



## Investigation of the Kinetics of Ultrasound Pre-treatment Drying of Seeded and Seedless Pomegranate Arils Using Thin Layer Models Containing at Most Two Parameters

Salih Eroğlu<sup>1,a,\*</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

\*Corresponding author

### ARTICLE INFO

Research Article

Received : 05.04.2024

Accepted : 27.04.2024

Keywords:

Drying

Modelling

Pomegranate

Pre-treatment

Ultrasound

### ABSTRACT

In this study, seeded and seedless pomegranate arils (*Punica granatum* L.) were dried at 70 °C at an air velocity of 1,3 m/s after ultrasonic pre-treatment (US) for different durations in thin layers. To investigate the drying kinetics of pomegranate arils, two-parameter models were mostly used instead of multi-parameter models, which are widely used in the literature but are complex and require data transformation. These models are the Lewis (Newton), Page, Modified Page I, Weibull, Weibull I, and Modified Two Term III models. RMSE (Root mean square error) and coefficient of determination ( $R^2$ ) values were used to select the model that best explained the drying processes. According to the results, the Page model best explained the drying of seeded pomegranate arils under all process conditions. In seedless pomegranate arils, the Page model was found to be the best model to explain the drying of pomegranate arils without pre-treatment and with the 10-min of US pre-treatment, and the Weibull model was found to be the best model to explain the drying of pomegranate arils with the 20 and 30 min of US pre-treatment. However, US pre-treatments of different durations applied before drying significantly reduced the drying time of seeded and seedless pomegranate arils.

Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 12(7): 1129-1136, 2024

## Çekirdekli ve Çekirdeksiz Nar Tanelerinin Ultrason Ön İşlemleri Kurutma Kinetiğinin En Çok İki Parametre İçeren İnce Tabaka Modelleri Kullanılarak İncelenmesi

### MAKALE BİLGİSİ

Araştırma Makalesi

Geliş : 05.04.2024

Kabul : 27.04.2024

Anahtar Kelimeler:

Kurutma

Modelleme

Nar

Ön işlem

Ultrason

### ÖZ

Bu çalışmada çekirdekli ve çekirdeksiz nar taneleri (*Punica granatum* L.) ince tabaka halinde farklı sürelerde ultrason ön işlemi (US) uygulandıktan sonra 70 °C'de 1,3 m/s hava hızında kurutulmuştur. Nar tanelerinin kuruma kinetiğinin incelenmesi amacıyla literatürde çok kullanılan ancak karmaşık ve verilerin dönüştürülmesini gerektiren çok parametrelili modeller yerine en çok iki parametrelili modeller kullanılmıştır. Bu modeller Lewis (Newton), Page, Modifiye Page I, Weibull, Weibull I ve Modifiye Çift Terimli III modelleridir. Kurutma işlemlerini en iyi açıklayan modelin seçilmesi amacıyla hata kareleri ortalamasının kare kökü (RMSE) ve belirleme katsayısı ( $R^2$ ) değerleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre çekirdekli nar tanelerinin kurutulmasını tüm işlem koşullarında en iyi Page modelinin açıkladığı belirlenmiştir. Çekirdeksiz nar tanelerinde ön işlemsiz ve 10 dakika US ön işlemleri nar tanelerinin kurutulmasını en iyi açıklayan modelin Page modeli, 20 ve 30 dakika US ön işlemleri nar tanelerinin kurutulmasını en iyi açıklayan modelin ise Weibull modeli olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, kurutma öncesinde uygulanan farklı sürelerdeki US ön işlemlerinin çekirdekli ve çekirdeksiz nar tanelerinin kuruma sürelerini önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir.

<sup>a</sup> [saliheroglu@sdu.edu.tr](mailto:saliheroglu@sdu.edu.tr)

<https://orcid.org/0000-0002-1489-9761>



## Giriş

Nar, (*Punica granatum* L.), Asya, Kuzey Afrika, Akdeniz ve Orta Doğu'nun bazı bölgelerinde yaygın olarak yetiştirilen önemli bir ticari meyvedir (Saxena ve ark., 1987). Meyvenin yenilebilir kısmı olan taneleri, toplam meyve ağırlığının yaklaşık %55-60'ını oluşturur. Taneler, önemli düzeyde, asitler, şekerler, vitaminler, polisakkaritler, polifenoller, ellagik asit, gallik asit, punikalagin, antosiyaninler ve tanenler gibi güçlü antioksidanlar ihtiva etmesi sebebiyle sağlık açısından oldukça faydalı bir besin kaynağıdır. Bu fitokimyasallar, hücreye zarar veren serbest radikalleri yok ederek insan sağlığını koruma ve desteklemede önemli rol oynar (Allahdad ve ark., 2019). Hasat mevsiminin kısa olması taze meyvenin değerlendirilmesindeki sorunlar arasında yer alır.

Kurutma, gıdaların muhafazasında kullanılan en eski ve hala popüler bir yöntemdir. Kurutma işleminde gıda materyali içindeki su, ürünün mikrobiyal stabilitesini sağlayan ve depolama sırasında malzemenin kimyasal ve fiziksel değişikliklerini en aza indiren nihai bir konsantrasyona düşürülür. Ancak kurutma işleminde kurutulmuş ürünün kalitesinde istenmeyen değişiklikler meydana gelebilir. Konveksiyonel kurutmada şeker içeren meyve materyallerinden suyun uzaklaştırılması için gereken yüksek sıcaklıklar ve uzun kuruma süreleri, kurutulmuş ürünün aromasında, renginde, besin maddelerinde ciddi hasara sebebiyet verebilmektedir (Horuz ve Maskan, 2015). Bu sebeple ısı olmayan kurutma işlemlerine olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır.

