

## ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

Ebru MANÇUHAN<sup>1</sup>, Selin ÖZEN<sup>2</sup>, Perviz SAYAN<sup>2</sup>, Sibel TİTİZ SARGUT<sup>2</sup>,  
Gamze E. CİĞER<sup>2</sup>, Buğçe ÖZOĞUL<sup>2</sup>

### YAŞ TUĞLA KURUTMA PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

#### ÖZ

Bu çalışmada, kil içeriği farklı (%40, 50 ve 60) yaş tuğla numuneleri laboratuvar ölçekli tünel kurutucuda farklı kurutma havası sıcaklıkları (50, 60 ve 70 °C) ve hızlarında (1,13; 1,52; 1,66 m/s) kurutulmuştur. Deneysel sonuçları incelendiğinde, herhangi bir kil içeriğine sahip numunelerde kurutma havası sıcaklığı artışıyla kuruma süresinin azaldığı görülmüştür. Kil içeriği %40 olan numune için kurutma havası sıcaklığı 50 °C'de kuruma süresi 280 dakika, 70 °C'de ise 170 dakika olarak ölçülmüştür. Numune kil yüzdesi artışıyla kurutma süresinin arttığı görülmüştür. Kurutma havası sıcaklığı 50 °C ve hızı 1,13 m/s olduğu koşulda en düşük kil (%40) içerikli numunenin kuruma süresi 280 dakika iken en yüksek kil (%60) içerikli numuneninki 315 dakika olarak belirlenmiştir. Kurutma havası sıcaklığı numune kuruma küçülmesini etkilemiştir. Kurutma havası hızı 1,13 m/s iken kil içeriği %40 olan numune, 50 °C'de kurutulduğunda toplam kuruma küçülmesi %5,90, 70 °C'de ise %4,89 olarak ölçülmüştür. TS 2514 standardına göre kurutulmuş numunelerin eğilme dayanımı en az 1 MPa olmalıdır. Numunelerin test sonuçları incelendiğinde, tüm kurutma parametreleri için eğilme dayanımlarının 1 MPa'dan yüksek olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Tünel kurutucu, Yaş tuğla, Kurutma parametreleri.

### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DRYING PARAMETERS OF WET BRICKS

#### ABSTRACT

In this study, wet brick samples with different clay contents (40, 50 and 60%) were dried at various drying air temperatures (50, 60 and 70 °C) and velocities (1.13; 1.52; 1.66 m/s) in a laboratory scale tunnel dryer. The results indicated that increasing air temperature reduces drying time at any clay content of the brick body. Drying times were obtained as 280 and 170 minutes at drying air temperatures of 50 and 70 °C for sample with 40% clay content, respectively. Increasing clay percentage in wet brick body resulted in an increase of the drying time. At drying air conditions (50 °C, 1.13 m/s), the sample with the lowest clay content (40%) had 280 minutes drying time whereas the highest clay content one (60%) had 315 minutes drying time. The drying air temperature also affected sample's drying shrinkage. Drying air temperatures increased from 50 to 70 °C, total drying shrinkage decreased from 5.90% to 4.89% (40% clay content and 1.13 m/s air velocity), respectively. According to TS 2514, flexure strength has to be at least 1 MPa for dried bricks. When all test results were examined, they had been seen that the flexure strength values were quite higher than 1 MPa.

**Keywords:** Tunnel dryer, Wet brick, Drying parameters.

<sup>1</sup> Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü Kadıköy/İSTANBUL, 34722

E- posta: emanuhan@marmara.edu.tr

<sup>2</sup> Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Kadıköy/İSTANBUL, 34722

