



T.C.

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**BUĞDAYLARA OZON GAZI UYGULAMASININ HAMMADDE,
HAMUR VE EKMEĞİN KİMYASAL BİLEŞİMİ, REOLOJİK VE
TEKSTÜREL ÖZELLİKLERİ İLE DUYUSAL KALİTE
PARAMETRELERİ ÜZERİNE OLAN ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Doktora Tezi

Çağla KAYIŞOĞLU

Çorum - 2024

**BUĞDAYLARA OZON GAZI UYGULAMASININ HAMMADDE, HAMUR VE
EKMEĞİN KİMYASAL BİLEŞİMİ, REOLOJİK VE TEKSTÜREL
ÖZELLİKLERİ İLE DUYUSAL KALİTE PARAMETRELERİ ÜZERİNE
OLAN ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Çağla KAYIŞOĞLU

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Gıda Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

Doktora Tezi

TEZ DANIŞMANI

Doç. Dr. Seçil UZEL

Çorum 2024

Çağla KAYIŞOĞLU tarafından hazırlanan “Buğdaylara Ozon Gazı Uygulamasının Hammadde, Hamur ve Ekmeğin Kimyasal Bileşimi, Reolojik ve Tekstürel Özellikleri ile Duyusal Kalite Parametreleri Üzerine Olan Etkilerinin Araştırılması” adlı tez çalışması 26/12/2024 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Gıda Mühendisliği Ana Bilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. M. Sertaç ÖZER

.....

Başkan

Doç. Dr. Seçil UZEL

.....

Danışman

Prof. Dr. Bülent KABAK

.....

Üye

Prof. Dr. Hülya GÜL

.....

Üye

Doç. Dr. Münir ANIL

.....

Üye

Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 06/01/2025 tarih ve 25/51 sayılı kararı ile Çağla KAYIŞOĞLU'nun Ana Bilim Dalında Doktora derecesi alması onanmıştır.

Prof. Dr. Osman ÇUBUK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.

Çağla KAYIŞOĞLU



**BUĞDAYLARA OZON GAZI UYGULAMASININ HAMMADDE, HAMUR VE EKMEĞİN
KİMYASAL BİLEŞİMİ, REOLOJİK VE TEKSTÜREL ÖZELLİKLERİ İLE DUYUSAL KALİTE
PARAMETRELERİ ÜZERİNE OLAN ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Çağla KAYIŞOĞLU

ORCID: 0000-0002-5235-7963

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Doktora Tezi

Aralık 2024

ÖZET

Tahıllar, tarih boyunca insan beslenmesinde önemli bir yere sahip olmuş; buğday ise hem Türkiye'de hem de dünya genelinde temel bir gıda kaynağı olarak öne çıkmıştır. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü'nün (FAO) verilerine göre, dünya çapında her yıl yaklaşık 1,3 milyar ton gıda israf edilmektedir. Tahıllarda hasat sonrası kayıpların yaklaşık %55'e ulaştığı, bu kayıpların %10-40'ının depo zararlılarıyla ilişkilendirildiği bildirilmektedir. Depolama süreçlerinde depo zararlıları ve *Aspergillus*, *Penicillium* ve *Fusarium* gibi küf türlerinin gelişimi sonucu mikotoksin oluşumunun yaygın olarak meydana geldiği vurgulanmaktadır. Tahılların raf ömrünü uzatmak için gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılan permanganat, klordioksit ve flor gibi kimyasal ajanlar, insan sağlığı ve gıda güvenliği açısından risk teşkil eden trihalo bileşikler gibi parçalanma ürünlerinin oluşmasına neden olabilmektedir. Buna karşın, doğal ve sağlıklı gıdalara yönelik artan talep, çevre dostu bir yöntem olarak ozon kullanımını, yani "yeşil teknoloji" uygulamalarını, ön plana çıkarmaktadır. Bu tez kapsamında, farklı protein miktarlarına sahip üç ekmeklik buğday çeşidine (kuvvetli, orta ve zayıf), farklı ozon konsantrasyonlarında (14, 37 ve 65 ppm) ve sürelerde (45, 90 ve 150 dak) ozon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Uygulamanın aflatoksin B₁ (AFB₁) detoksifikasyonu üzerindeki etkileri incelenmiş ve maksimum detoksifikasyonun 65 ppm konsantrasyonda, 150 dak'lık uygulama ile sağlandığı belirlenmiştir. Bu parametrelerle gerçekleştirilen ozonlama işlemi sonrası kontrol ve ozonlanmış buğday örneklerinin bazı fiziksel (tane ağırlığı, hektolitre ağırlığı, renk tayini) ve kimyasal özellikleri (protein, rutubet, kül, toplam fenolik bileşen ve toplam antioksidan aktivite) analiz edilmiştir. Fizikokimyasal özellikler kapsamında zeleny sedimentasyon, yaş gluten miktarı, gluten indeks ve düşme sayısı analizleri yapılmış; hamur

örneklerinin farinograf, ekstansograf ve reometre analizleriyle reolojik özellikleri değerlendirilmiştir. Ayrıca, ekmek analizlerinde ağırlık, hacim, spesifik hacim ve tekstür incelenmiş; un ve ekmek örneklerinin nişasta özellikleri için diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi, protein ve nişasta yapılarındaki oksidatif değişiklikler için taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleme analizi ve ozonlamanın moleküler düzeydeki etkileri için fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) analizi uygulanmıştır. Sonuçlar, ozonlama işleminin buğdayın toplam protein, kül ve kuru madde miktarında önemli bir değişikliğe yol açmadığını göstermiştir. Kuvvetli buğdayda zeleny sedimantasyon değerinin azaldığı, orta buğdayda bu azalmanın daha sınırlı olduğu, zayıf buğdayda ise anlamlı bir değişim olmadığı tespit edilmiştir. Yaş gluten miktarının kuvvetli ve orta buğdayda değişmediği, ancak zayıf buğdayda azaldığı gözlemlenmiştir. Gluten indeks değerleri kuvvetli buğdayda artış gösterirken, zayıf buğdayda azalma meydana gelmiştir. Düşme sayısı tüm buğday çeşitlerinde ozonlama ile artmıştır. Ozonlama işlemi, hamurun reolojik özelliklerini buğday çeşidine bağlı olarak genellikle olumlu yönde etkilemiş; ancak ekmek analizlerinde önemli bir değişikliğe neden olmamıştır. SEM ve FT-IR analizleri, ozonlamanın protein ve nişasta yapılarında belirgin oksidatif değişimlere yol açtığını ortaya koymuştur.

Anahtar Kavramlar: Ekmeklik buğday, Ozon oksidasyonu, AFB₁, Protein, Nişasta

Bilim Kodu: 90812, 90817

**INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF OZONE GAS APPLICATION TO WHEATS ON THE
CHEMICAL COMPOSITION, RHEOLOGICAL AND TEXTURAL PROPERTIES AND SENSORY
QUALITY PARAMETERS OF RAW MATERIAL, DOUGH AND BREAD**

Çağla KAYIŞOĞLU

ORCID: 0000-0002-5235-7963

HITIT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL

Doctor of Philosophy Thesis

December 2024

ABSTRACT

Cereals have been a fundamental part of human nutrition throughout history, with wheat serving as a primary food source both in Turkey and worldwide. According to data from the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), approximately 1.3 billion tons of food is either lost or wasted globally every year. Post-harvest losses in cereals account for about 55%, with 10-40% of these losses attributed to storage pests. During storage, the activity of pests and the growth of molds such as *Aspergillus*, *Penicillium*, and *Fusarium* species frequently lead to mycotoxin contamination. Chemical agents like permanganate, chlorine dioxide, and fluorine are commonly used in the food industry to prolong the shelf life of cereals. However, these substances can produce harmful by-products, such as trihalo compounds, posing risks to human health and food safety. In contrast, increasing demand for natural and healthy food has emphasized the use of ozone, a “green technology,” as an alternative solution. This study evaluated the effects of ozone treatment at different concentrations (14, 37, and 65 ppm) and durations (45, 90, and 150 min.) on three bread wheat varieties with varying protein content (strong, medium, and weak). The impact of ozone on AFB1 detoxification was examined, and the optimal parameters (65 ppm for 150 min.) were identified. Wheat samples treated under these conditions were analyzed for physical (grain weight, hectoliter weight, color) and chemical properties (protein, moisture, ash, total phenolic content, and total antioxidant activity). Physicochemical characteristics, including Zeleny sedimentation, wet gluten content, gluten index, and falling number, were also assessed.

Rheological properties were evaluated using farinograph, extensograph, and rheometer analyses, while bread quality was analyzed in terms of weight, volume, specific volume, and texture. Starch properties were examined through differential scanning calorimetry (DSC) analysis, and oxidative changes in protein and starch structures were assessed with scanning electron microscopy (SEM) imaging and fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). The results indicated that ozone treatment caused no significant changes in total protein, ash, or dry matter content. Zeleny sedimentation values decreased in strong wheat, slightly decreased in medium wheat, and remained unchanged in weak wheat. Wet gluten content was unaffected in strong and medium wheat but decreased in weak wheat. Gluten index increased in strong wheat but decreased in weak wheat. Falling number values increased across all wheat varieties. Ozone generally improved dough rheological properties depending on the wheat variety, while bread analyses showed no significant changes. SEM and FT-IR analyses revealed distinct oxidative modifications in protein and starch structures caused by ozone treatment.

Key Terms: Bread wheat, Ozone oxidation, AFB₁, Protein, Starch

Science Code: 90812, 90817

TEŞEKKÜR

Bu doktora çalışmasının her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, sabırla destekleyen, akademik rehberliği ve özverili yaklaşımıyla yolumu aydınlatan değerli tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Seçil UZEL'e en derin şükranlarımı sunarım.

Tezimin gerçekleştirilmesi sürecinde ve savunma aşamasında değerli görüş ve katkılarıyla çalışmamı geliştiren saygıdeğer tez izleme komite üyeleri Sayın Prof. Dr. Bülent KABAK, Sayın Doç. Dr. Münir ANIL'a ve tez jüri üyeleri Prof. Dr. M. Sertaç ÖMER ve Prof. Dr. Hülya GÜL'e sonsuz teşekkür ederim. Mikotoksin analizlerinin yapılması ve yorumlanmasında tüm imkan ve olanaklarını sunan kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Bülent KABAK'a ayrıca şükranlarımı sunarım. İlgili yapıcı değerlendirmeleriyle çalışmamın bilimsel niteliğini güçlendirdikleri için her birine minnettarım.

Bu çalışmada kullanılan örneklerin temin edilmesinde desteklerini esirgemeyen Ulusoy Un ve Unay Un yönetimine, analiz süreçlerinde yardımlarıyla katkıda bulunan Hatap Un yönetimi (Yüksel – Latif KAVUKÇU) ve çalışanlarına (İlknur TEMİZ ve Sevda ŞAHİN), ayrıca bilimsel analizler için olanak sağlayan ve daima desteğini esirgemeyen Hitit Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (HÜBTUAM) müdürü Sayın Prof. Dr. İrfan KURTBAŞ'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam, üniversite-sanayi işbirliği kapsamında yürütülen bir projenin parçasını oluşturarak bilimsel bilgi birikiminin sanayiye aktarılmasına katkıda bulunmayı hedeflemiştir. Bu çerçevede, projeye katkılarıyla destek veren ve çalışma için ozon jeneratörünü sağlayan ALAPALA Makina firmasına teşekkür ederim.

Bu zorlu süreçte sabır ve sevgiyle her zaman yanımda olan sevgili eşim Adil Nezih KAYIŞOĞLU'na, beni daima yüreklendiren kıymetli annem ve babam Emine – Hasan KÜÇÜKSÖZEN'e, kardeşim Anıl Can KÜÇÜKSÖZEN'e ve sonsuz destekleriyle bana güç veren eşimin kıymetli ailesi Ayşe – Arif Saadettin KAYIŞOĞLU'na gönülden teşekkür ederim.

Son olarak, bu tezi hayatıma anlam katan sevgili oğlum Adil Kerem KAYIŞOĞLU'na ithaf ediyorum. Onun varlığı, bu çalışmayı tamamlamamda bana ilham kaynağı olmuştur.

Doktora tezi çalışmam, burada adı geçen herkesin katkı ve desteğiyle hayata geçirilmiştir.

Hepinize sonsuz teşekkür ve saygılarımla...

Çağla KAYIŞOĞLU

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
TABLolar DİZİNİ.....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
RESİMLER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xviii
GİRİŞ.....	1

1. BÖLÜM

LİTERATÜR ÖZETİ

1.1. Ozon Uygulaması	6
1.2. Ozon Uygulamasının Tahıl ve Ürünleri Üzerine Etkisi	8
1.2.1. Mikotoksinler üzerine etkisi	8
1.2.2. Nişasta üzerine etkisi.....	11
1.2.3. Proteinler üzerine etkisi	17
1.2.4. Renk üzerine etkisi	21
1.2.5. Biyoaktif bileşenler üzerine etkisi.....	22
1.2.6. Tahıl ürünleri üzerine etkisi	24

2. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal	31
2.2. Yöntemler	31
2.2.1. Buğday tane analizleri	32

2.2.2. Tam kırma unu analizleri	32
2.2.3. Rafine un analizleri	33
2.2.4. Ekmek analizleri	37
2.2.5. AFB ₁ analizi	39
2.2.6. İstatistik analizi	42

3. BÖLÜM

SONUÇLAR

3.1. Buğday Tane Analizleri	43
3.2. Tam Kırma Unu Analizleri	44
3.3. Rafine Un Analizleri.....	49
3.4. Tavsız/Tavlı/Ozonlanmış Buğday Unu ve Ekmek Analizleri.....	51
3.4.1. HPLC – AFB ₁ analizi sonuçları.....	51
3.4.2. Zeleny sedimantasyon analizi sonuçları	56
3.4.3. Yaş gluten analizi sonuçları.....	59
3.4.4. Gluten indeks analizi sonuçları.....	62
3.4.5. Düşme sayısı analizi sonuçları	65
3.4.6. Reolojik analizler	69
3.4.7. Toplam fenolik madde tayini sonuçları.....	90
3.4.8. Toplam antioksidan aktivite tayini sonuçları	94
3.4.9. Renk tayini sonuçları	97
3.4.10. Duyusal analiz sonuçları	101
3.4.11. Tekstür analizi sonuçları	103
3.4.12. Ağırlık, hacim ve spesifik hacim	107
3.4.13. SEM analizi sonuçları	110
3.4.14. FT-IR analizi sonuçları.....	113
3.4.15. Reometre analizi sonuçları.....	118
3.4.16. DSC analizi sonuçları.....	119

SONUÇ VE ÖNERİLER.....	122
KAYNAKÇA.....	124



TABLULAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
Tablo 1.1. Ozon gazının bazı özellikleri	7
Tablo 1.2. Ozon uygulamasının mikotoksinler detoksifikasyonu üzerine etkisi ile ilgili mevcut literatür verileri.....	9
Tablo 1.3. Ozon uygulamasının nişasta üzerine etkisi ile ilgili mevcut literatür verileri	13
Tablo 1.4. Ozon uygulamasının tahıl proteinleri üzerine etkisi ile ilgili mevcut literatür verileri	19
Tablo 1.5. Ozon uygulamasının renk değeri üzerine etkisi ile ilgili mevcut literatür verileri.	21
Tablo 1.6. Ozon uygulamasının tahıl ürünleri üzerine etkisi ile ilgili mevcut literatür verileri	25
Tablo 2.1. HPLC analiz cihaz koşulları.....	40
Tablo 3.1. Buğday tanesinin fiziksel analiz sonuçları.....	43
Tablo 3.2. Hektolit ve bin tane ağırlığı ile ilgili mevcut literatür verileri	44
Tablo 3.3. Tam kırma un renk analiz sonuçları	45
Tablo 3.4. Tam kırma un kimyasal analiz sonuçları	45
Tablo 3.5. Kimyasal analizlerle ilgili mevcut literatür verileri	49
Tablo 3.6. Buğday çeşidi ve yöntem (ozonsuz/ozonlu) göre un parametrelerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar.....	49
Tablo 3.7. Buğday çeşidi ve yöntem göre zeleni sedimantasyon (mL) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar karşılaştırılması	57
Tablo 3.8. Buğday çeşidi ve yöntem göre yaş gluten (%) değerine tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar iki yönlü varyans analizi	59
Tablo 3.9. Buğday çeşidi ve yöntem göre gluten indeks (%) değerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar.....	62
Tablo 3.10. Buğday çeşidi ve yöntem göre düşme sayısı (sn) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar.....	65
Tablo 3.11. Buğdayın gluten özellikleri üzerine ile ilgili mevcut literatür verileri.....	68

Tablo	Sayfa
Tablo 3.12. Buğday çeşidi ve yöntemle göre gelişme süresi (dak) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar.....	69
Tablo 3.13. Buğday çeşidi ve yöntemle göre su absorpsiyonu (%) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar.....	71
Tablo 3.14. Buğday çeşidi ve yöntemle göre stabilite (dak) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar.....	74
Tablo 3.15. Buğday çeşidi ve yöntemle göre yumuşama derecesi (BU) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar.....	76
Tablo 3.16. Hamurun reolojik özellikleri ile ilgili literatür verileri	78
Tablo 3.17. Buğday çeşidi ve yöntemle göre R_m (BU) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar.....	80
Tablo 3.18. Buğday çeşidi ve yöntemle göre R_5 (BU) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar.....	82
Tablo 3.19. Buğday çeşidi ve yöntemle göre uzayabilirlik (mm) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar.....	84
Tablo 3.20. Buğday çeşidi ve yöntemle göre enerji (cm ²) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar.....	86
Tablo 3.21. Buğday çeşidi ve yöntemle göre oran (BU) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar.....	87
Tablo 3.22. Buğday çeşidi ve yöntemle göre oran _{max} (BU) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar.....	89
Tablo 3.23. Buğday çeşidi ve yöntemle göre un toplam fenolik madde miktarına (mg GAE/100g) ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar.....	91
Tablo 3.24. Buğday çeşidi ve yöntemle göre ekmek toplam fenolik madde miktarına (mg GAE/100g) ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar	93
Tablo 3.25. Buğday çeşidi ve yöntemle göre un toplam antioksidan aktivitesine (TE mg/100g) ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar	94
Tablo 3.26. Buğday çeşidi ve yöntemle göre ekmek toplam antioksidan aktivitesine (TE mg/100g) ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar.....	95
Tablo 3.27. Buğday çeşidi ve yöntemle göre L değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar	97

Tablo	Sayfa
Tablo 3.28. Buğday çeşidi ve yöntemine göre a değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar	97
Tablo 3.29. Buğday çeşidi ve yöntemine göre b değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar	98
Tablo 3.30. Ekmek ve yöntemine göre tekstür değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar	103
Tablo 3.31. Buğday çeşidi ve yöntemine göre ekmek analizine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar	107



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Buğday tanesinin yapısal özellikleri	5
Şekil 2.1. Buğdaylara uygulanan yöntem ve analizler.....	32
Şekil 2.2. Ekmek yapım akım şeması.....	37
Şekil 2.3. AFB ₁ analiz yöntemi akım şeması.....	39
Şekil 3.1. AFB ₁ standartlarına ait kalibrasyon eğrisi.....	51
Şekil 3.2. HPLC' ye enjekte edilen AFB ₁ standart çözeltilerine ait (sırasıyla 0,5, 1,5,10,20 ppb) kromatogramlar	52
Şekil 3.3. Buğdaylara ait HPLC analiz kromatogram sonuçları (sırasıyla Rus Buğdayı 1, Rus Buğdayı 2 ve Bezostaya)	53
Şekil 3.4. Hammadde buğdaylara AFB ₁ (ppb) yükleme sonucu.....	54
Şekil 3.5. Buğday tanesinde ozon oksidasyonu sonucu %AFB ₁ indirgenme oranı	55
Şekil 3.6. Tam kırma unda ozon oksidasyonu sonucu %AFB ₁ indirgenme oranı.....	55
Şekil 3.7. Buğday çeşidi ve yönteme göre zeleny sedimantasyon (mL) değerleri.....	57
Şekil 3.8. Buğday çeşidi ve yönteme göre yaş gluten (%) değerleri.....	59
Şekil 3.9. Zeleny sedimantasyon ve yaş gluten miktarı korelasyon grafiği.....	62
Şekil 3.10. Buğday x Yöntem Gluten indeks (%) değerinin ortanca değerleri.....	63
Şekil 3.11. Buğday çeşidi ve yönteme göre düşme sayısı (sn) interaksiyon grafiği	66
Şekil 3.12. Buğday çeşidi ve yönteme göre gelişme süresi interaksiyon grafiği.....	70
Şekil 3.13. Buğday çeşidi ve yönteme göre su absorpsiyonu interaksiyon grafiği	72
Şekil 3.14. Buğday çeşidi ve yönteme göre stabilite interaksiyon grafiği.....	74
Şekil 3.15. Buğday çeşidi ve yönteme göre yumuşama derecesi interaksiyon grafiği.....	77
Şekil 3.16. Buğday çeşidi ve yönteme göre R _m interaksiyon grafiği	80
Şekil 3.17. Buğday çeşidi ve yönteme göre R ₅ interaksiyon grafiği.....	82
Şekil 3.18. Buğday çeşidi ve yönteme göre uzayabilirlik interaksiyon grafiği	84
Şekil 3.19. Buğday çeşidi ve yönteme göre enerji interaksiyon grafiği	86

Şekil	Sayfa
Şekil 3.20. Buğday çeşidi ve yönteme göre oran interaksiyon grafiği.....	88
Şekil 3.21. Buğday çeşidi ve yönteme göre oran $_{max}$ interaksiyon grafiği.....	89
Şekil 3.22. Buğday çeşidi ve yönteme göre un toplam fenolik madde miktarı interaksiyon grafiği.....	91
Şekil 3.23. Buğday çeşidi ve yönteme göre ekmek toplam fenolik madde miktarı interaksiyon grafiği.....	93
Şekil 3.24. Buğday çeşidi ve yönteme göre un toplam antioksidan aktivite interaksiyon grafiği.....	94
Şekil 3.25. Buğday çeşidi ve yönteme göre ekmek toplam antioksidan aktivite interaksiyon grafiği.....	96
Şekil 3.26. Buğday çeşidi ve yönteme göre L ortalama değerleri.....	97
Şekil 3.27. Buğday çeşidi ve yönteme göre a ortanca değerleri	98
Şekil 3.28. Buğday çeşidi ve yönteme göre b ortanca değerleri	98
Şekil 3.29. Ekmek örneklerine ait duyusal analiz sonuçları.....	102
şekil 3.30. buğday çeşidi ve yönteme göre ağırlık interaksiyon grafiği	108
şekil 3.31. buğday çeşidi ve yönteme göre spesifik hacim interaksiyon grafiği.....	108
Şekil 3.32. Buğday çeşidi ve yönteme göre hacim ortanca değerleri	109
Şekil 3.33. Rus buğdayı 1 çeşidine ait un ve ekmek örneklerinin FT-IR verileri.....	114
Şekil 3.34. Rus buğdayı 2 çeşidine ait un ve ekmek örneklerinin FT-IR verileri.....	115
Şekil 3.35. Bezostaya çeşidine ait un ve ekmek örneklerinin FT-IR verileri	116
Şekil 3.36. Ekmek hamuru reometre analizi.....	118
Şekil 3.37. Kontrol ve ozon uygulanmış buğday unu DSC grafiği.....	119

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Ozon Jeneratörü.....	42
Resim 3.1. Ekmek örneklerine ait görseller	102
Resim 3.2. Rus buğdayı 1 çeşidinin kontrol ve ozonlanmış un ve ekmek örneklerine ait SEM görüntüleri ((a) kontrol un, (b) ozonlanmış un, (c) kontrol ekmek, (d) ozonlanmış ekmek).....	111
Resim 3.3. Rus buğdayı 2 çeşidinin kontrol ve ozonlanmış un ve ekmek örneklerine ait SEM görüntüleri ((a) kontrol un, (b) ozonlanmış un, (c) kontrol ekmek, (d) ozonlanmış ekmek).....	112
Resim 3.4. Bezostaya çeşidinin kontrol ve ozonlanmış un ve ekmek örneklerine ait SEM görüntüleri ((a) kontrol un, (b) ozonlanmış un, (c) kontrol ekmek, (d) ozonlanmış ekmek).....	112

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

%	Yüzde
<	Küçük
>	Büyük
a*	Kırmızılık
Atm	Atmosfer
b*	Sarılık
C	Karbon
cm ²	Santimetre kare
dak	Dakika
G'	Elastik modül
g	Gram
G''	Viskos modül
kDa	Kilodalton
L	Litre
L*	Parlaklık
m ³	metreküp
nm	nanometre
O	Oksijen
O ₃	Ozon
ppb	µg/L
ppm	mg/L
sa	Saat
sn	Saniye
α	Alfa

γ	Gama
μm	Mikrometre
ω	Omega

Kisaltmalar

AACC	Approved Methods of American Association of Cereal Chemists
AFB ₁	Aflatoksin B ₁
AFB ₂	Aflatoksin B ₂
AFG ₁	Aflatoksin G ₁
AFG ₂	Aflatoksin G ₂
AOAC	Association of Official Analytical Chemists
BD	Breaking Viscosity
BU	Brabender Unit
DON	Deoksinivalenol
DPPH	1,1-Difenil-2-pikrilhidrazil
FDA	Food and Drug Administration
FLD	Floresans Dedektör
FT-IR	Fourier Transform İnfrared
FV	Final Viscosity
GA	Gallik Asit
GAE	Gallik Asit Eşdeğeri
GRAS	Generally Recognized as Safe
HMW-GS	High Molecular Weight Glutenin Subunits
HPLC	High Performance Liquid Chromatography
IAC	Immunoaffinity Chromatography
ICC	International Association for Cereal Science and Technology
LMW-GS	LowMolecular Weight Glutenin Subunits

NIV	Nivalenol
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
PBS	Phosphate Buffer Saline
pH	Potential Of Hydrogen
PV	Peak Viscosity
SB	Regression Viscosity
SDS	Sodyum Dodeksil Sülfat
SEM	Scanning Electron Microscope
SH	Sülfhidril bağı
SS	Disülfid bağı
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
TV	Trough Viscosity
UV	Ultraviyole
ZON	Zearalenon

GİRİŞ

Tahıl ve tahıl ürünleri, tarih boyunca insan beslenmesinde önemli bir yer tutmuş olup buğday, hem Türkiye'de hem de dünya genelinde temel bir gıda kaynağı olarak ön plana çıkmaktadır (Anjum vd., 2007; Başlar, 2008; Çetiner, 2020). Tahıllar arasında en geniş ekim alanına sahip olan buğday, temel mineraller, vitaminler, biyoaktif bileşenler (besinsel lif ve fitokimyasallar) ve mikro besinler açısından zengin bir besin kaynağıdır (Akın, 2022; Çetiner, 2020; Okur, 2017). Buğdayın antioksidan özellikleri, içeriğinde bulunan tokoferoller, fenolik bileşikler ve karotenoidler gibi fitokimyasallardan kaynaklanmakta olup bu özellikler, hastalıkların önlenmesi ve kronik rahatsızlıkların geciktirilmesinde koruyucu bir rol oynamaktadır (Akın, 2022; Kayışoğlu, 2017).

Yetiştiriciliğinin kolay olması, geniş adaptasyon yeteneği ve uzun süreli depolama imkânı sunması nedeniyle buğday, tahıl grubu içerisinde en fazla üretim payına sahiptir. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) 2023 verilerine göre, buğday üretimi toplam tahıl üretiminin %51,9'unu oluşturmaktadır. Artan nüfusun ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla, 2023 yılında toplam buğday üretimi bir önceki yıla göre %3,8 oranında artarak 20,5 milyon tona ulaşmıştır (TÜİK, 2024). Bu veriler, buğdayın hem besinsel hem de ekonomik açıdan stratejik bir ürün olduğunu göstermektedir.

Artan dünya nüfusu ve buna bağlı olarak yükselen tüketim talebi, küresel ölçekte önemli bir sorun oluşturmaktadır. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü'nün (FAO) raporlarına göre, dünya genelinde her yıl yaklaşık 1,3 milyar ton gıda israf edilmektedir. Üretilen gıdaların yaklaşık üçte birinin mikrobiyolojik kaynaklı bozulmalar nedeniyle kullanılamaz hale geldiği bilinmektedir. Küresel gıda güvenliği bağlamında, Birleşmiş Milletler Gıda Programı tarafından yürütülen "Sıfır Açlık Mücadelesi-2030" hedefleri kapsamında, gıda kayıplarının azaltılması ve açlığın sona erdirilmesi temel hedefler arasında yer almaktadır (Zhu vd., 2022).

Tahıl ve tahıl ürünlerinde meydana gelen kayıplar ise özellikle dikkat çekicidir. Tahıllarda hasat sonrası kayıpların yaklaşık %55 oranında olduğu, bu kayıpların %10-40'luk kısmının depo zararlılarından kaynaklandığı belirtilmektedir. Tahıllar, hasat öncesi ve sonrasında uygun olmayan koşullara maruz kaldıklarında çeşitli kontaminasyon riskleriyle karşılaşabilmektedir. Depolama sırasında, depo zararlıları (*Tribolium castaneum*, *Rhyzopertha dominica*, *Oryzaephilus surinamensis*, *Sitophilus oryzae* ve *Ephestia elutella*) ve küf gelişimi (*Aspergillus*, *Penicillium* ve *Fusarium türleri*) nedeniyle mikotoksin oluşumu sıklıkla meydana gelmektedir (Hamad vd., 2023; Ingegno ve Tavella, 2022; Mir vd., 2021). Bu durum, tahıl ürünlerinin güvenliği ve kalitesi üzerinde önemli bir tehdit oluşturarak gıda güvenliğini tehlikeye atmaktadır.

Mikotoksinlerle ilgili en büyük endişelerden biri, bu bileşiklerin kimyasal yapıları ve termostabilite özellikleri nedeniyle tahıl ve tahıl ürünlerinin işleme süreçlerinde (kurutma, presleme, ekstraksiyon, fermantasyon, öğütme, fırınlama ve pişirme) kolaylıkla elimine

edilememesidir (Nunes vd., 2021). Özellikle *Aspergillus*, *Penicillium* ve *Fusarium* türlerine ait küflerin ikincil metabolit ürünleri olan mikotoksinlerle kontamine olmuş tahıl ve tahıl ürünlerinin tüketiminin, insan sağlığı üzerinde akut zehirlenmeden kronik maruziyete kadar geniş bir yelpazede karsinojen, mutajenik ve teratojenik etkilere yol açabileceği bilinmektedir (Afsah-Hejri vd., 2020; Nada vd., 2022).

Tahılların raf ömrünü uzatmak amacıyla gıda sanayisinde yaygın olarak kullanılan kimyasal ajanlar arasında permanganat, klordioksit ve flor yer almaktadır (Gedikli ve Okan, 2015). Ancak, bu kimyasal ajanların kullanımı, insan sağlığı ve gıda güvenliği açısından risk teşkil eden trihalo bileşikler gibi parçalanma ürünlerinin oluşmasına neden olabilmektedir. Bununla birlikte, doğal ve sağlıklı gıdaya erişim talebinin artması, "yeşil teknoloji" olarak adlandırılan ozon kullanımını alternatif bir yöntem haline getirmiştir (Ashogbon, 2021; Kaur vd., 2022; Muştı, 2020; Savaş vd., 2014).

Ozonun güçlü oksidatif özellikleri, gıda işleme ve depolama süreçlerinde önemli bir avantaj sağlamaktadır. Klora kıyasla yaklaşık %52 daha güçlü oksidatif etkiye sahip olan ozon, yüksek bakterisidal ve virüsidal etkisiyle öne çıkmaktadır. Aynı zamanda çevre dostu olması, ozonun hem gıda güvenliğini artırmada hem de insan sağlığını korumada önemli bir araç olduğunu ortaya koymaktadır (Yıldız ve Yangılar, 2014).

Ozon oksidasyonu bakteriler ve küfler üzerinde termal olmayan inhibitör etkiler göstererek hücre zarının geçirgenliğini artırmakta ve hücre hasara yol açarak inhibasyonu sağlamaktadır. Bu süreç, tahılların depolama ömrünü ve kalitesini (protein, nişasta, fenolik bileşikler ve renk gibi özellikler) artırıcı bir etki göstermektedir (El, 2023; Gozé vd., 2017; Li vd., 2013; Muştı, 2020; Savaş vd., 2014; Zhu, 2018). Bununla birlikte ozonun aflatoksinler başta olmak üzere bazı mikotoksinleri yıkama uğrattığı belirtilmektedir {Citation} Özellikle tahıllarda oluşan ikincil metabolit ürünlerinden olan *aflatoksin B₁ (AFB₁)*, *aflatoksin B₂ (AFB₂)*, *aflatoksin G₁ (AFG₁)* ve *aflatoksin G₂ (AFG₂)*'nin ozonla oksidasyonu sonucu detoksifikasyon oranının, mikotoksinin yapısına bağlı olarak değişiklik gösterdiği ifade edilmektedir. Toksik etkisi yüksek olan *AFB₁*'in ozon uygulaması ile detoksifikasyonunun diğer tiplere oranla daha yüksek oranda gerçekleştiği belirtilmektedir (Afsah-Hejri vd., 2020; Mir vd., 2021; Pandiselvam vd., 2022).

Ozon oksidasyonunun *AFB₁* üzerindeki etkisi, furan halkasındaki hipertoksik bölgenin indirgenmesi ve C8-C9 çift bağının kırılarak yeniden düzenlenmesi mekanizması ile açıklanmaktadır (Afsah-Hejri vd., 2020; Chandravarman vd., 2022; Mir vd., 2021). Ozon molekülü, mikotoksinlerin yapısında bulunan fonksiyonel gruplarla etkileşime girerek moleküler yapıda değişikliklere neden olabilir. Bu değişim sonucunda, daha düşük moleküler ağırlıklı, daha az çift bağ içeren ve toksik etkisi daha az olan organik asitler ve karbonil bileşikler gibi yeni maddeler oluşabilmektedir (Chandravarman vd., 2022).

Ozonlama işleminin mikotoksinlerin detoksifikasyonu üzerindeki etkisi, uygulanan ozon konsantrasyonu, işlem sıcaklığı, uygulama süresi, ozon akış hızı, tahıl tanesi nem oranı, tahıl tanesi formu ve yüzey pürüzlülüğü gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak farklılık göstermektedir (Afsah-Hejri vd., 2020; Brodowska vd., 2018; Pandiselvam vd., 2022; Savaş vd., 2014).

Bu tez çalışması, farklı protein miktar ve kalitesine sahip üç farklı ekmeklik buğday çeşidine uygulanacak ozon işlemi ile mikotoksin detoksifikasyonu ve bu işlem sonrası oluşabilecek kimyasal ve fizikokimyasal değişimlerin incelenmesini kapsamaktadır. Çalışmanın ilk aşamasında, belirlenen üç farklı ozon konsantrasyonu (14, 37 ve 65 ppm) ve üç farklı uygulama süresi (45, 90 ve 135 dakika) kullanılarak maksimum detoksifikasyon oranına ulaşmayı sağlayacak en uygun parametrelerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Elde edilen optimum ozonlama koşullarının belirlenmesinin ardından, bu parametreler tüm buğday örneklerine uygulanarak buğday, hamur ve ekmek numunelerinin kimyasal, fizikokimyasal, reolojik, tekstürel ve duyusal özelliklerindeki değişimlerin detaylı olarak analiz edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma, ozon uygulamasının gıda güvenliği ve kalite üzerindeki etkilerini değerlendirmekle birlikte, ekmeklik buğday ve buğday ürünlerinin fonksiyonel ve duyusal özelliklerini iyileştirmeye yönelik bilimsel bir katkı sağlamayı hedeflemektedir.

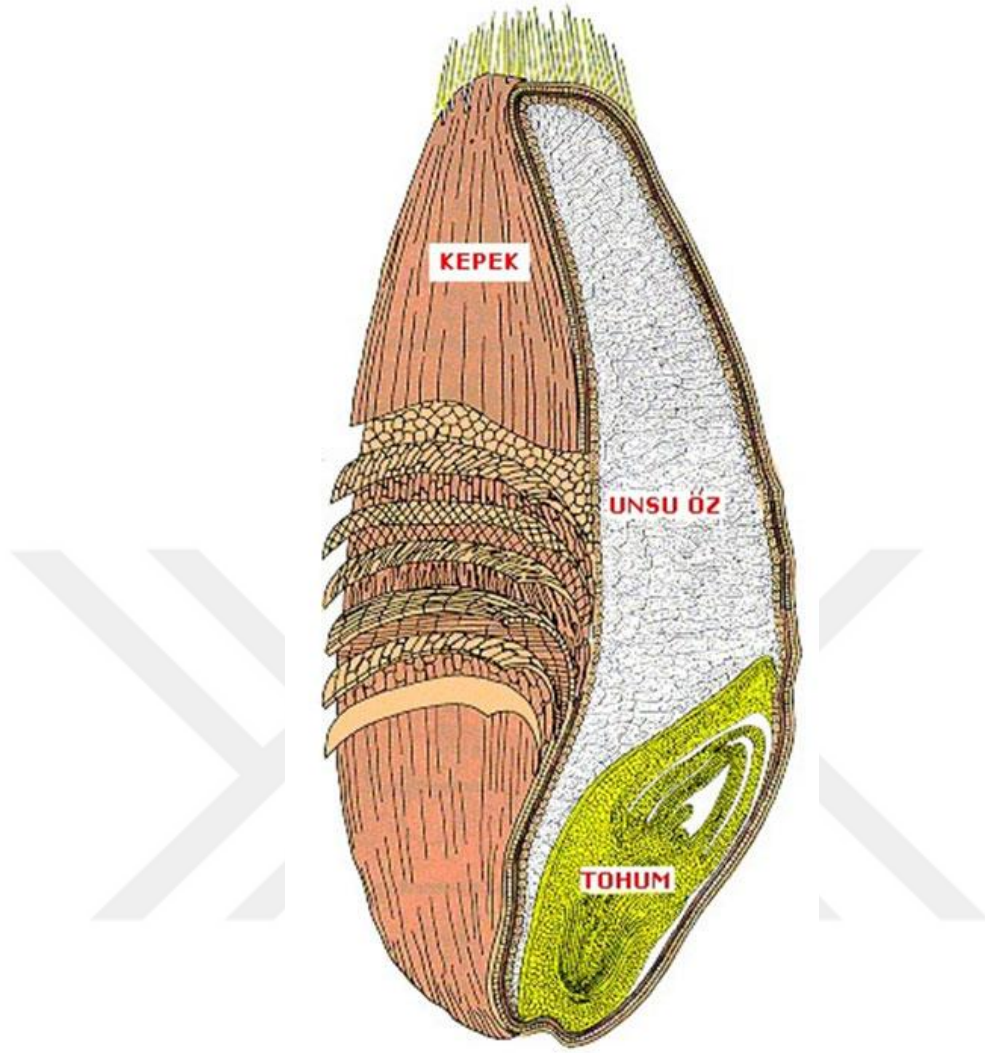
1. BÖLÜM

LİTERATÜR ÖZETİ

Buğday (*Triticum*), dünya genelinde ve ülkemizde en önemli tahıl ürünlerinden biri olup, Poaceae (Graminea) familyasının Triticae kabilesine aittir (Çıbık, 2017; Diekmann, 2009; Ma vd., 2020; Mızrak, 2021). Yaklaşık 10.000 yıllık bir geçmişe sahip olan buğdayın, ilk olarak ülkemizin Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde bulunan ve "Bereketli Hilal" olarak adlandırılan bölgede ortaya çıktığı ve buradan dünyaya yayıldığı bilinmektedir (Yorulmaz, 2023). Kolay yetiştirilebilmesi, geniş adaptasyon kapasitesi, nem içeriğine bağlı olarak ekonomik ve kolay bir şekilde depolanıp taşınabilmesi, aynı zamanda enerji, besinsel lif bakımından zengin bir kaynak olması, buğdayı ülkemizde ve dünyada en çok tüketilen bitkisel ürünlerden biri haline getirmiştir (Anjum vd., 2007; Mızrak, 2021; Zhang vd., 2021). Buğday tüketimi, genellikle ekmek, erişte, spagetti, pizza, kek, donut ve makarna gibi ürünler aracılığıyla gerçekleşmekte olup, ülkemizde tüketim alışkanlıkları arasında ekmek ilk sırada yer almaktadır (Anjum vd., 2007; Ma vd., 2020). Üretimde ise ekonomik ve ticari değeri yüksek olan, 42 kromozoma sahip ekmeklik buğday (*Triticum aestivum L.*) öne çıkmakta ve buğday üretiminin %82' sini oluşturmaktadır (Gür, 2022; Yorulmaz, 2023).

Buğday, çeşitli özelliklere göre farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Botanik yapısına göre üç ana türe ayrılmaktadır: makarnalık (*Triticum durum*), bisküvilik (*Triticum compactum*) ve ekmeklik (*Triticum aestivum*). Kromozom sayılarına göre tetraploid (makarnalık), heksaploid (ekmeklik) ve diploid (kaplıca) olarak sınıflandırılırken, tane sertliğine göre yumuşak, orta vve sert taneli; tane rengine göre ikırmızı, beyaz ya da amber renkli olarak gruplandırılabilir. Ayrıca ekim dönemine bağlı olarak yazlık ve kışlık buğday türleri olarak da sınıflandırılmaktadır (Bozkurt, 2023; Gür, 2022; Mühendisli ve Ertugay, 2008; Okur, 2017).

Buğday tanesi yapısal olarak incelendiğinde, temel olarak üç ana bölümden oluştuğu görülmektedir: %13-16 kabuk, %2,5-3,5 embriyo ve %83-85 endosperm (Akın, 2022; Çıbık, 2017; Mızrak, 2021). Tanenin yapısal özellikleri Şekil 1'de detaylı olarak gösterilmiştir. Ortalama 8 mm uzunluğa ve 30-40 mg ağırlığa sahip olan tanenin sırt kısmı yuvarlak bir yapıya sahipken, karın kısmında boylu boyunca uzanan bir karın çukuru bulunmaktadır. Tanenin %5'ini oluşturan perikarp kısmı, %2 kül, %6 protein, %0.5 yağ ve %20 selüloz içerirken geri kalan kısmı nişasta olmayan polisakkaritlerden meydana gelmektedir. Perikarp, yani meyve kabuğu, içten dışa doğru epidermis, hipodermis ve endokarp olmak üzere üç tabakadan oluşmaktadır.



Şekil 1.1. Buğday tanesinin yapısal özellikleri

Buğday tanesinin en büyük kısmını oluşturan endosperm, alöron tabakası ve nişastalı endospermden meydana gelmekte olup, un üretiminde kullanılan bölümdür (Çıbık, 2017). Nişastalı endosperm, depolama görevi üstlenmekte olup, iki farklı nişasta granülü tipi barındırmaktadır: 40 µm çapındaki büyük granüller ve 2-8 µm çapındaki küçük, küresel granüller. Selüloz bulunmayan bu bölümün hücre duvarları ise arabinoksilanlar, hemiselülozlar ve az miktarda β-glukan içermektedir (Akın, 2022).

Buğday tanesi kimyasal olarak incelendiğinde, temel bileşenler olarak nişasta ve protein (%70-75 nişasta, %13-14 protein) ve daha az miktarda lipid, mineral, vitamin ile selülozik maddeler gibi minör bileşenlerden oluştuğu görülmektedir (Çeliker, 2019; Ma vd., 2020). Makro bileşenlerden biri olan proteinlerin %80-85'ini oluşturan gluten proteini, işlevsel açıdan

monomerik gliadinler ve polimerik gluteninler olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır (Ma vd., 2020; Zhao vd., 2020).

Gliadin fraksiyonu, 30-80 kDa arasında değişen monomerik proteinlerden oluşan heterojen bir yapıya sahiptir ve üç alt tipe ayrılır: α -, γ - ve ω -gliadinler. α - ve γ -gliadinler, sülfür bakımından zengin olup genellikle molekül içi disülfid (SS) bağları veya serbest sülfhidril (-SH) grupları formunda bulunurlar. Bu gliadin tiplerinde sırasıyla altı ve sekiz sistein bulunurken, ω -gliadin sistein içermektedir (Ma vd., 2020). α - ve γ -gliadinler, hamurun viskoelastik özelliğinin viskozitesinden sorumlu olan ana proteinlerdir. Bu bağların oluşumu için alkali ve oksidatif reaktanlar (potasyum bromat, potasyum iyodat, klordioksit vb.) gerekmektedir (Zhao vd., 2020).

Glutenin fraksiyonu ise molekül ağırlığına göre yüksek molekül ağırlıklı gluteninler (HMW-GS, 70.000-90.000 kDa) ve düşük molekül ağırlıklı gluteninler (LMW-GS, 30.000-45.000 kDa) olmak üzere iki grupta sınıflandırılır. HMW-GS, glutenin elastikiyeti ve işlevselliği ile doğrudan ilişkilidir ve glutenin performansını belirlemede kritik bir role sahiptir (Ma vd., 2020; Zhao vd., 2020).

Hamurun karıştırılması sırasında gliadinler ve gluteninler, molekül içi ve moleküller arası disülfid bağları, hidrojen bağları ve hidrofobik etkileşimler yoluyla birbirine bağlanarak gluten ağını oluşturur (Wang vd., 2016). Teknolojik olarak, buğday proteini hamurun işleme özelliklerini ve fonksiyonel kapasitesini belirlerken, buğday nişastası ise nihai ürünün görünümünü ve ağızda bıraktığı his açısından temel rol oynamaktadır (Çeliker, 2019; Ma vd., 2020).

1.1. Ozon Uygulaması

Ozon Yunancada 'ozein' sözcüğünden türetilmiş olup oksijenin triatomik formudur (Afsah-Hejri vd., 2020). 1839 yılında Schobein tarafından keşfedilen ozon, 1997 yılında Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) tarafından GRAS (Genel Olarak Güvenli Kabul Edilen) statüsüne alınmış ve 2001 yılında gıda ile temasına onay verilmiştir (Desvignes vd., 2008; Hu vd., 2020a; Li vd., 2013; Maniglia vd., 2021a; Niveditha vd., 2021; Zhu, 2018). 2001 yılında FDA tarafından gıda ve gıda üretim tesislerinin sterilizasyonunda, işlenmesinde ve depolanmasında patojen bakterileri inhibe etmek amacıyla gazlı ve sulu fazda antimikrobiyal madde olarak kullanılmaya başlanmıştır (Botondi vd., 2021). Atmosferde doğal olarak bulunan ve üç atomlu oksijen olan ozonun (O_3) kaynama noktası $-111,97 \pm 0,3$ ° C ve erime noktası $-192,57 \pm 0,4$ ° C'dir. Gaz haldeyken mavi sıvı formu ise mavi-siyah renktedir (Tablo 1.1). Yarıömürü oda sıcaklığında ortalama 20-30 dak olan ozon 0.2 ppm gibi düşük konsantrasyonlarda bile keskin bir kokuya sahip olup gıdalara uygulanabilen , ticari kullanımı olan tek doğal dezenfektandır (Afsah-Hejri vd., 2020; Arda vd., 2021; Kaur vd., 2022; Muştı, 2020; Savaş vd., 2014; Yıldız ve Yangılar, 2014). Endüstriyel olarak ozon üretimi, korona deşarj teknolojisi ile sağlanmaktadır.

Bu sistem, atmosferik hava ya da saf oksijenden elektron boşalımı yöntemiyle ozon üretmektedir. Elde edilen aktif oksijen (O=), moleküler oksijene (O₂) kıyasla çok daha reaktif bir yapıya sahip olduğu için oksidasyon süreçlerini belirgin şekilde hızlandırır. Ozonun reaksiyonları genellikle organik maddelerdeki karbon-karbon (C=C) çift bağlarının kırılması temeline dayanmaktadır (Elgün ve Bilgiçli, 2019). Ozon molekülünün oluşumu; diatomik oksijen molekülünün başka bir diatomik oksijenle ultraviyole ışınımı, elektrokimyasal işlemler veya elektriksel deşarjlar tarafından ozon molekülü oluşturması prensibine dayanmaktadır (Botondi vd., 2021; Yıldız ve Yangılar, 2014).

Tablo 1.1. Ozon gazının bazı özellikleri

Özellik	Ozon
Formül	O ₃
Koku	Keskin
Renk	Açık mavi
Yoğunluk (g/L)	2,144
Erime noktası	-192,5±0,4°C
Kaynama noktası	-111,9±0,3°C
Kritik basınç	54,6 atm
Kritik sıcaklık	-12,1 °C

Kaynak: (Botondi vd., 2021; Elgün ve Bilgiçli, 2019; Yıldız ve Yangılar, 2014)

Gıda endüstrisinde ozonun kontrollü bir şekilde kullanılabilmesi ve düşük konsantrasyonlarda insan sağlığı için risk taşıması, en önemli avantajlarından biridir (Muştı, 2020; Yıldız ve Yangılar, 2014). Ozon kullanımının diğer avantajları; suda ki kötü koku ve tadın yok edilmesi, kimyasal reaktif kullanım gerektirmemesi, mangan ve demiri ortamdaki yükseltgenme reaksiyonu ile uzaklaştırması, klordan yaklaşık %52 daha güçlü etkiye sahip olması dolayısıyla yüksek bakterisidal ve viridal etkiye sahip olması ve çevre dostu olmasıdır (Brodowska vd., 2018; Muştı, 2020; Yıldız ve Yangılar, 2014). Ancak ozon prosesi yüksek maliyet gerektirmesi ve yüksek dozda ozon uygulamasıyla organik maddelerle reaksiyon sonucunda aldehit, keton gibi bileşiklerin oluşması ve ozonlama sonucu biyo-bozunur organik maddelerin mikroorganizma gelişimine yol açabilmesi, gıdalarda yüzey oksidasyonu sonucunda B₁ vitamini ve askorbik asit miktarının azalmasına ve lipid oksidasyonu sonucunda ransid tat-roma oluşumuna neden olması ozonun dezavantajları arasındadır (Kayaşoğlu ve Türksoy, 2023; Yıldız ve Yangılar, 2014).

Ozonun kontrollü bir şekilde kullanılması gerektiği ve düşük dozlarda bile insan sağlığı üzerinde risk oluşturabileceği belirtilmiştir. FDA'ya göre, sürekli solunum için güvenli kabul edilen ozon seviyesi 0,01-0,05 ppm arasında değişirken insan tolerans seviyesi ise maksimum 1 ppm olarak belirlenmiştir. İş Güvenliği ve Sağlık İdaresi (OSHA), çalışma alanlarında ozon konsantrasyonunun 8 saatlik süre için 0,1 ppm'i geçmemesi gerektiğini, kısa süreli

uygulamalarda (1,5 dakika) ise güvenli konsantrasyonun 0,3 ppm olarak sınırlandırıldığını ifade etmektedir (Muştı, 2020).

1.2. Ozon Uygulamasının Tahıl ve Ürünleri Üzerine Etkisi

1.2.1. Mikotoksinler üzerine etkisi

Tüketicilerin artan bilinç düzeyi, doğal ve minimal işlem görmüş ürünlere olan talebi artırmış, bu da güvenli gıdaya yönelik ilginin önem kazanmasına katkı sağlamıştır. Bu durum, gıda endüstrisinde kimyasal maddelerden uzak, yenilikçi teknolojilere yönelimi de beraberinde getirmiştir. Gıda güvenliğini sağlamak için yaygın olarak kullanılan klor, izin verilen seviyelerde sınırlı bir etki sunmakta ve uygulandığında insan sağlığına zararlı olabilecek trihalometanlar gibi maddelere dönüşebilmekte, ayrıca gıdada kalıntı bırakabilmektedir. Bu endişeler, çevre dostu, kalıntı bırakmayan ve klora kıyasla 1.5 kat daha güçlü oksitleme gücüne sahip olan ozon uygulamasına olan ilgiyi artırmıştır. Ozon, geniş mikrobiyal etki alanı sayesinde gıda güvenliğinde tercih edilen bir seçenek haline gelmiştir (Afsah-Hejri vd., 2020; Chhem-Kieth vd., 2022; Elgün ve Bilgiçli, 2019; Qasim vd., 2022; Sivaranjani vd., 2021).

Ozon uygulaması, depolanmış tahıllarda bulunan zararlılar (*Tribolium castaneum*, *Rhizopertha dominica*, *Oryzaephilus surinamensis*, *Sitophilus oryzae* ve *Ephestia elutella*), bakteriler (*Bacillus*, *Koliform*, *Micrococcus*, *Flavobacterium*, *Alcaligenes* ve *Serratia*) ve çeşitli küf türleri (*Aspergillus*, *Penicillium* ve *Fusarium*) üzerinde inhibitör etki göstermektedir (Afsah-Hejri vd., 2020; Chakka vd., 2021; Lillo vd., 2022; Mir vd., 2021, 2022; Nickhil vd., 2021; Sivaranjani vd., 2021; Suman, 2021). Bu inhibitör etki, mikroorganizmaların hücre zarındaki lipoprotein ve glikoprotein yapılarındaki C=C çift bağlarının oksidasyonu ile gerçekleşmektedir (Afsah-Hejri vd., 2020; Alegbeleye vd., 2022; Chakka vd., 2021; Lillo vd., 2022; Mir vd., 2021, 2022; Nickhil vd., 2021; Sivaranjani vd., 2021; Suman, 2021; Tiwari vd., 2010). Özellikle tahıllarda bulunan *Aspergillus*, *Penicillium* ve *Fusarium* gibi küflerin ürettiği ikincil metabolit ürünleri olan AFB₁, AFB₂, AFG₁, AFG₂, okratoksin A, zearalenon (ZON), nivalenol (NIV) ve deoksinivalenol (DON) gibi mikotoksinlerin inaktivasyonu için ozon uygulamasının etkinliği, uygulanan ozonun konsantrasyonu, süresi ve hedeflenen mikotoksin türüne bağlı olarak değişkenlik gösterdiği literatürde yapılan çalışmalar doğrultusunda belirlenmiştir (Tablo 1.2).

Tablo 1.2. Ozon uygulamasının mikotoksinler detoksifikasyonu üzerine etkisi ile ilgili mevcut literatür verileri

	Ozon uygulaması	Mikotoksin türü	Mikotoksinlerin azalma oranı (%)	Kaynak
Buğday	Gaz, 60 mg/L, 300 dak	DON AFG ₂ AFB ₁	64,3 75,3 57	(Sivaranjani vd., 2021)
Buğday	Gaz, 60 µmol/mol, 180 dak	AFB ₁ AFB ₂ AFG ₁ AFG ₂ DON	94,6 84,5 80 81 100	(Mir vd., 2021)
Mısır	40-90/L, 5-40 dak 90 mg L 1, 40dak 60 mg/L for 480 dak	AFB ₁	88 88,1 57	(Mir vd., 2021; Sivaranjani vd., 2021)
Buğday	Gaz, 20-40/L, maruz kalma süresi 5-40 dak	AFB ₁	97	(Mir vd., 2021)
Pirinç	Gaz, 5L/dak, 5 sa	AFB ₁ AFB ₂ AFG ₁ AFG ₂ DON OTA ZEA	81 59 62 48 56 88 76	(da Luz vd., 2022)
Buğday	Gaz, 40-60 µmol/mol, 120 dak	AFB ₁ AFB ₂ AFB ₁ AFB ₂	92,9 76,7 94,6 84,5	(Savi vd., 2014)
Buğday	Gaz, 75 mg/L, 30, 60 ve 90 dak	DON	26,4 39,16 53,48	(Wang vd., 2016)
Pirinç	Gaz, 2 mg/L, 10 sn ve 180 sn	ZON (10 sn uygulama) OTA (180 sn uygulama)	100 34	(Chandravarnan vd., 2022)

Yapılan bilimsel araştırmalarda, tahıl tanelerinde oluşan mikotoksinlerin, tahıl miktarı ve kalitesi açısından ciddi kayıplara yol açtığı bildirilmiştir. Tahıl ürünlerinde meydana gelen bu kayıpların, yaklaşık %25-30 oranında olduğu tahmin edilmektedir. Mikotoksin birikimi sonucunda tahıllarda çimlenme kapasitesinin azalması, serbest yağ asitlerinin artışı, nişasta yapısının bozulması ve proteinlerin denatürasyonu gibi fiziksel ve kimyasal değişiklikler gözlemlenmektedir. Bu etkiler, tahılların besin değerini ve işlevselliğini önemli ölçüde azaltmakta, dolayısıyla hem ekonomik kayıplara yol açmakta hem de gıda güvenliği açısından ciddi riskler doğurmaktadır. Bunun yanı sıra, mikotoksinlerin insan sağlığı üzerinde kanserojenik, teratojenik ve immünoşpresif etkilerinin bulunduğu bildirilmektedir. Karsinojen etkiler, hücrelerde DNA hasarına yol açarak kanser gelişimini tetikleyebilirken,

teratojenik etkiler fetüs üzerinde yapısal ve fonksiyonel bozukluklara neden olabilmektedir. İmmünoşpresif etkiler ise bağışıklık sistemini zayıflatarak enfeksiyonlara ve diğer hastalıklara karşı vücut direncini düşürmektedir. Bu toksinlerin özellikle gıda zincirine dahil olduğu durumlarda halk sağlığına yönelik ciddi tehditler oluşturduğu ve bu nedenle uluslararası düzeyde kontrol edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Arda vd., 2021; da Luz vd., 2022b; Hashemi Moosavi vd., 2021; Nada vd., 2022; Sirohi vd., 2021).

Uzun süre depolanan tahıl taneleri (örneğin buğday, pirinç, mısır, arpa, çavdar, yulaf, darı ve sorgum), depolama sürecinde sıcaklık ve bağıl nem gibi çevresel faktörlere bağlı olarak hem miktar hem de kalite açısından kayıplar yaşayabilmektedir. Bu kayıpların önlenmesi için, uygun sıcaklık ve nem koşullarının sağlanması, depolama süreçlerinin düzenli olarak izlenmesi ve gerekli durumlarda fumigasyon işlemlerinin uygulanması kritik önem taşımaktadır (Gavahian vd., 2021). Fumigasyon işlemleri sırasında genellikle alüminyum fosfit, metil bromür ve fosfin gibi pestisitler kullanılmaktadır. Ancak, bu kimyasal maddelerin hem çevre üzerinde kalıcı zararlı etkiler yarattığı hem de insan sağlığı için risk oluşturduğu bilinmektedir. Bu durum, söz konusu sorunların küresel ölçekte dikkate alınmasını ve sürdürülebilir alternatiflerin geliştirilmesini zorunlu hale getirmektedir (Sirohi vd., 2021).

Son yıllarda yapılan bilimsel çalışmalar, kimyasal fumigantların neden olduğu bu olumsuz etkileri azaltmaya yönelik, çevre dostu ve termal olmayan bir teknoloji olan ozon uygulamasını öne çıkarmıştır. Ozon, güçlü oksidatif kapasitesi sayesinde hem toplam mikroorganizma sayısının azaltılmasında hem de mikotoksin düzeylerinin düşürülmesinde etkili bir yöntem olarak görülmektedir (Gavahian vd., 2021; Hashemi Moosavi vd., 2021; Nickhil vd., 2021; Sirohi vd., 2021). Ozonun kullanımına dair yapılan araştırmalar, bu teknolojinin özellikle kimyasal fumigantlara karşı çevre dostu bir alternatif olabileceğini ortaya koymaktadır.

Tahıllar ve tahıl ürünleri üzerindeki ozon oksidasyonunun etkisi, çeşitli faktörlere bağlı olarak farklılık gösterebilir. Bu faktörler arasında mikroorganizma türü, tahılın nem oranı, ozon seviyesi, uygulama süresi ve sıcaklık önemli bir etkiye sahiptir (Hu vd., 2020). Bununla birlikte, tahılların fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde istenmeyen değişikliklerin oluşmaması için bu parametrelerin dikkatlice optimize edilmesi gerekmektedir. Tahıl tanesinin nem içeriği, ozon oksidasyonu üzerinde etkili olan önemli parametrelerden biridir. Tane içindeki nem oranının artışı, reaktif iyon oluşumunu artırarak oksidasyon sürecinin etkisini güçlendirmektedir. Nem içeriğinin mısırdaki AFB₁ bozulması üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışmada, yüksek nem içeriğine sahip mısırların (%20.37), düşük nem içeriğine sahip mısırlara (%13.47) kıyasla bozulma oranının daha düşük olduğu tespit edilmiştir (Sivaranjani vd., 2021). Başka bir çalışmada, düşük nem içeriğine sahip mısırlarda, 90 ppm ozon ile 40 dakika süren ozonlama işlemi sonrasında AFB₁ detoksifikasyon oranının %88 gibi yüksek bir seviyede olduğu rapor edilmiştir (Guo vd., 2021).

Dekontaminasyon süreçlerinde hedeflenen mikotoksin türü, ozon uygulamasının etkinliğini belirlemede kritik bir rol oynamaktadır (Tablo 1.2). Mikotoksinlerin kimyasal yapıları, ozonun

güçlü oksidatif etkilerine verdikleri yanıtlar açısından önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Özellikle, kimyasal yapılarında çift bağ bulundurmayan AFB₂ ve AFG₂ gibi mikotoksinler, bu yapısal özellikleri nedeniyle ozonun oksidatif etkilerine karşı daha dirençli bir özellik sergilemektedir. Bu durum, mikotoksinlerin kimyasal ve yapısal özelliklerinin, ozonlama işleminin etkinliğini optimize etmek için dikkate alınması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, ozon uygulamasının parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi, hedef mikotoksinlerin yapısal özelliklerine uygun bir dekontaminasyon stratejisinin geliştirilmesinde hayati bir öneme sahiptir. Ozon konsantrasyonu, süresi ve gaz akış hızı gibi işlem parametrelerinin, hedeflenen mikotoksinin yapısal özelliklerine uygun şekilde düzenlenmesi, ozonlama uygulamalarının etkinliğini artırmak için temel bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

Bu bulgular, mikotoksin dekontaminasyon süreçlerinin yalnızca ozonun genel etkinliğine değil, aynı zamanda mikotoksinin kendine özgü kimyasal ve yapısal özelliklerine göre tasarlanması gerektiğini vurgulamaktadır. Çift bağ içermeyen mikotoksinlerin dirençli yapısı, daha yüksek ozon konsantrasyonları, uzun temas süreleri veya farklı gaz akış hızlarının uygulanmasını gerektirebilir. Bunun yanı sıra, ozonun uygulandığı çevresel koşulların (sıcaklık, bağıl nem, tahıl yüzeyindeki organik madde varlığı) da işlem verimliliği üzerinde etkili olduğu bilinmektedir ve bu faktörlerin de süreç tasarımına entegre edilmesi gerekmektedir.

