durum, spesifik hacmin düşmesiyle sonuçlanmıştır. Ekmeklerin diyet lifi kompozisyonu da modifikasyon tekniklerine bağlı olarak farklılık göstermiştir. HM uygulaması, ekmeklerde hem çözünür diyet lifi (SDF) oranını hem çözünmeyen diyet lifi (IDF) oranını artırarak toplam diyet lifinin (TDF) artışıyla sonuçlanmıştır. UM uygulaması ise kepeğin fitik asit içeriğini oldukça efektif bir biçimde azaltmış ve bu durum, UM-E ve HM-E ekmeklerindeki fitik asit seviyelerinin etkileyici bir şekilde düşmesiyle sonuçlanmıştır. Fitik asidin mineral bağlayıcı özellikleri göz önünde bulundurulduğunda bu bulgunun ekmeklerin besinsel biyoyararlılığını artırdığı söylenebilir. Modifiye edilmiş buğday kepeği ile üretilen ekmeklerin fenolik içerikleri ve antioksidan aktiviteleri incelendiğinde, HM uygulamasının en yüksek toplam fenolik içerik ve antioksidan aktivite değerlerini sağladığı tespit edilmiştir. Ultrases modifikasyonunun, serbest fenoliklerin erişilebilirliğini artırarak nihai üründeki antioksidan potansiyeli geliştirdiği görülmüştür. Bununla birlikte çalışmanın kepek ve ekmek fraksiyonlarında yer yer ortaya çıkan fenolik madde miktarı ve antioksidan aktivite arasındaki doğrudan korelasyonun eksikliği, fenolik bileşiklerin bireysel antioksidan katkılarının ve sinerjik etkilerinin önemini ortaya koymaktadır. Bu durum, çalışmada kullanılan modifikasyon tekniklerinin, fenolik asit profillerini ve dağılımlarını değiştirerek ürün özelliklerini nasıl etkileyebileceğini göstermektedir.

Bu çalışma, ultrasonik modifikasyonun buğday kepeği ve kepekten üretilen ürünler üzerindeki etkilerini ele alan literatürdeki sınırlı bilgiye önemli katkılar sunmaktadır. Özellikle hibrit modifikasyon tekniği, buğday kepeği araştırmalarında

yenilikçi bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır ve hem teknolojik hem de besinsel özelliklerde kayda değer iyileştirmeler sağladığı ortaya konulmuştur. Ayrıca, bu çalışmada modifiye edilmiş kepeklerle üretilen ekmeklerin besinsel özelliklerinin, literatürdeki diğer çalışmalarla uyumlu olduğu ancak bu çalışmanın daha geniş bir bakış açısı sunduğu da önemli bir sonuç olarak değerlendirilmektedir.

Tez çalışması, buğday kepeği modifikasyonunda kullanılan farklı tekniklerin (MB, UM ve HM) hem kepeğin hem de kepekten üretilen ekmeklerin besinsel, fonksiyonel ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, MB ve UM tekniklerinin birlikte uygulanmasıyla elde edilen hibrit modifikasyon (HM), kepek ve ekmek kalitesinde en efektif iyileşmeyi sağlamış ve buğday kepeği ile zenginleştirilmiş unlu mamullerin sağlık faydalarını geliştirmek için etkili bir yaklaşım olduğu kanıtlanmıştır. HM, sadece fenolik içerik ve antioksidan aktiviteyi artırmakla kalmamış, aynı zamanda tekstürel özelliklerdeki iyileşmelerle tüketici beğenisini artırma potansiyeli sunmuştur. Bununla birlikte, hibrit modifikasyonun etkinliğini daha da artırmak ve gıda endüstrisinde yaygın kullanımını sağlamak için maliyet etkinliği çalışmaları, büyük ölçekli üretim gereklilikleri ve fizibilite çalışmaları gibi konular üzerinde daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Ayrıca, UM ve HM ile modifiye edilmiş buğday kepeği ve ekmeklerin uzun vadeli sağlık etkileri, özellikle besinsel bileşiklerin biyoyararlanımı ve prebiyotik etkiler gibi alanlar da daha kapsamlı olarak araştırılmalıdır. Böylece bu uygulamaların tüketim güvenliğini değerlendirmek ve modifiye edilmiş kepeğin beslenme açısından sağladığı avantajları daha iyi anlamak mümkün hale gelecektir.

Gelecekteki araştırmalar hem hibrit modifikasyon hem de diğer tekniklerin etkili parametrelerini optimize ederek, yalnızca buğday kepeği değil, aynı zamanda diğer tahıl yan ürünleri ve unlu mamullerdeki uygulanabilirliğini de incelemelidir. Böylelikle, bu değerli yan ürünlerin daha geniş çapta kullanımı teşvik edilerek, gıda endüstrisinde sürdürülebilir ve yenilikçi çözümler sunulabilecektir. Bu çalışma, modifikasyon tekniklerinin potansiyelini vurgulamakla kalmamış, aynı zamanda fonksiyonel gıda ürünlerinin geliştirilmesine yönelik de güçlü bir temel oluşturmuştur.

KAYNAKÇA

[1] Stevenson, L., F. Phillips, K. O'sullivan and J. Walton, *Wheat bran: its composition and benefits to health, a European perspective.* International journal of food sciences and nutrition, 2012. **63**(8): p. 1001-1013.

[2] Hemdane, S., P.J. Jacobs, E. Dornez, J. Verspreet, J.A. Delcour and C.M. Courtin, *Wheat (Triticum aestivum L.) bran in bread making: A critical review.* Comprehensive reviews in food science and food safety, 2016. **15**(1): p. 28-42.

[3] Sztupecki, W., L. Rhazi, F. Depeint and T. Aussenac, *Functional and nutritional characteristics of natural or modified wheat bran non-starch polysaccharides: A literature Review.* Foods, 2023. **12**(14): p. 2693.

[4] Zannini, E., Á. Bravo Núñez, A.W. Sahin and E.K. Arendt, *Arabinoxylans as Functional Food Ingredients: A Review.* Foods, 2022. **11**(7): p. 1026.

[5] Huang, M., J. Bai, D.G. Buccato, J. Zhang, Y. He, Y. Zhu, Z. Yang, X. Xiao and M. Daglia, *Cereal-Derived Water-Unextractable Arabinoxylans: Structure Feature, Effects on Baking Products and Human Health.* Foods, 2024. **13**(15): p. 2369.

[6] Rosa-Sibakov, N., K. Poutanen and V. Micard, *How does wheat grain, bran and aleurone structure impact their nutritional and technological properties?* Trends in Food Science & Technology, 2015. **41**(2): p. 118-134.

[7] Wanzenböck, E., S. Apprich, Ö. Tirpanalan, U. Zitz, D. Kracher, K. Schedle and W. Kneifel, *Wheat bran biodegradation by edible Pleurotus fungi–A sustainable perspective for food and feed.* LWT, 2017. **86**: p. 123-131.

[8] Collar, C., E. Santos and C. Rosell, *Assessment of the rheological profile of fibre-enriched bread doughs by response surface methodology.* Journal of Food Engineering, 2007. **78**(3): p. 820-826.

[9] Sasaki, T., T. Yasui and J. Matsuki, *Influence of non-starch polysaccharides isolated from wheat flour on the gelatinization and gelation of wheat starches.* Food Hydrocolloids, 2000. **14**(4): p. 295-303.

[10] Tebben, L., Y. Shen and Y. Li, *Improvers and functional ingredients in whole wheat bread: A review of their effects on dough properties and bread quality.* Trends in Food Science & Technology, 2018. **81**: p. 10-24.

[11] Li, Y., M. Li, L. Wang and Z. Li, *Effect of particle size on the release behavior and functional properties of wheat bran phenolic compounds during in vitro gastrointestinal digestion.* Food Chemistry, 2022. **367**: p. 130751.

[12] Yan, J., Y. Lv and S. Ma, *Wheat bran enrichment for flour products: Challenges and solutions.* Journal of Food Processing and Preservation, 2022. **46**(11): p. e16977.

[13] Chen, M., D. Jiang, E. Guan, M. Li, Y. Liu, K. Zhang and K. Bian, *Dynamic Changes of Wheat Bran Components During Lactic Acid Bacteria Solid-*

State Fermentation. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024. **43**(2): p. 30-37.

