



Prediction of the Antibacterial Effect of Ozone Against *Listeria* Isolated from Chicken Meat Using a Machine Learning Approach

Bülent Zorlugenc^{1,a,*}, Sema Atasever^{2,b}, Feyza Kiroğlu Zorlugenc^{1,c}

¹Nevşehir Hacı Bektaş Veli University, Engineering-Architecture Faculty, Food Engineering Department, Nevşehir, Türkiye

²Nevşehir Hacı Bektaş Veli University, Engineering-Architecture Faculty, Computer Engineering Department, Nevşehir, Türkiye

*Corresponding author

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Research Article</p> <p>Received : 12.11.2024 Accepted : 17.12.2024</p> <p>Keywords: <i>Listeria</i> Ozone Antibacterial Effect XGBoost Machine Learning</p>	<p>In this study, an XGBoost-based prediction model with 99.99% accuracy was developed to predict the antibacterial effects of ozone gas on <i>Listeria</i> spp. isolated from poultry plants and chicken meat. Prior to the machine learning process, various pre-processing procedures were performed on 75 pieces of data obtained from experimental data and 70% of the data were randomly allocated as training set and 30% as test set. In this study, five different machine learning algorithms were tested with default settings and the performance of the models were compared. According to the R² score, the XGBoost algorithm was found to be the most successful model. Hyper-parameter optimization was performed to improve the accuracy performance of the XGBoost model. As a result of the study, it was observed that the antibacterial effect on <i>Listeria</i> spp. increased with the increase in the duration of ozone gas application, especially at the end of 20 minutes, <i>Listeria ivanovii</i>, <i>Listeria monocytogenes</i> and <i>Listeria innocua</i> species were completely inhibited. In conclusion, it was determined that the antibacterial effect of ozone on <i>Listeria</i> spp. may vary from species to species and ozone application has potential as an effective antibacterial method in food safety practices. The research findings demonstrate the industrial applicability of predictive models in the field of food safety.</p>

Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 13(2): 446-452, 2025

Makine Öğrenmesi Yaklaşımı Kullanılarak Tavuk Etinden İzole Edilen *Listeria*'ya Karşı Ozonun Antibakteriyel Etkisinin Tahmin Edilmesi

MAKALE BİLGİSİ	ÖZ
<p>Araştırma Makalesi</p> <p>Geliş : 12.11.2024 Kabul : 17.12.2024</p> <p>Anahtar Kelimeler: <i>Listeria</i> Ozon Antibakteriyel Etki XGBoost Makine Öğrenmesi</p>	<p>Bu çalışmada, ozon gazının <i>Listeria</i> spp. (tavuk işletmeleri ve tavuk etlerinden izole edilen) üzerine antibakteriyel etkilerini tahmin etmek amacıyla %99.99 doğruluk oranına sahip bir XGBoost tabanlı tahmin modeli geliştirilmiştir. Makine öğrenimi süreci öncesinde, deneysel verilerden elde edilen 75 adet veri üzerinde çeşitli ön işlemler gerçekleştirilmiş ve verilerin %70'i eğitim, %30'u test seti olarak rastgele ayrılmıştır. Çalışma kapsamında varsayılan ayarlarla beş farklı makine öğrenmesi algoritması denenmiş ve modellerin performansı karşılaştırılmıştır. R² skoruna göre en başarılı modelin XGBoost algoritması olduğu tespit edilmiştir. XGBoost modelinin doğruluk performansını artırmak amacıyla hiper-parametre optimizasyonu yapılmıştır. Araştırma sonucunda ozon gazı uygulamasının süresinin artmasıyla birlikte <i>Listeria</i> spp. üzerindeki antibakteriyel etkinin arttığı gözlemlenmiş, özellikle 20 dakika sonunda <i>Listeria ivanovii</i>, <i>Listeria monocytogenes</i> ve <i>Listeria innocua</i> türleri tamamen inhibe edilmiştir. Sonuç olarak, ozonun <i>Listeria</i> spp. üzerindeki antibakteriyel etkisinin türden türe değişebileceği ve ozon uygulamasının gıda güvenliği pratiklerinde etkili bir antibakteriyel yöntem olarak potansiyel taşıdığı tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, gıda güvenliği alanında prediktif modellerin endüstride uygulanabilirliğini göstermektedir.</p>

