



## OZON UYGULAMASININ TAHIL VE ÜRÜNLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Çağla Kayışoğlu<sup>1\*</sup> Seçil Türksoy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hitit Üniversitesi, Bilimsel Teknik Uygulama ve Araştırma Merkezi, Gıda Mühendisliği, Çorum, Türkiye

<sup>2</sup>Hitit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği, Çorum, Türkiye

Geliş/Received 22.11.2022; / Kabul/Accepted: 10.02.2023 / Online baskı: Published online 23.02.2023

Kayışoğlu, Ç., Türksoy, S. (2023). Ozon uygulamasının tahıl ve ürünleri üzerindeki etkileri. GIDA (2023) 48 (2) 285-304 doi: 10.15237/ gida.GD22117

Kayışoğlu, Ç., Türksoy, S. (2023). The effect of ozone treatment on cereals and products. GIDA (2023) 48 (2) 285-304 doi: 10.15237/ gida.GD22117

### ÖZ

Ozon (O<sub>3</sub>), kimyasal ve mikrobiyal detoksifikasyon amacıyla gıda endüstrisinin farklı alanlarında (taze meyve ve sebzeler, süt ürünleri, meyve suyu işleme endüstrisi, tahıl ve tahıl ürünleri endüstrisi, suların sterilizasyonu ve ambalajlama teknolojisi) yaygın olarak kullanılan ve genellikle güvenli olarak kabul edilen (GRAS) kuvvetli bir oksidan bileşik olup yeşil teknoloji potansiyeline sahiptir. Ozon uygulaması ile gıdaların mikrobiyolojik kalitesi iyileştirilerek raf ömrü uzamakta, ayrıca gıdalardaki mikotoksinler etkili bir şekilde azaltılmakta veya tamamıyla elemine edilebilmektedir. Ayrıca uygulama parametrelerine bağlı olarak tahılın önemli makro ve mikro bileşenlerinden protein, nişasta, renk, mineral madde, biyoaktif bileşenler, yağ, asitlik ve çimlenme kabiliyeti üzerinde olumlu/olumsuz birtakım değişikliklere neden olmakta ve son ürün özelliklerini etkilemektedir. Bu derleme çalışmasının amacı ozonun uygulama parametrelerine bağlı olarak tahılda meydana getirdiği fiziksel, kimyasal, fizikokimyasal ve tekstürel özelliklerindeki değişikliklerin bazı literatür verileri ile açıklanmasıdır.

**Anahtar kelimeler:** Tahıllar, ozon, mikotoksin, nişasta, protein

## THE EFFECT OF OZONE TREATMENT ON CEREALS AND PRODUCTS

### ABSTRACT

Ozone (O<sub>3</sub>) is widely used and generally accepted as safe (GRAS) for chemical and microbial detoxification in different areas of the food industry (fresh fruits and vegetables, dairy products, juice processing industry, grain and cereal products industry, sterilization of water and packaging technology). It is also termed green technology. By ozone application, the microbiological quality of the food is improved, the shelf life is extended, mycotoxins in the food can also be effectively reduced or completely eliminated. Depending on the application parameters, it causes some changes on protein, starch, color, mineral substance, bioactive components, oil, acidity and germination ability, and affects the final product properties. The purpose of this review study is to explain the changes in the physical, chemical, physico-chemical and textural properties of the cereals depending on the application parameters of ozone with some literature data.

**Keywords:** Cereals, ozone, mycotoxin, starch, protein

\* Yazışmalarda sorumlu yazar/Corresponding author:

✉ caglakayisoglu@hitit.edu.tr

☎: (+90) 364 219 2886

☎: (+90) 364 219 2855

Çağla Kayışoğlu; ORCID no: 0000-0002-5235-7963

Seçil Türksoy; ORCID no: 0000-0001-5763-2744

## GİRİŞ

Ozon, Yunanca “ozein” sözcüğünden türetilmiş olup “koklamak” anlamına gelmektedir. Dünyayı çevreleyen atmosferdeki en önemli gazlardan biri olan ozon, biyolojik dengenin ve sürekliliğın sağlanmasında önemli rol oynamaktadır. Ozon gaz haldeyken mavi, sıvı haldeyken opak mavimsiyah renge sahiptir. Kaynama noktası  $-111.97\pm 0.3$  °C ve erime noktası  $-192.57\pm 0.4$  °C'dir. Literatürde ozon, suda kısmen çözünen ve keskin kokuya sahip tek doğal dezenfektan olarak adlandırılmaktadır (Botondi vd., 2021; Hatice Çatal ve Şenol İbanoğlu, 2012; Kaur vd., 2022; Muştı, 2020; Nada vd., 2022; Rangel vd., 2021; Sciorsci vd., 2020; Ünal ve Sel, 2019; F. Zhu, 2018).

Ozon 1840 yılında Christian Fredrick Schönbein tarafından keşfedilmiş olup ilk olarak 1903-1906 yılları arasında bitkiler için su arıtımında, 1940 yılında ise içme suyunun arıtılmasında kullanılmıştır. Avrupa'da gıdaların dezenfeksiyonunda ve işlenmesinde ozon kullanımı uzun senelere dayanmakta olup 1997 yılında Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi (FDA; Food and Drug Administration) tarafından *güvenli gıda* (GRAS; Generally Recognised As Safe) olarak kabul edilmiş, 2001 yılında ise kullanımına yasal olarak izin verilmiştir. Güçlü bir oksidan olan ozon diğer oksidasyon sistemleriyle karşılaştırıldığında maliyeti yüksek bir sistemdir (Yıldız ve Yangınlar, 2014). Gıda endüstrisinin farklı alanlarında (meyve ve sebze endüstrisi, kırmızı, beyaz et ve balık endüstrisi, tahıl ve tahıl ürünleri endüstrisi, süt ve süt ürünleri, suların sterilizasyonu ve ambalajlama teknolojisi) mikrobiyel yükün azaltılması, mikotoksinlerin dekontaminasyonu ve güvenli ambalajlama amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Bai ve Zhou, 2021; Botondi vd., 2021; Epelle vd., 2022; Kaur vd., 2022; Mayookha vd., 2023; Nickhil vd., 2021; Niveditha vd., 2021; Phan vd., 2022; Qian vd., 2022; Savi vd., 2020; Sivaranjani vd., 2021; Suman, 2021; Tabla ve Roa, 2022; Violleau vd., 2012; Zhang vd., 2022).

Bu derleme çalışması kapsamında, tarladan ürüne tahılların işlenmesi sürecinde farklı aşamalarda ozon uygulamasının hammadde ve son ürünün

kimyasal bileşimi, öğütme özellikleri ve son ürün kalitesi üzerine etkileri hakkında güncel bilimsel veriler derlenmeye çalışılmıştır.

## OZON UYGULAMASININ TANENİN ÖĞÜTME ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Öğütme öncesinde buğday tanelerine yapılan ozon uygulanmasının kırma ve redüksiyon valslerinde gerekli olan enerji miktarını azalttığı ifade edilmektedir. Öğütme öncesi ozon uygulamasının kaba kepek ve zedelenmiş nişasta miktarını azaltırken, ince kepek ve çözünmez özellikteki glutenin polimer protein miktarlarını arttırdığı da belirtilmektedir (Desvignes vd., 2008; Zhu, 2018). Desvignes (2008), yapmış oldukları çalışmada buğdayın tane sertliğine bağlı kalmaksızın, ozon uygulamasının kırma valslerindeki enerjiyi %10-20 oranında azalttığı bildirilmiştir. Ozonlama işleminin unun ekstraksiyon verimi (kepek-endosperm ayrışma oranı) üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada ozonlama (10-60 mg/L, 2-5 saat) ile ekstraksiyon oranının değişmediği tespit edilmiştir (Trombete vd., 2016; Vanier vd., 2017). Farklı tahıl tanelerine (buğday ve mısır) ozon uygulamasının (50 mg/kg, 30 gün) öğütme performansı üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada tahıl ve unun kül, protein ve un veriminde önemli değişiklikler olmadığı dolayısıyla öğütme performansı üzerinde ozon uygulamasının (50 mg/kg) etkili olmadığı bildirilmiştir. (Mendez, 2003).

## OZON UYGULAMASININ MİKROBİYOLOJİK KALİTE İLE UN BİLEŞENLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

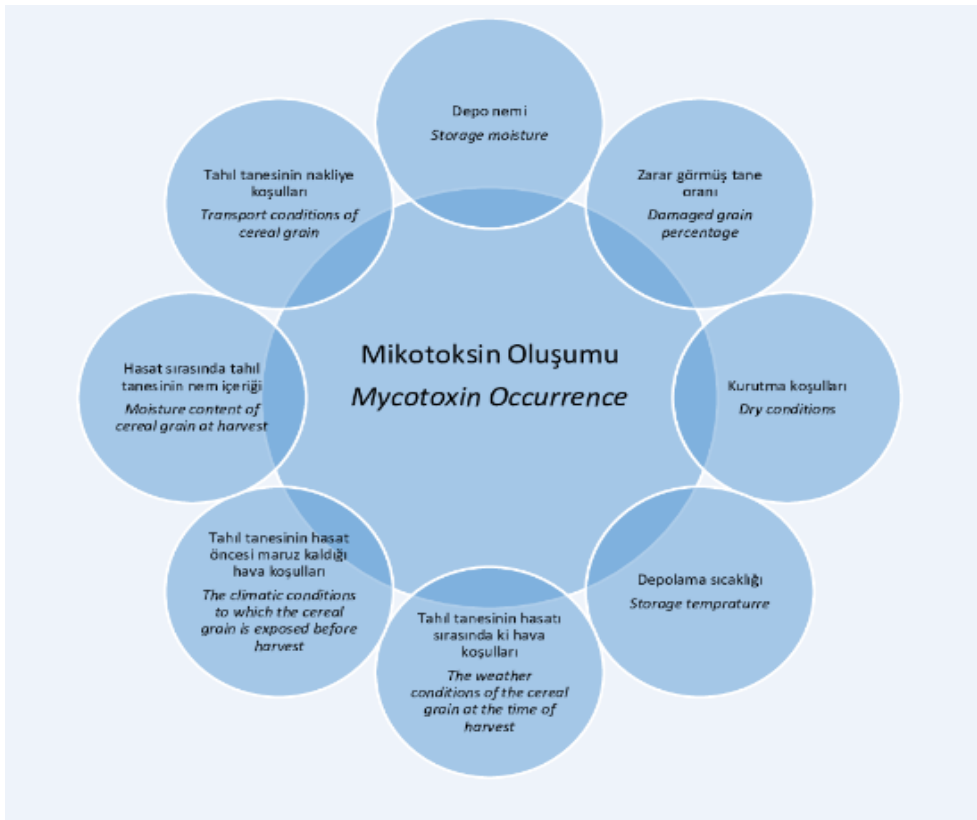
### Mikotoksinler ve Patojenler Üzerine Etkisi