1.2.2. Nişasta üzerine etkisi

Buğday tanesinin %75-80'ini oluşturan nişasta, jelatinleşme ve viskozite gibi fonksiyonel özelliklere sahiptir. Nişasta amiloz ve amilopektin olmak üzere iki ana polisakkaritten oluşmaktadır. Amiloz 500-6000 glikoz molekülü düz zincirli yapı içerirken amilopektin molekülü $3 \times 10^5 - 3 \times 10^6$ glikoz ünitesinden dallanmış yapıdan oluşmaktadır (Ojogbo vd., 2020). Nişasta buğdayın ürüne işlenmesiyle nihai ürünün duyu özelliklerinden ve depolanması sırasında jelatinizasyon ve retrogradasyon gibi birtakım reaksiyonlardan sorumludur (Castanha vd., 2017; Ma vd., 2020; Maniglia vd., 2021; Ojogbo vd., 2020; Pandiselvam vd., 2022). Nişasta kolay ulaşılabilir, yenilebilir ve ucuz olmasından dolayı endüstriyel açıdan önem arz etmektedir. Ancak tahıllardan elde edile doğal nişastanın gıda endüstrisinde direkt olarak kullanımını sınırlandıran birtakım faktörler (stabilite, pişirme özellikleri, düşük viskozite, bağlanma özellikleri vb) mevcuttur. Bu nedenle endüstriyel nişastanın fonksiyonel özelliklerini değiştirmek ve geliştirmek adına birtakım modifikasyonlar (fiziksel, kimyasal enzimatik ve genetik) uygulamaktadır. Kimyasal modifikasyon (asetilasyon, oksidasyon, çapraz bağlama, hidroksipropilasyon ve eterifikasyon) gıda endüstrisi tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak kimyasal modifikasyon (sodyum hipoklorit ve hidrojen peroksit) hem insan sağlığı hem de çevre sağlığı için risk teşkil etmektedir. Dolayısıyla çevre dostu modifikasyon teknolojisi günümüzde sürdürülebilirlik açısından önem arz etmektedir (Ashogbon, 2021; Castanha vd., 2017; Kells vd., 2001; Maniglia vd., 2021). Nişasta performansı

için termal olmayan çevre dostu teknoloji olan ozon uygulamasının tarihçesi 1964 yılına dayanmaktadır. Nişastanın ozon oksidasyonu iki aşamadan oluşmaktadır; oksidasyon ve hidroliz. Birinci aşamda -OH gruplarının (C-2,C-3,C-6'daki -OH) karbonil ve karboksil grubuna oksidasyonu, ikinci aşamada ise α -(1→4) glikosidik bağların parçalanması ile nişastanın amorf ve kristal bölgede depolimerizasyonu ve molekül ağırlığının azalmasıdır (Ashogbon, 2021; Chan vd., 2011; Çatal ve İbanoğlu, 2014; Hu vd., 2022). Bu bağlamda, nişastanın ozon oksidasyonu ile modifikasyonunda çevresel etkileri ve gıda güvenliğini gözetilen sürdürülebilir yöntemlerin tercih edilmesi giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Ozon oksidasyonu yoluyla nişasta, teknolojik olarak modifiye edilerek işlevsel ve fiziksel özelliklerinde önemli iyileştirmeler sağlanabilmektedir. Bu süreç, nişastanın düşük viskozite, yüksek stabilite, güçlü şişme kabiliyeti, etkili film oluşturma yeteneği, retrogradasyon eğiliminde azalma ve yapışkanlık gibi özelliklerini geliştirmektedir. Oksidasyon sonucu modifiye edilen nişasta, gıda endüstrisinde stabilizatör, emülgatör ve yağ ikame edici olarak geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu özellikler, özellikle gıda ürünlerinin raf ömrünün uzatılmasında, tekstür iyileştirilmesinde ve fonksiyonel katkı maddesi olarak kullanımında önemli bir avantaj sunmaktadır (Chan vd., 2011; Çatal ve İbanoğlu, 2014; Devu vd., 2022; Lima vd., 2021; Sandhu vd., 2012).

Yapılan araştırmalarda, ozon oksidasyonu sonrasında tahıl nişastasındaki karboksil gruplarının sayısında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu değişim, pH değerinin düşmesine, nişastanın şişme kapasitesinin artmasına ve yapışma özelliklerinde belirgin değişimlere yol açmaktadır. Nişastanın akış davranışına yönelik yapılan incelemelerde, akış davranış indeksinde değişiklikler meydana geldiği ve Non-Newtonyen akış tipinin baskın hale geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca, literatürde ozon oksidasyonunun nişastanın retrogradasyon eğilimini azalttığına dair bulgular rapor edilmiştir (Tablo 1.3). Retrogradasyon eğilimindeki bu azalma, nişastanın gıda ürünlerinde doku stabilitesini artırarak raf ömrünü uzatma potansiyeli açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Bu sonuçlar, ozonlama işleminin nişastanın fonksiyonel özelliklerini geliştirmede etkili bir yöntem olabileceğini göstermektedir (Chan vd., 2011; Chittrakorn vd., 2014; Çatal ve İbanoğlu, 2014; Lima vd., 2021; Pandiselvam vd., 2022).

Tablo 1.3. Ozon uygulamasının nişasta üzerine etkisi ile ilgili mevcut literatür verileri

Nişasta Kaynağı	Ozon Parametreleri	Sonuç	Kaynak
Mısır	Gaz, 1L/dak 15 ve 30 dak	Jel gücü arttı (%10,7).	(Raghunathan vd., 2021; Sivaranjani vd., 2021)
Buğday	Gaz, 3,3 L/dak 0,5, 1, 1,5 ve 2 sa	Düşme sayısı gelişti ve unun beyazlığı arttı.	(Raghunathan vd., 2021; Sivaranjani vd., 2021)
Pirinç	Gaz, 0,06 L/dak 0,5, 1 ve 2 sa	Yapıştırma viskozitesi arttı.	(Raghunathan vd., 2021; Sivaranjani vd., 2021)
Buğday	Gaz, 5 g/sa, 60 dak	Şişme gücü arttı. Tepe ve son viskozite değerleri arttı.	(Raghunathan vd., 2021; Sivaranjani vd., 2021)
Mısır	Gaz, 4,2 mg mol/ L 60 dak	Jelatinleşme sıcaklığı arttı. Jelatinleşme entalpi değeri azaldı. Yapıştırma sıcaklığı arttı. Tepe ve son viskozite değerleri azaldı.	(Raghunathan vd., 2021; Sivaranjani vd., 2021)
Mısır, Sagu ve Tapyiko	Gaz	Tüm nişasta çeşitinin non-newtonyel akış tipi gösterdiği, akış tipinin kayma hızı ile incelme (shear rate thinning) gösterdi (mısır için %8, sago için %17 ve tapyoka için %29).	(Chan vd., 2011)
Karabuğday ve buğday unu	Gaz, 2,4 g/sa, 15 dak	Tepe viskozitesinin %3,26, son viskozite değerinin %3,23 oranında arttı.	(Hu vd., 2020)
Buğday unu (kuvvetli)	Gaz, (5 L/dak; 1, 10, 30 ve 60 dak	Çalışmada tepe viskozitesi (%30), geçiş viskozitesi (%36,09) ve son viskozite değeri (%16,92) uygulama süresinin arttı.	(Li vd, 2012)
Manyok nişastası Mısır nişastası Patates nişastası	Gaz, 46 mg O ₃ /L, 1,1 L/dak, 15 ve 30 dak	SEM analizinde nişasta granül yapısında değişiklik olmadı.	(Castanha vd., 2020)
Buğday (orta sert)	Gaz, 5 mg/L, 0, 0,5, 1, 1,5 ve 2 sa	1,5-2 sa uygulama ile %10-20 oranında zedelenmiş nişasta oranı arttı. SEM analizi sonucu nişasta granül boyutu azaldı.	(Mei vd., 2016)

Tablo 1.3. (Devam) Ozon uygulamasının nişasta üzerine etkisi ile ilgili mevcut literatür verileri

Buğday	Gaz, 0,00042 ozon g/100 g, 15 dak	Nişastasının şişme gücünü ve viskozitesinde arttı, retrogradasyon entalpi değeri azaldı.	(Zhu, 2018)
Pirinç	Gaz, 5L/dak	Şişme gücü %15,8 çözünürlük %44,7 arttı.	(da Luz vd., 2022)
Mısır nişatası	Gaz, 60 g ozon/sa 5, 10, 15,30 ve 60 dak	pH azaldı. Nişasta çözünürlük azaldı. 5 dak ozonlama ile en yüksek viskozite değeri 30 dak ozonlama ile en düşük viskozite değeri tespit edildi.	(Özaslan ve İbanoğlu, 2022)
Buğday nişastası	Gaz, ; 0.00042 g ozon/100g su, 15, 30, 60 dak	Tepe viskozitesi azaldı (60 dak ozonlama ile %98). retrogradasyon eğilimi %98 azaldı, jelatinleşme değerinde %66 arttı (15-60dak ozonlama).	(Çatal ve İbanoğlu, 2014)
Buğday nişastası	Gaz, 0.06 L ozon/dak, 5-25 dak	Viskozite değeri arttı.	(Chittrakorn vd., 2014)
Karabuğday nişastası	Gaz, 2,4 g/saat, 2,5-7,5, 15 ve 20 dak	Kısa ve orta süreli ozon uygulamasıyla (2,5 ve 7,5 dak) amiloz içeriği değişmedi, uzun süreli uygulama ile (15 ve 20 dak) amiloz içeriğinin amilopektinin depolimerizasyonundan dolayı %8,3 arttı. Tepe viskozitesinde (PV), çukur viskozitesinde (TV) ve son viskozitede (FV) arttı, kırılma viskozitesi (BD) ve gerileme viskozitesi (SB) azaldı. G' ve G'' değerleri arttı.	(Hu vd., 2022)
Buğday nişastası	Gaz, 2,5 L/dak, 30-45 dak	Amiloz miktarı arttı, amilopektin miktarı azaldı. Jelatinleşme entalpi değeri değişmedi. Şişme gücü %13,3 arttı.	(Sandhu vd., 2012)

Ozon uygulamasının nişasta molekülü üzerindeki etkileri, oksidasyon süresinin uzamasına bağlı olarak matris içerisindeki amiloz miktarı, amiloz/amilopektin oranı ve karbonil ile

karboksil gruplarının oksidasyon hızına göre değişkenlik göstermektedir. Bu değişiklikler, nişastanın kimyasal yapısına ve yapısal özelliklerine bağlı olarak farklılık arz edebilir. Özellikle, nişastanın moleküler yapısı, ozonlama sürecinin etkinliği ve oluşan kimyasal modifikasyonların derecesi üzerinde belirleyici bir rol oynar. Örneğin, Chan vd. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, karbonil içeriği yüksek olan tapyoka nişastasının, mısır ve sago nişastalarına kıyasla ozon oksidasyonundan daha fazla etkilendiği belirlenmiştir. Nişasta türlerinin ozonlama işlemi üzerindeki etkilerini inceleyen bir diğer çalışmada, mısır ve patates nişastalarının, buğday ve pirinç nişastalarına göre 1 saatlik ozon uygulamasından (60 g/h) daha fazla etkilendiği bildirilmiştir (Çatal ve İbanoğlu, 2012). Bu çalışmada, granül boyutlarının nişastanın ozon oksidasyonuna verdiği tepkide önemli bir faktör olduğu vurgulanmıştır. Daha büyük granül boyutlarına sahip nişastaların ozonlama sırasında kimyasal modifikasyonlara daha duyarlı olabileceği ifade edilmiştir.

Bu bulgular, nişasta türünün ozon oksidasyonu sürecinde kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Oksidasyon sırasında oluşan kimyasal değişimlerin ve granül boyutlarının nişasta türüne bağlı olarak farklılık göstermesi, ozonlama işleminin optimizasyonu açısından önem taşımaktadır. Farklı nişasta türlerinin ozonlama koşullarına verdiği yanıtların incelenmesi, gıda endüstrisinde nişasta modifikasyonu için daha verimli uygulamaların geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Ayrıca, bu çalışmalar, ozonlama teknolojisinin nişasta bazlı ürünlerin işlevselliğini artırmak için nasıl kullanılabileceği konusunda önemli bilgiler sunmaktadır.

Tahıl nişastasının ozon oksidasyonu ile modifiye edilmesi sonucunda şişme kabiliyetinde artış olduğu literatürde sıkça vurgulanmıştır. Sandhu vd. (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, ekmeçlik buğday unu (*Triticum aestivum L.*) ve buğday nişastasına sırasıyla 45 dak ve 30 dak boyunca 2.5 L/dak hızında ozon gazı uygulanmış ve okside örneklerde nişastanın şişme kabiliyetinin kontrol örneklerine kıyasla anlamlı derecede arttığı tespit edilmiştir. Çalışmada, oksitlenmiş örneklerde şişme kabiliyeti değerleri sırasıyla %8.5 ve %8.4 olarak ölçülürken, kontrol örneğinde bu oran %7.5 olarak belirlenmiştir. Şişme kabiliyetindeki bu artışın, oksidasyon işlemi sırasında nişasta molekülünde oluşan hidrofilik karboksil gruplarının (-COOH), amiloz ve amilopektin zincirlerindeki hidroksil gruplarıyla güçlü hidrojen bağları kurması sonucunda daha fazla su tutabilen bir ağ yapısının oluşmasına bağlı olduğu rapor edilmiştir.

Hu vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada, ozon oksidasyonu ile nişastanın şişme kapasitesinde benzer şekilde bir artış gözlenmiştir. Çalışmada, 2.5 dak süreyle ozonlama uygulanan nişasta örneklerinde şişme kapasitesinde %3 oranında bir artış tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, ozonlama işlemi sırasında nişastanın kimyasal yapısında meydana gelen modifikasyonların, özellikle hidrofilik grupların oluşumu ve bu grupların su bağlama kapasitesini artırmasıyla ilişkilendirilmiştir.

Bu bulgular, ozon oksidasyonunun nişasta molekülünün su tutma kapasitesini artırarak şişme kabiliyetini iyileştirdiğini ve bunun da nişastanın fonksiyonel özelliklerinde önemli bir değişiklik sağladığını göstermektedir. Ayrıca, şişme kapasitesindeki bu artışın ozonlama süresi ve yoğunluğu gibi işlem parametrelerine bağlı olarak değişiklik gösterebileceği, bu nedenle ozonlama koşullarının nişasta modifikasyonu üzerindeki etkilerinin daha detaylı incelenmesi gerektiği ortaya konmuştur. Bu bilgiler, nişasta bazlı ürünlerin geliştirilmesi ve gıda endüstrisinde ozonlama teknolojisinin kullanımı için önemli bir temel oluşturmaktadır.

Nişastanın yapışma özelliği, genellikle nişasta granüllerinin şişme kapasitesi ve granüllerin parçalanmasıyla doğrudan ilişkilidir. Oksidatif uygulamalar, nişastanın yüzey özelliklerini önemli ölçüde değiştirerek yüzeydeki hidrofobik özelliklerin artmasına neden olmaktadır. Bu durum, nişasta granüllerinin su ile etkileşim dinamiklerini etkileyerek fonksiyonel özelliklerinde değişikliklere yol açabilir. Nişastanın oksidasyonu sırasında, moleküler yapısında karboksil gruplarının oluşması, granüllerin yüzeyinde negatif yüklerin artmasına neden olur. Negatif yüklerin varlığı, su moleküllerinin granüllere daha kolay bağlanmasını sağlayarak su absorpsiyonunu artırır ve bu süreç, nişasta granüllerinin şişmesini destekler. Sonuç olarak, oksidasyon süreci yalnızca nişastanın yapışma özelliklerini değil, aynı zamanda nişasta içeren sistemlerin reolojik davranışlarını ve fonksiyonel performansını da etkileyebilir. Bu tür yapısal ve kimyasal modifikasyonlar, nişastanın gıda ürünlerindeki kullanım potansiyelini genişletmekte ve ürünlerin tekstürel özelliklerini optimize etmede önemli bir rol oynamaktadır (Marston vd., 2015; Zhang vd., 2021). Oksitlenmiş nişastalar düşük viskozite, yüksek stabilite, iyi film oluşturma ve bağlama özelliklerine sahiptir. Oksitlenmiş nişastada C2, C3 ve C6 pozisyonundaki hidroksil gruplarının karbonil ve karboksil gruplarına dönüştüğü dolayısıyla nişastanın şişme gücünün (hidrofobik grupların artışıyla) ve yapıştırma özelliklerinin değiştiği bilinmektedir (Sandhu vd., 2012). Yapılan çalışmalarda nişasta oksidasyonunun amorf ve kristal bölgede polimerizasyona neden olduğu bunun sonucunda nişasta yüzeyindeki por miktarının artışıyla nişastanın su ve yağ bağlama kapasitesini arttırdığı bildirilmiştir (Marston vd., 2015).

Ozon oksidasyonu, nişastanın kimyasal yapısında modifikasyonlara neden olurken, morfolojik yapısında genellikle minimal değişikliklere yol açmaktadır (Lima vd., 2021; Sandhu vd., 2012). Örneğin, Lima vd. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, manyok nişastasına uygulanan ozon oksidasyonunun (45 mg/L ozon) nişastanın morfolojisi ve yüzey özellikleri üzerinde belirgin bir etki yaratmadığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, ozonlama işleminin nişastanın temel morfolojik yapısını büyük ölçüde koruduğunu ve yüzey modifikasyonlarının sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte, farklı bir çalışmada, tartar karabuğdayı nişastasına uygulanan ozonlama işleminin süresine bağlı olarak daha belirgin morfolojik değişikliklerin meydana geldiği bildirilmiştir (Hu vd., 2022). Çalışmada, ozonlama süresi uzadıkça (15 ve 20 dak), nişasta partikül boyutunda azalma, molekül içindeki hilum adı verilen boşlukların genişlemesi gibi

yapısal değişimlerin gözlemlendiği rapor edilmiştir. Bu bulgular, ozonlama parametrelerinin (doz, süre ve uygulama yöntemi) nişastanın fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemede kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

Genel olarak, ozonlama işlemi, nişastanın kimyasal yapısında modifikasyonlara yol açarak fonksiyonel özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilirken, morfolojik yapısı üzerindeki etkileri, uygulama koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Ozonlama sırasında nişasta moleküllerindeki oksidasyon reaksiyonları, özellikle kimyasal bağların modifikasyonuna neden olurken, bu değişimlerin morfolojik yapıya olan etkileri ozon konsantrasyonu, temas süresi ve işlem sıcaklığı gibi faktörlerle yakından ilişkilidir.

Düşük doz ve kısa süreli ozonlama işlemleri, nişastanın morfolojik bütünlüğünü büyük ölçüde koruyabilmekte, bu da nişastanın yüzey yapısında veya granül boyutunda belirgin bir değişiklik olmadan fonksiyonel özelliklerin iyileştirilmesine olanak tanımaktadır. Ancak, uzun süreli ve yüksek dozlu ozonlama uygulamaları, nişasta granüllerinin yüzeyinde çatlaklar, gözenekler veya deformasyonlar gibi daha belirgin yapısal değişimlere yol açabilmektedir (Sandhu vd., 2012). Bu tür değişimler, nişastanın işlevsel özellikleri üzerinde hem olumlu hem de olumsuz etkiler oluşturabilir; örneğin, nişastanın şişme kapasitesinin artması veya retrogradasyon eğiliminin azalması gibi istenen sonuçlar elde edilirken, aşırı oksidasyonun nişasta granüllerinin mekanik dayanıklılığını azaltabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu durum, ozon oksidasyonunun nişastanın hem kimyasal hem de morfolojik modifikasyonu üzerindeki etkilerinin daha ayrıntılı bir şekilde araştırılmasını gerektirmektedir. Ozonlama işlemlerinin nişasta üzerindeki etkilerini optimize etmek için, farklı uygulama parametrelerinin etkilerinin incelenmesi ve bu parametrelerin hedeflenen kullanım alanlarına uygun şekilde düzenlenmesi önemlidir. Özellikle, gıda endüstrisi gibi hassas uygulamalarda ozonlama işleminin nişastanın işlevsel ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri dengelenerek, istenen sonuçların elde edilmesi sağlanabilir. Bu kapsamda yapılacak çalışmalar, ozonlama teknolojisinin nişasta modifikasyonundaki potansiyel kullanım alanlarını genişletmek için kritik bir rol oynamaktadır.

1.2.3. Proteinler üzerine etkisi

Tahılın makro moleküllerinden proteinlerin ozon oksidasyonu yoluyla modifikasyonu, son ürün kalitesinin belirlenmesi açısından araştırılması gereken konular arasındadır. Yapılan çalışmalar, ozonlama işleminin tahılın toplam protein miktarını değiştirmedeğini, ancak protein yapılarında disülfid bağlarının ve çapraz bağlanmaların artmasına yol açtığını göstermektedir. Bu yapısal değişiklikler, gluten molekül ağırlığında ve ekstrakte edilemeyen polimerik protein miktarında artışa neden olmakta, dolayısıyla tahılın işlenmesi sırasında oluşan ara ürünlerin viskoelastik özelliklerini ve nihai ürün kalitesini doğrudan etkilemektedir (Chittrakorn vd., 2014; Violleau vd., 2012).

Ozonlama sürecinin neden olduğu bu modifikasyonlar, tahıl proteinlerinin fizikokimyasal özelliklerinde önemli değişimlere yol açmakta ve bu değişimlerin hamur teknolojisi ve unlu mamuller gibi gıda sanayi uygulamalarında kaliteyi artırıcı etkiler sağlayabileceği bildirilmektedir. Özellikle, glutenin yapısındaki disülfid bağlarının artışı, hamurun dayanıklılığını ve elastikiyetini güçlendiren temel bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Bunun yanı sıra, ekstrakte edilemeyen polimerik protein miktarındaki artış, nihai ürünlerin tekstürel özelliklerinde iyileşme sağlamak ve ürün kalitesine olumlu katkılar sunmaktadır (Chittrakorn vd., 2014; Violleau vd., 2012; Zhu, 2018).

Bu bulgular, ozonlamanın tahıl proteinleri üzerindeki etkilerini anlamada ve bu teknolojiyi gıda sanayi uygulamalarına entegre etmede önemli bir bilimsel temel sunmaktadır. Proteinlerin ozon oksidasyonu yoluyla modifikasyonu, sadece son ürün kalitesini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda üretim süreçlerinde yeni yaklaşımlar geliştirilmesine de katkı sağlayabilir. Bu nedenle, ozonlamanın tahıl proteinleri üzerindeki etkilerinin daha detaylı incelenmesi, bu teknolojinin daha geniş bir uygulama alanına sahip olmasına olanak tanıyacaktır.

Yapılan araştırmalar, ozon uygulamalarında optimum seviyelerin aşılması durumunda, protein yapısının bozulduğunu ve bunun olumsuz etkiler doğurabileceğini ortaya koymaktadır (Obadi vd., 2018). Ozonlama sürecine dair çalışmaların büyük bir kısmı, un veya tane matrisi içerisindeki protein yapısına odaklanmıştır (Chittrakorn vd., 2014; Elgün ve Bilgiçli, 2019; Gozé vd., 2016; Mei vd., 2016; Obadi vd., 2018; Violleau vd., 2012; Zhang vd., 2021; Zhu, 2018). Bu çalışmalar, ozon uygulamasının unun toplam protein içeriği üzerinde belirgin bir değişikliğe neden olmadığını, ancak proteinlerin fizikokimyasal özelliklerinde önemli etkiler yarattığını göstermektedir.

Özellikle orta düzeyde gerçekleştirilen ozon uygulamalarının, proteinler arası çapraz bağlanmaları ve moleküller arası etkileşimleri artırdığı, bunun sonucunda glutenin gibi önemli proteinlerin çözünürlüğünü azalttığı tespit edilmiştir. Bu durum, gluten yapısının daha güçlü ve stabil bir hale gelmesine katkıda bulunarak, hamur reolojisi ve nihai ürün kalitesinde iyileşmeler sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, aşırı ozon konsantrasyonlarına maruz kalma durumunda proteinlerin moleküler yapısında ciddi bozulmaların meydana geldiği ve bu bozulmaların proteinlerin işlevselliğini olumsuz yönde etkilediği belirtilmektedir (Zhu, 2018). Bu tür yapısal bozulmalar, proteinlerin elastikiyet ve dayanıklılık özelliklerini zayıflatarak hamur reolojisi üzerinde negatif etkiler yaratmakta ve bu durum nihai ürün özelliklerinde kalite kayıplarına yol açabilmektedir.

Ozon uygulamalarının etkileri üzerine yapılan bu çalışmalar, kontrollü ve optimize edilmiş ozonlama koşullarının, buğday proteininin işlevselliği ve son ürün kalitesini artırmada etkili bir araç olabileceğini göstermektedir. Ancak, aşırı ozon uygulamasının istenmeyen etkiler doğurabileceği gerçeği göz önünde bulundurularak, ozonlama işlemlerinin dikkatlice yönetilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Ozonun protein yapısına olan etkileri üzerine yapılan

ileri düzey araştırmalar, bu teknolojinin daha verimli kullanımı ve gıda sanayinde uygulanabilirliğinin artırılması için önemli bilgiler sunmaktadır.

Mei vd. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, orta sertlikteki buğday ununa farklı sürelerde (0; 0,5; 1; 1,5 ve 2 sa) ozon gazı uygulanmıştır (5 ppm ozon, 3,3 L/dak). Araştırma bulguları, ozon uygulama süresindeki artışa paralel olarak düşme sayısında anlamlı bir artış meydana geldiğini göstermiştir. Kontrol örneğinde düşme sayısı 250 sn olarak ölçülürken, 2 sa ozon uygulaması sonrasında bu değer 400 sn.'ye ulaşmıştır. Bu artışın, ozon oksidasyonu nedeniyle α -amilaz enziminin aktivitesinin azalmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Çalışma, ozonlama sürecinin α -amilaz aktivitesi ile negatif eğrisel bir ilişkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, ozonlama ile enzim aktivitesinin azalması sonucunda nişasta hidroliz hızında düşüş meydana geldiğini ve bunun düşme sayısını artırdığı göstermektedir (Tablo 1.4). Bu bulgular, ozon uygulama süresinin buğday unu bileşenleri üzerindeki etkisini anlamak ve teknolojik özellikleri optimize etmek açısından önemli veriler sunmaktadır.

Ozon uygulamasının tahılların protein miktarı ve kalitesi üzerine etkisi ile ilgili bazı literatür verileri Tablo 1.4'te verilmiştir. Ancak, literatür verileri incelendiğinde, ozon oksidasyonunun genellikle buğdayın un formuna uygulandığı, tane formuna yönelik uygulamalarla ilgili çalışmaların sınırlı sayıda olduğu görülmektedir. Bu durum, bu alandaki bilgi eksikliğini gidermek ve tane formuna ozon uygulamasının etkilerini daha kapsamlı bir şekilde araştırmak gerektiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 1.4. Ozon uygulamasının tahıl proteinleri üzerine etkisi ile ilgili mevcut literatür verileri

Materyal	Ozon uygulama koşulları (ozon formu, kons., süre)	Sonuçlar	Kaynak
Ekstrakte proteinler (buğday gluteni, glutenin ve gliadin)	Gaz, 5 g/sa, 0-1 sa	Sülfidril gruplarının sayısı azaldı, gluten ve glutenin alt grupları düştü, gluten proteinlerinin denatürasyon sıcaklıkları ile G' ve G'' değerleri arttı.	Obadi vd., 2016
Buğday unu	50 mg/kg, 1 sa	-SH grup miktarı azaldı, S-S grup miktarı arttı.	Zhu, 2018

Tablo 1.4. (Devam) Ozon uygulamasının tahıl proteinleri üzerine etkisi ile ilgili mevcut literatür verileri

Buğday unu	Gaz, 5 mg/L, 0-2 sa	Yaş gluten miktarı ve unun beyazlık değeri arttı, α -amilaz ve viskozite değeri azaldı, düşme sayısında arttı.	Mei vd., 2016
Buğday	2,0 m ³ /sa	Buğday prolaminlerinin SDS (sodyum dodeksil sülfat) çözünürlüğü azaldı. S-S bağları arttı, çapraz bağlardaki artış ile proteinin sekonder yapısı değişti.	Goze vd., 2017
Buğday	Gaz, 0,4g/sa, 5 dak	Toplam protein oranının değişmedi ancak ekstrakte edilemeyen protein miktarı arttı, yaş gluten (%0.6) ve düşme sayısı (%0.3) arttı.	Elgün ve Bilgiçli, 2019
Buğday	Gaz, 0,06 L/dak, 10, 20,30, 36 ve 40 dak	Toplam protein miktarının değişmedi, Ekstrakte edilemeyen polimerik protein miktarı arttı (%8).	Chittrakorn vd., 2014
Buğday	Gaz, 0,4 g/sa, 8 dak	Toplam protein miktarı değişmedi, yaş gluten miktarında arttı (%1-3), gluten indeks değeri değişmedi.	Demir vd., 2011
Buğday	Gaz, 1500 ppm, gaz akış hızı 2,5 L/dak	Toplam protein miktarı değişmedi.	Sandhu vd., 2011
Buğday	Gaz, 0,61 ve 3,82 g/sa; 5 ve 30 dak	Düşük dozda uygulama ile ekstrakte edilemeyen protein miktarı değişmedi, yüksek dozda uygulama ile arttı.	Zhang vd., 2022
Buğday	Gaz, 5 g/kg	Ekstrakte edilemeyen protein/ekstrakte edilebilir protein oranı arttı.	Violleau vd., 2012
Buğday	6g/sa, 90 dak	Toplam protein miktarı değişmedi, yaş gluten miktarı azaldı (%35' den %32' ye) gluten indeks değeri arttı (%67' den %70' e).	Zhang vd., 2021
Buğday	(3,3 L/dak 5mg/L; 0; 0,5; 1; 1,5 ve 2 sa)	Yaş gluten miktarında 1 saat uygulama ile arttı (%35). Yaş gluten miktarı 2 saat uygulama ile azaldı (%32). Düşme sayısı uygulama süresinin artışı ile %60 yükseldi , toplam protein miktarı değişmedi.	Mei vd., 2016

1.2.4. Renk üzerine etkisi

Değirmencilik sektöründe buğday ununun pazarlanabilirliği ve tüketici tarafından kabul edilebilirliğinde en önemli kalite kriterlerinden biri, unun sahip olduğu renk değeridir. Renk, tüketici algısını doğrudan etkileyen ve ürün tercihlerini şekillendiren temel bir parametre olarak ön plana çıkmaktadır. Unun rengi, ürünün genel estetik görünümünden kalite algısına kadar geniş bir yelpazede etkili olmaktadır ve bu nedenle endüstride büyük bir öneme sahiptir.

Son yıllarda, ozon teknolojisi, un fabrikalarında unun renk değerini iyileştirmek amacıyla prosesin son aşamalarında etkili bir yöntem olarak uygulanmaktadır. Bu teknoloji, unun bileşiminde yer alan karotenoid pigmentlerin yapısal özelliklerine etki ederek renk açma sürecini gerçekleştirmektedir. Karotenoid pigmentlerin moleküler yapısında bulunan konjuge çift bağlar, ozon oksidasyonu ile parçalanmakta ve bu süreç sonucunda un, daha açık, homojen renk kazanmaktadır.

Değirmencilik sektöründe, öğütme işlemi sonrası elde edilen una, piyasaya sürülmeden önce rengini beyazlatmak amacıyla ağartma işlemi uygulanmaktadır. Geleneksel olarak bu işlemde aktif soya unu gibi oksidatif ajanlar kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda yapılan araştırmalar, ozon teknolojisinin bu alanda etkili bir alternatif sunduğunu göstermiştir. Ozon uygulaması, karotenoid renk pigmentlerindeki çift bağları kırarak unun rengini etkili bir şekilde beyazlatmakta ve aynı zamanda gıda güvenliği açısından önemli avantajlar sağlamaktadır (Chittrakorn vd., 2014; Sivaranjani vd., 2021; Zhu, 2018). Yapılan bazı bilimsel çalışmalarda ozon oksidasyonu sonucunda, unun L* (parlaklık) değerinin arttığı, b* (sarılık) değerinin ise azaldığı tespit edilmiştir (Tablo 1.5). Bu değişimler, unun daha açık ve homojen bir renge sahip olmasını sağlayarak tüketici tarafından daha fazla tercih edilen bir ürün elde edilmesine olanak tanımaktadır (Chittrakorn vd., 2014; Demir vd., 2011; Elgün ve Bilgiçli, 2019; Zhu, 2018).

Tablo 1.5'te ozon uygulamasının tahılların renk değeri üzerine etkisinin incelendiği bazı çalışmalar özetlenmiştir.

Tablo 1.5. Ozon uygulamasının renk değeri üzerine etkisi ile ilgili mevcut literatür verileri

Materyal	Ozon uygulama koşulları	Sonuçlar	Kaynak
Buğday unu	Gaz, 0,4 g/sa, 5 dak	L değeri %0,2 ve a değeri %9,4 oranında arttı, b değeri %8 oranında azaldı.	(Elgün ve Bilgiçli, 2019)
Pirinç	Gaz, 5L/dak, 5 sa	L değeri %6,5 arttı.	(da Luz vd., 2022)
Buğday unu	Gaz, 50 ppm, 30 dak	Renk değerinde değişim tespit edilmedi.	(Mendez vd., 2003).
Buğday	Gaz, 2 L/dak, 20 dak	L değeri %0,7 arttı, a değeri %10 azaldı.	(Subroto vd., 2022)

Tablo 1.5. (Devam) Ozon uygulamasının renk değeri üzerine etkisi ile ilgili mevcut literatür verileri

Karabuğday bazlı kompozit un	Gaz, 2,4/sa, 0; 2,5; 7,5; 15;20 dak	<i>L değeri %0,55 artı , b %3,4 arttı.</i>	(Hu vd., 2022).
Buğday unu (orta sert)	Gaz, 3,3 L/dak 5 mg/L; 0; 0,5, 1; 1,5 ve 2 sa)	<i>L parlaklık değeri arttı (2 sa uygulama ile %1,2).</i>	(Mei vd., 2016)
Buğday unu	Gaz, 1,500 ppm	<i>L değeri arttı.</i>	(Sandhu vd., 2011)
Buğday unu	(5 g/L, 5; 10; 15; 20 ve 30 dak)	<i>L değeri %0,33 arttı b değeri %22 azaldı.</i>	(Li vd., 2013)
Sorgum unu	Gaz, 0,06 L/dak 15; 30 ve 45 dak	<i>L değeri %5 arttı b değeri %35 azaldı.</i>	(Marston vd., 2015)
Karabuğday unu	Gaz, 2,4 g/sa 0; 2,5; 7,5 ve 15 dak	<i>L değeri %0,6 arttı. a %33 ve b %34 değeri azaldı.</i>	(Hu vd., 2020).
Buğday unu	Gaz, 0,06 L/dak 36 dak	<i>L değerinin %0,6 artış a değerinin (%27) ve b (%35) değerinin azalma</i>	(Chittrakorn vd., 2014)
Buğday unu	Gaz, 6 g/sa, 90 dak	<i>L değerinde %0,6 artış</i>	(Zhang vd., 2021)

Bu etkiler, unun renk özelliklerinde iyileşme sağlamakta ve aynı zamanda endüstriyel ölçekte ağartma ajanlarına olan ihtiyacı azaltmaktadır. Ozon teknolojisinin kullanımı, geleneksel kimyasal ağartma yöntemlerine göre çevreye daha duyarlı ve insan sağlığı açısından daha güvenli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu özellik, modern gıda işleme süreçlerinde hem gıda güvenliği hem de tüketici sağlığına öncelik verilmesi açısından önemli bir avantaj sunmaktadır (Chittrakorn vd., 2014; Mei vd., 2016; Sivaranjani vd., 2021; Zhu, 2018).

Ozon teknolojisi, modern değirmencilik süreçlerinde hem kaliteyi artıran hem de çevre dostu ve tüketici odaklı bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu yenilikçi yaklaşım, un üretiminde yüksek kalite standartlarına ulaşılmasını desteklerken, sürdürülebilirlik hedeflerini gerçekleştirmek için de etkili bir araç sunmaktadır. Gelecekte yapılacak kapsamlı araştırmalar, ozon teknolojisinin değirmencilik ve diğer gıda işleme sektörlerinde daha yaygın bir şekilde kullanılmasının önünü açabilir.

1.2.5. Biyoaktif bileşenler üzerine etkisi

Buğday, doğal fitokimyasal kaynaklar arasında önemli bir konuma sahiptir ve özellikle fenolik asit çeşitliliği ile öne çıkmaktadır. Sinamik asit türevleri (o-kumarik, m-kumarik, p-kumarik, kafeik asit, sinapik asit ve ferulik asit) ile benzoik asit türevleri (p-hidroksibenzoik asit, m-hidroksibenzoik asit, vanilik asit, siringik asit, gallik asit ve prokateşuik asit) buğdayın fenolik bileşenlerini oluşturan temel bileşiklerdir. Buğday tanesindeki toplam fenolik bileşenlerin yaklaşık %60'ı ferulik asitten (trans-4-hidroksi-3-metoksisinamik asit) oluşmaktadır. Fenolik

asitler, buğdayın kepek fraksiyonu olarak bilinen perikarpın dış tabakasında serbest veya bağlı formda bulunur (Yılmaz, 2011).

Biyoaktif bileşen açısından zengin gıdaların tüketimi, kardiyovasküler hastalıklar, kanser, diyabet ve yaşa bağlı fonksiyonel bozuklukların riskini azaltarak insan sağlığına önemli katkılar sağlar. Bu nedenle, gıda işlemleri sırasında bu biyoaktif bileşenlerin en az düzeyde etkilenmesi kritik bir öneme sahiptir. Ozon uygulaması, tahılların biyoaktif bileşenleri üzerinde uygulama parametrelerine bağlı olarak olumlu etkiler gösterebilmektedir. Ozonun bu bileşenlere etkisi iki temel teoriyle açıklanmaktadır: İlki, Oksidatif Stres Teorisi; Ozon, hücre yapısının kısmi parçalanmasına yol açarak hücre duvarına bağlı fenolik bileşenlerin serbest kalmasını ve ekstraksiyon verimliliğinin artmasını sağlar. Bu süreç, fenolik bileşen miktarının artışıyla sonuçlanır. İkincisi ise Enzimatik Aktivasyon Teorisi; ozonun etkisiyle fenilalanin amonyak liyaz, stilben sentaz ve flavonol sentaz gibi bazı enzimlerin aktivasyonu artar. Bu enzimlerin artışı, fenolik bileşen miktarının yükselmesine ve dolayısıyla besin kalitesinin iyileşmesine katkı sağlar (Kaur vd., 2022).

Yapılan bir çalışmada, ozon oksidasyonu (5 g/sa) uygulanmış tam tahıl unundan elde edilen yağın fenolik madde miktarının %107 oranında arttığı rapor edilmiştir. Bu bulgu, ozonun biyoaktif bileşenler üzerindeki olumlu etkisini desteklemektedir (Kaur vd., 2022). Başka bir çalışmada, sorgum ununun polifenol içeriği üzerindeki ozonlama etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, 0,06 L/dak debi ile 30 dak ozonlama sonucunda tanen konsantrasyonunun %4 oranında azaldığı bildirilmiştir. Bu azalmanın, ozonun polifenollerini okside etmesi ve polifenol oksidaz enziminin inhibisyonundan kaynaklanabileceği belirtilmiştir (Li vd., 2013). Elgün ve Bilgiçli (2019) tarafından yapılan çalışmada ozonlama işleminin fitik asit miktarını %17 oranında azalttığı gösterilmiştir. Fitik asidin, antioksidan özelliklerinin yanı sıra mineral biyoyararlılığı üzerinde olumsuz etkileri olduğu bilindiğinden, bu sonuç ozonlamanın olumlu bir etkisi olarak değerlendirilmiştir. Ancak aynı çalışmada, ozonlama işlemiyle toplam fenolik madde miktarında (%1.72) ve antioksidan aktivite oranında (%11.8) anlamlı bir artış olmadığı tespit edilmiştir. Bu araştırmalar, ozonlama işleminin tahılların biyoaktif ve besinsel bileşenleri üzerindeki etkilerinin, uygulama parametreleri ve hedef bileşene bağlı olarak farklılık gösterebileceğini ortaya koymaktadır.

Ozonun toplam fenolik madde içeriği üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışmada, kolza tohumuna uygulanan ozonlama işleminin fenolik bileşen miktarını %19, flavonoid miktarını ise %13 oranında artırdığı rapor edilmiştir (Jackowska vd., 2019). Benzer şekilde, mısır nişastasına uygulanan ozonlama işlemi (60 g/sa) sonucunda DPPH (1,1-Difenil-2-pikrilhidrazil) antioksidan aktivitesinde %17, toplam fenolik bileşen miktarında ise %42 oranında artış gözlemlenmiştir (Özaslan ve İbanoglu, 2022).

Bununla birlikte, ozon konsantrasyonu parametresinin önemini vurgulayan bir başka çalışmada, buğday ruşeymine farklı konsantrasyonlarda (2000, 4000, 6000 mg/kg) ozon uygulaması yapılmıştır. Ozon konsantrasyonunun artmasıyla antioksidan miktarında %25

oranında bir azalma olduğu belirlenmiştir. Bu durumun, yüksek konsantrasyonda ozonlama sonucu hidroksil, süperoksit ve hidroperoksil gibi serbest radikallerin oluşumundan kaynaklandığı ifade edilmiştir (Saroei vd., 2019). Bu sonuçlar, yüksek dozda ozon gazının antioksidan maddelerin miktarını olumsuz yönde etkileyebileceğini göstermektedir.

Öte yandan, ozon uygulamasının toplam fenolik bileşen miktarını artırdığı bir çalışmada, buğday ununa uygulanan ozonlama işlemi (5 g/L) sonucunda toplam fenolik bileşen miktarının uygulama süresine bağlı olarak %224 oranında yükseldiği ve DPPH antioksidan aktivitesinin %3 oranında arttığı rapor edilmiştir. Bu artışların, ozonlama işlemi sırasında kovalent bağların etkilenmesiyle karoten, tanen, askorbat, flavoprotein ve polifenoller gibi antioksidan bileşiklerin serbest hale gelmesiyle bağlantılı olduğu ifade edilmiştir (Obadi vd., 2018).

Bu bulgular, ozonlama işleminin uygulama parametrelerine bağlı olarak fenolik bileşenlerin profili ve antioksidan aktiviteler üzerinde farklı ve karmaşık etkiler oluşturabileceğini ortaya koymaktadır. Ozonlama sırasında oluşan oksidatif modifikasyonlar, fenolik bileşiklerin yapısal bütünlüğünü ve biyolojik aktivitelerini doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle, ozonlama işleminin parametrelerinin (örneğin, ozon konsantrasyonu, uygulama süresi, sıcaklık ve nem düzeyi gibi) dikkatlice optimize edilmesi gerekmektedir.

Bu optimizasyon, fenolik bileşenlerin oksidasyona karşı korunmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda hedeflenen biyoaktif özelliklerin artırılmasına olanak tanır. Bununla birlikte, işlem sırasında meydana gelebilecek istenmeyen reaksiyonlar ve potansiyel kalite kayıplarını en aza indirmek için, ozonlama uygulamalarının güvenli ve kontrollü bir şekilde yürütülmesi büyük önem taşır. Bu kapsamda, ozonlama parametrelerinin iyi bir şekilde tanımlanması ve gıda matrisi ile etkileşimlerinin derinlemesine anlaşılması, uygulamanın etkinliğini artırırken, ürün kalitesinin korunması ve fonksiyonel özelliklerinin geliştirilmesi için temel bir gerekliliktir. Dolayısıyla, ozonlama sürecine ilişkin ileri düzey araştırmalar, bu teknolojinin fenolik bileşenlerin korunması ve gıda ürünlerinin biyoyararlılığını artırmadaki potansiyelini tam anlamıyla ortaya koyabilmek adına kritik bir öneme sahiptir.

1.2.6. Tahıl ürünleri üzerine etkisi

Değirmencilik sektöründe, hamur ve nihai ürün kalitesinin artırılmasına yönelik çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu bağlamda, gluten ağının güçlendirilmesi, hamurun işleme özelliklerinin iyileştirilmesi ve ekmeğin iç yapısının daha homojen bir şekilde oluşmasının sağlanması için una sıklıkla olgunlaştırıcı ajanlar olarak oksidan maddeler eklenmektedir. Bu oksidanlar, hamurun fizikokimyasal özelliklerini modifiye ederek daha iyi bir reolojik davranış ve pişirme performansı sunmayı hedefler. Ancak, kimyasal katkı maddelerinin gıda güvenliği ve tüketici kabulü üzerindeki potansiyel olumsuz etkileri nedeniyle, bu tür geleneksel uygulamalara alternatif yöntemler arayışı artmaktadır.

Son yıllarda, yeşil teknoloji yaklaşımları kapsamında ozon gazının, un ve hamur işleme süreçlerinde olgunlaştırıcı bir ajan olarak kullanılabilmesi gösterilmiştir. Ozon, yüksek oksidatif gücü nedeniyle gluten proteinlerinin sülfidril grupları ile etkileşime girerek disülfid bağlarının oluşumunu teşvik eder, bu da gluten ağını güçlendirebilir ve hamurun işleme özelliklerini iyileştirebilir. Bunun yanı sıra, ozon uygulamasının çevre dostu bir teknoloji olması ve kimyasal kalıntı bırakmaması, bu yöntemi diğer geleneksel kimyasal oksidanlara göre daha cazip hale getirmektedir (Violleau vd., 2012).

Ozon gazının uygulama parametrelerinin (örneğin ozon konsantrasyonu, uygulama süresi ve ortam koşulları) un ve hamur üzerindeki etkilerinde belirleyici olduğu belirtilmektedir. Araştırmalar, bu parametrelere bağlı olarak tahıl unundan elde edilen hamurun özelliklerinde (renk, stabilite, mukavemet, gelişme süresi gibi) ve nihai ürün özelliklerinde (kabuk rengi, gözenek yapısı, hacim ve tekstür gibi) çeşitli olumlu veya olumsuz değişikliklerin meydana gelebileceğini ortaya koymuştur. Yüksek konsantrasyonlarda ozon uygulanması, hamurun reolojik özelliklerinde aşırı sertleşmeye veya ürünün nihai kalitesinde olumsuz değişimlere yol açabilir. Buna karşın, doğru parametrelerle optimize edilen ozon uygulamaları, hamurun daha homojen bir yapı kazanmasına, gluten ağının güçlenmesine ve nihai ürünün kalite parametrelerinde iyileşmeye katkı sağlayabilir (Mendez vd., 2003; Sivaranjani vd., 2021).

Sonuç olarak, ozon gazının uygun parametrelerle kullanılması, değirmencilik sektöründe hem sürdürülebilirlik hem de ürün kalitesi açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Ancak, bu teknolojiye ilişkin kapsamlı ve standartlaştırılmış araştırmaların yapılması, etkilerinin daha iyi anlaşılması ve endüstriyel uygulamalar için güvenilir protokollerin geliştirilmesi gereklidir.

Tablo 1.6' da ozon uygulamasının tahıl ürünleri üzerine etkisinin incelendiği bazı çalışmalar özetlenmiştir.

Tablo 1.6. Ozon uygulamasının tahıl ürünleri üzerine etkisi ile ilgili mevcut literatür verileri

Ürün	Ozon parametresi	Sonuç	Kaynak
Ekmek (orta sert buğday unu)	Gaz, 5 L/dak akış hızında 5, 15, 25, 35 ve 45 dak	45 dak uygulama ile ekmek hacmi %33 azaldı. 45 dak uygulama ile ekmek sertliği %100 arttı. Ekmek kabuk rengi <i>L</i> değerinin arttı (%25) ancak <i>a</i> (%19) ve <i>b</i> (%21) değerinin azaldı. Bayatlama gecikti. Elastik modül <i>G'</i> ve viskoz modül <i>G''</i> değeri arttı. Buğday proteinin β -tabaka ve α -sarmalının entalpi değeri azaldı (sırasıyla %43, %57 ve %65), denatürasyon sıcaklığı arttı (sırasıyla %5, %8 ve %4). Tekstür analizi sertlik değeri arttı. Ekmek kabuk rengi <i>L</i> değerinde arttı, <i>b</i> değeri azaldı.	(Obadi vd., 2018)

Tablo 1.6. (Devam) Ozon uygulamasının tahıl ürünleri üzerine etkisi ile ilgili mevcut literatür verileri

Ekmek (Sorgum unu)	Gaz, 0,06 L/dak 15, 30 ve 45 dak	Spesifik hacim değişmedi. Ekmek dilim parlaklığı 45 dak uygulamayla %4,5 arttı.	(Marston vd., 2015)
Ekmek (buğday unu)	Gaz, 1500 mg/kg, 2-4,5 dak	Hamur mukavemeti arttı. Ekmek hacmi arttı.	(Sandhu vd., 2011)
Kek (buğday unu)	Gaz, 0,06 L/dak 10 ve 36 dak	Kek hacmi %8 arttı. Sertlik değeri %18 arttı. Esneklik %5 arttı. Yapışkanlık %5 arttı.	(Chittrakorn vd., 2014)
Erişte (buğday unu)		Mikrobiyal yük %38 azaldı. Parlaklık %35,3 arttı.	(Li vd., 2013)
Ekmek (buğday unu)	Gaz, 0,4 g/sa, 5 dak	Farinogram yumuşama derecesi %11,4 düştü, gelişme süresi %5,33 ve stabilite süresi %13,2 arttı. Ekstensogram direnç değeri (%25), enerji (%20,4), maksimum direnç (%26,7) ve oran sayısı (%28,8) arttı. Uzama kabiliyeti %7,3 düşüş Ekmek gözenek yapı puanı %33 arttı. Ekmek kabuk rengi <i>a</i> değeri %10,6 azaldı, <i>L</i> değeri %7,2 arttı Ekmek içi sertlik azaldı.	(Elgün ve Bilgiçli, 2019)
Ekmek (Buğday unu)	Gaz, 0,4 g/sa, 8 dak	Farinogram analizinde gelişme süresi, yumuşama derecesi, su absorpsiyonu %3,8 azaldı. Ekstensograf analiz sonucunda uzama kabiliyeti değişmedi, enerji değeri %19,6 arttı. Ekmek hacmi %6,7 arttı. Spesifik hacim %8,3 arttı. Sertlik %14,7 arttı. Ekmek kabuk ve iç rengi <i>L</i> değeri arttı.	(Demir vd., 2011)
Pirinç (Haşlanmış)	Gaz, 5L/dak, 3 sa	Sertlik %60 arttı. Çiğnenebilirlik %44 arttı. Sertlik değeri %16 arttı.	(da Luz vd., 2022)
Karabauğday unu erişttesi	Gaz, 2,4 g/sa 0; 2,5; 7,5; ve 15 dak	Farinogram su absorpsiyonu %2 , gelişme süresi %45 stabilite süresi %100 arttı. Yumuşama derecesi %50 azaldı, farinogram kalite sayısı %78,4 arttı.	(Hu vd., 2020)
Erişte (Buğday unu)	Gaz, 5 L/dak; 1; 10; 30 ve 60 dak	Sertlik, esneklik ve çiğnenebilirlik arttı, yapışkanlık azaldı.	(Li vd., 2012)
Buğday unu	Gaz, 20 mg/L, 5 ve 10 dak	Su absorpsiyonu %1,13-1,7 arttı, Gelişme süresi %59-87 arttı, Stabilite %98 arttı. <i>G'</i> değeri azaldı.	(Moll vd., 2022)

Ozon oksidasyonunun buğdayın kimyasal bileşenleri üzerinde yarattığı modifikasyonlar, özellikle protein ve nişasta gibi makromoleküllerin yapısal ve fonksiyonel özelliklerini değiştirme potansiyeline sahiptir. Bu değişimler, hamur reolojisi ve nihai ürün kalitesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Özellikle ekmek, erişte ve makarna gibi unlu mamullerin

üretiminde hamurun reolojik özellikleri, gluten proteinlerinin oluşturduğu ağ yapısıyla doğrudan ilişkilidir. Buğday ununun su ile karıştırılması sırasında, glutenin ve gliadin proteinleri arasında disülfid bağlarının oluşumu ile bir gluten ağı meydana gelir. Bu ağ yapısı, hamura viskoelastik özellik kazandırarak işlenebilirliğini artırır ve ürünün nihai fiziksel özelliklerini şekillendirir.

Ozon oksidasyonunun gluten proteinleri üzerindeki etkisi, sülfidril (-SH) gruplarının oksidasyonu yoluyla disülfid (S-S) bağlarının oluşumunu teşvik eder. Bu süreç, gluten ağının yapısal bütünlüğünü güçlendirebilir ve hamurun mukavemetini artırabilir. Bununla birlikte, aşırı ozon uygulamaları proteinlerin aşırı oksidasyonuna yol açarak ağ yapısında bozulmalara neden olabilir ve hamurun reolojik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, ozon uygulamasının protein modifikasyonunu optimize edecek şekilde dikkatlice kontrol edilmesi gerekmektedir.

Nişasta bileşenleri açısından bakıldığında, ozon oksidasyonu, nişasta granüllerinin yüzey özelliklerinde ve iç yapısında değişimlere neden olabilir. Oksidasyon sürecinde karboksil ve karbonil gruplarının oluşumu, nişastanın su bağlama kapasitesini ve jelatinleşme davranışını değiştirebilir. Bu tür değişiklikler, hamurun şişme kabiliyeti ve yapışkanlık özelliklerini etkileyerek ürünün tekstürel ve duyuşal özelliklerinde önemli farklılıklar yaratabilir.

Nihai ürün kalitesi açısından değerlendirildiğinde, ozon oksidasyonunun nişasta ve protein molekülleri üzerine etkileri ürünün renk, tekstür, hacim ve gözenek yapısı gibi önemli kalite parametrelerinde belirgin bir şekilde değişikliğe neden olabilir. Örneğin, ozonun oksidatif etkisi pigment moleküllerini etkileyerek ürünün rengini açabilir. Aynı zamanda, protein ve nişasta modifikasyonlarının bir sonucu olarak, ürünün hacmi artabilir veya gözenek yapısı iyileştirilebilir. Ancak, bu etkiler uygulama parametrelerine bağlı olarak olumlu veya olumsuz yönde değişiklik gösterebilir.

Sonuç olarak, ozon oksidasyonunun buğday kimyası ve hamur reolojisi üzerindeki etkileri, bu teknolojinin unlu mamuller üretimindeki potansiyel kullanımını desteklerken, aynı zamanda uygulama parametrelerinin dikkatlice optimize edilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu tür modifikasyonların kapsamlı bir şekilde araştırılması, ozon teknolojisinin endüstriyel ölçekte daha etkin ve güvenli bir şekilde uygulanabilmesi için kritik bir öneme sahiptir (Zhao vd., 2020).

Literatür bulguları, buğday ununa uygulanan ozon işleminin hamurun gelişme süresini ve stabilitesini artırdığını ortaya koymaktadır. Örneğin, ekstensograf analizlerine göre, yumuşak buğday ununa uygulanan 0,5-50 ppm ozon işleminin hamurun uzamaya karşı direncini artırdığı, orta sertlikteki un için ise 5-50 ppm ozonlama işleminin hamurun uzayabilirliğini iyileştirdiği bildirilmiştir. Bu gelişmelerin, protein yapısında disülfid bağlarının ve çapraz bağlanmaların artışı ile gluten polimer çözünürlüğünün azalmasından kaynaklandığı bildirilmiştir.

Ancak, aşırı ozon uygulaması proteinlerin temel yapı taşları olan amino asitlerin oksidasyonuna ve protein moleküllerinin depolimerizasyonuna yol açabilmektedir. Bu durum, hem hamurun hem de nihai ürünün özellikleri üzerinde olumsuz etkiler de yaratabilir (Zhu, 2018).

Ekmek hamurunun oluşumu ve pişmiş ekmek yapısı, nişastanın hidrolizi, hamur fermantasyonu sırasında üretilen gazlar ve aroma bileşiklerinin oluşumu gibi bir dizi biyokimyasal süreçle şekillenir. Hamur fermantasyonu, un bileşiminde bulunan enzimlerin (amilaz, lipaz, proteaz ve oksidoredüktazlar) aktivitesine bağlı olarak gerçekleşir. Bu enzimler, hamur ve nihai ürünün reolojik ve duyuşal özelliklerini etkileyen kritik bir rol oynar.

Ekmek üretiminde α - ve β -amilazlar, nişasta moleküllerini oligosakkaritlere, özellikle maltoza hidroliz ederek fermantasyonda kullanılabilir şekerlerin oluşumunu sağlar. Bu şekerler, mayaların metabolizması ile karbondioksit gazı ve aroma bileşiklerinin üretimine olanak tanır ve hamurun kabarmasına katkıda bulunur. Proteazlar ise gluten proteinlerini hidrolize ederek peptit bağlarını kırar ve gluten ağının serbest kalmasını sağlar. Bu süreç, fermantasyon sırasında oluşan gazların hamurda tutulmasına yardımcı olur ve hamurun hacmi ile esnekliğini artırır.

Lipazlar, özellikle unun depolama stabilitesinde ve ekmek üretiminde önemli bir role sahiptir. Lipaz aktivitesi, hamurun reolojik özelliklerini etkileyerek nihai ürünün dokusal kalitesine katkıda bulunur. Ayrıca, lipoksigenaz enzimi, un pigmentlerini etkileyerek ekmeğin beyazlamasına yardımcı olabilir. Ancak, bu enzimlerin aktivitesinin optimal seviyelerde olması, istenen ürün kalitesini sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Çok düşük enzim aktivitesi, hamurun elastikiyetini ve fermantasyon kapasitesini sınırlarken, çok yüksek aktivite ise gluten yapısının bozulmasına, hamurun reolojik özelliklerinde bozulmalara ve ekmek tekstüründe (örneğin, hacim kaybı veya düzensiz gözenek yapısı) problemlere yol açabilir (Demir vd., 2011; Elgün ve Bilgiçli, 2019; Piechowiak vd., 2018).

Bir çalışmada, buğday ununun ozonlanması (30 ppm, 30 dakika) sonucunda amilaz, proteaz ve lipaz enzimlerinin aktivitelerinde belirgin bir azalma tespit edilmiştir. Bu azalmalar sırasıyla %75, %57 ve %72 oranında gerçekleşmiştir. Buna karşılık, lipoksigenaz aktivitesinin kontrol grubuna kıyasla 4 kat arttığı belirlenmiştir. Enzim aktivitelerindeki bu azalma, hamurun düşme sayısında ve viskozitesinde bir artışa neden olmuştur. Bu durum, enzimlerin yapısında bulunan -SH gruplarının oksidasyonu ve disülfid bağlarının artışıyla enzim yapısının değişmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, ozon oksidasyonu sonucu lipoksigenaz aktivitesindeki bu yüksek artış, doymamış yağ asitlerinin peroksit ve hidroperoksit türevlerinin oluşumunu teşvik edebilir. Bu süreçte, enzim yapısındaki amino asitlerin, özellikle sistein kalıntılarının, bu reaksiyonları olumlu yönde etkileyebileceği düşünülmektedir. Lipoksigenaz aktivitesinin artışı aynı zamanda β -karotenin oksidasyonuna yol açarak unun renginin ağarmasına katkıda bulunmaktadır. Bu bulgular, ozonlama işleminin enzim

aktiviteleri ve ürün kalitesi üzerindeki etkilerini anlamak açısından önemli veriler sunmaktadır (Piechowiak vd., 2018).

Ekmek yapımında unun gluten kalitesi ile ürün kalitesi arasında pozitif bir korelasyon olduğu bilinmektedir. Gluten proteinleri içerisinde gliadin fraksiyonu, hamurun viskoz özelliklerinden sorumlu olurken, glutenin fraksiyonu ise hamurun stabilitesi ve mukavemeti üzerinde etkili olmaktadır (Violleau vd., 2012). Proteinlerin *in vitro* polimerizasyonu, oksidasyon süreçleriyle gerçekleşmekte ve glutenin fraksiyonunda çapraz bağlanmaların artmasıyla çözünürlüğü azalmaktadır. Bu bağlamda, ozon oksidasyonunun önemli biyokimyasal hedeflerinden biri, ozon ile sistein arasındaki reaksiyonlardır. Oksidasyon sonucunda disülfid bağlarının artışı, ekstrakte edilemeyen polimerik protein miktarını artırmakta ve bu durum hamurun mukavemetinin yükselmesine neden olmaktadır (Violleau vd., 2012).