^a bzorlugenc@nevsehir.edu.tr

^b <https://orcid.org/0000-0002-6800-4548>

^c sema@nevsehir.edu.tr

^d <https://orcid.org/0000-0002-2295-7917>

^e fzorlugenc@nevsehir.edu.tr

^f <https://orcid.org/0000-0001-8313-8459>



Giriş

Ozon uygulaması; gıda işleme yöntemleri arasında çevre dostu ve ısılmayan bir yöntem olarak ümit verici bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Oksijenin allotropu olan ozon, FDA (Food and Agriculture Organisation) tarafından 2001 yılında hem sulu hem de gaz halinde doğrudan gıdalarda antimikrobiyal olarak (GRAS-Generally Recognized As Safe) kabul edilen oksitleyici bir maddedir (Barthwal ve ark., 2025). Gram pozitif-negatif bakteri sporları ve vejetatif hücreleri, küfler ve virüsler olmak üzere birçok mikroorganizma üzerinde ozonun antimikrobiyal etkisi ortaya koyulmuştur (Giménez ve ark., 2021). Ozonun hücrelere nüfuz etmesi ile hücre zarı bileşenleri, enzimler ve DNA ile RNA gibi genetik materyaller de dahil olmak üzere çeşitli hücre bileşenler etkilenir. Bu etki hücreler içeriklerin hücre dışına sızmasına ve hücrenin parçalanmasına neden olur (Sarron ve ark., 2021). Ozonlama, gıda sanayiinde sebzelerin yüzey sanitasyonu, içme suyu dezenfeksiyonu, atık su arıtımı ve pestisitlerin giderilmesi gibi çeşitli proseslerde ürünün biyolojik ve kimyasal güvenliği ile raf ömrünü artırmak için uygulanan önemli bir yöntemdir (Öztekin ve ark., 2006; Zorlugenç ve ark., 2008; Pandiselvam ve ark., 2020; Botondi ve ark., 2021; Özen ve ark., 2021).

Listeriosis gıda kaynaklı önemli bir hastalıktır ve ciddi klinik sonuçlara neden olabilmektedir. Listeriosis etmeni *Listeria monocytogenes*'dir. *L. monocytogenes*, *Listeria* cinsteki 6 türden biridir ve önemli bir patojen olarak kabul edilen tek türüdür. Diğer *Listeria* türleri *L. innocua*, *L. seeligeri*, *L. welshimeri*, *L. ivanovii* ve *L. grayi*'dir. 2010-2022 yılları arasında klasik *Listeria* türlerine 22 yeni tür eklenmiştir. Yeni tanımlanan bu 22 tür, *Listeria*'nın genetik olarak tahmin edilenden daha çok çeşitlilik gösterdiğini ortaya koymaktadır (Orsi ve ark., 2024). *Listeria* türleri doğada yaygın olarak bulunmakta olup sağlıklı hayvanlar ile insanların yanı sıra toprak, sebze ve doğal sulardan da izole edilebilmektedirler (Lakićević ve ark., 2010). *Listeria monocytogenes* ile kontamine olmuş gıdaların tüketilmesinden kaynaklanmaktadır. Özellikle işlenmiş et, süt ürünleri, önceden paketlenmiş sandviçler, soğuk tütülenmiş balık, hazırlanmış sebzeler, salatalar ve meyveler gibi kontamine gıda ürünlerinin tüketilmesi yoluyla insana bulaşır.

Listeriosis vakalarını azaltmaya yönelik çalışmalar, gıda güvenliği ile ilgili yapılan yasal düzenlemeler ve gıda güvenliği uygulamalarındaki iyileştirmelere rağmen, sanayileşmiş ülkelerde gıda kaynaklı enfeksiyonlardan kaynaklanan ölümlerin en önemli nedeni invazif listeriosis olarak kabul edilmektedir (Magalhães ve ark., 2016). Günümüz gıda endüstrisinde, ozon gazı güçlü antibakteriyel etkileri nedeniyle birçok uygulamalarda kullanılmaktadır. Meyve ve sebzelerdeki gıda patojenlerinin kesikli tip yıkama ile inaktivasyonu üzerine yapılan bir araştırmada, 30 dakikalık ozonlu su ile yıkama prosesi uygulanmıştır. *Listeria innocua*'nın *E.coli* ve *S. Typhimurium* 'a göre daha yüksek düzeyde (4.7 log kob/g) inaktive olduğu bildirilmiştir (Gibson ve ark., 2019)

Gıda maddeleri kompleks bir yapıya sahiptir ve bu durum gıdaların belirli özellikleri ile mikrobiyal popülasyon dinamikleri arasındaki etkileşimi ölçmeyi

zorlaştırabilir. Bunun başlıca nedeni, çevresel faktörlerin bakteriyel büyüme ve inaktivasyon üzerindeki birleşik etkilerinin yeterince anlaşılammış olmasıdır. Özellikle, bakteri popülasyonlarının davranışı ile çeşitli değişkenler arasındaki ilişkileri tanımlamak zordur. Tahmine dayalı gıda mikrobiyolojisinde, işleme ve depolama koşullarının ürünlerin nihai patojen kontaminasyon seviyeleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla çeşitli istatistiksel modeller kullanılmaktadır (Hiura ve ark., 2021). Makine öğrenimindeki gelişmeler, gıdalardaki mikrobiyal popülasyon davranışını hassas bir şekilde tahmin etmek için alternatif ve güçlü bir yaklaşımın yanı sıra, genellikle mikrobiyal yanıtla ilişkili olan yüksek miktarda değişkenlik ve belirsizlikle başa çıkma kapasitesi sağlar (Zhen ve ark., 2024).

Hiura ve ark. (2021), mikrobiyolojide çevresel faktörler (sıcaklık, pH, su aktivitesi) kullanarak bakteriyel popülasyon davranışını tahmin etmek için istatistiksel modeller kullanmışlardır. Artan veri miktarı ve karmaşıklığı nedeniyle yüksek boyutlu değişkenlerle tüm verileri işlenmesinin zorluğu nedeniyle, mikrobiyal tepkilerin bir veri tabanını kullanarak bakteriyel davranışları tahmin etmek amacıyla bir veri madenciliği yaklaşımı önermişlerdir. Çalışmalarında, 0-25°C arasında değişen sıcaklıklar altında beş farklı gıda kategorisinde (sığır eti, kültür ortamı, domuz eti, deniz ürünleri ve sebzeler) *Listeria monocytogenes* popülasyonunun büyüme ve inaktivasyon verilerini kullanarak, eXtreme Gradient Boosting Tree (XGBoost) algoritması ile sekiz açıklayıcı değişkene dayalı olarak tahmin modelleri geliştirmişlerdir.

