



**$\alpha$ -LAKTALBUMIN'İN ISIL DENATÜRASYONUNUN İKİ FARKLI MODELLE  
TANIMLANMASI**

***DEMONSTRATION OF TWO DIFFERENT MODELS FOR THERMAL DENATURATION OF  
 $\alpha$ -LACTALBUMIN***

Sencer BUZRUL\*<sup>1</sup>

1 Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

**ABSTRACT**

The  $n^{\text{th}}$ -order model commonly used in kinetic modeling and an empirical model were used to describe previously published denaturation of  $\alpha$ -lactalbumin at different temperatures (67.5, 70, 72.5, 75, 77.5 and 80°C) as the primary models and a comparison was made. Application of the models revealed that the first-order kinetic model could not be used to describe these data i.e., the first-order kinetic model would be inadequate. The  $n^{\text{th}}$ -order model produced slightly better fits at five temperatures, while the empirical model had better result at only one temperature. Since one parameter of each model did not depend on temperature, it was possible to fix these parameters by using the average values of six temperatures, and hence reduce the models. The reduced  $n^{\text{th}}$ -order model had better results at four temperatures, whereas the empirical model produced better fits at two temperatures. It was observed that the sole parameter in the reduced models changed linearly with temperature, and secondary modeling was performed by simple linear regression. Secondary models were integrated into the primary (reduced) models and predictions were made at three different temperatures. Although the predictions of the two models were different at 68°C, the models had almost the same predictions at 74 and 76.5°C. It was concluded that both models can be used to describe the data for kinetic modeling purposes; however, outcomes may be different for other data sets.

**Keywords:** Denaturation Kinetics; Kinetic Modeling; Model Fitting; Model Prediction; Regression

**ÖZET**

Kinetik modellemede kullanılan  $n$ 'inci dereceden ( $n$ -derece) model ile başka bir ampirik model birincil model olarak daha önce yayımlanmış  $\alpha$ -laktalbumin'in farklı sıcaklıklardaki (67.5, 70, 72.5, 75, 77.5 ve 80°C) denatürasyonunu tanımlamak için kullanılmış ve karşılaştırılmıştır. Modellerin uygulamasından birinci dereceden kinetik modelin bu verileri tanımlamak için kullanılamayacağı ya da bu veriler için yetersiz kalacağı anlaşılmıştır. Az farkla da olsa beş sıcaklıkta  $n$ -derece model daha iyi uyum göstermiş, ampirik model ise sadece bir sıcaklıkta daha iyi sonuç vermiştir. Her iki modelin de birer parametresi sıcaklığa bağlı olarak değişmediğinden bu parametreleri altı sıcaklığın ortalaması olarak sabitlemek ve modelleri sadeleştirmek ya da indirgemek mümkündür. Benzer şekilde indirgenmiş  $n$ -derece model dört sıcaklık değerinde daha iyi sonuçlar vermiş, ampirik model iki sıcaklıkta daha iyi uyum göstermiştir. İndirgenmiş modellerde yer alan tek parametrenin de sıcaklıkla doğrusal olarak değiştiği görülmüş ve ikincil modelleme basit doğrusal regresyon kullanılarak yapılmıştır. İkincil modeller birincil (indirgenmiş) modeller içerisine yerleştirilerek üç farklı sıcaklıkta tahmin çalışması yapılmıştır. Her ne kadar 68°C'de iki modelin tahmini farklı çıkmış olsa da 74 ve 76.5°C'lerde iki model de hemen hemen aynı tahmini vermiştir. Sonuç olarak kinetik modelleme amacıyla bu veri setleri için her iki modelin de kullanılabileceği ancak farklı veri setleri için farklı sonuçlar elde edilmesinin mümkün olabileceği değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bozunma Kinetiği; Kinetik Modelleme; Model Tahmini; Model Uyumu; Regresyon

\*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: sencer.buzrul@erbakan.edu.tr; sencer.buzrul@gmail.com

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayın Tarihi
11.11.2023	08.12.2023	19.12.2023	27.12.2023

## 1. GİRİŞ

Kinetik, zamana bağlı değişiklikleri tanımlayan bilim dalı olup bu değişiklikler gıdalar için kimyasal, fiziksel veya mikrobiyolojik olabilir [1]. Kinetik modelleme gıda bilimlerinde sıklıkla kullanılmakta ve gıdalardaki bazı bileşenler için denatürasyon veya bozunma (örneğin vitaminlerin zamana bağlı bozunması) genellikle sıfıncı, birinci ya da ikinci dereceden bozunma kinetiği ile tanımlanmaya çalışılmaktadır [2]. Ancak son yıllarda gıdaların bozunma kinetiği için yapılan çalışmalar göstermektedir ki bozunma kinetiğinde tepkime (reaksiyon) derecesi sıfır, bir ya da iki yerine herhangi bir dereceden (örneğin 1.7 derece) olabilmektedir [3].

Jaskulka vd. [4] yapmış oldukları çalışmada daha önce tepkime derecesi birinci ya da ikinci derecede olarak rapor edilen  $\beta$ -laktoglobulin'in ısı denatürasyonu için gerçek tepkime derecelerinin 0.5 ile 2.5 arasında değiştiğini göstermişlerdir. Bu nedenle gıdalarda yapılan çalışmalarda tepkime derecesini önceden sabitlemek ya da öngörerek modellemeye başlamak yerine tepkime derecesini modelleme yaparak elde etmek doğru bir yaklaşım olacaktır.

