

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**ÇEŞİTLİ SICAKLIKLARDA DEPOLANAN DOĞRANMIŞ SOĞANLARDA
SALMONELLA BÜYÜMESİNİN MODELLENMESİ**

Aykut MAMUR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Basri OMAÇ

TUNCELİ-2025

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ÇEŞİTLİ SICAKLIKLARDA DEPOLANAN DOĞRANMIŞ SOĞANLARDA
***SALMONELLA* BÜYÜMESİNİN MODELLENMESİ**

Aykut MAMUR
(22001168)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Basri OMAÇ

TUNCELİ-2025

T.C
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ÇEŞİTLİ SICAKLIKLARDA DEPOLANAN DOĞRANMIŞ
SOĞANLARDA *SALMONELLA* BÜYÜMESİNİN MODELLENMESİ**

Aykut MAMUR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 04/09/2025 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

İmza

İmza

İmza

Doç. Dr. Nihal GÜZEL
(Hitit Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Basri OMAÇ
(Munzur Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep EROĞLU
(Munzur Üniversitesi)

BAŞKAN

DANIŞMAN

ÜYE

Bu tez, Enstitümüz Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç. Dr. Nagihan KARAASLAN AYHAN
Enstitü Müdürü

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir.

03/10/2025

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

İmza
Aykut MAMUR

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Basri OMAÇ

TEŞEKKÜR

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Basri OMAÇ ve kıymetli hocam Doç. Dr. Alper GÜVEN'e son iki yıldaki destekleri, ilgileri, sabırları ve rehberlikleri için en derin şükranlarımı sunmak istiyorum. Onların yardımı olmadan araştırmamı tamamlamam mümkün olmazdı. Doç. Dr. Nihal GÜZEL ve Dr. Öğr. Üyesi Zeynep EROĞLU'na jüri üyelerim olarak hizmet ettikleri ve araştırmama sundukları kıymetli öneriler ile rehberlikleri için teşekkür ederim.

Tüm eğitim yaşantım boyunca her zaman yanımda olan, sevgilerini esirgemeyen ve sabırlarıyla desteklerini sunan canım aileme, sevgili eşim Tuğçe MAMUR ile güzel kızım Güneş MAMUR'a sonsuz teşekkür ederim.

Aykut Mamur
TUNCELİ-2025

İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	I
TEŞEKKÜR.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
TABLolar LİSTESİ	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	V
SEMBOLLER LİSTESİ	VI
KISALTMALAR.....	VII
ÖZET	VIII
ABSTRACT	IX
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	4
2.1. Soğan	4
2.2. Soğanla İlişkili Gıda Kaynaklı Hastalık Salgınları.....	7
2.3. Soğanların Hasat Öncesi Kontaminasyonunu Etkileyen Faktörler	9
2.4. Hasat Sonrası Taze Kesilmiş Soğan Üretimi ve Kontaminasyonu.....	15
2.5. Prediktif Mikrobiyoloji.....	22
2.5.1. Birincil büyüme modelleri.....	24
2.5.2. İkincil modeller	27
2.5.3. Üçüncül modeller	29
2.5.4. Gıda biliminde yapay zekâ kullanımı.....	30
3. MATERYAL VE METOD	32
3.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Örneklerin Hazırlanması	32
3.2. Bakteriyel Suşlarını Hazırlanması	32
3.3. Örneklerin İnokule Edilmesi ve <i>Salmonella</i> Sayımı	33
3.4. Büyüme ve İnaktivasyon Modelleri	33
3.4.1. Birincil büyüme ve inaktivasyon modelleri	33
3.4.2. İkincil modeller	34
3.4.3. Birinci ve ikinci modellerin değerlendirilmesi.....	35
3.5. İstatiksel Analiz	35
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	36
4.1. Doğranmış Soğanlarda <i>Salmonella</i> Spp.nin Çoğalması	36
4.2. Birincil Büyüme Modelleri.....	42
4.3. İkincil Büyüme Modelleri	47
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	53
6. KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. 2010–2023 Yılları arasında seçilmiş ölkelerde kuru soğan üretim miktarları (ton)	5
Tablo 4.1. Farklı sıcaklıklarda depolanmış doğranmış soğanlarda <i>Salmonella</i> spp.’nin büyüme kinetik parametreleri	45
Tablo 4.2. Farklı sıcaklıklarda depolanmış doğranmış soğanlarda <i>Salmonella</i> spp.’nin inaktivasyon kinetik parametreleri	46
Tablo 4.3. Doğranmış soğanda <i>Salmonella</i> spp.’nin maksimum büyüme oranı ($\mu_{\max}$) modeli	52
Tablo 4.4. Doğranmış soğanda <i>Salmonella</i> spp.’nin lag fazı süresi (t_{lag}) ve maksimum büyüme konsantrasyonu ($y_{\max}$) modelleri.....	52

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 4.1. Doğranmış soğanda <i>Salmonella</i> bŸyŸmesi (15°C)	38
Şekil 4.2. Doğranmış soğanda <i>Salmonella</i> bŸyŸmesi (25°C)	38
Şekil 4.3. Doğranmış soğanda <i>Salmonella</i> bŸyŸmesi (30°C)	39
Şekil 4.4. Doğranmış soğanda <i>Salmonella</i> bŸyŸmesi (35°C)	39
Şekil 4.5. Doğranmış soğanda <i>Salmonella</i> bŸyŸmesi (40°C)	40
Şekil 4.6. Doğranmış soğanda <i>Salmonella</i> bŸyŸmesi (45°C)	40
Şekil 4.7. Doğranmış soğanda <i>Salmonella</i> inaktivasyonu (4°C)	41
Şekil 4.8. Doğranmış soğanda <i>Salmonella</i> inaktivasyonu (7°C)	41
Şekil 4.9. Doğranmış soğanda <i>Salmonella</i> inaktivasyonu (10°C)	42

SEMBOLLER LİSTESİ

a_w	: Su Aktivitesi
kob/g	: Gram Başına Koloni Oluşturan Birim
CO₂	: Karbondioksit
°C	: Santigrat Derece – Sıcaklık Birimi
D-değeri	: Belirli Sıcaklıkta Mikrobiyal Popülasyonun %90'ının İnaktivasyonu İçin Gereken Süre
K	: İnaktivasyon Oranı -Mikrobiyal Ölüm Kinetiği Parametresi
O₂	: Oksijen
QDG	: Kuersetin 3,4'-diglukozit
QMG	: Kuersetin 4'-glukozit
R²	: Determinasyon Katsayısı (Model Uyumu)
RMSE	: Root Mean Square Error (Kök Ortalama Kare Hatası)
T	: Sıcaklık (°C)
t	: Zaman (saat)
t_{lag}	: Lag Faz Süreci
T_{max}	: Büyümenin Gerçekleşmediği Maksimum Sıcaklık
T_{min}	: Büyümenin Gerçekleşmediği Minimum Sıcaklık
μ_{max}	: Spesifik Büyüme Oranını (1/saat); ve v Kritik Substratın Artış Oranı
y	: Belirli Zamandaki Mikrobiyal Yük
y₀	: Başlangıçtaki Mikrobiyal Yük (CFU/g veya CFU/mL)
y_{max}	: Maksimum Bakteri Konsantrasyonu

KISALTMALAR

CDC	: ABD Hastalık Kontrol ve Önleme Merkezi
CPM	: Kardinal Parametre Modeli
DÖ	: Derin Öğrenme
FA	: Gıda ve Tarım Örgütü
FDA	: Amerika Birleşik Devletleri Gıda ve İlaç Dairesi
FSSP	: Gıda Bozulma ve Güvenlik Tahmincisi
EHEC	: Kanlı İshal Yapan <i>E. coli</i> Türü
EVA	: Etilen Vinil Asetat
GAP	: Good Agricultural Practices (İyi Tarım Uygulamaları)
HACCP	: Tehlike Analizleri ve Kritik Kontrol Noktaları
IOT	: Nesnelerin İnterneti
MAP	: Modifiye Atmosfer Paketleme
MÖ	: Makine Öğrenmesi
NBPSDHU	: Kanada yerel sağlık otoritesi
OPP	: Yönlendirilmiş Polipropilen
PA-LDPE	: Poliamid-Düşük Yoğunluklu Polietilen
PE	: Polietilen
PHAC	: Kanada Halk Sağlığı Ajansı
PMP	: Patojen Modelleme Programı
PP	: Polipropilen
QMRA	: Kantitatif Mikrobiyal Risk Değerlendirmesi
TSB	: Tryptic Soy Broth
TTI	: Zaman-Sıcaklık Göstergeleri
USDA IPMP	: ABD Tarım Bakanlığı'nın Patojen Modelleme Programı
UV	: Ultravioye
WGS	: Whole Genome Sequencing (Tüm Genom Dizileme)
wgMLST	: Çok Lokuslu Genom Dizileme Yöntemi
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü
XLD	: Xylose Lysine Deoxycholate
YZ	: Yapay Zekâ

ÖZET

Bu çalışmada, doğranmış soğan üzerinde *Salmonella* spp.'nin farklı sıcaklık koşullarındaki büyüme ve inaktivasyon davranışı değerlendirilmiş, elde edilen veriler birincil ve ikincil matematiksel modellerle analiz edilmiştir. Deneysel bulgular, *Salmonella* spp.'nin 15–45°C aralığında belirgin şekilde çoğaldığını; buna karşılık 4°C, 7°C ve 10°C sıcaklıklarında ise bakteriyel büyümenin durduğu ve zamanla inaktivasyonun gerçekleştiğini göstermiştir. Özellikle 30–40°C aralığı hem büyüme oranı hem de maksimum hücre konsantrasyonu açısından *Salmonella* spp. için en elverişli sıcaklık aralığı olarak belirlenmiştir. Ancak 45°C'de bakteriyel büyüme oranının düştüğü ve sistemde stres etkilerinin ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.

Birincil modelleme kapsamında büyümenin gözlemlendiği sıcaklıklarda Baranyi modeli, inaktivasyonun gözlemlendiği düşük sıcaklıklarda ise log-linear model kullanılmıştır. Baranyi modelinin büyüme verileriyle yüksek düzeyde uyum sağladığı ve determinasyon katsayısının (R^2) 0,95–0,99 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Büyüme hızı (μ_{max}), sıcaklık arttıkça yükselmiş ve en yüksek değer 40°C'de (3,77 sa⁻¹) elde edilmiştir. Lag faz süresi (t_{lag}) ise sıcaklıkla ters orantılı olarak azalmış; 15°C'de 35 saate yakın olan lag süresi, 45°C'de yaklaşık 2,5 saate kadar düşmüştür. Maksimum bakteri konsantrasyonu (y_{max}) ise 30°C'de en yüksek düzeye ulaşmış (8,94 log kob/g) ve daha yüksek sıcaklıklarda düşüş göstermiştir. Log-linear modelle yapılan analizler, düşük sıcaklıklarda *Salmonella* spp.'nin inaktive olduğunu ve bu inaktivasyonun 4°C'de daha hızlı gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Özellikle D-değeri 4°C'de 53,81 saat olarak hesaplanmış, bu da *Salmonella*'nın düşük sıcaklıklarda daha kısa sürede 1 log birim azalabildiğini göstermiştir. Bu bağlamda 4°C, *Salmonella*'nın kontrolü açısından kritik bir sıcaklık noktası olarak öne çıkmıştır.

İkincil modelleme kapsamında ise Tam Ratkowsky karekök modeli kullanılarak büyüme hızının sıcaklığa bağlı değişimi modellenmiş ve modelin yüksek düzeyde uyum gösterdiği ($R^2 = 0,89$) belirlenmiştir. Bu model ile *Salmonella* spp.'nin büyüme gösterebildiği minimum sıcaklık (T_{min}) 7,09°C, maksimum sıcaklık (T_{max}) ise 45,25°C olarak tahmin edilmiştir. Ayrıca, lag faz süresi ve maksimum popülasyon düzeyi gibi parametreler farklı polinom modellerle açıklanmış; özellikle ters ikinci dereceden polinom kullanılarak sıcaklık ile lag fazı arasındaki ilişki mükemmel uyumla ($R^2 = 1,00$) modellenmiştir. Maksimum hücre konsantrasyonunun sıcaklığa karşı parabolik bir yanıt verdiği, optimum noktadan sonra ise düşüş eğilimine girdiği gözlemlenmiştir.

Genel olarak çalışma; doğranmış soğan gibi yüksek su aktivitesine sahip taze sebzelerin, uygun olmayan sıcaklıklarda *Salmonella* spp. için hızlı bir çoğalma ortamı oluşturabileceğini göstermektedir. Elde edilen model parametreleri, *Salmonella*'nın büyüme sınırlarının ve kinetik davranışlarının daha doğru tahmin edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu veriler; taze kesilmiş soğanların üretim, taşınma ve depolanma süreçlerinde mikrobiyal risklerin azaltılması açısından önem arz etmekte olup, gıda güvenliği politikalarının geliştirilmesinde doğrudan kullanılabilir niteliktedir.

Anahtar kelimeler: *Salmonella*, soğan, taze kesilmiş meyveler ve sebzeler, prediktif mikrobiyoloji, gıda güvenliği

ABSTRACT

Modeling of *Salmonella* Growth in Chopped Onions Stored at Various Temperatures

In this study, the growth and inactivation behavior of *Salmonella* spp. on diced onions under different temperature conditions was evaluated, and the data were analyzed using primary and secondary mathematical models. Experimental results showed that *Salmonella* spp. grew significantly within the temperature range of 15–45°C, whereas no growth was observed at 4°C, 7°C and 10°C, where inactivation occurred over time. The temperature range of 30–40°C was identified as optimal for *Salmonella* growth in terms of both growth rate and maximum population density. However, at 45°C, the growth rate declined, and stress effects were observed on the cells.

For primary modeling, the Baranyi model was applied to data where growth was observed, while the log-linear model was used to describe inactivation at lower temperatures. The Baranyi model demonstrated a good fit to the growth data, with determination coefficients (R^2) ranging between 0.95 and 0.99. The specific growth rate ($\mu_{\max}$) increased with temperature, reaching its peak value at 40°C (3.77 h⁻¹). The lag phase duration (t_{lag}) decreased with increasing temperature; while it was approximately 35 hours at 15°C, it shortened to about 2.5 hours at 45°C. The highest bacterial concentration ($y_{\max}$) was recorded at 30°C (8.94 log CFU/g), with a subsequent decrease at higher temperatures. Analysis with the log-linear model showed that inactivation occurred at lower temperatures, with the fastest inactivation observed at 4°C, where the D-value was calculated as 53.81 hours. This suggests that *Salmonella* can be more effectively controlled at lower temperatures, with 4°C being particularly critical for microbial safety.

For secondary modeling, the full Ratkowsky square root model was employed to describe the temperature dependence of the growth rate, achieving a high correlation ($R^2 = 0.89$). The model estimated the minimum and maximum growth temperatures for *Salmonella* spp. as ($T_{\min}$) 7.09°C and ($T_{\max}$) 45.25°C, respectively. In addition, the relationships between temperature and other parameters such as lag phase and maximum population density were modeled using polynomial equations. Notably, the inverse second-order polynomial used for lag time versus temperature showed perfect fit ($R^2 = 1.00$). The maximum population level exhibited a parabolic response to temperature, increasing up to an optimum point and then declining.

Overall, the study highlights that fresh-cut vegetables like diced onions, due to their high-water activity, can serve as a favorable environment for rapid *Salmonella* proliferation under improper temperature conditions. The derived model parameters allow for more accurate predictions of *Salmonella* growth limits and kinetic behavior. These findings are highly relevant for improving microbial risk assessments and informing food safety strategies in production, storage, and distribution of diced onions.

Keywords: *Salmonella*, onion, fresh cut fruits and vegetables, predictive microbiology, food safety

1. GİRİŞ

Gıda güvenliği, dünya genelinde önemli bir sorun oluşturmaktadır. Her yıl milyonlarca hastalık vakası ve ciddi salgın, gıda kaynaklı patojenlerden kaynaklanmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü'ne (WHO) göre, her yıl dünya genelinde yaklaşık her 10 kişiden biri kontamine olmuş gıdaların tüketimi sonucunda hastalanmakta ve bu durum 420.000'den fazla ölüme yol açmaktadır. Bu ölümlerin önemli bir kısmı, orantısız şekilde etkilenen çocukları kapsamaktadır; özellikle 5 yaş altı çocuklar arasında yılda yaklaşık 125.000 ölüm meydana gelmektedir (Schirone ve Visciano, 2021). Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'nde bakteriyel enterik patojenler, her yıl yaklaşık 9,4 milyon gıda kaynaklı hastalık vakasına, 55.961 hastaneye yatışa ve 1.351 ölüme yol açmaktadır (Scallan ve ark., 2011). ABD Hastalık Kontrol ve Önleme Merkezi'ne (CDC) göre, her yıl yaklaşık 48 milyon Amerikalı yani her altı kişiden biri, gıda kaynaklı hastalıklara yakalanmakta ve bu hastalıklar nedeniyle yaklaşık 3.000 kişi hayatını kaybetmektedir (Finger ve ark., 2019). Farklı gıda kategorileri arasında, taze ürünlerin gıda kaynaklı salgınlarda önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Örneğin, 2010 ile 2017 yılları arasında ABD'de etkeni ve kaynağı belirlenmiş toplam 413 taze ürün kaynaklı salgın bildirilmiş ve bu salgınlardan %36,8'i (152 vaka) birden fazla eyalette etkili olmuştur (Carstens ve ark., 2019). Özellikle son yıllarda ise salgınlarda *Salmonella* bakterisinin neden olduğu soğan kaynaklı salgınlara dikkat çekilmektedir (McCormic ve ark., 2022; Mitchell ve ark., 2024).

Soğan dünya genelinde yaygın olarak yetiştirilen bir tarımsal üründür. Hasat edilen soğanlar kurutularak, uygun koşullarda yaklaşık olarak 9 aya kadar depolanabilirler (Lieberman ve ark., 2015). Bu soğanlar çok çeşitli pişmiş tuzlu yemeklerde temel bir bileşen olarak, salatalarda garnitür ya da katkı maddesi şeklinde ve çiğ olarak et ürünlerinde çeşni olarak yaygın şekilde tüketilmektedir. Ticari olarak işlenmiş taze kesilmiş soğanlar; gıda hizmeti sektörüne yönelik olarak soyulmuş, dilimlenmiş, ince doğranmış, halka şeklinde kesilmiş veya püre formunda ve perakende pazarı için ise genellikle küp şeklinde doğranmış biçimlerde sunulmaktadır (Lieberman ve ark., 2015). Yapılan bir çalışmada taze kesilmiş kuru soğanların raf ömrü, uygun depolama sıcaklığında (4°C) ve modifiye atmosfer ambalajlama (%2 O₂ ve %10 CO₂ içeren atmosfer) ile yaklaşık 14 güne kadar uzatılabilmektedir (Blanchard ve ark., 1996).

Soğanlar biyoaktif bileşiklerce zengin sebzelerdir (Ren ve Zhou, 2021). Soğanların özellikle kuersetin ve kaempferol gibi yüksek flavonol içeriklerine sahip olduğu bilinmektedir (Ignat ve ark., 2011). Dört farklı soğan rengi üzerinde yapılan bir

karşılaştırma, kırmızı soğanların en yüksek düzeyde kuersetin ve kaempferol içerdiğini göstermiştir (Prakash ve ark., 2007). Ayrıca, bu bileşiklerin özellikle kabuklarda yenilebilir kısımlara göre daha yoğun bulunduğu ve kabukların toprak mikroorganizmalarına karşı antimikrobiyal etki gösterdiği belirlenmiştir (Sagar ve ark., 2020). Soğandaki fitokimyasallar uygulanan işlem türüne, bu işlemin süresine ve depolama koşullarına bağlı olarak bozulabilir veya değişime uğrayabilir (Islek ve ark., 2015). Bu fenolik bileşiklerin çoğu antimikrobiyal özelliktedir ve özellikle *Salmonella* gibi patojenlerin kontaminasyon durumunda hayatta kalmasını engelleyen doğal bir savunma mekanizması olarak değerlendirilmektedir (Emch ve Waite-Cusic, 2016). Nitekim gıda kaynaklı salgınlar ve ürün geri çağırımları incelendiğinde, soğanların diğer tarımsal ürünlere kıyasla daha az sıklıkla bu tür olaylarla ilişkilendirildiği görülmektedir. Bu bileşiklerin Gram-negatif bakterilere karşı antimikrobiyal etkileri; hücre zarlarıyla elektrostatik ve iyonik etkileşimlere girerek sitoplazmaya pasif difüzyon yoluyla ulaşmaları ve burada asidifikasyon ve hücre ölümüne neden olmalarıyla açıklanmaktadır (Emch ve Waite-Cusic, 2016; Mitchell ve ark., 2024).

Genellikle kuru koşullarda işlenen soğanlarda su kullanılmaz veya eklenmez. Ancak bu kuruluğa rağmen, *Salmonella* gibi patojenlerle kontamine olabilirler. Kurutulmuş ortamlarda artan ısı direnci sayesinde *Salmonella* uzun süre hayatta kalabilir (Kiplagat ve ark., 2025). Örneğin, 2020 yılında ABD'de yaşanan ve *Salmonella* Newport kaynaklı olan salgın, 1127 hastalık ve 167 hastane yatışıyla son 30 yıldaki en büyük üç *Salmonella* salgınından biri olmuştur. Bu salgında ölüm yaşanmamış, ancak kontaminasyonun kuru paketlenme tesisindeki yetersiz protokollerden kaynaklanmış olabileceği belirlenmiştir (McCormic ve ark., 2022). Benzer şekilde 2021 yılında Meksika'nın Chihuahua bölgesinden ithal edilen soğanlar, ABD'nin 39 eyaletinde 1040 hastalık ve 260 hastaneye yatışa yol açarak *Salmonella* Oranienburg ile ilişkilendirilmiştir (Mitchell ve ark., 2024). Son olarak, ABD'de 2023 yılında doğranmış soğanlardan kaynaklı *Salmonella* enfeksiyonu vakası rapor edilmiş ve 23 eyalette 18 kişi hastanelik olmuştur. Bu vaka sonunda bir ölüm rapor edilmiştir (CDC, 2025). Bu vakaların ayrıntılı analizi, güçlü antimikrobiyal bileşiklerin varlığına rağmen, *Salmonella* bakterisinin soğanlarda yaşayabildiğini göstermiştir. Artan sayıda araştırma taze kesilmiş ürünlerin ticari taşımacılık, perakende depolama ve teşhir süreçleri sırasında uygun olmayan sıcaklıklara maruz kalabileceğini ortaya koymaktadır (Canatan ve ark., 2025; Carrasco ve ark., 2007; McKellar ve ark., 2014; Zeng ve ark., 2014). Bir çalışmada Japonya'da marulun işletmeden perakende noktasına taşınması sırasında iç sıcaklığının 3°C ile 15°C arasında değiştiği rapor edilmiştir

(Koseki ve Isobe, 2005). Ayrıca taze kesilmiş ürünlerin perakende koşullarında depolanması ve teşhiri sırasında sıcaklık yönetiminin yetersiz olduğuna dair bulgular da literatürde yer almaktadır (Brown ve ark., 2016; McKellar ve ark., 2012, 2014). Örneğin, ABD'deki çeşitli perakende noktalarında yapılan bir çalışmada, perakende depolamada sıcaklıkların 0,6°C ile 15,4°C, teşhir sırasında ise -1,1°C ile 9,7°C arasında değiştiği raporlanmıştır (Brown ve ark., 2016). Bu çalışmalar taze veya taze kesilmiş ürünlerin taşınması, depolanması ve teşhiri sırasında uygun olmayan sıcaklıklara maruz kaldığını göstermektedir. Bu nedenle, sıcaklık değişimlerinin bu ürünlerdeki *Salmonella* konsantrasyonu üzerindeki etkisinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Prediktif mikrobiyoloji; gıdanın işlenmesi, taşınması, reyonlarda tüketiciye sunulması ve depolama süreçleri sırasında patojen mikroorganizmaların rolünü anlamak amacıyla mikroorganizmaların gelişimini, yaşamını ve inaktivasyonunu matematiksel modeller kullanarak araştırmasıdır. Matematiksel modeller kullanılarak mikroorganizmaların davranışları belli şartlara (gıdanın iç değişkenleri veya çevresel faktörler) bağlı olarak tahmin edilmektedir (Tarlak, 2023). Sıcaklık, mikroorganizmaların gelişimini etkileyen başlıca faktörlerden biridir. Özellikle zamana bağlı olarak değişen sıcaklık profillerinin (izotermal olmayan koşullar) söz konusu olduğu durumlarda, gıda sistemlerinde patojenlerin popülasyon dinamiklerini tahmin edebilmek için dinamik modellerden yararlanılmaktadır. Bu tür bir dinamik modelin oluşturulabilmesi için öncelikle çeşitli izotermal koşullar altında mikrobiyal popülasyon düzeylerini tahmin etmeye yönelik birincil modeller geliştirilir. Ardından, ikincil modeller kullanılarak sıcaklık gibi çevresel faktörlerin, birincil model parametreleri üzerindeki etkisi açıklanır. Son aşamada ise birincil ve ikincil modellerin entegrasyonu yoluyla, izotermal olmayan koşullarda mikrobiyal popülasyonların sayısal olarak tahmin edilmesini sağlayan dinamik model inşa edilir (Puerta-Gomez ve ark., 2013).

Bu tezin temel amacı; patojenik bir bakteri olan *Salmonella*'nın doğranmış taze kuru soğanlara inokulasyonu sonrasında, farklı sıcaklık koşullarında depolama süresince gösterdiği gelişim ve inaktivasyon kinetiklerini incelemektir. Elde edilen deneysel veriler doğrultusunda, *Salmonella*'nın doğranmış taze kuru soğanlar üzerindeki büyümesini ve inaktivasyonunu tahmin etmeye yönelik matematiksel büyüme ve inaktivasyon modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modeller, kesilmiş taze kuru soğanlarda *Salmonella* bakterisinin davranışlarının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlarken, aynı zamanda mikrobiyolojik gıda güvenliği risklerinin değerlendirilmesinde de önemli bir analitik araç olarak işlev görecektir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Soğan

Soğan (*Allium cepa* L.), içerdği zengin bileşenler nedeniyle yalnızca mutfakta yaygın bir kullanım alanına sahip olmakla kalmayıp, aynı zamanda sağlık açısından çeşitli potansiyel faydalar sunan bir sebzedir (Stoica ve ark., 2023). Soğanın temel kimyasal bileşenleri; su (%89,1), karbonhidratlar (%9,3), protein (%1,1), yağ (%0,1), vitaminler, mineraller, kükürt bileşikler, saponinler ve flavonoidlerdir (Lee ve ark., 2008). Bu bileşenlerin oranları doğranmış formda da benzerlik göstermekte olup, soğanın işlenmiş halleri de dikkate alınarak analiz edilmiştir. Soğanın sağlık üzerindeki olumlu etkileri, büyük ölçüde içerdği biyoaktif bileşiklerle ilişkilidir. Başlıca üç grupta toplanan bu bileşenler; çözünür karbonhidratlar (örneğin fruktooligosakkaritler ve polisakkaritler), kükürt bileşikler (özellikle tiyosülfınatlar) ve fenolik bileşiklerdir (örneğin flavonoidler). Bu gruplar arasında flavonoidler, özellikle antioksidan aktiviteleriyle ön plana çıkmaktadır. Literatürde yer alan bulgulara göre, günlük 10 gram soğan tüketimi yaklaşık 4 mg kuersetin sağlamaktadır; bu miktar, yetişkinler için önerilen günlük E vitamini alımı (8–10 mg/gün) ile karşılaştırılabilecek düzeydedir (Ewald ve ark., 1999).

Soğanda bulunan bu biyoaktif bileşiklerin sağlık üzerindeki potansiyel etkileri oldukça çeşitlidir. Antikarsinogenik, antikolesterik, antidepresan, antidiyabetik, antifungal, antienflamatuar, antimikrobiyal, antiosteoporoz, antioksidan, hipotansif ve antispazmodik aktivitelerin yanı sıra bu bileşiklerin bakır, demir ve çinko gibi bazı minerallere karşı da yüksek afinite gösterdiği belirtilmektedir (Ren ve Zhou, 2021; Sagar ve ark., 2022; Umer ve ark., 2024). Ayrıca, kırmızı soğanların sarı soğanlara kıyasla daha yüksek radikal temizleme aktivitesine sahip olduğu da literatürde ifade edilmektedir (Chernukha ve ark., 2022). Bununla birlikte; soğanda yer alan birçok biyoaktif bileşiğin termal olarak kararsız yapıda olduğu göz önünde bulundurulduğunda, bu bileşiklerin maksimum düzeyde fayda sağlayabilmesi için soğanın çiğ olarak tüketilmesi ya da yalnızca hafif pişirme yöntemleriyle hazırlanması önerilmektedir (Cattivelli ve ark., 2023; Jin ve ark., 2024).

Gıda ve Tarım Organizasyonu (FAO, 2025) verilerine göre, 2010–2023 yılları arasında incelenen ülkelerde soğan üretiminde genel olarak artış eğilimi gözlemlenmektedir (Tablo 2.1). Özellikle Hindistan, bu dönemde açık ara en yüksek üretim seviyelerine ulaşan ülke olmuştur. 2010 yılında 15.118.000 ton olan Hindistan'ın üretimi, 2023 yılına gelindiğinde 30.208.000 tona ulaşarak yaklaşık iki kat artmıştır. Bu, Hindistan'ın küresel soğan

üretimindeki liderliğini açıkça ortaya koymaktadır. Avrupa Birliği ülkeleri (27 ülke toplamı) için üretim yıllar içinde dalgalı bir seyir izlemiş, ancak genel eğilim yukarı yönlü olmuştur. 2010 yılında 5.280.803 ton olan üretim, 2021 yılında 7.276.800 ton ile en yüksek seviyeye ulaşmış, 2022 yılında düşüş yaşansa da 2023'te yeniden 6.399.000 tona yükselmiştir. Avrupa ülkelerinde üretimdeki bu değişkenlik, iklim koşulları ve tarım politikaları ile ilişkili olabilir. Benzer şekilde, Mısır'ın soğan üretiminde de dikkate değer bir artış görülmektedir. 2010 yılında 2.208.078 ton olan üretim, yıllar içinde dalgalı bir seyir izleyerek 2023 yılında 3.804.077 tona ulaşmıştır. Özellikle 2020 sonrası dönemde üretimdeki artış dikkat çekicidir. Bu artış, Mısır'ın soğan ihracatındaki büyüme stratejilerinin bir yansıması olabilir. ABD'nin soğan üretiminde ise istikrarlı bir yapı göze çarpmaktadır. 2010 yılında 3.338.380 ton olan üretim, 2023'te 3.315.421 ton olarak kaydedilmiş ve üretim miktarlarında büyük dalgalanmalar yaşanmamıştır. ABD'nin soğan üretiminde stabil bir üretim politikası benimsediği anlaşılmaktadır. Türkiye'nin soğan üretimi ise dönemsel dalgalanmalar göstermiştir. 2010 yılında 1.900.000 ton olan üretim, 2013 ve 2014 yıllarında düşüş göstermiş, 2016 sonrasında yeniden artış eğilimine girmiştir. 2021 yılında 2.500.000 ton üretime ulaşan Türkiye, 2023 yılında 2.600.000 ton üretim ile son yılların en yüksek seviyesine ulaşmıştır. Sonuç olarak, Hindistan açık farkla en büyük üretici ülke konumundadır. Avrupa Birliği ve Mısır'ın üretimlerinde de artış eğilimi gözlemlenirken, ABD'nin üretimi durağan kalmıştır. Türkiye ise üretimde istikrarsız bir görünüm sergilese de son yıllarda yükselme eğilimi göstermektedir.

