




# Prediktif modellemelerin gıdalarla ilgili mikrobiyal çalışmalarda kullanımı

## The use of predictive models in food related microbial studies

Cengiz Çetin<sup>1,\*</sup> , Suzan Öztürk Yılmaz<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Karabük Üniversitesi, Otel, Lokanta ve İkrâm Hizmetleri Bölümü, 78300, Karabük Türkiye

<sup>2</sup> Sakarya Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 54187, Sakarya, Türkiye

### Öz

Gıdaların mikrobiyolojik kalitesini ve güvenliğini sağlama ihtiyacı, mikrobiyal davranışı ölçme ve tahmin etme maksadıyla matematiksel modellerin kullanımına olan ilgiyi artırmıştır. Son zamanlarda, gıda kaynaklı patojen bakterilerin üremesini tahmin etmek için prediktif mikrobiyoloji geliştirilmiştir. Prediktif mikrobiyoloji modelleri mikrobiyal gıda güvenliğini ve kalitesini iyileştirmek için pratik uygulamaya sahiptir. Son yıllarda prediktif modelleme yaklaşımıyla ilgili yapılan çalışma sayısında artış mevcuttur. Bu çalışmada gıda mikrobiyolojisi alanında kullanılan bazı matematiksel modellerin (prediktif modeller) kullanımı derlenmeye çalışılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Matematiksel modelleme, Prediktif model, Gıda, Bakteri, Raf ömrü

### 1 Giriş

Model, gerçek dünyadaki herhangi bir sürecin, sistemin veya olgunun işleyişinin fizik, kimya, biyoloji, jeoloji, astronomi, ekonomi ve sosyoloji gibi ilgili olduğu bilim dalının kavram ve kanunlarına bağlı olarak ifade edilmesidir [1]. Deneysel çalışmaların sınırlı sayıda kaldığı ve bunu yapmanın imkânsız olduğu ya da pratik ve ekonomik olarak çok sayıda deneyin yapılması gerektiği halde yapılamadığı durumlarda matematiksel modellerden yararlanılmaktadır [2].

Matematiksel modelleme ise matematik veya matematik dışındaki bir olayı, olguyu, olaylar arasındaki ilişkileri matematiksel olarak ifade etmeye çalışma, bu olaylar ve olgular içerisinde matematiksel örüntüler ortaya çıkarma sürecidir [3].

Sıcaklık, pH, organik asit, tuz gibi bazı parametrelerde meydana gelen değişimler gıdanın raf ömrü ve kalitesini etkilediği için her seferinde tekrar tekrar kurulan geleneksel raf ömrü-rekabet testleri yapılmaktadır. Fakat prediktif mikrobiyoloji, matematiksel olarak validasyonu teyit edilmiş modellerin kullanılmasına olanak sağlayarak gıdanın raf ömrü ve kalitesinin belirlenmesi ile ilgili yeni araştırmaları teşvik etmiştir [4].

Prediktif modeller gıdanın sıcaklık, pH-değeri, su aktivitesi değeri, oksidasyon-redüksiyon potansiyeli ve gıdaya sodyum klorür, sodyum laktat, asetik asit, laktik asit

### Abstract

The need to ensure the microbiological quality and safety of foods has increased interest in the use of mathematical models to measure and predict microbial behavior. Recently, predictive microbiology has been developed to predict the growth of foodborne pathogenic bacteria. Predictive microbiology models have practical application to improve microbial food safety and quality. In recent years, there has been an increase in the number of studies on the predictive modeling approach. In this study, the use of some mathematical models (predictive models) used in the field of food microbiology has been reviewed.

**Keywords:** Mathematical modeling, Predictive model, Food, Bacteria, Shelf life

gibi çeşitli katkıları katılması gibi farklı şartlar altındaki mikroorganizmaların tepkilerinin tanımlanmasına yardımcı olan araçlardır [5].

Prediktif modellemenin amacı, insan sağlığını tehdit eden muhtemel mikroorganizma seviyesi ve bu tehdidin ne zaman oluşabileceğini tahmin edip risk faktörlerini tanımlayarak gıda güvenliğini önceden sağlamaktır [6, 7].

Gıdalarda mikrobiyal gelişme belirli bir zaman içerisinde belli bir mikrobiyal büyüme hızıyla maksimum değere ulaşır. Prediktif modeller, matematiksel modeller kullanarak gıdalardaki mikrobiyal büyüme veya ölümü tahmin etmekte kullanılmaktadır [8, 9].

#### 1.1 Modellemelerin sınıflandırılması

Gıdaların gerek üretim aşaması gerekse depolama sırasındaki mikroorganizmaların gelişmesini veya inaktivasyonunu belirlemek için uygulanan yöntemler pahalı ve zaman alıcıdır [10].

Mikroorganizmaların üremesinde su aktivitesi, pH ve sıcaklık gibi çevresel faktörler etkilidir. Prediktif modelleme bu etkiyi tahmin etmek için pratikte yaygın olarak kullanılmaktadır [11].

Gıda alanında birden fazla prediktif model sınıflandırılması yapılması sonucunda bir karışıklık meydana gelmiştir. Bu karışıklığı gidermek amacıyla Birincil Model, İkincil Model ve Üçüncül Model olmak üzere bir sınıflandırma sistemi önerilmiştir [12].

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: cengizcetin@karabuk.edu.tr (C. Çetin)

Geliş / Received: 13.07.2021 Kabul / Accepted: 28.04.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.971178

### 1.1.1 Birincil model

Birincil model, gelişme hızı gibi kinetik parametreleri hesaplamak için bakteri hücresi sayımındaki depolanma süresi ve gecikme fazı süresindeki değişiklikleri tarif eder [13]. Bu modelleme normal olarak ortam parametrelerini içermez ve mikroorganizma sayısındaki değişimi zamana bağlı olarak gösterir [14]. Bu modellere Monod modeli, Gompertz fonksiyonu, Logistik, Richards, Schunte, Stannard ve Baranyi modelleri örnek verilebilir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan model denklemleri aşağıda verilmiştir.

Gompertz fonksiyonu,

$$X(t) = X_0 + (X_{\max} - X_0) \exp(-\exp(-B(t-M))) \quad (1)$$

Baranyi modeli,

$$y(t) = y_{\max} - \ln(1 + (e^{-y_{\max} - y_0} - 1)e^{-\mu_{\max} \cdot A_n(t)}) \quad (2)$$

Gompertz modeli eşitliğinde  $X(t)$  t anındaki hücre konsantrasyonunu (log cfu/ml),  $X_0$  başlangıç konsantrasyonunu (log cfu/ml),  $X_{\max}$  maksimum hücre konsantrasyonu (log cfu/ml), B maksimum büyüme oranını, M büyüme oranının maksimum olduğu zamanı (saat) ifade etmektedir [15]. Baranyi modeli eşitliğinde ise belirtilen y hücre sayısını,  $\mu_{\max}$  maksimum spesifik büyüme oranını, A asimptotik hücre sayısını, t zamanı (saat) ifade etmektedir [16].

### 1.1.2 İkincil model

İkincil modeller, birinci modellerden elde edilen k, D,  $\mu$  gibi çoğalma parametrelerinin üzerine, pH, su aktivitesi ve sıcaklık gibi çevresel faktörlerin kinetik parametreler üzerindeki etkisinin ortaya konduğu modellerdir [13, 14, 17, 18]. Bu modellere Ratkowsky modeli, Arrhenius eşitliği, Z Değeri ve Belehradek Modeli örnek verilebilir. Yaygın olarak kullanılan ikincil model denklemlerinden bazıları aşağıda verilmiştir.

