

## Termik Santral Uçucu Külünün Tuğla Dayanımına Etkisi

Mehmet SÖYLEMEZ<sup>11</sup>, Abdulaziz YILDIRIM<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Adiyaman Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 02040, Adiyaman/Türkiye

<sup>2</sup>Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 45140, Manisa/Türkiye

### ÖZET

Çeşitli yapı malzemeleri arasında çok eski zamanlardan beri kullanılan tuğla günümüzde de önemini kaybetmemiştir. Tuğla suya dona ve ateşe karşı oldukça dayanıklı olduğundan yapı malzemesi olarak kullanılan temel bir malzemedir. Uçucu kül kömürle çalışan termik santrallerde bacadan uzaklaşan, yanma nedeniyle baca tarafından çekilen gazlarla birlikte yukarıya sürüklenen (uçan) çok ince kül parçacıklarıdır. Bu çalışmada; Turgutlu (Manisa) yöresinde tuğla ve kiremit yapımında kullanılan bir killi zemin ile Soma Termik Santralinden alınan uçucu külün belirli oranlarda karıştırılmasıyla imal edilen tuğlaların çeşitli özellikleri incelenmiştir. Katkısız killi zeminden oluşturulan tuğlaların pişme sıcaklığına bağlı olarak dayanımlarının 0,73 kPa dan 5,24 kPa değerine kadar arttığı görülmüştür. Kül-uçucu kül karışımı malzemenin oluşturulan tuğlalarda ise %30 uçucu kül karışımına kadar katkısız zemin ile oluşturulan tuğlalara benzer davranış görülürken, uçucu kül miktarının artmasıyla pişme sıcaklığına bağlı tuğlalardaki dayanım da azalmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Tuğla, uçucu kül, pişirme sıcaklığı, basınç dayanımı

## The Effects Of Fly Ash of Thermal Power Plant On Strength Of Brick

### ABSTRACT

Brick has always been a very important building material since ancient times. It offers very good resistance against water, frost and fire therefore it one of the most fundamental and commonly used building material. Fly ash refers to the very fine ash particles that are formed and drifted away with other gases from the coal-fired thermal power plant chimneys as a result of coal combustion. In this study various characteristics of a brick, produced by mixing fly ash from the Soma Thermal Power Plant with clay in the region of Turgutlu (Manisa) with a certain proportion, are investigated. An increase of up to 0.73 kPa to 5.24 kPa has been observed for the mere clayey soil bricks depending on their burning temperature. As for the clay-fly ash blended bricks, we have observed similar characteristics to those of the mere clayey soil bricks when the amount of fly-ash is less than 30% in the blend. When this amount of fly-ash is increased above 30% in the blend, the strength of resulting bricks is worsened.

**Keywords:** Brick, fly ash, burning temperature, compression strength

<sup>1</sup> Sorumlu Yazar: [msoylemez@adiyaman.edu.tr](mailto:msoylemez@adiyaman.edu.tr) (M. Söylemez)

## 1. GİRİŞ

Çeşitli yapı malzemeleri arasında yapılarda çok eski zamanlardan beri kullanılan pişmiş toprak malzemeler günümüzde de önemini kaybetmemiştir. Pişmiş toprak malzemeler gerek ucuz, gerekse temininin ve yapıda kullanımının kolay olması sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler içerisinde ise en başta tuğla gelmektedir. Son yıllarda hızla gelişen sanayi kollarından olan tuğla imalatı da Türkiye ekonomisinde önemli bir yere sahiptir. Tuğla, ham maddesi kil olan ve en çok inşaat sektöründe kullanılan malzemeler arasındadır. Tuğla suya dona ve ateşe karşı oldukça dayanıklı olduğundan yapı malzemesi olarak kullanılan temel bir maddedir. Tuğla, dünya tarihinde imalatı yapılan ilk yapı malzemesidir [1]. Keşfedildiği günden buyana tasarımı ve boyutları değişmekle birlikte hiçbir zaman vazgeçilemeyen bir malzeme olma özelliğini kaybetmemiştir. Tuğlanın ham maddesi olan killi toprak doğallığı ve ucuzluğu nedeniyle tuğla için alternatifsiz bir malzeme olmuştur. Tarihteki ilk uygarlıklarda pişmemiş kil tabletler günümüzdeki tuğlalara benzer boyutlarda ve elle şekillendirilerek kullanılmıştır. Ancak sonraki dönemlerde kullanıcılar daha sağlam bina ve yüksek kuleler inşa etmek istemişler ve pişmiş tuğlayı M.Ö. 4. yüzyılda keşfetmeye başlamışlardır [1].

Kil mineralleri, bazı kayaçların fiziksel ve kimyasal ayrışmaları sonucunda oluşan çok küçük kristalsi maddelerdir. Kimyasal anlamda sulu alüminosilikatlar ile diğer metalik iyonlardan oluşmuşlardır. Tüm kil mineralleri çok küçük boyda (çapları  $1\mu\text{m}=0.001\text{mm}$  den küçük) olup sadece elektron mikroskopu ile görülebilirler. Killerin yapısında tetrahedral veya silika ile oktahedral alümina olmak üzere sadece iki çeşit kristal levhası bulunmaktadır. Bu levhaların değişik bağlarla ve farklı metalik iyonlarla birbirine bağlanmasıyla değişik kil mineralleri oluşmaktadır. Kil minerallerinden ve ultra mikroskobik boyutlarda plaka şekilli danelerden oluşan, ancak agregasyona uğradığında boyutları mikron mertebesine varan killer, mühendislik uygulamalarında genel olarak boyutu  $2\mu\text{m}$ 'den ( $0.002\text{mm}$ ) daha küçük danelere sahip ince daneli zeminler olarak kabul edilir. Killer, aynı boyuttaki diğer zeminlerden farklı olarak, su ile karıştırıldığında çamur oluştururlar. Hamur halinde şekil verilebilecek kadar plastisiteye sahipken, pişirildiğinde büyük dayanım artışları gösteren bir katıya dönüşürler. Islatıldığında genellikle hacim artışı gösterir, kurutulduğunda ise hacmi azalır ve çoğunlukla çatlaklar.