[14] Manini, F., M. Brasca, C. Plumed-Ferrer, S. Morandi, D. Erba and M.C. Casiraghi. *Study of the chemical changes and evolution of microbiota during sourdoughlike fermentation of wheat bran*. in *Cereal Chemistry*. 2014.

[15] Zhang, K., D. Jiang, X. Wan, E. Guan, M. Li, M. Chen, H. Tang and K. Bian, *Research progress on nutritional quality and resource utilization of microbial solid-state fermented wheat bran.* Food and Fermentation Industries, 2024. **50**(4): p. 337-346.

[16] Chavan, P., P. Sharma, S.R. Sharma, T.C. Mittal and A.K. Jaiswal, *Application of high-intensity ultrasound to improve food processing efficiency: A review.* Foods, 2022. **11**(1): p. 122.

[17] Onipe, O.O., A.I. Jideani and D. Beswa, *Composition and functionality of wheat bran and its application in some cereal food products.* International Journal of Food Science & Technology, 2015. **50**(12): p. 2509-2518.

[18] Neves, M.A.d., T. Kimura, N. Shimizu and K. Shiiba, *Production of alcohol by simultaneous saccharification and fermentation of low-grade wheat flour.* Brazilian archives of biology and technology, 2006. **49**: p. 481-490.

[19] Prueckler, M., S. Siebenhandl-Ehn, S. Apprich, S. Hoeltinger, C. Haas, E. Schmid and W. Kneifel, *Wheat bran-based biorefinery 1: Composition of wheat bran and strategies of functionalization.* LWT-Food Science and Technology, 2014. **56**(2): p. 211-221.

[20] Balandrán-Quintana, R.R., J.N. Mercado-Ruiz and A.M. Mendoza-Wilson, *Wheat bran proteins: a review of their uses and potential.* Food Reviews International, 2015. **31**(3): p. 279-293.

[21] Heiniö, R.-L., M. Noort, K. Katina, S.A. Alam, N. Sozer, H.L. De Kock, M. Hersleth and K. Poutanen, *Sensory characteristics of wholegrain and bran-rich cereal foods–a review.* Trends in Food Science & Technology, 2016. **47**: p. 25-38.

[22] Chen, Z., A.L. Mense, L.R. Brewer and Y.-C. Shi, *Wheat bran layers: composition, structure, fractionation, and potential uses in foods.* Critical reviews in food science and nutrition, 2023: p. 1-24.

[23] Cheng, W., Y. Sun, M. Fan, Y. Li, L. Wang and H. Qian, *Wheat bran, as the resource of dietary fiber: A review.* Critical reviews in food science and nutrition, 2022. **62**(26): p. 7269-7281.

[24] Brouns, F., Y. Hemery, R. Price and N.M. Anson, *Wheat aleurone: separation, composition, health aspects, and potential food use.* Critical reviews in food science and nutrition, 2012. **52**(6): p. 553-568.

[25] Chudan, S., R. Ishibashi, M. Nishikawa, Y. Tabuchi, Y. Nagai, S. Ikushiro and Y. Furusawa, *Effect of Wheat-Derived Arabinoxylan on the Gut Microbiota Composition and Colonic Regulatory T Cells.* Molecules, 2023. **28**(7): p. 3079.

[26] Chalamacharla, R., K. Harsha, K. Sheik and C. Viswanatha, *Wheat bran-composition and nutritional quality: a review. Adv Biotech Microbiol 9 (1): 555754*. 2018.

[27] Meziani, S., I. Nadaud, A. Tasleem-Tahir, E. Nurit, R. Benguella and G. Branlard, *Wheat aleurone layer: A site enriched with nutrients and bioactive molecules with potential nutritional opportunities for breeding.* Journal of Cereal Science, 2021. **100**: p. 103225.

[28] Deroover, L., Y. Tie, J. Verspreet, C.M. Courtin and K. Verbeke, *Modifying wheat bran to improve its health benefits.* Critical reviews in food science and nutrition, 2020. **60**(7): p. 1104-1122.

[29] Budhwar, S., M. Chakraborty, K. Sethi and A. Chatterjee, *Antidiabetic properties of rice and wheat bran—A review.* Journal of food biochemistry, 2020. **44**(10): p. e13424.

[30] Chen, Z., A.L. Mense, L.R. Brewer and Y.C. Shi, *Wheat bran arabinoxylans: Chemical structure, extraction, properties, health benefits, and uses in foods.* Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024. **23**(3): p. e13366.

[31] Wu, T., Z. Li, R. Liu, W. Sui and M. Zhang, *Effect of extrusion, steam explosion and enzymatic hydrolysis on functional properties of wheat bran.* Food Science and Technology Research, 2018. **24**(4): p. 591-598.

[32] Lai, S., Z. Chen, Y. Zhang, G. Li, Y. Wang and Q. Cui, *Micronization effects on structural, functional, and antioxidant properties of wheat bran.* Foods, 2022. **12**(1): p. 98.

[33] Coda, R., C.G. Rizzello, J.A. Curiel, K. Poutanen and K. Katina, *Effect of bioprocessing and particle size on the nutritional properties of wheat bran fractions.* Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014. **25**: p. 19-27.

[34] Cai, L., I. Choi, C.K. Lee, K.K. Park and B.K. Baik, *Bran characteristics and bread-baking quality of whole grain wheat flour.* Cereal Chemistry, 2014. **91**(4): p. 398-405.

[35] Roozendaal, H., M. Abu-hardan and R.A. Frazier, *Thermogravimetric analysis of water release from wheat flour and wheat bran suspensions.* Journal of Food Engineering, 2012. **111**(4): p. 606-611.

[36] Li, C., G. Chen, M. Tilley, Y. Chen and Y. Li, *Comparing bread-making properties of white and whole wheat flours from 64 different genotypes: A correlation analysis.* Journal of Cereal Science, 2023. **114**: p. 103793.

[37] Almeida, E.L., Y.K. Chang and C.J. Steel, *Dietary fibre sources in bread: Influence on technological quality.* LWT-Food Science and Technology, 2013. **50**(2): p. 545-553.

[38] Saini, P., M. Islam, R. Das, S. Shekhar, A.S.K. Sinha and K. Prasad, *Wheat bran as potential source of dietary fiber: Prospects and challenges.* Journal of Food Composition and Analysis, 2023. **116**: p. 105030.

[39] Sidhu, J.S., S.N. Al-Hooti and J.M. Al-Saqer, *Effect of adding wheat bran and germ fractions on the chemical composition of high-fiber toast bread.* Food chemistry, 1999. **67**(4): p. 365-371.

[40] Campbell, G.M., M. Ross and L. Motoi, *Bran in bread: effects of particle size and level of wheat and oat bran on mixing, proving and baking*, in *Bubbles in food 2*. 2008, Elsevier. p. 337-354.

[41] Anil, M., *Effects of wheat bran, corn bran, rice bran and oat bran supplementation on the properties of pide.* Journal of Food Processing and Preservation, 2012. **36**(3): p. 276-283.

[42] Schmiele, M., L.Z. Jaekel, S.M.C. Patricio, C.J. Steel and Y.K. Chang, *Rheological properties of wheat flour and quality characteristics of pan bread as modified by partial additions of wheat bran or whole grain wheat flour.* International journal of food science & technology, 2012. **47**(10): p. 2141-2150.

[43] Curti, E., E. Carini, G. Bonacini, G. Tribuzio and E. Vittadini, *Effect of the addition of bran fractions on bread properties.* Journal of Cereal Science, 2013. **57**(3): p. 325-332.

[44] Le Bleis, F., L. Chaunier, H. Chiron, G. Della Valle and L. Saulnier, *Rheological properties of wheat flour dough and French bread enriched with wheat bran.* Journal of Cereal Science, 2015. **65**: p. 167-174.

[45] Boita, E.R., T. Oro, J. Bressiani, G.S. Santetti, T.E. Bertolin and L.C. Gutkoski, *Rheological properties of wheat flour dough and pan bread with wheat bran.* Journal of Cereal Science, 2016. **71**: p. 177-182.

[46] Packkia-Doss, P.P., S. Chevallier, A. Pare and A. Le-Bail, *Effect of supplementation of wheat bran on dough aeration and final bread volume.* Journal of Food Engineering, 2019. **252**: p. 28-35.

[47] Seo, Y., Y. Moon and M. Kweon, *Effect of Purple-Colored Wheat Bran Addition on Quality and Antioxidant Property of Bread and Optimization of Bread-Making Conditions.* Applied Sciences, 2021. **11**(9): p. 4034.

