



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İÇME SUYU ARITMA ÇAMURU VE YUMURTA KABUĞUNDAN ISI  
YALITIM TUĞLASI ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

**Gizem BAKIROĞLU**

**DANIŞMAN**

**DOÇ. DR. Ali YARAŞ**

**BARTIN-2024**





**T.C.**

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İÇME SUYU ARITMA ÇAMURU VE YUMURTA KABUĞUNDAN ISI YALITIM  
TUĞLASI ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Gizem BAKIROĞLU**

**JÜRİ ÜYELERİ**

Danışman : Doç. Dr. Ali YARAŞ  
Üye : Doç. Dr. Gülfem BİNAL  
Üye : Prof. Dr. Mücahit SÜTÇÜ

**BARTIN-2024**

## BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç.Dr. Ali YARAŞ danışmanlığında hazırlamış olduğum “İÇME SUYU ARITMA ÇAMURU VE YUMURTA KABUĞUNDAN ISI YALITIM TUĞLASI ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

02.05.2024

Gizem

BAKIROĞLU

## ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi ve tecrübesi ile desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Ali YARAŞ'a, laboratuvar çalışmaları sırasında büyük bir sabırla tecrübelerini paylaşan hocam Sayın Prof. Dr. Ertuğrul ERDOĞMUŞ'a ve her daim yanımda olan sevgili eşime ve kızıma teşekkürü bir borç bilirim.

Gizem BAKIROĞLU

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **İÇME SUYU ARITMA ÇAMURU VE YUMURTA KABUĞUNDAN ISI YALITIM TUĞLASI ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

**Gizem BAKIROĞLU**

**Bartın Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ali YARAŞ**

**Bartın-2024, sayfa: 54**

Doğal kaynakların tüketiminin artması ve çeşitli endüstriyel/evsel atıkların açığa çıkması çevre sorunlarını beraberinde getirmektedir. Bu tez çalışmasında, tuğla üretimi için endüstriyel bir atık olan içme suyu arıtma çamuru kile alternatif olarak ve yumurta kabuğu da gözenek yapıcı ajan olarak kullanıldı. Yumurta kabuğu farklı oranlarda (%0, %5, %10, %15, %20 ve %25) içme suyu arıtma çamuruna katılarak yarı-kuru yöntemle tuğla karışımları hazırlandı. Hazırlanan karışımlar hidrolik bir pres yardımıyla preslendi, oda sıcaklığında kurutuldu ve sonrasında kalıplanmış numuneler 900°C, 1000°C ve 1100°C’de 2 saat boyunca pişirme işlemine tabi tutuldu. Pişirilen tuğla numunelerinin kızdırma kaybı, görünür gözeneklilik, bulk yoğunluk, su emme, basınç dayanımı ve termal iletkenlik özellikleri belirlendi. Pişirme sıcaklığının ve yumurta kabuğu içeriğinin artışına bağlı olarak görünür gözeneklilik ve su emme değerleri artarken bulk yoğunluk değerlerinde azalma gözlemlendi. Tuğlaların basınç dayanımları 14.7 MPa ile 28.9 MPa aralığında değişim gösterdi ve yumurta kabuğu içeriğinin artması basınç dayanımında azalmaya neden oldu. Bunun yanı sıra, pişirme sıcaklığının 900°C’den 1100°C’ye çıkmasıyla basınç dayanımında artış meydana geldi. Basınç dayanımı açısından üretilen tuğlalar tüm yumurta kabuğu katkı oranları ve pişirme sıcaklıkları için standart gerekliliklerini karşılamaktadır. Termal iletkenlik değerleri ise 0.961 W/mK ile 0.615 W/mK aralığında değişim gösterdi. En düşük

termal iletkenlik değerine (0.615 W/mK) 900°C pişirme sıcaklığında ve %25 yumurta kabuğu içeriğine sahip tuğlada ulaşıldı. Sonuçlar, pişirme sıcaklığı ve yumurta kabuğu katkı oranının üretilen tuğlaların fiziksel, mekanik ve termal özellikleri üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Deneysel verilere göre, tuğla üretiminde içme suyu arıtma çamurunun kile alternatif olarak kullanılabilereği ve yumurta kabuğunun da gözenek yapıcı olarak değerlendirilebileereği söylenebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Basınç dayanımı, fiziko-kimyasal özellikler, içme suyu arıtma çamuru, termal iletkenlik, tuğla üretimi, yumurta kabuğu.

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF THERMAL INSULATION BRICKS FROM DRINKING WATER TREATMENT SLUDGE AND EGGSHELLS**

**Gizem BAKIROĞLU**

**Bartın University**

**Graduate School**

**Department of Metallurgical and Materials Engineering**

**Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ali YARAŞ**

**Bartın-2024, pp: 54**

Increasing consumption of natural resources and the release of various industrial/domestic wastes lead to environmental problems. In this thesis study, drinking water treatment sludge, an industrial waste for brick production, was used as an alternative to clay and eggshell was utilized as a pore-forming agent. Egg shells were incorporated to drinking water treatment sludge at different rates (0%, 5%, 10%, 15%, 20% and 25%) to prepare brick mixtures using the semi-dry method. The prepared mixtures were pressed with the help of a hydraulic press, dried at room temperature, and then the molded specimens were subjected to firing at 900°C, 1000°C and 1100°C for 2 hours. Loss on ignition, apparent porosity, bulk density, water absorption, compressive strength and thermal conductivity properties of the fired brick specimens were determined. As the firing temperature and eggshell content increased, apparent porosity and water absorption values increased, while bulk density values declined. Compressive strength of bricks ranged from 14.7 MPa to 28.9 MPa, and it decreased as the eggshell content increased. In addition, there was an increase in compressive strength as the firing temperature increased from 900°C to 1100°C. In terms of compressive strength, the produced bricks meet the standard requirements for all eggshell additive ratios and firing temperatures. Thermal conductivity values varied between 0.961 W/mK and 0.615 W/mK. The lowest thermal conductivity value (0.615



W/mK) was reached in the brick with a firing temperature of 900°C and 25% eggshell content. The results reveal that firing temperature and eggshell additive ratio are effective on the physical, mechanical and thermal properties of the produced bricks. According to experimental data, it is possible to employ eggshell as a pore-forming and drinking water treatment sludge as a clay substitute in brick production.

**Keywords:** Compressive strength, physico-chemical properties, drinking water treatment sludge, thermal conductivity, brick production, egg shell.

## İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	ii
BEYANNAME .....	iii
ÖN SÖZ .....	iv
ÖZET .....	v
ABSTRACT .....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
TABLolar DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Tuğla Hakkında Genel Bilgiler.....	2
1.1.1. Tuğlanın Geçmişi .....	3
1.1.2. Tuğla Üretim Prosesi.....	3
1.1.3. Tuğla Çeşitleri ve Özellikleri .....	6
1.2. Pişirme İşlemi Sırasında Meydana Gelebilecek Muhtemel Tepkimeler .....	7
1.2.1. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> İkili Faz Sistemi .....	7
1.2.2. CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> Üçlü Faz Sistemi .....	8
2. SÜRDÜRÜLEBİLİR TUĞLA ÜRETİMİ .....	10
2.1. İçme Suyu Arıtma Çamuru .....	10
2.1.1. İçme Suyu Arıtma Çamurunun Genel Özellikleri.....	11
2.1.2. İçme Suyu Arıtma Çamuru Bertaraf Teknikleri.....	12
2.1.3. İçme Suyu Arıtma Çamurunun Kullanım Alanları .....	12
2.2. Yumurtanın Yapısı ve Özellikleri .....	13
2.2.1. Dünya’da ve Türkiye’de Yumurta Üretimi ve Tüketimi.....	13
2.2.2. Yumurta Kabuğunun Yapısı .....	13
2.2.3. Yumurta Kabuğunun Kullanım Alanları.....	13
3. LİTERATÜR ÖZETİ.....	15
4. MATERYAL VE METOT.....	21
4.1. Ham Maddeler .....	21

4.2.	Karakterizasyon İşlemleri.....	22
4.3.	Tuğla Numunelerinin Üretimi .....	28
5.	<b>BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>31</b>
5.1.	Görünür Gözeneklilik .....	31
5.2.	Su Emme.....	32
5.3.	Bulk Yoğunluk .....	33
5.4.	Basınç Dayanımı .....	34
5.5.	Termal İletkenlik .....	35
5.6.	Kızdırma Kaybı .....	36
5.7.	Piştirilen Tuğlaların SEM Görüntüleri ve EDS Analizleri .....	37
5.8.	Piştirme Sonrası Tuğlaların XRD Analizleri.....	45
6.	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>47</b>
	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>49</b>
	<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1.1: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> faz diyagramı .....	8
1.2: CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> üçlü faz sistemindeki birincil faz alanları .....	9
4.1: İAÇ ve YK'nun dijital fotoğraf görüntüleri .....	22
4.2: YK'nun farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları .....	25
4.3: İAÇ'nun SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları .....	25
4.4: İAÇ (a) ve YK (b)'nin XRD grafikleri.....	26
4.5: YK ve İAÇ'na ait TGA eğrileri.....	28
4.6: Tuğla üretim prosesine ait akış diyagramı .....	30
4.7: Tuğla numunelerinin pişirme öncesi ve sonrası dijital fotoğraf görüntüleri.....	30
5.1: Görünür gözeneklilik sonuçları .....	32
5.2: Su emme sonuçları .....	33
5.3: Bulk yoğunluk sonuçları .....	34
5.4: Basınç dayanım sonuçları .....	35
5.5: Termal iletkenlik sonuçları .....	36
5.6: 900°C (a), 1000°C (b) 1100°C'de pişirilen referans tuğlaların SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları .....	38
5.7: 900°C'de pişirilen %25 oranında YK içeren tuğlanın SEM görüntüsü ve EDS analizi .....	39
5.8: 1000°C'de pişirilen %25 oranında YK içeren tuğlanın SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları.....	40
5.9: 1100°C'de pişirilen %25 oranında YK içeren tuğlanın SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları.....	41
5.10: 900°C'de pişirilen %25 oranında YK içeren tuğlanın haritalama (mapping) analiz sonuçları.....	42
5.11: 1000°C'de pişirilen %25 oranında YK içeren tuğlanın haritalama (mapping) analiz sonuçları.....	43
5.12: 1100°C'de pişirilen %25 oranında YK içeren tuğlanın haritalama (mapping) analiz sonuçları.....	44
5.13: 900°C, 1000°C ve 1100°C'de pişirilen referans tuğlaların (a) ve %25 oranında YK içeren tuğlaların (b) XRD sonuçları .....	46

## TABLULAR DİZİNİ

<b>Tablo</b>	<b>Sayfa</b>
<b>No</b>	<b>No</b>
1.1: Pişirme esnasında kil bünyede meydana gelen tepkimeler. ....	8
2.1: İAÇ'nin genel karakteristikleri.....	11
4.1: Ham maddelerin XRF analiz sonuçları .....	23
4.2: Hazırlanan tuğla karışım oranları .....	29
5.1: Pişirilen tuğlaların kızdırma kaybı sonuçları .....	37

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

MPa	: mega paskal
°C	: santigrat derece
dk	: dakika

### KISALTMALAR

ASAÇ	: Atık Su Arıtma Çamuru
ASTM	: Amerika Test ve Malzeme Kuruluşu
ANOVA	: Varyans Analizi
BA	: Beton Atığı
Ba	: Baryum
Ca	: Kalsiyum
CAS	: Kalsiyum-Alümina-Silika
CT	: Cam Tozu
GV	: Genleştirilmiş Vermikülit
HCKT	: Hindistan Cevizi Kabuk Tozu
HD	: Düşey Delikli Taşıyıcı Tuğla
İAÇ	: İçme Suyu Arıtma Çamuru
KÇ	: Karbonatlama Çamuru
KFAÇ	: Kağıt Fabrikası Atık Çamuru
LD	: Taşıyıcı Olmayan Tuğla
MİT	: Mermer İşleme Tozu
MK	: Mısır Koçanı
Mg	: Magnezyum
PAC	: Pencere Atık Camı
TA	: Tuğla Atığı
TT	: Talaş Tozu
YK	: Yumurta Kabuğu

## 1. GİRİŞ

İnşaat sektörü ve yapı malzeme endüstrisi ülkemiz ekonomisi açısından itici güç olarak görev yapan önemli sektörlerden biridir. Günümüzde kil ve çimento esaslı tuğlalar inşaat uygulamaları için vazgeçilmez yapı malzemeleridir. Kil esaslı tuğlaların çimento esaslı tuğlalara göre özellikle maliyet açısından daha ucuz olmaları nedeniyle hem üreticiler hem de tüketiciler tarafından kil tuğlalar daha fazla tercih edilmektedir (Madurwar vd., 2014; Muñoz vd., 2014). Gelişen günümüz dünyasında insanların yapı malzemelerinden beklentileri sürekli olarak değişim gösterdiği için tuğla özellikleri de sürekli olarak bir gelişme ve yenilenme eğilimindedir. Düşük maliyetin yanı sıra, kil esaslı tuğlaların termal yalıtım, hafiflik ve kolay üretim gibi bazı önemli özelliklere sahip olduğu da bilinmektedir. Bununla birlikte, kil esaslı tuğlaların hizmet ömrünün uzun olması da bu tuğlalarla inşa edilen binaların uzun yıllar kullanılmasına imkan sağlamaktadır (Ozturk vd., 2019).

Kil tuğla üretimi için gerekli olan kil ihtiyacı global ölçekte yıllık yaklaşık 340 milyar ton olup bu miktar temiz ve verimli kil rezervlerinden karşılanmaktadır. Bu da her geçen gün temiz ve verimli kil kaynaklarının tükenmesi demektir (Riaz vd., 2019). Bu nedenle, başta Çin olmak üzere bazı ülkeler, uygulamaya koydukları çevre mevzuat ve yasaları ile kil kullanımına sınırlama getirmiştir (Chen vd., 2011). Bu uygulama, tuğla üreticilerini kil yerine alternatif kaynakların kullanımına yönlendirmektedir. Tuğla üretiminde ikincil bir hammadde kaynağı olarak çeşitli endüstriyel, evsel ve tarımsal atıkların değerlendirilmesi, sürdürülebilir ve çevre dostu bir üretim açısından önemli bir yaklaşımdır (Munir vd., 2018).

Bu kapsamda incelenen literatürdeki çalışmalar, farklı atık türlerinin kil esaslı tuğla üretiminde yaygın olarak kullanıldığını göstermektedir. Bu çalışmalara, tezin literatür özeti bölümünde detaylı bir şekilde yer verilmiştir. Bu atıklardan birisi de, tuğla üretiminde katkı maddesi olarak kullanılan ve endüstriyel bir atık olarak tanımlanan yüksek oranda kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) içeriğine sahip yumurta kabuğudur (YK). YK, kalsiyum açısından zengindir ve kireçtaşı ile benzer özellikler gösterir. İçerik olarak özellikle kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg),  $\text{CaCO}_3$  ve protein ihtiva eder. YK, büyük oranda  $\text{CaCO}_3$  (>%90) içerir. Evlerde ve çeşitli işletmelerde yüksek miktarda açığa çıkan bu atığın

yeniden üretim süreçlerinde değerlendirilmesi, atığın geri dönüşümüne katkı sağlayacaktır (Gowsika, 2014).

Diğer taraftan, günümüz şartlarında doğadaki suyun içilebilir hale gelebilmesi için bazı işlemlerden geçirilmesi gerekir. Örneğin, su arıtma tesislerinde içme suyundan yabancı maddeleri uzaklaştırmak için su; ferrik sülfat, alüminyum sülfat ve kireç gibi çeşitli maddeler ile muamele edilmektedir (Sales vd., 2011). Arıtma işlemi sonrasında açığa çıkan yan ürüne “içme suyu arıtma çamuru” (İAÇ) denilmektedir. İAÇ, çeşitli organik/inorganik bileşikler ve oksitleri içerir (Ahmad vd., 2016). Dünya genelinde, her gün yüksek miktarda İAÇ'nin açığa çıktığı düşünüldüğünde, bu durumun çevre ve katı atık yönetimi sorunlarına neden olması kaçınılmazdır. Bu problem, günümüzde İAÇ'nin düzenli depolanması veya su yollarına deşarjı ile bertaraf edilmektedir. İAÇ, içerdiği kimyasal bileşenler itibariyle kile benzerlik göstermesinden dolayı son yıllarda tuğla üretim sürecinde kil hammaddesine alternatif olarak kullanılmaya başlanmış olup ilgili araştırmalara ait detaylar literatür özeti bölümünde verilmiştir.

Bu tez çalışmasında, kilin yerine alternatif bir hammadde olarak endüstriyel bir atık olan İAÇ'nin ve gözenek yapıcı ajan olarak da endüstriyel/evsel bir atık olan YK'nun tuğla üretiminde birlikte değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bunun için, farklı kombinasyonlarda İAÇ/YK karışımları hazırlanmıştır. Sinterleme sıcaklığının tuğla özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla üç farklı sıcaklıkta pişirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretilen tuğlaların fiziksel (bulk yoğunluk, görünür gözeneklilik, su absorpsiyonu), kimyasal (XRD ve XRF analizleri), mikro yapı özellikleri ve basınç dayanımı detaylı olarak incelenmiştir.

## **1.1. Tuğla Hakkında Genel Bilgiler**

İnşaat sektöründe yapı malzemesi olarak kullanılan tuğla, kil ile suyun homojen bir biçimde karıştırılmasıyla hazırlanan karışımın yüksek sıcaklıklarda (900°C-1300°C) sinterlenmesi sonucu üretilir. Tuğlanın üretim maliyetinin düşük, dayanımının yüksek ve kullanımının kolay olması gibi yararlı özelliklere sahip olması inşaat projelerinde yaygın olarak tercih edilmesine olanak sağlar. Tarihteki ilk yapı malzemesi olarak bilinen tuğlanın ana hammaddesi ucuz ve doğal bir madde olan kildir. İnsanların ihtiyaç ve istekleri doğrultusunda tuğlaların şekil, boyut ve özellikleri sürekli olarak bir değişim ve gelişim içerisinde (Cultrone ve Sebastián, 2009; Del Coz Díaz vd., 2007).



Türk yapı sektörü 2021 yılı verilerine göre, ülkemizde üretilen tuğlaların iç piyasa ihtiyacını karşılamanın yanı sıra ihracatı da yapılmaktadır. 2021 yılında ülkemizin gerçekleştirdiği tuğla ihracatının yaklaşık 14,3 milyon dolar olduğu ve ülkemiz tuğla ihracatının dünya ihracatı içindeki payının %0,46 seviyesinde olduğu rapor edilmiştir (Al-Shammarı, 2023)

### **1.1.1. Tuğlanın Geçmişi**

Tarihte ilk üretilen tuğla olarak bilinen kil tablet, herhangi bir pişirme işlemi olmaksızın sadece el ile şekil verilerek günümüzdeki tuğla boyutlarına yakın ölçülerde üretilmiştir. Bu tuğlalar, geçmişten günümüze kadar sürekli bir gelişim göstermiştir. İlerleyen zamanlarda insanların barınma konusunda daha geniş ve yüksek yapılara ihtiyaç duyması dayanıklı kil tuğla ihtiyacını da beraberinde getirmiştir. Bunun için, şekillendirilmiş kil tuğlalara pişirme işlemi uygulanmaya başlanmıştır. Tarihte ilk kez pişmiş tuğlanın kullanıldığı Babil Kulesi yapımında seksen beş milyon tuğlanın kullanıldığı bilinmektedir (Şahin, 2008)

Tarihte, Osmanlı döneminde II. Mehmet tarafından tuğlalara standart getirilerek standart dışı ölçülerde üretilen tuğlaların kullanım ve satışı engellenmiştir. Ülkemizde “Sümerbank Filyos Ateş Tuğlası Sanayi Müessesesi” fabrikası tarafından 1948 senesinde ilk seri tuğla üretimine başlanmıştır. Sonraki yıllarda şehirleşmenin hızlı bir şekilde artışı tuğlaya olan ihtiyacı da arttırmıştır. Tuğla üretiminin seri biçimde gerçekleştirilmesi amacıyla ülkemizde yeni fabrikalar kurulmaya başlanmıştır (Şahin, 2001)

### **1.1.2. Tuğla Üretim Prosesi**

Bir tuğla üretim süreci; hammadde eldesi, tuğla karışımının hazırlanması, şekillendirme işlemi, kurutma, pişirme ve soğutma işlemi, paketleme ve nakliye olmak üzere altı aşamadan oluşur. Bu aşamaları aşağıdaki şekilde açıklamak mümkündür;

Endüstriyel boyuttaki gerçekleştirilen tuğla üretimi için, hammadde olarak kullanılan killi toprak iş makineleri yardımıyla alınarak tuğla üretim tesisine getirilir. Sonrasında, iri boyuttaki kil partiküllerini daha küçük boyuta indirgemek amacıyla bilyalı değirmenlerde

öğütme işlemi uygulanır. Öğütme işlemi sayesinde, kohezyon ve plastiklik özelliği yüksek ve homojen bir partikül boyut dağılımına sahip kil elde edilir. Eleme işlemi ile de kil partikülleri tane boyutlarına göre sınıflandırılır (İnce, 2019). Öğütme ve eleme işlemlerinin ardından mekanik bir karıştırıcı vasıtasıyla karıştırılarak kıvamlı bir karışım (hamur) elde edilir (Çimen, 2019). Tuğla hamurunun mukavemetini iyileştirmek maksadıyla hamur belirli bir süre dinlenmeye bırakılır (Görhan, 2011).