Tuğlanın imal aşamasında yoğrulan hammadde dinlendirilerek, çamurun bir miktar direnç kazanması sağlanır. Dinlendirme, malzemenin kalitesini etkileyen önemli bir unsur olduğu için hammadde hazırlama aşamalarının en önemlisidir. Hammadde aşamasının sonunda şekillendirmeye uygun bir nitelik kazanan hamur, değişik yöntemler kullanılarak şekillendirilmekte ve değişik biçim ve boyutlarda yarı mamul tuğla elde edilmektedir. Şekillendirme el ile veya makine kalıplama yöntemleriyle yapılabilmektedir. Mekanik yapılan tuğlalarda presleme ve telle kesme yöntemleri kullanılmaktadır [2].

Tuğla üretimindeki en son aşama pişirmedir. Pişirme sırasında kil kimyasal reaksiyonlara maruz kalır.  $300^{\circ}\text{C}$  civarında organik maddeler tamamen yanar,  $550^{\circ}\text{C}$  da molekül suyu bileşimi terk ederek, karışım silis ve alümin haline ayrışır ve  $550\text{--}900^{\circ}\text{C}$  arasında silis ve alümin tekrar birleşerek metakaolin silikası ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) oluşur. Bu yeni malzeme artık sert, şeklini değiştirmeyen, belirli bir mukavemeti ve rengi olan tuğladır. Pişirme sıcaklığının artması tuğlanın mekanik dayanımını arttırmakta, su emmesini azaltmakta ve birim ağırlığını arttırmaktadır. Ancak çok yüksek pişirme sıcaklığı tuğlanın camlaşmasına ve harca yapışma özelliğinin azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle pişirme sıcaklığının  $900\text{--}980^{\circ}\text{C}$  arasında olması gerekir [3,4].

Kil minerali ihtiva eden, belli ölçüde suyla karıştırıldığında plastik çamur haline gelen, şekillenme özelliğine sahip ve  $900\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ 'de pişirildiğinde, çatlamadan sertleşebilen bütün topraklar, tuğla-kiremit hammaddesi olup tuğla toprağının genellikle illit, az miktarda montmorillonit, kaolinit, kuvars, demir mineralleri, az miktarda organik maddeler ve suda çözülebilen tuzlar içermektedir. Kil minerallerinin en önemli özelliği belirli oranda su ile (% 25–35) karıştırıldığında plastik hale gelmesi, şekillenebilmesi ve

kurutulup pişirildikten sonra dayanıklı bir malzeme yeteneğinin olmasıdır. Kil içinde bulunan silisli, demirli ve alkali bileşikler plastikliğini ve ateşe dayanma yeteneğini azaltmaktadır [5,6].

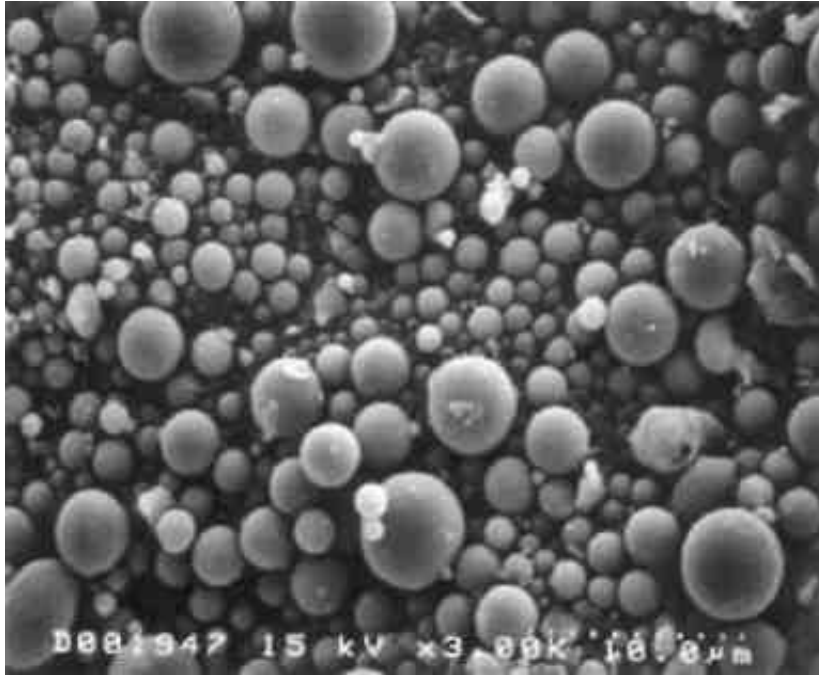
## 2. Uçucu Kül

Elektrik santrallerinde atılan gaz halindeki yanma atıklarının dışında, baca gazlarıyla beraber yanmamış yakıt toz ve zerrelere, kül, kükürlü gazlar, ağır metaller vb, gibi yabancı maddelerde atmosfere bırakılır. Yakıtta bulunan mineral, yabancı maddeler, yakma tesisine göre cüruf ve kül olarak veya baca gazlarıyla birlikte sürüklenerek ortamdan uzaklaşırlar.