Tablo 2.1. 2010–2023 Yılları arasında seçilmiş ülkelerde kuru soğan üretim miktarları (ton; FAO, 2025)

Ülke/Yıl	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Hindistan	15118000	17511090	16813000	19299000	19401680	18927000	20931000
Avrupa Birliği (27 ülke)	5280803	6159417	5506665	5377343	6043778	5853282	6211655
Mısır	2208078	2304207	2024881	1093230	2505189	3049607	2458618
ABD	3338380	3360970	3242940	3159350	3166740	3413100	3800670
Türkiye	1900000	2141373	1735857	1904846	1790000	1879189	2120581
Ülke/Yıl	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Hindistan	22427000	23262000	22819000	26091000	26641000	31687000	30208000
Avrupa Birliği (27 ülke)	6380423	5485120	6600160	6716500	7276800	6259260	6399000
Mısır	2965218	3067214	3077316	3199250	3575245	3716485	3804077
ABD	3737100	3284420	3170271	3353500	3295100	3178368	3315421
Türkiye	2175911	1930695	2200000	2280000	2500000	2350000	2600000

Soğan ürünleri genel olarak üç ana kategoriye ayrılmaktadır; taze tüketime yönelik pazarlık soğanlar, gıda işleme endüstrisinde kullanılan kurutulmuş soğanlar ve uçucu yağ üretimi amacıyla yetiştirilen soğanlar (Wiczowski, 2018). Soğan, gastronomide yaygın kullanım alanına sahip olmasının yanı sıra, besin öğeleri ve sağlığı destekleyici biyoaktif bileşikler açısından da önemli bir kaynaktır (Mitchell ve ark., 2024). Taze doğranmış soğan kategorisinde; bütün, soyulmuş, küp şeklinde doğranmış, dilimlenmiş, ince doğranmış veya püre haline getirilmiş ürünler yer almaktadır. Soğanın tüketim amacı doğrultusunda hafif ya da keskin tat profiline sahip çeşitleri tercih edilebilmektedir (Bahram-Parvar ve Lim, 2018). Hafif tat profiline sahip soğanlar genellikle baharat veya pişmiş sebze olarak tüketim için uygunken soslar, konserve çorbalar ve özütler gibi işlenmiş ürünlerde daha keskin tat özelliklerine sahip çeşitler için soğan tercih edilmektedir (Liu ve ark., 2022).

Taze soğanların kesilmesi, dokuya verilen mekanik zarar nedeniyle birçok biyokimyasal reaksiyonu tetiklemekte ve bu durum ürünün raf ömrü boyunca kalite değişimlerine yol açmaktadır (Liu ve ark., 2022). Bu bağlamda, taze kesilmiş soğanların kalitesinin raf ömrü süresince dikkatle izlenmesi gerekmektedir. Ayrıca, mikrobiyal bozulma ve özellikle patojenik mikroorganizmaların çoğalmasıyla ilişkili olası gıda kaynaklı hastalık salgınlarını önlemek amacıyla, taze doğranmış soğanlarla ilişkili mikrobiyal risklerin en aza indirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bozulmuş dokularda besin maddelerinin artan erişilebilirliği ve taşıma sürecinde yaşanabilecek sıcaklık dalgalanmaları, taze kesilmiş ürünlerin mikrobiyal güvenliğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle üretimden tüketime kadar geçen süreçte — yani çiftlikten sofraya kadar — üreticiler, işleyiciler, perakendeciler ve tüketiciler için mikrobiyal güvenlik, temel bir halk sağlığı endişesi haline gelmiştir (Mitchell ve ark., 2024; Yemmireddy ve Mancias, 2025).

Günümüzde; havuç, marul, yapraklı sebze karışımları, pancar, brokoli, lahana ve karnabahar gibi çeşitli taze kesilmiş sebzeler; bireysel olarak paketlenmiş birimler veya karışık sebze torbaları formatında ticari olarak pazarda yer almaktadır. Ancak taze kesilmiş soğan ürünlerinin pazar potansiyeli, bu diğer sebze türlerine kıyasla yeterince değerlendirilmemiştir. Taze kesilmiş soğanlar, kesme işlemi sırasında ortaya çıkan ve çoğu tüketici tarafından rahatsız edici bulunan göz yaşartıcı ve keskin uçucu bileşikler nedeniyle tercih edilmemektedir. Ayrıca elle temas sırasında soğanın kalıcı kokusu ciltte uzun süre hissedilebilmekte, bu durum tüketici konforunu olumsuz yönde etkilemektedir (Bahram-Parvar ve Lim, 2018). Bu tür olumsuzluklardan dolayı hazır formda pazarlanan soğan ürünlerinde daha pratik kullanım imkânı sunması nedeniyle tüketimine talep giderek

artmaktadır. Bu ürünler özellikle kullanım kolaylığı, zaman tasarrufu ve gelişmiş tüketici deneyimi açısından önemli avantajlar sunmakta ve bu bağlamda pazar açısından kayda değer fırsatlar barındırmaktadır (Berno ve ark., 2014; Khade ve ark., 2023; Liu ve Li, 2006; Siddiq ve ark., 2013).

Amerika Birleşik Devletleri'nde gıda hizmeti sektörü ve perakende pazarında satılan soğanların yaklaşık %20'sinin taze kesilmiş veya işlenmiş formlarda olduğunu göstermektedir (Bahram-Parvar ve Lim, 2018). Bu eğilimden daha fazla faydalanabilmek amacıyla, son ürünün tüketim alışkanlıkları ve hedef kullanım alanları dikkate alınarak; ürünün fiziksel formu (örneğin küp, dilim veya parçalanmış), üretim sürecindeki birim operasyonlar, muhafaza yöntemleri ve uygun ambalajlama stratejileri dikkatle belirlenmelidir. Ayrıca, ürün kalitesini ve ekonomik verimliliği maksimize edebilmek için soğanın fizyolojik ve biyokimyasal özelliklerinin de göz önünde bulundurulması büyük önem taşımaktadır (Berno ve ark., 2014).

2.2. Soğanla İlişkili Gıda Kaynaklı Hastalık Salgınları

Soğan (*Allium cepa* L.), dünya genelinde en yaygın tüketilen sebzelerden biri olup, uzun bir tarımsal üretim geçmişine ve hem mutfak hem de geleneksel tıbbi uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir (Zhao ve ark., 2021). Genellikle bütün halde ticareti yapılan soğanlar, fiziksel dayanıklılıkları ve uzun raf ömürleri sayesinde tedarik zincirinde avantaj sağlamaktadır (Kiran ve ark., 2024; Muhie, 2022). Buna karşılık, son yıllarda taze kesilmiş soğanlar; pratiklik, zaman tasarrufu ve önceden hazırlanmış gıdalara yönelik artan tüketici talebi gibi nedenlerle perakende ve gıda hizmeti sektörlerinde giderek daha fazla tercih edilmektedir (Bahram-Parvar ve Lim, 2018; Liu ve ark., 2022).

Ancak taze kesilmiş sebzeler özellikle hijyenik olmayan koşullarda işlendiğinde ve uygun sıcaklıkta muhafaza edilmediğinde, gıda kaynaklı patojenlerle kontaminasyona açık hale gelmektedir (Du ve ark., 2024; Malahlela ve ark., 2024; Santos ve ark., 2023). Bu durum soğanlar için de geçerli olup, çeşitli gıda kaynaklı hastalık salgınlarında önemli rol oynamıştır. Örneğin; ABD'nde bir restoran zincirinde sunulan taze ve dilimlenmiş soğanlar, *Escherichia coli* O157:H7 kaynaklı bir salgında yaklaşık 104 hastalık, 34 hastaneye yatış ve 1 ölüm ile ilişkilendirilmiştir (CDC, 2025). Benzer şekilde, Kanada'da bir restorandan temin edilen taze kesilmiş soğanlar da bir *E. coli* O157:H7 salgınıyla ilişkilendirilmiştir (Lieberman ve ark., 2021). Ayrıca 2012 yılında, *Listeria monocytogenes* izolasyonunun ardından taze kesilmiş soğanlar geri çağırılmış; ancak söz konusu kontaminasyona bağlı

herhangi bir listeriosis vakası bildirilmemiştir (Goetz, 2013). Doğranmış soğan içeren dondurulmuş sebze karışımları *Listeria monocytogenes* kaynaklı listeriosis salgınında rol oynamıştır (Siegener, 2016). Beyaz, sarı ve kırmızı soğan türleri ise ABD genelinde çok sayıda eyaleti etkileyen bir *Salmonella* salgınına neden olmuştur (Mitchell ve ark., 2024).

Daha önceki yıllarda da benzer halk sağlığı olayları yaşanmıştır. 1983 yılında, patty melt olarak bilinen sandviç türünü tükettikten sonra 28 birey A tipi botulizme yakalanmıştır. Olayın ardından yapılan mikrobiyolojik analizlerde, restoranda kalan çiğ soğan örneklerinden *Clostridium botulinum* izole edilmiştir. İlgili soğanların, margarinle sotelenmeden önce uzun süre ızgaranın arkasında bekletildiği ve sonrasında sandviç süsü olarak kullanıldığı belirlenmiştir. Bu işlem zincirinin, *C. botulinum*'un gelişimi ve toksin üretimi için sıcak, yüksek su aktivitesine sahip ve anaerobik koşullar sağladığı rapor edilmiştir (MacDonald ve ark., 1985).

Benzer şekilde; 2008 yılında Kanada'nın Ontario eyaletine bağlı North Bay kentindeki bir fast-food restoran zincirinde, *Escherichia coli* O157:H7'nin sebep olduğu toplamda 235 vaka bildirilmiştir (Lieberman ve ark., 2021) Vaka-kontrol analizleri, salgının en olası kaynağının, hamburgerlerde garnitür olarak kullanılan pişmemiş doğranmış soğanlar olduğunu ortaya koymuştur. Bu soğanlar, restoranda bütün halde elle soyulmuş; kesme tahtası, bıçak ve koruyucu kesme eldiveni ile işlendikten sonra, metal bir doğrayıcı kullanılarak doğranmış ve doğrudan plastik saklama kaplarında muhafaza edilmiştir. Her ne kadar kontaminasyonun kaynağı kesin olarak doğrulanamamış olsa da araştırmacılar, soğan doğrayıcısının yetersiz ve düzensiz temizliğinin, doğrama işlemi sırasında mikrobiyal bulaşmaya neden olmuş olabileceğini belirtmiştir. Ayrıca, doğranmış soğanların buzdolabında toplu şekilde saklandığı, gün içinde garnitür istasyonlarındaki küçük kaselere aktarıldığı ve bu kaselerin oda sıcaklığında tutulduğu rapor edilmiştir. Bu uygulamalar, mikrobiyal çoğalma için elverişli ortamlar oluşturarak patojenik bakterilerin yayılmasına katkıda bulunmuştur (NBPSDHU, 2009).

Temmuz 2020'de Kanada genelinde *Salmonella* Newport enfeksiyonları ile ilişkili geniş çaplı bir salgın üzerine epidemiyolojik bir soruşturma başlatılmıştır (PHAC, 2020). Soruşturma kapsamında, tüm genom dizileme (Whole Genome Sequencing- WGS) yöntemi kullanılarak farklı eyaletlerde vakalar tespit edilmiştir. Maruziyet verileri, vaka görüşmeleri aracılığıyla toplanırken; geri izleme araştırmaları, ilgili makbuzlar, faturalar, ithalat belgeleri ve restoran menüleri kullanılarak yürütülmüştür. Toplamda yedi eyalette, alel farkı ile tanımlanan 0-6 tüm genom çok lokuslu dizi tipleri (wgMLST) aracılığıyla birbirleriyle ilişkili 515 vaka doğrulanmıştır. Vakaların yaş ortalaması 40 olarak belirlenmiş

(yaş aralığı: 1–100), %54’ü kadın, %19’u hastaneye yatırılmış ve üç ölüm vakası rapor edilmiştir. (Denich ve ark., 2024) Salgının yayılımı; restoranlar, perakende satış noktaları ve toplu yaşam alanlarını içeren 48 konuma özgü vaka kümelerinde gözlemlenmiştir. Maruz kalma verilerine sahip 414 vakanın %71’i, hastalık başlamadan önceki bir hafta içinde soğan tükettiklerini belirtmiş; soğan tükettiğini bildiren vakaların %80’i ise özellikle kırmızı soğan tüketimini ifade etmiştir. Geri izleme analizleri sonucunda, vakaların büyük çoğunluğunun ABD, Kaliforniya menşeli bir üretici’ye ait kırmızı soğanlarla temas ettiği tespit edilmiştir. Her ne kadar soruşturma kapsamında test edilen gıda ve çevresel örneklerde *Salmonella* izole edilememiş olsa da epidemiyolojik ve lojistik geri izleme verileri, kırmızı soğanların salgının muhtemel kaynağı olduğunu güçlü bir şekilde işaret etmektedir (Denich ve ark., 2024). Son olarak 2023 yılında, ABD Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) ile Hastalık Kontrol ve Önleme Merkezi CDC), eyalet ve yerel sağlık otoriteleriyle iş birliği içinde, geri çağrılan doğranmış sarı soğanlarla bağlantılı bir *Salmonella* enfeksiyonu salgını araştırılmıştır. Soruşturma kapsamında FDA, söz konusu doğranmış soğanları tedarik eden üretim çiftliğinden çok sayıda su, çevresel yüzey ve ürün örneği toplamıştır. Bu örneklerden altısı —üç su ve üç çevresel örnek— *Salmonella* spp. açısından pozitif bulunmuştur. Tüm Genom Dizileme (WGS) analizleri, üç pozitif örnekte tespit edilen *Salmonella* izolatlarının, salgında enfeksiyona neden olan suşlarla genetik olarak eşleştiğini doğrulamıştır. Söz konusu salgın kapsamında, ABD genelinde 23 eyalette toplam 80 enfeksiyon vakası rapor edilmiştir. Bu vakaların 18’i hastaneye yatışla sonuçlanmış ve bir ölüm gerçekleşmiştir (Graham-Glover ve ark., 2025).

2.3. Soğanların Hasat Öncesi Kontaminasyonunu Etkileyen Faktörler

Taze ürünlerin üretim zincirindeki açık yapı, bu ürünleri *Salmonella* spp. ve diğer patojenlerle kontaminasyona karşı savunmasız hale getirmektedir. Çeşitli çalışmalar; su, toprak, hava, biyolojik girdiler, rüzgâr ve yabani hayvanların aktiviteleri gibi birçok çevresel faktörün potansiyel kontaminasyon kaynakları olduğunu ortaya koymuştur (Botondi ve ark., 2021; Muhie, 2022; Wang ve Teplitski, 2023; Yemmireddy ve Mancias, 2025). Üretim sürecinde, özellikle yetiştirme ve hasat aşamalarında kontaminasyonu önlemek en etkili yöntem olsa da bu her zaman uygulanabilir değildir (Raffo ve Paoletti, 2022). Bu bağlamda, İyi Tarım Uygulamaları (Good Agricultural Practices – GAP), özellikle hasat öncesi dönemde kontaminasyon riskinin azaltılması açısından önemli bir araç olarak kabul edilmektedir (Devarajan ve ark., 2023). Ancak çevresel patojenlerin uzun

süre hayatta kalabildiği ve geniş alanlara yayılabildiği bilinmektedir (Savitha ve ark., 2022; Rood ve ark., 2025; Yemmireddy ve Mancias, 2025).

Sulama suyu; nehirler, göller, yağmur suyu, kuyulardan çekilen yeraltı suyu, geri dönüştürülmüş atık su veya içme suyu gibi farklı doğal kaynaklarından temin edilebilir (Islam ve ark., 2005; Emch ve Waite-Cusic, 2016; Gurtler ve Gibson, 2022). Bu sular, *Salmonella* spp., *Escherichia coli* ve *Listeria monocytogenes* gibi patojen mikroorganizmalar için potansiyel bir taşıyıcı olarak işlev görür ve dolayısıyla taze ürünlerde mikrobiyal kontaminasyon açısından önemli bir risk faktörü teşkil eder (Alegbeleye ve Sant'Ana, 2021; Gerdes ve ark., 2022). Örneğin Duffy ve ark., (2005) Teksas'ta toplanan sulama suyu örneklerinin %9,4'ünde *Salmonella* izolatu tespit etmiştir. Holvoet ve ark., (2014) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise sera üretim alanlarına kıyasla açık tarla çiftliklerinden alınan sulama suyu örneklerinde *Salmonella* spp., *Campylobacter* spp. ve enterohemorajik *E. coli* (EHEC) izolatlarının daha yaygın olduğu rapor edilmiştir (%46,7'ye karşı %12,0). Amerika Birleşik Devletleri'nde çiftliklerin %50'sinden fazlası sulama için kuyulardan çekilen yeraltı suyunu kullanmaktadır (Sahu ve Pradhan, 2024). Yeraltı suyunun mikrobiyolojik kalitesi, suyun çekildiği derinliğe bağlı olarak değişiklik gösterebilir; yüzeyden daha derin kaynaklardan alınan su genellikle daha güvenlidir çünkü patojenlerin filtrelene ve inaktivasyon süresi daha uzundur (Alsalah ve ark., 2015; Lee ve ark., 2017). Ancak yine de patojen varlığı, özellikle sığ yeraltı suyu katmanlarında ve yüzeye yakın kuyularda tespit edilebilmektedir (Duffy ve ark., 2005; Lee ve ark., 2017). Yüzey sularında örneğin; dereler, nehirler, göller ve göletlerden sağlanan sulama suları ise özellikle hayvan dışkısı, yaban hayatı, insan atıkları ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan atıklarla kontaminasyon riski taşımaktadır (Leifert ve ark., 2008; Pachepsky ve ark., 2014). Hayvan dışkıları, bu tür yüzey sularındaki patojenlerin başlıca kaynakları arasında yer almaktadır (Liu ve ark., 2018; Rock ve ark., 2019). Ayrıca gübreli tarlalardan gelen yüzey akışı, otlak alanlardan sızan atıklar, gübre lagünlerinden taşmalar, kanalizasyon sistemlerinden gelen atık su ve arızalı septik sistemlerden kaynaklanan sızıntılar, yüzey suyu kaynaklarının kirlenmesine neden olan başlıca dolaylı yollardır (Akinde ve ark., 2016; Uyttendaele ve ark., 2015).

Sulama yönteminin türü de ürünlerin kontaminasyon riski üzerinde doğrudan etkilidir. Üstten püskürtme, damla sulama veya karıklarla su basma gibi farklı sulama tekniklerinin, patojenlerin ürünlere geçiş oranları üzerinde farklı etkileri bulunmaktadır. Üstten püskürtme ve taşkın sulama sistemleri, patojen içeren suyun doğrudan yenilebilir ürün yüzeyleri ile temas etmesine neden olarak kontaminasyon riskini artırmaktadır.

Örneğin; Solomon ve ark., (2002) *E. coli O157:H7* içeren su ile üstten püskürtme yapılan marullarda %90 oranında kontaminasyon tespit ederken, yüzey sulama uygulanan bitkilerde bu oran %19'da kalmıştır. Ayrıca, hasat sonrası 200 ppm klor ile yapılan dezenfeksiyon işlemine rağmen, üstten püskürtme sulanan bitkilerin %73'ü ve yüzey sulananların %6'sı hâlâ pozitif çıkmıştır. Stine ve ark., (2005) ise kavun ve marul bitkilerinde, karık sulama ile yapılan sulamalarda damla sulamaya kıyasla daha yüksek *Salmonella* kontaminasyon seviyelerini bildirmiştir. Diğer bir çalışmada, *E. coli O157:H7* ile kontamine edilmiş sulama suyu, püskürtme yöntemiyle soğan sulamada kullanılmış ve bu patojenin toprakta 154-196 gün, soğanda ise 74 ile 164 gün yaşadığı tespit edilmiştir (Islam ve ark., 2005).

Organik gübreler, özellikle hayvansal kaynaklı olanlar (örneğin, çiftlik gübresi), patojen mikroorganizmalarla kontamine olabilmekte ve bu patojenlerin çevresel koşullarda veya tarımsal ürünler üzerinde yaşamlarını sürdürmelerine ya da çoğalmalarına olanak tanıyabilmektedir (Sharma ve Reynnells, 2018). Bu tür gübreler, taze sebze ve meyve üretiminde önemli bir rol oynamaktadır; zira organik madde ve temel besin elementleri sağlayarak toprak kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunurlar. Park ve ark., (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, incelenen 955 çiftçinin 795'inin gübre kullandığı ve bu üreticilerin yaklaşık %60'ının sığır gübresini tercih ettiği bildirilmiştir. Literatürde, *Salmonella* spp. ve *E. coli* gibi patojenlerin gübre örneklerinden izole edildiği ve bu mikroorganizmaların yaygınlığının hayvan türüne göre değişiklik gösterdiği ortaya konmuştur (Black ve ark., 2021; Sharma ve Reynnells, 2018). Looper ve ark., (2009) ABD'nin güneybatı bölgesindeki aynı çiftlikten farklı mevsimlerde toplanan sağlıklı sığır dışkı örneklerinde *Salmonella* dağılımının %1,7 ile %92 arasında değiştiğini bildirmiştir. Wasilenko ve ark., (2014) ise, 19 farklı eyaletten toplanan 188 örneğin %10'unda *Salmonella* tespit edildiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular gübrenin, içerdiği patojen mikroorganizmalar nedeniyle, özellikle taze ürünlerin üretiminde potansiyel bir kontaminasyon kaynağı olabileceğini göstermektedir (Sharma ve Reynnells, 2018; Uyttendaele ve ark., 2015).

Gübre ve gübre ile zenginleştirilmiş topraklardaki patojenlerin hayatta kalma süreleri; sıcaklık, pH, yerel mikrobiyal flora, lif içeriği ve havalandırma gibi çeşitli çevresel faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterebilir (Devarajan ve ark., 2023; Sharma ve Reynnells, 2018). Birçok çalışmada *E. coli O157:H7* ve *Salmonella* gibi zoonotik patojenlerin, düşük sıcaklıklarda uzun süre canlı kalabildiği rapor edilmiştir. Semenov ve ark., (2007) *E. coli O157:H7*'nin sığır gübresinde 22°C ve 30°C'de 49 gün, 5°C'de ise 70

günden fazla hayatta kalabildiğini göstermiştir. Hutchison ve ark., (2007) gerçekleştirdiği başka bir çalışmada, 35,000 litrelik tanklarda depolanan taze hayvan atıklarında (sığır ve domuz gübresi, içilemez su ile birlikte), *Listeria*, *Salmonella* ve *E. coli O157:H7*'nin canlılık sırasının *Listeria* <*Salmonella*<*E. coli O157:H7* şeklinde olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde Nicholson ve ark., (2005) bu patojenlerin katı gübrede 2 ila 32 gün arasında canlı kalabildiğini ve katı formda *Listeria*<*Salmonella*<*E. coli O157:H7* sıralamasının gözlemlendiğini, sıvı gübrede ise bu sıralamanın *Salmonella*<*Listeria*<*E. coli O157:H7* olarak değiştiğini belirtmiştir. Öte yandan Winfield ve Groisman, (2003) *Salmonella* türlerinin *E. coli O157:H7*'ye kıyasla çevresel streslere (örneğin, kuruma, tuzluluk) daha dayanıklı olduklarını ve bu nedenle hayvansal konak dışındaki ortamlarda daha uzun süre hayatta kalabildiklerini ifade etmiştir. Birçok çalışma, yüksek düzeyde patojenle kontamine gübre kullanılarak yetiştirilen ürünlerin bu mikroorganizmalarla kontamine olabileceğini ve bu kontaminasyonun kalıcı olabileceğini ortaya koymuştur (Nicholson ve ark., 2005; Sharma ve Reynnells, 2018). Ayrıca taze gübre uygulanan topraklarda yetiştirilen ürünlerin, yaprak dokularına nüfuz edebilen enterik patojenlerle kontamine olabileceği, bu durumun ürün güvenliğini önemli ölçüde tehlikeye atabileceği bildirilmiştir (Solomon ve ark., 2002). Buna ek olarak, hasat işlemi sırasında kullanılan ekipmanlar aracılığıyla da toprakta bulunan patojenlerin ürünlere taşınabileceği belirtilmektedir (Iwu ve Okoh, 2019).

Taze ürünlerin patojenik mikroorganizmalarla kontaminasyonu, yaban hayatı (örneğin kuşlar, kemirgenler, domuzlar), evcil çiftlik hayvanları (örneğin tavuklar, köpekler, sığırlar) ve insanlar aracılığıyla doğrudan ya da dolaylı yollardan gerçekleşebilmektedir (Ramos ve ark., 2021; Smith ve ark., 2023). Özellikle *Salmonella* spp. ve *Escherichia coli* gibi taze ürünlerle sıkça ilişkilendirilen gıda kaynaklı patojenler hem yaban hayatı hem de evcil hayvan popülasyonlarında tanımlanmıştır (Mafizur ve ark., 2024; Smith ve ark., 2023). Bu patojenler; konakçıda klinik belirtiler görülmezsizin dışkı yoluyla çevreye yayılabilmekte ve bu durum, tarım alanlarında kontaminasyon riskini artırmaktadır (Tran ve Xie, 2024; Wegner ve ark., 2022). Gruszynski ve ark., (2014) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, Kasım 2010 ile Temmuz 2011 tarihleri arasında Virginia'nın Doğu Kıyısı'ndaki 17 farklı lokasyondan toplanan geyik, kaplumbağa ve kuşlara ait toplam 262 dışkı örneği analiz edilmiş; örneklerin %8,8'inin (n=23) *Salmonella* spp. açısından pozitif sonuç verdiği tespit edilmiştir. Bu bulgu, yaban hayatının taze ürünlere yönelik mikrobiyal kontaminasyon riski açısından potansiyel bir kaynak olduğunu göstermektedir. Ayrıca, ürünlerin büyüme döneminde açık tarlalara bırakılan dışkı atıkları da meyve ve sebzelerde mikrobiyal bulaşmaya neden olabilmektedir (Smith ve ark., 2023).

Salmonella enfeksiyonlarının çoğu zoonotik karakterdedir ve kümes hayvanları, sürüngenler, sığırlar ve domuzlar gibi çok çeşitli hayvan türlerinde bu bakterinin konaklık yaptığı bilinmektedir (Gutierrez-Rodriguez ve Adhikari, 2018; Iwu ve Okoh, 2019). Bir çalışmada, evcil hayvanlarda *Salmonella* sürü dağılımının, hayvan türüne ve coğrafi bölgeye bağlı olarak %0 ile %90 arasında değişebileceğini tahmin etmiştir (Iwu ve Okoh, 2019). Patojen mikroorganizmalar yalnızca doğrudan dışkı kontaminasyonu yoluyla değil, aynı zamanda çeşitli vektörler aracılığıyla da taze ürünlere taşınabilmektedir. Kemirgenler, böcekler ve kuşlar gibi taşıyıcı organizmalar, enfekte konakçıların dışkılarıyla temas ederek patojenleri dolaylı yollardan tarım ürünlerine aktarabilirler (Spence ve ark., 2025). Bu taşıyıcı organizmaların hayvansal kaynaklara yakınlıkları, kontaminasyon riskini daha da artırmakta ve ürün güvenliği açısından önemli bir tehdit oluşturmaktadır (Gutierrez-Rodriguez ve Adhikari, 2018).

İklimsel koşulların, patojen mikroorganizmaların çevresel kaynaklardan tarla ürünlerine transferinin sıklığı ve şiddeti üzerindeki etkisi çeşitli çalışmalarda ele alınmıştır (Jacxsens ve ark., 2010; Strawn ve ark., 2013). Özellikle sıcaklık ve yağış gibi meteorolojik parametreler, gıda kaynaklı patojenlerin çevredeki hayatta kalma kapasitelerini, çoğalma potansiyellerini ve tarımsal sistemlerdeki yayılım dinamiklerini doğrudan etkileyebilmektedir (Hellberg ve Chu, 2016; Singh ve ark., 2023). Sıcaklık, mikrobiyal büyümeyi etkileyen başlıca çevresel faktörlerden biridir ve tarlada yetiştirilen ürünlerin kontaminasyon riski açısından kritik bir değişkendir. Daha sıcak dönemlerde yüzey sularında bulunan patojenlerin hem yaygınlığında hem de yoğunluğunda artış gözlemlenmiştir (Hellberg ve Chu, 2016; Sutherst ve ark., 2011). Benzer şekilde, gübre ve gübre ile zenginleştirilmiş topraklarda *Salmonella* spp. ve *E. coli* gibi patojenlerin hayatta kalma süreleri yüksek sıcaklıklarda artış göstermektedir (Duchenne-Moutien ve Neetoo, 2021). You ve ark., (2006) 20°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda uygulanan gübrelerin, soğuk havalarda uygulananlara kıyasla toprakta daha yüksek düzeyde *Salmonella* ve *E. coli* kontaminasyonuna yol açtığını ortaya koymuştur. Sıcak hava koşullarında toplanan domates ve yapraklı sebzelerde *E. coli* ve diğer bakteriyel gösterge organizmaların tespit oranları artmaktadır (Devarajan ve ark., 2023; Singh ve ark., 2023). Holley ve ark., (2006) çalışmasında, 25°C ve 30°C sıcaklıklarda gübrelenen sebzelerde *Salmonella* serovarlarının (*Salmonella* Agona, Hadar, Heidelberg, Montevideo, Oranienburg ve Typhimurium) daha yaygın olduğu, buna karşın -18°C ve 4°C gibi düşük sıcaklıklarda gübrelenen sebzelerde kontaminasyonun minimal olduğu gözlemlenmiştir (Holley ve ark., 2006). Yüksek sıcaklıklar ayrıca, çiftliklerde böcek ve zararlı popülasyonlarını artırarak, bu vektörlerin

aracılığıyla gıda kaynaklı patojenlerin ürünlere taşınma riskini yükseltebilir (Coetzer, 2006). Aynı zamanda sıcaklık artışı, hayvanların çeşitli hastalıklara duyarlılığını artırarak onların asemptomatik olarak insan patojenleriyle kolonize olma olasılıklarını da yükseltebilir (Singh ve ark., 2023).

Öte yandan, artan yağış miktarları da toprak nem oranını artırarak patojenlerin çevresel ortamlarda daha uzun süre hayatta kalmasına olanak tanır (Strawn ve ark., 2013; Ward ve ark., 2015). Yoğun yağışlar, hayvancılık işletmelerinden ve otlatma alanlarından gelen patojenlerin yüzey akışı ve yer altı suları yoluyla yayılmasına aracılık ederek taze ürünler için kontaminasyon riski yaratabilir (Iwu ve Okoh, 2019; Park ve ark., 2014). Ayrıca şehirsal atık suların taşmasıyla patojenlerin kuyulara ve akarsulara karışması, tarım alanlarının patojenle kontaminasyonuna neden olabilir (Gil ve Allende, 2018; Summerlin ve ark., 2021). Rüzgâr da kontaminasyona katkıda bulunabilen bir başka çevresel etkidir. Rüzgarla taşınan toz partikülleri, ürün yaprakları üzerinde patojenleri taşıyabilir. Çalışmalar, *Salmonella* ve *E. coli*'nin toz ortamında sırasıyla 26 ay ve 10 aya kadar canlı kalabildiğini göstermiştir (Summerlin ve ark., 2021). Bu aerosoller, rüzgâr yardımıyla uzun mesafelere taşınarak geniş alanlarda kontaminasyona neden olabilir (Bell ve ark., 2021). Son olarak, hava koşullarındaki değişkenlikler, bitkilerin büyüme sürecini ve fizyolojik durumlarını etkileyerek onların patojenlere karşı duyarlılığını artırabilir (Ward ve ark., 2015). Bu bağlamda iklim değişkenliği, tarlada mikrobiyal kontaminasyonun hem doğrudan hem de dolaylı yollarla artmasına neden olabilecek önemli bir çevresel faktördür.