Mei vd. (2016), orta sertlikteki buğday ununa farklı sürelerde (0; 0,5; 1; 1,5 ve 2 sa) ozon gazı (5 mg/L ozon, 3,3 L/dak) uygulayarak Mixolab analiz sonuçlarını değerlendirmiştir. Çalışmada, 1 saatlik ozon uygulamasının hamur geliştirme süresini olumlu yönde etkilediği, ancak artan oksidasyon süresiyle birlikte hamur geliştirme süresinin %74 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Ozonlanmış unlardan yapılan ekmeklerin kalite analizlerinde, oksidasyon nedeniyle α -amilaz aktivitesinin azalmasına bağlı olarak çözünür nişasta içeriğinin azaldığı, artan gluten içeriğinin ise hamur mukavemetini artırarak ekmeklerin sertlik değerinde bir artışa (%34) yol açtığı belirlenmiştir. Ancak, 2 saatlik uzun süreli ozonlama, gluten yapısında hasara neden olarak ekmek sertlik değerinde düşüşe sebep olmuştur. Ekmeklerin diğer tekstürel özellikleri (çiğnenebilirlik, elastikiyet, dayanıklılık) sertlik ile paralel bir eğilim göstermiştir. Duyusal analiz sonuçları incelendiğinde, 1 saatlik ozonlama uygulamasının hacim/ağırlık oranı, yükseklik, renk, yapı, dış görünüm ve iç yapı gibi kriterlerde en yüksek puanları sağladığı, buna karşılık 2 saatlik ozonlama uygulanan unlardan elde edilen ekmeklerin daha düşük duyusal değerlendirme sonuçlarına sahip olduğu tespit edilmiştir.

Obadi vd. (2018), orta sertlikteki buğday ununa uygulanan ozon gazının ekmek hacminde azalmaya neden olduğunu belirlemiştir. Tekstür analizi sonuçları, ozonlama süresinin artışıyla ekmek sertliğinin arttığını, aşırı ozon uygulamasının gluten yapısını bozarak su tutma kapasitesini düşürdüğünü ve bu durumun ekmek sertliğinde belirgin bir artışa yol açtığını göstermiştir (Tablo 1.6). Çalışmada ayrıca, ozonlanmış undan üretilen ekmeklerin kabuk renginde, ozonun β -karoten, ksantofil ve flavon yapılarındaki çift bağları oksitlemesi sonucu sarı rengin azalması ve parlaklığın artması gibi değişikliklerin meydana geldiği rapor edilmiştir. Ekmeğin morfolojik incelemelerinde, kontrol grubu ve kısa süreli ozonlama uygulanan unlardan üretilen ekmeklerin protein matrisinde gömülü nişasta granülleri içerdiği tespit edilirken, uzun süreli ozonlama uygulanan unlardan yapılan ekmeklerde nişasta granüllerinin deformasyona uğradığı, glutenin depolimerize olduğu ve bu nedenle ekmeklerde şekil bozukluklarının ortaya çıktığı bildirilmiştir. Çalışmanın sonuçları, ozonlama işleminin ekmek hacmi, renk ve dokusal özellikler üzerinde olumlu etkiler sağlayabileceğini; ancak uzun

sürekli ozon uygulamalarının ekmeğin bayatlama hızını artırarak kalite ve raf ömrü üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğunu ortaya koymuştur.

Sandhu vd. (2011) buğday ununun ozonlamasıyla ekmeğin spesifik hacminin potasyum bromatla yapılan oksitleme işlemine göre daha fazla arttırdığı dolayısıyla ozonlamanın potasyum bromata alternatif oksidant olabileceği bildirilmiştir. Ekmeğin spesifik hacim artışının ise artan ozonlama süresi ile birlikte çözünmeyen polimerik protein miktarının artışıyla kaynaklandığı yüksek molekül ağırlığına sahip çözünmeyen polimerik protein miktarı ile ekmeğin hacmi arasında pozitif yönde korelasyon olduğu bildirilmiştir. Çalışma sonucunda ekmeğin hacminden sorumlu olan, kükürt içeren aminoasitten oluşan (özellikle sistein) gluten proteininin yapısındaki disülfid bağının oksidasyonla artması hem ekmeğin hamurunun gaz tutma kapasitesini arttırmakta hemde hamur mukavemetini etkileyerek ekmeğin hacmi üzerinde direkt olarak etkilediği bildirilmiştir (Tablo 1.6).

Elgün ve Bilgiçli (2019) ozon uygulanmış (0,4 g/sa, 5 dak) sert buğday unundan üretilen ekmeklerin duyusal analiz sonucunda gözenek yapısı puanının arttığı, ozonlamanın ekmeğin gözenek yapısını geliştirici yönde etkilediği bildirilmiştir. Ekmeğin gözenek yapısındaki olumlu bu değişimin ozonun un ve hamurun kalitesinin gelişmesi ve ekmeğin hacmini arttırıcı özelliği ile doğru orantılıdır. Maillard ve karemelizasyon olayları ekmeğin kabuk rengi oluşumundan sorumlu olup ozonlama ile ozonun oksidatif özelliği ile inhibe edilmiş olup çalışmada ekmeğin kabuk rengi kırmızılık (a) değerinde düşüş gözlemlenmiştir. Ekmeğin kabuk renginin tane yumuşaklığına bağlı ince granülasyonla parlaklığı artmıştır. Bayatlama için önemli bir parametre olan ekmeğin içi sertliğinin ozonlama ile daha yumuşak tekstürlü ekmeklerin oluştuğu (sert buğdayda daha düşük ekmeğin içi sertlik) dolayısıyla daha geç bayatlayacak ekmeğin elde edildiği bildirilmiştir.

2. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

Tez çalışması kapsamında hammadde olarak protein miktar ve kalitelerine göre; zayıf (Bezostaya), orta (Rus Buğdayı 2) ve kuvvetli (Rus Buğdayı 1) ekmeklik buğday (*Tr. aestivum*) örnekleri Ulusoy Un (Samsun) ve Unay Un (Çorum) fabrikalarından temin edilmiştir. Hasat sonrasında ilaçlanmadan temin edilen örnekler, safsızlık (sap, saman, kavuz, taş, böcek vb) unsurlarından temizlendikten sonra uygun ambalaj materyalleri içerisinde analize alınana kadar +4°C sıcaklıkta muhafaza edilmiştir.

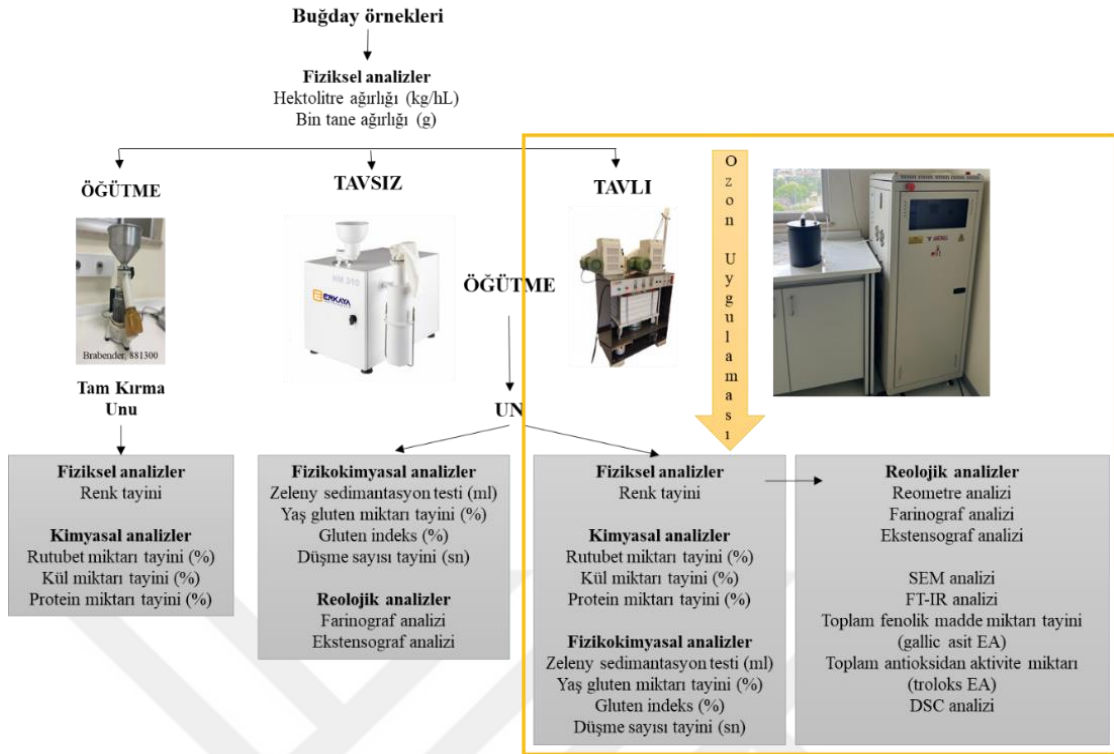
Bu tez çalışmasında, buğday tanelerine farklı konsantrasyon (14 ppm, 37 ppm ve 65 ppm) ve sürelerde (45 dak, 90 dak ve 150 dak) ozon uygulamasının AFB₁ detoksifikasyonu üzerindeki etkileri araştırılmış ve bu süreçte ozonun buğdayın fizikokimyasal özellikleri, reolojik davranışları ve ekmek kalitesi üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Çalışmada, yumuşak, orta ve sert olarak nitelendirilen üç farklı buğday çeşidi kullanılmış ve ozonun protein miktarı, gluten özellikleri, Zeleny sedimentasyon değeri, düşme sayısı, nişasta ve lif içeriği gibi kimyasal özelliklere etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, farinograf, ekstensograf ve reometre analizleri ile hamurun reolojik davranışlarındaki değişimler ve ekmeklerin hacim, ağırlık, spesifik hacim gibi kalite göstergeleri detaylı olarak incelenmiştir.

Türk Gıda Kodeksi Buğday Unu Tebliği (Tebliğ No: 2013/9)' ne göre buğday ununun üretilmesi, hazırlanması, işlenmesi, depolanması, nakledilmesi vve piyasaya arz edilmesi aşamalarında ozon uygulaması ile ilgili herhangi bir yasaklama yer almamaktadır.

2.2. Yöntemler

Tez çalışması kapsamında uygulanan analizlere yönelik akım şeması aşağıda verilmiştir (Şekil 2.1).

Bu tez çalışmasında, tavlı buğdayların öğütülmesi sonrasında ozon uygulaması gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.1). Uygulanan ozon prosesine ilişkin parametreler, AFB₁'in en etkili şekilde bozunmasını sağlayacak optimum koşullara göre belirlenmiştir. Bu doğrultuda, ozon konsantrasyonu 65 ppm olarak, uygulama süresi ise 150 dak olarak optimize edilmiştir. Belirlenen bu parametreler, ozonun AFB₁ giderimi üzerindeki maksimum etkisinin sağlandığı değerler olup, prosesin etkin yönetimi için temel alınmıştır.



Şekil 2.1. Buğdaylara uygulanan yöntem ve analizler

2.2.1. Buğday tane analizleri

Buğday örneklerinde hektolitre ağırlığı (kg/hl) ve bin tane ağırlığı (g) tayinleri gerçekleştirilmiştir (Çetiner, 2020).

2.2.2. Tam kırma unu analizleri

Buğday örnekleri temizlendikten sonra tavlanmaksızın laboratuvar tipi değirmende (Brabender, 881300) öğütülerek tam kırma unu elde edilmiştir (Şekil 2.1).

2.2.2.1. Renk Tayini

Tam kırma unların renk parametrelerinin (L , a , b) belirlenmesi için renk ölçüm cihazı (Chroma Meter CR 400 Konica Minolta, Japonya) kullanılmıştır. L değeri beyaz ve siyah ($L=100-0$) arasındaki renkleri tanımlamak için; a değeri yeşil ($-a$) ve kırmızı ($+a$); b değeri mavi ($-b$) ve sarı ($+b$) arasındaki renkleri tanımlamada kullanılmaktadır. Çalışmada, Sardoğan (2016) tarafından ortaya konulan yöntem, araştırmannın amacına uygun şekilde modifiye edilerek kullanılmıştır.

2.2.2.2. Rutubet Miktarı Tayini

Un örneklerinin rutubet miktarı tayini otomatik nem tayin cihazında (Shimadzu MOC-63) AACC (Approved Methods of American Association of Cereal Chemists) Standart Metot No: 44-01'a (AACC, 2000) göre tayin edilmiştir.

2.2.2.3. Protein Miktarı Tayini

Un örneklerinde protein miktarı tayini AACC Metot No:46-12'ye (AACC, 2000) göre tayin edilmiştir (Velp Scientifica UDAK 159). Protein çevirme faktörü 5.70 olarak alınmıştır.

2.2.2.4. Kül Miktarı Tayini

Un örneklerinin kül miktarı AACC Metot No:08-12'ye (AACC, 2000) göre yapılmıştır.

2.2.3. Rafine un analizleri

2.2.3.1. Tavsız Buğday Unu Analizleri

Fiziksel, kimyasal ve fizikokimyasal un analizlerinin yapılabilmesi amacıyla buğdaylar temizlendikten sonra tavlansızın laboratuvar tipi valsli değirmende (Erkaya, HM 310) öğütülerek un ve kepek fraksiyonları ayrılmıştır.

2.2.3.1.1. Zeleny sedimentasyon değeri tayini

Un örneklerinde Zeleny sedimentasyon değeri ICC Standart No:155 (1994) yöntemine göre tayin edilmiştir.

2.2.3.1.2. Düşme sayısı tayini

Un örneklerinde düşme sayısı değeri ICC Standart No: 107/1 (1995) yöntemine göre tayin edilmiştir.

2.2.3.1.3. Yaş gluten (yaş öz)/ gluten indeks tayini

Yaş gluten miktarı, ICC Standart Metod No: 106/2'ye (1984) ve gluten indeks tayini ICC Standart Metod No: 158'e (1995) göre tayin edilmiştir.

2.2.3.1.4. Farinogram özellikleri tayini

Hamur örneklerinde farinogram özellikleri ICC Standart No: 115/1'e (ICC, 1992a) göre tayin edilmiştir.

2.2.3.1.5. Ekstensogram özellikleri tayini

Hamur örneklerinde ekstensogram özellikleri ICC Standart No: 114/1'e (ICC, 1992b) göre tayin edilmiştir.

2.2.3.2. Tavlı Buğday Unu Analizleri

Fizikokimyasal ve reolojik analizlerin yapılabilmesi amacıyla buğdayların rutubeti temizlendikten sonra %14,5' e ayarlanmıştır. Tavlama işlemi oda sıcaklığında 24 saat süre ile aralıklı karıştırma işlemi uygulanmıştır. Tavlama işlemi için gerekli olan su miktarı aşağıdaki formül doğrultusunda belirlenmiştir. Tavlama işleminin (24 sa) hemen ardından buğdaylar laboratuvar tipi valsli değirmende (Ekin Gıda, Ekinograph D6) öğütülerek un ve kepek fraksiyonu ayrılmıştır.

$$W=A*(F2-F1)/100-F2$$

W=İlave edilecek su miktarı (g)

F1=Buğdayın rutubeti

F2=Olması istenilen rutubet

A=Tavlanacak buğday miktarı (g)

2.2.3.2.1. Rutubet miktarı tayini

Un örneklerinin rutubet miktarı tayini otomatik nem tayin cihazında (Shimadzu MOC-63, Japonya) AACC (Approved Methods of American Association of Cereal Chemists) Standart Metot No: 44-01'e (AACC, 2000) göre tayin edilmiştir.

2.2.3.2.2. Protein miktarı tayini

Un örneklerinde protein miktarı tayini AACC Metot No:46-12'ye (AACC, 2000) göre tayin edilmiştir (Velp Scientifica UDK 159, AB). Protein çevirme faktörü 5,70 olarak alınmıştır.

2.2.3.2.3. Kül miktarı tayini

Un örneklerinin kül miktarı AACC Metot No:08-12'ye (AACC, 2000) göre yapılmıştır (Protherm Furnaces).

2.2.3.2.4. Zeleny sedimentasyon değeri tayini

Un örneklerinde Zeleny sedimentasyon değeri ICC Standart No:155 (1994) yöntemine göre tayin edilmiştir.

2.2.3.2.5. Düşme sayısı tayini

Un örneklerinde düşme sayısı değeri ICC Standart No: 107/1 (1995) yöntemine göre tayin edilmiştir.

2.2.3.2.6. Yaş gluten (yaş öz) miktarı tayini/ gluten indeks tayini

Yaş gluten miktarı, ICC Standart Metod No: 106/2'ye (1984) ve gluten indeks tayini ICC Standart Metod No: 158 (1995)' e göre tayin edilmiştir.

2.2.3.2.7. Farinogram özellikleri tayini

Hamur örneklerinde farinogram özellikleri ICC Standart No: 115/1'e (ICC, 1992a) göre tayin edilmiştir.

2.2.3.2.8. Ekstensogram özellikleri tayini

Hamur örneklerinin ekstensogram özellikleri, ICC Standart No: 114/1 (ICC, 1992b) doğrultusunda belirlenmiştir. Analiz sonuçları, 135. dakika verileri olarak sunulmuştur.

2.2.3.2.9. Reometre

Hamur örneklerinde G' ve G'' değerleri (Turksoy vd., 2021) yöntemi modifiye edilerek uygulanmıştır. Hamur örnekleri bekletilmeden analiz edilmiş olup analiz $25\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ de, 40 mm çapında paralel plaka ve plakalar arası boşluk 2 mm olarak gerçekleştirilmiştir. Doğrusal viskoelastik bölge tespiti için 1,59 Hz aralığında frekans taraması yapılmıştır. Analiz sonucunda hamurların elastik modül (G') ve viskoz modül (G'') incelenmiştir.

2.2.3.2.10. Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM)

Un ve ekmek örneklerinin morfolojik özellikleri taramalı elektron mikroskobu (Anatek, FEI/Quanta 450 FEG, Çekya) ile Mei vd. (2016) tarafından önerilen yöntem modifiye edilerek kullanılmıştır. Örnekler analiz öncesinde altın kaplama yapılmıştır (Quorum, Q150R, İngiltere).

2.2.3.2.11. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)

Un ve ekmek örneklerindeki kimyasal değişiklikler, 4000-700 cm^{-1} dalga boyu aralığında Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (Thermo Scientific Nicolet Nexus 470, Waltham, MA, USA) kullanılarak analiz edilmiştir.

2.2.3.2.12. Toplam fenolik madde tayini

Toplam fenolik bileşik belirleme tayini UV Spektrofotometre cihazıyla kolorimetrik olarak Yu ve diğerlerinin (2013) yöntemi modifiye edilerek kullanılmıştır. Örneklerin ekstraksiyonu için; 1 g öğütülmüş örnek, 10 mL 1 N HCl/ %95 etanol (15:85) ile muamele edilip önce 65 °C çalkalamalı su banyosunda (VWR, USC300T) sonrasında 10.000 rpm' de santrifüjlenmiştir (HERMLE, Z 326 K). Fenolik bileşen tayini için 10 kat seyreltilmiş Folin-Ciocalteu reaktifi kullanılmıştır. 0,2 mL örnek ekstraktını oksitlemek için 1,5 mL Folin-Ciocalteu reaktifi kullanılmıştır. Çözelti 5 dak beklendikten hemen sonra 1,5 mL sodyum karbopat (60 g/L) ile nötralize edilmiştir. 90 dak sonrasında çözeltinin 725 nm' de UV Spektrofotometrede (SHIMADZU, UV-1280) okuması yapılmıştır. Farklı konsantrasyonlarda (0,1, 0,2, 0,5, 1, 1,5 ve 2 ppm) hazırlanan Gallik asit çözeltisi ile elde edilen kalibrasyon eğsine göre sonuçlar Gallik asit eşdeğeri mg/100g olarak verilmiştir.

2.2.3.2.13. Toplam antioksidan aktivite tayini

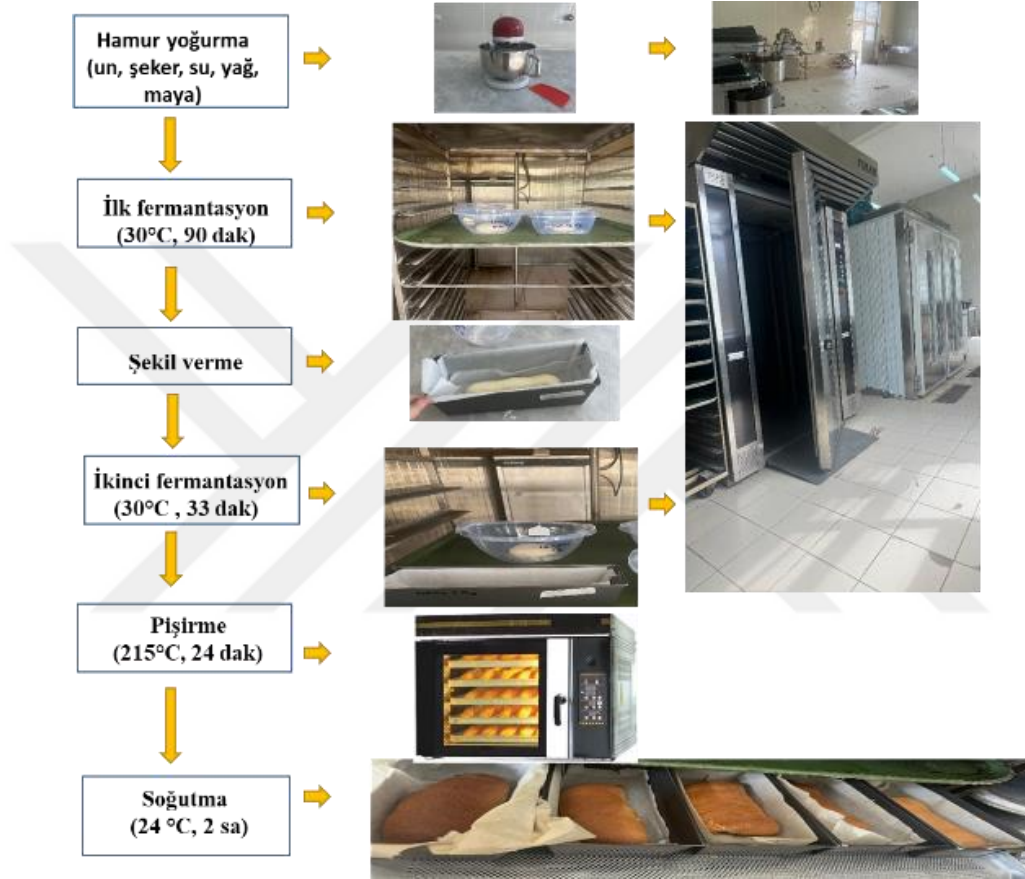
Toplam antioksidan madde tayini için DPPH serbest radikalleri giderme aktivitesi tayini Yu ve diğerlerinin (2013) yöntemi modifiye edilerek uygulanmıştır. Örnek ekstraksiyonu Toplam fenolik madde tayinin ile aynı şekilde uygulanmıştır. Analiz için 60 $\mu\text{mol/L}$ DPPH reaktanı metanol içerisinde hazırlanmıştır. 0,1 mL örnek ekstraktı ve 3,9 mL DPPH çözeltisi ilave ederek 525 nm de UV Spektrofotometrede (SHIMADZU, UV-1280) okuma yapılmıştır. Anktioksidan aktivite aşağıda verilen formül doğrultusunda hesaplanmıştır;

$$\%DPPH = (1 - (A_{\text{örnek}} / A_{\text{kontrol}})) * 100$$

Farklı konsantrasyonlarda (0,1, 0,2, 0,5, 1, 1,5 ve 2) hazırlanan Trolox çözeltisi ile elde edilen kalibrasyon eğsine göre sonuçlar Trolox eşdeğeri/g olarak verilmiştir.

2.2.4. Ekmek analizleri

Tavlı buğday örneklerinin öğütülmesiyle elde edilen unlara ozonlama işlemi yapıldıktan sonra ekmek yapımı gerçekleştirilmiştir. Ekmekler AACC Metot No: 10-10.03 yöntemine göre yapılmıştır. Ozon uygulanmamış unlardan elde edilen ekmekler kontrol grubu olarak değerlendirilmiştir. Ekmek yapımı akım şeması Şekil 2.2' de verilmiştir.



Şekil 2.2. Ekmek yapım akım şeması

2.2.4.1. Doku Profil Analizi

Ekmek örneklerinin tekstürel özellikleri TA.XT Plus Texture Analyser (Stable Micro Systems, TA.XT plus, UK) cihazında Li vd. (2023) tarafından önerilen yöntem modifiye edilerek belirlenmiştir. Ekmekler 15 mm kalınlığında dilimlenmiştir. Test parametreleri; %50 strain, pre-test hızı ve test hızı 1.0 mm/s, trigger force 20 g' dır.

2.2.4.2. Ekmek Ağırlık Analizi

Ekmek ağırlığı tartımı için ekmek pişimini takiben 2 saat sonra laboratuvar tipi terazide (Precia, XB 6200d, İsviçre) ağırlık tartımı yapılmıştır. Demir vd. (2011) tarafından önerilen yöntem modifiye edilerek kullanılmıştır.

2.2.4.3. Ekmek Hacim Analizi

Ekmek fırından çıktıktan 2 saat sonra kolza tohumu ile yer değiştirme esasına göre ekmek hacmi hesaplanmıştır. Demir vd. (2011) tarafından önerilen yöntem modifiye edilerek kullanılmıştır.

2.2.4.4. Spesifik Hacim Analizi

Ekmek hacminin, ekmek ağırlığına oranı ile hesaplanmıştır. Demir vd. (2011) tarafından önerilen yöntem modifiye edilerek kullanılmıştır.

2.2.4.5. Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM)

Ekmek örneklerinin morfolojik özellikleri, taramalı elektron mikroskobu (ANATEK, FEI/Quanta 450 FEG, Çekya) kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sırasında Mei vd. (2016) tarafından önerilen yöntem modifiye edilerek uygulanmıştır. Örnekler, analiz öncesinde altın kaplama işlemi (Quorum, Q150R, İngiltere) ile hazırlanmıştır.

2.2.4.6. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR)

Un ve ekmek örneklerinin kimyasal değişikliklerinin analizi için Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi Spektrometresi (Thermo Scientific Nicolet Nexus 470, Waltham, MA, USA) cihazı ile 4000-700 cm^{-1} dalga boyunda ölçülmüştür.

2.2.4.7. Toplam Fenolik Madde Tayini

Toplam fenolik bileşik belirleme tayini UV spektrofotometre cihazıyla kolorimetrik olarak Yu ve diğerlerinin (2013) yöntemi modifiye edilerek kullanılmıştır. Örneklerin ekstraksiyonu için; 1 g öğütülmüş örnek, 10 mL 1 N HCl/ %95 etanol (15:85) ile muamele edilip önce 65 °C çalkalamalı su banyosunda (VWR, USC300T, Malezya) sonrasında 10.000 rpm' de santrifüjlenmiştir (Hermle, Z 326 K, Almanya). Fenolik bileşen tayini için 10 kat seyreltilmiş Folin-Ciocalteu reaktifi kullanılmıştır. 0,2 mL örnek ekstraktını oksitlemek için 1,5 mL Folin-

Ciocalteu reaktifi kullanılmıştır. Çözelti 5 dak bekletildikten hemen sonra 1,5 mL sodyum karbobat (60 g/L) ile nötrale edilmiştir. 90 dak sonrasında çözeltinin 725 nm' de UV Spektrofotometrede (Shimadzu, UV-1280, Almanya) okuması yapılmıştır. Farklı konsantrasyonlarda (0,1, 0,2, 0,5, 1, 1,5 ve 2 mg/kg) hazırlanan gallik asit çözeltisi ile elde edilen kalibrasyon eğsine göre sonuçlar gallik asit eşdeğeri (GAE) mg/100g olarak verilmiştir.

2.2.4.8. Toplam Antioksidan Aktivite Tayini

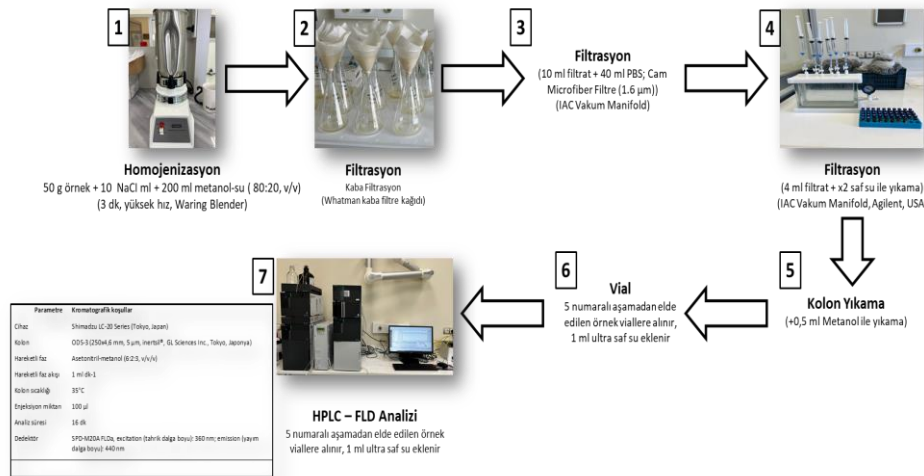
Toplam antioksidan madde tayini için 2,2-difenil-1-pikrilhidrazil serbest radikalleri giderme aktivitesi tayini Yu vd. (2013) tarafından önerilen yöntem modifiye edilerek uygulanmıştır. Örnek ekstraksiyonu toplam fenolik madde tayinin ile aynı şekilde uygulanmıştır. Analiz için 60 µmol/L DPPH reaktanı metanol içerisinde hazırlanmıştır. 0,1 mL örnek ekstraktı ve 3,9 mL DPPH çözeltisi ilave ederek 525 nm de UV Spektrofotometrede (Shimadzu, UV-1280, Almanya) okuma yapılmıştır. Anktioksidan aktivite aşağıda verilen formül doğrultusunda hesaplanmıştır;

$$\%DPPH = (1 - (A_{\text{örnek}} / A_{\text{kontrol}})) * 100$$

Farklı konsantrasyonlarda (0,1, 0,2, 0,5, 1, 1,5 ve 2 mg/kg) hazırlanan trolox çözeltisi ile elde edilen kalibrasyon eğsine göre sonuçlar trolox eşdeğeri (TE)/g olarak verilmiştir.

2.2.5. AFB₁ analizi

AFB₁ analizi kapsamında örneklerden ekstraksiyon işleminin akış şeması Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. AFB₁ analiz yöntemi akım şeması

2.2.5.1. Ekstraksiyon

Buğday taneleri analiz öncesinde öğütülmüş ve homojen hale getirilmiştir. Analiz için VICAM rehberinde (VICAM, 2008) belirtilen aşamalar modifiye edilerek uygulanmıştır. Ekstraksiyon işlem aşamaları şu şekildedir:

- 50 g öğütülmüş homojen buğday, 10 g NaCl ve 200 ml metanol-su (80:20, v/v) ekstraksiyon çözeltisi ile 3 dak süreyle yüksek hızda Waring Blender (8011ES, USA)' da homojenize edilmiştir.
- Ekstrakt Whatman kaba filtre kağıdından süzülmüştür.
- Filtrattan 10ml alınarak 40 Phosphate Buffer Saline (PBS) ilave edilerek seyreltilmiş sonrasında 1,6 µm gözenek çapında cam microfiber filtreden (VWR, 691, Fransa) geçirilmiştir.
- 4 ml filtrattan alınıp AFB₁ 'e karşı antikor içeren IAC'ler vakummanifold düzeneğine (Agilent, USA) yerleştirilmiş ve geçirilmiştir. Bu aşamada 2 kere saf su ile yıkama işlemi yapılmıştır.
- Kolondan 2 kere 0.5 ml metanolden geçirilerek antikorlara bağlı halde bulunan olası HPLC viallerine (Supelco, Bellefonte, PA, USA) alınmış ve üzerine 1 ml ultra saf su ilave edilmiştir.
- Ekstraksiyonun son aşamasında k 100'er µl örnek floresan detektörlü HPLC (HPLC-FLD) cihazına enjekte edilerek AFB₁ varlığı tespit edilmiştir.

2.2.5.2. HPLC -AFB₁ Analizi

Buğday örneklerinde AFB₁' in kalitatif/kantitatif analizinde Shimadzu RF-20AXL model HPLC sistemi kullanılmıştır. Kullanılan sistem, online vakum degaser (DGU-20A3), LC-20AP izokratik pompa ünitesi, kolon fırını (CTO-10AS), sistem kontrol birimi (CBM-20A Lite) ve otomatik enjeksiyon ünitesi (SIL-20A) gibi bileşenlerden oluşmaktadır.

AFB₁ analizi, AOAC 999.07 resmi yöntemi temel alınarak ön testler sonucunda gerekli modifikasyonlar yapılarak, Tablo 2.1'de belirtilen prosedüre uygun şekilde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2.1. HPLC analiz cihaz koşulları

Parametre	Koşullar
Cihaz	Shimadzu LC-20 Serisi (Tokyo, Japonya)
Kolon	GL Sciences (150 x 4,6 mm, C18 5 µm, İnertSustain®, GL Sciences Inc., Tokyo, Japonya)
Hareketli Faz	Su-Asetonitril-Metanol (6:2:3, v/v/v)
Hareketli Faz Akışı	1 mL/dakika
Kolon Sıcaklığı	35°C
Enjeksiyon Hacmi	100 µL
Analiz Süresi	16 dakika
Dedektör	Shimadzu RF-20A xs (Tokyo, Japonya)

HPLC cihazına farklı konsantrasyonlarda (0,5; 1; 5; 10; 20 µg/L) AFB₁ standartları enjekte edilerek, bu standartlara karşılık gelen pik alanları üzerinden beş farklı nokta kullanılarak bir kalibrasyon eğrisi oluşturulmuştur. Kalibrasyon eğrisi analizinde R² (Pearson çarpım moment korelasyon katsayısının karesi) değeri >0,99 olarak hesaplanmış ve bu sonuç, çalışmanın doğruluğunu destekleyen kabul edilebilir bir değer olarak değerlendirilmiştir.

2.2.5.3. Ozon Uygulamasının AFB₁ Yıkımı Üzerine Etkisinin Belirlenmesi

Ozon uygulamasının AFB₁ parçalanması üzerindeki etkisini değerlendirmek için, öncelikle hammadde olarak kullanılan buğdaylarda AFB₁ varlığı tespit edilmiştir. Ardından, belirlenen yöntem doğrultusunda buğdaylara yapay olarak AFB₁ yüklenmiş ve ozonun AFB₁ inhibisyonundaki etkisi analiz edilmiştir.

2.2.5.4. Hammadde Buğdaylara AFB₁ Yükleme

Hammadde buğdaylara AFB₁ yükleme işlemi, Türk Gıda Kodeksi Bulaşanlar Yönetmeliği'ne (2023) uygun şekilde yapılmıştır. Yönetmelik gereğince, tahıllar ve bunlardan elde edilen ürünler için AFB₁ maksimum limit değeri 2 µg/kg olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, 600 gram hammadde buğdayın tavlama suyuna (tavlama işlemiyle %14.5 nem oranına ulaşmak amacıyla) 48 µg AFB₁ standart çözeltisi eklenmiş ve çözeltinin buğdaya homojen şekilde dağılması için manuel karıştırma işlemi uygulanmıştır. Yükleme işlemi tamamlandıktan sonra, 24 saat bekleme süresinin ardından toksin yüklü buğdaylarda HPLC yöntemiyle AFB₁ analizi yapılmış ve her bir örnekteki toksin miktarı hesaplanmıştır.

2.2.5.5. Ozon Uygulaması

Ozon gazı uygulaması, toksin yüklü buğday örneklerine üç farklı konsantrasyonda (14, 37, 65 ppm) ve üç farklı süreyle (45, 90, 150 dakika) laboratuvar tipi bir ozon jeneratörü (ARCBULL MEO-SR1, Türkiye) kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Resim 2.1). Ozonlama işlemi, delrin malzemedan üretilmiş ve ağzı kapalı bir kap içerisinde yürütülmüş; uygulama esnasında homojen bir ürün dağılımı sağlamak amacıyla düzenli aralıklarla manuel çalkalama işlemi yapılmıştır. İşlem sonrasında her bir buğday örneği HPLC yöntemiyle analiz edilerek, en yüksek detoksifikasyon oranını sağlayan ozonlama parametreleri (konsantrasyon ve süre) belirlenmiştir.



Resim 2.1. Ozon Jeneratörü

2.2.6. İstatistik analizi

Veriler, Minitab v14 ve Jamovi 2.3.28 yazılımları kullanılarak analiz edilmiştir. Verilerin normal dağılıma uygunluğu Shapiro-Wilk testi ile değerlendirilmiştir. Buğday çeşidi ve yöntem değişkenlerine göre normal dağılım gösteren nicel verilerde iki yönlü varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Çoklu karşılaştırmalar ise Tukey testi ve Bonferroni testi ile gerçekleştirilmiştir. Normal dağılım göstermeyen nicel veriler için Walrus paketi kullanılarak Robust ANOVA analizi yapılmış ve çoklu karşılaştırmalar Bonferroni testi ile incelenmiştir. Nicel değişkenlere ilişkin tanımlayıcı istatistikler, ortalama \pm standart sapma ve ortanca değerleri olarak sunulmuştur. Tüm istatistiksel değerlendirmelerde anlamlılık düzeyi $p < 0,05$ olarak kabul edilmiştir.

3. BÖLÜM

SONUÇLAR

3.1. Buğday Tane Analizleri

Fiziksel özelliklerden hektolitre ağırlığı ve bin tane ağırlığı, buğday kalitesinin belirlenmesinde ıslah çalışmalarında seleksiyon amacıyla kullanılan temel analiz yöntemlerindedir. Tanenin büyüklüğü ve yoğunluğuna bağlı olarak değişim gösteren bin tane ağırlığı, tanenin endosperm miktarı hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Yüksek bin tane ağırlığına sahip buğdaylarda, endosperm miktarı tanedeki diğer bileşenlere kıyasla daha fazladır ve bu durum un verimini olumlu yönde etkilemektedir (Çetiner, 2020). Buğday tane verimi açısından kritik bir parametre olan bin tane ağırlığı; çevre koşulları, iklim ve toprak özellikleri gibi dış faktörlere bağlı olarak da değişkenlik göstermektedir (Akbalık, 2021; Türk, 2013). Dolayısıyla tanenin fiziksel özellikleri üzerinde hem çevresel hem de genetik faktörler etkili olmaktadır.

Değirmencilik açısından değerlendirildiğinde, aşırı iri veya küçük taneler buğdayın depolanması ve temizliği sırasında kullanılan ekipmanların verimliliğini azaltabilir. Bir diğer önemli fiziksel kalite kriteri olan hektolitre ağırlığı, un verimi ile yüksek düzeyde korelasyon göstermektedir. Hektolitre ağırlığı; tanenin büyüklüğü, şekli, yoğunluğu ve homojenliği ile ilişkilidir ve yüksek hektolitre ağırlığı, un veriminin artmasını destekleyen bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Hektolitre ağırlığı, buğdayın türüne, çeşidine, yabancı madde oranına, tane şekline ve yazlık ya da kışlık özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Akbalık, 2021; Çeliker, 2019; Çetiner, 2020).

Buğday örneklerine ait tane analiz sonuçları Tablo 3.1' de verilmiştir.

Tablo 3.1. Buğday tanesinin fiziksel analiz sonuçları

Analiz Adı	Buğday Çeşiti		
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya
Hektolitre ağırlığı (kg/hl)*	72.71	75.63	77.33
Bin tane ağırlığı (g)*	30.24	30.97	30.92

*sonuçlar kurumadde üzerinden hesaplanmıştır

Bu tez çalışmasında elde edilen verilere göre, incelenen ekmeklik buğday çeşitlerinin bin tane ağırlıkları 30,24 ile 30,97 g arasında, hektolitre ağırlıkları ise 72,71 ile 77,33 kg/hl arasında belirlenmiştir (Tablo 3.1). Hektolitre ağırlığı, hem kuru madde miktarını hem de un verimini artıran önemli bir kalite parametresidir. Bununla birlikte, hektolitre ağırlığının çeşit, tür, ekolojik koşullar, ekim mevsimi ve gübreleme gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterebileceği tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, buğdayın türlere bağlı olarak değişen fiziksel özelliklerinin nispeten dar bir aralıkta seyrettiğini ve belirli çeşitlerde stabilite sağlanabileceğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, buğday kalitesinin belirlenmesinde hektolitre ağırlığı ve bin tane ağırlığı gibi parametrelerin önemini vurgulamakta ve buğdayda kaliteyi artırmayı hedefleyen gelecekteki çeşit geliştirme çalışmalarına değerli bir katkı sunmaktadır.

Yapılan araştırmalar, buğdayın hektolitre ağırlığının geniş bir varyasyon gösterdiğini ve 71,11 ile 84,98 kg/hl arasında değiştiğini, bin tane ağırlığının ise 22,3 ile 53 g arasında olduğunu ortaya koymuştur (Tablo 3.2). Bu bulgular, buğday türleri ve yetiştirme koşulları (gübreleme, çevresel faktörler ve ekim mevsimi) doğrultusunda fiziksel özelliklerde gözlemlenen çeşitliliği açıkça ortaya koymaktadır.

Tablo 3.2. Hektolitre ve bin tane ağırlığı ile ilgili mevcut literatür verileri

Buğday çeşidi	Analiz sonucu	Kaynak
Yerli ve ithal 12 çeşit buğday (Göller Bölgesi)	Bin tane ağırlığı 35,15-46,60 g Hektolitre ağırlığı 71,11 kg ile 84,98 kg/hl	(Türk, 2013)
Çorum ve ilçesi 22 çeşit buğday	Bin tane ağırlığı 29,1 ile 41,2 g Hektolitre ağırlığı 75,8-79,2 kg/hl	(Akbalık, 2021)
Gerek-79 buğday çeşidi Guadalupe buğday çeşidi	Bin tane ağırlığı 24,6-27,7 g Hektolitre ağırlığı 80,9-82,4 kg/hl	(Türksoy, 2011)
18 çeşit buğday	Bin tane ağırlığı 22,3-43,5 g Hektolitre ağırlığı 74,4-81,7 kg/hl	(Çetiner, 2020)
Flamura-85 çeşiti buğday Nina çeşiti	Bin tane ağırlığı 37-41 g Hektolitre ağırlığı 78-82 kg/hl Bin tane ağırlığı 40-42 g Hektolitre ağırlığı 78-80 kg/hl	(Tenikecier ve Öner, 2018)
9 çeşit buğday	Hektolitre ağırlığı 78,2-83,1 kg/hl Bin tane ağırlığı 31-53 g	(Yılmaz, 2011)

3.2. Tam Kırma Unu Analizleri

Tam kırma unu örneklerine ait renk analzi ve kimyasal analiz sonuçları sırasıyla Tablo 3.3 ve Tablo 3.4' te verilmiştir.

Tablo 3.3. Tam kırma un renk analiz sonuçları

Analiz Adı	Buğday Çeşiti		
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya
<i>L</i> *	73,88±2,28	76,36±0,20	73,09±0,23
<i>a</i> *	4,71±0,19	3,60±0,05	4,85±0,12
<i>b</i> *	14,2±0,42	12,55±0,40	14,52±0,19

Tablo 3.4. Tam kırma un kimyasal analiz sonuçları

Analiz Adı	Buğday Çeşiti		
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya
Rutubet Miktarı (%)	8,54±0,10	8,87±0,06	9,03±0,07
Protein Miktarı* (%)	11,41±0,19	9,76±0,22	7,28±0,01
Kül Miktarı * (%)	1,57±0,01	1,29±0,04	1,26±0,04

*Sonuçlar kurumadde üzerinden hesaplanmıştır

Bu tez çalışmasında, incelenen buğday çeşitlerinin renk özellikleri ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, renk parametreleri olan *L*, *a* ve *b* değerleri sırasıyla parlaklık, kırmızılık ve sarılık göstergesi olarak ele alınmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, *L* değerleri 73,09 ile 76,36 arasında, *a* değerleri 3,60 ile 4,85 arasında, *b* değerleri ise 12,55 ile 14,52 arasında değişiklik göstermiştir (Tablo 3.3). İncelenen buğday çeşitleri arasında en yüksek parlaklık değerinin Rus Buğdayı 2 çeşidinde olduğu, buna karşılık en düşük parlaklık değerinin Bezostaya çeşidinde gözlemlendiği belirlenmiştir.

Literatürde, sert buğdayların sarımtırak krem tonlarında, yumuşak buğdayların ise daha açık ve parlak beyaz renkte olduğu belirtilmektedir (Gummadov, 2012). Bu çalışmanın bulguları, Rus Buğdayı 1 çeşidinin sert buğday kategorisinde değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Sert buğdayların genellikle daha yüksek *b* (sarılık) değerine sahip olduğu ve bu durumun kalite parametreleri ile yakından ilişkili olduğu literatürle uyumlu bir şekilde tespit edilmiştir (Gummadov, 2012).

Rus Buğdayı 2'nin yüksek parlaklık değerine karşın kırmızılık (*a*) ve sarılık (*b*) değerlerinin en düşük seviyelerde olması, bu çeşidin renk özellikleri açısından farklı bir profil sergilediğini ortaya koymaktadır. Diğer yandan, *a* ve *b* parametreleri açısından farklılık yoktur. Bu durum, buğday renk özelliklerindeki farklılıkların, çevresel faktörler, yetiştirme koşulları ve buğdayların temin edildiği bölgelerin özelliklerinden kaynaklanabileceğini düşündürmektedir.

Elde edilen bulgular, farklı yetiştirme bölgelerinden gelen buğday çeşitlerinin renk parametrelerinin çevresel koşullara duyarlı olduğunu ve bu faktörlerin buğday kalitesinde önemli bir belirleyici rol oynayabileceğini göstermektedir. Bu durum, çevresel ve yetiştirme koşullarının buğdayın fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerindeki etkilerini daha iyi anlamak ve kalite değerlendirmelerini bu bağlamda ele almak açısından önemli bir perspektif sunmaktadır.

Araştırmalar, özellikle sert ve koyu renkli buğdayların, açık renkli ve daha yumuşak yapılı türlere kıyasla daha yüksek kalite özellikleri sergilediğini göstermektedir. Sert ve koyu renkli buğdaylarda, protein miktarının daha yüksek olduğu ve bu durumun buğdayın işlenebilirlik ve ürün verimliliği gibi parametrelere olumlu yönde katkıda bulunduğu vurgulanmıştır (Yılmaz, 2011).

Bu bulgular, buğdayın fiziksel özellikleri ile kimyasal bileşenleri arasında önemli bir ilişki olduğunu kanıtlamakta ve bu bağlamda tanenin renk değeri gibi fiziksel göstergelerin kalite değerlendirmelerinde dikkate alınması gerektiğini işaret etmektedir. Ayrıca, buğdayın dış görünüşünün, protein miktarı gibi içsel kalite parametreleri hakkında dolaylı da olsa bilgi verebileceği, ıslah ve seleksiyon çalışmaları için değerli bir kriter olabileceği ifade edilmektedir. Koyu renkli buğdayların yüksek kaliteli olarak sınıflandırılması, bu tür buğdayların protein içeriği gibi temel kalite parametreleri üzerinde olumlu etkiler yarattığını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, buğdayın kalite değerlendirmesinde fiziksel özelliklerin, özellikle renk değerinin, temel bir analiz parametresi olarak kullanılabilmesi anlaşılmaktadır (Çeliker, 2019).

Bu çalışmada incelenen buğday çeşitlerinin nem oranlarının %8,54 ile %9,03 arasında değiştiği tespit edilmiştir (Tablo 3.4). Belirlenen bu nem oranları, sektörde kabul edilebilir nitelikte olup, hem işleme hem de depolama süreçleri açısından uygun bir seviyede bulunmaktadır. Bu sonuçlar, buğdayın işlenebilirliği ve depolama stabilitesi açısından güvenli bir nem düzeyinde olduğunu göstermektedir. Bu bulgular literatür verileri ile de paralellik göstermektedir (Tablo 3.5).

Buğday tanesinin teknolojik değeri açısından kritik bir kalite göstergesi olan nem oranı, hem değirmencilik hem de depolama süreçleri açısından büyük bir öneme sahiptir. Özellikle değirmencilik sektöründe, buğday tanesinin işlenebilirliği ve ürün kalitesinin korunabilmesi için optimal nem oranının %11-12 aralığında olması gerektiği vurgulanmaktadır. Bu aralık, buğdayın işleme performansını artırmak ve uzun süreli depolama süreçlerinde stabilitesini korumak adına temel bir kalite kriteri olarak kabul edilmektedir (Bulut, 2012).

Depolama sırasında buğdayın nem oranının yüksek olması, kurumadde miktarının azalmasına yol açarak besin değerini ve genel kalitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Ayrıca, yüksek nem düzeyleri, böcek, küf ve çimlenme gibi istenmeyen faktörlerin ortaya çıkmasını tetikleyerek buğdayın teknolojik değerinde ciddi kayıplara neden olabilmektedir. Bu nedenle, buğdayın nem oranının uygun aralıkta tutulması, hem işleme kalitesinin korunması hem de depolama sırasında oluşabilecek kalite kayıplarının önlenmesi açısından son derece önemlidir. Bu gereklilik, sektörde ürünün işlenebilirliğini artırmak ve depolama sürecini güvence altına almak için titizlikle uygulanmaktadır.

Bu tez çalışmasında incelenen buğday çeşitlerinin protein içerikleri ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiş olup, elde edilen veriler Tablo 3.4'te sunulmuştur. Rus Buğdayı 1, Rus Buğdayı 2 ve Bezostaya çeşitlerinin protein oranları sırasıyla %11,41, %9,76 ve %7,28 olarak tespit edilmiştir. Çalışmada, Rus Buğdayı 1'in protein oranının diğer çeşitlere kıyasla daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, Rus Buğdayı 1'in protein içeriği bakımından üstün bir profil sergilediğini ortaya koymaktadır.

Elde edilen bulgular ışığında, buğday çeşitleri protein içeriklerine göre sınıflandırılmıştır. Rus Buğdayı 1, yüksek protein içeriği nedeniyle "kuvvetli" buğday kategorisinde değerlendirilirken, Rus Buğdayı 2 "orta" düzeyde protein içeriğine sahip bir çeşit olarak tanımlanmıştır. Buna karşın, Bezostaya çeşidi, düşük protein oranı nedeniyle "zayıf" buğday kategorisinde yer almıştır.

Bu sınıflandırma, buğday çeşitlerinin besin değeri ve endüstriyel kullanım potansiyelleri açısından önemli bir rehber niteliği taşımaktadır. Yüksek protein içeriği ile öne çıkan kuvvetli buğdaylar, un üretimi ve ekmekçilik gibi gıda sanayii uygulamalarında öncelikli olarak tercih edilmektedir. Buna karşılık, düşük protein içeriğine sahip çeşitlerin farklı endüstriyel ve tarımsal kullanım alanlarında değerlendirilme eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu sınıflama, buğdayın teknolojik özelliklerine yönelik kalite odaklı çalışmalar için yol gösterici veriler sunmaktadır.

Buğday kalitesinin belirlenmesinde en önemli parametrelerden biri olan protein miktarı, yetiştirme tekniği, çevresel koşullar ve topraktan alınabilir azot miktarı gibi birçok faktörden etkilenmektedir (Gummadov, 2012; Yılmaz, 2011; Yiğit vd., 2019). Literatürde, buğdayda protein içeriğini belirleyen en kritik faktörlerin başında yetiştirme yöntemleri ve çevresel koşulların geldiği ifade edilmektedir (Menderis, 2006). Bu durum, yetiştirme sürecinde kullanılan gübreleme teknikleri, sulama rejimleri, iklimsel faktörler ve bölgenin toprak özelliklerinin buğday protein miktarını doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır.

Protein miktarının yıllara ve koşullara bağlı olarak aynı bölgede yetiştirilen aynı buğday çeşidi için bile farklılık gösterebildiği çeşitli çalışmalarla kanıtlanmıştır (Gummadov, 2012). Bu durum, çevresel değişkenlerin ve yetiştirme uygulamalarının protein içeriği üzerindeki etkisinin büyüklüğünü vurgulamaktadır. Örneğin, kuraklık, düşük toprak azotu veya yetersiz besin elementi seviyesi gibi stres faktörleri protein miktarını artırabilirken, aynı zamanda buğdayın veriminde azalmaya neden olabilir. Buna karşın, optimal çevresel ve yetiştirme koşullarında hem yüksek protein içeriği hem de iyi bir verim sağlanabilmektedir.

Çalışmalarda elde edilen buğday protein oranları Tablo 3.5' te sunulmuştur ve bu veriler, farklı yıllarda ve bölgelerde yetiştirilen buğday çeşitlerinin protein miktarlarında önemli değişiklikler gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, buğday yetiştiriciliğinde çevresel koşullar ve yetiştirme uygulamalarının kalite üzerinde ne denli belirleyici bir rol oynadığını açıkça göstermektedir. Sonuç olarak, buğdayda protein içeriğinin artırılmasına yönelik

çalışmaların, yetiştirme teknikleri ile çevresel faktörlerin birlikte optimize edilmesine odaklanması gerektiği sonucuna varılabilir.

Bu tez çalışması tam kırma un protein analizi bulguları literatürde bazı çalışmalarla paralellik gösterirken bazıları ise uyum içerisinde değildir (Tablo 3.5).

Buğdayın kül oranı, yetiştirilme tekniği, kullanılan gübre miktarı ve türü, yetiştirildiği toprağın mineral madde içeriği ve buğdayın topraktan mineral madde alabilme kapasitesine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Yılmaz, 2011). Kül oranı, buğdayın mineral madde içeriğini yansıtan önemli bir kalite göstergesi olup, yetiştirme koşullarının yanı sıra genetik ve çevresel faktörlerden de etkilenmektedir.

Bu çalışmada incelenen buğday çeşitleri arasında en yüksek kül oranı %1,57 ile Rus Buğdayı 1 çeşidinde tespit edilmiştir. Buna karşın, Rus Buğdayı 2 ve Bezostaya çeşitleri arasında kül oranı bakımından farklılık göstermektedir. Bu durum, kül oranının genetik faktörlerden ziyade yetiştirme koşulları ve çevresel faktörlere daha duyarlı olduğunu düşündürmektedir.

Ayrıca, buğdayın fiziksel ve kimyasal özellikleri arasındaki ilişkiler incelendiğinde, tane protein oranı ile kül oranı arasında pozitif bir korelasyon olduğu belirlenmiştir. Bu ilişki, yüksek protein içeriğine sahip buğdayların aynı zamanda daha fazla mineral madde içerebileceğini ve bu özelliklerin birbirini tamamladığını göstermektedir. Kül oranı ile protein arasındaki bu pozitif korelasyon, buğdayın hem besin değeri hem de endüstriyel işlenebilirliği açısından dikkate alınması gereken önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Bu sonuçlar, kül oranının buğdayın kalite parametreleri arasındaki yerini vurgulamakta ve bu özelliğin, özellikle besin değeri yüksek buğday çeşitlerinin seçimi ve değerlendirilmesinde önemli bir kriter olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, buğdayın kül miktarı ile protein düzeyi arasındaki ilişkiyi daha iyi anlamak için gelecekteki araştırmalara değerli bir temel sunmaktadır.

Bu tez çalışması tam kırma un kül analizi bulguları literatürde bazı çalışmalarla paralellik gösterirken bazıları ise uyum içerisinde değildir (Türk, 2013; Yorulmaz, 2023) (Tablo 3.5).

Tablo 3.5. Kimyasal analizlerle ilgili mevcut literatür verileri

Buğday çeşidi	Kimyasal analiz sonucu	Kaynak
Çorum ve ilçeleri 22 çeşit buğday	Protein oranı %15,3-18,2 arasında	(Akbalık, 2021)
Gerek-79 buğday çeşidi Guadalupe buğday çeşidi	Protein oranı %12,7-14,4	(Türksoy, 2011)
18 farklı buğday çeşidi	Protein oranı Sivas ve Ankara lokasyonunda %10,1-15,6 ve %12,0-14,6 ,eski çeşitlerin Ankara lokasyonunda %10,8-15,6 arasında olduğu, yerel buğdayların Siyez, Karakılçık ve Sünter' in için sırasıyla %13-16,8	(Çetiner, 2020).
Flamura-85 buğday çeşidi Nina çeşidi Gelibolu çeşidi Krasunia Odes'ka çeşidi	Protein oranı %13-14 Protein oranı %12,7-13,9 Protein oranı %12,2 Protein oranı %13-15	(Tenikecier ve Öner, 2018)
8 çeşit buğday	Protein oranı ortalama %15,12 Kül oranı ortalama %1,64	(Yorulmaz, 2023)
Göller Yöresi 12 çeşit buğday	Nem oranı %9,06-13,44 Kül oranı %1,37-1,73	(Türk, 2013)
15 ekmeklik buğday (Aydın, konya Thyrow lokasyonu)	Protein oranı %12,15-14,19 Kül oranı %1,16-1,50	(Yiğit vd., 2019)

3.3. Rafine Un Analizleri

Buğday unu örneklerine ait kurumadde, kül ve protein analiz sonuçları sırasıyla Tablo 3.6' da verilmiştir.

Tablo 3.6. Buğday çeşidi ve yöntem (ozsuz/ozonlu) göre un parametrelerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Un	Yöntem	Buğday Çeşidi			Toplam		F	p	η^2
		Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya					
Kuru madde (%)	Ozsuz	92,43±0,59	92,56±0,78	92,25±0,59	92,41±0,53	Buğday	5,870	0,039	0,662
	Ozonlu	90,47±0,62	92,96±0,01	91,45±0,41	91,63±1,17	Yöntem	5,970	0,050	0,499
Kül (%)	Ozsuz	0,68±0,04 ^A	0,53±0,02 ^B	0,51±0,01 ^B	0,57±0,09	Buğday	47,620	<0,001	0,941
	Ozonlu	0,48±0,01 ^{BC}	0,42±0,01 ^{CD}	0,39±0,01 ^D	0,43±0,04	Yöntem	142,230	<0,001	0,960
Protein (%)	Ozsuz	11,59 ± 0,13	9,68 ± 0,13	7,58 ± 0,08	9,61 ± 1,8	Buğday	1212,889	<0,001	0,998
	Ozonlu	11,67 ± 0,11	9,55 ± 0,18	7,29 ± 0,05	9,5 ± 1,96	Yöntem	2,654	0,154	0,307

F: Varyans analizi test istatistiği; η^2 : Kısmi Eta Kare; Kuru madde (R²: %81,66; Adj. R²:%66,37); Kül (R²: %97,64; Adj. R²:%95,68); Protein (%99,75; Adj. R²:%99,02); Ortalama±standart sapma;^{a-c}: Aynı harfe sahip buğday çeşitleri arasında fark yoktur. ^{A-D}: Aynı harfe sahip etkileşimler arasında fark yoktur.

Yöntem ayrımı yapmaksızın buğday çeşidine göre kuru madde (%) ortalama değerleri arasında bir fark elde edilmiştir (p=0,039). Bezostaya çeşidinin ortalaması %91,85, Rus

buğdayı 1'in ortalaması % 91,45 ve Rus buğdayı 2'nin ortalaması % 92,76 olarak elde edilmiştir. Rus buğdayı 1 ve Rus buğdayı 2 arasında fark varken Bezostaya diğer iki çeşit ile benzerdir. Çeşit ayrımı yapmaksızın yöntemle göre kurumadde (%) ortalama değerleri arasında bir fark elde edilmemiştir ($p=0,05$). Ozonlu yöntemin ortalaması % 91,63, ozonsuz yöntemin ortalaması % 92,41 olarak elde edilmiştir. Buğday çeşiti ve yöntem etkileşimine göre kurumadde (%) ortalama değerleri arasında bir fark elde edilmemiştir ($p=0,064$).

Yöntem ayrımı yapmaksızın buğday çeşidine göre kül (%) ortalama değerleri arasında bir fark elde edilmiştir ($p<0,001$). Bezostaya çeşidinin ortalaması % 0,45, Rus buğdayı 1'in ortalaması % 0,58 ve Rus buğdayı 2'nin ortalaması % 0,47 olarak elde edilmiştir. Rus buğdayı 1 ile diğer çeşitler arasında bir farklılık vardır. Çeşit ayrımı yapmaksızın yöntemle göre kül (%) ortalama değerleri arasında bir fark elde edilmiştir ($p=0$). Ozonlu yöntemin ortalaması % 0,43, ozonsuz yöntemin ortalaması ise % 0,57 olarak elde edilmiştir. Buğday çeşidi ve yöntem etkileşimine göre kül (%) ortalama değerleri arasında bir fark belirlenmiştir ($p=0,042$). Ozonlu yöntem Bezostaya çeşidinin ortalaması %0,39, Rus buğdayı 1'in ortalaması % 0,48 ve Rus buğdayı 2'nin ortalaması % 0,42 olarak elde edilmiştir. Ozonsuz yöntemde Bezostaya çeşidinin ortalaması % 0,51, Rus buğdayı 1'in ortalaması % 0,68 ve Rus buğdayı 2'nin ortalaması %0,53 olarak elde edilmiştir. Ozonlu yöntem içerisinde Bezostaya çeşidi ile Rus buğdayı 1 çeşidi arasında; ozonsuz yöntemde Rus buğdayı 1 ile diğer çeşitler arasında fark vardır. Her bir buğday çeşidi içerisinde iki yöntem arasında bir farklılık vardır.

Çalışmada, yöntemlerden bağımsız olarak buğday çeşidinin protein değerleri üzerindeki ana etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,001$). Rus Buğdayı 1'in ortalama protein değeri % 11,63, Rus Buğdayı 2'nin % 9,61 ve Bezostaya'nın % 7,43 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, buğday çeşitleri arasında protein değerleri açısından anlamlı farklılıklar olduğunu göstermektedir. Rus Buğdayı 1, en yüksek protein içeriğine sahipken, Bezostaya, en düşük protein değerine sahip buğday çeşidi olarak belirlenmiştir. Bu durum, buğday çeşitlerinin genetik özellikleri ve yetiştirme koşulları gibi faktörlere bağlı protein içeriklerinde farklılıklar olabileceğini düşündürmektedir.

Bununla birlikte, buğday çeşidinden bağımsız olarak yöntemlerin protein değerleri üzerindeki ana etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p=0,154$). Buğday çeşidi ve yöntem etkileşiminin protein değerleri üzerindeki etkisi de istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p=0,174$). Bu bulgu, hem buğday çeşitleri hem de ozonlama yöntemi dikkate alındığında protein içeriği açısından herhangi bir istatistiksel farklılık olmadığını ifade etmektedir.