Kömürle çalışan termik santrallerde bacadan uzaklaşan ve uçucu kül olarak tanımlanan en önemli atık malzeme, yanma nedeniyle baca tarafından çekilen gazlarla birlikte yukarıya sürüklenen (uçan) çok ince kül parçacıklarıdır. Bu ince kül parçacıkları elektro filtrelerde yakalanmakta, baca gazları ile atmosfere çıkışları önlenmektedir. [7].

Uçucu küllerin santrallerden dışarı atılmasının ciddi ekonomik ve ekolojik sorunlar ortaya çıkardığı bilinen bir gerçektir. Dolayısıyla, uçucu küllerin beton üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılması iki yönlü yarar sağlamaktadır. Bir yandan kül atım masrafları ve sorunları azaltılırken diğer yandan da üretilen betonun maliyeti düşürülebilmektedir [8]. Bu uçucu küllerin baraj, yol, tuğla ve diğer dolgu yapım işlerinde de kullanılması hem çevreye hem de ekonomik ve mühendislik açısından faydalar sağlayabilir.

Uçucu küller çok ince taneli, dokunulduğunda yumuşak bir malzemedir [9]. Mikroskopta incelendiklerinde süngerimsi boşluklu ve boşluksuz küresel taneciklerden meydana geldiği görülür (Şekil 1).



Şekil 1. Uçucu kül tanelerinin 2000 kat büyütülmüş hali [9].

Her endüstriyel atık gibi uçucu külden de yararlanma olasılıkları araştırılmıştır. Bunların başında çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılması gelir. Silindirle sıkıştırılmış betonlarda, beton blok ve boruların yapımında kullanım bulur. Çimento hammaddesi olarak kullanılabilir. Özel işlemlerle uçucu külden dayanıklı hafif agrega elde edilebilir. Diğer kullanım alanları arasında: beton ve asfalt yollarda, yol temel tabakalarında filler olarak, zemin stabilizasyonunda, kireç-kumtaşı blokları, endüstriyel seramik ve refrakterlerin, boyaların üretiminde, katı atıkların stabilizasyonunda ve bitki yetiştirilmesinde kullanımları sayılabilir.

Uçucu külün özellikleri kömürün özelliklerine ve yakılma yöntemine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Genellikle silisi ve alüminli olan bileşimi dolayısıyla puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı maddesi olarak yararlı olur. İnce ve küresel taneleri dolayısı ile taze betonda işlenebilmeyi artırır; ayrıca hidrasyon ısısını azaltır. Çimento hidrasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturur, çimento hamurundaki boşlukları doldurur ve betona dayanıklılık kazandırır. Linyit kömürü yakılması ile elde edilen uçucu külden kireç oranı genellikle yüksek olup bu tür köller aynı zamanda hidrolik, yani bağlayıcılık özelliği gösterirler.

Antrasit kömüründen veya iyi yakılmayan diğer kömürlerden elde edilen uçucu köllerde karbon miktarı yüksek olur. Bu da çimento ve betonda su ihtiyacını artırır; puzolanik özelliği ve kaliteyi olumsuz etkiler. Uçucu kül genellikle çimentodan daha ince taneli olarak elde edilir. Dolayısıyla ilave öğütme gerektirmeden kullanılabilir. Gerektiğinde seperatörden geçirilerek inceliği daha da artırılır ve olumlu özellikleri daha etkin hale getirilir.

Uçucu külün bilinçli olarak çeşitli alanlarda kullanımı hem kullanıcı, hem de külü üreten için ekonomik avantaj sağlar, atık bir madde ortadan kalktığı için çevre korunmuş olur. Ayrıca, kullanıcı ürettiği yeni ürünlerde veya uygulamalarında çeşitli teknik avantajlar elde eder. Bütün bu olumlu hususlara rağmen, kullanılarak değerlendirilen uçucu kül miktarları santrallarda elde edilen miktarların küçük bir yüzdesini geçememekte olup, dünya ortalaması olarak %15 civarında rakamlar verilmektedir [10].

Uçucu külden bulunan başlıca bileşenler  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve  $\text{CaO}$  olup, diğerleri  $\text{SO}_3$ ,  $\text{MgO}$  ve alkali oksitlerdir. Ayrıca, yanmamış karbon, titanyum, fosfor, berilyum, mangan ve molibden de eser bileşen olarak bulunabilmektedir. Temel oksitler olan  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ' in miktarları, uçucu külün silisi veya kireçsi yapıda olmasına göre geniş aralıkta değişmektedir. Buna göre, uçucu külden  $\text{SiO}_2$  % 25-60,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  % 10-30,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  % 1-15 olarak ve  $\text{CaO}$ , % 1-40 değerleri arasında bulunmaktadır [11].

Tuğla üretiminde kullanılan killeri ile uçucu kül aynı oksitleri içerdiklerinden tuğla üretiminde kullanılabilirler. Uçucu köllerin tuğlalarda kullanılması ile tuğlaların kuruma ve pişme küçülmeleri azalmaktadır. Aynı zamanda uçucu köllerin içerdikleri karbon, tuğlaların pişirilmesinde enerji tasarrufu sağlamaktadır [12].