**Geliş:** 30 Eylül 2014 **Düzeltilme:** 21 Kasım 2014 **Düzeltilme:** 25 Ocak 2015 **Kabul:** 26 Ocak 2015

## 1. GİRİŞ

Tuğla, killi toprağın su ile hamur şekline getirilip, şekillendirildikten ve kurutulduktan sonra özel ocak ve fırınlarda yüksek sıcaklıklarda (900–1300 °C) pişirilmesi ile elde edilen bir malzemedir. Kil minerali içeren, yeterli miktarda su katıldığında plastikleşerek şekillendirilme özelliğine sahip olan, kurutma ve pişirmeyle çatlamadan sertleşebilen topraklar, tuğla hammaddesi olarak kabul edilmektedir (DPT, 2008). Hammadde hazırlama aşaması sonunda şekillendirmeye uygun bir nitelik kazandırılan hamur, değişik yöntemler kullanılarak şekillendirilmektedir. Şekillendirilmiş tuğlaların pişirme öncesi belirli bir mukavemet kazanması ve pişirme sırasında şekil değiştirerek çatlamasının önlenmesi için kurutulması gerekmektedir (Kornmann, 2007). Kurutma işleminde yaş tuğlaların kusursuz olarak kurutulmasının sağlanabilmesi için kurutma havasının en uygun sıcaklık, nem ve hız değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Yaş tuğla numuneleri kurutma işlemi üç periyotta gerçekleşmektedir. *Ön-ısıtma periyodunda* numune yüzey sıcaklığı, kurutma havasının ıslak termometre sıcaklığına kadar ısınır. Bu periyotta yaş tuğladan önemli bir nem kaybı söz konusu değildir. Kurutmanın ikinci aşaması olan *sabit hızlı kurutma periyodunda* numune yüzeyinin tamamıyla ıslak kaldığı ve numunenin yüzey sıcaklığının yaş termometre sıcaklığında sabit kaldığı kabul edilir. *Azalan hızlı kurutma periyodunda* ise numunenin hem yüzeyinde hem de içerisinde sıcaklık artışı görülmektedir. Kurutmanın hızı aşamalı olarak düşmeye başlarken bu periyot için gerekli zaman oldukça uzundur (Geankoplis, 1993; Kowalski, 2003).

Konu ile ilgili olarak literatürde Kowalski ve ark. (2007) tarafından yapılan bir çalışmada laboratuvar ölçekli bir kurutucuda, dört farklı sabit hava sıcaklığında (41,5; 50,8; 60,4 ve 82,7 °C) kilden yapılmış silindirik numunelerde yüzey sıcaklık değişimleri ve kuruma hızları ölçülmüştür. Kowalski ve ark. (1997) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise kurutulan malzemelerde çatlak ve deformasyonun oluşmadığı optimum kurutma koşulları (kurutma havası sıcaklığı, nemi ve hızı) belirlenmiştir. Hasatani ve ark. (1993) laboratuvar ölçekli bir kurutucuda küresel ve dikdörtgen prizması biçimindeki numunelerde kuruma küçülme davranışının, kurutma havası sıcaklık ve hızından etkilendiğini belirlemişlerdir.

Tuğla üretiminin en önemli aşaması olan kurutma işleminde uygun kurutma koşulları sağlanmadığında tuğlada çatlama ve dağılmalar meydana gelebilmekte, bu ise hem ürün hem de enerji kaybına neden olarak prosesin verimliliğini düşürmektedir. Bu çalışmada, tuğla fabrikasından temin edilen kil içeriği farklı yaş tuğlalarda kurutma havasının farklı sıcaklık ve hızları için en az enerji tüketilen en uygun kurutma koşulları araştırılmıştır. Bu amaçla, laboratuvar ölçekli tünel kurutucuda gerçekleştirilen deneyler ile yaş tuğlaların kurutma davranışları incelenmiş ve sonuçları tartışılmıştır.

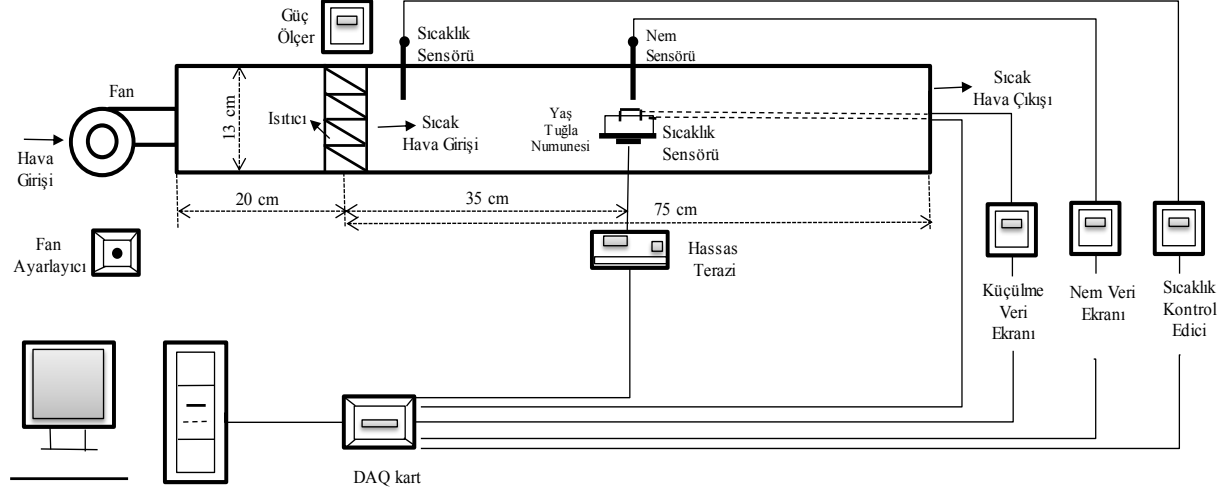
## 2. MATERYAL ve YÖNTEM

### 2.1. Deney Düzenegi

Yaş tuğla numunelerinin kuruma davranışlarının incelenmesi için kullanılan 125 cm<sup>3</sup> hacmindeki laboratuvar ölçekli tünel tipi kurutucunun çapı 13 cm, toplam uzunluğu 95 cm'dir (Şekil 1). Kurutucu; hava hazırlama ünitesi, kurutma tüneli ve kontrol ünitesi olmak üzere üç ana birimden oluşmaktadır. Ortam havası, 32 W güç ve 85 m<sup>3</sup>/h kapasiteye sahip bir fan (Ebmpapst marka, Almanya) ile kurutucuya gönderilmektedir.