[48] Onipe, O.O., D. Beswa and A.I.O. Jideani, *Effect of size reduction on colour, hydration and rheological properties of wheat bran.* Food Science and Technology, 2017. **37**(3): p. 389-396.

[49] Demuth, T., J. Betschart and L. Nyström, *Structural modifications to water-soluble wheat bran arabinoxylan through milling and extrusion.* Carbohydrate polymers, 2020. **240**: p. 116328.

[50] Lin, S., X. Jin, J. Gao, Z. Qiu, J. Ying, Y. Wang, Z. Dong and W. Zhou, *Impact of wheat bran micronization on dough properties and bread quality: Part I–Bran functionality and dough properties.* Food Chemistry, 2021. **353**: p. 129407.

[51] Kaur, S., S. Sharma, B. Singh and B. Dar, *Effect of extrusion variables (temperature, moisture) on the antinutrient components of cereal brans.* Journal of food science and technology, 2015. **52**: p. 1670-1676.

[52] Ye, G., Y. Wu, L. Wang, B. Tan, W. Shen, X. Li, Y. Liu, X. Tian and D. Zhang, *Comparison of six modification methods on the chemical composition, functional properties and antioxidant capacity of wheat bran.* Lwt, 2021. **149**: p. 111996.

[53] De Bondt, Y., W. Hermans, P. Moldenaers and C.M. Courtin, *Selective modification of wheat bran affects its impact on gluten-starch dough*

rheology, microstructure and bread volume. Food Hydrocolloids, 2021. **113**: p. 106348.

[54] Ye, J., X. Hu, S. Luo, W. Liu, J. Chen, Z. Zeng and C. Liu, *Properties of starch after extrusion: A review.* Starch-Stärke, 2018. **70**(11-12): p. 1700110.

[55] Aktas-Akyildiz, E., M.T. Masatcioglu and H. Köksel, *Effect of extrusion treatment on enzymatic hydrolysis of wheat bran.* Journal of cereal science, 2020. **93**: p. 102941.

[56] Bartkiene, E., E. Zokaityte, V. Lele, V. Starkute, P. Zavistanaviciute, D. Klupsaite, D. Cernauskas, M. Ruzauskas, V. Bartkevics and I. Pugajeva, *Combination of extrusion and fermentation with Lactobacillus plantarum and L. uvarum strains for improving the safety characteristics of wheat bran.* Toxins, 2021. **13**(2): p. 163.

[57] Yan, X., R. Ye and Y. Chen, *Blasting extrusion processing: The increase of soluble dietary fiber content and extraction of soluble-fiber polysaccharides from wheat bran.* Food Chemistry, 2015. **180**: p. 106-115.

[58] Aktas-Akyildiz, E., O. Mattila, N. Sozer, K. Poutanen, H. Koksel and E. Nordlund, *Effect of steam explosion on enzymatic hydrolysis and baking quality of wheat bran.* Journal of Cereal Science, 2017. **78**: p. 25-32.

[59] Onwulata, C.I., *Baking Properties of milk protein-coated wheat bran.* Journal of food processing and preservation, 2008. **32**(1): p. 24-38.

[60] De Bondt, Y., N. Rosa-Sibakov, I. Liberloo, C. Roye, D. Van de Walle, K. Dewettinck, P. Goos, E. Nordlund and C.M. Courtin, *Study into the effect of microfluidisation processing parameters on the physicochemical properties of wheat (Triticum aestivum L.) bran.* Food chemistry, 2020. **305**: p. 125436.

[61] De Kock, S., J. Taylor and J. Taylor, *Effect of heat treatment and particle size of different brans on loaf volume of brown bread.* LWT-Food Science and Technology, 1999. **32**(6): p. 349-356.

[62] Özkaya, B., S. Turksoy, H. Özkaya and B. Duman, *Dephytinization of wheat and rice brans by hydrothermal autoclaving process and the evaluation of consequences for dietary fiber content, antioxidant activity and phenolics.* Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017. **39**: p. 209-215.

[63] Zhao, H.-M., X.-N. Guo and K.-X. Zhu, *Impact of solid state fermentation on nutritional, physical and flavor properties of wheat bran.* Food Chemistry, 2017. **217**: p. 28-36.

[64] Wang, L., Y. Tian, Y. Chen and J. Chen, *Effects of acid treatment on the physicochemical and functional properties of wheat bran insoluble dietary fiber.* Cereal chemistry, 2022. **99**(2): p. 343-354.

[65] Zhang, M.-Y., A.-M. Liao, K. Thakur, J.-H. Huang, J.-G. Zhang and Z.-J. Wei, *Modification of wheat bran insoluble dietary fiber with carboxymethylation, complex enzymatic hydrolysis and ultrafine comminution.* Food Chemistry, 2019. **297**: p. 124983.

[66] Huang, S., Y. He, Y. Zou and Z. Liu, *Modification of insoluble dietary fibres in soya bean okara and their physicochemical properties.* International Journal of Food Science & Technology, 2015. **50**(12): p. 2606-2613.

[67] Qi, J., W. Yokoyama, K.G. Masamba, H. Majeed, F. Zhong and Y. Li, *Structural and physico-chemical properties of insoluble rice bran fiber: Effect of acid–base induced modifications.* RSC advances, 2015. **5**(97): p. 79915-79923.

[68] Muhammad Anjum, F., M. Rauf, M. Issa Khan and S. Hussain, *Preparation of low calorific fiber rich cakes by wheat bran supplementation.* Nutrition & Food Science, 2006. **36**(6): p. 438-444.

[69] Nemes, S.A., B.E. Teleky, F. Ranga, L.F. Călinoiu, D.G.A. Elekes, R. Odocheanu, F.V. Dulf and D.C. Vodnar, *Enhancing nutritional quality and bioactivity of wheat bran through acid and alkaline pretreatments.* Journal of Cereal Science, 2024. **118**.

[70] Santala, O., A. Kiran, N. Sozer, K. Poutanen and E. Nordlund, *Enzymatic modification and particle size reduction of wheat bran improves the mechanical properties and structure of bran-enriched expanded extrudates.* Journal of Cereal Science, 2014. **60**(2): p. 448-456.

[71] Xiao, Z.-g., R.-z. Li, Z.-g. Luo, Y.-m. Duan, H.-w. Zhang, L. Liu, C.-y. Lü and Q.-y. Yang, *Effect of modified wheat bran on the structure and digestibility of bread.* 2021.

[72] Zhang, H., M. Yang, X. Fan and S. Cui, *Effects of three modification methods on the structure and characters of wheat bran dietary fiber.* Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016. **31**(12): p. 12-17.

[73] Zhang, S., X. Jia, L. Xu, Y. Xue, Q. Pan, W. Shen and Z. Wang, *Effect of extrusion and semi-solid enzymatic hydrolysis modifications on the quality of wheat bran and steamed bread containing bran.* Journal of Cereal Science, 2022. **108**: p. 103577.

[74] Arte, E., C.G. Rizzello, M. Verni, E. Nordlund, K. Katina and R. Coda, *Impact of Enzymatic and Microbial Bioprocessing on Protein Modification and Nutritional Properties of Wheat Bran.* Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015. **63**(39): p. 8685-8693.

[75] Xue, Y., X. Cui, Z. Zhang, T. Zhou, R. Gao, Y. Li and X. Ding, *Effect of β-endoxylanase and α-arabinofuranosidase enzymatic hydrolysis on nutritional and technological properties of wheat brans.* Food Chemistry, 2020. **302**.

[76] Petersson, K., E. Nordlund, E. Tornberg, A.C. Eliasson and J. Buchert, *Impact of cell wall-degrading enzymes on water-holding capacity and solubility of dietary fibre in rye and wheat bran.* Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013. **93**(4): p. 882-889.

[77] Xue, Y., X. Cui, Z. Zhang, T. Zhou, R. Gao, Y. Li and X. Ding, *Effect of β-endoxylanase and α-arabinofuranosidase enzymatic hydrolysis on nutritional and technological properties of wheat brans.* Food Chemistry, 2020. **302**: p. 125332.

[78] Cui, Y., C. Ding, Q. Liu, J. Xi, J. Meng, T. Dong, T. Jia and T. Du, *Effects of solid-state fermented wheat bran on inflammation level, serum lipid profiles and intestinal microbiota in Kunming mice.* Food Bioscience, 2024. **62**.