Evcil hayvan çiftliklerinin konumu, arazi eğimi ve çevredeki ormanlık alanlar gibi manzara ve coğrafi faktörler, tarımsal ürünler ve yem bitkileri açısından mikrobiyal kontaminasyon riski yaratabilmektedir (Gurtler ve Gibson, 2022). Bu çevresel faktörler, patojen mikroorganizmaların varlığını ve hayatta kalmasını destekleyebileceği gibi, bu patojenlerin hareketliliğini de önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Park ve ark., 2014). Nitekim *Salmonella* spp., *Listeria monocytogenes* ve *Escherichia coli*, Birleşik Krallık'ın Nottinghamshire bölgesinde gübre ile kontamine olmuş killi tınlı çayır toprağında 100 güne kadar hayatta kalabilmiştir (Nicholson ve ark., 2005). Tarımsal üretim yapılan çiftliklerin coğrafi konumu, komşu arazilerin veya yakın çevredeki diğer çiftliklerin otlatma, hayvan barındırma, besleme ya da kesim gibi hayvancılık faaliyetleri için kullanılması durumunda, ürünlerin mikrobiyal kontaminasyon düzeyini etkileyebilir (Coetzer, 2006). Strawn ve ark., (2013) yürüttüğü bir çalışmada, New York Eyaleti'ndeki tarım arazilerinin sırasıyla %6,1'inde *Salmonella* ve %17,5'inde *L. monocytogenes* varlığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, çevresel rezervuarlar ile tarım arazileri arasındaki

mesafe, bu patojenlerin varlığı üzerinde belirleyici bir unsur olabilir (Keraita ve ark., 2003). Kirletici unsurlar çeşitli yollarla tarım ürünlerine ulaşabilmektedir: (i) hayvanların otlaklardan veya barınaklardan çiftlik arazisine hareketi; (ii) çiftlik içi veya çiftlikler arası hayvan hareketliliği; (iii) yağış kaynaklı yüzey akışı ile kontamine olmuş ve ürün alanına doğru eğimli olan zemin ve (iv) komşu tarım alanlarında hayvan gübresinin uygulanması (Coetzer, 2006). Ayrıca Holley ve ark., (2006) zoonotik patojenlerin özellikle nemli, kil bazlı topraklarda ve düşük sıcaklıklarda gübre varlığında daha uzun süre yaşayabildiğini rapor etmiştir. Hayvan gübresi kullanılan tarım alanları, toprakta aylarca hatta yıllarca canlı kalabilen enterik patojenlerle kontaminasyon riski açısından daha yüksek bir potansiyele sahiptir (Ramos ve ark., 2021).

2.4. Hasat Sonrası Taze Kesilmiş Soğan Üretimi ve Kontaminasyonu

Soğanın hasat sonrası dayanıklılığını ve pazarlanabilirliğini artırmak amacıyla uygulanan kürleme işlemi, ürünün depolama süresince kalite kaybını önlemede kritik bir rol oynamaktadır. Kürleme işlemi sırasında, soğanın dış kabukları, kökleri ve boyun dokuları kurutularak hem hastalık etmenlerine karşı fiziksel bir bariyer oluşturulmakta hem de su kaybına karşı sızdırmazlık sağlanmaktadır. Bu süreç, aynı zamanda dış kabukların çamurlu ve gevşek kısımlarını da kurutarak daha temiz ve homojen bir yüzey elde edilmesini mümkün kılmakta, böylece ürün estetik açıdan daha cazip hale gelmektedir. Özellikle kahverengi kabuklu soğanlarda, kürleme işlemi sayesinde dış kabuk daha homojen ve tüketici açısından daha kabul edilebilir olan altın-kahverengi bir renge ulaşmaktadır (Downes ve ark., 2010). Geleneksel kürleme işlemleri genellikle tarlada doğal koşullar altında gerçekleştirilse de çevresel değişkenlikler nedeniyle bu yöntem her zaman yeterli süreyi sağlayamamaktadır. Bu nedenle, özellikle erken hasat edilen soğanlarda yaklaşık 96 saat, optimum hasat edilenlerde 72 saat ve geç hasat edilenlerde daha kısa süreli olmak üzere minimum kürleme süresinin sağlanabilmesi için yapay kürleme yöntemleri tercih edilmektedir (Maw ve Mullinix, 2005). Yapay kürleme süreci, genellikle soğanların depolama tesislerinde 2 ila 3 hafta boyunca doğal hava akımı ile (24–27°C aralığında) veya daha kısa sürede (2 gün ya da daha fazla) ısıtılmış hava (29–35°C ya da üzeri) ile temas ettirilmesiyle gerçekleştirilir (Schroeder ve du Toit, 2010). Kürleme için en uygun çevresel koşulların, 1 ila 4 gün boyunca 25–32°C sıcaklık ve %60–75 bağıl nem aralığında olduğu bildirilmektedir (Kader, 2002). Depolama sürecinin devamında, ortam havasının bağıl nemi %70'in altına düştüğünde, ürünün soğutma işlemi başlatılmakta ve

sıcaklık günde 1°C ile 5°C azaltılarak yaklaşık 3–5°C seviyelerine kadar düşürülmektedir (Schroeder ve du Toit, 2010). Soğan çeşitlerinin küremeye ve dolayısıyla depolamaya karşı gösterdikleri direnç ise farklılık göstermektedir. Depolama stabilitesi açısından çeşitler arasında genel olarak sarı soğanlar en yüksek dayanıklılığa sahipken, bunu sırasıyla kırmızı, beyaz, İspanyol ve tatlı soğan çeşitleri izlemektedir. Bununla birlikte her renk grubu içerisinde, bireysel çeşitler arasında da önemli dayanıklılık farkları bulunmaktadır (Herold ve ark., 1998; Kiran ve ark., 2024).

Soğanın işlenmesi süreci, ürünün raf ömrünü ve kalitesini etkileyebilecek bir dizi fizyolojik, biyokimyasal ve mikrobiyal değişimi beraberinde getirebilir. Özellikle kesme ve diğer mekanik işlemler sırasında meydana gelen fiziksel hasar, bitki dokularında önemli düzeyde stres oluşmasına neden olur (Akinwotu ve Adeniran, 2025; Kiran ve ark., 2024; Muhie, 2022). Bu tür hasarlar, hücre yapılarının bozulmasına ve enzimlerle substratların doğal olarak ayrıldığı bölmelerin kırılmasına yol açar. Sonuç olarak, bu durum renk değişimi, doku yumuşaması ve lezzet kaybı gibi istenmeyen kalite bozulmalarını tetikleyebilir (Akinwotu ve Adeniran, 2025). Ayrıca soğanların pH, su aktivitesi ve doku bütünlüğü gibi fiziksel ve kimyasal özellikleri, patojenlerin hayatta kalmasını ve büyümesini etkileyebilir. Bu tür olumsuz etkileri en aza indirmek amacıyla, taze kesilmiş soğan üretiminde uygulanan birim operasyonların dikkatle planlanması ve yönetilmesi gerekmektedir. Özellikle doku hasarını sınırlamak, mikrobiyal kontaminasyonu azaltmak ve ürünün duyuşal özelliklerini korumak adına işleme aşamaları özenle optimize edilmelidir. Taze kesilmiş soğan üretiminde yaygın olarak kullanılan bu birim operasyonların her bir aşaması ürün kalitesi açısından kritik öneme sahiptir (Bahram-Parvar ve Lim, 2018; Siddiq ve ark., 2013; Xie ve ark., 2023).

Taze kesilmiş soğan üretiminde kullanılacak hammaddenin kalitesi, nihai ürünün raf ömrü ve duyuşal özellikleri açısından belirleyici bir faktördür. Bu kapsamda, fiziksel olarak bütünlüğünü koruyan, herhangi bir kesik, çürük, gri veya siyah küf ya da leke içermeyen; dış katmanlarında kuruma belirtileri göstermeyen, sert ve kuru yapıdaki soğanlar tercih edilmelidir. Bu tür nitelikler, işlenmiş ürünün hem mikrobiyolojik güvenliğini hem de tüketici tarafından algılanan kalitesini doğrudan etkilemektedir. Özellikle taze kesilmiş soğan endüstrisinde kullanılacak ürünlerin seçimi sırasında, görsel değerlendirme ve elle kontrol gibi ön tarama süreçleri büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, soğanların işleme öncesinde dikkatli bir şekilde elleçlenmesi gereklidir; zira taşıma ya da düşme sonucu oluşabilecek darbeler, iç dokularda çürüme ve bozulmaya yol açabilmekte,

bu da kalite kaybına neden olmaktadır (Akinwotu ve Adeniran, 2025; Bahram-Parvar ve Lim, 2018).

Taze kesilmiş soğan üretiminde ilk aşama olan soyma işlemi, ürün kalitesini doğrudan etkileyen kritik bir adımdır. Bu işlem sırasında, genellikle keskin bıçaklar veya jilet benzeri kesici aletler kullanılmakta olup, uygulanan mekanik işlemler soğan dokusunda hasara neden olabilmektedir. Özellikle körelmiş veya yetersiz keskinliğe sahip soyma/kesme ekipmanları, depolama sürecinde sıklıkla gözlemlenen yarı saydamlık veya camsı yapı oluşumunu artırarak ürünün görsel ve yapısal kalitesini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, kesme aletlerinin düzenli bakım ve kontrolü büyük önem taşımaktadır (Liu ve ark., 2022). Taze kesilmiş ürünlerin hazırlanmasında yaygın olarak tercih edilen iki temel soyma yöntemi bulunmaktadır: elle soyma ve aşındırıcı soyma (Bahram-Parvar ve Lim, 2018). Elle soyma işlemi, yüksek iş gücü gerektirmesine rağmen, ürün üzerinde minimal hasar oluşturarak en yüksek kaliteli çıktının elde edilmesini sağlar. Buna karşın, aşındırıcı soyma yönteminde, dış kabukların uzaklaştırılması için aşındırıcı yüzey silindirleri kullanılır ve ardından ince su spreyları ile yüzey temizliği sağlanır (Kader, 2002). Gelişen teknoloji ile birlikte, farklı boyutlardaki soğanları işleyebilen ve üst-kuyruk kısımlarını otomatik olarak ayarlayan çeşitli soğan soyma makineleri de kullanılmaktadır. Soyma işlemi sırasında oluşan doku yaralanmaları, soğanın biyoaktif bileşik içeriğinde önemli kayıplara neden olabilmektedir (Muhie, 2022). Örneğin, soğan kabuğunda yüksek oranda bulunan kuersetin flavonoidinin %90'ının soyma sırasında kaybedildiği; kalan kuersetin miktarının ise %40 oranında azaldığı rapor edilmiştir (Bahram-Parvar ve Lim, 2018). Benzer şekilde, kırmızı soğanlar soyulduklarında kuersetin-4-glukozidi (QMG)'nin yaklaşık %20'sini ve antosiyaninlerin %70'ine kadarını kaybetmektedir (Rodrigues ve ark., 2010; Wiczowski, 2018). Ewald ve ark., (1999) ise soğanın soyulma ve budama aşamalarında toplam flavonoid içeriğinde %39'a varan bir azalma olduğunu bildirmiştir. Bu nedenle, biyoaktif bileşiklerin korunması açısından, soyma işleminin dikkatle kontrol edilen koşullar altında gerçekleştirilmesi ve mümkün olduğunca minimal doku hasarına neden olacak yöntemlerin tercih edilmesi önerilmektedir.

Taze kesilmiş soğanların işlenmesinde yıkama ve dezenfeksiyon aşamaları, ürün üzerindeki kir, pestisit kalıntıları ve gıda kaynaklı patojenlerin uzaklaştırılmasını hedeflemektedir. Bu aşama aynı zamanda kalite kaybı ve çürümeye neden olan mikroorganizmaların elimine edilmesini sağlayarak ürünün mikrobiyal güvenliğini artırır (Kiura ve ark., 2021). Ayrıca, yıkama işlemi ürün sıcaklığının hızlı bir şekilde düşürülmesine katkı sağlayarak raf ömrünü uzatır (Bahram-Parvar ve Lim, 2018). Taze

kesilmiş ürün endüstrisinde yaygın olarak kullanılan dezenfeksiyon yöntemlerinin başında kimyasal bazlı yıkama yer almaktadır. Özellikle klor dioksit çözeltileri, yüksek antimikrobiyal etkinliği nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. Bununla birlikte, bu yöntemin kullanımı sırasında su içerisinde kanserojen potansiyel taşıyan kloraminler ve trihalometanlar gibi klorlu bileşiklerin oluşması önemli bir endişe kaynağıdır. Ayrıca, taze kesilmiş sebzelerdeki patojen bulaşmalarıyla ilişkili olarak son yıllarda yaşanan salgınlar, bu yöntemin etkinliğini sorgulatmaktadır çünkü yıkama adımı aynı zamanda patojenlerin yayılması nedeniyle yıkanmış ve yıkanmamış ürünler arasında çapraz kontaminasyon riski taşıyan potansiyel bir aktarım yoludur (López-Gálvez ve ark., 2021; Possas ve Pérez-Rodríguez, 2023). İçilebilir su ile yapılan yıkama, yüzey tutunması, biyofilm oluşumu ve mikrobiyal içselleştirme gibi mekanizmalar nedeniyle patojenleri uzaklaştırmada sınırlı etki gösterir (0,5-2,0 log azalma) (Gombas ve ark., 2017; López-Gálvez ve ark., 2019). Ayrıca, suyun kendisi de patojenlerin ürün dokusuna içselleşmesine katkıda bulunabilir (Banach ve ark., 2015). Buna ek olarak, yüksek su tüketimi ve atık suyun çevresel etkileri de endüstrinin karşı karşıya olduğu önemli sorunlardandır (Gombas ve ark., 2017; Possas ve Pérez-Rodríguez, 2023). Bu nedenlerle, mevcut yöntemlerin yerini alabilecek, güvenliği artıran ve kaliteyi korurken çevresel etkileri azaltmayı hedefleyen alternatif teknikler üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu alternatif yöntemler arasında antioksidan kullanımı, gama ışınlaması, ozon, organik asitler, elektrolize su, kalsiyum bazlı solüsyonlar, ultraviyole (UV) ışınları, modifiye atmosfer paketleme (MAP) ve peynir altı suyu permeatı gibi uygulamalar yer almaktadır (Chinchkar ve ark., 2022; Reddy ve ark., 2021). Ilık suyla muamele, klor dioksit bazlı yıkamalara alternatif olarak önerilmiş ve böcek istilası ile yüzey mikroorganizmalarının kontrolünde etkili bulunmuştur. Ancak, başlangıçta yaklaşık 0,9 log düzeyinde bir azalma sağlansa da bu yöntemin etkisi depolama süresince sürdürülebilir olmamaktadır. Buna karşın, 0,5, 1,0 ve 1,5 kGy dozlarındaki gama ışınlaması, toplam aerobik mikroorganizma sayısını azaltmada ve çürüme ile kötü koku oluşumunu önlemede daha avantajlı sonuçlar sunmuştur (Golding ve ark., 2024; Shahbaz ve ark., 2016).

Dezenfeksiyon süreci aynı zamanda soğanların besin bileşimi ve biyoaktif içeriği üzerinde de etkili olmaktadır (Kiura ve ark., 2021; Savitha ve ark., 2022). Özellikle flavonoid yapıları ve biyoyararlanım düzeylerinde değişimler gözlenmektedir (Akinwotu ve Adeniran, 2025). Perez-Gregorio ve ark., (2011) dilimlenmiş kırmızı soğan örneklerinde uygulanan çeşitli dezenfeksiyon tekniklerinin flavonoid içeriği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışma bulgularına göre sodyum hipoklorit, hidrojen peroksit, sodyum

dikloroizosiyanat ve UV-C ışınlaması gibi kimyasal ve ışınlama temelli dezenfeksiyon işlemleri flavonol seviyelerinde azalmaya neden olmuştur. Bu kayıpların büyük ölçüde flavonoidlerin yıkama sularında çözünmesi ile ilişkili olduğu bildirilmiştir. Öte yandan, kuru dekontaminasyon teknikleri flavonoidlerin korunmasına katkı sağlamış; flavonol içeriğinde %35, antosiyanin içeriğinde ise %29 oranında artış gözlemlenmiştir. Bu bulgular, kimyasal yöntemlere kıyasla daha avantajlı ve etkili sonuçlar ortaya koymaktadır (Pérez-Gregorio ve ark., 2014). Son yıllarda Joshi ve ark., (2013) taze ürünler için yeni nesil dezenfeksiyon yöntemlerini incelemiş olsalar da bu tekniklerin henüz gıda endüstrisinde geniş çapta uygulama alanına sahip değildir. Bu bağlamda, mevcut yöntemlerin etkinliğini değerlendirecek ve güvenilirliğini artıracak alternatif yaklaşımlara ve validasyon göstergelerine duyulan ihtiyaç devam etmektedir (Bahram-Parvar ve Lim, 2018).

Kesme işlemi sırasında; soğan dilimlenebilir, küp şeklinde doğranabilir veya rendelenebilir. Küp doğrama, soğanın üç yönde kesilmesini içererek küpler oluştururken, dilimleme yalnızca tek bir yönde gerçekleştirilir. Kesme ve soyma işlemleri, taze kesilmiş ürünlerin raf ömrünü önemli ölçüde etkileyen yaralanmalara neden olur. Bu etkinin temel nedeni, bu işlemlerin uyardığı çeşitli fizyolojik tepkilere bağlı olarak gerçekleşen kimyasal değişikliklerdir. Yaralanmaya karşı verilen tepkileri etkileyen iç ve dış faktörler arasında tür, kültivar, olgunluk düzeyi, depolama/işleme sıcaklığı, kesme protokolleri, karbondioksit ve oksijen konsantrasyonları ile bağıl nem yer alır (Bahram-Parvar ve Lim, 2018; Siddiq ve ark., 2013). Yaralanma kaynaklı reaksiyonlar arasında doku yumuşaması, hücre zarlarının bozulması, solunum hızında artış, su kaybı, mikrobiyal bozulmaya karşı duyarlılığın artması, istenmeyen tat/aroma oluşumu ve besin ile sağlıkla ilişkili bileşiklerin kaybı yer almaktadır (Siddiq ve ark., 2013). Taze soğanların dilimlenmesi, alliinaz enzimini S-alk(en)il sistein sülfoksitlerle etkileşime geçirerek uçucu kükürtlü bileşiklerin, pirüvatın ve amonyağın oluşmasına yol açar. Bu aromatik bileşiklerin oluşum hızı, doku bozulmasının şiddetine bağlıdır (Howard ve ark., 1994; Rico ve ark., 2007). Ayrıca, kesme sırasında ürün ile kesici bıçak arasında temas sonucu çapraz kontaminasyon riski de ortaya çıkabilir (Kader, 2002). Önceki araştırmalar soğanların kesilmesi ve işlenmesinin, patojenlerin en çok yapışıp çoğalabileceği yüzeyler oluşturabileceğini göstermiştir. Örneğin, Scollon ve ark., (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, *Listeria monocytogenes* ile inoküle edilmiş sarı bir soğanın mekanik bir dilimleyici kullanılarak dilimlenmesi, inoküle edilmemiş diğer 20 soğanın çapraz kontaminasyonuna yol açmıştır.

Kesme işlemi, ürünün kimyasal bileşimi üzerinde de etkili olabilir. Bir çalışmaya göre, doğranmış soğanların kuersetin konsantrasyonu, depolamanın ilk 11 gününde bütün soğanlara kıyasla değişiklik göstermemiştir (Pérez-Gregorio ve ark., 2014). Ancak, 4°C'de 11 ile 30 gün arasında kuersetin konsantrasyonda bir artış gözlenmiştir. Bu artışın miktarı, paketlenme koşullarına bağlı olarak değişmiştir. Modifiye atmosferde, su (462 mg/kg) veya hipoklorit (471 mg/kg) ile yıkanan örneklerde, bütün soğanlara göre sırasıyla %19,5 ve %22 oranında kuersetin artışı gözlenmiştir. Bu değerler, bütün soğanlarda sırasıyla 386 ve 387 mg/kg olarak belirlenmiştir (Howard ve ark., 1994). Makris ve Rossiter, (2001) doğrama ve ardından 60 dakika boyunca maserasyona uğratmanın kuersetin 3,4'-diglukozit (QDG) ve QMG düzeylerinde bir değişiklik oluşturmadığını bildirmiştir. Bu durum, enzimlerin etkisinin görülmesi için daha uzun süre gerekmesiyle açıklanabilir. Ancak Rodrigues ve ark., (2009) yaptığı başka bir çalışmada, doğrandıktan sonra oda sıcaklığında ve sürekli ışık altında 5 saat boyunca bekletilen soğan örneklerinde hem QDG hem de QMG seviyelerinde hafif bir azalma tespit edilmiştir. Sonrasında, stres nedeniyle soğan dilimleri bu flavonoid glikozitlerin sentezini artırmış ve bu artış 18. saatte maksimum seviyeye ulaşmıştır. Ancak 18 ila 48 saat arasında, yani depolama süresinin sonunda, flavonol içeriği kademeli olarak azalmıştır. Antosiyanin içeriğindeki değişim de flavonollerle benzer bir eğilim göstermiştir; fakat bu değişim daha az belirgindir. Buna ek olarak, doğrama şekli de taze kesilmiş soğanların kalite özelliklerini etkiler. Dilimleme işlemi, hücre yapılarına daha az zarar verdiği ve kesim yoğunluğu daha düşük olduğu için, fiziko-kimyasal ve biyokimyasal özelliklerin daha stabil kalmasını sağlar. Bu da, küp doğramaya kıyasla daha uzun bir raf ömrü sunar (Berno ve ark., 2014). Taze kesilmiş ürünlerin yıkama işleminden sonra üzerlerinde kalan fazla suyun uzaklaştırılması amacıyla santrifüjleme en yaygın tercih edilen yöntemdir. Ancak bu işlem sırasında oluşabilecek hücresel hasar ve sıvı sızıntısını önlemek amacıyla, santrifüj süresi ve hızı dikkatlice optimize edilmelidir. Özellikle yapısı hassas olan taze kesilmiş ürünlerde, fazla nemin uzaklaştırılmasında basınçlı hava uygulaması da alternatif bir yöntem olarak kullanılabilir (Kader, 2002).

Taze kesilmiş soğanlar kolayca bozulur ve en iyi kalite ile güvenlik düzeyine ulaşmak için uygun şekilde paketlenmelidir. Bu ürünlerin paketlenmesinde genellikle esnek poşetler veya sert kaplar kullanılır. Raf ömrünü uzatmak amacıyla modifiye atmosfer paketlenme (MAP) ve aktif paketlenme yöntemleri, örneğin oksijen emici poşetler, tercih edilir. Depolama atmosferinin bileşiminin değiştirilmesi, soğanın solunum hızını yavaşlatır ve metabolizmasını ile olgunlaşmasını azaltır (Bahram-Parvar ve Lim, 2018). Ambalaj

malzemesi seçiminde oksijen, karbondioksit ve su buharı geçirgenlik oranlarının yanı sıra çekme dayanımı, delinme direnci, kapatılabilirlik ve biyolojik olarak parçalanabilirlik gibi özellikler de önemlidir. Taze kesilmiş ürünlerin paketlenmesinde kullanılan malzemeler arasında polietilen (PE), polipropilen (PP), PE ve etilen vinil asetat (EVA) karışımları ile çeşitli plastiklerin koekstrüde polimerleri ve laminatları bulunmaktadır (Kader, 2002). Doğranmış soğanlar için yönlendirilmiş polipropilen (OPP) (40 µm kalınlıkta) veya poliamid-düşük yoğunluklu polietilen (PA-LDPE) (70-100 µm kalınlıkta) uygun ambalaj malzemeleri olarak önerilmiştir (Robertson, 2005). Ayrıca, biyolojik olarak parçalanabilir poli(laktik asit) torbaların, yüksek oksijenli atmosferle birlikte kullanılması da düşünülmüş; bu yöntem, doğranmış soğanların uzun süreli buzdolabı saklamasında *Listeria monocytogenes* büyümesini azaltmıştır (Page ve ark., 2016). Taze kesilmiş ürünlerin raf ömrünü ve güvenliğini artırmak için antimikrobiyal maddelerle kaplanmış çeşitli ambalaj filmleri geliştirilmiş olsa da, bu alandaki araştırmalar henüz yenidir ve taze kesilmiş soğanların ambalajlama gereksinimleri hakkında kapsamlı sistematik bilgi bulunmamaktadır (Bahram-Parvar ve Lim, 2018).

Taze kesilmiş soğan, bozulmaya karşı hassas olduğu için, pakatlendikten sonra sıcaklık kontrollü koşullar altında hızlıca dağıtılmalıdır (Rico ve ark., 2007). ABD Gıda ve İlaç Dairesi'nin (FDA) Gıda Kanunu'na göre, taze kesilmiş meyve ve sebzelerin nakliye ile perakende depolama ve sergileme sırasında 5°C veya daha düşük sıcaklıklarda saklanması zorunludur. Ancak özellikle yaz aylarında yükleme ve boşaltma sırasında bu sıcaklığın korunması halen önemli bir zorluktur. Uygun olmayan depolama, besin ve duysal kalite kayıplarına yol açabilir (Liu ve ark., 2022). Depolama sıcaklığının taze kesilmiş mor soğanların kalitesi üzerindeki etkisi Berno ve ark., (2014) tarafından incelenmiştir. Beklendiği gibi, düşük sıcaklık kaliteyi korumada daha başarılı olmuştur. 0°C'de depolanan soğan örnekleri, 5°C veya 15°C'de saklananlara göre daha az keskinlik, daha düşük solunum oranı ve toplam fenolik, antosiyanin ile kuersetin seviyelerinde daha az değişim göstermiştir. Ayrıca, daha düşük sıcaklıkta saklanan örneklerde fizikokimyasal değişiklikler daha sınırlı kalmış; bu da daha yüksek çözünür katı maddeler, daha yüksek pH, daha düşük asitlik, daha az renk değişimi ve daha iyi genel görünümle sonuçlanmıştır.

Birçok çalışmada, taze kesilmiş ürünlerin ticari nakliye, perakende depolama ve teşhir sırasında uygun olmayan sıcaklıklara maruz kalabileceğini göstermektedir. Koseki ve Isobe, (2005) Japonya'da işleyiciden perakendeye nakliye sırasında marulun iç sıcaklığının 3°C ile 15°C arasında değiştiğini ve bu koşullarda *Escherichia coli* O157:H7 ile *Listeria monocytogenes* popülasyonlarının inoküle edilmiş örneklerde sırasıyla yaklaşık 1 ve 2 log

kob/g arttığını, *Salmonella*'nın ise önemli bir büyüme göstermediğini bildirmiştir. Diğer çalışmalarda, taze kesilmiş ürünlerin ticari nakliyesi sırasında sıcaklıkların genellikle 10°C'nin altında olduğu rapor edilmiştir (Canatan ve ark., 2025; Carrasco ve ark., 2007). Ancak perakende depolama ve teşhir aşamalarında sıcaklığın kötü yönetildiği birçok örnek vardır. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki çeşitli perakende noktalarında yapılan bir çalışmada (Brown ve ark., 2016) perakende depolama sırasında sıcaklıkların 0,6 ila 15,48°C perakende teşhir sırasında ise -1,1°C ile 9,7°C arasında değiştiğini bildirmiştir. Zeng ve ark., (2014) ise laboratuvar ortamında benzer sıcaklık değişimlerini taklit ederek, inoküle edilmiş marul karışımında *E. coli* O157:H7 ve *L. monocytogenes* popülasyonlarının sırasıyla 3,1 ve 3,0 log kob/g'a kadar arttığını göstermiştir. Bu çalışmalar, potansiyel uygun olmayan sıcaklık kullanımına dair önemli bilgiler sağlarken, taze kesilmiş ürünlerin nakliyesi, perakende depolaması ve teşhiri aşamalarının ayrı ayrı incelendiği ve farklı paketleme teknolojilerinin etkilerinin araştırıldığı nadir örneklerdir.

2.5. Prediktif Mikrobiyoloji

Prediktif mikrobiyoloji, gıda maddelerinde bulunan patojenik ya da bozulmaya neden olan mikroorganizmaların büyüme, inaktivasyon ve hayatta kalma süreçlerinin matematiksel modeller aracılığıyla anlaşılmasını sağlayan bir yaklaşımdır. Bu yöntem, gıda ürünlerinin işlenmesi, dağıtımı ve depolanması sırasında mikrobiyal kinetiği etkileyen içsel ve dışsal faktörlerin etkilerini açıklamayı amaçlamaktadır (Kumar ve ark., 2024). Prediktif mikrobiyoloji, HACCP planlarının oluşturulması, mikrobiyal risk değerlendirmesi ve yönetimi, raf ömrü tayini, yeni ürünlerin araştırma ve geliştirme süreçleri, hijyen kontrolleri ve müdahale stratejileri, personel eğitimi ve deney tasarımı gibi birçok endüstriyel ve düzenleyici uygulamada pratik bir araç olarak kullanılmaktadır (Baranyi ve ark., 2024). Gıda endüstrisinde tahmine dayalı modeller; ürün geliştirme, operasyonel süreçlerin desteklenmesi ve olay yönetimi gibi amaçlarla sıklıkla tercih edilmektedir (Avila-Sosa ve Nevárez-Moorillón, 2025; Tarlak, 2023). Küreselleşme ve e-ticaretin etkisiyle gıda ürünlerinin tüketiciye ulaşma süreci değişmekte, bu da tedarik zincirinin çeşitli aşamalarında mikrobiyal kontaminasyon riskini artırmaktadır. Bu nedenle, tahmine dayalı modeller, kritik kontrol noktalarının belirlenmesi ve taşıma, depolama ile dağıtım aşamalarında gıda güvenliğinin sağlanması için önleyici kontrol tedbirlerinin uygulanmasına katkı sağlamaktadır (Taiwo ve ark., 2024).

Prediktif mikrobiyolojinin temel hedeflerinden biri; mikroorganizmaların sıcaklık, pH, su aktivitesi gibi çevresel değişkenlere verdikleri tepkileri analiz ederek bu doğrultuda üreticilere ve düzenleyici otoritelere yardımcı olabilecek modellerin geliştirilmesidir (Kumar ve ark., 2024). Patojen mikroorganizmaların zaman içinde oluşturabilecekleri potansiyel tehlikelerin önceden belirlenmesi ve bu tehlikelere karşı stratejilerin geliştirilmesi, halk sağlığı açısından ve endüstriyel üretim bağlamında büyük önem taşımaktadır. Bu yaklaşım, mikroorganizmaların davranışlarını öngörmeye yönelik olarak biyolojik sistemlerin matematiksel ve hesaplamalı tekniklerle simüle edilebileceği temel varsayımına dayanmaktadır (Tarlak, 2023). Matematiksel modeller aracılığıyla belirli bir ortamda mikroorganizmaların tanımlanması ve kontaminasyon kaynaklarının belirlenmesi mümkün olmaktadır. Bu modellerin geliştirilmesi süreci, mikrobiyal büyüme ve metabolizma verilerinin toplanması, modelin inşası, doğrulama çalışmaları ve çevresel faktörlerin modele entegrasyonu gibi aşamalardan oluşmaktadır (Baranyi ve ark., 2024; Centorame ve ark., 2024). Bu bağlamda regresyon analizleri, değişkenler arasındaki ilişkilerin modellenmesi, zaman serilerinin değerlendirilmesi ve değişken durumların belirlenmesi açısından önemli bir rol oynamaktadır (Baranyi ve ark., 2024).