Bu çalışmanın ana amacı daha önce yayımlanmış veri setlerini iki farklı modelle tanımlamak, bu modellerin performansını ve tahmin yeteneklerini karşılaştırmaktır. İkinci amacımız geleneksel modellemelerden farklı bir yol izleyerek kinetik modellemeyi uygulayacak araştırmacılara farklı bir bakış açısı kazandırmaktır.

## 2. YÖNTEM

### 2.1. Veri setleri

Bu çalışma için kullanılan veriler Halabi vd.'den [5] alınmıştır. Halabi vd. [5] sıcaklığın  $\alpha$ -laktalbumin denatürasyon kinetiği üzerindeki etkisini çalışmışlardır. Bu verileri kullanmamızın amacı (i) çalışmanın 6 farklı sıcaklıkta (67.5, 70, 72.5, 75, 77.5 ve 80°C) yapılmış olması, (ii) her bir sıcaklık için yüksek  $\alpha$ -laktalbumin konsantrasyonundan düşük konsantrasyona doğru veri toplanması (en az %90 denatürasyon), (iii) her bir sıcaklık için en az 13 farklı zamanda veri alınmış olması yani veri sayısının fazlalığıdır. Literatürde yapılan kinetik çalışmalar genellikle az sayıda sıcaklıkla ( $\leq 3$ ), az sayıda veri ile ( $\leq 5$ ) ve denatürasyon/bozunma oranı %50'yi geçmeyecek şekilde yapıldığından kullanılan bu veri seti modelleme için çok uygundur. Veriler WebPlotDigitizer (<https://automeris.io/WebPlotDigitizer>) kullanılarak sayısallaştırılmış ve Excel® programına aktarılmıştır.

### 2.2. Modelleme

Bozunma kinetiği için kullanılan n-derece denklem aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\frac{dC}{dt} = -k' \cdot C^n \quad (1)$$

Bu denklemde  $C$   $\alpha$ -laktalbumin konsantrasyonu (g/L),  $t$  zaman (dakika),  $k'$  hız sabiti ( $g^{1-n} \cdot L^{n-1} / \text{dakika}$ ),  $n$  ise birimsiz tepkime derecesidir. Denklem 1'i düzenleyip integral alırsak:

$$C(t) = [C_0^{1-n} + (n-1) \cdot k' \cdot t]^{\frac{1}{1-n}} \quad n \neq 1 \quad (2)$$

Burada  $C_0$   $\alpha$ -laktalbumin'in ilk ( $t = 0$ ) konsantrasyonudur. Denklemi yeniden düzenlersek:

$$\frac{C(t)}{C_0} = [1 + (n-1) \cdot K \cdot t]^{\frac{1}{1-n}} \quad n \neq 1 \quad (3)$$

Bu denklemde  $K$  yeni hız sabiti olup ( $K = k' \cdot C_0^{n-1}$ ) birimi 1/dakika'dır.

Eğer Denklem 1'de  $n = 1$  olursa

$$\frac{dC}{dt} = -k \cdot C \quad (4)$$

Denklem 4 çözüldürse:

$$\frac{C(t)}{C_0} = \exp(-k \cdot t) \quad (5)$$

Burada da  $k$  (1/dakika) hız sabiti olup,  $\exp = e$  ise Euler sayısıdır ( $e^1 = 2.71828$ )

Literatürde Denklem 3'e alternatif olarak aşağıdaki denklem önerilmiştir [6]:

$$\frac{C(t)}{C_0} = \exp(-b \cdot t^m) \quad (6)$$

Burada  $b$  hız sabiti olarak düşünülebilir çünkü birimi 1/dakika<sup>m</sup>'dir,  $m$  ise birimsiz bir parametredir. Dikkat edilecek olursa, eğer  $m = 1$  ise tamamen ampirik bir model olan Denklem 6, birinci dereceden denkleme (Denklem 5) dönüşmektedir. Hem Denklem (3) hem de Denklem (6) ikişer parametreye sahiptir ve verileri tanımlamak için kullanılmışlardır.

### 2.3. Modellerin karşılaştırılması

Verileri tanımlamak için kullanılan modeller aşağıdaki gibi karşılaştırılmıştır:

- (i) Görsel karşılaştırma: Görsel olarak modellerin veriyle uyumuna bakılmıştır. Ancak, bu karşılaştırma sayısal bir değer vermediği gibi bazı durumlarda yanıltıcı da olmaktadır. Bu nedenle tek başına bir şey ifade etmeyen bu karşılaştırma sadece modellerin verilere yakınlığını değerlendirmektedir. Sonuç olarak verilere daha yakın olan model tercih edilmelidir.
- (ii) Model parametrelerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı: Parametreleri anlamsız olan model ( $p > 0.05$ ) varsa anlamlı parametrelere ( $p \leq 0.05$ ) sahip model tercih edilmelidir.
- (iii) Model uyum göstergeleri: Belirleme katsayısı ( $R^2$ ) ile ayarlı belirleme katsayısı ( $R^2_{\text{ayarlı}}$ ) yüksek ve 1'e yakın olan model tercih edilmelidir. Öte yandan, modelin standart hatasının (RMSE) düşük ve 0'a yakın olması model uyumunun iyi olduğunu göstergesidir.
- (iv) Modellerin tahmin yeteneği: Model için kullanılan sıcaklıklardan farklı sıcaklık ya da sıcaklıklar için modellerin tahminlerine bakılarak daha iyi tahmin veren model tercih edilmelidir.