Ratkowsky modeli,

$$\text{Sqrt}(\mu) = b(T - T_{\min}) \quad (3)$$

Arrhenius eşitliği,

$$\ln(N/N_0) = kt = k_0 \exp(-E_A/(RT))t \quad (4)$$

Ratkowsky modeli eşitliğinde  $\text{Sqrt}(\mu)$  spesifik büyüme oranını, b sıcaklık katsayısını, T sıcaklık (°C) ve  $T_{\min}$  bakteri büyümesi için minimum notasyonel sıcaklığı (°C) ifade etmektedir [19]. Arrhenius eşitliğinde ise N hücre sayısını,  $k_0$  frekans faktörünü, T kesin sıcaklık (Kelvin), R universal gaz sabitini (8.314 J/mol.K) ve  $E_A$  aktivasyon enerjisini (J/mol) ifade etmektedir [20].

### 1.1.3 Üçüncül model

Üçüncül modeller, birincil ve ikincil modellerin yazılıma uygulanması ile elde edilen modellerdir. Bu modeller hem çevrimiçi hem de ticari yazılım uygulamaları ile geniş kapsamlı bir şekilde kolaylıkla kullanılabilir [21].

Food Spoilage and Safety Predictor (FSSP™), ComBase, Pathogen Modelling Program (PMP), Food MicroModel, Pseudomonas Predictor, Growth Predictor, Seafood Spoilage Predictor (SSP), GlnaFit, DataFit, DMFit, Sym' Previus, Forecast ve ChefCad uygulamaları üçüncül modellere örnektir.

Bu çalışmada gıda mikrobiyolojisi alanında kullanılan bazı prediktif modellerin kullanımı derlenmeye çalışılmıştır.

## 2 Yapılan çalışmalar

Dalgaard vd. [22], modifiye atmosfer paketlenme (MAP) ile paketlenmiş morina filetolarının raf ömrünü tahmin etmek için Polinom ve Karekök denklemlerini kullanmışlardır. Bu çalışmada *Photobacterium phosphoreum* bakterisinin paketlenmiş morina balığı ve sıvı ortamdaki büyümesi 0 °C ile 15 °C sıcaklıkta ve %0 CO<sub>2</sub> ile %100 CO<sub>2</sub> gazı altında incelenerek büyüme kinetiği çıkarılmıştır. Paketlenmiş morina filetolarının raf ömrü ilk *P. phosphoreum* sayılarına, ürün sıcaklığına ve modifiye atmosferdeki CO<sub>2</sub> seviyesine göre tahmin edilmiştir. Duyusal değerlendirme ile belirlenen raf ömrü ile Karekök denklemi ve Polinom denklemi tarafından tahmin edilen raf ömrü arasında sırasıyla %17 ve %9 ortalama sapma olduğunu bildirmişlerdir.

Koutsoumanis [23], farklı izotermal koşullarda (0 ile 15 °C) aerobik olarak depolanmış Akdeniz yıldızlı çipuranın (*Sparus aurata*) *Pseudomonas spp.*'nin büyümesi üzerindeki sıcaklığın etkisi için matematiksel bir model sunmayı amaçlayan bir çalışma yapmıştır. Farklı izotermal koşullar altında aerobik olarak depolanmış yıldızlı çipura ile 23 deneyden elde edilen *Pseudomonas spp.* büyüme verilerini toplamış ve bakterinin kinetik parametrelerini (gecikme süresi, maksimum büyüme oranı ve maksimum hücre konsantrasyonu) hesaplamak için Logistik fonksiyon kullanmıştır. Gecikme süresi ( $t_{\text{lag}}$ ) ve maksimum büyüme oranının ( $\mu_{\text{max}}$ ) aksine maksimum hücre konsantrasyonunun ( $N_{\text{max}}$ ) depolama sıcaklığından önemli ölçüde etkilenmediğini ve  $8.4 \pm 0.7$  log CFU/g aralığında olduğunu saptamıştır. Ayrıca, *Pseudomonas spp.* büyümesinin kinetik parametrelerini, Belehradek tipi model kullanılarak sıcaklığın bir fonksiyonu olarak modellemiştir. Belehradek modelinin  $\mu_{\text{max}}$  ve  $t_{\text{lag}}$  için nominal minimum sıcaklık parametresini sırasıyla -11.8 °C ve -12.8 °C olarak bulmuştur. Depolama sıcaklığına bağlı olarak 7 saat ile 40 saat arasında değişen nispeten önemli bir *Pseudomonas spp.*'in gecikme fazını hesaplamıştır. Belehradek tipi modelin, sıcaklığın 0 °C ile 15 °C aralığında *Pseudomonas spp.* büyümesi üzerindeki etkisini başarılı bir şekilde tanımlayabildiğini ve modelin gerçek dünya koşullarında balık kalitesini doğru bir şekilde tahmin edebileceğini bildirmiştir.

Lopez vd. [24] yaptıkları çalışmada biri, büyümenin optik yoğunluk birimleri olarak ifade edildiği farklı bakteri ve mantar türlerinin 21 büyüme eğrisini içeren, diğeri de farklı pH, sıcaklık ve CO<sub>2</sub> koşulları altında geliştirilmiş *Yersinia enterocolitica* plakalarında sayılan 34 koloni oluşturan birim eğrisini içeren iki veri setini kullanarak mikrobiyal büyüme eğrilerini tanımlamak istemişlerdir. Bunun için üç fazlı doğrusal, Logistik, Gompertz, Von

Bertalanffy, Richards, Morgan, Weibull, France ve Baranyi modellerinden yararlanarak matematiksel fonksiyonların uygunluğunu değerlendirmişlerdir. Her iki set için de, farklı büyüme oranları ve gecikme sürelerine sahip çok çeşitli şekiller sağlamak için eğriler seçmişlerdir. Bununla birlikte çok çeşitli eğri şekilleri ve profilleri üzerinde ayrıntılı bir istatistiksel değerlendirme, performansları ve doğrulukları açısından modeller arasında bazı önemli farklılıkları ortaya çıkarmışlardır. En iyi genel performansı gösteren modelleri, Baranyi, üç fazlı lineer, Richards ve Weibull modelleri olarak bildirmişlerdir. Ayrıca genel olarak, Baranyi modelinin çeşitli kriterlere göre incelenen büyüme eğrileri içinde en iyi davranışı gösterdiğini de ifade etmişlerdir.

Ölmez ve Aran [25] yaptıkları bir çalışmada Gompertz fonksiyonu kullanarak sıcaklık, pH, sodyum laktat ve sodyum klorür konsantrasyonlarının *B.cereus*'un lag fazı ve log fazı (çoğalma) üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda sıcaklık ve pH'nin sodyum laktatın antimikrobiyel etkisini azalttığını, sodyum klorürün ise sodyum laktat üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığını bildirmişlerdir.

Gospavic vd. [26], 2 °C ile 20 °C aralığında değişen sıcaklıklarda aerobik şartlar altındaki kümes hayvanlarına *Pseudomonas spp.* bakterisinin büyümesini tahmin etmek için birincil modellerden Baranyi ve Roberts Modeli ile Modifiye Gompertz Fonksiyonu, ikincil model olan Ratkowski (Karekök) modelini uygulamışlardır. Birincil modellerden elde edilen sahte korelasyon katsayısı (Pseudo-R<sup>2</sup>), h ve hata kareler ortalaması (MSE) değerlerinin birbirine yakın olduğunu ve kümes hayvanlarında raf ömrünü tahmin etmek için çalışılan sıcaklık koşullarında *Pseudomonas spp.* türlerinin mikrobiyal büyümesini modellemek için uygun olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca ikincil model olan Ratkowski (Karekök) modelinin de birincil modellere alternatif olarak kullanılabilceğini bildirmişlerdir.