Tahmine dayalı modeller çeşitli alt kategorilere ayrılmaktadır. Bunlar; tahmin edici modeller, kümeleme modelleri, aykırı değer tespiti modelleri, zaman serisi modelleri, tanımlayıcı / tanısal analitikler, tahmine dayalı analitikler ve kuralcı analitiklerdir. Bu modelleme teknikleri, farklı problem türlerine ve alanlara özgü şekilde geliştirilmektedir (Avila-Sosa ve Nevárez-Moorillón, 2025; Pérez-Rodríguez ve Valero, 2013; Stavropoulou ve Bezirtzoglou, 2019). Ayrıca, modelleme yaklaşımları ampirik ve mekanistik olarak sınıflandırılabilirken; birincil, ikincil ve üçüncül modeller; kinetik ve olasılık temelli modeller; çapraz kontaminasyon süreçlerinin açıklanmasında ise transfer modelleri kullanılmaktadır (Valdramidis, 2016).

Mikrobiyal büyüme dinamiklerinin temel amacı, mikroorganizmaların çoğalma süreçlerini etkileyen mekanizmaların anlaşılmasıdır. Matematiksel olarak modellenen bu dinamikler; gecikme (lag), üstel büyüme (log), durağan (stationary) ve ölüm (death) evrelerini kapsamaktadır (Tarlak, 2023). Verheyen ve Van Impe, (2021)'ye göre, mikroorganizmalar çevresel koşullara uyum sağladıktan sonra üstel faza geçerek hızlı bir çoğalma sürecine girer, kaynakların tükenmesiyle durağan faza ulaşır ve ölen hücre sayısının üreyen hücre sayısını aşması durumunda ölüm fazına girilir.

Büyüme kinetiği modeli, tahmine dayalı modelleme kapsamında en sık kullanılan model türüdür. Bu modelde, mikrobiyal popülasyon değişimleri; sıcaklık, pH, su aktivitesi

ve besin durumu gibi değişkenlerle ilişkilendirilerek denklemler aracılığıyla tanımlanır (Verheyen ve Van Impe, 2021). Mikrobiyal büyüme eğrilerinin modellenmesinde Gompertz, Baranyi ve lojistik modeller öne çıkmaktadır (Tarlak, 2023). Bu modeller, mikrobiyal büyümenin farklı evrelerini dikkate alarak sürecin detaylı şekilde anlaşılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, öngörücü modellerin kullanıcılar tarafından daha etkin biçimde uygulanabilmesi için çeşitli yazılım araçları da geliştirilmiştir. ComBase Predictor, Food Spoilage and Safety Predictor (FSSP) ve Pathogen Modeling Program (PMP) bu araçlara örnek olarak verilebilir (González ve ark., 2019).

Dinamik sıcaklık koşulları altında taze kesilmiş ürünlerde patojen büyümesini tahmin etmeye yönelik çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bu modeller genellikle birincil ve ikincil büyüme modelleriyle maksimum popülasyon yoğunluğunu içeren denklemlerin birleşiminden oluşmaktadır. Örneğin, marul gibi yeşil yapraklı sebzelerin ticari faaliyet süresince sıcaklık-zaman verileri kullanılarak, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* O157:H7 ve *Salmonella*'nın büyümesi başarılı şekilde modellenebilmektedir (Koseki ve Isobe, 2005). Mishra ve ark., (2017a) izotermal olmayan koşullarda *Salmonella* ve *L. monocytogenes*'in büyüme ve hayatta kalma süreçlerini değerlendirmek üzere modeller geliştirmiştir. Benzer biçimde, McKellar ve Delaquis, (2011) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, *E. coli* O157:H7'nin hem izotermal hem de izotermal olmayan koşullardaki büyümesini içeren birleşik bir büyüme-ölüm modeli başarıyla uygulanmıştır.

Zeng ve ark., (2014) gerçekleştirdiği bir çalışmada ise, perakende depolama koşulları altında simüle edilen taze kesilmiş marul karışımında, *E. coli* ve *L. monocytogenes* popülasyonlarında 3 gün içinde sırasıyla 3,1 ve 3,0 log kob/g artış gözlemlenmiştir. Bu bulgular, matematiksel modellemenin taze kesilmiş ürünlerin mikrobiyolojik güvenliğinin sağlanmasında önemli bir araç olduğunu göstermektedir. Literatürde, *Salmonella*'nın taze ya da taze kesilmiş sebzelerde çoğalmasını öngörmeye yönelik birçok modelin geliştirildiği görülmektedir (Huang, 2014; Kumar ve ark., 2024; Mishra ve ark., 2017b; Puerta-Gomez ve ark., 2013; Sant'Ana ve ark., 2012; Veys ve ark., 2016).

2.5.1. Birincil büyüme modelleri

Birincil modeller, mikroorganizmaların büyüme veya inaktivasyon süreçlerini; sıcaklık, pH ve su aktivitesi gibi çevresel etmenlerin bir fonksiyonu olarak tanımlayan

matematiksel yaklaşımlardır. Ampirik verilere dayanan bu modeller, belirli çevresel koşullar altında mikroorganizmaların davranışlarını öngörme amacıyla geliştirilmiştir. Bu kapsamda, mikroorganizmanın nesil süresi, gecikme fazı süresi, üstel büyüme hızı ve maksimum popülasyon yoğunluğu gibi temel büyüme parametreleri hakkında nicel bilgi sağlamaktadır (Baranyi ve ark., 2024; Pérez-Rodríguez ve Valero, 2013; Tarlak, 2023).

Birincil modelleme yaklaşımının erken örneklerinden biri olan Monod modeli substrat sınırlı ortamlarda mikrobiyal büyümeyi tanımlamak amacıyla geliştirilmiştir (Pérez-Rodríguez ve Valero, 2013). Bu model, mikrobiyal büyüme hızının substrat konsantrasyonuna bağlı olarak değiştiği varsayımına dayanır. Substratın sınırlı olduğu durumlarda büyüme hızı, substrat miktarıyla doğru orantılı olarak artarken; substratın bol bulunduğu ortamlarda büyüme hızı doygunluğa ulaşarak maksimum değere yaklaşmaktadır. Monod modeli, özellikle substrat konsantrasyonunun zamanla değiştiği doğal ortamlarda mikrobiyal büyümeyi tahmin etmek amacıyla çevre mikrobiyolojisinde yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Bir diğer temel model olan üstel (logaritmik) büyüme modeli ise mikrobiyal popülasyonun büyüme hızının mevcut hücre yoğunluğuyla orantılı olduğunu kabul eder (Baranyi ve ark., 2017; Verheyen ve Van Impe, 2021). Basit yapısı ve kolay anlaşılabilirliği nedeniyle ideal koşullarda büyüme dinamiklerini açıklamada etkilidir. Ancak, doğal ortamlarda karşılaşılan kaynak kısıtlılığı, metabolik atık birikimi veya avlanma gibi ekolojik baskıların etkisini göz ardı ettiğinden, bu modelin uygulama alanı sınırlıdır (McMeekin ve ark., 2002).

Bu sınırlamaların üstesinden gelmek amacıyla, taşıma kapasitesi kavramını içeren lojistik büyüme modeli geliştirilmiştir (Baranyi ve ark., 1999). Bu model, popülasyonun taşıma kapasitesine yaklaştıkça büyüme hızının kademeli olarak azaldığını ve nihayetinde sabit bir düzeye ulaştığını ifade eder. Kaynak kısıtlamalarını hesaba katması nedeniyle, lojistik model gerçek dünya koşullarını yansıtmaya açısından üstel modelden daha gerçekçidir (Ratkowsky, 2002).

Gompertz modeli ise mikrobiyal büyümenin sigmoidal karakterini tanımlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Huang, 2014; Pérez-Rodríguez ve Valero, 2013). Bu model, büyüme hızındaki zamanla meydana gelen azalmayı, çevresel stresler veya hücre yaşlanması gibi faktörlere bağlayarak açıklamaktadır. Gıda ürünlerinin raf ömrünün tahmin edilmesinde ve mikrobiyal risk değerlendirmelerinde sıklıkla tercih edilmektedir (Tarlak, 2023).

Gıda mikrobiyolojisinde yaygın olarak kullanılan bir diğer model, Buchanan tarafından geliştirilen üç fazlı doğrusal modeldir (Huang, 2014; Pérez-Rodríguez ve Valero, 2013). Bu model, mikrobiyal büyüme eğrisini gecikme, üstel ve durağan faz olmak üzere üç doğrusal bölüme ayırarak tanımlar. Bu yapısal basitleştirme, modelin matematiksel olarak daha kolay uygulanabilir olmasını ve büyüme parametrelerinin hızlı bir şekilde tahmin edilmesini mümkün kılar. Bununla birlikte, modelin aşırı derecede basitleştirilmiş yapısı, mikrobiyal büyümenin tüm yönlerini yeterince yansıtamayabilir (Huang, 2014; Stavropoulou ve Bezirtzoglou, 2019).

Baranyi modeli, özellikle gecikme fazının fizyolojik temellerini dikkate alarak geliştirilmiş birincil büyüme modellerinden biridir. Bu model, mikroorganizmaların çevresel koşullara uyum sağlamak amacıyla üstel büyümeye geçmeden önce bir adaptasyon sürecinden geçtiğini varsayar. Baranyi modeli, farklı depolama sıcaklıklarında patojenlerin büyümesini tahmin etmek amacıyla kullanılan ve özellikle gıda güvenliği alanında önemli bir yer tutan matematiksel bir çerçeve sunmaktadır (Baranyi ve Roberts, 1995; Pérez-Rodríguez ve Valero, 2013; Tarlak, 2023).

2.5.1.1. Birincil inaktivasyon modelleri

Mikrobiyal hayatta kalma ve inaktivasyon kinetiklerinin anlaşılması, gıda bilimi ve güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu bilgiler, çeşitli çevresel koşullar altında mikrobiyal davranışların öngörülmesini kolaylaştırarak, gıda kaynaklı patojenlerin etkili bir şekilde kontrol altına alınmasına katkı sağlar. Bu kapsamda kullanılan araçlardan biri, Microsoft Excel'e entegre edilebilen ve dokuz farklı mikrobiyal hayatta kalma modelini içeren ücretsiz bir yazılım olan GInaFiT'tir (Geeraerd ve ark., 2005). Her bir model, mikrobiyal popülasyonların farklı çevresel koşullar altındaki dinamiklerini temsil eden kendine özgü davranış örüntülerini yansıtır. Ancak, bu modellerin uygunluğu ve doğruluğu hem incelenen mikrobiyal popülasyona hem de deneysel koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterebilir.

GInaFiT'te yer alan ilk model olan klasik log-lineer model (Geeraerd ve ark., 2005), zaman boyunca sabit bir mikrobiyal ölüm oranı varsayar. Bu model, çevresel koşulların mikroorganizmalar için sürekli olarak elverişsiz olduğu durumlarda geçerli olabilir. Ancak sabit ölüm oranı varsayımı, gerçek hayattaki mikrobiyal çeşitliliği ve çevresel etkileşimleri yeterince yansıtamayabilir. Bazı senaryolarda, mikrobiyal popülasyonun başlangıçta hızlı bir azalma sergilediği, ardından daha yavaş bir düşüşe

geçtiği gözlemlenebilir. Bu tür eğrilerde gözlenen “kuyruk” (Geeraerd ve ark., 2000), genellikle daha dirençli bir alt popülasyonun varlığına işaret eder. Ancak, bu dirençli alt popülasyonun varlığı ve davranışı, çevresel faktörler ve mikrobiyal türler arasındaki genetik farklılıklardan etkilenebileceği için her durumda geçerli olmayabilir. Benzer şekilde, mikrobiyal inaktivasyon eğrisinin başlangıcında gözlenen “omuz” fazı, mikroorganizmaların olumsuz koşullara karşı başlangıçta direnç gösterdiği bir dönemi temsil eder. Bu fenomen, mikrobiyal adaptasyon süreçlerinin bir göstergesi olabilir; ancak omuz fazının varlığı, süresi ve nedeni, mikrobiyal türlere ve çevresel koşullara göre farklılık gösterebilir.

Bazı modeller hem omuz hem de kuyruk davranışlarını kapsayarak daha karmaşık hayatta kalma örüntülerini tanımlamaya çalışır. Bu modeller teorik olarak daha kapsamlı bir bakış sunmakla birlikte, her deneysel duruma uygulanabilir olmayabilir. Öte yandan, zaman içinde ölüm oranlarının azaldığı ya da arttığı durumları tanımlamak üzere geliştirilen içbükey ve dışbükey eğriler mikroorganizmaların stres koşullarına adaptasyon yeteneklerini dikkate alır (Mafart ve ark., 2002). Ancak adaptasyon düzeyi, mikrobiyal türler ve çevresel faktörlere bağlı olarak büyük farklılıklar gösterebilir; dolayısıyla bu modellerin genellenebilirliği sınırlı olabilir. Son olarak, iki fazlı inaktivasyon kinetiği sunan modeller (tek başına veya omuz fazı ile birlikte), heterojen mikrobiyal popülasyonlardaki farklı direnç düzeylerini temsil etmede faydalı olabilir (Geeraerd ve ark., 2000). Bu modeller, popülasyonun birden fazla alt grubunu ve bu gruplar arasındaki farklı ölüm oranlarını dikkate alarak daha ayrıntılı bir analiz sunar. Ancak bu yaklaşım, ölüm oranlarının ayrılabilir ve belirgin fazlara bölünebildiği varsayımına dayandığı için, karmaşık mikrobiyal davranışların gözlemlendiği doğal ortamlarda her zaman geçerli olmayabilir (Geeraerd ve ark., 2005).

2.5.2. İkincil modeller

İkincil modeller, mikroorganizmaların çevresel faktörlerdeki (örneğin sıcaklık, pH, su aktivitesi) değişikliklere verdiği yanıtları tanımlamak amacıyla geliştirilmiş matematiksel araçlardır (Ratkowsky ve ark., 1991). Bu modeller, çevresel koşulların mikrobiyal büyüme veya inaktivasyon üzerindeki etkilerinin nicel olarak tahmin edilmesine olanak sağlar. Gıda mikrobiyolojisinde yaygın olarak kullanılan başlıca ikincil modeller arasında Karekök Modeli, Arrhenius modeli, Kardinal Parametre Modeli ve Polinom model yer almaktadır (Li ve ark., 2008; McKellar ve Lu, 2003; Pérez-Rodríguez

ve Valero, 2013). Bu modeller, farklı matematiksel yapılar ve varsayımlar üzerine kuruludur. Bu modellerin her biri belirli avantajlar ve sınırlamalar içermektedir (Mertens ve ark., 2012). Karekök Modeli, kullanım kolaylığı ve sade yapısı nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. Model, büyüme hızının, belirli bir minimum sıcaklık eşiği aşıldıktan sonra sıcaklıkla doğrusal bir ilişki içinde olduğunu varsayar. Ancak bu basitleştirilmiş yaklaşım, özellikle karmaşık gıda sistemlerinde ve çoklu çevresel stres faktörlerinin etkili olduğu durumlarda önemli tahmin hatalarına yol açabilir (Rosso ve ark., 1995). Arrhenius modeli, mikrobiyal büyümenin sıcaklığa bağlılığını kimyasal reaksiyon kinetiği çerçevesinde ele alır. Bu model, sıcaklığın reaksiyon hızına etkisini tanımlayan klasik bir yaklaşımdır ve bu bağlamda mikrobiyal büyüme süreçlerine uygulanabilir. Teorik olarak daha hassas tahminler sağlamasına rağmen, karmaşık formülasyonu ve pratik uygulamalardaki zorluklar nedeniyle sınırlı kullanım alanına sahiptir (Ratkowsky ve ark., 1991).

Polinom model ise sıcaklık, pH ve su aktivitesi gibi birden fazla çevresel faktörü aynı anda hesaba katan parametrik bir yapıya sahiptir. Bu model, mikrobiyal büyümenin daha kapsamlı bir temsiline olanak tanır; ancak modelin yüksek hesaplama gereksinimi ve bazı durumlarda aşırı uyum eğilimi göstermesi, kullanımını kısıtlayabilir (Rosso ve ark., 1995). Kardinal Parametre Modeli (CPM), mikrobiyal büyüme hızının sıcaklıkla ilişkisini tanımlamakta yaygın olarak kullanılan sağlam bir yaklaşımdır (Rosso ve ark., 1993). Bu model, üç temel sıcaklık parametresi tanımlar: minimum (büyümenin başlamadığı en düşük sıcaklık), optimum (maksimum büyüme hızının gözlemlendiği sıcaklık) ve maksimum (büyümenin durduğu en yüksek sıcaklık). CPM, geniş sıcaklık aralıklarında güvenilir tahminler sunabilmesi açısından avantajlıdır. Bununla birlikte, kardinal parametrelerin güvenilir biçimde belirlenebilmesi için farklı sıcaklıklarda elde edilmiş kapsamlı deneysel veriye ihtiyaç duyulmaktadır (Rosso ve ark., 1995).

Ratkowsky modeli, büyüme hızının sıcaklıkla olan ilişkisini tanımlayan, yaygın olarak kullanılan bir diğer ikincil modeldir (Pérez-Rodríguez ve Valero, 2013; Ratkowsky ve ark., 1991; Tarlak, 2023). Model, büyüme hızının karekökü ile sıcaklık arasındaki doğrusal ilişkiyi esas alır. Basit formülasyonu ve uygulama kolaylığı sayesinde yaygın kullanıma sahiptir. Ancak, bu modelin büyümenin sınırlandığı sıcaklıklara yakın ya da sınır değerlerin dışında kalan koşullarda doğruluğu azalabilmektedir. Bu modele dayalı olarak geliştirilen Huang modeli, sıcaklığın alt sınırına yakın koşullarda daha doğru tahminler yapabilmek amacıyla Ratkowsky modeline sıcaklığa bağlı bir düzeltme terimi ekler. Bu uyarılama, özellikle düşük sıcaklıkta depolanan gıdalarda bulunan psikrotrof

mikroorganizmaların büyümesinin modellenmesinde faydalı olmaktadır (Ratkowsky ve ark., 1991).

2.5.3. Üçüncül modeller

Üçüncül modeller, birincil ve ikincil modellerin gelişmiş uygulamaları olup, genellikle kullanıcı dostu yazılımlar aracılığıyla prediktif mikrobiyolojiye entegre edilirler (Kumar ve ark., 2024; Tarlak, 2023). Bu modeller, sıcaklık, su aktivitesi (aw) ve pH gibi çevresel faktörlerin zamana bağlı etkilerini birincil ve ikincil model çıktılarıyla birleştirerek, mikroorganizmaların büyüme kapsamını ve hızını belirlemede kullanılır. Ayrıca değişen koşullar altındaki mikrobiyal tepkilerin analizini kolaylaştırarak, kapsamlı veritabanlarına dayalı olarak farklı türler arasında karşılaştırmalı değerlendirmelere imkân tanır (Baranyi ve ark., 2024; Huang, 2014). Bu modeller, prediktif mikrobiyolojiyi hem araştırma hem de endüstri uygulamaları açısından daha erişilebilir hale getirir; kullanıcıların temel modelleme bilgisine sahip olmalarını gerektirmeden etkili analizler yapmalarına olanak tanır.

Günümüzde bu amaçla geliştirilmiş çeşitli mikrobiyal modelleme yazılımları mevcuttur. Bunlar arasında, ABD Tarım Bakanlığı'nın Patojen Modelleme Programı (USDA IPMP) ve ComBase modelleri öne çıkan iki önemli üçüncül model sistemidir (Baranyi ve Tamplin, 2004; Huang, 2014; Rohilla ve ark., 2023). USDA IPMP modelleri, gıda kaynaklı patojenlerin farklı çevresel koşullar altında büyüme, hayatta kalma ve inaktivasyon süreçlerini modellemek için geliştirilmiş bir dizi tahmini model sunar (Huang ve Juneja, 2025; You ve ark., 2024). Bu modellerin temel avantajı, belirli patojenler ve çevresel koşullar için yüksek özgüllük sunmalarıdır. Bu durum, belirli senaryolar altında oldukça isabetli tahminler yapılmasını mümkün kılmaktadır. Ancak bu özgüllük, modellerin genellenebilirliğini sınırlandırabilir; çünkü laboratuvar koşullarında geliştirilen modeller, gerçek gıda sistemlerinin içerdiği çok faktörlü ve etkileşimli yapıyı her zaman yansıtamayabilir (Baranyi ve ark., 2024; Kumar ve ark., 2024).

ComBase ise mikrobiyal büyüme ve inaktivasyon verilerinden oluşan kapsamlı bir veritabanına dayanır ve bu veriler temel alınarak geliştirilen modeller, geniş bir çevresel koşul aralığında öngörülerde bulunabilir (Baranyi ve Tamplin, 2004). ComBase modellerinin en güçlü yönlerinden biri, çok sayıda mikroorganizma ve çevresel değişkeni kapsayan geniş veri setine dayalı olmasıdır. Bu, çok çeşitli gıda türleri ve koşulları için potansiyel olarak güvenilir tahminler sağlar. Ancak modelleme performansı, doğrudan

veritabanındaki verilerin temsiliyetine ve kalitesine bağlıdır. Veri eksikliği veya belirli koşullara ilişkin yetersiz veri, tahmin doğruluğunu olumsuz etkileyebilir (Baranyi ve ark., 2024; Kumar ve ark., 2024; Stavropoulou ve Bezirtzoglou, 2019).

Sonuç olarak, mikrobiyal davranışın farklı ve karmaşık gıda sistemleri içinde doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi için çeşitli modelleme yaklaşımlarının birlikte kullanılması gerekebilir. Bu nedenle, mevcut modellerin sürekli güncellenmesi, yeni veri setleri ile beslenmesi ve daha ileri düzey modelleme tekniklerinin geliştirilmesi, gıda güvenliği uygulamalarında prediktif mikrobiyolojinin etkinliğini artırmak açısından büyük önem taşımaktadır. Artan veri birikimi ve modelleme yeteneklerindeki gelişmeler sayesinde, üçüncül modellerin gelecekte daha isabetli ve yaygın kullanıma uygun hale gelmesi beklenmektedir.

2.5.4. Gıda biliminde yapay zekâ kullanımı

Yapay zekâ (YZ) ve makine öğrenimi (MÖ), mevcut prediktif modelleme sistemlerine entegrasyon potansiyeli yüksek olan ileri teknolojilerdendir. Prediktif modellerin geliştirilmesi genellikle, geleneksel istatistiksel yöntemlerle analiz edilmesi güç büyük veri kümeleri üretir. Bu noktada yapay zekâ ve özellikle makine öğrenimi, büyük veri setlerini analiz etme, karmaşık örüntüleri ve çok boyutlu korelasyonları tespit etme açısından güçlü araçlar olarak öne çıkar. Bu teknolojiler, mikroorganizmaların büyümesini ve davranışlarını etkileyen çoklu faktörleri eşzamanlı değerlendirme imkânı sunarak daha doğru ve esnek modellerin geliştirilmesine olanak tanır (Taiwo ve ark., 2024; Tsitou ve ark., 2024).

Makine öğrenimi, yapay zekanın bir alt alanı olarak, algoritmaların mevcut verilerden öğrenerek zamanla kendini geliştirmesini sağlar. Bu algoritmalar, özellikle genetik varyasyonların ve çevresel etkileşimlerin değerlendirilmesi açısından önemlidir. Bu kapsamda, suş çeşitliliği, fenotipik değişkenlikler ve bireysel parametrelerin diğer değişkenlerle olan etkileşimleri analiz edilerek daha kapsamlı mikrobiyal risk değerlendirmeleri yapılabilmektedir (Asnicar ve ark., 2024; Goodswen ve ark., 2021). Ayrıca makine öğrenimi tabanlı sistemler, zaman içerisinde meydana gelen genetik değişimleri izleyerek, yeni virülans özellikleri taşıyan mikroorganizma suşlarının erken dönemde tespitine katkı sağlar (Tarlak, 2023).

Makine öğrenimi algoritmalarının, geleneksel öngörücü mikrobiyoloji modellerine kıyasla daha esnek ve dinamik olduğu görülmektedir. Bu algoritmalar, mikrobiyal

parametreler ile gıdalardaki gözlenen özellikler arasındaki ilişkileri tanımlamak için sabit matematiksel formüllere ihtiyaç duymazlar. Bunun yerine, veri kümesi içindeki karmaşık ilişkileri öğrenerek tahminlerde bulunabilirler. Bu yönüyle, mekanistik bir modellemeye gerek kalmadan, çok değişkenli veri ortamlarında dahi yüksek doğrulukla tahminler yapılmasına olanak tanır (Jiang ve ark., 2022; Niu, 2024; Soni ve ark., 2022).

Lin ve ark., (2022) tarafından yürütülen bir çalışmada makine öğrenimi modeli, *Salmonella enteritidis*'in ısı ve klor uygulamasına maruz kaldıktan sonra gözlemlenen tek hücre gecikme süresinin tahmininde başarılı sonuçlar vermiştir. Geleneksel modellerin her bir patojen ve işlem için ayrı parametre setlerine ihtiyaç duyduğu durumlarda, makine öğrenimi yalnızca hiperparametrelerle çalışarak, farklı patojen türleri ve uygulama koşulları için ortak bir model geliştirme olanağı sağlamıştır. Bu, modelleme sürecini sadeleştirirken genellenabilirliği artırmaktadır.

Yapay zekâ ayrıca gıda kalite kontrol sistemlerinin otomasyonu konusunda da önemli katkılar sunmaktadır. Robotlar, zaman-sıcaklık göstergeleri (TTI'ler) ve Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojileriyle entegre edilen yapay zeka sistemleri, ürünlerin işlenmesi, depolanması ve dağıtımı süreçlerinde mikrobiyal kontaminasyon riskini azaltmak amacıyla kullanılmaktadır (Asnicar ve ark., 2024; Avila-Sosa ve Nevárez-Moorillón, 2025; Lin ve ark., 2023). Özellikle IoT cihazları, sıcaklık ve nem gibi çevresel parametreleri gerçek zamanlı izleyerek, tahmin modellerine entegre edilebilecek veri akışını sağlar. TTI'ler ise ürünlerin zaman-sıcaklık geçmişine dair bilgi sunarak, mikrobiyal büyümenin potansiyel düzeyi hakkında doğrudan bir gösterge sunar.

Bu teknolojilerin prediktif modellere entegrasyonu, gıda güvenliği risklerinin daha etkin izlenmesini ve yönetilmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca, yapay zekâ sayesinde modelleme sistemlerine insan benzeri sezgisel karar verme yeteneklerinin eklenmesi hem ürün geliştirme süreçlerinde hem de tedarik zinciri yönetiminde daha proaktif ve duyarlı yaklaşımların benimsenmesine katkı sağlamaktadır.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Örneklerin Hazırlanması

Çalışmada kullanılan tüm sarı kuru soğanlar (*Allium cepa* L.), Türkiye'nin Tunceli ilinde yerel bir marketten temin edilmiştir. Deneysel işlemler öncesinde, soğanlar ev tipi bir doğrayıcı (K20710 Ingenio, Tefal, Çin) kullanılarak doğranmıştır. Ardından, her bir örnek için 5-gram doğranmış soğan hassas terazide tartılmış ve steril numune torbalarına (Isolab, İstanbul, Türkiye) yerleştirilmiştir.

3.2. Bakteriyel Suşlarını Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan *Salmonella enterica* subsp. *enterica*'ya ait beş farklı serovar (*Newport* MET S1-670, *Infantis* MET S1-674, *Kentucky* MET S1-675, *Enteritidis* MET S1-411 ve *Typhimurium* MET S1-625), Orta Doğu Teknik Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü bünyesindeki Prof. Dr. Yesim Soyer'in Gıda Mikrobiyolojisi Laboratuvarı'ndan temin edilmiştir. Suşlar, %15 gliserol içeren Tryptic Soy Broth'a (TSB; Condalab, Madrid, İspanya) hazırlanarak -80°C'de muhafaza edilmiştir. Bu serotiplerin tamamı, Türkiye'nin çeşitli şehirlerindeki pazarlarda satılan taze gıda ürünlerinden izole edilmiştir (Konyalı ve ark., 2023). Dondurulmuş kültürlerden ilk inokulum, steril bir öze yardımıyla çıkarılarak 9 mL TSB içeren tüplere aktarılmış ve 37°C'de 24 saat inkübe edilmiştir. Bu ilk inkübasyonu takiben, her bir kültür tekrar 9 mL TSB içeren yeni tüplere inokule edilmiş ve aynı koşullarda ikinci kez inkübe edilmiştir. İkinci inkübasyon sonrasında, hücreler 10 dakika süreyle 4800 x g kuvvetinde santrifüjlenmiştir (K241, Centurion Scientific, İngiltere). Elde edilen hücre pelletleri, steril %0,1 peptonlu su (PW; Condalab, Madrid, İspanya) ile iki kez yıkanmış ve yeniden aynı solüsyonda süspanse edilmiştir. Beş farklı *Salmonella* suşu, yaklaşık olarak eşit hücre sayıları içerecek şekilde (10^9 kob/ml) bir karışım (kokteyl) halinde birleştirilmiştir. Popülasyon yoğunluğu, Tryptic Soy Agar (TSA; Condalab, Madrid, İspanya) üzerine yayma plak yöntemi ile yapılan ekim ve sonrasında 37°C'de 24-48 saat inkübe edildikten sonra, gelişen koloniler sayılarak kontrol edilmiştir. Son olarak, inokulum, steril %0,1 PW kullanılarak istenilen inokulasyon seviyesine (10^2 kob/ml) ayarlanarak, örnek inokulasyonunda kullanılmıştır.

3.3. Örneklerin İnokule Edilmesi ve *Salmonella* Sayımı

Steril stomacher torbalarına konulan beş gramlık doğranmış soğanlar, son konsantrasyonu 10^2 kob/g olan *Salmonella* kokteyli içeren 0,5 mL PW ile inokule edildiler. Numune torbaları, inokulumun numune üzerinde eşit şekilde dağılmasını sağlamak için yaklaşık bir dakika boyunca hafifçe çalkalandı ve ardından bir inkübatörde (Stik, BI-150A, Şanghay, Çin) depolandı ve belirli bir sabit sıcaklıkta (4°C, 7°C, 10°C, 15°C, 25°C, 30°C, 35°C, 40°C ve 45°C) tutuldu. Ayrıca her deney öncesi örneklerde doğal olarak varolan *Salmonella* varlığını tespit etmek için *Salmonella* ile inokule edilmemiş üç örnek alındı. Her örnekleme zamanı için üç numune alınarak *Salmonella* konsantrasyonu için analiz yapıldı. Toplamda bu deneyler üç kez tekrarlandı (n=9).

