

Güneşte Kurutulmuş Bamyaların Rehidrasyon Kinetiği

Engin Demiray ✉, Yahya Tülek

Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Denizli

Geliş Tarihi (Received): 13.03.2016, Kabul Tarihi (Accepted): 10.05.2016

✉ Yazışmalardan Sorumlu Yazar (Corresponding author): edemiray@pau.edu.tr (E. Demiray)

☎ 0 258 296 30 90 📠 0 258 296 32 62

ÖZ

Çalışmada, bütün halde güneşte kurutulmuş bamyaya örneklerinin rehidrasyonunda, üç farklı rehidrasyon suyu sıcaklığının (25, 35 ve 45°C) rehidrasyon kinetiğine etkisi incelenmiştir. Dört farklı modelle, rehidrasyonda elde edilen deneysel sonuçların uygunluğu doğrusal olmayan regresyon analizi uygulanarak karşılaştırılmış ve modellere ait katsayılar hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlara en iyi uyum gösteren modellerin Peleg ve Weibull modelleri olduğu belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca efektif difüzyon katsayıları da belirlenmiş ve 9.84×10^{-10} - $1.66 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ değerleri arasında hesaplanmıştır. Yüksek sıcaklıkta yapılan rehidrasyon işleminde nem kazanımının daha hızlı olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kuru bamyaya, Rehidrasyon, Efektif difüzyon, Weibull, Peleg

Rehydration Kinetics of Sun-dried Okras

ABSTRACT

In this study, sun-dried okra samples were rehydrated at three different rehydration water temperatures (25, 35 and 45°C), and the effect of water temperature on rehydration kinetics was determined. Four different models were used to model the rehydration behaviors of sun-dried okras, and non-linear regression analysis were performed to obtain the model that gives the best fit to the experimental data. The coefficients of the models were calculated. According to regression analysis, Weibull and Peleg models resulted in a better fit for all rehydration conditions applied. On the other hand, the effective diffusivities were between 9.84×10^{-10} and $1.66 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. The rehydration temperature also affected the rehydration rate. At high temperatures, the moisture uptake of sun-dried okra samples was faster.

Keywords: Dried okra, Rehydration, Effective diffusivity, Weibull, Peleg

GİRİŞ

Kurutma bir ürünün su miktarını azaltmak ve çok düşük düzeylere düşürmek amacı ile yapılan, olası mikrobiyolojik ve kimyasal bozulmaların önlenmesini, bu yolla meyve sebzelerin uzun süre depolanmasını ve üretim mevsimi dışında da tüketilmesini sağlayan, çok eski çağlardan bu yana uygulanan bir işlemdir [1, 2]. Bu amaçla geçmişten günümüze birçok kurutma yöntemi geliştirilmiştir. Kurutma yöntemleri, doğal ve yapay kurutma yöntemleri olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Doğal kurutmada enerji kaynağı olarak güneş enerjisi

kullanılmaktadır. Güneş enerjisini kullanan kurutucular; sera tipi, tünel tipi, zorunlu hava akışlı ve entegre kurutuculardır. Yapay kurutmada güneş enerjisi de enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Beraber genellikle kömür, doğalgaz ve elektrik gibi diğer enerji kaynakları daha yaygın kullanılır [3, 4].

Kurutulmuş meyve ve sebzeler tüketilmeden önce genellikle rehidre edilirler. Özellikle kurutulmuş sebzelerin birçoğu rehidrasyon işleminden sonra tüketilir. Rehidrasyon, kurutulmuş ürünlere tekrar su kazandırma işlemidir. Rehidrasyon ile suyun doku içine

absorpsiyonu ve buna bağlı olarak üründe kütle artışı meydana gelmektedir. Fakat aynı zamanda üründen de rehidrasyon için kullanılan suya bir kütle transferi söz konusudur. Kurutulmuş meyve ve sebzelerin rehidrasyonu sırasında üründe rehidrasyon ortamından su kazanımı gerçekleşirken bir yanda da şeker, asit, vitamin ve mineral madde gibi bileşenlerin de rehidrasyon ortamına geçişi meydana gelebilmektedir. Ürüne uygulanan kurutma yöntemi ve koşulları, ürünün kimyasal ve fiziksel yapısı, rehidrasyon için kullanılan suyun sıcaklığı gibi faktörler rehidrasyon özelliklerini etkilemektedir [5]. Rehidrasyon işleminin başında kurutulmuş üründeki su kazanımı hızlı bir şekilde gerçekleşirken ürün nem içeriği denge nem içeriği değerine yaklaştıkça rehidrasyon hızı azalmaktadır [6].