Yang vd. [27] tarafından yapılan bir çalışmada *Vibrio parahaemolyticus* TGqx01 (serotip O3: K6) türünün farklı depolama sıcaklıklarında (0, 3, 6, 9, 12, 16, 20, 25, 30 ve 35 °C) somon eti üzerindeki büyüme ve hayatta kalma eğrileri belirlenmiştir. Depolama sırasında bu patojen bakterisinin büyüme veya inaktivasyon kinetiğini modellemek için Modifiye Gompertz ve Weibull denklemleri seçilmiştir. Somon balığındaki *V. parahaemolyticus* büyümesine ilişkin verilere Modifiye edilmiş Gompertz modeli, 16–35 °C'de (ortalama korelasyon katsayısı (R<sup>2</sup>) değeri 0.990) saklandığında iyi bir uyum sağlamıştır. Weibull denklemi ise somon balığı 0–12 °C'de saklandığında inaktivasyon verilerine iyi uyum göstermiştir. Weibull denkleminin R<sup>2</sup> değeri 0.920 olarak hesaplanmıştır.

Singh vd. [28], pH 7.8'e ayarlanmış sıvı tam yumurtaya yaklaşık 2.5-3.0 log CFU/mL *Salmonella spp.* inoküle etmişler ve farklı izotermal koşullarda (5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 37, 39, 41, 43, 45 ve 47 °C) bakterinin büyüme verilerini saptamışlardır. *Salmonella spp.*'nin 5, 7, 45 ve 47 °C'de büyüme göstermediğini gözlemişlerdir. Her sıcaklıktaki (10 °C ile 43°C aralığındaki) büyüme verilerini bir birincil model olan Baranyi modeli ile tahmin etmişlerdir. Baranyi modeline göre hata kareler ortalamasının karekökü

(RMSE) değerlerini 0.4643-1.0259 aralığında, Pseudo-R<sup>2</sup> değerlerini 0.9706-0.9936 aralığında hesaplamışlardır. Sıvı yumurtada *Salmonella spp.*'in 10 °C, 480 saatte durağan faza ulaştığını da bildirmişlerdir.

Lobacz vd. [29] yaptıkları bir çalışmada Camembert peynirinin olgunlaşması, Camembert peynirinin 3 °C ile 15 °C arasında değişen sıcaklıklarda soğukta depolanması ve mavi peynirin 3 °C ile 15 °C arasında değişen sıcaklıklarda soğukta saklanması sırasında *Listeria monocytogenes* türünün bakterilerine göre küfle olgunlaştırılmış peynirlerin güvenliğini modellemeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmalarında Baranyi modeli ve Modifiye Gompertz Fonksiyonunu büyüme eğrilerine uyarlamışlardır. Camembert peynirinin 13 °C'de 10 gün olgunlaşması sırasında *L. monocytogenes*'in sayısında bir artış meydana gelmediğini, Camembert peynirinin soğuk depolanması sırasında, *L. monocytogenes*'in uygulanan sıcaklığa bağlı olarak yoğun bir şekilde çoğaldığını bildirmişlerdir. Sıcaklık arttıkça, gecikme fazının süresinin azaldığını ve 3, 6, 9, 12 ve 15 °C sıcaklıklar için sırasıyla 146, 112, 66, 50 ve 33 saat değerlerine ulaştığını hesaplamışlardır. Mavi peynir durumunda ise gecikme fazının Camembert peynirine göre uzadığını ve 3, 6, 9, 12 ve 15 °C sıcaklıklar için sırasıyla 400, 350, 313, 257 ve 133 saate ulaştığını belirtmişlerdir. Analiz edilen durumların çoğunda (%80), en düşük Akaike Bilgi Kriteri (AIC) ve MSE değerleri ile Baranyi modelinin en doğru uyum verdiğini bildirmişlerdir.

Ağyar ve Üçkardeş [30] yaptıkları bir çalışmada *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus crispatus* ve *Lactobacillus rhamnosus* suşlarının GM17 ve MRS besi ortamlarında koloni büyüme, maksimum bakteri büyüme hızı ve maksimum büyüme hızına ulaştığı sürelerini Modifiye Gompertz modelinden yararlanarak araştırmışlardır. Modifiye Gompertz modeline göre *L. crispatus* bakteri suşunun maksimum büyüme miktarı ve maksimum büyüme hızını diğer iki suşa göre daha yüksek hesaplarken maksimum hıza ulaşma süresi arasında önemli bir farklılığın olmadığını bildirmişlerdir. Ayrıca *L. crispatus* bakteri suşunun ortamda *L. acidophilus* ve *L. rhamnosus* bakteri suşlarından baskın olduğunu belirlemişlerdir.

Kološta vd. [31], keçi ve koyun sütünden beş *Laktobacillus* suşu (*Lbc. plantarum* 17L1, *Lbc. plantarum* 18L2, *Lbc. paraplantarum* 25/1L, *Lbc. paracasei* 21L10 ve *Lbc. johnsonii* KB2-1) izole etmişlerdir. NaCl'nin bu suşların büyümesi üzerindeki etkisi; 37 °C'de kültürlenmiş çeşitli NaCl konsantrasyonları (%0, %2, %5) ile MRS ortamının 600 nm'deki optik yoğunluğu ölçülerek değerlendirilmiştir. MRS ortamını gece boyunca %1 kültürle inoküle etmişlerdir. Spesifik büyüme oranı ( $\mu_m$ ) ve gecikme fazını ( $\lambda$ ), TableCurve 2D yazılımı kullanılarak Gompertz fonksiyonundan hesaplamışlardır. Test edilen suşların (*Lbc. Johnsonii* KB2-1 hariç) model MRS ortamında NaCl'ye çok duyarlı olmadığını tespit etmişlerdir. %5 NaCl konsantrasyonu, 37 °C'de büyümelerini yavaşlatsa da, sert ve yarı sert peynirlerdeki tipik %2 NaCl konsantrasyonunun onları engellemediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca *Lbc. johnsonii* KB2-1 büyümesinin en çok NaCl eklenmesinden etkilendiği için fermente sütlü içeceklerin üretimi için uygun olabileceğini bildirmişlerdir.

Bednarko-Młynarczyk vd. [32] yaptıkları bir çalışmada keçi sütünden yaptıkları yoğurtları  $10^3$ - $10^4$  cfu/g başlangıç seviyesine kadar *S. aureus* ile kontamine ederek dört farklı sıcaklıkta (4 °C, 6 °C, 20 °C ve 22 °C) depolamışlardır. Depolama sırasında her iki saatte bir *S. aureus* oluşturan koloni sayımını yapmışlar. Bakteri sayısındaki değişikliklerin kinetiğini açıklamak için birincil modellerden olan Cole's modeli, Modifiye Gompertz Modeli ve Baranyi ve Roberts Modelinden yararlanmışlardır. Modellenen ve ölçülen değerler arasında, Pearson'un korelasyon katsayısının (r) ortalama değerlerine göre yaptıkları model uyumunun analizinde Cole's modelinin en kötü uyumu gösterirken Modifiye Gompertz Modelinin ise bakteri sayısını negatif bir değer olarak gösterdiğini belirtmişlerdir. r değerlerinin 0.959-0.995 aralığında değişen Baranyi ve Roberts Modelinin yoğurttaki stafilokokların sayısındaki değişikliklerin kinetiğini en iyi şekilde yansıttığını bildirmişlerdir.

Kowalik ve Lobacz [33], farklı sıcaklık (3-15 °C) aralığında depolanan Camembert tipi peynirindeki *Y. enterocolitica* bakterisinin davranışlarını izledikten sonra bu bakteriyi matematiksel modelleme uygulayarak tanımlamışlardır. Bu çalışmada *Y. enterocolitica* bakterisinin Lag fazını Baranyi-Roberts model için 3 °C 132 saat, 9 °C 87 saat, 15 °C 39 saat olarak bildirirlerken Gompertz modeli için ise 3 °C 132 saat, 9 °C 91 saat, 15 °C 31 saat olarak bildirmişlerdir.