Ultrasonik ses, 20 kHz'den 100 MHz'e kadar frekanstaki hava titreşimleri olarak değerlendirilebilir ve ayrıca hava dışındaki katı, sıvı ve gazlarda yayılan mekanik dalgalardan da kaynaklanır (Nowacka ve ark., 2012). Su içeren malzemelerde insanın duymayacağı bir frekansta (18-500 kHz) titreşen akustik dalgalar, malzemenin sıkışmasına ve genişlemesine neden olur ve bu durum (sünger etkisi) gıda materyali içinde kavitasyon meydana getirir. Kavitasyon sırasında ultrasonik dalgalar küçük vakum baloncuklar meydana getirir ve bu baloncuklar daha fazla enerji absorbe ettikçe büyüyerek yüksek basınçlı dalga oluşturarak patlar. Patlayan kabarcıklar, hücre dokusuna zarar vererek hücre içerisinde mikroskobik kanalcıkların oluşmasına sebep olur. Bu durum ürün içindeki nemin dışarıya daha hızlı transferini sağlayarak kuruma süresinin kısalmasına katkıda bulunur (Kerboua ve Hamdaoui, 2018; Morton ve ark., 2023).

Bu çalışmada ultrasonik su banyosunda farklı sürelerde ultrason ön işlemine maruz bırakılmış çekirdekli ve çekirdeksiz nar tanelerinin zorlamalı konvektif bir kurutucuda kuruma süreleri hesaplanmış ve kuruma davranışlarına en uygun modeller belirlenmiştir.

## Materyal ve Yöntem

### Materyal

Kurutma için kullanılan çekirdekli ve çekirdeksiz nar taneleri (*Punica granatum* L.) Isparta'da yerel bir firmadan temin edilmiştir. Nar tanelerinin meyveden ayrılması işleminden sonra kurutma işlemi uygulanmıştır. Çekirdekli ve çekirdeksiz nar tanelerinin yaş bazda başlangıç nem içerikleri sırasıyla %77,54±1,26 ve %80,05±1,72 olarak tespit edilmiştir.

### Ultrason Ön İşlemi

Taneleri ayrılan nar meyvesi ultrasonik su banyosunda (WiseClean WUC-A06H, Güney Kore) 10, 20 ve 30 dakika boyunca 40 kHz frekansta US ön işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 1). Ultrason ön işlemi için hammadde/su oranı 1/4 olarak uygulanmıştır.

### Hava Kurutma

Kontrol ve US ile ön işleme tabi tutulmuş çekirdekli ve çekirdeksiz nar taneleri 30 x 30 cm kurutma tepsiğine yerleştirilmiş ve laboratuvar tipi kurutucuda (Mikrotest, MKD 250, Türkiye) 70°C'de 1,3 m/s sabit hava hızında yaş bazda yaklaşık %5 nem içeriğine kadar kurutulmuştur.

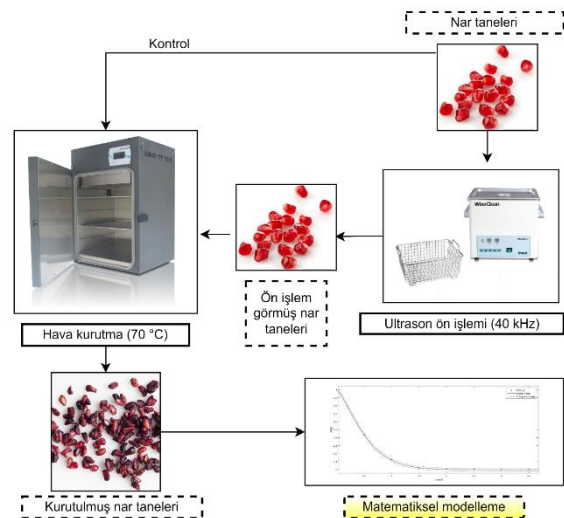
### Matematiksel Modelleme

Çekirdekli ve çekirdeksiz nar tanelerinin kuruma davranışını açıklamak amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan en çok iki parametre içeren ince tabaka modelleri kullanılmıştır (Çizelge 1). Buzrul, (2022) ince tabaka kurutma modellerinin keyfi kullanımından kaçınılması gerektiğini ve çok parametrelili ve karmaşık modellerin çoğu zaman önemsiz parametreler içerebildiğini belirtmiştir. Bu nedenle bu çalışmada çok parametrelili modeller tercih edilmemiştir.

Öncelikle nar tanelerinin zamana bağlı ayrılabilir nem oranı (ANO) değerleri Eşitlik 1'e göre hesaplanmıştır.

$$ANO = \frac{M_1 - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

Burada, ANO, boyutsuz ayrılabilir nem oranını  $M_1$ , kurutma prosesinin herhangi bir t zamanındaki nem değerini (g su/g kuru madde),  $M_0$ , kurutma başlangıcındaki ( $t=0$ ) nem değerini (g su/g kuru madde)  $M_e$ , denge nem içeriği değerini (g su/g kuru madde) ifade etmektedir.  $M_0$  ve  $M_1$  değerlerine göre denge nem içeriğinin ( $M_e$ ) oldukça düşük olmasından ve kurutma süresinin uzun olmasından dolayı  $M_e$  değeri 0 olarak kabul edilmiştir (Darvishi ve ark., 2014; Karacabey ve ark., 2016).