Kurutma havası, hava hazırlama ünitesinde bulunan 500 kW gücündeki elektriksel ısıtıcı yardımıyla ısıtılmaktadır. Isıtılan havanın sıcaklığı Pt100 sıcaklık sensörü tarafından ölçülerek dijital kontrol edici (Omron marka, model E5AK-T, Japonya) ile kontrol edilmektedir. Fan yardımıyla sisteme gönderilen hava, elektrikli ısıtıcıdan geçerek kurutma tüneli içerisinde sıcak hava girişinden 35 cm uzaklığa konumlandırılmış yaş tuğla numunesine ulaşmaktadır. Tünel tipli kurutucunun diğer ana birimi olan kurutma tüneli 75 cm uzunluğundadır. Bu kısım sıcaklık ve kütle ölçümleri için Pt100 sıcaklık sensörü, nem sensörü ve hassas terazi (Boecco marka, 0,01 gr hassasiyet, Almanya) içermektedir. Numune, hassas terazi üzerine bağlı kurutma tüneli içerisinde bulunan kefe üzerine yerleştirilmektedir.

Kurutma deneylerine başlamadan önce, fan ayar düğmesi açılarak havanın istenilen hıza gelerek sabitlenmesi sağlanmaktadır. Elektrikli ısıtıcı ile ısıtılan havanın sıcaklığı, PID kontrolü ile istenilen deney koşullarında sabit tutulmaktadır. Sistem kararlı hal koşullarına geldiğinde, küçük tel kafes üzerindeki yaş tuğla numunesi terazi kefesine üzerine yerleştirilmekte ve kurutma başlatılmaktadır. Numune kütleindeki ve boyutundaki değişim, giriş havası ve numune sıcaklığı, kurutucu içerisindeki havanın nemi deney süresince kaydedilmektedir.



Şekil 1. Laboratuvar ölçekli tünel kurutucu

## 2.2. Ölçümler

### 2.2.1. Kurutma Havası

**Hız:** Optik sensör ile devri ölçülen fanın, devir -pompalama kapasite eğrisi ve hava akış kesit alanından faydalanılarak kurutucuya gönderilen havanın hızı hesaplanmıştır. Hava hızı, 1,13; 1,52; 1,66 m/s olarak üç farklı hızda ayarlanmış ve hava hızı deneylerde sabit tutulmuştur. Hava hızları, kurutucu içerisindeki hassas terazinin stabilitesini etkilemeyecek şekilde seçilmiştir.

**Sıcaklık:** Kurutma havasının sıcaklığı, bir termokupl içeren dijital sıcaklık göstergesi ile gözlenmektedir. Deney süresince, kurutma tüneli içerisinde havanın sıcaklık değişimi  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$  hassasiyette Pt100 sıcaklık sensörü yardımıyla her 20 saniye için ölçülerek kontrol edilmektedir. Platin rezistanslar ile ölçülen sıcaklıklar veri toplama kartı (DAQ kart (Data Acquisition Card)) (MCC marka, USA) ile bilgisayar belleğine iletilmekte ve yüksek performanslı programlanabilir bir dijital kontrol edici (Omron, model E5AK-T, Japonya) yardımıyla kontrol edilip bilgisayara kaydedilmektedir.

**Nem:** Kurutucu içerisindeki havanın bağıl nemi belirli bir değere ayarlanmamıştır. Mevcut deney koşullarındaki havanın bağıl nemi, nem sensörü (Cole-Palmer, model 610, USA) yardımıyla ölçülerek 5 dakikalık aralıklarla bilgisayara kaydedilmiştir.

### 2.2.2. Numune

Çalışmada kullanılan numuneler uzun ve kısa olmak üzere iki farklı formda İstanbul'daki bir tuğla fabrikasından temin edilmiştir. Üç farklı kil içeriğinde (%40, 50 ve 60) hazırlanan yaş tuğla numuneleri başlangıçta  $0,26 \pm 0,02 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$  kuru tuğla nem içermektedir. Boyutları dijital kumpas ile tespit edilen 70 mm uzunluk, 40 mm genişlik ve 18 mm kalınlıktaki kısa yaş numuneler  $90 \pm 5 \text{ gr}$  ağırlığındadır. Boyutları 210 mm uzunluk, 20 mm genişlik ve 15 mm kalınlıktaki uzun yaş numuneler  $160 \pm 5 \text{ gr}$  ağırlığındadır. Uzun numunelere, kurutma işlemi bittikten sonra eğilme dayanımlarını tespit etmek için üç nokta eğme testi uygulanmıştır.

