

## Makine Sıva Alçısının İnce Tabaka Infrared Kuruma Kinetiği, Karakteristiği ve Modellenmesi

Mehmet KALENDER

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, 23119 Elazığ  
mkalender@firat.edu.tr

(Geliş/Received:17.01.2017; Kabul/Accepted:13.02.2017)

### Özet

Bu çalışmada makine sıva alçısının kuruma davranışı ve modellenmesi incelenmiştir. Kuruma deneyleri bir infrared kurutucuda ve farklı kuruma sıcaklıklarında (50-70 °C) gerçekleştirilmiştir. Makine sıva alçısı örneklerinin fonksiyonel grupları FTIR analizleri ile belirlenmiş ve tipik alçı spektrumları elde edilmiştir. Makine sıva alçısının kuruma prosesinin düşük sıcaklıkta (50 °C) azalan hız periyodunda gerçekleştiği, yüksek sıcaklıklarda (60 ve 70 °C) ise başlangıç, sabit ve azalan hız periyotlarında meydana geldiği gözlenmiştir. Hesaplanan etkin difüzyon katsayısı değerleri  $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s mertebelerindedir. Deneysel nem oranı değerleri literatürde var olan türetilmiş model eşitlikleri (Newton, modifiye Page ve Difüzyon) ile istatistiksel olarak kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, makine sıva alçısının kuruma olayını en iyi temsil eden modelin türetilmiş Newton modellerinden biri olduğu bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Makine sıva alçısı, Infrared kurutma, Difüzyon katsayısı, Modelleme

## Thin Layer Infrared Drying Kinetics, Characteristics, and Modelling of Machine Plaster

### Abstract

This study presents investigation of infrared drying behaviour and modelling of machine plaster. The drying experiments have been carried out by using an infrared dryer at different drying temperature (50-70 °C). The functional groups of machine plaster samples have been determined by FTIR analyses. It was obtained that machine plasters studied have a typical gypsum FTIR spectra. While the drying process of machine plaster samples at the low temperature (50 °C) occurred in the falling rate period, the drying processes of those at the high temperatures (60 and 70 °C) occurred beginning, constant and falling periods. Effective diffusivities were in the order of  $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s. The experimental moisture ratio values were statistically fitted to the derived drying models named as Newton, Modified Page, and Diffusion in literature. As a result, it was found that the most available model for the infrared drying of machine plaster was one of the Newton models derived.

**Keywords:** Machine plaster, Infrared drying, Diffusivity, Modelling.

### 1. Giriş

Tüm alçı ürünlerinin başlangıç materyali jips olarak da adlandırılan gri-beyaz renkli maden minerali alçı taşıdır. Alçı taşının ana minerali bileşiminde iki molekül kristal suyu bulunduran kalsiyum sülfattır (CaSO<sub>4</sub>•2H<sub>2</sub>O). Su alçı taşının ağırlıkça yaklaşık % 20'sini oluşturur. Bu özellik yangına dayanıklı olma yönüyle inşaat endüstrisinde çok önemlidir [1]. Alçı taşı maden ocağından çıkarıldıktan sonra kırılır, kurutulur, un halinde olacak şekilde

öğütülür ve son olarak bünyedeki suyu uzaklaştırmak amacıyla kalsine edilir. Kalsine kireç taşı genellikle paris alçısı (plaster of paris) olarak adlandırılır. Kalsine kireç taşı kullanım amacına göre çeşitli ilave kimyasal ve katkı maddeleriyle karıştırıldıktan sonra paketlemeyle piyasaya sürülür [2]. En çok kullanılan alçı ürünleri arasında inşaat alçısı, perlitli sıva alçısı, makine sıva alçısı ve saten perdah alçı sayılabilir. Alçı ateşe dayanıklılık, iyi ses yalıtımı, hafiflik, düşük kurulum maliyeti, hızlı kurulum, kolay dekoratiflik ve çok yönlülük gibi

özellikleri ile inşaat alanında oldukça fazla kullanılır [1-4].

Alçı yapı materyali olarak boyadan önce kullanılan son yüzey kaplama ajanıdır. Bu kaplama direkt sıva, levha blok, alçıpen gibi farklı şekillerde yapılabilir [1]. Alçıpen ve bloklar halindeki alçı materyalleri kesme, kurutma, son ürün haline getirme ve paketlemeden oluşan sürekli proses ile üretilir [1, 5-7]. Görüldüğü gibi alçı ürünlerinin endüstriyel üretim proses basamaklarından biri kurutmadır. Kurutma son ürünün kalitesini önemli ölçüde etkileyen üretim basamağı olduğundan alçının kurutma olayı incelenmelidir.