“Güvenli gıda” kavramının önem kazanması ve bu konuda tüketicilerin bilinçlenmesi ile kimyasal koruyucu içermeyen veya az işlem görmüş doğal ve güvenilir gıdaya olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Bu durum gıda endüstrisinde kimyasal ajanlara karşı yenilikçi teknolojilere yönelimi de beraberinde getirmiştir. Gıda endüstrisinde özellikle mikrobiyal güvenliği sağlamak için yaygın olarak kullanılan klorinin, izin verilen konsantrasyonlarda sınırlı seviyede etki mekanizmasına sahip olması, gıdaya uygulandığında insan sağlığı için zararlı maddelere

(trihalometanlar) dönüşmesi ve gıdada kalıntı bırakması gibi gıda güvenliği açısından birtakım dezavantajları bulunmaktadır. Bu endişe çevre dostu ve gıda prosesine uygun, insan sağlığı açısından kalıntı bırakmayan, oksitleme gücü klorinden çok daha fazla (1.5 kat) ve mikroorganizmalar üzerinde geniş etki mekanizmasına sahip olan ozon uygulamasının ilgiyi artırmıştır (Afsah-Hejri vd., 2020; Chhem-

Kieth vd., 2022; Elgün ve Bilgiçli, 2019; Qasim vd., 2022; Sivaranjani vd., 2021).

Tahıllar hasat öncesi ve sonrası uygun olmayan koşullar altında (Şekil 1) kontamine olabilmekte, özellikle uygun olmayan sıcaklık, nem vb depolama koşullarında depo zararlısı ve böcek gelişimi ile küf gelişimine bağlı mikotoksin oluşumu gözlenebilmektedir (Hamad vd., 2023; Ingegno ve Tavella, 2022; Mir vd., 2021).



Şekil 1: Tahıl tanesinin tedarik zincirinde mikotoksin oluşumunu etkileyen faktörler (Mir vd., 2021)

Figure 1: Factors affecting mycotoxin formation in the cereal grain supply chain (Mir et al., 2021)

Ozon uygulamasının depolanmış tahıl böcekleri (*Tribolium castaneum*, *Rhizopertha dominica*, *Oryzaephilus surinamensis*, *Sitophilus oryzae* ve *Ephestia elutella*) ile bakteriler (*Bacillus*, *Koliform*, *Micrococcus*, *Flavobacterium*, *Alcaligenes* ve *Serratia*) ve çeşitli küfler (*Aspergillus*, *Penicillium* ve *Fusarium*) üzerine inhibe edici etkisi bulunmaktadır (Afsah-Hejri vd., 2020; Chakka vd., 2021; Lillo vd., 2022; Mir vd., 2021, 2022; Nickhil vd., 2021; Sivaranjani vd., 2021; Suman, 2021). Mikroorganizmalar üzerindeki bu inhibe edici etkisi hücre

membranındaki lipoprotein ve glikoprotein yapısında yer alan C=C çift bağlarının oksitlemesi 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 tahıl tanesinde *Aspergillus*, *Penicillium* ve *Fusarium* küflerinin ikincil metabolit ürünleri olan Aflatoksin B<sub>1</sub> (AFB<sub>1</sub>), Aflatoksin B<sub>2</sub> (AFB<sub>2</sub>), Aflatoksin G<sub>1</sub> (AFG<sub>1</sub>), Aflatoksin G<sub>2</sub> (AFG<sub>2</sub>), Oksatoksin A, Zearalenon (ZON),

Nivalenol (NIV) ve Deoksinivalenol (DON) mikotoksinlerinin inaktivasyonu için gerekli ozon uygulamasında oksidasyonun etkisi konstrasyon,

süre ve mikotoksin türüne göre değişiklik göstermektedir (Çizelge 1).

Çizelge 1: Ozon uygulamasının tahılların mikotoksin detoksifikasyonu üzerine etkisi (Mir vd., 2022; Sivaranjani vd., 2021)

Table 1: Effect of ozone application on mycotoxin detoxification of grains (Mir et al., 2022; Sivaranjani et al., 2021)

Mikotoksin türü <i>Mycotoxin type</i>	Ozon uygulama <i>Ozone application</i>	Tahıl <i>Cereals</i>	Mikotoksinlerin azalma oranı (%) <i>Reduction percentage of mycotoxin (%)</i>
Deoksinivalenol	Ozon gazı konsantrasyonu 60 mg/L, maruz kalma süresi 300 dakika <i>Ozone gas concentration 60 mg/L, exposure time 300 minutes</i>	Buğday <i>Wheat</i>	64.3
AFB <sub>1</sub>	Ozon gazı konsantrasyonu 60 µmol/mol, maruz kalma süresi 180 dakika <i>Ozone gas concentration 60 µmole/mole, exposure time 180 minutes</i>	Buğday <i>Wheat</i>	94.6
AFB <sub>2</sub>	Ozon gazı konsantrasyonu 60 µmol/mol, maruz kalma süresi 180 dakika <i>Ozone gas concentration 60 µmole/mole, exposure time 180 minutes</i>	Buğday <i>Wheat</i>	84.5
AFG <sub>1</sub>	Ozon gazı konsantrasyonu 60 µmol/mol, maruz kalma süresi 180 dakika <i>Ozone gas concentration 60 µmole/mole, exposure time 180 minutes</i>	Buğday <i>Wheat</i>	80
AFG <sub>2</sub>	Ozon gazı konsantrasyonu 60 µmol/mol, maruz kalma süresi 180 dakika <i>Ozone gas concentration 60 µmole/mole, exposure time 180 minutes</i>	Buğday <i>Wheat</i>	81
Deoksinivalenol	Ozon gazı konsantrasyonu 60 µmole/mole, maruz kalma süresi 120 dakika <i>Ozone gas concentration 60 µmole/mole, exposure time 120 minutes</i>	Buğday <i>Wheat</i>	100
Fusarium	Ozon gazı konsantrasyonu 11 ve 26 mg/g, maruz kalma süresi 15 dakika <i>Ozone gas concentration 11 and 26 mg/g, exposure time 15 minutes</i>	Arpa <i>Barley</i>	36
AFB <sub>1</sub>	Ozon gazı konsantrasyonu 40-90/L, maruz kalma süresi 5-40 dakika <i>Ozone gas concentration 40-90/L, exposure time 5-40 minutes</i>	Mısır <i>Corn</i>	88
AFB <sub>1</sub>	Ozon gazı konsantrasyonu 20-40/L, maruz kalma süresi 5-40 dakika <i>Ozone gas concentration 20-40/L, exposure time 5-40 minutes</i>	Buğday <i>Wheat</i>	97

Tahıl tanesinde oluşan mikotoksinlerin, tanede hem nicelik açısından hem de kalite (çimlenme kabiliyetinin azalması, serbest yağ asidi artışı, nişastanın modifikasyonu, proteinlerin denatüre olması gibi) açısından ortalama %25-30 arasında değer kaybına neden olduğu, ayrıca insan sağlığı açısından kanserojen, teratojenik ve immünosupresif problemleri de beraberinde getirdiği bildirilmiştir (Arda vd., 2021; da Luz vd., 2022; Hashemi Moosavi vd., 2021; Nada vd., 2022; Sirohi vd., 2021; Ünüsan, 2019). Kumar vd., (2022) farklı tahıl çeşitlerinde (pirinç, buğday ve mısır) bu kaybın en fazla buğdayda en az mısırdada olduğunu, Zhu vd., (2022) ise yine aynı tahıl çeşitleri için bu kaybın en fazla pirinç en az buğdayda olduğunu ve bu kayıpların %55'inin depolama sırasında meydana geldiğini bildirmişlerdir.

Dolayısı ile hasattan sonra uzun süre depolanan tahıl tanelerinin (buğday, pirinç, mısır, arpa, çavdar, yulaf, darı ve sorgum) depolama koşullarına (sıcaklık ve bağıl nem) bağlı olarak depolama süresi boyunca nicelik ve nitelik bakımından değer kaybına uğramaması için depolama süre, sıcaklık ve bağıl nemine ek olarak düzenli aralıklarda fumigasyon işlemine tabi tutulması gerekmektedir (Gavahian vd., 2021). Fumigasyon işlemi için kullanılan pestisitler genellikle alüminyum fosfit, metil bromür ve fosfin içermektedir. Ancak kullanılan bu kimyasal ajanların hem çevre hem de insan sağlığı için birtakım problemlere yol açtığı ve bu problemlerin küresel hale geldiği bilinmektedir (Sirohi vd., 2021). Bilimsel çalışmalar bu zararı indirgemek için termal olmayan çevre dostu güçlü bir oksidan olan ozon teknolojisinin kimyasal fumigantlara alternatif bir çözüm olduğunu belirtmektedir (Gavahian vd., 2021; Hashemi Moosavi vd., 2021; Nickhil vd., 2021; Sirohi vd., 2021).