Özdemir [34], nar tanelerine ön işlemler uygulayarak 4 °C sıcaklıkta 28 gün süresince depolamıştır. Su (kontrol), %1 Askorbik asit, %1 Kitosan-%1 Askorbik asit, %2 Kitosan-%2 Askorbik asit çözeltileri ile muamale edilen nar tanelerini 7'şer gün aralıklarla toplam maya ve küf sayısı ile toplam anaerobik mezofilik canlı sayısındaki değişimini depolama süresince izlemiştir. Bu izleme sonuçlarını Gompertz fonksiyonundan yararlanarak matematiksel modelleme yaptığında %1 Kitosan-%1 Askorbik asit kaplı nar tanelerinin fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik açıdan 21 gün süresince tüketilebilir durumda olduğunu belirtmiştir.

Kalkan [35] yaptığı çalışmada *Staphylococcus aureus*'a karşı *Lactobacillus rhamnosus* ile *Lactobacillus casei* Shirota'nın karışık kültürlerinin antimikrobiyel etkilerini en iyi açıklayan modeli tespit etmeyi amaçlamıştır. Çalışmasında doğrusal (Basit Doğrusal, Kuadratik, Kübik ve Kuartik) ve doğrusal olmayan (Logistik, Richards, Gompertz) modellerden yararlanmışdır. Model belirleme katsayısı ile hata kareler ortalaması istatistiklerinden yararlanılarak kullanılan Kuartik modelin *Staphylococcus aureus* inaktivasyonu için uygun olduğunu belirtmiştir.

Lytou vd. [36], tavuk göğsü filetosu örneklerini 4 °C, 10 °C ve 15 °C de 10 gün aerobik koşullarda depolandıktan sonra 3 saat 4 °C'de nar suyu içeren marine soslarına daldırmışlardır. Marine edilmiş ve marine edilmemiş numunelerin toplam canlı sayımından elde ettikleri sonuçlarını  $\mu_{max}$ 'ı hesaplamak için Baranyi modeline uyarlamışlardır. Dinamik sıcaklık koşulları altında modelin hem kontrol hem de marine edilmiş numunelerde toplam canlı sayımının büyümesini tatmin etmesine rağmen marine edilmiş numunelerin toplam canlı sayımının  $\mu_{max}$  değerinin sıcaklıktan bağımsız olarak kontrol numunelerine göre

önemli ölçüde daha düşük olduğunu göstermişlerdir. Raf ömrünün sıcaklık bağımlılığını Arrhenius tipi bir denklem ile modellemişlerdir. Marine edilmiş numunelerin raf ömrünün kontrole kıyasla önemli ölçüde (4 °C'de 5 gün) arttırdığını hesaplamışlardır. Çalışmalarının sonucunda nar suyunun, tavuğun raf ömrünü arttırmak için marinasyonda alternatif bir bileşen olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Quinto vd. [37] yaptıkları bir çalışmada et sosuna 4 °C, 10 °C, 16 °C ve 22 °C'de *Listeria monocytogenes* Scott A'nın üç farklı popülasyonunun büyüme kinetiği üzerindeki *Lactobacillus sakei* MN suşunun bakteriosin üreten üç farklı popülasyonuna etkisini birlikte inoküle ederek incelemişlerdir. Baranyi modelini *Listeria monocytogenes* ve *Lactobacillus sakei*'nin her suşu veya birlikte inoküle edilen suşların kinetik parametrelerini tahmin etmek için kullanmışlardır. Tüm sıcaklıklarda en yüksek *Listeria monocytogenes* popülasyonunun saf kültürlerde elde edildiğini, *Lactobacillus sakei*'nin farklı inoküle kültürleri ile hazırlanan kültürlerde ise azalmanın olduğunu bildirmişlerdir.

Szczawiński vd. [38], ticari yoğurtların farklı sıcaklıklarda depolama sırasında *Listeria monocytogenes* patojen bakterisinin davranışını tahmin etmeyi amaçladıkları bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada yoğurt örneklerini üç *L. monocytogenes* suşunun karışımı ile aşımamışlar ve 3, 6, 9, 12 ve 15 °C'de 16 gün depolamışlardır. *Listeria monocytogenes* sayısını 0, 1, 2, 3, 5, 7,9, 12, 14 ve 16 günlük depolamadan sonra belirlemişlerdir. Birincil modellerden General Linear Regression model yardımıyla bakteri sayısındaki en yavaş azalma 6 °C'de (D-10 değeri = 243,9 saat) saklanan örneklerde görülürken, bakteri sayısında en yüksek azalma 15 °C'de (D-10 değeri= 87.0 saat) saklanan örneklerde görüldüğünü hesaplamışlardır. Birincil modelden hesaplanan *L. monocytogenes*'in ortalama hayatta kalma/inaktivasyon oranlarının doğal logaritmasını Linear ve Polinom olmak üzere iki ikincil modele uyarlamışlardır. Her iki ikincil modelden elde edilen matematiksel denklemler, 3 °C ile 15°C sıcaklık aralığında depolanan yoğurttaki *L. monocytogenes*'in hayatta kalma/inaktivasyon oranının tahminde bir araç olarak kullanılabileceğini, ancak Polinom modelin deneysel verilere daha iyi bir uyum sağladığını belirtmişlerdir.

Vega vd. [39], bir sebze içeceğinde aşıl原因 *L. innocua* CECT 910 hücrelerinin inaktivasyon eğrilerini üç pH koşulu (4.25, 4.75 ve 5.20), dört sıcaklık seviyesi (50, 55, 60 ve 65 °C) ve farklı işlem sürelerinden (0-75 dakika) elde etmişlerdir. Bu inaktivasyon eğrileri log-lineer bir ilişki göstermediğinden GInaFIT yazılımı kullanılarak Weibull modeli, Geeraerd modeli, Cerf with shoulder modelinden ve Statgraphics Centurion XV kullanılarak Modifiye Gompertz denkleminde yararlanılarak açıklanmışlardır. Her modelden elde edilen regresyon katsayıları, 50 °C, pH 4.75 ve 65 °C, pH 5.20 koşullarında %80 önemli bulunurken bunların dışında tüm durumlarda %90 önemli olduğunu bulmuşlardır. Her pH seviyesinde en iyi uyum sunanın Modifiye Gompertz denklemi, bunu Geeraerd ve Cerf modellerinin takip ettiğini, Weibull dağılım fonksiyonunun ise sonuncu olduğunu bildirmişlerdir. Modifiye Gompertz denkleminin sebze içeceğinde düşük işlem sıcaklıklarında *L. innocua*'nın termal

inaktivasyonunu açıklamak için ilk seçenek olması gerektiğini de ifade etmişlerdir.

Bursova vd. [40], farklı depolama koşullarındaki (8 °C ve 24 °C sıcaklık) pastörize inek ve keçi sütü örneklerine *Y. enterocolitica* patojen bakterisini inkübe ederek bakterinin büyüme potansiyelini incelemişlerdir. Mikrobiyal büyüme verilerini ComBase Combined Database for Predictive Microbiology'nin (www.combase.cc) bir DMFit modülü kullanılarak Baranyi-Roberts modelinden hesaplayarak incelemişlerdir. *Y. enterocolitica* bakterisinin büyüme eğrisinde sabit faza 8 °C'de altı ve sekiz gün içinde, 24 °C'de ise iki ile üç gün içinde zirveye ulaştığını bildirmişlerdir. Bununla birlikte pastörize sütün az miktarda dahi kontamine olması durumunda *Y. enterocolitica* bakterisi depolama sıcaklığına bağlı olarak saatler veya günler içinde enfektif bir doza çoğalabileceğini belirtmişlerdir.