Kurutma atmosferik şartlarda güneş enerjisi ile gerçekleştirilen geleneksel yöntemlerin yanında sıcak hava akımının kullanıldığı tepsili kurutucu ekipmanları gibi endüstriyel proseslerle de gerçekleştirilebilmektedir [8]. Infrared (IR) ve mikrodalga kurutma teknikleri son zamanlarda kullanılan modern kurutma tekniklerindedir. Geleneksel ve mikrodalga kullanımıyla çeşitli yapı malzemelerinin kurutulmasına ilişkin literatürde çok sayıda çalışma yapılmıştır [3, 9-13]. Alçı kurutulmasına ilişkin mikrodalga kurutma çalışması çok az olup IR ile alçı kurutmaya yönelik neredeyse çalışma yoktur.

Elektromanyetik radyasyon saçılma ve absorplama olmak üzere iki şekilde transfer olur. Saçılma yansıma, kırılma ve kırınım şeklinde meydana gelir. Absorpsiyonla transferde ise elektromanyetik ışın enerjisinin bir başka şekline dönüşür. İkinci mekanizma IR kurutma olayının temel mekanizması olan IR ışınmasının ısı enerjisine dönüşümüdür [14]. Gözenek yapısına sahip olmayan katılar IR ışınlarını yüzey tabakası halinde absorplarken, IR ışınları gözenekli materyallerde katının daha derin noktalarına kadar nüfuz eder. IR kurutmada nem içeriği önemli bir parametredir. Infrared kurutma yüksek ısı transfer katsayısı, kısa proses zamanı ve düşük enerji ihtiyacına sahip olma özellikleri ile geleneksel kurutmaya göre avantajlara sahiptir. IR ışınma havada geçirildiğinden kurutma prosesi hava ortamında yapılabilir [14-16].

Literatürde kurutma proseslerini tasarlamak, ölçek büyütme ve geliştirmede kullanılabilecek bazı eşitlikler mevcuttur. Bu eşitliklerden deneysel kurutma verilerinden yararlanarak model uyum analizi gerçekleştirilebilmektedir

[17-22]. Genellikle gıda materyallerinin kurutulma analizlerinde kullanılan bu eşitliklerin alçı kurutma çalışmalarında da kullanılabildiği gösterilmiştir [3].

Bu çalışmada, tuğla, beton, gazbeton, bimsblok vb. materyallerin üzerine doğrudan uygulanabilen makine sıva alçısının IR kuruma davranışı farklı kurutma sıcaklıklarında incelenmiştir. Ayrıca, deneysel kuruma verilerinin literatürde mevcut model eşitlikleriyle istatistiksel uyum analizi araştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Materyal

Deneysel çalışmalarda Elazığ'da üretim gerçekleştiren Aralçı şirketinden temin edilen makine sıva alçısı (MSA) örnekleri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan alçı örneklerinin ana oksitleri X-ray fluorescence (XRF, Thermo-Scientific ARL-9900 Series) ile belirlenerek Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 2'de ise Micromeritics® ASAP 2020 ile belirlenen BET yüzey alanı ve ortalama gözenek çapı, Quantachrome model MVP-1 He piknometresi ile ölçülen gerçek yoğunluk ve Malvern Mastersizer 2000 ile ölçülen ortalama partikül çapı değerleri mevcuttur.

### 2.2. Deneysel Prosedür

Deneysel çalışmalar Şekil 1'de gösterilen Shimadzu MOC63u marka halojen IR kurutucuda gerçekleştirildi. Çalışmalarda kullanılan MSA örneklerinin başlangıç nem içeriği değerleri 105 °C'de belirlendi. Kurutmanın gerçekleştirildiği ortamın relatif nemi PCE-555 hygrometre ile ölçüldü. Relatif nem değeri yaklaşık olarak % 15 idi. MSA 10 birim su 6 birim alçı ağırlık oranında su ile karıştırılarak harç hazırlandı. Bu harç iç çapı 1.3 cm uzunluğu (L) 1 cm olan poliamid malzemeden yapılmış halka şeklindeki kalıba döküldü. Kalıpla birlikte MSA harcı IR kurutucunun alüminyum kabına yerleştirildi. Kurutma deneyleri atmosferik şartlarda 50-70 °C aralığında gerçekleştirildi. Deneysel çalışmalar örneklerin belirli zaman aralıklarında tartım değerleri alınarak yürütüldü.