**Nem içeriği tayini:** Kurutma deneylerine başlamadan önce, kısa ve uzun yaş tuğla numunelerinden 10 mm kalınlığında numuneyi temsil eden parçalar kesilmiştir. Her parçanın kuru bazdaki nem içeriği ASTM C324-01'e göre "etüvde kurutma yöntemi" ile saptanmıştır (ASTM, 2007). Bu yöntemde 10 mm kalınlığında kesilen parçaların kütleleri etüvde kurutma öncesinde hassas terazide (Mettler Toledo marka, AG285 model, 0,001 gr hassasiyet, Almanya) tartılır ve ölçümler kaydedilir. Cam petri kabına konulan parçalar, önceden  $100 \pm 5$  °C sabit sıcaklığa ayarlanmış etüvde (Binder marka, Almanya) kütleleri sabit hale gelinceye kadar (24 saat) kurutulur. Etüv çıkışı kuru parça kütlesi ve işlem öncesindeki yaş parça kütlesi arasındaki farktan numunedeki su miktarı hesaplanır. Bu miktarın kuru kütle miktarına bölünmesiyle kuru bazda numune nem içeriği Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanır.

$$MC_{db} = \frac{W_0 - W_d}{W_d} \quad (1)$$

Numunenin kuru bazda nem içeriği  $MC_{db}$ , numuneyi temsil eden parçanın başlangıç kütlesi  $W_0$  (gr), kuru kütlesi ise  $W_d$  (gr)'dir.

**Kütle:** Hassas bir terazinin (Boeco marka, 0,01 gr hassasiyet, Almanya), metal tutucu ile tünel kurutucuya bağlantısı yapılmıştır. Numune kurutucu içerisindeki terazinin kefesine bir tel kafes üzerinde yerleştirilmektedir. Kurutma sırasında numunenin anlık kütle değişimi hassas terazi ile 5 dakikada bir ölçülüp kaydedilmektedir.

**Yüzey sıcaklığı:** Kurutma süresince numune yüzey sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Numune yüzey sıcaklığının anlık değişikliklerini izlemek amacıyla 3 mm çapında platin sensör numunenin merkezine yerleştirilmiştir. Pt100 sıcaklık sensörü, numune sıcaklığını  $\pm 0,1$ °C hassasiyetinde 20 saniyede bir ölçmektedir. Ölçülen sıcaklık değerleri veri toplama cihazı (MCC marka, USA) ile bilgisayara iletilmektedir. DAQ kart ve yazılım ile donatılmış bilgisayarda veriler kaydedilmektedir.

**Kuruma küçülmesi:** Dikdörtgenler prizması formundaki numunenin uzun kenarına (60 mm) kuruma küçülmesini ölçen elektronik cihaz yerleştirilmiştir. Deney süresince bu kenardan 5 dakikalık aralıklarla ohmik direnç değişimleri ölçülmektedir. Ölçülen direnç değerleri uzunluk birimine (mm) dönüştürülmektedir. Kuruma küçülmesi ASTM, C326-09'a göre uzun kenar için Eşitlik 2 ile hesaplanmıştır (ASTM, 2009).

$$S_d = \frac{L_0 - L}{L_0} \times 100 \quad (2)$$

Eşitlik 2'de herhangi bir andaki kuruma küçülmesi  $S_d$  (%), numune uzun kenarı başlangıç uzunluğu  $L_0$  (mm), herhangi bir anda numune uzun kenarının kuru uzunluğu  $L$  (mm) olarak belirtilmiştir.

**Üç nokta eğme testi:** Üç nokta eğme testi genellikle malzemenin eğilme dayanımının belirlenmesi için kullanılmaktadır. Test, 200x20x15 mm boyutlara sahip kurutulmuş numunelere uygulanmıştır. Üç nokta eğme test cihazı ile kopmaya neden olan maksimum yük miktarı tespit edilmiştir. Numune iki nokta üzerine temas edecek şekilde test düzeneğine yatay olarak konulur (alt destek noktası) ve ardından numune kırılıncaya kadar üzerine tek noktadan (üst destek noktası) yük uygulanır. Kaydedilen maksimum yük numunenin eğilme dayanımını vermektedir. Eğilme dayanımı aynı zamanda kopma modülü, eğme dayanımı ve kırılma dayanımı olarak da bilinmektedir. Numune eğilme dayanımı ASTM, C67-13a'ya göre Eşitlik 3 ile hesaplanmıştır (ASTM, 2013).

$$M = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3)$$

Numune eğilme dayanımı  $M$  (MPa), cihazın uyguladığı maksimum yük  $P$  (kg), destekler arası mesafe  $L$  (mm), numune genişliği  $b$  (mm), ve derinliği  $d$  (mm) olarak belirtilmiştir.