Salmonella spp. inokule edilmiş ve edilmemiş her örnek torbası (5 g), 45 mL tamponlu pepton suyu (BPW; Condalab, Madrid, İspanya) ile karıştırıldı. Her örnek torbası, bir stomacher'da (BagMixer, Interscience, Fransa) iki dakika boyunca homojenizasyona tabi tutuldu. Daha sonra, 9 ml %0,1 PW'lik tüpler kullanılarak ekim için uygun dilüsyona kadar seyreltilerek Xylose Lysine Deoxycholate (XLD; Neugen, Heywood, İngiltere) agar bulunan petri kaplarına ekim yapıldı ve ardından 37°C'de 24-48 saat inkübe edildi. İnkübasyondan sonra, görünür koloniler sayıldı.

3.4. Büyüme ve inaktivasyon modelleri

3.4.1. Birincil büyüme ve inaktivasyon modelleri

Doğranmış soğanlarda *Salmonella* spp.'nin büyümesine ilişkin elde edilen deneysel veriler, ücretsiz olarak erişilebilen the Integrated Pathogen Modeling Program (IPMP) yazılımı aracılığıyla, Baranyi modeli (Denklem 3.1-3.2) kullanılarak modellenmiştir (Huang, 2014).

$$y(t) = y_0 + \mu_{max} A(t) - \ln\left(1 + \frac{\exp(\mu_{max} A(t) - 1)}{\exp(Y_{max} - Y_0)}\right) \quad [3.1]$$

$$A(t) = t + \frac{1}{\mu_{max}} \ln(\exp(-\mu_{max} t) + \exp(-\mu_{max} t_{lag}) - \exp(-\mu_{max} t - (\mu_{max} t_{lag}))) \quad [3.2]$$

Burada, y_0 başlangıç hücre konsantrasyonunu, y_{max} maksimum hücre konsantrasyonunu, μ_{max} maksimum özgül büyüme hızını, t zamanı ve t_{lag} ise gecikme (lag) fazı süresini ifade etmektedir.

Doğranmış soğanlardaki mikrobiyal inaktivasyona ilişkin kinetik parametreler, log-lineer model kullanılarak tahmin edilmiştir. Log-lineer model, birinci dereceden reaksiyon kinetiğine dayanmaktadır ve bu doğrultuda Denklem 3.3 ile ifade edilmektedir.

$$\log\left(\frac{y}{y_0}\right) = -kt \quad [3.3]$$

Burada y , işlem süresinin herhangi bir anındaki mikroorganizma sayısını (log kob/g), y_0 ise başlangıçtaki mikroorganizma yoğunluğunu (log kob/g) ifade etmektedir. t , işlem süresini (saat), k ise birinci dereceden inaktivasyon katsayısını (s^{-1}) temsil etmektedir.

Logaritmik doğrusal model, mikroorganizmaların logaritmik sayısı ile uygulanan işlem süresi arasında doğrusal bir ilişki kurmaktadır. Bu modelde, k ile gösterilen inaktivasyon (ölüm) hızı sabit olup işlem süresinden bağımsızdır. Başka bir ifadeyle, model tüm mikrobiyal hücrelerin uygulanan ölümcül strese karşı eşit düzeyde direnç gösterdiğini varsaymaktadır (Keklik ve ark., 2012).

3.4.2 İkincil modeller

Sıcaklığa bağlı olarak maksimum özgül büyüme hızı (μ_{max}) değişim, IPMP ücretsiz yazılım aracılığıyla Ratkowsky (Denklem 3.4) model kullanılarak hesaplanmıştır (Huang, 2014).

$$\sqrt{\mu_{max}} = a(T - T_{min})[1 - e^{b(T - T_{max})}] \quad [3.4]$$

Bu bağlamda T_{min} ve T_{max} parametreleri sırasıyla organizmanın çoğalmasının mümkün olmadığı teorik minimum ve maksimum sıcaklığı, a ve b ise regresyon katsayılarını temsil etmektedir.

Sıcaklığın lag (gecikme) fazı süresi (t_{lag} , Denklem 3.5) ve maksimum hücre konsantrasyonu (y_{max} , Denklem 3.6) üzerindeki etkileri, ikinci dereceden polinom denklemi aracılığıyla hesaplanmıştır (Omac, 2024). Bu analizler doğrultusunda elde edilen veriler, Sigma Plot yazılımı (sürüm 11.0, San Jose, CA, ABD) kullanılarak modellenmiştir.

$$t_{lag} = A_1 + \frac{A_2}{T} + \frac{A_3}{T^2} \quad [3.5]$$

$$y_{max} = A_1 + A_2T + A_3T^2 \quad [3.6]$$

Burada, A_1 , A_2 ve A_3 regresyon katsayılarını ifade etmektedir.

3.4.3 Birinci ve ikincil modellerin değerlendirilmesi

Bu çalışmada geliştirilen modellerin geçerliliğini değerlendirmek amacıyla belirleme katsayısı (R^2) ve kök ortalama kare hatası (RMSE) kullanılmıştır. R^2 ve RMSE değerleri, analizlerde kullanılan açık erişimli yazılım aracılığıyla elde edilmiştir.

3.5. İstatiksel Analiz

Her rnekleme zamanı için üç tekrar rneği alınmış ve deneysel çalışma toplamda üç kez tekrarlanmıştır ($n = 9$). Elde edilen verilerin istatistiksel analizleri, Windows için SPSS yazılımı (sürüm 20.0, 2011) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde %5 anlamlılık düzeyinde tek yönlü varyans analizi (ANOVA) uygulanmış; gruplar arasındaki ortalamalar arasındaki farkların belirlenmesi amacıyla ise Tukey'nin çoklu karşılaştırma testi kullanılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Doğranmış Soğanlarda *Salmonella* Spp.nin Çoğalması

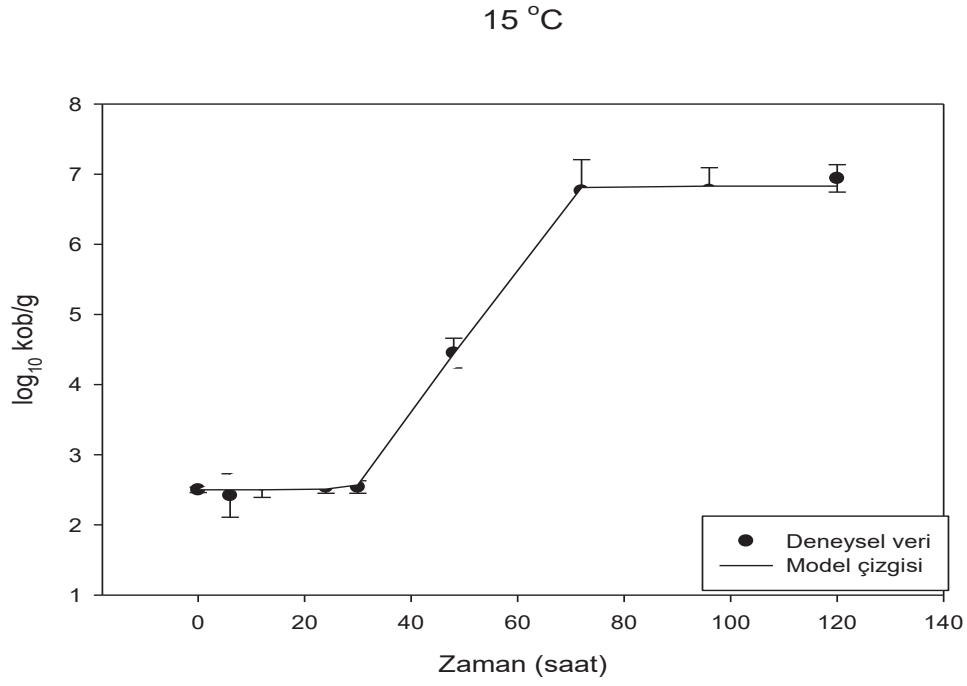
Bu bölümde, doğranmış soğan matriksinde *Salmonella* spp.'nin 4°C ile 45°C arasındaki farklı sıcaklık koşullarında sergilediği büyüme davranışları deneysel veriler doğrultusunda incelenmiş ve elde edilen bulgular grafiksel olarak sunulmuştur. Çalışma kapsamında, özellikle 15°C, 25°C, 30°C, 35°C, 40°C ve 45°C sıcaklıklarında *Salmonella* spp.'nin büyüme davranışı analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 4.1–4.6'da gösterilmiştir. Buna karşılık, 4°C, 7°C ve 10°C'de herhangi bir bakteriyel çoğalma gözlemlenmemiştir (Şekil 4.7–4.9). Literatür de de benzer sonuçlar bildirilmiştir; örneğin Lieberman ve ark., (2015) *Salmonella* spp.'nin doğranmış soğanda 4°C'de gelişim göstermediğini, ancak 23°C'de büyüme kaydettiğini rapor etmişlerdir. Aynı çalışmada, bu nedenle doğranmış soğanların buzdolabı koşullarında muhafaza edilmesinin halk sağlığı açısından kritik olduğu vurgulanmıştır. Benzer şekilde, Kiplagat ve ark., (2025) *Salmonella* Newport suşunun farklı soğan çeşitlerinin iç katmanlarında 25°C'de çoğaldığını bildirmiştir. Öte yandan, Tarlak ve ark., (2020) tarafından yürütülen bir başka çalışmada, taze kesilmiş iceberg marul üzerinde *Salmonella* Reading suşunun büyüme ve inaktivasyon davranışı 4°C, 8°C ve 15°C sıcaklıklarda değerlendirilmiş; yalnızca 15°C'de büyüme gözlemlenmiş ve bu sıcaklıkta maksimum konsantrasyon 5,83 log kob/g olarak hesaplanmıştır. Ancak Son ve ark., (2024) *Salmonella* spp.'nin doğranmış soğanda 9°C'de de büyüme gösterebildiğini rapor etmişlerdir. Bu tür sonuçlar arasındaki farklılıkların, kullanılan bakteriyel suşların genetik ve fizyolojik özelliklerinden kaynaklanabileceği öne sürülmektedir (Sant'Ana ve ark., 2012; Ndraha ve ark., 2022).

Deneysel çalışmada doğranmış soğanlarda başlangıç *Salmonella* spp. konsantrasyonu 2,33–2,50 log kob/g aralığında belirlenmiştir. Deneyin 12. saatinde, 15°C'de bakteri konsantrasyonu sabit kalırken; 25°C, 30°C, 35°C, 40°C ve 45°C'de sırasıyla 1,75; 3,95; 5,73; 5,36 ve 5,20 log kob/g düzeylerinde artış gözlemlenmiştir. 24. saatin sonunda da benzer bir eğilim sürmüştür; 15°C'de herhangi bir değişim kaydedilmemişken, diğer sıcaklıklarda sırasıyla 5,70; 6,53; 6,28; 5,70 ve 5,33 log kob/g düzeylerine ulaşılmıştır. 48 saatlik izleme sonunda ise, 15°C ve 25°C'de bakteriyel artış devam etmiş ve sırasıyla 1,95 ve 5,75 log kob/g düzeylerine ulaşılmıştır. Ancak 30°C ve üzerindeki sıcaklıklarda büyümenin durağan faza ulaştığı ve bu nedenle anlamlı bir artış gözlemlenmediği belirlenmiştir. Bu bulgular, doğranmış soğan gibi yüksek su aktivitesine

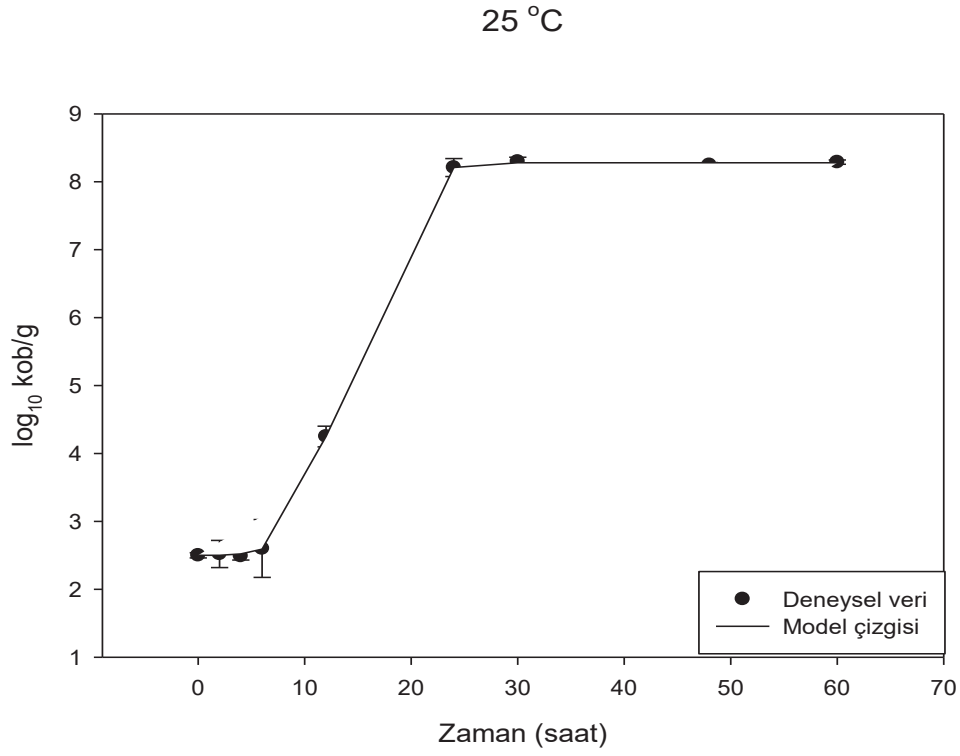
sahip taze ürünlerde *Salmonella* spp.'nin uygun sıcaklık koşullarında hızlı bir şekilde çoğalabileceğini ortaya koymaktadır. Nitekim Kiplagat ve ark., (2025) sarı soğan ekstraktlarında *Salmonella* Newport suşunun büyüme ve inhibisyon davranışlarını incelemiş; 25°C'de özellikle iç katmanlarda 2,4–2,8 log kob/g düzeyinde artışlar gözlemlenmiştir. Bu durum, dış katmanların fenolik bileşikler bakımından zengin olmasına rağmen, iç dokunun yüksek su aktivitesi ve bütünlüğü nedeniyle mikrobiyal çoğalmayı destekleyebileceğini göstermektedir.

Son ve ark., (2024) tarafından yapılan bir diğer çalışmada, *Salmonella* spp.'nin çiğ ve işlenmiş sebzelerdeki büyüme davranışı 4–36°C sıcaklık aralığında incelenmiştir. Bu çalışmada doğranmış soğan ve soğan suyu ayrı olarak değerlendirilmiş; doğrudan soğan dokusunda 9°C'den itibaren *Salmonella* spp. büyümesi gözlemlenmiş, ancak soğan suyunda 36°C'ye kadar hiçbir sıcaklıkta çoğalma gerçekleşmemiştir. Bu bulgu, ekstrakt ortamlarının (örneğin soğan suyu) antimikrobiyal potansiyel taşıyabileceğini; buna karşılık, bütün ürün dokusunun (doğranmış soğan) mikrobiyal büyümeyi destekleyebileceğini göstermektedir. Soğan suyunda büyümenin engellenmesi; fenolik bileşikler, sülfürlü uçucu maddeler ve düşük besin yoğunluğu gibi faktörlerle ilişkilendirilmektedir (Son ve ark., 2024).

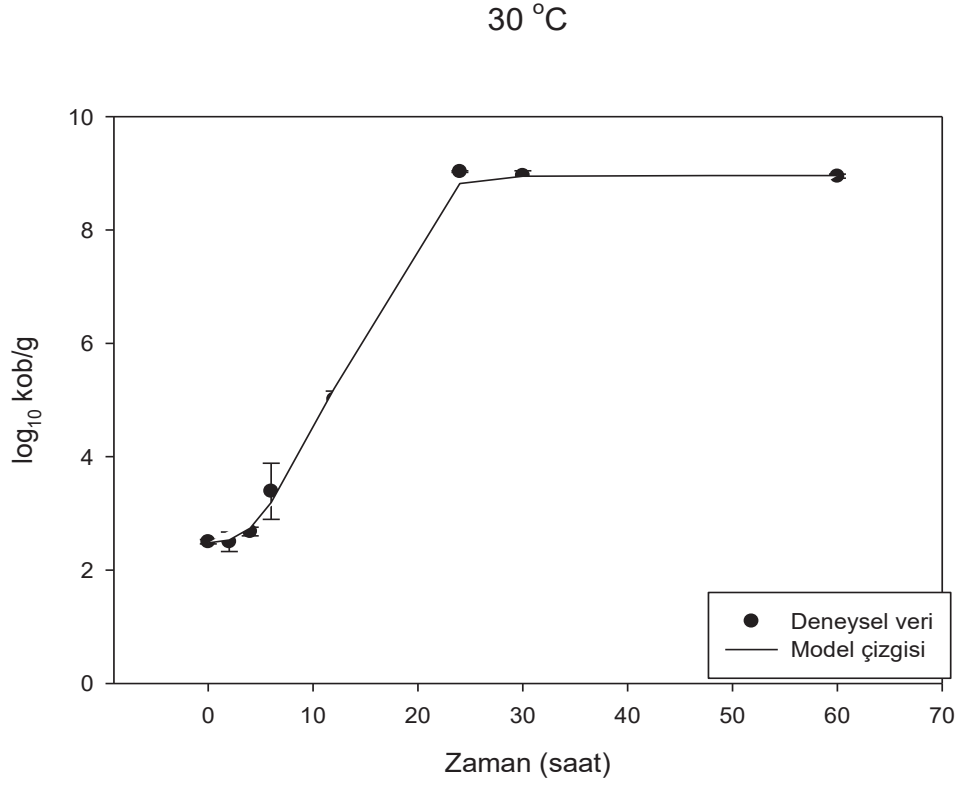
Benzer şekilde Omac, (2024) tarafından yürütülen bir çalışmada, doğranmış havuçta *Salmonella* spp.'nin 10–35°C aralığında çoğalma gösterdiği bildirmiştir. Özellikle düşük sıcaklıklarda yavaş büyüme eğilimi gözlenmiş, ancak 25°C ve üzerindeki sıcaklıklarda hızlı çoğalma kaydedilmiş ve maksimum bakteri konsantrasyonunun 8–9 log kob/g seviyelerine ulaştığı rapor edilmiştir. Puerta-Gomez ve ark., (2013) tarafından yürütülen bir başka çalışmada ise, bebek ıspanak yapraklarında *Salmonella* Typhimurium LT2 suşunun büyüme davranışı 10–37°C aralığında değerlendirilmiş; 10°C ve 20°C'de büyümenin sınırlı olduğu, buna karşın 30°C ve üzerindeki sıcaklıklarda hızlı çoğalma gözlemlendiği ve maksimum 6–9 log kob/g düzeyine ulaşıldığı belirtilmiştir. Bu bulgular, düşük sıcaklıklarda hücresel metabolizmanın yavaşlaması nedeniyle bakteriyel büyümenin sınırlı kaldığını, ancak uygun sıcaklık koşullarında hızlı bir şekilde çoğalabildiğini ortaya koymaktadır.



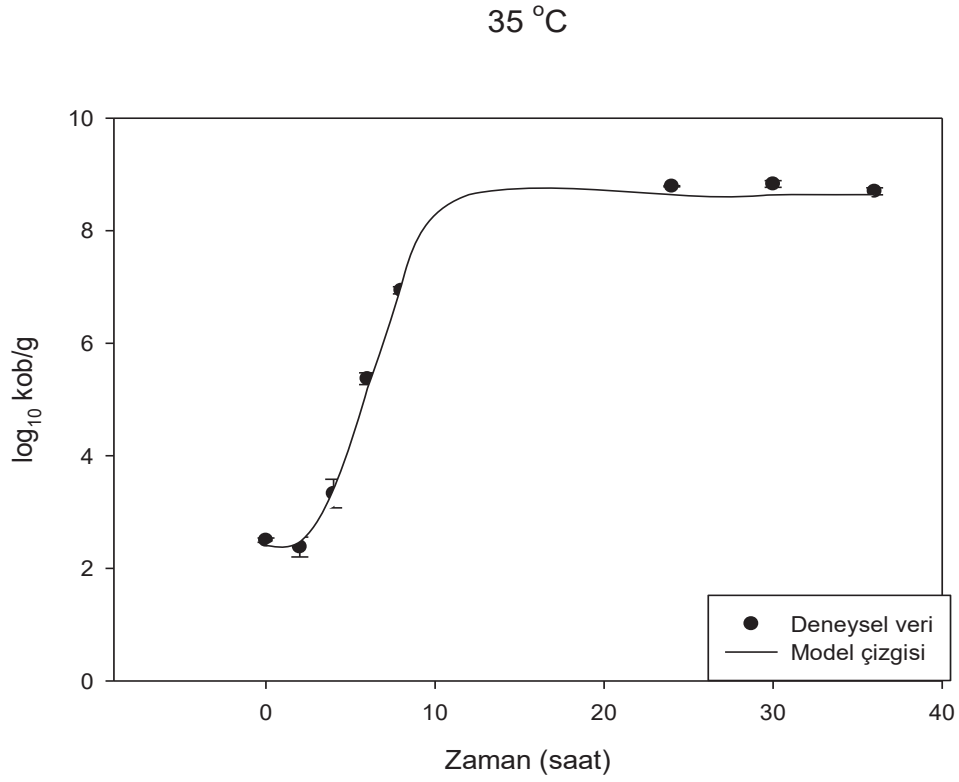
Şekil 4.1. Doğranmış soğanda *Salmonella* büyümesi (15°C)



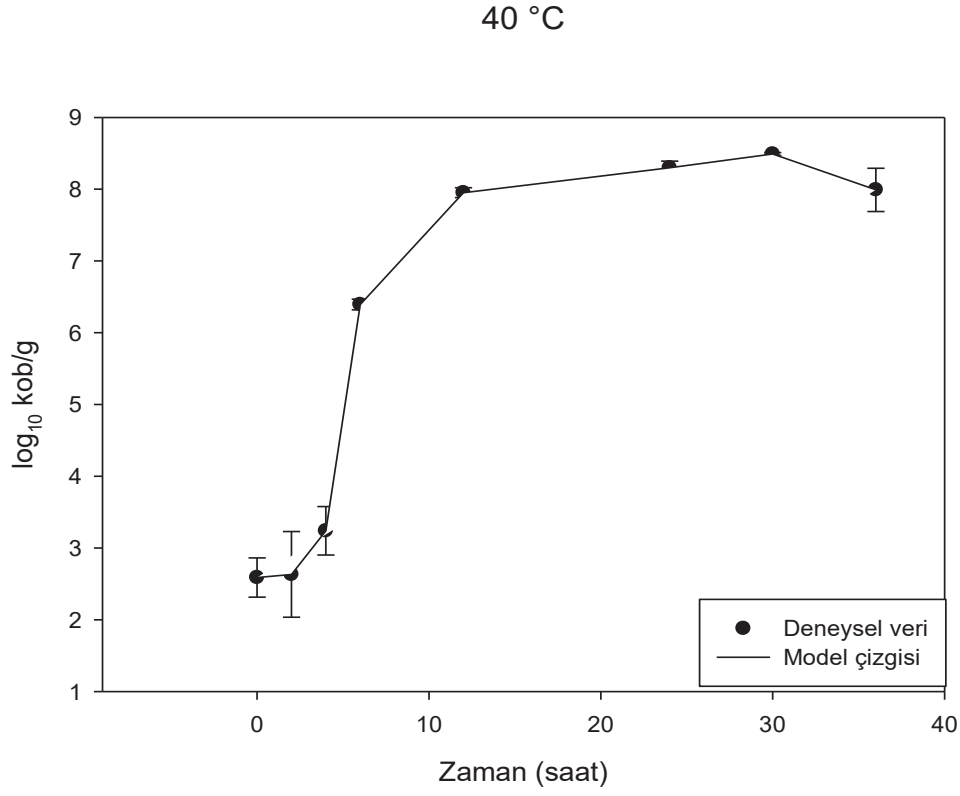
Şekil 4.2. Doğranmış soğanda *Salmonella* büyümesi (25°C)



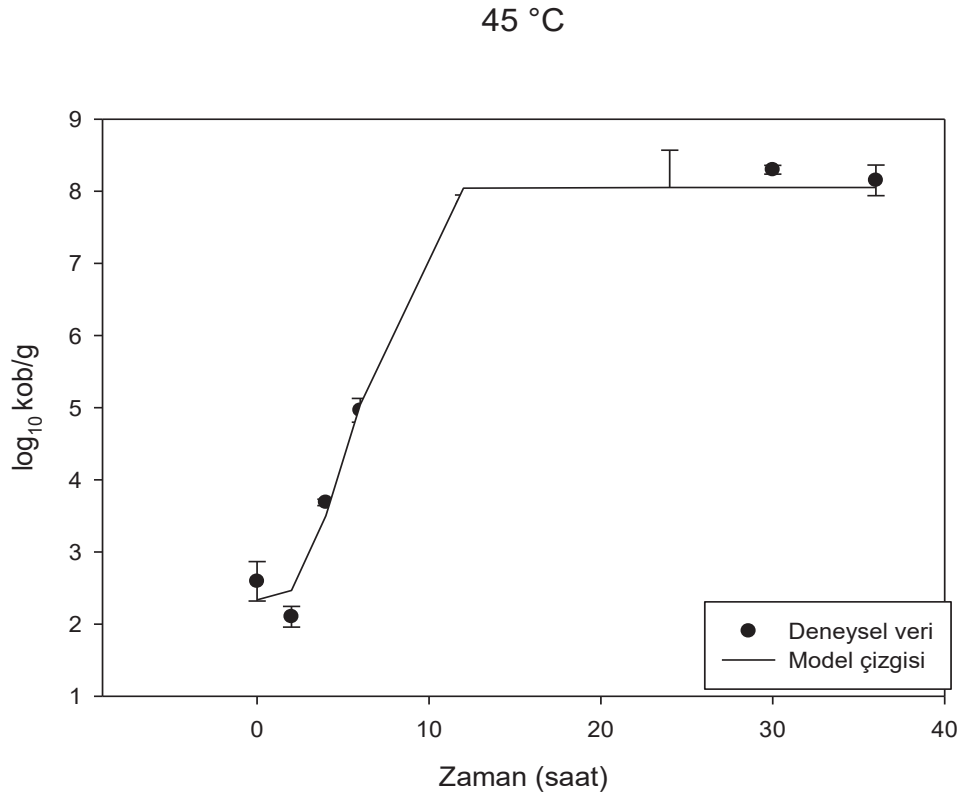
Şekil 4.3. Doğranmış soğanda *Salmonella* büyümesi (30°C)



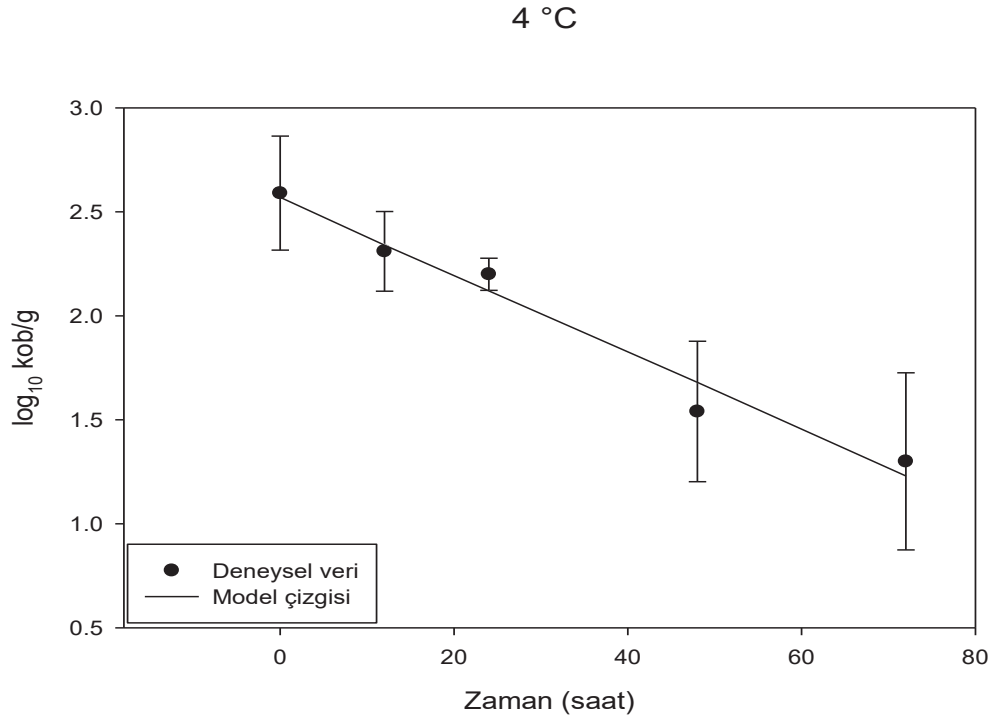
Şekil 4.4. Doğranmış soğanda *Salmonella* büyümesi (35°C)



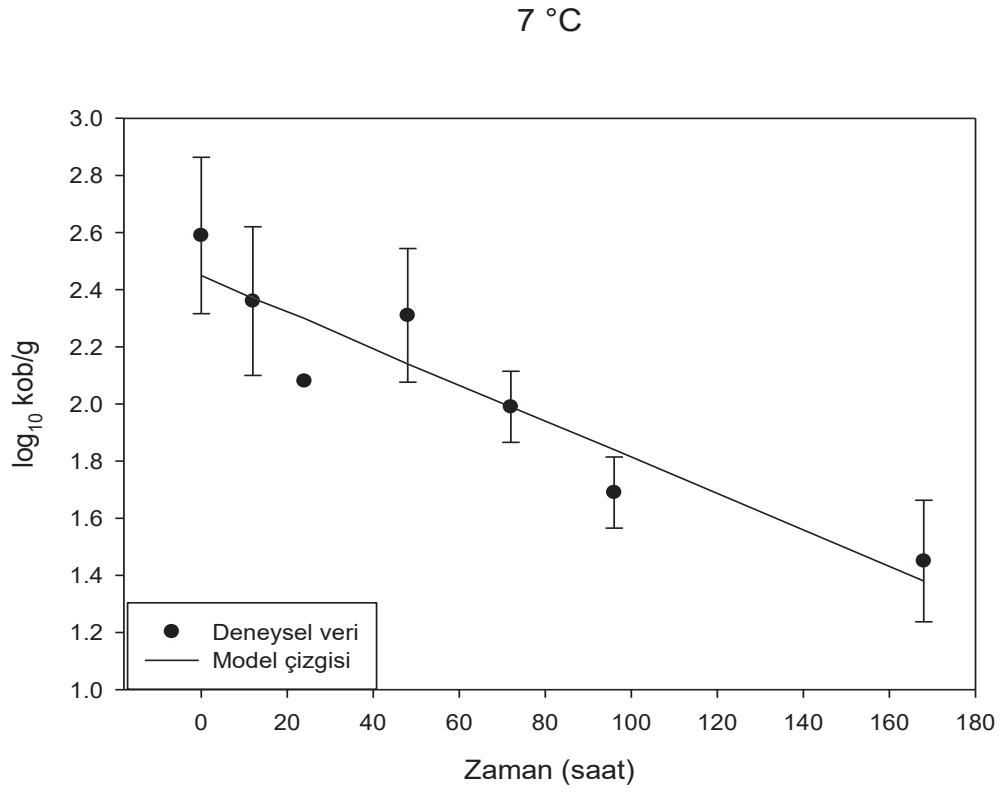
Şekil 4.5. Doğranmış soğanda *Salmonella* büyümesi (40°C)



Şekil 4.6. Doğranmış soğanda *Salmonella* büyümesi (45°C)

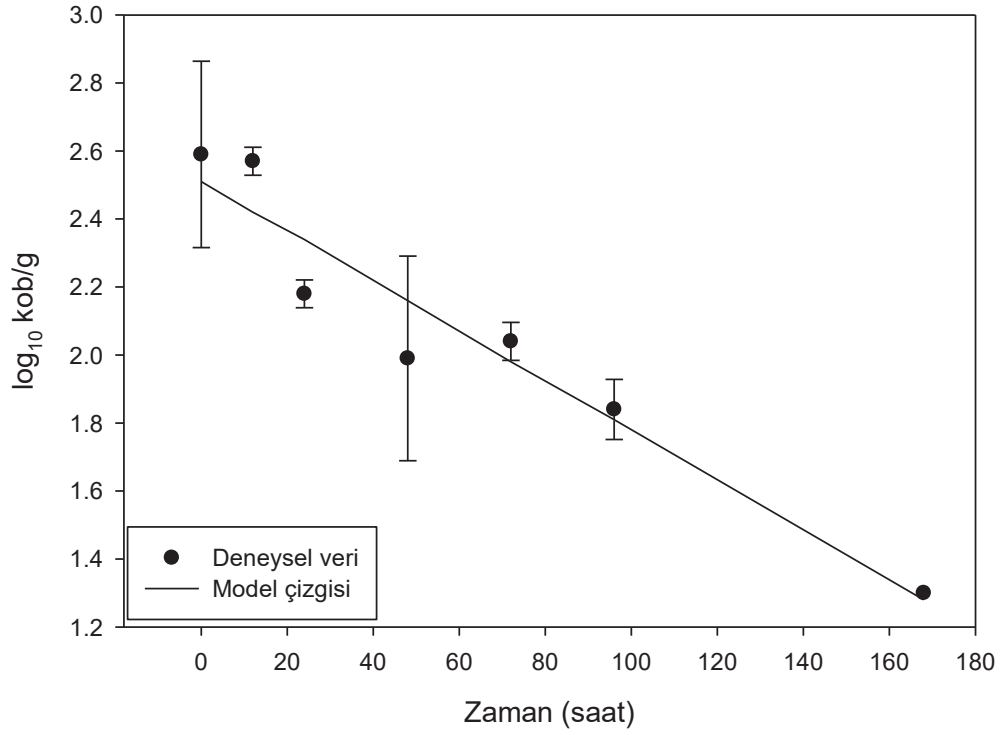


Şekil 4.7. Doğranmış soğanda *Salmonella* inaktivasyonu (4°C)



Şekil 4.8. Doğranmış soğanda *Salmonella* inaktivasyonu (7°C)

10 °C



Şekil 4.9. Doğranmış soğanda *Salmonella* inaktivasyonu (10°C)

4.2. Birincil Büyüme Modelleri

Bu bölümde, farklı sıcaklıklarda depolanan doğranmış soğanlarda *Salmonella* spp.'nin büyüme ve inaktivasyon dinamikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, bakteriyel büyüme 15–45°C sıcaklık aralığında gerçekleşirken, 4–10°C aralığında ise inaktivasyon gözlemlenmiştir. Büyümenin gerçekleştiği sıcaklıklara ait veriler, her bir sıcaklık için ayrı ayrı Baranyi modeli ile uyumlandırılmıştır (Şekil 4.1–4.6). Öte yandan, 4–10°C aralığında inaktivasyonun gözlemlendiği sıcaklıklardaki veriler, zamana bağlı olarak log-lineer model ile analiz edilmiştir. Her iki modele ait parametreler Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de sunulmuştur. Baranyi modeli sonuçları, büyümenin gözlemlendiği tüm sıcaklıklar için deneysel verilere yüksek düzeyde uyum sağlamıştır. Bu modele ait kök ortalama kare hata (RMSE) değerleri 0,02 ile 0,31 log kob/g arasında değişmiş; determinasyon katsayısı (R^2) değerleri ise 0,95 ile 0,99 aralığında bulunmuştur. Düşük RMSE ve yüksek R^2 değerleri, modelin verilerle yüksek düzeyde uyum gösterdiğini ve güvenilir sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır.