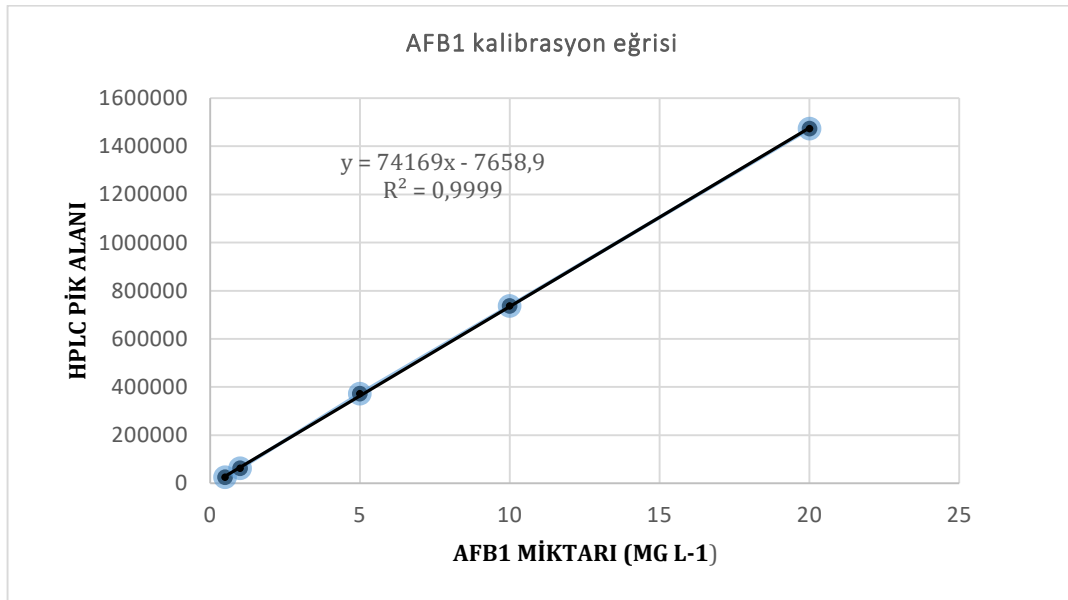
Ozon uygulamasının buğdaydaki toplam protein miktarını değiştirmemesi, ozonun proteinlerin temel kimyasal yapısına sınırlı etki göstermesinden kaynaklanmaktadır. Proteinlerin uzun zincirli polipeptit yapıları, ozonun oksidatif etkilerine karşı genellikle stabildir. Ozon, serbest sülfidril grupları (-SH) ve çift bağ içeren amino asit yan zincirleri gibi reaktif bölgelerle etkileşime girerek yapısal modifikasyonlara neden olabilir; ancak bu etkileşimler toplam protein miktarını değil, proteinlerin işlevsel özelliklerini ve yapısal

düzenlemelerini etkiler. Ayrıca, buğday proteinlerinin büyük bir kısmı tanenin iç bölgelerinde bulunur ve ozonun reaktivitesi genellikle yüzeye sınırlı olduğundan, tanenin içindeki proteinlere ulaşması zordur. Uygulanan ozonlama parametrelerinin (süre, doz, konsantrasyon) proteinlerin toplam miktarını değiştirecek düzeyde olmadığı, bunun yerine yüzeysel modifikasyonlara yol açtığı düşünülmektedir. Bu nedenle, ozonlama işlemi sırasında proteinlerin miktarını ölçen analitik yöntemlerde herhangi bir azalma gözlenmemiştir. Bu bulgu, ozonlama teknolojisinin protein içeriğini koruyarak buğdayın besinsel bütünlüğüne zarar vermeden uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır.

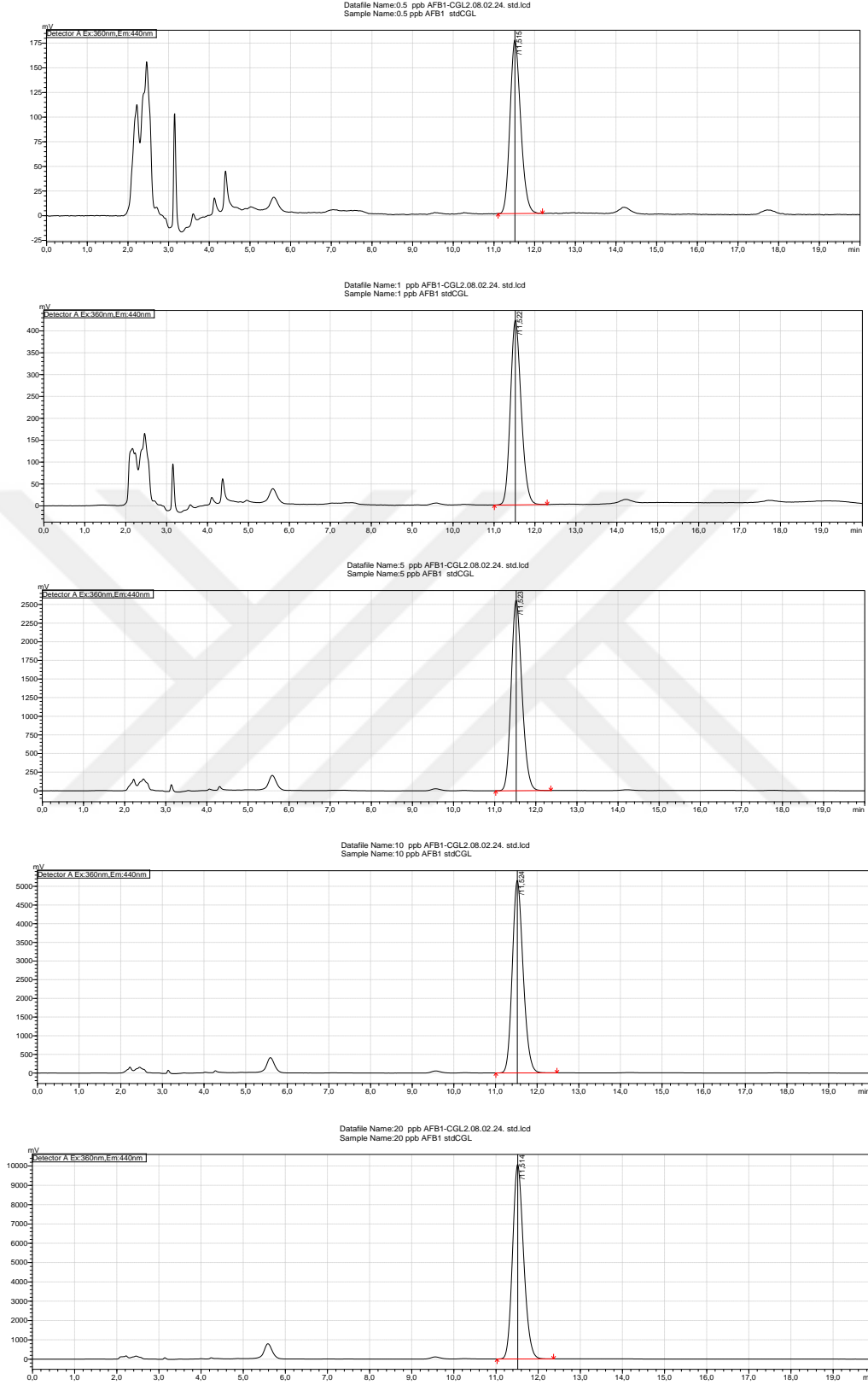
3.4. Tavsız/Tavlı/Ozonlanmış Buğday Unu ve Ekmek Analizleri

3.4.1. HPLC - AFB₁ analizi sonuçları

HPLC cihazına farklı konsantrasyonlarda AFB₁ (0,5-20 µg L⁻¹) standartları enjekte edilerek, elde edilen pik alanları kullanılarak beş farklı noktadan oluşan bir kalibrasyon eğrisi oluşturulmuştur (Şekil 3.1). Kalibrasyon eğrisinin R² değeri (veri noktaları boyunca hesaplanan Pearson çarpım moment korelasyon katsayısının karesi) >0,99 olarak tespit edilmiş ve bu değer kabul edilebilir bir doğruluk düzeyine işaret etmektedir. AFB₁ standartlarına ait kromatogramlar ise kalibrasyon eğrisinin oluşturulmasına temel teşkil etmiş olup, bu kromatogramlar Şekil 3.2 'de sunulmaktadır.



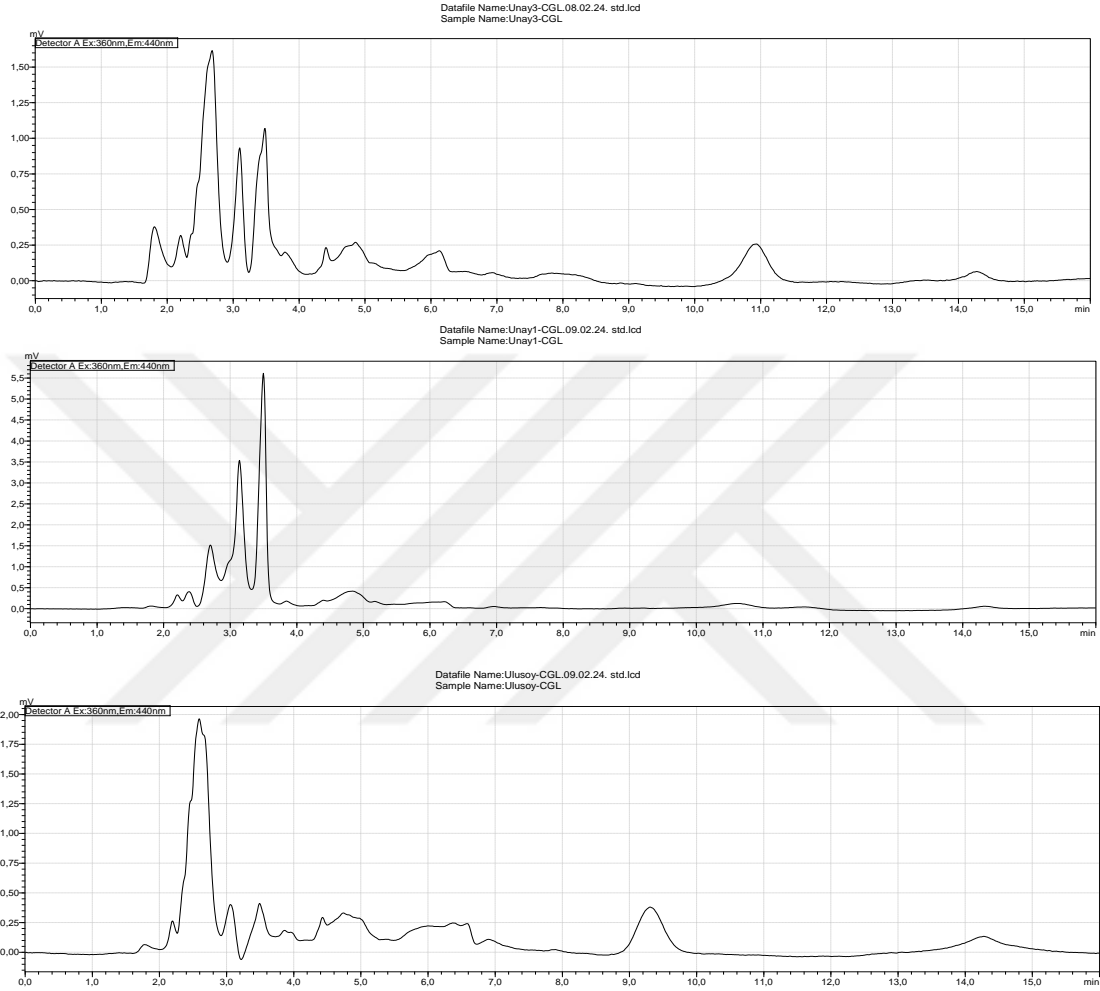
Şekil 3.1. AFB₁ standartlarına ait kalibrasyon eğrisi



Şekil 3.2. HPLC' ye enjekte edilen AFB₁ standart çözeltilerine ait (sırasıyla 0,5, 1,5,10,20 ppb) kromatogramlar

3.4.1.1. Hammadde Buğdayda AFB₁ Varlığı/Tespiti

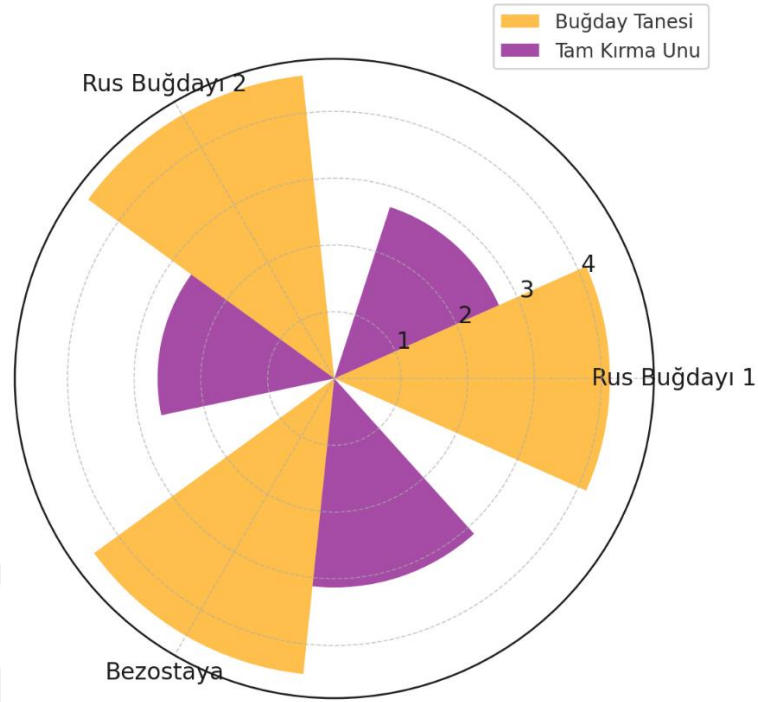
Çalışma kapsamında hammadde buğdaylarda AFB₁ saptanmamıştır. Analiz sonuçlarına ait kromatogramlar Şekil 3.3' te verilmiştir.



Şekil 3.3. Buğdaylara ait HPLC analiz kromatogram sonuçları (sırasıyla Rus Buğdayı 1, Rus Buğdayı 2 ve Bezostaya)

3.4.1.2. Buğdaylara AFB₁ Yükleme Sonuçları

Buğday tane formları ile bunlardan elde edilen tam kırma unlarına AFB₁ yüklenmesiyle (ppb) elde edilen analiz sonuçları Şekil 3.4'te verilmiştir.

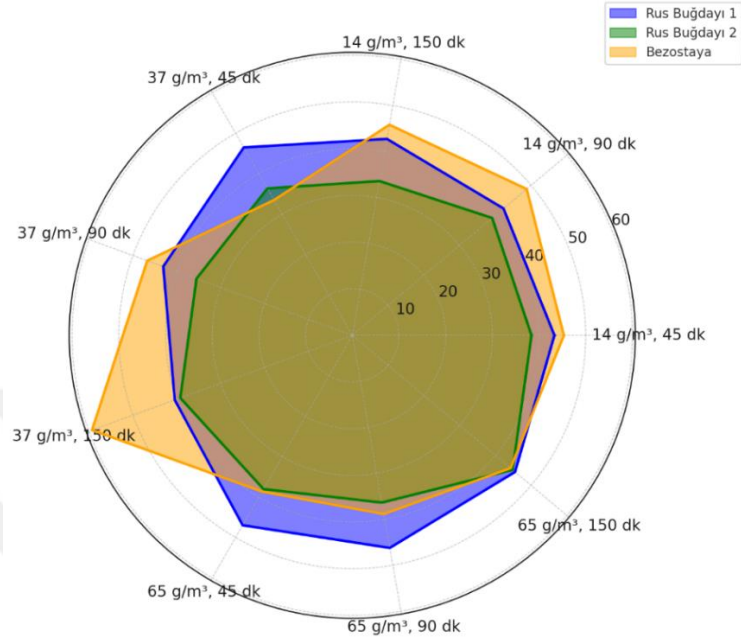


Şekil 3.4. Hammadde buğdaylara AFB₁ (ppb) yükleme sonucu

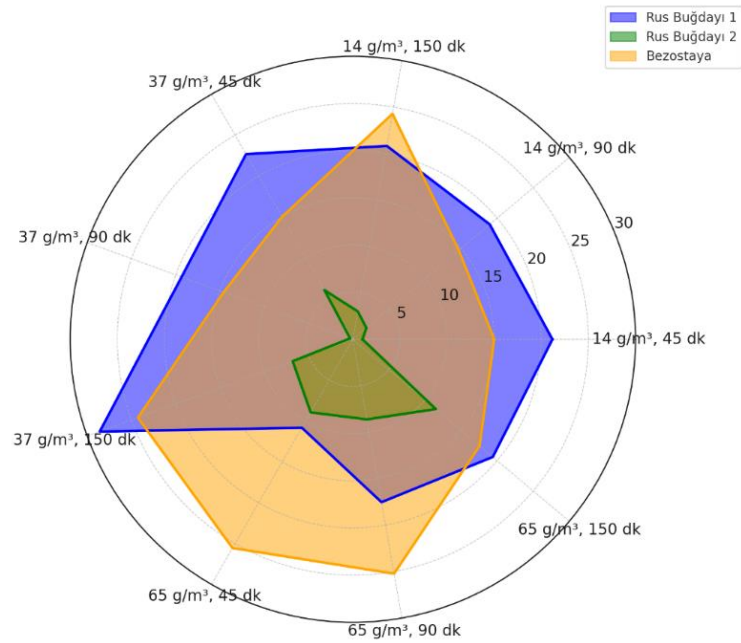
Sonuçlar değerlendirildiğinde, buğday tanesinin toksin yükleme aşamasında, tanenin çekirdek formunda olması nedeniyle toksinlerin tanenin tüm yüzeyine ve iç kısımlarına eşit şekilde dağılmadığı, dolayısıyla ozonlama işlemi sırasında homojen bir etki sağlanamadığı tespit edilmiştir. Bu durum, ozonlama işleminin etkinliğini sınırlandırmış ve dekontaminasyon sürecinde üniform bir mekanizma elde edilmesini engellemiştir. Literatürde, buğdayın tane formunda ozon oksidasyonuna ilişkin çalışmaların sınırlı olduğu, ozonlama işleminin genellikle buğdayın un formunda uygulandığı görülmektedir. Tane formundaki bu tür zorluklar nedeniyle, ozonlama prosesinin homojenliği sağlama potansiyelinin daha iyi anlaşılması ve değerlendirilmesi önem arz etmektedir.

Bu bağlamda, çalışmada, tane formundaki buğdayda karşılaşılan dağılım ve etki heterojenliğini aşmak amacıyla, aynı ozonlama prosesi tam öğütülmüş unlar üzerinde de uygulanmıştır. Tam kırma un formunda uygulanan ozonlama işlemi, tanenin homojen bir şekilde ozon gazına maruz kalmasını sağlamış ve bu süreçte elde edilen verilerin karşılaştırılmasıyla ozonlama etkinliği ve toksin giderme kapasitesi daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, buğdayın tane ve tam kırma un formlarında ozonlama uygulamalarına ilişkin bilgi boşluğunu doldurarak literatüre katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Ayrıca, tane formunda gerçekleştirilen ozonlama işlemlerinin, dekontaminasyon süreçlerinde potansiyel bir iyileştirme sağlayabileceği öngörülmektedir.

Buğdaylara ve tam kırma unlara uygulanan ozon uygulama sonucunda elde edilen mikotoksin detoksifikasyon sonuçları Şekil 3.5 ve Şekil 3.6' da verilmiştir.



Şekil 3.5. Buğday tanesinde ozon oksidasyonu sonucu %AFB₁ indirgenme oranı



Şekil 3.6. Tam kırma ununda ozon oksidasyonu sonucu %AFB₁ indirgenme oranı

Ozon uygulaması sonucunda buğday taneleri ve tam kırma unlarda elde edilen veriler değerlendirildiğinde, en yüksek detoksifikasyon oranlarının genellikle 65 ppm dozunda, 150 dakika süreyle yapılan ozon uygulamaları ile sağlandığı tespit edilmiştir. Buğday tanelerinde detoksifikasyon oranları Rus buğdayı 1 için %45,52, Rus buğdayı 2 için %44,83 ve Bezostaya çeşidi için %44,26 olarak belirlenmiştir. Tam kırma unlarda ise detoksifikasyon oranları Rus buğdayı 1'de %19,40, Rus buğdayı 2'de %11,50 ve Bezostaya çeşidinde %17,57 olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, ozon uygulamasının buğday tanelerinde tam kırma unlara kıyasla daha yüksek bir detoksifikasyon oranı sağladığını göstermektedir.

Tam kırma unlarda buğday tanesine kıyasla daha düşük detoksifikasyon oranlarının gözlenmesi, ozonlama sürecinde yüzey alanının sınırlı olması, mikotoksinlerin homojen olmayan dağılımı ve ozonun matrise nüfuz etme kapasitesinin azalması gibi faktörlerle ilişkilendirilebilir. Buğday tanesinde mikotoksinler genellikle yüzeyde veya dış katmanlarda yoğunlaştığından, ozon bu bölgelere doğrudan etki ederek daha etkili bir detoksifikasyon sağlar. Ancak tam kırma unlarda, öğütme işlemi mikotoksinlerin partiküller arasında daha homojen bir şekilde dağılmasına neden olur ve ozonun toksinlere ulaşmasını zorlaştırır. Ayrıca, un partiküllerinin daha büyük yüzey alanı, ozonun etki yoğunluğunu azaltarak toksinlerle yeterince reaksiyona girmesini engelleyebilir. Nem ve ozon reaktivitesi de bu süreçte etkili faktörlerdir; tane formunda yüzeydeki nem ozonun reaksiyon kapasitesini artırırken, un formunda nemin homojen dağılması bu etkiyi sınırlayabilir. Bunun yanı sıra, un partiküllerinde ozonun protein ve nişasta gibi diğer bileşenlerle reaksiyona girme olasılığı, mikotoksin giderme etkinliğini daha da düşürebilir. Bu sonuçlar, ozonlama işleminin etkinliğinin, buğdayın fiziksel formuna göre optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Literatür incelendiğinde, buğday tanesine ozon uygulamasıyla ilgili sınırlı sayıda çalışma olduğu, mevcut çalışmaların ise genellikle buğdayın un formuna odaklandığı tespit edilmiştir. Un formu üzerinde yapılan araştırmalarda, Sivaranjani vd. (2021) AFB₁ indirgenme oranını %57 olarak, Mir vd. (2021) %94,6 olarak, Savi vd. (2014) ise %92,9 olarak rapor etmiştir. Bu bulgular, buğdayın uygulama formunun ve ozonlama işleminin parametrelerinin (süre, konsantrasyon, gaz akış hızı) AFB₁ detoksifikasyonu üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, buğdayın farklı formlarında ozon uygulamalarının etkinliğinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi, bu alandaki bilgi eksikliğini gidermeye yönelik önemli bir katkı sağlayabilir.

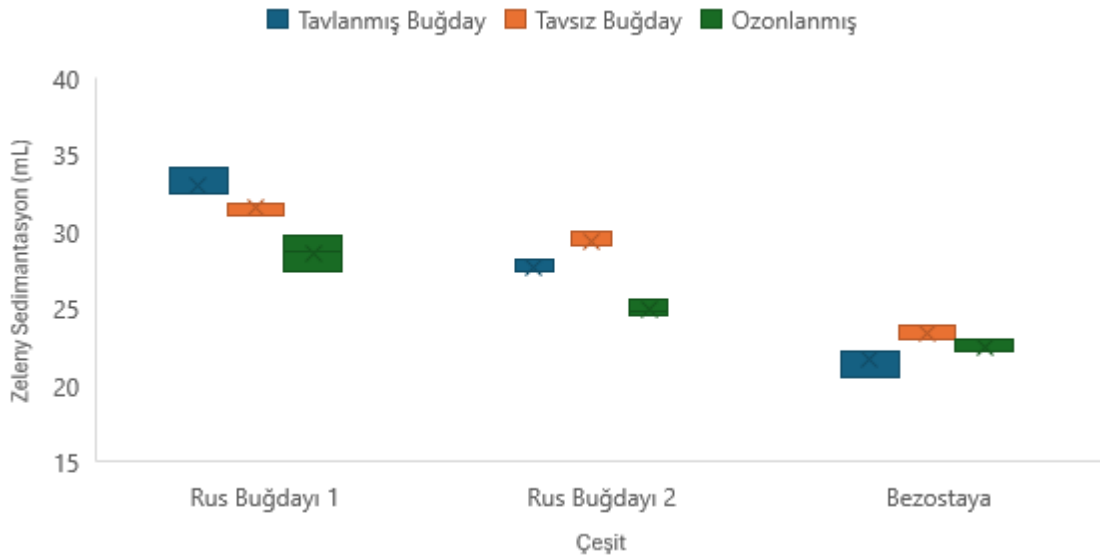
3.4.2. Zeleny sedimentasyon analizi sonuçları

Buğday unu örneklerine ait sonuçlar Tablo 3.7 ve Şekil 3.7' de verilmiştir.

Tablo 3.7. Buğday çeşidi ve yöntemle göre zeleny sedimantasyon (mL) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar karşılaştırılması

Yöntem	Buğday Çeşidi				Test İstatistiği	p	
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya	Toplam			
Tavlı	32,47 (32,47 - 34,18) ^A	27,36 (27,36 - 28,22) ^C	22,17 (20,46 - 22,17) ^F	27,36 (20,46 - 34,18) ^b	Buğday	671,600	<0,001
Tavsız	31,87 (30,98 - 31,87) ^B	29,09 (29,09 - 29,97) ^D	23 (23 - 23,89) ^G	29,09 (23 - 31,87) ^a	Yöntem	91,900	<0,001
Ozonlu	28,71 (27,42 - 29,71) ^{CD}	24,72 (24,55 - 25,58) ^E	22,13 (22,13 - 22,98) ^F	24,72 (22,13 - 29,71) ^c	Buğday x Yöntem	362,900	<0,001

*Robust ANOVA; Ortanca (minimum-maksimum); ^{a-c}: Aynı harfe sahip yöntemler arasında fark yoktur. ^{a-c}: Aynı harfe sahip buğday çeşidi arasında fark yoktur. ^{A-G}: Aynı harfe sahip etkileşimler arasında fark yoktur.



Şekil 3.7. Buğday çeşidi ve yöntemle göre zeleny sedimantasyon (mL) değerleri

Bu çalışmada, buğday çeşitinden bağımsız olarak yöntemin ana etkisinin de Zeleny sedimantasyon değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı olduğu tespit edilmiştir ($p < 0,001$). Tavlanmış buğday için ortanca Zeleny sedimantasyon değeri 27,36 mL, tavsız buğday için 29,09 mL ve ozonlanmış buğday için 24,72 mL olarak ölçülmüştür. Üç yöntem arasında da anlamlı farklılıklar olduğu belirlenmiştir.

Buna ek olarak, buğday çeşidi ve uygulanan yöntemin etkileşiminin Zeleny sedimantasyon değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür ($p < 0,001$). En yüksek etkileşim değeri, 32,47 mL ile Rus Buğdayı 1 ve tavlanmış yöntem arasında gözlemlenirken, en düşük etkileşim değeri 22,13 mL ile Bezostaya buğday çeşidi ve ozonlanmış yöntem arasında elde edilmiştir.

Her bir buğday çeşidi için yöntemlerin Zeleny sedimentasyon değerleri açısından karşılaştırılması sonucunda, Rus Buğdayı 1 çeşidinde en yüksek ortanca değer tavlı yöntemde, en düşük ortanca değer ise ozonlu yöntemde belirlenmiştir (ozonlama ile %11,57 azalma). Rus Buğdayı 2 çeşidinde ise tüm yöntemler birbirinden farklılık göstermiş; en yüksek ortanca değer tavsız yöntemde, en düşük ortanca değer ozonlu yöntemde tespit edilmiştir (ozonlama ile % 9,64 azalma).

Bezostaya çeşidinde, tavlı ve ozonlu yöntemlerin Zeleny sedimentasyon değerleri birbirine yakın bulunmuş ancak tavsız yöntemden farklılık göstermiştir. Bu çeşit için en yüksek ortanca değer tavsız yöntemde, en düşük ortanca değer ise ozonlu yöntemde gözlenmiştir.

Bu bulgular, hem buğday çeşitleri hem de uygulanan yöntemlerin Zeleny sedimentasyon değerleri üzerindeki etkisini ortaya koyarak, uygun yöntem ve çeşit seçiminin önemini vurgulamaktadır.

Zeleny sedimentasyon testi, buğday ununun hem gluten miktarını hem de gluten kalitesini değerlendiren kritik bir kalite parametresidir. Özellikle ekmekçilik alanında, unun protein kalitesini ve su absorpsiyon kapasitesini ölçmede yaygın olarak kullanılan bu test, unun ekmek üretiminde arzu edilen özellikleri sağlayıp sağlamayacağını öngörmek açısından önem taşır. Testin uygulanması sırasında, buğday ununa su ve laktik asit çözeltisi eklenerek un proteinlerinin şişme derecesi ölçülür; bu süreç sonunda çökelti miktarı belirlenerek unun gluten miktarı ve kalitesi hakkında bilgi edinilir. Zeleny sedimentasyon testinde yüksek değerler, gluten miktarı yüksek ve kaliteli unlarda gözlemlenmektedir. Bu unların protein partikülleri fazla şiştiğinden, yoğunluk azalır ve çökeltme hızı yavaşlar, böylece sedimentasyon değeri yüksek çıkar. Bu durum, buğdayın daha yüksek gluten içeriğine ve kaliteli bir gluten yapısına sahip olduğunu göstermektedir. Ekmek üretiminde bu özellikler, daha iyi kabarma kapasitesi, hamur dayanıklılığı, ekmek hacmi ve gözenek yapısı gibi istenilen nitelikleri sağlayarak kaliteyi artırır. Literatürde, Zeleny sedimentasyon değeri 36 mL'nin üzerindeki buğday unlarının çok iyi gluten kalitesine sahip olduğu, 25-36 mL arası iyi, 15-24 mL arası zayıf ve 15 mL'nin altındaki değerlerin ise düşük kaliteli unları işaret ettiği belirtilmektedir (Alemu vd., 2021; Bulut, 2012; Çeliker, 2019; Kibar, 2015; Mecitoğlu Güçbilmez vd., 2019). Protein kalitesini belirleyen daha çok genetik faktörlerden etkilenen kriter olan zeleny sedimentasyon değeri kaliteli buğdaylarda yüksek çıkmaktadır (Menderis, 2006).

Ozon oksidasyonu ile birlikte kuvvetli ve orta kuvvetli buğday çeşitlerinde ozon, glutenin yapısında bulunan disülfid (S-S) bağları ve serbest sülfidril (-SH) grupları gibi bağları okside eder. Disülfid bağlarının bozulması ve serbest sülfidril gruplarının yapısal değişimi, glutenin elastik ağ yapısını zayıflatır ve proteinlerin su tutma kapasitesini azaltır. Bu farklılığın, Zeleny sedimentasyon değerlerinin buğday çeşitleri arasındaki genetik faktörler, yetiştirme koşulları ve uygulanan gübreleme teknikleri gibi çeşitli etmenlerden etkilenmesinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır (Gummadov, 2012).

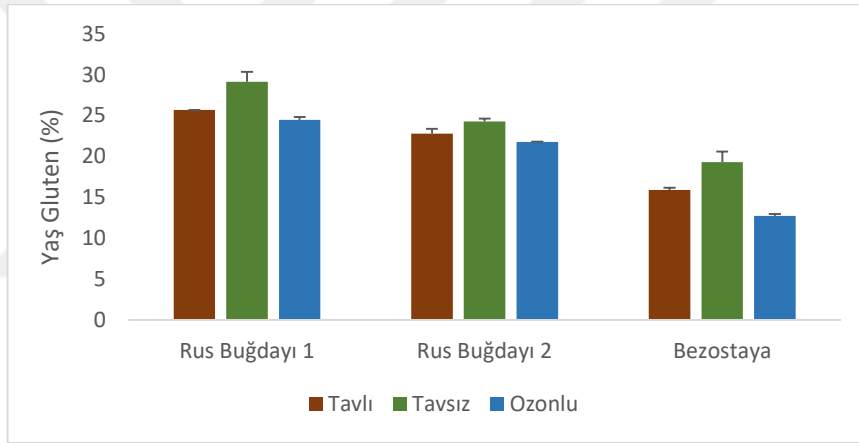
3.4.3. Yaş gluten analizi sonuçları

Yaş gluten (%) sonuçları Tablo 3.8 ve Şekil 3.8' da verilmiştir.

Tablo 3.8. Buğday çeşidi ve yönetime göre yaş gluten (%) değerine tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar iki yönlü varyans analizi

Yöntem	Buğday çeşidi				F	p	η^2	
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya	Toplam				
Tavlı	25,67 ± 0,02 ^B	22,8 ± 0,58 ^{CD}	15,9 ± 0,28 ^F	21,46 ± 4,36 ^b	Buğday çeşidi	593,58	<0,001	0,985
Tavsız	29,14 ± 1,2 ^A	24,26 ± 0,38 ^{BC}	19,3 ± 1,29 ^E	24,23 ± 4,36 ^a	Yöntem	111,384	<0,001	0,925
Ozonlu	24,46 ± 0,38 ^{BC}	21,78 ± 0,04 ^D	12,72 ± 0,26 ^G	19,66 ± 5,33 ^c	Buğday çeşidi*Yöntem	8,056	0,001	0,642

F: Varyans analizi test istatistiği; η^2 : Kısmi Eta Kare; R²: %98,77; Adj. R²: %98,22; Ortalama±standart sapma; ^{a-c}: Aynı harfe sahip yöntemler arasında fark yoktur. ^{a-c}: Aynı harfe sahip buğday çeşidi arasında fark yoktur. ^{A-G}: Aynı harfe sahip etkileşimler arasında fark yoktur.



Şekil 3.8. Buğday çeşidi ve yönetime göre yaş gluten (%) değerleri

Bu çalışmada, buğday çeşidinin yaş gluten değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir ana etkiye sahip olduğu belirlenmiştir ($p < 0,001$). Her bir buğday çeşidi ayrı ayrı değerlendirildiğinde, Rus Buğdayı 1 ve Rus buğdayı 2 çeşidinde tavlı ve ozonlu yöntemlerin yaş gluten (%) değerleri açısından benzerlik gösterdiği, ancak tavsız yöntemin bu yöntemlerden farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Bezostaya çeşidinde ise, ozonlama işlemi ile birlikte yaş gluten oranında %20 oranında azalma tespit edilmiştir.

Ek olarak, buğday çeşidi ve yöntem etkileşiminin yaş gluten değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olduğu saptanmıştır ($p = 0,001$). En yüksek etkileşim değeri, %29,14 ile tavsız Rus Buğdayı 1, en düşük etkileşim değeri % 12,72 ile ozonlu Bezostaya çeşidinden elde edilmiştir. Bu bulgular, hem buğday çeşidinin hem de uygulanan yöntemin yaş gluten değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Bu veriler doğrultusunda, ozonlama işleminin yaş gluten oranı üzerinde Rus Buğdayı 1 ve Rus Buğdayı 2 çeşitlerinde anlamlı bir etkisi olmadığı, ancak Bezostaya çeşidinde ozon oksidasyonu ile yaş gluten oranında anlamlı bir azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.

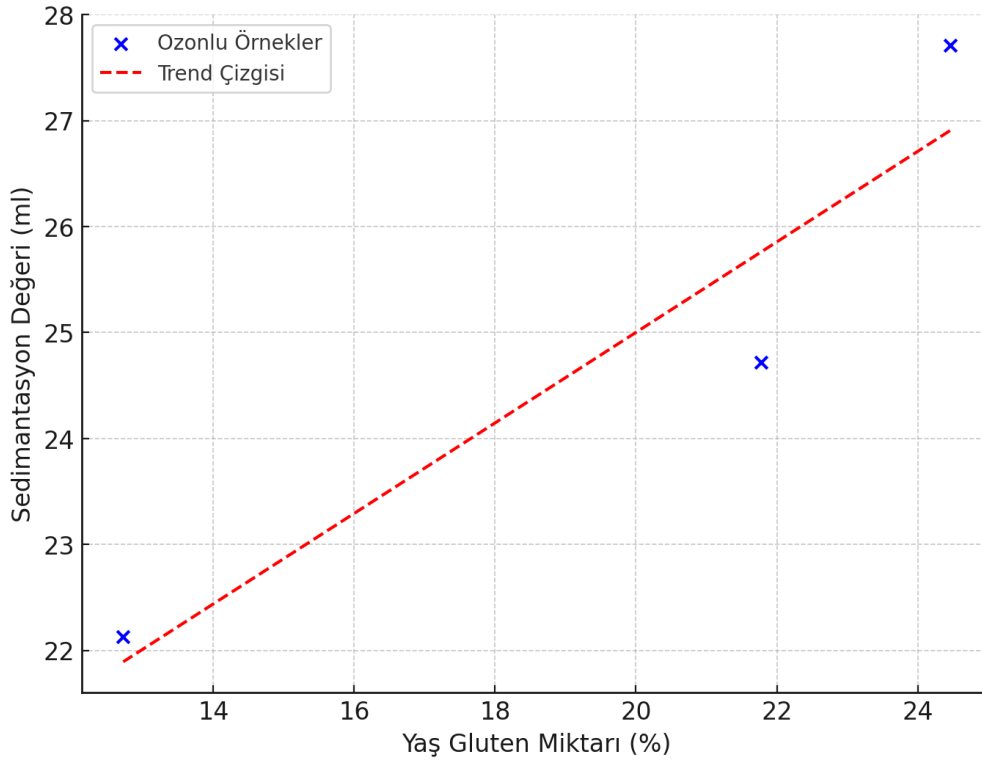
Ozon oksidasyonunun güçlü gluten yapısına sahip olan Rus Buğdayı 1 ve orta dereceli gluten yapısına sahip olan Rus Buğdayı 2 üzerinde protein yapısından dolayı kayda değer bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir. Ancak, daha zayıf bir protein yapısına sahip olan Bezostaya çeşidinde ozonlama işleminin yaş gluten oranında anlamlı bir azalmaya yol açması, bu durumun buğdayın protein yapısından kaynaklandığını düşündürmektedir. Literatürde, ozonlama işleminin buğday unundaki yaş gluten miktarı üzerindeki etkisi konusunda farklı sonuçlar elde edilmiş olup, bu sonuçların kullanılan buğday çeşidi ve uygulanan ozon oksidasyonunun parametrelerine bağlı olarak değişiklik gösterdiği çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir. Örneğin, Obadi vd. (2018), Elgün ve Bilgiçli (2019) ile Demir vd. (2011) buğday ununun ozonlanması ile yaş gluten miktarında artış gözlemlerken, Mei vd. (2016) buğday ununun ozonlanması sonucunda yaş gluten miktarında azalma tespit etmiştir. Genel olarak, literatür incelendiğinde ozonlama işleminin çoğunlukla buğdayın un formuna uygulandığı, tane formuna yönelik çalışmaların ise sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu tez çalışmasında, bu eksikliği gidermek amacıyla buğdayın tane formuna uygulanan ozonlama işleminin yaş gluten miktarı üzerindeki etkisi incelenmiş ve literatüre yeni veriler kazandırılması hedeflenmiştir.

Elde edilen bulgular, buğday çeşitlerinin un kalitesi ve endüstriyel kullanım alanları açısından önemli ipuçları sunmakta ve özellikle ekmek yapımı gibi yaş gluten miktarının kritik olduğu ürünlerde tercih edilecek buğday çeşidi seçiminde yol gösterici olabilecek niteliktedir (Liu vd., 2025; Parenti vd., 2021; Wang vd., 2015; Zhang vd., 2022).

Buğdayda yaş gluten miktarı, unun kalitesini ve buğdayın endüstriyel kullanım alanlarını belirleyen en önemli protein parametrelerinden biridir. Yaş gluten, su ile karıştığında esnek ve yapışkan bir ağ oluşturan protein komplekslerinden oluşur ve esas olarak gliadin ve glutenin proteinlerinden meydana gelir. Gliadin hamurun viskozite ve şekil alabilirliğini sağlarken, glutenin elastikiyeti artırır ve hamurun gaz tutma kapasitesine katkıda bulunur. Bu özellikler, özellikle ekmek yapımında, hamurun kabarma kapasitesini ve pişirme sonrası ürünün hacim ve gözenek yapısını doğrudan etkiler (Lafiandra ve Shewry, 2022; Ooms ve Delcour, 2019; Ortolan ve Steel, 2017; Yu vd., 2024). Buğday unundaki yaş gluten miktarı, unun toplam protein içeriği ile doğrudan ilişkilidir ve bu özellik, buğdayın fırıncılık ürünleri, makarna ve erişte gibi çeşitli gıda ürünlerinde biyofiziksel işlevselliğini belirleyen temel faktörlerden biridir (Ooms ve Delcour, 2019; Wang vd., 2015). Gluten kovalent ve kovalent olmayan bağ içermektedir. Kovalent olmayan bağlar; hidrojen, iyonik ve hidrofobik bağlar hamur oluşumu mekanik enerji ile birlikte viskoelastik özelliklere sahip kohezif hamur eldesine katkı sağlamaktadır (Ferrari vd., 2014; Ortolan ve Steel, 2017). Yoğurma işlemi sırasında gluten proteinleri, su ile birleşerek hidrojen bağları oluşturur ve bu ağ, fermantasyon sürecinde mayanın ürettiği karbondioksit gazını hapseder. Yani gluten polimerleri arasında bulunan didülfür (SS) bağları bu açıdan

önemlidir. Hamur karışma esnasında SH-SS bağlarına değişimi ile gluten agregatlarının moleküler ağırlığı artmaktadır ve üç boyutlu gluten ağının oluşumu gerçekleşmektedir. Sonuç olarak, hamur mukavemeti ve üç boyutlu gluten ağı, glutenin yapısındaki disülfür bağı ve sülfidril bağlarının düzenine ve sayısına bağlı olarak tiyol-disülfür değişim reaksiyonundan kaynaklanmaktadır. Yaş gluten miktarı arttıkça glutenin gaz tutma kapasitesi ve elastikiyeti, ekmeğin iç yapısının yumuşak, gözenekli ve hacimli olmasını sağlarken, kabuğun da stabilitesini koruyarak ekmeğin formunun pişirme sonrasında bozulmasını engeller (Çeliker, 2019; Della Valle vd., 2022; Gummadov, 2012; Liu vd., 2025; Ooms ve Delcour, 2019; Parenti vd., 2021; Şahin, 2012; Tenikecier ve Öner, 2018; Wang vd., 2015). Yaş glutenin miktarı ve kalitesi, bu nedenle, unun kalitesini, işlenebilirliğini ve ürünlerin son kalitesini doğrudan etkileyerek gıda endüstrisinde buğdayın değerini belirleyen başlıca faktörlerden biri olarak öne çıkar (Daniela vd., 2023; Lafiandra ve Shewry, 2022; Ooms ve Delcour, 2019; Parenti vd., 2021; Sun vd., 2023; Wang vd., 2015).

Yapılan çalışma kapsamında, örneklerin Zeleny sedimentasyon değerleri ile yaş gluten miktarları arasında pozitif yönde anlamlı bir pozitif yönde korelasyon ($R^2 = 0,94$) olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, sedimentasyon değerleri ile yaş gluten miktarlarının birbirleriyle doğrudan ilişkili olduğunu ve her iki parametrenin de aynı yönde değişim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, buğday proteinlerinin yapısal özelliklerinin hem sedimentasyon hem de yaş gluten miktarını etkileyen temel bir faktör olduğunu ve bu iki parametrenin, özellikle ozonlama gibi dış etkenlere karşı benzer tepkiler verdiğini göstermektedir (Gozé vd., 2016). Bu bağlamda, sedimentasyon değeri ve yaş gluten miktarındaki değişimlerin, buğdayın protein kalitesi ve yapısal bütünlüğü hakkında önemli bilgiler sunduğu ifade edilebilir. İlgili korelasyonu görselleştiren grafik, Şekil 3.9.'da sunulmuş olup, bu grafik üzerinden pozitif korelasyonun kuvveti ve istikrarı açık bir şekilde gözlemlenebilmektedir.



Şekil 3.9. Zeleny sedimentasyon ve yaş gluten miktarı korelasyon grafiği

Yukarıdaki korelasyon grafiği, ozon uygulanmış buğday örneklerinde yaş gluten miktarı ile sedimentasyon değerleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Grafik, bu iki parametre arasında pozitif bir ilişki olduğunu, ancak ozon uygulamasına bağlı olarak genel bir azalma eğilimi bulunduğunu vurgulamaktadır. Trend çizgisi, bu eğilimi daha belirgin hale getirmektedir.

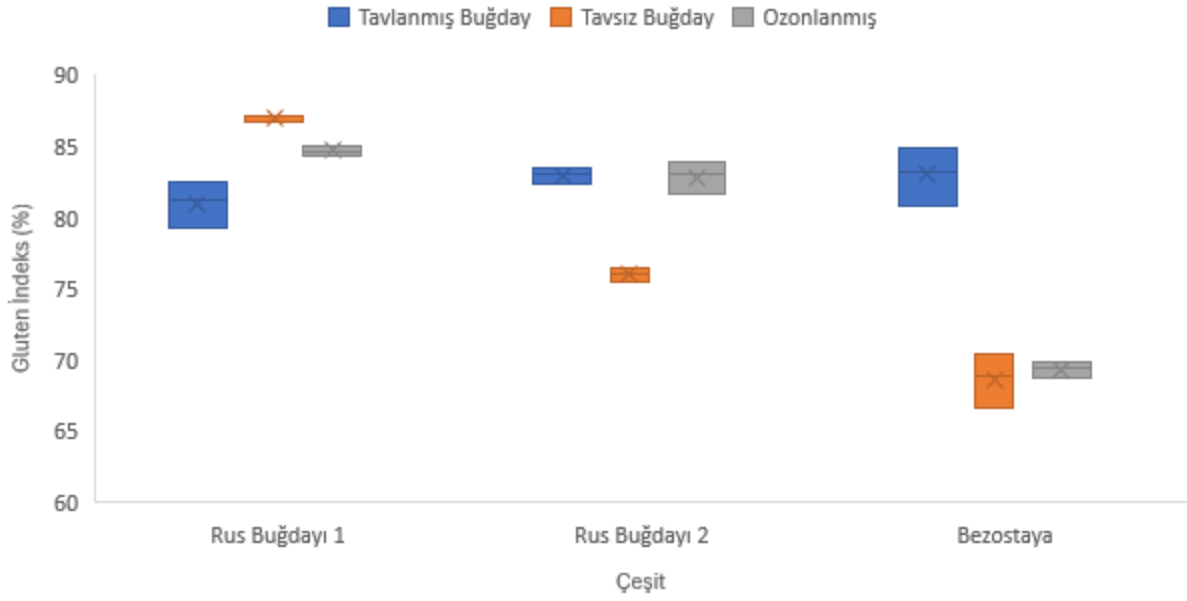
3.4.4. Gluten indeks analizi sonuçları

Buğdaylara ait iki yönlü varyans analiz sonuçları ve interaksiyon grafiği sırasıyla Tablo 3.9 ve Şekil 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.9. Buğday çeşidi ve yöntemine göre gluten indeks (%) değerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Yöntem	Buğday Çeşidi				F	p	
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya	Toplam			
Tavli	81,18 ^A	82,99 ^D	83,22 ^{ACD}	82,46 ^b	Buğday	283,700	<0,001
Tavsız	87,11 ^B	76 ^E	68,86 ^F	76 ^c	Yöntem	65,700	<0,001
Ozonlu	84,65 ^C	83 ^D	69,5 ^F	83 ^a	Buğday*Yöntem	1656,600	<0,001

*Robust ANOVA; Ortanca; ^{a-c}: Aynı harfe sahip yöntemler arasında fark yoktur. ^{a-c} : Aynı harfe sahip buğday çeşidi arasında fark yoktur. ^{A-G}: Aynı harfe sahip etkileşimler arasında fark yoktur.



Şekil 3.10. Buğday x yöntem gluten indeks (%) değerinin ortanca değerleri

Yöntem gözetmeksizin buğday çeşidi ana etkisi Gluten indeksi (%) değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,001$). Rus buğdayı 1'e ait ortanca Gluten indeksi (%) değeri 84,65, Rus Buğdayı 2'nin 82,36 ve Bezostaya ortanca Gluten indeksi (%) değeri 69,91 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda kuvvetli buğdayda en yüksek zayıf buğdayda ise en düşük gluten indeks değeri verilerinin elde edildiği söylenebilir.

Rus Buğdayı 1 çeşidinde uygulanan yöntemler arasında gluten indeksi açısından anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir. Bu çeşitte, gluten indeksi ortanca değeri en yüksek olan yöntem tavsız yöntem iken, en düşük ortanca değer tavlı yöntemde elde edilmiştir. Kuvvetli buğday Rus buğdayı 1'e ozon uygulamasının gluten indeks değerini önem düzeyinde arttırdığı (%4,27) tespit edilmiştir.

Rus Buğdayı 2 çeşidinde tavlı ve ozonlu yöntemler benzer sonuçlar göstermiş olup, tavsız yöntem bu iki yöntemden anlamlı şekilde farklılık göstermektedir. Bu çeşitte, gluten indeksi ortanca değeri en yüksek olan yöntem ozonlu yöntem iken, en düşük ortanca değer tavsız yöntemde kaydedilmiştir. Orta kuvvetli Rus buğdayı 2'ye ozon uygulamasının gluten indeks değerini önem düzeyinde değiştirmedeği belirlenmiştir.

Bezostaya çeşidinde ise tavsız ve ozonlu yöntemlerin benzer olduğu, ancak tavlı yöntemin bu yöntemlerden farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Bezostaya çeşidinde, gluten indeksi ortanca değeri en yüksek olan yöntem tavlı yöntem, en düşük ortanca değer ise tavsız yöntemde tespit edilmiştir. Ozon oksidasyonunun zayıf buğdayın gluten indeks değeri üzerindeki etkisinin ise olumsuz yönde olduğu, gluten indeks değerini %16,48 oranında azalttığı tespit edilmiştir.

Bu bulgular, buğday çeşitleri ve kullanılan yöntemlerin gluten indeksi değerleri üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymakta ve buğday çeşitliliği ile yöntem seçiminin buğday kalitesine olan katkısını vurgulamaktadır. Özellikle ozon uygulamasının, Rus Buğdayı 1 çeşidinde gluten indeksini olumlu yönde etkilediği, buna karşın Bezostaya çeşidinde olumsuz sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Bu durumun, Bezostaya çeşidinin zayıf buğday olarak sınıflandırılmasına neden olan yapısal özelliklerinden, özellikle de gluten yapısındaki disülfür bağlarının zayıflığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Disülfür bağlarının bu zayıflığı, ozon uygulamasına karşı daha hassas bir yapı oluşturmakta ve bu nedenle gluten indeksinin olumsuz etkilenmesine yol açmaktadır.

Bu bulgular, literatürde buğday ununun ozonlanması üzerine yapılan bazı çalışmalarda uyum göstermektedir (Tenikecier ve Öner, 2018; Semiz, 2021; Yiğit vd., 2019; Zhang vd., 2021). Ozon oksidasyonunun gluten indeks değerini artırmasının temel nedeni, ozonun güçlü bir oksidan olarak gluten yapısındaki proteinler, özellikle gliadin ve glutenin, arasında kimyasal bağların oluşumunu teşvik etmesidir.

Gluten indeksi, ekmeklik buğdaylarda gluten kalitesini değerlendirmek amacıyla kullanılan önemli bir parametredir ve yaş glutenin özel bir elekten geçirilmesiyle elde edilen sonuçlara dayanarak belirlenir. Bu analiz, hamurdaki glutenin elastikiyet ve mukavemet gibi reolojik özelliklerini doğrudan etkileyen glutenin kalitesini ölçmek için uygulanır. Gluten İndeksi, yaş gluten içeriğinin elekten geçmeyen (üstte kalan) kısmının, elekten geçen (altta kalan) kısmına oranlanmasıyla hesaplanır. Elek üstünde kalan gluten miktarı, glutenin yapısal bütünlüğünü ve mukavemetini ifade ederken; elek altına geçen glutenin fazla olması ise daha düşük kaliteye işaret etmektedir (Eryaşar, 2011; Koç, 2023). Dolayısıyla, gluten indeksinin yüksek olması, hamurun işlenebilirliğini ve ekmek yapımı için uygunluğunu gösterir (Kibar, 2015; Semiz, 2021). Literatürde yaş gluten miktarının, zeleny sedimentasyon değeri ve protein miktarı ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir; ancak gluten indeks değerinin protein miktarı, zeleny sedimentasyon değeri ve ekmek hacmi gibi kalite parametreleriyle anlamlı bir ilişki göstermemesi nedeniyle, bu değer tek başına buğday kalitesini belirlemede yeterli bir ölçüt olarak kullanılamayacağı ifade edilmiştir (Bulut, 2012). Başka bir çalışmada ise yaş ve kuru gluten ile gluten indeks değerlerinin ekmek kalitesinin belirlenmesinde sınırlı bir etkiye sahip olduğu ortaya konulmuştur. Bu nedenle, son ürünün istenen özelliklere sahip olmasını sağlayacak protein ve gluten kalitesini değerlendirebilmek için ekmek hacmi ile pozitif bir ilişki gösteren Zeleny sedimentasyon değerinin belirlenmesi önem taşımaktadır (Gélinas ve McKinnon, 2011; Hrušková ve Faměra, 2003).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, gluten indeks değerinin genetik faktörler, gübreleme teknikleri ve yetiştirme koşulları gibi çevresel faktörlerden etkilendiğini göstermiştir. Örneğin, azotlu gübrelemenin buğdayın gluten miktarını ve kalitesini artırarak gluten indeks değerini olumlu yönde etkilediği rapor edilmiştir (Okur, 2017). Bu da ekmekçilikte yüksek kaliteli ürün elde

etmek için buğday yetiştirme ve işleme süreçlerinin optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Ozon uygulaması, gluten proteinlerinde bulunan sülfhidril (-SH) gruplarını okside ederek disülfür (S-S) bağlarının oluşumunu artırır. Bu kimyasal dönüşüm, gluten ağının daha dayanıklı ve elastik bir yapı kazanmasına katkı sağlar. Sonuç olarak, glutenin fiziksel özellikleri iyileşir ve gluten indeksi değeri yükselir. Bu mekanizma, özellikle protein yapısının daha güçlü ve stabil olduğu sert buğday çeşitlerinde daha belirgin bir şekilde görülmektedir.

Bununla birlikte, ozon oksidasyonunun etkisi buğday çeşidine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Örneğin, zayıf buğday çeşitlerinde (Bezostaya), glutenin doğal yapısındaki disülfür bağlarının azlığı veya kırılabilirliği nedeniyle ozon oksidasyonu, sınırlı bir olumlu etki yaratabilir ya da olumsuz sonuçlara yol açabilir.

Bu durum, ozon uygulamasının gluten indeksine olan etkisinin yalnızca oksidasyonun şiddetine değil, aynı zamanda buğday çeşidinin protein yapısal özelliklerine de doğrudan bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, ozon işlemlerinin etkili bir şekilde optimize edilmesi için buğday çeşidine özel yaklaşımlar geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Literatürde, sedimantasyon değeri ve yaş gluten miktarının buğdayın protein içeriği ile güçlü bir doğrusal ilişki gösterdiği belirtilmiştir. Ancak gluten indeksinin bu ilişkiyi sergilemediği ve bu nedenle, buğdayın genel kalitesinin değerlendirilmesinde gluten indeksinin tek başına yeterli bir parametre olmadığı vurgulanmıştır (Okur, 2017). Bu durum, buğday kalitesinin çok boyutlu bir yaklaşımla değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

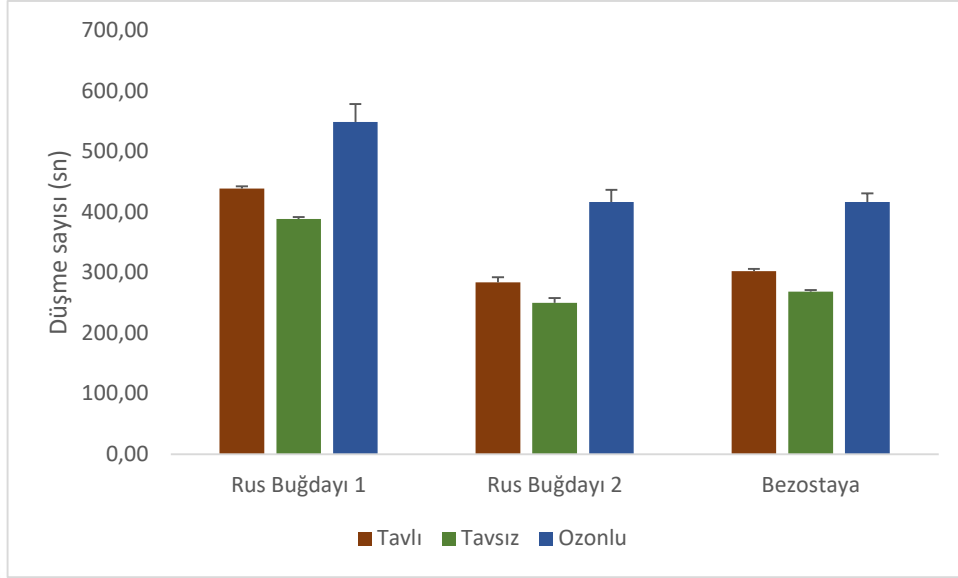
3.4.5. Düşme sayısı analizi sonuçları

Buğday ve yöntemlere ait düşme sayısı iki yönlü varyans analiz tablosu ve interaksiyon grafiği sırasıyla Tablo 3.10 ve Şekil 3.11'de verilmiştir.

Tablo 3.10. Buğday çeşidi ve yonteme göre düşme sayısı (sn) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Yöntem	Buğday çeşidi					F	p	η^2
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya	Toplam				
Tavlı	438,64 ± 3,85	283,56 ± 8,81	302,42 ± 3,45	341,54 ± 73,46 ^c	Buğday çeşidi	302,494	<0,001	0,971
Tavsız	388,33 ± 3,41	250,05 ± 7,74	268,23 ± 3,06	302,2 ± 65,23 ^b	Yöntem	333,034	<0,001	0,974
Ozonlu	548,39 ± 25	416,4 ± 20	416,57 ± 14	460,45 ± 68,68 ^a	Buğday çeşidi*Yöntem	0,884	0,493	0,164

F: Varyans analizi test istatistiği; η^2 : Kısmi Eta Kare; R²: %98,61; Adj. R²: %97,99; Ortalama±standart sapma; ^{a-c}: Aynı harfe sahip yöntemler arasında fark yoktur. ^{a-b}: Aynı harfe sahip buğday çeşidi arasında fark yoktur.



Şekil 3.11. Buğday çeşidi ve yöntemine göre düşme sayısı (sn) interaksiyon grafiği

Yöntem gözetmeksizin buğday çeşidi ana etkisi düşme sayısı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,001$). Rus buğdayı 1’de düşme sayısına ait ortalama değer 458,45 sn, Rus buğdayı 2’de 316,67 sn ve Bezostaya’da düşme sayısına ait ortalama değer 329,07 sn olarak elde edilmiştir. Rus buğdayı 2 ve Bezostaya düşme sayısı birbirine benzer iken Rus buğdayı 1’den farklıdır.

Buğday çeşidi gözetmeksizin yöntem ana etkisi düşme sayısı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,001$). Tavlanmış buğdayda düşme sayısına ait ortalama değer 341,54 sn, tavsız buğdayda 302,2 sn ve Ozonlanmış yöntemde düşme sayısına ait ortalama değer 460,45 sn olarak elde edilmiştir. Tüm yöntemler arasında fark vardır.

Buğday çeşidi ve yöntem etkileşimi düşme sayısı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p = 0,493$). En yüksek etkileşim değeri 438,64 sn ile tavlı Rus buğdayı 1 iken en düşük etkileşim değeri 250,05 sn ile tavsız Rus buğdayı 2 etkileşiminde elde edilmiştir.

Rus Buğdayı 1 çeşidinde, kuvvetli yapısı nedeniyle düşme sayısı ortalamasının en yüksek olduğu yöntem ozonlu yöntemdir (%25,02 artış). Ozon uygulaması, gluten yapısını ve nişasta stabilitesini destekleyerek düşme sayısını artırmıştır. Buna karşın, tavsız yöntemde en düşük düşme sayısı ortalaması elde edilmiştir. Bu, yöntemin gluten ve nişasta üzerindeki daha sınırlı etkisine bağlanabilir.

Benzer şekilde, orta kuvvetli yapıya sahip olan Rus Buğdayı 2 çeşidinde de benzer bir eğilim gözlenmiştir (%16,52 artış). Düşme sayısı ortalamasının en yüksek olduğu yöntem ozonlu yöntemdir. Bu yöntemdeki artış, orta kuvvetli buğdaylarda gluten yapısının kısmen

güçlenmesine ve nişasta stabilitesinin iyileşmesine bağlanabilir. Tavsız yöntem ise düşme sayısı açısından en düşük ortalama değeri vermiştir.

Zayıf buğday olarak sınıflandırılan Bezostaya çeşidinde, ozonlu yöntemin düşme sayısını artırdığı (%37,7 artış) tespit edilmiştir.

Bu sonuçlar, ozon uygulamasının düşme sayısı üzerindeki olumlu etkisini ortaya koymakta ve bu etkinin, kullanılan yöntemin nişasta enzim aktivitesine olan etkisiyle ilişkilendirilebileceğini göstermektedir.