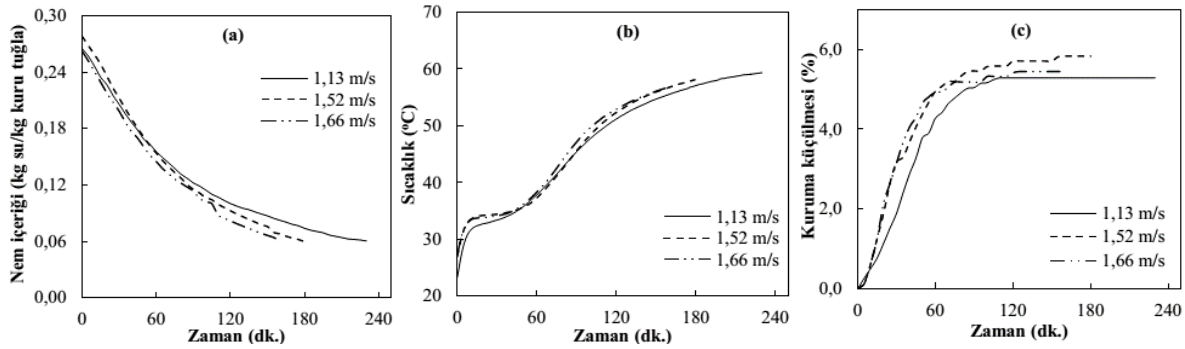
### 3. BULGULAR

Yaş tuğlaların kurutulması; kurutma havası sıcaklığı, hızı ve nemi gibi çevresel faktörlere bağlıdır. Ayrıca numune büyüklüğü, şekli ve kil içeriği gibi numune özellikleri de kurutmayı etkilemektedir (Kowalski, 2003). Bu çalışmada, yaş tuğla kurutma karakteristiklerine kurutma havası parametreleri ve tuğla kil içeriğinin etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Kil içeriği farklı (%40, 50 ve 60) yaş tuğla numunelerinin, kurutma havasının farklı sıcaklık (50, 60 ve 70 °C) ve hızlarında (1,13; 1,52; 1,66 m/s) kurutulmasıyla elde edilen toplam kuruma küçülmesi, toplam kuruma süresi ve eğilme dayanım değerleri gibi özelliklerinin deneysel sonuçları Tablo 1’de görülmektedir.

#### 3.1. Kuruma Davranışına Hava Hızının Etkisi

Kil içeriği %40 olan numunelerin 60 °C sabit kurutma havası sıcaklığında farklı kurutma hava hızlarındaki (1,13; 1,52; 1,66 m/s) kuruma davranışı incelenerek hava hızının kurutma karakteristiklerine etkisi belirlenmiştir.

Bu çalışmada, yaş tuğla kuruma süresi, kurutucudan çıkartılan numune nem içeriğinin 0,06 kg H<sub>2</sub>O/kg kuru tuğla olması için geçen zaman olarak tanımlanmıştır (Vellhuis ve Denissen, 1997). Bu tanıma göre belirlenen kuruma süresinin, kil içeriği %40 olan numuneler 60 °C’lik kurutma havası ile kurutulduğunda, hava hızı arttıkça azaldığı görülmektedir (Şekil 2a). Şekil 2b’de, farklı kurutma hava hızlarında %40 kil içerikli numune yüzey sıcaklıklarının birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Kurutma havası 60 °C’de kurutulan %40 kil içerikli numunelerin hava hızı 1,13’den 1,66 m/s’ye artırılınca kuruma küçülme miktarı, %5,29’dan %5,45’e artmıştır (Şekil 2c). Dolayısıyla kurutma havası hızı arttıkça numune kuruma küçülmesinin de arttığı gözlenmiştir. Kurutulan numunelerin eğilme dayanımlarının, değişik kurutma havası hızlarında TS 2514’te belirtilen minimum değer 1 MPa’dan yüksek olduğu ve kurutma hava hızlarından etkilenmediği görülmüştür (TS, 1977).