Uçucu külden tuğla yapımında kullanılacak külün karıştırılacağı kilin özellikleri önemlidir. Karıştırılacak malzeme ve oranları deneysel olarak saptanmalıdır. Uçucu kül, kil ile karıştırıldığında kilin porozitesini artırıp yoğunluğunu ve karışım suyunu ve pişme sırasında ısı tüketimini azalttığından tuğla üretiminde kullanılabilir [13].

### 3. Malzeme ve Yöntem

Bu çalışmada kullanılan kil numunesi Turgutlu (Manisa) yöresi Ömerli Deresinin kil ocağından, uçucu kül ise Soma Termik Santralinden alınmıştır.

Alınan numuneler üzerinde dane boyu dağılımı, kıvam limitleri ve diğer tüm sınıflandırma deneylerine yönelik çalışmalarda ASTM standartları uygulanmıştır. Turgutlu killeri üzerine yapılmış olan

kantitatif analizler sonucu smektit (montmorillonit) oranının %51, illitin %35 ve kaolinitin %14 olduğu saptanmıştır [14]. Turgutlu çevresinde oldukça yaygın olan killerin toplam kayaç mineral içerikleri başlıca %17- 21 kuvars, %7-11 kalsit, % 12-16 illit-plajioklas-K feldispat birlikteliği ve %56-60 arasında değişen smektitlerden oluşur. [14].

Turgutlu Ömerli dere yöresi killi zemininin oksit içeriklerinin uçucu kil ile benzerliği kimyasal analiz sonuçlarından anlaşılmaktadır (tablo 1).

**Tablo 1.** Turgutlu Ömerli dere yöresi kilinin mineral bileşimi [14]

Oksit Bileşimi	% Miktarı
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,03
SiO <sub>2</sub>	52,92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,00
Na <sub>2</sub> O	1,36
MgO	1,54
CaO	0,62
K <sub>2</sub> O	3,79
TiO <sub>2</sub>	1,34
<b>Kızdırma Kaybı</b>	<b>6,36</b>

Turgutlu yöresine ait killi zeminden, Kudret Tuğla Sanayi ve Ticaret AŞ tarafından standart üretilen 6.0x8.5x18.5 cm boyutlu 33 adet tuğla 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100 ve 1200 °C de özel fırında pişirilmiştir.

Her bir sıcaklık seviyesi için 3 adet tuğla kullanılmıştır. Tuğla numuneleri 1400 °C kapasiteli Thermoterm marka kül fırınında her adımda 3'er numune konularak pişirilmiştir. Sıcaklık etkisinin su emme, ortalama ağırlık kaybı ve basınç dayanımına etkisi araştırılmıştır. Su emme ve ortalama ağırlık kaybı ölçümleri, 1/100 gr hassasiyetli terazi ile yapılmıştır. Farklı sıcaklıklarda pişirilen tuğlaların dayanım deneyleri 200 ton kapasiteli YKM marka beton test presisi ile yapılmıştır (Şekil 2).