Gonçalves vd. [41], taze ette farklı sıcaklıklarda (4 °C, 7 °C, 12 °C) ve farklı pH değerlerinde (5.5, 6.0, 6.3) *Pseudomonas fluorescens* bakterisinin büyümesini tahmin etmek için birincil modellerden olan Baranyi ve Roberts Modeli ile Modifiye Gompertz modelini DMFit 3.0 programını kullanarak matematiksel modelleme yapmışlardır. Bu birincil modellerden elde edilen R<sup>2</sup> değerlerinin 0.918-0.990 aralığında, RMSE değerlerinin ise 0.0959-0.2967 aralığında değiştiğini gözlemleyerek bu modellerin test edilen koşullar altında *P. fluorescens*'in büyümesini tahmin etmede uygulanabileceğini bildirmişlerdir. Bu çalışma sonucunda elde edilen R<sup>2</sup> değerleri ve RMSE değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Mishra vd. [42], *S. enterica* ve *L. monocytogenes* patojen bakterilerinin farklı koşullar ve depolama sıcaklıkları altında büyümesi ve hayatta kalmasına yönelik deneysel verileri yayınlanmış çalışmalardan elde etmişlerdir. Farklı sıcaklıklarda (°C) spesifik büyüme oranını (ln CFU/g.sa) hesaplamak için birincil model olarak üç aşamalı doğrusal model ve ikincil model olan Karekök modeli kullanılarak prediktif model geliştirmişlerdir. MATLAB yazılımı kullanılarak Karekök modeline büyüme oranı verilerini yerleştirmişlerdir. Büyüme oranını Karekök modelinde *S. enterica* için  $\mu = (0.020 (\text{Sıcaklık} + 0,57))^2$ , *L. monocytogenes* için  $\mu = (0.023 (\text{Sıcaklık} - 0.60))^2$  olarak hesaplamışlardır. Yeşil yapraklı sebzelerin üretimi ve tedarigi süresinde *S. enterica*'nın büyüme-hayatta kalma modeli ve *L. monocytogenes*'in büyüme modelini birkaç dinamik zaman-sıcaklık profili kullanarak doğrulamışlardır. *L. monocytogenes* bakterisinin büyüme verilerindeki

değişkenliğe kıyasla *S. enterica*'nın büyüme verilerinde daha fazla değişkenlik gözlemlenmiştir. Bunun nedenini de, *S. enterica* bakterisinin büyüme modellerini geliştirmek için kesilmiş/parçalanmış ve kesilmemiş yeşil yapraklı sebzelerin deneylerde kullanılması olabileceğini ifade etmişlerdir.

Savran [43], yoğurt üretiminde kullanılan geleneksel starter kültüre karşı *Salmonella Enteritidis*'in fermantasyon işlemi süresince canlı kalma durumunu 30 dakika aralıklarla sayım yaparak Baranyi modeli ile ifade etmiştir. Sütte 3, 5 ve 7 log KOB/mL inokülasyon düzeylerinde *Salmonella Enteritidis* patojen bakterisini fermantasyon aşamasında ilave ederek fermentasyon süresince sayım yapmış ve elde ettiği sayım sonuçlarını DMFit yazılımı kullanılarak Baranyi modeline uygulamıştır. Bu çalışmada maksimum gelişme hızı ( $\mu_{max}$ ) değerlerini (0.26–0.38 log KOB/g/sa) elde ederek başlangıç inokülasyon düzeylerinin *Salmonella Enteritidis*'in üzerine etki etmediğini göstermesinin yanısıra lag fazı ( $\lambda$ ) arasında da belirgin bir ilişkinin gözlenmediğini bildirmiştir. Ayrıca Baranyi modelinin standart hatasını 0.02-0.05 değerleri arasında, determinasyon katsayısını da (R<sup>2</sup>) 0.95-0.97 aralığında bulmuştur.

Silva vd. [44], vakumlu paketlenmiş dilimlenmiş jambonda izotermal olmayan koşullar altında *Lactobacillus viridescens* büyümesini modellemek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, taze jambon parçasını dilimleyerek *Lactobacillus viridescens* ile aşılandıktan sonra vakumla paketlenmişlerdir. Bu paketleri beş farklı izotermal olmayan koşullarda (4 ile 25 °C arasında) ve bir izotermal koşul (8 °C) altında sıcaklık kontrollü inkübatörde depolama işlemi uygulayarak *Lactobacillus viridescens* büyümesini ölçmüşlerdir. Birincil model olan Baranyi ve Roberts Modeli ve ikincil modeli olan Karekök modellerin tahmin yeteneği, izotermal koşullar altında (4 ve 30 °C arasında) MRS kültür ortamında tahmin edilen parametreleri kullanılarak değerlendirmişlerdir. MRS ortamında elde edilen matematiksel modelleri, vakumla paketlenmiş jambonda *L. viridescens* büyüme verilerinin tahmin edilen değerlerin karşılaştırılmasıyla değerlendirmişlerdir. Bias faktörünü 0.95 ile 1.03 arasında; doğruluk faktörünü 1.04 ile 1.07 arasında ve RMSE değerlerini 0.76 ile 1.33 arasında hesaplamışlardır. MRS ortamındaki izotermal büyüme verilerinden elde edilen model parametrelerinin analiz edilen sıcaklık aralığında izotermal olmayan koşullar altında ticari bir jambonun raf ömrünün tahmin edebileceğini bildirmişlerdir

**Tablo 1.** *Pseudomonas fluorescens*'in R<sup>2</sup> değerleri ve RMSE değerleri

Büyüme Koşulları	Baranyi ve Roberts Modeli		Modifiye Gompertz Modeli	
	R <sup>2</sup> değeri	RMSE değeri	R <sup>2</sup> değeri	RMSE değeri
4 °C pH 5.5	0.98	0.1701	0.97	0.2105
4 °C pH 6.0	0.99	0.1026	0.99	0.0959
4 °C pH 6.3	0.99	0.8333	0.99	0.0854
7 °C pH 5.5	0.989	0.1703	0.996	0.1077
7 °C pH 6.0	0.990	0.1469	0.993	0.1284
7 °C pH 6.3	0.992	0.1400	0.994	0.1154
12 °C pH 5.5	0.987	0.1815	0.972	0.2612
12 °C pH 6.0	0.991	0.1614	0.979	0.2505
12 °C pH 6.3	0.984	0.2126	0.968	0.2967

Bolivar vd. [45], *L. monocytogenes*'in büyümesini, farklı atmosfer koşullarında (yani azaltılmış oksijen ve aerobik) 2–20 °C sıcaklık aralığında optik yoğunluk (OD) ölçümleri aracılığıyla balık bazlı meyve suyunda (FBJ) değerlendirmişlerdir. Baranyi ve Roberts modelini gözlemlenen büyüme eğrilerinden  $\mu_{max}$ 'ı tahmin etmek için kullanmışlardır. Ayrıca depolama sıcaklığının  $\mu_{max}$  üzerindeki etkisini de Ratkowsky Karekök modeli kullanarak modellemişlerdir. Geliştirilen modeller, statik ve dinamik sıcaklık koşullarında depolanan çipura ve levrek filetolarında *L. monocytogenes* için deneysel büyüme verileri kullanılarak doğrulamışlardır. Azaltılmış oksijen koşulları altında oluşturulan modelin Akdeniz balık ürünlerinde *L. monocytogenes* büyümesini yeterince tahmin etmek için iyi performans gösterdiğini bildirmişlerdir.