[79] Chen, Q., R. Wang, Y. Wang, X. An, N. Liu, M. Song, Y. Yang, N. Yin and J. Qi, *Characterization and antioxidant activity of wheat bran polysaccharides modified by Saccharomyces cerevisiae and Bacillus subtilis fermentation.* Journal of Cereal Science, 2021. **97**.

[80] Nordlund, E., K. Katina, A.-M. Aura and K. Poutanen, *Changes in bran structure by bioprocessing with enzymes and yeast modifies the in vitro digestibility and fermentability of bran protein and dietary fibre complex.* Journal of Cereal Science, 2013. **58**(1): p. 200-208.

[81] Animashahun, R., S. Olawoye, O. Alabi, F. Okeniyi, A. Animashahun and P. Oluwafemi. *Optimization of temperature in Aspergillus niger (USM F4) assisted solid state fermentation for protein enrichment of wheat bran*. in *International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals, SEB4SDG 2024*. 2024.

[82] Lei, Y., D. Xie, Y. Xie and Q. Kang, *Nutritional components changes of wheat bran after modification and effect of modified wheat bran on the quality of fermented dough.* Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition, 2020. **41**(2): p. 50-57.

[83] An, J., K. Liu, Y. Wang and A. Li, *Nutritional Properties of Fermented Wheat Bran and Its Application in Animal Production.* Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020. **32**(7): p. 3064-3071.

[84] Vermeulen, K., J. Verspreet, C.M. Courtin, F. Haesebrouck, S. Baeyen, A. Haegeman, R. Ducatelle and F. Van Immerseel, *Reducedparticle-size wheat bran is efficiently colonized by a lactic acid-producing community and reduces levels of Enterobacteriaceae in the cecal microbiota of broilers.* Applied and Environmental Microbiology, 2018. **84**(21).

[85] Zhang, H., X. Zhang, X.R. Cao, M. Iftikhar and J. Wang, *Semi-solid state fermentation and enzymatic hydrolysis impeded the destroy of wheat bran on gluten polymerization.* LWT, 2018. **98**: p. 306-313.

[86] Messia, M., A. Reale, L. Maiuro, T. Candigliota, E. Sorrentino and E. Marconi, *Effects of pre-fermented wheat bran on dough and bread characteristics.* Journal of Cereal Science, 2016. **69**: p. 138-144.

[87] Tang, N., X. Xing, H. Li, B. Suo, Y. Wang, Z. Ai and Y. Yang, *Co-culture fermentation by Saccharomycopsis fibuligera and lactic acid bacteria improves bioactivity and aroma profile of wheat bran and the bran-containing Chinese steamed bread.* Food Research International, 2024. **182**: p. 114179.

[88] Mao, M., P. Wang, K. Shi, Z. Lu, X. Bie, H. Zhao, C. Zhang and F. Lv, *Effect of solid state fermentation by Enterococcus faecalis M2 on antioxidant and nutritional properties of wheat bran.* Journal of Cereal Science, 2020. **94**: p. 102997.

[89] Aung, T., S.S. Park and M.J. Kim, *Influence of Lactobacillus (LAB) Fermentation on the Enhancement of Branched Chain Amino Acids and Antioxidant Properties in Bran among Wheat By-Products.* Fermentation, 2022. **8**(12).

[90] Spaggiari, M., A. Ricci, L. Calani, L. Bresciani, E. Neviani, C. Dall'Asta, C. Lazzi and G. Galaverna, *Solid state lactic acid fermentation: A strategy to improve wheat bran functionality.* Lwt, 2020. **118**: p. 108668.

[91] Clark, J.P., *Commercial Applications of Ultrasound in Foods.* Food Technol, 2010. **64**: p. 78.

[92] Bhargava, N., R.S. Mor, K. Kumar and V.S. Sharanagat, *Advances in application of ultrasound in food processing: A review.* Ultrasonics Sonochemistry, 2021. **70**.

[93] Qiu, L., M. Zhang, B. Chitrakar and B. Bhandari, *Application of power ultrasound in freezing and thawing Processes: Effect on process efficiency and product quality.* Ultrasonics sonochemistry, 2020. **68**: p. 105230.

[94] Yao, Y., Y. Pan and S. Liu, *Power ultrasound and its applications: A state-of-the-art review.* Ultrasonics sonochemistry, 2020. **62**: p. 104722.

[95] Ambadgatti, S., S. Patil, A. Dabade, A. Ss, P. Bhushette and S.K. Sonawane, *A Review on Recent Trends of Ultrasound Assisted Processing in Food Segment.* Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences, 2020. **10**(1): p. 1-4.

[96] Alshehhi, M., G. Wu, T. Kangsadan, K.W. Chew and P.L. Show. *Ultrasound-Assisted Food Processing: A Mini Review of Mechanisms, Applications, and Challenges*. in *E3S Web of Conferences*. 2023.

[97] Chandrapala, J., C. Oliver, S. Kentish and M. Ashokkumar, *Ultrasonics in food processing - Food quality assurance and food safety.* Trends in Food Science and Technology, 2012. **26**(2): p. 88-98.

[98] Arruda, T.R., P. Vieira, B.M. Silva, T.D. Freitas, A.J.B. do Amaral, E.N.R. Vieira and B.R.D.C. Leite Júnior, *What are the prospects for ultrasound technology in food processing? An update on the main effects on different food matrices, drawbacks, and applications.* Journal of Food Process Engineering, 2021. **44**(11).

[99] Tiwari, A., A.S. Sengar, A.H. Kurup and A. Rawson, *Recent Advances in Ultrasound Processing of Food*, in *Food Processing: Advances in Thermal and Non-Thermal Technologies, Two Volume Set*. 2021. p. 39-65.

[100] Bucciol, F., L. Lamberti and G. Cravotto, *Application of sonication in the food industry*, in *Non-thermal Food Processing Operations: Unit Operations and Processing Equipment in the Food Industry*. 2022. p. 465-495.

[101] Wang, J., B. Sun, Y. Liu and H. Zhang, *Optimisation of ultrasound-assisted enzymatic extraction of arabinoxylan from wheat bran.* Food chemistry, 2014. **150**: p. 482-488.

[102] Wang, J., B. Sun, Y. Cao, Y. Tian and X. Li, *Optimisation of ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from wheat bran.* Food chemistry, 2008. **106**(2): p. 804-810.

[103] Cengiz, M.F., U. Babacan, E. Akinci, S. Tuncer Kesci and A. Kaba, *Extraction of phenolic acids from ancient wheat bran samples by ultrasound application.* Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2021. **96**(1): p. 134-141.

[104] Yan, J.K., L.X. Wu, W.D. Cai, G.S. Xiao, Y. Duan and H. Zhang, *Subcritical water extraction-based methods affect the physicochemical and functional properties of soluble dietary fibers from wheat bran.* Food Chemistry, 2019. **298**.

[105] Xu, Y., W. Zhang, Y. Wang, L. Wang, H. Gao, D. Wang, C. Qian, D. Liu, H. Wu and J. Xie, *Effect of Ultrasonic on Structure and Functional Properties of Wheat Bran Protein.* Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023. **38**(10): p. 53-61.

[106] Habuš, M., D. Novotni, M. Gregov, S. Štifter, N. Čukelj Mustač, B. Voučko and D. Ćurić, *Influence of particle size reduction and high-intensity ultrasound on polyphenol oxidase, phenolics, and technological properties of wheat bran.* Journal of Food Processing and preservation, 2021. **45**(3): p. e15204.

[107] Hromádková, Z., Z. Košťálová and A. Ebringerová, *Comparison of conventional and ultrasound-assisted extraction of phenolics-rich heteroxylans from wheat bran.* Ultrasonics Sonochemistry, 2008. **15**(6): p. 1062-1068.

[108] Habuš, M., D. Novotni, M. Gregov, N.Č. Mustač, B. Voučko and D. Ćurić, *High-intensity ultrasound treatment for prolongation of wheat bran oxidative stability.* LWT, 2021. **151**: p. 112110.

[109] Pasqualone, A., L.N. Delvecchio, G. Gambacorta, B. Laddomada, V. Urso, A. Mazzaglia, P. Ruisi and G. Di Miceli, *Effect of supplementation with wheat bran aqueous extracts obtained by ultrasound-assisted technologies on the sensory properties and the antioxidant activity of dry pasta.* Natural Product Communications, 2015. **10**(10): p. 1739-1742.