Ozon oksidasyonunun tahıl ve ürünlerinin toplam mikroorganizma sayısı ve mikotoksin oranı üzerine etkisi birçok faktöre (mikroorganizmanın türüne, uygulanan tahılın nem içeriğine, ozonun konsantrasyonuna, uygulanma süresine ve sıcaklık) bağlı olarak değişmektedir (Hu vd., 2020). Ozon uygulama süresinin toplam

mikroorganizma sayısı üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada buğday ununa farklı sürelerde (5, 10, 15, 20, 30 dakika) ozon gazı uygulaması ile oksidasyon süresinin artmasına karşı toplam mikroorganizma sayısında önem düzeyinde azalma olmadığı, bunun ise tanedeki nişasta ve proteinin ozon oksidasyonuna karşı sterilizasyon etkisini azaltmasından kaynaklandığı bildirilmiştir (Li vd., 2013). Çalışmada ayrıca ozonlanıp (15 dakika) depolanmış (4 gün) buğday tanesinin toplam mikroorganizma içeriğinde %18 oranda bir azalma olduğu tespit edilmiştir (Li vd., 2013). Çatal ve İbanoglu (2012) ise uygulanan nişasta çeşidine bağlı kalmaksızın (patates, buğday, mısır ve pirinç nişastası) toplam bakteri sayısının, ozonlama işlemiyle (60 g/h, 1 saat) pH değerinin azalmasına paralel olarak tüm nişasta tiplerinde önem düzeyinde azaldığını (buğday nişastası için %40, mısır nişastası için %44, patates nişastası için %60 ve pirinç nişastası için %56 oranında) belirlemişlerdir. Ozon oksidasyonunun etkinliğinin uygulama süresine bağlı olarak değiştiği çalışmada farklı sürelerde (20 ve 60 dakika) ozon uygulaması ile Zearelenon (ZEN) miktarında sırasıyla %60.2 ve %62.3 oranında azalma olduğu saptanmıştır (Pandiselvam vd., 2022).

Uygulama yapılacak olan tahıl tanesinin nem miktarı ozon oksidasyonu için önem arz eden parametrelerden bir diğeri olup tanedeki nem miktarının artışı ile reaktif iyon oluşumunun fazlaşması oksidasyonun etkisini arttırmaktadır. Sivaranjani vd. (2021) yapmış olduğu çalışmada iki farklı nem içeriğine (%12.4 ve %14.2) sahip pirincin *Rhizopertha Dominica* mortalitesi için gerekli olan sürenin, nemli tahıl tanesinde ozonun difüzyonunun daha yavaş olmasından dolayı daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Başka bir çalışmada ise ozon oksidasyonu sonucunda (90 mg/L ozon, 40 dakika) farklı nem içeriğine (%20.37 ve %13.47) sahip mısırdada AFB<sub>1</sub> oranındaki azalmanın nem içeriği düşük olan örnekte daha fazla (%88.1) olduğu bildirilmiştir (Guo vd., 2021). Dolayısıyla ozon oksidasyonunun nem ve tahıl çeşidine bağlı olarak da değişiklik gösterdiği ve uygulanan yöntemin standardize edilmesi gerektiği çalışmalarda çıkarılabilecek bulgular arasındadır.

Dekontamine edilecek olan mikotoksin türü de ozon uygulamasının etkinliği için önem taşımaktadır. Örneğin, yapılarında çift bağ içermeyen AFB<sub>2</sub> ve AFG<sub>2</sub> mikotoksinleri daha reaktif olup, ozon oksidasyonuna karşı daha dirençlidirler (Sivaranjani vd., 2021). Yapılan bir çalışmada buğday tanesine 180 dk süre ile 60 µmol/mol konsantrasyonda ozon uygulamasının AFB<sub>1</sub> ve AFB<sub>2</sub> miktarlarını %94.6 ve % 84.5 oranlarında azalttığı, bu değerlerin AFG<sub>1</sub> ve AFG<sub>2</sub> için sırasıyla %80 ve %81 olarak bulunduğu rapor edilmiştir (Çizelge 1).

### Un Bileşenleri Üzerine Etkisi

#### *Nişasta*

Tahılların temel bileşeni olan nişasta son ürün özelliklerinin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir (Raghunathan vd., 2021; Zhu, 2018). Endüstriyel alanda oldukça geniş kullanım alanına (gıda, kâğıt, kozmetik, ilaç ve tekstil) sahip olan nişastanın doğrudan kullanımını sınırlandıran birtakım faktörler (yüksek termal kararlılık, yüksek retrogradasyon vb.) bulunmaktadır (Castanha vd., 2020; Maniglia vd., 2021; Ojogbo vd., 2020; Özaslan ve İbanoğlu, 2022; Pandiselvam vd., 2022). Bu nedenle doğal nişasta fiziksel, kimyasal veya enzimatik yollarla birtakım modifikasyonlara tabi tutulmaktadır (Hu vd., 2022; Lima vd., 2021; Raghunathan vd., 2021). Nişastanın modifikasyonunda genellikle sodyum hipoklorit, amonyum persülfat ve hidrojen peroksit kullanılmakta olup kullanılan bu kimyasal ajanlar gıda üzerinde birtakım kalıntılar bırakarak hem gıda güvenliğinde problemlere yol açmakta hem de atık işlemede verimsizliğe neden olmaktadır (Raghunathan vd., 2021). Ozon uygulaması düşük saflaştırma maliyeti gerektirmesi, atık su oluşturmaması, oda sıcaklığında dahil uygulanabilmesi, gıdaya uygulandığında kalıntı bırakmaması gibi avantajlarından ötürü nişastanın modifikasyonunda kimyasal oksidanlara karşı tercih edilmesi gereken “çevre dostu” bir yöntemdir (Hu vd., 2022; Maniglia vd., 2021; Zhang vd., 2022).

Teknolojik olarak ozon ile oksidasyon, nişastaya yüksek konsantrasyonlarda dahi düşük viskozite değeri, yüksek stabilite, şişme gücü kabiliyeti, iyi film oluşturma, retrogradasyon eğiliminde azalma

ve yapışkanlık gibi özellikler kazandırabilmektedir. Oksitlenmiş nişasta gıda endüstrisinde stabilizatör, emülgatör, yağ ikame edici olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir (Chan vd., 2011; Çatal ve İbanoğlu, 2014; Devu vd., 2022; Lima vd., 2021; Sandhu vd., 2012). Nişastanın oksidasyonunda iki önemli reaksiyon rol oynamaktadır. Bunlardan biri nişasta molekülündeki hidroksil gruplarının (C-2,C-3,C-6'daki –OH) karbonil ve karboksil gruplarına okside olması, bir diğeri ise  $\alpha$ -(1→4) glikozidik bağın parçalaması ile nişastanın amorf ve kristal bölgede depolimerizasyonudur (Ashogbon, 2021; Chan vd., 2011; Çatal ve İbanoğlu, 2014; Hu vd., 2022).

Ozon oksidasyonu ile birlikte tahıl nişastasındaki karboksil grubu sayısının artmasına bağlı olarak pH değerinin düştüğu, şişme gücünün arttığı ve yapıştırma özelliklerinin değiştiği, akış davranış indeksinin değişip Non-newtonyel akış tipi gösterdiği, retrograde olma eğiliminde azalma olduğu literatür verileri ile desteklenmektedir (Çizelge 2) (Chan vd., 2011; Chittrakorn vd., 2014, 2014; Çatal ve İbanoğlu, 2014; Lima vd., 2021; Pandiselvam vd., 2022).

Ozon uygulaması ile nişasta molekülünde meydana gelen değişiklikler oksidasyon süresinin artmasına bağlı olarak matris içindeki amiloz miktarına, amiloz/amilopektin oranına, karbonil ve karboksil gruplarının oksidasyon hızına bağlı olarak nişasta tipleri arasında farklılık göstermektedir (Chan vd., 2011). Yapılan bir araştırmada karbonil içeriği fazla olan tapyoka nişastasının mısır ve sago nişastasına göre ozon oksidasyonundan daha fazla etkilendiği belirlenmiş olup bu bilgiyi destekler niteliktedir (Chan vd., 2011). Nişasta çeşitinin (pirinç, mısır, buğday ve patates) ozon uygulaması (60g/sa, 1 saat) üzerine etkisinin incelediği başka bir çalışmada ise mısır ve patates nişastasının daha büyük morfolojiye sahip olması dolayısıyla ozonun taneye difüzyonunun ve tane içerisindeki penetrasyonunun daha kolay olması, ozon oksidasyonundan en fazla etkilenen nişasta çeşiti konumuna getirmiştir (Çatal ve İbanoğlu, 2012).

Çizelge 2: Ozon uygulamasının nişasta çeşitleri üzerine etkisi (Raghunathan vd., 2021; Sivaranjani vd., 2021)

Table 2: Effect of ozone application on starch varieties (Raghunathan et al., 2021; Sivaranjani et al., 2021)

Nişasta kaynağı <i>Starch source</i>	Ozon akış hızı <i>Ozone flow rate</i>	Ozon uygulama süresi <i>Ozone application time</i>	Ozon oksidasyon sonuçları <i>Ozone oxidation results</i>
Mısır <i>Corn</i>	1L/dk <i>1 L/minute</i>	15 ve 30 dk <i>15 and 30 minute</i>	Jel gücü arttı (%10.7) <i>Gel strength increased (%10.7)</i>
Buğday <i>Wheat</i>	3.3 L/dk <i>3.3 L/minute</i>	0.5, 1, 1.5 ve 2 s <i>0.5, 1, 1.5 ve 2 hour</i>	Düşme sayısı gelişti ve unun beyazlığı arttı. <i>The falling number improved and the whiteness of the flour increased.</i>
Pirinç <i>Rice</i>	0.06 L/dk <i>0.06 L/minute</i>	0.5, 1 ve 2 s <i>0.5, 1 and 2 hour</i>	Yapıştırma viskozitesi arttı. <i>The adhesive viscosity increased.</i>
Buğday <i>Wheat</i>	5 g/s <i>5 g/second</i>	60 dk <i>60 minute</i>	Şişme gücü arttı Tepe ve son viskozite değerleri arttı <i>Inflatable power increased</i> <i>Peak and final viscosity values increased</i>
Mısır <i>Corn</i>	4.2 mg mol/ L <i>4.2 mg mole/ L</i>	60 dk <i>60 minute</i>	Jeletleşme sıcaklığı arttı Jelatinleşme entalpi değeri azaldı Yapıştırma sıcaklığı arttı Tepe ve son viskozite değerleri azaldı <i>Gelatinization temperature increased</i> <i>Gelatinization enthalpy value decreased</i> <i>Bonding temperature increased</i> <i>Peak and final viscosity values decreased</i>
Pirinç <i>Rice</i>	0.06 L/dk <i>0.06 L/minute</i>	2 s <i>2 hour</i>	Tepe ve son viskozite değerleri azaldı Karbonil ve karboksil içeriği arttı <i>Peak and final viscosity values decreased</i> <i>Increases carbonyl and carboxyl content</i>