Şekil 1. Nar tanelerinin US ön işlemlili kurutulmasının şematik gösterimi

Figure 1. Schematic representation of US pretreated drying of pomegranate arils

Çizelge 1 Deneysel kurutma verilerini tanımlayan ince tabaka kurutma modelleri

Table 1 Thin layer drying models describing experimental drying data

Model	Denklem	Kaynak
Newton (Lewis)	ANO = exp (-b.t)	(Lewis, 1921)
Page	ANO = exp (-b.t <sup>n</sup> )	(Page, 1949)
Modifiye Page I	ANO = exp [(-b.t) <sup>n</sup> ]	(Overhults ve ark., 1973)
Weibull	ANO = exp [-(t/b) <sup>n</sup> ]	(Corzo ve ark., 2008)
Weibull I	ANO = 10 <sup>-n</sup> [-(t/b) <sup>n</sup> ]	(Karacabey & Buzrul, 2017)
Modifiye çift terimli III	ANO = a.exp (-b.t)+(1-a).exp (-b.a.t)	(Hutchinson & Otten, 1983)

ANO: Ayrılabilir nem oranı, t: Zaman (saat), a, b, n: Model parametreleri

Çizelge 2 Çekirdeksiz nar tanelerinin kurutulmasının ince tabaka modelleme sonuçları

Table 2 Thin layer modelling results of drying of seedless pomegranate arils

Model	Kurutma işlemi	Model parametreleri (%95 güven aralığı)	R <sup>2</sup>	RMSE
Newton (Lewis)	Çz-K	b=1,07(0,94,1,20)	0,9885	0,36960
	Çz-10US	b=1,13(1,01,1,25)	0,9923	0,03081
	Çz-20US	b=1,43(1,20,1,65)	0,9866	0,40670
	Çz-30US	b=1,88(1,64,2,12)	0,9940	0,02550
Page	Çz-K	b=0,96(0,94,0,99) n=1,47(1,41,1,52)	0,9997	0,06094
	Çz-10US	b=1,11(1,09,1,13) n=1,26(1,22,1,30)	0,9999	0,00434
	Çz-20US	b=1,51(1,47,1,56) n=1,46(1,40,1,52)	0,9998	0,00544
	Çz-30US	b=2,12(1,99,2,26) n=1,36(1,25,1,48)	0,9996	0,00774
Modifiye Page I	Çz-K	b=1,02(0,97,1,06) n=1,32(1,23,1,40)	0,9992	0,10370
	Çz-10US	b=1,09(1,07,1,13) n=1,26(1,19,1,32)	0,9926	0,00757
	Çz-20US	b=1,52(1,47,1,56) n=1,46(1,41,1,52)	0,9998	0,00502
	Çz-30US	b=2,12(2,00,2,25) n=1,37(1,26,1,47)	0,9997	0,00697
Weibull	Çz-K	a=0,99(0,96,1,02) n=1,32(1,23,1,40)	0,9992	0,10370
	Çz-10US	a=0,93(0,91,0,95) n=1,26(1,20,1,32)	0,9926	0,00757
	Çz-20US	a=0,75(0,74,0,77) n=1,46(1,41,1,52)	0,9998	0,00502
	Çz-30US	a=0,58(0,56,0,59) n=1,37(1,26,1,47)	0,9997	0,00697
Weibull I	Çz-K	b=0,14(-1,28e+05,1,28e+05) n=0,06(-5,98e+04,5,97e+04)	0,9885	0,03920
	Çz-10US	b=0,05(-1,28e+04,1,28e+04) n=0,02(-6302,6302)	0,9923	0,03294
	Çz-20US	b=0,027(-8045,8045) n=0,017(-4984,4984)	0,9866	0,04348
	Çz-30US	b=0,10(-1,10e+05,1,10e+05) n=0,08(-8,94e+04,8,94e+04)	0,9940	0,02975
Modifiye Çift Terimli III	Çz-K	a=1,868(1,70,2,04) b=1,525(1,37,1,68)	0,9983	0,01606
	Çz-10US	a=1,82(1,72,1,92) b=1,57(1,48,1,67)	0,9994	0,00903
	Çz-20US	a=2,09(1,98,2,20) b=2,24(2,11,2,36)	0,9996	0,00771
	Çz-30US	a=2,04(1,83,2,25) b=2,82(2,56,3,08)	0,9996	0,00799

Çz-K: Çekirdeksiz nar taneleri için kontrol grubu, Çz-10US: Çekirdeksiz nar taneleri için 10 dakika ultrason ön işlem uygulanmış, Çz-20US: Çekirdeksiz nar taneleri için 20 dakika ultrason ön işlem uygulanmış, Çz-30US: Çekirdeksiz nar taneleri için 30 dakika ultrason ön işlem uygulanmış

### İstatistiksel Analiz

Deneysel veriler ile kullanılan ince tabaka modelinin tahmin ettiği veriler arasındaki uyumun belirlenmesi amacıyla MATLAB R2015a programı kullanılarak RMSE ve R<sup>2</sup> değerleri incelenmiştir. Bu değerlerin hesaplanması Eşitlik 2 ve Eşitlik 3 olarak verilmiştir. Kuruma süreleri üzerine işlemlerin etkisinin belirlenmesi amacıyla varyans analizi (ANOVA) ve Tukey çoklu karşılaştırma testi Minitab 17.0 paket programı kullanılarak yapılmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ANO_{tahmin,i} - ANO_{deneysel,i})^2} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (ANO_i - ANO_{tahmin,i}) \times \sum_{i=1}^N (ANO_i - ANO_{deneysel,i})}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^N (ANO_i - ANO_{tahmin,i})^2 \right] \times \left[ \sum_{i=1}^N (ANO_i - ANO_{deneysel,i})^2 \right]}} \quad (3)$$