Kim vd. [46], farklı sıcaklıklarda (5, 22 ve 30 °C, 72 saate kadar) depolanmış ticari tuzlu napa lahanalarındaki mikrobiyal gelişmeleri (aerobik plaka sayımı, toplam koliform ve laktik asit bakterileri) araştırmışlardır. Tuzlanmış napa lahanalarının raf ömrünü belirlemek için Modifiye Gompertz denklemini kullanmışlardır. Modifiye Gompertz modeline göre ( $R^2 > 0.97$ ), en yüksek büyümeyi 30 °C'de (0.61 log CFU/h) laktik asit bakterilerinde, en düşük büyümeyi ise 5 °C'de (0.04 log CFU/h) toplam koliformda gözlemişlerdir. Raf ömrünü, aerobik plaka sayımı (7.7 log CFU/g) ve laktik asit bakterileri (6.0 log CFU/g) limitlerini kullanarak belirlemişlerdir. Tuzlanmış napa lahanasının mikrobiyolojik kabul süresi 22 °C ve 30 °C'de sırasıyla 12.6 saat ve 9.3 saat olarak tahmin etmişlerdir. Bu nedenle tüketicilere, ürünü oda sıcaklığında 12 saatte (yazın daha hızlı (9 saat)) kullanmalarını ya da buzdolabında depolamaları gerektiğini önermişlerdir.

Silvestri vd. [47], farklı sıcaklıklarda (4, 7, 10, 15, 25 ve 30 °C) *Aeromonas hydrophila* DSM-30187, *Listeria monocytogenes* DSM-20600 ve *Yersinia enterocolitica* DSM-27689 suşlarının büyüme davranışını incelemişlerdir. Ayrıca suşların hücre konsantrasyonlarını başlatmak için (10 ve 10<sup>6</sup> CFU/ml) büyüme oranları ve ilgili gecikme fazların aktivasyon enerjilerinden (Ea) yararlanmayı amaçlamışlardır. Bu uygulamada Arrhenius modelinin faydalanmışlardır. Arrhenius modeline göre hesaplanan latent dönemlerin süresine dahil olan Ea değerleri *A. hydrophila* ve *L. monocytogenes* suşları için karşılaştırılabilirken (21.3 ile 24.4 kcal/mol), *Y. enterocolitica* (16.6 kcal/mol) önemli ölçüde farklılık göstermiştir. Büyüme oranlarının Ea değerleri *A. hydrophila* ve *L. monocytogenes* suşları için benzerlik gösterirken (20.9 ila 21.1 kcal/mol), *Y. enterocolitica* için oldukça düşük olduğunu (14.2 ile 16.7 kcal/mol) hesaplamışlardır. Test edilen *Y. enterocolitica* suşunun diğer iki patojen suşuna kıyasla farklı bir davranış gösterdiğini ve düşük sıcaklıkta önemli ölçüde daha hızlı büyüme yeteneğine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Ha vd. [48] yaptıkları bir çalışmada kurutulmuş dana etini 10 g'lık parçalar haline getirdikten sonra örnekleri *S. aureus* ATCC13565 ile inoküle ederek aerobik koşullarda 10 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C ve 35 °C'de 600 saat depolamışlardır. Birincil bir model geliştirmek için,  $\rho$  (eğrilerin şekli) ve

Delta (ilk ondalık azaltma için gerekli süre) değerlerini hesaplamak amacıyla hücre sayısı verilerine Weibull modelini yerleştirmişlerdir. İkincil modelleme içinse, depolama sıcaklığının bir fonksiyonu olarak Delta değerlerine bir polinom modeli yerleştirmişlerdir. Model tahmininin doğruluğunu değerlendirmek için, tahmin edilen verilerin gözlenen verilerle karşılaştırılmasıyla RMSE değerlerini hesaplamışlardır. Canlı kalan *S. aureus* hücre sayılarının tüm depolama sıcaklıklarında azaldığını gözlemlemişlerdir. Delta değerlerini 10 °C, 20 °C ve 25 °C değerlerinde 30 °C ve 35 °C değerlerinden daha uzun olarak hesaplamışlardır. İkincil modelin 0.920 R<sup>2</sup> değeriyle  $\rho$ 'nin sıcaklık üzerindeki etkisini iyi tanımladığını bildirmişlerdir. Ayrıca doğrulama analizinde, 0.325'lik RMSE değerlerinin model performansına uygun olduğunu belirtmişlerdir. Ek olarak kurutulmuş sığır etinin düşük su aktivitesi değerine sahip olmasına rağmen, *S. aureus* kontamine olursa hücrelerin düşük sıcaklıkta uzun süre hayatta kalabileceğini ve gıda güvenliği sorunlarına neden olabileceğini de bildirmişlerdir.

*Lactobacillus sakei* suşu L115'in sıvı kültürde *Listeria monocytogenes*'e karşı inhibe etme kapasitesini 4, 8, 11, 15 ve 20 °C'de test eden Costa vd. [49], *Lb. sakei* L115'in varlığında birlikte kültürlendiğinde, *Listeria monocytogenes*'in maksimum popülasyon yoğunluğu ve büyüme oranının belirgin şekilde azaldığını, dolayısıyla *Lb. sakei* L115'in bir dizi karışık patojen suşuna karşı inhibe edici etkisini doğrulamışlardır. Hem monokültürde hem de ortak kültürde mikroorganizmaların büyümesini tanımlamak için kinetik parametreler (maksimum spesifik büyüme hızı ve maksimum popülasyon yoğunluğu) Baranyi büyüme modelinin modifikasyonlarına dayalı olarak geliştirilen Jameson etkisi, Modifiye Jameson etkisi ve Lotka-Volterra modellerinden yararlanarak tahmin etmişlerdir. *Lb. sakei* ve *L. monocytogenes* kokteylinin eşzamanlı büyümesi Lotka-Volterra modeli ve Modifiye Jameson modeli ile daha iyi simüle edilebileceğini belirtmişlerdir. Ortak kültürde, *L. monocytogenes* maksimum spesifik büyüme hızının azaldığını (örneğin, 4 °C'de inhibisyon katsayısı ( $\alpha$ ) =%31) ve maksimum popülasyon yoğunluğunun monokültürden çok daha düşük olduğunu (örneğin, 4 °C'de  $\alpha$  =%36) gözlemişlerdir. *Lb. sakei* L115'in yüksek konsantrasyonda kombinasyonu, düşük sıcaklıklar, besin tükenmesi ve bakteriyosin üretimi *L. monocytogenes*'in büyümesinin engellenmesinin ana nedenleri olabileceğini bildirmişlerdir.

Tarлак vd. [50] yaptıkları bir çalışmada farklı izotermal koşullarda (4, 12, 20 ve 28 °C) depoladıkları beyaz düğme mantarları (*Agaricus bisporus*) üzerinde *Pseudomonas spp.*'nin deneysel büyüme verilerini Baranyi modeli uygulayarak *Pseudomonas spp.*'in düğme mantarlar üzerindeki kinetik büyüme parametrelerini elde etmişlerdir. Baranyi modeli, tüm izotermal depolama sıcaklıklarında RMSE değerlerini 0.193'ten düşük ve ayarlanmış-R<sup>2</sup> değerlerini 0.975'ten yüksek verdiğini gözlemişlerdir. Baranyi modelinden elde edilen  $\mu_{max}$ 'ı Ratkowsky ve Arrhenius modelleri gibi ikincil modeller kullanılarak sıcaklık ile ilişkilendirmişlerdir. Ratkowsky modelinin  $\mu_{max}$ 'ın sıcaklık bağımlılığını Arrhenius modelinden daha iyi

tanımladığını bildirmişlerdir. Yüksek ayarlanmış-R<sup>2</sup> ve düşük RMSE değerleri, Ratkowsky modelinin mantarların depolama sıcaklığı ile *Pseudomonas spp*'nin maksimum spesifik büyüme hızı arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

### 3 Sonuçlar

Bu alanda yapılan çalışmaların verdiği sonuç matematiksel modellerin, zaman alıcı ve maliyetli kalite kontrol analizlerinin yerine daha kısa bir zaman içerisinde sonuç alınabilecek analizlere imkan tanımaktadır. Ayrıca ekonomik açıdan da faydalı olmaktadır. Elde edilen veriler ışığında Prediktif mikrobiyoloji modelleri, mikrobiyal gıda güvenliğini ve kalitesini iyileştirmek için pratik uygulama potansiyeline sahiptir. Gıdalar üzerindeki mikroorganizma sayısını belirlemek için geleneksel sayım tekniklerine bir alternatif olmaktadır.