Bu çalışmada, tavuk işletmeleri ve tavuk etlerinden izole edilen *Listeria* spp.'lere karşı ozonun antibakteriyel etkisini belirlemek amacıyla zaman değişkenini açıklayıcı değişken olarak kullanarak XGBoost algoritmasıyla bir tahmin modeli oluşturulmuştur. Çalışmadan elde edilecek sonuçlar, gıda güvenliği alanında prediktif modellerin endüstride uygulanabilirliğini göstermesi açısından değerlidir. Uygulanacak prosedür, tahmin edilen bakteri popülasyonu davranışı ile gıda işleme ve depolama koşullarının belirlenmesine yönelik kılavuz sağlayabilir. Ayrıca, makine öğreniminin sağladığı bu tür çalışmaların, antibakteriyel uygulamaların etkinliğinin artırılmasına ve gıda işleme endüstrisinde risk yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Materyal ve Yöntem

Materyal

Bu çalışmada kullanılan *Listeria ivanovii*, *Listeria welshimeri*, *Listeria innocua* ve *Listeria welshimeri* türleri, FDA metodu ve Vitec 2 compact (Biomerieux) cihazı kullanılarak tavuk karkaslarından izolasyonu yapılmıştır. Çalışma Çukurova Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü Gıda Mikrobiyolojisi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Kontrol amacıyla, liyofilize *Listeria monocytogenes* (Türkiye-Biomerieux) kullanılmıştır (USDA, 2015).

Yöntem

Ozon Gazı Uygulaması Öncesinde *Listeria* spp.'lerin Sıvı Besiyerinde Çoğaltılması

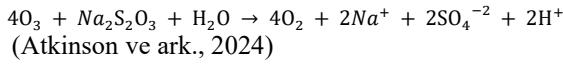
Bu amaçla daha önceden hazırlanan ve sterilize edilen 500 ml hacimli TSB (Tryptic Soy Broth) (Hitchins ve ark., 2022; USDA, 2015) besiyerine *Listeria* spp.'ler aşılansın ve 37°C 48 saat inkübe edildikten sonra ozonlama düzeneğine aktarılmışlardır.

Listeria spp.'lere Ozon gazı Uygulaması

Çalışmada saatte 7 g ozon üretim kapasitesine sahip Ozomax (VTT-1 Model, Kanada) marka ozon jeneratörü kullanılmıştır. Reaksiyon kabı içindeki çözünmüş ozon konsantrasyonunu tespit etmek ve ozon jeneratörü ile oksijen tüpündeki gaz akışının kontrolü amacıyla sisteme PID kontrollü ATI marka (Model: Q45 H/64, ABD) ozon kontrol ve analiz cihazı eklenmiştir. Bu sayede reaksiyon kabı içerisinde 100 ppb çözünmüş ozon seviyesine ulaşıldığında, ozon jeneratörünü ve oksijen gaz akışını sağlayan solenoid valfinin kapatılması sağlanmıştır. Araştırmada kullanılan ozonlama düzeneğinin şeması Şekil 1'de verilmiştir.

Ozonlama işleminin gerçekleştirildiği reaksiyon kabı, ozon gazının yarılanma ömrünün sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik göstermesi ve mikroorganizmalarının üreme hızının yavaşlatılabilmesi amacıyla 10°C'ye ayarlı soğutmalı su banyosu içerisine yerleştirilmiştir.

3000 ml hacimli üç boyunlu reaksiyon tankı içerisine 1000 ml steril izotonik çözelti ilave edilmiş hem sistemin dezenfekte edilmesi hem de ozon konsantrasyonunun 100 ppb düzeyinde stabil hale gelmesi için sisteme mikroorganizma aşılması yapılmadan 60 dakika boyunca ozon gazı verilmiştir. Reaksiyon kabı içindeki suda çözünmeyen ozon gazı iş güvenliği açısından tehlike oluşturmaması amacıyla teflon hortum aracılığıyla içerisinde sodyum tiyosülfat çözeltisi bulunan kavanoza aktararak ozon gazı oksijene indirgenmiştir.

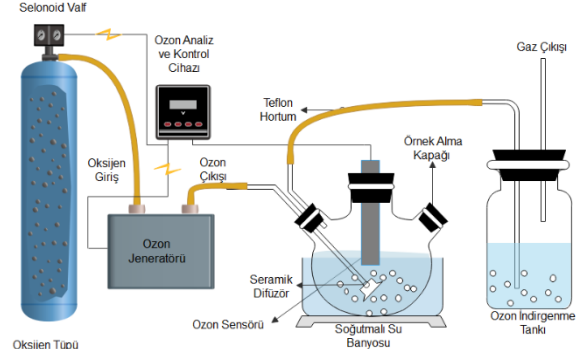


Listeria spp. kültürleri, triptic soy broth besi ortamı içerisinde üretilen Şekil 1'de görülen 3 boyunlu reaksiyon kabına aseptik koşullarda (steril kabin içerisinde) bunzen beki yakınında 100 ml olarak ilave edilmiştir. Bu esnada başlangıç mikroorganizma sayısını belirlemek amacıyla yayma ekim yöntemi kullanılarak seri dilüsyonlar hazırlanmış ve PALCAM Agar besiyerine ekim işlemi gerçekleştirilmiştir (Hitchins ve ark., 2022). Sistemden 5, 10, 15 ve 20. dakikalarda örnek alınarak PALCAM Agar besiyerine aynı şekilde ekim yapılmış ve ozon gazının *Listeria* spp. üzerine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Veri Önışleme