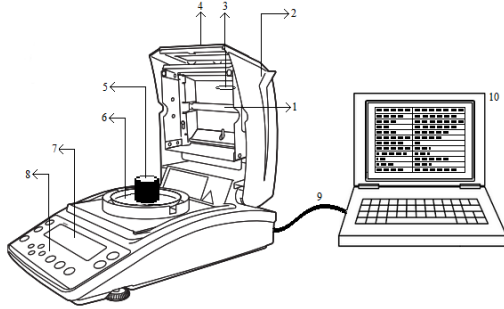
**Tablo 1.** MSA'a ait ana oksitler

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Others
1.71	0.34	0.23	38.81	0.98	46.03	0.44	0.05	11.46

**Tablo 2.** MSA' a ait bazı fiziksel özellikler

Katı yoğunluğu, $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Ortalama partikül çapı, $\bar{d}_p$ ( $\mu$ m)	Ortalama gözenek çapı, $d_g$ ( $\mu$ m)	BET yüzey alanı, $S_g$ (m <sup>2</sup> /g <sup>1</sup> )
2.360	194.398	0.03853	4.207

İki tartım değeri arasındaki fark yaklaşık olarak sabit oluncaya kadar tartım işlemine devam edildi. MSA örneklerinin kurutma öncesi ve sonrası yüzey özellikleri FTIR analizleri ile belirlendi (ATI Unicam Mattson 1000)



**Şekil 1.** Shimadzu MOC63u halojen IR kurutucu: (1) halojen lamba ısıtıcı, (2) ısıtıcı muhafazası, (3) sıcaklık sensörü, (4) gözetleme camı, (5) MSA örneği, (6) alüminyum terazi kabı, (7) görüntüleme paneli, (8) ayar düğmeleri, (9) veri aktarma kablosu, (10) bilgisayar.

### 2.3. Kurutmanın Teorisi ve Kuruma Model Eşitlikleri

Katı materyallerin nem içeriği (g su/g katı madde) aşağıdaki denklemle hesaplanabilir:

$$M = \frac{w_t - w_d}{w_d} \quad (1)$$

Burada,  $w_t$  nemli materyalin herhangi bir zamandaki ağırlığı (g) ve  $w_d$  ise katı maddenin ağırlığıdır [23]. Materyalin denge nemi değerini de içeren nem oranı değeri (MR) ise;

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

şeklinde. Burada  $M_0$ ,  $M_t$  ve  $M_e$  sırasıyla katı materyalin başlangıç, herhangi bir zaman ve denge nem içeriği değerleridir. Kurutma olayı için etkin difüzyon katsayısı Fick'in II yasasının çözümlenmesiyle hesaplanabilir.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_L t}{L^2}\right) \quad (3)$$

Burada,  $D_L$  etkin difüzyon katsayısı (m<sup>2</sup>/s),  $L$  difüzyon yolu (m) ve  $t$  zamandır (s). Eşit. 3'den görüldüğü üzere  $t-\ln(MR)$  grafiğinin eğiminden etkin difüzyon katsayısı belirlenebilir [24].

Deneyel nem oranı değerlerinin literatürde mevcut bazı eşitliklere lineer olmayan regresyonla uyum analizi gerçekleştirilerek kurutma olayını temsil eden matematiksel ifadeler saptanabilir. Bu amaçla literatürde alçı örneği için kullanılan model eşitliklerinden Modifiye Page, Difüzyon ve Newton eşitlikleri kullanılmıştır [3]. Pillai, 2013 [3] sadece tek bir sıcaklık için model analizi gerçekleştirmişti. Yine literatür çalışmaları kurutma model eşitliklerinin nem oranı değerini zamana ve sıcaklığa eşzamanlı olarak bağlayan eşitlikler haline dönüştürülmesinin de mümkün olduğunu göstermektedir. Burada, model sabitlerinin lineer, logaritmik, üstel, eksponansiyel, arrhenius vb. tip modellerle değiştiği varsayılmıştır [16, 25]. Bu çalışmada kullanılan model eşitlikleri Tablo 3'de verilmiştir. Model sabitlerini ve aşağıda verilen istatistiksel test parametrelerini (Ki-kare, RMSE ve RSS) belirlemek için lineer olmayan çoklu (multiple) regresyon analizleri STATISTICA programı ile yapılmıştır.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{deneyel,i} - MR_{hesaplanan,i})^2}{N - n} \quad (4)$$