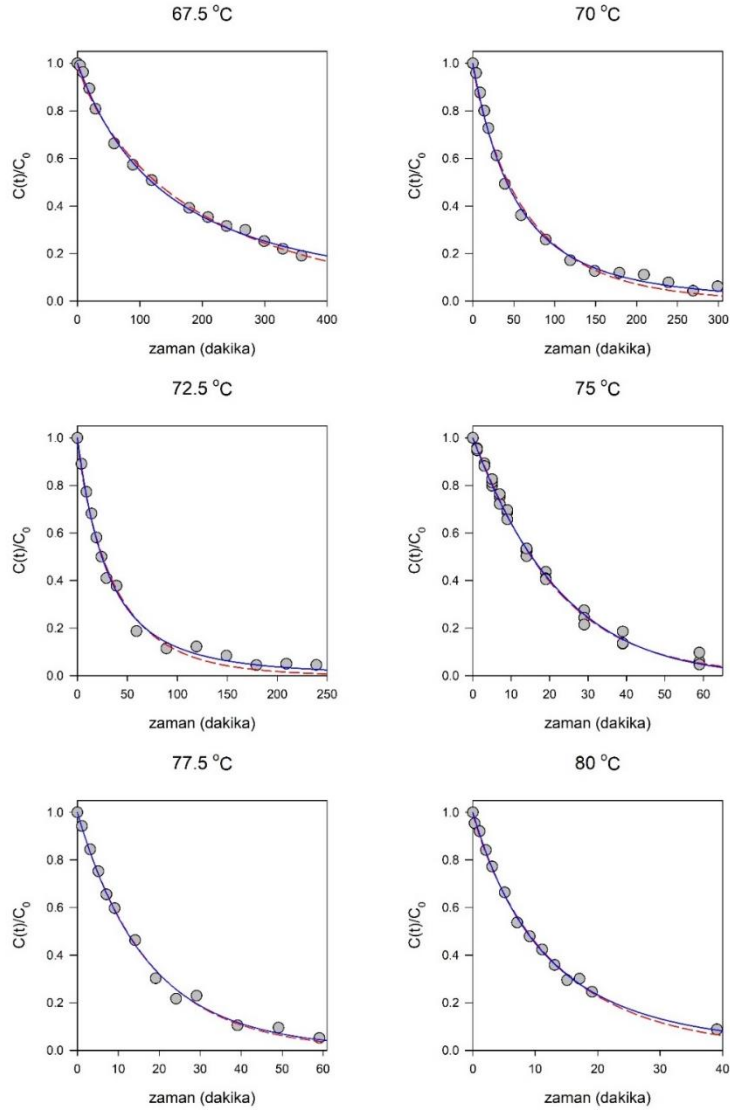
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 1'de her iki modelin (Denklem 3 ve Denklem 6) 6 farklı sıcaklıktaki  $\alpha$ -laktalbumin denatürasyonunu tanımlaması gösterilmiştir. Şekil 1 incelendiğinde her sıcaklık için yüksek konsantrasyondan diğer deyişle  $C(t)/C_0 = 1$ 'den düşük konsantrasyona diğer deyişle  $C(t)/C_0 = 0$ 'a çok sayıda veri alınmış ve sonuçta modelleme için son derece uygun bir veri seti ortaya çıkmıştır. Görsel olarak her iki model de verilerle uyumludur. Hatta bazı sıcaklıklarda (67.5, 75, 77.5 ve 80°C) her iki model hemen hemen aynı uyumu göstermiştir (Şekil 1). Ayrıca iki modelin de parametreleri tüm sıcaklıklarda istatistiksel olarak anlamlı ( $p \leq 0.05$ ) çıkmıştır.

Tablo 1'de modellerin uyum göstergeleri ( $R^2$ ,  $R^2_{\text{ayarlı}}$  ve RMSE) listelenmiş olup n-dereceden model (Denklem 3) ampirik modele (Denklem 6) göre az farkla da olsa daha iyi uyum göstermiştir. Ampirik model sadece 75°C sıcaklıkta daha iyi sonuç vermiştir, onun dışındaki tüm sıcaklıklarda n-dereceden model daha iyidir (Tablo 1).

**Tablo 1.** Birincil modellerin (Denklem 3 ve Denklem 4) uyum göstergelerinin karşılaştırılması

Sıcaklık (°C)	$R^2$		$R^2_{\text{ayarlı}}$		RMSE	
	Denklem 3	Denklem 6	Denklem 3	Denklem 6	Denklem 3	Denklem 6
67.5	0.9975	0.9958	0.9973	0.9955	0.0157	0.0202
70	0.9967	0.9928	0.9965	0.9923	0.0210	0.0310
72.5	0.9948	0.9907	0.9944	0.9900	0.0248	0.0332
75	0.9965	0.9970	0.9964	0.9969	0.0193	0.0178
77.5	0.9961	0.9958	0.9958	0.9954	0.0220	0.0230
80	0.9980	0.9971	0.9979	0.9968	0.0137	0.0166



**Şekil 1.** Denklem 3 (sürekli mavi eğriler) ve Denklem 6'nın (kesikli kırmızı eğriler) altı farklı sıcaklıkta  $\alpha$ -laktalbumin denatürasyon verilerine (gri daireler) uygulanması. Orijinal veriler Halabi vd.'den [5] alınmıştır.