Bu çalışmada, deneylerden elde edilen 75 adet veri üzerinde makine öğrenmesi işlemlerine başlamadan önce çeşitli veri ön işleme adımları gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, bakteri türleri sayısal olarak kodlanmıştır (örneğin: "*Listeria ivanovii*" 0, "*Listeria monocytogenes*" 1 şeklinde). Daha sonra, verilerin %70'i eğitim, %30'u test verisi olarak rastgele ayrılmıştır. Çalışma kapsamında varsayılan ayarlarla beş farklı makine öğrenmesi algoritması denenmiş ve modellerin performansı karşılaştırılmıştır. R² skoruna göre en başarılı modelin XGBoost algoritması olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 1).

XGBoost modelinin doğruluk performansını artırmak amacıyla hiper-parametre optimizasyonu yapılmıştır. Bu süreçte, RandomizedSearchCV algoritması kullanılarak belirlenen parametre aralıklarından rastgele kombinasyonlar test edilmiş ve en uygun parametreler belirlenmiştir (Çizelge 2). Optimum parametrelerle yeniden eğitilen model, test verisi üzerinde değerlendirilmiş ve tahmin sonuçları analiz edilmiştir. Çalışmanın tüm veri analizi, model eğitimi, değerlendirme ve grafiksel görselleştirme işlemleri Python programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen modelin deneysel veri üzerinde yüksek doğruluk performansı sergilediğini göstermiştir.



Şekil 1. Ozonlama düzeneği
Figure 1. Ozone application system

XGBoost Algoritması

XGBoost, Chen ve Guestrin (2016) tarafından geliştirilen bir topluluk (ensemble) öğrenme algoritmasıdır. XGBoost, gradient boosting decision tree (GBDT) algoritmasının geliştirilmiş bir versiyonudur. GBDT, birden fazla karar ağacını içeren yinelemeli bir algoritmadır ve kayıp fonksiyonunun (loss function) gradyanını azaltmaya odaklanan adım adım bir yöntemle çalışır. Bu algoritma, bir karar ağacı modelini temel alarak her adımda hataları düzelten yeni modeller ekleyerek eğitimi sürdürür. Boosting, birden çok zayıf temel modelin birleştirilmesiyle yüksek performanslı bir model oluşturan bir topluluk öğrenme (ensemble learning) yöntemidir. GBDT yöntemleri, makine öğrenimi ve veri madenciliği çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Chen ve Guestrin, 2016; Hiura ve ark., 2021).

XGBoost algoritmasının temel amacı, aşağıdaki hedef fonksiyonu minimize etmektir; bu fonksiyon, kayıp fonksiyonu ve düzenleme teriminden oluşur:

$$L^{(t)} = \sum_{i=1}^n l(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)} + f_t(x_i)) + \Omega(f_t)$$

(Tarwidi ve ark., 2023)

Burada, l gözlenen veri y_i ile tahmin edilen veri \hat{y}_i arasındaki hatayı temsil eden kayıp fonksiyonudur, f_t t-inci ağacın modelidir ve t optimizasyon sürecindeki iterasyon indeksidir. Düzenleme terimi $\Omega(f)$ aşağıdaki gibidir:

$$\Omega(f) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \|w\|^2$$

(Tarwidi ve ark., 2023)

Denklemden T, ağaç yapılarının toplam sayısını, γ ve λ ceza katsayılarını, w ise her bir yaprağın skorunu içeren bir vektörü temsil eder. XGBoost modelleri, XGBoost Python Paketi kullanılarak oluşturulmuştur.

Çizelge 1. Farklı makine öğrenimi algoritmalarının değerlendirme metrikleri ve model sonuçlarının karşılaştırılması
Table 1. Comparison of evaluation metrics and model results of different machine learning algorithms

Model	R ²	MSE	RMSE
XGBoost (En iyi Model)	0,9998	0,0009	0,0303
Decision Tree	0,9868	0,0575	0,2397
Gradient Boosting	0,9824	0,0767	0,2770
Random Forest	0,9570	0,1871	0,4326
Support Vector Machine	0,6886	1,3555	1,1643

Çizelge 2. Hiper-parametre optimizasyon işleminin konfigürasyonu ve sonuçları
Table 2. Configuration and results of the hyper-parameter optimization process

Hiper-parametre	Optimizasyon aralığı	En iyi değer
n_estimators	[100, 200, 300, 400, 500]	300
learning_rate	[0,01, 0,05, 0,1, 0,2, 0,3]	0,3
max_depth	[3, 5, 7, 10]	7
min_child_weight	[1, 3, 5]	3
subsample	[0,6, 0,8, 1,0]	0,6
colsample_bytree	[0,6, 0,8, 1,0]	1,0
gamma	[0, 1, 5]	0

Çizelge 3. Ozon Gazı Uygulamasının *Listeria* spp.'ler Üzerine Etkisi (kob/ml)
Table 3. Effect of ozone gas application on *Listeria* spp. (cfu/ml)