**Tablo 3.** Bu çalışmada kullanılan türetilmiş kurutma model eşitlikleri

Model	Model No	Eşitlik
Modifiye Page	1	$MR = \exp(-((k_1 T^{k_2}) t)^{n_1 \exp(n_2 T)})$
	2	$MR = \exp(-((k_1 T^{k_2}) t)^{n_1 T^{n_2}})$
	3	$MR = \exp(-(k_1 \exp(k_2 T) t)^{n_1 \exp(n_2 T)})$
	4	$MR = \exp(-((k_1 \exp(k_2 T) t)^{n_1 T^{n_2}})$
Difüzyon	5	$MR = a_1 T^{a_2} \exp(-k_1 T^{k_2} t) + (1 - a_1 T^{a_2}) \exp(-k_1 T^{k_2} (b_1 T^{b_2}) t)$
	6	$MR = a_1 T^{a_2} \exp(-k_1 T^{k_2} t) + (1 - a_1 T^{a_2}) \exp(-k_1 T^{k_2} (b_1 \exp(b_2 T)) t)$
	7	$MR = a_1 \exp(a_2 T) \exp(-k_1 T^{k_2} t) + (1 - a_1 \exp(a_2 T)) \exp(-k_1 T^{k_2} (b_1 \exp(b_2 T)) t)$
	8	$MR = a_1 T^{a_2} \exp(-k_1 \exp(k_2 T) t) + (1 - a_1 T^{a_2}) \exp(-k_1 \exp(k_2 T) (b_1 T^{b_2}) t)$
	9	$MR = a_1 T^{a_2} \exp(-k_1 \exp(k_2 T) t) + (1 - a_1 T^{a_2}) \exp(-k_1 \exp(k_2 T) (b_1 \exp(b_2 T)) t)$
	10	$MR = a_1 \exp(a_2 T) \exp(-k_1 \exp(k_2 T) t) + (1 - a_1 \exp(a_2 T)) \exp(-k_1 \exp(k_2 T) (b_1 T^{b_2}) t)$
	11	$MR = a_1 \exp(a_2 T) \exp(-k_1 \exp(k_2 T) t) + (1 - a_1 \exp(a_2 T)) \exp(-k_1 \exp(k_2 T) (b_1 \exp(b_2 T)) t)$
Newton	12	$MR = \exp(-k_1 T^{k_2} t)$
	13	$MR = \exp(-k_1 \exp(k_2 T) t)$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{hesaplanan,i} - MR_{deneysel,i})^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

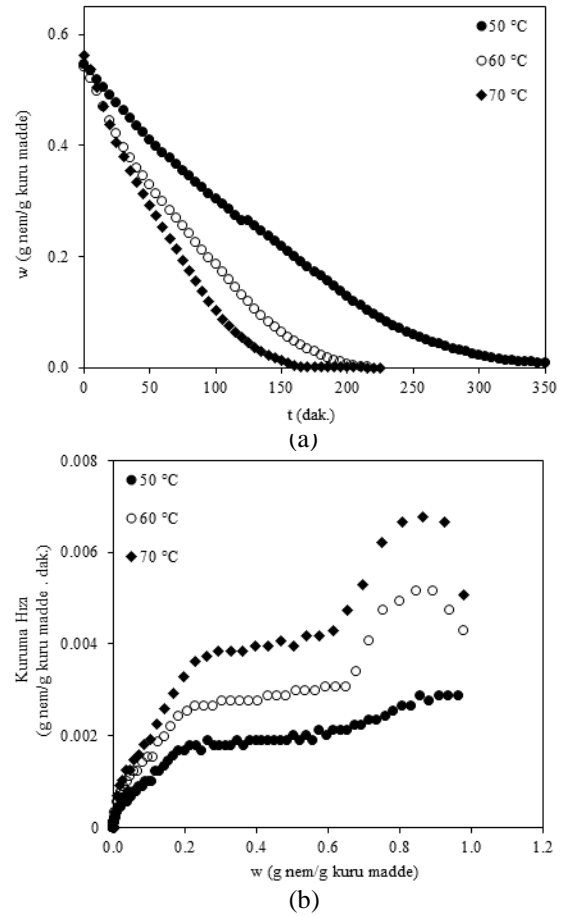
$$RSS = \sum_{i=1}^N (MR_{hesaplanan,i} - MR_{deneysel,i})^2 \quad (6)$$

Burada  $MR_{deneysel}$  ve  $MR_{hesaplanan}$  sırasıyla deneysel ve hesaplanan model eşitliklerinden hesaplanan ayrılabilir nem oranı değerleri, N hesaplamalarda kullanılan veri sayısı ve n ise model eşitliklerindeki sabit sayısıdır.