Şekil 2'de  $n$ -dereceden modelin (Denklem 3) ve ampirik modelin (Denklem 6) sırasıyla  $n$  ve  $m$  parametrelerinin sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir. Denklem 3'teki  $n$  parametresinin de Denklem 6'daki  $m$  parametresinin de sıcaklığa bağlı olmadığı anlaşılmaktadır. Diğer bir deyişle bu parametrelerin sıcaklığa bağlı modelini (ikincil model) elde etmek mümkün değildir.  $n$  parametresi 0.9 ile 1.6 arasında değişirken,  $m$  parametresi 0.8 ile 1.1 arasında değişmektedir. Şekil 2'den çıkarabileceğimiz bir diğer sonuç ise  $\alpha$ -laktalbumin'in sıcaklığa bağlı denatürasyonunun birinci dereceden olmadığıdır çünkü  $m$  değeri hiçbir sıcaklıkta 1 değildir. Dahası  $n$  değeri 5 sıcaklık için 1'den büyük, bir sıcaklık ( $75^\circ\text{C}$ ) için 1'den küçüktür ve birinci dereceden kinetik model bu veriler için uygun değildir.

Modellerin her ikisinde de model parametreleri birbirleriyle bağlantılıdır (gösterilmeyen sonuçlar) ve bu da bir parametre değerindeki hatanın diğer parametredeki hata ile dengelenebileceği, dolayısıyla istatistiksel olarak bir sorun teşkil edebileceği anlamını taşımaktadır [7]. Bu nedenle sıcaklığa bağlı olmayan ya da sıcaklığın "zayıf" bir fonksiyonu olan  $n$  ve  $m$  parametrelerini sabitlemek bu sorunu çözecektir. Her iki parametrenin altı sıcaklıktaki değerinin ortalaması alınarak parametreler sabitlenmiştir:  $n_{ortalama} = 1.26$  ve  $m_{ortalama} = 0.92$ . Bu durumda Denklem 3 aşağıdaki gibi

$$\frac{C(t)}{C_0} = [1 + 0.26 \cdot K \cdot t]^{-\frac{1}{0.26}} \quad (7)$$

Denklem 6 aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{C(t)}{C_0} = \exp(-b \cdot t^{0.92}) \quad (8)$$

Bu indirgenmiş modeller artık iki değil tek parametreye sahiptir ve orijinal hallerine göre daha basit modellere dönüşmüşlerdir. Aynı veri setlerine indirgenmiş modeller uygulanmıştır ve bunlar Şekil 3'te gösterilmektedir. Modeller her sıcaklık için görsel olarak neredeyse aynı uyumu göstermiştir.

Tablo 2'de indirgenmiş modellerin uyum göstergeleri ( $R^2$ ,  $R^2_{\text{ayarlı}}$  ve RMSE) verilmiştir. Orijinal modellerde (Denklem 3 ve Denklem 6) olduğu gibi indirgenmiş modellerde de n-dereceden model ampirik modele göre az da olsa daha iyi sonuç vermiştir. İndirgenmiş ampirik model sadece 75 ve 77.5°C'lerde indirgenmiş n-dereceden modelden daha iyi uyuma sahiptir (Tablo 2). Modellerin indirgenmiş halleri orijinal modellerin uyumuna göre daha düşük olsa da 80°C indirgenmiş modeller veriyile daha uyumludur (Tablo 1 ve Tablo 2). Ayrıca indirgenmiş modeller tek parametreye sahip olduklarından  $R^2 = R^2_{\text{ayarlı}}$  [8].

**Tablo 2.** İndirgenmiş modellerin (Denklem 7 ve Denklem 8) uyum göstergelerinin karşılaştırılması

Sıcaklık (°C)	$R^2$		$R^2_{\text{ayarlı}}$		RMSE	
	Denklem 7	Denklem 8	Denklem 7	Denklem 8	Denklem 7	Denklem 8
67.5	0.9933	0.9919	0.9933	0.9919	0.0247	0.0271
70	0.9962	0.9922	0.9962	0.9922	0.0216	0.0312
72.5	0.9940	0.9897	0.9940	0.9897	0.0256	0.0336
75	0.9886	0.9903	0.9886	0.9903	0.0341	0.0315
77.5	0.9939	0.9946	0.9939	0.9946	0.0264	0.0250
80	0.9980	0.9971	0.9980	0.9971	0.0131	0.0160

İndirgenmiş modellerden elde edilen parametrelerin yani Denklem 7'den elde edilen  $K$  parametresi ile Denklem 8'den elde edilen  $b$  parametresinin sıcaklığa bağlı değişimleri Şekil 4'te gösterilmektedir. Her ne kadar hız sabiti geleneksel olarak Arrhenius denklemi ile tanımlansa da [1], Arrhenius denkleminin kullanılması sürekli eleştiri konusu olmuştur [6, 9]. Dahası Arrhenius denkleminin mevcut verilere (Şekil 4) uygulanması neticesinde daha kötü model uyumu ortaya çıkmıştır (gösterilmeyen sonuçlar). Bu nedenle her iki parametrede mümkün olan en basit modelle tanımlanmış ve iki parametrenin de sıcaklıkla doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 4).