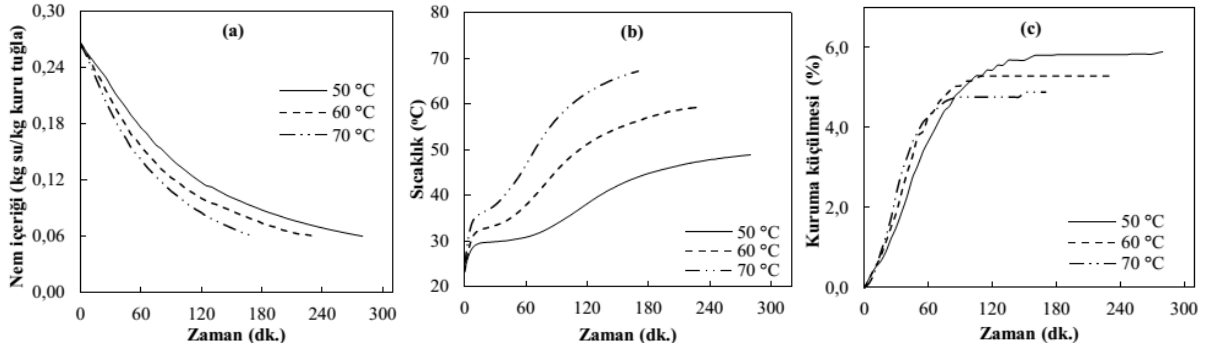
Şekil 2. Farklı kurutma hava hızlarında yaş tuğla numune (a) nem içeriğinin, (b) yüzey sıcaklığının ve (c) kuruma küçülmesinin zamana bağlı değişimi (Numune kil içeriği %40, kurutma hava sıcaklığı 60 °C’dir.)

Tablo 1. Farklı kil içeriğindeki numunelerin farklı kurutma havası parametrelerindeki kuruma özellikleri

Kil içeriği (%)	Kurutma havası parametreleri		Toplam kuruma küçülmesi (%)	Toplam kuruma süresi (dk.)	Eğilme dayanımları (MPa veya N/mm <sup>2</sup> )
	Sıcaklık (°C)	Hız (m/s)			
40	50	1,13	5,90	280	2,7
		1,13	5,29	230	2,9
	60	1,52	4,64	170	3,1
		1,66	5,45	160	2,8
		1,13	4,89	170	1,9
50	50		6,02	300	4,3
	60	1,13	5,42	250	3,7
			5,15	185	3,9
60	50		6,68	315	5,7
	60	1,13	5,78	280	4,9
			5,29	175	2,4

### 3.2. Kuruma Davranışına Hava Sıcaklığının Etkisi

Numune (%40 kil içeren) kuruma süresi 50, 60 ve 70 °C’de sırasıyla 280, 230 ve 170 dakika olarak belirlenmiştir (Şekil 3a). Uzun sürede kurutulan numune (50 °C’de 280 dakika) yüzey kalitesinin hızlı kurutulan numuneye (70 °C’de 170 dakika) göre daha iyi olduğu gözlenmiştir. Şekil 3b’de tüm kurutma sıcaklıkları için kurutma prosesinin; ön ısıtma, sabit hızlı ve azalan hızlı kurutma periyotlarının özellikleri belirgin olarak görülmektedir. Ön ısıtmada, numunenin sıcaklığı bir miktar artarken nem kaybı düşük olmuştur, sabit hızlı kurutma periyodunda tuğla yüzey sıcaklığı sabit kalmıştır. Azalan hızlı kurutma periyodunda ise tuğla yüzey sıcaklığı artarak tuğla neminin kurutma havasına transferi sağlanmıştır. Şekil 3a ve 3b birlikte incelendiğinde 1,13 m/s kurutma havası hızında kurutma havası sıcaklığı arttıkça kuruma süresinin azaldığı görülmüştür (Tablo 1).



Şekil 3. Farklı kurutma hava sıcaklıklarında yaş tuğla numune (a) nem içeriğinin, (b) yüzey sıcaklığının ve (c) kuruma küçülmesinin zamana bağlı değişimi (Numune kil içeriği %40, kurutma hava hızı 1,13 m/s’dir.)

Tuğla kuruma küçülmeleri, homojen ve dengeli olmuyorsa tuğlada çatlama, kırılma veya dağılma meydana gelmektedir. Kuruma küçülmesinin kil içerikli malzemelerde %8’den küçük olması istenmektedir (Kornmann, 2007). Kurutma havası sıcaklığının, kuruma küçülmesi davranışına etkisi Şekil 3c’de verilmiştir. Kil içeriği %40 olan numunelerin kurutma prosesi sonunda yapılarında meydana gelen kuruma küçülmeleri 50 °C’de %5,90, 60 °C’de %5,29 ve 70 °C’de %4,89 olarak ölçülmüştür. Toplam kuruma küçülmesi, kurutma havası sıcaklıkları 50, 60 ve 70 °C’de iken sırasıyla 280, 230 ve 170 dakika sonunda tamamlanmıştır (Şekil 3c, Tablo 1). Deneysel sonuçlar, kurutma havası sıcaklığı arttıkça kuruma küçülmesinin azaldığını göstermiştir.