### 3. Sonuçlar ve Tartışma

#### 3.1. Kuruma Kinetiği ve Etkin Difüzyon Katsayısı

Su ile karıştırılarak hazırlanan MSA örneklerinin infrared kurutucuda çalışılan her bir sıcaklıkta zamanla ağırlık değişimleri kaydedilerek kuruma eğrileri (t-w) oluşturuldu. Şekil 2a'da gösterilen bu kuruma eğrilerinden sıcaklık arttıkça tüm zaman değerlerinde nem içeriği değerlerinin azaldığı görülmektedir. Tüm sıcaklıklarda nem içeriği değerlerinin belirli bir zaman sonra sifıra düştüğü de kuruma eğrilerinde göze çarpan bir diğer sonuçtur.



**Şekil 2.** Farklı sıcaklıklarda MSA örneklerine ait kuruma (a) ve kuruma hızı eğrileri (b)

Böylece tüm sıcaklık değerlerinde MSA örneklerinin denge nem içeriği değerlerinin sıfır olduğu belirlenmiştir ve bu değerler Eşit. 2’de verilen deneysel nem oranı (MR) değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Şekil 2b’de farklı sıcaklıklarda MSA için kuruma hızı eğrileri ( $w-dw/dt$ ) gösterilmiştir. Kuruma hız periyodunun saptanmasında kullanılan bu eğrilerden 50 °C’de MSA için kuruma olayının çift azalan hız periyodunda gerçekleştiği; buna karşın, 60 ve 70 °C sıcaklıklarında ise üç kuruma hızı periyodunun da (başlangıç, sabit hız ve çift azalan hız) meydana geldiği gözlenmiştir.

Çalışılan sıcaklıklarda Eşit. 3’den faydalanarak azalan hız periyodu bölgesi için  $t-\ln(MR)$  grafiklerinden lineer bir doğru elde edileceği bilgisi ile bu grafiklerin eğimlerinden etkin difüzyon katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Bu şekilde yapılan analiz sonucu MSA kuruma olayı için eğim, etkin difüzyon katsayısı ve regresyon katsayıları değerleri Tablo 4’de verilmiştir. Tablo 4’den görüldüğü gibi regresyon katsayıları oldukça yüksek doğrular elde edilmiştir. Difüzyon katsayılarının gözenekli katılardaki difüzyon katsayısı değerleri büyüklüğünde olduğu ve artan sıcaklıkla arttığı belirlenmiştir.

**Tablo 4.** MSA örneklerine ait farklı sıcaklıklardaki eğim, difüzyon katsayısı ve regresyon katsayısı değerleri

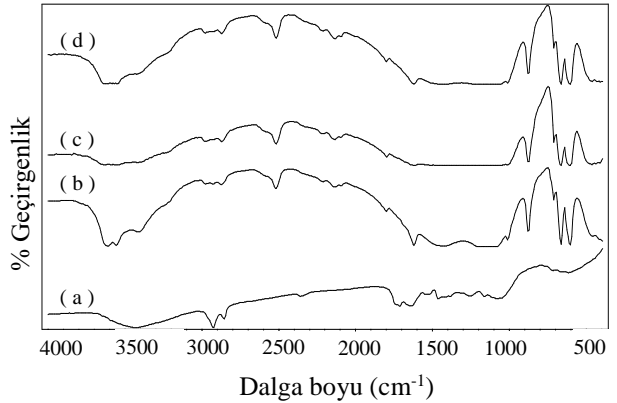
Sıcaklık (°C)	Eğim ( $-1 \times 10^3$ )	$D_L$ ( $\times 10^9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ )	$R^2$
50	6.6	1.1156	0.9931
60	11.3	1.9101	0.9911
70	15.1	2.5525	0.9901

Farklı üç sıcaklık değerindeki (Kelvin cinsinden) difüzyon katsayısı değerlerinin Arrhenius denklemi uyarınca aktivasyon enerjisi de hesaplanmıştır. Bu amaçla  $1/T-\ln D_L$  grafiği oluşturulmuştur. Grafik lineer bir doğru olup ( $R^2=0.9765$ ) eğiminden aktivasyon enerjisi 38.2186 kJ/mol bulunmuştur.