İkincil modeller aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$K = 0.0066 \cdot T - 0.4443 \quad (9)$$

$$b = 0.0069 \cdot T - 0.4619 \quad (10)$$

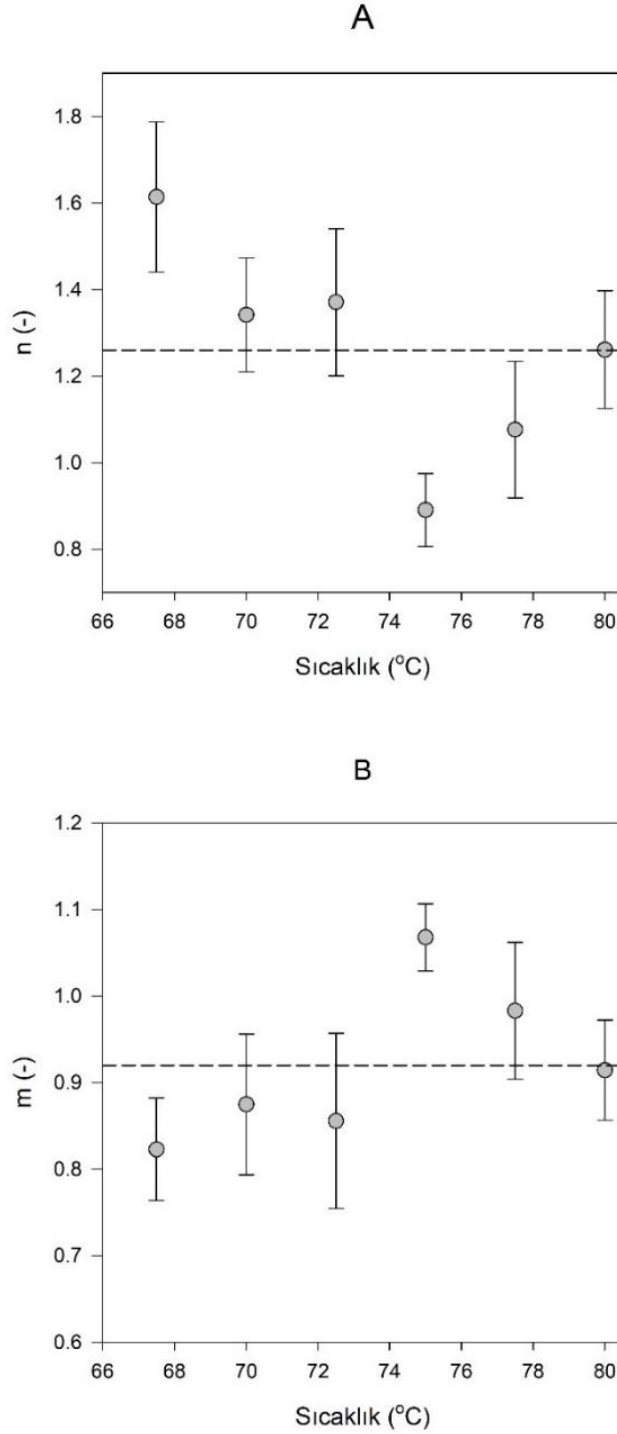
Bu denklemlerde  $T$  sıcaklıktır (°C). İkincil modeller karşılaştırıldığında  $b$  parametresinin  $K$  parametresine göre doğrusal modelle daha uyumlu olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 4). Eğer ikincil modeller indirgenmiş birincil modellerin (Denklem 7 ve Denklem 8) içerisine yerleştirilirse aşağıdaki modeller elde edilir:

$$\frac{C(t)}{C_0} = [1 + 0.26 \cdot (0.0066 \cdot T - 0.4443) \cdot t]^{-\frac{1}{0.26}} \quad (11)$$