Kurutma ve rehidrasyon işlemlerinin tasarım ve optimizasyonunda matematiksel modeller önemlidir. Matematiksel modeller yardımıyla bir gıdanın kurutulması veya rehidrasyonu için en uygun koşullar belirlenebilir. Modelleme yapılırken gıdanın geometrik şekli ve yapısı dikkate alınmaktadır. Kurutma ve rehidrasyon gibi işlemlerin tasarımında matematiksel modellerden yararlanılarak ciddi bir enerji kazancı sağlanır ve zaman kaybı önlenir [7]. Matematiksel modellerin oluşturulmasında Fick'in II. Yasası'ndan yararlanılır. Rehidrasyon işleminin modellenmesinde literatürde yaygın olarak Peleg modeli, Weibull modeli, birinci-derece modeli ve eksponensiyel model kullanılmaktadır [8, 9].

Bamya, ebegümecigiller ailesinden olup tek yıllık bir yaz sebzesidir. Asıl anavatanın Doğu Afrika ve özellikle Etiyopya olduğu bildirilmektedir [10]. Tropikal ve subtropikal iklimlerin görüldüğü yerlerde de yetiştirilmektedir. Günümüzde önemli bamya üretici ülkeleri Hindistan, Nijerya, Pakistan, Gana ve Mısır'dır. Bamya, Afrika ve Amerika'da "gumbo" Hindistan'da ise "bhindi" olarak isimlendirilmiştir [11]. Ülkemizde, genel olarak Ege bölgesinde yoğun olarak yetiştirilmektedir. Ege bölgesinin dışında İç Anadolu, Akdeniz, Marmara ve Karadeniz bölgelerinde de yetiştirilmektedir [12]. Bamya, protein ve mineral maddelerce zengin olup, A, C ve K vitaminlerini de içermektedir. Bamya, taze olarak tüketilebildiği gibi kurutulmuş, dondurularak veya konserve edilerek de tüketilebilmektedir [13]. Ülkemizde genellikle kurutulmuş bamya üretimi güneşte kurutma ile yapılmaktadır. Tercihen küçük boyutlardaki bamyalar ipe dizilir daha sonra güneş görebileceği bir yere asılır ve bu şekilde doğal yolla kuruma gerçekleşir. Kurutulan bamyaların tüketilebilmesi için rehidrasyon işlemi gereklidir.

Bu çalışmada, güneşte kurutulmuş bamyalar farklı sıcaklıklarda su ile rehidre edilmiş, dört farklı rehidrasyon modeli (Peleg modeli, Weibull modeli, Eksponensiyel model ve Birinci – derece modeli) deneyerek rehidrasyon kinetiği belirlenmiştir. Ayrıca her bir rehidrasyon sıcaklığı için efektif difüzyon katsayıları da hesaplanmıştır.

MATERYAL ve METOT

Materyal

Çalışmada rehidre edilecek olan güneşte kurutulmuş bamya örnekleri, Denizli ilinde bulunan bir aktardan temin edilmiştir. Polietilen poşetler içerisinde bölüm laboratuvarına getirilen kuru bamya örnekleri, bu poşetlerde rehidrasyon işlemine kadar oda sıcaklığında muhafaza edilmiştir. Rehidrasyon işlemlerine başlamadan önce kuru bamya örneklerinin nem içerikleri AOAC yöntemine göre 70°C'de vakumlu etüvde 24 saat kurutularak belirlenmiştir. Örneklerin nem içeriği 0.070 kg su/kg kuru madde olarak hesaplanmıştır.

Metot

Rehidrasyon

Rehidrasyon işlemleri, 25, 35 ve 45°C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta su ile gerçekleştirilmiştir. Rehidrasyon işlemine başlamadan 30 dakika önce su banyosunun (WB-11 model, Wisd Laboratory Instruments, Wertheim, Almanya) sıcaklığı rehidrasyon sıcaklık derecesine ayarlanmıştır. Daha sonra 250 mL'lik bir beherin içine 150 mL saf su ilave edilmiş ve termometre yardımıyla beher içindeki suyun sıcaklığının istenilen çalışma sıcaklığına gelip gelmediği kontrol edilmiştir. Rehidrasyon suyunun sıcaklığı istenilen değerlere ulaştıktan sonra ipte dizili halde bulunan kuru bamya örnekleri, ipten çıkarılarak 5±0.11 g tartılmış ve su banyosunda bulunan beher içine konulmuştur. Rehidrasyon işlemleri 24 saat devam etmiş, bu süreçte ilk 6 saat her 30 dakikada bir örnekler beher içerisinden çıkartılarak ağırlık artışları 0.01 g hassasiyetli dijital terazi (TP-3002 model, Denver Instruments, Gottingen, Almanya) ile ölçülmüştür. Tartım işlemlerinden önce örneklerin yüzeyindeki fazla su, filtre kağıdı ile kurulanmıştır. Rehidrasyon işlemleri, 2 paralelli ve 2 tekrarlı olarak yapılmış ve ortalama değerler hesaplanmıştır.