Birçok gıda ürününün işlenmesi, paketlenmesi, dağıtılması ve depo koşullarının kontrolü, gıda güvenliğinin sağlanması gerek sağlık gerekse ekonomik önem taşımaktadır. Dolayısıyla gıda üretimi ve dağıtımındaki mikrobiyolojik riski kantitatif olarak değerlendirmek ve raf ömrünü belirlemek için prediktif modeller kullanılabilir. Gıda kaynaklı patojenlerin prediktif modeller kullanarak kontaminasyon riskini tahmin etmek için, bu mikroorganizmaların spesifik gıdalardaki davranışını analiz etmek gerekmektedir. Bu sebeple hammaddelerin tarladan sofraya kadar tüm aşamalarında mikroorganizmaların konsantrasyonu sürekli izlenmelidir. Böylece bozulmaya yatkın yiyeceğin kalitesini, mikrobiyal popülasyonun davranışı ve bunun çevre üzerindeki etkisi kolaylıkla tahmin edilebilir. Bu sayede gıda üretimi ve işleminde HACCP planlarında prediktif mikrobiyolojiden yararlanılabilir.

Prediktif mikrobiyoloji, hem gıda mikrobiyolojisi alanında hem de matematiksel modellemede yer alan bilim adamlarının disiplinler arası araştırma çabaları sayesinde ilerleme kaydetmiştir. Gıda ürünlerindeki modellerin doğrulanması, uygun modellerin geliştirilmesi ve bunların gıda güvenliği yönetimine doğrudan uygulanması önemlidir. Bunun için potansiyeli olan bu alanda yapılan çalışmalara ihtiyaç vardır.

### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

### Benzerlik oranı (iThenticate): %9

### Kaynaklar

- [1] M. Mutlu, Matematik modelleme ve gıda mühendisliğinde kullanımı. 9. Gıda Kongresi, sayfa 31-32, Bolu, Türkiye, 24-26 Mayıs 2006.
- [2] Y. O. Devres ve M. Pala, Gıda sanayiinde matematiksel modellemenin önemi ve uygulama alanları. Gıda, 18 (3), 173-181, 1993.
- [3] L. Verschaffel, B. Greer and E. De Corte, Everyday knowledge and mathematical modeling of school word problems. In: Gravemeijer, K., Lehrer, R., Van Oers, B., Verschaffel, L. (eds) Symbolizing, Modeling and Tool Use in Mathematics Education. Mathematics Education Library, Springer, Dordrecht, vol 30, pp.

- 257-276, 2002. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-3194-2\\_16](https://doi.org/10.1007/978-94-017-3194-2_16).
- [4] T. A. Roberts, Mathematical modeling of microbial growth. 3th Karlsruhe Nutrition Symposium European Research Towards Safer and Better Food, pp 33-42, Karlsruhe, Germany, October 18-20, 1998.
- [5] H. Bozkurt and O. Erkmen, Predictive modelling of *Yersinia enterocolitica* inactivation in Turkish Feta cheese during storage. Journal of Food Engineering, 47, 81-87, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00102-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00102-3).
- [6] T. K. Soboleva, A. B. Pleasants and G. le Roux, Predictive microbiology and food safety. International Journal of Food Microbiology, 57 (3), 183-192, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(00\)00265-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(00)00265-8).
- [7] Y. Yoon, Principal theory and application of predictive microbiology. Food Science and Industry, 43 (1), 70-74, 2010. pISSN: 0257-2397.
- [8] M. H. Zwietering, I. Jongenburger, F. M. Rombouts and K. Vantriet, Modeling of the bacterial-growth curve. Applied and Environmental Microbiology, 56, 1875-1881, 1990. <https://doi.org/10.1128/aem.56.6.1875-1881.1990>.
- [9] M. H. Zwietering, J. C. de Wit and S. Notermans, Application of predictive microbiology to estimate the number of *Bacillus cereus* in pasteurised milk at the point of consumption. International Journal of Food Microbiology, 30, 55-70, 1996. [https://doi.org/10.1016/0168-1605\(96\)00991-9](https://doi.org/10.1016/0168-1605(96)00991-9).
- [10] L. Huang, A comprehensive data analysis tool for predictive microbiology. International Journal of Food Microbiology, 171, 100-107, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodmicro.2013.11.019>.
- [11] F. Devlieghere, K. Francois, B. De Meulenaer and K. Baert, Modelling Food Safety. In: Safety in the Agri-Food Chain. P. A. Luning, F. Devlieghere and R. Verhe (eds). Wageningen: Wageningen Academic Publishers, pp. 397-439, 2006.
- [12] R. C. Whiting and R. L. Buchanan, A classification of models for predictive microbiology. Food Microbiology, 10, 175-177, 1993.
- [13] J. Ha, E. Gwak, M. H. Oh, B. Park, J. Lee, S. Kim, H. Lee, S. Lee, Y. Yoon and K. H. Choi, Kinetic behavior of *Salmonella* on low NaNO<sub>2</sub> sausages during aerobic and vacuum storage. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 36 (2), 262-266, 2016. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2016.36.2.262>.
- [14] O. Erkmen, Gıda Mikrobiyolojisi. Efil Yayınevi, 2.Baskı, Ankara, 2010.
- [15] A. M. Gibson, N. Bratchell and T. A. Roberts, The effect of sodium chloride and temperature on the rate and extent of growth of *Clostridium botulinum* type A in pasteurized pork slurry. Journal of Applied Bacteriology, 62, 479-490, 1987. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1987.tb02680.x>.
- [16] J. Baranyi, T. A. Roberts and P. McClure, A non-autonomous differential equation to model bacterial growth. Food Microbiology, 10, 43-59, 1993. <https://doi.org/10.1006/fmic.1993.1005>.