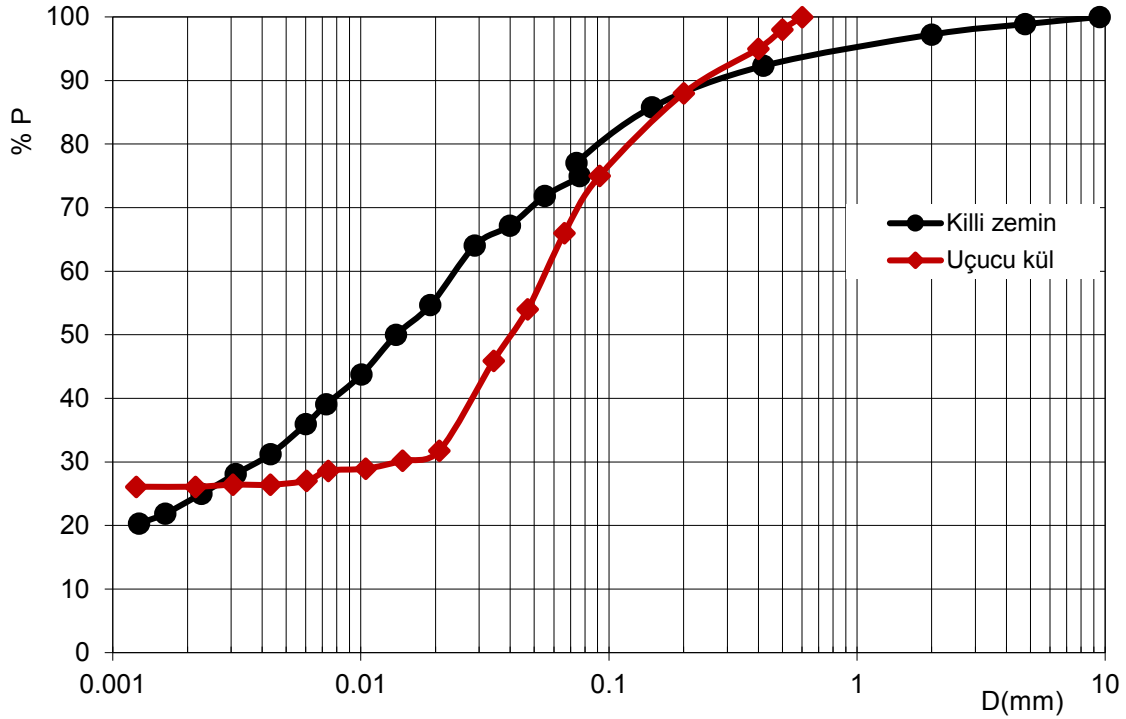
**Şekil 2.** Beton Pres Test Makinesi

#### 4. Araştırma Bulguları

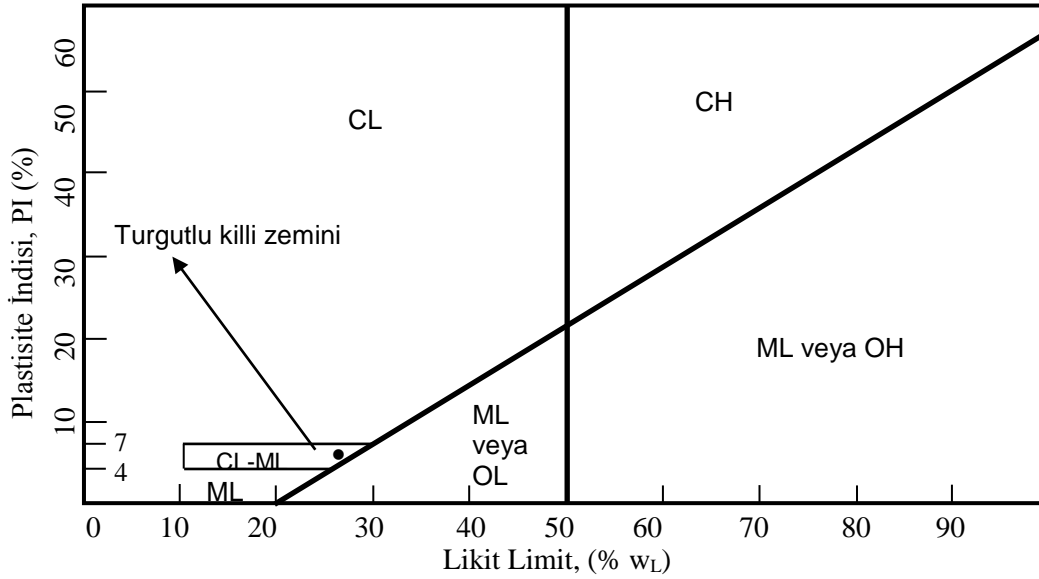
Tuğla ve kiremit yapımında kullanılan killi zemin ile uçucu külün sınıflandırma ve mühendislik özelliklerinin belirlenmesine yönelik dane boyu dağılımı, likit limit, plastik limit, standart kompaksiyon deneyleri ASTM standartlarına göre belirlenmiştir [15,16]

##### 4.1. Dane Boyu Dağılımı ve Kıvam Limitleri

Tane boyu dağılımı için elek ve hidrometre analizi yapılmış ve sonuçlardan killi zeminin kil ve silt oranının % 55, uçucu külün ince tane oranının ise %32 olduğu görülmüştür (Şekil 3). Killi zeminin kıvam limitleri Casagrande yöntemiyle belirlenmiş ve likit limiti (wL) % 28.8, plastik limit değeri de (PL) % 22.2 olarak bulunmuştur. Bu verilerden aktivite sayısı 0.12 bulunarak, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre zeminin CL-ML (düşük ve orta plastisiteli, inorganik siltli kil) tipi aktif olmayan bir zemin olduğu belirlenmiştir (Şekil 4). Uçucu kül ise plastiklik özelliği göstermemiştir.



Şekil 3. Deneylerde kullanılan killi zemin ve uçucu külün dane boyu dağılımı



Şekil 4. Deneysel olarak kullanılan killi zeminin Plastisite Kartındaki yeri.

### 5. Farklı Sıcaklıklarda Pişirilen Tuğlaların Ortalama Ağırlık Kayıpları

Killi zemin uçucu kül karışımı ile üretilen 6.0x8.5x18.5 cm boyutundaki her biri 3 adetten oluşan tuğla serileri pişirilmeden önce ham halde iken ve pişirildikten sonra oda sıcaklığında soğutulduktan sonra tartılarak her bir serinin ortalama ağırlık kaybı ölçülmüştür. Her bir seri tuğla seçilen sabit sıcaklıkta 5 saat süreyle pişirilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. 1400°C ısıtma kapasiteli Thermoterm marka yüksek fırın

Fırın ilk pişirme derecesi olan 200 °C'ye 16 dakikada çıkarken son pişme derecesi olan 1200 °C'ye 1 saat 39 dakikada çıkmıştır. Bu süre pişme sıcaklığına dâhil edilmemiştir. Daha doğru sonuca ulaşabilmek için her sıcaklık derecesinde 3 adet numune pişirilmiştir. Her bir numunenin 0,001 gr hassasiyetindeki terazide pişirilmeden önceki ve sonraki ağırlıkları tartılmıştır. Daha sonra aşağıdaki formüle göre ortalama ağırlık kaybı hesaplanmıştır.

$M_{ort}$ : Ortalama Ağırlık Kaybı

$M_1$ : 1 Numaralı tuğlanın ağırlık kaybı

$M_2$ : 2 Numaralı tuğlanın ağırlık kaybı

$M_3$ : 3 Numaralı tuğlanın ağırlık kaybı

$$M_{ort} = (M_1 + M_2 + M_3) / 3$$

Her bir kil-uçucu kül karışımı ile oluşturulan tuğlalar seçilen her pişme sıcaklığında 3 adet numune olmak üzere her bir seri için 33 adet 6.0x8.5x18.5 cm boyutlarında tuğla pişirilmiştir. Fakat 500°C'ye kadar pişirilen uçucu kül katkılı ve sade kilden üretilen tuğlalar su ile ıslatıldıklarında tamamen çözüldüğünden dayanım deneylerine tabi tutulmamışlardır (Şekil 6).