Nişasta çeşidine bağlı kalmaksızın ozon oksidasyonunun tüm nişasta çeşitlerinde artan kayma gerilimi değerlerinde viskozitede azalmaya neden olduğu (Non-Newtonien, shear thinning) belirtilmiştir. Farklı nişasta tiplerine (mısır ve tapyoka) ozon gazı uygulanmasıyla artan uygulama süresine bağlı olarak amorf bölgede meydana gelen amiloz fraksiyonunun depolimerizasyonuna bağlı olarak shear-thinning akış tipine geçildiği, kıvam katsayısının (K) ve

viskozite değerlerinde artış olduğu literatürde mevcuttur (Chan vd., 2011). Ozon uygulamasının nişastanın viskozite değeri üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada, buğday nişastasına farklı sürelerde ozon uygulamasıyla (15, 30, 60 dk; 0.00042 g ozon/100g su) moleküldeki glikozidik bağların kısmi bölünmesinden dolayı tepe viskozitesi değerinin uygulama süresi arttıkça %98 oranında azaldığı belirtilmiştir. Aynı çalışmada ayrıca granüldeki hidroksil gruplarının yerini

oksidasyonla karboksil gruplarının almasından dolayı retrogradasyon entalpi değerinin % 98 azaldığı (Çatal ve İbanoğlu, 2014). Viskozite değerindeki azalmaya paralel olarak ozon oksidasyon süresinin artmasıyla kıvam katsayısı (K) değerini de %18 oranında azaldığı bildirilmiştir (Çatal ve İbanoğlu, 2014). İlaveten nişastanın ozonlama süresi arttıkça jeletanize olma eğiliminin de %67 oranında arttığı belirlenmiştir. Ozon oksidasyonunun nişastanın viskozite değeri üzerindeki etkisinin incelendiği başka bir çalışmada ise buğday ununa farklı sürelerde uygulanan ozon gazı (0.06 L ozon/dk, 5-25 dk) stabilitesinin bundan olumlu yönde etkilediği bildirilmiştir (Chittrakorn vd., 2014).

Nişasta şişme gücü kabiliyetinin artışının oksidasyonla oluşan hidrofilik karboksil gruplarının (-COOH) amiloz-amilopektinin hidroksil gruplarıyla güçlü bir hidrojen bağı kurmasıyla yapıda daha fazla su tutabilen bir ağın oluşmasından kaynaklanmaktadır (Sandhu vd., 2012). Yapılan bir çalışmada buğday nişastasına ozon uygulamasıyla (2.5 L/dk, 45 ve 30 dk) nişastanın şişme kabiliyetinin %1 oranına arttığı tespit edilmiş olup bu bilgiyi destekler niteliktedir (Sandhu vd., 2012). Nişastanın şişme kapasitesinin belirlendiği başka bir çalışmada ise oksidasyonla şişme kapasitesinde artışın %3 oranında olduğu belirlenmiştir (Hu vd., 2020).

Ozon oksidasyonu ile nişastanın kimyasal yapısında meydana gelen bu modifikasyonlar nişastanın morfolojik görüntüsü üzerinde çok az değişikliğe neden olmaktadır (Lima vd., 2021; Sandhu vd., 2012). Örneğin Lima vd. (2021)'in yaptığı çalışmada manyok nişastasası üzerine ozon oksidasyonunun (45 mg/L ozon) nişastanın morfolojisini ve yüzey özelliklerini değiştirmediğinin gözlemlenmesi bu bilgiyi destekler niteliktedir. Ancak başka bir çalışmada ise tartar karabuğdayına uygulanan ozonlama süresi arttıkça (15 ve 20 dk) nişasta partikül büyüklüğünün azaldığı ve moleküldeki hilum denilen boşlukların büyüdüğu bildirilmiştir (Hu vd., 2022).

Ozon uygulamasının nişasta özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesine yönelik çalışmaların çoğunluğu ekstrakte edilmiş nişasta örnekleri

üzerinde yapılmıştır (Vanier vd., 2017). Öğütme öncesi buğday tanelerine uygulanan ozonlama işleminin nişastanın özellikleri üzerine etkisinin, ekstrakte edilmiş nişasta üzerindeki kıyasla çok daha az olduğu belirtilmektedir. Bu durum, tane içerisindeki nişasta granüllerinin protein ve hücre duvarı materyali ile çevrelenmiş bir matriks içerisinde oksidasyondan korunması şeklinde açıklanmaktadır (Zhu, 2018).

#### *Protein*

Nişasta gibi son ürün kalitesinin belirlenmesinde oldukça belirleyici olan proteinlerin ozon uygulaması ile modifikasyonu, çok çalışılan konular arasında yer almaktadır. Yapılan çalışmalarda; ozon uygulamasının ekstrakte edilemeyen polimerik protein oranında, disülfid bağı sayısında, çapraz bağlanmalarda ve gluten molekül ağırlığında artışa, tiyol grubunda azalmaya ve viskoelastik özelliklerde ise değişime yol açtığı bildirilmektedir (Chittrakorn vd., 2014; Violleau vd., 2012; Zhu, 2018).

Ozon uygulamasının tahıl proteinleri üzerindeki etkileri Çizelge 3' de özetlenmiştir.

Obadi vd., (2018) yapmış oldukları çalışmada optimumdan sapan yüksek ozon uygulama konsantrasyonlarında, protein yapısında meydana gelen makaslanmalar sonucu yapının bozulduğunu bildirmişlerdir. Ozon uygulamasının unun protein içeriği üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Özet olarak, ılıman koşullarda yapılan ozon uygulamasının çapraz bağlanmaları ve interaksiyonları arttırdığı, proteinlerin çözünürlüğünü ise (özellikle glutenin proteini) azalttığı ifade edilmektedir (Zhu, 2018). Diğer yandan, aşırı ozon uygulamasının proteinlerin moleküler yapılarının zayıflamasına neden olduğu, bu durumun ise hamur reolojisinde ve son ürün özelliklerinde önemli değişikliklere yol açtığı belirtilmektedir (Zhu, 2018).

#### *Diğer Bileşenler*

Ozonlama işleminin tahılların besleyici ve fonksiyonel özellikleri üzerindeki etkileri uygulama parametrelerine (konsantrasyon, süre, gaz/sıvı form, sıcaklık vb) bağlı olarak önemli değişiklikler göstermektedir.



Çizelge 3: Ozon Uygulamasının Tahıl Proteinleri Üzerine Etkisi  
 Table 3: Effect of Ozone Application on Cereal Proteins

Materyal <i>Material</i>	Ozon uygulama koşulları (ozon formu, kons., süre) <i>Ozone application conditions</i> ( <i>ozone form, conc., duration</i> )	Sonuçlar <i>Results</i>	Kaynak <i>Source</i>
Ekstrakte proteinler (buğday gluteni, glutenin ve gliadin) <i>Extracted proteins</i> ( <i>wheat gluten, glutenin and gliadin</i> )	Gaz, 5 g/s, 0-1 s <i>Gas, 5 g/s, 0-1 hour</i>	Sülfidril grup sayısında azalma, gluten ve glutenin alt gruplarında azalma, gluten proteinlerinin denatürasyon sıcaklıklarında artış, G' ve G'' değerlerinde artış <i>Decrease in the number of sulfhydryl groups, decrease in gluten and glutenin subgroups, increase in denaturation temperatures of gluten proteins, increase in G' and G'' values</i>	Obadi vd., 2016
Buğday unu <i>Wheat flour</i>	50 mg/kg, 1 s <i>50 mg/kg, 1 hour</i>	Yaş gluten miktarında artış, unun beyazlık değerinde artış, α-amilaz ve viskozite değerinde azalma <i>Increase in wet gluten content, increase in flour whiteness, decrease in α-amylase and viscosity</i>	Zhu, 2018
Buğday unu (orta sert) <i>Wheat flour</i> ( <i>medium hard</i> )	Gaz, 5 mg/L, 0-2 s <i>Gas, 5 mg/L, 0-2 hour</i>	Buğday prolaminlerinin SDS (sodyum dodeksil sülfat) çözünürlüğünde azalma, molekül içi bağlanmadaki artış sonucunda proteinin polimer yapısında artan dayanım, moleküller arası S-S bağlarında artış, çapraz bağlardaki artış ile proteinin sekonder yapısında değişim <i>Decreased SDS (sodium dodecyl sulfate) solubility of wheat prolamins, increased strength in the polymer structure of the protein as a result of the increase in intramolecular binding, increase in intermolecular S-S bonds, increase in cross-links and change in the secondary structure of the protein</i>	Mei vd., 2016
Buğday <i>Wheat</i>	2.0 m <sup>3</sup> NTP/s <i>2.0 m<sup>3</sup> NTP/second</i>	Toplam protein oranının değişmediği ancak ekstrakte edilemeyen protein miktarında artış <i>An increase in the amount of protein that does not change in the total protein ratio but cannot be extracted</i>	Goze vd., 2017
Buğday <i>Wheat</i>	Gaz, 0.4g/h, 5 dk <i>Gas, 0.4g/h, 5 minute</i>	Toplam protein miktarının sabit kaldığı, gluten proteininde ki disülfid bağında ki artış ile ekstrakte edilemeyen polimerik protein miktarında artış <i>The amount of non-extractable polymeric protein increased with the increase in the disulfide bond in the gluten protein, where the total protein amount remained constant.</i>	Elgün ve Bilgiçli, 2019
Buğday <i>Wheat</i>	Gaz, 0.06 L/dk, 10, 20,30, 36 ve 40 minute <i>Gas, 0.06 L/dk, 10, 20,30, 36 and 40 minute</i>	Ekstrakte edilemeyen protein/ekstrakte edilebilir protein oranında artış <i>Increase in non-extractable protein/extractable protein ratio</i>	Chittrakorn vd., 2014
Buğday <i>Wheat</i>	Gaz, 5 g/kg <i>Gas, 5g/kg</i>		Violleau vd., 2012