Tuğla hamuru hazırlandıktan sonra şekillendirme işlemine geçilir. Bu aşamada hazırlanan tuğla hamuru farklı yöntemler kullanılarak farklı şekil ve boyutlarda yarı mamül tuğla haline getirilir. Günümüzde tuğla şekillendirilmesinde aşağıdaki üç farklı yöntem tercih edilmektedir.

**Katı Çamur Yöntemi:** Bu metotta kil, kütlece yaklaşık %15 oranında su ile karıştırılır. Sonrasında, karışımın işlenebilirlik, plastiklik ve dayanımının iyileştirilmesi amacıyla vakum işlemi uygulanır. Bu işlemi takiben hazırlanan hamur iki boyutlu şekilde ekstrude edilir ve sonra yarı mamül tuğlaya kesici yardımıyla son şekli verilir.

**Yumuşak Çamur Yöntemi:** Bu yöntemde kil, yüksek oranda su (%20 ile %30 aralığında) ile hamur haline getirilerek kalıplarda şekillendirilir. Tuğlanın kalıptan çıkarılması esnasında herhangi bir yapışma durumunun yaşanmaması için kalıplar işlem öncesi su veya kum ile yağlanır. Kum ile yağlanmış kalıplarda üretilen tuğlalara kum baskılı tuğla, su ile yağlanmış kalıplarda üretilen tuğlalara ise su baskılı tuğla adı verilmektedir (İnce, 2019).

**Kuru Presleme Yöntemi:** Plastiklik derecesi oldukça düşük killer için tercih edilen bir tekniktir. Bu yöntemde göre, kil ve su karışımı hazırlanabilmesi için en fazla kütlece %10 oranında kullanılır. Sonrasında, hazırlanan karışımlar çelik kalıplara konularak belirli bir basınç altında şekillendirilir (İnce, 2019).

Şekillendirme işlemi sonrasında, hamur bünyesindeki suyun uzaklaştırılması amacıyla kurutma işlemi uygulanır. Yarı mamül tuğlanın hızlı bir şekilde kurutulması durumunda tuğla bünyesinde çeşitli çatlaklar ve deformasyonlar meydana gelebilir. Yarı mamül tuğlaların kurutulması iki şekilde gerçekleştirilir.

Doğal Kurutma: Kurutma işlemi atmosferik şartlar altında gerçekleştirilir. Yarı mamül tuğlalar önce üstü kapalı yarı açık bir alanda sonrasında üzeri açık ve güneşli bir ortamda kurumaya bırakılır. Doğal kurutma yöntemi, genellikle sıcak iklim bölgelerinde tercih edilir (Gezer vd., 2006).

Yapay (Suni) Kurutma: Bu yöntemde kurutma işlemi, tünel fırın adı verilen özel tasarlanmış kurutma odalarında gerçekleştirilir. Genellikle %7 ile %30 aralığında nem içeriğine sahip olan yarı mamül tuğlalar raylı bir sistem ile tünel fırına girerler. Bünyelerindeki nemin büyük bir kısmı 38°C ile 204°C kurutma sıcaklığında uzaklaştırılır. Kurutma süresi, kilin türüne göre değişiklik göstermekle birlikte kurutma işlemi genellikle 24 saat ile 48 saat olarak uygulanır (Şahin, 2008).

Kurutulan tuğla numuneleri pişirme işlemi için özel tasarlanmış fırınlara gönderilir. Pişirme sonrasında tuğlalar yine aynı fırın içerisinde kendiliğinden soğumaya bırakılır. Pişirme süresi, başta fırının türü olmak üzere tuğla hamur içeriğine bağlı olarak da farklılık gösterir. Pişirme işleminde tünel fırın ve periyodik fırın yaygın olarak kullanılır (Aksin, 2007). Periyodik fırınlarda, yarı mamül tuğlalar fırına yüklendikten sonra pişirilir, soğutulur ve sonrasında fırın boşaltılır. Tünel fırınlarda ise tuğla numuneleri vagonlara yüklenerek raylı bir sistem vasıtasıyla fırına gönderilir. Tuğlalar, fırın içerisindeki farklı sıcaklık bölgelerinde belirli bir süre kalırlar. Fırın sıcaklığı kontrol altında tutulmakla birlikte fırın sürekli çalışır durumdadır (Çimen, 2019). Pişirme işlemi altı kademe gerçekleşir. Bunlar; en fazla 204°C’de bünyedeki serbest suyun uzaklaşması, 149°C ile 982°C aralığında dehidrasyon, 538°C ile 982°C aralığında oksidasyon, 871°C ile 1316°C aralığında vitrifikasyon ve fırın sıcaklığının düştüğü flashing ve soğutma adımlarıdır. Pişirme işlemi esnasında sıcaklığa bağlı olarak çeşitli tepkimeler de meydana gelmektedir. Bu tepkimeler; 300°C’de bünyedeki organik maddelerin yanması ve 550°C’de tuğla bünyesindeki suyun uzaklaşması, 550°C ile 900°C sıcaklık aralığında alümina ve silisin tepkimeye girerek metakaolin silikat oluşturması olarak sıralanabilir (Çimen, 2019). Pişirme işlemi sonunda, belirli bir formda, içerdiği bileşenlere bağlı olarak farklı renk ve dayanıma sahip tuğlalar elde edilir. Pişirme sıcaklığına ve tuğla karışım içeriği tuğlaların basınç dayanımı, yoğunluk ve gözeneklilik gibi özellikleri üzerinde etkilidir.

Sıcaklığın düşmeye başladığı soğutma işlemi, periyodik fırınlarda 48 ile 72 saat, tünel fırınlarda ise 48 saatlik bir sürede gerçekleşir. Soğutma hızı pişmiş tuğlaların özellikleri üzerinde oldukça etkilidir. Hızlı soğutma durumunda tuğlaların renginde bozulma ve yüzeylerinde çatlama gibi sorunlarla karşılaşılabilir (İnce, 2019).

Pişmiş tuğlaların soğutma işleminin ardından fırından çıkarılması sonrasında ayıklama, sınıflandırma, paketleme ve depolama işlemlerine geçilir. Kolay bir şekilde taşınabilmesi için tuğlalar palet üzerinde tellerle sarılarak paketlenir ve sevkiyat için araçlara yüklenir.

### 1.1.3. Tuğla Çeşitleri ve Özellikleri

Günümüzde yaygın olarak kullanılan tuğla çeşitlerinden bazıları ve özellikleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

**Kil Tuğlaları:** Geleneksel tuğla çeşididir ve ana hammaddesi kildir. Genellikle kırmızı veya kahverengi renk tonlarına sahiptirler. Bu tuğlalar, mekanik açıdan dayanıklı ve sıcaklık değişimlerine karşı da dirençlidirler.

**Beton Tuğlaları:** Bu tuğla türü çimento, kum, çakıl ve suyun karıştırılmasıyla elde edilir. Maliyetlerinin düşük olması ve üretim kolaylığı nedeniyle fazla tercih edilmektedir. Çeşitli renk ve şekillerde üretilebilmektedir.

**Kiremit Tuğlaları:** Genellikle çatı kaplamalarında kullanılır ve genellikle kil veya betondan üretilir. Bu tuğlaların su yalıtım performansları yüksektir.

**Şamot Tuğlaları:** Ateşe dayanıklı olarak bilinir ve metal ergitme fırınları, dökümhaneler ve ocaklar gibi yüksek sıcaklık gerektiren alanlarda kullanılır.

**Cam Tuğlaları:** Genellikle iç mekanlara veya dış cephelere estetik bir görünüm kazandırmak amacıyla tercih edilir. Bu tuğlalar, ışığı geçirirler, ısı yalıtım özelliğine sahiptirler ve kullanıldıkları yapıya modern bir hava katarlar.

Yukarıda belirtilen tuğla çeşitlerinin yanı sıra, tuğlalar inşaat sektöründe düşey delikli taşıyıcı tuğla (HD) ve taşıyıcı olmayan tuğla (LD) olarak da sınıflandırılmaktadır. HD

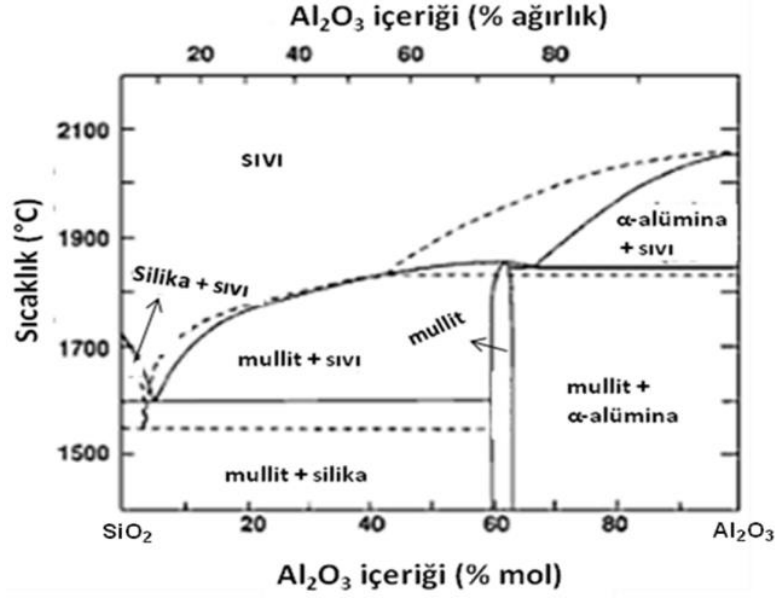
tuğlada boşluk oranı 3'te 1 veya daha azdır. Bu tür tuğlalar, taşıyıcı görevi üstlenir ve yığma binalarda kullanılır. Taşıyıcı olmayan yani LD tuğlalarda ise boşluk oranı 3'te 1'den fazladır. Taşıyıcı görevi üstlenmediğinden bahçe duvarları ve oda bölme işlemlerinde tercih edilmektedir. Bununla birlikte, tuğlalar kullanım alanları ve özellikleri dikkate alınarak hazırlanan ASTM tuğla standartlarına göre de sınıflandırılmaktadır.

## **1.2. Pişirme İşlemi Sırasında Meydana Gelebilecek Muhtemel Tepkimeler**

Tuğla üretim sürecinde kullanılan hammaddelerin içeriğine bağlı olarak farklı kimyasal tepkimeler meydana gelmektedir. Bu tepkimeler, elde edilen ürünün fiziksel, termal ve mekanik özellikleri üzerinde etkilidir. Tuğlanın pişirilmesi sırasında sıcaklığa bağlı olarak meydana gelebilecek kimyasal tepkimelerden bazıları aşağıda verilmiştir.

### **1.2.1. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> İkili Faz Sistemi**

Gözenekliliği yüksek ve termal iletkenliği düşük izolasyon tuğlaları genellikle SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oksitleri varlığında üretilir. Yüksek gözenekliliğe sahip tuğlaların üretimi, yapıya organik/inorganik katkıların ilave edilerek pişirme sırasında bu katkıların yapıdan uzaklaşması ile sağlanabilir (Jonker, 2006). Kil esaslı tuğlaların pişirilmesi esnasında farklı sıcaklıklarda çeşitli fiziksel ve kimyasal tepkimeler meydana gelmektedir. Bu tepkimeler nihai ürünün fiziksel, mekanik ve termal performansları üzerinde etkilidir (Brown ve Gallagher, 2003). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> ikili sistemi olarak bilinen faz diyagramı, sinterlenme sırasında kil ve kil-silika karışımlarında gözlenen tepkimeleri ifade eder (Şekil 1.1). Örneğin, Şekil 1.1'deki diyagrama göre, silika içeriği yüksek tuğlalar 1650°C sıcaklığa kadar dayanırken daha yüksek sıcaklıklar için alümina içeriği %90 seviyesinde olan hafif, termal iletkenliği düşük ve mukavemeti yüksek olan tuğlalar kullanılabilir (Jonker, 2006; Mazen, 2009). Pişirme işlemi sırasında farklı sıcaklıklarda kil yapısında meydana gelen dönüşümler Tablo 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> faz diyagramı (Bowen ve Greig, 1924)

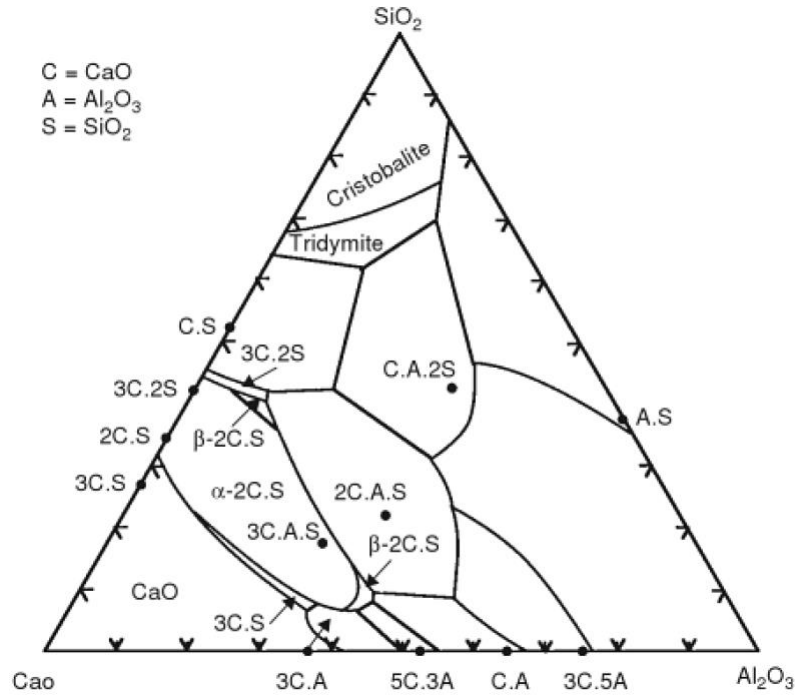
Tablo 1.1: Pişirme esnasında kil bünyede meydana gelen tepkimeler (Kornmann, 2007)

Sıcaklık, °C	Kaolinit	İllit	Montmorilonit	Klorit
130	Bünyedeki suyun uzaklaşması			
150-250			Hidrasyon suyun kaybı	
400-550	Birleşik suyun kaybı			
470	Metakaolinit arasında bulunan suyun kaybı			
700-850			Muhtemel spinel oluşumu	Mika/Brusit sisteminden su kaybı
900-1000		Muhtemel spinel oluşumu		
970-1300	Mullit oluşumu			
1050-1200		Sinterleme, mullit kristalizasyonu		Camsı faz oluşumu
1350-1700	Sinterleme			

### 1.2.2. CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> Üçlü Faz Sistemi

CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> fazı (CAS), kimyasal kararlılığının ve aşınma direncinin yüksek olması ve endüstride kullanılabilirliği nedeniyle günümüzde tercih edilmektedir. CAS içeren malzemelerin mekanik performansları ve optik özellikleri de iyi seviyededir. Hammadde maliyetlerinin düşük olması nedeniyle bu tür malzemeler inşaat sektöründe yer ve duvar uygulamalarında da kullanılmaktadır (Banijamali vd., 2007).

CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> üçlü faz sisteminde, anortit (CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.SiO<sub>2</sub>), gehlenit (2CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.SiO<sub>2</sub>) ve 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.SiO<sub>2</sub> fazları yer almaktadır. Bunlardan anortit ve gehlenit, eşleşik erime gerçekleştirir. Bu üçlü sisteme ait faz diyagramı Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2: CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> üçlü faz sistemindeki birincil faz alanları (Zhao, 2011)

CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ikili sisteminde ise 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5CaO.3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve 3CaO.5Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olmak üzere dört bileşik oluşur. Diğer taraftan, CaO-SiO<sub>2</sub> ikili sisteminde de wollastonit bileşikleri diye bilinen 2CaO.SiO<sub>2</sub>, 3CaO.2SiO<sub>2</sub> ve CaO.SiO<sub>2</sub> bileşikler meydana gelir (Predel vd., 2013).

## 2. SÜRDÜRÜLEBİLİR TUĞLA ÜRETİMİ

Sürdürülebilirlik kavramı, günümüz dünyasında inşaat ve yapı malzeme sektöründe büyük önem taşımaktadır. Tuğla üretim süreci, çevreye son derece önemli etkiler bırakabilen bir süreçtir. Dolayısıyla sürdürülebilir tuğla üretimi, çevresel etkiyi azaltmanın yanı sıra mevcut kaynakları da etkin ve verimli kullanmayı amaçlar. Çeşitli atıkların değerlendirilmesi ve çevre kirliliğinin azaltılması amacıyla çok çeşitli atık türlerinin tuğla üretiminde kullanılması sürdürülebilirlik açısından önemli bir adımdır. Böyle bir yaklaşım, daha az karbondioksit salınımı ve binaların karbon ayak izinin azalması anlamına gelir. Sonuç olarak, sürdürülebilir tuğla üretimi ile çevresel etkileri azaltarak daha yeşil ve çevre dostu bir üretim mümkündür.

Geleneksel tuğla üretimi için kullanılan ana hammadde kildir. Tuğla üretimi için gerekli olan kil ihtiyacı genellikle temiz ve verimli doğal kil kaynaklarından karşılanmaktadır. Bu nedenle, sınırlı olan doğal kaynakların tüketimini azaltmak için çevre dostu çözümler bulmak dünya genelinde bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu kapsamda, literatür özeti bölümünde sürdürülebilir bir tuğla üretimi için yapılan araştırmalara dair açıklamalar detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Diğer taraftan, bu tez çalışmasında kullanılan İAÇ ve YK'na dair genel bilgilere aşağıda yer verilmiştir.

### 2.1. İçme Suyu Arıtma Çamuru

İçme sularının arıtımı sırasında sudan çöktürme işlemiyle uzaklaştırılan kimyasal ve diğer katı formdaki maddelere içme suyu arıtma çamuru (İAÇ) adı verilmektedir. İAÇ, çamurlu



bir su formundadır. İAÇ bünyesinde bulunan askıdaki katı madde miktarı genellikle 1000 mg/litre seviyesindedir (Sun vd., 2015). Yüksek hacimlerde açığa çıkan bu atığın ekonomik ve çevre dostu yöntemlerle bertaraf edilmesi gerekir.

### 2.1.1. İçme Suyu Arıtma Çamurunun Genel Özellikleri

Yeraltı yüzey sularının içilebilir nitelikte olabilmesi için koagülasyon, çöktürme, filtrasyon ve dezenfeksiyon gibi bir takım arıtma işlemlerinden geçirilmesi gerekir. Bu işlemler sonucunda açığa çıkan İAÇ'nin dünya genelinde günde yaklaşık 10000 ton olduğu tahmin edilmektedir. Bununla birlikte, içme suyu kullanımındaki artışa bağlı olarak bu miktarın ilerleyen yıllarda daha da artacağı öngörülmektedir (Dharmappa vd., 1997).

İAÇ, bünyesinde organik ve inorganik çeşitli maddeleri bünyesinde barındıran jelatimsi bir yapıya sahiptir. İAÇ içerisinde yer alan temel bileşenler genellikle değişmemekle birlikte, kullanılan ham su kaynağının içeriği, koagülant türü ve miktarı ile tesis işletme şartları oluşan İAÇ'nin bileşenleri ve miktarı üzerinde etkilidir (Dharmappa vd., 1997). Örneğin; arıtılması istenen suyun bulanıklığının fazla olması çamur miktarını da arttıracığından fazla miktarda kimyasal kullanımına ihtiyaç duyulabilir. İAÇ'na ait genel karakteristik özellikler Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1: İAÇ'nin genel karakteristikleri (Babatunde ve Zhao, 2007)

Parametre	Alum çamuru	Demir çamuru
Silisyum dioksit (% kuru kütle)	33,4±26,2	-
Alüminyum (% kuru kütle)	29,7±13,3	10,0±4,8
Demir (% kuru kütle)	10,2±12,0	26,0±15,5
Kalsiyum (% kuru kütle)	2,9±1,7	8,32±9,5
Kurşun (mg/kg)	44,1±38,2	19,3±25,3
Nikel (mg/kg)	44,3±38,4	42,9±39,2
Bakır (mg/kg)	33,72±32,5	18,7±25,8
Krom (mg/kg)	25,0±20,1	25,7±21,6
Çinko (mg/kg)	33,9±28,0	18,7±16,0
Toplam katı madde (mg/litre)	2500-52345	2132-5074
pH	7,0±1,4	8,0±1,6

### **2.1.2. İçme Suyu Arıtma Çamuru Bertaraf Teknikleri**

Günümüzde İAÇ'ları başlıca bertaraf yöntemleri akarsulara direkt deşarj, yakma ve katı atık tesislerinde depolama şeklindedir (Babatunde ve Zhao, 2007; O'Kelly, 2010; Wang ve Tseng, 1993). Ancak, bu yöntemlerin kullanılması hali hazırda bazı problemleri de beraberinde getirmektedir. Örneğin, İAÇ'nin akarsulara deşarjı yüzey sularının kalitesini düşürerek insan ve çevre sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir. İAÇ'nin, kurutma gibi iyileştirme amaçlı herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan katı atık depolama sahalarına gönderilmesi hem atıkların stabilitesinde kayıplara hem de daha büyük hacimli depolama alanlarına ihtiyaç duyulmasına neden olur. Yukarıda ifade edilen nedenlerden dolayı İAÇ'nin bertarafı için ekonomik ve çevreci bertaraf yöntemlerinin araştırılması önem arz etmektedir. Bu manada, şuan için ilgili yasa ve mevzuatlar çerçevesinde İAÇ, atık sınıfına girmektedir. Bu nedenle, katı atık depolama sahalarına gönderilmeden önce İAÇ'ye kimyasal şartlandırma ve susuzlaştırma işlemleri uygulanmaktadır (Razali vd., 2007).