Doğranmış soğanlardaki başlangıç bakteri konsantrasyonları, sıcaklık değişiminden anlamlı düzeyde etkilenmemiştir. 15°C’ de 2,50 (95% GA: 2,39–2,60), 25°C’ de 2,50 (95% GA: 2,47–2,53), 30°C’ de 2,51 (95% GA: 2,38–2,65), 35 °C’ de 2,41 (95% GA: 1,96–2,87), 40°C’ de 2,61 (95% GA: 2,17–3,05) ve 45°C’ de 2,33 (95% GA: 1,60–3,07) log kob/g olarak ölçülen değerler, deneysel olarak benzer seviyelerde bulunmuştur. Farklı sıcaklıkların büyüme kinetikleri üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, maksimum büyüme oranı (μ_{max}) sıcaklıkla birlikte artış göstermiştir. 15°C’de 0,34 (95% GA: 0,18–0,51) sa⁻¹ olarak belirlenen büyüme oranı, 25°C’ de 0,92 (95% GA: 0,85–0,98), 30°C’ de 1,28 (95% GA: 1,16–1,40), 35°C’ de 2,11 (95% GA: 1,59–2,64) ve 40°C’ de 3,77 (95% GA: 2,57–4,96) sa⁻¹’ye kadar yükselmiştir. Ancak 45°C’de büyüme oranı 1,81 (95% GA: 0,47–3,14) sa⁻¹’ye gerileyerek düşüş göstermiştir. Bu durum, optimum büyüme sıcaklığının yaklaşık 40°C olduğunu, 45°C’de ise yüksek sıcaklık nedeniyle büyüme hızında azalma yaşandığını göstermektedir. Literatürde yer alan benzer çalışmalar bu bulgularla büyük ölçüde örtüşmektedir. Örneğin Son ve ark., (2024) doğranmış soğanda *Salmonella* spp.’nin 15°C, 25°C ve 36°C’ deki büyüme hızlarını sırasıyla 0,1, 0,33 ve 1,31 sa⁻¹ olarak raporlamışlardır. Bu değerler, mevcut çalışmada elde edilen büyüme hızlarından daha düşük olmasına rağmen, istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır (p>0.05). Başka bir sebze türü olan marulda yürütülen bir çalışmada ise Sant’Ana ve ark., (2012) *Salmonella enterica* ’nın büyüme hızını 15°C, 20°C ve 25°C’ de sırasıyla 0,12, 0,16 ve 0,31 sa⁻¹ olarak bildirmiştir. Yoon ve ark., (2014) tarafından lahana üzerinde yapılan bir çalışmada ise, *Salmonella* spp.’nin büyüme hızının 15°C ile 25°C arasındaki sıcaklıklarda 0,03 ila 0,26 sa⁻¹ arasında değiştiği raporlanmıştır. Benzer şekilde Xiao ve ark., (2021) marulda 16°C’de 0,32 sa⁻¹ olarak tespit edilen büyüme hızının, mevcut çalışmada 15°C için elde edilen değerle benzerlik gösterdiğini, ancak 26°C ve 36°C’ deki büyüme hızlarının bu çalışmada rapor edilenden düşük olduğunu belirtmişlerdir. Ndraha ve ark., (2022) bakteri türleri arasındaki büyüme hızlarında 15°C ve üzeri sıcaklıklarda anlamlı farklılıkların ortaya çıktığını rapor etmiş ve bakteri suşları arasındaki varyasyon açısından değerlendirildiğinde ise, yerel *Salmonella* izolatlarının 15°C, 20°C ve 25°C’deki büyüme hızlarının, standart suşların büyüme hızlarına kıyasla anlamlı derecede yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, sebze türünün *Salmonella* spp.’nin büyüme kinetiği üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, suş varyasyonlarının büyüme hızı üzerindeki etkisinin, bakterilerin çevresel stres faktörlerine karşı geliştirdiği savunma mekanizmalarıyla (Nikparvar ve ark., 2021) ya da halen tam olarak

açıklanamamış başka faktörlerle ilişkili olarak belirli sıcaklık aralıklarında daha belirgin hale gelebileceği değerlendirilmektedir.

Lag faz süresi (t_{lag}) de sıcaklıkla birlikte belirgin şekilde azalmıştır. 15°C’ de 34,96 (95% GA: 28,25–41,67) saat olan lag süresi, 25°C’ de 7,62 (95% GA: 7,21–8,02), 30°C’ de 4,92 (95% GA: 4,27–5,58), 35°C’ de 2,96 (95% GA: 1,88–4,05), 40°C’ de 3,69 (95% GA: 3,00–4,37) ve 45°C’ de 2,56 (95% GA: 0,09–5,04) saat olarak hesaplanmıştır. Özellikle 30–45°C aralığında lag süresinin oldukça kısa olması, bakterilerin bu sıcaklıklarda daha hızlı adapte olduğunu göstermektedir. Ancak 45°C’deki geniş güven aralığı, ortam koşullarının stres oluşturduğunu ve deneysel değişkenliğin arttığını düşündürmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar da bu eğilimi desteklemektedir. Örneğin, Son ve ark., (2024) doğranmış soğan örneklerinde *Salmonella* spp.’nin lag faz süresini 15°C, 25°C ve 36°C’de sırasıyla 24,33, 6,18 ve 4,79 saat olarak bildirmiştir; bu değerler, mevcut çalışmada elde edilen bulgularla benzerlik göstermektedir. Farklı bir sebze olan marulda yürütülen çalışmada Veys ve ark., (2016) *Salmonella* spp.’nin lag faz süresini 25°C’de 1,85 saat ve 37°C’de 0,85 saat olarak raporlamıştır; bu sonuçlar da çalışmamızdaki değerlere oldukça yakındır. Yoon ve ark., (2014) ise, lahana içerisinde *Salmonella*’nın lag faz süresini 15–35°C aralığında 10,18 ila 0,81 saat olarak bildirmiştir; bu bulgular, genel eğilimi desteklemekle birlikte, çalışmamızda elde edilen oranlardan kısmen daha düşük kalmıştır. Öte yandan Elias ve ark., (2018) 37°C’de en kısa lag faz süresinin gözlemlendiğini, ancak 40°C’de bu sürede hafif bir artış yaşandığını belirtmişlerdir. Bu veriler birlikte değerlendirildiğinde, lag faz süresinin hem sıcaklığa hem de sebze türüne ve suş özelliklerine bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebileceği anlaşılmaktadır.

Maksimum bakteri konsantrasyonu, sıcaklığa bağlı olarak değişiklik göstermiştir. 15°C’ de 6,83 (95% GA: 6,71–6,96) log kob/g olan bu değer, 25°C’ de 8,28 (95% GA: 8,25–8,31) ve 30°C’ de 8,94 (95% GA: 8,83–9,04) ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Daha yüksek sıcaklıklarda ise 35°C’ de 8,64 (95% GA: 8,34–8,94), 40°C’ de 8,18 (95% GA: 7,87–8,49) ve 45°C’ de 8,05 (95% GA: 7,62–8,48) log kob/g düzeylerine gerilemiştir. Bu bulgular, 30°C’nin maksimum popülasyon düzeyine ulaşmak açısından en verimli sıcaklık olduğunu, 40°C ve üzerindeki sıcaklıklarda ise bakteriyel büyüme kapasitesinin azaldığını göstermektedir. Literatürde yer alan çeşitli çalışmalar da bu sonuçları destekler niteliktedir. Örneğin, Ndraha ve ark., (2022) ile Yoon ve ark., (2014) *Salmonella* spp.’nin marulda 15–35°C arasındaki sıcaklıklarda benzer maksimum popülasyon düzeylerine ulaştığını bildirmişlerdir. Gumudavelli ve ark., (2007) ise, *Salmonella* Enteritidis’in yumurta sarısında 10–43°C arasında yaklaşık 8,65 log kob/g düzeyinde sabit bir maksimum hücre

yoğunluğuna ulaştığını ve başlangıç inokulumunun 2,5 log kob/g olduğunu belirtmişlerdir. Buna karşılık, Son ve ark., (2024) doğranmış soğan örneklerinde 15–36°C arasında *Salmonella* spp. için maksimum büyüme konsantrasyonunu 4,70 ila 7,54 log kob/g aralığında rapor etmişlerdir. Benzer şekilde Koseki ve Isobe, (2005) marulda *Salmonella* spp.'nin maksimum hücre konsantrasyonunu 15°C'de 6,01 log kob/g ve 25°C'de 6,51 log kob/g olarak bildirmiştir. Mevcut çalışmada elde edilen maksimum hücre konsantrasyonlarıyla literatürde bildirilen değerler arasındaki farklılıklar, büyük olasılıkla kullanılan mikroorganizma suşlarının genetik özellikleri ve gıda matrikslerinin bileşiminden kaynaklanmaktadır. Mikrobiyal çoğalma, öncelikle ortamda yeterli düzeyde besin bulunduğunda sıcaklıktan etkilenmektedir (Baranyi ve Roberts, 1994; Aruscavage ve ark., 2006). Ancak besinlerin sınırlı olduğu rekabetçi ortamlarda, maksimum hücre konsantrasyonunun farklı faktörlerden etkilendiği bildirilmektedir. Bu gibi koşullarda, hızlı büyüme yeteneğine sahip mikroorganizmalar, besin seviyelerinin yüksek olduğu ortamlarda baskınlık sağlayarak ya da besinlerin tükenmeye başladığı durumlarda bile büyümeye devam ederek avantaj elde edebilir. Ayrıca, antimikrobiyal bileşik üretme kapasitesine sahip rakip mikroorganizmalar da bu rekabet ortamında üstünlük sağlayabilmektedir (Aruscavage ve ark., 2006; Schuenzel ve Harrison, 2002).

Genel olarak elde edilen veriler, sıcaklık artışının bakteriyel büyüme hızını artırdığını; ancak bu etkinin 40°C üzerindeki sıcaklıklarda sınırlanabileceğini ortaya koymuştur. Lag faz süresinin yüksek sıcaklıklarda kısılması, bakterilerin hızlı adaptasyon kabiliyetini gösterirken; 45°C'deki büyüme oranı ve lag süresine ilişkin geniş güven aralıkları, bu sıcaklığın stres oluşturduğunu ve sistemdeki biyolojik değişkenliği artırdığını göstermektedir.

Tablo 4.1. Farklı sıcaklıklarda depolanmış doğranmış soğanlarda *Salmonella* spp.'nin büyüme kinetik parametreleri

Baranyi model						
Sıcaklık	Maksimum büyüme oranı (μ_{max})	Lag fazı (t_{lag})	Başlangıç konsantrasyonu (y_0 , log kob/g)	Maksimum büyüme konsantrasyonu (y_{max} , log kob/g)	RMSE	R ²
15	0,34 (0,18-0,51)*	34,96 (28,25-41,67)	2,50 (2,39-2,60)	6,83 (6,71-6,96)	0,08	0,97
25	0,92 (0,85-0,98)	7,62 (7,21-8,02)	2,50 (2,47-2,53)	8,28 (8,25-8,31)	0,02	0,98
30	1,28 (1,16-1,40)	4,92 (4,27-5,58)	2,51 (2,38-2,65)	8,94 (8,83-9,04)	0,17	0,96
35	2,11 (1,59-2,64)	2,96 (1,88-4,05)	2,41 (1,96-2,87)	8,64 (8,34-8,94)	0,24	0,95
40	3,77 (2,57-4,96)	3,69 (3,00-4,37)	2,61 (2,17-3,05)	8,18 (7,87-8,49)	0,22	0,99
45	1,81 (0,47-3,14)	2,56 (0,09-5,04)	2,33 (1,60-3,07)	8,05 (7,62-8,48)	0,31	0,99

*95% Güven aralığı

Tablo 4.2. Farklı sıcaklıklarda depolanmış doğranmış soğanlarda *Salmonella* spp.'nin inaktivasyon kinetik parametreleri

Log-linear model				
Sıcaklık	Başlangıç konsantrasyonu (y ₀ , log kob/g)	D-değeri (saat)	RMSE	R ²
10	2,51 (2,32-2,70)*	136,32 (92,71-179,93)	0,13	0,93
7	2,45 (2,22-2,67)	157,34 (88,01-226,68)	0,16	0,87
4	2,57 (2,34-2,8)	53,81 (37,55-70,06)	0,1	0,97

*95% Güven aralığı

Log-linear model kullanılarak gerçekleştirilen analizler, düşük sıcaklık koşullarında bakteriyel inaktivasyon kinetiğinin değerlendirilmesini amaçlamaktadır (Tablo 4.2). Bu kapsamda sıcaklık seviyeleri 10°C, 7°C ve 4°C olarak belirlenmiş; her bir sıcaklık için başlangıçtaki bakteri konsantrasyonu, D-değeri ile modelin uyum parametreleri olan kök ortalama kare hata (RMSE) ve determinasyon katsayısı (R²) hesaplanmıştır. Modelin performansı değerlendirildiğinde, RMSE değerleri sırasıyla 10°C için 0,13, 7°C için 0,16 ve 4°C için 0,10 olarak tespit edilmiştir. Buna karşılık, R² değerleri 10°C'de 0,93, 7°C'de 0,87 ve 4°C'de 0,97 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, modelin tüm sıcaklıklarda veri setine yüksek düzeyde uyum sağladığını göstermektedir. Özellikle 4°C'de elde edilen yüksek R² ve düşük RMSE değeri, log-linear modelin bu sıcaklıkta bakteriyel inaktivasyonun tahmininde daha güçlü bir performans sergilediğine işaret etmektedir.

Başlangıçtaki bakteri konsantrasyonları, uygulanan sıcaklık koşulları arasında benzer düzeylerde ölçülmüştür. 10°C, 7°C ve 4°C sıcaklıklarda sırasıyla 2,51 log kob/g (95% GA: 2,32–2,70), 2,45 log kob/g (95% GA: 2,22–2,67) ve 2,57 log kob/g (95% GA: 2,34–2,80) olarak tespit edilen değerler, deneysel koşulların tutarlılığını ve uygulama standardizasyonunu ortaya koymaktadır. Mikroorganizmaların 1 log birim azalması için gerekli süreyi ifade eden D-değeri, sıcaklık azaldıkça anlamlı bir düşüş göstermiştir. Bu bağlamda, 10°C'de 136,32 saat (95% GA: 92,71–179,93), 7°C'de 157,34 saat (95% GA: 88,01–226,68) ve 4°C'de 53,81 saat (95% GA: 37,55–70,06) olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular, özellikle 4°C'de bakteriyel inaktivasyonun daha hızlı gerçekleştiğini ve mikrobiyal yükün daha kısa sürede azaldığını göstermektedir (p < 0.05). Söz konusu farklılıklar, sıcaklığın mikrobiyal inaktivasyon kinetiği üzerindeki belirgin etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Literatürde yer alan benzer çalışmalar da bu bulgularla örtüşmektedir. Örneğin, Tarlak ve ark., (2020) taze kesilmiş marulda *Salmonella* Reading konsantrasyonunun 4°C ve 8°C'deki depolama süresine bağlı olarak azaldığını; 10 günlük depolama sonunda

4°C'deki azalmanın 8°C'ye kıyasla daha fazla olduğunu bildirmiştir ($p < 0.05$). Vandamm ve ark., (2013) ise 12°C'de *Salmonella* spp. konsantrasyonunda değişim gözlemlenmezken, 4°C'de 7 günlük depolama süresi boyunca anlamlı bir azalma meydana geldiğini rapor etmiştir. Bu çalışmalar, düşük sıcaklıkların mikrobiyal kontrol açısından etkili bir yöntem olduğunu ve özellikle 4°C'nin mikrobiyal güvenliğin sağlanması açısından kritik bir sıcaklık seviyesi olduğunu göstermektedir. Nitekim, 7–10°C aralığında mikroorganizmaların daha uzun süre canlı kalabildiği; buna karşın 4°C'de daha kısa sürede yüksek oranda mikrobiyal azalma sağlandığı gözlemlenmiştir. Bu durum, soğuk zincir uygulamaları ve gıda güvenliği açısından 4°C'nin tercih edilmesi gereken bir sıcaklık aralığı olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada hesaplanan ortalama inaktivasyon oranı (k), 4°C, 7°C ve 10°C sıcaklıkları için sırasıyla 0,043, 0,015 ve 0,018 sa^{-1} olarak bulunmuştur. Mishra ve ark., (2017a) tarafından log-logistic model kullanılarak yapılan bir çalışmada, yeşil yapraklı sebzelerde 4°C ve 5°C için *Salmonella* spp.'nin k değeri 0,013 sa^{-1} olarak rapor edilmiştir. Benzer şekilde Tarlak ve ark., (2020) log-linear model kullanarak, doğranmış marulda *Salmonella* Reading için k değerini 4°C'de 0,009 sa^{-1} , 8°C'de ise 0,006 sa^{-1} olarak hesaplamışlardır. Vandamme ve ark., (2013) ise Baranyi modeli ile kerevizde yapılan analizlerde, *Salmonella* spp.'nin 4°C ve 12°C'deki inaktivasyon oranlarını sırasıyla 0,007 sa^{-1} ve 0,002 sa^{-1} olarak bildirmiştir. Daha yakın tarihli bir çalışmada, Kaur ve Yemmireddy, (2023) tarafından marul, lahana, havuç ve karışık salatada log-linear model aracılığıyla yapılan değerlendirmelerde, 4°C'de *Salmonella* spp.'nin k değerleri sırasıyla 0,010, 0,013, 0,033 ve 0,016 sa^{-1} olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen k değerlerinin literatürdeki bazı verilerden farklılık göstermesi, büyük ölçüde kullanılan model türünden kaynaklanabilir (Li ve ark., 2018). Bunun yanı sıra, *Salmonella* serovar ve suşlarının farklı sıcaklıklarda gösterdiği adaptasyon yetenekleri ile kullanılan ürünlerin bileşimsel özellikleri de bu farklılıkların oluşmasında etkili olabilir (Espinosa ve ark., 2020; Li ve ark., 2018).

4.3. İkincil Büyüme Modelleri

Bu çalışmada, mikroorganizmanın sıcaklığa bağlı maksimum büyüme hızını ($\mu_{\max}$) tahmin etmek amacıyla Tam Ratkowsky karekök modeli kullanılmıştır (Şekil 4.10). Model parametreleri sırasıyla $a = 0,081$, $b = 3,46$ olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.3). Tahmin edilen minimum sıcaklık ($T_{\min}$) 7,09°C, maksimum sıcaklık ($T_{\max}$) ise 45,25°C olarak bulunmuştur. Modelin doğruluk düzeyi, kök ortalama kare hata (RMSE) ve determinasyon

katsayısı (R^2) ile değerlendirilmiş; RMSE değeri 0,43, R^2 değeri ise 0,89 olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.3). Bu sonuçlar, Tam Ratkowsky modelinin gözlenen verilerle yüksek düzeyde uyum sağladığını ve $\mu_{\max}$ değerinin sıcaklıkla ilişkisini güvenilir biçimde yansıttığını göstermektedir.

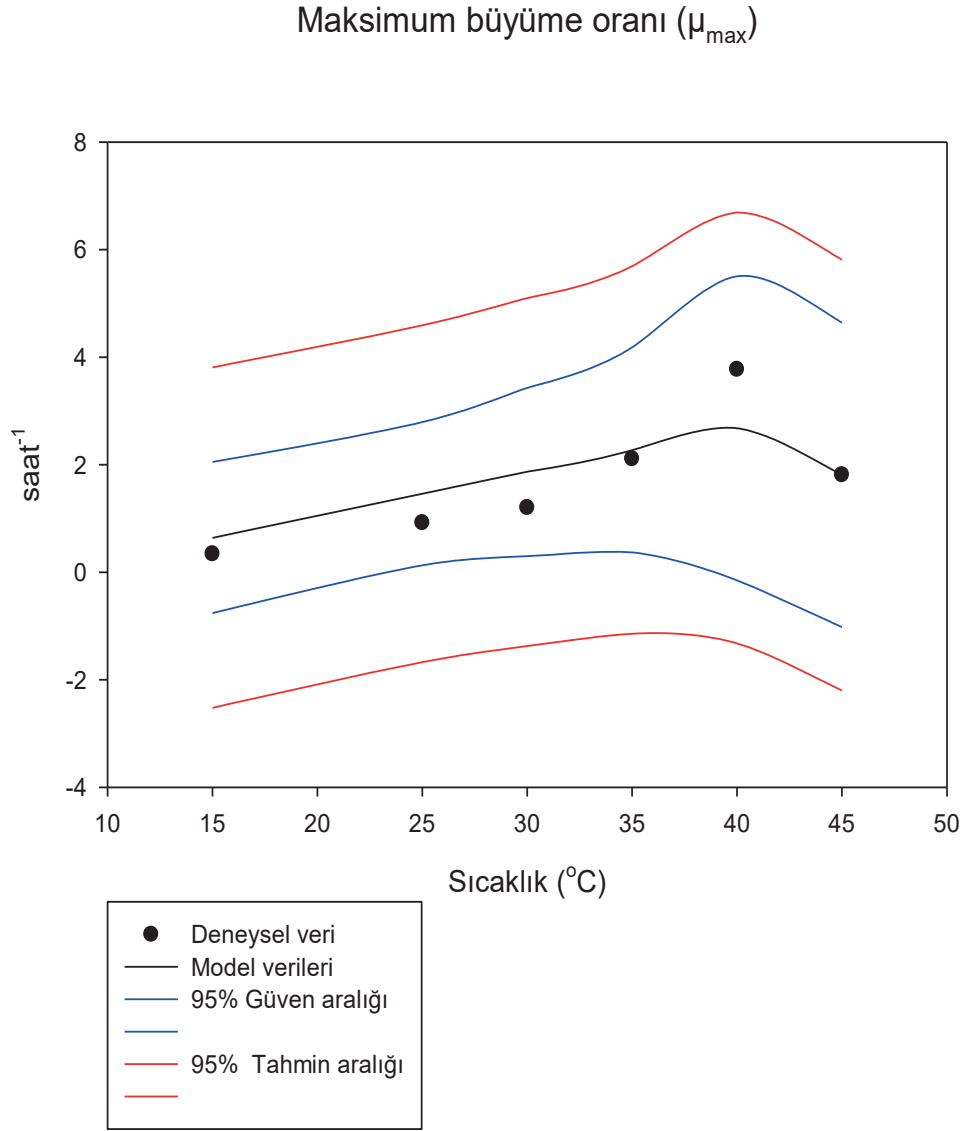
Mikrobiyal büyüme kinetiğini tanımlamak amacıyla uygulanan Tam Ratkowsky karekök modeli, çalışmada kullanılan sıcaklık aralığı için yüksek derecede uyum göstermiştir. Modelin tahmin ettiği $T_{\min}$ (7,09°C) değeri, mikroorganizmanın büyüme gösterebildiği en düşük sıcaklık sınırını ortaya koyarken; $T_{\max}$ (45,25°C), büyümenin sona erdiği üst sıcaklık sınırını tanımlamaktadır. Bu değerler, çevresel sıcaklık koşullarına duyarlılığı yüksek olan mikroorganizmaların gıda güvenliği açısından oluşturabileceği risklerin daha doğru tahmin edilmesini mümkün kılmaktadır. Son ve ark., (2024) *Salmonella* spp.'nin doğranmış soğanlardaki $T_{\min}$ değerini 12,07°C olarak raporlamışlardır. Bu çalışmadaki değerle söz konusu bulgu arasındaki farkın, kullanılan *Salmonella* suşlarının farklılığından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Nitekim, Ndraha ve ark., (2022) çeşitli *Salmonella* suşlarının marul üzerindeki $T_{\min}$ değerlerinin 5,47°C ile 8,81°C arasında değiştiğini bildirmiştir. Bu bulgular, aynı tür içerisinde yer alan farklı suşların, çevresel faktörlere – özellikle sıcaklığa – verdikleri yanıtlarda anlamlı farklılıklar gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda Lanou ve Koutsoumanis, (2013) belirli bir patojenin çevresel stres koşullarına tepkisinin suş düzeyinde değişkenlik gösterebileceğini ve bunun da mikrobiyal büyüme parametrelerine etki edebileceğini öne sürmüştür.

Ratkowsky modeli, sıcaklığın mikrobiyal büyüme hızına etkisini karekök fonksiyonu ile açıklayarak biyolojik geçerliliği yüksek sonuçlar sunar. Bu yönüyle, farklı gıda matrislerinde ve çevresel koşullarda gerçekleştirilecek mikrobiyal risk analizlerinde tercih edilebilecek etkili bir parametrik modeldir. Ayrıca, modelin tahmin ettiği $T_{\min}$ değeri, özellikle soğuk zincir uygulamalarında büyümenin baskılanabileceği sıcaklık seviyelerinin belirlenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Literatürde yer alan benzer çalışmalar, Ratkowsky modelinin farklı mikroorganizmalar için güvenilir tahminler sunduğunu göstermektedir (Koseki ve Isobe, 2005; Ndraha ve ark., 2022; Omac, 2024; Tarlak ve ark., 2023). Bununla birlikte modelin farklı serovarlar ve gıda türlerinde test edilmesi, genel geçerliliğini değerlendirmek açısından önem arz etmektedir.