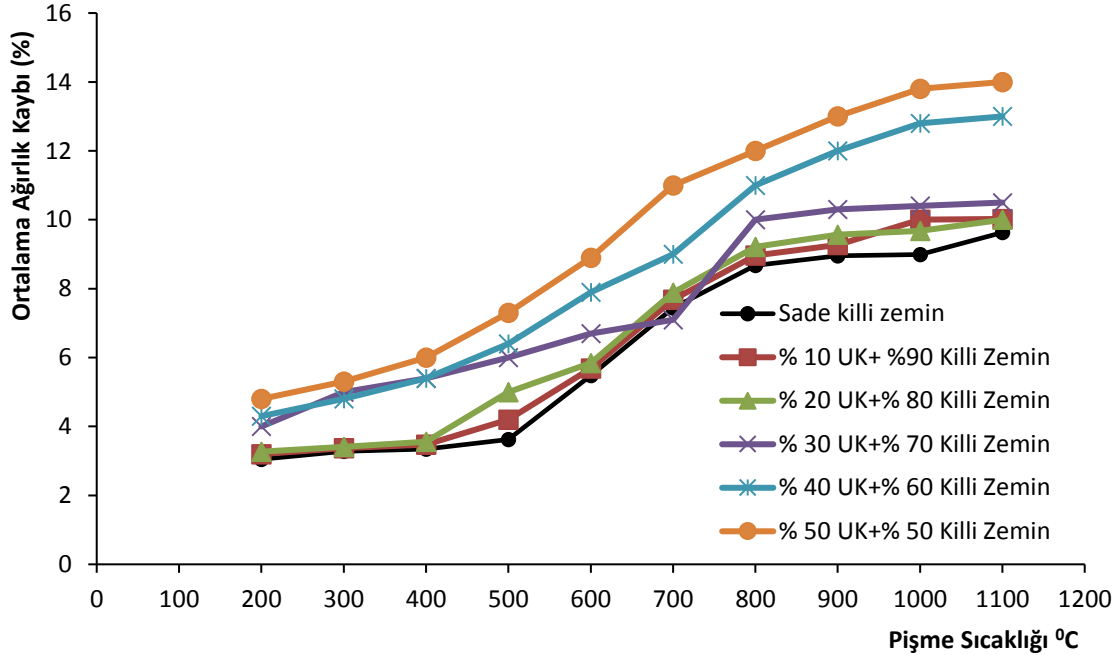


**Şekil 6.** 500°C'ye kadar pişirilen tuğlaların su ortamında dağılımları [4]

Uçucu kül- killi zemin karışımının % 30 oranına kadar katkısız killi zeminden oluşturulan tuğlaların ağırlık kaybının benzer olduğu, uçucu kül oranının %30 dan fazla olduğu diğer numunelerde porozitenin artmasına bağlı olarak ağırlık kayıplarının da büyüdüğü gözlenmiştir. 500 °C sıcaklığa kadar pişirilen tuğlaların bünyesinde bulunan tüm suları kaybettiği, organik maddelerin yandığı, buna bağlı olarak az da olsa ağırlık kaybına uğradığı gözlenmektedir. 500-800 °C aralığında killi zeminin mineral yapısında büyük değişiklikler meydana geldiği, organik maddelerin tamamen yandığı, molekül suyunun bileşimi terk ederek



karışımın silis ve alümin haline dönüştüğü, silis ve alümin de artan sıcaklıklarda tekrar birleşerek metakaolin silikatına ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) dönüştüğü ve bunun sonucu olarak büyük ağırlık kayıplarının yaşandığı ve açık kırmızıdan kahverengiye renk değişimi yaşandığı görülmektedir. 800-1000 °C aralığında yine % 30 uçucu kül katkısı oranına kadar belirgin bir ağırlık kaybı oluşmamakla birlikte uçucu kül oranı % 30 u aştığı numunelerde ağırlık kayıpları artmaya devam etmiştir. 1000 °C den daha yüksek sıcaklıklardaki ağırlık kaybının ise ya numunenin tamamen eriyerek bünyesinde bulunan bazı minerallerin buharlaşmasından ya da erime sonucu numune camsı bir doku kazandığından, boşluk oranı daha da azalarak fırından çıkarıldıktan tartılınca kadar ki sürede havadaki nemi bünyesine alamamasından kaynakladığı düşünülmektedir (Şekil 7).