## Renk

Değirmencilik sektöründe öğütme prosesi sonrasında elde edilen unu piyasaya sürülmeden önce renginin beyazlatılması amacıyla ağartma işlemi uygulanmaktadır. Bunun için oksidatif ajan olarak genellikle aktif soya unu kullanılmaktadır. Son yıllarda yapılan bilimsel çalışmalarda, ozon uygulamasının bir yandan karatenoid renk pigmentlerindeki çift bağları kırarak ağartma işlemini etkili bir şekilde sağladığı, diğer yandan gıda güvenliği açısından da önem arz ettiği bildirilmiştir (Chittrakorn vd., 2014; Sivaranjani vd., 2021; Zhu, 2018). Unun ozon gazı ile oksidasyonu sonucunda  $L^*$  (parlaklık) değerinin arttığı,  $b^*$  (sarılık) değerinin azaldığı ifade edilmektedir (Chittrakorn vd., 2014; Demir vd., 2011; Elgün ve Bilgiçli, 2019; Zhu, 2018). Ozon uygulanmış (0.4 g/h, 5 dakika) buğday ununun renk değerlerinin incelendiği çalışmada oksidasyonla birlikte  $L^*$  değerinin (parlaklık) %0.2 ve  $a^*$  değerinin (kırmızılık) %9.4 oranında arttığı,  $b^*$  değerinin (sarılık) ise %8 oranında azaldığı tespit edilmiş olup bu bilgiyi destekler niteliktedir. Çalışma sonucunda ayrıca un ağartma işlemi için 21 günlük dinlendirme işlemi ile ozon oksidasyonunun eşdeğer olduğu da bildirilmiştir (Elgün ve Bilgiçli, 2019). Ozon uygulama parametreleri ve uygulama yapılacak tahıl çeşiti renk değişimi için önemlidir. Luz vd (2022), yapmış oldukları çalışmada pirince ön işlem aşamasında ozon uygulamasıyla (5 L/dk) tüm örneklerde parlaklık ( $L$ ) değerinde artış olduğunu ancak en fazla artışın %6.5 oranında 5 saatlik ozon uygulamasıyla olduğunu belirlemişlerdir. Yapılan başka bir çalışmada buğday ununa uygulanan ozon gazının (50 mg ozon/kg) unun renk değerlerinde önem düzeyinde değişikliğe neden olmadığı ozon uygulama konsantrasyonunun önemini destekler niteliktedir (Mendez vd., 2003). Tahıl çeşidinin renk değişimi üzerine etkisinin incelendiği çalışmada farklı nişasta tiplerine (buğday, mısır ve pirinç) ozon oksidasyonu sonrasında  $L$  değerinin en yüksek buğday nişastasında olduğu yine tahıl çeşidinin ozon oksidasyonu için önemini destekler niteliktedir (Çatal ve İbanoğlu, 2012). Başka bir çalışmada ise Özaslan ve İbanoğlu (2022), farklı nişasta tipleri (mısır, guar ve guar gam mısır nişastası) üzerine ozon uygulanmasının (60 g ozon/saat, 5, 10, 15, 30

ve 60 dakika) renk değerlerine etkisini incelemiş olup çalışma sonucunda  $L$  değerinin en fazla %16 artışla guar gam-mısır nişastası çözeltilisine olduğu ve  $a$  değerinde azalmanın en fazla %77 oranında guar gam nişastasında olduğu dolayısıyla nişasta çeşitinin ozon etki mekanizması için önemli bir faktör olduğu çalışmadan çıkarılabilecek sonuçlar arasındadır. Tahıl nişasta çeşitlerinden Adlay nişastasının endüstriyel ölçekte kullanımını sınırlandıran birkaç faktörün (düşük su absorpsiyon, düşük şişme hacmi ve düşük çözünürlük) modifikasyonu amacıyla Subroto vd (2022) ozon oksidasyonu (2 L/dk, 20 dakika) uygulamış olup çalışma sonucunda birlikte  $L$  değerinin %0.7 oranında artış gösterdiği  $a$  değerinin ise %10 oranında azalma gösterdiği tespit edilmiştir. Karabuğday bazlı kompozit un örneklerine ozon uygulanmasıyla (2.4/h)  $L$  değerinde %0.55 oranında artış,  $b$  %3.4 oranında olduğu bunun ise unda bulunan doğal bileşiklerin (karotenoid ve flavon) ozon oksidasyonu ile dekompoze olmasından ve polifenol oksidaz enziminin inhibisyonundan kaynaklandığı bildirilmiştir (Hu vd, 2020).

## Mineral madde içeriği

Ozon uygulamasının toplam mineral madde üzerine etkisinin uygulanan ozon konsantrasyonuna bağlı olarak değiştiği literatürde bildirilmiştir. Yapılan bir çalışmada buğday örneklerine 30 mg/kg ozon gazı uygulanması ile birlikte Mg, Ca, K, P, Zn, Mn içeriğinin önem düzeyinde arttığı tespit edilmiştir (Broberg vd, 2015). Başka bir çalışmada ise nohut tanesine ozon uygulanması sonucunda (500, 750 ve 1000 mg/kg, 20 ile 30 dakika), düşük dozda ozon uygulamasının (500 ve 750 mg/kg) toplam mineral madde miktarını etkilemediği ancak yüksek dozda uygulamanın (1000 mg/kg) fosfor (%22 oranında) ve demir (%5 oranında) içeriğini arttırdığı, bakır (%25 oranında), çinko (%3 oranında), kalsiyum (%13 oranında) ve potasyum (%87 oranında) içeriklerini ise çapraz bağlanmalar sonucunda önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir (Nickhil vd., 2021).

## Yağ asidi içeriği

Güçlü oksitleme potansiyeline sahip ozon gazı uygulama parametrelerine bağlı olarak tahılda

yağlarının oksidasyonuna neden olmaktadır (Dubois vd., 2006; Savi vd., 2014; Wang vd., 2016). Yapılan çalışmalarda ozon gazı uygulamasının (1500 mg/kg, 0-45 dk) buğday unundaki lipitleri okside ettiği rapor edilmiştir (Sandhu vd., 2011). Benzer şekilde Qi vd. (2016), ozon uygulamasının mısır lipitlerinin asit içeriğini yaklaşık %40 oranında arttırdığını belirtmişlerdir. Buğday ununda ozon uygulamasını içeren başka bir çalışmada (5 g/s, 0-45 dk), ozonlama ile linoleik asit miktarının azaldığı, palmitik asit miktarının ise arttığı ifade edilmiştir. Aynı çalışmada unun asitlik değeri ve lipaz aktivitesinin azaldığı, buna karşın peroksit değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, lipit oksidasyonuna bağlı olarak uçucu bileşiklerin (haptanal ve hekzanal gibi) konsantrasyonlarında da artış görülmüştür (Obadi vd., 2018). Ozon uygulanmasının (5 g/h) depolama boyunca buğday unu üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada yağ asidi içeriğinin değişmediği hatta depolama sürecinde azaldığı bunun ise buğday tanesinde ki diğer bileşenlerin yağ bileşeni üzerinde koruyucu etkisinden ve hidrolaz enziminin inhibisyonundan kaynaklandığı bildirilmiştir (Li vd, 2013).

Tahıldaki doymuş ve doymamış yağ asitlerinin miktarına bağlı olarak yağ kalitesi değişiklik göstermektedir. Tahıllarda mevcut halde bulunan doymamış yağ asitleri yapılarında bulunan çift bağlardan dolayı oksidasyona daha çok maruz kalmaktadır ve sonucunda istenmeyen ransit tat ve koku oluşumu meydana gelebilmektedir. Dolayısıyla ozon oksidasyonunun tahılların yağ asitleri üzerinde ki olumsuz etkisini minimize edebilmek için uygulanacak olan parametrelerin optimize edilmesi önem taşımaktadır. Ozon oksidasyonunun (50 mg/kg, 30 dakika) farklı tahıl (mısır, buğday ve soya fasulyesi) çeşitlerindeki yağ asidi içeriği üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada, ozonun tahıl çekirdeğine nüfuz etmemesinden dolayı toplam yağ asidi içeriğinin oksidasyonla değişmediği bildirilmiş olup bu bilgiyi destekler niteliktedir (Mendez vd., 2003). Buna karşın, bir diğer çalışmada nohut tanesine uygulanan ozon işlemi (500, 750 ve 1000 mg/kg; 20-30 dakika) ile yağ asidi kompozisyonunun önemli ölçüde değiştiği ozon uygulamasıyla doymuş yağ asit miktarının sabit kaldığı ancak

omega 3 ve omega 6 açısından önem arz eden oleik asit miktarının orta derecede ozonlama işlemi ile %16 oranında arttığı, omega 6'nın öncüsü olan linoleik asit miktarının ise %2 oranında arttığı ancak bu sonuçların yüksek dozda ozonlama ile azaldığı belirlenmiştir (Nickhil vd., 2021). Başka bir çalışmada ise buğday ruşeymine ozon (2000, 4000 ve 6000 mg ozon /kg ve 1, 2 ve 4 saat) uygulamasının konsantrasyon ve maruz kalma süresinin artışı ile birlikte %33, %100 ve %57 oranında arttığı tespit edilmiştir (Saroei vd, 2019). Endüstriyel ölçekte önemli yağ kaynağı olan mısıra uygulanan ozon oksidasyonu ile (51 mg/L) peroksit değerinin ozon uygulama süresinin artışıyla orantılı olarak %258 oranında arttığı tespit edilmiştir (Alexandre vd, 2019).

Ozonlama işlemi ile tahılda miristoleik asit, 10-pentadesenoik asit ve heptadesenoik asit gibi birtakım yağ asitlerinin oluşumu meydana gelebilir veya var olan yağ asitlerinin (oleik asit, linoleik asit, palmitoleik asit, hekzadesenoik asit) miktarında artış veya azalma olabilir. Yapılan bir çalışmada nohut tanesine ozon uygulanması sonucunda (500, 750 ve 1000 mg/kg) omega-6 yağ asidinin öncüsü linoleik asit miktarının düşük ve orta dereceli ozonlama ile %2 oranında, oleik asit miktarının ise orta dereceli ozonlama işlemi ile %16 oranında arttığı tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca doymuş yağ asitlerinde ki azalma %0-9 arasında olup tekli doymamış yağ asitlerinden Hekzadesenoik asit, Palmitoleik asit, Oktadesenoik asit ve Eikosenoik asit miktarının sırasıyla %20, %7.69, %4.45 ve %9.43 oranında azalma olduğu tespit edilmiştir (Nickhill vd, 2021). Çalışma sonucunda insan sağlığı için faydalı doymamış yağ asitlerinden linoleik asit ve oleik asit miktarındaki artışın ozonlamanın baklagillerde haşere kontrol önlemleri uygunluğunu desteklemektedir (Nickhill vd, 2021).