Çalışma neticesinde düşme sayısı değerleri incelendiğinde, tüm buğday çeşitlerinde ozonlu yöntemle elde edilen ortalama değerlerin en yüksek olduğu, tavsız yöntemde ise en düşük ortalama değerlere ulaşıldığı tespit edilmiştir.

Ekmeklik buğday için kalite değerlendirmesinde büyük öneme sahip olan düşme sayısı testi, buğday ve unun alfa-amilaz aktivitesini değerlendirerek nişasta yapısındaki enzimatik değişiklikleri belirleyen kritik bir yöntemdir. Bu test, özellikle çimlenmiş buğday tanelerinde artan alfa-amilaz aktivitesini tespit eder ve buğdayın çimlenme durumuna ilişkin bilgi sağlar. düşme sayısı testi, unun viskozitesini ölçmek suretiyle alfa-amilaz aktivitesini belirler ve bu sayede ekmek hamurunun su absorpsiyonu ve fermantasyon süreci üzerinde doğrudan etkisi olan kalite parametrelerini sağlar. Özellikle değirmencilik ve fırıncılık sektörlerinde yaygın olarak kullanılan düşme sayısı testinin değerinin düşük olması durumunda yüksek alfa-amilaz aktivitesine işaret ederek ekmek hamurunda elastikiyet kaybı, hacim düşüşü ve yapışkan iç yapıya yol açan zayıf bir yapı oluşabileceğini gösterir. Ekmek yapımında düşme sayısı değerinin 200- 250 sn' nin olması ideal kabul edilirken, düşme sayısı değeri 300 sn üzerinde olması amilaz aktivitesinin düşük olduğunu gösterir (Aydar, 2022; Bulut, 2012; Menderis, 2006; Özerdem, 2018). Düşme sayısı testinin önemi sadece ekmeklik buğday ununun kalitesini değerlendirmekle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda FN değeri yüksek olan buğdayların nişasta stabilitesini koruyarak pişirme kalitesini arttırdığı için makarna ve diğer unlu mamuller açısından da kritiktir İklim değişikliği ve çevresel stres faktörlerinin, özellikle kuraklık ve sıcaklık artışlarının buğday tanelerinde çimlenmeyi tetikleyerek alfa-amilaz aktivitesini artırdığı ve düşme sayısı değerlerinde düşüşe neden olduğu, dolayısıyla buğday kalitesini olumsuz etkilediği güncel araştırmalarla ortaya konmuştur. Sonuç olarak, FN testi, ekmeklik buğdayın kalite kontrolünde nişasta yapısındaki değişimleri ölçerek özellikle ekmekçilik sektörü için kaliteyi belirleyen temel bir araç olarak öne çıkmaktadır (Bulut, 2012; Kibar, 2015; Türksoy, 2011).

Tavlı ve tavsız buğdayların analiz sonuçları, literatürde daha önce yapılan çalışmalarla uyum göstermektedir (Tablo 3.11) (Aydar, 2022; Özerdem, 2018; Türk, 2013; Yiğit vd., 2019). Ayrıca, buğday ununun ozonlanması ile düşme sayısında artış tespit eden çalışmaların bulgularıyla (Mei vd., 2016) da benzerlik görülmektedir.

Tablo 3.11. Buğdayın gluten özellikleri üzerine ilgili mevcut literatür verileri

Buğday çeşidi	Gluten analiz sonucu	Kaynak
Flamura-85ekmeklik buğday çeşiti Nina ekmeçlik buğday çeşiti Gelibolu ekmeçlik buğday çeşiti	Zeleny Sedimantasyon 40-50ml Gluten %40-50 Gluten indeks %80-90 Gluten %29,4 Gluten %29,1 Gluten indeks %95,7 Sedimantasyon 43 ml	(Tenikecier ve Öner, 2018)
15 çeşit ekmeçlik buğday	Konya lokasyonunda 1. yıl gluten %38,63, 2.yıl Gluten %27,13 Eskişehir lokasyonunda 1.yıl %41,33, 2.yıl %19,47	(Gummadov, 2012)
15 çeşit ekmeçlik buğday	Konya lokasyonunda 1. Yıl mini SDS 13,35 2.yıl 14,09 Eskişehir lokasyonunda 1. yıl mini SDS 12,0, 2.yıl 11,33 Konya lokasyonunda 1. Yıl Düşme sayısı 386, 2, Yıl 368 Eskişehir lokasyonunda 1. Yıl 394 , 2.yıl 364	(Gummadov, 2012)
Göller Yöresi 12 çeşit ekmeçlik buğday	Yaş gluten %23,02-40,08 Gluten indeks %90,94-99,60 Sedimantasyon değeri 38,33-41,00 ml Düşme sayısı 340-484 sn	(Türk, 2013)
15 çeşit ekmeçlik buğday (2017 ve 2018 yılı verileri)	2017 yılı yaş gluten %31,73 ve 2018 yılı yaş gluten %31,80 Gluten indeks 2017 yılı %72,63, 2018 yılı için %67,11 Sedimantasyon değeri 2017 yılı için %18,42; 2018 yılı için %16,87 Düşme sayısı 2017 yılı için 367 sn, 2018 yılı için 406 sn	(Yiğit vd., 2019)
24 çeşit ekmeçlik buğday	Yaş gluten %29,08-40,47 Zeleny sedimantasyon 35,12-68,63 ml	(Bozkurt, 2023)
8 çeşit ekmeçlik buğday (Eskişehir)	Gluten indeks %83-98	(Semiz, 2021)
2 çeşit ekmeçlik buğday	Zeleny sedimantasyon 25-32 ml Yaş gluten %30,4-23,2 Gluten indeks %97,6-98,1 Düşme sayısı 387-203 sn	(Özerdem, 2018)
9 çeşit ekmeçlik buğday	Zeleny sedimantasyon eski çeşitlerin 10-20 ml, yeni çeşitlerin 23-32 ml Yeni çeşit gelişme süresi 3,6-13,8 dak, su absorpsiyonu %57,3-67,0, stabilite 6,2-19,7, yumuşama derecesi 26-81 BU; Eski çeşit gelişme süresi 1,5-5,5 dak, su absorpsiyon değeri %58,9-65,0, stabilite değeri 1,8-7,7 dak, yumuşama derecesi 67-98 BU.	(Çetiner, 2020)
Çorum-İskilip şartlarında yetiştirilen 22 çeşit ekmeçlik buğday	Zeleny sedimantasyon değeri 32,0-60,0 ml Yaş gluten %37,1-43,8	(Sakin vd., 2022)
9 çeşit ekmeçlik buğday	Tekirdağ bölgesinde ortalama gluten indeks değeri %95,80	(Koç, 2023)
2 çeşit ekmeçlik buğday	Düşme sayısı 351-440 s	(Aydar, 2022)

Literatürde, buğdayın tane formuna ozon oksidasyonu uygulanmasına ilişkin verilerin sınırlı olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada, buğdayın tane formuna ozon uygulanarak düşme sayısındaki değişimin tespit edilmesi, hem bilimsel literatüre hem de endüstriyel uygulamalara katkı sağlayabilecek önemli bir bulgu olarak öne çıkmaktadır. Bu sonuçlar, ozon oksidasyonunun buğdayın tane formunda da etkili bir yöntem olduğunu göstermekte ve bu alanda yapılacak ileri çalışmalar için yeni bir perspektif sunmaktadır.

3.4.6. Reolojik analizler

3.4.6.1. Farinograf Analizi Sonuçları

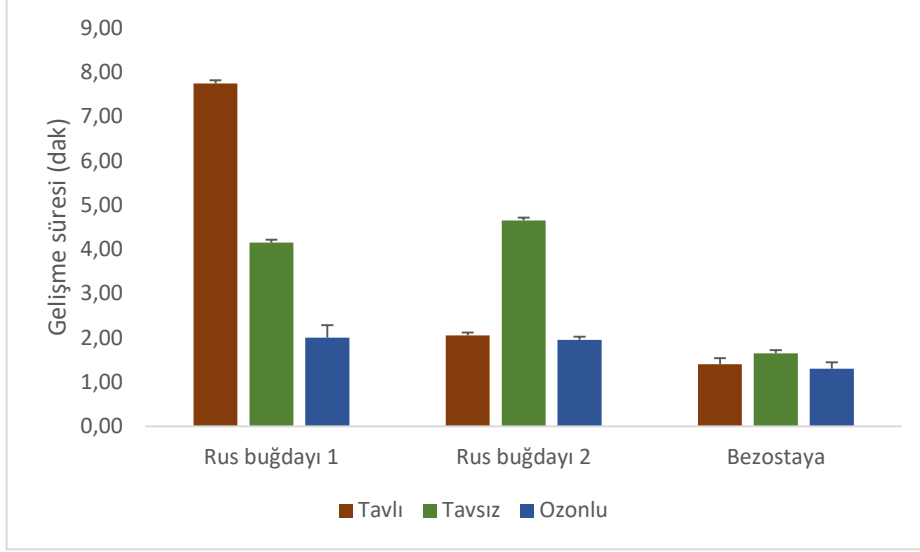
Farinograf analizi, buğday unununun hamur oluşturma özelliklerini değerlendiren kritik bir yöntemdir ve özellikle ekmekçilik açısından unun su absorpsiyonu, yoğurma dayanıklılığı, gelişme süresi ve stabilitesini ölçer. Bu analiz, unun işlenebilirliğini, yani hamur yoğurma sırasında nasıl davrandığını gösterir ve unun ekmek yapımında ne kadar uygun olduğunu belirlemede temel bir araçtır (Ortolan ve Steel, 2017; Parenti vd., 2021). Farinograf, unun su absorpsiyon kapasitesini belirleyerek optimal hamur kıvamını elde etmek için ne kadar su ekleneceğini hesaplar; bu parametre, ekmek üretiminde hamurun elastikiyetini ve kabarma kapasitesini doğrudan etkiler. Yüksek su absorpsiyon kapasitesi, unun protein kalitesinin ve gluten yapısının güçlü olduğuna işaret eder, bu da daha iyi yoğurulabilir bir hamur ve nihayetinde daha büyük hacimli ve homojen yapılı bir ekmek elde edilmesini sağlar (Çetiner, 2020; Daniela vd., 2023; Karaduman, 2013; Mecitoğlu Güçbilmez vd., 2019). Gelişme ve stabilite süresinin uzun, yumuşama derecesi ve tolerans sayısının düşük olması unun ekmeklik kalitesinin yüksek olduğunun göstergesidir (Aydoğan ve Soylu, 2020; Menderis, 2006).

Buğdaylara ait farinogram gelişme süresi (dak) iki yönlü varyans analiz tablosu ve interaksiyon grafiği sırasıyla Tablo 3.12 ve Şekil 3.12' te verilmiştir.

Tablo 3.12. Buğday çeşidi ve yöntemine göre gelişme süresi (dak) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Yöntem	Buğday çeşidi				F	p	η^2	
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya	Toplam				
Tavlı	7,75 ± 0,07 ^A	2,05 ± 0,07 ^C	1,4 ± 0,14 ^D	3,73 ± 3,13 ^a	Buğday çeşidi	420,033	<0,001	0,989
Tavsız	4,15 ± 0,07 ^B	4,65 ± 0,07 ^B	1,65 ± 0,07 ^{CD}	3,48 ± 1,44 ^b	Yöntem	438,983	<0,001	0,995
Ozonlu	2 ± 0,28 ^C	1,95 ± 0,07 ^C	1,3 ± 0,14 ^D	1,75 ± 0,38 ^c	Buğday çeşidi*Yöntem	915,033	<0,001	0,995

F: Varyans analizi test istatistiği; η^2 : Kısmi Eta Kare; R²: %99,8; Adj. R²: %99,62; Ortalama±standart sapma; ^{a-c}: Aynı harfe sahip yöntemler arasında fark yoktur. ^{a-c} : Aynı harfe sahip buğday çeşidi arasında fark yoktur. ^{A-D}: Aynı harfe sahip etkileşimler arasında fark yoktur.



Şekil 3.12. Buğday çeşidi ve yöntemine göre gelişme süresi interaksiyon grafiği

Farinograf analizinin bir diğer önemli parametresi, hamurun gelişme süresidir. Bu süre, hamurun yoğurma işlemi sırasında optimum yapısal özelliklerine ulaşması için geçen zamanı gösterir. Uzun gelişme süresi, unun daha yüksek protein kalitesine sahip olduğunu ve daha fazla elastikiyet kazandığını gösterir. Gelişme süresi boyunca hamurun gluten ağı yapısı güçlenir ve gaz tutma kapasitesi artar, bu da fermantasyon sırasında hamurun daha iyi kabarmasını ve ekmeğin iç yapısının daha homojen olmasını sağlar (Daniela vd., 2023).

Yöntem gözetmeksizin buğday çeşidi ana etkisi gelişme süresi (dak) değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,001$). Rus Buğdayı 1 ortalama gelişme süresi değeri 4,63 dak, Rus buğdayı 2 ortalama değeri 2,88 dak ve Bezostaya buğday çeşidinde ortalama değeri 1,45 dak olarak elde edilmiştir. Üç buğday çeşidi de birbirinden farklıdır.

Rus Buğdayı 1 (kuvvetli buğday); tüm yöntemler arasında gelişme süresi açısından anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir. Gelişme süresi açısından en yüksek ortalama değer tavlı yöntemde elde edilirken, en düşük ortalama ozonlu yöntemde kaydedilmiştir. Bu durum, tavlı yöntemin gluten ağını güçlendirme etkisinin buğdayın gelişme süresine olumlu yansımalarıyla ilişkilendirilebilir. Ozonlama ile gelişme süresi %74,19 azalmıştır.

Orta kuvvetli buğday olan Rus Buğdayı 2 (orta buğday) çeşidinde, tavlı ve ozonlu yöntemlerin gelişme süresi açısından benzer sonuçlar verdiği, ancak tavsız yöntemin bu iki yöntemden farklı olduğu tespit edilmiştir. Gelişme süresi açısından en yüksek ortalama değer tavsız yöntemde görülürken, en düşük ortalama ozonlu yöntemde elde edilmiştir. Tavsız yöntemde gelişme süresinin uzun olması, gluten yapısının daha az modifikasyona uğramasıyla ilişkilendirilebilir. Ancak ozonlama işlemiyle birlikte gelişme süresinde önem düzeyinde değişiklik olmamıştır.

Zayıf buğday olarak sınıflandırılan Bezostaya çeşidinde, yöntemler arasında gelişme süresi açısından belirgin farklılıklar gözlenmemiştir; ortalama değerler birbirine yakın bulunmuştur. Ancak, en yüksek ortalama değer in tavsız yöntemde, en düşük ortalama değer in ise ozonlu yöntemde kaydedildiği belirlenmiştir.

Rus buğdayı 1' e ozon uygulaması sonucunda gelişme süresinin kılalmasını nenedinin, oksidasyonlar birlikte gluten proteinlerindeki sülfhidril (-SH) gruplarını okside ederek disülfür (S-S) bağlarının oluşumunun artması, gluten ağını daha sert ve sıkı hale gelmesi ve bu şekilde daha hızlı bir şekilde stabilize olması, hamurun gelişme süresinin kılalması olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla kuvvetli buğdaylarda ozonun gluten ağı üzerindeki dengeleyici etkisi, hamurun gerekli esnekliğe ve dayanıklılığa daha kısa sürede ulaşmasına katkı sağladığı sonucuna varılabilir.

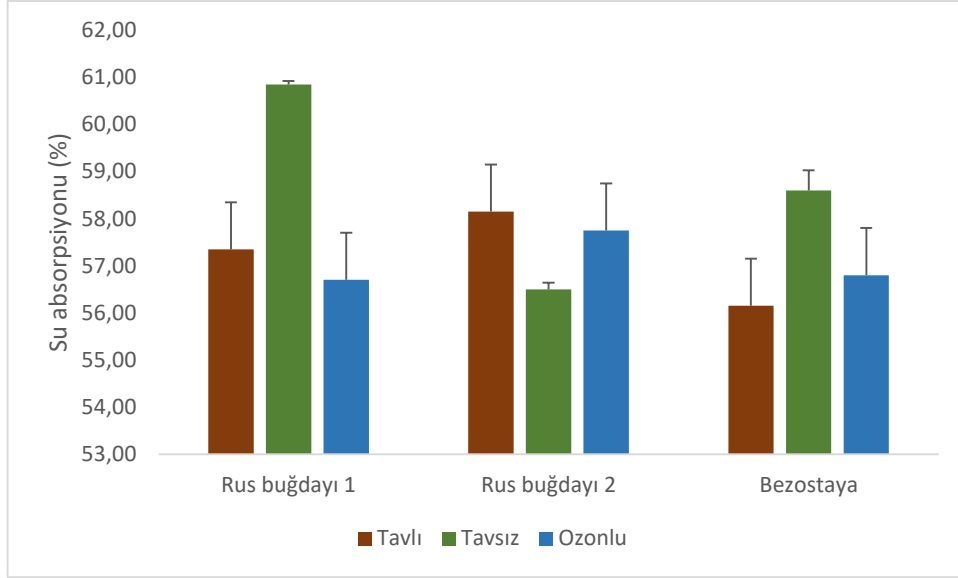
Ozonlama işleminin buğday üzerindeki etkileri, farinograf gelişme süresi ve kül miktarının düşüşü arasında dikkat çekici bir ilişki olduğunu göstermektedir. Literatürde, ozonlama işlemi sırasında gerçekleşen oksidatif reaksiyonların buğdayın mineral yapısını bozarak kül miktarında azalmaya yol açtığı ve bu durumun hamurun reolojik özelliklerini etkileyerek farinograf gelişme süresini kısalttığı belirtilmiştir (Trombete vd., 2016). Miranda ve diğerlerinin (2017) yaptığı çalışmada, ozonlama işleminin farinograf stabilitesi ve karışım toleransı gibi parametreleri değiştirerek hamurun dayanıklılığını ve elastikiyetini azalttığı, bu değişimlerin farinograf gelişme süresini kısalttığı bulunmuştur (Miranda vd., 2017). Ayrıca ozon gazının gluten proteinlerini ve mineralleri okside ederek kimyasal ve fiziksel değişimlere neden olduğu, bu durumun farinograf parametrelerinde önemli değişiklikler yarattığı tespit edilmiştir (Obadi vd., 2016). Kül miktarındaki azalma, hamurun su tutma kapasitesi ve dayanıklılığı üzerinde dolaylı olarak etkili olurken, farinograf gelişme süresinin kılalmasında bu kimyasal kayıpların önemli bir rol oynadığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar, ozonlama işleminin buğdayın mineral profili ve reolojik özellikleri üzerindeki çok yönlü etkilerini ortaya koymaktadır.

Buğdaylara ait farinogram su absorpsiyonu (%) değerine ait iki yönlü varyans analiz tablosu ve interaksiyon grafiği sırasıyla Tablo 3.13 ve Şekil 3.13' de verilmiştir.

Tablo 3.13. Buğday çeşidi ve yöntemine göre su absorpsiyonu (%) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Yöntem	Buğday çeşidi				F	p	η^2	
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya	Toplam				
Tavlı	57,35 ± 0,21 ^{CD}	58,15 ± 0,07 ^{BC}	56,15 ± 0,35 ^E	57,22 ± 0,92 ^b	Buğday çeşidi	36,03	<0,001	0,889
Ozonlu	56,7 ± 0,28 ^{DE}	57,75 ± 0,21 ^{BC}	56,8 ± 0 ^{DE}	57,08 ± 0,54 ^b	Buğday çeşidi*Yöntem	90,371	<0,001	0,976

F: Varyans analizi test istatistiği; η^2 : Kısmi Eta Kare; R^2 : %98,51; Adj. R^2 : %97,18; Ortalama±standart sapma; ^{a-b}: Aynı harfe sahip yöntemler arasında fark yoktur. ^{a-b}: Aynı harfe sahip buğday çeşidi arasında fark yoktur. ^{A-E}: Aynı harfe sahip etkileşimler arasında fark yoktur.



Şekil 3.13. Buğday çeşidi ve yöntemine göre su absorpsiyonu interaksiyon grafiği

Farinogram analizinde su absorpsiyon değeri, unun su tutma kapasitesini belirleyen ve buğday ununun teknolojik performansı ile kalite özelliklerini değerlendirmede kritik bir parametredir. Bu değer, unun protein içeriği, gluten kalitesi, nişasta yapısı ve kepek fraksiyonları gibi bileşenleriyle doğrudan ilişkilidir. Su absorpsiyon kapasitesi, hamurun elastikiyetini ve gaz tutma yeteneğini artırarak fırıncılık ürünlerinin hacim, doku ve raf ömrü gibi özelliklerini iyileştirir. Aynı zamanda endüstriyel süreçlerde enerji tüketimi ve işleme verimliliği üzerinde etkili olup, farklı buğday türlerinin belirli ürünlere uygunluğunu değerlendirmek için önemli bir kriter sunar (Daniela vd., 2023; Sünter, 2003).

Yöntem gözetmeksizin buğday çeşidi ana etkisi su absorpsiyonu (%) değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,001$). Rus Buğdayı 1 ortalama Su absorpsiyonu (%) değeri 58,3, Rus buğdayı 2 ortalama değeri 57,47 ve Bezostaya buğday çeşidinde ortalama Su absorpsiyonu (%) değeri 57,18 olarak elde edilmiştir. Rus buğdayı 2 ve Bezostaya birbirine benzerken Rus buğdayı 1'den farklıdır. Buğday çeşitlerine göre yapılan değerlendirmede, su absorpsiyonu değerlerinin yöntemler arasında farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Rus Buğdayı 1 çeşidinde, tavlı ve ozonlu yöntemler su absorpsiyonu açısından benzer sonuçlar verirken, tavsız yöntem bu iki yöntemden anlamlı şekilde farklılık göstermiştir. En yüksek su absorpsiyonu ortalaması tavsız yöntemde, en düşük ortalama ise ozonlu yöntemde kaydedilmiştir. Rus Buğdayı 2 çeşidinde ise tavlı ve ozonlu yöntemler benzer sonuçlar vermiş, tavsız yöntem diğerlerinden farklı bulunmuştur. Bu çeşitte, en yüksek su absorpsiyonu ortalaması tavlı yöntemde, en düşük ortalama ise tavsız yöntemde elde edilmiştir. Bezostaya çeşidinde de benzer bir eğilim gözlenmiştir; tavlı ve ozonlu yöntemler su absorpsiyonu açısından benzerlik gösterirken, tavsız yöntem diğerlerinden farklılık göstermiştir. Bezostaya çeşidinde en yüksek su absorpsiyonu ortalaması tavsız yöntemde, en düşük ortalama ise tavlı

yöntemde tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, su absorpsiyonu değerlerinin buğday çeşitleri ve yöntemlere göre farklılık gösterdiğini ve bu farklılıkların, buğdayın gluten yapısı ve protein özelliklerinden kaynaklandığını ortaya koymaktadır.

Buğday çeşidi gözetmeksizin yöntem ana etkisi su absorpsiyonu (%) üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,001$). Yöntemlere göre yapılan değerlendirmede, buğday çeşitlerinin su absorpsiyonu değerleri arasında belirgin farklılıklar gözlenmiştir. Tavlı yöntemde, Rus Buğdayı 1 ve Rus Buğdayı 2'nin su absorpsiyonu değerleri birbirine benzer bulunmuş, ancak Bezostaya çeşidi bu iki çeşitten farklılık göstermiştir. Bu yöntemde en yüksek su absorpsiyonu ortalaması Rus Buğdayı 2'de, en düşük ortalama ise Bezostaya'da elde edilmiştir. Tavsız yöntemde, tüm buğday çeşitleri arasında anlamlı farklılıklar gözlenmiştir; en yüksek su absorpsiyonu ortalaması Rus Buğdayı 1'de, en düşük ortalama ise Rus Buğdayı 2'de kaydedilmiştir. Ozonlu yöntemde, Rus Buğdayı 1 ve Bezostaya çeşitleri benzer sonuçlar verirken, Rus Buğdayı 2 bu iki çeşitten farklılık göstermiştir. Bu yöntemde en yüksek su absorpsiyonu ortalaması Rus Buğdayı 2'de, en düşük ortalama ise Rus Buğdayı 1'de tespit edilmiştir. Bu bulgular, su absorpsiyonu değerlerinin hem yöntemler hem de buğday çeşitlerinin yapısal özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Çalışma sonucunda Rus buğdayı 1 (kuvvetli buğday) ozon oksidasyonu sonucunda su absorpsiyon değerinin azaldığı, diğer buğday çeşitlerinde ise önem düzeyinde bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. Ozon oksidasyonu sonucunda Rus Buğdayı 1' in (kuvvetli buğday) su absorpsiyon değerinin azalması, ozonun gluten yapısı ve protein bileşenleri üzerinde oluşturduğu kimyasal değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Ozon, gluten proteinlerinde disülfür (S-S) bağlarının aşırı oluşumunu teşvik ederek gluten ağını daha sert ve yoğun bir yapıya dönüştürebilir, bu da suyun bağlanmasını sınırlayabilir. Ayrıca, ozonun gliadin ve glutenin etkileşimlerini modifiye etmesi, glutenin elastik yapısını zayıflatıp su bağlama kapasitesini olumsuz etkileyebilir. Bunun yanı sıra, nişasta granüllerinde meydana gelen değişiklikler de su absorpsiyonunun azalmasında rol oynayabilir. Kuvvetli gluten yapısına sahip buğdaylarda ozonun etkisiyle oluşan aşırı sertleşme, suyun gluten matrisi tarafından emilimini engelleyerek su absorpsiyon değerinin düşmesine neden olabilir. Bu durum, ozon uygulamasının kuvvetli buğdaylar için dikkatle optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Ozonlama işleminin buğdayın farinograf analizi su absorpsiyon değerlerini azaltmasının temel nedeni, bu işlemin buğday proteinleri, nişastası ve diğer kimyasal bileşenleri üzerinde meydana getirdiği oksidatif değişikliklerdir. Ozon, yüksek reaktivitesi nedeniyle protein yapılarındaki disülfid bağlarını okside ederek glutenin ve gliadin proteinlerinin su tutma kapasitesini azaltır. Bu durum, buğday ununun reolojik özelliklerinde önemli değişikliklere yol açar (Obadi vd., 2016). Ayrıca, ozonlama işlemi nişasta granüllerinin yapısını bozarak, su bağlama bölgelerinde azalmaya neden olur ve bu da su absorpsiyon kapasitesini düşürür (Miranda vd., 2017). Trombete ve diğerlerinin (2016) çalışmalarında, ozon konsantrasyonu ve işlem süresinin artışıyla farinograf su absorpsiyon oranında belirgin bir azalma kaydedilmiş ve

bu durum, protein yapılarında meydana gelen oksidatif modifikasyonlar ile ilişkilendirilmiştir (Trombete vd., 2016). Bu süreçte, su tutma kapasitesinin azalması hamur viskoelastik özelliklerini etkileyerek farinograf parametrelerinde genel bir düşüşe yol açar. Sonuç olarak, ozonlama işlemi, hem protein hem de nişasta yapısında meydana getirdiği oksidatif bozulmalar nedeniyle buğdayın su absorpsiyon değerlerini azaltmaktadır ve bu durum farinograf analizinde açıkça gözlemlenmektedir.

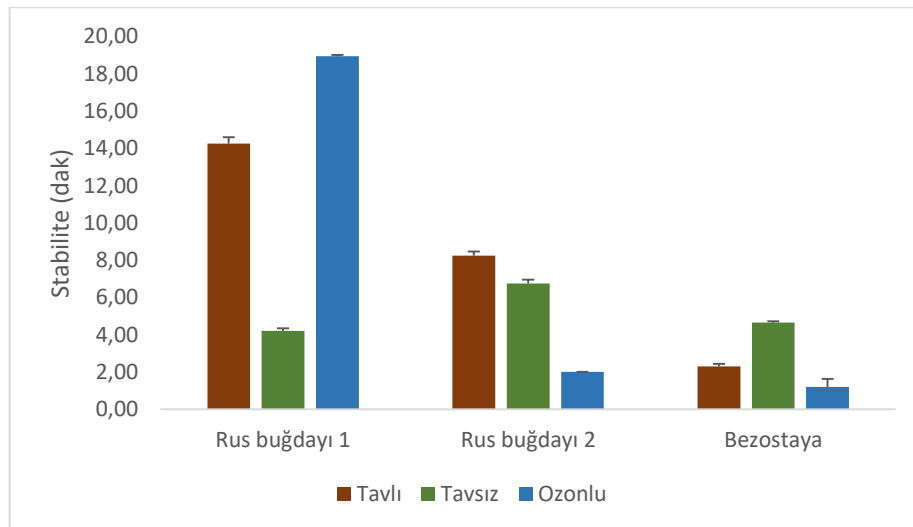
Tavlı ve tavsız buğdaylara ait farinogram su absorpsiyonu çalışma bulguları, literatürdeki bazı çalışmalarla uyum göstermektedir (Aydoğan ve Soylu, 2020; Çetiner, 2020; Gül vd., 2020; Koç, 2023), ancak (Karaduman, 2013) çalışmasından farklılıklar ortaya koymaktadır. Ozonlanmış buğday analiz sonuçları ise, literatürle farklılık göstermektedir (Hu vd., 2022; Moll vd., 2022). Bu sonuçlar, buğdaya tane formunda ozon uygulamanın etkilerini inceleyen sınırlı literatüre önemli katkılar sağlayarak bu alandaki bilgi birikimini destekleyici niteliktedir.

Buğdaylara ait farinogram stabilite değerine ait iki yönlü varyans analiz tablosu ve interaksiyon grafiği sırasıyla Tablo 3.14 ve Şekil 3.14' de verilmiştir.

Tablo 3.14. Buğday çeşidi ve yöntemine göre stabilite (dak) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Yöntem	Buğday çeşidi				F	p	η^2	
	Rus buğdayı 1	Rus buğdayı 2	Bezostaya	Toplam				
Tavlı	14,25 ± 0,35 ^B	8,25 ± 0,21 ^C	2,3 ± 0,14 ^F	8,27 ± 5,35 ^a	Buğday	3033,809	<0,001	0,999
Tavsız	4,2 ± 0,14 ^E	6,75 ± 0,21 ^D	4,65 ± 0,07 ^E	5,2 ± 1,22 ^c	Yöntem	302,393	<0,001	0,985
Ozonlu	18,95 ± 0,07 ^A	2 ± 0 ^{FG}	1,2 ± 0,42 ^G	7,38 ± 8,97 ^b	Buğday*Yöntem	1275,202	<0,001	0,998

F: Varyans analizi test istatistiği; η^2 : Kısmi Eta Kare; R²: %99,92; Adj. R²:99,86; Ortalama±standart sapma; ^{a-c}: Aynı harfe sahip yöntemler arasında fark yoktur. ^{a-c}: Aynı harfe sahip buğday çeşidi arasında fark yoktur. ^{A-G}: Aynı harfe sahip etkileşimler arasında fark yoktur.



Şekil 3.14. Buğday çeşidi ve yöntemine göre stabilite interaksiyon grafiği

Buğday çeşitleri ve uygulanan yöntemlere göre stabilite süreleri (dak) incelenmiş ve her bir buğday çeşidi için yöntemler arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar olduğu belirlenmiştir ($p<0,001$). Rus Buğdayı 1 çeşidinde, tüm yöntemler arasında anlamlı fark bulunmuş olup, en yüksek stabilite ortalama değeri ozonlu yöntemle elde edilirken, en düşük ortalama değer tavsız yöntemle gözlemlenmiştir. Rus Buğdayı 2 çeşidinde de yöntemler arasında anlamlı farklılıklar saptanmış; buğday stabilitesinin en yüksek olduğu yöntem tavlı yöntem, en düşük olduğu yöntem ise ozonlu yöntem olarak belirlenmiştir. Bezostaya çeşidinde ise en yüksek stabilite ortalama değeri tavsız yöntemde, en düşük ortalama ise ozonlu yöntemde elde edilmiştir. Bu bulgular, buğday çeşitleri ve uygulanan yöntemler arasındaki stabilite sürelerinin farklılık gösterdiğini ve bu farklılıkların buğdayın türüne ve yöntemlerin etkisine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Buğday çeşidi ve yöntem etkileşimi Stabilite (dak) üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,001$). En yüksek etkileşim değeri 18,95 dak ile Rus buğdayı 1 ile ozonlanmış arasında iken en düşük etkileşim değeri 1,2 dak ile Bezostaya ve Ozonlanmış etkileşimi arasında elde edilmiştir.

Çalışmada, kuvvetli buğday kategorisinde yer alan Rus Buğdayı 1 çeşidine uygulanan ozonlama işlemi ile stabilite değerinin %33 oranında arttığı belirlenmiştir. Rus buğdayı 2 ve Bezostaya çeşidinde ise sırasıyla %75,75 ve %47,82 oranında azalma tespit edilmiştir. Ozon uygulamasının, güçlü gluten yapısına sahip buğdaylarda olumlu etkiler gösterirken, orta ve zayıf gluten yapısına sahip buğday çeşitlerinde olumsuz sonuçlar doğurduğu tespit edilmiştir. Bu durumun, ozon oksidasyonu ile gluten yapısındaki sülfidril (-SH) gruplarının disülfid (-SS) bağlarına daha fazla oksitlenmesi ve güçlü gluten yapısının bu süreçte daha dayanıklı bir ağ yapısı oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çalışma bulguları değerlendirildiğinde, tavlı ve tavsız buğday örneklerinin stabilite değerlerinin, Aydoğan ve Soylu (2020), Gül vd. (2020), Karaduman (2013) ve Türk (2013) tarafından bildirilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca, buğday ununa uygulanan ozon oksidasyonunun stabilite değerleri üzerindeki etkisi, Elgün ve Bilgiçli (2019), Hu vd. (2020) ile Moll vd. (2022) tarafından elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir.

Hamurun stabilite süresi, unun dayanıklılığını ve gluten yapısının sağlamlığını temsil eden önemli bir reolojik parametredir. Stabilite süresi, hamurun yoğurma işlemi sırasında deformasyona karşı ne kadar dayanıklı olduğunu ve gluten yapısının mekanik işlemlere nasıl tepki verdiğini ölçer. Stabilite süresi uzun olan unlar, hamur yoğurma sırasında yapısal bütünlüğünü koruyarak dayanıklılığını sürdürür. Bu özellik, özellikle endüstriyel ekmek üretiminde büyük bir avantaj sağlar, çünkü makinelerde uzun süre işlem görebilen unlar, yüksek hacimli ve kaliteli ekmek üretimine olanak tanır. Uzun stabilite süreleri, hamurun yoğurma sırasında gaz tutma kapasitesini ve elastikiyetini koruyarak fırıncılık performansını artırır. Ayrıca, stabilite süresinin uzunluğu, gluten proteinlerinin güçlü ve esnek bir ağ oluşturduğunu, buğdayın yüksek protein kalitesine sahip olduğunu ve su absorpsiyonu ile

dengeli bir gluten yapısının geliştiğini de işaret eder (Daniela vd., 2023; Sünter, 2003; Yu vd., 2024). Bu nedenle, stabilite süresi, yalnızca hamur kalitesinin bir göstergesi değil, aynı zamanda endüstriyel ölçekli üretimde un seçiminde kritik bir parametredir (Daniela vd., 2023; Sünter, 2003; Yu vd., 2024).

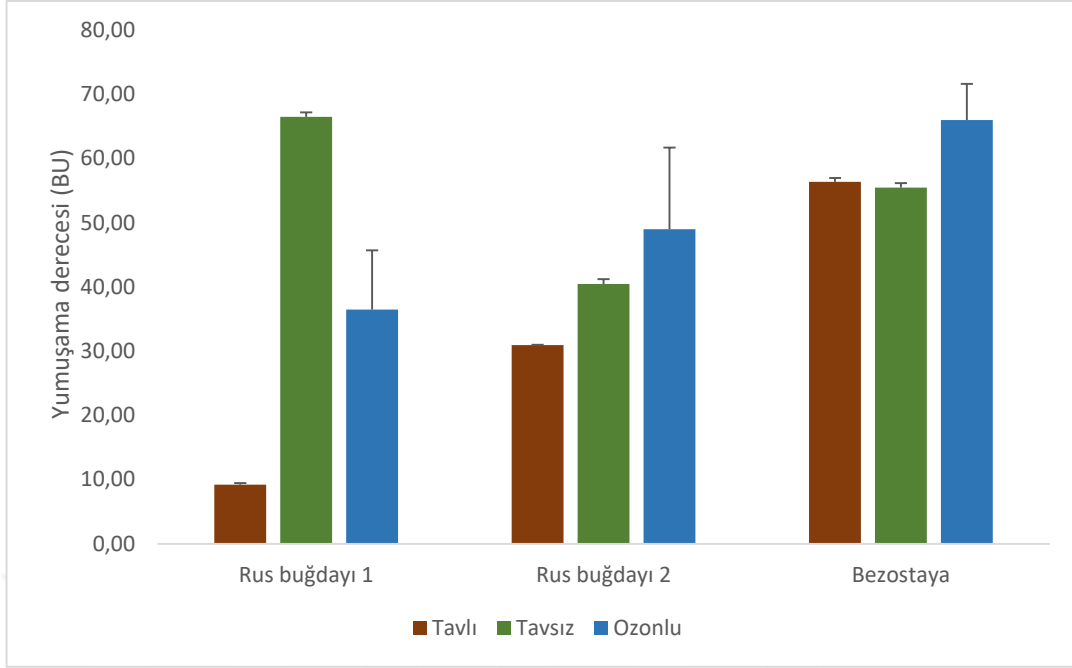
Ozonlama işlemi farinograf analizinde su absorpsiyon ve gelişme süresi değerlerini azaltırken stabiliteyi artırmaktadır. Bunun nedeni, ozon gazının protein ve nişasta yapısında meydana getirdiği oksidatif değişimlerden kaynaklanmaktadır. Özellikle gluten proteinlerindeki disülfid bağlarının oksidasyonu sonucu, gluten ağı daha sıkı ve stabil bir hale gelirken proteinlerin su tutma kapasiteleri azalmaktadır. Nişasta granüllerinin ozonlama sırasında yapısal bütünlüğünün bozulması, nişasta ve su arasındaki etkileşim potansiyelini düşürerek su absorpsiyon kapasitesinin azalmasına neden olmaktadır (Miranda vd., 2017). Başka bir çalışmada, ozonlama işleminin farinograf stabilitesini artırmasının gluten ağının oksidatif olarak modifiye edilmesiyle ilişkilendirildiği belirtilmiştir. Bu modifikasyonlar, gluten yapısında yeni çapraz bağlar oluşturarak hamurun mekanik strese karşı daha dayanıklı hale gelmesine neden olmaktadır (Codin vd., 2011). Ozon konsantrasyonunun ve işlem süresinin farinograf parametreleri üzerindeki etkilerini inceleyen başka bir çalışmada ise, yüksek ozon konsantrasyonlarında glutenin oksidasyonunun daha belirgin olduğunu ve bunun stabiliteyi artırırken su absorpsiyonunu azalttığını bildirmiştir (Trombete vd., 2016). Ozonlama işleminin buğday unundaki amino asit profili ve gluten yapısı üzerinde değişimlere yol açtığını bildiren çalışmada, bu değişimlerin farinograf stabilitesini olumlu etkilerken su absorpsiyonunu azalttığı tespit edilmiştir (Saad vd., 2018). Sonuç olarak, ozonlamanın reolojik etkileri, protein ve nişasta yapısında meydana gelen oksidatif değişimlerin bir sonucudur. Bu etkiler, gluten ağının sertleşmesiyle stabiliteyi artırırken, su tutma kapasitesindeki azalmayla gelişme süresi ve su absorpsiyonunun düşmesine neden olmaktadır. Bu bulgular, ozonlamanın un teknolojisi üzerindeki çok yönlü etkilerini anlamak için önemli bilgiler sağlamaktadır.

Buğdaylara ait farinogram yumuşama derecesi değerine ait iki yönlü varyans analiz tablosu ve interaksiyon grafiği sırasıyla Tablo 3.15 ve Şekil 3.15' de verilmiştir.

Tablo 3.15. Buğday çeşidi ve yonteme göre yumuşama derecesi (BU) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Yöntem	Buğday çeşidi				F	p	η^2	
	Rus buğdayı 1	Rus buğdayı 2	Bezostaya	Toplam				
Tavlı	9,2 ± 0,28 ^D	30,95 ± 0,07 ^{CD}	56,4 ± 0,57 ^{AB}	32,18 ± 21,13 ^b	Buğday	27,407	<0,001	0,859
Tavsız	66,5 ± 0,71 ^A	40,5 ± 0,71 ^{BC}	55,5 ± 0,71 ^{AB}	54,17 ± 11,69 ^a	Yöntem	26,711	<0,001	0,856
Ozonlu	36,5 ± 9,19 ^{BC}	49 ± 12,73 ^{ABC}	66 ± 5,66 ^A	50,5 ± 15,2 ^a	Buğday*Yöntem	16,714	<0,001	0,881

F: Varyans analizi test istatistiği; η^2 : Kısmi Eta Kare; R²: %95,11; Adj. R²: %90,77; Ortalama±standart sapma; a-b: Aynı harfe sahip yöntemler arasında fark yoktur. a-b : Aynı harfe sahip buğday çeşidi arasında fark yoktur. A-D: Aynı harfe sahip etkileşimler arasında fark yoktur.



Şekil 3.15. Buğday çeşidi ve yöntemle göre yumuşama derecesi interaksiyon grafiği

Yöntem gözetmeksizin buğday çeşidi ana etkisi Yumuşama derecesi (BU) değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,001$). Rus Buğdayı 1 çeşidinde, yöntemler arasında belirgin bir fark bulunmuş olup, en yüksek yumuşama derecesi ortalama değeri tavsız yöntemde, en düşük yumuşama derecesi ise tavlı yöntemde elde edilmiştir. Rus Buğdayı 2 çeşidinde ise yöntemler arasında genel olarak benzerlik görülmekle birlikte, en yüksek yumuşama derecesi ozonlu yöntemde, en düşük yumuşama derecesi ise tavlı yöntemde saptanmıştır. Bezostaya çeşidinde de yöntemler arasında genel bir benzerlik bulunmuş, ancak en yüksek yumuşama derecesi tavsız yöntemde, en düşük yumuşama derecesi tavlı yöntemde elde edilmiştir. Bu bulgular, buğday çeşidi ve uygulanan yöntemlerin yumuşama derecesi üzerinde farklı etkiler gösterebileceğini ortaya koymaktadır.

Çalışmada, kuvvetli gluten yapısına sahip Rus Buğdayı 1 çeşidinde ozon uygulamasının yumuşama derecesini %300 oranında artırdığı belirlenmiştir. Ozon uygulaması ile kuvvetli buğdaylarda yumuşama derecesinin artması ozonun gluten proteinlerinde meydana getirdiği oksidatif modifikasyonu olabilir. Ozon, gluten proteinlerinde bulunan sülfidril (-SH) gruplarını disülfid (-SS) bağlarına dönüştürerek gluten ağını güçlendirir de, bu süreç aynı zamanda glutenin ve gliadin proteinleri arasındaki dengeyi değiştirebilir. Kuvvetli buğdaylarda, gluten proteinlerinin yüksek elastikiyet ve gaz tutma kapasitesi nedeniyle gluten ağı zaten oldukça güçlüdür. Ancak ozonlama ile artan oksidasyon, gluten yapısının aşırı sertleşmesine ve esnekliğin azalmasına yol açabilir.

Bu durum, hamurun yoğurma sırasında daha hızlı elastikiyet kaybetmesine ve gluten ağının daha erken zayıflamasına neden olarak farinogram analizinde yumuşama derecesinin artmasına yol açabilir. Ayrıca, ozonlama işlemi sırasında gluten proteinlerinin yapısında meydana gelen oksidatif stres, proteinler arası bağların düzensiz şekilde oluşmasına ve ağ yapısının homojenliğinin azalmasına neden olabilir. Bu da hamurun viskoelastik özelliklerini etkileyerek yumuşama derecesinin artışına katkıda bulunabilir.

Çalışmada elde edilen farinogram yumuşama derecesi bulguları, tavlı ve tavsız buğday örnekleri için Koç (2023) tarafından bildirilen sonuçlarla uyumlu bulunmuş, ancak Çetiner (2020) ve Karaduman (2013) tarafından elde edilen sonuçlarla farklılık göstermiştir (Tablo 3.16). Buğday ununun ozonlanması sonucunda yumuşama derecesindeki artış, Moll vd. (2022) ile benzerlik gösterirken, Demir vd. (2011), Elgün ve Bilgiçli (2019) ile Hu vd. (2020) tarafından bildirilen sonuçlarla uyuşmamaktadır. Bu farklılıkların, ozon oksidasyonunun buğdayın tane formuna uygulanması nedeniyle, oksidasyonun tane içine nüfuz etmesinin daha zor olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, bu çalışmanın sonuçlarının, literatürde buğday tanesinin ozonlanmasıyla ilgili sınırlı verilere katkı sağlayarak önemli bir referans oluşturması beklenmektedir.

Tablo 3.16. Hamurun reolojik özellikleri ile ilgili literatür verileri

Buğday çeşidi	Reolojik analiz sonucu	Kaynak
Konya lokasyonu 21 çeşit ekmeklik buğday	A değeri 34-208 cm ² E değeri 112-295 mm R _{max} 200-729 BU Gelişme süresi 2,54-19,34 dak Su absorpsiyon %52,60-65,90 Stabilite 2,35-20 dak	(Aydoğan vd., 2013)
6 yeni çeşit ekmeklik buğday 9 çeşit eski ekmeklik buğday	Yeni çeşit; Gelişme süresi 3,6-13,8 dak Su absorpsiyonu % 57,3 - 67,0 Stabilite değeri 6,2 - 19,7 dak, Yumuşama derecesi 26 – 81 BU Eski çeşit; Su absorpsiyon değerleri % 58,9 - 65,0 Stabilite değeri 1,8 - 7,7 dak Gelişme süresi 1,5 - 5,5 dak	(Çetiner, 2020)
9 çeşit ekmeklik buğday	Tekirdağ bölgesinde Farinograf su absorpsiyonu %55,63, yumuşama derecesi 59,72 BU. Edirne bölgesinde farinograf su absorpsiyonu %57,97, yumuşama derecesi 28,44 BU.	(Koç, 2023)
Göller yöresi 9 çeşit ekmeklik buğday	Farinogram su absorpsiyon %53,33-64,47, gelişme süresi 1,2-6,7 dak, stabilite 1,7-17 dak, farinogram kalite numarası 27-201,3 BU	(Gül vd., 2020)
23 çeşit buğday	Su absorpsiyonu %48,3-57, gelişme süresi 0,7-2,2 dak, stabilite 2,4-14,9 dak, yoğurma tolerans sayısı 14,4-134,6 BU, yumuşama derecesi 32,3-150,8 BU E değeri 64-133 mm, Rm 173-899 BU, R5 164-630 BU, A 36-101 cm ²	(Karaduman, 2013)

Farinogram analizinde yumuşama derecesi, hamurun yoğurma sırasında gluten ağının dayanıklılığını ve stabilitesini kaybetme eğilimini ölçen önemli bir parametredir. Yumuşama derecesi, hamurun viskoelastik yapısının bozulmaya başladığı noktayı gösterir ve unun su kaldırma kapasitesi, gluten kalitesi ve işlenebilirliği hakkında bilgi verir (Demir vd., 2011; Elgün ve Bilgiçli, 2019).

Daha düşük yumuşama derecesi, hamurun yoğurma sırasında elastikiyetini ve yapısını daha uzun süre koruyabildiğini, dolayısıyla gluten ağının güçlü olduğunu gösterir. Bu, ekmek yapımı gibi dayanıklı bir hamur gerektiren ürünlerde istenen bir özelliktir. Daha yüksek yumuşama derecesi ise hamurun zayıf olduğunu, kolayca elastikiyetini kaybettiğini ve kısa süreli işleme uygun olduğunu ifade eder. Bu durum, bisküvi veya kek gibi ürünlerde tercih edilebilir. Yumuşama derecesi bu nedenle, unun uygun kullanım alanını belirlemede kritik bir rol oynar (Koç, 2023; Moll vd., 2022).

3.4.6.2. Ekstensograf Analizi Sonuçları

Ekstensograf analizi, buğday unununun hamur elastikiyeti ve uzayabilirlik özelliklerini değerlendiren önemli bir yöntemdir. Bu analiz, özellikle hamurun yoğurma, fermentasyon ve şekil verme aşamalarındaki davranışlarını ölçerek, ekmekçilikte kullanılan unun kalitesini belirlemek için kritik bir role sahiptir. Ekstensograf, hamurun elastikiyetini ve uzama kapasitesini değerlendirerek, hamurun nasıl işleneceği, ne kadar şekil alabileceği ve pişirme sırasında nasıl bir performans sergileyeceği hakkında bilgi sağlar. Özellikle ekmek yapımında, hamurun gaz tutma kapasitesi, gluten yapısının dayanıklılığı ve nihai ürünün hacmi üzerinde önemli etkileri vardır (Gül vd., 2020; Karaduman, 2013; Türkoğlu, 2022).

Yüksek uzayabilirlik, hamurun daha uzun süre işlenebileceğini ve pişirme sırasında gaz tutma kapasitesinin yüksek olacağını gösterir. Elastikiyet, hamurun uzama sonrası ne kadar hızlı eski formuna dönebildiğini gösterir ve gluten kalitesiyle doğrudan ilişkilidir. Elastikiyeti yüksek hamurlar, fermentasyon süresince gazların hamur içinde tutulmasına yardımcı olur, bu da ekmeğin hacmini ve iç yapısını olumlu etkiler. Ekstensograf analizinin bir diğer önemli parametresi, hamurun toplam enerji kapasitesidir. Bu değer, hamurun yoğurma ve fermentasyon işlemlerine karşı gösterdiği direnci ve dayanıklılığı ifade eder. Yüksek enerji değerine sahip hamurlar, daha fazla işlenebilir ve endüstriyel ekmekçilik için daha uygundur, çünkü bu hamurlar uzun süre dayanıklılığını koruyarak büyük hacimli ekmeklerin üretiminde avantaj sağlar. Hamurun direnç değeri ise gluten yapısının gücünü gösterir. Yüksek direnç, hamurun şekillendirme sırasında deformasyona karşı dayanıklılığını ve fermentasyon sırasında daha stabil bir yapı sergilemesini sağlar (Aydoğan ve Soylu, 2020; Mecitoğlu Güçbilmez vd., 2019).

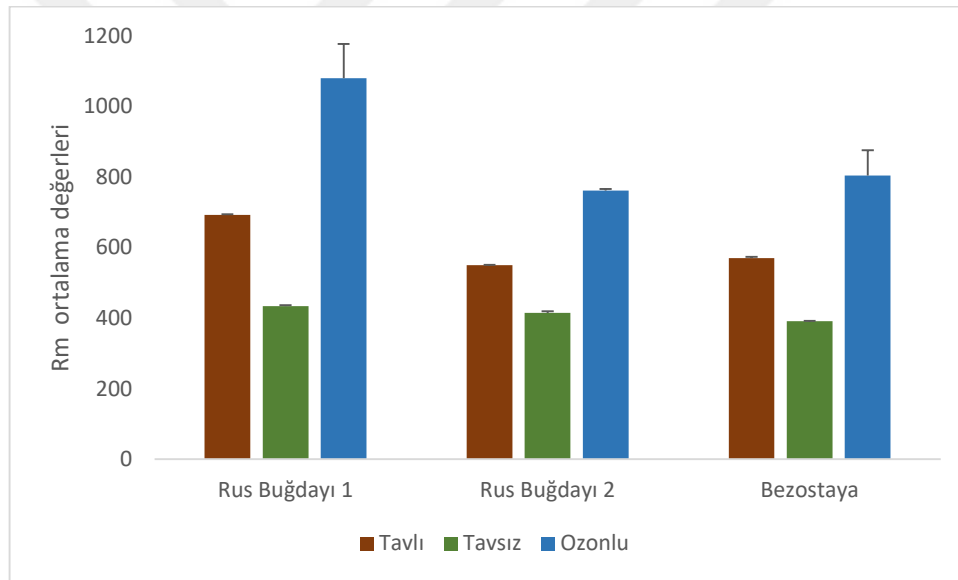
Son yıllarda yapılan araştırmalar, ekstensograf analizinin buğday unununun kalitesini etkileyen çevresel ve genetik faktörlerle yakından ilişkili olduğunu göstermektedir (Sünter, 2003).

Buğdaylara ait eksensogram R_m iki yönlü varyans analiz tablosu ve interaksiyon grafiği sırasıyla Tablo 3.17 ve Şekil 3.16' da verilmiştir.

Tablo 3.17. Buğday çeşidi ve yöntemle göre R_m (BU) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Yöntem	Buğday çeşidi				F	p	η^2	
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya	Toplam				
Tavlı	692,5 ± 2,12 ^{BC}	550,5 ± 0,71 ^{CDE}	570,5 ± 3,54 ^{CD}	604,5 ± 68,77 ^b	Buğday	28,810	<0,001	0,865
Tavsız	434 ± 2,83 ^{DE}	414,5 ± 4,95 ^{DE}	391 ± 1,41 ^E	413,17 ± 19,44 ^c	Yöntem	202,597	<0,001	0,978
Ozonlu	1080 ± 97,58 ^A	761,5 ± 4,95 ^B	804 ± 72,12 ^B	881,83 ± 163,93 ^a	Buğday*Yöntem	7,654	0,006	0,773

F: Varyans analizi test istatistiği; η^2 : Kısmi Eta Kare; R^2 : %98,21; Adj. R^2 : %96,62; Ortalama±standart sapma; ^{a-c}: Aynı harfe sahip yöntemler arasında fark yoktur. ^{a-b}: Aynı harfe sahip buğday çeşidi arasında fark yoktur. ^{A-E}: Aynı harfe sahip etkileşimler arasında fark yoktur.



Şekil 3.16. Buğday çeşidi ve yöntemle göre R_m interaksiyon grafiği

Ekstensogram analizinde R_m değeri, buğday hamurunun uzama sırasında gösterdiği direnç olup, gluten kalitesini ve hamurun esneklik ve dayanıklılık özelliklerini belirlemede önemli bir göstergedir. Yüksek R_m değeri, güçlü bir gluten ağına ve hamurun yüksek kabarma kapasitesine işaret ederken, düşük R_m değeri daha yumuşak bir hamur yapısını işaret eder. Ekmekçilikte R_m değeri, hamurun işlenebilirliğini ve pişirme performansını etkileyerek hangi buğday unlarının ekmek yapımına daha uygun olduğunu belirlemede kritik rol oynamaktadır.

Yöntem gözetmeksizin buğday çeşidi ana etkisi R_m değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,001$).

Buğday çeşidi ve yöntem etkileşimi Rm üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (p=0,006). Buğday çeşitlerine göre yapılan analizde, Rus Buğdayı 1 çeşidinde tüm yöntemler arasında anlamlı farklılıklar olduğu belirlenmiştir. En yüksek Rm ortalama değeri ozonlu yöntemde, en düşük ortalama değeri ise tavsız yöntemde elde edilmiştir. Rus Buğdayı 2 çeşidinde, tavlı ve tavsız yöntemler benzer sonuçlar gösterirken, ozonlu yöntem bu iki yöntemden farklılık göstermiştir. Bu buğday çeşidinde de en yüksek Rm ortalama değeri ozonlu yöntemde, en düşük ortalama değeri ise tavsız yöntemde gözlemlenmiştir. Bezostaya çeşidinde ise tüm yöntemler arasında anlamlı farklılıklar saptanmış olup, en yüksek Rm ortalama değeri ozonlu yöntemde, en düşük ortalama değeri ise tavsız yöntemde tespit edilmiştir. Bu bulgular, yöntemlerin farklı buğday çeşitleri üzerindeki etkilerinin çeşitlilik gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Çalışmada, ozon oksidasyonunun kuvvetli, orta ve zayıf buğday çeşitlerinin Rm (maksimum direnç) değerlerini sırasıyla %55, %39 ve %41 oranında artırdığı belirlenmiştir. Bu artışın en yüksek olduğu çeşidin kuvvetli buğday kategorisindeki Rus Buğdayı 1 olduğu tespit edilmiştir. Ozon oksidasyonunun Rm değerini artırmasının temel nedeni, gluten proteinlerinde yarattığı kimyasal değişikliklerdir. Ozon, gluten proteinlerinde bulunan sülfidril (-SH) gruplarını okside ederek disülfid (-SS) bağlarının oluşumunu teşvik eder; bu da gluten ağının daha güçlü ve dayanıklı bir yapıya kavuşmasını sağlamaktadır. Güçlü gluten ağı, hamurun yoğurma ve uzatma sırasında daha fazla direnç göstermesine yol açar, bu da Rm değerinin yükselmesini sağlamaktadır. Ayrıca, ozonlama glutenin polimerlerini daha sıkı bir şekilde bağlayarak ağ yapısını güçlendirir ve hamurun uzatmaya karşı dayanıklılığını artırır. Bu oksidatif etkiler, hamurun viskoelastik özelliklerini olumlu yönde etkileyerek Rm değerindeki artışı desteklemektedir. Özellikle güçlü gluten yapısına sahip buğdaylarda, başlangıçta zaten sağlam olan ağ yapısı ozonlama ile daha da stabilize olur ve bu durum Rm değerindeki artışı daha belirgin hale getirdiği düşünülmektedir.

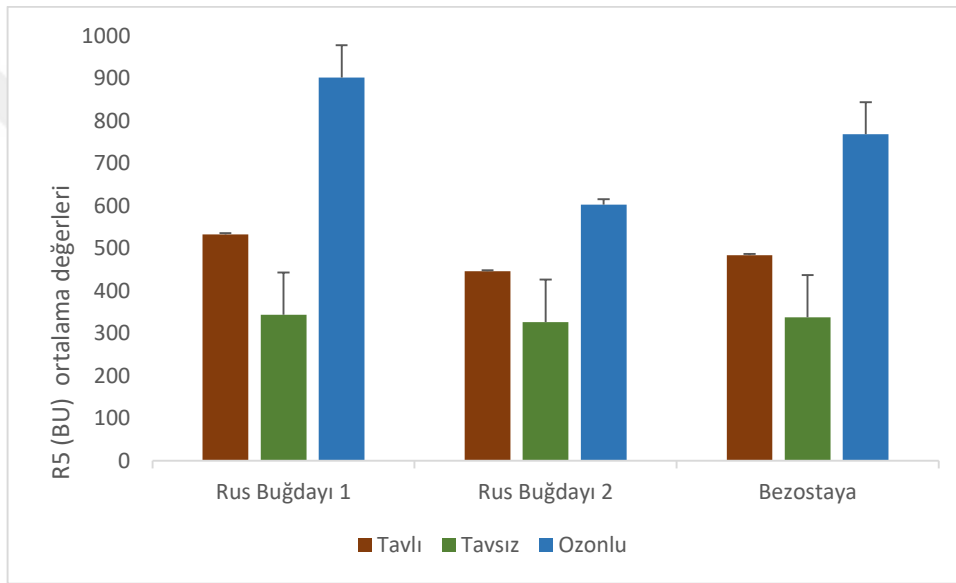
Çalışma bulguları, tavlı ve tavsız buğdaylar için Karaduman (2013) tarafından bildirilen sonuçlarla uyum göstermiştir. Ozonlanmış buğday analiz sonuçları ise buğday ununun ozonlanmasını inceleyen Demir vd. (2011) ile Elgün ve Bilgiçli (2019) tarafından elde edilen bulgularla benzerlik göstermektedir. Ancak, bu tez çalışması buğday tanesinin ozonlanmasına odaklanmış olup, bu konu üzerine sınırlı sayıda çalışma bulunan literatüre önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Buğdaylara ait eksensogram R₅ (BU) iki yönlü varyans analiz tablosu ve interaksiyon grafiği sırasıyla Tablo 3.18 ve Şekil 3.17' de verilmiştir.

Tablo 3.18. Buğday çeşidi ve yöntemine göre R₅ (BU) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Yöntem	Buğday çeşidi				F	p	η^2	
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya	Toplam				
Tavlı	533 ± 2,83 ^{BC}	446,5 ± 2,12 ^{CDE}	484 ± 2,83 ^{BCD}	487,83 ± 38,85 ^b	Buğday	20,904	<0,001	0,823
Tavsız	343,5 ± 2,12 ^{DE}	326,5 ± 2,12 ^E	337,5 ± 0,71 ^E	335,83 ± 7,83 ^c	Yöntem	212,066	<0,001	0,979
Ozonlu	902 ± 76,37 ^A	603 ± 12,73 ^B	769 ± 74,95 ^A	758 ± 142,39 ^a	Buğday*Yöntem	8,409	0,004	0,789

F: Varyans analizi test istatistiği; η^2 : Kısmi Eta Kare; R²: %98,23; Adj. R²: %96,66; Ortalama±standart sapma; a-c: Aynı harfe sahip yöntemler arasında fark yoktur. a-c : Aynı harfe sahip buğday çeşidi arasında fark yoktur. A-E: Aynı harfe sahip etkileşimler arasında fark yoktur.



Şekil 3.17. Buğday çeşidi ve yöntemine göre R₅ interaksiyon grafiği

Ekstensogram analizinde R₅ değeri, hamurun uzama sırasında gösterdiği direnci ölçen ve hamurun esneklik ile dayanıklılık özellikleri hakkında bilgi veren önemli bir parametredir. R₅ değeri, hamurun analiz süresince uzama direncinin belirli bir zamanda (5. dak) ölçülen bir göstergesidir. Bu parametre, özellikle hamurun gluten ağının kalitesini ve dayanıklılığını değerlendirirken dikkate alınır. R₅ değerinin yüksek olması, hamurun güçlü bir gluten yapısına ve mekanik strese karşı iyi bir dayanıklılığa sahip olduğunu ifade eder. Bu özellik, özellikle ekmekçilikte fermantasyon ve pişirme sırasında hamurun yapısını koruyarak daha hacimli ve homojen bir ürün elde edilmesini sağlar. R₅ değeri, hamurun işlenebilirliğini ve son ürün kalitesini doğrudan etkileyerek hangi buğday türlerinin ekmek yapımına daha uygun olduğunu belirlemede kritik bir rol oynamaktadır.