Rehidrasyon Kinetiğinin Modellenmesi

Güneşte kurutulmuş bamyaların farklı sıcaklıklarda rehidrasyonu sırasında zamana bağlı olarak nem içeriğini en iyi ifade eden modeli belirlemek için Tablo 1'de verilmiş olan, literatürde yaygın olarak kullanılan rehidrasyon modelleri kullanılmıştır.

Bu modellerden Peleg modeli iki parametrelili bir model olup, birçok kurutulmuş gıdanın rehidrasyonunda kullanılır [14-17]. Peleg modeline ait eşitlikte M_0 rehidre edilmemiş örneğin başlangıç nem içeriğini (kg su/kg kuru madde), M , rehidrasyonun t zamanında örneğin nem içeriğini (kg su/kg kuru madde), t rehidrasyon zamanını (dak.), k_1 Peleg hız sabiti (dak. (kg su/kg kuru madde)) ve k_2 Peleg kapasite sabitidir (kg su/kg kuru madde).

Tablo 1. Çalışmada kullanılan rehidrasyon modelleri

Model Adı	Model Eşitliği	Referans
Peleg	$M = M_0 + \frac{t}{k_1 + k_2 t}$	[21]
Weibull	$M = M_e + (M_0 - M_e) \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right]$	[15]
Eksponensiyel	$M = M_e [1 - \exp(-Ht)]$	[22]
Birinci-derece	$M = M_e + (M_0 - M_e) \exp(-Kt)$	[9]

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde birçok araştırmacı, çeşitli yöntemlerle kurutulmuş gıdaların rehidrasyon eğrilerini açıklayan modelin Weibull modeli olduğunu ifade etmiştir [18-20]. Tablo 1'de Weibull modeline ait verilen eşitlikte, M_0 rehidre edilmemiş örneğin başlangıç nem içeriğini, M rehidrasyonun t zamanında örneğin nem içeriğini, M_e denge nem içeriğini t rehidrasyon zamanını, α Weibull modelinin şekil parametresini, β Weibull modelinin hız parametresini ifade etmektedir.

Eksponensiyel modelinin eşitliğinde yer alan H değeri modele ait rehidrasyon kinetik sabiti (dak^{-1}), Birinci-derece modelinin eşitliğinde yer alan K değeri de modele ait rehidrasyon kinetik sabitidir (dak^{-1}).

Rehidrasyon Sırasında Efektif Difüzyon Katsayılarının Hesaplanması

Gıdaların kurutulması ve kurutulmuş gıdaların rehidrasyonu sırasında gerçekleşen difüzyon karmaşık bir olaydır. Kurutma ve rehidrasyon işlemlerinin başında hızlı bir kütle transferi söz konusu iken işlemlerin sonuna doğru transfer hızı azalır. Dolayısıyla suyun difüzyonu azalır [10, 23, 24].

Rehidrasyon sırasında sıcaklığa bağlı olarak efektif difüzyon katsayıları (D_{eff}), 2. Fick Kanunu'ndan yararlanılarak hesaplanır [24, 25]. Bu kanun kullanılırken bazı kabuller yapılarak hesaplamalar yapılır. Rehidrasyon işlemi sırasında yapılan kabuller; (i) Başlangıç nem içeriği rehidre edilecek gıda içinde uniformdur. (ii) Rehidrasyon sırasında gıda orijinal şeklini korumaktadır. (iii) Gıda yüzeyinden nem alımı, gıdanın rehidrasyon suyuna daldırılmasıyla başlar. (iv) Rehidrasyon için belirlenen koşulların dışındaki faktörlerden kaynaklanabilecek ısı ve kütle transferleri ihmal edilir. (v) Rehidrasyon boyunca efektif difüzyon katsayısı sabittir. (vi) Rehidre edilen gıdanın hacim değişimleri rehidrasyon boyunca ihmal edilir [26]. Buna göre güneşte kurutulmuş bamyaların farklı sıcaklıklarda rehidrasyonu sırasında efektif difüzyon katsayılarının hesaplanabilmesi için belirtilen kabuller yapılmış, küre ve yuvarlak şekle benzer olduğu için Eşitlik (5) kullanılmıştır. Nitekim Doymaz [10] yaptığı çalışmada bamyaların sıcak hava ile 50, 60 ve 70°C'de kurutulması sırasında efektif difüzyon katsayılarını boyutsuz nem oranından yararlanılarak hesaplanmasında aynı eşitliği kullanmıştır.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{eff} t}{R^2}\right) \quad (5)$$

Burada; D_{eff} , efektif difüzyon katsayısını ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), M , herhangi bir t anındaki nem içeriğini (kg su/kg kuru madde), M_0 rehidre edilmemiş örneğin başlangıç nem içeriğini (kg su/kg kuru madde), M_e denge nem içeriğini (kg su/kg kuru madde), MR boyutsuz nem miktarını, t rehidrasyon zamanını (min), R ise rehidre edilecek gıdanın çapını (m) ifade etmektedir.