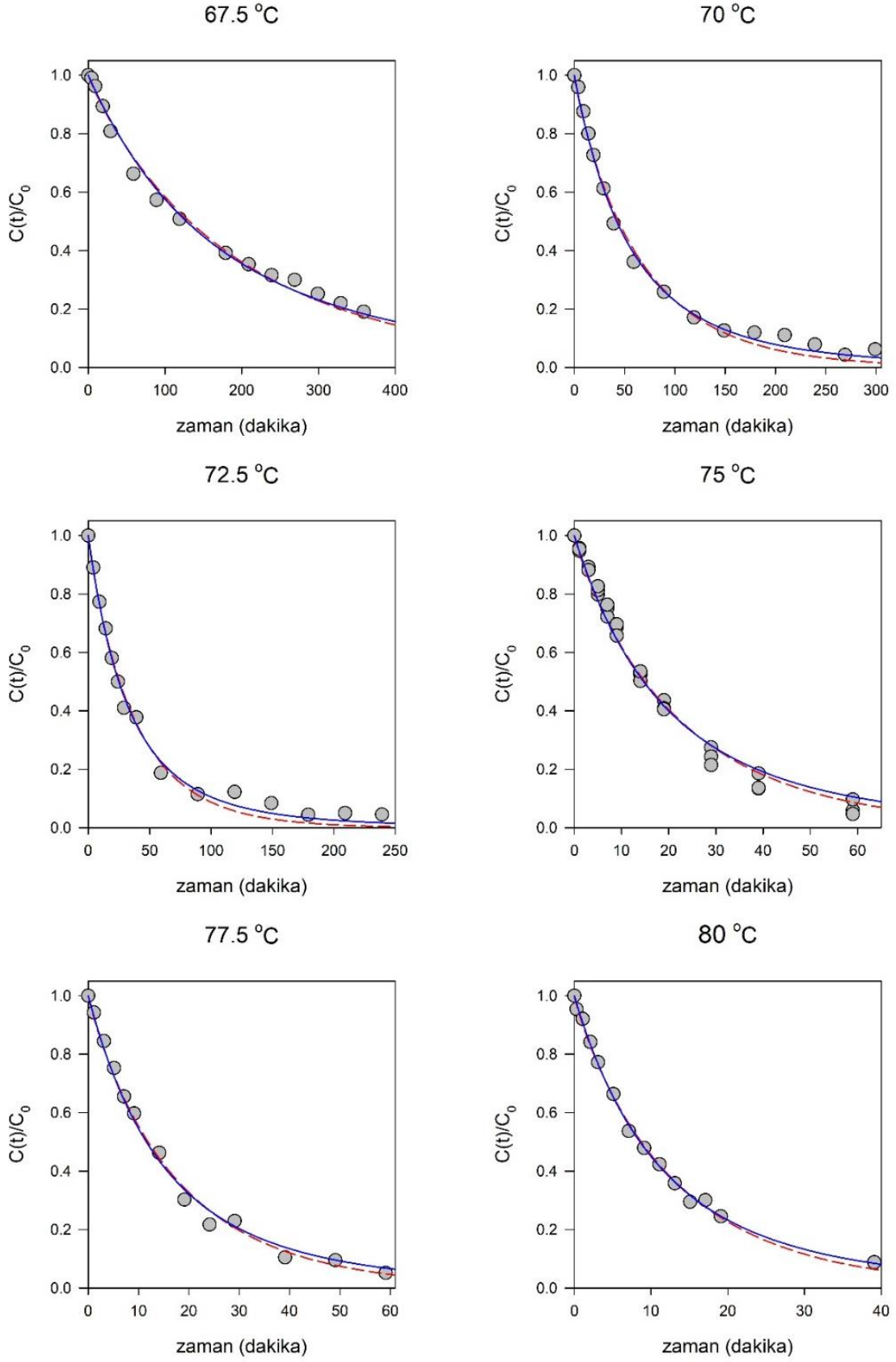
$$\frac{C(t)}{C_0} = \exp[-(0.0069 \cdot T - 0.4619) \cdot t^{0.92}] \quad (12)$$

Denklem 11 ve Denklem 12 kullanılarak modelleri oluşturmak için kullandığımız sıcaklıklardan farklı sıcaklıklarda  $\alpha$ -laktalbumin denatürasyonunu tahmin edebilmek mümkündür. Bu amaçla 67.5-80°C

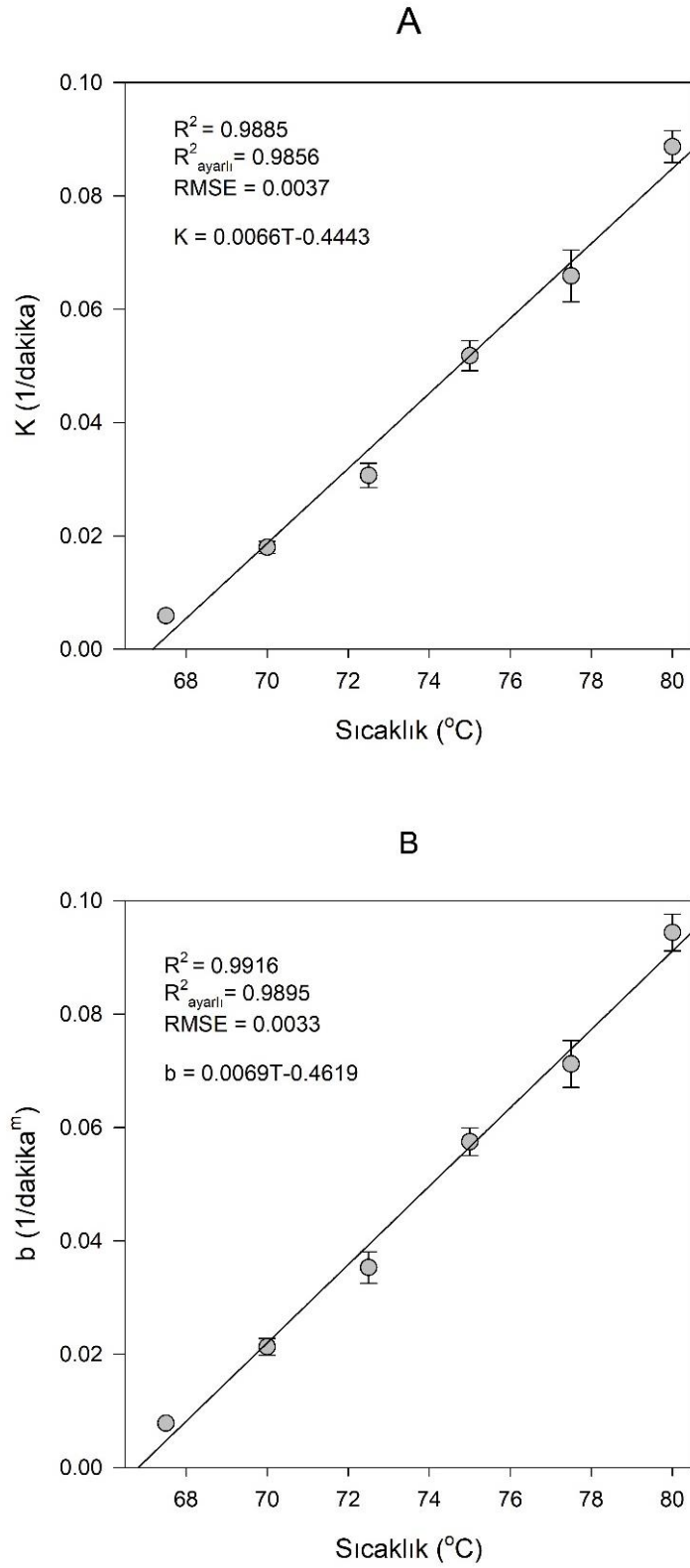
aralığında üç farklı sıcaklık seçilmiştir: 68, 74 ve 76.5°C. Tahmin benzetimleri Şekil 5'te gösterilmektedir. Her ne kadar 68°C'de iki modelin tahmini farklı olsa da 74 ve 76.5°C'lerde iki model hemen hemen aynı tahminleri vermiştir. Maalesef tahmin sonuçlarını değerlendirebilecek veriler elimizde bulunmamaktadır. Orijinal verilerin alındığı Halabi vd. [5] de herhangi bir tahmin çalışması yürütmemişleridir. Yine de bu tür çalışmalarda sabit sıcaklıklarda model tahminlerinin nasıl yapıldığını göstermesi bakımından sonuçlarımız önemlidir.