Yöntem ayrımı yapmaksızın buğday çeşidine göre R₅ ortalama değerleri arasında bir fark elde edilmiştir (p<0,001).

Buğday çeşidi ve yöntem etkileşimine göre R₅ ortalama değerleri arasında bir fark elde edilmiştir (p=0,004). Buğday çeşitlerine göre yapılan analizde, Rus Buğdayı 1 çeşidinde uygulanan yöntemler arasında anlamlı farklılıklar olduğu belirlenmiştir. En yüksek R₅ ortalama değeri ozonlu yöntemle, en düşük R₅ ortalama değeri ise tavsız yöntemle elde edilmiştir. Rus Buğdayı 2 çeşidinde, tavlı ve tavsız yöntemler benzer sonuçlar göstermiş, ancak ozonlu yöntem diğerlerinden farklılık göstermiştir. Bu çeşitte de en yüksek R₅ ortalama değeri ozonlu yöntemde, en düşük R₅ ortalama değeri ise tavsız yöntemde gözlemlenmiştir. Bezostaya çeşidinde ise tüm yöntemler arasında anlamlı farklılıklar saptanmış olup, en yüksek R₅ ortalama değeri ozonlu yöntemde, en düşük R₅ ortalama değeri ise tavsız yöntemde tespit edilmiştir. Bu bulgular, buğday çeşitleri ve yöntemlerin R₅ değeri üzerinde farklı etkiler yarattığını göstermektedir.

Çalışmada, ozon oksidasyonunun kuvvetli, orta ve zayıf buğday çeşitlerinin R₅ değerlerini sırasıyla Rus buğdayı 1' in %69, Rus buğdayı 2' nin %35 ve Bezostaya' nın %58.8 oranında arttırmıştır. Ozon oksidasyonunun ekstensogram R₅ (direnc indeksi) değerini artırmasının temel nedeni, ozonun buğday gluten proteinleri üzerindeki kimyasal etkileridir. Ozon, güçlü bir oksidant olarak gluten proteinlerinde bulunan sülfidril (-SH) gruplarını okside ederek disülfid (-SS) bağlarının oluşumunu artırır. Bu bağlar, gluten ağ yapısını güçlendirir ve proteinler arasındaki çapraz bağlanmayı artırarak daha sıkı bir yapı oluşturur. Sonuç olarak, hamurun elastikiyeti artar ve uzatma sırasında daha fazla direnc göstermesine neden olur, bu da ekstensogramda R₅ değerinin yükselmesine katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Rus buğdayı 1' in R₅ değerinin daha yüksek oranda artması ise kuvvetli unlarda gluten proteinleri (özellikle glutenin) yüksek oranda bulunması ve bu proteinler arasında doğal olarak daha fazla disülfid (S-S) bağı varlığına dayanmaktadır. Ozonlama, bu mevcut güçlü yapı üzerinde ek disülfid bağları oluşturarak gluten ağını daha da sıkılaştırır ve dayanıklılığını artırmaktadır. Bu durumun, uzatma sırasında hamurun daha fazla direnc göstermesine neden olduğu ve R₅ değerini daha fazla yükselttiği düşünülmektedir.

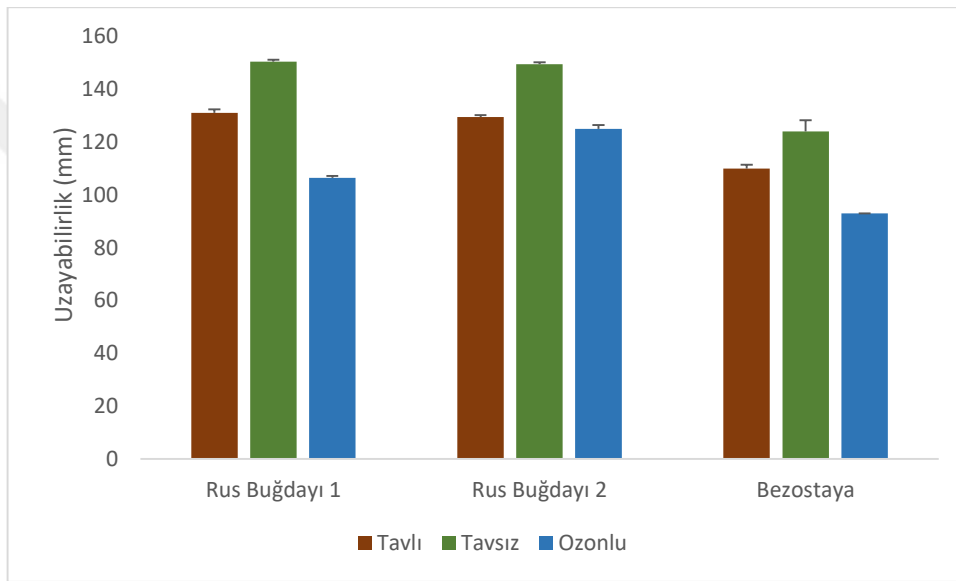
Çalışma bulguları, tavlı ve tavsız buğdaylar için Karaduman (2013) tarafından bildirilen sonuçlarla uyum göstermiştir. Ozonlanmış buğday analiz sonuçları ise buğday ununun ozonlanmasını inceleyen Demir vd. (2011) ile Elgün ve Bilgiçli (2019) tarafından elde edilen bulgularla benzerlik göstermektedir.

Buğdaylara ait ekstensogram uzayabilirlik (mm) değeri iki yönlü varyans analiz tablosu ve interaksiyon grafiği sırasıyla Tablo 3.19 ve Şekil 3.18' de verilmiştir.

Tablo 3.19. Buğday çeşidi ve yöntemine göre uzayabilirlik (mm) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Yöntem	Buğday çeşidi				F	p	η^2
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya	Toplam			
Tavlı	131 ± 1,41 ^B	129,5 ± 0,71 ^{BC}	110 ± 1,41 ^D	123,5 ± 10,52 ^b	Buğday	<0,001	0,988
Tavsız	150,5 ± 0,71 ^A	149,5 ± 0,71 ^A	124 ± 4,24 ^C	141,33 ± 13,57 ^a	Yöntem	<0,001	0,992
Ozonlu	106,5 ± 0,71 ^D	125 ± 1,41 ^{BC}	93 ± 0 ^E	108,17 ± 14,39 ^c	Buğday*Yöntem	<0,001	0,916

F: Varyans analizi test istatistiği; η^2 : Kısmi Eta Kare; R²: %99,55; Adj. R²: %99,16; Ortalama±standart sapma; a-c: Aynı harfe sahip yöntemler arasında fark yoktur. a-c : Aynı harfe sahip buğday çeşidi arasında fark yoktur. A-E: Aynı harfe sahip etkileşimler arasında fark yoktur.



Şekil 3.18. Buğday çeşidi ve yöntemine göre uzayabilirlik interaksiyon grafiği

Yöntem ayrımı yapmaksızın buğday çeşidine göre uzayabilirlik ortalama değerleri arasında bir fark elde edilmiştir ($p < 0,001$). Rus Buğdayı 1 çeşidinin ortalaması 129,33 mm, Rus Buğdayı 2 çeşidinin ortalaması 134,67 mm ve Bezostaya çeşidinin ortalaması 109 mm olarak elde edilmiştir. Her bir çeşit birbirine göre farklılık göstermektedir.

Çeşit ayrımı yapmaksızın yöntemine göre uzayabilirlik ortalama değerleri arasında bir fark elde edilmiştir ($p < 0,001$). Ozonlanmamış tavlı hammadde yönteminin ortalaması 123,5 mm, Ozonlanmamış tavsız hammadde yönteminin ortalaması 141,33 mm ve Ozonlanmış yönteminin ortalaması 108,17 mm olarak elde edilmiştir. Her bir yöntem birbirine göre farklılık göstermektedir.

Buğday çeşidi ve yöntem etkileşimine göre uzayabilirlik ortalama değerleri arasında bir fark elde edilmiştir ($p < 0,001$). Buğday çeşitleri arasında yapılan analizde, Rus Buğdayı 1 çeşidinde

yöntemler arasında anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir. En yüksek ortalama uzayabilirlik değeri tavsız yöntemde, en düşük ortalama uzayabilirlik değeri ise ozonlu yöntemde elde edilmiştir. Rus Buğdayı 2 çeşidinde, tavlı ve ozonlu yöntemler arasında uzayabilirlik değerleri açısından benzerlik bulunmuş, ancak tavsız yöntem diğerlerinden farklılık göstermiştir. Bu çeşitte de en yüksek ortalama uzayabilirlik değeri tavsız yöntemde, en düşük ortalama uzayabilirlik değeri ozonlu yöntemde gözlemlenmiştir. Bezostaya çeşidinde ise tüm yöntemler arasında anlamlı farklılıklar saptanmış olup, en yüksek ortalama uzayabilirlik değeri tavsız yöntemde, en düşük ortalama uzayabilirlik değeri ise ozonlu yöntemde elde edilmiştir. Bu bulgular, buğday çeşitleri ve uygulanan yöntemlerin uzayabilirlik değeri üzerinde farklı etkiler yarattığını ortaya koymaktadır.

Çalışmada, ozon oksidasyonunun kuvvetli, orta ve zayıf buğday çeşitlerinin uzayabilirlik değeri sırasıyla Rus buğdayı 1' in %18,70, Rus buğdayı 2' nin %3,47 ve Bezostaya' nın %15,45 oranında azaltmıştır. Ozon oksidasyonunun buğdayların uzayabilirlik değerini azaltması gluten ağının viskozitesinden ve uzatılabilirliğinden sorumlu olan gliadinin yapısını etkileyerek uzama fonksiyonu üzerinde olumsuz etki yaparak esnekliği düşürmesinden kaynaklanabilir.

Bu bulgular, tavlı ve tavsız buğdaylar için Aydoğan ve Soylu (2020) ile Karaduman (2013) tarafından bildirilen sonuçlarla uyumlu bulunurken, Türk (2013) ile farklılık göstermektedir. Ozonlanmış buğday analiz sonuçları, buğday ununun ozonlanmasına yönelik yapılan çalışmalar arasında Elgün ve Bilgiçli (2019) ile benzerlik gösterirken, Zhu (2018) ve Demir vd. (2011) tarafından elde edilen bulgularla farklılık göstermektedir.

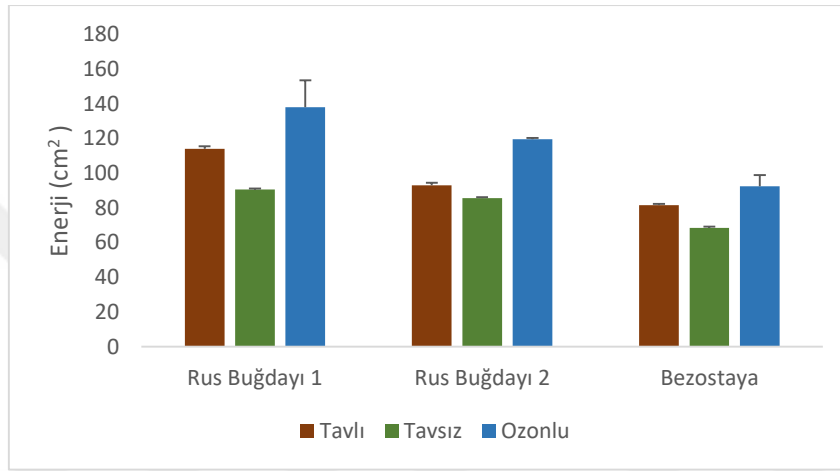
Uzayabilirlik değeri, hamurda gluten proteinlerinin ağ yapısının ne kadar esnek olduğunu gösterir. Gluten, hamura uzayabilme ve elastikiyet kazandıran protein yapılarından oluşur. Yüksek bir E değeri, güçlü ve esnek bir gluten ağına işaret eder, bu da hamurun genişleyebilme kapasitesini artırır. Esnek ve dayanıklı gluten yapısı, hamurun fermantasyon sırasında üretilen gazları tutmasını sağlayarak ekmeğin hacmini ve gözenek yapısını iyileştirir. Endüstriyel ekmekçilikte uzayabilirlik değeri, hamurun yoğurma, şekillendirme ve pişirme gibi süreçlerde nasıl bir tepki vereceğini belirlemek açısından önemlidir. Yüksek uzayabilirlik değeri, hamurun çeşitli işlemler esnasında esnekliğini koruyabilmesini ve işlemlere kolay adapte olmasını sağlar. E değeri yüksek hamurlar, şekil verme ve pişirme sırasında kabarıklığını ve formunu koruyarak endüstriyel süreçlerde tercih edilir. Bu, daha homojen ve kaliteli bir ürün elde edilmesini sağlarken, üretim verimliliğini artırır.

Buğdaylara ait eksensogram enerji (cm²) değeri iki yönlü varyans analiz tablosu ve interaksiyon grafiği sırasıyla Tablo 3.20 ve Şekil 3.19' da verilmiştir.

Tablo 3.20. Buğday çeşidi ve yöntemle göre enerji (cm²) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Yöntem	Buğday çeşidi				F	p	η^2	
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya	Toplam				
Tavlı	114 ± 1,41	93 ± 1,41	81,5 ± 0,71	96,17 ± 14,77 ^b	Buğday	52,112	<0,001	0,921
Tavsız	90,5 ± 0,71	85,5 ± 0,71	68,5 ± 0,71	81,5 ± 10,33 ^c	Yöntem	58,299	<0,001	0,928
Ozonlu	138 ± 15,56	119,5 ± 0,71	92,5 ± 6,36	116,67 ± 21,81 ^a	Buğday*Yöntem	2,849	0,089	0,559

F: Varyans analizi test istatistiği; η^2 : Kısmi Eta Kare; R²: %99,55; Adj. R²:%99,16; Ortalama±standart sapma; ^{a-c}: Aynı harfe sahip yöntemler arasında fark yoktur. ^{a-c}: Aynı harfe sahip buğday çeşidi arasında fark yoktur.



Şekil 3.19. Buğday çeşidi ve yöntemle göre enerji interaksiyon grafiği

Yöntem ayrımı yapmaksızın buğday çeşidine göre Enerji ortalama değerleri arasında bir fark elde edilmiştir ($p < 0,001$). Rus Buğdayı 1, Rus Buğdayı 2 ve Bezostaya çeşitleri için elde edilen A ortalama değerleri sırasıyla 114,17 cm², 99,33 cm² ve 80,83 cm² olarak tespit edilmiştir. Her bir buğday çeşidinin ortalama değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar bulunmuştur. Çeşit ayrımı yapılmaksızın yöntemler arasında yapılan analizde, A ortalama değerleri açısından anlamlı farklılıklar gözlemlenmiştir ($p < 0,001$). Tavlı için ortalama 96,17 cm², tavsız için 81,5 cm² ve ozonlu yöntem için 116,67 cm² olarak hesaplanmıştır. Her bir yöntem, diğer yöntemlerden anlamlı olarak farklılık göstermiştir. Ancak, buğday çeşidi ve kullanılan yöntem arasındaki etkileşimin A ortalama değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olmadığı belirlenmiştir ($p = 0,089$).

Buğdayların ortalama değerleri karşılaştırıldığında en yüksek değere kuvvetli olan Rus buğdayı 1' in en düşük değere ise zayıf buğday Bezostaya çeşitinin sahip olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca ozon uygulamasıyla birlikte A değerinin Rus buğdayı 1' in ortanca değerinin %21,5, Rus buğdayı 2 ortanca değerinin %28,49 ve Bezostaya' nın %13,49 oranında arttığı belirlenmiştir. Bunun ozon oksidasyonu ile gluten yapısındaki çapraz bağlanmaların artması dolayısıyla hamurun yapısal stabilitesini artırması ve uzatma işlemi sırasında

kopmalara karşı daha dayanıklı hale gelmesiyle toplam enerji gereksiniminin (A değeri) artmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Çalışma bulguları, tavlı ve tavsız buğdaylar için Aydoğan ve Soylu (2020) tarafından bildirilen sonuçlarla benzerlik gösterirken, Karaduman (2013) ile farklılık göstermektedir. Ozonlanmış buğday analiz sonuçları ise buğday ununun ozonlanması üzerine yapılan çalışmalarla, özellikle Demir vd. (2011) ile Elgün ve Bilgiçli (2019) tarafından bildirilen bulgularla uyumludur.

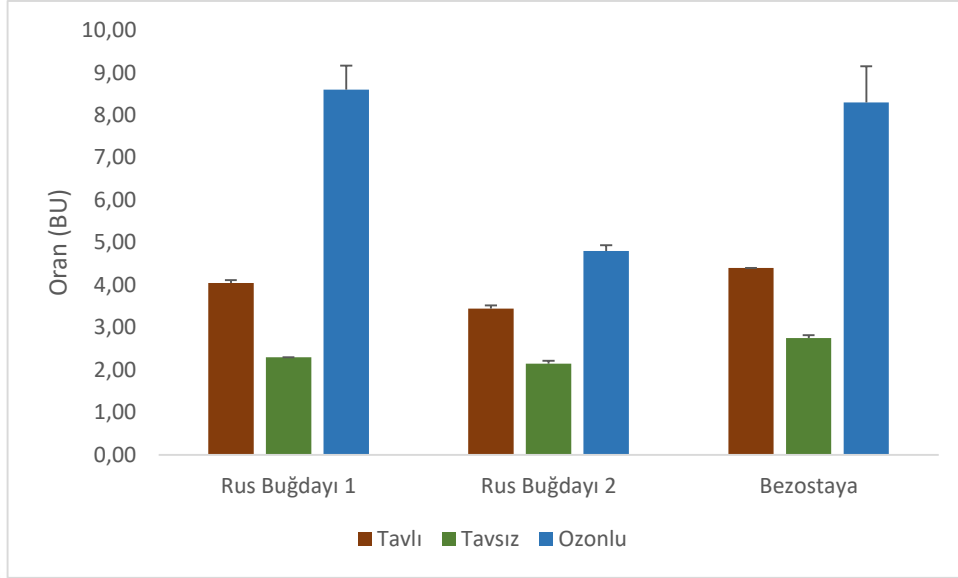
Ekstensogram analizinde Enerji değeri, hamurun uzama sırasında harcanan toplam enerjiyi ifade eder ve bu değer hamurun esneklik, dayanıklılık ve gluten ağının sağlamlığı gibi özelliklerini belirlemede kritik bir rol oynar. Enerji değeri, ekstensogram eğrisinin altındaki alan olarak hesaplanır ve hamurun uzayabilirlik kapasitesinin yanı sıra gluten yapısının dayanıklılığı hakkında bilgi verir. Ekmekçilik açısından Enerji değeri, hamurun kabarma potansiyeli, fermantasyon süresince gaz tutma kapasitesi ve pişirme sırasında formunu koruyabilmesi gibi özellikleri doğrudan etkileyen önemli bir parametredir.

Buğdaylara ait ekstensogram oran (BU) değeri iki yönlü varyans analiz tablosu ve interaksiyon grafiği sırasıyla Tablo 3.21 ve Şekil 3.20' te verilmiştir.

Tablo 3.21. Buğday çeşidi ve yöntemle göre oran (BU) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Yöntem	Buğday çeşidi				F	p	η^2	
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya	Toplam				
Tavlı	4,05 ± 0,07 ^{BC}	3,45 ± 0,07 ^{BCD}	4,4 ± 0 ^B	3,97 ± 0,43 ^b	Buğday	43,014	<0,001	0,905
Tavsız	2,3 ± 0 ^D	2,15 ± 0,07 ^D	2,75 ± 0,07 ^{CD}	2,4 ± 0,28 ^c	Yöntem	304,056	<0,001	0,985
Ozonlu	8,6 ± 0,57 ^A	4,8 ± 0,14 ^B	8,3 ± 0,85 ^A	7,23 ± 1,94 ^a	Buğday*Yöntem	18,424	<0,001	0,891

F: Varyans analizi test istatistiği; η^2 : Kısmi Eta Kare; R²: %98,84; Adj. R²:%97,81; Ortalama±standart sapma; a-b: Aynı harfe sahip yöntemler arasında fark yoktur. a-c : Aynı harfe sahip buğday çeşidi arasında fark yoktur. A-D: Aynı harfe sahip etkileşimler arasında fark yoktur.



Şekil 3.20. Buğday çeşidi ve yönteme göre oran interaksiyon grafiği

Buğday çeşidi ve yöntem etkileşimine göre oran ortalama değerleri arasında bir fark elde edilmiştir ($p < 0,001$). Rus buğday 1 için en yüksek ortalama oran değeri ozonlu yöntemde, en düşük değer ise tavsız yöntemde elde edilmiştir. Rus Buğdayı 2 çeşidinde, tavsız ve ozonlu yöntemler arasında farklılık gözlenmiş, ancak tavlı yöntem diğer iki yöntemle benzerlik göstermiştir. Bu çeşitte de en yüksek ortalama oran değeri ozonlu yöntemde, en düşük değer ise tavsız yöntemde saptanmıştır. Bezostaya çeşidinde ise tüm yöntemler arasında anlamlı farklılıklar tespit edilmiş olup, en yüksek ortalama oran değeri ozonlu yöntemde, en düşük değer ise tavsız yöntemde elde edilmiştir. Bu bulgular, yöntemlerin buğday çeşitleri üzerindeki etkilerinin farklı olduğunu ortaya koymaktadır.

Çeşit ayrımı yapmaksızın yöntemlere göre oran ortalama değerleri arasında bir fark elde edilmiştir ($p < 0,001$). Tavlı buğday ortalaması 3,97, tavsız buğday ortalaması 2,4 ve ozonlu buğday ortalaması 7,23 olarak elde edilmiştir. Her bir yöntem birbirine göre farklılık göstermektedir.

Çalışma sonucunda ozonlama işlemi ile birlikte kuvvetli buğday Rus buğdayı 1 için oran %112,3, orta buğday Rus buğdayı 2 için %39,13 ve zayıf buğday Bezostaya için %88,6 oranında artmıştır. Bunun ozon oksidasyonunun tüm buğday çeşitlerinde, ozonun gluten yapısındaki çapraz bağları güçlendirerek hamurun viskoelastik özelliklerini iyileştirmesi ve elastikiyetini artırmasıdır. Bu, hem kuvvetli hem de zayıf buğdaylarda etkili olur ve hamurun işlenebilirliğini ve uzama kapasitesini artırarak oran değerini yükselttiği bildirilmiştir.

Çalışma bulguları, ozon oksidasyonunun buğdayın gluten yapısına etkilerini daha iyi anlamak ve ekstensogram parametrelerindeki değişimleri detaylı bir şekilde incelemek için önemli bir

referans oluşturabilir. Özellikle, farklı buğday çeşitlerinde ozonlamanın oran üzerindeki etkisinin ortaya konulması, literatürdeki bilgi boşluğunu doldurabilecek niteliktedir.

Ekstensogram eğrisinde oran, R_5 ve E değerlerinin bir oranı olarak hesaplandığı için doğrudan grafik üzerinde bir konuma sahip olmamakla birlikte, eğrinin genel profili üzerinden değerlendirilir. Yüksek Ratio number değerleri, eğrinin daha dik ve dar bir yapıda olduğunu gösterir; bu, hamurun daha dayanıklı ancak daha az uzayabilir olduğunu ifade eder. Düşük Ratio number ise daha geniş ve uzayan bir eğri yapısına işaret eder; bu da hamurun daha esnek ve uzayabilir olduğunu gösterir.

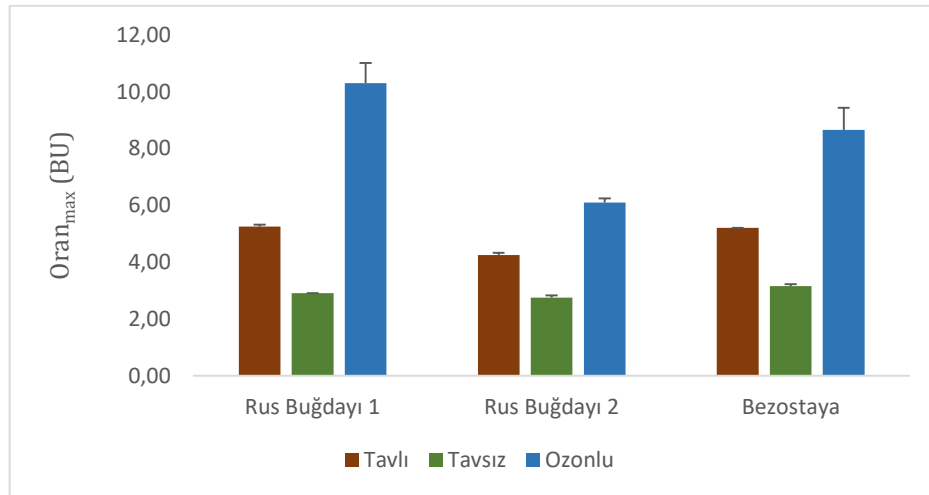
Ekmeğin üretiminde oran, hamurun gaz tutma kapasitesi ve fermantasyon sırasındaki genişleme yeteneği üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Yüksek oran değerine sahip hamurlar, gaz tutma kapasitesini artırarak ekmeğin kabarma ve hacim kalitesini olumlu yönde etkiler; ancak esneklikleri düşük olduğu için hamurun fazla genişlemesi sınırlıdır.

Buğdaylara ait ekstensogram oran (max) değeri iki yönlü varyans analiz tablosu ve interaksiyon grafiği sırasıyla Tablo 3.22 ve Şekil 3.21’te verilmiştir.

Tablo 3.22. Buğday çeşidi ve yöntemine göre $oran_{max}$ (BU) değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Yöntem	Buğday çeşidi				F	p	η^2	
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya	Toplam				
Tavlı Buğday	5,25 ± 0,07 ^{CD}	4,25 ± 0,07 ^{DE}	5,2 ± 0 ^{CD}	4,9 ± 0,51 ^b	Buğday	40,118	<0,001	0,899
Tavsız Buğday	2,9 ± 0 ^{EF}	2,75 ± 0,07 ^F	3,15 ± 0,07 ^{EF}	2,93 ± 0,19 ^c	Yöntem	354,581	<0,001	0,987
Ozonlu	10,3 ± 0,71 ^A	6,1 ± 0,14 ^C	8,65 ± 0,78 ^B	8,35 ± 1,95 ^a	Buğday*Yöntem	17,952	<0,001	0,889

F: Varyans analizi test istatistiği; η^2 : Kısmi Eta Kare; R^2 : %98,97; Adj. R^2 : %98,05; Ortalama±standart sapma; a-b: Aynı harfe sahip yöntemler arasında fark yoktur. a-c : Aynı harfe sahip buğday çeşidi arasında fark yoktur. A-F: Aynı harfe sahip etkileşimler arasında fark yoktur.



Şekil 3.21. Buğday çeşidi ve yöntemine göre $oran_{max}$ interaksiyon grafiği

Ekstensogram analizinde "oran maksimum" değeri, hamurun maksimum direnç (Rm) değerinin uzama kapasitesi (E) değerine oranlanmasıyla elde edilen en yüksek değeri ifade eder.

Yöntem ayrımı yapmaksızın buğday çeşidine göre oran (max) ortalama değerleri arasında bir fark elde edilmiştir ($p < 0,001$). Rus Buğdayı 1 çeşidinin ortalaması 6,15, Rus Buğdayı 2 çeşidinin ortalaması 4,37 ve Bezostaya çeşidinin ortalaması 5,67 olarak elde edilmiştir. Rus buğdayı 2 ile diğer çeşitler arasında bir fark elde edilmiştir.

Buğday çeşidi ve yöntem etkileşimine göre oran (max) ortalama değerleri arasında bir fark elde edilmiştir ($p < 0,001$). Buğday çeşitlerine göre yapılan analizde, oran (max) değerleri açısından yöntemler arasında anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir. Rus buğdayı 1 çeşidinde, en yüksek ortalama oran (max) değeri ozonlu yöntemde, en düşük değer ise tavsız yöntemde elde edilmiştir. Benzer şekilde, Rus buğdayı 2 çeşidinde de tüm yöntemler arasında farklılık bulunmuş olup, en yüksek ortalama değer ozonlu yöntemde, en düşük değer tavsız yöntemde gözlemlenmiştir. Bezostaya çeşidinde de yöntemler arasında anlamlı farklılıklar saptanmış ve en yüksek ortalama oran (max) değeri ozonlu yöntemde, en düşük değer ise tavsız yöntemde tespit edilmiştir. Bu bulgular, buğday çeşitleri ve uygulanan yöntemlerin oran (max) değeri üzerinde farklı etkiler yarattığını ortaya koymaktadır.

Çalışma sonucunda ozonlama işlemi ile birlikte Rus buğdayı 1 için oran (max) %96,19, Rus buğdayı 2 için %43,52 ve Bezostaya için %66,34 oranında artmıştır. Bu artış, ozonlama işlemi sırasında gluten proteinlerinde meydana gelen oksidasyon, disülfid bağlarının artışı, protein polimerizasyonu ve protein-nişasta etkileşimlerinin güçlenmesiyle ilişkilendirilebilir. Kuvvetli buğdaylarda başlangıçta daha sağlam bir ağ yapısı bulunduğu için ozonun etkisi daha belirgin olurken, zayıf ve orta buğdaylarda ozonlama, protein yapısını iyileştirerek artış sağladığı düşünülmektedir.

Bu çalışma, ozonlama işleminin kuvvetli, orta ve zayıf buğday çeşitlerindeki oran (max) değerini artırma mekanizmasını ortaya koyarak, ozonlamanın gluten yapısına olan etkileri hakkında literatürdeki bilgi boşluğunu doldurmaktadır. Farklı buğday çeşitlerinde ozonlamanın etkilerini karşılaştırmalı olarak ele alması, bu yöntemin optimize edilmesi ve unlu mamul sektöründe uygulanabilirliği açısından önemli bir referans oluşturmaktadır. Ayrıca, buğdayın tane formunda ozonlamaya odaklanan çalışma, un ve hamur kalitesini iyileştirme süreçlerinde ozonlamanın nasıl kullanılabileceğini açıklayarak, endüstriyel uygulamalara ve gıda işleme teknolojisine yönelik yeni perspektifler sunmaktadır.

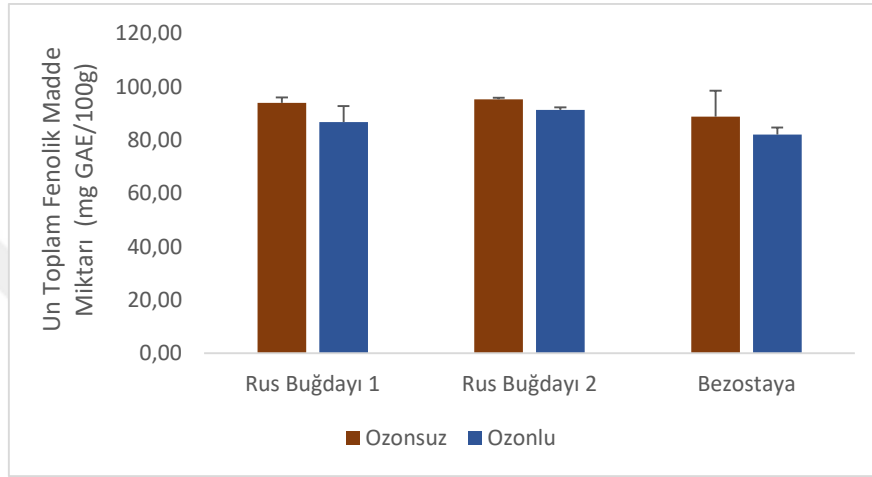
3.4.7. Toplam fenolik madde tayini sonuçları

Buğday unlarına ait toplam fenolik bileşen madde iki yönlü varyans analiz tablosu ve interaksiyon grafiği sırasıyla Tablo 3.23 ve Şekil 3.22' de verilmiştir.

Tablo 3.23. Buğday çeşidi ve yöntemine göre un toplam fenolik madde miktarına (mg GAE/100g) ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Yöntem	Buğday Çeşidi			Toplam		F	p	η^2
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya					
Ozonsuz	93,95±2,08	95,29±0,52	88,80±9,71	92,68±5,40	Buğday	2,630	0,151	0,467
Ozonlu	86,72±6,07	91,25±1,04	82,06±2,60	86,67±5,08	Yöntem	4,530	0,077	0,430

F: Varyans analizi test istatistiği; η^2 : Kısmi Eta Kare; R²: %62,59; Adj. R²:%31,41; Ortalama±standart sapma



Şekil 3.22. Buğday çeşidi ve yöntemine göre Un Toplam Fenolik Madde Miktarı interaksiyon grafiği

Bu çalışma kapsamında, yöntem ayrımı yapılmaksızın buğday çeşitlerine göre un toplam fenolik madde miktarı ortalama değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmemiştir ($p=0,151$). Rus Buğdayı 1'in 90,33 mg GAE/100g ve Rus Buğdayı 2'nin 93,27 mg GAE/100g, Bezostaya çeşidinin ortalama değeri 85,43 mg GAE/100g olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, buğday çeşidi ayrımı yapılmaksızın yöntemlere göre un toplam fenolik madde miktarı ortalama değerleri arasında da anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p=0,077$). Ozonlu yöntemin ortalaması 86,67 mg GAE/100g, ozonsuz yöntemin ortalaması ise 92,68 mg GAE/100g olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, buğday çeşidi ve yöntem etkileşiminin un toplam fenolik madde miktarı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olmadığı belirlenmiştir ($p=0,886$).

Buğdayda bulunan fenolik bileşenler, temel olarak fenolik asitler (ferulik asit, sinapik asit, kafeik asit, kumarik asit), flavonoidler (apigenin, luteolin) ve tanenler gibi polifenolik bileşiklerden oluşmaktadır. Fenolik bileşenler, fenolik bir halkaya bağlı hidroksil (-OH) grupları içeren yapılarından dolayı antioksidan özelliklere sahiptir ve oksidatif stresle mücadelede kritik rol oynar. Çalışmada fenolik bileşen miktarının ozonlama işleminden etkilenmemesinin başlıca nedeni, bu bileşenlerin oksidasyona karşı dirençli aromatik halkalar

içermesi ve ozonun bu yapılar üzerinde sınırlı etkisinin olmasından kaymaklandığı düşünülmektedir. Yapılan araştırmada, tahıl çekirdeğinin hücre duvarı, protein ve nişasta bileşenlerinin, un veya çekirdek matrisine ozon penetrasyonunu engellediği, bu nedenle polifenol bileşiklerinin ozon oksidasyonundan daha az etkilendiği de literatürde belirtilmiştir (Zhu, 2018). Ayrıca literatürde ozon uygulaması diğer bileşenlerde olduğu gibi tahılın biyoaktif bileşenleri üzerinde uygulanan parametrelere bağlı olarak değiştiği bildirilmiştir (Kaur vd., 2022). Çalışmanın bulguları, buğday ununa ozon oksidasyonu üzerine çalışan Elgün ve Bilgiçli (2019) ile benzerlik gösterirken, Obadi ve diğerlerinin (2018) bulgularıyla farklılık göstermektedir. Fenolik bileşiklerin hamur reolojisi üzerindeki etkisi ise, gluten ve nişasta gibi temel bileşenlerle olan kimyasal etkileşimlerine dayanır ve bu etkiler literatürde detaylı olarak incelenmiştir. Han ve Koh (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, fenolik asitlerin (örneğin ferulik ve kafeik asit) gluten proteinlerini modifiye ederek hamurun uzama direncini azalttığı ve uzayabilirliğini artırdığı, ancak aynı zamanda ekmek hacmini düşürdüğü gösterilmiştir (Han ve Koh, 2011). Ayrıca, Wang ve diğerlerinin (2021) yaptığı araştırmada çözünmeyen diyet lifleri ve ferulik asit kombinasyonunun, gluten ile çapraz bağlanarak hamurun viskoelastik özelliklerini güçlendirdiği, plastiklik etkisini azalttığı ve nişastanın jelleşme özelliklerini zayıflattığı tespit edilmiştir (Wang vd., 2021). Sivam ve diğerlerinin (2011) çalışması, fenolik antioksidanların ve pektin gibi diyet liflerinin hamur içindeki çapraz bağlanma mikro yapısını stabilize ederek, elastiklik (G') ve viskozite (G'') modüllerini artırdığını ortaya koymuştur (Sivam vd., 2011). Bu etkileşimlerin sonucunda, hamurun işlenebilirliği ve fırınlanmış ürünlerin tekstürel özellikleri üzerinde önemli değişiklikler gözlemlenmiştir. Genel olarak, fenolik bileşikler gluten ağını stabilize etme veya modifiye etme potansiyeline sahiptir ve bu durum hamurun reolojik davranışını ve nihai ürün kalitesini şekillendirmektedir.

Ozon uygulamasının buğday tanesinin toplam fenolik bileşen miktarı üzerinde etkili olmamasının temel nedeninin, işlemin buğdayın tane formunda uygulanması ve ozonun fenolik bileşenlerin yoğunlaştığı iç katmanlara nüfuz etmede sınırlı kalması olduğu düşünülmektedir. Fenolik bileşenlerin büyük bir kısmı, buğday tanesinin hücre duvarlarına bağlı durumda bulunur ve bunlara "bağlı fenolikler" denir. Kepek kısmında, özellikle ferulik asit, arabinoksilanlar gibi hücre duvarı bileşenlerine ester bağları ile bağlanmıştır. "Serbest fenolikler" daha az bulunur ve genellikle endospermde yer alır. Fenolik bileşenler, buğday tanesinin dış katmanlarında (özellikle kepek ve aleuron tabakasında) bulunmasına rağmen, bu katmanlar ozonun tam olarak içeri girmesini engelleyebilecek yapısal bir bariyer oluşturabilir. Kepek tabakasında bulunan selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi polisakkaritler, ozonun daha derin dokulara geçişini sınırlandırarak fenolik bileşenlere ulaşmasını zorlaştırabilir.

Ozon, tanenin yüzeyinde bulunan protein ve nişasta ile reaksiyona girerek kimyasal etkisinin büyük bir kısmını yüzeyde harcar. Bu süreç, ozonun iç katmanlara ulaşmadan yüzeyde tükenmesine yol açabilir. Ayrıca, fenolik bileşenlerin çoğunun hücre duvarlarına bağlanmış halde bulunması, ozonun bu bileşenlere etkisini daha da sınırlar. Tane formunda uygulanan

ozonlama işlemi, buğday tanesinin bütünlüğünü koruduğundan, fenolik bileşenlerin buğdayın işlenmiş formundaki (örneğin un) durumuna göre daha az etkilenmesine neden olabilir.

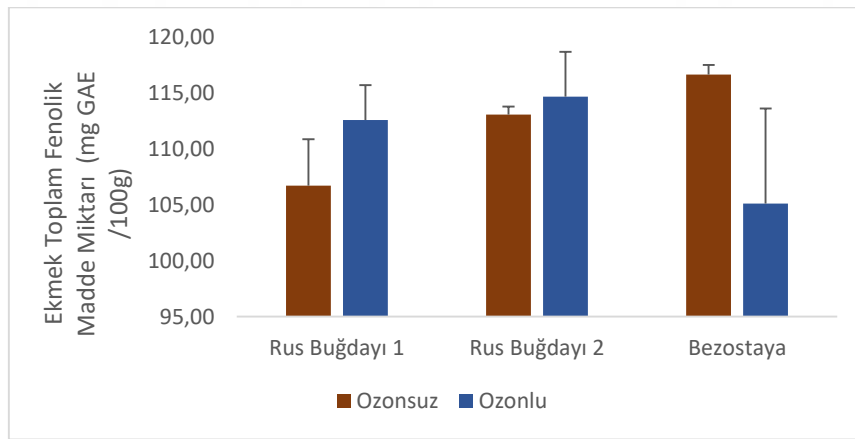
Bu sınırlı nüfuz etkisi, ozonun buğday tanesindeki toplam fenolik madde miktarını değiştirmemesiyle sonuçlanmıştır. Ozonlama süresinin veya dozunun artırılması gibi işlem parametrelerinin değiştirilmesi durumunda, bu etkilerin farklılaşabileceği, ancak tane formunun korunduğu bu gibi uygulamalarda etkilerin yüzeyle sınırlı kalmasının doğal bir sonuç olduğu söylenebilir. Bu durum, ozonun buğday tanesine olan etkisinin daha çok yüzeyde ve dış katmanlarla sınırlı kaldığını göstermektedir.

Ekmek örneklerine ait Toplam fenolik bileşen madde (mg GAE /100g) iki yönlü varyans analiz tablosu ve interaksiyon grafiği sırasıyla Tablo 3.24 ve Şekil 3.23' de verilmiştir.

Tablo 3.24. Buğday çeşidi ve yöntemine göre ekmek toplam fenolik madde miktarına (mg GAE/100g) ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Yöntem	Buğday Çeşidi			Toplam		F	p	η^2
	Bezostaya	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2					
Ozonlu	105,10±8,49	112,57±3,12	114,66±3,99	110,78±6,31	Buğday	0,980	0,429	0,246
Ozonsuz	116,62±0,87	106,69±4,16	113,06±0,69	112,12±4,89	Yöntem	0,280	0,616	0,045

F: Varyans analizi test istatistiği; η^2 : Kısmi Eta Kare; R²: %64,12; Adj. R²:%34,22; Ortalama±standart sapma



Şekil 3.23. Buğday çeşidi ve yöntemine göre Ekmek Toplam Fenolik Madde Miktarı interaksiyon grafiği

Ekmeklerde toplam fenolik madde miktarının un formuna göre daha yüksek tespit edilmiştir (ozonlanmış Rus buğdayı 1 için %29,9, Rus buğdayı 2 için %25,37 ve Bezostaya için %28,07; ozonsuz Rus buğdayı 1 %13,56, Rus buğdayı 2 için %18,64 ve Bezostaya için %31,32). Fenolik bileşen miktarının ekmek yapımıyla artması, fermantasyon ve pişirme süreçlerindeki

biyokimyasal ve termal dönüşümlerden kaynaklanmaktadır. Ekmek hamurunun fermantasyonu sırasında, buğday ununda doğal olarak bulunan enzimler (esteraz, fenolik asit dekarboksilaz ve polifenol oksidaz) aktif hale gelerek bağlı fenolik asitlerin serbestleşmesini sağlar. Esterazlar, ferulik asit gibi fenolik asitlerin hücre duvarı bileşenleriyle oluşturduğu ester bağlarını kırarken, fenolik asit dekarboksilaz bu bileşiklerin daha aktif formlara dönüşümüne katkıda bulunur. Polifenol oksidaz ise fenolik bileşiklerin oksidasyonunu tetikleyerek reaktif ürünlerin oluşumunu destekler. Fermantasyon sırasında mayaların metabolitleri, hücre duvarlarını parçalayarak fenolik bileşiklerin çözünürlüğünü artırır. Pişirme işlemi ise yüksek sıcaklıkla hücre duvarlarını parçalayarak bağlı fenolik bileşikleri serbest bırakır ve Maillard reaksiyonları gibi termal süreçlerle yeni fenolik yapılar oluşmasını sağlar. Bu süreçler ekmeğin, toplam fenolik madde içeriğini ve antioksidan kapasiteyi artırarak ekmeğin fenolik bileşikler açısından daha zengin hale gelmesine olanak tanımaktadır.

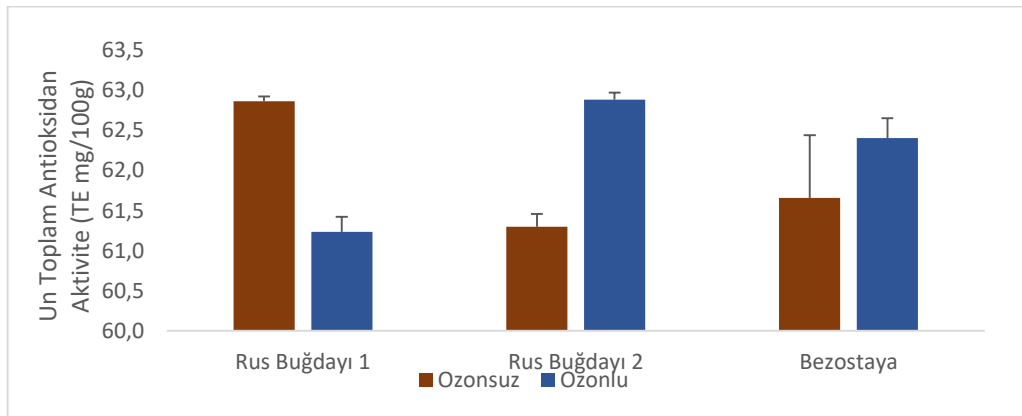
3.4.8. Toplam antioksidan aktivite tayini sonuçları

Buğday unlarına ait toplam antioksidan aktivite tayini (TE mg/100g) iki yönlü varyans analiz tablosu ve interaksiyon grafiği sırasıyla Tablo 3.25 ve Şekil 3.24' de verilmiştir.

Tablo 3.25. Buğday çeşidi ve yöntemine göre Un Toplam Antioksidan Aktivitesine (TE mg/100g) ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Yöntem	Buğday Çeşidi			Toplam		F	p	η^2
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya					
Ozonsuz	62,86±0,06 ^A	61,30±0,16 ^B	61,66±0,78 ^{AB}	61,94±0,82	Buğday	0,030	0,970	0,010
Ozonlu	61,24±0,19 ^B	62,88±0,09 ^A	62,40±0,25 ^{AB}	62,17±0,77	Yöntem	1,360	0,288	0,185

F: Varyans analizi test istatistiği; η^2 : Kısmi Eta Kare; R²: %88,42; Adj. R²:%78,76; Ortalama±standart sapma; A-B: Aynı harfe sahip etkileşimler arasında fark yoktur.



Şekil 3.24. Buğday çeşidi ve yöntemine göre un toplam antioksidan aktivite interaksiyon grafiği

Bu çalışmada, yöntem ayrımı yapılmaksızın buğday çeşitlerine göre un toplam antioksidan aktivite ortalama değerleri arasında anlamlı bir fark tespit edilmemiştir ($p=0,970$). Bezostaya çeşidinin ortalama değeri 62,03 TE mg/100g, Rus Buğdayı 1'in 62,05 TE mg/100g ve Rus Buğdayı 2'nin 62,09 TE mg/100g olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, buğday çeşidi ayrımı yapılmaksızın yöntemlere göre de un toplam antioksidan aktivite ortalama değerleri arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p=0,288$). Ozonlu yöntemin ortalama değeri 62,17 TE mg/100g, ozonsuz yöntemin ise 61,94 TE mg/100g olarak tespit edilmiştir.

Buna karşılık, kuvvetli buğday ve orta buğday çeşitlerinde buğday çeşidi ve yöntem etkileşimine göre un toplam antioksidan aktivite değerleri arasında anlamlı bir fark saptanmıştır ($p=0,002$). Rus buğdayı 1 ozonlama işlemi ile toplam antioksidan aktivite değeri %2,57 azalma, Rus buğdayı 2' nin %2,57 artış gerçekleşmiş olup Bezostaya çeşitinde anlamlı bir fark tespit edilememiştir.

Kuvvetli buğday olan Rus Buğdayı 1'in toplam antioksidan değerindeki azalmanın, başlangıçta daha yüksek fenolik bileşen içeriğine sahip olmasına rağmen, ozon oksidasyonu sırasında fenolik bileşiklerin yapısal bütünlüğünün bozulması ve reaktif oksijen türlerine (ROS) dönüşmesiyle açıklanabileceği düşünülmektedir. Buna karşılık, orta buğdaydaki toplam antioksidan değerindeki artış, başlangıçta orta seviyede bulunan fenolik bileşiklerin ozonlama ile bağlı formdan serbest forma geçmesi ve bu süreçte serbest fenolik bileşiklerin miktarının artmasıyla ilişkilendirilebilir.

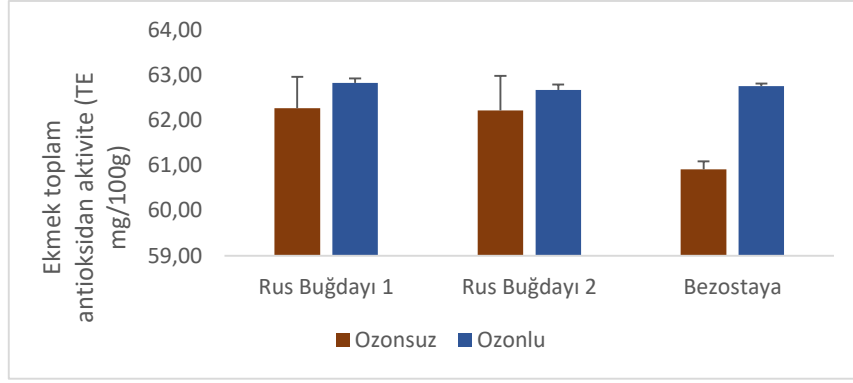
Çalışma sonuçları, mısır nişastasının ozonlanması ile antioksidan aktivitede artış tespit eden Özaslan ve İbanoğlu (2022) tarafından bildirilen bulgularla farklılık göstermektedir. Bununla birlikte, buğday ununun ozonlanması üzerine yapılan çalışmalarla, özellikle Elgün ve Bilgiçli (2019), Obadi vd. (2018) ile Sarooei vd. (2019) tarafından elde edilen sonuçlarla uyumlu bulunmuştur. Literatürde genellikle buğday ununun ozonlanması üzerine yapılan çalışmaların yaygın olduğu, ancak buğday tanesi üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir.

Ekmek örneklerine ait toplam antioksidan aktivite tayini iki yönlü varyans analiz tablosu (TE mg/100g) ve interaksiyon grafiği sırasıyla Tablo 3.26 ve Şekil 3.25' de verilmiştir.

Tablo 3.26. Buğday çeşidi ve yöneme göre ekmek toplam antioksidan aktivitesine (TE mg/100g) ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Yöntem	Buğday Çeşidi			Toplam		F	p	η^2
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya					
Ozonsuz	62,27±0,69	62,22±0,77	60,92±0,17	61,80±0,83	Buğday	3,170	0,115	0,514
Ozonlu	62,83±0,10	62,68±0,12	62,76±0,06	62,76±0,10	Yöntem	14,630	0,009	0,709

F: Varyans analizi test istatistiği; η^2 : Kısmi Eta Kare; R^2 : %82,00; Adj. R^2 : %67,00; Ortalama±standart sapma



Şekil 3.25. Buğday çeşidi ve yöntemine göre ekmek toplam antioksidan aktivite interaksiyon grafiği

Bu çalışmada, yöntem ayrımı yapılmaksızın buğday çeşitlerine göre ekmek toplam antioksidan aktivite ortalama değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p=0,115$). Bezostaya çeşidinin ortalama değeri 61,84 TE mg/100g, Rus Buğdayı 1'in 62,55 TE mg/100g ve Rus Buğdayı 2'nin 62,45 TE mg/100g olarak tespit edilmiştir. Buna karşılık, buğday çeşidi ayrımı yapılmaksızın yöntemlere göre ekmek toplam antioksidan aktivite ortalama değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark gözlemlenmiştir ($p=0,009$). Ozonlu yöntemde üretilen ekmeklerin ortalama değeri 62,76 TE mg/100g, ozonsuz yöntemde ise 61,80 TE mg/100g olarak belirlenmiştir. Ancak, buğday çeşidi ve yöntem etkileşiminin ekmek toplam antioksidan aktivite değerleri üzerindeki etkisi açısından anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p=0,115$).

Ozonlama işlemi ile birlikte toplam fenolik bileşen miktarında artış meydana gelirken, toplam antioksidan madde miktarında değişim meydana gelmeyebilir. Bunun nedeni oksidasyonla birlikte bağlı formdaki fenolik bileşenlerin serbest forma geçmesi ancak serbestleşen fenolik bileşiklerin kimyasal yapısı oksidatif stres altında değişmesinden (yüksek konsantrasyonda ozonlama sonucu hidroksil, süperoksit ve hidroperoksil gibi serbest radikallerin oluşumundan) kaynaklanabilir (Saroei vd., 2019).

Çalışma bulguları, buğday unu üzerinde yapılan araştırmalarla, özellikle Saroei vd. (2019) ile Li vd. (2013) tarafından bildirilen sonuçlarla uyumlu bulunurken, Obadi vd. (2018) tarafından elde edilen bulgularla farklılık göstermektedir. Literatürde, buğday tanesinin ozonlanması üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olması nedeniyle, bu çalışmanın bulgularının mevcut bilgi birikimine önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

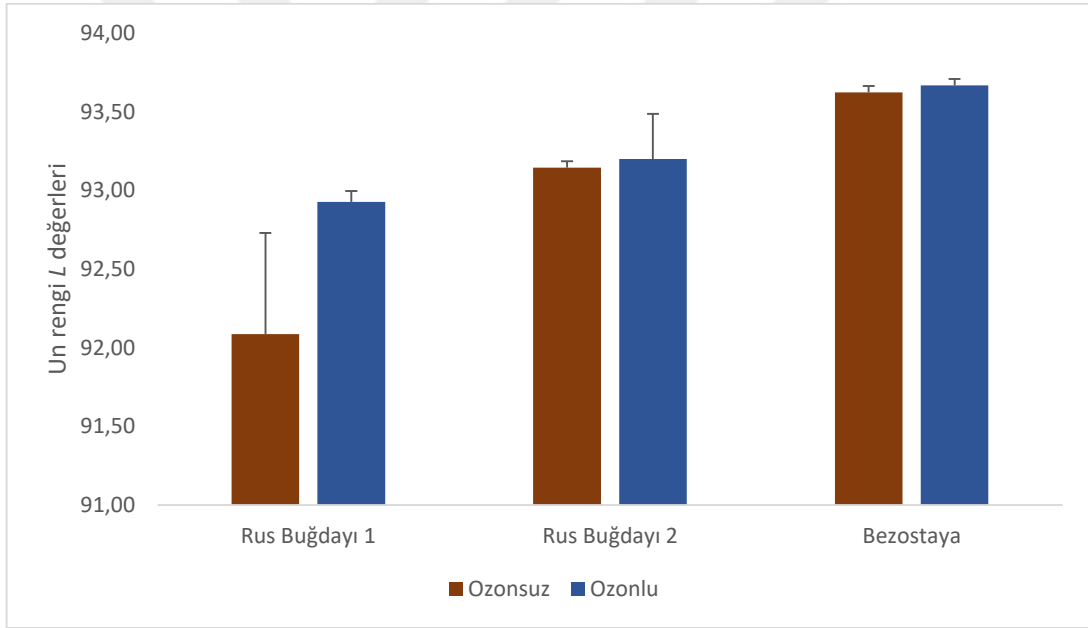
3.4.9. Renk tayini sonuçları

Buğday unlarına ait Renk tayini L , a ve b değerlerine ait iki yönlü varyans analiz tablosu sırasıyla Tablo 3.27, Tablo 3.28 ve Tablo 3.29 'da ve Şekil 3.26, Şekil 3.27 ve Şekil 3.28' de verilmiştir.

Tablo 3.27. Buğday çeşidi ve yönetime göre L değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Yöntem	Buğday çeşidi					F	p	η^2
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya	Toplam				
Ozonsuz	92,09 ± 0,64	93,14 ± 0,04	93,62 ± 0,04	92,95 ± 0,75	Buğday	23,327	<0,001	0,795
Ozonlu	92,93 ± 0,07	93,2 ± 0,29	93,67 ± 0,04	93,26 ± 0,36	Yöntem	5,253	0,041	0,304

F: Varyans analizi test istatistiği; η^2 : Kısmi Eta Kare; R^2 : %83,18; Adj. R^2 : %76,17; Ortalama±standart sapma; ^{a-b}: Aynı harfe sahip yöntemler arasında fark yoktur.

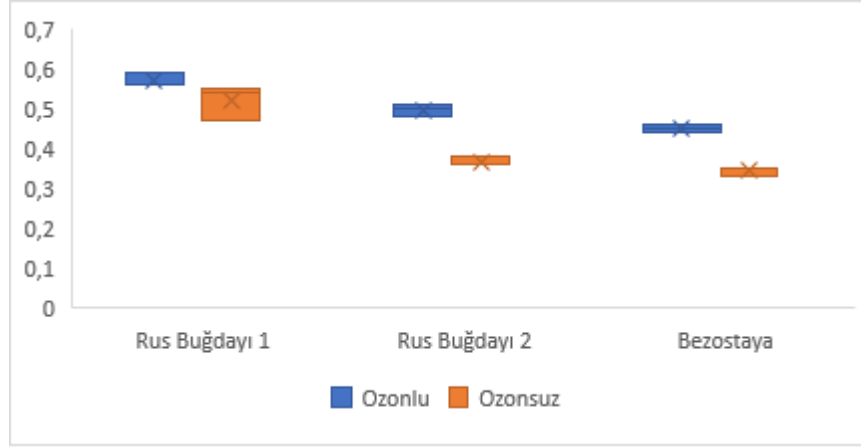


Şekil 3.26. Buğday çeşidi ve yönetime göre L ortalama değerleri

Tablo 3.28. Buğday çeşidi ve yönetime göre a değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Yöntem	Buğday çeşidi					Test İstatistiği	p
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya	Toplam			
Ozonsuz	0,54 (0,47 - 0,55) ^A	0,36 (0,36 - 0,38) ^C	0,35 (0,33 - 0,35) ^D	0,36 (0,33 - 0,55)	Buğday	136,000	<0,001
Ozonlu	0,56 (0,56 - 0,59) ^B	0,5 (0,48 - 0,51) ^A	0,45 (0,44 - 0,46) ^E	0,5 (0,44 - 0,59)	Yöntem	191,000	<0,001

*Robust ANOVA; Ortanca (minimum-maksimum); ^{a-c}: Aynı harfe sahip buğday çeşidi arasında fark yoktur. ^{A-E}: Aynı harfe sahip etkileşimler arasında fark yoktur.

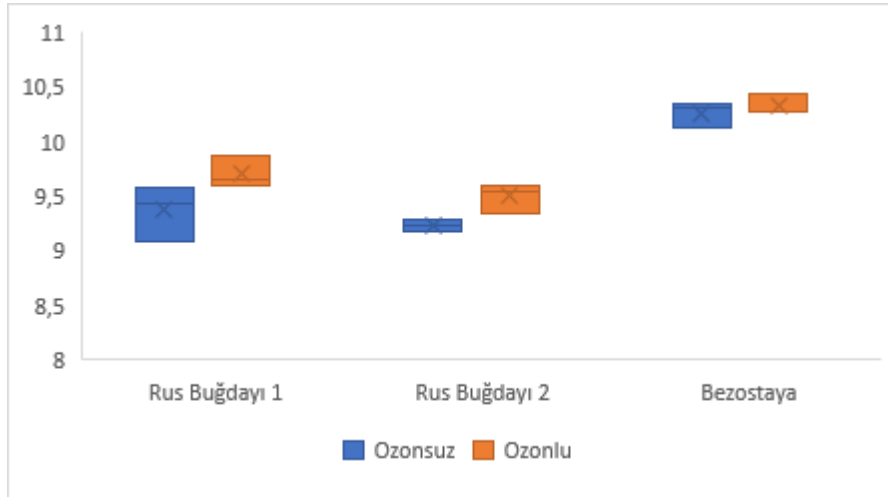


Şekil 3.27. Buğday çeşidi ve yöntemine göre a ortanca değerleri

Tablo 3.29. Buğday çeşidi ve yöntemine göre b değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Yöntem	Buğday çeşidi				Test İstatistiği	p	
	Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya	Toplam			
Ozonsuz	9,44 (9,09 - 9,58) ^{AB}	9,23 (9,17 - 9,28) ^A	10,31 (10,13 - 10,34) ^D	9,44 (9,09 - 10,34)	Buğday	275,900	<0,001
Ozonlu	9,65 (9,59 - 9,87) ^C	9,55 (9,34 - 9,6) ^B	10,28 (10,28 - 10,44) ^D	9,65 (9,34 - 10,44)	Yöntem	14,200	<0,001

*Robust ANOVA; Ortanca (minimum-maksimum); a-b: Aynı harfe sahip buğday çeşidi arasında fark yoktur. A-D: Aynı harfe sahip etkileşimler arasında fark yoktur.



Şekil 3.28. Buğday çeşidi ve yöntemine göre b ortanca değerleri

Buğday çeşitleri ve uygulama yöntemleri arasında L (parlaklık) değerleri açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmadığı tespit edilmiştir (p=0,056). Bu durumun, ozonun buğday

tanelerine tane formunda uygulanmasıyla sınırlı bir etki göstermesinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ozon, güçlü bir oksidan olmasına rağmen, reaksiyonlarının büyük ölçüde buğdayın dış yüzeyindeki bileşenlerle sınırlı kalmış olabileceği ve bu nedenle iç endospermde renk değişikliğine yol açacak düzeyde bir kimyasal dönüşüm yaratmadığı öngörülmektedir.

Endosperm, buğdayın ağırlıklı olarak nişasta ve protein içeren kısmıdır ve pigment içeriği oldukça düşüktür. Nişasta, yapısal olarak inert bir molekül olup, ozonun oksidatif etkilerine karşı yüksek direnç göstermektedir. Benzer şekilde, proteinlerin yapı taşlarını oluşturan amino asitlerin çoğu, ozonun kısa süreli veya düşük konsantrasyonlu uygulamaları sırasında doğrudan etkilenmemektedir. Bu durum, ozonun reaktif türlerinin buğdayın yüzeyindeki pigmentler veya lipidler üzerinde sınırlı reaksiyonlara neden olduğu, ancak bu değişimlerin öğütme sonrası unun iç kısmında belirgin bir renk farklılığı yaratmadığını düşündürmektedir.