### **2.1.3. İçme Suyu Arıtma Çamurunun Kullanım Alanları**

Su arıtma tesislerinde yüksek miktarda açığa çıkan İAÇ ile ilgili sorunları en aza indirmek için İAÇ'nin çeşitli alanlarda değerlendirilebilmesi gerekir. Bu bağlamda, İAÇ, atık suların çeşitli kirleticilerin ve metallerin uzaklaştırılmasında adsorban olarak kullanılabilir (Mortula ve Gagnon, 2007). Bununla birlikte, toprak kalitesinin ve veriminin iyileştirilmesinde de değerlendirilebilir (Wu vd., 2011; Zhao vd., 2011). Geoteknik açıdan bakıldığında İAÇ, yüksek kayma dayanımı ve düşük geçirgenlik değerine sahiptir. Bu özellikleri İAÇ'ye geoteknik ve geo-çevre uygulamalarında kullanımına olanak sağlar. Örneğin; düşük geçirgenliği nedeniyle katı atık depolama sahalarında geçirimsiz olması istenen örtü tabakası uygulamaları için oldukça uygundur. Ayrıca, yol yapımında dolgu materyali ve geoteknik uygulamalarda geri dolgu malzemesi olarak değerlendirilebilir. Son yıllarda araştırmacılar İAÇ'nun inşaat sektöründe ve yapı malzemelerinin üretiminde kullanımına yönelik çalışmalara yoğunlaşmışlardır. Bu çalışmaların içeriği ile ilgili bilgiler tez çalışmasının literatür özeti bölümünde detaylı biçimde verilmiştir.

## **2.2. Yumurtanın Yapısı ve Özellikleri**

Yumurta denilince ilk akla gelen tavuk yumurtasıdır. Yumurtaların rengi beyaz ve kahverengi olabilir. Yumurta kabuğu renginin farklı olmasının nedeni farklı genlere sahip olan tavuk türleridir. Her ne kadar renkleri farklı olsa da tat ve besin değeri açısından aralarında bir fark yoktur. Dünya genelinde yaygın olarak kullanılan yumurta, beyaz renkli tavuk yumurtasıdır (Sharif vd., 2018). Yumurta yapısı içten dışa doğru; yumurta sarısı, yumurta akı, kabuk zarı ve kabuktan oluşur. Bir yumurtanın ağırlığının yaklaşık %10'unu kabuktan, %60'ı yumurta akından ve %30'u yumurta sarısından meydana gelir.

### **2.2.1. Dünya'da ve Türkiye'de Yumurta Üretimi ve Tüketimi**

2018 yılı verilerine göre, ülkemizde 1,2 milyon ton yumurta üretilirken 361 milyon ton yumurta ihraç edilmiştir. Sonraki yıllar için bu değerler artış göstermiştir (Zerek, 2021). Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü verilerine göre, Çin dünya yumurta üretiminde ilk sırada yer almaktadır. Tüketilen yumurta miktarının yüksek olması fazla miktarda yumurta kabuğunun açığa çıkması anlamına gelir. Bu durum çevreyi kirletici bir etki olarak değerlendirilmektedir.

### **2.2.2. Yumurta Kabuğunun Yapısı**

Yumurta kabuğu (YK), yumurtanın toplam ağırlığının yaklaşık %10'u kadar bir ağırlığa sahiptir. Polikristalin formda olan YK içeriğinde, gözenekli yapıdaki kütikül katmanı, kalsit katmanı ile kabuk zarı yer alır. YK esas itibarıyla yumurtanın en dış katmanında yer alan inorganik mineral matris (dış kabuk yüzeyi) ve bu tabakanın altında bulunan iç organik bölümden (kabuk zarı) oluşmaktadır. YK, yüksek miktarda kalsiyum karbonat (>%98) ve az miktarda da magnezyum karbonat ve kalsiyum fosfat içeriğine sahiptir. Yumurtanın en dış yüzeyinde yer alan kabuğa kütikül tabakası adı verilir. YK'na renk veren pigmentler bu tabakada bulunur (Zerek, 2021).

### **2.2.3. Yumurta Kabuğunun Kullanım Alanları**

Günümüzde her geçen gün açığa çıkan atık miktarlarındaki artışla birlikte atık bertaraf tekniklerinin maliyetleri de hem ülkemizde hem de dünya genelinde yükselmektedir. Bu

atıklardan birisi de YK'dur. Tavuk yumurta üretiminde ülkemiz dünyada 10. ve Avrupa'da ise 3. sırada yer almaktadır. Bu nedenle, YK atıklarının bertarafı yumurta üreticileri açısından güncel bir sorun haline gelmiştir. Çevresel bir problem olan YK atığının geri dönüşümünün oldukça zor ve karmaşık bir süreç olduğu bilinmektedir. YK atıkları ya düşük katma değerli ürünlere dönüştürmek için çeşitli yöntemlerle işlenmektedir ya da belirli bir meblağ karşılığında atık işleme tesislerine verilmektedir. Bunun dışında bazı çalışmalar da mevcuttur. Örneğin; YK atıklarından kalsiyum karbonat tozu üretimi gerçekleştirilerek ofis kağıdı üretiminde dolgu maddesi olarak değerlendirilmiştir (Tutus vd., 2022). Başka bir çalışmada ise YK ile atık pil kömürünün radyasyon tutucu malzeme üretiminde kullanımı incelenmiştir (Binici vd., 2013). YK'nun yapı malzemeleri üretim süreçlerinde değerlendirilmesine yönelik çalışmalar literatürde yapılmış olup ilgili araştırmalara literatür özeti bölümünde yer verilmiştir.

### 3. LİTERATÜR ÖZETİ

Tuğla üretim aşamasında, hem proses şartlarını iyileştirmek hem de tuğlaların fiziksel özelliklerini, basma dayanımlarını ve ısı iletkenliklerini geliştirmek amacıyla çeşitli katkıları kullanarak farklı proses şartları altında çok sayıda araştırma literatürde mevcuttur. Bu kapsamda, incelenen güncel araştırma sonuçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

Düşük pişirme sıcaklığında, kil esaslı tuğlanın gözeneklilik ve mukavemetini arttırmak için mısır koçanı (MK) ve pencere atık camının (PAC) katkı maddesi olarak kullanıldığı çalışmada, ilk olarak kütlece %10 MK içeriğine sahip kil tuğla karışımı hazırlandı. Sonrasında, hazırlanan kil-MK karışımına kütlece %20 oranına kadar PAC ilave edilerek 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C’de pişirme işlemi gerçekleştirildi. CaO miktarının yüksek olmasından dolayı MK, tuğla bünyesinde gözenekliliği artırıcı bir etki gösterdi. PAC varlığı ise, bir akı gibi davranarak sinterleme sıcaklığını düşürdü ve tuğlaların mekanik performansını iyileştiren albit fazının oluşumuna katkı sağladı. Kütlece %10 MK ve %20 PAC içeriğine sahip karışımların 900°C’de pişirilmesiyle termal iletkenliği 0.81 W/mK olan tuğlalar üretildi ve bu tuğlalar basınç dayanımı ve su emme açısından standartların gerektirdiği şartları karşıladı (Lawanwadeekul vd., 2023).

Sürdürülebilir tuğla üretimi ve enerji verimli binaların geliştirilmesi için yapılan bir başka çalışmada, farklı oranlarda kil, şeker kamışı külü ve su arıtma çamuru içeriğine sahip tuğlalar üretilmiştir. Üretilen tuğlaların ısı iletkenliklerinin (0,11 ile 0,26 W/mK

aralığında), geleneksel kil esaslı tuğlalara kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir. Simülasyon analiz sonuçları; kil tuğla ile karşılaştırıldığında ısı akışında ortalama %64 seviyesinde bir azalma gözlemlendiğini ve bunun enerji tüketiminde %16,5'lük bir azalmaya karşılık geldiğini ortaya koymuştur (Hassan vd., 2022).

Yaras vd. (2019), endüstriyel bir atık olan ve yüksek CaO içeriğine sahip karbonatlama çamurunu (KÇ) kullanarak yüksek gözenekli kil esaslı tuğlalar üretmişlerdir. Buna göre; kütlece %5'den %40'a kadar KÇ içeren tuğla karışımları 1000°C ve 1100°C sıcaklıklarında 2 saat süreyle sinterlenmiştir. Sonuçlar, KÇ miktarının artışına bağlı olarak tuğlaların görünür gözeneklilik değerlerinin arttığını ortaya koymuştur. Ayrıca, KÇ içeriğinin %30'a kadar olması durumunda, üretilen tuğlalar basınç dayanımı açısından standart gerekliliklerini karşılamaktadır. Kil esaslı tuğla ile karşılaştırıldığında (0,79 W/mK), KÇ katkılı tuğlaların termal iletkenlik değerleri azalma eğiliminde olup en düşük termal iletkenlik değerine (0,26 W/mK) kütlece %40 KÇ varlığında ulaşılmıştır. Deneysel sonuçlar, sinterleme sıcaklığının tuğlaların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğunu ve yüksek miktarda CaO içeriğine sahip olmasından dolayı KÇ atığının tuğla üretiminde gözenek yapıcı bir ajan olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir (Yaras vd., 2019).

Kil esaslı tuğlaların fiziksel, mekanik ve termal özellikleri üzerine KÇ ve kağıt fabrikası atık çamuru (KFAÇ) katkılarının etkilerini araştırmak amacıyla iki farklı pişirme sıcaklığında (1000°C ve 1100°C) on iki seri numune üretilmiştir. Deneysel sonuçlar, kütlece %15 KÇ ve %5 KFAÇ ihtiva eden kil tuğlaların mekanik dayanım açısından standartları karşıladığı belirlenmiştir. Termal iletkenlik değerleri ise 0,742 W/mK'den 0.155 W/mK'e bir azalma göstermiştir. Varyans analiz yöntemi (ANOVA) ile yapılan analiz sonuçlarına göre, görünür gözeneklilik üzerinde etkin olan parametrelerin sıralaması KÇ > KFAÇ > sinterleme sıcaklığı olacak şekilde belirlenmiştir. Bununla birlikte, sinterleme sıcaklığının, tuğlanın diğer tüm özellikleri üzerinde en az etkili olduğu bulunmuştur (Yaras, 2020).

Yukarıda verilen çalışmalardan da görüldüğü üzere, tuğla üretim sürecinde CaO içeriği yüksek olan katkı kullanımının pişirme sıcaklığının etkisiyle gözenekliliği arttırdığı bilinmektedir. Bu kapsamda, yüksek oranda CaO ihtiva eden YK atığının kil esaslı tuğla

üretim prosesinde gözenek yapıcı ajan olarak değerlendirilmesine yönelik aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır.

Ngayakamo vd. (2020) tarafından, granit tozu, YK ve sinterleme sıcaklığının kil esaslı tuğlaların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için dört seri tuğla numunesi üç farklı sıcaklıkta (900°C, 1000°C ve 1100°C) sinterlenmiştir. Basınç dayanımı (3,12 MPa), bulk yoğunluk (1,76 g/cm<sup>3</sup>) ve su emme (%12,2) özellikleri açısından en yüksek değerlere, kütlece %20 granit tozu ve %10 YK içeren kil karışımında ve 900°C pişirme sıcaklığında ulaşılmıştır (Ngayakamo vd., 2020).

Bir diğer çalışmada; YK, talaş tozu (TT) ve Hindistan cevizi kabuk tozu (HCKT) çeşitli oranlarda kil bünyeye dahil edilerek tuğla bloklar üretilmiştir. Deneyler iki aşamalı olarak yürütüldü: ilk aşamada atıklar, kil bünyeye ayrı ayrı dahil edilirken ikinci aşamada YK oranı %10 ile %30 aralığında, TT ve HCKT oranları ise ayrı ayrı kütlece %2,5 olacak şekilde kombine edildi. Sonuçlara göre, atıkların ayrı ayrı kil bünyede kullanılması halinde, en iyi değerlere YK için kütlece %40 YK oranında, TT ve HCKT için ise kütlece %2,5 içeriğinde ulaşıldı. İlgili atıkların üçünün birlikte kil bünyeye dahil edilmesi durumunda ise tuğlaların genel özelliklerinde kötüleşme meydana geldi. Bununla birlikte, farklı kombinasyonlarda üretilen tuğla örneklerinin tamamı standart şartlarını karşılayabildi (Jannat vd., 2022).

İnşaat sektöründe yapı malzemelerine talebin her geçen gün artması enerji tüketimi ve doğal kaynakların azalması gibi çevresel sorunları da beraberinde getirmektedir. Özellikle geleneksel tuğla üretiminde ham madde kaynağı olarak kilin kullanılması doğadaki verimli kil rezervlerinin azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, kile alternatif olarak doğal ve/veya atık malzemelerin kullanımı sürdürülebilir ve çevre dostu üretim için önemlidir. Bu amaçla, literatürde kil içermeyen ve kile ikame olarak çeşitli atıkların kullanılması ile üretilen tuğlalara ait çalışmaları aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür.

Örneğin, kil yerine zeolitin ve gözenek yapıcı katkı olarak da YK'nun kullanıldığı çalışmada, kütlece beş farklı oranda (%0'dan %20'ye kadar) YK, zeolite ikame olarak karışıma ilave edilmiştir. Bulgular, 950°C'de sinterlenen ve kütlece %20 oranında YK içeren numunelerin en düşük bulk yoğunluğuna (1,4 g/cm<sup>3</sup>) ve en düşük termal iletkenlik

değerine (0,27 W/mK) sahip olduğunu ve basınç dayanımının ise 10,5 MPa olduğunu ortaya koymuştur. Üretilen tuğla numunelerinin tamamı, standartların belirlediği minimum basınç değerinden daha yüksek bir basınç dayanımı göstermiştir (İbrahim vd., 2022).

Kile alternatif maddelerden birisi de içme suyu arıtma çamurudur (İAÇ). Kimyasal bileşen içeriği açısından kile benzerliği nedeniyle su arıtma çamuru, tuğla üretiminde kil hammaddesine alternatif olarak değerlendirilmektedir. Yapılan bir çalışmada, kile ikame olarak kütlece %10 ile %50 arasında değişen oranlarda İAÇ, kile ilave edilerek karışımlar hazırlanmış ve hazırlanan karışımlara 700°C'de 3 saat süreyle sinterleme işlemi uygulanmıştır. İAÇ içeriğinin kütlece %10'dan %50'ye çıkmasıyla tuğlaların basınç dayanımı 29,8 MPa'dan 8 MPa'a azalmıştır. Bulk yoğunluk 1,005 g/cm<sup>3</sup>'den 0,75 g/cm<sup>3</sup>'e azalırken görünür gözeneklilik %20'den %35'e ve su emme %12'den %37'ye yükselmiştir (Mahanna vd., 2024).

Amin vd. (2022), sadece kil kullanılarak üretilen tuğlalar ile atık su arıtma çamurunu (ASAÇ) çeşitli oranlarda (kütlece %5'den %40'a kadar) kile katkılayarak üretilen tuğlaları fiziksel ve mekanik özellikleri açısından karşılaştırmışlardır. ASAÇ içeren tuğlaların, sadece kil ihtiva eden tuğlalara kıyasla daha yüksek basma ve eğilme dayanımına sahip olduğu bulunmuştur. Sonuçlar, ASAÇ kullanımı ile sülfat saldırılarına karşı tuğlaların direncinin arttığını, çiçeklenme özelliklerinin geliştiğini ve donma/çözünme dirençlerinin de arttığını ortaya koymuştur. İlgili tuğla üretim şartlarında optimum ASAÇ içeriğinin kütlece %20 olduğu tespit edilmiştir (Amin vd., 2022).

Çevre kirliliğinin yanı sıra içerdiği ağır metallerden dolayı insan sağlığını da olumsuz yönde etkileyen ASAÇ'ın tuğla bünyede kullanımına yönelik bir başka araştırmada, Perwira ve Senggarang olmak üzere iki farklı bölgeden numuneler alınmıştır. Alınan ASAÇ örneklerinin her ikisinin de içeriğinde en yüksek ağır metal konsantrasyonunun Baryum (Ba) olduğu ve yüksek oranda SiO<sub>2</sub> ihtiva ettikleri belirlenmiştir. Tuğla üretimi için, kile ikame olarak ASAÇ, kütlece %1'den %30'a kadar kil karışımlara ilave edilmiştir. Kütlece %5 ASAÇ içeriğine sahip tuğlalar, her iki çamur türü için de en iyi fiziksel ve mekanik özellikleri sergilemekle birlikte, Senggarang'dan gelen çamurdan Perwira çamuruna kıyasla daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Sızıntı testleri sonuçları, her iki çamurun ağır metal değerlerinin standartlara uygun olduğunu ve Senggarang'dan gelen çamur ihtiva eden tuğlaların (kütlece %20'ye kadar) en düşük ağır metal sızıntısı



sergilediğini göstermektedir. Tuğlaların mekanik ve fiziksel özelliklerinin yanı sıra sızıntı performansı dikkate alındığında, kil tuğla üretiminde her iki çamur türü için kütlece %5'in optimum oran olduğu belirlenmiştir (Detho vd., 2024).

Pişmiş tuğla üretiminde kilin yerine ana hammadde olarak içme suyu arıtma çamurunun (İAÇ) (kütlece %75 ile %100 aralığında) ve katkı maddesi olarak da genişletilmiş vermikülitin (GV) (kütlece %5 ile %25 aralığında) kullanıldığı çalışmada, farklı kombinasyonlarla hazırlanan karışımlar 1000°C'de sinterlenmiştir. Sonuçlara göre, GV ilavesi, tuğlaların termal iletkenlik (0,678 W/mK'den 0,374 W/mK'e), basma dayanımı (19,3 MPa'dan 8,3 MPa'a) ve bulk yoğunluğunda (2,01 g/cm<sup>3</sup>'den 1,69 g/cm<sup>3</sup>'e) bir azalmaya neden olmuştur. Bununla birlikte, görünür gözeneklilik (%20,3'den %35,2'ye) ve su emme (%10,1'den %22'ye) değerlerinde artış gözlenmiştir (Gencel vd., 2022b). Benzer şekilde, kil olmaksızın İAÇ, cam tozu (CT) ve mermer işleme tozu (MİT) kullanılarak tuğla üretiminin gerçekleştirildiği başka bir araştırmada, altı farklı kombinasyonla tuğla karışımları hazırlanmıştır. Üretilen tuğla örneklerinin tamamının (sadece İAÇ içeren numunenin yanı sıra CT ve MİT katkılı numuneler) su absorpsiyon değerleri %5,3 ile %12,6 aralığında değişim göstermekte olup standart gerekliliklerini karşılamaktadır. Kil içermeyen, sadece İAÇ varlığında üretilen tuğlaların termal iletkenlik ve görünür gözeneklilik değerleri ise sırasıyla 1,014 W/mK ve %11 olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte, üretilen tüm tuğla numuneleri basınç dayanımı ve bulk yoğunluk değerleri açısından inşaat sektöründeki uluslararası yükümlülükleri karşılamaktadır (Gencel vd., 2021). Tuğla üretiminde, tuğla atığı (TA) ve İAÇ'ın farklı kombinasyonlarla kullanıldığı bir başka çalışmada, hazırlanan yedi seri karışım 1000°C'de 2 saat süreyle sinterlenmiştir. Deneysel verilere göre, kütlece %60'ın üzerinde TA içeriğine sahip olan tuğlaların basınç dayanımlarının, sadece İAÇ ihtiva eden tuğlalara kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bünyedeki İAÇ içeriğinin artışına bağlı olarak, tuğlaların kızdırma kaybı, görünür gözeneklilik ve su absorpsiyon değerleri kısmen azalırken termal iletkenlik ve basınç dayanımları artış göstermiştir. Üretilen tüm tuğla örneklerinin çiçeklenmeleri hafif düzeydedir. Sonuç olarak, kütlece %70 ile %85 oranında İAÇ içeriğine sahip tuğlaların, yapı malzemesi olarak etkin bir şekilde kullanılabileceği belirtilmiştir (Erdogmus vd., 2021). Gencel vd. (2022), benzer bir yaklaşımla doğal kilin yerine İAÇ'nu ve tuğlaların mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi için de beton atıklarını (BA) değerlendirmişlerdir. Bunun için, farklı miktarlarda BA (kütlece %0 ile %20 aralığında)

içeren tuğla karışımlarını 1000°C’de 2 saat pişirme işlemine tabi tutmuşlardır. Sonuçlar, BA içeriğinin artışına bağlı olarak görünür gözeneklilik ve su absorpsiyon değerlerinin arttığını, bulk yoğunluk, basma dayanımı ve ısı iletkenlik değerlerinin azaldığını göstermektedir. Kütlece %5 ile %20 aralığında BA içeriğine sahip sinterlenmiş tuğlaların bulk yoğunlukları 1,72 ile 2,10 g/cm<sup>3</sup>, su absorpsiyon oranı %7,9 ile %17,5, görünür gözeneklilikleri %16,7 ile %30,6, basma dayanımları 8,9 MPa ile 20,2 MPa ve termal iletkenlikleri 0,889 ile 0,659 W/mK arasında değişim sergilemiştir. Liç sızıntı test sonuçlarına göre, pişmiş tuğlalardaki ağır metallerin (Cu, Cd, Cr, Pb, Zn ve Ni), sülfat ve klorürün sınır değerleri, standartlarda belirtilen liç sınır değerlerini aşmamaktadır. Bütün bu nedenlerden dolayı, İAÇ ve BA kullanılarak üretilen ve kil ihtiva etmeyen bu tuğlaların yapı malzemesi olarak kullanılabilmesi ve sürdürülebilir tuğla üretiminin gerçekleştirilebileceği, bu sayede de su arıtma tesislerinin katı atık yükünün azaltılabileceği belirtilmiştir (Gencel vd., 2022a).