**Şekil 2.** Denklem 3'te yer alan  $n$  parametresinin sıcaklıkla değişimi (A) ile Denklem 6'da yer alan  $m$  parametresinin sıcaklıkla değişimi (B). Her bir grafikteki kesikli çizgiler değerlerin ortalamasıdır:  $n_{ortalama} = 1.26$  ve  $m_{ortalama} = 0.92$ . Hata çubukları %95 güven aralıklarını göstermektedir.

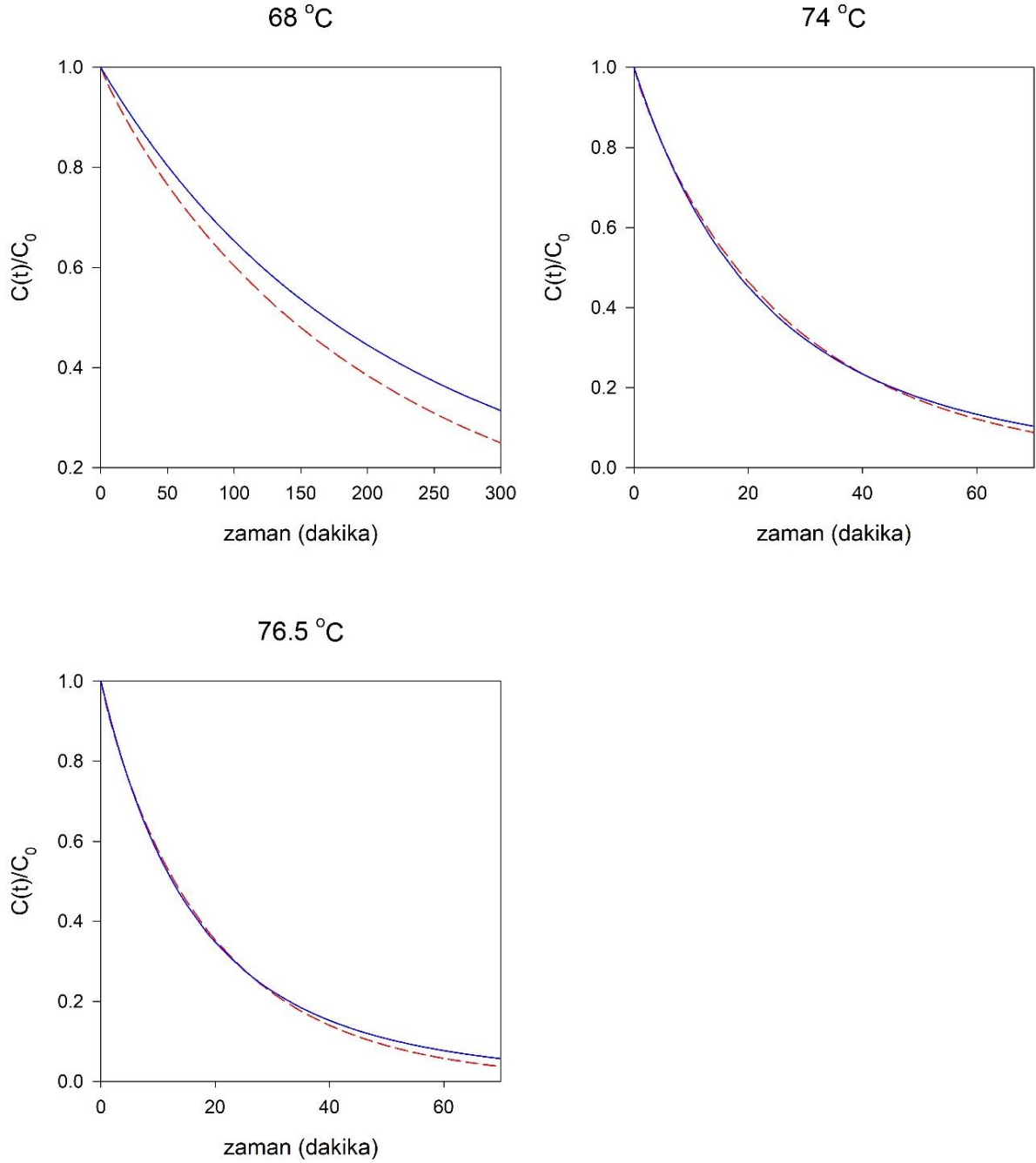


**Şekil 3.** İndirgenmiş modellerin yani Denklem 7 (sürekli mavi eğriler) ve Denklem 8'in (kesikli kırmızı eğriler) altı farklı sıcaklıkta  $\alpha$ -laktalbumin denatürasyon verilerine (gri daireler) uygulanması. Orijinal veriler Halabi vd.'den [5] alınmıştır.



**Şekil 4.** Denklem 7’de yer alan  $K$  parametresinin sıcaklıkla değişimi (A) ile Denklem 8’de yer alan  $b$  parametresinin sıcaklıkla değişimi (B). Hata çubukları %95 güven aralıklarını göstermektedir.





**Şekil 5.** Denklem 11 (sürekli mavi eğriler) ve Denklem 12'nin (kesikli kırmızı eğriler) üç farklı sıcaklıkta tahmin eğrileri

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada iki farklı modelin altı farklı sıcaklıktaki  $\alpha$ -laktalbumin denatürasyonunu tanımlaması ve tahmini gösterilmiştir. Bu çalışmadan çıkarılabilecek sonuçlar şunlardır:

- (i) Denklem 3 Denklem 6'ya göre verilere az farkla da olsa daha iyi uyum sağlamıştır (Şekil 1 ve Tablo 1). Her iki modeli de  $\alpha$ -laktalbumin denatürasyonunu tanımlamak için kullanmak mümkündür. (Birincil modelleme)
- (ii) Denklem 3'teki  $n$  parametresi ile Denklem 6'daki  $m$  parametresi sıcaklığa bağlı değildir ve sabitlenebilir (Şekil 2). Bu parametreler sabitlenerek modeller indirgenebilir yani parametre

sayıları ikiden bire düşürülebilir. Böylece Denklem 7 ve Denklem 8 elde edilir. (Yeniden birincil modelleme)

- (iii) İndirgenmiş modeller (Denklem 7 ve Denklem 8) en az orijinal modeller kadar kullanışlıdır (Şekil 3 ve Tablo 2). Burada da az farkla olsa da Denklem 7 Denklem 8'e göre daha iyi sonuç vermiştir (Tablo 2).
- (iv) Denklem 7'deki  $K$  parametresi ile Denklem 8'deki  $b$  parametresi sıcaklıkla doğrusal değişmektedir (Şekil 4). (İkincil modelleme)