#### Biyoaktif bileşenler

Antioksidan maddeler vücudumuzda serbest radikallerin reaksiyonunun engellenmesinde, metalleri bağlayarak oksidasyonun neden olduğu zararların indirgenmesinde dolayısı ile insan sağlığı için çeşitli hastalıkların önlenmesinde önemli rol oynamaktadır (Kolaç vd, 2017).

Yapılan çalışmada tahıl çekirdeğinde ki hücre duvarı, protein ve nişastanın un/çekirdek matrisine ozonun penetrasyonunu engellediğini dolayısıyla da polifenol bileşiklerin ozon oksidasyonundan daha düşük düzeyde etkilendiği bildirilmiştir (Zhu, 2018). Ozon oksidasyonunun fonksiyonel ve anti-besinsel bileşikler üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla antioksidan aktivite özelliğine sahip ancak mineral madde bağlayıcı özelliği ile istenmeyen bileşen olarak bilinen fitik asit miktarının uygulanan ozon konsantrasyonuna bağlı olarak değiştiği, örneğin 0.4 g/L ozon gazı uygulaması ile fitik asit miktarının %17 oranında azaldığı ancak 60 m/m ozon uygulamasının fitik asit miktarında değişikliğe neden olmadığı tespit edilmiştir. Ozon oksidasyonu ile fitik asit miktarındaki düşüş mineral biyoyararlılığı açısından dikkate alınması gereken önemli bir fonksiyonel özellik olup ozonun bu konu açısından ön planda tutulması gerektiği kanısına varılmıştır (Elgün ve Bilgiçli, 2019).

Biyoaktif bileşenlerin tkutilmesi kardiyovasküler hastalıklar, kanser ve diyabet gibi hastalıkların önlenmesiyle insan sağlığı açısından önem arz etmektedir. Dolayısıyla gıdalara uygulanacak olan ozon parametrelerinin optimizasyonu biyoaktif bileşenlerin korunması veya arttırılması açısından önem taşımaktadır. Ozon oksidasyonu ile hücre membranının kısmi parçalanmasıyla bağlı formdaki fenolik bileşenlerin serbest forma dönüşmesi ve oksidasyon sonucu bazı enzimlerin artan aktivitesiyle (fenilalanin amonyak liyaz, stilben sentazlar ve flavonol sentazlar gibi) tanede ki polifenolik bileşen miktarı artmaktadır. Ayrıca oksidatif esmerleşmeye neden olan polifenoloksidaz ve peroksidaz enzimlerinin inhibisyonu ile besin kalitesi artmaktadır (Jackowska vd, 2019; Kaur, 2022). Yapılan bir çalışmada ozon oksidasyonu uygulanmış (5 g/sa) tam tahıl unundan elde edilen yağdaki fenolik madde içeriğinin %107 oranında arttığı bu bilgiyi destekler niteliktedir (Kaur, 2022). Ozonun toplam fenolik madde içeriği üzerine etkisinin incelendiği başka bir çalışmada kolza tohumuna uygulanan ozonlama işlemi ile fenolik bileşen miktarının %19 ve flavanoit miktarının ise %13 oranında arttığı bildirilmiştir (Jackowska vd, 2019). Radikal yakalama aktivitesine ozon

oksidasyonunun etkisinin incelendiği çalışmada ise mısır nişastasına ozonlama işlemiyle (60g/saat) radikal yakalama aktivitesinin %17 oranında arttığı toplam fenolik bileşen miktarınınsa %42 oranında arttığı belirlenmiştir (zaslan ve İbanoğlu, 2022). Ancak başka bir çalışmada uygulanacak olan ozon konsantrasyonun öneminden bahsedilmiş olup, Sarooei vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada buğday ruşeymine uyguladıkları ozon konsantrasyonunun artmasıyla (2000, 4000, 6000 mg/kg) antioksidan miktarında ki %25 oranında azalma olduğu bunun ise yüksek konsantrasyonda ozonlama ile hidroksil, süperoksit ve hidroperoksil gibi serbest radikallerin oluşmasından kaynaklandığı bildirilmiştir. Dolayısıyla yüksek dozda ozon gazının antioksidan madde miktarı üzerinde olumsuz etkisi mevcut olduğu sonucuna varılmıştır. Ozon uygulamasının toplam fenolik bileşen miktarını olumlu etkisi ile sonuçlanan çalışmada buğday ununa ozonlama işlemi (5 g/L) toplam fenolik bileşen miktarının uygulama süresinin artışı ile %224 oranında arttığı ve DPPH antioksidan aktivite miktarının %3 oranında arttığı belirlenmiş olup bu sonuçların ozonlama ile kovalent bağların etkilenmesi karoten, tanen, askorbat, flavoprotein ve polifenoller gibi antioksidanların serbest hale geçmesinden kaynaklandığı bildirilmiştir (Obadi vd, 2018).

#### Asitlik

Ozon uygulaması ile tanedeki karbonil ve karboksil grup içeriklerinin artmasına paralel olarak tahıl tanesinin asitlik miktarının arttığı dolayısı ile tanenin pH değerinin düştüğü bildirilmektedir (Sivaranjani vd., 2021; Zhu, 2018). Hu vd. (2022) karabuğday nişastasına farklı sürelerde (2.5, 7.5, 15 ve 20 dk) ozon gazı uygulaması ile (2.4 g/h akış hızında) karbonil miktarında %263 oranında ve karboksil miktarında %121 oranında artış olduğu ve artan asitlikle birlikte pH değerinde düşüş %5 oranında düşüş olduğunu belirlemişlerdir.

Asitlik ve pH değerinin belirlendiği başka bir çalışmada, manyok nişastasına ozon gazı uygulaması ile karbonil içeriğinin ve karboksil içeriğinin oksidasyonla birlikte arttığı (sırasıyla %8 ve %3) pH değerinin % 31 oranında düştüğü tespit edilmiştir (Lima vd., 2021). Ozonun farklı

nişasta tipleri (buğday, mısır, patates ve pirinç) üzerine etkisinin incelendiği çalışmada ise uygulanan ozon oksidasyonu sonucunda tüm nişasta tiplerinde asitliğin artmasına paralel olarak pH değerinin azaldığı ancak en çok azalmanın %78 oranına patates nişastasında olduğu belirlenmiş olup oksidasyonun pH üzerine etkisinin uygulanan tahıl çeşitine bağlı olmadığı bildirilmiştir (Çatal ve İbanoğlu, 2012). Mısır nişastasına ozon oksidasyonunun etkisinin incelendiği başka bir çalışmada ozonlama ile (60 g/saat) karbonil içeriğinin %90 oranında, karboksil içeriğinin %150 oranında arttığı dolayısıyla pH değerinin düştüğü ve ortam asitliğinin arttığı tespit edilmiştir (Özaslan ve İbanoğlu 2022). Ozon oksidasyonunun ön işlem aşamasında uygulanmasının asitlik üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada pirince ısıtma aşamasında ozon uygulamasıyla (5 L/dk, 1, 2, 3 ve 5 saat) ısıtma atık suyunun pH değerinin %18 oranında düştüğü dolayısıyla ortam asitliğinin arttığı bunun ise ozonlama sırasında ki serbest radikal oluşumundan kaynaklanabileceği ve ortam asitleşmesinin hidrasyonunu desteklediği bildirilmiştir (Luz vd 2022). Yine başka bir çalışmada ise buğday unu ve buğday nişastasının ozonlanmasıyla (1500 mg/kg) karboksilik asit miktarının arttığı bildirilmiş olup çalışmalar birbirini destekler niteliktedir (Sandhu vd, 2012).

Ozon oksidasyonu sonucunda serbest radikallerin oluşumuyla pH'da meydana gelen bu değişiklikler tahıl tanesinin makro bileşenlerinde (protein ve nişasta) modifikasyonlara neden olabilir (Luz vd, 2022). Dolayısıyla ozonlama parametrelerinin optimize edilmesinin önemini bir kez daha vurgulamak gerekmektedir.

#### Çimlenme kabiliyeti

Çimlenmiş tahılların artan besin değeri, bu tahıllara olan ilgiyi de beraberinde getirmiştir. Dolayısıyla çimlenme süresinin azaltılması ve çimlenme kabiliyetinin artırılması amacıyla birtakım uygulamalar mevcut olup bunlardan biri olan ozonun uygulama parametrelerine göre olumlu/olumsuz birtakım etkileri vardır (Ma vd, 2020; Savi vd, 2020). Ozon oksidasyonunun a-amilaz, beta-amilaz,  $\beta$ -glukanaz ve endo-proteaz gibi hidrolitik enzim aktivitesi üzerinde olumlu etkisinin olduğu böylece protein matrisinin

hidrolizi ve nişasta parçalayıcı enzimlerin erişiminin kolaylaşması özellikle ozon uygulamasıyla enzo proteazların aktivitesinin %35 oranında artması maltlama verimi açısından önem taşımaktadır. Ozonlama işlemi ile a-amilaz aktivitesinin %14 oranında arttığı ve arpaya (*Hordeum vulgare* L.) ozon uygulamasıyla (5 mg/cm<sup>3</sup> 120 dakika) 72 saatlik çimlenme kabiliyeti üzerinde %12 oranında artışı bu bilgiyi destekler niteliktedir (Ma vd, 2020). Ancak ozonlama süresinin artışı ile tahıl tanesinin koleoptil ve seminal kökü zarar görebilir dolayısıyla çimlenme kapasitesi düşebilir. 3 saatlik ozon uygulamasının bu köklere zarar verdiği dolayısıyla çimlenme kabiliyetini %12 oranında azalttığı literatürde mevcut olup bu bilgiyi destekler niteliktedir (Savi vd, 2020). Ozonlama süresinin çimlenme kabiliyeti üzerine etkisinin incelendiği başka bir çalışmada artan uygulama süresiyle (2 ve 3 saat) 2 çimlenme kapasitesini %12 oranında azalttığı bildirilmiştir (Zhu, 2018). Ozon uygulamasıyla (0.02-0.04 mg/L, 120 dakika) mısırın çimlenme kabiliyetini %65'den %80'e çıktığı ancak maruz kalma süresinin artışıyla (180 dakika) hücre tahribatının artmasından dolayı çimlenme kabiliyetinin %12.5 oranında azalttığı da literatürde mevcuttur (Sivaranjani vd., 2021). Süre parametresinin mercimeğin çimlenme kabiliyeti üzerine etkisinin incelendiği çalışmada ise ozonlama işlemiyle (1 g/m<sup>3</sup>) en iyi çimlenme oranının %90 oranında 3 ve 10 dakika ozon uygulamasına maruz kalınan örneklerde olduğu bunun yapıdaki C-H oranında ki artıştan kaynaklandığı bildirilmiştir (Souza vd 2021).