Tuğla üretiminde, hem kile ikame çeşitli atıkların kullanıldığı hem de sadece atıkların değerlendirildiği literatürdeki güncel çalışmalara yukarıda yer verilmiştir. Buna göre; çeşitli endüstriyel/evsel/tarımsal atıklar kullanılarak kil esaslı tuğlaların üretimine yönelik çalışmaların yanı sıra sadece ilgili atıklar varlığında tuğla üretimleri de gerçekleştirilmiştir. Yukarıdaki çalışmalardan farklı olarak bu tez çalışmasında, tuğla üretiminde kilin yerine endüstriyel bir atık olan İAÇ ve gözenekliliği sağlamak için de endüstriyel/evsel bir atık olan YK’nun birlikte kullanımı amaçlanmıştır. Bunun için, farklı kombinasyonlarda İAÇ/YK karışımları hazırlanmış ve sinterleme sıcaklığının tuğla özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla üç farklı sıcaklıkta pişirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretilen tuğlaların fiziksel (bulk yoğunluk, görünür gözeneklilik, su absorpsiyonu), kimyasal (XRD ve XRF analizleri), mikro yapı özellikleri ve basınç dayanımı detaylı olarak incelenmiştir.

## 4. MATERYAL VE METOT

Tez çalışması kapsamında deneylerde kullanılan hammaddeler ve özellikleri, deneylerin yapılışı ve karakterizasyon işlemlerine ait bilgiler aşağıda verilmiştir.

### 4.1. Ham Maddeler

Deneyleerde, kile alternatif olarak kullanılan içme suyu arıtma çamuru (İAÇ) 2020 yılında Bartın Belediyesi İçme Suyu Arıtma Tesisinden temin edildi. Katı haldeki İAÇ, bünyesindeki nemi uzaklaştırmak için laboratuvarıda oda sıcaklığında kurumaya bırakıldı. Öğütme ve eleme işlemlerinin ardından 80°C'deki etüvde 24 saat süreyle tekrar kurutulan İAÇ tozları kapalı bir plastik kap içerisinde saklandı. Tuğla üretiminde gözenek yapıcı ajan olarak kullanılan yumurta kabukları (YK) ise Bartın'daki yerel bir ticari firmadan temin edildi. Yumurta kabukları ilk olarak yumurta akı ve sarısından ayrıldı ve oda sıcaklığında kurumaya bırakıldı. Ardından kuru haldeki YK'ları öğütme ve eleme işlemlerine tabi tutuldu. Son olarak 24 saat boyunca 80°C'deki etüvde kurutulduktan sonra YK tozları plastik ağzı kapalı bir kap içerisinde saklandı. Deneyleerde kullanılan ham maddelere ait dijital fotoğraf görüntüleri Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1: İAÇ ve YK'nun dijital fotoğraf görüntüleri

İAÇ ve YK'nun kimyasal bileşenlerini içeren XRF sonuçları Tablo 4.1'de sunulmuştur. Buna göre; İAÇ esas itibariyle yüksek oranda  $\text{SiO}_2$  içermekte olup bunun yanı sıra  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve  $\text{CaO}$  bileşiklerini de ihtiva etmektedir. YK'nun ise  $\text{CaO}$  içeriği %55 seviyelerinde olup %43 gibi yüksek bir kızdırma kaybı oranına sahiptir. YK ve İAÇ'nun SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3) incelendiğinde YK'nun homojen olmayan bir partikül boyut dağılımına sahip olduğunu görülmektedir. YK'nun yüksek oranda kalsiyum içeriğine sahip olduğu da EDS analiz sonuçlarından anlaşılmaktadır. Şekil 4.3'deki İAÇ'na ait EDS analiz sonuçları da ağırlıklı olarak Si elementinin bünyede bulunduğunu ve bunun yanı sıra Al ve Fe elementlerinin de yer aldığını göstermektedir. Şekil 4.4'deki XRD verilerine göre ise İAÇ, esas itibariyle muskovit (potasyum alümina silika hidrat) ve quartz kristal fazlarından oluşmaktadır. YK yapısında ise kalsiyum karbonat fazlarının varlığı görülmektedir. Bu sonuçlar XRF analiz verileri ile örtüşmektedir.

## 4.2. Karakterizasyon İşlemleri

Hammaddelerin kimyasal bileşimleri X-Işını Floresan Spektrometresi (XRF), faz analizi X-Işını Difraktometresi (XRD) (Rigaku, Smartlab) ve mikroyapı özellikleri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) (Tescan, MAIA3 XMU) ile incelendi. Termal analizler ise Termal Gravimetrik Analiz cihazı (Hitachi, STA 7300) kullanılarak gerçekleştirildi. Üretilen tuğla numunelerinin görünür gözeneklilik, su emme ve bulk yoğunluk özellikleri Arşimet yöntemi ile ölçülmüştür. Bu yöntemle göre, pişirilen tuğla numunelerinin önce kuru ağırlıkları tartılır ve sonrasında numuneler 2 saat boyunca kaynayan suda bekletilir. Suyun numune bünyesine tam nüfuz etmesi için 12 saat süreyle oda sıcaklığında soğumaya

bırakılır. Arşimet terazisi kullanılarak numunelerin su içerisinde askıda kaldıkları durumdaki ağırlıkları ile suya doymuş ağırlıkları tartılır. Son olarak ölçülen kuru ağırlık, su içinde askı durumdaki ağırlık ve suya doymuş ağırlık değerleri ile aşağıdaki eşitlikler (Eşitlik 1, Eşitlik 2 ve Eşitlik 3) yardımıyla su emme, bulk yoğunluk ve görünür gözeneklilik değerleri hesaplanır.

$$\text{Su emme (\%)} = \left( \frac{SDA-KA}{KA} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Bulk yoğunluk (g/cm}^3\text{)} = \left( \frac{KA}{SDA-SAA} \right) \times \text{Suyun yoğunluğu} \quad (2)$$

$$\text{Görünür gözeneklilik (\%)} = \left( \frac{SDA-KA}{SDA-SAA} \right) \times 100 \quad (3)$$

KA: Kuru ağırlık (g)

SAA: Suda askıdaki ağırlık (g)

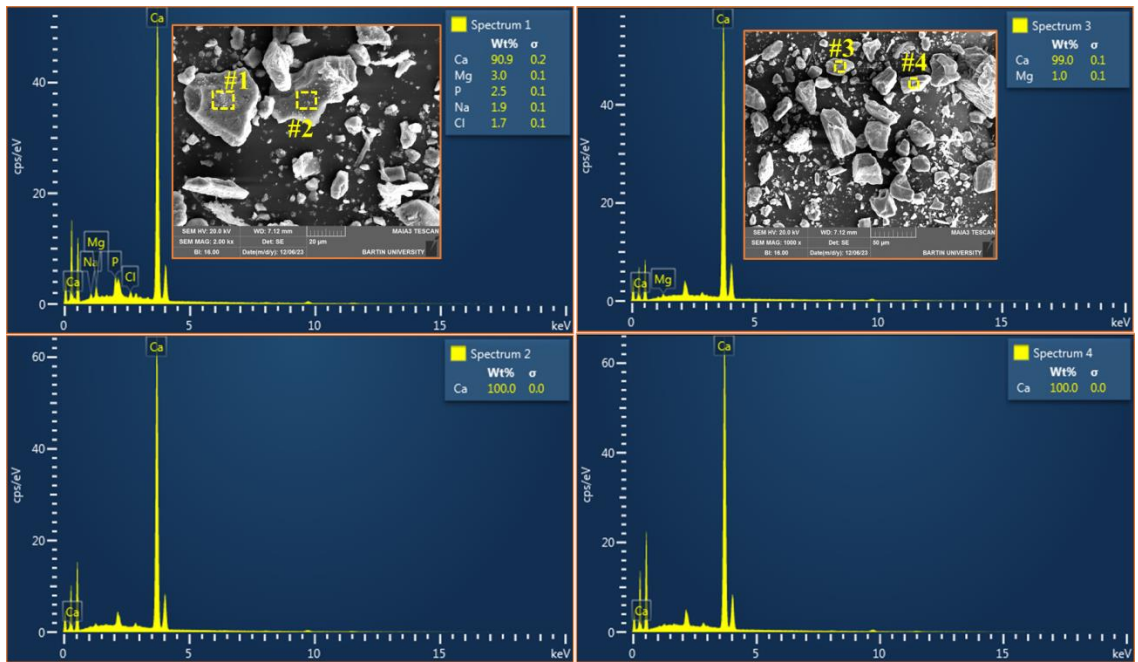
SDA: Suyu doymuş ağırlık (g)

Tuğla numunelerinin ısı iletim katsayıları Bartın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarındaki termal iletkenlik ölçüm cihazı (C-Therm TCi, Kanada) kullanılarak ölçüldü. Numunelerin basma mukavemetleri de Bartın Çimento fabrikası laboratuvarındaki mekanik test cihazı (As-Tek Makine, Adana) kullanılarak gerçekleştirildi.

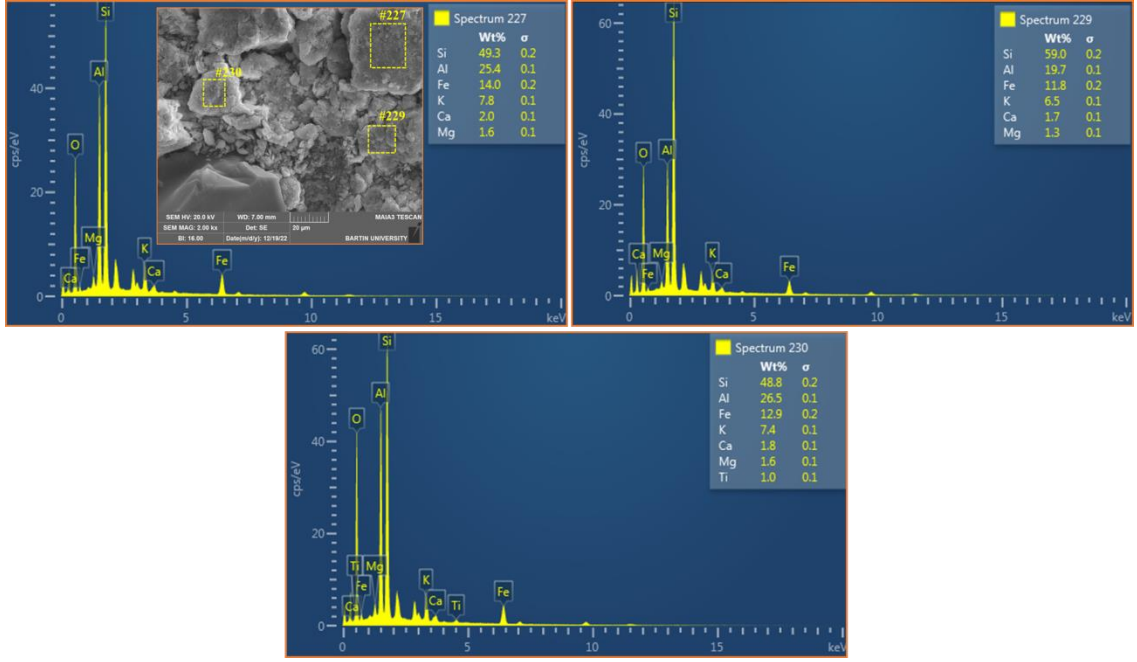
Tablo 4.1: Ham maddelerin XRF analiz sonuçları

Bileşen	Değer (kütlece %)	
	İAÇ	YK
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,87	-
SiO <sub>2</sub>	47,12	0,11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,42	0,02
MgO	1,49	0,68
CaO	5,18	55,61
K <sub>2</sub> O	1,97	0,06
Na <sub>2</sub> O	0,88	0,17
TiO <sub>2</sub>	0,11	-
MnO	0,14	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	-

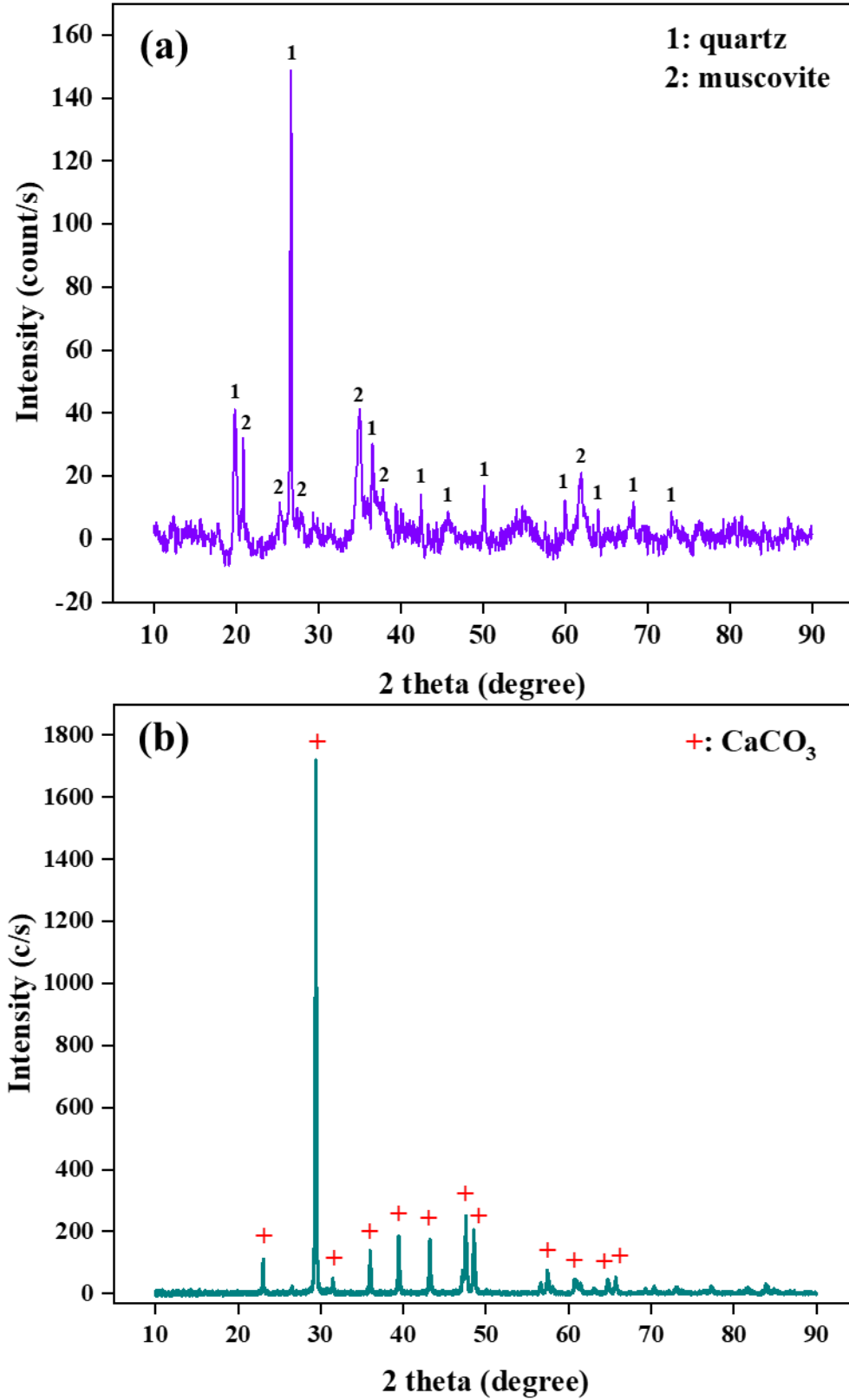
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,14	0,19
SO <sub>3</sub>	0,25	0,15
Kızdırma Kaybı (%)	14,42	43,01



Şekil 2.2: YK'nun farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları



Şekil 4.3: İAÇ'nun SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları

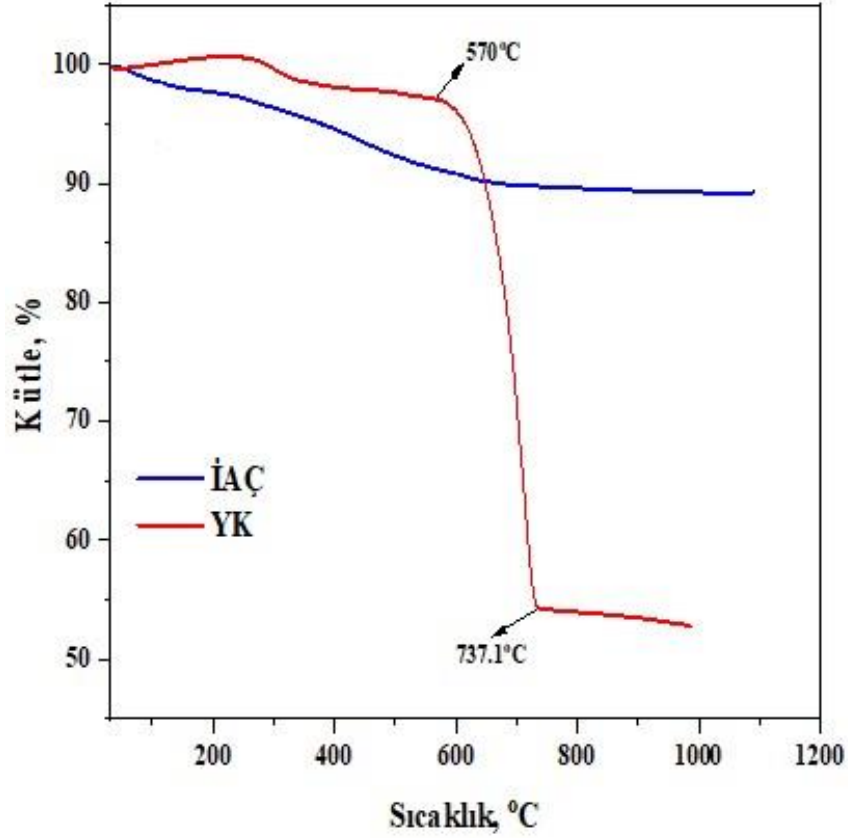


Şekil 4.4: İAÇ (a) ve YK (b)'nin XRD grafikleri



Şekil 4.5'deki TGA grafiğine göre 80-100°C sıcaklık aralığında İAÇ bünyesindeki serbest suyun buharlaşmasından dolayı kütlece yaklaşık %3 oranında bir kütle kaybı gözlemlendi. 250-600°C aralığında meydana gelen kütlece yaklaşık %4'lük kütle kaybının ise İAÇ'da bulunan hidratlı bileşiklerin (muskovit) kimyasal olarak bozunması ile uzaklaşan kimyasal sudan kaynaklandığı düşünülmektedir (Erdogmus vd., 2021; Kizinievič vd., 2018). 600-750°C aralığında karbonatlı bileşiklerin varlığından kaynaklanan kütlece yaklaşık %2'lik bir kütle kaybı gözlemlendi. İAÇ'nun 1100°C sıcaklığa ısıtılması sonucunda meydana gelen toplam kütle kaybı kütlece yaklaşık %10 seviyesindedir.

Artan sıcaklığa bağlı olarak YK'nun termal bozunma profili Şekil 4.5'de verilmiştir. Sıcaklığın oda sıcaklığından 300°C'ye yükselmesiyle yaklaşık %1 oranında az bir ağırlık kaybı gözlemlendi. Bu kayıp, uçucu bileşenler ve serbest suyun uzaklaşmasından kaynaklanabilir. 300°C ve 570°C sıcaklık aralığında meydana gelen yaklaşık %3'lük kütle kaybı ise yumurta kabuğunun dış zarını oluşturan organik maddenin bozunmasından kaynaklanır. En önemli ağırlık kaybı CaCO<sub>3</sub>'ün CaO dönüşmesi ve CO<sub>2</sub> gazının çıkmasıyla 570°C ile 740°C aralığında yaklaşık %43 oranında gerçekleşmiştir. YK'nun termal bozunma davranışına ait sonuçlar, literatürde daha önce YK ile yapılan çalışmalarla uyumludur (İbrahim vd., 2022; Kristl vd., 2019).