### 3.2. MSA Örneklerinin Materyal Karakterizasyon Sonuçları

MSA örneklerinin harç yapılmadan önce ham hali ve harç yapıp kurutulduktan sonraki yüzey özellikleri FTIR analizi ile belirlendi. FTIR sonucunda elde edilen spektrumlar Şekil

3’de gösterilmiştir. Alçı örnekleri için 602-672  $\text{cm}^{-1}$ , 1118-1142  $\text{cm}^{-1}$  ve 2112-2130  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyu aralıklarında  $\text{SO}_4$ ’ün farklı saçılma frekanslarının olduğu literatürde belirlenmiştir [26]. Ayrıca 1650  $\text{cm}^{-1}$  de H-O-H ve 3450  $\text{cm}^{-1}$ ’de O-H yapıları vardır [26, 27]. Şekil 3’den görüldüğü gibi ham materyalin ve çalışılan tüm sıcaklıklarda kurutulmuş örneklerin FTIR sonuçlarından yukarıda belirtilen dalga boyu ya da dalga boyu aralıklarında pikler görülmektedir. Bu durum alçı örneklerinin yapısal olarak tipik özelliklerinde olduğunu göstermektedir.



**Şekil 3.** MSA örneklerinin ham ve kurutulmuş haldeki FTIR spektrumları: (a) kuruma öncesi ham materyal, (b) 50 °C, (c) 60 °C, (d) 70 °C

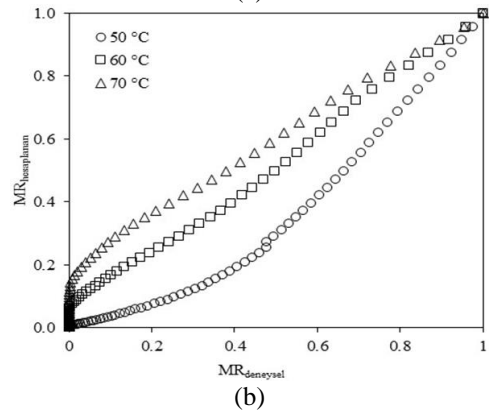
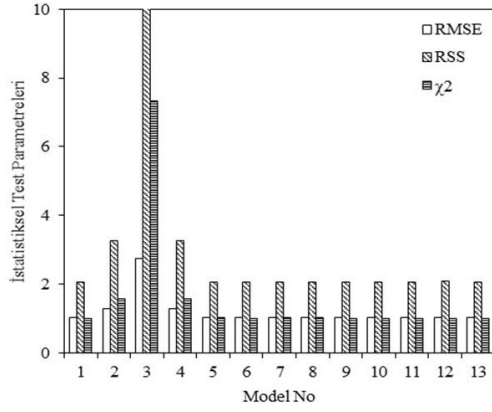
### 3.3. Modelleme Sonuçları

MSA örneklerinin IR kurutulması sonucu elde edilen deneysel nem oranı değerleri literatürde geliştirilen 13 farklı model eşitlikleri ile çoklu lineer olmayan regresyon analiz kullanılarak karşılaştırıldı (Tablo 3). Model eşitliklerine uyum analizleri STATİSTİCA programı ile gerçekleştirildi. Yapılan regresyon analizleri sonucunda elde edilen model sabitleri ve regresyon katsayısı değerleri ( $R^2$ ) Tablo 5’de verilmiştir. Tablo 5’den görüldüğü gibi regresyon katsayısı en yüksek model 1 nolu modeldir. İstatistiksel analiz sonucunda çalışılan model denklemleri için elde edilen RMSE, RSS ve  $\chi^2$  değerleri Şekil 4a’da gösterilmiştir. Şekil 4a’daki  $\chi^2$  değerleri 100 ile çarpılmıştır. İstatistiksel olarak özellikle  $\chi^2$  en belirleyici parametre olup en küçük  $\chi^2$  değerine sahip model en uyumlu modeldir [28]. Bunun yanında RMSE ve RSS değerlerinin de düşük olması gerekir.