[110] Özkaya, H. and B. Kahveci, *Analyses methods of cereals and cereal products.* Association of Food Technology, Ankara, Turkey, 1990.

[111] Committee, A.A.o.C.C.A.M., *Approved methods of the American association of cereal chemists*. Vol. 1. 2000: American Association of Cereal Chemists.

[112] Science, I.A.f.C. and Technology, *Determination of Sedimentation Value (ac. to Zeleny) as an Approximate Measure of Baking Quality*. 1994, International Association for Cereal Science and Technology Vienna, Austria.

[113] Jacobs, P.J., S. Hemdane, E. Dornez, J.A. Delcour and C.M. Courtin, *Study of hydration properties of wheat bran as a function of particle size.* Food Chemistry, 2015. **179**: p. 296-304.

[114] Shamanin, V., Z. Tekin-Cakmak, E. Gordeeva, S. Karasu, I. Pototskaya, A. Chursin, V. Pozherukova, G. Ozulku, A. Morgounov and O. Sagdic, *Antioxidant capacity and profiles of phenolic acids in various genotypes of purple wheat. Foods 11 (16): 2515*. 2022.

[115] Miao, Y., F. Jing, J. Ma, Y. Liu, P. Zhang, T. Chen, Z. Che and D. Yang, *Major Genomic Regions for Wheat Grain Weight as Revealed by QTL Linkage Mapping and Meta-Analysis.* Frontiers in Plant Science, 2022. **13**.

[116] Duan, X., H. Yu, W. Ma, J. Sun, Y. Zhao, R. Yang, T. Ning, Q. Li, Q. Liu and T. Guo, *A major and stable QTL controlling wheat thousand grain weight: identification, characterization, and CAPS marker development.* Molecular Breeding, 2020. **40**: p. 1-12.

[117] Cristina, D., M. Ciuca, V. Mandea and C.P. Cornea, *Assessment of 25 genes reported to influence thousand grain weight in winter wheat germplasm.* Cereal Research Communications, 2022. **50**(2): p. 237-243.

[118] Öztürk, İ., *Genotype and Environment Effect on Yield and Quality Parameters and Stability in Bread Wheat (Triticum aestivum L.) Cultivars under Rainfed Conditions.* Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 2024. **21**(2): p. 324-334.

[119] Manley, M., M.L. Engelbrecht, P.C. Williams and M. Kidd, *Assessment of variance in the measurement of hectolitre mass of wheat, using equipment from different grain producing and exporting countries.* Biosystems Engineering, 2009. **103**(2): p. 176-186.

[120] Ayalew, H., L. Wondale and A. Teshager, *GGE biplot analysis on the performance of wheat genotype for hectolitre weight and mega environments identification in north western Ethiopia.* Australian Journal of Crop Science, 2014. **8**(10): p. 1435-1440.

[121] Faltermaier, A., D. Waters, T. Becker, E. Arendt and M. Gastl, *Common wheat (Triticum aestivum L.) and its use as a brewing cereal - a review.* Journal of the Institute of Brewing, 2014. **120**(1): p. 1-15.

[122] Mallick, S.A., S.K. Mondal and M. Gupta, *Evaluation of promising wheat genotypes for nutritional quality associated to protein fractions and phytic acid levels.* Indian Journal of Agricultural Biochemistry, 2011. **24**(1): p. 23-28.

[123] Tayyar, S. and M.K. Gül, *Evaluation of 12 bread wheat varieties for seed yield and some chemical properties grown in northwestern Turkey.* Asian Journal of Chemistry, 2008. **20**(5): p. 3715-3725.

[124] Aktas, B., *EVALUATION OF YIELD PERFORMANCE AND QUALITY PARAMETERS OF BREAD WHEAT CULTIVARS CULTIVATED IN RAINFED CENTRAL ANATOLIA.* Journal of Animal and Plant Sciences, 2022. **32**(4): p. 1035-1045.

[125] Aktaş, H. and F.S. Baloch, *Allelic variations of glutenin subunits and their association with quality traits in bread wheat genotypes.* Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2017. **41**(2): p. 127-134.

[126] Biesiekierski, J.R., *What is gluten?* Journal of Gastroenterology and Hepatology (Australia), 2017. **32**: p. 78-81.

[127] Barak, S., D. Mudgil and B.S. Khatkar, *Relationship of gliadin and glutenin proteins with dough rheology, flour pasting and bread making performance of wheat varieties.* LWT, 2013. **51**(1): p. 211-217.

[128] Chaudhary, N., P. Dangi and B.S. Khatkar, *Fractionation of unreduced gluten proteins on SEC and their relationship with cookie quality characteristics.* Journal of Food Science and Technology, 2017. **54**(2): p. 342-348.

[129] Elgün, A., Z. Ertugay, H.G. Kotancılar and M. Certel, *TAHIL ÜRÜNLERİNDE ANALİTİK KALİTE KONTROLÜ VE LABORATUAR UYGULAMA KLAVUZU*. 2012.

[130] Hossain, K., C. Ulven, K. Glover, F. Ghavami, S. Simsek, M. Alamri, A. Kumar and M. Mergoum, *Interdependence of cultivar and environment on fiber composition in wheat bran.* Australian journal of crop science, 2013. **7**(4): p. 525.

[131] Navrotskyi, S., G. Guo, P.S. Baenziger, L. Xu and D.J. Rose, *Impact of wheat bran physical properties and chemical composition on whole grain flour mixing and baking properties.* Journal of Cereal Science, 2019. **89**.

[132] Lauková, M., J. Karovicová, Z. Kohajdová and L. Minarovicová, *Thermo-mechanical properties of dough enriched with wheat bran from different wheat variety.* Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences, 2018. **12**(1): p. 202-208.

[133] Hemdane, S., S. Leys, P.J. Jacobs, E. Dornez, J.A. Delcour and C.M. Courtin, *Wheat milling by-products and their impact on bread making.* Food Chemistry, 2015. **187**: p. 280-289.

[134] O'Sullivan, K., *The superior benefits of wheat bran fibre in digestive health.* European Gastroenterology and Hepatology Review, 2012. **8**(2): p. 90-93.

[135] Lin, Y., K. Chen, D. Tu, X. Yu, Z. Dai and Q. Shen, *Characterization of dietary fiber from wheat bran (Triticum aestivum L.) and its effect on the digestion of surimi protein.* Lwt, 2019. **102**: p. 106-112.

[136] Ma, J., M. Yuan, Y. Liu, Y. Duan, D. Zhang, Y. Shao, T. Wang and L. Jiang, *Effects of steam explosion on yield and properties of soluble dietary fiber from wheat bran.* Food Science and Technology Research, 2021. **27**(1): p. 35-42.

[137] Sharanappa, T., R. Chetana and G. Suresh Kumar, *Evaluation of genotypic wheat bran varieties for nutraceutical compounds.* Journal of food science and technology, 2016. **53**: p. 4316-4324.

[138] Seyer, M.È. and P. Gélinas, *Bran characteristics and wheat performance in whole wheat bread.* International journal of food science & technology, 2009. **44**(4): p. 688-693.

[139] Vitaglione, P., A. Napolitano and V. Fogliano, *Cereal dietary fibre: a natural functional ingredient to deliver phenolic compounds into the gut.* Trends in food science & technology, 2008. **19**(9): p. 451-463.

[140] Kumar, V., A.K. Sinha, H.P. Makkar and K. Becker, *Dietary roles of phytate and phytase in human nutrition: A review.* Food chemistry, 2010. **120**(4): p. 945-959.

[141] Bloot, A.P.M., D.L. Kalschne, J.A.S. Amaral, I.J. Baraldi and C. Canan, *A review of phytic acid sources, obtention, and applications.* Food Reviews International, 2023. **39**(1): p. 73-92.

[142] García-Estepa, R.M., E. Guerra-Hernández and B. García-Villanova, *Phytic acid content in milled cereal products and breads.* Food research international, 1999. **32**(3): p. 217-221.

[143] Sun, T., Y. Zhang, S. Wang, B. Guo, Q. Yang and H. Zhao, *Study on spatio-temporal variation mechanism of phytic acid contents of wheat grains.* International Journal of Food Science and Technology, 2022. **57**(10): p. 6435-6444.

[144] Wu, P., T. Zhao and J.C. Tian, *Phytic acid contents of wheat flours from different mill streams.* Agricultural Sciences in China, 2010. **9**(11): p. 1684-1688.