Türler	Ozon Uygulama Süresi (Dakika)				
	0	5	10	15	20
<i>Listeria ivanovii</i>	1,1×10 ⁵	4,2×10 ⁴	1,0×10 ³	8,1×10 ¹	t.e.
<i>Listeria monocytogenes</i>	1,2×10 ⁵	9,0×10 ⁴	6,0×10 ⁴	2,3×10 ³	t.e.
<i>Listeria innocua</i>	1,1×10 ⁵	1,9×10 ⁴	2,1×10 ³	t.e.*	t.e.
<i>Listeria welshimeri</i>	9,8×10 ⁵	5,4×10 ⁴	2,4×10 ⁴	3,4×10 ³	1,7×10 ²
<i>Listeria monocytogenes</i> (kontrol)	1,6×10 ⁶	6,6×10 ⁵	5,0×10 ⁴	3,7×10 ³	7,0×10 ²

* t.e.: Tespit edilemedi

Sonuçlar ve Tartışma

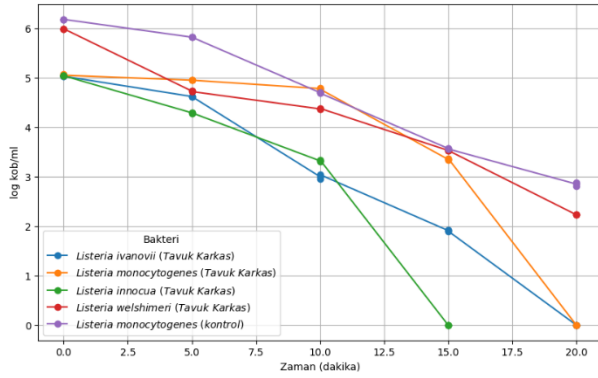
Ozon gazı uygulamasının, tavuk işletmelerinden ve tavuk etlerinden izole edilen *Listeria* spp.'lere karşı etkisi Çizelge 3 ve Şekil 2'de verilmiştir. Uygulama süresi artıkça *Listeria* spp.'lere ozon gazının antibakteriyel etkisi artmıştır. 15. dakikada *Listeria innocua*, 20. dakikada *Listeria ivanovii* ve *Listeria monocytogenes* tamamen inhibe edilmiştir. 20 dakikalık ozonlama sonrasında başlangıç bakterisi yüküne göre *Listeria monocytogenes* (kontrol)'de %80,69 (log kob/ml) ve *Listeria ivanovii* ise %79,71 düzeyinde bir azalma (log kob/ml) meydana gelmiştir. Ozon uygulama süreleri arasında en yüksek antibakteriyel etki 20. dakikada 3,35 logaritmik azalma ile tavuk karkaslarından izole edilmiş olan *Listeria monocytogenes* ile 15. dakikada 3,32 logaritmik azalma ile *Listeria innocua* saptanmıştır.

Şekil 2'de gözlemlenen verilere göre, "*Listeria welshimeri*" ve "*Listeria monocytogenes* (kontrol)" bakterisi türlerinin, diğer türlerin aksine, 20. dakika sonunda tamamen inhibe edilmedikleri görülmektedir. Bu durum, çeşitli makine öğrenmesi modelleri kullanılarak, farklı bakterisi türlerinin gıda üzerindeki azalma eğilimlerini modellemek ve gıda güvenliği açısından kritik zaman noktalarını tahmin etmek için bir fırsat sunmaktadır. Bu amaçla, bu çalışmada Şekil 3'te sonuçları gösterilen lineer regresyon modeli (LR) kullanılmıştır. Şekil 3, "*Listeria welshimeri*" ve "*Listeria monocytogenes* (kontrol)" türlerinin zaman içinde nasıl azaldığını görselleştirmekte ve logaritmik değerlerin (log kob/ml) zamanla nasıl azalan bir eğilim sergilediğini ortaya koymaktadır.

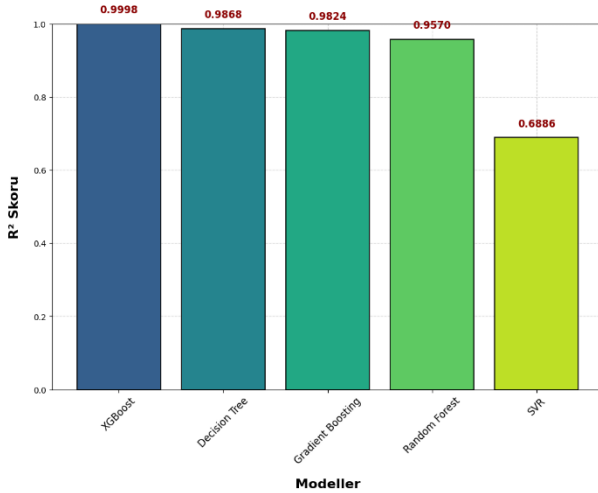
Model, her iki bakterisi türü için de tahmini sifıra ulaşma zamanlarını belirlemiş olup, "*Listeria welshimeri*" için tahmini 33,90 dakika, "*Listeria monocytogenes* (kontrol)" için ise yaklaşık 35,91 dakika olarak öngörülmektedir. Bu tahminler, mevcut verilerde gözlemlenen lineer düşüş eğilimine dayanmakta olup, gerçek deney koşullarında bakterisi sayısının azalmasını bu modelden farklılık gösterip göstermediğini anlamak için daha fazla analiz ve veri gerekmektedir. Şekil 3'ten elde edilen sonuçlar, makine öğrenmesi modellerinin, gıda üzerindeki çeşitli bakterisi türlerinin azalma eğilimlerini başarıyla modelleyebileceğini ve gıda güvenliği açısından kritik zaman noktalarını etkin bir şekilde tahmin edebileceğini göstermesi açısından pratik bir önem taşımaktadır.