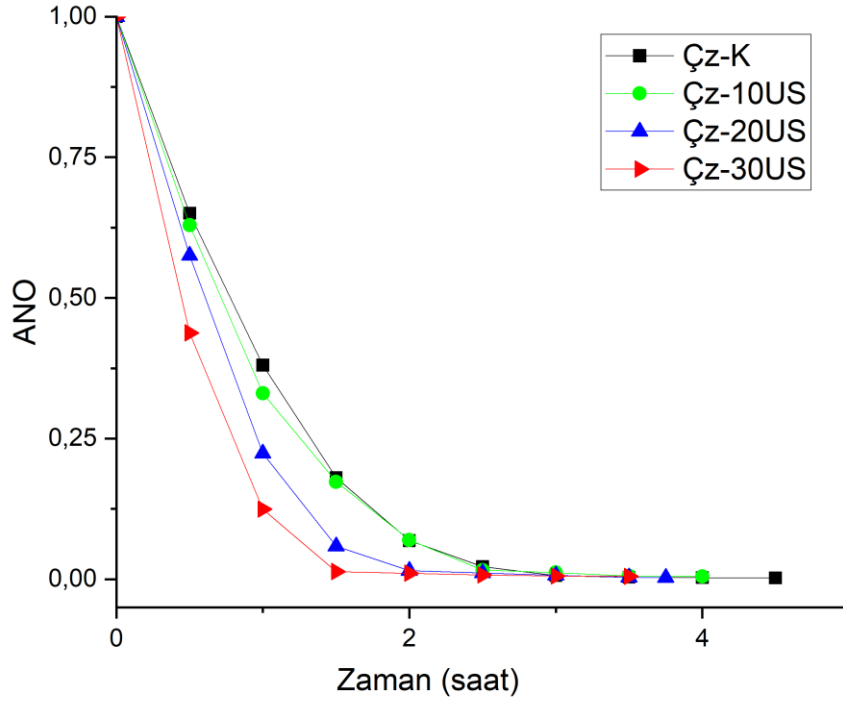
Burada,  $ANO_{tahmin,i}$ , tahmini ayrılabilir nem oranını,  $ANO_{deneysel,i}$ , deneysel ayrılabilir nem oranını,  $ANO_i$ , herhangi bir zamandaki ayrılabilir nem oranını,  $N$ , toplam ağırlık ölçüm sayısını ifade etmektedir.

### Bulgular ve Tartışma

#### Matematiksel Modelleme

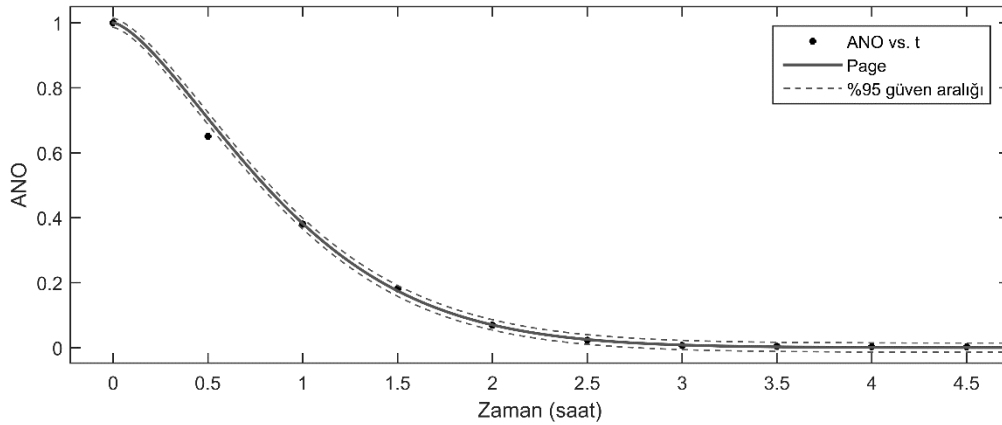
Araştırma kapsamındaki koşullar altında, çekirdekli ve çekirdeksiz nar tanelerinin kuruma davranışını açıklayacak en uygun modeli belirlemek için literatürde sıklıkla kullanılan ince tabaka kurutma modelleri Çizelge 1'de verilmiştir. Bu amaçla öncelikle çekirdeksiz nar tanelerinin kontrol (Çz-K), 10 dakika ultrason ön işlem uygulanmış (Çz-10US), 20 dakika ultrason ön işlem uygulanmış (Çz-20US) ve 30 dakika ultrason ön işlem uygulanmış (Çz-30US) nar taneleri için ANO (ayrılabilir nem oranı) değerleri hesaplanmış ve zamana karşı grafiğe aktararak belirtilen matematiksel modeller ile uyumu istatistiksel olarak belirlenmiştir (Şekil 2).

Çekirdeksiz nar taneleri için ince tabaka kurutma modelleme sonuçları, %95 güven aralığında model parametrelerinin değerleri ile RMSE ve R<sup>2</sup> değerlerini içerecek şekilde Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Çekirdeksiz nar tanelerinin kurutma işlemlerinde zamana bağlı olarak ANO değerleri değişimi  
 Figure 2. Changes in moisture ratio (ANO) values of seedless pomegranate arils during the drying processes as a function of time

Çz-K: Çekirdeksiz nar taneleri için kontrol grubu, Çz-10US: Çekirdeksiz nar taneleri için 10 dakika ultrason ön işlem uygulanmış, Çz-20US: Çekirdeksiz nar taneleri için 20 dakika ultrason ön işlem uygulanmış, Çz-30US: Çekirdeksiz nar taneleri için 30 dakika ultrason ön işlem uygulanmış



Şekil 3. Çekirdeksiz nar tanelerinin kontrol grubu için deneysel ANO ve Page modelinin tahmin ettiği ANO değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi

Figure 3. Variation of experimental moisture ratio (ANO) and Page model predicted ANO values for the control group of seedless pomegranate arils depending on time