Üç farklı sıcaklıktaki su içerisinde rehidre edilen kuru bamyaya örnekleri için hesaplanan boyutsuz nem değerlerinin zamana göre değişim grafikleri yarı logaritmik koordinatlara sahip olacak şekilde çizilmiş ve eğim (k) değerleri Eşitlik (6) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$k = \frac{\pi^2 D_{eff}}{R^2} \quad (6)$$

Çalışmada, üç farklı sıcaklıkta yapılan rehidrasyon işlemine ait efektif difüzyon katsayıları, hesaplanmış olan eğimlerden yararlanılarak elde edilmiştir.

İstatistiksel Analiz

Çalışmada kullanılan rehidrasyon modellerinin, deneysel verilerle uyumu Microsoft Excel (Microsoft Office, sürüm 2013) programı kullanılarak doğrusal olmayan regresyon analizi ile belirlenmiştir. Uyum göstergesi olarak, determinasyon katsayısının (R^2) 1'e yakın olmasının dikkate alınmasının yanında, karekök ortalamalarının hatasının ($RMSE$) ve ki-kare (χ^2) değerlerinin düşüklüğü ile uyumun arttığı kabul edilmiştir. $RMSE$ ve χ^2 değerleri Eşitlik 7 ve Eşitlik 8 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_{tah \min i,i} - M_{deneysel,i})^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{deneysel,i} - M_{tah \min i,i})^2}{N - n} \quad (8)$$

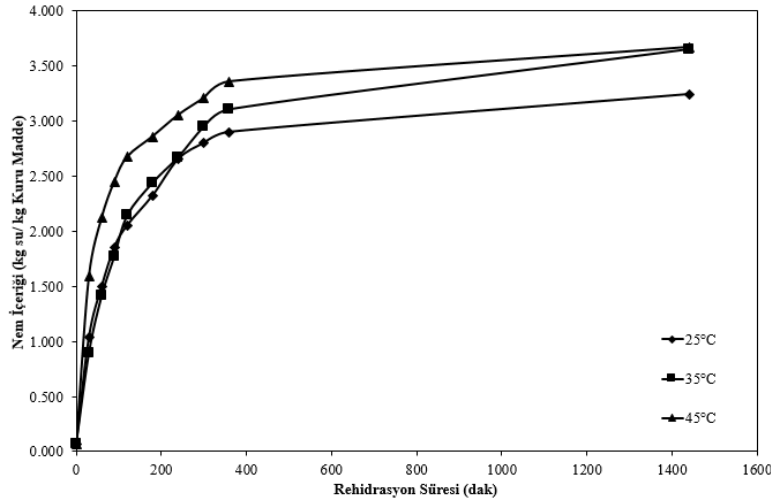
Burada, $M_{deneysel,i}$ değeri i. deneysel analizde ölçülen değer, $M_{tahmini,i}$ değeri modeldeki i. analizde tahmini değer, N deneysel veri sayısı ve n kullanılan modeldeki katsayı miktarıdır.

BULGULAR ve TARTIŞMA

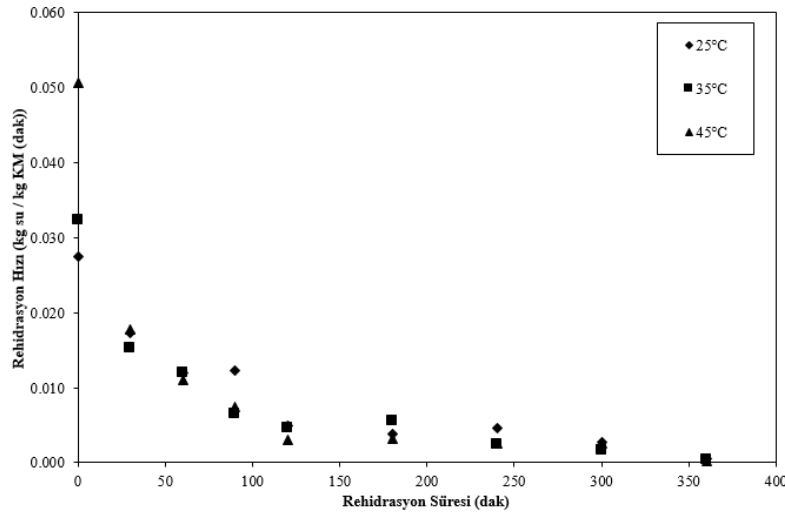
Rehidrasyon Suyu Sıcaklığının Kurutulmuş Bamyaların Rehidrasyonu Üzerindeki Etkisi