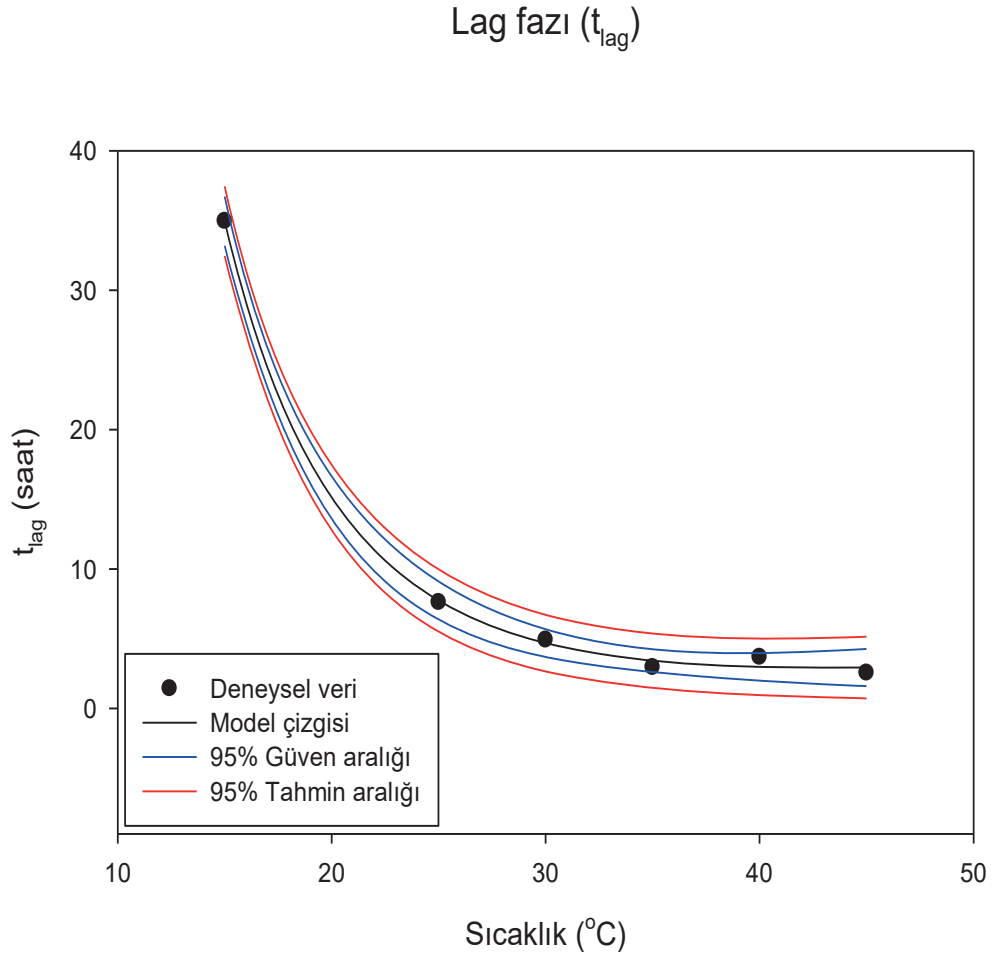
Sıcaklık değişiminin mikrobiyal büyüme parametreleri üzerindeki etkisini modellemek amacıyla yapılan analizlerde, lag fazı süresi (t_{lag}) için polinomsal (Polynomial) ve ters ikinci dereceden (Inverse Second Order) denklem kullanılmıştır (Şekil 4.11 ve

4.12). Lag fazına ilişkin modelin katsayıları $A_1 = 11,9216$, $A_2 = -779,5212$ ve $A_3 = 16873,9518$ olarak hesaplanmıştır. Modelin uyumu oldukça yüksek olup, RMSE değeri 0,15 ve determinasyon katsayısı (R^2) 1,00 olarak bulunmuştur (Tablo 4.4). Bu durum, modelin sıcaklıkla ilişkili lag fazı tahminlerinde mükemmele yakın bir uyum sağladığını göstermektedir. Lag fazının polinomsal ve ters ikinci dereceden polinom modelle açıklanması, mikroorganizmanın yeni çevresel koşullara adaptasyonu sürecini daha hassas biçimde yansıtmaktadır. Modelin determinasyon katsayısının 1,00 gibi mükemmel bir düzeyde olması, sıcaklık değişiminin lag fazı süresi üzerindeki etkisinin doğrusal olmayan ama öngörülebilir bir yapıda olduğunu göstermektedir. Sıcaklığın düşmesiyle birlikte lag fazının uzadığı, artmasıyla ise kısaldığı bilinen bir fenomendir; kullanılan model bu biyolojik gerçeği başarıyla yansıtmıştır. Maksimum büyüme konsantrasyonu (y_{max}) ise ikinci dereceden polinom (Quadratic) model ile değerlendirilmiştir. Modele ait katsayılar $A_1 = 2,4306$, $A_2 = 0,3812$ ve $A_3 = -0,0058$ olarak belirlenmiştir. Bu model için RMSE değeri 0,24 ve R^2 değeri 0,93 olarak hesaplanmış (Tablo 4.4), bu da modelin yüksek doğrulukta tahminler sunduğunu ortaya koymaktadır. Maksimum büyüme konsantrasyonu için kullanılan ikinci dereceden polinom model de yüksek uyum değerleri göstermiştir ($R^2 = 0,93$). Bu durum, sıcaklık arttıkça mikrobiyal büyümenin belirli bir noktaya kadar arttığını, ardından ise stres koşullarına bağlı olarak sınırlanabileceğini göstermektedir. Modelin negatif A_3 katsayısı, büyüme konsantrasyonunun sıcaklığa karşı parabolik (çan eğrisi şeklinde) bir tepki verdiğini ortaya koymaktadır. Bu, optimum sıcaklık koşullarında mikrobiyal yükün en yüksek seviyeye ulaşabileceğini, ancak bu eşiğin üzerinde sıcaklıkların bakteriyel büyümeyi baskılayabileceğini göstermektedir.

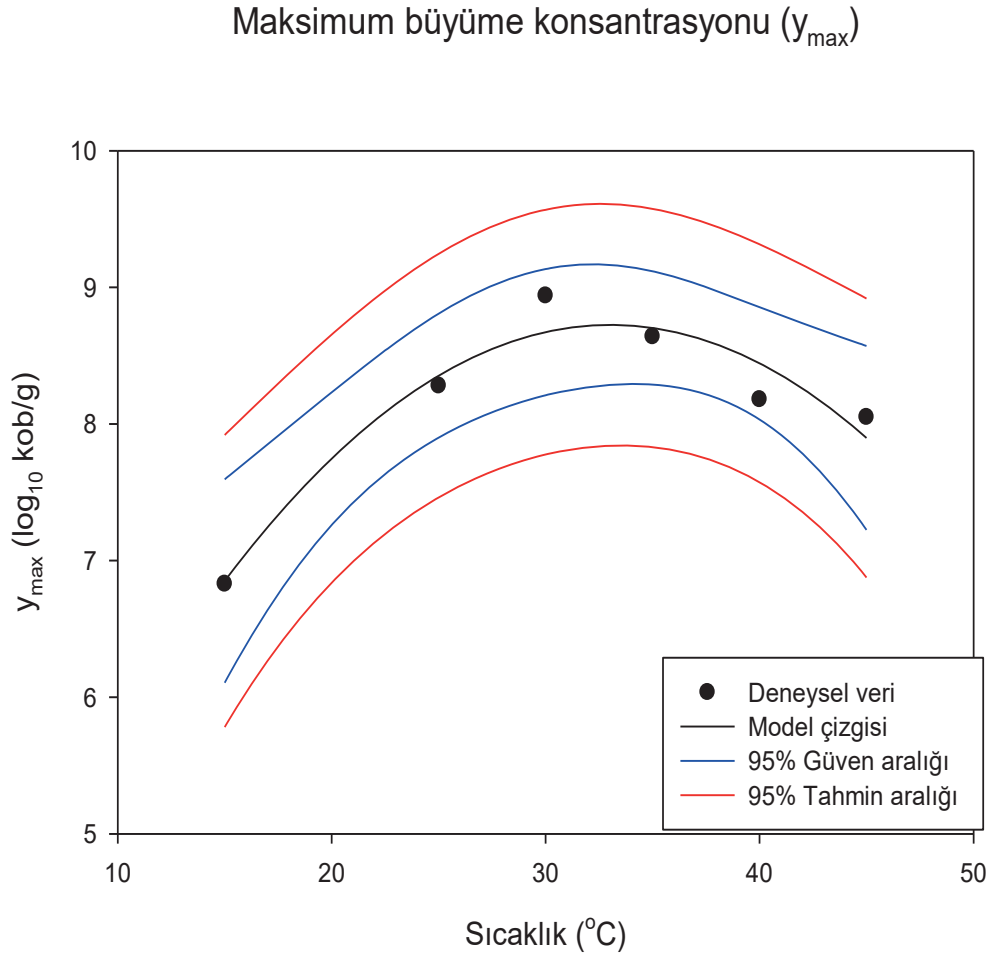
Bu çalışmada, sıcaklığın mikrobiyal büyüme kinetiği üzerindeki etkilerini daha ayrıntılı analiz edebilmek adına, maksimum büyüme oranı (y_{max}), lag fazı süresi (t_{lag}) ve maksimum büyüme konsantrasyonu (y_{max}) gibi parametreler farklı matematiksel modellerle değerlendirilmiştir. Her üç model de hem mikrobiyal risk değerlendirmelerinde hem de gıda güvenliği açısından kritik sıcaklık noktalarının belirlenmesinde önemli araçlar sunmaktadır. Özellikle gıdaların üretim, depolama ve dağıtım süreçlerinde sıcaklığa duyarlı planlamalar yapılması için bu tür modellemelere ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 4.10. Sıcaklığa bağlı olarak *Salmonella* bakterisinin maksimum büyüme oranının değişimi



Şekil 4.11. Sıcaklığa bağlı olarak *Salmonella* bakterisinin lag fazı değişimi



Şekil 4.12. Sıcaklığa bağlı olarak *Salmonella* bakterisinin maksimum büyüme konsantrasyonunun değişimi

Tablo 4.3. Doğranmış soğanda *Salmonella* spp.'nin maksimum büyüme oranı ($\mu_{\max}$) modeli

Model/Parameter	a	b	$T_{\min}$	$T_{\max}$	RMSE	R^2
($\mu_{\max}$)	0,081	3,46	7,09	45,25	0,43	0,89

Tablo 4.4. Doğranmış soğanda *Salmonella* spp.'nin lag fazı süresi (t_{lag}) ve maksimum büyüme konsantrasyonu ($y_{\max}$) modelleri

Model/Parameter	A_1	A_2	A_3	RMSE	R^2
(t_{lag})	11,92	-779,52	16873,95	0,15	1,00
($y_{\max}$)	2,43	0,38	-0,006	0,24	0,93

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, doğranmış soğan üzerinde *Salmonella* spp.'nin farklı sıcaklık koşullarındaki büyüme ve inaktivasyon dinamikleri deneysel ve modelleme temelli yaklaşımlarla incelenmiştir. Bulgular, *Salmonella* spp.'nin 15–45°C aralığında önemli düzeyde çoğalma gösterdiğini, özellikle 25–35°C sıcaklıklarda büyüme hızının ve maksimum bakteri konsantrasyonunun en yüksek seviyelere ulaştığını ortaya koymuştur. Buna karşın, 4–10°C aralığında mikrobiyal çoğalma gözlemlenmemiş; aksine bakteriyel inaktivasyon gerçekleşmiştir. Bu durum, düşük sıcaklıkların gıda güvenliği açısından kritik rol oynadığını ve özellikle 4°C'nin mikrobiyal kontrol açısından en etkili sıcaklık düzeyi olduğunu göstermektedir.

Baranyi, log-lineer ve Tam Ratkowsky modelleri ile yapılan analizler, bakteriyel büyüme ve inaktivasyon parametrelerinin sıcaklığa duyarlı şekilde değiştiğini, dolayısıyla sıcaklığın mikrobiyal kinetik üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Lag faz süresi yüksek sıcaklıklarda anlamlı biçimde azalmış; maksimum büyüme oranı ise 40°C'ye kadar artmış, ardından 45°C'de düşüş göstermiştir. Elde edilen model parametreleri ve uyum değerleri, bu tür matematiksel yaklaşımların gıda güvenliğini sağlama noktasında güçlü birer araç olarak kullanılabileceğini kanıtlamıştır.

Sonuç olarak, doğranmış soğan gibi taze ve yüksek su aktivitesine sahip ürünlerde sıcaklık kontrolü, *Salmonella* spp.'nin çoğalmasını önlemek açısından büyük önem taşımaktadır. Soğuk zincir uygulamalarının özellikle 4°C civarında etkin bir şekilde sürdürülmesi, mikrobiyal risklerin minimize edilmesi bakımından önerilmektedir. Ayrıca bu çalışmada geliştirilen birincil ve ikincil modelleme yaklaşımları, benzer gıdalarda mikrobiyal büyüme tahmini ve risk analizi için referans niteliği taşımaktadır. Bu modeller, tedarik zinciri boyunca mikrobiyal risklerin önceden belirlenmesine olanak tanıyarak, niceliksel mikrobiyal risk değerlendirme (QMRA) çalışmalarına ve risk azaltma stratejilerine bilimsel temel oluşturabilir.

6. KAYNAKLAR

- Akinde, S. B., Sunday, A. A., Adeyemi, F. M., Fakayode, I. B., Oluwajide, O. O., Adebunmi, A. A., Julius K. Oloke., Adebooye, C. O., 2016. Microbes in irrigation water and fresh vegetables: Potential pathogenic bacteria assessment and implications for food safety. *Applied Biosafety*, 21(2), 89–97.
- Akinwotu, K. O., Adeniran, H. A., 2025. Nutritional benefits, post-harvest challenges, and innovative preservation strategies of onions (*Allium cepa* L.): A comprehensive review. *Food Science and Preservation*, 32(3), 423–444. <https://doi.org/10.11002/fsp.2025.32.3.423>
- Alegbeleye, O. O., Sant’Ana, A. S., 2021. Risks associated with the consumption of irrigation water contaminated produce: On the role of quantitative microbial risk assessment. *Current Opinion in Food Science*, 41, 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.03.013>
- Alsalah, D., Al-Jassim, N., Timraz, K., Hong, P. Y., 2015. Assessing the groundwater quality at a Saudi Arabian agricultural site and the occurrence of opportunistic pathogens on irrigated food produce. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(10), 12391–12411. <https://doi.org/10.3390/ijerph121012391>
- Asnicar, F., Thomas, A. M., Passerini, A., Waldron, L., Segata, N., 2024. Machine learning for microbiologists. *Nature Reviews Microbiology*, 22(4), 191–205. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00984-1>
- Avila-Sosa, R., Nevárez-Moorillón, G. V., 2025. Machine learning and predictive microbiology: enhancing food safety models. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1655908. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1655908>
- Bahram-Parvar, M., Lim, L. T., 2018. Fresh-cut onion: A review on processing, health benefits, and shelf-life. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(2), 290–308. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12331>
- Banach, J. L., Sampers, I., Van Haute, S., Van der Fels-Klerx, H. J., 2015. Effect of disinfectants on preventing the cross-contamination of pathogens in fresh produce washing water. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(8), 8658–8677. <https://doi.org/10.3390/ijerph120808658>
- Baranyi, J., Buss da Silva, N., Ellouze, M., 2017. Rethinking tertiary models: relationships between growth parameters of *Bacillus cereus* strains. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1890. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01890>
- Baranyi, J., Pin, C., Ross, T., 1999. Validating and comparing predictive models. *International Journal of Food Microbiology*, 48(3), 159–166. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(99\)00035-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(99)00035-5)
- Baranyi, J., Roberts, T. A., 1995. Mathematics of predictive food microbiology. *International journal of Food Microbiology*, 26(2), 199–218. [https://doi.org/10.1016/0168-1605\(94\)00121-L](https://doi.org/10.1016/0168-1605(94)00121-L)

- Baranyi, J., Rockaya, M., Ellouze, M., 2024.** From data to models and predictions in food microbiology. *Current Opinion in Food Science*, 57, 101177. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2024.101177>
- Baranyi, J., Tamplin, M. L., 2004.** ComBase: a common database on microbial responses to food environments. *Journal of Food Protection*, 67(9), 1967-1971. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-67.9.1967>
- Berno, N. D., Tezotto-Uliana, J. V., dos Santos Dias, C. T., Kluge, R. A., 2014.** Storage temperature and type of cut affect the biochemical and physiological characteristics of fresh-cut purple onions. *Postharvest Biology and Technology*, 93, 91-96. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.02.012>
- Black, Z., Balta, I., Black, L., Naughton, P. J., Dooley, J. S., Corcionivoschi, N., 2021.** The fate of foodborne pathogens in manure treated soil. *Frontiers in Microbiology*, 12, 781357. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.781357>
- Blanchard, M., Castaigne, F., Willemot, C., Makhlouf, J., 1996.** Modified atmosphere preservation of freshly prepared diced yellow onion. *Postharvest Biology and Technology*, 9(2), 173-185. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(96\)00046-4](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(96)00046-4)
- 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>
- Brown, W., Ryser, E., Gorman, L., Steinmaus, S., Vorst, K., 2016.** Transit temperatures experienced by fresh-cut leafy greens during cross-country shipment. *Food Control*, 61, 146-155. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.09.014>
- Canatan, M., Munoz-Carpena, R., Boz, Z., 2025.** Continuous surface temperature monitoring of refrigerated fresh produce through visible and thermal infrared sensor fusion. *Postharvest Biology and Technology*, 222, 113354. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2024.113354>
- Carrasco, E., Pérez-Rodríguez, F., Valero, A., García-Gimeno, R. M., Zurera, G., 2007.** Survey of temperature and consumption patterns of fresh-cut leafy green salads: risk factors for listeriosis. *Journal of Food Protection*, 70(10), 2407-2412. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-70.10.2407>
- Carstens, C. K., Salazar, J. K., Darkoh, C., 2019.** Multistate outbreaks of foodborne illness in the United States associated with fresh produce from 2010 to 2017. *Frontiers in Microbiology*, 10, 2667. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02667>
- Cattivelli, A., Nissen, L., Casciano, F., Tagliazucchi, D., Gianotti, A., 2023.** Impact of cooking methods of red-skinned onion on metabolic transformation of phenolic compounds and gut microbiota changes. *Food Function*, 14(8), 3509-3525. <https://doi.org/10.1039/D3FO00085K>

- Centers for Disease Control and Prevention (CDC).**, 2025. *E. coli* outbreak linked to onions served at mcdonald's. <https://www.cdc.gov/ecoli/outbreaks/e-coli-O157.html>, 21 Nisan 2025.
- Centorame, P., Iannetti, L., Pomilio, F., Butler, F.**, 2024. Applying advanced predictive microbiology techniques to static and dynamic growth studies of *Listeria monocytogenes*. *EFSA Journal*, 22, e221114. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.e221114>
- Chernukha, I., Kupaeva, N., Kotenkova, E., Khvostov, D.**, 2022. Differences in antioxidant potential of *Allium cepa* husk of red, yellow, and white varieties. *Antioxidants*, 11(7), 1243. <https://doi.org/10.3390/antiox11071243>
- Chinchkar, A. V., Singh, A., Singh, S. V., Acharya, A. M., Kamble, M. G.**, 2022. Potential sanitizers and disinfectants for fresh fruits and vegetables: A comprehensive review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(10), e16495. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16495>
- Coetzer, E.**, 2006. Microbiological risk in produce from the field to packing. *Microbial hazard identification in fresh fruit and vegetables*, pp. 73-94, eds. J. James, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, <https://doi.org/10.1002/0470007761.ch3>
- Denich, L., Cheng, J. M., Smith, C. R., Taylor, M., Atkinson, R., Boyd, E., Chiu, L., Honish, L., Isaac, I., Kearney, A. J., Liang, J., Mah, V., J. W., Manore, A., D. McCormic, Z., Misfeldt, C., Nadon, C., Patel, K., Sharma, D., Todd, A., Hexemer, A.**, 2024. A multi-provincial outbreak of *Salmonella* Newport infections associated with red onions: A report of the largest *Salmonella* outbreak in Canada in over 20 years. *Epidemiology Infection*, 152, e106. <https://doi.org/10.1017/S0950268824001055>
- De Oliveira Elias, S., Noronha, T. B., Tondo, E. C.**, 2018. Assessment of *Salmonella* spp. and *Escherichia coli* O157: H7 growth on lettuce exposed to isothermal and non-isothermal conditions. *Food Microbiology*, 72, 206-213. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.11.016>
- Devarajan, N., Weller, D. L., Jones, M., Adell, A. D., Adhikari, A., Allende, A., Karp, D. S.**, 2023. Evidence for the efficacy of pre-harvest agricultural practices in mitigating food-safety risks to fresh produce in North America. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.11.016>
- Downes, K., Chope, G. A., Terry, L. A.**, 2010. Postharvest application of ethylene and 1-methylcyclopropene either before or after curing affects onion (*Allium cepa* L.) bulb quality during long term cold storage. *Postharvest Biology and Technology*, 55(1), 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2009.08.003>
- Du, Y., Tian, Q., Li, G., Yi, J., Hu, X., Jiang, Y.**, 2024. Advanced application of slightly acidic electrolyzed water for fresh-cut fruits and vegetables preservation. *Food Research International*, 195, 114996. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114996>

- Duchenne-Moutien, R. A., Neetoo, H.,** 2021. Climate change and emerging food safety issues: a review. *Journal of Food Protection*, 84(11), 1884-1897. <https://doi.org/10.4315/JFP-21-141>
- Duffy, E. A., Lucia, L. M., Kells, J. M., Castillo, A., Pillai, S. D., Acuff, G. R.,** 2005. Concentrations of *Escherichia coli* and genetic diversity and antibiotic resistance profiling of *Salmonella* isolated from irrigation water, packing shed equipment, and fresh produce in Texas. *Journal of Food Protection*, 68(1), 70-79. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-68.1.70>
- Emch, A. W., Waite-Cusic, J. G.,** 2016. Conventional curing practices reduce generic *Escherichia coli* and *Salmonella* spp. on dry bulb onions produced with contaminated irrigation water. *Food Microbiology*, 53, 41-47. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2015.08.004>
- Espinosa, M. F., Sancho, A. N., Mendoza, L. M., Mota, C. R., Verbyla, M. E.,** 2020. Systematic review and meta-analysis of time-temperature pathogen inactivation. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 230, 113595. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2020.113595>
- Ewald, C., Fjelkner-Modig, S., Johansson, K., Sjöholm, I., Åkesson, B.,** 1999. Effect of processing on major flavonoids in processed onions, green beans, and peas. *Food Chemistry*, 64(2), 231-235. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00136-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00136-8)
- Finger, J. A., Baroni, W. S., Maffei, D. F., Bastos, D. H., Pinto, U. M.,** 2019. Overview of foodborne disease outbreaks in Brazil from 2000 to 2018. *Foods*, 8(10), 434. <https://doi.org/10.3390/foods8100434>
- Food and Agriculture Organization (FAO),** 2025. Food and agriculture data. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/fbs>, 13 Nisan 2025.
- Geeraerd, A. H., Herremans, C. H., Van Impe, J. F.,** 2000. Structural model requirements to describe microbial inactivation during a mild heat treatment. *International journal of Food Microbiology*, 59(3), 185-209. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(00\)00362-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(00)00362-7)
- Geeraerd, A. H., Valdramidis, V. P., Van Impe, J. F.,** 2005. GInaFiT, a freeware tool to assess non-log-linear microbial survivor curves. *International Journal of Food Microbiology*, 102(1), 95-105. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.11.038>
- Gerdes, M. E., Cruz-Cano, R., Solaiman, S., Ammons, S., Allard, S. M., Sapkota, A. R., A. Micallef, S., Goldstein, R. E. R.,** 2022. Impact of irrigation water type and sampling frequency on microbial water quality profiles required for compliance with US Food Safety Modernization Act Produce Safety Rule standards. *Environmental Research*, 205, 112480. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112480>
- Gil, M. I., Allende, A.,** 2018. Water and wastewater use in the fresh produce industry: food safety and environmental implications. *Quantitative methods for food safety and quality in the vegetable industry*, pp. 59-76, eds. Perez-Rodriguez, F.,

- Skandamis, P., & ValDRAMIDIS, Springer International Publishing, Cham, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68177-1_4
- Goetz, G.,** 2013. *Listeria* in onions, *Salmonella* in mangoes topped last year's reportable foods list. <https://www.foodsafetynews.com/2013/05/listeria-in-onions-salmonella-in-mangoes-top-reportable-foods-for-2012/>, 9 May1s 2025.
- Golding, J. B., Uthairatanakij, A., de Jesús Ornelas-Paz, J., Prakash, A.,** 2024. Phytosanitary irradiation effects on fresh produce quality—A review. *Postharvest Biology and Technology*, 211, 112855. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2024.112855>
- Gombas, D., Luo, Y., Brennan, J., Shergill, G., Petran, R., Walsh, R., Hao, H., Khurana, K., Zomorodi, B., Rojen, J., Varley, R., Deng, K.,** 2017. Guidelines to validate control of cross-contamination during washing of fresh-cut leafy vegetables. *Journal of Food Protection*, 80(2), 312-330. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-16-258>
- Goodswen, S. J., Barratt, J. L., Kennedy, P. J., Kaufer, A., Calarco, L., Ellis, J. T.,** 2021. Machine learning and applications in microbiology. *FEMS Microbiology Reviews*, 45(5), fuab015. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuab015>
- Graham-Glover, B., Pereira, E., Jefferson, S., Blessington, T., Armstrong, M., Schwensohn, C., Wilson, C., Cromwell, A., Manetas, J., Mickiewicz, C., Kraft, A., Pightling, A., Edwards, L., Donovan, D., Dow, J., Altman, S., Galves, S., Keshishyan, G., Gieraltowski, L., Shade, L., Viazis, S.,** 2025. Multistate outbreak of *Salmonella* Thompson infections linked to diced onions—2023. *Foodborne Pathogens and Disease*. <https://doi.org/10.1177/15353141251377305>
- Gruszynski, K., Pao, S., Kim, C., Toney, D., Wright, K., Ross, P. G., Colan, A., Levine, S.,** 2014. Evaluating wildlife as a potential source of *Salmonella* serotype Newport (JJPX 01.0061) contamination for tomatoes on the eastern shore of Virginia. *Zoonoses and Public Health*, 61(3), 202-207. <https://doi.org/10.1111/zph.12061>
- Gumudavelli, V., Subbiah, J., Thippareddi, H., Velugoti, P. R., Froning, G.,** 2007. Dynamic predictive model for growth of *Salmonella* Enteritidis in egg yolk. *Journal of Food Science*, 72(7), M254-M262. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00444.x>
- Gurtler, J. B., Gibson, K. E.,** 2022. Irrigation water and contamination of fresh produce with bacterial foodborne pathogens. *Current Opinion in Food Science*, 47, 100889. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100889>
- Gutierrez-Rodriguez, E., Adhikari, A.,** 2018. Preharvest farming practices impacting fresh produce safety. *Preharvest Food Safety*, 19-46. <https://doi.org/10.1128/9781555819644.ch2>
- Hellberg, R. S., Chu, E.,** 2016. Effects of climate change on the persistence and dispersal of foodborne bacterial pathogens in the outdoor environment: A review. *Critical*

- Herold, B., Oberbarnscheidt, B., Geyer, M.,** 1998. Mechanical load and its effect on bulb onions due to harvest and post-harvest handling. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 71(4), 373-383. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0336>
- Holvoet, K., Sampers, I., Seynnaeve, M., Uyttendaele, M.,** 2014. Relationships among hygiene indicators and enteric pathogens in irrigation water, soil and lettuce and the impact of climatic conditions on contamination in the lettuce primary production. *International Journal of Food Microbiology*, 171, 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.11.009>
- Howard, L. R., Yoo, K. S., Pike, L. M., Miller Jr, G. H.,** 1994. Quality changes in diced onions stored in film packages. *Journal of Food Science*, 59(1), 110-112. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1994.tb06909.x>
- Huang, L.,** 2014. IPMP 2013—a comprehensive data analysis tool for predictive microbiology. *International Journal of Food Microbiology*, 171, 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.11.019>
- Huang, L., Juneja, V. K.,** 2025. The USDA Integrated Pathogen Modeling Program (IPMP) and Pathogen Modeling Program (PMP). In *Basic Protocols in Predictive Microbiology Softwares* (pp. 59-78). New York, NY: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-4112-5_3
- Hutchison, M. L., Thomas, D. J. I., Avery, S. M.,** 2007. Thermal death of *Escherichia coli* O157: H7 in cattle feeds. *Letters in Applied Microbiology*, 44(4), 357-363. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2006.02091.x>
- Ignat, I., Volf, I., Popa, V. I.,** 2011. A critical review of methods for characterisation of polyphenolic compounds in fruits and vegetables. *Food Chemistry*, 126(4), 1821-1835. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.026>
- Islam, M., Doyle, M. P., Phatak, S. C., Millner, P., Jiang, X.,** 2005. Survival of *Escherichia coli* O157: H7 in soil and on carrots and onions grown in fields treated with contaminated manure composts or irrigation water. *Food Microbiology*, 22(1), 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2004.04.007>
- Islek, M., Nilufer-Erdil, D., Knuthsen, P.,** 2015. Changes in flavonoids of sliced and fried yellow onions (*Allium cepa* L. var. zittauer) during storage at different atmospheric, temperature and light conditions. *Journal of Food Processing And Preservation*, 39(4), 357-368. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12240>
- Iwu, C. D., Okoh, A. I.,** 2019. Preharvest transmission routes of fresh produce associated bacterial pathogens with outbreak potentials: a review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(22), 4407. <https://doi.org/10.3390/ijerph16224407>
- Jacxsens, L., Luning, P. A., Van der Vorst, J. G. A. J., Devlieghere, F., Leemans, R., Uyttendaele, M.,** 2010. Simulation modelling and risk assessment as tools to

- identify the impact of climate change on microbiological food safety–The case study of fresh produce supply chain. *Food Research International*, 43(7), 1925-1935. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.07.009>
- Jiang, Y., Luo, J., Huang, D., Liu, Y., Li, D. D., 2022.** Machine learning advances in microbiology: A review of methods and applications. *Frontiers in Microbiology*, 13, 925454. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.925454>
- Jin, W., Zhao, S., Chen, X., Sun, H., Pei, J., Wang, K., Gao, R., 2024.** Characterization of flavor volatiles in raw and cooked pigmented onion (*Allium cepa* L.) bulbs: A comparative HS-GC-IMS fingerprinting study. *Current Research in Food Science*, 8, 100781. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100781>
- Joshi, K., Mahendran, R., Alagusundaram, K., Norton, T., Tiwari, B. K., 2013.** Novel disinfectants for fresh produce. *Trends in Food Science Technology*, 34(1), 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.08.008>
- Kader, A. A., 2011.** Postharvest technology of horticultural crops. University of California Agriculture and Natural Resources, Richmond, CA, 435s. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28507.98089>
- Kaur, A., Yemmireddy, V., 2023.** Effect of different pre-growth temperatures on the survival kinetics of *Salmonella enterica* and *Listeria monocytogenes* in fresh-cut salad during refrigerated storage. *Foods*, 12(23), 4287. <https://doi.org/10.3390/foods12234287>
- Keklik, N. M., Demirci, A., Puri, V. M., Heinemann, P. H., 2012.** Modeling the inactivation of *Salmonella* Typhimurium, *Listeria monocytogenes*, and *Salmonella* Enteritidis on poultry products exposed to pulsed UV light. *Journal of Food Protection*, 75(2), 281-288. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-11-298>
- Keraita, B., Drechsel, P., Amoah, P., 2003.** Influence of urban wastewater on stream water quality and agriculture in and around Kumasi, Ghana. *Environment and Urbanization*, 15(2), 171-178. <https://doi.org/10.1177/095624780301500207>
- Khade, H. D., Saxena, S., Hajare, S. N., Gautam, S., 2023.** Gamma radiation processing for extending shelf-life and ensuring quality of minimally processed ready-to-eat onions. *Journal of Food Science and Technology*, 60(8), 2265-2274. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05754-8>
- Kiplagat, E., Ramezani, M., Malla, S., Cisneros-Zevallos, L., Joshi, V., Castillo, A., 2024.** Factors affecting growth and survival of *Salmonella* in onion extracts and onion bulbs. *Foods*, 14(1), 1. <https://doi.org/10.3390/foods14010001>
- Kiran, P. R., Aradwad, P., TV, A. K., Nayana N, P., CS, R., Sahoo, M., Urhe, B. S., Yadav, R., Kar, A., Mani, I., 2024.** A comprehensive review on recent advances in postharvest treatment, storage, and quality evaluation of onion (*Allium cepa*): Current status, and challenges. *Future Postharvest and Food*, 1(1), 124-157. <https://doi.org/10.1002/fpf2.12009>