Çizelge 3, gerçek deneysel sonuçlardan elde edilen verileri sunmaktadır. Bu veriler ışığında, en dirençli bakterisi türünün *Listeria monocytogenes* (kontrol) olduğu görülmektedir. Bu tür, zamanla işlem sırasında en düşük azalma oranını göstermekte olup, çözülmüş ozona karşı diğer türlere kıyasla daha yüksek direnç sergilemiştir. Bu direnç farklılığının, genetik ve fenotipik çeşitlilikten kaynaklandığı düşünülmektedir (Marino et al., 2018; Orsi et al., 2024)

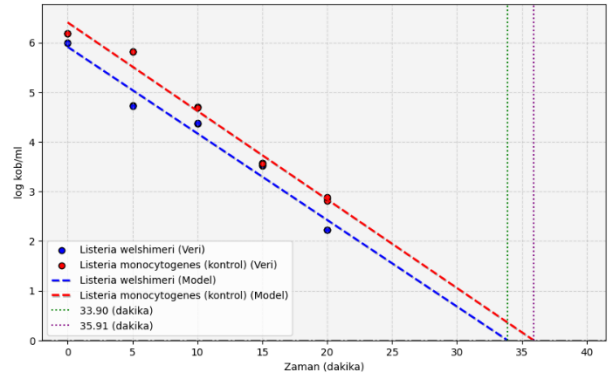
Çizelge 4'teki sonuçlar ise, gerçek deney sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak belirli bir zaman aralığındaki bakterisi yoğunluğundaki değişimi ölçmek için ortalama logaritmik azalmaya göre Python programı kullanılarak hesaplanmıştır.



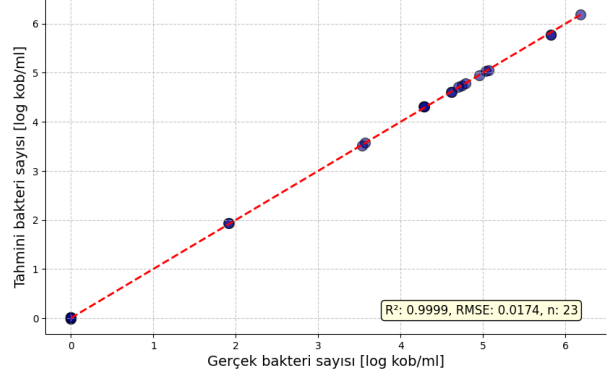
Şekil 2. *Listeria* spp.'ler üzerine ozon gazının etkisi (log kob/ml)
Figure 2. Effect of ozone gas on *Listeria* spp. (log cfu/ml)



Şekil 4. Model performanslarının R² skorlarına göre karşılaştırması
Figure 4. Comparison of model performances based on R2 scores



Şekil 3. Bakteri türlerinin log sayımı için LR modeli tahmin sonucu
Figure 3. LR model estimation result for log count of bacterial species



Şekil 5. Hiper-parametre optimizasyonu sonrası XGBoost model sonucu
Figure 5. XGBoost model result after hyper-parameter optimization

Çizelge 4. Python Programı Kullanılarak Hesaplanan Ortalama logaritmik Azalmaya Göre Bakteri Direnç Analizi Sonuçları
Table 4. Bacterial resistance analysis results based on average logarithmic decrease calculated using python program

<i>Listeria</i> Türleri	Azalma Miktarı (log kob/ml)
<i>Listeria monocytogenes</i>	5,06
<i>Listeria innocua</i>	5,04
<i>Listeria ivanovii</i>	5,03
<i>Listeria welshimeri</i>	3,76
<i>Listeria monocytogenes</i> (kontrol)	3,33

Bu yöntemde, her bir bakteri türü için başlangıç zamanı (0 dakika) ve bitiş zamanı (20 dakika) log değerlerinin ortalamaları hesaplanır, ardından bu iki değer arasındaki fark alınarak bakterinin zaman içindeki direnci veya azalma miktarı hesaplanır. Elde edilen sonuçlara göre en dirençli bakteri türü "*Listeria monocytogenes* (kontrol)" olarak belirlenmiştir. Bu bakteri türü, zaman içinde logaritmik olarak en az azalma gösteren türdür. Logaritmik azalma miktarı 3,33 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu istatistiksel sonuçlar Çizelge 3 sonuçları ile uyum göstermektedir.

Daha önce yapılan bazı çalışmalarda makine öğrenimi algoritmaları bakteriyel davranışları öngörme potansiyelini ortaya koymak amacıyla kullanılmıştır. Hiura ve ark. (2021), bakterilerin gıdalardaki davranışını tahmin etmek için veri madenciliği yaklaşımı bir model geliştirmişlerdir. ComBase veritabanındaki 1.007 farklı çevresel koşul altındaki *Listeria monocytogenes* verilerini kullanarak XGBoost algoritması ile tahminler yapmışlardır. Geliştirdikleri model mikrobiyal bir veri tabanına makine öğrenimi yaklaşımının uygulanabilirliğini göstermesi ve

gıda işleme ve depolama koşullarının belirlenmesi için kılavuzlar sağlama potansiyeli açısından önem arz etmektedir.