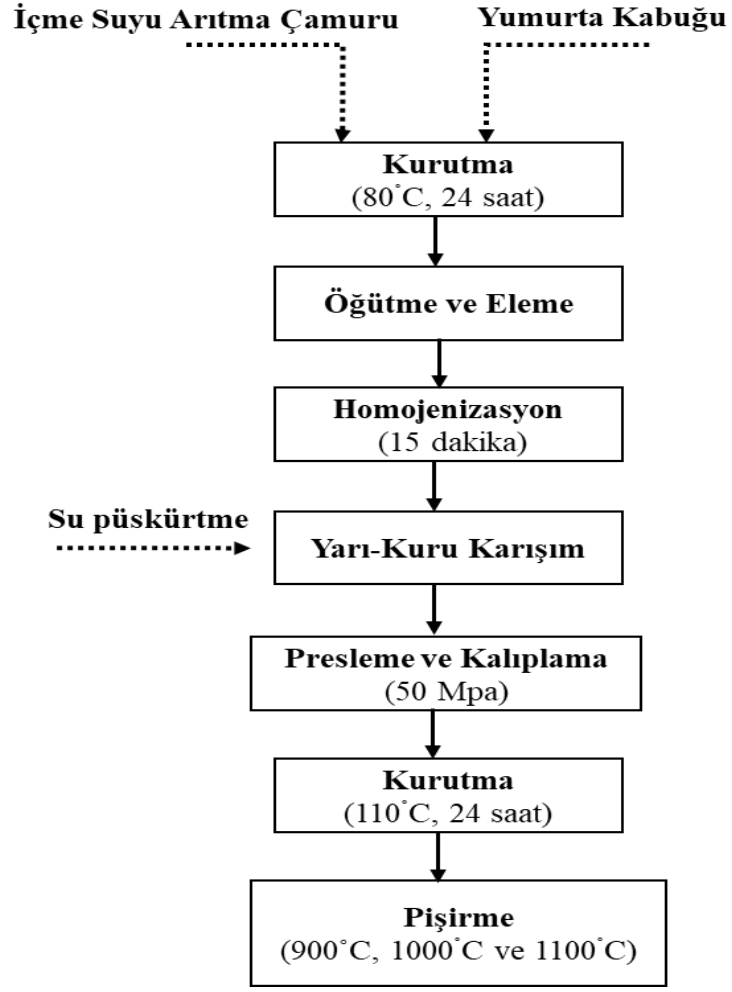
Şekil 4.5: YK ve İAÇ'na ait TGA eğrileri

### 4.3. Tuğla Numunelerinin Üretimi

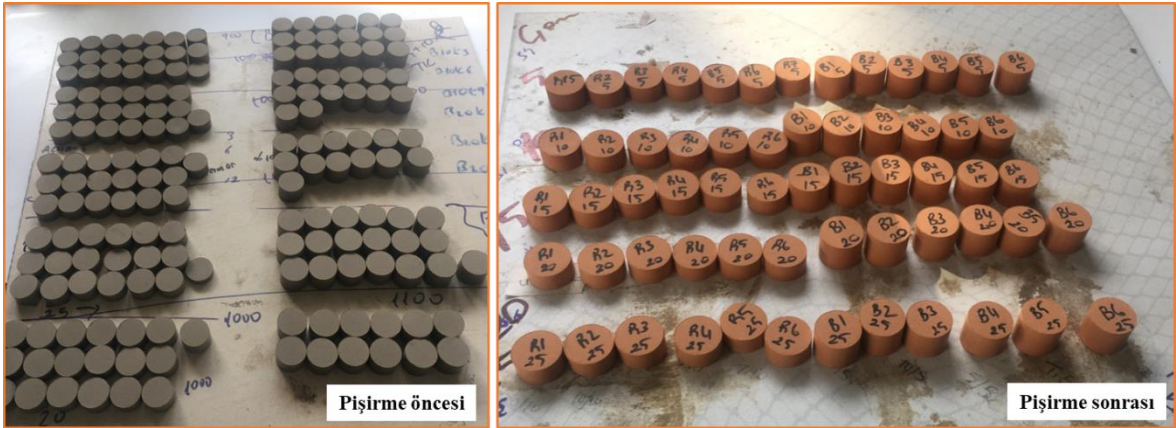
Tablo 4.2'de verilen karışım oranlarına göre karışımlar hazırlandı. Toz karışımlar homojenliği sağlamak amacıyla 10 dk. bir mekanik karıştırıcı yardımıyla karıştırıldı. Sonrasında, hazırlanan toz karışımlarına kalıplama işlemini kolaylaştırmak için ağırlıklarının yaklaşık %10'u kadar su püskürtüldü. Hazırlanan yarı-kuru toz karışımlar hidrolik pres kullanılarak 50 MPa basınç altında preslendi. Kalıptan çıkarılan numuneler pişirme işlemi öncesinde bünyesindeki suyu uzaklaştırmak amacıyla önce oda sıcaklığında 24 saat, sonrasında 110°C'deki etüvde 24 saat boyunca kurumaya bırakıldı. Pişirme işlemi 900°C, 1000°C ve 1100°C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta 2 saat sürede gerçekleştirildi. Pişirme işlemi için 5°C/dk ısıtma hızına sahip laboratuvar tipi elektrikli fırın (Protherm PLF12/25) kullanıldı. Her bir tuğla numunesi için deneyler en az üç kez tekrarlandı. Tuğla üretim prosesine ait akış diyagramı ve tuğla numunelerinin pişirme öncesi ve sonrası dijital fotoğraf görüntüleri sırasıyla Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilmiştir.

Tablo 3.2: Hazırlanan tuğla karışım oranları

Sıcaklık	İAÇ (kütlece %)	YK (kütlece %)
900°C	100	0
	95	5
	90	10
	85	15
	80	20
	75	25
	1000°C	100
95		5
90		10
85		15
80		20
75		25
1100°C		100
	95	5
	90	10
	85	15
	80	20
	75	25



Şekil 4.6: Tuğla üretim prosesine ait akış diyagramı



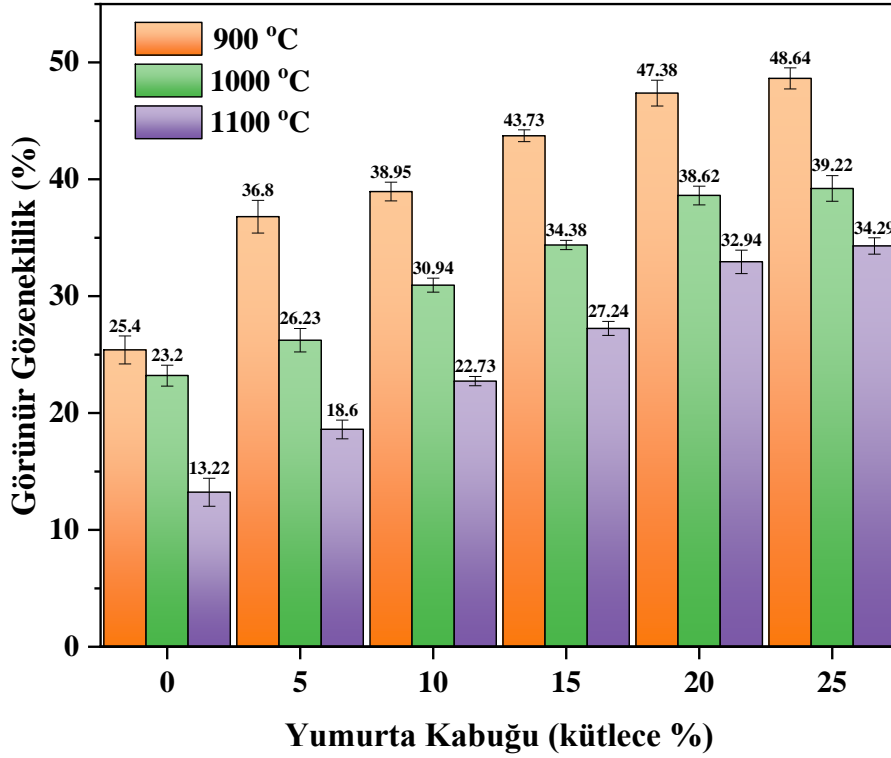
Şekil 4.7: Tuğla numunelerinin pişirme öncesi ve sonrası dijital fotoğraf görüntüleri

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

900°C, 1000°C ve 1100°C olmak üzere üç farklı pişirme sıcaklığında referans ve YK katkılu tuğla numuneler üretilmiştir. Üretilen tuğla numuneleri, fiziksel (görünür gözeneklilik, su emme ve bulk yoğunluk) özellikler, basınç dayanımı ve ısı iletkenlik açısından karakterize edilerek aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

### 5.1. Görünür Gözeneklilik

Görünür gözeneklilik, tuğlaların mühendislik özellikleri açısından oldukça kritik bir parametredir. Örneğin, basınç dayanımındaki azalma, su emme oranının artması ve ısı iletkenlik katsayısının azalması gözeneklilikteki artışın bir sonucudur. Şekil 5.1, üç farklı sıcaklıkta pişirilen tuğla numunelerinin görünür gözeneklilik değerlerini göstermektedir. Buna göre, tuğlaların gözenekliliği %13,22 ile %48,64 aralığında değişmektedir. Sadece İAÇ içeren referans numunelerinin gözeneklilik değerleri, YK katkılu tuğla numunelerine kıyasla daha düşüktür. Bu durum, İAÇ'nun kızdırma kaybı oranının (%16,42), YK'na (%43,01) kıyasla daha düşük olmasından kaynaklanabilir. Ayrıca, deneysel bulgular pişirme sıcaklığının ve YK miktarının gözenek oluşumunda oldukça etkili olduğunu açıkça göstermektedir. YK yapısındaki kalsiyum karbonat'ın ( $\text{CaCO}_3$ ) ısı ayrışması sonucu karbondioksit gazı ( $\text{CO}_2$ ) açığa çıkar ve kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ) oluşur. Bunun sonucunda da tuğla bünyesinde gözenekler meydana gelir. Şekil 4.1.'deki sonuçlar, pişirme sıcaklığı arttıkça gözenekliliğin azalma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bu durum, daha yüksek pişirme sıcaklıklarında tuğla yapısında densifikasyon olayının artışına atfedilebilir (Yaras, 2020). Nitekim, son derece reaktif olan  $\text{CaO}$ , özellikle de yüksek pişirme sıcaklıklarında tuğla bünyesinde kuvars ve kil mineralleri ile birlikte kalsiyum-alümina-silikat içeren yeni fazlar oluşturma eğilimindedir (Sutcu vd., 2015). Sonuçlar, YK'nun tuğla üretiminde gözenek yapıcı ajan olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Literatürde, kil esaslı tuğlaların gözenekliliğini arttırmak için vermikülit (Sutcu, 2015) ve pomza (Gencel, 2015) gibi hafif minerallerin yanısıra endüstriyel atıklardan olan karbonatlama çamuru (Yaras vd., 2019) ve mermer atığının (Sutcu vd., 2015) kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur.

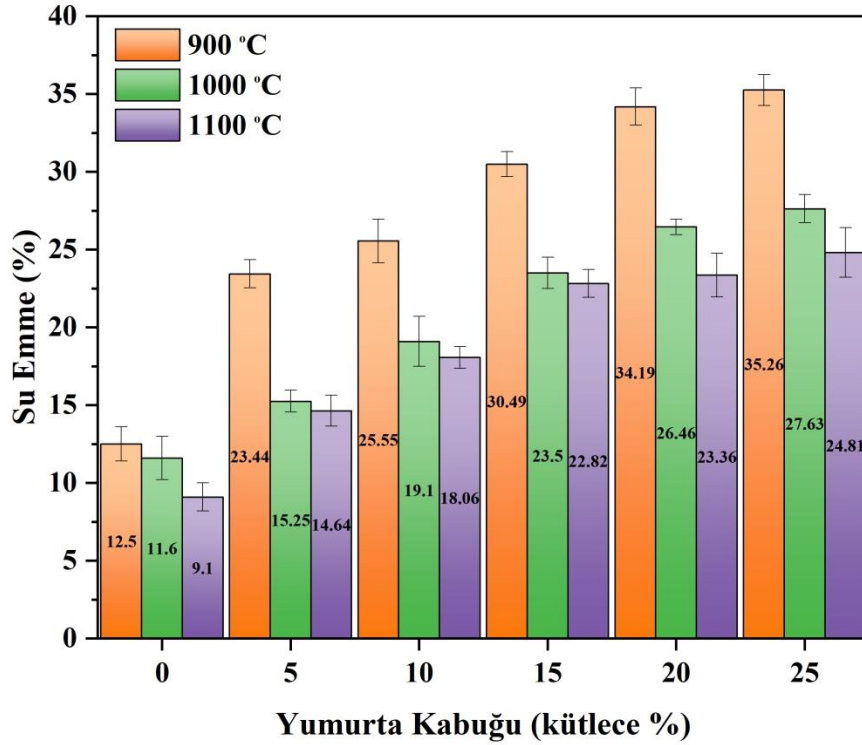


Şekil 5.1: Görünür gözeneklilik sonuçları

## 5.2. Su Emme

Nemli ortam şartlarına dayanıklılığın bir göstergesi olarak değerlendirilen su emme özelliği, seramik esaslı malzemeler için (özellikle de tuğlalar) son derece önemlidir (Phonphuak vd., 2016). Şekil 5.2, üretilen tuğla numunelerinin su emme performanslarını göstermektedir. Buna göre, su emme değerleri %9,1 ile %35,26 aralığında değişim göstermektedir. YK içeriği ve pişirme sıcaklığı da tuğlaların su emme performansı üzerinde etkilidir. Referans numune ile karşılaştırıldığında, her üç pişirme sıcaklığı için YK içeriğinin artışına bağlı olarak su emme değerleri artış kaydetmiştir. Bütün YK katkı oranları için pişirme sıcaklığının 900°C'den 1100°C'ye çıkmasıyla da bir azalma eğilimi söz konusudur. Diğer bir ifadeyle, pişirme sıcaklığının artması su emme üzerinde azaltıcı bir etkiye sahipken, YK içeriğinin artışı su emme performansını arttırmaktadır. Ayrıca, pişirme sıcaklığı ve YK miktarına bağlı olarak su emme oranında meydana gelen değişimin, pişmiş tuğlaların görünür gözenekliliği ile benzer bir eğilim sergilediği görülmektedir. Literatürde, benzer ilişkiler çeşitli araştırmacılar tarafından daha önce de rapor edilmiştir (Eliche-Quesada ve Leite-Costa, 2016; Lingling vd., 2005; Sutcu vd.,

2019). ASTM C62 standardına göre, tuğlaların su emme sınır değerleri şiddetli, orta ve ihmal edilebilir hava koşulları için sırasıyla %17, %22 ve sınırsız olarak tanımlanmıştır (ASTM C62, 2013). Buna göre; her üç pişirme sıcaklığında hazırlanan referans numuneler ile 1000°C ve 1100°C'de pişirilen %5 YK katkılı tuğlalar şiddetli hava koşulları için uygundur. 1000°C ve 1100°C'de hazırlanan %10 YK içeriğine sahip tuğlalar ise orta şiddetli hava şartlarına uygundur. Bunların dışında kalan tüm tuğla numuneleri, su emme değerleri %22'den yüksek olduğu için sınırsız grubunda değerlendirilebilir.

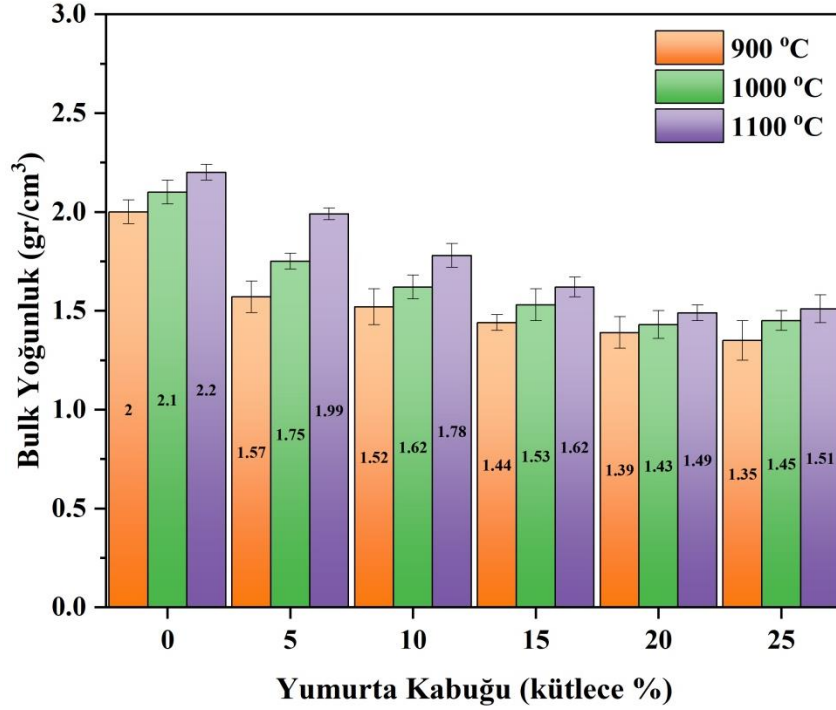


Şekil 5.2: Su emme sonuçları

### 5.3. Bulk Yoğunluk

Şekil 5.3'deki bulk yoğunluk sonuçlarına göre, 1100°C'de pişirilen tuğlaların bulk yoğunluk değerleri 900°C ve 1000°C'de pişirilen tuğlaların bulk yoğunluk değerlerinden daha yüksektir. Diğer bir ifadeyle, pişirme sıcaklığının artması bulk yoğunluk değerlerinde artışa sebep olmuştur. 900°C, 1000°C ve 1100°C'de pişirme sıcaklıklarındaki referans numunelerin bulk yoğunlukları sırasıyla 2,0 g/cm<sup>3</sup>, 2,1 g/cm<sup>3</sup> ve 2,2 g/cm<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda tuğla karışımındaki partiküller arasında meydana gelen vitrifikasyon reaksiyonunun daha etkin olmasından kaynaklanabilir (Sutcu vd., 2014; Yaras vd., 2019). 900°C pişirme sıcaklığında hazırlanan %5, %10, %15, %20 ve

%25 YK katkılı numunelerin bulk yoğunlukları referans numuneden sırasıyla %21,5, %24, %28, %30,5 ve %32,5 oranında daha düşüktür. Benzer şekilde, 1000°C ve 1100°C pişirme sıcaklıkları için de bir azalma trendi gözlenmiştir. Özetle, referans numunelerle kıyaslandığında, tuğla numunelerinin bulk yoğunlukları üç pişirme sıcaklığı için YK içeriğinin artmasıyla azalış göstermiştir. Bu azalma, YK bünyesindeki karbonatlı bileşiklerin yüksek sıcaklıklarda bozunmasından kaynaklanmaktadır (Yaras vd., 2019). ASTM C90 uluslararası standartına göre tuğlaların bulk yoğunluk değerleri için hafif (<1680 kg/m<sup>3</sup>), orta ağırlık (1680-2000 kg/m<sup>3</sup>) ve normal ağırlık (>2000 kg/m<sup>3</sup>) şeklinde bir sınıflandırma yapılmıştır. Buna göre, üç farklı pişirme sıcaklığında üretilen referans numuneler “normal ağırlık”, 1000°C ve 1100°C sıcaklıkta pişirilen %5 YK katkılı numuneler ile 1100°C’de pişirilen %10 YK katkılı numuneler “orta ağırlık” ve diğer numuneler ise “hafif” olarak sınıflandırılabilir (ASTM C90, 2014).