Ayrıca, buğday tanelerine uygulanan ozonun konsantrasyonu, uygulama süresi ve tanelerin fiziksel özellikleri (örneğin tane yüzey alanı ve sertlik dereceleri) gibi parametrelerin, ozonun penetrasyon etkinliğini ve reaksiyon derinliğini doğrudan etkilediği bilinmektedir. Çalışmada kullanılan ozon parametrelerinin, tanelerin dış yüzeyinde oksidatif reaksiyonları tetiklediği ancak bu reaksiyonların un formuna yansiyacak derecede bir etkisi olmadığı değerlendirilmektedir. Özellikle ozonun yüzeydeki lipid oksidasyonu ve pigment bozunmasına neden olabileceği bilinmekle birlikte, endosperm içeriği üzerinde benzer bir değişim yaratmadığı için *L* değerinde anlamlı bir farklılık gözlenmemiştir.

Sonuç olarak, bu bulgu, ozonun buğday tanelerine uygulanmasında iç bileşenlere olan etkisinin sınırlı olduğunu ve renk değişikliklerinin unun *L* değerine yansması için daha yoğun veya uzun süreli ozon uygulamalarının gerekebileceğini göstermektedir. Bu nedenle, ozon parametrelerinin optimizasyonunun yanı sıra, farklı buğday çeşitleri ve tanenin işleme şeklinin, *L* değerindeki değişiklikleri anlamak ve kontrol etmek için dikkate alınması önemlidir.

Çalışma bulguları, buğday ununun ozonlanması üzerine yapılan önceki araştırmalardan bazılarıyla (Chittrakorn vd., 2014; Elgün ve Bilgiçli, 2019; Sandhu vd., 2011; Subroto vd., 2022) farklılık göstermektedir. Bununla birlikte, bulgular, Mei vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmayla benzerlik göstermektedir. Ancak bu çalışmanın, literatürde yaygın olarak buğday ununun ozonlanması üzerine yoğunlaşan çalışmalardan farklı olarak, ozonlama işleminin buğdayın tane formunda uygulanması üzerine odaklandığı vurgulanmalıdır. Bu farklılık, buğdayın tane formunda ozonlama işleminin renk parametreleri üzerindeki etkilerine yönelik sınırlı sayıda çalışma bulunması nedeniyle önem taşımaktadır.

Buğday çeşitleri ve uygulama yöntemleri arasında *a* değerleri açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu tespit edilmiştir ($p < 0,001$). En yüksek ortanca *a* değeri, ozonlanmış kuvvetli buğday çeşidi olan Rus Buğdayı 1'de gözlenirken, en düşük ortanca *a* değeri ozonlanmamış zayıf buğday çeşidi olan Bezostaya'da tespit edilmiştir.

Ozon uygulamasının buğday çeşitlerine etkileri incelendiğinde, Rus Buğdayı 1'in *a* değerinde %3,7 oranında, Rus Buğdayı 2'nin *a* değerinde %38,9 oranında ve Bezostaya çeşidinin *a* değerinde %25,6 oranında artış sağladığı belirlenmiştir. Bu bulgular, ozon uygulamasının buğday çeşitlerinde kırmızılık değerini artırıcı bir etki oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Ozon uygulaması sonucunda buğdayın *a* değerindeki artış, buğday yüzeyinde gerçekleşen bir dizi kimyasal reaksiyonun etkisiyle açıklanabilir. Özellikle pigmentlerin (karotenoidler ve flavonoidler gibi), fenolik bileşiklerin, lipidlerin ve proteinlerin ozonun oksidatif etkisine maruz kalması, renk değişimlerini tetikleyen temel mekanizmalardır. Karotenoidlerin oksidasyonu sonucu oluşan ara ürünler ve fenolik bileşiklerin kinon türevlerine dönüşümü, kırmızımı tonların artışında kritik bir rol oynamaktadır. Aynı şekilde, lipid peroksidasyonu ve tirozin gibi amino asitlerin oksidasyonu ile oluşan bileşikler, yüzey rengindeki kırmızılık değerini artırıcı etkiler sağlamaktadır.

Buğday tanelerine ozon uygulaması sırasında meydana gelen reaksiyonların yoğunluğu, başlıca ozonun konsantrasyonu, uygulama süresi, buğdayın fiziksel özellikleri (örneğin, sertlik derecesi ve yüzey bileşenlerinin yapısı) ve kimyasal bileşenlerdeki farklılıklarla doğrudan ilişkilidir. Özellikle buğday çeşitleri arasında pigment ve fenolik madde içeriğinin çeşitlilik göstermesi, ozon uygulamasının etkilerinin buğday türlerine göre farklılık göstermesine neden olmuştur. Kuvvetli buğday tanelerinde, fenolik bileşikler ve pigmentlerin daha homojen dağılımı ve muhtemelen buğdayın yapısal bütünlüğü nedeniyle ozonun etkisinin diğer buğday türlerine göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum, sert buğday çeşitlerinde ozonun kimyasal reaksiyonlar üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu ve bu tür buğdaylarda renk değişimlerinin daha az belirgin olabileceğini destekler niteliktedir.

Sonuç olarak, ozon uygulaması buğday tanelerinin yüzey kimyasını ve optik özelliklerini değiştirerek *a* değerinde artışa yol açmıştır. Bu bulgular, ozonun buğdayın renk özelliklerini değiştirme potansiyeline sahip bir işlem olduğunu ve bu etkilerin buğdayın kimyasal bileşimine ve ozonlama parametrelerine bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, ozonun renk iyileştirici bir teknoloji olarak kullanımını ve farklı buğday türleri için optimize edilmesi gereken bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışma bulguları, buğday ununun ozonlanması üzerine yapılan önceki araştırmalardan bazılarıyla (Hu vd., 2020; Mendez vd., 2003) ile benzerlik göstermemektedir. Ancak (Elgün ve Bilgiçli, 2019) ile benzerdir.

Buğday çeşitleri ve uygulama yöntemleri arasında *b* değerleri açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu belirlenmiştir ($p < 0,001$). Çeşitler arasında yapılan değerlendirmede, en yüksek *b* değerine hem ozonlanmış hem de ozonlanmamış (uygulama yöntemi fark etmeksizin) zayıf buğday çeşidi Bezostaya'nın sahip olduğu, en düşük *b* değerinin ise ozonlanmamış orta sertlikteki buğday çeşidi Rus Buğdayı 2' de gözlemlendiği tespit edilmiştir.

Ozon uygulamasının *b* değerleri üzerindeki etkileri incelendiğinde, Rus Buğdayı 1'in *b* değerinde ozonlama işlemi ile birlikte %2,3 oranında, Rus Buğdayı 2'nin *b* değerinde ise %3,5 oranında bir artış olduğu belirlenmiştir. Ancak, zayıf buğday çeşidi olan Bezostaya'da ozon uygulaması sonucunda *b* değerinde istatistiksel olarak anlamlı bir değişim saptanmamıştır. Bu bulgular, ozon uygulamasının buğday türlerine göre sarılık değeri üzerindeki etkisinin farklılık gösterdiğini ve bu etkinin çeşidin kimyasal ve fiziksel yapısına bağlı olarak değişebileceğini ortaya koymaktadır.

Buğday tanesindeki *b* değeri, öncelikle karotenoid pigmentler, özellikle lutein ve zeaksantin, tarafından belirlenir; bu pigmentler sarı tonların ana kaynağıdır ve buğday çeşitleri arasındaki farklılıklarda belirleyici rol oynar. Karotenoidler, oksidasyona duyarlı olduklarından, ozonlama gibi işlemler bu pigmentlerin yapısını değiştirerek *b* değerinde artışa veya azalışa yol açabilir. Bunun yanında, buğday kepek kısmında bulunan fenolik bileşikler, özellikle ferulik asit, oksidatif reaksiyonlar sırasında kinon türevlerine dönüşerek sarı tonların görünümünü artırabilir. Lipitlerin oksidasyonu, özellikle lipoksigenaz enziminin etkisiyle, karotenoidlerin yıkımına veya stabilizasyonuna neden olabilirken, proteinlerin pigmentlerle etkileşimleri de sarılık değerini dolaylı olarak etkiler. İz mineraller (örneğin demir ve magnezyum) ve riboflavin gibi bileşenler de pigment stabilitesini ve renk özelliklerini etkileyebilir. Ayrıca, buğdayın fiziksel yapısı, özellikle endosperm ve kepek oranı ile tane sertliği, pigmentlerin korunmasını ve dağılımını etkileyerek *b* değerinde farklılıklara neden olabilir. Zayıf buğday Bezostaya çeşitinde *b* değerinin en yüksek değeri alması ise sarılık değerinin ana belirleyicisi olan karotenoid pigmentler (lutein ve zeaksantin), buğday tanesinin endospermde yoğunlaşmış olması ve, genellikle endospermdeki nişasta ve pigment miktarına ters orantılı olmasından, yumuşak buğdaylarda endosperm dokusu daha gevşektir ve bu, pigmentlerin ışığı daha iyi yansıtmasına ve sarılık değerinin daha yüksek görünmesine neden olabilir.

Çalışma bulguları kompozit unun ozonlanması üzerine çalışan (Hu vd., 2022) benzerlik gösterirken, buğday ununun ozonlanması üzerine çalışan (Chittrakorn vd., 2014; Hu vd., 2020) ile benzerlik göstermemektedir.

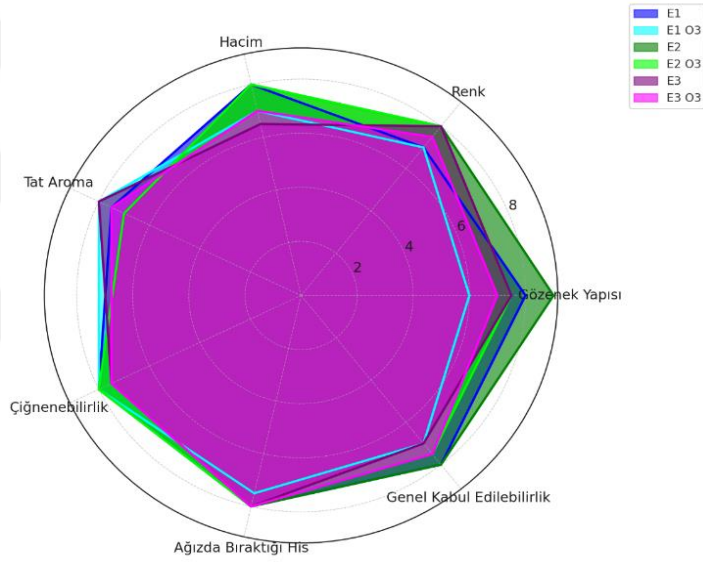
Bu bağlamda, çalışma tane formunda ozon uygulamasının renk özelliklerine etkisinin sınırlı olarak incelendiği mevcut literatüre anlamlı bir katkı sağlayabilecektir. Tane formuna yönelik ozonlama işlemleri, buğdayın kimyasal ve fiziksel özelliklerine olan etkileri açısından daha fazla araştırma gerektiren bir alan olarak değerlendirilmektedir. Elde edilen bulgular, özellikle buğday tanelerinin ozonlama sonrası renk değişikliklerini değerlendiren çalışmaların zenginleştirilmesine ve bu tür uygulamaların potansiyel gıda teknolojisi kullanımlarına ışık tutabilecektir.

3.4.10. Duyusal analiz sonuçları

Ekmek örneklerine ait görsel Resim 3.1 ve Duyusal analiz sonuçları Şekil 3.29' da verilmiştir.



Resim 3.1. Ekmek örneklerine ait görseller



Şekil 3.29. Ekmek örneklerine ait duyu analizi sonuçları

Çalışma bulguları değerlendirildiğinde, gözenek yapısı açısından en yüksek puanın orta sert buğday çeşidi olan Rus Buğdayı 2 hammadde ekmeğine, en düşük puanın ise zayıf buğday çeşidi Bezostaya hammadde ekmeğine ait olduğu belirlenmiştir. Renk puanlaması sonuçlarına göre, en yüksek puanı Rus Buğdayı 2 hammadde ekmeği ve Rus Buğdayı 2 ozonlanmış buğday ekmeği alırken, en düşük puan Rus Buğdayı 1 hammadde ekmeği ve Rus Buğdayı 1 ozonlanmış buğday ekmeğine verilmiştir. Hacim puanlamalarında, en yüksek puanın Rus Buğdayı 1 hammadde ekmeği, Rus Buğdayı 2 hammadde ekmeği ve Rus Buğdayı 2 ozonlanmış buğday ekmeği tarafından alındığı, en düşük puanın ise Bezostaya hammadde ekmeğine ait olduğu tespit edilmiştir.

Tat ve aroma puanlamaları incelendiğinde, en yüksek puanın Rus Buğdayı 1 ozonlanmış buğday ekmeği ve Bezostaya hammadde ekmeği tarafından alındığı belirlenmiştir.

Çiğnenebilirlik puanları, Rus Buğdayı 1 ve Rus Buğdayı 2'nin hem hammadde hem de ozonlanmış ekmeği için aynı değere sahipken, Bezostaya ekmeğinin de hammadde ve ozonlanmış formları arasında benzer bir sonuç göstermiştir. Ağızda bıraktığı his açısından, Rus Buğdayı 1 ozonlanmış ekmeğinin diğer örneklerle göre daha düşük bir puana sahip olduğu, diğer buğday çeşitlerinde hammadde ve ozonlanmış ekmeğin aynı puanı aldığı gözlemlenmiştir.

Son olarak, genel kabul edilebilirlik puanları incelendiğinde, en yüksek puanın Rus Buğdayı 1 ve Rus Buğdayı 2 hammadde ekmeğine ait olduğu, en düşük puanın ise Bezostaya hammadde ekmeğine verildiği belirlenmiştir. Bu bulgular, buğday çeşitleri ve ozonlama işleminin ekmeğin kalitesi üzerindeki farklı etkilerini ortaya koymaktadır.

Çalışma sonucunda ozon oksidasyonu ile gözenek yapı puanlamalarının ve genel kabul edilebilirlik puanının düştüğü tespit edilmiştir.

3.4.11. Tekstür analizi sonuçları

Ekmeğin örneklerine ait duyu analizi iki yönlü varyans analiz sonuçları Tablo 3.30' da verilmiştir.

Tablo 3.30. Ekmeğin ve yöntemine göre tekstür değerlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

		E1	E2	E3	Toplam		F	p	η^2
Sertlik (g)	Ozonsuz	631,31 ± 20 ^B	468,3 ± 23,89 ^C	761,2 ± 48,52 ^A	620,27 ± 133,78	Buğday	75,387	<0,001	0,962
	Ozonlu	445,9 ± 15,65 ^C	615,91 ± 1,03 ^B	699,69 ± 16,27 ^{AB}	587,17 ± 116,1	Yöntem	5,142	0,064	0,461
Yapışkanlık (g.sn)	Ozonsuz	-3,21 ± 0,69	-0,78 ± 0,13	-0,91 ± 0,77	-1,63 ± 1,31	Buğday	0,927	0,446	0,236
	Ozonlu	-0,32 ± 0,21	-2,6 ± 3,32	-0,17 ± 0,13	-1,03 ± 1,92	Yöntem	0,537	0,491	0,082
Esneklik	Ozonsuz	0,97 ± 0,02	0,94 ± 0,01	0,98 ± 0,03	0,96 ± 0,03	Buğday	0,939	0,442	0,239
	Ozonlu	1 ± 0	1 ± 0	0,99 ± 0,02	1 ± 0,01	Yöntem	13,364	0,011	0,690
Yapışma	Ozonsuz	0,69 ± 0,03	0,65 ± 0,03	0,59 ± 0,08	0,64 ± 0,06	Buğday	2,413	0,170	0,446
	Ozonlu	0,73 ± 0,04	0,65 ± 0,05	0,71 ± 0	0,7 ± 0,04	Yöntem	4,73	0,073	0,441
Sakızimsılık (g)	Ozonsuz	434,05 ± 30,65 ^A	302,43 ± 29,56 ^B	447,22 ± 35,79 ^A	394,57 ± 75,81	Buğday	23,797	0,001	0,888
	Ozonlu	325,68 ± 5,14 ^B	402,57 ± 27,35 ^{AB}	497,71 ± 10,84 ^A	408,65 ± 78,23	Yöntem	0,896	0,380	0,130
Çiğnenebilirlik (g)	Ozonsuz	419,92 ± 40,58 ^{AB}	285,06 ± 32,19 ^C	439,9 ± 47,28 ^{AB}	381,63 ± 81,6	Buğday	17,330	0,003	0,852
	Ozonlu	326,53 ± 5,89 ^{BC}	402,34 ± 27,2 ^{ABC}	493,3 ± 2,88 ^A	407,39 ± 75,73	Yöntem	2,096	0,198	0,259
Elastikiyet	Ozonsuz	0,32 ± 0,03	0,28 ± 0,03	0,26 ± 0,06	0,29 ± 0,04	Buğday	3,825	0,085	0,560
	Ozonlu	0,39 ± 0,02	0,29 ± 0,05	0,38 ± 0	0,35 ± 0,06	Yöntem	9,377	0,022	0,610

F: Varyans analizi test istatistiği; η^2 : Kısmi Eta Kare; Hardness (R²: %97,61; Adj. R²:%95,61); Adhesiveness (R²: %56,71; Adj. R²:%20,63); Springiness (R²: %76,73; Adj. R²:%57,34); Cohesiveness (R²: %67,54; Adj. R²:%40,48); Gumminess (R²: %93,35; Adj. R²:%87,81); Chewiness (R²: %91,01; Adj. R²:%83,66); Resilience (R²: %78,71; Adj. R²:%60,97);Ortalama±standart sapma;^{a-b}: Aynı harfe sahip buğday çeşitleri arasında fark yoktur. ^{A-C}: Aynı harfe sahip etkileşimler arasında fark yoktur. (E1:Rus buğdayı 1 ekmeği, E2:Rus buğdayı 2 ekmeği; E3:Bezostaya ekmeği)

Ekmek çeşidi ana etkisi, yöntemden bağımsız olarak Sertlik değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,001$). Ortalama Sertlik değerleri, Rus Buğdayı 1 ekmek için 538,61 g, Rus Buğdayı 2 ekmek için 542,1 g ve Bezostaya ekmek için 730,44 g olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre, Rus Buğdayı 1 ve Rus Buğdayı 2 ekmek türleri birbirine benzerken, Bezostaya ekmek çeşidi diğer iki türden anlamlı olarak farklılık göstermektedir.

Yöntem ana etkisi, ekmek çeşidinden bağımsız olarak Sertlik değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p = 0,064$). Yöntemlere göre ortalama Sertlik değerleri, ozonsuz yöntemde 620,27 g, ozonlu yöntemde ise 587,17 g olarak elde edilmiştir.

Ekmek çeşidi ve yöntem arasındaki etkileşim, Sertlik değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,001$). En yüksek etkileşim ortalaması, 761,2 değeri ile ozonsuz Bezostaya, en düşük etkileşim ortalaması ise 445,9 değeri ile ozonlu Rus Buğdayı 1' de gözlenmiştir.

Ozon oksidasyonu ile ekmeklerin tekstür analizi Sertlik sonuçları değerlendirildiğinde Rus buğdayı 1 ' de ozonlama ile %29,36 oranında azalma, Rus buğdayı 2 %31,52 artış ve Bezostaya çeşidi ekmeğinde %8 oranında azalma tespit edilmiştir.

Ozonlama işlemi ile kuvvetli buğday ekmeğinin Sertlik değerinde azalma meydana gelmesi, gluten protein yapısında ozonun neden olduğu kimyasal değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Ozon, gluten proteinlerindeki disülfid bağlarını (-SS) okside ederek daha küçük moleküler yapılara ayrılmalarına veya sülfoksit gibi formlara dönüşmelerine neden olabilir, bu da gluten ağının zayıflamasına yol açar. Ayrıca, serbest sülfidril (-SH) gruplarının disülfid bağlarına dönüşmesi, gluten ağının homojen olmayan bir yapıya bürünmesine ve stabilitesinin azalmasına katkıda bulunabilir. Ozonlama sırasında zayıf bağlar (hidrojen bağları ve hidrofobik etkileşimler) da etkilenerek glutenin elastikiyet ve dayanıklılığı zayıflar. Bunun yanı sıra, ozonun nişasta molekülleriyle etkileşimi, amilopektin yapısında oksidasyon yoluyla su tutma kapasitesini artırabilir ve bu durum ekmek dokusunun daha yumuşak hale gelmesine katkı sağlayabilir. Tüm bu kimyasal süreçler, gluten ağının stabilitesini ve hamurun dayanıklılığını etkileyerek ekmeğin sertlik değerinde azalma ile sonuçlanmaktadır. Ozonlama işlemi ile zayıf buğday ekmeğinin hardness (sertlik) değerinde azalma, zayıf gluten yapısının ozonun oksidatif etkilerine karşı hassas olmasından kaynaklanmaktadır. Zayıf buğdaylarda doğal olarak daha az kompleks ve düşük moleküler ağırlıklı bir gluten ağı bulunduğu için, ozonun disülfid (-SS) bağlarını oksidasyona uğratması ve sülfoksit gibi bileşiklere dönüştürmesi gluten ağını daha da destabilize eder. Ayrıca, serbest sülfidril (-SH) gruplarının disülfid bağlarına dönüşümünün düzensiz gerçekleşmesi, glutenin bağlanma kabiliyetini daha da azaltarak yapının çökmesine yol açar. Ozonun gluten proteinlerinin hidrofobik bölgelerine ve nişasta moleküllerine etkisi, protein-nişasta etkileşimlerini zayıflatır ve gluten ağını destekleyemez hale getirir. Bu kimyasal değişiklikler, ekmek dokusunun daha gevşek ve yumuşak bir yapı kazanmasına neden olarak sertlik değerinde azalma ile sonuçlanmış olabilir.

Yapılan analizler sonucunda, ekme  çeşidi ana etkisinin Yapışkanlık değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark oluşturmadığı belirlenmiştir ($p=0,446$). Ortalama Yapışkanlık değerleri Rus Buğdayı 1 ekme  için $-1,76$ g.sn, Rus Buğdayı 2 ekme  için $-1,69$ g.sn ve Bezostaya ekme  için $-0,54$ g.sn olarak hesaplanmıştır. Ekme  çeşidinden bağımsız olarak, yöntem ana etkisinin de Adhesiveness değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı olmadığı tespit edilmiştir ($p=0,491$). Ayrıca, ekme  çeşidi ve yöntem etkileşiminin Yapışkanlık değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi bulunmamıştır ($p=0,143$). En yüksek etkileşim ortalaması $-0,17$ g.sn ile Bezostaya ekme  ve ozonlu yöntem etkileşiminde, en düşük ortalama ise $-3,21$ g.sn ile Rus Buğdayı 1 ekme  ve ozonsuz yöntem etkileşiminde tespit edilmiştir. Sonuç olarak, ekme  çeşidi ve yöntem değişkenlerine göre Yapışkanlık değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır.

Ekme  çeşidi dikkate alındığında, yöntemden bağımsız olarak, Esneklik değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p=0,442$). Rus buğdayı 1 ekmeği için ortalama Esneklik değeri $0,98$; Rus buğdayı 2 ekmeği için $0,97$; Bezostaya ekmeği için ise $0,99$ olarak ölçülmüştür.

Bununla birlikte, ekme  çeşidinden bağımsız olarak yöntem ana etkisi, Esneklik değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p=0,011$). Ozonsuz yöntemle üretilen ekmeklerin ortalama Esneklik değeri $0,96$ iken, ozonlu yöntemle bu değer 1 olarak tespit edilmiştir. Ancak, ekme  çeşidi ve yöntem etkileşimi Springiness değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark yaratmamıştır ($p=0,184$).

Sonuç olarak, ekme  çeşidi ve yöntem kombinasyonları arasında Esneklik açısından anlamlı bir fark gözlenmemiştir.

Ekme  çeşidi dikkate alındığında, yöntemden bağımsız olarak, Yapışma değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p=0,170$). Rus buğdayı 1 ekmeği için ortalama yapışma değeri $0,71$; Rus buğdayı 2 ekmeği ve Bezostaya ekmeği için ise bu değer $0,65$ olarak ölçülmüştür.

Benzer şekilde, ekme  çeşidinden bağımsız olarak yöntem ana etkisi de Yapışma değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p=0,073$). Ozonsuz yöntemle üretilen ekmeklerin ortalama Yapışma değeri $0,64$ iken, ozonlu yöntemle bu değer $0,70$ olarak tespit edilmiştir.

Ekme  çeşidi ve yöntem etkileşimi ise Yapışma değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark yaratmamıştır ($p=0,304$). Bununla birlikte, en yüksek etkileşim ortalaması $0,73$ ile Rus buğdayı 1 ekmeği ve ozonlu yöntem kombinasyonunda, en düşük etkileşim ortalaması ise $0,59$ ile Bezostaya ekmeği ve ozonsuz yöntem kombinasyonunda gözlenmiştir. Ekme  çeşidi ve yöntem kombinasyonları arasında Yapışma açısından anlamlı bir fark bulunmamıştır.

Ekmek çeşidi dikkate alındığında, yöntemden bağımsız olarak, Sakızimsılık değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmuştur ($p=0,001$). Rus buğdayı 1 ekmeği için ortalama Sakızimsılık değeri 379,87 g, Rus buğdayı 2 ekmeği için 352,5 g, Bezostaya ekmeği için ise 472,46 g olarak ölçülmüştür. Rus buğdayı 1 ve Rus buğdayı 2 ekmekleri birbirine benzer değerler gösterirken, Bezostaya ekmeği diğerlerinden farklılık göstermiştir.

Ekmek çeşidinden bağımsız olarak, yöntem ana etkisi Sakızimsılık değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p=0,380$). Ozonsuz yöntemle üretilen ekmeklerin ortalama Sakızimsılık değeri 394,57 g iken, ozonlu yöntemle bu değer 408,65 g olarak kaydedilmiştir.

Bununla birlikte, ekmek çeşidi ve yöntem etkileşimi Sakızimsılık değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark yaratmıştır ($p=0,003$). En yüksek etkileşim ortalaması 497,71 g ile Bezostaya ekmeği ve ozonlu yöntem kombinasyonunda, en düşük etkileşim ortalaması ise 302,43 g ile Rus buğdayı 2 ekmeği ve ozonsuz yöntem kombinasyonunda gözlenmiştir.

Rus buğdayı 1 ekmeğinin Sakızimsılık değeri ozonlama işlemi birlikte %24,96 oranında azalırken, Rus buğdayı 2 ve Bezostaya çeşidinde önem düzeyinde değişmemiştir.

Ekmek çeşidi dikkate alındığında, yöntemden bağımsız olarak, Çiğnenebilirlik değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmuştur ($p=0,003$). Rus buğdayı 1 ekmeği için ortalama Çiğnenebilirlik değeri 373,23 g, Rus buğdayı 2 ekmeği için 343,7 g, Bezostaya ekmeği için ise 466,6 g olarak ölçülmüştür. Rus buğdayı 1 ve Rus buğdayı 2 ekmekleri birbirine benzerken, Bezostaya ekmeği diğerlerinden farklılık göstermiştir.

Yöntem ana etkisi, ekmek çeşidinden bağımsız olarak, Çiğnenebilirlik değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p=0,198$). Ozonsuz yöntemle üretilen ekmeklerin ortalama Çiğnenebilirlik değeri 381,63 g, ozonlu yöntemle ise 407,39 g olarak tespit edilmiştir.

Bununla birlikte, ekmek çeşidi ve yöntem etkileşimi Çiğnenebilirlik değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark yaratmıştır ($p=0,008$). En yüksek etkileşim ortalaması 493,3 g ile ozonlu Bezostaya ekmeği ve en düşük etkileşim ortalaması ise ozonsuz 285,06 g ile Rus buğdayı 2 ekmeğinde gözlenmiştir.

Ekmek çeşidi dikkate alındığında, yöntemden bağımsız olarak, Elastikiyet değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p=0,085$). Rus buğdayı 1 ekmeği için ortalama Elastikiyet değeri 0,35; Rus buğdayı 2 ekmeği için 0,28; Bezostaya ekmeği için ise 0,32 olarak ölçülmüştür.

Ekmek çeşidinden bağımsız olarak yöntem ana etkisi ise Elastikiyet değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p=0,022$). Ozonsuz yöntemle üretilen ekmeklerin ortalama Elastikiyet değeri 0,29 iken, ozonlu yöntemle bu değer 0,35 olarak kaydedilmiştir.

Ekmek çeşidi ve yöntem etkileşimi Elastikiyet değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark yaratmamıştır ($p=0,156$). Bununla birlikte, en yüksek etkileşim ortalaması 0,39 ile ozonlu Rus buğdayı 1 ekmeği, en düşük etkileşim ortalaması ise 0,26 ile ozonsuz Bezostaya ekmeğinde gözlenmiştir.

Literatürde buğday ununun ozonlanması üzerine yapılan çalışmalar (Chittrakorn vd., 2014; da Luz vd., 2022; Obadi vd., 2018) ile elde edilen bulgular arasında farklılıklar gözlenmiştir. Bu farklılıkların temel nedeninin, mevcut çalışmada ozon uygulamasının buğdayın tane formuna yapılmış olması olduğu düşünülmektedir. Buğday ununun ozonlanması ile buğday tanesinin ozonlanması arasında işlem mekanizmaları ve etkileri açısından farklılıklar bulunabilir.

Ayrıca, bu çalışma ile buğday tanesinin ozonlanmasına yönelik sınırlı sayıda mevcut literatüre alternatif ve tamamlayıcı bir veri seti sunulabileceği düşünülmektedir. Bu bağlamda, elde edilen bulgular, buğday tanesinin ozonlanmasının nihai ürün özellikleri üzerindeki etkilerini anlamaya yönelik yeni bir perspektif sağlayarak, bu alandaki bilgi boşluğunu doldurmayı hedeflemektedir.

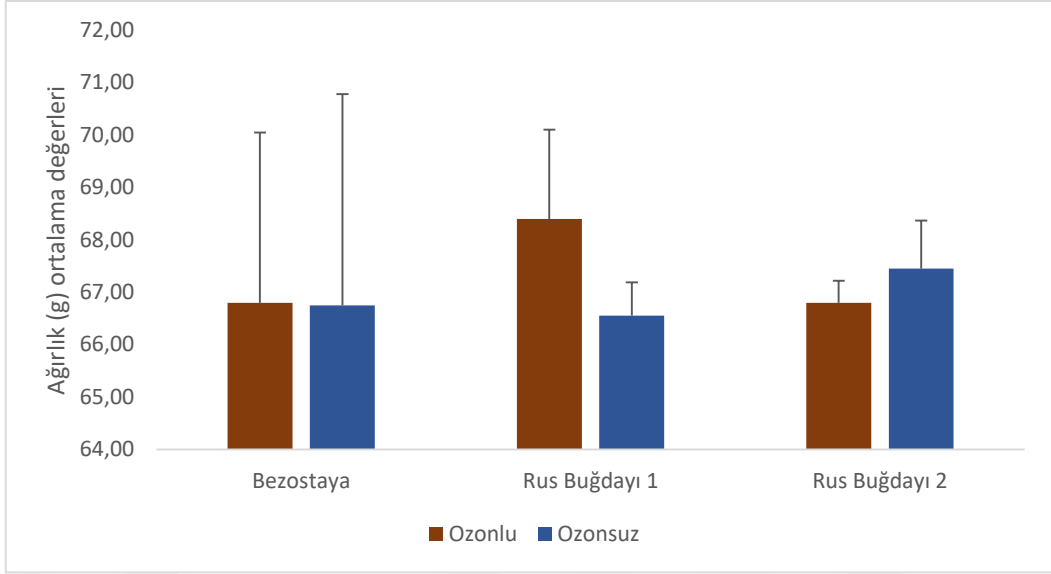
3.4.12. Ağırlık, hacim ve spesifik hacim

Ekmek örneklerine ait Ağırlık, Hacim ve Spesifik hacim analizi iki yönlü varyans analiz tablosu ve grafikleri sırasıyla Tablo 3.31 ve Şekil 30, Şekil 3.31 ve Şekil 3.32' de verilmiştir.

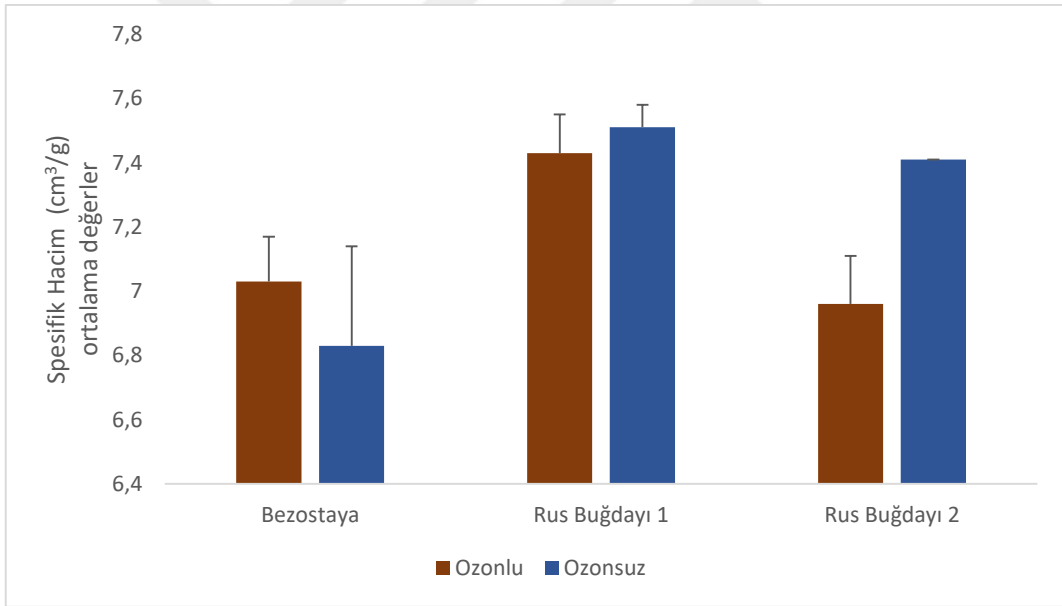
Tablo 3.31. Buğday çeşidi ve yöntemine göre ekmeğe ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve çoklu karşılaştırmalar

Ekmek analizi	Yöntem	Ekmek Çeşidi			Toplam		F	p	η^2
		Rus Buğdayı 1	Rus Buğdayı 2	Bezostaya					
Ağırlık (g)	Ozonsuz	66,55±0,64	67,45±0,92	66,75±4,03	66,92±1,92	Buğday	0,090	0,911	0,031
	Ozonlu	68,40±1,70	66,80±0,42	66,80±3,25	67,33±1,85	Yöntem	0,100	0,762	0,016
Hacim (cm ³)	Ozonsuz	500 (500 - 500)	500 (495 - 505)	455 (450 - 460)	497,5 (450 - 505)	Buğday	211,450	<0,001	
	Ozonlu	508 (505 - 511)	465 (460 - 470)	469,5 (460 - 479)	474,5 (460 - 511)	Yöntem	5,950	0,015	
Spesifik Hacim (cm ³ /g)	Ozonsuz	7,51±0,07	7,41±0,00	6,83±0,31	7,25±0,36	Buğday	11,360	0,009	0,791
	Ozonlu	7,43±0,12	6,96±0,15	7,03±0,14	7,14±0,25	Yöntem	1,410	0,279	0,191

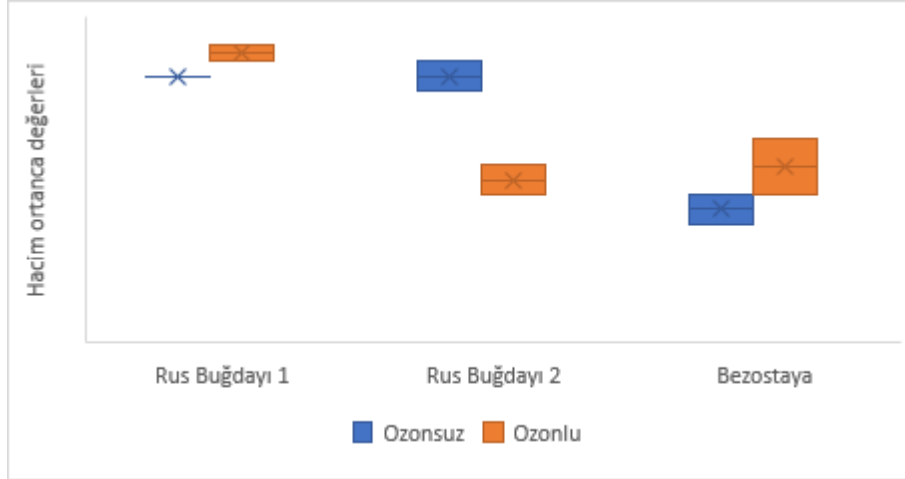
F: Varyans analizi test istatistiği; η^2 : Kısmi Eta Kare; Ağırlık (R^2 : % 13,42; Adj. R^2 :% 0,00); Spesifik Hacim (R^2 : % 84,43; Adj. R^2 :%71,46); Ortalama±standart sapma; Ortanca (minimum-maksimum); ^{a-b}: Aynı harfe sahip buğday çeşidi arasında fark yoktur.



Şekil 3.30. Buğday çeşidi ve yöntemine göre ağırlık interaksyon grafiği



Şekil 3.31. Buğday çeşidi ve yöntemine göre spesifik hacim interaksyon grafiği



Şekil 3.32. Buğday çeşidi ve yöntemine göre hacim ortanca değerleri

Bu çalışmada, yöntem ayrımı yapılmaksızın buğday çeşitlerine göre ekmek ağırlığı (g) ortalama değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmemiştir ($p=0,911$). Bezostaya çeşidinin ağırlık ortalaması 66,78 g, Rus Buğdayı 1'in 67,48 g ve Rus Buğdayı 2'nin 67,13 g olarak belirlenmiştir. Çeşit ayrımı yapılmaksızın yöntemlere göre ağırlık ortalama değerleri arasında da anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p=0,762$). Ozonlu yöntemin ağırlık ortalaması 67,33 g, ozonsuz yöntemin ise 66,92 g olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, buğday çeşidi ve yöntem etkileşimine göre ağırlık ortalama değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı görülmüştür ($p=0,737$). Buğday çeşidi ve yöntem etkileşimine göre ağırlık değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı tespit edilmiştir ($p=0,737$).

Ozon oksidasyonu uygulaması sonucunda, Rus Buğdayı 1'in ekmek ağırlığı %2,8 oranında bir artış, Rus Buğdayı 2'nin ekmek ağırlığı %0,9 oranında bir azalma, Bezostaya çeşidinde ise herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Ancak bu değişimlerin kalıcı olarak anlamlı olmadığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, ozonlamanın ekmek ağırlığı üzerindeki önem düzeyinde belirgin bir farklılık yaratmadığını göstermektedir.

Yöntem ayrımı yapılmaksızın buğday çeşitlerine göre hacim (cm^3) ortanca değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmiştir ($p<0,001$). Bezostaya çeşidinin ortanca değeri 460 cm^3 , Rus Buğdayı 1'in $502,5 \text{ cm}^3$ ve Rus Buğdayı 2'nin $482,5 \text{ cm}^3$ olarak belirlenmiştir. Her bir buğday çeşidinin spesifik hacim değerleri birbirinden istatistiksel olarak farklılık göstermektedir. Çeşit ayrımı yapılmaksızın yöntemine göre spesifik hacim ortanca değerleri arasında da anlamlı bir fark bulunmuştur ($p=0,015$). Ozonlu yöntemin ortanca değeri $474,5 \text{ cm}^3$, ozonsuz yöntemin ortanca değeri ise $497,5 \text{ cm}^3$ olarak hesaplanmıştır. Ancak, buğday çeşidi ve yöntem etkileşimine ilişkin anlamlı bir sonuç elde edilememiştir.

Ozon uygulamasının ekmeklerin hacimleri ni Rus buğdayı 1 için %1,6 arttırdığı, Rus buğdayı 2' yi %7 oranında azalttığı ve Bezostaya' yı %3,18 oranında arttırmıştır. Ancak bu değişimler istatistiksel olarak önem düzeyinde değildir.

Buğdayların ozonlanması üzerine yapılan araştırmalar, ozonun hamurun reolojik özelliklerini artırırken, ekmek hacminde önemli bir değişiklik yapmadığını göstermektedir. Yapılan bir çalışmada, ozonlanmış buğdayın ekstensogram enerji değerlerini artırdığı, yani hamurun elastikiyet ve mukavemet özelliklerini geliştirdiği rapor edilmiştir. Bu durum, ozonun protein oksidasyonu yoluyla gluten ağını güçlendirmesiyle ilişkilendirilmiştir (Violleau vd., 2012a). Ancak, aynı çalışmada ozonlanmış undan yapılan ekmeklerin hacim değerlerinde anlamlı bir değişiklik olmadığı belirtilmiştir. Başka bir çalışmada ise, ozonlama işleminin hamurun stabilitesini ve dayanıklılığını artırmasına rağmen, ekmek hacminin yalnızca minimal bir şekilde etkilendiğini göstermiştir (El-Desouky vd., 2014). Bu sonuçlar, ozonlamanın protein yapısını güçlendirerek hamurun enerji değerlerini yükselttiğini ancak gaz tutma kapasitesine sınırlı bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Böylece, ozonlama işlemi, reolojik özelliklerde iyileşme sağlasa da ekmek hacmi üzerinde doğrudan bir artış sağlamamaktadır. Çalışma verileri değerlendirildiğinde, sorgum ununun ozonlanması üzerine yapılan araştırmalarla, özellikle Marston vd. (2015) tarafından sağlanan sonuçlarla uyumluluk göstermektedir. Bununla birlikte buğday ununun ozonlanmasına yönelik yapılan çalışmalar arasında, Demir vd. (2011), Elgün ve Bilgiçli (2019) ile Sandhu vd. (2011) tarafından elde edilen sonuçlarla farklılık göstermektedir. Literatürde, buğday tanelerinin ozonlanması üzerinde sınırlı sayıda çalışma gösterdiği için, bu kapsamda elde edilen veri alanı içindeki boşlukların bilgilerini doldurarak literatürde önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Spesifik hacim (cm^3/g) açısından, yöntem ayrımı yapılmaksızın buğday çeşitleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmuştur ($p=0,009$). Bezostaya çeşidinin spesifik hacim ortalaması $6,93 \text{ cm}^3/\text{g}$, Rus Buğdayı 1'in $7,47 \text{ cm}^3/\text{g}$ ve Rus Buğdayı 2'nin $7,19 \text{ cm}^3/\text{g}$ olarak elde edilmiştir. Özellikle Bezostaya buğdayı ile Rus Buğdayı 1 arasında anlamlı bir fark tespit edilmiştir. Çeşit ayrımı yapılmaksızın yöntemlere göre spesifik hacim ortalama değerleri arasında ise anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p=0,279$). Ozonlu yöntemin spesifik hacim ortalaması $7,14 \text{ cm}^3/\text{g}$, ozonsuz yöntemin ise $7,25 \text{ cm}^3/\text{g}$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca, buğday çeşidi ve yöntem etkileşimine göre spesifik hacim ortalama değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı görülmüştür ($p=0,072$).

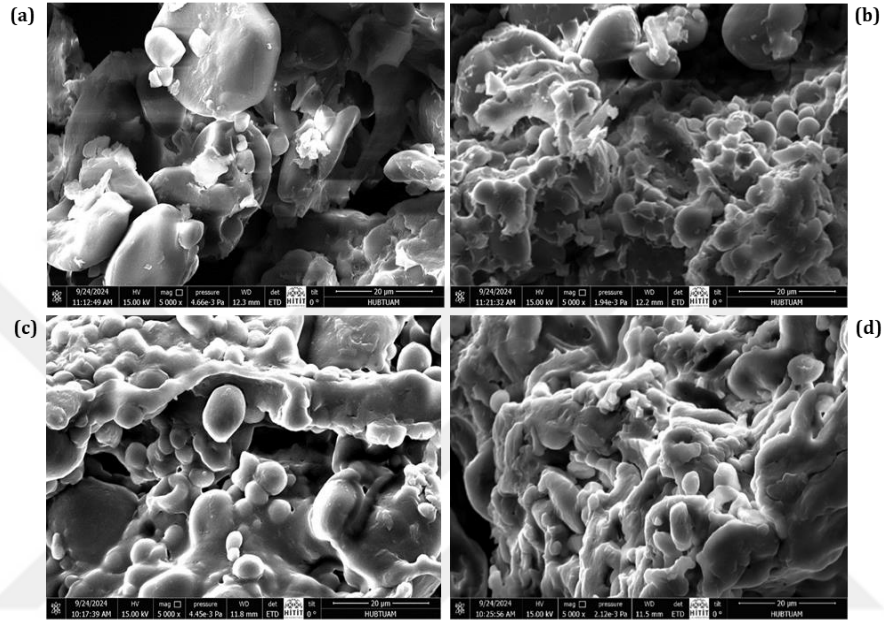
3.4.13. SEM analizi sonuçları

Çalışma kapsamında, ozon uygulamasının buğday ununa ve bu undan üretilen ekmeklere olan etkileri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Özellikle, kontrol grubu ile ozon ile muamele edilen örneklerin karşılaştırılması amacıyla elektron taramalı mikroskop (SEM) kullanılarak elde

edilen görüntüler değerlendirilmiş, bu görüntülerde ozonun un ve ekmek örneklerinin mikro yapısı üzerinde meydana getirdiği farklılıklar detaylı olarak analiz edilmiştir.

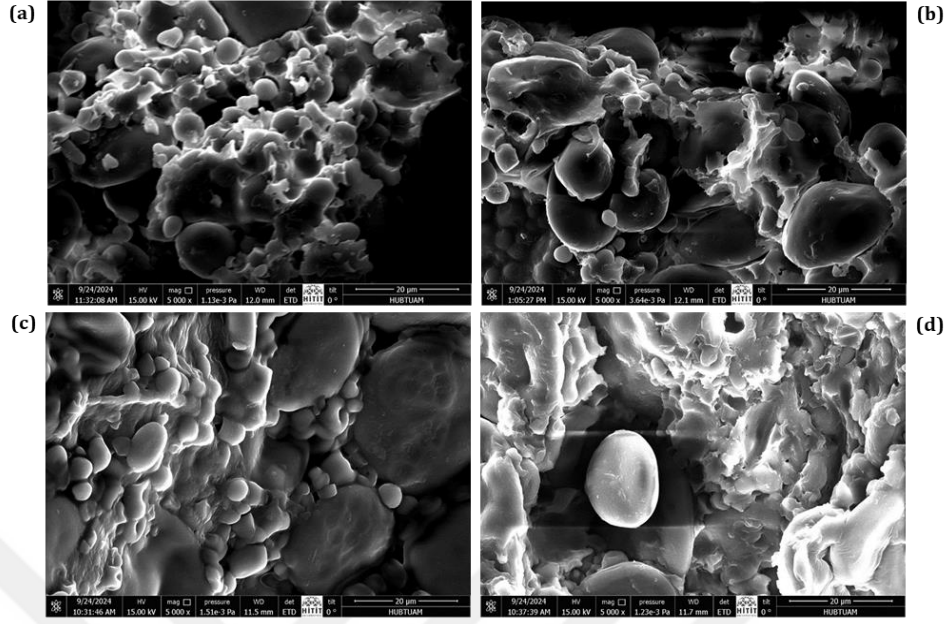
İncelenen bulgular, Resim 3.2, Resim 3.3 ve Resim 3.4'te sunulan mikroskopik görüntülerle verilmiş olup ozon uygulamasının etkilerinin görsel olarak da ortaya konulmasını sağlamıştır.

Rus buğdayı 1



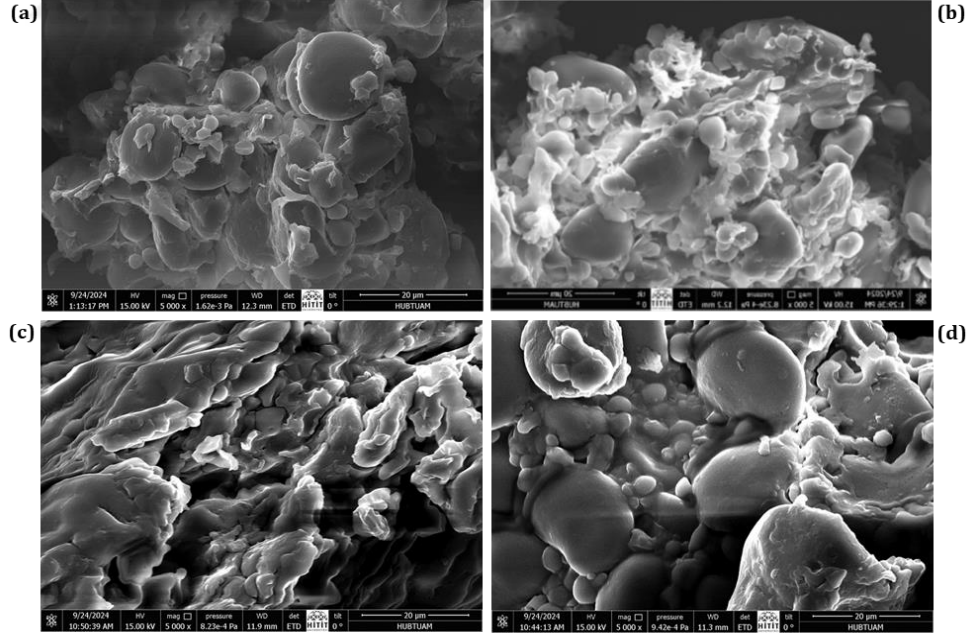
Resim 3.2. Rus buğdayı 1 çeşidinin kontrol ve ozonlanmış un ve ekmek örneklerine ait SEM görüntüleri ((a) kontrol un, (b) ozonlanmış un, (c) kontrol ekmek, (d) ozonlanmış ekmek)

Rus buğdayı 2



Resim 3.3. Rus buğdayı 2 çeşidinin kontrol ve ozonlanmış un ve ekmek örneklerine ait SEM görüntüleri ((a) kontrol un, (b) ozonlanmış un, (c) kontrol ekmek, (d) ozonlanmış ekmek)

Bezostaya



Resim 3.4. Bezostaya çeşidinin kontrol ve ozonlanmış un ve ekmek örneklerine ait SEM görüntüleri ((a) kontrol un, (b) ozonlanmış un, (c) kontrol ekmek, (d) ozonlanmış ekmek)

Ozonun buğday tanelerinde oluşturduğu etkiler, özellikle protein ve nişasta yapıları üzerinde belirgin oksidatif değişimlere yol açmıştır.

Ozon, buğday tanelerindeki prolamin proteinlerinde yeni disülfid bağlarının oluşumuna neden olmuş ve bu durum protein polimerlerinin daha sıkı bir yapıya kavuşmasını sağlamıştır (Gozé vd., 2017). Moleküler boyutlardaki artış ve ikincil yapılardaki değişimler, SEM ve diğer ileri analiz yöntemleriyle doğrulanmıştır. Ozon, protein molekülleri arasında disülfid bağlarının yanı sıra ditirosin çapraz bağlarının oluşumuna da neden olmuştur. Bu çapraz bağlar, proteinlerin moleküler sıkışıklığını artırmış ve daha kompakt bir yapı meydana getirmiştir (Maqbool vd., 2024).

Ayrıca, SDS çözünürlüğündeki düşüş, proteinlerin ağ yapısında daha fazla bağlanma olduğunu göstermiştir. İkincil yapı analizleri, ozonun proteinlerin alfa-heliks ve beta-sheet içeriklerinde değişimlere yol açtığını ortaya koymuştur. Bu yapısal değişiklikler, buğday ununun yoğurma ve fermantasyon süreçlerindeki davranışını etkileyebilir.

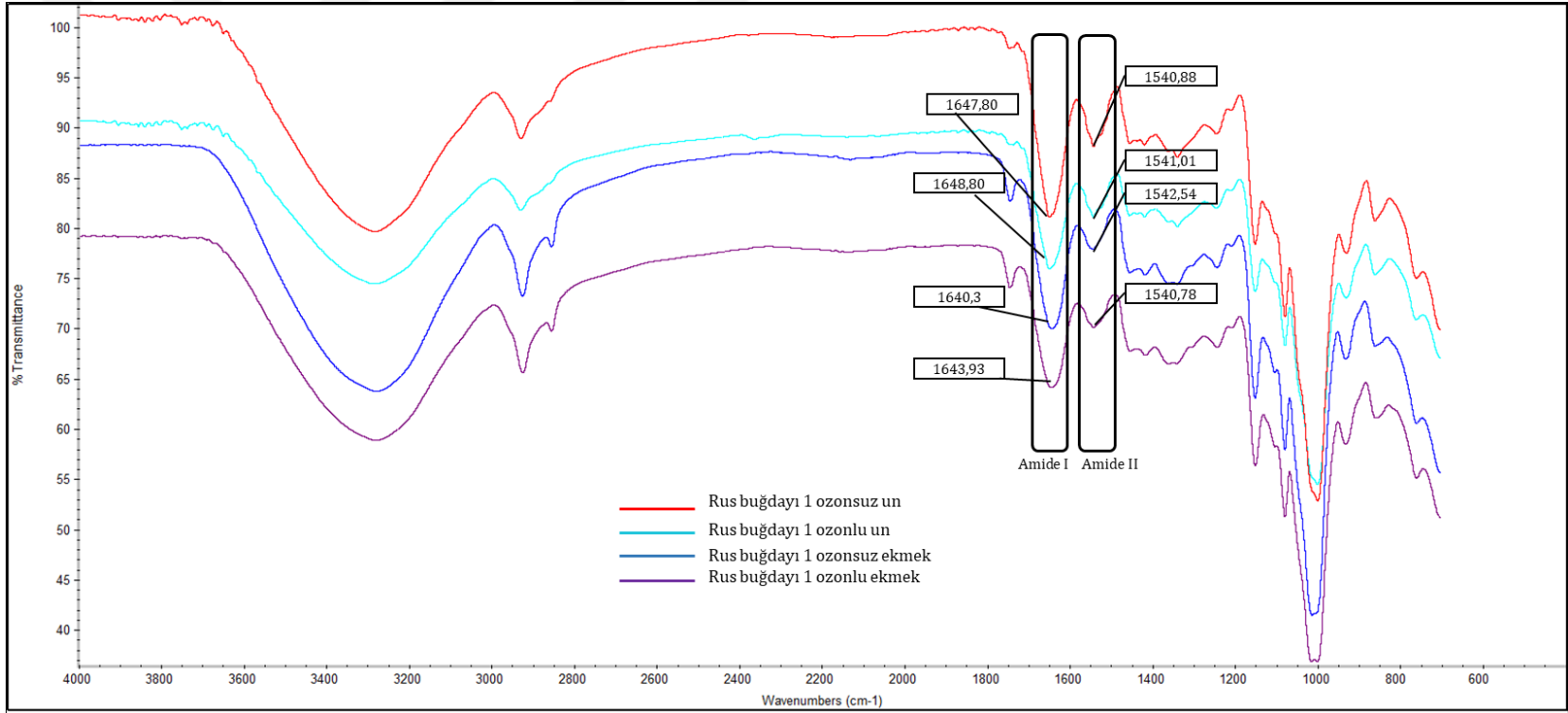
Ozonun nişasta üzerinde yarattığı etkiler genellikle minimal düzeyde kalmıştır. Moleküler yapı incelemelerinde, nişasta granüllerinin temel yapısının korunduğu ve moleküler ağırlık dağılımında önemli bir değişim gözlenmediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, karbonil gruplarında hafif artışlar ve amilopektin dallanma uzunluğunda sınırlı kısaltmalar kaydedilmiştir. Ancak bu değişimlerin nişastanın işlevselliği üzerinde önemli bir etkisi bulunmamaktadır. Amiloz ve amilopektin oranlarında ise herhangi bir değişiklik rapor edilmemiştir (Gozé vd., 2016).

Karbonil ve karboksil gruplarındaki artışlar, ozonun yüzey seviyesinde bir oksidasyona neden olduğunu, iç yapıya ise minimal etki ettiğini göstermektedir. Bu durum, nişastanın genel yapısal bütünlüğünü koruduğunu işaret etmektedir (Obadi vd., 2016).

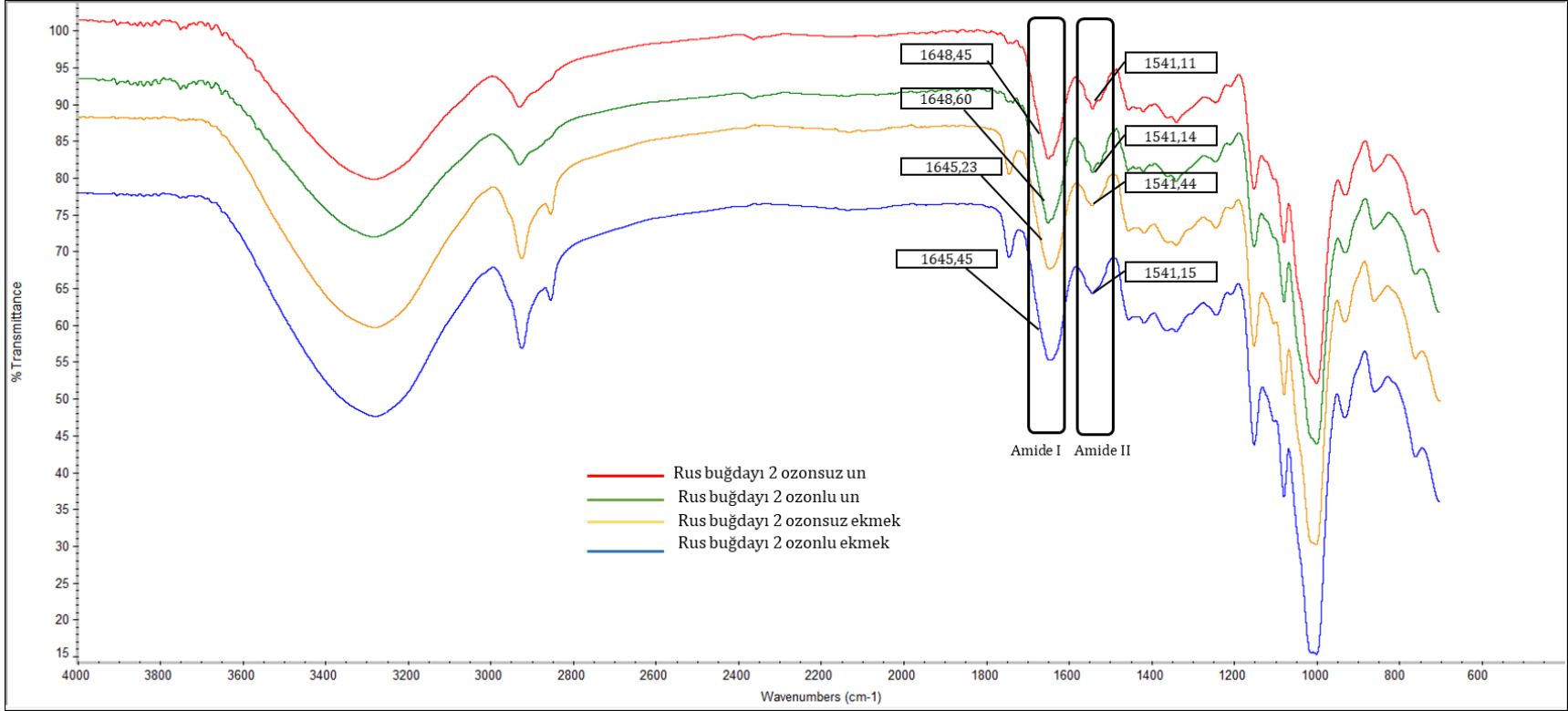
SEM analizleri, ozon uygulamasının buğday tanelerinin yüzey morfolojisinde belirgin bir bozulmaya yol açmadığını, ancak uzun süreli maruziyetin fiziksel değişikliklere neden olabileceğini ortaya koymuştur (Savi vd., 2014).

3.4.14. FT-IR analizi sonuçları

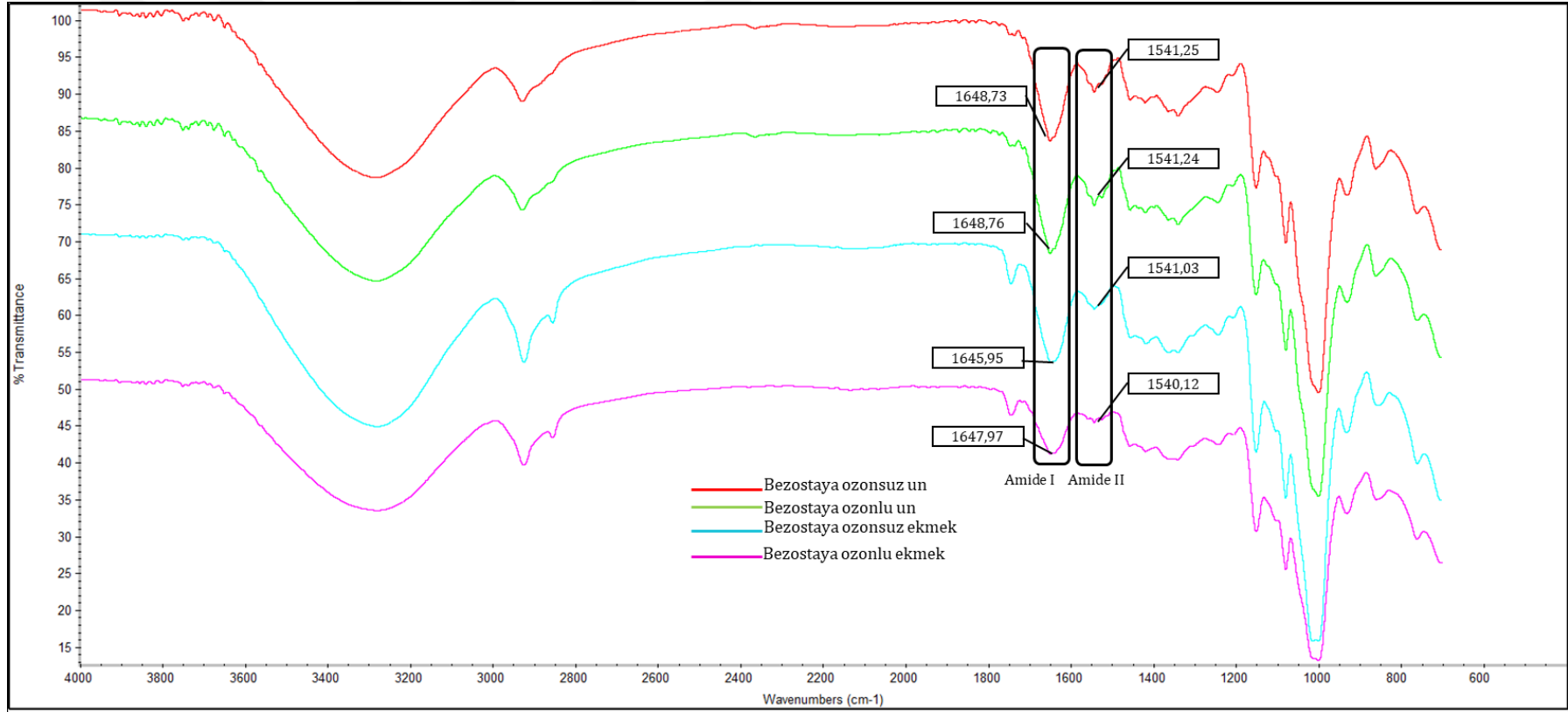
Ozonun buğday tanesi, un ve ekmek üzerindeki etkilerinin FT-IR analizi ile elde edilen veriler Şekil 3.33, Şekil 3.34 ve Şekil 3.35' te verilmiştir.