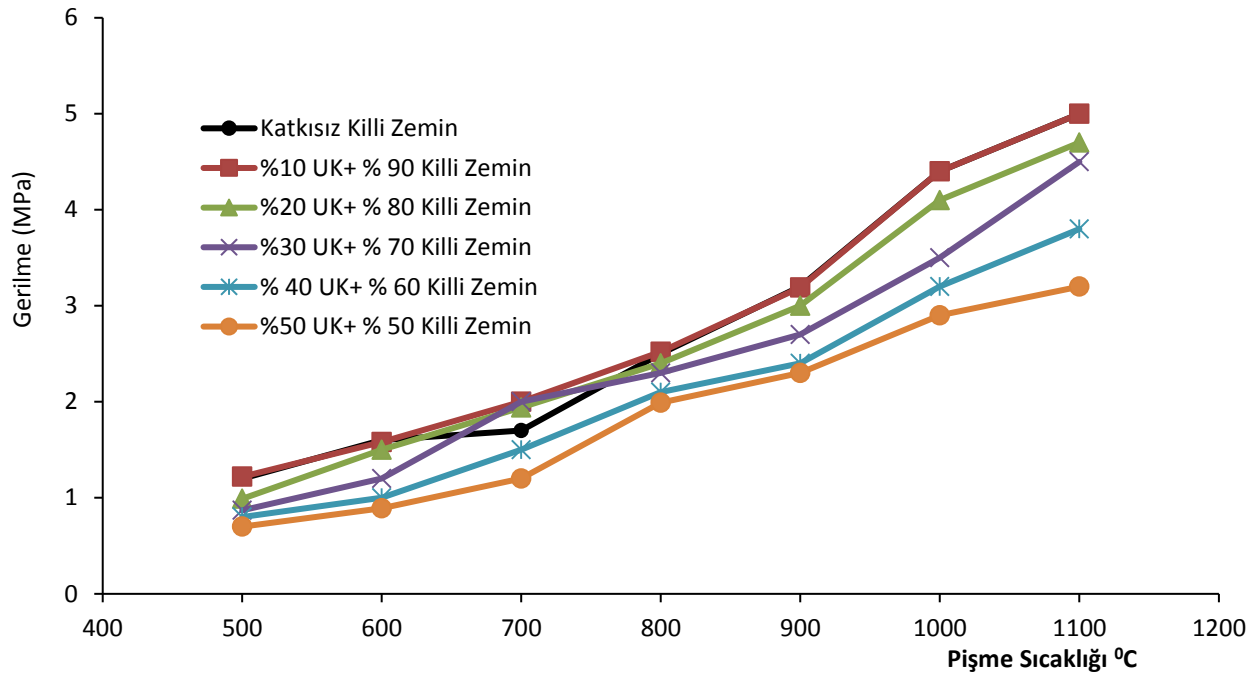


Şekil 7. Farklı Sıcaklıklarda Pişirilen Tuğlaların Ortalama Ağırlık Kayıpları

## 6. Farklı Sıcaklıklarda Pişirilen Tuğlaların Dayanım Özellikleri

Turgutlu yöresi killeri ile üretilen 6.0x8.5x18.5 boyutundaki tuğlaların basınç dayanımları Yapı Mekanikliği Laboratuvarlarında bulunan YKM beton test presini kullanılarak belirlenmiştir.

Hem uçucu kül katkılı killi zeminden hem de katkısız killi zeminden üretilen tuğlaların pişme sıcaklığı ile basınç dayanımlarının doğru orantılı olduğu, pişme sıcaklığının artmasıyla dayanımın arttığı tespit edilmiştir. Bununla beraber uçucu kül katkısının % 20 yi geçtiği tuğlaların dayanım parametresi uçucu kül oranının daha az olduğu tuğlaların dayanımından düşük çıkmıştır. Yüksek pişme sıcaklıklarının tuğla yapımında kullanılan killi zemin bileşimindeki minerallerin ergimesine sebep olduğu ve bu ergime sonucunda boşluk oranının azalarak daha masif ve camsı bir doku oluşturduğu görülmüştür. Tuğlaların pişme sıcaklığı 1100 °C ye kadar arttıkça basınç dayanımlarının da arttığı tespit edilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Pişme Sıcaklığının Dayanıma Etkisi

1200 0C' de pişen tuğla numuneleri ise tamamen ergiyip şekil bozuklukları oluştuğundan dayanım değerleri ölçülmemiştir.(Şekil 9).



Şekil 9. 1200 C<sup>0</sup> de pişmiş tuğla numuneleri [4]

YKM beton test presinde kırılmış tuğla numuneleri incelendiğinde düşük sıcaklıkta pişen tuğla numunelerinin tek bir düzlemsel çatlakla mukavemetlerini kaybettiği gözlenmiştir. Fakat 900 °C ve üzeri sıcaklıklarda pişen numunelere bakıldığında numunelerin camsı bir yapı kazandığı ve parça parça kırıldığı gözlenmiştir (Şekil 10 ve Şekil 11).



**Şekil 10.** 600 °C de pişen tuğlaların dayanım testinden sonraki kırılma düzlemi



**Şekil 11.** 1000 °C de pişen tuğlanın dayanım testinden sonraki kırılması

Deney sonuçlarına bakıldığında pişme sıcaklığının artması tuğlanın mekanik dayanımını arttırmakta, su emme miktarını azaltmakta olduğu görülür. Ancak çok yüksek pişirme sıcaklığı tuğlanın ergiyerek camlaşmasına ve şekil bozukluğuna neden olmaktadır. Bu sebeple pişme sıcaklığının 800 – 1100 °C arasında olması daha uygundur.

## 7. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada Turgutlu yöresinden alınan bir killi zemin ile Soma Termik Santrali uçucu külü karışımından oluşturulan tuğlanın bazı teknolojik özellikleri incelenmeye çalışılmıştır.

Çalışılan killi zeminin likit limiti ( $w_L$ ) % 28.8, plastik limit değeri (PL) % 22.2 ve aktiflik sayısı 0.12 olarak bulunmuş ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre CL-ML (düşük ve orta plastisiteli, inorganik siltli kil) tipi aktif olamayan bir zemin olduğu belirlenmiştir.