Güneşte kurutulmuş bamyaya örnekleri, 25, 35 ve 45°C sıcaklığa sahip rehidrasyon suları içinde rehidre edilmiştir. Rehidrasyon işlemi boyunca örneklerin su kazanımı gerçekleşmiştir. 24 saat süren rehidrasyon işleminde, örneklerin nem içeriği 0.070 kg su/kg kuru madde değerinden ortalama 3.523 ± 0.24 kg su/kg kuru madde değerine artmıştır. Örneklerin ağırlıklarının zamanla değişimini gösteren grafik Şekil 1'de verilmiştir.

Rehidrasyon sırasında kullanılan suyun sıcaklığının, örneklerin su alımı üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Nitekim, Şekil 2 incelendiğinde, rehidrasyon suyunun sıcaklığının artmasıyla rehidrasyon hızının arttığı görülmektedir. Ayrıca tüm rehidrasyon işlemlerinin başında rehidrasyon hızı yüksek iken, işlemin sonuna doğru azalmaktadır. Benzer duruma literatürdeki birçok çalışmada rastlamak mümkündür. Örneğin, Noshad ve ark. [27] ayva dilimlerini 0-30 dakika arasında içinde saf su bulunan ultrasonik su banyosunda tuttuktan sonra ozmotik kurutma yöntemi ile kurutulmuşlardır. Daha sonra kurutulan ayva dilimlerini, 25, 45 ve 70°C sıcaklığa sahip saf suların içinde rehidre etmişlerdir. Rehidrasyon işleminin başında örneklerin ağırlığının hızlı bir şekilde arttığını saptamışlardır. Ayrıca 70°C'de yapılan rehidrasyon işleminin 25°C'de yapılabildiğine göre daha hızlı gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Kaymak-Ertekin [25] kurutulmuş kırmızı ve yeşil biberlerin rehidrasyon özelliklerini incelediği çalışmasında da benzer sonuç elde etmiştir.



Şekil 1. Farklı sıcaklıklarda rehidre edilen kuru bamyaya örneklerinin ağırlıklarının zamanla değişimi



Şekil 2. Farklı sıcaklıklarda rehidre edilen kuru bamyaya örneklerinin rehidrasyon hızlarının zamanla değişimi

Rehidrasyon Kinetiğine Ait Modelleme

Bamya örneklerinin her bir sıcaklıkta rehidrasyon işlemleri 6 saat devam ettirilmiştir. Rehidrasyon süresince elde edilen ağırlık değişimi verileri Tablo 1'de verilen, rehidrasyon kinetiği ile ilgili modellemelerde kullanılmıştır.

Microsoft Excel programı kullanılarak yapılan modelleme çalışmasıyla her bir modele ait katsayılar belirlenmiştir. Ayrıca modellere ait istatistik parametreler

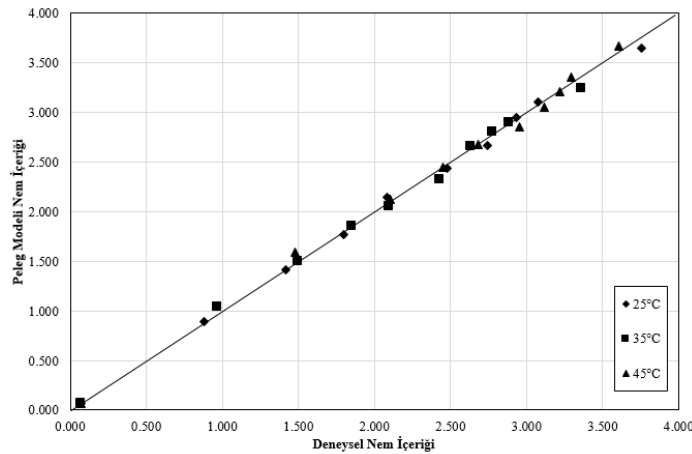
hesaplanmış ve deneysel verilere uyum gösteren en iyi rehidrasyon modeli belirlenmiştir. Rehidrasyon modellerine ait katsayılar ve istatistik parametreler Tablo 2'de sunulmuştur. Determinasyon katsayısı (R^2), en uygun modelin belirlenmesinde önemli bir istatistik parametredir. R^2 'nin yanında her bir model için hesaplanan ki-kare (χ^2) ve $RMSE$ değerleri de en uygun rehidrasyon modelinin belirlenmesini sağlamıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda R^2 değerinin en yüksek, χ^2 ve $RMSE$ değerlerinin en küçük olduğu model en uygun model olarak ifade edilmiştir.