Zhen ve ark. (2024), *Listeria monocytogenes* biyofilmlerini paslanmaz çelik yüzeylerde etkisiz hale getirmek için sodyum hipoklorit (NaClO), perasetik asit (PAA), ve klor dioksit (ClO₂) çözeltilerinin etkinliğini değerlendirmişlerdir. Yapay Sinir Ağları ve Random Forest (RF) modelleri, geleneksel Weibull modeline kıyasla bakteriyel davranış tahmin etmede üstün performans göstermiştir; Özellikle RF modeli eğitim ve doğrulama aşamalarında en başarılı sonuçları vermiştir. Bu sonuçlar, gıda güvenliği ve kaliteyi sağlamak için dezenfeksiyon prosedürlerinin iyileştirilmesine yönelik makine öğrenimi modellerinin potansiyel değerini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, beş farklı popüler makine öğrenimi algoritmasının performansları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Algoritmaların başarı düzeyleri, R², MSE ve RMSE metrikleri kullanılarak analiz edilmiştir (Çizelge 1). Varsayılan parametrelerle yapılan değerlendirmede,

XGBoost algoritması $R^2 = 0,9998$ ve $RMSE = 0,0303$ değerleriyle en yüksek doğruluk oranını sağlamıştır. Performans sıralamasında XGBoost'u sırasıyla Decision Tree, Gradient Boosting ve Random Forest algoritmaları takip etmiş; SVR algoritması ise $R^2 = 0,6886$ değeriyle diğer algoritmalara kıyasla daha düşük bir performans sergilemiştir. Bu sonuçlar, XGBoost algoritmasının regresyon problemleri için etkili bir seçenek olduğunu göstermektedir (Şekil 4). Ayrıca, elde edilen bulgular doğrultusunda XGBoost algoritmasına hiper-parametre optimizasyonu uygulanmış (Çizelge 2) ve nihai sonuçlar Şekil 5'te sunulmuştur. Şekil 5, araştırmada kullanılan *Listeria* spp.'lere karşı ozon gazının antibakteriyel etkilerini tahmin etmek amacıyla %99,99 doğruluk oranına ve 0,0174'lük bir RMSE'ye sahip XGBoost tabanlı tahmin modelinin sonucunu göstermektedir.

Sonuç

Bu çalışmada, tavuk işletmelerinden ve tavuk etlerinden izole edilen *Listeria* spp.'lere karşı ozonun antibakteriyel etkilerini değerlendirmek amacıyla geliştirilen XGBoost tabanlı tahmin modeli, %99,99 gibi yüksek bir doğruluk oranı ile antibakteriyel etkiyi başarıyla tahmin etmiştir. Elde edilen bu sonuç, gıda güvenliği alanında prediktif modellerin endüstride uygulanabilirliğini göstermektedir. Bu prosedür, tahmin edilen bakteri popülasyonu davranışı ile gıda işleme ve depolama koşullarının belirlenmesine yönelik kılavuz sağlayabilir. RandomizedSearchCV kullanılarak yapılan hiper-parametre optimizasyonu, modelin performansını artırmış ve böylece deneysel süreçlerin maliyet ve süresini azaltma potansiyeli sunmuştur. Ayrıca, makine öğreniminin sağladığı bu tür çalışmalar, antibakteriyel uygulamaların etkinliğinin artırılmasında ve gıda işleme endüstrisinde risk yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Bu çalışma makine öğrenmesi modellerinin, çeşitli bakteri türlerinin gıda üzerindeki azalma eğilimlerini modelleyerek, gıda güvenliği açısından kritik zaman noktalarını tahmin edebileceğini göstermesi açısından da pratik bir önem arz etmektedir.

Sulu ortamda ozon gazı uygulamasının süresi arttıkça, özellikle *Listeria ivanovii*, *Listeria monocytogenes* ve *Listeria innocua* türlerinde gözlemlenen bakteriyel inhibisyon, ozonun güçlü antibakteriyel kapasitesini göstermektedir. Zaman içinde bakteriyel yüklerdeki azalma eğilimi, ozonun etkinliğini net bir şekilde ortaya koymaktadır; özellikle *Listeria innocua* türü belirgin bir hızla azalmıştır. Ancak, *Listeria monocytogenes* (kontrol) en dirençli tür olarak öne çıkmış, başlangıçta yüksek olan log kob/ml değerleri diğer türlere kıyasla daha yavaş azalmıştır. Bu sonuçlar, *Listeria* spp.'ler üzerindeki suda çözülmüş ozonun etkisinin *listeria* türleri arasındaki genetik çeşitlilikten kaynaklanabileceğini ve bazı durumlarda oldukça etkili olabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, ozonlama gıda güvenliği uygulamalarında önemli bir rol oynayabilecek potansiyel bir antibakteriyel yöntem olarak değerlendirilebilir.

Beyanlar

Etik Onay Belgesi

-

Yazar Katkı Beyanı

B.Z.: mikrobiyolojik analizler, yazım - gözden geçirme ve düzenleme; S.A.: yazım - gözden geçirme ve düzenleme, deneysel verilerin işlenmesi; F.K.Z.: Ozon düzeneğinin kurulması, mikrobiyolojik analizlere yardım, yazım - gözden geçirme ve düzenleme.