**Tablo 5.** Çoklu lineer olmayan regresyon analizi sonucu hesaplanan model sabiti ve R<sup>2</sup> değerleri

Model No	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	n <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>
1	0.0079	0.0572	1.0124	0.0010	-	-	-	-	0.9724
2	0.0100	0.0061	0.8395	0.0806	-	-	-	-	0.9551
3	4.0010	-2.1551	0.2706	-0.0749	-	-	-	-	0.6863
4	0.0091	0.0013	0.8992	0.0392	-	-	-	-	0.9551
5	0.0501	0.2492	-	-	0.0578	0.000000059	0.0474	0.0602	0.9724
6	0.0394	0.2641	-	-	0.0532	0.2042	0.0585	0.0012	0.9723
7	0.0060	0.2071	-	-	0.9277	0.0059	0.0681	0.8374	0.9723
8	0.0614	0.0013	-	-	0.0504	0.0000	0.0620	0.1691	0.9722
9	0.0090	0.0016	-	-	0.9448	0.0000	0.1569	0.0115	0.9724
10	0.0891	0.0020	-	-	0.2329	-0.2782	0.0947	0.0001	0.9724
11	0.0891	0.0020	-	-	0.2329	-0.2782	0.0947	0.0001	0.9724
12	0.0042	0.2038	-	-	-	-	-	-	0.9720
13	0.0088	0.0018	-	-	-	-	-	-	0.9723

Şekil 4a incelendiğinde bu değerlerin en düşük olduğu modelin model 13 olduğu görülecektir.



**Şekil 4.** (a) MSA kurutulmasına ait farklı model eşitlikleri için istatistiksel analiz sonucu elde edilen RMSE, RSS ve  $\chi^2$  değerleri (b) Deneysel MR değerleri ile Model 13'den hesaplanan MR değerlerinin değişimi

Bu analize göre MSA kuruma olayı için nem oranını kuruma zamanı ve kurutma sıcaklığına bağlayan eşitlik Newton eşitliğinin türetilmiş halidir:

$$MR = \exp(-(0.0088 \exp(0.0018T))t) \quad (7)$$

Model 13'e göre deneysel ve hesaplanan MR değerlerinin değişimini gösteren bir grafik Şekil 4b'de gösterilmiştir. Şekil 4b'de görüldüğü gibi çalışılan her üç sıcaklık için de uyumlu olan modelde sıcaklıklar arasında en uyumlu sıcaklık 60 °C olarak elde edilmiştir.

#### 4. Semboller

- a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, n<sub>1</sub>, n<sub>2</sub>: Model sabitleri
- MSA : Makine Sıva Alçısı
- d<sub>g</sub> : Ortalama gözenek çapı (µm)
- d<sub>p</sub> : Ortalama partikül çapı (µm)
- D<sub>L</sub> : Etkin difüzyon katsayısı (m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>)
- M : Nem içeriği (g nem / g kuru madde)
- M<sub>e</sub> : Denge nem içeriği (g nem / g kuru madde)
- MR : Boyutsuz nem oranı (-)
- MR<sub>deneysel</sub>: Deneysel boyutsuz nem oranı (-)
- MR<sub>hesaplanan</sub>: Modellerden hesaplanan boyutsuz nem oranı (-)
- M<sub>t</sub> : Herhangi bir zaman nem içeriği (g nem / g kuru madde)
- M<sub>0</sub> : Başlangıç anındaki nem içeriği (g nem / g kuru madde)
- L : Didüzyon yolu ya da mesafesi (m)
- N : Deneysel çalışmalarda zamanla elde edilen veri sayısı
- R : İdeal gaz sabiti (J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)
- S<sub>g</sub> : BET yüzey alanı
- t : Zaman (dak.)
- T : Sıcaklık (°C, K)
- w<sub>d</sub> : Katının kuru madde ağırlığı (g)
- w<sub>t</sub> : Nemli materyalin herhangi bir andaki ağırlığı (g)

#### Yunan Harfleri

$\rho_s$  : Katı madde yoğunluğu (g cm<sup>-3</sup>)