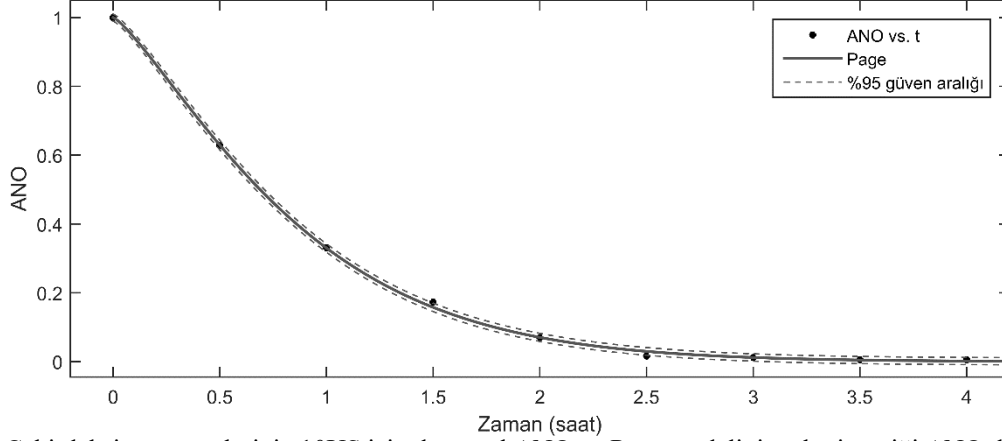
Çekirdeksiz nar tanelerinde ön işlemsiz ve 10 dakika US ön işlemi uygulanmış nar tanelerinin kuruma davranışını açıklayan en uygun modelin en düşük RMSE ve en yüksek  $R^2$  değerleri ile Page modeli olduğu belirlenmiştir. Buna karşın 20 ve 30 dakika US ön işlemi uygulanmış nar tanelerinde ise en uygun model en düşük düşük RMSE ve en yüksek  $R^2$  değerleri ile Weibull modeli olduğu belirlenmiştir. Her işlem için en uygun model ile deneysel verileri içeren grafikler Şekil 3-6'te verilmiştir. Benzer şekilde yapılan bir çalışmada 50, 55 ve 60°C'de kabin kurutucuda kurutulan nar taneleri için en uygun

modelin Page olduğu tespit edilmiştir (Kingsly ve Sign, 2006). Benzer bulgular literatürde nar tanelerinin kurutulması çalışmalarında mevcuttur (Adetoro ve ark., 2020; Mineai ve ark., 2012).

Aynı şekilde kontrol (Ç-K), 10 dakika ultrason ön işlem uygulanmış (Ç-10US), 20 dakika ultrason ön işlem uygulanmış (Ç-20US) ve 30 dakika ultrason ön işlem uygulanmış (Ç-30US) çekirdekli nar taneleri için ANO (ayrılabilir nem oranı) değerleri hesaplanmış ve zamana karşı grafiğe aktarılmıştır (Şekil 7).

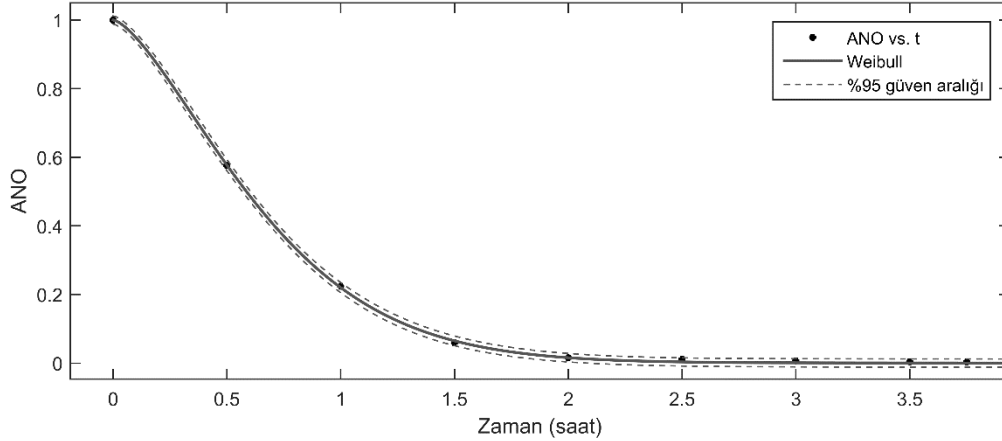
Çekirdekli nar taneleri için ince tabaka kurutma modelleme sonuçları, %95 güven aralığında model parametrelerinin değerleri ile RMSE ve  $R^2$  değerlerini içerecek şekilde Çizelge 3'te verilmiştir. Buna göre, çekirdekli nar tanelerinde en uygun kurutma modelinin tüm kurutma koşullarında en düşük RMSE değeri ile Page model olduğu tespit edilmiştir. Her işlem için en uygun

modelin Page olmasından dolayı sadece tek bir grafik seçilerek kontrol grubu için deneysel ANO değerleri ile Page modelinin tahmin değerlerini içeren grafik Şekil 8'de verilmiştir. Benzer şekilde Horuz ve Maskan, (2015) yaptıkları çalışmada nar tanelerinin sıcak hava ve mikrodalga yöntemleriyle kurutma davranışının Page modeli ile iyi açıklandığını belirtmişlerdir.



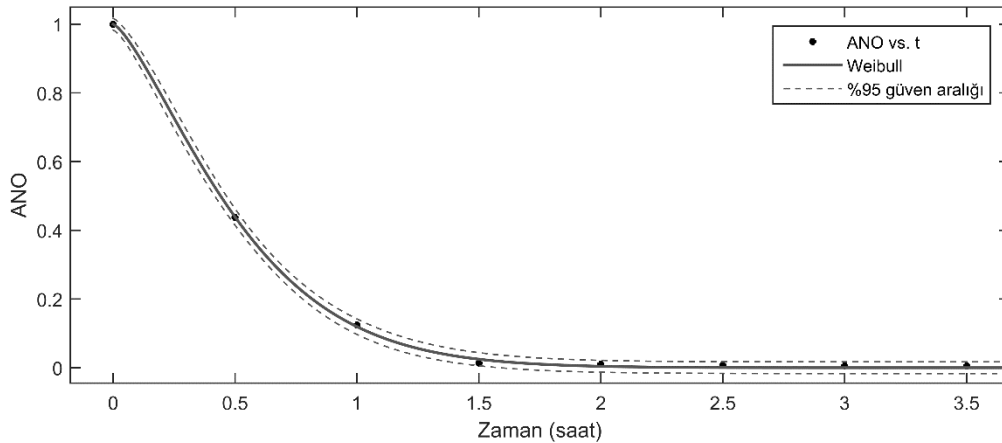
Şekil 4. Çekirdeksiz nar tanelerinin 10US için deneysel ANO ve Page modelinin tahmin ettiği ANO değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi

Figure 4. Variation of experimental moisture ratio (ANO) and Page model predicted ANO values for the 10US of seedless pomegranate arils depending on time



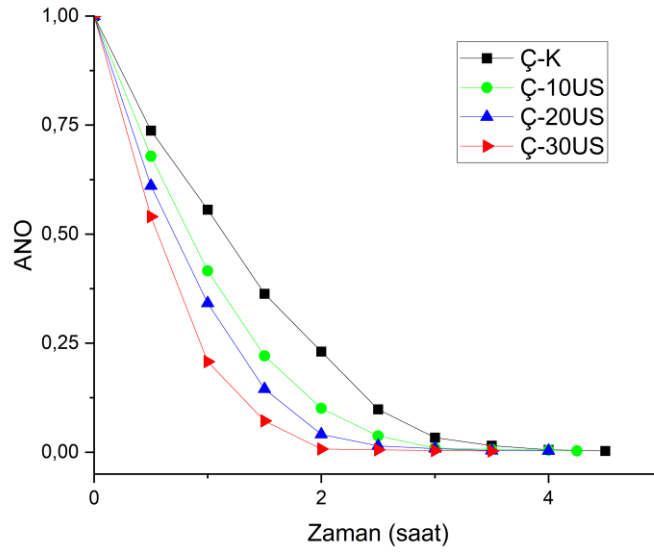
Şekil 5. Çekirdeksiz nar tanelerinin 20US için deneysel ANO ve Weibull modelinin tahmin ettiği ANO değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi

Figure 5. Variation of experimental moisture ratio (ANO) and Weibull model predicted ANO values for the 20US of seedless pomegranate arils depending on time



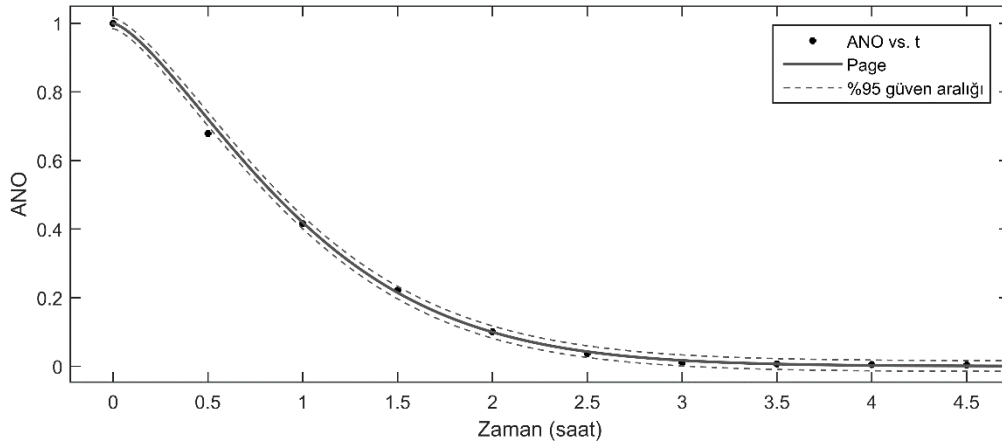
Şekil 6. Çekirdeksiz nar tanelerinin 30US için deneysel ANO ve Weibull modelinin tahmin ettiği ANO değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi

Figure 6. Variation of experimental moisture ratio (ANO) and Weibull model predicted ANO values for the 30US of seedless pomegranate arils depending on time



Şekil 7. Çekirdekli nar tanelerinin kurutma işlemlerinde zamana bağlı olarak ANO değerleri değişimi

Figure 7. Changes in moisture ratio (ANO) values of pomegranate arils during the drying processes as a function of time  
 Ç-K: Çekirdekli nar taneleri için kontrol grubu, Ç-10US: Çekirdekli nar taneleri için 10 dakika ultrason ön işlem uygulanmış, Ç-20US: Çekirdekli nar taneleri için 20 dakika ultrason ön işlem uygulanmış, Ç-30US: Çekirdekli nar taneleri için 30 dakika ultrason ön işlem uygulanmış



Şekil 8. Çekirdekli nar tanelerinin kontrol grubu için deneysel ANO ve Page modelinin tahmin ettiği ANO değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi

Figure 8. Variation of experimental moisture ratio (ANO) and Page model predicted ANO values for the control group of seeded pomegranate arils as a function of time

### Kuruma Süresi

Çekirdekli ve çekirdeksiz nar tanelerinin kuruma süreleri (dakika) Çizelge 4'te verilmiştir. Kuruma süreleri üzerine US ön işleminin etkili olduğu belirlenmiştir ( $p < 0,05$ ). Çekirdekli ve çekirdeksiz nar tanelerine uygulanan US süresi arttıkça kuruma süresi azalmıştır ( $p < 0,05$ ). Bu durum US işleminin ürünün dokularında meydana getirdiği kavitasyon etkisi ile kurutma sırasındaki nem transferinin daha kolay ve hızlı gerçekleşmesinden meydana geldiği yapılan çalışmalarda belirtilmiştir (Guo vd., 2020). US işlem süresinin artması bu etkiyi daha da arttırmıştır. Benzer sonuçlar yapılan çalışmalarda kahverengi deniz yosunu, elma, havuç ve dut materyalleri için de elde edilmiştir (Kadam ve ark., 2015; Nowacka ve ark., 2012; Tao ve ark., 2016; Wang ve ark., 2018).