Tablo 2. Farklı sıcaklıklarda rehidre edilen kuru bamya örneklerine ait deney sonuçlarının doğrusal olmayan regresyon analizi ile hesaplanan katsayıları ve modellere uyumunun incelenmesi

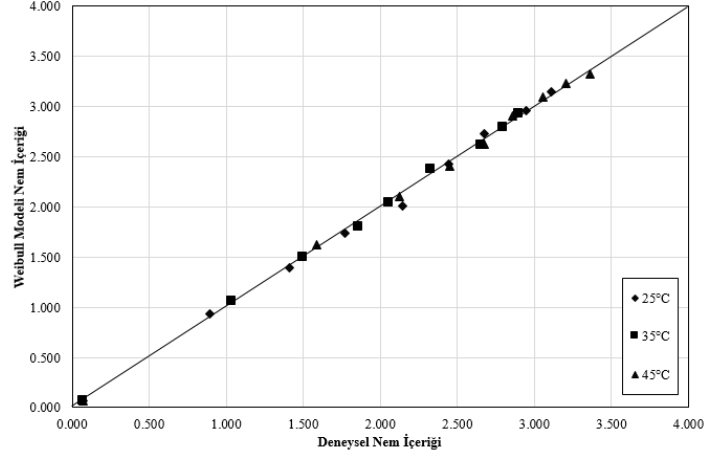
Peleg Modeli					
Sıcaklık (°C)	k_1	k_2	$RMSE$	χ^2	R^2
25	29.606	0.2507	0.001768	0.000004	0.9978
35	24.748	0.2866	0.006364	0.000054	0.9974
45	13.106	0.2739	0.010253	0.000140	0.9980
Weibull Modeli					
Sıcaklık (°C)	β	α	$RMSE$	χ^2	R^2
25	0.0048	0.7216	0.010607	0.000150	0.9939
35	0.0063	0.6579	0.002828	0.000011	0.9974
45	0.0115	0.5590	0.001414	0.000003	0.9944
Birinci-derece Rehidrasyon Kinetik Modeli					
Sıcaklık (°C)	K	$RMSE$	χ^2	R^2	
25	0.0044	0.563918	0.363432	0.8897	
35	0.0053	0.614122	0.431024	0.8495	
45	0.0071	0.980404	1.098504	0.7069	
Ekspansiyonel Model					
Sıcaklık (°C)	H	$RMSE$	χ^2	R^2	
25	0.0045	0.592202	0.400804	0.8748	
35	0.0054	0.651599	0.485236	0.8317	
45	0.0072	1.013991	1.175061	0.6873	

Yapılan modelleme sonucunda elde edilen verilere göre en yüksek R^2 ve en düşük χ^2 ve $RMSE$ değerlerinin Tablo 2'den de görüleceği üzere Peleg ve Weibull modellerine ait olduğu belirlenmiştir. Rehidrasyon işlemi boyunca deneysel olarak belirlenen nem içeriği değerlerindeki artışı tüm rehidrasyon koşullarında Peleg

ve Weibull modellerinin daha iyi temsil ettiği saptanmıştır. Farklı sıcaklıklar için deneysel yolla elde edilen nem içeriği değerleri ile Peleg ve Weibull modellerinden hesaplanan nem içeriği değerlerinin uyumu Şekil 3 ve 4'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Deneysel nem içeriği sonuçları ile Peleg modelinden elde edilen nem içeriği sonuçlarının uyumu



Şekil 4. Deneysel nem içeriği sonuçları ile Weibull modelinden elde edilen nem içeriği sonuçlarının uyumu

Rehidrasyon kinetiği ile ilgili literatürdeki çalışmalar incelendiğinde çalışmamızda elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Dadalı ve ark. [14] mikrodalga yöntemi ile kuruttukları ıspanağı farklı sıcaklardaki su içerisinde rehidre etmişler ve Peleg modelinin kendi çalışma koşullarına en uygun model olduğunu belirlemişlerdir. Noshad ve ark. [27] yaptıkları çalışmada, ayva dilimlerini farklı koşullarda kuruttuktan sonra üç farklı sıcaklığa (25, 40 ve 70°C) sahip su içerisinde rehidre etmişlerdir. Uygulanan dört farklı rehidrasyon modelinden en uygun olanının Weibull model olduğunu belirtmişlerdir. Markowski ve ark. [24], patatesleri küp şeklinde doğradıktan sonra vakum-mikrodalga tekniği ile kuruttuktan sonra rehidre etmişler ve hem Peleg hem de Weibull modelinin rehidrasyon sonuçlarını temsil etmede daha başarılı modeller olduğunu ifade etmişlerdir. Apar-Kılıç ve ark. [9], mikrodalga yöntemiyle beş farklı mikrodalga gücünde (180, 360, 540, 720 ve 900 W) kuruttukları bamyaya örneklerini, 30°C sabit sıcaklığa sahip su içerisinde rehidre etmişlerdir. Dört farklı rehidrasyon modelini (Peleg, Weibull, Birinci-derece ve Ekspansiyon) kullanarak elde ettikleri sonuçların deneysel verilere oldukça iyi uyum gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Rehidrasyon Sırasında Efektif Difüzyon Katsayıları