Fon Beyanı

Araştırmada herhangi kurum ya da kuruluştan fon desteği alınmamıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar bu makalede, diğer kişiler ve kurumlar arasında herhangi bir çıkar çatışmasının olmadığını beyan eder

Teşekkür

Araştırmada kullanılan bakteri kültürlerinin temininden dolayı Gıda Müh. Dr. S.S.'a teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Atkinson, A. J., Ray, H., & Wert, E. C. (2024). Efficiency of Ozone Quenching Agents at Different Temperature, pH, and Hydrodynamic Conditions. *Ozone: Science and Engineering*, 00(00), 1–20. <https://doi.org/10.1080/01919512.2024.2366239>
- Barthwal, R., Negi, A., Kathuria, D., & Singh, N. (2025). Ozonation: Post-harvest processing of different fruits and vegetables enhancing and preserving the quality. *Food Chemistry*, 463(P4), 141489. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141489>
- 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). <https://doi.org/10.3390/foods10040748>
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 13-17-Aug, 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- Gibson, K. E., Almeida, G., Jones, S. L., Wright, K., & Lee, J. A. (2019). Inactivation of bacteria on fresh produce by batch wash ozone sanitation. *Food Control*, 106(May), 106747. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106747>
- Giménez, B., Graiver, N., Giannuzzi, L., & Zaritzky, N. (2021). Treatment of beef with gaseous ozone: Physicochemical aspects and antimicrobial effects on heterotrophic microflora and listeria monocytogenes. *Food Control*, 121(May 2020), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107602>
- Hitchins, A., Jinneman, K., & Chen, Y. (2022). Food BAM: Detection and Enumeration of *Listeria monocytogenes* Detection and Enumeration of *Listeria monocytogenes* in Foods. *Bacteriological Analytical Manual (BAM)*, April, 1–23. <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-10-detection-listeria-monocytogenes-foods-and-environmental-samples-and-enumeration>
- Hiura, S., Koseki, S., & Koyama, K. (2021). Prediction of population behavior of *Listeria monocytogenes* in food using machine learning and a microbial growth and survival database. *Scientific Reports*, 11(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90164-z>
- Lakićević, B., Stjepanović, A., Milijašević, M., Terzićvidojević, A., Golić, N., & Topisirović, L. (2010). The presence of *Listeria* spp. and *Listeria monocytogenes* in a chosen food processing establishment in Serbia. *Archives of Biological Sciences*, 62(4), 881–887. <https://doi.org/10.2298/ABS1004881L>

- Magalhães, R., Ferreira, V., Brandão, T. R. S., Palencia, R. C., Almeida, G., & Teixeira, P. (2016). Persistent and non-persistent strains of *Listeria monocytogenes*: A focus on growth kinetics under different temperature, salt, and pH conditions and their sensitivity to sanitizers. *Food Microbiology*, 57, 103–108. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2016.02.005>
- Marino, M., Maifreni, M., Baggio, A., & Innocente, N. (2018). Inactivation of foodborne bacteria biofilms by aqueous and gaseous ozone. *Frontiers in Microbiology*, 9(AUG), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02024>
- Orsi, R. H., Liao, J., Carlin, C. R., Wiedmann, M., Orsi, R. H., Liao, J., Carlin, C. R., & Wiedmann, M. (2024). *Described Between 2010 and 2022*. 15(2).
- Özen, T., Koyuncu, M. A., & Erbaş, D. (2021). Effect of ozone treatments on the removal of pesticide residues and postharvest quality in green pepper. *Journal of Food Science and Technology*, 58(6), 2186–2196. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04729-3>
- Öztekin, S., Zorlugenç, B., & Zorlugenç, F.K. (2006). Effects of ozone treatment on microflora of dried figs. *Journal of Food Engineering*, 75(3), 396–399. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.024>
- Pandiselvam, R., Kaavya, R., Jayanath, Y., Veenuttranon, K., Lueprasitsakul, P., Divya, V., Kothakota, A., & Ramesh, S. V. (2020). Ozone as a novel emerging technology for the dissipation of pesticide residues in foods—a review. *Trends in Food Science and Technology*, 97(December 2019), 38–54. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.017>
- Sarron, E., Gadonna-Widehem, P., & Aussenac, T. (2021). Ozone treatments for preserving fresh vegetables quality: A critical review. *Foods*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/foods10030605>
- Tarwidi, D., Pudjaprasetya, S. R., Adytia, D., & Apri, M. (2023). An optimized XGBoost-based machine learning method for predicting wave run-up on a sloping beach. *MethodsX*, 10(December 2022), 102119. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102119>
- USDA. (2015). *Testing Methodology for Listeria species or L. monocytogenes in Environmental Samples*. October, 1–11.
- Zhen, H., Hu, Y., Xiong, K., Li, M., & Jin, W. (2024). Quantification and modeling of disinfectant inactivation of *Listeria monocytogenes* biofilms on stainless steel surfaces. *Food Bioscience*, 61(June), 104637. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104637>
- Zorlugenç, B., Kiroğlu Zorlugenç, F., Öztekin, S., & Evliya, İ. B. (2008). The influence of gaseous ozone and ozonated water on microbial flora and degradation of aflatoxin B1 in dried figs. *Food and Chemical Toxicology*, 46, 3593–3597. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.09.003>