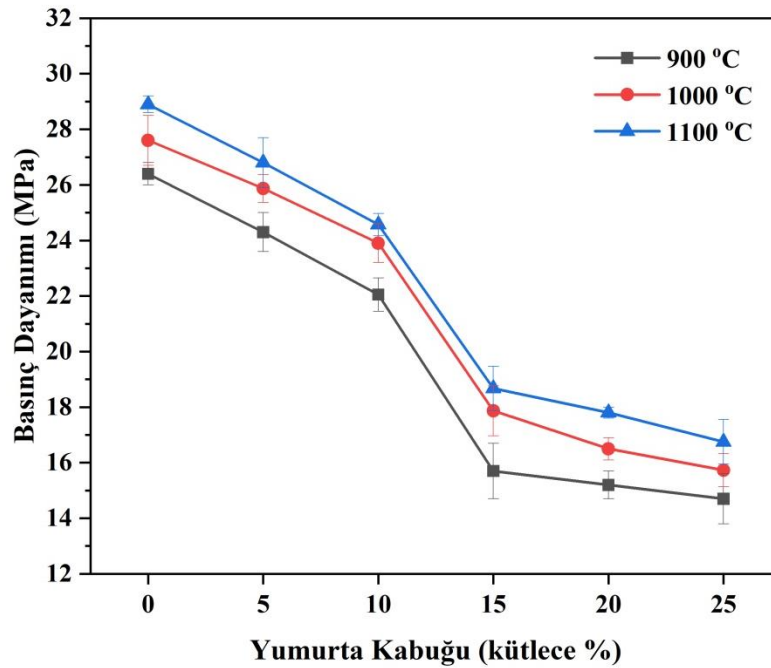
Şekil 5.3: Bulk yoğunluk sonuçları

#### 5.4. Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı, tuğlanın ağır yüklere dayanabilme yeteneğinin bir göstergesidir. Bu nedenle basınç dayanımı, tuğlaların mühendislik uygulamaları açısından kritik öneme sahiptir (Ukwatta vd., 2015). Şekil 5.4’deki sonuçlara göre; tuğlaların basınç dayanımları 14,7 MPa ile 28,9 MPa aralığında değişim sergilemektedir. Üç pişirme sıcaklığı için YK



katkı oranının artışına bağlı olarak basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir. Nitekim, YK kullanımı tuğla bünyesinde gözenek oluşumuna neden olmuştur. Bu gözeneklerin varlığı uygulanan kuvvet karşısında tuğlanın dayanımında azalmaya sebebiyet vermiştir. Gözenek yapıcı ajan olarak çeşitli katkıların kullanıldığı çalışmalarda da benzer sonuçlar gözlenmiştir (Sutcu vd., 2015; Sutcu ve Akkurt, 2009; Yaras vd., 2019). Diğer taraftan, pişirme sıcaklığı 900°C'den 1100°C'ye yükseldiğinde basınç dayanım performansında artış gözlenmiştir. Basınç dayanımındaki bu iyileşme, yüksek pişirme sıcaklıklarında oluşabilecek muhtemel kalsiyum-alümina-silika gibi yeni fazların gözenekleri doldurulması ile ilişkili olabilir (Faria vd., 2012; Phonphuak vd., 2016). Mühendislik uygulamalarında yapı malzemesi olarak tuğlaların kullanılabilmesi için standartlar gereği 5 MPa ile 8 MPa arasındaki minimum basınç mukavemetine sahip olması istenir (Indian Standart 3495, 1992; TS EN 771-1, 2005). Buna göre, üretilen tuğlalar, bütün YK katkı oranları ve pişirme sıcaklıkları için mekanik dayanım açısından standart gerekliliklerini karşılamaktadır.

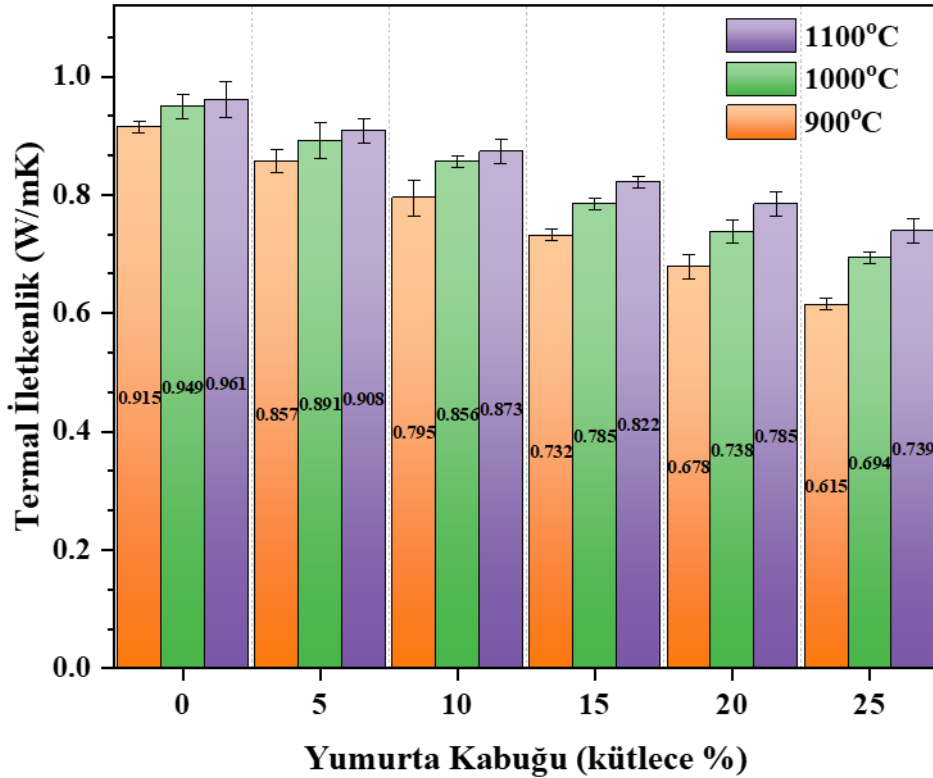


Şekil 5.4: Basınç dayanım sonuçları

### 5.5. Termal İletkenlik

Günümüzde üretilen toplam enerjinin yaklaşık %40'ı binalarda kullanılmakta olup başta ısı yalıtım sorunları olmak üzere çeşitli nedenlerden dolayı enerjinin neredeyse yarısı duvarlardan kaybolmaktadır (Del Coz Díaz vd., 2009; Sutcu vd., 2014). Bu nedenle, duvar

yapı malzemesi olarak kullanılan tuğlaların ısı iletkenliği tüm binanın enerji verimliliğini etkileyen önemli bir parametredir. Şekil 5.5, üretilen tuğlaların termal iletkenliklerinin 0,961 W/mK ile 0,615 W/mK arasında değiştini göstermektedir. 900°C, 1000°C ve 1100°C pişirme sıcaklıkları için sadece İAÇ içeren referans tuğlalarının ısı iletkenlikleri sırasıyla 0,915 W/mK, 0,949 W/mK ve 0,961 W/mK olarak bulunmuştur. Bu, önceki çalışmalarda bildirilen kil tuğlaların ısı iletkenlik değerlerinden daha düşüktür (Eliche-Quesada ve Leite-Costa, 2016; Gencel vd., 2013; Sutcu vd., 2015). Görünür gözeneklilik ve bulk yoğunluk, tuğlaların termal davranışları üzerinde etkili olan parametrelerdendir (Kazmi vd., 2018). Bu tez çalışmasında, YK ilavesine bağlı olarak gözeneklilik artarken bulk yoğunluk değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu durum, YK ihtiva eden tuğlaların referans numuneye kıyasla daha düşük termal iletkenlik değerine sahip olması şeklinde açıklanabilir (Gencel vd., 2021).



Şekil 5.5: Termal iletkenlik sonuçları

## 5.6. Kızdırma Kaybı

Tablo 5.1'deki verilere göre, YK ihtiva eden numunelerde meydana gelen kızdırma kayıpları her üç pişirme sıcaklığı için YK içermeyen referans numunelerden daha

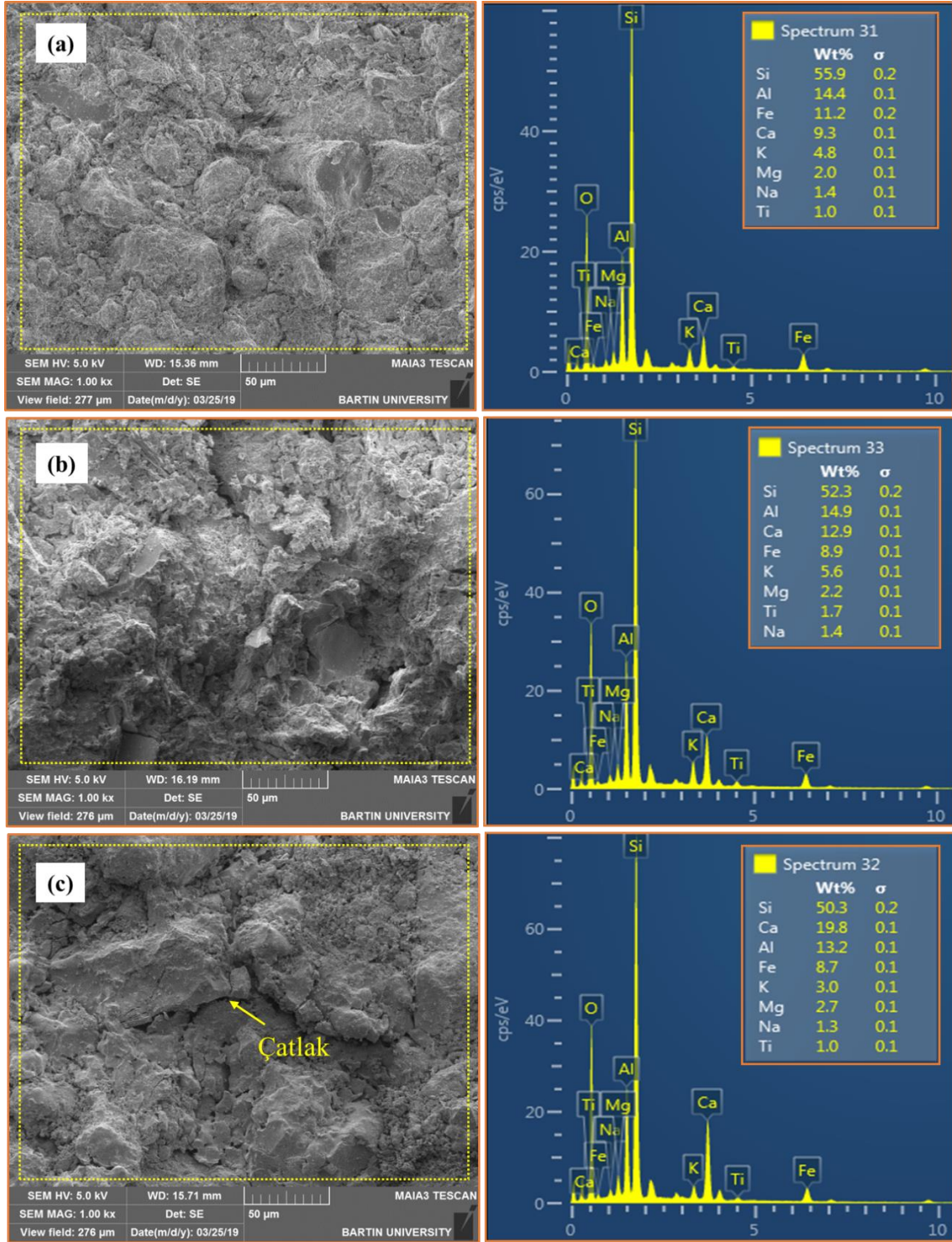
yüksektir. YK içeriğinin artması kızdırma kayıplarında da artışa neden olmuştur. Bununla birlikte, pişirme sıcaklığının artmasıyla kızdırma kaybı değerlerinde azalma gözlenmiştir.

Tablo 4.1: Pişirilen tuğlaların kızdırma kaybı sonuçları

Pişirme sıcaklığı, °C	YK katkı oranı (kütlece), %					
	0	5	10	15	20	25
900	13,96	15,08	16,65	17,95	18,88	20,71
1000	12,84	14,76	15,06	16,84	17,47	19,04
1100	11,92	13,03	14,19	15,01	16,69	18,11

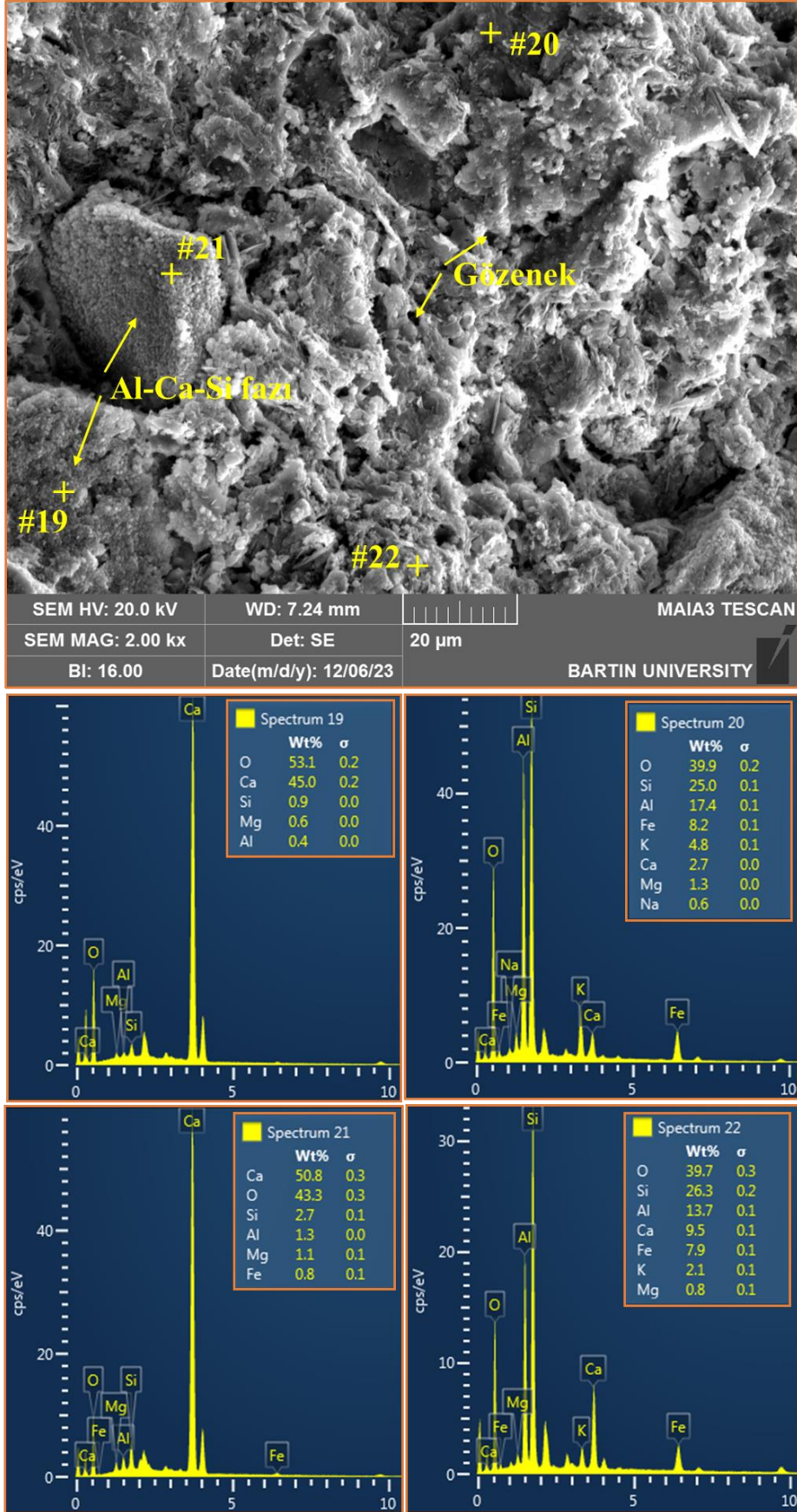
### 5.7. Pişirilen Tuğlaların SEM Görüntüleri ve EDS Analizleri

900°C, 1000°C ve 1100°C’de pişirilen YK içermeyen referans tuğlaların ve %25 YK katkılı tuğlaların SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları sırasıyla Şekil 5.6, Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da verilmiştir. Buna göre; her üç pişirme sıcaklığı için referans numunelerin bünyesinde gözeneklerin varlığı söz konusu değildir. Ayrıca, İAÇ’nun kimyasal bileşimine bağlı olarak Si elementi başta olmak üzere Al, Ca ve Fe elementlerinin bünyede olduğu görülmektedir (Şekil 5.7). %25 YK ihtiva eden tuğlaların SEM görüntüleri ise pişirme sonrası bünyede gözeneklerin meydana geldiğini göstermektedir. Bununla birlikte, pişirme sıcaklığındaki artışa bağlı olarak vitrifikasyon derecesinin de arttığı söylenebilir. Bu, tuğlaların yoğunluğunun pişirme sıcaklığının artması ile arttığı anlamına gelir. Bu durum, bulk yoğunluk sonuçları ile örtüşmektedir. Ayrıca, %25 YK içeren tuğla örneklerinde, küresel formdaki yapıların varlığı dikkat çekmektedir. Bu yapının pişirme işlemiyle meydana gelen Al-Ca-Si fazına ait olduğu (anortit) düşünülmektedir. Aşağıda yer alan pişirme sonrası tuğlaların XRD analizleri bölümünde oluşan fazlar gösterilmektedir. 900°C, 1000°C ve 1100°C’de pişirilen %25 YK katkılı tuğlaların yapısındaki elementlerin dağılımını belirlemek amacıyla yapılan haritalama (mapping) analiz sonuçları Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de verilmiştir.

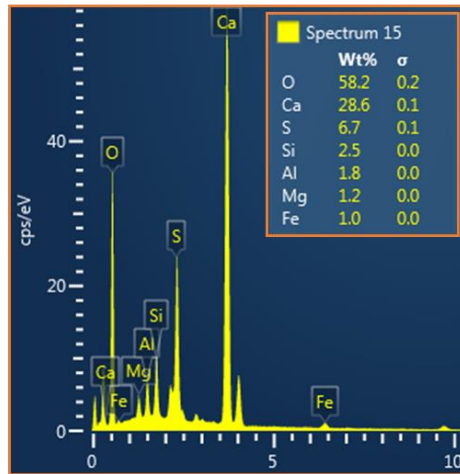
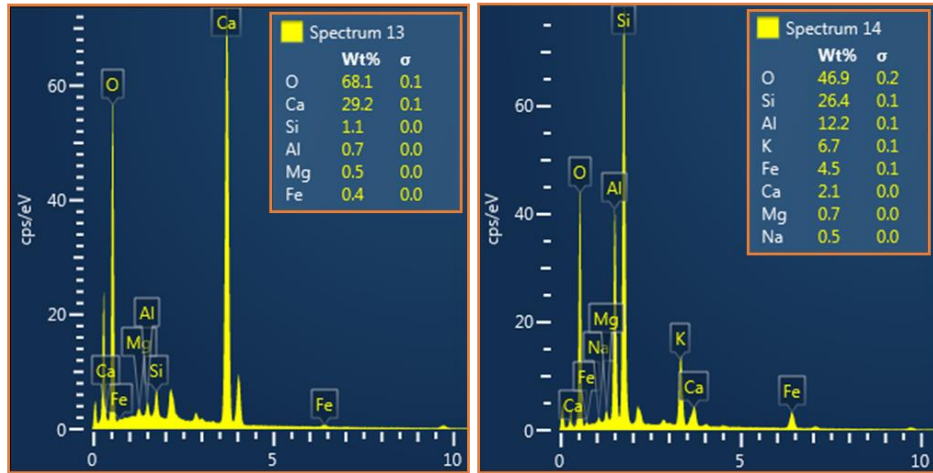
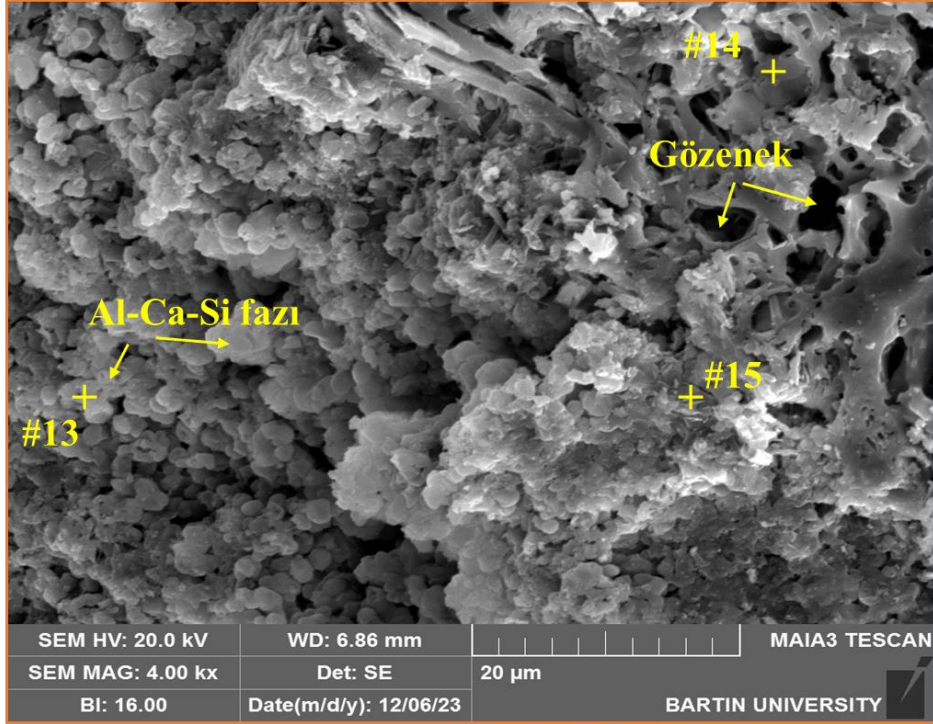


Şekil 5.6: 900°C (a), 1000°C (b) 1100°C’de pişirilen referans tuğlaların SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları



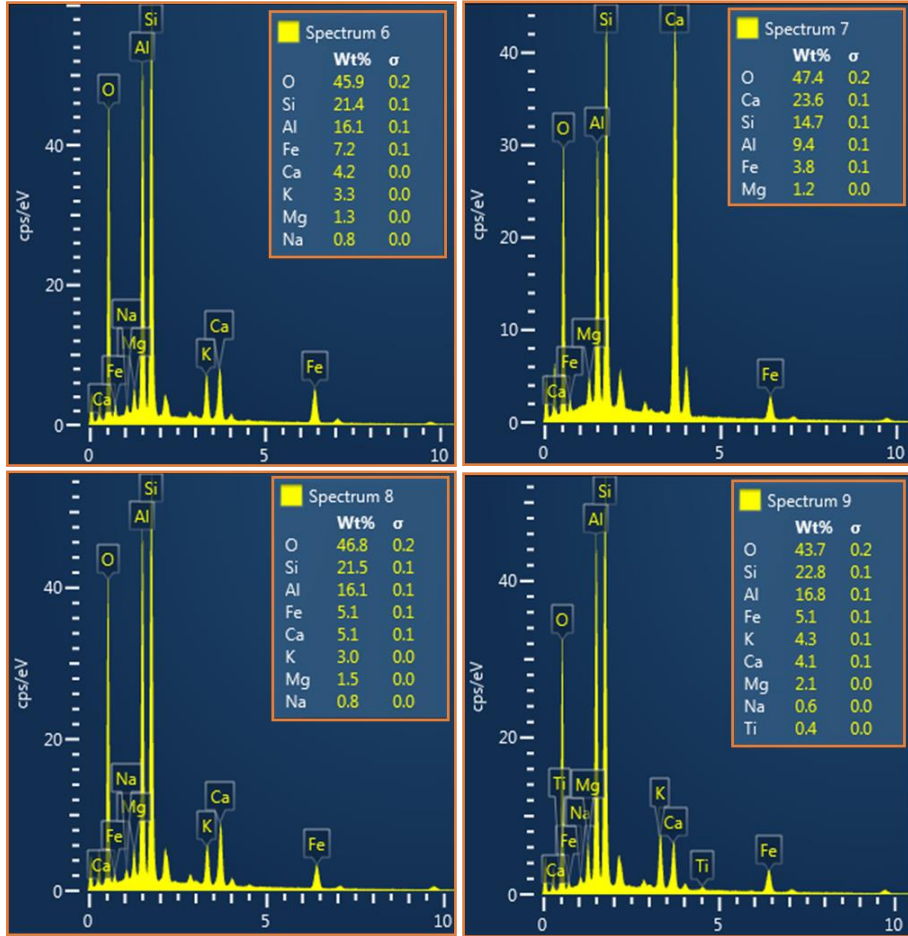
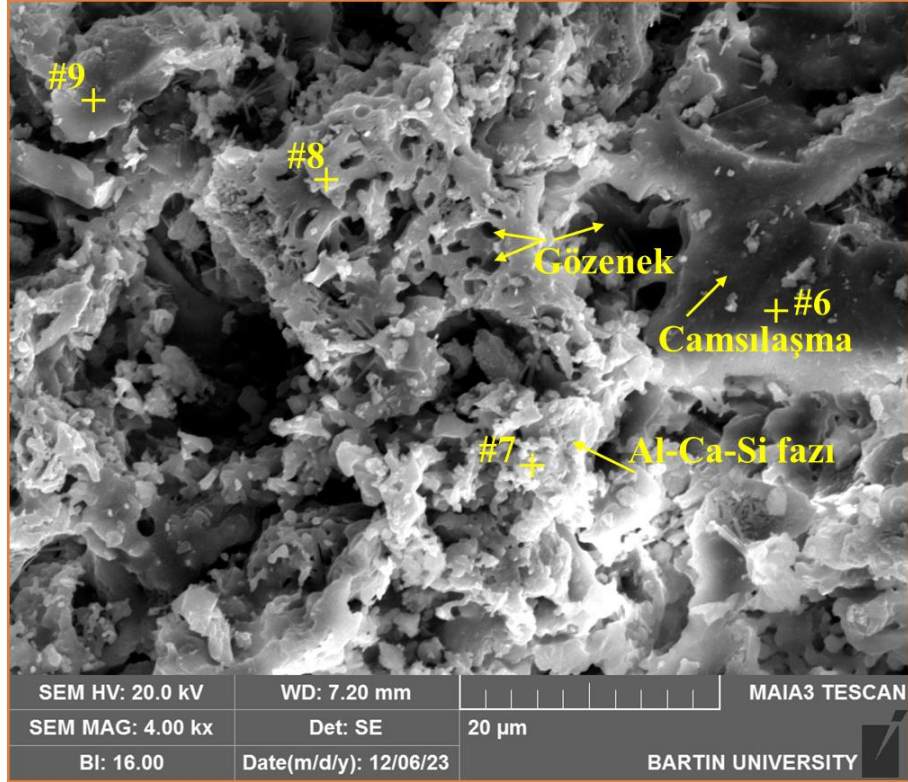


Şekil 5.7: 900°C’de pişirilen %25 oranında YK içeren tuğlanın SEM görüntüsü ve EDS analizi

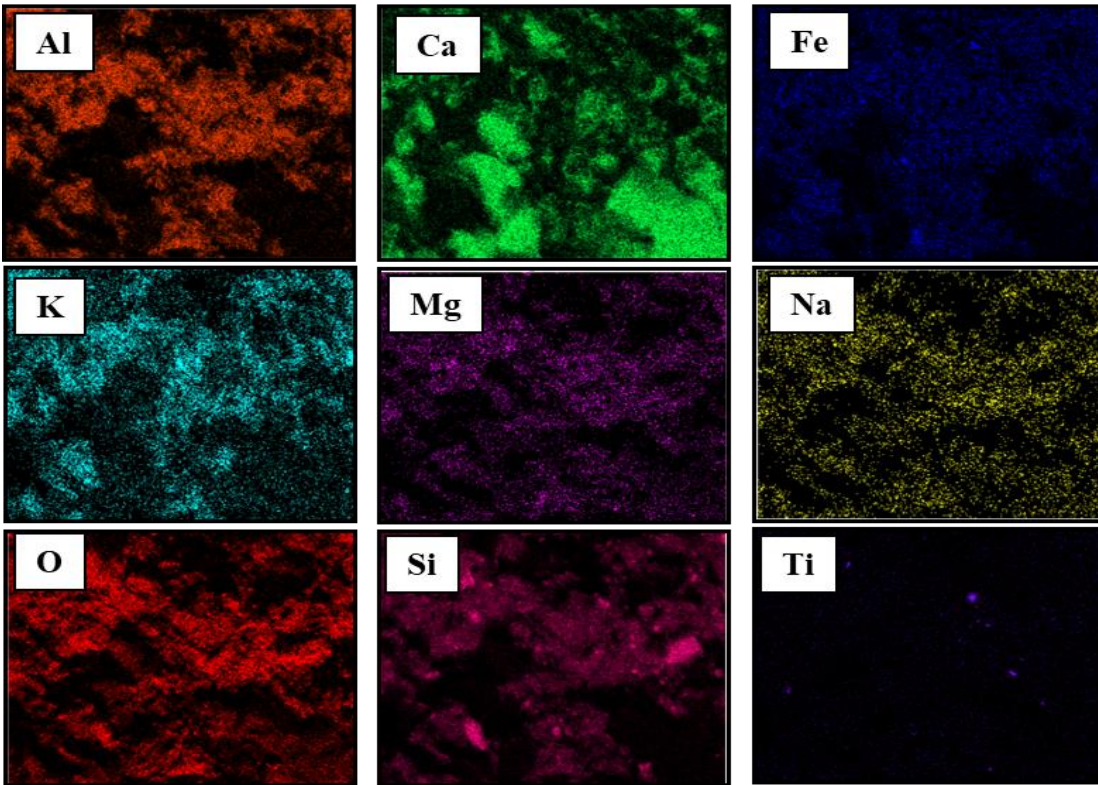
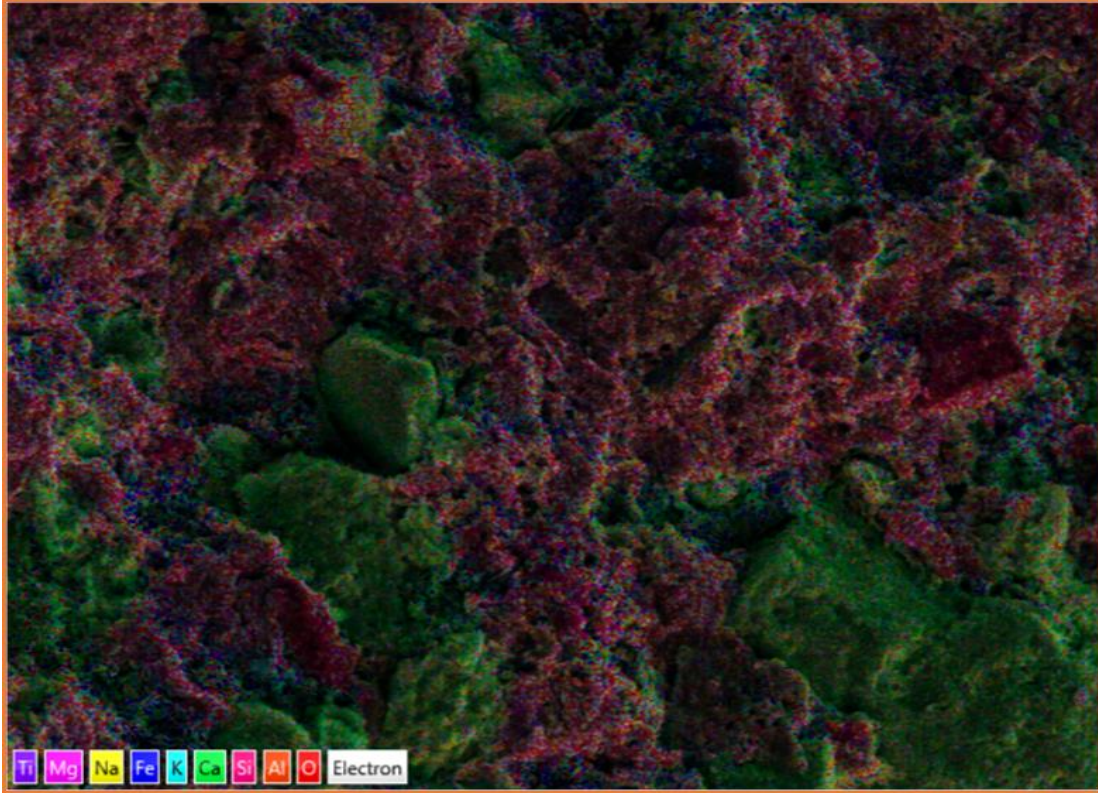


Şekil 5.8: 1000°C’de pişirilen %25 oranında YK içeren tuğlanın SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları



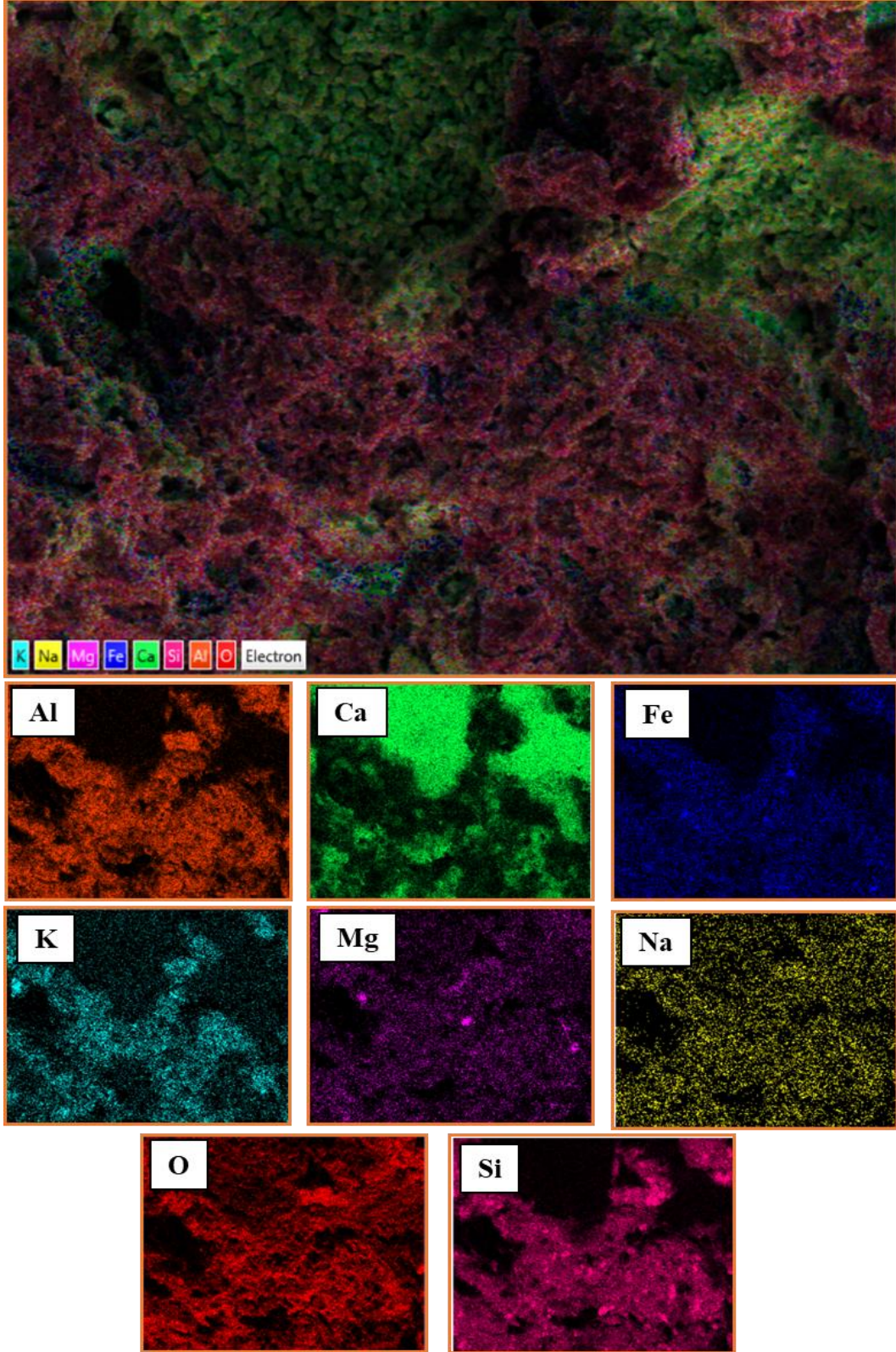


Şekil 5.9: 1100°C’de pişirilen %25 oranında YK içeren tuğlanın SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları



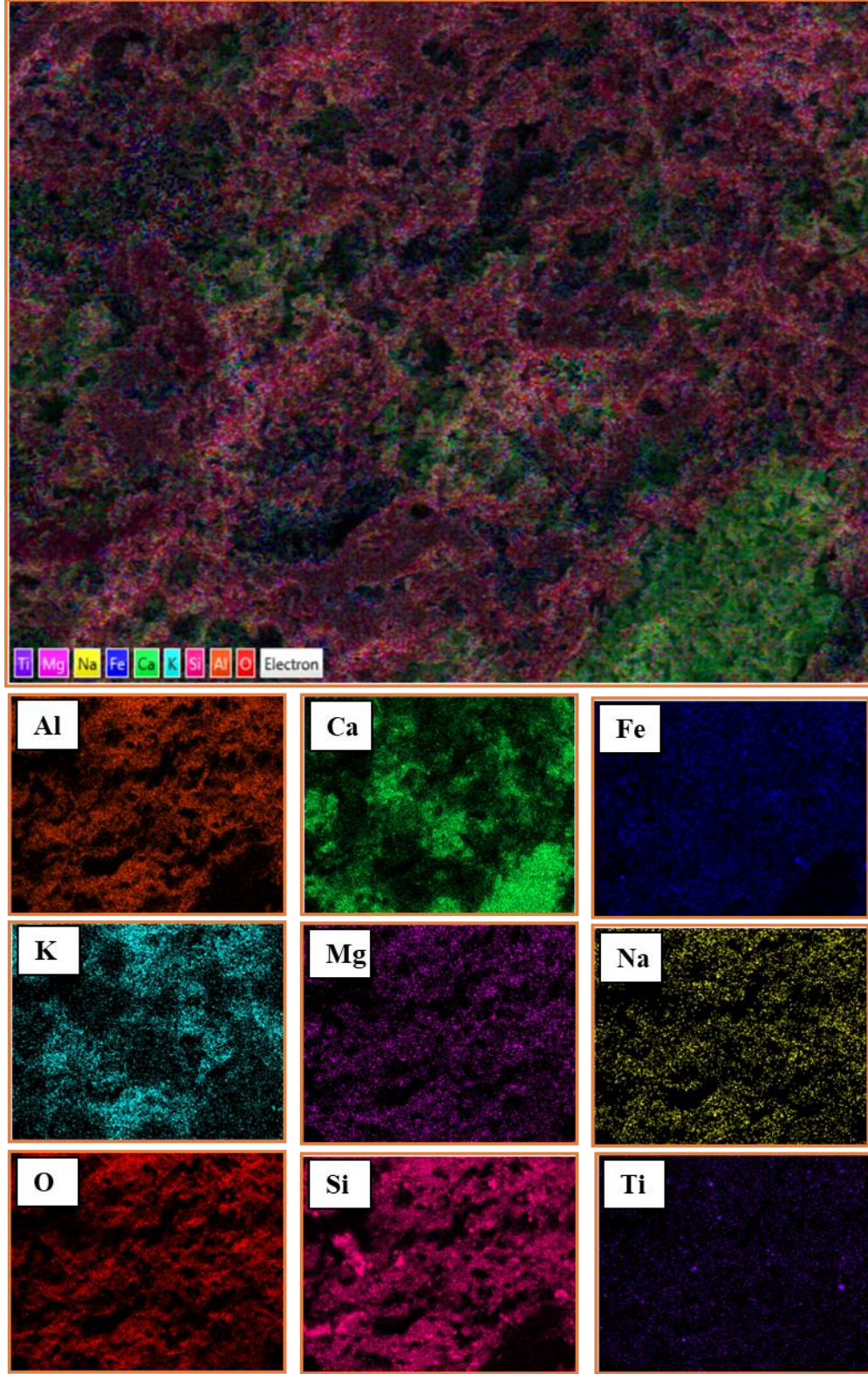
Şekil 5.10: 900°C'de pişirilen %25 oranında YK içeren tuğlanın haritalama (mapping) analiz sonuçları





Şekil 5.11: 1000°C'de pişirilen %25 oranında YK içeren tuğlanın haritalama (mapping) analiz sonuçları

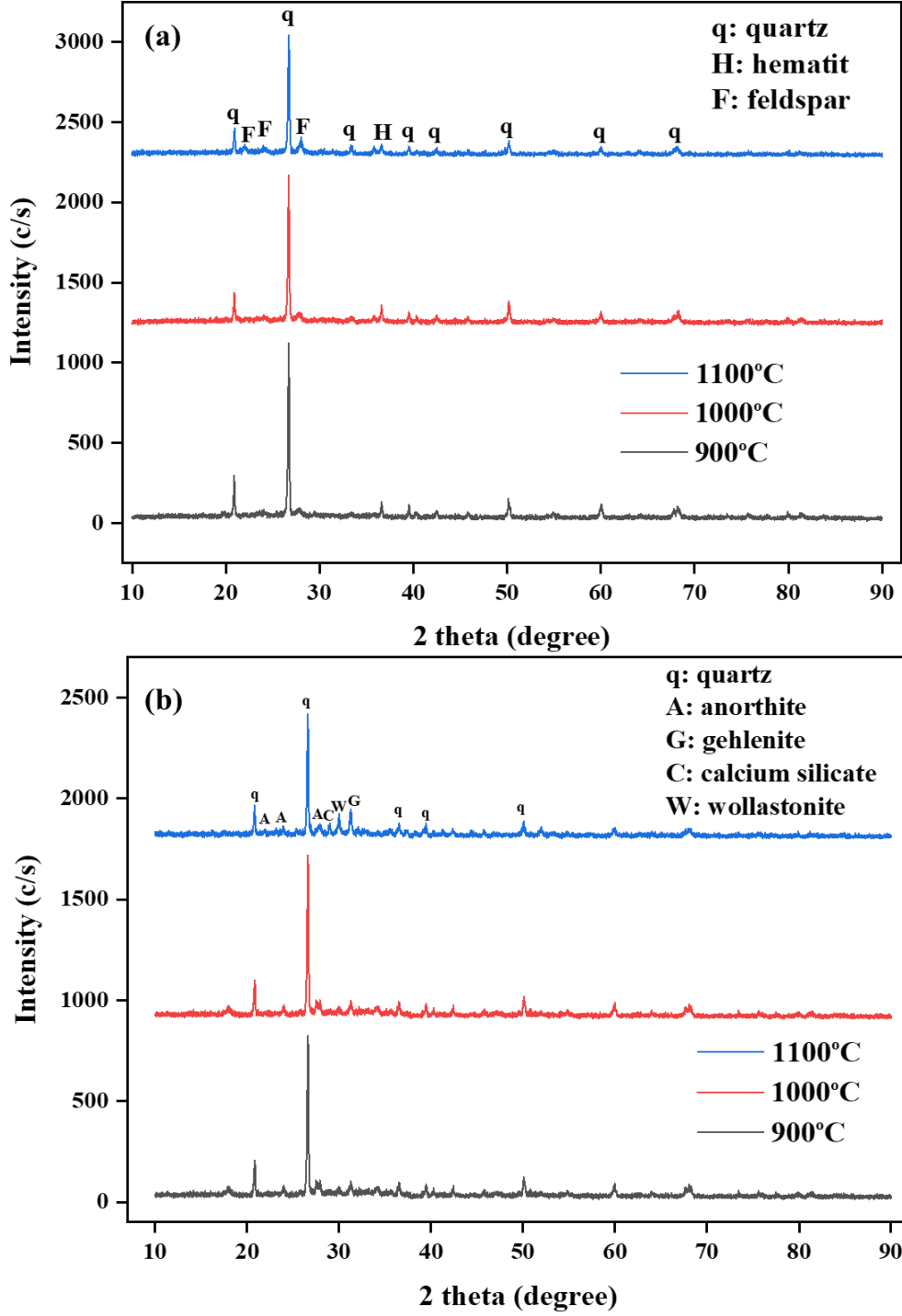




Şekil 5.12: 1100°C'de pişirilen %25 oranında YK içeren tuğlanın haritalama (mapping) analiz sonuçları

## 5.8. Pişirme Sonrası Tuğlaların XRD Analizleri

YK ihtiva etmeyen referans tuğla numunelerine ait XRD verilerine göre, tuğla yapısı hematit ve feldspar fazlarının yanı sıra ana faz olarak kuvars'dan oluşmaktadır (Şekil 5.13(a)). Pişirme sıcaklığının artmasıyla İAÇ'nun bünyesindeki muskovit mineral fazı ayrılmış ve bu faza ait pikler kaybolmuştur. Bu durum, pişirme işlemi sırasında sıcaklığın etkisiyle tuğla bünyesinde feldspat ve hematit fazlarının oluşması ile açıklanabilir. Şekil 5.13(b)'deki %25 YK içeren tuğla numunelerinin bünyesinde pişirme işlemi sonrasında, özellikle de 1100°C pişirme sıcaklığında, kuvars fazının yanı sıra yeni kristal fazların da oluştuğu görülmektedir. Şöyle ki; tuğla karışımında yer alan YK'daki kalsit, yüksek sıcaklıklarda bozunarak kalsiyum oksite (CaO) dönüşmüş ve oluşan CaO yüksek sıcaklıklarda İAÇ bünyesindeki bileşenlerle tepkimeye girmiştir. Tepkime sonucunda kalsiyum alümina silikat bileşiğinin yüksek sıcaklıktaki fazları olan anortit ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), gehlenit ( $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ), wollastonit ve kalsiyum silikat fazları meydana gelmiştir. Literatürde, kalsiyum oksit içeriğine sahip katkıların kullanılması ile üretilen kil esaslı tuğlaların bünyesinde pişirme sonrasında benzer fazların oluştuğu belirtilmektedir (Sutcu vd., 2015; Yaras vd., 2019).