### Sonuç ve Öneriler

Çekirdekli ve çekirdeksiz nar tanelerinin US ön işlemleri sıcak havalı kurutucuda kurutulmasındaki kuruma davranışı incelenmiştir. Çekirdekli nar tanelerinin 70°C'de 1,3 m/s hava hızında kurutulmasını tüm işlem koşullarında en iyi Page modelinin açıkladığı belirlenmiştir. Çekirdeksiz nar tanelerinde de benzer şekilde ön işlemsiz ve 10 dakika US ön işlemleri nar tanelerinin kurutulmasını en iyi açıklayan modelin Page modeli olduğu tespit edilmiştir. Çekirdeksiz nar tanelerinin 20 ve 30 dakika US ön işlemleri kurutulmasını en iyi açıklayan modelin ise Weibull modeli olduğu belirlenmiştir. US ön işleminin çekirdekli ve çekirdeksiz nar tanelerinin kuruma sürelerini ultrason ön işlem süresi arttıkça önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir.

Çizelge 3 Çekirdekli nar tanelerinin kurutulmasının ince tabaka modelleme sonuçları

Table 3 Thin layer modelling results of drying of pomegranate arils

Model	Kurutma işlemi	Model parametreleri (%95 güven aralığı)	R <sup>2</sup>	RMSE
Newton (Lewis)	Ç-K	b=0,98(0,86,1,10)	0,9880	0,03788
	Ç-10US	b=0,98(0,86,1,10)	0,9880	0,03799
	Ç-20US	b=1,17(1,03,1,32)	0,9900	0,03520
	Ç-30US	b=1,49(1,28,1,70)	0,9912	0,03404
Page	Ç-K	b=0,87(0,85,0,89) n=1,41(1,35,1,46)	0,9997	0,00679
	Ç-10US	b=1,11(1,09,1,13) n=1,26(1,22,1,30)	0,9999	0,00440
	Ç-20US	b=1,07(1,03,1,11) n=1,50(1,42,1,58)	0,9995	0,00858
	Ç-30US	b=1,56(1,52,1,60) n=1,34(1,29,1,39)	0,9999	0,00470
Modifiye Page I	Ç-K	b=0,91(0,88,0,94) n=1,31(1,24,1,38)	0,9993	0,00969
	Ç-10US	b=1,10(1,07,1,13) n=1,26(1,19,1,32)	0,9996	0,00756
	Ç-20US	b=1,15(1,08,1,21) n=1,30(1,18,1,40)	0,9987	0,01348
	Ç-30US	b=1,57(1,53,1,62) n=1,35(1,29,1,41)	0,9998	0,00523
Weibull	Ç-K	a=1,08(1,05,1,11) n=1,31(1,24,1,38)	0,9993	0,00969
	Ç-10US	a=0,93(0,90,0,95) n=1,26(1,19,1,32)	0,9996	0,00757
	Ç-20US	a=0,90(0,86,0,94) n=1,29(1,18,1,40)	0,9987	0,01348
	Ç-30US	a=0,72(0,70,0,73) n=1,35(1,29,1,41)	0,9998	0,00523
Weibull I	Ç-K	b=0,09(-5,68e+04,5,68e+04) n=0,04(-2,42e+04,2,42e+04)	0,9880	0,04018
	Ç-10US	b=0,13(-1,1e+05,1,1e+05) n=0,05(-4,67e+04,4,66e+04)	0,9880	0,04029
	Ç-20US	b=0,06(-2,91e+04,2,91e+04) n=0,032(-1,49e+04,1,49e+04)	0,9900	0,03763
	Ç-30US	b=9,38(-7,59e+07,7,59e+07) n=6,07(-4,91e+07,4,91e+07)	0,9912	0,00368
Modifiye Çift Terimli III	Ç-K	a=1,86(1,74,1,98) b=1,40(1,29,1,50)	0,9987	0,01329
	Ç-10US	a=1,82(1,72,1,92) b=1,57(1,48,1,67)	0,9994	0,00903
	Ç-20US	a=1,84(1,66,2,02) b=1,64(1,47,1,82)	0,9987	0,01614
	Ç-30US	a=1,02(-494,6,496,6) b=1,49(-21,73,24,71)	0,9912	0,00368

Ç-K: Çekirdekli nar taneleri için kontrol grubu, Ç-10US: Çekirdekli nar taneleri için 10 dakika ultrason ön işlem uygulanmış, Ç-20US: Çekirdekli nar taneleri için 20 dakika ultrason ön işlem uygulanmış, Ç-30US: Çekirdekli nar taneleri için 30 dakika ultrason ön işlem uygulanmış

Çizelge 4 Çekirdekli ve çekirdeksiz nar tanelerinin farklı işlem koşullarındaki kuruma süreleri

Table 4 Drying times of seeded and seedless pomegranate arils under different processing conditions

Kurutma İşlemi	Kuruma süreleri (dakika)	
	Çekirdeksiz Nar	Çekirdekli Nar
Kontrol	270±10 <sup>a</sup>	272±13 <sup>a</sup>
10US	242±13 <sup>b</sup>	247±8 <sup>a, b</sup>
20US	225±10 <sup>b, c</sup>	227±13 <sup>b, c</sup>
30US	212±8 <sup>c</sup>	213±8 <sup>c</sup>

10US: 10 dakika ultrason ön işlem uygulanmış, 20US: 20 dakika ultrason ön işlem uygulanmış, 30US: 30 dakika ultrason ön işlem uygulanmış; a-c: Aynı sütundaki farklı harflere sahip ortalamalar arasındaki farklılıklar istatistik açıdan önemlidir (P≤0,05); a-c: Differences between means with different letters in the same column are statistically significant (P≤0,05)

## Teşekkür

Bu çalışmada kullandığım programları öğrenmeme yardımcı olan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu ("TÜBİTAK 2237-A, Proses Analizi ve Optimizasyonu"; Proje Numarası: 1129B372300736) tarafından düzenlenen projenin koordinatörlerine teşekkür ederim.