## 5. Kaynaklar

1. Merritt, F.S., Ricketts, J.T., Building design and construction handbook, Citeseer, 2001.
2. Handbook, G.C., Centennial Edition, 2000, United States Gypsum Company/All USA, 125 South Franklin Street, Chicago, IL 60606-4678, in.
3. Pillai, M.G., Thin layer drying kinetics, characteristics and modeling of plaster of paris, Chemical Engineering Research and Design, 91 (2013) 1018-1027.
4. Pundir, A., Garg, M., Singh, R., Evaluation of properties of gypsum plaster-superplasticizer blends of improved performance, Journal of Building Engineering, 4 (2015) 223-230.
5. Gonçalves, M.C., Margarido, F., Materials for Construction and Civil Engineering: Science, Processing, and Design, Springer, 2015.
6. web-1: Using Gypsum Board for Walls and Ceilings Section I. <https://www.gypsum.org/technical/using-gypsum-board-for-walls-and-ceilings/using-gypsum-board-for-walls-and-ceilings-section-i/#economy> (accessed 14.09.16)
7. Web-2: Drying type of Paper Faced Gypsum Board. [http://www.lvjoe.com/en/cpzs/PU\\_machine/432.html](http://www.lvjoe.com/en/cpzs/PU_machine/432.html) (accessed 14.09.16)
8. McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriott, P., Unit operations of chemical engineering, McGraw-Hill New York, 1993.
9. Bennamoun, L., Kahlerras, L., Michel, F., Courard, L., Salmon, T., Fraikin, L., Belhamri, A., Léonard, A., Determination of moisture diffusivity during drying of mortar cement: experimental and modeling study, International Journal of Energy Engineering, 3 (2013) 1-6.
10. Franzen, C., Zöttl, M., Trommler, U., Hoyer, C., Holzer, F., Höhlig, B., Roland, U., Microwave and radio wave supported drying as new options in flood mitigation of imbued decorated historic masonry, Journal of Cultural Heritage, in press, (2016).
11. Ganesapillai, M., Regupathi, I., Murugesan, T., An empirical model for the estimation of moisture ratio during microwave drying of plaster of paris, Drying Technology, 26 (2008) 963-978.
12. Ganesapillai, M., Regupathi, I., Murugesan, T., Characterization and process optimization of microwave drying of plaster of Paris, Drying technology, 26 (2008) 1484-1496.
13. Neto, A.A.M., Cincotto, M.A., Repette, W., Mechanical properties, drying and autogenous shrinkage of blast furnace slag activated with hydrated lime and gypsum, Cement and Concrete Composites, 32 (2010) 312-318.
14. Sandu, C., Infrared radiative drying in food engineering: a process analysis, Biotechnology progress, 2 (1986) 109-119.
15. Nowak, D., Lewicki, P.P., Infrared drying of apple slices, Innovative Food Science & Emerging Technologies, 5 (2004) 353-360.
16. Toğrul, H., Suitable drying model for infrared drying of carrot, Journal of food engineering, 77 (2006) 610-619.
17. Doymaz, I., Pala, M., The effects of dipping pretreatments on air-drying rates of the seedless grapes, Journal of Food Engineering, 52 (2002) 413-417.
18. Yaldiz, O., Ertekin, C., Uzun, H.I., Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes, Energy, 26 (2001) 457-465.
19. Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z., A new model for single-layer drying, Drying technology, 20 (2002) 1503-1513.
20. Yagcioglu, A., Degirmencioglu, A., Cagatay, F., Drying characteristic of laurel leaves under different conditions, in: Proceedings of the 7th international congress on agricultural mechanization and energy, Faculty of Agriculture, Cukurova University, Adana, Turkey, 1999, pp. 565-569.
21. Toğrul, İ.T., Pehlivan, D., Modelling of drying kinetics of single apricot, Journal of Food Engineering, 58 (2003) 23-32.
22. Yoğurtçu, H., Determination of Drying Kinetics of Tunceli Garlic with Microwave Drying Technique, Tarım Bilimleri Dergisi, 22 (2016) 237-248.
23. Geankoplis, C., Transport processes and separation process principles (includes unit operations), Prentice Hall Press, 2003.
24. Crank, J., The mathematics of diffusion, Oxford university press, 1979.
25. Toğrul, H., Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices, Journal of Food Engineering, 71 (2005) 311-323.
26. Hass, M., Sutherland, G., The infra-red spectrum and crystal structure of gypsum, in: Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, The Royal Society, 1956, pp. 427-445.
27. Seidl, V., Knop, O., Falk, M., Infrared studies of water in crystalline hydrates: gypsum, CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, Canadian Journal of Chemistry, 47 (1969) 1361-1368.
28. SPIEGEL, M.R., Larry J, Stephens, İstatistik,(çev. Ed. Alptekin Esin ve Salih Çelebioğlu), Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, (1999).