Şekil 5.13: 900°C, 1000°C ve 1100°C’de pişirilen referans tuğlaların (a) ve %25 oranında YK içeren tuğlaların (b) XRD sonuçları

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tuğla üretim sürecinde, kil hammaddesine alternatif olarak İAÇ'nun ve gözenek yapıcı olarak da YK'nun kullanıldığı bu tez çalışmasında elde edilen deneysel sonuçlar şu şekilde sıralanabilir;

- Üç pişirme sıcaklığında da YK miktarının artması ile görünür gözeneklilik ve su emme değerlerinde artış meydana gelirken bulk yoğunluk değerlerinde azalma gözlemlendi.

- Üretilen tüm tuğla numunelerinin basma dayanımı 14,7 MPa ile 28,9 MPa aralığında değişim sergiledi. 900°C, 1000°C ve 1100°C pişirme sıcaklıklarında, YK katkı içeriğinin artması ile basma dayanımında azalma kaydedildi. Bu azalmanın sebebi, tuğla bünyesindeki gözeneklerin varlığıdır ki bu gözenekler uygulanan kuvvet karşısında tuğla dayanımında azalmaya neden olmuştur. Diğer taraftan, pişirme sıcaklığının 1100C'ye yükselmesi ile tuğlaların basma dayanım performansı iyileşmiştir. Bu iyileşmenin nedeninin, yüksek pişirme sıcaklıklarında oluşan kalsiyum-alümina-silika fazlarının tuğla bünyesindeki gözenekleri doldurması olduğu düşünülmektedir. Standartlar gereği tuğlaların en düşük basma mukavemetinin 8 MPa olması dikkate alındığında, üretilen tüm tuğlalar mekanik dayanım açısından standart gerekliliğini karşılamaktadır.

- Görünür gözeneklilikteki artışın bir sonucu olarak tuğlaların termal iletkenlik katsayı değerlerinde azalma meydana geldi. YK içeriğinin ve pişirme sıcaklığının artışı, termal iletkenlikte azalmaya neden oldu. 900°C, 1000°C ve 1100°C pişirme sıcaklıklarında, %25 YK ihtiva eden tuğla örnekleri için en düşük termal iletkenlik değerleri sırasıyla 0,739 W/mK, 0,694 W/mK ve 0,615 W/mK olarak ölçüldü.

Elde edilen deneysel sonuçlar ışığında, geleneksel tuğla üretiminde kullanılan kil hammaddesine alternatif olarak İAÇ'nun kullanılabilmesi ve YK'nun da gözenek yapıcı ajan olarak değerlendirilebileceği söylenebilir. Belirtilen proses şartlarında, basma dayanımı açısından standart gerekliliklerini sağlayan gözenekli tuğlaların, kil olmadan sadece atıklar (İAÇ ve YK) kullanılarak üretimi mümkündür. Endüstriyel ölçekte bu atıkların değerlendirilmesi, ilgili sektörlerin hem katı atık yükü azaltılabilir hem de sürdürülebilir, çevre dostu ve düşük maliyetli tuğla üretimine imkan sağlayabilir.

Sonraki çalışmalarda, ilgili atıklar kullanarak yüksek basma dayanımına ve ısı yalıtım özelliklerine sahip tuğla üretimi için optimizasyon çalışmaları yapılabilir. Tuğla retiminde farklı endüstriyel/evsel/tarımsal atıkların kullanımı incelenebilir. evre açısından tehlike teşkil eden ağır metal içerikli atıkların tuğla üretim sürecinde kullanımı durumunda, pişirme işlemi sonrasında li testleri yapılarak bu metallerin tuğla bünyesinden salınımı araştırılabilir. Üretilen termal iletkenliği düşük olan tuğlaların enerji verimliliği üzerindeki etkilerini görmek amacıyla laboratuvar ölçekli veya gerçek hava şartlarında testler gerçekleştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- Ahmad, T., Ahmad, K. Alam, M. (2016). Sustainable management of water treatment sludge through 3 'R' concept. *Journal of Cleaner Production*, 124: 1–13.
- Aksin, E. (2007). Endüstriyel Atıklarının Tuğla ve Kiremit Üretiminde Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı, İzmir, 89.
- Al-Shammari, T.Z.K. (2023). Kırşehir Yöresi Atık Mermer Tozunun Çevre Dostu Tuğla Üretiminde Kullanılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Kırşehir, 11-12.
- Amin, F., Abbas, S. Abbass, W. Salmi, A. Ahmed, A. Saeed, D. Sufian, M. Sayed, M.M. (2022). Potential use of wastewater treatment plant sludge in fabrication of burnt clay bricks. *Sustainability*, 14: 6711.
- ASTM C62. (2013). Standard specification for building brick (solid masonry units made from clay or shale). West Conshohocken, 19428-22959.
- ASTM C90. (2014). Standard Specification for Loadbearing Concrete Masonry Units. Annual book of ASTM standards, United States.
- Babatunde, A.O. ve Zhao, Y.Q. (2007). Constructive approaches toward water treatment works sludge management: an international review of beneficial reuses. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 37: 129–164.
- Banijamali, S., Rezaei, H.R. Yekta, B.E. ve Marghussian, V.K. (2007). Sinterability, crystallization and properties of glass–ceramic tiles belonging to CaF<sub>2</sub>–CaO–MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> system. *Ceramics International*, 33 (8): 1557–1561.
- Binici, H., Temiz, H. Sevinç, A. Eken, M. Kuçukönder, A. ve Ergül, T. (2013). Atık Pil Kömürü Ve Yumurta Kabuğunun Radyasyon Tutucu Materyal Olarak Üretimde Kullanılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16 (1): 8–14.
- Bowen, N.L. ve Greig, J.W. (1924). The system: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. SiO<sub>2</sub>. *Journal of the American Ceramic Society*, 7: 238–254.
- Brown, M.E. ve Gallagher, P.K. (2003). Handbook of thermal analysis and calorimetry: applications to inorganic and miscellaneous materials. Elsevier, 295-300.
- Chen, Y., Zhang, Y. Chen, T. Zhao, Y. ve Bao, S. (2011). Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailings. *Construction and Building Materials*, 25 (4): 2107–2111.
- Çimen, S. (2019). Bor atığı ve perlit katkılı üretilen tuğlanın fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Kastamonu,

- Cultrone, G. ve Sebastián, E. (2009). Fly ash addition in clayey materials to improve the quality of solid bricks. *Construction and Building Materials*, 23 (2): 1178–1184.
- Del Coz Díaz, J.J., Nieto, P.J.G. Biempica, C.B. ve Gero, M.B.P. (2007). Analysis and optimization of the heat-insulating light concrete hollow brick walls design by the finite element method. *Applied Thermal Engineering*, 27 (8-9): 1445–1456.
- Del Coz Díaz, J.J., Nieto, P.J.G. Hernández, J.D. ve Sánchez, A.S. (2009). Thermal design optimization of lightweight concrete blocks for internal one-way spanning slabs floors by FEM. *Energy and Buildings*, 41 (12): 1276–1287.
- Detho, A., Kadir, A.A. ve Ahmad, S. (2024). Utilization of wastewater treatment sludge in the production of fired clay bricks: An approach towards sustainable development. *Results in Engineering*, 21: 101708.
- Dharmappa, H.B., Hasia, A. ve Hagare, P. (1997). Water treatment plant residuals management. *Water Science and Technology*, 35 (8): 45–56.
- Eliche-Quesada, D. ve Leite-Costa, J. (2016). Use of bottom ash from olive pomace combustion in the production of eco-friendly fired clay bricks. *Waste Management*, 48: 323–333.
- Erdogmus, E., Harja, M. Gencil, O. Sutcu, M. ve Yaras, A. (2021). New construction materials synthesized from water treatment sludge and fired clay brick wastes. *Journal of Building Engineering*, 42: 102471.
- Faria, K.C.P., Gurgel, R.F. ve Holanda, J.N.F. (2012). Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks. *Journal of Environmental Management*, 101: 7–12.
- Gencil, O. (2015). Characteristics of fired clay bricks with pumice additive. *Energy and Buildings*, 102: 217–224.
- Gencil, O., Kazmi, S.M.S. Munir, M.J. Sutcu, M. Erdogmus, E. ve Yaras, A. (2021). Feasibility of using clay-free bricks manufactured from water treatment sludge, glass, and marble wastes: An exploratory study. *Construction and Building Materials*, 298: 123843.
- Gencil, O., Kizinievic, O. Erdogmus, E. Kizinievic, V. Sutcu, M. ve Muñoz, P. (2022a). Manufacturing of fired bricks derived from wastes: utilization of water treatment sludge and concrete demolition waste. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 22 (2): 78.
- Gencil, O., Kizinievic, O. Sutcu, M. Erdogmus, E. Velasco, P.M. Eliche- Quesada, D. Kizinievic, V. ve Kurmus, H. (2022b). Effects of expanded vermiculite on the properties of fired bricks from water treatment sludge. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 19 (3): 1214–1226.



- Gencel, O., Sutcu, M. Erdogmus, E. Koc, V. Cay, V.V. ve Gok, M.S. (2013). Properties of bricks with waste ferrochromium slag and zeolite. *Journal of Cleaner Production*, 59: 111–119.
- Şişman, C.B., Kocaman, İ. ve Gezer, E. (2006). Tekirdağ yöresinde üretilen ve tarımsal yapılarda yaygın olarak kullanılan tuğlanın fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine bir araştırma. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 3 (1): 32–40.
- Görhan, G. (2011). Çeltik kavuzunun tuğla üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 78 s.
- Gowsika, D. (2014). Experimental investigation of egg shell powder as partial replacement with cement in concrete. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 14 (1): 65–68.
- Hassan, A.M.S., Abdeen, A. Mohamed, A.S. ve Elboshy, B. (2022). Thermal performance analysis of clay brick mixed with sludge and agriculture waste. *Construction and Building Materials*, 344: 128267.
- Ibrahim, J.E.F.M., Kotova, O.B. Sun, S. Kurovics, E. Tihtih, M. ve Gömze, L.A. (2022). Preparation of innovative eco-efficient composite bricks based on zeolite-poor rock and Hen's eggshell. *Journal of Building Engineering*, 45: 103491.
- Indian Standart 3495 (1992). Methods of Tests of Burnt Clay Building Brick, Parts 1-4.
- İnce, A.S. (2019). Tuğla bünyesinde kömür artığı ve bor kullanımının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya, 10.
- Jannat, N., Al-Mufti, R.L. Hussien, A. Abdullah, B. ve Cotgrave, A. (2022). Influences of agro-wastes on the physico-mechanical and durability properties of unfired clay blocks. *Construction and Building Materials*, 318: 126011.
- Jonker, A. (2006). Insulating refractory materials from inorganic waste resources. Faculty of Science, Tshwane University of Technology, Doctor Technologiae, 120.
- Kazmi, S.M.S., Munir, M.J. Wu, Y.-F. Hanif, A. ve Patnaikuni, I. (2018). Thermal performance evaluation of eco-friendly bricks incorporating waste glass sludge. *Journal of Cleaner Production*, 172: 1867–1880.
- Kizinievič, O., Kizinievič, V. Boris, R. Girskas, G. ve Malaiškienė, J. (2018). Eco-efficient recycling of drinking water treatment sludge and glass waste: development of ceramic bricks. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20: 1228–1238.
- Kornmann, M. (2007). Clay bricks and rooftiles, manufacturing and properties. Société de l'industrie minérale, Paris, 120-143 s.
- Kristl, M., Jurak, S. Brus, M. Sem, V. ve Kristl, J. (2019). Evaluation of calcium carbonate

in eggshells using thermal analysis. *Journal of Thermal Analysis Calorimetry*, 138: 2751–2758.

- Lawanwadeekul, S., Srisuwan, A. Phonphuak, N. ve Chindaprasirt, P. (2023). Enhancement of porosity and strength of clay brick fired at reduced temperature with the aid of corn cob and waste glass. *Construction and Building Materials*, 369: 130547.
- Lingling, X., Wei, G. Tao, W. ve Nanru, Y. (2005). Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio. *Construction and Building Materials*, 19 (3): 243–247.
- Madurwar, M.V, Mandavgane, S.A. ve Ralegaonkar, R.V. (2014). Development and feasibility analysis of bagasse ash bricks. *Journal of Energy Engineering*, 141 (3): 4014022.
- Mahanna, H., Salah, H. Mansour, A. Elareed, A. Abadel, A.A. Nehdi, M.L. ve Tahwia, A.M. (2024). Eco-efficient reuse of alum-based water treatment sludge into structural sintering bricks. *Case Studies in Construction Materials*, 20: e03011.
- Mazen, N.A. (2009). Production of fire clay refractory bricks from local materials. *European Journal of Scientific Research*, 26 (3): 386–392.
- Mortula, M.M. ve Gagnon, G.A. (2007). Alum residuals as a low technology for phosphorus removal from aquaculture processing water. *Aquacultural Engineering*, 36 (3): 233–238.
- Munir, M.J., Kazmi, S.M.S. Wu, Y.-F. Hanif, A. ve Khan, M.U.A. (2018). Thermally efficient fired clay bricks incorporating waste marble sludge: an industrial-scale study. *Journal of Cleaner Production*, 174: 1122–1135.
- Muñoz, P., Morales, M.P. Mendivil, M.A. Juárez, M.C. ve Muñoz, L. (2014). Using of waste pomace from winery industry to improve thermal insulation of fired clay bricks. Eco-friendly way of building construction. *Construction and Building Materials*, 71: 181–187.
- Ngayakamo, B.H., Bello, A. ve Onwualu, A.P. (2020). Development of eco-friendly fired clay bricks incorporated with granite and eggshell wastes. *Environmental Challenges*, 1: 100006.
- O’kelly, B.C. (2010). Landfill disposal of alum water treatment residues: some pertinent geoengineering properties. *Journal of Residuals Science and Technology*, 7 (2): 95-113.
- Ozturk, S., Sutcu, M. Erdogmus, E. ve Gencel, O. (2019). Influence of tea waste concentration in the physical, mechanical and thermal properties of brick clay mixtures. *Construction and Building Materials*, 217: 592–599.
- Phonphuak, N., Kanyakam, S. ve Chindaprasirt, P. (2016). Utilization of waste glass to enhance physical–mechanical properties of fired clay brick. *Journal of Cleaner*

*Production*, 112: 3057–3062.

- Predel, B., Hoch, M. ve Pool, M.J. (2013). Phase diagrams and heterogeneous equilibria: a practical introduction. Springer Science & Business Media, 128-129.
- Razali, M., Zhao, Y.Q. ve Bruen, M. (2007). Effectiveness of a drinking-water treatment sludge in removing different phosphorus species from aqueous solution. *Separation and Purification Technology*, 55 (3): 300–306.
- Riaz, M.H., Khitab, A. ve Ahmed, S. (2019). Evaluation of sustainable clay bricks incorporating Brick Kiln Dust. *Journal of Building Engineering*, 24: 100725.
- Şahin, S. (2001). Türkiyede TuğlaKiremit Sanayiinin Genel Görünümü ve Çorum İli Örneği. *Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 21 (2), 19-41.
- Şahin, Ş.E. (2008). Ham ve Kalsine Kolemanit Atıklarının Tuğla Yapımında Kullanım Olanaklarının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya, 79.
- Sales, A., De Souza, F.R. Almeida, F. ve Do C.R. (2011). Mechanical properties of concrete produced with a composite of water treatment sludge and sawdust. *Construction and Building Materials*, 25 (6): 2793–2798.
- Sharif, M.K., Saleem, M. ve Javed, K. (2018). Food materials science in egg powder industry, in: Role of Materials Science in Food Bioengineering. Elsevier, 505–537.
- Sun, Y., Fan, W. Zheng, H. Zhang, Y. Li, F. ve Chen, W. (2015). Evaluation of dewatering performance and fractal characteristics of alum sludge. *PLoS ONE*, 10 (6): e0130683.
- Sutcu, M. (2015). Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks. *Ceramics International*, 41 (2): 2819–2827.
- Sutcu, M. ve Akkurt, S. (2009). The use of recycled paper processing residues in making porous brick with reduced thermal conductivity. *Ceramics International*, 35 (7): 2625–2631.
- Sutcu, M., Alptekin, H. Erdogmus, E. Er, Y. ve Gencel, O. (2015). Characteristics of fired clay bricks with waste marble powder addition as building materials. *Construction and Building Materials*, 82: 1–8.
- Sutcu, M., Del Coz Díaz, J.J. Rabanal, F.P.A. Gencel, O. ve Akkurt, S. (2014). Thermal performance optimization of hollow clay bricks made up of paper waste. *Energy and Buildings*, 75: 96–108.
- Sutcu, M., Erdogmus, E. Gencel, O. Gholampour, A. Atan, E. ve Ozbakkaloglu, T. (2019). Recycling of bottom ash and fly ash wastes in eco-friendly clay brick production. *Journal of Cleaner Production*, 233: 753-764.

- TS EN 771-1 (2005). Specification for masonry units. Part1: clay masonry units, Ankara, Turkey, 1-44.
- Tutus, A., Killi, U. ve Cicekler, M. (2022). Evaluation of eggshell wastes in office paper production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12 (4): 1115–1124.
- Ukwatta, A., Mohajerani, A. Setunge, S. ve Eshtiaghi, N. (2015). Possible use of biosolids in fired-clay bricks. *Construction and Building Materials*, 91: 86–93.
- Wang, M.C. ve Tseng, W. (1993). Permeability behavior of a water treatment sludge. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119 (10): 1672–1677.
- Wu, S., Austin, D. Liu, L. ve Dong, R. (2011). Performance of integrated household constructed wetland for domestic wastewater treatment in rural areas. *Ecological Engineering*, 37 (6): 948–954.
- Yaras, A. (2020). Combined effects of paper mill sludge and carbonation sludge on characteristics of fired clay bricks. *Construction and Building Materials*, 249: 118722.
- Yaras, A., Sutcu, M. Gencel, O. ve Erdogmus, E. (2019). Use of carbonation sludge in clay based building materials processing for eco-friendly, lightweight and thermal insulation. *Construction and Building Materials*, 224, 57–65.
- Zerek, E. (2021). Yumurta kabuğu tozu eklenmiş kurabiyelerin bazı besinsel ve kalite özelliklerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Medipol Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Beslenme ve Diyetik Anabilim Dalı, 6-14.
- Zhao, J.C. (2011). Methods for phase diagram determination. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 341-360.
- Zhao, Y.Q. Babatunde, A.O. Hu, Y.S. Kumar, J.L.G. ve Zhao, X.H. (2011). Pilot field-scale demonstration of a novel alum sludge-based constructed wetland system for enhanced wastewater treatment. *Process Biochemistry*, 46 (1): 278–283.