Sıcaklık-ortalama ağırlık kaybı incelendiğinde uçucu kül- killi zemin karışımının % 30 oranına kadar katkısız killi zeminden oluşturulan tuğlaların ağırlık kaybının benzer olduğu, uçucu kül oranının %30 dan fazla olduğu diğer numunelerde porozitenin artmasına bağlı olarak ağırlık kayıplarının da büyüdüğü gözlenmiştir. Hem uçucu kül katkılı hem de katkısız zeminden oluşturulan tuğla numunelerinin 500 °C' ye kadar pişirilmeleri sonucu ciddi bir ağırlık kaybı olmazken, 500-800 °C aralığında killi zeminin mineral yapısında büyük değişiklikler meydana geldiği ve bunun sonucu olarak büyük ağırlık kayıplarının yaşandığı görülmektedir. 800-1000 °C aralığında % 30 uçucu kül katkı oranına kadar belirgin bir ağırlık kaybı oluşmamaktadır. Bunun erime sonucu numune camsı bir doku kazandığından, boşluk oranı daha da azalarak fırından çıkarıldıktan tartılıncaya kadarki sürede havadaki nemi bünyesine alamamasından kaynakladığı düşünülmektedir.

Hem uçucu kül katkılı hem de katkısız zeminden oluşturulan tuğla numunelerinin pişme sıcaklığının artması tuğlanın mekanik dayanımını arttırmakla birlikte, katkısız tuğlalara nazaran uçucu kül katkılı tuğlaların dayanımı azalmaktadır. Ancak artan pişme sıcaklığı tuğlanın camlaşmasına ve daha sonra da ergiyerek şekil bozukluklarına neden olmaktadır. Bu sebeple pişme sıcaklığının 800 – 1100 °C arasında seçilmesi daha uygundur.

YKM beton test presinde kırılmış tuğla numuneleri incelendiğinde düşük sıcaklıkta pişen tuğla numunelerinin tek bir düzlemsel çatlakla mukavemetlerini kaybettikleri gözlenmiştir. Fakat 900 °C ve üzeri sıcaklıklarda pişen numunelere bakıldığında numunelerin camsı bir yapı kazandığı ve parça parça kırıldığı gözlenmiştir.

## Teşekkür

Bu makale, “Termik Santral Uçucu Külünün Tuğla Dayanımına Etkisi” adlı yüksek lisans tezinden türetilmiştir. Çalışmanın olgunlaşip mevcut duruma gelmesinde, laboratuvar imkanlarından faydalandığımız Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği bölüm başkanına ve yapıcı katkılarından dolayı eleştirmenlere teşekkür ederiz.

## Kaynaklar

- [1] Görçiz, G., 2000. Ülkemizde Tuğla ve Kiremit Endüstrisi, TUKDER yay. Yıl: 3, Sayı:9, Sayfa: 26-32, Manisa.
- [2] Dönmez, S., 1993. Yapı Bilgisi 3. (Çeviri) Yüksek Öğretim Kurulu Yayını, s. 149-173, Ankara
- [3] Ekmekyapar, T., Örüng, I., 1993. İnşaat Malzeme Bilgisi. Atatürk Üniv. Ziraat Fakültesi Ders Yayınları No: 145, s. 22-36, Erzurum.
- [4] Söylemez, M., Demir, A., Onar, A.F., 2011. Pisme Sıcaklığının Tuğlanın Bazı Fiziksel Özelliklerine Etkileri, CBÜ Fen Bilimleri Dergisi, c7, s:71-80.
- [5] Köktürk, U., 2002. Endüstriyel Hammaddeler, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları, s. 250-255.

- [6] Yüksel, A.N., Şişman, C.B., 2003. Tarımsal İnşaat. Trakya Üniv. Tekirdağ Ziraat Fak. Genel Yayın No:278, Ders Kitabı No:36, Tekirdağ.
- [7] Ünal, O., Uygunoğlu, T., 2004 Soma Termik Santral Atığı Uçucu Külün İnşaat Sektöründe Değerlendirilmesi, Türkiye 14. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, Zonguldak, Türkiye.
- [8] Tokyay, M., 1993. Betonda uçucu kül kullanımı. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe kullanılması Sempozyumu. İMO, Ankara : s 29-36.
- [9] Erşan, H., 1996, Uçucu Küllerin Siltli Zeminlerin Kayma Mukavemeti Üzerine Etkisi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, 75 s., İstanbul.
- [10] Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. And Yeğinoğlu, A. 2009. Türkiyedeki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri. TÇMB/AR-GE/Y03/03, Ankara.
- [11] Hewlett, P.C. Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Fourth Edition, Arnold, 1998.
- [12] Öztürk, A. Ç., 2001. Tuğla Üretiminde Termik Santral Atığı Puzolanik Uçucu Küllerin Değerlendirilmesi Üzerine Bir Araştırma, Mimar Sinan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, S. 38-43, Edirne.
- [13] Güzel, G.A., 2003. Pomza Katkılı Tuğla Üretimi Ve Bu Tuğlaların Mekanik Ve Boşluk Oranlarının İncelenmesi, Doktora tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 237 sayfa, İstanbul.
- [14] Köseoğlu, K., Bayça, U.S., Çiçek, T. 2008 Tuğla Atığının Tuğla Üretiminde Değerlendirilmesi, CBÜ Soma Meslek Yüksekokulu, Teknik Bilimler Dergisi, c1, v9.
- [15] ASTM. 1993a. Standard test method for particle-size analysis of soils (D422-92). In 1993 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08. American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, Pa. pp. 93-99.
- [16] ASTM. 1993e. Standard test method for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils (D4318-84). In 1993 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08. American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, Pa. pp. 682-692.