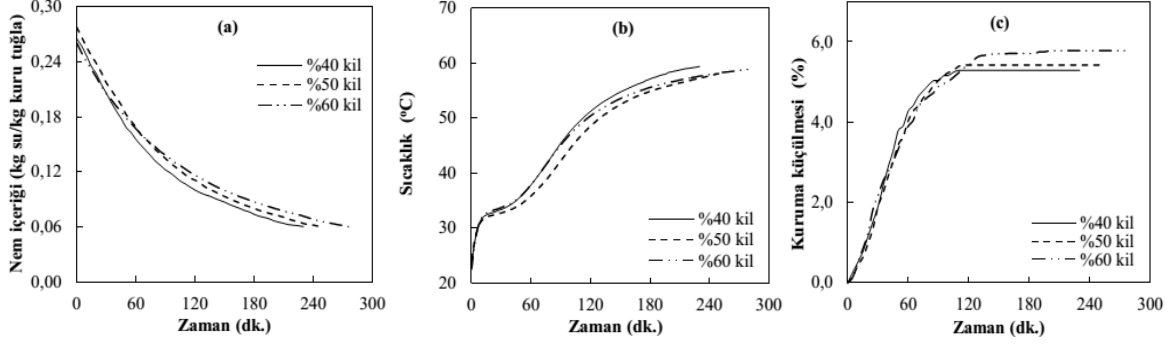
Kurutulmuş tuğla numunelerinin eğilme dayanımları, artan hava sıcaklığıyla azalmaktadır. Örneğin, kurutucu içerisindeki hava sıcaklığı 50 °C’den 70 °C’ye artırıldığında %40 kil içeren numunelerin eğilme dayanımları sırasıyla 2,7 MPa’dan 1,9 MPa’ya azalmaktadır. Hava sıcaklığının diğer kil içeriklerinin (%50 ve %60) kurumasına olan etkilerinde de benzer sonuçlar görülmüştür (Tablo 1).

### 3.3. Tuğla Malzemesinin Kuruma Davranışına Etkisi

Şekil 4a incelendiğinde, kurutma havası 60 °C sıcaklık ve 1,13 m/s hızında iken kuruma süresi numune kil içeriği %40 için 230 dakika, %50 için 250 dakika olarak belirlenmiştir. Kil içeriği %60 olan numunenin kuruma süresi 280 dakika olarak ölçülmüş ve diğer numunelerle karşılaştırıldığında kuruma süresi en uzun olan tuğla malzemesi olduğu görülmüştür. Şekil 4b’de kurutma prosesinin karakteristik periyotları belirgin olarak görülürken %60 kil içerikli numunelerde sabit hızlı kurutma periyodunun daha kısa sürdüğü tespit edilmiştir. Farklı kil içeriklerine sahip numunelerin yüzey sıcaklık değişimlerinin birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür (Şekil 4b).

Yüksek kil içeriği tuğlanın şekillendirmesi için gerekli olan su miktarını artırır. Bu da kurutma işlemi süresince tuğla küçülmesinin yüksek seviyelerde olmasına ve kuruma hassasiyetinin fazla olmasına neden olur. Kuruma küçülmesinin büyük çoğunluğu ön ısıtma ve sabit hızlı kurutma periyotlarında gerçekleşmektedir. Kuruma küçülmesi, tuğla malzemesindeki partiküller birbirleriyle

temas halinde olduklarından azalan hızlı kurutma periyodunda çok az olmaktadır. Kurutma havası sıcaklığı 60 °C, hızı 1,13 m/s iken kil içeriği %40, %50 ve %60 olan numunelerin kuruma küçülmeleri sırasıyla %5,29, %5,42 ve %5,78 olarak ölçülmüştür (Şekil 4c). Numune kil içeriği arttıkça kuruma küçülmesinin arttığı görülmüştür.



Şekil 4. Farklı kil içeriğindeki numunelerin (a) nem içeriğinin, (b) yüzey sıcaklığının ve (c) kuruma küçülmesinin zamana bağlı değişimi (Kurutma havası sıcaklığı 60 °C, hızı 1,13 m/s'dir.)

Tuğla malzemesine kil ilavesi tuğlanın plastikliğini arttırırken yapıdaki gözenek boyutunu azaltır. Gözenekliliği azalan tuğla uygulanan kuvvetlere karşı daha dayanıklı hale gelir. Numunenin kil içeriği %40'tan %60'a arttırıldığında, eğilme dayanımının 2,7 MPa'dan 5,7 MPa'a arttığı ölçülmüştür (kurutma havası sıcaklığı 50 °C ve hızı 1,13 m/s). Deneysel sonuçlar, tuğladaki kil içeriğinin artması ile tuğla mekanik dayanımının da arttığını göstermiştir (Tablo 1).