[145] Turksoy, S., B. Ozkaya and S. Akbas, *The effect of wheat variety and flour extraction rate on phytic acid content of bread.* Journal of Food, Agriculture and Environment, 2010. **8**(2): p. 178-181.

[146] Roye, C., M. Henrion, H. Chanvrier, K. De Roeck, Y. De Bondt, I. Liberloo, R. King and C.M. Courtin, *Extrusion-cooking modifies physicochemical and nutrition-related properties of wheat bran.* Foods, 2020. **9**(6): p. 738.

[147] Roye, C., H. Chanvrier, M. Henrion, K. De Roeck, Y. De Bondt, I. Liberloo, R. King and C.M. Courtin, *Single-pass, double-pass and acid twin-screw extrusion-cooking impact physicochemical and nutrition-related properties of wheat bran.* Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020. **66**: p. 102520.

[148] Roye, C., M. Henrion, H. Chanvrier, C. Loret, R. King, L. Lamothe and C.M. Courtin, *Changing Wheat Bran Structural Properties by Extrusion-Cooking on a Pilot and Industrial Scale: A Comparative Study.* Foods, 2021. **10**(2): p. 472.

[149] Rosa-Sibakov, N., M.J. de Oliveira Carvalho, M. Lille and E. Nordlund, *Impact of enzymatic hydrolysis and microfluidization on the techno-functionality of oat bran in suspension and acid milk gel models.* Foods, 2022. **11**(2): p. 228.

[150] Verma, B., P. Hucl and R.N. Chibbar, *Phenolic content and antioxidant properties of bran in 51 wheat cultivars.* Cereal Chemistry, 2008. **85**(4): p. 544-549.

[151] Andreasen, M.F., P.A. Kroon, G. Williamson and M.-T. Garcia-Conesa, *Intestinal release and uptake of phenolic antioxidant diferulic acids.* Free radical biology and medicine, 2001. **31**(3): p. 304-314.

[152] Lin, Y.J., L.Y. Liu, K. Zhong, L.T. Tong, X.R. Zhou and S.M. Zhou, *Comparison of nutritional and phenolic content of wheat bran obtained from different sources.* Modern Food Science and Technology, 2014. **30**(12): p. 194-200.

[153] Narwal, S., V. Thakur, S. Sheoran, S. Dahiya, S. Jaswal and R.K. Gupta, *Antioxidant activity and phenolic content of the Indian wheat varieties.* Journal of plant biochemistry and biotechnology, 2014. **23**: p. 11-17.

[154] Brewer, L.R., J. Kubola, S. Siriamornpun, T.J. Herald and Y.-C. Shi, *Wheat bran particle size influence on phytochemical extractability and antioxidant properties.* Food chemistry, 2014. **152**: p. 483-490.

[155] Lu, Y., J. Lv, L. Yu, A. Fletcher, J. Costa, L. Yu and D. Luthria, *Phytochemical composition and antiproliferative activities of bran fraction of ten Maryland-grown soft winter wheat cultivars: Comparison of different radical scavenging assays.* Journal of Food Composition and Analysis, 2014. **36**(1): p. 51-58.

[156] Zhu, K.-X., C.-X. Lian, X.-N. Guo, W. Peng and H.-M. Zhou, *Antioxidant activities and total phenolic contents of various extracts from defatted wheat germ.* Food Chemistry, 2011. **126**(3): p. 1122-1126.

[157] Li, M., L. Li, B. Sun and S. Ma, *Interaction of wheat bran dietary fiber-gluten protein affects dough product: A critical review.* International journal of biological macromolecules, 2024. **255**: p. 128199.

[158] Dewan, A., N. Chhikara and B.S. Khatkar, *EVALUATING DOUGH AND GLUTEN STRENGTH IN WHEAT VARIETIES: A COMBINED QUALITATIVE AND QUANTITATIVE APPROACH.* Agricultural Research Journal, 2024. **61**(3): p. 420-431.

[159] Gulia, N. and B.S. Khatkar, *Quantitative and Qualitative Assessment of Wheat Gluten Proteins and their Contribution to Instant Noodle Quality.* International Journal of Food Properties, 2015. **18**(8): p. 1648-1663.

[160] Ji-chun, T., H. Rui-bo, D. Zhi-ying and W. Yan-xun, *The Variation and Stability Analysis of Wheat Dough Stability Time.* Agricultural Sciences in China, 2007. **6**(2): p. 143-149.

[161] Cai, L., I. Choi, J.N. Hyun, Y.K. Jeong and B.K. Baik, *Influence of bran particle size on bread-baking quality of whole grain wheat flour and starch retrogradation.* Cereal chemistry, 2014. **91**(1): p. 65-71.

[162] Li, Q., R. Liu, T. Wu, M. Wang and M. Zhang, *Soluble dietary fiber fractions in wheat bran and their interactions with wheat gluten have impacts on dough properties.* Journal of agricultural and food chemistry, 2016. **64**(46): p. 8735-8744.

[163] Tufail, T., F. Saeed, M.U. Arshad, M. Afzaal, R. Rasheed, H. Bader Ul Ain, M. Imran, M. Abrar, M.A. Farooq and M.Z. Shahid, *Exploring the effect of cereal bran cell wall on rheological properties of wheat flour.* Journal of Food Processing and Preservation, 2020. **44**(3): p. e14345.

[164] Rogers, D. and R. Hoseney, *Problems associated with producing whole wheat bread.* Cereal Foods World, 1982. **27**(9): p. 451-454.

[165] Liu, W., M. Brennan, L. Serventi and C. Brennan, *Effect of wheat bran on dough rheology and final quality of Chinese steamed bread.* Cereal Chemistry, 2017. **94**(3): p. 581-587.

[166] Hemdane, S., N.A. Langenaeken, P.J. Jacobs, J. Verspreet, J.A. Delcour and C.M. Courtin, *Study of the role of bran water binding and the steric hindrance by bran in straight dough bread making.* Food Chemistry, 2018. **253**: p. 262-268.

[167] Carr, L.G. and C.C. Tadini, *Influence of yeast and vegetable shortening on physical and textural parameters of frozen part baked French bread.* LWT-Food Science and Technology, 2003. **36**(6): p. 609-614.

[168] Rathnayake, H., S. Navaratne and C. Navaratne, *Porous crumb structure of leavened baked products.* International Journal of Food Science, 2018. **2018**(1): p. 8187318.

[169] Gómez, M., F. Ronda, C.A. Blanco, P.A. Caballero and A. Apesteguía, *Effect of dietary fibre on dough rheology and bread quality*. European Food research and technology, 2003. **216**: p. 51-56.

[170] Xu, X., Y. Xu, N. Wang and Y. Zhou, *Effects of superfine grinding of bran on the properties of dough and qualities of steamed bread.* Journal of Cereal Science, 2018. **81**: p. 76-82.

[171] Santos, E., C. Rosell and C. Collar, *Gelatinization and retrogradation kinetics of high-fiber wheat flour blends: A calorimetric approach.* Cereal Chemistry, 2008. **85**(4): p. 455-463.

[172] Pan, Q., J. Zhou, W. Shen, Z. Wang, H. Cai and X. Jia, *Effect of extruded wheat bran on volatile and physicochemical properties of bread during its shelf life.* Journal of Cereal Science, 2022. **107**: p. 103525.

[173] Kaur, D., V. Singh and R. Agrawal, *EFFECT OF SUPPLEMENTATION OF WHEAT BRAN ON NUTRITIONAL, FUNCTIONAL AND SENSORY QUALITY OF BREAD.* Plant Archives (09725210), 2022. **22**(1).

[174] Cornejo, F. and C.M. Rosell, *Physicochemical properties of long rice grain varieties in relation to gluten free bread quality*. LWT-Food Science and Technology, 2015. **62**(2): p. 1203-1210.

[175] Onyango, C., C. Mutungi, G. Unbehend and M.G. Lindhauer, *Modification of gluten-free sorghum batter and bread using maize, potato, cassava or rice starch.* LWT-Food Science and Technology, 2011. **44**(3): p. 681-686.

[176] Özkaya, B., B. Baumgartner and H. Özkaya, *Effects of concentrated and dephytinized wheat bran and rice bran addition on bread properties.* Journal of texture studies, 2018. **49**(1): p. 84-93.