## Kaynaklar

- Adetoro, A. O., Tsige, A. A., Opara, U. L., & Fawole, O. A. (2020). Mathematical modelling of blanch-assisted drying of pomegranate (*Punica granatum*) arils in a hot-air drier. *Processes*, 8(5), 611. <https://doi.org/10.3390/pr8050611>
- Allahdad, Z., Nasiri, M., Varidi, M., & Varidi, M. J. (2019). Effect of sonication on osmotic dehydration and subsequent air-drying of pomegranate arils. *Journal of Food Engineering*, 244, 202-21. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.09.017>
- Buzrul, S. (2022). Reassessment of thin-layer drying models for foods: A critical short communication. *Processes*, 10(1), 118. <https://doi.org/10.3390/pr10010118>
- Corzo, O., Bracho, N., Pereira, A., & Vásquez, A. (2008). Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices. *LWT-Food Science and Technology*, 41(10), 2023-2028. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.01.002>
- Darvishi, H., Asl, A. R., Asghari, A., Azadbakht, M., Najafi, G., & Khodaei, J. (2014). Study of the drying kinetics of pepper. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(2), 130-138. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.03.002>
- Guo, Y., Wu, B., Guo, X., Ding, F., Pan, Z., & Ma, H. (2020). Effects of power ultrasound enhancement on infrared drying of carrot slices: Moisture migration and quality characterizations. *Food Science and Technology*, 126, 109312. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109312>
- Horuz, E., & Maskan, M. (2015). Hot air and microwave drying of pomegranate (*Punica granatum* L.) arils. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 285-293. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1032-9>
- Hutchinson, D., & Otten, L. (1983). Thin-layer air drying of soybeans and white beans. *International Journal of Food Science & Technology*, 18(4), 507-522. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1983.tb00292.x>

- Kadam, S. U., Tiwari, B. K., & O'Donnell, C. P. (2015). Effect of ultrasound pre-treatment on the drying kinetics of brown seaweed *Ascophyllum nodosum*. *Ultrasonics sonochemistry*, 23, 302-307. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.10.001>.
- Karacabey, E., & Buzrul, S. (2017). Modeling and predicting the drying kinetics of apple and pear: Application of the Weibull model. *Chemical Engineering Communications*, 204(5), 573-579. <https://doi.org/10.1080/00986445.2017.1291427>
- Karacabey, E., Baltacıoğlu, C., Cevik, M., & Kalkan, H. (2016). Optimization of microwave-assisted drying of Jerusalem Artichokes (*Helianthus tuberosus* L.) by Response Surface Methodology and Genetic Algorithm. *Italian Journal of Food Science*, 28(1), 121-130. <https://doi.org/10.14674/1120-1770/ijfs.v466>.
- Kerboua, K., & Hamdaoui, O. (2018). Ultrasonic waveform upshot on mass variation within single cavitation bubble: Investigation of physical and chemical transformations. *Ultrasonics Sonochemistry*, 42, 508-516. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.12.015>
- Kingsly, A. R. P., & Singh, D. B. (2007). Drying kinetics of pomegranate arils. *Journal of Food Engineering*, 79(2), 741-744. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.02.033>
- Lewis, W. K. (1921). The rate of drying of solid materials. *Industrial & Engineering Chemistry*, 13(5), 427-432. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie50137a021>
- Minaei, S., Motevali, A., Ahmadi, E., & Azizi, M. H. (2012). Mathematical models of drying pomegranate arils in vacuum and microwave dryers. [http://jast.journals.modares.ac.ir/?\\_action=articleInfo&article=509](http://jast.journals.modares.ac.ir/?_action=articleInfo&article=509)
- Morton, J.A., Khavari, M., Priyadarshi, A., Kaur, A., Grobert, N., Mi, J., Porfyrakis, K., Prentice, P., Eskin, D. G., & Tzanaki, I. 2023. Dual frequency ultrasonic cavitation in various liquids: Highspeed imaging and acoustic pressure measurements Special Collection: Cavitation. *Physics of Fluids* 35, 017135 (2023) <https://doi.org/10.1063/5.0136469>.
- Nowacka, M., Wiktor, A., Śledź, M., Jurek, N., & Witrowa-Rajchert, D. (2012). Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. *Journal of Food Engineering*, 113(3), 427-433. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.06.013>.
- Overhults, D. G., White, G. M., Hamilton, H. E., & Ross, I. J. (1973). Drying soybeans with heated air. *Transactions of the ASAE*, 16(1), 112. [https://uknowledge.uky.edu/bae\\_facpub/134](https://uknowledge.uky.edu/bae_facpub/134)
- Page, G. E. (1949). Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin layers. Purdue University. <https://www.proquest.com/dissertations-theses/factors-influencing-maximum-rates-air-drying/docview/301817819/se-2?accountid=14141>
- Saxena, A. K., Mevah, J. K., & Berry, S. K. (1987). Pomegranate postharvest technology, chemistry and processing. *Indian Food Packer*, 41(718), 43. <http://ir.cftri.res.in/id/eprint/4882>
- Tao, Y., Wang, P., Wang, Y., Kadam, S. U., Han, Y., Wang, J., & Zhou, J. (2016). Power ultrasound as a pretreatment to convective drying of mulberry (*Morus alba* L.) leaves: Impact on drying kinetics and selected quality properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 31, 310-318. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.01.012>.
- Wang, L., Xu, B., Wei, B., & Zeng, R. (2018). Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices: Effect on the moisture migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 40, 619-628. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.005>.