Güneşte kurutulan bamyaya örneklerinin üç farklı sıcaklıktaki su içinde rehidrasyonu sırasında efektif difüzyon katsayısını hesaplamak amacıyla boyutsuz nem değerlerinin zamana göre değişim grafikleri yarı logaritmik koordinatlara sahip olacak şekilde çizilmiştir. Elde edilen eğim kullanılarak efektif difüzyon katsayıları hesaplanmış ve Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Farklı rehidrasyon sıcaklıkları için hesaplanmış efektif difüzyon katsayıları

Rehidrasyon Sıcaklığı (°C)	Efektif Difüzyon Katsayıları (m ² s ⁻¹)
25	9.84×10^{-10}
35	1.40×10^{-9}
45	1.66×10^{-9}

Tablo 3'teki sonuçlar incelendiğinde rehidrasyon işleminde kullanılan suyun sıcaklığının artmasıyla su kazanımının arttığı dolayısıyla efektif difüzyon katsayılarının da arttığı görülmektedir. Literatürde, kurutulmuş meyve ve sebzelerin rehidrasyonu ile ilgili çalışmalar incelendiğinde benzer sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Nitekim, Maldonado ve ark. [26], 25 ve 40°C sabit sıcaklığa sahip su içinde rehidre ettikleri kuru mango dilimlerine ait efektif difüzyon katsayılarını sırasıyla 1.24×10^{-10} m².s⁻¹ ve 1.60×10^{-10} m².s⁻¹ olarak hesaplamışlardır. Bir başka çalışmada, Falade ve Abbo [28] hurma (*Phoenix dactylifera* L.) örneklerini sıcak hava yöntemi ile 50-80°C arasındaki sıcaklıklarda kurutmuşlar ve kuru hurma örneklerini üç farklı sıcaklıkta (15, 30 ve 45°C) rehidre etmişlerdir. Rehidrasyon işlemi sonunda, rehidrasyon suyunun sıcaklığının artmasıyla efektif difüzyon katsayılarının da arttığını ifade etmişler ve sırasıyla efektif difüzyon katsayılarını 1.80×10^{-10} m².s⁻¹, 4.74×10^{-10} m².s⁻¹ ve 1.15×10^{-9} m².s⁻¹ olarak hesaplamışlardır.

SONUÇ

Güneşte kurutulmuş bamyaya örneklerinin rehidrasyon kinetiği üzerine üç farklı sıcaklığa (25, 35 ve 45°C) sahip su kullanımının etkisinin incelendiği bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Rehidrasyon suyunun sıcaklığının artmasıyla kuru bamyaya örneklerinin daha hızlı nem kazandığı belirlenmiştir. Rehidrasyon suyunun sıcaklığının artmasıyla su moleküllerinin kinetik enerjisinin artmasına bağlı olarak örneklere su difüzyonunun hızlanmasının bu durumun nedeni olduğu ifade edilebilir.
- Rehidrasyon işlemi süresince elde edilen deneysel verilerin literatürdeki modellere uygunluğu incelendiğinde, Peleg ve Weibull modellerinin diğer modellerden daha yüksek R^2 ve daha düşük χ^2 ve $RMSE$ değerlerine sahip olduğu saptanmıştır. Bu yüzden Peleg ve Weibull modellerinin rehidrasyon kinetiğini tanımlayan en iyi modeller olduğu belirlenmiştir.
- Geleneksel ve yeni kurutma yöntemleri ile kurutulmuş diğer ürünler için de farklı rehidrasyon