- [17] R. L. Buchanan, Predictive food microbiology. Trends in Food Science Technology, 4, 6-11, 1993. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(05\)80004-4](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(05)80004-4).
- [18] R. C. Whiting, Microbial modelling in foods. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 35 (6), 467-494, 1995. <https://doi.org/10.1080/10408399509527711>.
- [19] D. A. Ratkowsky, R. K. Lowry, T. A. McMeekin, A. N. Stokes and R. E. Chandler, Model for bacterial culture growth rate throughout the entire biokinetic temperature range. Journal of Bacteriology, 154 (3), 1222-1226, 1983. <https://doi.org/10.1128/jb.154.3.1222-1226.1983>.
- [20] B. Fu, P. S. Taoukis and T. P. Labuza, Predictive microbiology for monitoring spoilage of dairy products with time-temperature integrators. Journal of Food Science, 56 (5), 1209-1215, 1991. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1991.tb04736.x>.
- [21] İ. Y. Genç ve A. Diler, Matematiksel modelleme ve su ürünlerinde kullanılan raf ömrü tahmin modelleri. Süleyman Demirel Üniversitesi, Yalvaç Akademik Dergisi, 2 (1), 13-18, 2017.
- [22] P. Dalgaard, O. Mejlholm and H. H. Huss, Application of an iterative approach for development of a microbial model predicting the shelf-life of packed fish. International Journal of Food Microbiology, 38, 169-179, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(97\)00101-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(97)00101-3).
- [23] K. Koutsoumanis, Predictive modeling of the shelf life of fish under nonisothermal conditions. Applied And Environmental Microbiology, 67 (4), 1821-1829, 2001. <https://doi.org/10.1128/AEM.67.4.1821-1829.2001>.
- [24] S. Lopez, M. Prieto, J. Dijkstra, M. S. Dhanoa and J. France, Statistical evaluation of mathematical models for microbial growth. International Journal of Food Microbiology, 96, 289-300, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.03.026>.
- [25] H. Ölmez ve N. Aran, Sodyum laktatın *Bacillus cereus*'ün büyüme kinetiği üzerindeki etkisi. İtühendisi/d mühendislik, Cilt:4, Sayı:3, 32-38, 2005.
- [26] R. Gospavic, J. Kreyenschmidt, S. Bruckner, V. Popov and N. Haque, Mathematical modelling for growth of *Pseudomonas* spp. in poultry under variable temperature conditions. International Journal of Food Microbiology, 127, 290-297, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2008.07.022>.
- [27] Z. Yang, X. Jiao, P. Li, Z. Pan, J. Huang, R. Gu, W. Fang and G. Chao, Predictive model of *Vibrio parahaemolyticus* growth and survival on salmon meat as a function of temperature. Food Microbiology, 26, 606-614, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2009.04.004>.
- [28] A. Singh, N. R. Korasapati, V. K. Juneja, J. Subbiah, G. Froning and H. Thippareddi, Dynamic predictive model for the growth of *Salmonella* spp. in liquid whole egg. Journal of Food Science, 76 (3), 225-232, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02074.x>.
- [29] A. Lobacz, J. Kowalik and A. Tarczyska, Modeling the growth of *Listeria monocytogenes* in mold-ripened cheeses. Journal of Dairy Science, 96, 3449-3460, 2013. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5964>.
- [30] O. Ağyar ve F. Üçkardeş, Probiyotik özellikte üç farklı Laktik Asit Bakterileri grubu suşunun koloni büyüme eğrilerinin modifiye edilmiş Gompertz modeli ile modellenmesi. Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi, 1 (3), 430-434, 2014.
- [31] M. Kološta, A. Slottová, M. Drončovský, L. Klapáčová, V. Kmet', D. Bujňáková, A. Lauková, G. Greif, M. Greifová and M. Tomáška, Characterisation of lactobacilli from ewe's and goat's a milk for their further processing re-utilisation. Potravinarstvo Scientific Journal for Food Industry, 8 (1), 130-134, 2014. <https://doi.org/10.5219/354>.
- [32] E. Bednarko-Młynarczyk, J. Sztejn, I. Białobrzewski, A. Wiszniewska-Łaszczyc and K. Liedtke, Modeling the kinetics of survival of *Staphylococcus aureus* in regional yogurt from goat's milk. Polish Journal of Veterinary Sciences, 18 (1), 39-45, 2015. <https://doi.org/10.1515/pjvs-2015-0005>.
- [33] J. Kowalik and A. Lobacz, Development of a predictive model describing the growth of *Yersinia enterocolitica* in Camembert-type cheese. International Journal of Food Science and Technology, 50, 811-818, 2015. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12715>.
- [34] K. S. Özdemir, Gıda ve biyoaktif gıda bileşenlerinin kaplanması: Proses ve depolama stabilitesi üzerine etkileri. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Türkiye, 2015.
- [35] S. Kalkan, Probiyotik laktik asit bakterilerinin *Staphylococcus aureus*'a karşı antimikrobiyel etkilerinin farklı matematiksel modeller ile analizi. Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 1 (2), 150 - 159, 2016. ISSN: 2536-4383.
- [36] A. Lytou, E. Z. Panagou and G.-J. E. Nychas, Development of a predictive model for the growth kinetics of aerobic microbial population on pomegranate marinated chicken breast fillets under isothermal and dynamic temperature conditions. Food Microbiology, 55, 25-31, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2015.11.009>.
- [37] E. J. Quinto, J. M. Marín and D. W. Schaffner, Effect of the competitive growth of *Lactobacillus sakei* MN on the growth kinetics of *Listeria monocytogenes* Scott A in model meat gravy. Food Control, 63, 34-45, 2016. <http://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.11.025>.
- [38] J. Szczawiński, M. E. Szczawińska, A. Łobacz and A. Jackowska-Tracz, Modeling the effect of temperature on survival rate of *Listeria monocytogenes* in yogurt. Polish Journal of Veterinary Sciences, 19 (2), 317-324, 2016. <https://doi.org/10.1515/pjvs-2016-0039>.
- [39] S. Vega, D. Saucedo, D. Rodrigo, C. Pina, C. Armero and A. Martınez, Modeling the isothermal inactivation curves of *Listeria innocua* CECT 910 in a vegetable beverage under low-temperature treatments and different pH levels. Food Science and Technology International, 22 (6), 525-535, 2016. <https://doi.org/10.1177/1082013215624807>.



- [40] S. Bursova, L. Necidova, D. Harustiakova and B. Janstova, Growth potential of *Yersinia enterocolitica* in pasteurised cow's and goat's milk stored at 8 °C and 24 °C. *Food Control*, 73, 1415-1419, 2017. <http://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.11.006>.
- [41] L. D. A. Gonçalves, R. H. Piccoli, A. P. Peres, A. V. Saúde, Predictive modeling of *Pseudomonas fluorescens* growth under different temperature and pH values. *Brazilian Journal of Microbiology*, 48, 352–358, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.12.006>.
- [42] A. Mishra, M. Guo, R. L. Buchanan, D. W. Schaffner and A. K. Pradhan, 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, 2017. <http://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.06.009>.
- [43] D. Savran, Yoğurt üretimi ve depolaması sırasında *Salmonella Enteritidis*'in canlı kalma durumunun modellenmesi. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Türkiye, 2017.
- [44] N. B. Silva, D. A. Longhi, W. F. Martins, J. B. Laurindo, G. M. F. de Aragao and B. A. M. Carciofi, Modeling the growth of *Lactobacillus viridescens* under non-isothermal conditions in vacuum-packed sliced ham. *International Journal of Food Microbiology*, 240, 97–101, 2017. <http://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.05.014>.
- [45] A. Bolívar, J. C. C. P. Costa, G. D. Posada-Izquierdo, A. Valero, G. Zurera and F. Pérez-Rodríguez, Modelling the growth of *Listeria monocytogenes* in Mediterranean fish species from aquaculture production. *International Journal of Food Microbiology*, 270, 14–21, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.02.005>.
- [46] H. W. Kim, K. Lee, S. H. Kim and M. S. Rhee, Predictive modeling of bacterial growth in ready-to-use salted napa cabbage (*Brassica pekinensis*) at different storage temperatures. *Food Microbiology*, 70, 129-136, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.09.017>.
- [47] A. Silvestri, E. Ferrari, S. Gozzi, F. Marchi and R. Foschino, Determination of temperature dependent growth parameters in psychrotrophic pathogen bacteria and tentative use of mean kinetic temperature for the microbiological control of food. *Frontiers in Microbiology*, 9, 3023, 2018. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.03023>.
- [48] J. Ha, J. Lee, S. Lee, S. Kim, Y. Choi, H. Oh, Y. Kim, Y. Lee, Y. Seo and Y. Yoon, Mathematical models to describe the kinetic behavior of *Staphylococcus aureus* in jerky. *Food Science of Animal Resources*, 39 (3), 371-378, 2019. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2019.e28>.
- [49] J. C. C. P. Costa, A. Bolívar, A. Valero, E. Carrasco, G. Zurera and F. Perez-Rodriguez, Evaluation of the effect of *Lactobacillus sakei* strain L115 on *Listeria monocytogenes* at different conditions of temperature by using predictive interaction models. *Food Research International*, 131, 108928, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108928>.
- [50] F. Tarlak, M. Ozdemir and M. Melikoglu, Predictive modelling for the growth kinetics of *Pseudomonas spp.* on button mushroom (*Agaricus bisporus*) under isothermal and non-isothermal conditions. *Food Research International*, 130, 108912, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108912>.