- (v) İkincil modeller (Denklem 9 ve Denklem 10) birincil modellerin (Denklem 7 ve Denklem 8) içine yerleştirilip elde edilen modeller (Denklem 11 ve Denklem 12) tahmin çalışması için kullanılabilir.
- (vi) Denklem 11 ve Denklem 12, 68°C hariç çok yakın tahmin sonuçları vermiştir.

Nihai olarak bu çalışmanın kinetik modellemeyi araştırmalarında kullanacak birçok kişi için yol gösterici olabileceği söylenebilir.

## REFERANSLAR

- [1] M.A.J.S. van Boekel, Kinetics of heat-induced changes in dairy products: Developments in data analysis and modelling techniques, *International Dairy Journal* 126, 105187, 2022.
- [2] M.A.J.S. van Boekel, Kinetics of heat-induced changes in foods: A workflow proposal. *Journal of Food Engineering* 306, 110634, 2021.
- [3] S.M. Loveday,  $\beta$ -Lactoglobulin heat denaturation: A critical assessment of kinetic modelling, *International Dairy Journal* 52, 92-100, 2016.
- [4] F.J. Jaskulka, D.E. Smith, K. Larntz, Determining the kinetic reaction rate order for the thermal denaturation of  $\beta$ -lactoglobulin using two statistical approaches. *International Dairy Journal* 10, 589-595, 2000.
- [5] A. Halabi, A. Deglaire, P. Hamon, S. Bouhallab, D. Dupont, T. Croguennec, Kinetics of heat-induced denaturation of proteins in model infant milk formulas as a function of whey protein composition. *Food Chemistry* 302, 125296, 2020.
- [6] M., Peleg, M.D. Normand, M.G. Corradini, A New Look at Kinetics in Relation to Food Storage. *The Annual Review of Food Science and Technology* 28, 135-153, 2017.
- [7] S. Buzrul, A predictive model for high-pressure carbon dioxide inactivation of microorganisms. *Journal of Food Safety* 29, 208-223, 2009.
- [8] C. Leylak, M. Yurdakul, S. Buzrul, Gıda bilimlerinde Excel kullanımı 1: Doğrusal regresyon. *Food and Health* 6, 186-198, 2020.
- [9] M., Peleg, M.D. Normand, M.G. Corradini, The Arrhenius equation revisited. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 52, 830-851, 2012.