koşulları denenerek ürünlerin bu koşullardaki rehidrasyon özelliklerinin belirlenmesi ve ayrıca modelleme çalışmalarının yapılması faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Yaldiz, O., Ertekin, C., Uzun, H.I., 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy* 26(5): 457-465.
- [2] Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., Jaouhari, J.T., 2004. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering* 61(2): 173-179.
- [3] Cemeroglu, B., Karadeniz, F., Özkan, M., 2003. Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi. Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları, Ankara.
- [4] Demiray, E., 2015. Havuç ve Kırmızıbiberin Farklı Kurutma Yöntemleri ile Kurutulması, Kuruma Karakteristiklerinin ve Bazı Kalite Özelliklerindeki Değişimin Modellenmesi. Doktora Tezi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.
- [5] Maskan, M., 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering* 48(2): 177-182.
- [6] Lee, K., Farid, M., Nguang, S., 2006. The mathematical modelling of the rehydration characteristics of fruits. *Journal of Food Engineering* 72(1): 16-23.
- [7] Krokida, M.K., Marinou-Kouris, D., 2003. Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering* 57(1): 1-7.
- [8] Sanjuan, N., Simal, S., Bon, J., Mulet, A., 1999. Modelling of broccoli stem rehydration process. *Journal of Food Engineering* 42(1): 27-31.
- [9] Apar Kılıç, D., Demirhan, E., Ozbek, B., Dadalı, G., 2009. Rehydration kinetics of microwave-dried okras as affected by drying conditions. *Journal of Food Processing and Preservation* 33: 618-634.
- [10] Doymaz, İ., 2005. Drying characteristics and kinetics of okra. *Journal of Food Engineering* 69(3): 275-279.
- [11] Ndjouenkeu, R., Goycoolea, F.M., Morrissa, E.R., Akingbala, J.O., 1996. Rheology of okra (*Hibiscus esculentus* L.) and dika nut (*Irvingia gabonensis*) polysaccharides. *Carbohydrate Polymers* 29(3): 263-269.
- [12] Anonim, 2014. Türkiye İstatistik Kurumu verileri <http://www.tuik.gov.tr/> (Erişim Tarihi: 10.10.2015).
- [13] Göğüs, F., Maskan, M., 1999. Water adsorption and drying characteristics of okra (*Hibiscus Esculentus* L.). *Drying Technology* 17(4-5): 883-894.
- [14] Dadalı, G., Demirhan, E., Özbek, B., 2008. Effect of drying conditions on rehydration kinetics of microwave dried spinach. *Food and Bioproducts Processing* 86(4): 235-241.
- [15] Goula, M.A., Adamopoulos, G.K., 2009. Modeling the rehydration process of dried tomato. *Drying Technology* 27(10): 1078-1088.
- [16] Bilbao-Sainz, C., Andres, A., Fito, P., 2005. Hydration kinetics of dried apple as affected by drying conditions. *Journal of Food Engineering* 68(3): 369-376.
- [17] Planinic, M., Velic, D., Tomas, S., Bilic, M., Bucic, A., 2005. Modelling of drying and rehydration of carrots using Peleg's model. *European Food Research and Technology* 221(3): 446-451.
- [18] Ruiz Diaz, G., Martinez-Monzo, P., Chiralt, A., 2003. Modelling of dehydration-rehydration of orange slices in combined microwave/air drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 4(2): 203-209.
- [19] Garcia-Pasqual, P., Sanjuan, N., Melis, R., Mulet, A., 2006. *Morchella esculenta* (morel) rehydration process modelling. *Journal of Food Engineering* 72(4): 346-353.
- [20] Marquez, L.G., Prado, M.M., Freire, J.T., 2009. Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits. *LWT – Food Science and Technology* 42(7): 1232-1237.
- [21] Peleg, M., 1988. An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science* 53: 1216-1217.
- [22] Kaptso, K.G., Njintang, Y.N., Komnek, A.E., Hounhouigan, J., Scher, J., Mbofung, C.M.F., 2008. Physical properties and rehydration kinetics of two varieties of cowpea (*Vigna unguiculata*) and Bambara groundnuts (*Voandzeia subterranean*) seeds. *Journal of Food Engineering* 86(1): 91-99.
- [23] Resio, A.C., Aguerre, R.J., Suarez, C., 2006. Hydration kinetics of amaranth grain. *Journal of Food Engineering* 72(3): 247-253.
- [24] Markowski, M., Bondaruk, J., Blaszcak, W., 2009. Rehydration behavior of vacuum-microwave-dried potato cubes. *Drying Technology* 27(2): 296-305.
- [25] Kaymak-Ertekin, F., 2002. Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers. *Journal of Food Science* 67: 168-175.
- [26] Maldonado, S., Arnau, E., Bertuzzi, M.A., 2010. Effect of temperature and pretreatment on water diffusion during rehydration of dehydrated mangoes. *Journal of Food Engineering* 96(3): 333-341.
- [27] Noshad, M., Mohebbi, M., Shahidi, F., Mortazavi, A.S., 2012. Kinetic modeling of rehydration in air-dried quinces pretreated with osmotic dehydration and ultrasonic. *Journal of Food Processing and Preservation* 36: 383-392.
- [28] Falade, O.K., Abbo, S.E., 2007. Air-drying and rehydration characteristics of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) fruits. *Journal of Food Engineering* 79(2): 724-730.