#### Ozon Uygulamasının Ürün Üzerine Etkisi

Değirmencilik sektöründe disülfid bağ oluşumunu arttırmak, gluten ağını kuvvetlendirmek, hamur işleme özelliklerini geliştirmek ve ekmek içi yapısının düzgün olmasını sağlamak amacıyla una olgunlaştırma ajanı olarak oksidan madde ilavesi yapılmaktadır. Ancak kimyasal katkı maddelerine alternatif yeşil teknoloji olarak adlandırılan ozon gazının da bu amaçla kullanılabileceği yapılan çalışmalarda bildirilmiştir (Mendez vd., 2003; Sivaranjani vd., 2021). Ozon gazının uygulama parametrelerine bağlı olarak tahıl unundan elde edilen hamurda (renk, stabilite, mukavemet, gelişme süresi) ve son üründe olumlu/olumsuz

birtakım değişiklikler meydana gelmektedir (Mendez vd., 2003; Sivaranjani vd., 2021).

Ozon oksidasyonunun hamur ve ekmekte meydana getirdiği değişiklikler üzerine yapılan bir çalışmada ozon uygulanmış (0.4 g/h, 8 dakika) unun su absorpsiyonunun %4, yumuşama derecesinin %8 ve hamur uzama kabiliyetinin %7 oranında azaldığı bildirilmiştir (Demir vd., 2011). Ayrıca ozonlanmış undan elde edilen ekmeğin hacminin %7 ve ekmeğin spesifik hacminin %8, ekmeğin bayatlaması için önemli bir kalite parametresi olan ekmeğin içi gözenek yapısının puanının %14 oranında arttığı tespit edilmiştir (Demir vd., 2011). Başka bir çalışmada ise yumuşak buğday tanesine ozon uygulamasıyla (36 dakika 0.06 L/dakika) kek hacminde önem düzeyinde artışa neden olduğu ve keklerin sertlik derecesinde %18 oranında (klorla oksidasyona kıyasla) düşüş (olduğu tespit edilmiştir (Chittrakorn vd., 2014).

Ekmeğin tekstürel özelliklerinde meydana gelen değişikliklere ek olarak renk özelliklerinde de bazı değişimler meydana gelmektedir (Demir vd., 2011). Ozon uygulamasının ekmeğin renk parametresi üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada 45 dk ozon uygulaması ile karotenoit renk pigmentlerinin oksidasyonu ile ekmeğin daha parlak ve daha beyaz olduğu bildirilmiştir (Zhu, 2018). Başka bir çalışmada ozon uygulanmış buğdaydan elde edilen ekmeğin parlaklığının (L) oksidasyonla birlikte %2 oranında arttığı, sarılık (*b*) ve kırmızılık (*a*) değerinin %14 ve %5 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Elgün, 2019).

Ozon uygulamasının erişte üzerine etkisinin ise daha açık ve parlak renkli erişte oluşumu doğrultusunda olduğu ve oksidasyonun eriştelerin yapışkanlığını azaltıp, sertliğini ve çignenebilirliğini etkilemediği bildirilmiştir (Zhu, 2018). Başka bir çalışmada ise 2 saat boyunca 5mg/L ozon uygulamasının ekmekteki tüm duyuşal özellikleri en düşük seviyeye indirdiği ve ekmeğin sertliğinin artarak tüketici için tercih edilebilirliğini azalttığı bildirilmiştir (Sivaranjani vd., 2021). Tüm bu çalışmalar sonucunda, uygulanacak ozon etkinliği için proses parametrelerinin öncesinde optimize edilmesi gerektiği çıkarılmaktadır (Sivaranjani vd., 2021).

Bai ve Zhou, (2021) erişte ve makarnanın kalitesi ve raf ömrünü arttırmak için hidrokolloitler, proteinler, emülgatörler, ön zenginleştirme ve ekstrüzyon yöntemlerine alternatif yeşil teknoloji kullanımının umut vaat edici olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmalarında buğday unu ve karabuğday unundan elde edilen erişte örneklerine farklı sürelerde ozon gazı 5g/h uygulamasıyla toplam canlı sayısının 0-40 dakika arasında %46 oranında azaldığı dolayısıyla eriştelerin raf ömrünün değiştii de bildirilmiştir. Ayrıca çalışma sonucunda ozon konsantrasyonunun artmasıyla eriştelerin yapısındaki boşluklar azalmış ve tekstürü sıkı bir hal almıştır. Proteinlerin çapraz bağlanmasının artışıyla eriştelerin sertlik ve elastikiyet değerinin uygulanan ozon konsantrasyonunun artmasıyla birlikte arttığı (4100g-5000g arasında) belirlenmiştir. Ozon ve klor uygulanan unlardan yapılan keklerin tekstürel özelliklerinin incelendiği başka bir çalışmada ise; ozonla muamele edilmiş undan yapılan keklerin sertliğinin %18 oranında azaldığı ancak klorlu undan yapılan keklerin sertlik oranının e %11 oranında arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada ozonlama süresinin artmasına paralel olarak kek hamurunun viskozitesinde önemli ölçüde arttığı ve özgül ağırlığın %23 oranında azaldığı dolayısı ile hamura karıştırma sırasında daha fazla oksijen dahil olduğu ve hava kabarcıklarının yapıda daha iyi tutulup oda sıcaklığında hamurun stabilitesinin arttığı belirlenmiştir (Chittrakorn vd., 2014). Raf ömrünün belirlendiği başka bir çalışmada ise; ozonlanmış ve depolanmış buğdaydan (15 dakika, 4 gün depolama) yapılmış eriştelerin depolama süresinin artışı ile birlikte toplam mikroorganizma sayısının %41 oranında azaldığı dolayısı ile eriştelerin mikrobiyolojik raf ömrünün arttığı belirlenmiştir (Li vd., 2013). Eriştelerin raf ömrünü uzatmak için yapılan başka bir çalışmada ise ozon gazı (2.4 g/saat) uygulanan un örneklerinde toplam mikroorganizma sayısının %18 oranında düştüğü dolayısı ile kimyasal koruyucu ajan, su aktivitesi düzenleyicisi, modifiye atmosfer paketlenme, ışınlama ile sterilizasyon ve soğuk zincir taşımaya alternatif çevre dostu teknoloji olarak ozon uygulamasının son üründe mikrobiyal inaktivasyonu sağladığı bildirilmiştir (Hu vd., 2020).

**SONUÇ**

Gıda endüstrisinde çeşitli uygulama alanlarına sahip olan ozon, tahıl teknolojisinde mikrobiyolojik güvenliği sağlamada, fonksiyonel özellikleri geliştirmede ve kalitatif raf ömrünü uzatmada kullanım alanı bulmaktadır. Uygulama, tahılların (özellikle buğday) öğütme özelliklerini olumlu yönde geliştirmektedir. Ancak ozon ile oksidasyonda dikkat edilmesi gereken husus uygulamanın birçok parametreye (ozon uygulama konsantrasyonu, süresi, sıcaklığı, uygulanacak olan tahılın nem miktarı, nişasta ve protein içeriği, nişastanın amiloz/amilopektin oranı vb.) bağlı olarak olumlu ve/veya olumsuz sonuçlar meydana getirmesidir. Dolayısı ile ozon oksidasyonu çalışmalarında optimum parametrelerin ön denemeler ile belirlenip sonrasında uygulamaya geçilmesi gerekmektedir. Endüstriyel ölçekte ozon teknolojisini sınırlandıran en önemli faktör ise yüksek maliyetli bir proses olmasıdır. Ancak bu durum düşük bakım maliyeti gerektirmesi ve uygulandığı ürünün uzun raf ömrüne sahip olması ile tolere edilebilmektedir. Ozon uygulaması diğer stratejiler ile birleştirilerek spesifik uygulamalar için alternatif çözümler yaratılmasında kullanılabilir. Ozonun tahıl ve ürünleri alanında büyük ölçeklerde uygulanmasına yönelik çalışmalarda halen geliştirilmeye açık konular yer almaktadır. Özellikle bu alanda farklı disiplinler ile yapılacak ortak çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

**ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI**

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**YAZAR KATKILARI**

Yazarlar makalenin gerçekleşmesinde, yazılmasında ve yayınlanmasında eşit katkı sağlamışlardır. Yazarlar makalenin son halini okumuş ve onaylamıştır.