- Kiura, I. N., Gichimu, B. M., Rotich, F., 2021.** Proximate and nutritional composition of stored bulb onions as affected by harvest and postharvest treatments. *International Journal of Agronomy*, 2021(1), 5532349. <https://doi.org/10.1155/2021/5532349>
- Konyali, D., Guzel, M., Soyer, Y., 2023.** Genomic characterization of *Salmonella enterica* resistant to cephalosporin, quinolones, and macrolides. *Current Microbiology*, 80(11), 344. <https://doi.org/10.1007/s00284-023-03458-y>
- Koseki, S., Isobe, S., 2005.** Prediction of pathogen growth on iceberg lettuce under real temperature history during distribution from farm to table. *International Journal of Food Microbiology*, 104(3), 239-248. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2005.02.012>
- Kumar, V., Ahire, J. J., Taneja, N. K., 2024.** Advancing microbial food safety and hazard analysis through predictive mathematical modeling. *The Microbe*, 2, 100049. <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100049>
- Lee, S., Jiang, X., Manubolu, M., Riedl, K., Ludsin, S. A., Martin, J. F., Lee, J., 2017.** Fresh produce and their soils accumulate cyanotoxins from irrigation water: Implications for public health and food security. *Food Research International*, 102, 234-245. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.079>
- Li, H., Xie, G., Edmondson, A. S., 2008.** Review of secondary mathematical models of predictive microbiology. *Journal of Food Products Marketing*, 14(2), 57-74. <https://doi.org/10.1080/10454440801918283>
- Lianou, A., Koutsoumanis, K. P., 2013.** Strain variability of the behavior of foodborne bacterial pathogens: a review. *International Journal of Food Microbiology*, 167(3), 310-321. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.09.016>
- Lieberman, V. M., Zhao, I. Y., Schaffner, D. W., Danyluk, M. D., Harris, L. J., 2015.** Survival or growth of inoculated *Escherichia coli* O157: H7 and *Salmonella* on yellow onions (*Allium cepa*) under conditions simulating food service and consumer handling and storage. *Journal of Food Protection*, 78(1), 42-50. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-14-281>
- Lieberman, V. M., Morgan, E. W., Harris, L. J., 2021.** Reduction of *Escherichia coli* O157: H7, *Listeria monocytogenes*, and *Salmonella* on whole yellow onions (*Allium cepa*) exposed to hot water. *Journal of Food Protection*, 84(11), 1965-1972. <https://doi.org/10.4315/JFP-21-242>
- Lin, Z., Qin, X., Li, J., Aslam, M. Z., Sun, T., Li, Z., Wang, X., Dong, Q., 2022.** Machine learning approach for predicting single cell lag time of *Salmonella* Enteritidis after heat and chlorine treatment. *Food Research International*, 156, 111132. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111132>
- Lin, Y., Ma, J., Wang, Q., Sun, D. W., 2023.** Applications of machine learning techniques for enhancing nondestructive food quality and safety detection. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(12), 1649-1669. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2131725>

- Liu, F., Li, Y., 2006.** Storage characteristics and relationships between microbial growth parameters and shelf life of MAP sliced onions. *Postharvest Biology and Technology*, 40(3), 262-268. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.01.012>
- Liu, H., Whitehouse, C. A., Li, B., 2018.** Presence and persistence of *Salmonella* in water: the impact on microbial quality of water and food safety. *Frontiers in Public Health*, 6, 159. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2018.00159>
- Liu, G., Wang, Y., Hu, L., He, H., 2022.** Characterization of the volatile compounds of onion with different fresh-cut styles and storage temperatures. *Foods*, 11(23), 3829. <https://doi.org/10.3390/foods11233829>
- Looper, M. L., Edrington, T. S., Callaway, T. R., Rosenkrans Jr, C. F., 2009.** Fate of *Escherichia coli* O157: H7 and *Salmonella* from contaminated manure slurry applied to soil surrounding tall fescue. *Letters in Applied Microbiology*, 48(5), 513-516. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2009.02563.x>
- López-Gálvez, F., Tudela, J. A., Allende, A., Gil, M. I., 2019.** Microbial and chemical characterization of commercial washing lines of fresh produce highlights the need for process water control. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 51, 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.05.002>
- López-Gálvez, F., Allende, A., Gil, M. I., 2021.** Recent progress on the management of the industrial washing of fresh produce with a focus on microbiological risks. *Current Opinion in Food Science*, 38, 46-51. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.10.026>
- MacDonald, K. L., Spengler, R. F., Hatheway, C. L., Hargrett, N. T., Cohen, M. L., 1985.** Type A botulism from sauteed onions: clinical and epidemiologic observations. *JAMA*, 253(9), 1275-1278. [10.1001/jama.1985.03350330073025](https://doi.org/10.1001/jama.1985.03350330073025)
- Mafart, P., Couvert, O., Gaillard, S., Leguérinel, I., 2002.** On calculating sterility in thermal preservation methods: application of the Weibull frequency distribution model. *International Journal of Food Microbiology*, 72(1-2), 107-113. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(01\)00624-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(01)00624-9)
- Mafizur, R. M., Sangjin, L., Chul, P. Y., 2024.** Prevalence of *Salmonella* spp. and *Escherichia coli* in the feces of free-roaming wildlife throughout South Korea. *PloS one*, 19(2), e0281006. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281006>
- Makris, D. P., Rossiter, J. T., 2001.** Domestic processing of onion bulbs (*Allium cepa*) and asparagus spears (*Asparagus officinalis*): effect on flavonol content and antioxidant status. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(7), 3216-3222. <https://doi.org/10.1021/jf001497z>
- Malahlela, H. K., Belay, Z. A., Mphahlele, R. R., Caleb, O. J., 2024.** Micro-nano bubble water technology: Sustainable solution for the postharvest quality and safety management of fresh fruits and vegetables—A review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 94, 103665. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103665>

- Maw, B. W., Mullinix, B. G., 2005.** Moisture loss of sweet onions during curing. *Postharvest Biology and Technology*, 35(2), 223-227. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.04.008>
- McCormic, Z. D., Patel, K., Higa, J., Bancroft, J., Donovan, D., Edwards, L., Cheng, J., Adcock, B., Bond, C., Pereira, E., Doyle, M., Wise, M. E., Gieraltowski, L., 2022.** Bi-national outbreak of *Salmonella* Newport infections linked to onions: The United States experience. *Epidemiology & Infection*, 150, e199. <https://doi.org/10.1017/S0950268822001571>
- McKellar, R. C., Lu, X., 2003.** Modeling microbial responses in food. CRC press, Boca Raton, Florida, 42s. <https://doi.org/10.1201/9780203503942>
- McKellar, R. C., Delaquis, P., 2011.** Development of a dynamic growth–death model for *Escherichia coli* O157: H7 in minimally processed leafy green vegetables. *International Journal of Food Microbiology*, 151(1), 7-14. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.07.027>
- McKellar, R. C., LeBlanc, D. I., Lu, J., Delaquis, P., 2012.** Simulation of *Escherichia coli* O157: H7 behavior in fresh-cut lettuce under dynamic temperature conditions during distribution from processing to retail. *Foodborne Pathogens and Disease*, 9(3), 239-244. <https://doi.org/10.1089/fpd.2011.1025>
- McKellar, R. C., LeBlanc, D. I., Rodríguez, F. P., Delaquis, P., 2014.** Comparative simulation of *Escherichia coli* O157: H7 behaviour in packaged fresh-cut lettuce distributed in a typical Canadian supply chain in the summer and winter. *Food Control*, 35(1), 192-199. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.06.002>
- McMeekin, T. A., Olley, J., Ratkowsky, D. A., Ross, T., 2002.** Predictive microbiology: towards the interface and beyond. *International Journal of Food Microbiology*, 73(2-3), 395-407. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(01\)00663-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(01)00663-8)
- Mertens, L., Van Derlinden, E., Van Impe, J. F., 2012.** Comparing experimental design schemes in predictive food microbiology: optimal parameter estimation of secondary models. *Journal of Food Engineering*, 112(3), 119-133. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.03.018>
- Mishra, A., Guo, M., Buchanan, R. L., Schaffner, D. W., Pradhan, A. K., 2017.** Development of growth and survival models for *Salmonella* and *Listeria monocytogenes* during non-isothermal time-temperature profiles in leafy greens. *Food Control*, 71, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.06.009>
- Mishra, A., Guo, M., Buchanan, R. L., Schaffner, D. W., Pradhan, A. K., 2017.** Prediction of *Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella*, and *Listeria monocytogenes* growth in leafy greens without temperature control. *Journal of food protection*, 80(1), 68-73. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-16-153>
- Mitchell Jr, M. R., Kirchner, M., Schneider, B., McClure, M., Neil, K. P., Madad, A., Jemaneh, T., Tijerina, M., Nolte, K., Wellman, A., Neises, D., Pightling, A., Swinford, A., Piontkowski, A., Sexton, R., McKenna, C., Cornell, J., Sandoval, L.A., Wang, H., Bell, L. R., Viazis, S., 2024.** Multistate outbreak of

- Salmonella* Oranienburg infections linked to bulb onions imported from Mexico—United States, 2021. *Food Control*, 160, 110325. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110325>
- Muhie, S. H.**, 2022. Preharvest production practices, and postharvest treatment and handling methods for best quality onion bulbs. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 97(5), 552-559. <https://doi.org/10.1080/14620316.2022.2041493>
- Ndraha, N., Goh, A. P., Tran, G. D., Chen, C. Q., Hsiao, H. I.**, 2022. Predictive models for the growth of *Salmonella* spp., *Listeria* spp., and *Escherichia coli* in lettuce harvested on Taiwanese farms. *Journal of Food Science*, 87(8), 3599-3610. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16236>
- Nicholson, F. A., Groves, S. J., Chambers, B. J.**, 2005. Pathogen survival during livestock manure storage and following land application. *Bioresource Technology*, 96(2), 135-143. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.02.030>
- Nikparvar, B., Andreevskaya, M., Duru, I. C., Bucur, F. I., Grigore-Gurgu, L., Borda, D., I. Nicolau, A., U. Riedel, C., Auvinen, P., Bar, N.**, 2021. Analysis of temporal gene regulation of *Listeria monocytogenes* revealed distinct regulatory response modes after exposure to high pressure processing. *BMC Genomics*, 22(1), 266. <https://doi.org/10.1186/s12864-021-07461-0>
- Niu, B.**, 2024. Applications of bioinformatics, machine learning and risk analysis for microbial food safety. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1414261. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1414261>
- North Bay Parry Sound District Health Unit (NBPSDHU).**, 2009. Investigative summary o the *Escherichia coli* outbreak associated ith a restaurant in North Bay, Ontario. <https://www.myhealthunit.ca/en/community-data-and-reports/resources/Reports-Statistics--Geographic-Profiles/Environmental-health/InvestigativeSummaryoftheE.coliOutbreak-June-2009.pdf>, 10 Mayis 2025.
- Omac, B.**, 2024. Modeling the growth behavior of *Salmonella* spp. in grated carrots inoculated with different inoculum levels stored at various temperatures. *Journal of Food Safety*, 44(4), e13150. <https://doi.org/10.1111/jfs.13150>
- Pachepsky, Y. A., Blaustein, R. A., Whelan, G. E. N. E., Shelton, D. R.**, 2014. Comparing temperature effects on *Escherichia coli*, *Salmonella*, and *Enterococcus* survival in surface waters. *Letters in Applied Microbiology*, 59(3), 278-283. <https://doi.org/10.1111/lam.12272>
- Page, N., González-Buesa, J., Ryser, E. T., Harte, J., Almenar, E.**, 2016. Interactions between sanitizers and packaging gas compositions and their effects on the safety and quality of fresh-cut onions (*Allium cepa* L.). *International Journal of Food Microbiology*, 218, 105-113. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.11.017>
- Park, S., Navratil, S., Gregory, A., Bauer, A., Srinath, I., Szonyi, B., Nightingale, K., Anciso, J., Jun, M., Han, D., Lawhon, S., Ivanek, R.**, 2014. Farm management, environment, and weather factors jointly affect the probability of

- spinach contamination by generic *Escherichia coli* at the preharvest stage. *Applied and Environmental Microbiology*, 80(8), 2504-2515. <https://doi.org/10.1128/AEM.03643-13>
- Pérez-Gregorio, M. R., Regueiro, J., González-Barreiro, C., Rial-Otero, R., Simal-Gándara, J.,** 2011. Changes in antioxidant flavonoids during freeze-drying of red onions and subsequent storage. *Food Control*, 22(7), 1108-1113. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.01.006>
- Pérez-Gregorio, M. R., Regueiro, J., Simal-Gándara, J., Rodrigues, A. S., Almeida, D. P. F.,** 2014. Increasing the added-value of onions as a source of antioxidant flavonoids: a critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54(8), 1050-1062. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.624283>
- Perez-Rodriguez, F., Valero, A.,** 2013. Predictive microbiology in foods. In *Predictive microbiology in foods* (pp. 1-10). New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5520-2_1
- Possas, A., Perez-Rodriguez, F.,** 2023. New insights into cross-contamination of fresh-produce. *Current Opinion in Food Science*, 49, 100954. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100954>
- Prakash, D., Singh, B. N., Upadhyay, G.,** 2007. Antioxidant and free radical scavenging activities of phenols from onion (*Allium cepa*). *Food chemistry*, 102(4), 1389-1393. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.06.063>
- Public Health Agency of Canada (PHAC),** 2020. Public Health Notice: Outbreak of *Salmonella* infections linked to red onions imported from the United States. <https://www.canada.ca/en/public-health/services/public-health-notices/2020/outbreak-salmonella-infections-under-investigation.html>, 09 Mayis 2025.
- Puerta-Gomez, A. F., Moreira, R. G., Kim, J., Castell-Perez, E.,** 2013. Modeling the growth rates of *Escherichia coli* spp. and *Salmonella* Typhimurium LT2 in baby spinach leaves under slow cooling. *Food Control*, 29(1), 11-17. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.05.070>
- Raffo, A., Paoletti, F.,** 2022. Fresh-cut vegetables processing: environmental sustainability and food safety issues in a comprehensive perspective. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 681459. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.681459>
- Ramos, T. D. M., Jay-Russell, M. T., Millner, P. D., Baron, J. N., Stover, J., Pagliari, P., Hutchinson, M., Lilley, J., Rowley, N., Haghani, V., Aminabadi, P., Kenney, A., Hashem, F., Lopez, B. A., Bihn, E. A., Clements, D. P., Shade, J. B., Sciligo, A. R. Pires, A. F.,** 2021. Survival and persistence of foodborne pathogens in manure-amended soils and prevalence on fresh produce in certified organic farms: a multi-regional baseline analysis. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 674767. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.674767>
- Ratkowsky, D. A.,** 2002. Some examples of, and some problems with, the use of nonlinear logistic regression in predictive food microbiology. *International Journal*

- of *Food Microbiology*, 73(2-3), 119-125. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(01\)00643-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(01)00643-2)
- Ratkowsky, D. A., Ross, T., McMeekin, T. A., Olley, J.,** 1991. Comparison of Arrhenius-type and Bêlehrádek-type models for prediction of bacterial growth in foods. *Journal of Applied Bacteriology*, 71(5), 452-459. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1991.tb03816.x>
- Reddy, S. P., Wang, H., Adams, J. K., Feng, P. C.,** 2016. Prevalence and characteristics of *Salmonella* serotypes isolated from fresh produce marketed in the United States. *Journal of Food Protection*, 79(1), 6-16. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-15-274>
- Ren, F., Zhou, S.,** 2021. Phenolic components and health beneficial properties of onions. *Agriculture*, 11(9), 872. <https://doi.org/10.3390/agriculture11090872>
- Rico, D., Martin-Diana, A. B., Barat, J. M., Barry-Ryan, C.,** 2007. Extending and measuring the quality of fresh-cut fruit and vegetables: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 18(7), 373-386. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.03.011>
- Robertson, G. L.,** 2005. Food packaging: principles and practice. CRC press, Boca Raton, FL, 329s. <https://doi.org/10.1201/9781420056150>
- Rock, C. M., Brassill, N., Dery, J. L., Carr, D., McLain, J. E., Bright, K. R., Gerba, C. P.,** 2019. Review of water quality criteria for water reuse and risk-based implications for irrigated produce under the FDA Food Safety Modernization Act, produce safety rule. *Environmental Research*, 172, 616-629. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.12.050>
- Rodrigues, A. S., Pérez-Gregorio, M. R., García-Falcón, M. S., Simal-Gándara, J., Almeida, D. P.,** 2010. Effect of post-harvest practices on flavonoid content of red and white onion cultivars. *Food Control*, 21(6), 878-884. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2009.12.003>
- Rohilla, P., Kumari, A., Birania, S., Monika.,** 2023. Commercially available databases in food microbiology. *Microbes in the Food Industry*, 441-467. <https://doi.org/10.1002/9781119776406.ch11>
- Rood, L., Kocharunchitt, C., Bowman, J., Stanley, R., Ross, T., Danyluk, M., Warriner, K., Singh, P. S., Eyles, A.,** 2025. Potential for in-field pre-harvest control of foodborne human pathogens in leafy vegetables: Identification of research gaps and opportunities. *Trends in Food Science & Technology*, 104928. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.104928>
- Rosso, L., Lobry, J. R., Bajard, S., Flandrois, J. P.,** 1995. Convenient model to describe the combined effects of temperature and pH on microbial growth. *Applied and Environmental Microbiology*, 61(2), 610-616. <https://doi.org/10.1128/aem.61.2.610-616.1995>

- Rosso, L., Lobry, J. R., Flandrois, J. P., 1993.** An unexpected correlation between cardinal temperatures of microbial growth highlighted by a new model. *Journal of Theoretical Biology*, 162(4), 447-463. <https://doi.org/10.1006/jtbi.1993.1099>
- Sagar, N. A., Pareek, S., Benkeblia, N., Xiao, J., 2022.** Onion (*Allium cepa* L.) bioactives: Chemistry, pharmacotherapeutic functions, and industrial applications. *Food Frontiers*, 3(3), 380-412. <https://doi.org/10.1002/fft2.135>
- Sahu, H., Pradhan, K. C., 2024.** The impact of agricultural practices on groundwater depletion: A spatiotemporal analysis of India. *Environmental Quality Management*, 34(1), e22207. <https://doi.org/10.1002/tqem.22207>
- Sant'Ana, A. S., Barbosa, M. S., Destro, M. T., Landgraf, M., Franco, B. D., 2012.** Growth potential of *Salmonella* spp. and *Listeria monocytogenes* in nine types of ready-to-eat vegetables stored at variable temperature conditions during shelf-life. *International Journal of Food Microbiology*, 157(1), 52-58. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2012.04.011>
- Santos, M. I., Grácio, M., Silva, M. C., Pedroso, L., Lima, A., 2023.** One health perspectives on food safety in minimally processed vegetables and fruits: From farm to fork. *Microorganisms*, 11(12), 2990. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11122990>
- Savitha, S., Chakraborty, S., Thorat, B. N., 2022.** Microbial contamination and decontamination of onion and its products. *Applied Food Research*, 2(1), 100032. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2021.100032>
- Schroeder, B. K., Du Toit, L. J., 2010.** Effects of postharvest onion curing parameters on *Enterobacter* bulb decay in storage. *Plant disease*, 94(12), 1425-1430. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-10-0457>
- Schuenzel, K. M., Harrison, M. A., 2002.** Microbial antagonists of foodborne pathogens on fresh, minimally processed vegetables. *Journal of Food Protection*, 65(12), 1909-1915. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-65.12.1909>
- Scollon, A. M., Wang, H., Ryser, E. T., 2016.** Transfer of *Listeria monocytogenes* during mechanical slicing of onions. *Food Control*, 65, 160-167. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.01.021>
- Semenov, A. V., Van Bruggen, A. H., Van Overbeek, L., Termorshuizen, A. J., Semenov, A. M., 2007.** Influence of temperature fluctuations on *Escherichia coli* O157: H7 and *Salmonella enterica* serovar Typhimurium in cow manure. *FEMS microbiology ecology*, 60(3), 419-428. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2007.00306.x>
- Shahbaz, H. M., Akram, K., Ahn, J. J., Kwon, J. H., 2016.** Worldwide status of fresh fruits irradiation and concerns about quality, safety, and consumer acceptance. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(11), 1790-1807. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.787384>

- Sharma, M., Reynnells, R.,** 2018. Importance of soil amendments: survival of bacterial pathogens in manure and compost used as organic fertilizers. *Preharvest food safety*, 159-175. <https://doi.org/10.1128/9781555819644.ch9>
- Siddiq, M., Roidoung, S., Sogi, D. S., Dolan, K. D.,** 2013. Total phenolics, antioxidant properties and quality of fresh-cut onions (*Allium cepa* L.) treated with mild-heat. *Food Chemistry*, 136(2), 803-806. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.023>
- Siegner, C.,** 2016. FDA finds *Listeria* throughout onion processing plant in WA. <https://www.foodsafetynews.com/2016/08/listeria-found-throughout-washington-onion-processing-plant/>, 9 May 2025.
- Singh, B. K., Delgado-Baquerizo, M., Egidi, E., Guirado, E., Leach, J. E., Liu, H., Trivedi, P.,** 2023. Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. *Nature Reviews Microbiology*, 21(10), 640-656. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00900-7>
- Smith, J. C., Varriano, S., Roach, K., Snipes, Z., Dawson, J. L., Shealy, J., L. Dunn, L., E. Snyder, W., Shariat, N. W.,** 2023. Prevalence and molecular characterization of *Salmonella* isolated from wild birds in fresh produce environments. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1272916. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1272916>
- Solomon, E. B., Yaron, S., Matthews, K. R.,** 2002. Transmission of *Escherichia coli* O157: H7 from contaminated manure and irrigation water to lettuce plant tissue and its subsequent internalization. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(1), 397-400. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.1.397-400.2002>
- Son, S. B., Lee, H. K., Kim, S. J., Yoon, K. S.,** 2024. Modeling behavior of *Salmonella* spp. and *Listeria monocytogenes* in raw and processed vegetables. *Foods*, 13(18), 2972. <https://doi.org/10.3390/foods13182972>
- Soni, A., Dixit, Y., Reis, M. M., Brightwell, G.,** 2022. Hyperspectral imaging and machine learning in food microbiology: Developments and challenges in detection of bacterial, fungal, and viral contaminants. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(4), 3717-3745. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12983>
- Spence, A. R., McGarvey, J. A., Lee, S., Smith, O. M., Olimp, E. M., Yang, W., Zhang, M., Karp, D. S.,** 2025. Assessing foodborne pathogen survival in bird faeces to co-manage farms for bird conservation, production, and food safety. *Journal of Applied Ecology*, 62(3), 516-526. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14853>
- Stavropoulou, E., Bezirtzoglou, E.,** 2019. Predictive modeling of microbial behavior in food. *Foods*, 8(12), 654. <https://doi.org/10.3390/foods8120654>
- Stine, S. W., Song, I., Choi, C. Y., Gerba, C. P.,** 2005. Application of microbial risk assessment to the development of standards for enteric pathogens in water used to

- irrigate fresh produce. *Journal of Food Protection*, 68(5), 913-918. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-68.5.913>
- Stoica, F., Rațu, R. N., Veleșcu, I. D., Stănciuc, N., Râpeanu, G., 2023.** A comprehensive review on bioactive compounds, health benefits, and potential food applications of onion (*Allium cepa* L.) skin waste. *Trends in Food Science & Technology*, 141, 104173. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104173>
- Strawn, L. K., Fortes, E. D., Bihn, E. A., Nightingale, K. K., Gröhn, Y. T., Worobo, R. W., Wiedmann, M., Bergholz, P. W., 2013.** Landscape and meteorological factors affecting prevalence of three food-borne pathogens in fruit and vegetable farms. *Applied and Environmental Microbiology*, 79(2), 588-600. <https://doi.org/10.1128/AEM.02491-12>
- Summerlin III, H. N., Pola, C. C., McLamore, E. S., Gentry, T., Karthikeyan, R., Gomes, C. L., 2021.** Prevalence of *Escherichia coli* and antibiotic-resistant bacteria during fresh produce production (romaine lettuce) using municipal wastewater effluents. *Frontiers in Microbiology*, 12, 660047. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.660047>
- Sutherst, R. W., Constable, F., Finlay, K. J., Harrington, R., Luck, J., Zalucki, M. P., 2011.** Adapting to crop pest and pathogen risks under a changing climate. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(2), 220-237. <https://doi.org/10.1002/wcc.102>
- Taiwo, O. R., Onyeaka, H., Oladipo, E. K., Oloke, J. K., Chukwugozie, D. C., 2024.** Advancements in predictive microbiology: Integrating new technologies for efficient food safety models. *International Journal of Microbiology*, 2024(1), 6612162. <https://doi.org/10.1155/2024/6612162>
- Tarlak, F., Johannessen, G., Bascón Villegas, I., Bolívar, A., Posada-Izquierdo, G. D., Pérez-Rodríguez, F., 2020.** Modelling of the behaviour of *Salmonella enterica* serovar Reading on commercial fresh-cut iceberg lettuce stored at different temperatures. *Foods*, 9(7), 946. <https://doi.org/10.3390/foods9070946>
- Tarlak, F., 2023.** The use of predictive microbiology for the prediction of the shelf life of food products. *Foods*, 12(24), 4461. <https://doi.org/10.3390/foods12244461>
- Tran, T., Xie, S., 2024.** Mitigating wildlife spillover in the clinical setting: how physicians and veterinarians can help prevent future disease outbreaks. *AJPM Focus*, 3(2), 100193. <https://doi.org/10.1016/j.focus.2024.100193>
- Tsitou, V. M., Rallis, D., Tsekova, M., Yanev, N., 2024.** Microbiology in the era of artificial intelligence: Transforming medical and pharmaceutical microbiology. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 38(1), 2349587. <https://doi.org/10.1080/13102818.2024.2349587>
- Umer, M., Nisa, M. U., Ahmad, N., Rahim, M. A., Kasankala, L. M., 2024.** Quantification of quercetin from red onion (*Allium cepa* L.) powder via high-performance liquid chromatography-ultraviolet (HPLC-UV) and its effect on

- hyperuricemia in male healthy Wistar albino rats. *Food Science & Nutrition*, 12(2), 1067-1081. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3822>
- Uyttendaele, M., Jaykus, L. A., Amoah, P., Chiodini, A., Cunliffe, D., Jaxsens, L., Holvoet, K., Korsten, L., Lau, M., McClure, P., Medema, G., Sampers, I., Rao Jasti, P.,** 2015. Microbial hazards in irrigation water: standards, norms, and testing to manage use of water in fresh produce primary production. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(4), 336-356. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12133>
- Valdramidis, V.,** 2016. Predictive microbiology. In *Modeling in food microbiology* (pp. 1-15). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-155-0.50001-0>
- Vandamm, J. P., Li, D., Harris, L. J., Schaffner, D. W., Danyluk, M. D.,** 2013. Fate of *Escherichia coli* O157: H7, *Listeria monocytogenes*, and *Salmonella* on fresh-cut celery. *Food microbiology*, 34(1), 151-157. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2012.11.016>
- Verheyen, D., Van Impe, J. F.,** 2021. The inclusion of the food microstructural influence in predictive microbiology: state-of-the-art. *Foods*, 10(9), 2119. <https://doi.org/10.3390/foods10092119>
- Veys, O., de Oliveira Elias, S., Sampers, I., Tondo, E. C.,** 2016. Modelling the growth of *Salmonella* spp. and *Escherichia coli* O157 on lettuce. *Procedia Food Science*, 7, 168-172. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2016.10.003>
- Reddy, S. V. R., Sharma, R. R., Raghavendra, H. R., Prajapati, U.,** 2021. Microbiological efficacy of decontamination methodologies for fresh produce. In *Food security and plant disease management* (pp. 323-355). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821843-3.00005-2>
- Wang, L., Teplitski, M.,** 2023. Microbiological food safety considerations in shelf-life extension of fresh fruits and vegetables. *Current Opinion in Biotechnology*, 80, 102895. <https://doi.org/10.1016/j.cobio.2023.102895>
- Ward, M., Dhingra, R., Remais, J. V., Chang, H. H., Johnston, L. M., Jaykus, L. A., Leon, J.,** 2015. Associations between weather and microbial load on fresh produce prior to harvest. *Journal of Food Protection*, 78(4), 849-854. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-14-381>
- Wasilenko, J. L., Fratamico, P. M., Sommers, C., DeMarco, D. R., Varkey, S., Rhoden, K., Tice, G.,** 2014. Detection of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* (STEC) O157: H7, O26, O45, O103, O111, O121, and O145, and *Salmonella* in retail raw ground beef using the DuPont™ BAX® system. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 4, 81. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2014.00081>
- Wegner, G. I., Murray, K. A., Springmann, M., Muller, A., Sokolow, S. H., Saylors, K., Morens, D. M.,** 2022. Averting wildlife-borne infectious disease epidemics requires a focus on socio-ecological drivers and a redesign of the global food system. *EClinicalMedicine*, 47. [10.1016/j.eclinm.2022.101386](https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2022.101386)

- Wiczowski, W.,** 2018. Garlic and onion: Production, biochemistry, and processing. *Handbook of vegetables and vegetable processing*, 661-682. <https://doi.org/10.1002/9781119098935.ch28>
- Winfield, M. D., Groisman, E. A.,** 2003. Role of nonhost environments in the lifestyles of *Salmonella* and *Escherichia coli*. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(7), 3687-3694. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.7.3687-3694.2003>
- Xiao, X., Tang, B., Liu, S., Suo, Y., Yang, H., Wang, W.,** 2021. Evaluation of the stress tolerance of *Salmonella* with different antibiotic resistance profiles. *BioMed Research International*, 2021(1), 5604458. <https://doi.org/10.1155/2021/5604458>
- Xie, Y., Nitin, N., Harris, L. J.,** 2023. Transfer of *Enterococcus faecium* and *Salmonella enterica* during simulated postharvest handling of yellow onions (*Allium cepa*). *Food Microbiology*, 115, 104340. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2023.104340>
- Yemmireddy, V., Mancias, M.,** 2025. Impact of fresh-cut onion types and flavonoid profiles on the survival kinetics of foodborne pathogen during refrigerated storage. *International Journal of Food Microbiology*, 431, 111080. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2025.111080>
- Yoon, J. H., Bae, Y. M., Jung, S. Y., Cha, M. H., Ryu, K., Park, K. H., Lee, S. Y.,** 2014. Predictive modeling for the growth of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* Typhimurium on fresh-cut cabbage at various temperatures. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 57(5), 631-638. <https://doi.org/10.1007/s13765-014-4096-y>
- You, Y., Rankin, S. C., Aceto, H. W., Benson, C. E., Toth, J. D., Dou, Z.,** 2006. Survival of *Salmonella enterica* serovar Newport in manure and manure-amended soils. *Applied and Environmental Microbiology*, 72(9), 5777-5783. <https://doi.org/10.1128/AEM.00791-06>
- You, X., Yang, D., Qu, Y., Guo, M., Zhang, Y., Zhao, X., Suo, Y.,** 2024. Modeling growth kinetics of *Escherichia coli* and background microflora in hydroponically grown lettuce. *Foods*, 13(9), 1359. <https://doi.org/10.3390/foods13091359>
- Zeng, W., Vorst, K., Brown, W., Marks, B. P., Jeong, S., Pérez-Rodríguez, F., Ryser, E. T.,** 2014. Growth of *Escherichia coli* O157: H7 and *Listeria monocytogenes* in packaged fresh-cut romaine mix at fluctuating temperatures during commercial transport, retail storage, and display. *Journal of Food Protection*, 77(2), 197-206. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-13-117>
- Zhao, X. X., Lin, F. J., Li, H., Li, H. B., Wu, D. T., Geng, F., Ma, W., Wang, Y., He Miao, B., Gan, R. Y.,** 2021. Recent advances in bioactive compounds, health functions, and safety concerns of onion (*Allium cepa* L.). *Frontiers in Nutrition*, 8, 669805. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.669805>