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada kil içeriği farklı yaş tuğla numunelerinin kuruma özellikleri, farklı kurutma parametreleri için belirlenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- TS 2514 standardına göre kurutulmuş numunelerin eğilme dayanımı en az 1 MPa olmalıdır. Bu çalışmada numunelerin test sonuçları incelendiğinde, tüm kurutma parametreleri için eğilme dayanımlarının 1 MPa'dan yüksek olduğu görülmüştür. Numunelerin eğilme dayanımları, kurutma havası hızından az etkilenirken sıcaklığından daha çok etkilenmiştir. Herhangi bir kil içeriğine sahip numunede kurutma havası sıcaklığı (50 °C'den 70 °C'ye) artışıyla eğilme dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Numunelerde kil içeriği arttıkça (%40'dan %60'a) eğilme dayanımı da artmıştır.
- Yaş tuğla kuruma süresi, kurutucudan çıkartılan numune nem içeriğinin 0,06 kg H<sub>2</sub>O/kg kuru tuğla olması için geçen zaman olarak tanımlanmıştır. Bu tanıma göre, kil içeriği %40 olan numuneler 1,13 m/s'de kurutulduğunda kuruma süresi 50 °C'de 280 dakika, 70 °C'de ise 170 dakikadır. Kuruma havası sıcaklığı arttıkça kuruma süresi azaldığı görülmüştür.
- Yaş tuğla kuruma süresi, numune kil içeriğinden etkilenmiştir. Kurutma havası 60°C'de ve 1,13 m/s hızında olduğunda kil içeriği %40 olan numunenin kuruma süresi 230 dakika iken kil içeriği %60 olan numunenin kuruma süresi 280 dakika olarak belirlenmiştir.
- Kurutma havasının farklı hızları (1,13; 1,52; 1,66 m/s) yaş tuğla kuruma süresini etkilemiştir. Kil içeriği %40 olan yaş tuğla numuneler 60 °C'de kurutulurken hava hızı 1,13'den 1,66 m/s'ye arttırıldığında kuruma süresi 230 dakikadan 160 dakikaya azalmıştır.
- Kurutma havası sıcaklığının, kuruma küçülmesini etkilediği görülmüştür. Kil içeriği %40 olan yaş tuğla 1,13 m/s hız ile kurutulduğunda, hava sıcaklığı 50 °C'den 70 °C'ye arttırıldığında numune küçülme miktarı %5,90'dan %4,89'a azalmıştır. Benzer etki %50 ve %60 kil içerikli yaş tuğla numuneleri için de gözlenmiştir.

- Farklı kurutma parametreleri incelendiğinde %40 kil içeriğine sahip numuneler 60 °C sıcaklık ve 1,66 m/s hızda kurutulduğunda toplam kuruma süresi 160 dakika ve eğilme dayanımı 2,8 MPa olarak ölçülmüştür. Bu koşul en az enerji ile en etkili kurutmanın sağlandığı durum olarak belirlenmiştir.

## AÇIKLAMA

Bu makale kapsamında sunulan çalışmalar Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu, BAPKO FEN-A-060510-0132 no'lu proje tarafından desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

- ASTM (2007). Standard Test Method for Free Moisture in Ceramic Whiteware Clays, C324-01.
- ASTM (2009). Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic Whiteware Clays, C326-09.
- ASTM (2013). Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile, C67-13a.
- DPT (Devlet Planlama Teşkilatı) (2008). *Dokuzuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı. Taş ve Toprağa Dayalı Sanayiler Özel İhtisas Komisyonu Raporu*, Cilt 1, DPT: 2773 ÖİK: 703, Ankara.
- Geankoplis, C.J. (1993). *Transport Processes and Unit Operations*. Prentice Hall, Inc., 3rd edition, U.S.A.
- Hasatani, M., Itaya, Y. and Muroie, K. (1993). Contraction Characteristics of Molded Ceramics During Drying. *Drying Technology*, 11(4) 815-830.
- Kornmann, M. (2007) *Clay Bricks and Roof Tiles: Manufacturing and Properties*. Société de l'industrie Minérale, France.
- Kowalski, S.J. (2003). *Thermomechanics of Drying Processes*. Vol. 8, Springer.
- Kowalski, S.J., Musielak, G. and Banaszak, J. (2007). Experimental Validation of The Heat and Mass Transfer Model for Convective Drying, *Drying Technology*, 25, 107-121.
- Kowalski, S.J., Musielak, G. and Rybick, A. (1997). The Response of Dried Materials to Drying Conditions. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol:40, No:5 1217-1226.
- TS 2514 (1977). Kerpiç Bloklar Yapım ve Kullanma.
- Vellhuis, J.M. and Denissen, J. (1997). Simulation Model for Industrial Dryers: Reduction of Drying Times of Ceramics & Saving Energy. *Drying Technology*, 15(6-8), 1941-1949.