**KAYNAKLAR**

Afsah-Hejri, L., Hajeb, P., 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>

Alegbeleye, O., Odeyemi, O. A., Strateva, M., 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>

Arda, B., Onbaşı, E., Öztürk, A., Cınar, A. (2021). Ozon Gazının Ant fungal Ajan Olarak Etkinliğinin Belirlenmesi. *Gıda ve Yem Bilimi*, 2(26), 40-48. ISSN 1303-3107

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>

Bai, Y.-P., Zhou, H.-M. (2021). Impact of aqueous ozone mixing on microbiological, quality and physicochemical characteristics of semi-dried buckwheat noodles. *Food Chemistry*, 336, 127709. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127709>

Botondi, R., Barone, M., 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>

Castanha, N., Matta Junior, M. D. da, 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., 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., 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., 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>
- Chhem-Kieth, S., Holm Rasmussen, L., Rosenfeld, M., 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*, 102157. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102157>
- Chittrakorn, S., Earls, D., 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>
- Çatal, H., İbanoğlu, Ş. (2012). Structure, Physico-chemical and Microbiological Properties of Ozone-oxidized Wheat, Corn, Potato and Rice Starches. *Journal of Food Science and Engineering*, 2(4). <https://doi.org/10.17265/2159-5828/2012.04.002>
- Çatal, H., 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>
- Çetinkaya, N., Pazarlar, S., Paylan, İ. C. (2022). Ozone treatment inactivates common bacteria and fungi associated with selected crop seeds and ornamental bulbs. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(12), 103480. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103480>
- da Luz, S. R., Almeida Villanova, F., Tuchtenhagen Rockembach, C., Dietrich Ferreira, C., José Dallagnol, L., Luis Fernandes Monks, J., 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>
- Demir, M. K., Elgün, A., Elgün, S. M. (2011). Farklı tip unlara ozon uygulamasının un, hamur ve ekmek kalitesi üzerine etkisi. *GIDA*, 36(4), Art. 4.
- Desvignes, C., Chaurand, M., Dubois, M., Sadoudi, A., Abecassis, J., 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., Jambak, A., Mediboyina, M. K., Kumar, M., Rajkumar, Raghunathan, R., Mousavi Khaneghah, A. (2022). Recent advancements in baking technologies to mitigate formation of toxic compounds: A comprehensive review. *Food Control*, 135, 108707. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108707>
- Dubois, M., Coste, C., Despres, A. G., Efstathiou, T., Nio, C., 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.
- Elgün, M. S., Bilgiçli, N. (2019). Buğday Ununa Ozon Gazı Uygulamasının Un ve Ekmek Kalitesine Etkisi. *Akademik Gıda*, 329-341. <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.647710>
- Epelle, E. I., Macfarlane, A., Cusack, M., Burns, A., Thissera, B., Mackay, W., Rateb, M. E., Yaseen, M. (2022). Bacterial and fungal disinfection via ozonation in air. *Journal of Microbiological Methods*, 194, 106431. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2022.106431>
- Gavahian, M., Sarangapani, C., 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. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110138>
- Guo, Y., Zhao, L., Ma, Q., Ji, C. (2021). Novel strategies for degradation of aflatoxins in food and feed: A review. *Food Research International*, 140, 109878. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109878>



- Hamad, G. M., Mehany, T., Simal-Gandara, J., Abou-Alella, S., Esua, O. J., Abdel-Wahhab, M. A., Hafez, E. E. (2023). A review of recent innovative strategies for controlling mycotoxins in foods. *Food Control*, *144*, 109350. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109350>
- Hashemi Moosavi, M., Mousavi Khaneghah, A., Javanmardi, F., Hadidi, M., Hadian, Z., Jafarzadeh, S., Huseyn, E., 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>
- Hu, J., Li, X., Cheng, Z., Fan, X., Ma, Z., Hu, X., Wu, G., 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., 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., 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>
- Kaur, K., Pandiselvam, R., Kothakota, A., Padma Ishwarya, S., Zalpouri, R., 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>
- Kolaç, T., Gürbüz, P., Yetiş, G. (2017). Doğal Ürünlerin Fenolik İçeriği Ve Antioksidan Özellikleri. *İstanbul Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Dergisi*, *5*(1).
- Li, M., Peng, J., Zhu, K.-X., Guo, X.-N., Zhang, M., Peng, W., 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>
- Lillo, E., Cordisco, M., Trotta, A., Greco, G., Carbonari, A., Rizzo, A., Sciorsci, R. L., 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*, S0093691X22004459. <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., Augusto, P. E. D. (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*, 894-905. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.11.046>
- Maniglia, B. C., Castanha, N., Rojas, M. L., 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>
- Mayookha, V. P., Pandiselvam, R., Kothakota, A., Padma Ishwarya, S., Chandra Khanashyam, A., Kutlu, N., Rifna, E. J., Kumar, M., Panesar, P. S., & Abd El-Maksoud, A. A. (2023). Ozone and cold plasma: Emerging oxidation technologies for inactivation of enzymes in fruits, vegetables, and fruit juices. *Food Control*, *144*, 109399. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109399>
- Mei, J., Liu, G., Huang, X., 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>
- Mendez, F., Maier, D. E., Mason, L. J., 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)
- Mir, S. A., Dar, B. N., Mir, M. M., Sofi, S. A., Shah, M. A., Sidiq, T., Sunooj, K. V., Hamdani, A. M., 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., 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>
- Muştu, Ç. (2020). Yiyecek ve İçecek İşletmelerinde Ozon Uygulamaları. *AYDIN GASTRONOMY*, 4(1), 45-53. [https://doi.org/10.17932/IAU.GASTRONOMY.2017.016/2020.401/gas\\_v04i1005](https://doi.org/10.17932/IAU.GASTRONOMY.2017.016/2020.401/gas_v04i1005)
- Nada, S., Nikola, T., Bozidar, U., Ilija, D., Andreja, R. (2022). Prevention and practical strategies to control mycotoxins in the wheat and maize chain. *Food Control*, 136, 108855. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108855>
- Nickhil, C., Mohapatra, D., Kar, A., Giri, S. K., Tripathi, M. K., 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., 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., Mousavi Khaneghah, A., Oliveira, C. A. (2021). Innovative modifications in food processing to reduce the levels of mycotoxins. *Current Opinion in Food Science*, 38, 155-161. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.11.010>
- Obadi, M., Zhu, K.-X., Peng, W., Noman, A., Mohammed, K., Zhou, H.-M. (2018). Characterization of oil extracted from whole grain flour treated with ozone gas. *Journal of Cereal Science*, 79, 527-533. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.12.007>
- Ojogbo, E., Ogunsona, E. O., 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>
- Özaslan, Z. T., 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>
- 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., 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>
- Phan, L. T., Schaar, H., Saracevic, E., Krampe, J., Kreuzinger, N. (2022). Effect of ozonation on the biodegradability of urban wastewater treatment plant effluent. *Science of The Total Environment*, 812, 152466. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152466>
- Qasim, M., Rafique, M. S., 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>
- Qian, Y.-F., Zhang, J.-J., Liu, C.-C., Ertbjerg, P., Yang, S.-P. (2022). Effects of gaseous ozone treatment on the quality and microbial community of salmon (*Salmo salar*) during cold storage. *Food Control*, 142, 109217.

- <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109217>
- Raghunathan, R., Pandiselvam, R., Kothakota, A., Mousavi Khaneghah, A. (2021). The application of emerging non-thermal technologies for the modification of cereal starches. *LWT*, *138*, 110795. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110795>
- Rangel, K., Cabral, F. O., Lechuga, G. C., Carvalho, J. P. R. S., Villas-Bôas, M. H. S., Midlej, V., De-Simone, S. G. (2021). Detrimental Effect of Ozone on Pathogenic Bacteria. *Microorganisms*, *10*(1), 40. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10010040>
- Sandhu, H. P. S., Manthey, F. A., 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., Ohm, J.-B. (2011). Comparison Between Potassium Bromate and Ozone as Flour Oxidants in Breading. *Cereal Chemistry Journal*, *88*(1), 103-108. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-06-10-0085>
- Savi, G. D., Gomes, T., Canever, S. B., Feltrin, A. C., Piacentini, K. C., Scussel, R., Oliveira, D., Machado-de-Ávila, R. A., Cargnin, M., Angioletto, E. (2020). Application of ozone on rice storage: A mathematical modeling of the ozone spread, effects in the decontamination of filamentous fungi and quality attributes. *Journal of Stored Products Research*, *87*, 101605. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101605>
- Savi, G. D., Piacentini, K. C., Bittencourt, K. O., 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>
- Sciorsci, R. L., Lillo, E., Occhiogrosso, L., Rizzo, A. (2020). Ozone therapy in veterinary medicine: A review. *Research in Veterinary Science*, *130*, 240-246. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2020.03.026>
- Sirohi, R., Tarafdar, A., Kumar Gaur, V., Singh, S., Sindhu, R., Rajasekharan, R., Madhavan, A., Binod, P., Kumar, S., Pandey, A. (2021). Technologies for disinfection of food grains: Advances and way forward. *Food Research International*, *145*, 110396. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110396>
- Sivaranjani, S., Prasath, V. A., Pandiselvam, R., Kothakota, A., & 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>
- 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>
- Tabla, R., Roa, I. (2022). Use of gaseous ozone in soft cheese ripening: Effect on the rind microorganisms and the sensorial quality. *LWT*, *170*, 114066. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114066>
- Tiwari, B. K., Brennan, C. S., Curran, T., Gallagher, E., Cullen, P. J., 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>
- Trombete, F., Minguita, A., Porto, Y., Freitas-Silva, O., Freitas-Sá, D., Freitas, S., Carvalho, C., Saldanha, T., 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. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1144067>
- Ünal, D., Sel, T. (2019). Ozone Application and Usage in Veterinary Medicine. *Eurasian Journal of Health Sciences*, *2*(4), 182-190.
- Ünusan, N. (2019). Systematic review of mycotoxins in food and feeds in Turkey. *Food Control*, *97*, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.10.015>
- Vanier, N. L., El Halal, S. L. M., Dias, A. R. G., da Rosa Zavareze, E. (2017). Molecular structure, functionality and applications of oxidized starches: A review. *Food Chemistry*, *221*, 1546-1559.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.138>

Violleau, F., Pernot, A.-G., 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, L., Luo, Y., Luo, X., Wang, R., Li, Y., Li, Y., Shao, H., 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>

Yildiz, P. O., Yangilar, F. (2014). Ozon ve Gıda Endüstrisinde Kullanım Alanları. *BEU Journal of Science*, 3 (1), 94-101.

Zhang, Y., Mahidul Islam Masum, Md., Gao, C., Cheng, Y., Guan, J. (2022). Ozone reduces the

fruit decay of postharvest winter jujube by altering the microbial community structure on fruit surface. *Microbiological Research*, 262, 127110. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127110>

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., Zhao, G. (2022). Current progress on innovative pest detection techniques for stored cereal grains and thereof powders. *Food Chemistry*, 396, 133706. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133706>