[177] Ahmed, H. and I. Gamil, *Effects of various brans on quality and volatile compounds of bread.* Foods and Raw materials, 2019. **7**(1): p. 42-50.

[178] Bodart, M., R. de Peñaranda, A. Deneyer and G. Flamant, *Photometry and colorimetry characterisation of materials in daylighting evaluation tools.* Building and Environment, 2008. **43**(12): p. 2046-2058.

[179] Torbica, A., M. Radosavljević, M. Belović, T. Tamilselvan and P. Prabhasankar, *Biotechnological tools for cereal and pseudocereal dietary fibre modification in the bakery products creation–Advantages, disadvantages and challenges.* Trends in Food Science & Technology, 2022.

[180] Cingöz, A., Ö. Akpinar and A. Sayaslan, *FARKLI KEPEK FRAKSİYONLARININ EKMEK KALİTESİNE ETKİSİ.* Gıda, 2022. **47**(2): p. 372-386.

[181] Li, C., W. Wu, M. Tilley, R. Chen and Y. Li, *Unraveling the Influence of Wheat Bran Chemical Composition, Lipolytic Enzyme Activities, and Phenolic Components on the Bread-Making Properties of Reconstituted Whole Wheat Flours.* ACS Food Science & Technology, 2023.

[182] Rosa-Sibakov, N., J. Sibakov, P. Lahtinen and K. Poutanen, *Wet grinding and microfluidization of wheat bran preparations: Improvement of dispersion stability by structural disintegration.* Journal of cereal science, 2015. **64**: p. 1-10.

[183] Navabhatra, A., *Ultrasound techniques: An approach to extracting plant materials for pharmacological studies*, in *Ultrasound Assisted Extraction: Methods and Applications*. 2024. p. 123-151.

[184] Wang, B., G. Li, L. Li, M. Zhang, T. Yang, Z. Xu and T. Qin, *Novel processing strategies to enhance the bioaccessibility and bioavailability of functional components in wheat bran.* Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024. **64**(10): p. 3044-3058.

[185] Fan, L., S. Ma, L. Li and J. Huang, *Fermentation biotechnology applied to wheat bran for the degradation of cell wall fiber and its potential health benefits: A review.* International Journal of Biological Macromolecules, 2024. **275**: p. 133529.

[186] Prückler, M., C. Lorenz, A. Endo, M. Kraler, K. Dürrschmid, K. Hendriks, F.S. da Silva, E. Auterith, W. Kneifel and H. Michlmayr, *Comparison of homo-and heterofermentative lactic acid bacteria for implementation of fermented wheat bran in bread.* Food Microbiology, 2015. **49**: p. 211-219.

[187] Ma, S., Z. Wang, X. Tian, B. Sun, J. Huang, J. Yan, Q. Bao and X. Wang, *Effect of synergistic fermentation of Lactobacillus plantarum and Saccharomyces cerevisiae on thermal properties of wheat bran dietary fiber-wheat starch system.* Food Chemistry, 2022. **373**: p. 131417.

[188] Wang, Z., S. Ma, L. Li and J. Huang, *Synergistic fermentation of Lactobacillus plantarum and Saccharomyces cerevisiae to improve the quality of wheat bran dietary fiber-steamed bread.* Food Chemistry: X, 2022. **16**: p. 100528.

[189] Wang, Z., J. Yan, S. Ma, X. Tian, B. Sun, J. Huang, L. Li, X. Wang and Q. Bao, *Effect of wheat bran dietary fiber on structural properties of wheat starch after synergistic fermentation of Lactobacillus plantarum and Saccharomyces cerevisiae.* International Journal of Biological Macromolecules, 2021. **190**: p. 86-92.

[190] Coda, R., I. Kärki, E. Nordlund, R.-L. Heiniö, K. Poutanen and K. Katina, *Influence of particle size on bioprocess induced changes on technological functionality of wheat bran.* Food microbiology, 2014. **37**: p. 69-77.

[191] Tu, J., J. Zhao, G. Liu, C. Tang, Y. Han, X. Cao, J. Jia, G. Ji and H. Xiao, *Solid state fermentation by Fomitopsis pinicola improves physicochemical and functional properties of wheat bran and the bran-containing products.* Food Chemistry, 2020. **328**: p. 127046.

[192] Lu, X., Y. Jing, Y. Li, N. Zhang and Y. Cao, *Eurotium cristatum produced β-hydroxy acid metabolite of monacolin K and improved bioactive compound contents as well as functional properties in fermented wheat bran.* LWT, 2022. **158**: p. 113088.

[193] Liao, A.-M., J. Zhang, Z.-L. Yang, J.-H. Huang, L. Pan, Y.-C. Hou, X.-X. Li, P.-H. Zhao, Y.-Q. Dong and Z.-Y. Hu, *Structural, physicochemical, and*

functional properties of wheat bran insoluble dietary fiber modified with probiotic fermentation. Frontiers in Nutrition, 2022. **9**: p. 803440.

[194] Du-qin, Z., S. Zhu-jiang and T. Bin, *Effect of Solid-state Fermentation on the Physico-chemical Properties of Wheat Bran.* Science & Technology of Cereals, Oils & Foods, 2024. **32**(1).

[195] Rui, H., L.I. Li, M.A. Sen and L.I. Yanhua, *Fermentation optimization and characterization of wheat bran dietary fiber mixed with microbes in solid state.* Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2024. **45**(1): p. 81-89.

[196] Bashir, S., A. Ahmad, K.S. Abbasi and Z. Akram, *Optimization of ultrasonic-assisted extraction of insoluble dietary fiber from wheat bran and its characterization.* Journal of Food Processing and Preservation, 2022. **46**(4): p. e16419.

[197] Hu, R., M. Zhang, B. Adhikari and Y. Liu, *Effect of homogenization and ultrasonication on the physical properties of insoluble wheat bran fibres.* International Agrophysics, 2015. **29**(4).

[198] Ma, Q., Y. Yu, Z. Zhou, L. Wang and R. Cao, *Effects of different treatments on composition, physicochemical and biological properties of soluble dietary fiber in buckwheat bran.* Food Bioscience, 2023. **53**: p. 102517.

[199] Liu, Q. and C. Ding, *Effect of Saocharomyoes Boulardii Fermentation on Active Ingredients of Wheat Bran.* Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023. **38**(7): p. 41-46.

[200] Servi, S., H. Özkaya and A.S. Colakoglu, *Dephytinization of wheat bran by fermentation with bakers' yeast, incubation with barley malt flour and autoclaving at different pH levels.* Journal of Cereal Science, 2008. **48**(2): p. 471-476.

[201] Majzoobi, M., S. Pashangeh, A. Farahnaky, M.H. Eskandari and J. Jamalian, *Effect of particle size reduction, hydrothermal and fermentation treatments on phytic acid content and some physicochemical properties of wheat bran.* Journal of Food Science and Technology, 2014. **51**(10): p. 2755-2761.

[202] Guo, J., Y.Y. Bian, K.X. Zhu, X.N. Guo, W. Peng and H.M. Zhou, *Reducing phytate content in wheat bran by directly removing the aleurone cell content with teeth roller mill and ultrasonic cleaner.* Journal of Cereal Science, 2015. **64**: p. 133-138.

[203] Mohammadi, F., A. Marti, K. Nayebzadeh, S.M. Hosseini, B. Tajdar-oranj and S. Jazaeri, *Effect of washing, soaking and pH in combination with ultrasound on enzymatic rancidity, phytic acid, heavy metals and coliforms of rice bran.* Food Chemistry, 2021. **334**: p. 127583.

[204] Grgić, T., Z. Pavišić, N. Maltar-Strmečki, B. Voučko, N. Čukelj Mustač, D. Ćurić, A. Le-Bail and D. Novotni, *Ultrasound-assisted Modification of Enzymatic and Antioxidant Activities, Functional and Rheological Properties of Oat and Barley Bran.* Food and Bioprocess Technology, 2023. **16**(11): p. 2416-2429.

[205] Sivakumar, V., G. Swaminathan and P. Rao, *Use of ultrasound in soaking for improved efficiency.* Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists, 2004. **88**(6): p. 249-251.

[206] Raghavendra, S., N.K. Rastogi, K. Raghavarao and R. Tharanathan, *Dietary fiber from coconut residue: effects of different treatments and particle size on the hydration properties.* European Food Research and Technology, 2004. **218**: p. 563-567.