Şekil 3.33. Rus buğdayı 1 çeşidine ait un ve ekmek örneklerinin FT-IR verileri



Şekil 3.34. Rus buğdayı 2 çeşidine ait un ve ekmek örneklerinin FT-IR verileri



Şekil 3.35. Bezostaya çeşidine ait un ve ekmeğ örneklerinin FT-IR verileri

FTIR analizi, ozonlama sonrası moleküler düzeydeki değişimlerin detaylı olarak incelenmesi için kritik bir araçtır ve özellikle kimyasal grupların dönüşümleri, protein, lipid ve nişasta yapılarındaki değişimlerin hassas bir şekilde gözlemlenmesine olanak tanımaktadır. Ozonun buğday tanesi, un ve ekmek üzerindeki etkilerine dair FTIR ile elde edilen bulgular, yapısal ve kimyasal modifikasyonların hammaddeye bağlı olarak farklı oranlarda geręekleştini göstermektedir. Özellikle Amide I ve Amide II bölgelerinde ($1600-1700\text{ cm}^{-1}$ ve $1500-1600\text{ cm}^{-1}$) meydana gelen değişiklikler, protein yapısındaki ikincil yapı dönüşümlerini yansıtır.

FTIR spektrumları, ozonlama sonrası buğday proteinlerindeki oksidasyon süreçlerini ve özellikle sülfhidril (-SH) gruplarının disülfid (-S-S-) bağlarına dönüşümünü açıkça ortaya koymaktadır. Bu dönüşüm, protein ağ yapısının güçlenmesine katkıda bulunurken, aynı zamanda proteinlerin α -heliks ve β -tabaka oranlarında belirgin değişimlere neden olmaktadır (Obadi vd., 2016). Amide I bölgesinde gözlemlenen pik kaymaları, ozonlama sonrası hidrojen bağlarının yeniden düzenlenmesi ve ikincil yapının değişmesiyle ilişkilidir. Amide II bölgesindeki pik yoğunluğunun azalması ise proteindeki amid bağlarının oksidasyona uğradığını göstermektedir (El-Desouky ve Hussain, 2021).

Ozonlama, buğday nişastasında C-O, C-H ve O-H gruplarındaki bağ zayıflamaları ve karbonil (C=O) gruplarının artışı ile sonuçlanmaktadır. Bu değişiklikler, nişasta zincirlerinin kısmi depolimerizasyonuna işaret etmektedir (Sandhu vd., 2012). Karbonhidrat yapılarında $1000-1200\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlenen değişimler, glikozidik bağların kırılması ve nişasta moleküllerinin hidroksil gruplarının oksidasyonu ile ilişkilidir (Dubois vd., 2006; Lee vd., 2017).

FTIR spektrumlarının $2800-3000\text{ cm}^{-1}$ bölgesinde yer alan C-H gerilme bantlarının zayıflaması, lipid moleküllerinde oksidasyon süreçlerini yansıtır. Ayrıca $1700-1800\text{ cm}^{-1}$ bölgesinde karbonil (C=O) gruplarının pik yoğunluğundaki artış, lipid peroksidasyonu ve aldehit oluşumunu göstermektedir (El-Desouky ve Hussain, 2021).

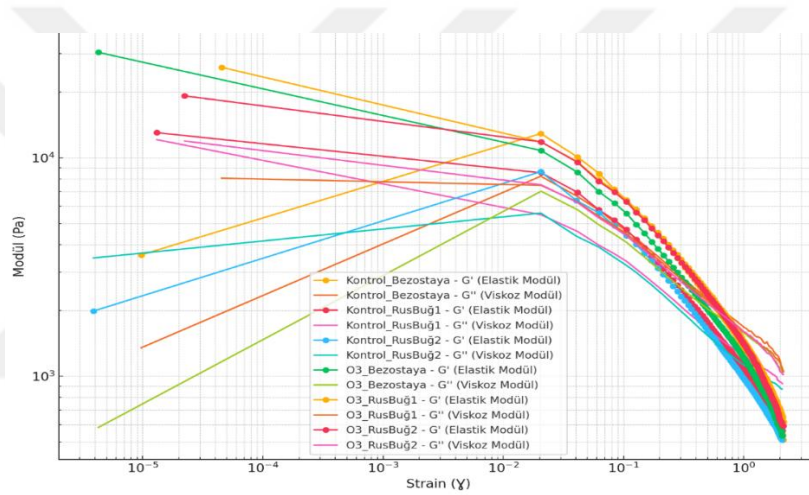
Ozonlama, proteinlerin ve karbonhidratların aldehit, keton ve karboksil gruplarını artırarak oksidatif stres etkisini ortaya koymaktadır. Bu, FTIR spektrumlarında karbonil gruplarına ait 1730 cm^{-1} pik yoğunluğunda artış olarak izlenmektedir. Bu değişiklikler, ozonun karbonhidrat ve protein molekülleri üzerindeki oksidatif etkilerinin göstergesidir (El-Desouky ve Hussain, 2021; Sandhu vd., 2012).

Ozon uygulaması, buğday ve un örneklerinin protein, nişasta, lipid ve diğer kimyasal gruplarının yapısında belirgin değişiklikler meydana getirmekte ve bu değişimler FTIR analizleriyle hassas şekilde tespit edilmektedir. Amide I ve II bölgelerinde gözlenen pik kaymaları ve yoğunluk değişimleri, protein yapısındaki oksidatif modifikasyonları ve ikincil yapı dönüşümlerini doğrulamaktadır. Lipid ve karbonhidrat yapılarına dair spektrum değişiklikleri ise ozonun oksidasyon kapasitesini ve yapısal etkilerini vurgulamaktadır. Bu

bulgular, ozonun buğday bileşenleri üzerinde moleküler düzeyde güçlü etkiler yarattığını göstermektedir.

3.4.15. Reometre analizi sonuçları

Ekmek yapımında fermantasyon aşamasını takip eden süreçte, buğday unundan hazırlanan hamurun reolojik özellikleri hamurun kalitesini ve nihai ürünün özelliklerini etkileyen kritik bir faktördür. Bu bağlamda, kontrol ve ozonlanmış buğday unu örneklerinden hazırlanan hamurların reolojik özellikleri incelenmiştir. Bu özelliklerin değerlendirilmesi amacıyla strain sweep analizi gerçekleştirilmiş ve elastik (G' , Pa) ile viskoz (G'' , Pa) modüller grafiğe dökülmüştür. Şekil 3.36' da bu değerler gösterilmiştir.



Şekil 3.36. Ekmek hamuru reometre analizi

Tüm örneklerde elastik modül (G') değerlerinin viskoz modül (G'') değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, hamurun viskoz özelliklerinden çok elastik özelliklerinin baskın olduğunu göstermektedir. Elastik modülün daha yüksek olması, hamurun yapısal dayanıklılığını ve stres altında deformasyona karşı dirençli olduğunu işaret eder. Literatürde, bu durum hamurun protein ağ yapısının güçlü olduğunu ve dış streslere karşı dayanıklılığını vurgulamaktadır (Dowell vd., 2008).

Artan kayma gerilimi (strain) seviyeleriyle hem G' hem de G'' değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Bu, tipik bir zayıflama davranışı olup hamurun iç yapısının gevşemeye başladığını işaret etmektedir. Özellikle elastik modülün yüksekliği, hamurun stres altında deformasyona karşı dirençli yapısını vurgular (Khatkar ve Schofield, 2002; Upadhyay vd., 2012).

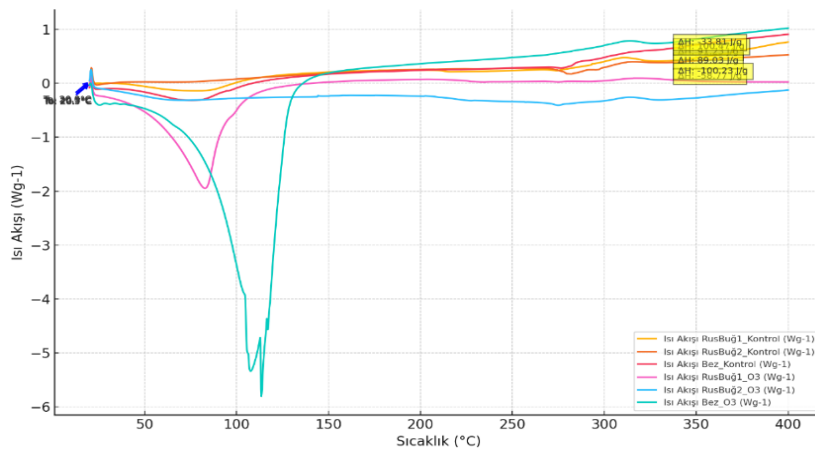
Ozonlanmış örneklerde, kontrol grubuna kıyasla elastik ve viskoz modüllerde genellikle bir düşüş görülmüştür. Bu, ozon işleminin protein ağ yapısında modifikasyonlara yol açtığını düşündürmektedir. Literatür, ozonlamanın disülfid bağlarının parçalanmasına ve glutende fonksiyonel değişikliklere neden olduğunu destekler. Özellikle düşük strain seviyelerinde ozonlanmış örneklerin elastik modül kaybı daha belirgin olmuştur. Kontrol örneklerinde strain'in başlangıç değerlerinde G' ve G'' eğrileri daha yüksek başlarken, ozonlanmış örneklerde bu başlangıç seviyeleri daha düşüktür. Strain arttıkça her iki modülde de daha hızlı bir azalma eğilimi ozonlanmış örneklerde gözlemlenmiştir, bu da ozonlama nedeniyle yapı stabilitesinde azalmaya işaret etmektedir (Dowell vd., 2008; Khatkar ve Schofield, 2002; Mirsaedghazi vd., 2008).

Kontrol grubu örneklerinde, strain başlangıç seviyelerinde G' ve G'' değerleri ozonlanmış örneklere göre daha yüksek başlamıştır. Ozonlama işleminin etkisiyle ozonlanmış örneklerde yapı stabilitesinde belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Bu bulgu, ozon işleminin hamurun yapısal dayanıklılığını azaltabileceğini göstermektedir.

Bu çalışma, ozonlama işleminin buğday unu hamurlarının reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini anlamada önemli veriler sunmaktadır. Ozonlama, hamurun elastik ve viskoz özelliklerini değiştirerek deformasyon altındaki davranışını etkilemekte ve unun nihai ürün kalitesini şekillendirmektedir. Özellikle düşük strain seviyelerinde gözlemlenen etkiler, ozonlama teknolojisinin optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Literatürle desteklenen bu bulgular, gıda endüstrisindeki ozonlama uygulamalarının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

3.4.16. DSC analizi sonuçları

Kontrol ve ozon uygulanmış buğday unu örneklerine ait DSC grafiği Şekil 3.37'de verilmiştir.



Şekil 3.37. Kontrol ve ozon uygulanmış buğday unu DSC grafiği

Grafik üzerinde başlangıç sıcaklıkları (T_o) işaretlenmiş ve her bir örnek için entegral yöntemiyle hesaplanan ΔH (entalpi) değerleri gösterilmiştir. Mavi oklar her bir örnekteki başlangıç sıcaklığını (T_o) işaret etmektedir. Sarı kutular ise ΔH değerlerini, yani ısı akışı eğrisinin altında kalan alanı temsil etmektedir.

X ekseninde sıcaklık ($^{\circ}C$), Y ekseninde ise her bir örnek için ısı akışı (Wg^{-1}) değerlerinin yer aldığı bu grafikte kontrol ve ozon uygulanmış un örneklerinin termal davranışları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Piklerin (tepe noktalarının) yerleri ve şekilleri ozonun nişasta jelatinizasyonu veya protein denatürasyonuna etkisini göstermektedir.

Grafikte; piklerin sıcaklık aralıkları ve tepe noktalarının (T_p) yerleri, nişasta jelatinizasyonu veya protein denatürasyonuna işaret etmektedir. Ozon uygulanmış örneklerde piklerde kayma, genişleme veya daralma gözlenmiştir. Bu durum, ozonun unun fizikokimyasal özelliklerini değiştirdiğini göstermektedir. Grafikte; ısı akışındaki pozitif veya negatif değişiklikler, ısı alımını veya salınımını temsil eder. Ozonun uygulandığı örneklerde endotermik tepkilerin enerjisinde (ΔH) farklılıklar olabilmektedir. Her örnekteki olaylar belirli bir sıcaklık aralığında gerçekleştiği için, kontrol ve ozonlu örnekler arasında başlangıç (T_o) ve bitiş (T_c) sıcaklıklarında değişiklik görülebilmektedir.

Grafik Rus Buğdayı 1 için incelendiğinde; kontrol örneğinde T_o daha düşük, ozon uygulaması bu sıcaklığı arttırdığı gözlenmiştir. Bu, ozonun nişasta veya protein yapısını değiştirdiğini ve daha fazla enerji gerektirdiğini göstermektedir. Ozonlu örnekte pik sıcaklığı (T_p) kontrol örneğine göre hafif bir kayma göstermiştir. Bu, ozonun nişasta jelatinizasyon mekanizmasını etkilediğini veya proteinlerin farklı bir şekilde denatüre olduğuna işaret etmektedir. Özetle, ozon uygulaması, RusBuğ1 örneğinde hem termal stabiliteyi artırmış hem de yapısal değişimlere neden olmuştur.

Rus Buğdayı 2 adlı un örneği için; kontrol örneği ile ozonlu örnek arasında T_o değerleri bakımından benzerlikler olmakla birlikte, ozonlu örnekte belirgin bir genişleme dikkat çekmektedir. T_p , ozon uygulaması ile kontrol örneğine kıyasla biraz artmış veya genişlemiştir. Bu durum, jelatinizasyon sürecinin daha fazla enerji gerektiğini göstermektedir. Genel olarak, Rus Buğdayı 2 örneğinde ozon uygulaması termal davranışları değiştirmiş ve nişasta/protein etkileşimlerinde önemli farklılıklar yaratmıştır.

Bezostaya için kontrol örneğinde başlangıç sıcaklığı daha düşükken, ozonlu örnekte bu sıcaklık artmıştır. Bu, ozonun un bileşenlerinin termal stabilitesini artırdığı anlamına gelmektedir. Ozon uygulaması sonrası T_p 'nin kaydığı ve pik şeklinin daha geniş bir hale geldiği gözlenmektedir. Bu, proteinlerin veya nişastanın termal olaylarının daha karmaşık hale geldiğini göstermektedir. Bezostaya örneğinde ozon, termal olayları belirgin şekilde değiştirmiş, yapısal stabiliteyi artırmış veya enerji gereksinimini yeniden şekillendirmiştir.

Analiz sonuçlarına göre, tüm örnekler arasında en yüksek ΔH (entalpi) değeri, Bez_Kontrol örneğinde ($100.47 J/g$) olarak gözlemlenmiştir. Bu durum, Bez_Kontrol örneğinin diğer

örneklere kıyasla termal olaylar sırasında daha fazla enerji gerektirdiğini göstermektedir. RusBuğ1_Kontrol ve RusBuğ2_Kontrol örnekleri sırasıyla 91.23 J/g ve 89.03 J/g ΔH değerleriyle ikinci ve üçüncü sırada yer almaktadır. Ozon uygulanmış örneklerde ise ΔH değerlerinde belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Bez_Ozon örneğinde ΔH değeri -33.81 J/g, RusBuğ1_Ozon örneğinde ise -58.77 J/g olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, ozon uygulamasının kontrol örneklerine kıyasla entalpi değerlerini kayda değer ölçüde azalttığını ve termal davranışlarda önemli değişikliklere yol açtığını göstermektedir. Özellikle, ozonun moleküler yapı üzerindeki bozucu etkisi nedeniyle enerji gereksiniminin düştüğü düşünülebilir. Bu bulgular, ozonun unun işlevsel özelliklerini değiştirebileceğini ve süreç optimizasyonu için dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Genel olarak; tüm örneklerde ozon uygulaması başlangıç ve pik sıcaklıklarını değiştirmiştir. Bu, ozonun buğday ununun fizikokimyasal yapısında değişikliklere neden olduğunu göstermektedir. ΔH değerlerinde değişiklikler, ozonun nişasta ve proteinlerin etkileşimlerini etkilediğine işaret etmektedir. Bazı örneklerde ozonun termal stabiliteyi artırdığı (piklerin genişlemesi veya ΔH artışı), bazı durumlarda ise yapı zayıflamalarına neden olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar, ozon uygulamasının kontrollü şekilde kullanılmasının, unun işlevsel ve termal özelliklerini optimize edebileceğini göstermektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Buğday, insanlık tarihi boyunca tarımın temel taşlarından biri olmuş ve medeniyetlerin gelişiminde hayati bir rol oynamıştır. Dünyanın en yaygın yetiştirilen ve tüketilen tahıllarından biri olan buğday, insan beslenmesinde önemli bir karbonhidrat kaynağıdır ve ekmek, makarna, bisküvi gibi temel gıdaların üretiminde kullanılır. Aynı zamanda, buğday tarımı ekonomilere istihdam ve gelir sağlayarak tarım sektörünün bel kemiğini oluşturur. Besleyici yapısının yanı sıra dayanıklı bir bitki türü olması, farklı iklim koşullarında yetiştirilebilmesini mümkün kılar ve bu da buğdayı küresel gıda güvenliğinde stratejik bir ürün haline getirir. Özetle, buğday hem bireylerin beslenme ihtiyaçlarını karşılamada hem de ülkelerin ekonomik ve sosyal sürdürülebilirliğinde vazgeçilmez bir role sahiptir.

Buğdayın depolama sırasında karşı karşıya kaldığı kayıplar, zararlı organizmalar, küf ve mikotoksin üretimi gibi sorunlardan kaynaklanmaktadır. Bu süreçte ozon (O₃) kullanımı, hem çevre dostu bir yaklaşım sunması hem de etkili bir kontrol aracı olması nedeniyle giderek önem kazanmaktadır. Ozon, güçlü oksidasyon özelliği sayesinde zararlı mikroorganizmaların, küf sporlarının ve böceklerin kontrol altına alınmasında etkili bir gazdır.

Ozon, depolama alanlarına uygulanarak buğday yüzeyindeki patojenlerin yok edilmesine, mikotoksin gelişiminin önlenmesine ve uzun süreli depolamada ürün kalitesinin korunmasına yardımcı olur. Özellikle, kimyasal pestisitlere alternatif olarak kullanılması, ürün üzerinde kimyasal kalıntı bırakmaması nedeniyle sağlık ve çevre açısından büyük avantajlar sağlar. Ayrıca ozonun gaz formunda olması, depolama alanlarının her köşesine ulaşarak homojen bir etki yaratmasını mümkün kılar.

Ozonun düzenli ve kontrollü kullanımı, buğdayın depolama süresince değer kaybetmesini önlerken, gıda güvenliği standartlarının sağlanmasına ve ekonomik kayıpların azaltılmasına önemli bir katkı sunar. Bu nedenle, ozon teknolojisi, modern tarımsal depolama sistemlerinde sürdürülebilir ve yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen araştırmalar, ozon uygulamalarının buğday tanesi üzerindeki etkilerinin belirli sınırlar çerçevesinde değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Literatür incelemeleri, ozon oksidasyonunun genellikle buğday unu üzerindeki etkilerine odaklandığını, ancak buğday tanesi üzerinde yapılan çalışmaların sınırlı sayıda kaynakla kısıtlı kaldığını göstermiştir. Bu eksikliği gidermek amacıyla, çalışmada farklı protein oranlarına sahip üç çeşit ekmeklik buğday (kuvvetli, orta ve zayıf) üzerinde ozon oksidasyonunun etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Çalışmada, düşük, orta ve yüksek ozon konsantrasyonları (14 ppm, 37 ppm ve 65 ppm) ile kısa, orta ve uzun uygulama süreleri (45 dak, 90 dak ve 150 dak) kullanılarak AFB₁ detoksifikasyonu üzerindeki etkiler değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, mikotoksin detoksifikasyonu açısından en yüksek etkinin 65 ppm ozon konsantrasyonu ve 150 daklık uygulama süresi ile elde edildiğini göstermiştir. Bu parametrelerin belirlenmesinin ardından, aynı koşullar buğday

tanelerine uygulanarak ozonun buğdayın kimyasal, fiziko-kimyasal, bazı fonksiyonel ve reolojik özellikler ile son ürün olan ekmeğin bazı özellikleri üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir.

Çalışmanın sonuçları, ozon uygulamasının buğday tanelerinin temel fiziko-kimyasal özellikleri üzerinde önemli değişimlere neden olduğunu ortaya koymuştur. İncelenen özellikler arasında rutubet miktarı, protein miktarı, kül miktarı, gluten miktarı, gluten indeks değeri, zeleny sedimentasyon değeri, düşme sayısı değeri, toplam fenolik madde miktarı, toplam antioksidan aktivite miktarı, DSC, SEM ve FT-IR analizleri yer almıştır. Ayrıca, ozonun hamurun reolojik (Farinograf, Ekstensograf ve Reometre analizleri) ve ekmeğin özellikleri (hacim, ağırlık, spesifik hacim ve tekstürel özellikler) üzerinde de dikkate değer etkiler yarattığı tespit edilmiş ve bulgular detaylı biçimde tartışılmıştır.

Elde edilen bulgular, ozon uygulamalarının mikotoksin detoksifikasyonu sağlamanın ötesinde, buğdayın teknolojik ve besinsel özelliklerinde de iyileştirici veya sınırlayıcı etkiler yaratabileceğini göstermektedir. Bu bağlamda, ozonun etkin kullanımının yalnızca konsantrasyon ve süre parametrelerine değil, aynı zamanda uygulandığı buğday türünün özelliklerine de bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tez çalışmasıyla elde edilen veriler, ozon uygulamalarının buğday kalitesine yönelik etkilerinin kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi gerektiğini vurgulamakta ve bu alanda yapılan çalışmaların önemine dikkat çekmektedir. Bu araştırmanın bulguları, hem akademik literatüre katkı sağlamakta hem de buğday depolama ve işleme süreçlerinde ozon kullanımına ilişkin yeni bir perspektif sunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Afsah-Hejri, L., Hajeb, P. ve Ehsani, R. J. (2020). Application of ozone for degradation of mycotoxins in food: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(4), 1777-1808. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12594>
- Akbalık, Ş. (2021). Çorum İskilip Şartlarında Bazı Ekmeklik Buğday, Tokat: Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Akın, A. (2022). *Tescil Ettirilmiş Ekmeklik Buğday Çeşitlerinin Beslenme ve Teknolojik Kalite Bakımından Değerlendirilmesi* (Doktora Tezi), Ankara: Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Alegbeleye, O., Odeyemi, O. A., Strateva, M. ve Stratev, D. (2022). Microbial spoilage of vegetables, fruits and cereals. *Applied Food Research*, 2(1), 100122. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100122>
- Alemu, A., El Baouchi, A., El Hanafi, S., Kehel, Z., Eddakhir, K. ve Tadesse, W. (2021). Genetic analysis of grain protein content and dough quality traits in elite spring bread wheat (*Triticum aestivum*) lines through association study. *Journal of Cereal Science*, 100, 103214. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103214>
- American Association of Cereal Chemists (AACC) (2000). *Approved Methods of the AACC* (10. Baskı). St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists.
- Anjum, F. M., Moazzam, R. K., Din, A., Saeed, M., Imran, P. ve Muhammad, U. A. (2007). Wheat gluten: High molecular weight glutenin subunits—structure, genetics, and relation to dough elasticity. *Journal of Food Science*, 72(3), 56-63. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00292.x>
- Arda, B., Onbaşı, E., Öztürk, A. ve Cinar, A. (2021). Ozon gazının antifungal ajan olarak etkinliğinin belirlenmesi. *Gıda ve Yem Bilimi Teknolojisi Dergisi*, 2021(26), 40-48.
- Ashogbon, A. O. (2021). Dual modification of various starches: Synthesis, properties and applications. *Food Chemistry*, 342, 128325. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128325>
- Aydar, E. F. (2022). *Kars Yöresine Ait Ata Buğdayı Kavılca ve Modern Ekmeklik Buğdaydan Hazırlanan Un ve Ekmeğin Fonksiyonel Özelliklerinin ve Sağlık Etkilerinin İncelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Aydoğan, S. ve Soylu, S. (2020). Farklı yetiştirme koşullarının bazı ekmeklik buğday çeşitlerinin farinograf özelliklerine etkisinin belirlenmesi. *Ziraat Mühendisliği*, (370), 34-44. <https://doi.org/10.33724/zm.700685>
- Başlar, M. (2008). *Ekmeklik Buğday Unlarının Bazı Kalite Özelliklerinin Yakın Kızılötesi Spektroskopisi (NIRS) Kullanılarak Belirlenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Erzurum: Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Botondi, R., Barone, M. ve Grasso, C. (2021). A Review into the effectiveness of ozone technology for improving the safety and preserving the quality of fresh-cut fruits and vegetables. *Foods*, 10(4), 748. <https://doi.org/10.3390/foods10040748>
- Bozkurt, M. (2023). Eskişehir sulu koşullarında bazı ekmeklik buğday hat ve çeşitlerinin verim ve kalite özelliklerinin incelenmesi. *Biyoloji Bilimleri Araştırma Dergisi*, 15(2), 74-79.
- Brodowska, A. J., Nowak, A. ve Śmigielski, K. (2018). Ozone in the food industry: Principles of ozone treatment, mechanisms of action, and applications: An overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(13), 2176-2201. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1308313>
- Bulut, S. (2012). Ekmeklik buğdayda kalite. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 28(5), 441-446.
- Castanha, N., Matta Junior, M. D. da ve Augusto, P. E. D. (2017). Potato starch modification using the ozone technology. *Food Hydrocolloids*, 66, 343-356. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.12.001>

- Castanha, N., Miano, A. C., Jones, O. G., Reuhs, B. L., Campanella, O. H. ve Augusto, P. E. D. (2020). Starch modification by ozone: Correlating molecular structure and gel properties in different starch sources. *Food Hydrocolloids*, 108, 106027. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106027>
- Chakka, A. K., Sriraksha, M. S. ve Ravishankar, C. N. (2021). Sustainability of emerging green non-thermal technologies in the food industry with food safety perspective: A review. *LWT*, 151, 112140. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112140>
- Chan, H., Leh, C. P., Bhat, R., Senan, C., Williams, P. A. ve Karim, A. A. (2011). Molecular structure, rheological and thermal characteristics of ozone-oxidized starch. *Food Chemistry*, 126(3), 1019-1024. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.11.113>
- Chandravarnan, P., Agyei, D. ve Ali, A. (2022). Green and sustainable technologies for the decontamination of fungi and mycotoxins in rice: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 124, 278-295. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.020>
- Chhem-Kieth, S., Holm Rasmussen, L., Rosenfeld, M. ve Larsen Andersen, M. (2022). Effects of vegetables and fruit with varying physical damage, fungal infection, and soil contamination on stability of aqueous ozone. *Food Bioscience*, 50(B), 102157. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102157>
- Chittrakorn, S., Earls, D. ve MacRitchie, F. (2014). Ozonation as an alternative to chlorination for soft wheat flours. *Journal of Cereal Science*, 60(1), 217-221. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.02.013>
- Codin, G. G., Mironeasa, S. ve Mironeasa, C. (2011). Evaluation of strong wheat type 650 flour parameters with the farinograph instrument. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Animal Science and Biotechnologies*.
- Çatal, H. ve İbanoglu, S. (2012). Structure, physico-chemical and microbiological properties of ozone-oxidized wheat, corn, potato. *Journal of Food Science and Engineering*, 2(4), 196-205.
- Çatal, H. ve İbanoğlu, Ş. (2014). Effect of aqueous ozonation on the pasting, flow and gelatinization properties of wheat starch. *LWT - Food Science and Technology*, 59(1), 577-582. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.04.025>
- Çeliker, G. (2019). *TS 2974 Buğday Standardına Göre Aynı Kategoride Yer Alan Ekmeklik Buğday Çeşitlerinin Farinograf ve Ekstensograf Özelliklerinin Belirlenerek TMO Hububat Alım Kriterleri ile Uyumluluğunun İncelenmesi ve Glutopik Analizinin Bu Sınıflandırma ve Değerlendirme Çerçevesinde Kullanılabilirliğinin Belirlenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Osmaniye: Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çetiner, B. (2020). *Bazı Ekmeklik Buğday Çeşitlerinin Fonksiyonel ve Tam Buğday Ekmeği Özelliklerinin Karşılaştırılması, Kalite ve Fonksiyonel Özellikler Bakımından İyileştirilme Olanaklarının Araştırılması*, (Doktora Tezi), Ankara: Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Çıbık, C. (2017). *Yüksek ve Düşük Molekül Ağırlıklı Glutenin Alt Ünitelerinin Ekmeklik Buğdayın Bazı Kalitatif Özelliklerine Etkisi*, (Yüksek Lisans Tezi), Karaman: Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- da Luz, S. R., Almeida Villanova, F., Tuchtenhagen Rockembach, C., Dietrich Ferreira, C., José Dallagnol, L., Luis Fernandes Monks, J. ve de Oliveira, M. (2022). Reduced of mycotoxin levels in parboiled rice by using ozone and its effects on technological and chemical properties. *Food Chemistry*, 372, 131174. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131174>
- Daniela, C. A., Victoria, S. M. ve Cecilia, P. M. (2023). Production of legume-wheat dough of optimum quality for breadmaking: Essential analyses required. *Current Opinion in Food Science*, 49, 100970. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100970>
- Della Valle, G., Dufour, M., Hugon, F., Chiron, H., Saulnier, L. ve Kansou, K. (2022). Rheology of wheat flour dough at mixing. *Current Opinion in Food Science*, 47, 100873. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100873>

Demir, M. K., Elgün, A. ve Elgün, S. M. (2011). Farklı tip unlara ozon uygulamasının, un, hamur ve ekmek kalitesi üzerine etkisi. *GIDA*, 36(4), 4.

Desvignes, C., Chaurand, M., Dubois, M., Sadoudi, A., Abecassis, J. ve Lullien-Pellerin, V. (2008). Changes in common wheat grain milling behavior and tissue mechanical properties following ozone treatment. *Journal of Cereal Science*, 47(2), 245-251. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.04.004>

Devu, S. S., Dileepmon, R., Kothakota, A., Venkatesh, T., Pandiselvam, R., Garg, R. ve Khaneghah, A. M. (2022). Recent advancements in baking technologies to mitigate formation of toxic compounds: A comprehensive review. *Food Control*, 135, 108707.

Dieakmann, F. (2009). Wheat. *Journal of Agricultural & Food Information*, 10(4), 289-299, <https://doi.org/10.1080/10496500903245404>

Dowell, F. E., Maghirang, E. B., Pierce, R. O., Lookhart, G. L., Bean, S. R., Xie, F., Caley, M. S., Wilson, J. D., Seabourn, B. W., Ram, M. S., Park, S. H. ve Chung, O. K. (2008). Relationship of bread quality to kernel, flour, and dough properties. *Cereal Chemistry*, 85(1), 82-91. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-85-1-0082>

Dubois, M., Coste, C., Despres, A. G., Efstathiou, T., Nio, C. ve Dumont, E. (2006). Safety of Oxygreen, an ozon treatment on wheat grains, Part 2. Is there a substantiation equivalence between Oxygreen-treated wheat grains and untreated wheat grains? *Food Additives & Contaminants*, 23, 1-15.

El-Desouky, T. A. ve Hussain, H. B. H. (2021). Evaluation of oxidation process by ozonation and glucose oxidase enzyme on the degradation of benzoquinone in wheat flour. *The Open Biochemistry Journal*, 15(1), 61-68. <https://doi.org/10.2174/1874091X02115010061>

Elgün, M. S. ve Bilgiçli, N. (2019). Buğday ununa ozon gazı uygulamasının un ve ekmek kalitesine etkisi. *Akademik Gıda*, 17(3), 329-341. <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.647710>

Eryaşar, Ö. (2011). *Kitosan Birimi İçeren İletken Kompozitlerin Sentezi ve Uygulama Alanlarının İncelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Çanakkale: Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ferrari, M. C., Clerici, M. T. P. S. ve Chang, Y. K. (2014). A comparative study among methods used for wheat flour analysis and for measurements of gluten properties using the Wheat Gluten Quality Analyser (WGQA). *Food Science and Technology*, 34(2), 235-242. <https://doi.org/10.1590/fst.2014.0038>

Gavahian, M., Sarangapani, C. ve Misra, N.N. (2021). Cold plasma for mitigating agrochemical and pesticide residue in food and water: Similarities with ozone and ultraviolet technologies. *Food Research International*, 141, 110138.

Gedikli, Okan, O., Uzundumlu, A. S. ve Tozlu, G. (2015). Çeltik, mısır ve buğday üretiminde tarımsal ilaç kullanımının çevresel duyarlılık yönünden incelenmesi: Samsun ili örneği. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 8(2), 19-26.

Gélinas, P. ve McKinnon, C. (2011). A finer screening of wheat cultivars based on comparison of the baking potential of whole-grain flour and white flour. *International Journal of Food Science & Technology*, 46(6), 1137-1148. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02600.x>

Goze, P., Rhazi, L., Lakhal, L., Jacolot, P., Pauss, A. ve Aussenac, T. (2017). Effects of ozone treatment on the molecular properties of wheat grain proteins. *Journal of Cereal Science*, 75(2017), 243-251.

Gozé, P., Rhazi, L., Pauss, A. ve Aussenac, T. (2016). Starch characterization after ozone treatment of wheat grains. *Journal of Cereal Science*, 70, 207-213. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.06.007>

Gummadov, N. (2012). *Kışık Ekmeklik Buğdayda Verim ve Kalite Özellikleri Yönünden Genetik İlerlemenin Belirlenmesi*, (Doktora Tezi), Konya: Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Guo, Y., Zhao, L., Ma, Q. ve Ji, C. (2021). Novel strategies for degradation of aflatoxins in food and feed: A review. *Food Research International*, 140, 109878.

Gül, H., Kara, B., Acun, S., Türk Aslan, S. ve Öztürk, A. (2020). Türkiye'nin Göller Bölgesi'nde yetiştirilen farklı buğday çeşitlerinin bazı kalite özellikleri. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 7(3), 586-595. <https://doi.org/10.30910/turkjans.663641>

Gür, S. (2022). *Bazı Ekmeklik Buğday Çeşitlerinin Teknolojik, Reolojik ve Ekmeklik Özellikleri ile Glutopik Parametreleri Arasındaki İlişkiler*, (Yüksek Lisans Tezi), Afyon: Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Hamad, G. M., Mehany, T., Simal-Gandara, J., Abou-Alella, S., Esua, O. J., Abdel-Wahhab, M. ve Hafez, E. E. (2023). A review of recent innovative strategies for controlling mycotoxins in foods. *Food Control*, 144 (2023), 109350.

Han, H. M. ve Koh, B.-K. (2011). Effect of phenolic acids on the rheological properties and proteins of hard wheat flour dough and bread: Effect of phenolic acids on hard wheat flour dough and bread. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(13), 2495-2499. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4499>

Hrušková, M. ve Faměra, O. (2003). Prediction of wheat and flour Zeleny sedimentation value using NIR technique. *Czech Journal of Food Sciences*, 21(3), 91-96. <https://doi.org/10.17221/3482-CJFS>

Hu, J., Li, X., Cheng, Z., Fan, X., Ma, Z., Hu, X., Wu, G. ve Xing, Y. (2022). Modified Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.) starch by gaseous ozone: Structural, physicochemical and in vitro digestible properties. *Food Hydrocolloids*, 125, 107365. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107365>

Hu, J., Li, X., Jing, Y., Hu, X., Ma, Z., Liu, R., Song, G. ve Zhang, D. (2020). Effect of gaseous ozone treatment on the microbial and physicochemical properties of buckwheat-based composite flour and shelf-life extension of fresh noodles. *Journal of Cereal Science*, 95, 103055. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103055>

Ingegno, B. L. ve Tavella, L. (2022). Ozone gas treatment against three main pests of stored products by combination of different application parameters. *Journal of Stored Products Research*, 95, 101902. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101902>

International Association for Cereal Science and Technology (ICC) (1984). *Determination of the Protein Content in Cereal and Cereal Products for Food and Feed by the Kjeldahl Method* (Standard No. 106/2). Vienna, Austria: ICC.

International Association for Cereal Science and Technology (ICC) (1994). *Determination of Wet Gluten Content in Wheat Flour and Wheat Meal by Mechanical Means* (Standard No. 155). Vienna, Austria: ICC.

International Association for Cereal Science and Technology (ICC) (1995). *Determination of the Crude Fat Content in Cereals and Cereal Products by the Soxhlet Method* (Standard No. 107/1). Vienna, Austria: ICC.

International Association for Cereal Science and Technology (ICC). (1995). *Standard No. 158: Determination of Gluten Index of Wheat Flour and Wheat Gluten (Glutomatic method)*. Vienna, Austria: ICC.

International Chamber of Commerce (1992a). ICC Standard No: 115/1. ICC.

International Chamber of Commerce (1992b). ICC Standard No: 114/1. ICC.

Jackowska, I., Bojanowska, M., Staszowska-Karkut, M. ve Sachadyn-Król, M. (2019). Low concentration short time ozonation of rapeseed seeds reduces the stability of the oil and content of some antioxidant components. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(12), 3175-3184. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14251>

Karaduman, Y. (2013). *Seçilmiş Yumuşak Ekmeklik Buğday Hatlarında Bisküvilik Kalite Özelliklerinin Araştırılması*, (Doktora Tezi), Ankara: Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Kaur, K., Pandiselvam, R., Kothakota, A., Padma Ishwarya, S., Zalpouri, R. ve Mahanti, N. K. (2022). Impact of ozone treatment on food polyphenols – A comprehensive review. *Food Control*, 142, 109207. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109207>
- Kayıoğlu, Ç. (2017). *Renkli Cin Mısırlarının Farklı Metotlarla Patlatılmasının Bazı Fonksiyonel Bileşenler Üzerine Etkisi*. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kayıoğlu, Ç. ve Türksoy, S. (2023). Ozon uygulamasının tahıl ve ürünleri üzerindeki etkileri. *Gıda*, 48(2), 285-304. <https://doi.org/10.15237/gida.gd22117>
- Kells, S. A., Mason, L. J., Maier, D. E. ve Woloshuk, C. P. (2001). Efficacy and fumigation characteristics of ozone in stored maize. *Journal of Stored Products Research*, 37(4), 371-382. [https://doi.org/10.1016/S0022-474X\(00\)00040-0](https://doi.org/10.1016/S0022-474X(00)00040-0)
- Khatkar, B. S. ve Schofield, J. D. (2002). Dynamic rheology of wheat flour dough. II. Assessment of dough strength and bread-making quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(8), 823-826. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1111>
- Kibar, H. (2015). Influence of storage conditions on the quality properties of wheat varieties. *Journal of Stored Products Research*, 62, 8-15. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2015.03.001>
- Koç, S. (2023). *Çeşitlerinin Verim ve Kalite Özellikleri Bakımından Performanslarının Belirlenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Bursa: Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Lafiandra, D. ve Shewry, P. R. (2022). Wheat Glutenin polymers 2. The role of wheat glutenin subunits in polymer formation and dough quality. *Journal of Cereal Science*, 106, 103487. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2022.103487>
- Lee, M. J., Kim, M. J., Kwak, H. S., Lim, S. T. ve Kim, S. S. (2017). Effects of ozone treatment on physicochemical properties of Korean wheat flour. *Food Science and Biotechnology*, 26(2), 435-440. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0059-5>
- Li, C., Tilley, M., Chen, R., Siliveru, K. ve Li, Y. (2023). Effect of bran particle size on rheology properties and baking quality of whole wheat flour from four different varieties. *LWT*, 175, 114504. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114504>
- Li, M., Peng, J., Zhu, K. X., Guo, X.-N., Zhang, M., Peng, W. ve Zhou, H.-M. (2013). Delineating the microbial and physical-chemical changes during storage of ozone treated wheat flour. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 20, 223-229. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.06.004>
- Li, M., Zhu, K. X., Wang, B. W., Guo, X. N., Peng, W. ve Zhou, H. M. (2012). Evaluation the quality characteristics of wheat flour and shelf-life of fresh noodles as affected by ozone treatment. *Food Chemistry*, 135(4), 2163-2169. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.103>
- Lillo, E., Cordisco, M., Trotta, A., Greco, G., Carbonari, A., Rizzo, A., Sciorsci, R. L. ve Corrente, M. (2022). Evaluation of antibacterial oxygen/ozone mixture in vitro activity on bacteria isolated from cervico-vaginal mucus of cows with acute metritis. *Theriogenology*, 196, 25-30. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2022.10.031>
- Lima, D. C., Maniglia, B. C., Matta Junior, M. D., Le-Bail, P., Le-Bail, A. ve Duarte Augusto, P. E. (2021). Dual-process of starch modification: Combining ozone and dry heating treatments to modify cassava starch structure and functionality. *International Journal of Biological Macromolecules*, 167(2021), 894–905.
- Liu, F., Huang, Y., Han, C., Wang, G., Wan, Z., Guo, J. ve Yang, X. (2025). Enhancing protein content and lubrication behavior of plant-based milk with microparticulated wheat gluten protein via SS-SH interchange. *Food Hydrocolloids*, 159, 110640. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110640>
- Liu, Q., Wu, S. ve Sun, X. (2025). Improvement in the rheological properties and gas phase of dough, and overall quality of dietary fibre enriched products: Enzymatic modification on the composition and structure of dietary fibre. *Food Hydrocolloids*, 160, 110742. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110742>

- Ma, M., Sun, Q. J., Li, M. ve Zhu, K. X. (2020). Deterioration mechanisms of high-moisture wheat-based food – A review from physicochemical, structural, and molecular perspectives. *Food Chemistry*, 318, 126495. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126495>
- Maniglia, B. C., Castanha, N., Rojas, M. L. ve Augusto, P. E. (2021). Emerging technologies to enhance starch performance. *Current Opinion in Food Science*, 37, 26-36. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.09.003>
- Maqbool, N., Dar, A. H., Kumar Dash, K., Srivastava, S., Pandey, V. K., Shams, R., Aga, M. B., Majeed, T. ve Manzoor, S. (2024). Ozonation effects on structural and functional characteristics of starch. *Future Foods*, 9, 100334. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100334>
- Marston, K., Khouryieh, H. ve Aramouni, F. (2015). Evaluation of sorghum flour functionality and quality characteristics of gluten-free bread and cake as influenced by ozone treatment. *Food Science and Technology International*, 21(8), 631-640. <https://doi.org/10.1177/1082013214559311>
- Mecitoğlu Güçbilmez, Ç., Şahin, M., Göçmen Akçacık, A., Aydoğan, S., Demir, B., Hamzaoğlu, S., Gür, S. ve Yakışır, E. (2019). Evaluation of GlutoPeak test for prediction of bread wheat flour quality, rheological properties and baking performance. *Journal of Cereal Science*, 90, 102827. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102827>
- Mei, J., Liu, G., Huang, X. ve Ding, W. (2016). Effects of ozone treatment on medium hard wheat (*Triticum aestivum* L.) flour quality and performance. *CyTA-Journal of Food*, 14(3), 449-456. <https://doi.org/10.1080/19476337.2015.1133714>
- Menderis, M. (2006). *Güneydoğu Anadolu Bölgesi Koşullarında Geliştirilen Bazı Ekmeklik Buğday (Triticum aestivum L.) Hatları ile Yetiştirilen Bazı Buğday Çeşitlerinin Kalite Özelliklerinin Araştırılması*, (Yüksek Lisans Tezi), Şanlıurfa: Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Mendez, F., Maier, D. E., Mason, L. J. ve Woloshuk, C. P. (2003). Penetration of ozone into columns of stored grains and effects on chemical composition and processing performance. *Journal of Stored Products Research*, 39(1), 33-44. [https://doi.org/10.1016/S0022-474X\(02\)00015-2](https://doi.org/10.1016/S0022-474X(02)00015-2)
- Mızrak, G. (2021). *Topraktan Sofraya Buğday*. Gürbüz Mızrak.
- Mir, S. A., Dar, B. N., Mir, M. M., Sofi, S. A., Shah, M. A., Sidiq, T., Sunooj, K. V., Hamdani, A. M. ve Mousavi Khaneghah, A. (2022). Current strategies for the reduction of pesticide residues in food products. *Journal of Food Composition and Analysis*, 106, 104274. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104274>
- Mir, S. A., Dar, B. N., Shah, M. A., Sofi, S. A., Hamdani, A. M., Oliveira, C. A. F., Hashemi Moosavi, M., Mousavi Khaneghah, A. ve Sant'Ana, A. S. (2021). Application of new technologies in decontamination of mycotoxins in cereal grains: Challenges, and perspectives. *Food and Chemical Toxicology*, 148, 111976. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.111976>
- Miranda, M. Z., Galdeano, M. C., Freitas-Silva, O. ve Tatsch, P. (2017). *Effect of Ozone Treatment in Wheat Quality of Whole Grain Wheat Flour*. Erişim tarihi: 15 Ocak 2023. <https://www.semanticscholar.org/paper/Effect-of-ozone-treatment-in-wheat-quality-of-whole-Miranda->
- Mirsaeedghazi, H., Emam-Djomeh, Z. ve Mousavi, S. M. A. (2008). Rheometric measurement of dough rheological characteristics and factors affecting it. *International Journal of Agriculture and Biology*, 10(1), 112-119.
- Moll, S., Zettel, V., Delgado, A. ve Hitzmann, B. (2022). Rheological evaluation of wheat dough treated with ozone and ambient air during kneading and dough formation. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(9), 6130-6142. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15974>
- Moosavi, M. H., Khaneghah, A. M., Javanmardi, F., Hadidi, M., Hadian, Z., Jafarzadeh, S., Huseyn, E. ve Sant'Ana, A. S. (2021). A review of recent advances in the decontamination of mycotoxin and inactivation of fungi by ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 79, 105755. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105755>

- Muştu, Ç. (2020). Yiyecek ve içecek işletmelerinde ozon uygulamaları. *Aydın Gastronomy*, 4(1), 45-53. https://doi.org/10.17932/IAU.GASTRONOMY.2017.016/2020.401/gas_v04i1005
- Nada, S., Nikola, T., Bozidar, U., Ilija, D. ve Andreja, R. (2022). Prevention and practical strategies to control mycotoxins in the wheat and maize chain. *Food Control*, 136(2022), 108855.
- Nickhil, C., Mohapatra, D., Kar, A., Giri, S. K., Tripathi, M. K. ve Sharma, Y. (2021). Gaseous ozone treatment of chickpea grains, part I: Effect on protein, amino acid, fatty acid, mineral content, and microstructure. *Food Chemistry*, 345, 128850. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128850>
- Niveditha, A., Pandiselvam, R., Prasath, V. A., Singh, S. K., Gul, K. ve Kothakota, A. (2021). Application of cold plasma and ozone technology for decontamination of Escherichia coli in foods- a review. *Food Control*, 130, 108338. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108338>
- Nunes, V. M., Moosavi, M., Khaneghah, A. M. ve Oliveira, C. A. (2021). Innovative modifications in food processing to reduce the levels of mycotoxins. *Current Opinion in Food Science*, 38, 155-161.
- Obadi, M., Zhu, K. X., Peng, W., Ammar, A. F. ve Zhou, H. M. (2016). Effect of ozone gas processing on physical and chemical properties of wheat proteins. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 15(10), 2147. <https://doi.org/10.4314/tjpr.v15i10.13>
- Obadi, M., Zhu, K., Peng, W., Sulieman, A. A., Mahdi, A. A., Mohammed, K. ve Zhou, H. (2018). Shelf life characteristics of bread produced from ozonated wheat flour. *Journal of Texture Studies*, 49(5), 492-502. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12309>
- Ojogbo, E., Ogunsona, E. O. ve Mekonnen, T. H. (2020). Chemical and physical modifications of starch for renewable polymeric materials. *Materials Today Sustainability*, 7-8, 100028. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100028>
- Okur, Y. (2017). *Ekmeklik Buğday Kalitesini Değerlendirmede Kullanılan Kimyasal ve Fiziksel Özelliklerin İncelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Ankara: Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ooms, N. ve Delcour, J. A. (2019). How to impact gluten protein network formation during wheat flour dough making. *Current Opinion in Food Science*, 25, 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.04.001>
- Ortolan, F. ve Steel, C. J. (2017). Protein characteristics that affect the quality of vital wheat gluten to be used in baking: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(3), 369-381. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12259>
- Özaslan, Z. T. ve İbanoğlu, Ş. (2022). Ozonation of corn starch in the presence of guar gum: Rheological, thermal and antioxidant properties. *Food Hydrocolloids*, 124, 107299. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107299>
- Özerdem, G. (2018). *Ekmeklik Unlara Prejelatinize Buğday Unu İlavesinin Hamur ve Ekmek Kalitesi Üzerine Etkisinin İncelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Mersin: Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Pandiselvam, R., Singh, A., Agriopoulou, S., Sachadyn-Król, M., Aslam, R., Gonçalves Lima, C. M., Khanashyam, A. C., Kothakota, A., Atakan, O., Kumar, M., Mathanghi, S. K. ve Mousavi Khaneghah, A. (2022). A comprehensive review of impacts of ozone treatment on textural properties in different food products. *Trends in Food Science & Technology*, 127, 74-86. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.06.008>
- Parenti, O., Guerrini, L., Mompin, S. B., Toldrà, M. ve Zanoni, B. (2021). The determination of bread dough readiness during kneading of wheat flour: A review of the available methods. *Journal of Food Engineering*, 309, 110692. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110692>
- Pekmez, H. (2012). Structure, physico-chemical and microbiological properties of ozone-oxidized wheat, corn, potato and rice starches. *Journal of Food Science and Engineering* 2(4), 196-205. <https://doi.org/10.17265/2159-5828/2012.04.002>
- Piechowiak, T., Józefczyk, R. ve Balawejder, M. (2018). Impact of ozonation process of wheat flour on the activity of selected enzymes. *Journal of Cereal Science*, 84, 30-37. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.09.010>

- Qasim, M., Rafique, M. S. ve Naz, R. (2022). Water purification by ozone generator employing non-thermal plasma. *Materials Chemistry and Physics*, 291, 126442. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126442>
- Raghunathan, R., Pandiselvam, R., Kothakota, A. ve Khaneghah, A. M. (2021). The application of emerging non-thermal technologies for the modification of cereal starches. *LWT*, 138, 110795.
- Sakin, M. A., Akbalık, Ş. ve Dirik, K. Ö. (2022). Çorum-İskilip şartlarında bazı ekmeklik buğday (*Triticum aestivum* L.) çeşitlerinin bazı verim ve kalite özelliklerinin belirlenmesi. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 11(2), 83-97.
- Sandhu, H. P. S., Manthey, F. A. ve Simsek, S. (2012). Ozone gas affects physical and chemical properties of wheat (*Triticum aestivum* L.) starch. *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 1261-1268. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.09.003>
- Sandhu, H. P. S., Manthey, F. A., Simsek, S. ve Ohm, J.-B. (2011). Comparison between potassium bromate and ozone as flour oxidants in breadmaking. *Cereal Chemistry Journal*, 88(1), 103-108. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-06-10-0085>
- Sardoğan, M. (2016). *Badem İç Kabuğunun Unlu Mamullerde Değerlendirilme İmkânları*, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sarooei, S. J., Abbasi, A., Shaghaghian, S. ve Berizi, E. (2019). Effect of ozone as a disinfectant on microbial load and chemical quality of raw wheat germ. *Ozone: Science & Engineering*, 41(6), 562-570. <https://doi.org/10.1080/01919512.2019.1642181>
- Savaş, E., Tavşanlı, H. ve Gökgozoğlu, İ. (2014). Gıda endüstrisinde ozon uygulamaları. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 2(3), 122. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v2i3.122-127.93>
- Savi, G. D., Piacentini, K. C., Bittencourt, K. O. ve Scussel, V. M. (2014). Ozone treatment efficiency on *Fusarium graminearum* and deoxynivalenol degradation and its effects on whole wheat grains (*Triticum aestivum* L.) quality and germination. *Journal of Stored Products Research*, 59, 245-253. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2014.03.008>
- Semiz, M. (2021). *Eskişehir Koşullarında Bazı Ekmeklik Buğday (*Triticum aestivum* L.) Çeşitlerinin Verim ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Eskişehir: Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sirohi, R., Tarafdar, A., Gaur, V. K., Singh, S., Sindhu, R., Rajasekharan, R. ve Pandey, A. (2021). Technologies for disinfection of food grains: Advances and way forward. *Food Research International*, 145, 110396.
- Sivam, A. S., Sun-Waterhouse, D., Waterhouse, G. I. N., Quek, S. ve Perera, C. O. (2011). Physicochemical properties of bread dough and finished bread with added pectin fiber and phenolic antioxidants. *Journal of Food Science*, 76(3). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02086.x>
- Sivaranjani, S., Prasath, V. A., Pandiselvam, R., Kothakota, A. ve Mousavi Khaneghah, A. (2021). Recent advances in applications of ozone in the cereal industry. *LWT*, 146, 111412. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111412>
- Subroto, E., Sitha, N., Filianty, F., Indiarito, R. ve Sukri, N. (2022). Freeze moisture treatment and ozonation of adlay starch (*coix lacryma-jobi*): Effect on functional, pasting, and physicochemical properties. *Polymers*, 14(18), 1-13.
- Suman, M. (2021). Last decade studies on mycotoxins' fate during food processing: An overview. *Current Opinion in Food Science*, 41, 70-80. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.02.015>
- Sun, X., Wu, S., Koksel, F., Xie, M. ve Fang, Y. (2023). Effects of ingredient and processing conditions on the rheological properties of whole wheat flour dough during breadmaking—A review. *Food Hydrocolloids*, 135, 108123. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108123>

- Sünter, K. M. (2003). *Buğdayın Farklı Sıcaklık ve Sürelerde Tavlanması Unun Bazı Özellikleri Üzerine Etkisi*, (Doktora Tezi), İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Şahin, N. (2012). *Ekmeklik Buğdayda Yaprak Gübresi Uygulamalarının Verim ve Kalite Üzerine Etkisi*, (Yüksek Lisans Tezi), Tekirdağ: Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Tarım ve Orman Bakanlığı (2023). Türk Gıda Kodeksi Bulaşanlar Tebliği. *T.C. Resmî Gazete*, Tarih: 05.11.2023, Sayı: 32360. Erişim tarihi: 15 Ocak 2024. <https://www.resmigazete.gov.tr>
- Tenikecier, N. S. ve Öner, N. (2018). Yaprak gübrelemesinin ekmeklik buğdayda verim ve kaliteye etkisi. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 15(3), 87-95.
- Tiwari, B. K., Brennan, C. S., Curran, T., Gallagher, E., Cullen, P. J. ve O' Donnell, C. P. (2010). Application of ozone in grain processing. *Journal of Cereal Science*, 51(3), 248-255. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.01.007>
- Toprak, Ş. (2021). Ozone generator and ozone generation. *Journal of Amasya University the Institute of Sciences and Technology*, 2(2), 16-25. <https://doi.org/10.54559/jauist.981674>
- Trombete, F., Minguita, A., Porto, Y., Freitas-Silva, O., Freitas-Sá, D., Freitas, S., Carvalho, C., Saldanha, T. ve Fraga, M. (2016). Chemical, technological, and sensory properties of wheat grains (*Triticum aestivum* L) as affected by gaseous ozonation. *International Journal of Food Properties*, 19(12), 2739-2749.
- TÜİK (2023). Bitkisel Üretim 1. Tahmini. Erişim tarihi: 15 Ocak 2024. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bitkisel-Uretim-1.Tahmini-2023-49534>
- Türk, S. (2013). *Göller Bölgesinde Bulunan Un Fabrikaları Tarafından Kullanılan Yerel ve İthal Ekmeklik Buğdayların Fiziksel, Kimyasal ve Teknolojik Özellikleri ile Ekmek Kalitelerinin Belirlenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Türkoğlu, M. T. (2022). *Buğday Ununa Çerezlik Kabak (Cucurbita pepo L.) Unu İlavesinin Hamurun ve Ekmeğin Teknolojik Özellikleri Üzerine Etkisi*, (Yüksek Lisans Tezi), Nevşehir: Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Türksoy, S. (2011). *Meyve ve Sebze Lif Konsantreleri İlavesinin Hamurun Reolojik Özellikleri ve Bisküvi Kalitesine Etkileri*, (Doktora Tezi), Ankara: Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Upadhyay, R., Ghosal, D. ve Mehra, A. (2012). Characterization of bread dough: Rheological properties and microstructure. *Journal of Food Engineering*, 109(1), 104-113. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.09.028>
- VICAM (2008). *Instruction Manual: AflaTest and FumoniTest*. Watertown, MA: VICAM.
- Violleau, F., Pernot, A. G. ve Surel, O. (2012). Effect of Oxygreen® wheat ozonation process on bread dough quality and protein solubility. *Journal of Cereal Science*, 55(3), 392-396. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.01.014>
- Wang, C. C., Yang, Z., Xing, J. J., Guo, X. N. ve Zhu, K. X. (2021). Effects of insoluble dietary fiber and ferulic acid on the rheological properties of dough. *Food Hydrocolloids*, 121, 107008. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107008>
- Wang, L., Luo, Y., Luo, X., Wang, R., Li, Y., Li, Y., Shao, H. ve Chen, Z. (2016). Effect of deoxynivalenol detoxification by ozone treatment in wheat grains. *Food Control*, 66, 137-144. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.01.038>
- Wang, P., Jin, Z. ve Xu, X. (2015). Physicochemical alterations of wheat gluten proteins upon dough formation and frozen storage – A review from gluten, glutenin and gliadin perspectives. *Trends in Food Science & Technology*, 46(2), 189-198. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.10.005>
- Yıldız, P. O. ve Yangılar, F. (2014). Ozon ve gıda endüstrisinde kullanım alanları. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 94-101.

Yılmaz, Ö. M. (2011). *Türkiye’de Yetiştirilen Başlıca Buğday Çeşitlerinin Antioksidan Aktivitelerinin ve Fenolik Asit Dağılımlarının Belirlenmesi ve Ekmeğin Nar Kabuğu Ekstraktı ile Zenginleştirilmesi*, (Doktora Tezi), Ankara: Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yiğit, A. (2019). *Farklı Ekolojik Koşulların Buğday Genotiplerinde Verim, Ekmeklik Buğday Kalitesi ve Antioksidan Özellikleri Üzerine Etkilerinin Belirlenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Aydın: Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yorulmaz, Ö. (2023). *Muğla Dalaman Koşullarında Farklı Ekmeklik Buğday (Triticum aestivum L.) Çeşitlerinin Verim ve Bazı Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Aydın: Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yu, L., Nanguet, A. L., ve Beta, T. (2013). Comparison of antioxidant properties of refined and whole wheat flour and bread. *Antioxidants*, 2(4), 370-383. <https://doi.org/10.3390/antiox2040370>

Yu, Y., Gong, W., Liu, H., Chen, Y., An, X., Zhang, H., Liang, Y. ve Wang, J. (2024). Insights into the enhancement mechanism of rheological properties of dough induced by wheat flour maturation: The view from gluten proteins aggregation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 282, 136942. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136942>

Zhang, W., Li, L., Shu, Z., Wang, P., Zeng, X., Shen, W., Ding, W. ve Shi, Y.-C. (2021). Properties of flour from pearled wheat kernels as affected by ozone treatment. *Food Chemistry*, 341, 128203. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128203>

Zhang, W., Wang, H., Li, L., Zeng, X., Shu, Z. ve Wang, P. (2022). Effect of ozone treatment intensity on pasting property, protein composition, and steamed bread quality of ozone-treated wheat flour. *Journal of Food Quality*, 2022(1), 1-7. <https://doi.org/10.1155/2022/1584656>

Zhao, C., Luo, Z., Li, M., Gao, J., Liang, Z., Sun, S. ve Yang, D. (2020). Wheat protein disulfide isomerase improves bread properties via different mechanisms. *Food Chemistry*, 315, 126242.

Zhu, F. (2018). Effect of ozone treatment on the quality of grain products. *Food Chemistry*, 264, 358-366. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.047>

Zhu, L., Ma, Q., Chen, J. ve Zhao, G. (2022). Current progress on innovative pest detection techniques for stored cereal grains and thereof powders. *Food Chemistry*, 396, 133706.