[207] De Bondt, Y., I. Liberloo, C. Roye, E.J. Windhab, L. Lamothe, R. King and C.M. Courtin, *The effect of wet milling and cryogenic milling on the structure and physicochemical properties of wheat bran.* Foods, 2020. **9**(12): p. 1755.

[208] Yadav, S., S. Mishra and R.C. Pradhan, *Ultrasound-assisted hydration of finger millet (Eleusine Coracana) and its effects on starch isolates and antinutrients.* Ultrasonics sonochemistry, 2021. **73**: p. 105542.

[209] Kaur, H. and B.S. Gill, *Effect of high-intensity ultrasound treatment on nutritional, rheological and structural properties of starches obtained from different cereals.* International journal of biological macromolecules, 2019. **126**: p. 367-375.

[210] Zhang, S., X. Jia, L. Xu, Y. Xue, Q. Pan, W. Shen and Z. Wang, *Effect of extrusion and semi-solid enzymatic hydrolysis modifications on the quality of wheat bran and steamed bread containing bran.* Journal of Cereal Science, 2022. **108**.

[211] Li, L., S. Ma, L. Fan, C. Zhang, X. Pu, X. Zheng and X. Wang, *The influence of ultrasonic modification on arabinoxylans properties obtained from wheat bran.* International Journal of Food Science & Technology, 2016. **51**(11): p. 2338-2344.

[212] Zhang, Y., J. Zhou, N. Zhang, L. Zhao, W. Wu, L. Zhang and F. Zhou, *Process Optimization for Production of Ferulic Acid and Pentosans from Wheat Brans by Solid-State Fermentation and Evaluation of Their Antioxidant Activities.* ACS Food Science & Technology, 2022. **2**(7): p. 1114-1122.

[213] Jacobo-Velázquez, D. and L. Cisneros-Zevallos, *Correlations of antioxidant activity against phenolic content revisited: a new approach in data analysis for food and medicinal plants.* Journal of Food Science, 2009. **74**(9): p. R107-R113.

[214] Skroza, D., V. Šimat, L. Vrdoljak, N. Jolić, A. Skelin, M. Čagalj, R. Frleta and I. Generalić Mekinić, *Investigation of Antioxidant Synergisms and Antagonisms among Phenolic Acids in the Model Matrices Using FRAP and ORAC Methods.* Antioxidants, 2022. **11**(9).

[215] Pinelo, M., L. Manzocco, M.J. Nuñez and M.C. Nicoli, *Interaction among Phenols in Food Fortification: Negative Synergism on Antioxidant Capacity.* Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004. **52**(5): p. 1177-1180.

[216] Du, X., H. Wu, Y. Tang, Z. Lei, Y. Chen, C. Chen, F. Lai and T. Min, *Analysis of phenolic compounds contents and antioxidant activities in*

unfermented and fermented wheat bran. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016. **31**(6): p. 17-23.

[217] Ren, X.R., J.W. Qi, N. Liu, R.F. Wang, Y. Wang and X.P. An, *Effect of Microbial Fermentation on Content, Composition and Antioxidant Activity of Water-soluble Polyphenols in Wheat Bran.* Science and Technology of Food Industry, 2020. **41**(3): p. 104-109.

[218] Wang, Z., S. Li, S. Ge and S. Lin, *Review of distribution, extraction methods, and health benefits of bound phenolics in food plants.* Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020. **68**(11): p. 3330-3343.

[219] Hartikainen, K., K. Poutanen and K. Katina, *Influence of bioprocessed wheat bran on the physical and chemical properties of dough and on wheat bread texture.* Cereal Chemistry, 2014. **91**(2): p. 115-123.

[220] Pei, F., Y. Du, L. Sun, W. Li, Y. Fang and Q. Hu, *Effect of Solid-state Fermentation on Antioxidant Properties of Wheat Bran and Sensory Quality of Whole Wheat Bread.* Shipin Kexue/Food Science, 2022. **43**(6): p. 212-220.

[221] Wang, Z., S. Song, J. Liu, X. Bai, G. Ye and J. Liu, *Solid-state fermentation by Aspergillus niger and Lactobacillus plantarum improved the nutritional and physicochemical properties of wheat bran and whole wheat bread.* International Journal of Food Science & Technology, 2024.

[222] Wang, B.B., Z.W. Ai, L.L. Liu and W.X. Chen, *Effect of Haematococcus pluvialis on baking quality of bread.* Food and Machinery, 2020. **36**(1): p. 192-197.

[223] Oliete, B., M. Gómez, V. Pando, E. Fernández-Fernández, P.A. Caballero and F. Ronda, *Effect of nut paste enrichment on physical characteristics and consumer acceptability of bread.* Food Science and Technology International, 2008. **14**(3): p. 259-269.

[224] Ammar, A.F., H. Zhang, A. Siddeeg, M.V.M. Chamba, B.G. Kimani, H. Hassanin, M. Obadi and N. Alhejj, *Effect of the Addition of Alhydwan Seed Flour on the Dough Rheology, Bread Quality, Texture Profile and Microstructure of Wheat Bread.* Journal of Texture Studies, 2016. **47**(6): p. 484-495.

[225] Tong, Q., X. Zhang, F. Wu, J. Tong, P. Zhang and J. Zhang, *Effect of honey powder on dough rheology and bread quality.* Food Research International, 2010. **43**(9): p. 2284-2288.

[226] Zhang, D. and B. Tan, *Effects of different solid-state fermentation ratios of S. cerevisiae and L. plantarum on physico-chemical properties of wheat bran and the quality of whole wheat bread.* Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021. **101**(11): p. 4551-4560.

[227] Vela, A.J., M. Villanueva and F. Ronda, *Physical modification caused by acoustic cavitation improves rice flour bread-making performance.* LWT, 2023. **183**: p. 114950.

[228] Habuš, M., A. Antolić, G. Šišić, B. Voučko, N. Čukelj Mustač, D. Novotni and D. Ćurić. *High-intensity ultrasound treatment for the inactivation of polyphenol oxidase from wheat bran*. in *10th International Congress Flour–*

Bread'19; 12th Croatian Congress of Cereal Technologists Brašno–Kruh'19. 2019.

[229] Mencin, M., N. Markanovič, M. Mikulič Petkovšek, R. Veberič and P. Terpinc, *Bioprocessed wholegrain spelt flour improves the quality and physicochemical characteristics of wheat bread.* Molecules, 2023. **28**(8): p. 3428.

[230] Nor Qhairul Izzreen, M.N., L. Nuobariene, S.K. Rasmussen, N. Arneborg and A.S. Hansen, *Changes in phytate content in whole meal wheat dough and bread fermented with phytase-active yeasts.* Cereal Chemistry, 2017. **94**(6): p. 922-927.

[231] Van Hung, P., D.W. Hatcher and W. Barker, *Phenolic acid composition of sprouted wheats by ultra-performance liquid chromatography (UPLC) and their antioxidant activities.* Food chemistry, 2011. **126**(4): p. 1896-1901.

[232] Niu, M., G.G. Hou, X. Li, L. Wang and Z. Chen, *Inhibitory effects of ultrasound combined with ascorbic acid or glutathione on enzymatic darkening of whole-wheat raw noodles.* LWT-Food Science and Technology, 2014. **59**(2): p. 901-907.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Şık, E., Özülkü, G. (2023). Kökeni bilinen belirli bir çeşit buğdaydan elde edilen kepeğin mikrobiyal biyoproses yoluyla modifikasyonu ve modifiye kepek kullanılarak ekmek üretimi. 6th International Eurasian Conference on Biological and Chemical Sciences (EurasianBioChem 2023), Ankara, Türkiye, oral presentation, p.p. 223.

Makaleler

1. Sik, E., Bekiroglu, H., Icyer, N. C., & Ozulku, G. (2025). Hybrid Modification of Wheat Bran Using Microbial Processing and Ultrasound: Enhancements in Bran Composition and Bread Quality. Foods, 14(2), 167. https://doi.org/10.3390/foods14020167

2. Sik, E., Ozulku, G. (2025). Evaluation of wheat bran from two different cultivars from grain to bread. Latin American Applied Research, (accepted).

Projeler

1. Şık, E. Buğday Kepeğinin Mikrobiyal Biyoproses ile Modifikasyonu ve Modifiye Kepeğin Ekmek Üretiminde Kullanılması. 2022 – 2023, Proje Numarası: 122O874, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK).