



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KÖMÜR MADENCİLİĞİ ATIĞI İÇEREN
TUĞLA ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

AYSUN BACAKSIZOĞLU

DANIŞMAN

DR. ÖĞR. ÜYESİ GÜLFEM BİNAL

BARTIN-2022



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KÖMÜR MADENCİLİĞİ ATIĞI İÇEREN TUĞLA ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AYSUN BACAKSIZOĞLU

BARTIN-2022

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Dr. Öğr. Üyesi Gülfem BİNAL danışmanlığında hazırlamış olduğum “KÖMÜR MADENCİLİĞİ ATIĞI İÇEREN TUĞLA 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.

31.01.2022

Aysun BACAKSIZOĞLU

ÖNSÖZ

Üniversite öğretimim esnasında lisans döneminde olduğu gibi yüksek lisans döneminde de yanımda olup beni yalnız bırakmayarak danışmanlığımı üstlenen, araştırma konusunun seçiminden sonuçlandırılmasına kadar büyük emeği geçen, her türlü desteği sağlayan kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Gülfem BİNAL' e saygıyla teşekkürlerimi sunarım. Hayatım boyunca beni destekleyip yanımda olan aileme sonsuz teşekkürler. Bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne “2019-FEN-CY-006” nolu projemize verdiği destekten dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Aysun BACAKSIZOĞLU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KÖMÜR MADENCİLİĞİ ATIĞI İÇEREN TUĞLA ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Aysun BACAKSIZOĞLU

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Gülfem BİNAL

Bartın-2022, sayfa: 60

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte hammadde ve enerji ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Enerji ve hammadde ihtiyacının büyük kısmı madenlerden elde edilmektedir. Madenlerin işletilmesi sonucunda diğer endüstriyel faaliyetlerde olduğu gibi atıklar meydana gelmektedir. Milyon tonları bulan atık miktarları çevre kirliliği ve insan sağlığı açısından çok büyük tehdit oluşturmaktadır. Madencilik atıklarından biri olan kömür atıklarının bertarafı da ciddi sorunlar teşkil etmektedir. Bu çalışmada, kömür madencilik atıklarının tuğla yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğini incelemek için bir araştırma yapılmıştır.

Çalışma, kuru öğütme yapılarak toz haline getirilen kömür üretim işlemlerinin farklı aşamalarından elde edilen kömür madenciliği atıklarının tuğla kili içerisine değişen oranlarda (%0-100) ilave edilip presleme yöntemiyle şekillendirilen tuğla örneklerinin 950, 1050 ve 1150 °C sıcaklıklarda pişirilmesi ve pişmiş numunelerin fiziksel, mekanik, mineralojik ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesini kapsamaktadır. Atık içeren tuğla özellikleri, atık içermeyen standart tuğla özellikleri ile kıyaslanmıştır. Her üç pişirme

sıcaklığında da su emme, görünür gözeneklilik ve yığın yoğunluk değerleri Şist A ilavesiyle standart numuneye benzer değerlerde elde edilmiştir. Şist B ilavesiyle su emme ve görünür gözeneklilik değerleri artmış, yığın yoğunluk değerleri ise azalmıştır. Tüm tuğla numuneleri Türk standartlarına göre gerekli basınç dayanımına (en az 7 MPa) sahiptir. Kömür madenciliği atıklarının tuğla üretiminde alternatif hammadde kaynağı olarak kullanılabileceği saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kömür madenciliği atıkları, kil, tuğla, karakterizasyon.

Bilim Alanı Kodu: 91526.



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

BRICK PRODUCTION AND CHARACTERIZATION CONTAINING COAL MINING WASTE

Aysun BACAKSIZOĞLU

Bartın University

Graduate School

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof Gülfem BİNAL

Bartın-2022, pp: 60

The requirement for raw materials and energy, along with the development of technology, proceeds to increase with each passing day. Most of the energy and raw material requirements are obtained from mines. As in all industrial activities, wastes are generated as a result of the operation of mines. The amount of waste reaching millions of tons poses a great threat to environmental pollution and human health. The disposal of coal mining wastes, which is one of the mining wastes, also poses serious problems. The purpose of this study was to investigate on the use of coal mining waste as a brick building material.

The study has involved the addition of coal mining wastes obtained from different stages of coal production processes, which are pulverized by dry grinding, into the brick clay in varying proportions (0-100%), shaping by the pressing method and firing of the brick samples at 950, 1050, and 1150 °C temperatures. It has also involved thermal analysis (TGA) and XRD analysis of brick clay and coal mining wastes, the examination of the physical,

mechanical, mineralogical, and microstructural properties of fired brick samples. The waste containing brick properties were compared with the waste-free standard brick properties. At all three firing temperatures, the bulk density, apparent porosity, and water absorption values were similar to the standard sample with the addition of Shist A. With the addition of Schist B, the apparent porosity and water absorption values increased, the bulk density values decreased. All brick samples had the required compressive strength according to Turkish standards (at least 7 MPa). Coal mining wastes have been found to be a viable alternative raw material option for brick construction.

Keywords: Coal Mining Wastes, Clay, Brick, Characterisation.

Scientific Field Code: 91526.

İÇİNDEKİLER

BEYANNAME.....	ii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	4
2.1. Tuğla.....	4
2.1.1 Tuğlanın Önemi.....	4
2.1.2 Tuğlanın Üretilmesi.....	4
2.2. Kil ve Özellikleri.....	6
2.2.1 Kil Türleri.....	7
2.2.2 Kilin Tabakalı Yapısı.....	8
2.3. Kömür.....	9
2.3.1 Kömürün Tanımı ve Oluşumu.....	9
2.3.2 Kömür Zenginleştirme.....	11
2.3.3 Flotasyon İşlemi.....	12
2.3.4 Bitümlü Şistler.....	12
2.4. Kömür Atıkları ve Değerlendirilmesi.....	13
3. MATERYAL METOD.....	17
3.1. Kullanılan Hammaddeler.....	17
3.2. Tuğla Örneklerinin Hazırlanması.....	18
3.3. Pişmiş Tuğla Örneklerine Uygulanan Testler.....	21
3.3.1 Kızdırma Kaybı.....	22
3.3.2 Hacim Küçülmesi.....	22
3.3.3 Su Emme, Yığın Yoğunluk ve Görünür Gözeneklilik.....	22
3.3.4 Basma Mukavemeti.....	23
3.3.5 Faz analizi.....	23
3.3.6 Mikroyapı analizi.....	23
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	24

4.1. Hammaddelere Uygulanan Test Sonuçları	24
4.2. Üretilen Tuğla Örneklerine Uygulanan Testlerin Sonuçları	29
4.2.1 Kızdırma Kaybı Değerleri.....	29
4.2.2 Küçülme Değerleri	31
4.2.3 Su Emme ve Görünür Gözeneklilik Değerleri	34
4.2.4 Yığın Yoğunluk Değerleri	37
4.2.5 Basma Mukavemeti Değerleri.....	39
4.2.6 Pişmiş Tuğla Numunelerinin Mineralojik Faz Analizi.....	42
4.2.7 Pişmiş Tuğla Numunelerinin Mikroyapı Analizi	45
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	53
KAYNAKLAR.....	56



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
No	No
2.1: Kaolenit, mika ve montmorillonitin tabakalı yapılarına ait şematik gösterim.....	9
3.1: Kömür madencilik atıklarının ve kömür yıkama atıklarının etüvde kurutulması	18
3.2: Kurutulan hammaddelerin bilyalı değirmende öğütülmesi.....	19
3.3: 50 bar basınç altında preste basılan tuğla numuneleri	21
3.4: Tuğla numunelerinin pişirmek için fırına yerleştirilirken ve pişirme işlemi sonrası durumu.....	21
4.1: Tuğla kiline ait XRD paterni.....	25
4.2: Kömür madenciliği atıklarına ait XRD paterni	26
4.3: Tuğla kiline ait termogravimetrik analiz grafiği	28
4.4: Kömür atıklarına ait termogravimetrik analiz grafikleri a) Şist A, b) Şist B ve c) Flotasyon	27
4.5: Hammaddelerin tane boyutu analizi (a) Tuğla kili, (b) Şist A, (c) Şist B, (d) Flotasyon	28
4.6: Kömür madenciliği a) Şist A, b) Şist B, c) Flotasyon atığı katkılı tuğla numunelerinin farklı pişirim sıcaklıklarında kızdırma kaybı oranları	30
4.7: Kömür madenciliği a) Şist A, b) Şist B, c) Flotasyon atığı katkılı tuğla numunelerinin kuru küçülme oranları.....	32
4.8: Kömür madenciliği a) Şist A, b) Şist B, c) Flotasyon atığı katkılı tuğla numunelerinin pişme küçülmesi oranları.....	43
4.9: Kömür madenciliği a) Şist A, b) Şist B, c) Flotasyon atığı katkılı tuğla numunelerinin farklı pişirim sıcaklıklarında su emme oranları	44
4.10: Kömür madenciliği a) Şist A, b) Şist B, c) Flotasyon atığı katkılı tuğla numunelerinin farklı pişirim sıcaklıklarında görünür gözeneklilik oranları.....	36
4.11: Kömür madenciliği a) Şist A, b) Şist B, c) Flotasyon atığı katkılı tuğla numunelerinin farklı pişirim sıcaklıklarında yığın yoğunluk oranları.....	38
4.12: Kömür madenciliği a) Şist A, b) Şist B, c) Flotasyon atığı katkılı tuğla numunelerinin farklı pişirim sıcaklıklarında basma mukavemeti değerleri	46
4.13: Farklı sıcaklıklarda pişirilen standart tuğla örneklerine ait XRD paterni.....	43

4.14: Farklı sıcaklıklarda pişirilen ağ. %100 oranında Şist A içeren tuğla örneklerine ait XRD paterni.....	48
4.15: Farklı sıcaklıklarda pişirilen ağ.% 100 oranında Şist B içeren tuğla örneklerine ait XRD paterni	49
4.16: Farklı sıcaklıklarda pişirilen ağ. %100 oranında Flotasyon atığı içeren tuğla örneklerine ait XRD paterni	44
4.17: Pişirilmiş standart tuğla örneklerinin SEM görüntüsü a) 950°C b) 1150°C (G: Gözenek, KT: Kristal Taneleri, C: Camsı Faz).....	45
4.18: Ağırlıkça %100 oranında Şist A içeren pişirilmiş tuğla örneklerinin SEM görüntüsü a) 950°C b) 1150°C (G: Gözenek, KT: Kristal Taneleri, C: Camsı Faz, K: Kuvars)	46
4.19: Ağırlıkça %100 oranında Şist B içeren pişirilmiş tuğla örneklerinin SEM görüntüsü a) 950°C b)1150°C (G: Gözenek, KT: Kristal Taneleri, C: Camsı Faz, K: Kuvars)	47
4.20: Ağırlıkça %100 oranında Flotasyon atığı içeren pişirilmiş tuğla örneklerinin SEM görüntüsü a) 950°C b)1150°C (G: Gözenek, K: Kuvars).....	49
4.21: 950°C’de pişirilmiş standart tuğla örneğinin EDS analizi.....	49
4.22: Ağırlıkça %100 oranında Şist A içeren 1150°C pişirilmiş tuğla örneğinin EDS analizi	50
4.23: Ağırlıkça %100 oranında Şist B içeren 1050°C pişirilmiş tuğla örneğinin EDS analizi	51
4.24: Ağırlıkça %100 oranında Flotasyon atığı içeren 950°C pişirilmiş tuğla örneğinin EDS analizi.....	52

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
2.1: Kömürde bulunan mineraller.....	10
3.1: Kömür madenciliği atığı içeren tuğla karışımları (% ağırlıkça).....	20
4.1: Kullanılan hammaddelerin kimyasal analizleri (% ağırlıkça).....	24
4.2: Hammaddelerin ortalama tane boyut dağılımları	29



1. GİRİŞ

İnsanlar barınmak için yaklaşık 50 bin yıldır yapılar inşa etmektedirler. Bu yapıların güvenli, konforlu, şık ve aynı zamanda ekonomik olması istenmektedir. Yapılar hangi amaçla yapılmışsa o amaca uygun, aşırı deformasyona uğramadan güvenilir bir şekilde uzun yıllar boyunca dayanacak aynı zamanda ekonomik ve estetik özelliklere sahip olarak inşa edilmelidir.

Kaliteli yapıların inşa edilmesi için yapı malzemelerinin üretiminde; ham madde ve üretim yöntemi seçimi uygun yapılmalı ve üretilen malzemelerden beklenen niteliklerin doğru belirlenmesi gerekmektedir. Yapı inşası için en uygun malzeme yeterli dayanım ve dayanıklılığa sahip, şık görünen ve aynı zamanda en ucuza mal olan malzemedir.

En çok kullanılan yapı malzemeleri pişmiş toprak malzemelerdir. Pişmiş toprak malzemeler günümüzde de hala önemini korumaktadır. Bu malzemeler ucuz, temini kolay ve yüksek dayanımlı olmaları sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu malzemelerin en çok tercih edilenlerinin başında tuğla gelmektedir. Tuğla tekniğine uygun üretildiği zaman dış etkilere dayanıklı, basınç dayanımı yüksek, su emme potansiyeli düşük bir yapı malzemesidir.

Tuğla, su ile killi toprağın hamur şekline getirilip, şekil verme işlemi tamamlandıktan ve kurutulma işlemi yapıldıktan sonra yüksek sıcaklıklarda fırın ve özel ocaklarda pişirilmesi ile elde edilmektedir. Tuğla üretimi hammaddenin hazırlanması, şekil verme işlemi, kurutma ve pişirilme adımlarından oluşmaktadır. Tuğla üretiminde kullanılan killerin boyutları ve kimyasal bileşimi tuğla üretimi için uygun olmalıdır. Kilin iri taşlar ve atık malzemelerden arındırıldıktan sonra uygun tane boyutuna kadar öğütülmesi gerekmektedir. İstenilen tane boyutuna ulaşıldıktan sonra kil su ile karıştırılarak tuğla hamuru elde edilmektedir.

Tuğla hamurunun elde edilmesinden sonra hammaddeye şekillendirme işlemi uygulanır. Şekillendirme işleminden sonra yarı mamul tuğlalar elde edilmektedir. Şekillendirme işlemi makineler, kalıplar veya insanlar tarafından elleriyle yapılır. Şekillendirilen yarı mamulün mukavemet kazanması ve pişirme sırasında çatlamayı engellemek için kurutma işlemi yapılır. Kurutma işlemi oda sıcaklığında yapılabileceği gibi özel sıcaklığın ve nemin kontrol

altında tutulduğu odalarda da yapılabilir. Kurutulan tuğlalar en son aşama olarak pişirilir. Pişirme işlemi sırasında 300°C civarında sıcaklığa ulaşıldığında kil kimyasal reaksiyonlara uğramaktadır. Kil üzerindeki organik maddeler tamamen yanarak yok olurlar. Pişirme sıcaklığı 550°C' ye ulaştığında moleküler su bileşimi terk eder ve tuğla hamuru silis ve alümin halinde ayrışır. Pişirme sıcaklığı 550-900°C aralığına ulaştığı zaman ise silis ve alümin tekrar birleşerek metakaolin silikatını oluşturur. Tuğla artık sert ve belirli bir mukavemete sahip yapıdadır. Tuğla pişirme işleminde pişirme sıcaklığını arttırmak tuğlanın dayanımını arttırmakta, su emme özelliğini azaltmakta ve adet ağırlığını arttırmaktadır.

Doğal hammaddeler kullanılarak imal edilen kil esaslı seramik malzemeler bileşim ve hammadde değişimlerini tolere edebilir bu nedenle çeşitli endüstriyel atıkların fazla miktarlarda kullanımı için ideal ürünlerdir (Menezes ve ark. 2012, Ferreira 2002, Segades 2006). Bu sebeple endüstriyel atıkların seramik ürünlerde kullanılabilirliğine yönelik araştırmalar durmadan artmaktadır (Xu ve ark. 2017, Lemeshev ve ark. 2004, Stolboushkin ve ark. 2016, Yoo ve ark. 2005, Hui ve ark. 2009, Wei ve ark. 2010, Dondi ve ark. 1997, Safiuddin ve ark. 2010)

Yürürlükteki ulusal mevzuat hükümlerine göre bulunduranın elden çıkardığı ya da atmak zorunda olduğu bir madde atık olarak tanımlanabilir (Çetiner ve ark. 2006). Madencilik endüstrisi dünyanın en önemli ve en çok atık üreten endüstriyel faaliyetlerinden biridir (Sezgin 2020). Üst toprak, dekapaj, atık kaya ve zenginleştirme atıkları maden atıkları olarak ifade edilmektedir (Çetiner ve ark. 2006). Maden atıklarının kimyasal ve fiziksel özellikleri mineraloji ve jeokimyalarına, madencilik araçlarının cinsine, meydana gelen ürünün nem miktarı ve tane boyutuna göre değişmektedir (Menezes ve ark. 2012).

Son yıllarda tüketimin artması neticesinde artan sanayi üretimi kullanılabilir doğal hammaddeler ve enerji kaynaklarında hızla azalmaya yol açarken büyük miktarda üretim atıkları da oluşmakta, bu atıkların birçoğu ise geri dönüştürülememektedir (Ferreira 2002). Kömür madenciliği atıklarını da bu gruba dahil etmek mümkündür. Kömür madenciliği atıkları çok fazla yer işgal etmekte ve toprak kirliliği, yeraltı suyu kirliliği, CO, CO₂, SO_x, NO_x emisyonu ve havaya tozların karışması gibi önemli çevresel sorunlara neden olmaktadır (Xu ve ark. 2017).

Yapılan tez çalışmasında, tuğla üretiminde kömür madenciliği atıklarının kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ülkemizde kömür madenciliği atıklarının geleneksel seramik malzeme üretiminde değerlendirilmesine yönelik çalışmalar oldukça azdır. Yüksek miktarda ortaya çıkan bu atıkların tuğla üretiminde değerlendirilmesi çevre kirliliğinin önlenmesi, stoklama maliyetlerin azaltılması ve üretilen ürün ile kazanç sağlanabilmesi açısından önem arz etmektedir.



2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Tuğla

2.1.1 Tuğlanın Önemi

İnsanlığın ilk çağlarından itibaren pişmiş topraktan yapılmış malzemeler çok önemli yer tutmuştur. Tuğla ise bu malzemelerin en önemlilerinden birisidir. İnsanların barınaklarını oluştururken kullandığı tuğla, pişmiş topraktan, yapımı basit, temin edilmesi ve kullanımı kolay bir ürün olduğu için geçmiş yüzyıllardan beri en çok kullanılan malzemelerden birisidir. Tuğla topraktan yapıldığı için ekonomik açıdan ucuz ve tedarik açısından temini kolaydır. Tuğla ateşe, soğuğa ve suya karşı oldukça dayanıklıdır. Bu sebeplerden ötürü tuğla geçmiş yıllardan günümüze kadar önemini korumuş ve günümüzde hızla gelişen sanayi kollarından birisi haline gelmiştir (Görçiz, 2000).

Tuğla kil toprağının bulunduğu her yerde yapılabildiği için dünyada kullanım alanı son derece yaygındır.

2.1.2 Tuğlanın Üretilmesi

Tuğlanın hammaddesi kildir. Kil dünya üzerinde en çok bulunan materyallerin başında gelmektedir ve bu yüzden tuğlanın üretimini daha yaygın ve basit hale getirmektedir. Kil belli oranda su ile karıştırıldığı zaman hamurumsu bir hale gelmektedir. Bu hamurumsu yapı tuğlanın ana maddesidir. Ancak her kil bu hamurun yapısı için uygun değildir. Kilin tuğla hamurunun yapımında kullanılabilmesi için su ile karıştırıldığı zaman plastisiteye sahip olması gerekir. Bunun yanında tuğla hamuruna şekil verdikten sonra yeterli miktarda ıslak ve kuruma gerilmesi direncine sahip olması gerekmektedir. Bu özellikleri sergileyen killerin son aşamada pişirildikleri zaman birlikte bütün olarak erimeleri gerekmektedir (Işık, 2010).

Tuğla hamuru hazırlanırken malzemelerin homojen olarak karıştırılması için hammaddelerin içerisinde bulunan büyük taş ve gereksiz maddelerin eleme yöntemi ile elemesi yapılır. Eleme işlemi sonrası gereksiz maddelerden arınan hammadde sırasıyla kurutma ve öğütme

işlemlerinden geçer. Bu adımlardan sonra tuğla hamuru dinlendirilmeye bırakılır ve direnç kazanması sağlanır (Dönmez 1993).

Tuğla hamuru uygun kıvama gelene kadar karıştırılır ve sonrasında kalıplama, presleme veya ekstrüzyon yöntemlerinden biri kullanılarak şekil verme işlemi yapılır. Şekil verilen tuğlalar yavaş bir şekilde kurumaları için kurutulmaya bırakılır. Şekil verilen tuğlalarda çatlak ve rötrelerin engellenmesi için kurutma işlemi iyi bir şekilde yapılmalıdır. Kurutulan tuğla hamurları özel fırın ya da ocaklarda 900-1300°C derece aralığında pişirilmeye bırakılır. Tuğlaların dayanıklı ve bozulmadan pişmesini sağlayan sıcaklık aralığı 900-1300°C'dir (Şişman ve ark., 2006; Güner ve Süme, 2000; Karaman, 2006; Diaz ve ark., 2007; Cultrone ve Sebastian, 2009).

Tuğlanın pişirme işlemi yapılırken kil minerali kimyasal reaksiyonlara girer. Pişirme sıcaklığı 300 °C' ye çıktığında organik maddelerin tamamı yanmış olur. Pişirme sıcaklığı 550 °C'ye çıktığında kil içerisindeki su tamamen yok olur ve sadece alümin ve silis haline gelip ayrışım işlemi gerçekleşir. Sıcaklık 550-900 °C aralığına ulaştığında ise alümin ve silisin tekrar birleşme işlemi gerçekleşir ve metakaolin silikası ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) ortaya çıkar. Metakaolin silikası şekli sabit ve sert bir tuğladır. Bir basınç mukavemeti vardır. Tuğlanın pişirme sıcaklığının artması basınç mukavemetinin de artmasını sağlar. Bununla beraber birim ağırlığı artıp, su emme değeri azalmaya başlamaktadır. Tuğla 900-1300 °C derece pişirme sıcaklığı aralığını aşmaya başladığı zaman camlaşmakta ve harcı tutup yapının dayanıklılığına zarar vermektedir (Ekmekyapar ve Örüng 1993).

Tuğlanın özellikleri ve kalitesi kilin kalitesine, kil ile suyun karışma oranına, sıcaklığın derecesine ve pişirme tekniğine göre değişiklik göstermektedir. Ülkemizde teknik olarak fabrika ve harman tuğlalarının üretimi yapılmaktadır. Fabrika tuğlalarının mukavemetleri yüksek olmasına karşın harman tuğlaların mukavemetleri düşüktür. Mukavemetleri düşük olduğu için harman tuğlaları daha hafif ve düşük katlı yapılarda, fabrika tuğlaları ise daha yüksek ve ağır yapılarda tercih edilmektedir. Harman tuğlaları ve fabrika tuğlaları arasındaki bu mukavemet farkı hammadde yapısı, karışım oranları ve pişirme sıcaklığından kaynaklanmaktadır. Harman tuğlası maliyeti düşük olduğundan dayanımı daha az olsa da mukavemetinin yeterli olduğu hafif yapılarda tercih edilmektedir (Özçelik 1975).

2.2 Kil ve Özellikleri

Kil insanlığın ilk tarihlerinden beri insan hayatında önemli bir yer teşkil etmiştir. Kil yüzyıllardan beri yapılarda, seramik eşya üretiminde ve birçok alanda kullanılmıştır ve günümüzde hala kullanılmaya devam etmektedir. Kil dünyada en fazla bulunan materyallerin başında gelmektedir. Bu materyaller çok karmaşık yapılardan oluşmaktadır. Kil su ile temas ettiği zaman şekil alabilen, yumuşak, yağlı bir toprağa dönüşmektedir. Yer kabuğundaki mineral yataklarında büyük tabakalar halinde bolca bulunabilmektedir. Bunların dışında okyanus, göl ve deniz yataklarında ve nehir deltalarında rastlanılmaktadır. Kil yeryüzünde ince taneli minarelerden doğal olarak oluşmuştur. Kili oluşturan mineraller sediman mineralidir ve minerallerin tane boyutu 2 μm 'den küçüktür. Bu mineraller sulu alüminyum silikat mineralleridir. Kaolen minareli kili oluşturan sulu alüminyum silikat minarellilerinin başında yer almaktadır. Kili oluşturan ana bileşenin montmorillonit olması halinde bentonit adını almaktadır. Bu mineraller kile plastiklik verip, pişirildikleri zaman sertleşmesini sağlamaktadır. (Görhan 2011; Sarız 1992).

Kilin tanımı mühendislikte biraz farklıdır, kil mühendislikte alüminyum silikat ve bazı yabancı maddelerden oluşan, yeterli sıcaklıklarda suyu bünyesinden dışarı atabilen, çok ince tanelerden oluşan, plastik ve kohezif özelliklerine sahip toprak malzeme olarak tanımlanmıştır. Minerallerin tane boyutu 2 μm 'den küçük olan malzemeler mühendislikte kil olarak tanımlanmıştır. Mühendislikte kili genel olarak tanımlamak gerekirse kristal bir bünyeye sahip, çok ince tanelerden oluşan, yeteri kadar su katıldığı zaman plastikliği artan toprağımsı bir mineral karışımıdır (Sarız 1992).

Bazı killer tek bir kil minarelinde oluşmaktadır bunun dışında kilin asıl bileşenleri alüminyum hidro silikatlarıdır. Bazı kil minerallerinde alüminyum yanında Fe ve Mg maddeleri yer almaktadır ya da mineraller tamamen Fe ve Mg maddelerinden oluşmaktadır. Çoğu kil minareli birden fazla mineralin karışımından oluşmaktadır. Killerde minerallerin yanı sıra pirit, kuvars kumu, feldspat ve kalsit gibi malzemeler bulunmaktadır. Kilerin çoğunda organik maddeler ve tuzlarda yer almaktadır (Dengiz 2009; Sarız 1992).

2.2.1 Kil Türleri

Kili oluşturan mineraller belli başlı fiziksel ve jeokimyasal şartların konfigürasyonu neticesinde ortaya çıkarlar. Bir kil türü çoğu zaman birden çok kil türü içermektedir ve kil minerali yatakları çoğu zaman tek mineralli yataklardan oluşmamaktadırlar (Işık 1998). Killer 3 farklı şekilden oluşmaktadır. Bu şekillerin kimyasal yapıları aynı olup fiziksel yapıları birbirleri arasında farklılık göstermektedir. Bu 3 farklı şekil killer şeyhler, ateş killeri ve yüzey killeri. Metalik oksitler bu killerin birlikte ayrılmadan tutulmalarını sağlar. Fe, Ca ve Mg maddeleri killerin rengini belirler. Killerin yabancı maddelerden arınması ve killerin fiziksel özelliklerinin karıştırma ile üreticinin istediği kıvama gelmesi üreticiler tarafından masraf gerektirmektedir (Grimshaw 1962; Dengiz 2009).

Silikat grubu mineralleri kuvars, piroksen, amfibol, mika ve kil minerallerinden oluşmaktadır. Bu mineraller kristal yapı kafesi moleküllerinden olan silis tetrahedraları ve alüminyum oktahedralarıdır. Kristal kafesler silis tabaka ve alüminyum tabakadan meydana gelebilmektedirler (Dengiz 2009).

Kil mineralinin iç yapısı atomların diziliş şekline bağlıdır. Atomların diziliş şekli atomlar arası bağ kuvvetleri etkisinde gelişir. Diziliş şekilleri düzenli ise kristal yapıda, düzensiz ise amorf yapıda oluşmaktadırlar. Düzenli bir dizilişte atomların sürekli tekrarlayan yapıları vardır. Herhangi bir doğrultuda atomlar arasındaki mesafe eşit ve atomların çevreleri birbirlerine benzerdir. Kil minerallerinin çoğu kristal yapıda bir atom birleşimine sahiplerdir. Kil minerallerinin kristal boyutları çok küçüktür ve bu kristal yapıların tanımlanmasında elektron mikroskopları ve x ışınları kullanılır. Kil mineralleri kristallerinin yapısına göre gruplandırılmıştır. Kil mineralleri kaolinit, montmorillonit ve illit isimli üç grupta gruplanır. Mühendislikte ise bu gruplar kaolinit, mika ve smektit grupları olarak şekillendirilmiştir.

Killer ana olarak iki temel kristalimsi yapıdan meydana gelmiştir. Bu yapılar magnezyum oktahedron ve silika tetrahedron yapılarıdır. Silika tetrahedron silika atomunu çevreleyen dört oksijen atomundan oluşmaktadır. Tetrahedron tabanlarında bulunan bu oksijen atomlarının birleşmesi ile tetrahedron yapısı oluşmaktadır. Oksijen atomları iki tetrahedron ile birleşmesi durumunda ise yapılar levha şeklinde olmaktadır (Türköz, 2007).

2.2.2 Kilin Tabakalı Yapısı

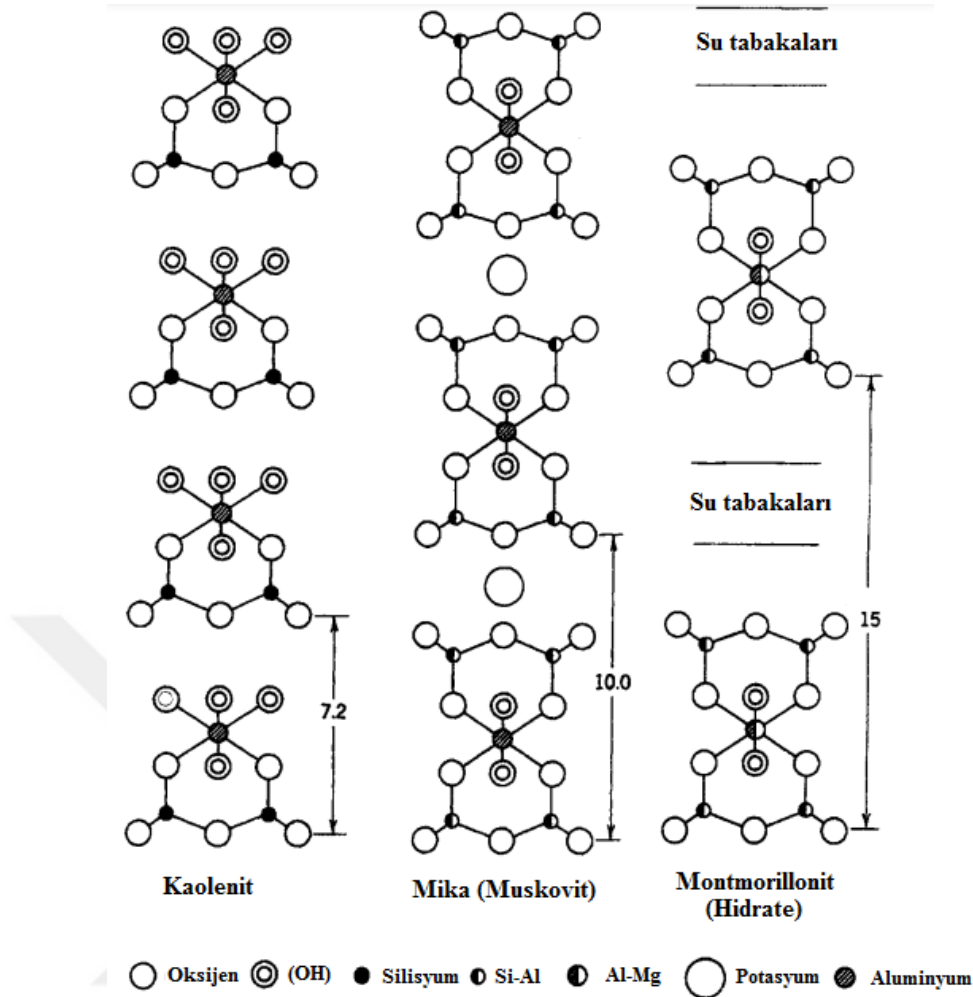
Kil mika, feldspat, piroksen, amfibol ve çeşitli kil minerallerinden oluşmaktadır. Kili oluşturan mineraller silikat grubu mineraller olarak bilinir. Silikat minerallerinde kristalimsi yapı kafeslerinin molekülleri alüminyum oktahedraları ve silis tetrahedralarından oluşmaktadır (Şekil 2.1). Birim kristal kafesleri silis tabaka veya zincirleri ya da alüminyum tabaka veya zincirlerinden oluşmaktadır. Alüminyum oktahedraları çift yönde eşit miktarda yapılanarak eşit büyüklüklerde tabaka şeklinde ve sınırlı sayıda oluşmaktadır. Aynı zamanda diğer yönde daha fazla miktarda dizilerek şerit ağlar oluşturmaktadırlar. Amfiboller gibi tek yönde uzun kristalimsi yapılar oluşmaktadır veya mika gibi çift yönde eşit boyutlarda kristalimsi yapıdadırlar (Dengiz 2009).

Kil minerallerinin içyapısı, atomlar arasındaki bağın atomlara uyguladıkları kuvvetler ile oluşan diziliş biçimine bağlıdır. Atomlar rastgele bir şekilde dizilmiş ise amorf yapı oluşurken, düzenli bir şekilde dizildikleri zaman ise kristal yapı oluşmaktadır. Kil minarellerinin kristal boyutları küçüktür. Bu kristal boyuttaki mineraller ancak elektron mikroskobu ve X-ışını kırınım yöntemi ile gözlemlenebilmektedir. Kil mineralleri kristallerin dizilimine göre gruplandırılmaktadır. Bu gruplar neredeyse aynı benzer özelliklere sahip olmaktadır.

Kil mineralleri üç gruptan oluşmaktadır:

- Kaolinit grubu
- Smektit grubu
- Mika grubu

Kaolinit grubuna giren kil minerallerinin genleşme özellikleri yok denecek kadar az olmakla birlikte genellikle hiç genleşmemektedirler. Smektit grubundaki mineraller montmorillonitleri kapsamakta ve yüksek şişme ihtimaline sahip olmaktadır. Smektit grubu mineralleri en problemli mineraller olarak bilinmektedir. Mika grubu mineralleri ise vermikulit ve ilit tipi mineralleri içermektedir. Mika grubu mineraller genleştikleri zaman önemli problemlere yol açmazlar (Türköz 2007).



Şekil 2.1: Kaolenit, mika ve montmorillonitin tabakalı yapılarına ait şematik gösterim (Carty, Senapati 1998).

2.3 Kömür

2.3.1 Kömürün Tanımı ve Oluşumu

Kömür köken olarak bitki kökenli olup, karbon, hidrojen, oksijen, azot ve kükürt elementleriyle birlikte kil, silt, marn gibi maddelerinin bileşiminden oluşmaktadır. Tablo 2.3.1’de kömürde bulunabilen mineraller görülmektedir. Farklı kömür türleri, farklı mineral miktarlarına ve cinslerine sahiptir. Kömür genellikle bataklık ortamlarında olmakla birlikte siyah, gri ve kahverengi renklerde olmaktadır. Kimyasal ve fiziksel süreçlerle birlikte meydana gelen yanma özelliğine sahip sedimanter bir kayaç türüdür (Uzun 2002; Çit 2007).

Tablo 2.1: Kömürde bulunan mineraller (Taylor 1998)

	İllit		Kalkopirit
Kil	Montmorillonit	Sülfürler	Pirotit
Mineralleri	Kaolinit		Sphalerit
	Halloysit		Galen
Demir	Pirit	Sülfatlar	Barit
Sülfürler	Markasit		Jips
	Siderit		Zirkon
	Ankerit		Biotit
Karbonatlar	Kalsit	Silikatlar	Turmalin
	Dolomit		Garnet
	Aragonit		Epidot
	Hematit		Bismit
Oksitler	Kuvars	Tuzlar	Silvin
	Magnetit		Halit
	Rutil		Kiserit
Hidroksitler	Limonit	Fosfatlar	Apatit
	Diaspor		Fosforit

Kömür oluşumunda kanalların oluşması için bataklıkların olduğu delta, lagün ve akarsuların oluşturdukları taşkın ovaları gibi ortamlar olması gerekmektedir. Bu ortamların yansırı iklim, bitki toplulukları, beslenme girdisi, pH değeri bakteri yoğunluğu, kükürt oranı ve turba sıcaklığı koşullarının sağlanması gerekmektedir (Stach vd. 1982; Yağmurlu 1983).

Kömürleşme evresinin ilk basamağı oksijen yoğunluğu yüksek turba yüzeylerinden turbalaşma olayının yaşanmasıdır. Kömürleşme süreci su üstünde gerçekleşirse, bitkilerin üzerinde bakterilerinde etkisiyle birlikte humik asit, su ve karbondioksit dönüşmektedir. Ancak bitkiler suyun altında olursa ve bitkilerin gelişim evreleri devam ediyorsa, bakteriyel etkinin devam ettiği derinlik 10 metre kadardır (Van Krevelen 1961; Stach vd. 1982; Yağmurlu 1983; Köksoy 1994).

Biyokimyasal kömürleşme süreci tamamlandıktan sonra jeokimyasal süreç başlamaktadır. Bu süreçte kömürleşme sürecinde olan turba jeokimyasal etkilere maruz kalmakta ve kömürleşmenin rankına göre kömür türlerine dönüşmektedir (Stach vd. 1982).

Kömürleşme aşamasında bazı gazlar oluşmaktadır. Karbondioksit, Karbon monoksit, azot oksit ve metan kömürleşme aşamasında oluşan gazlardır. Kömürün gözeneklerine yerleşmiş olan bu gazlardan bir miktarı, gerçekleşen kayaç hareketleri ile kömürden ayrılıp yan kayaçlara sızmaktadır. Kömürleşme miktarı arttıkça ve kömür yaşlandıkça kayaç hareketleri artmaktadır. Kayaç hareketlerinin artması sonucunda ise uçucu maddelerin oranı ters orantıda azalmaktadır (Ünal 2010).

Kömür kullanımının sebep olduğu problemler kömürün karbonlu kısmından yanıcı özelliği olmayan atık minerallerin arınmasıyla azaltılabilmektedir. Flotasyon yöntemini uygulamak için düşük maliyet ve alan gereksinimleri olduğu için diğer yöntemler arasında tercih edilmektedir (Özmaç ve Aktaş, 2006).

2.3.2 Kömür Zenginleştirme

Kömür tüketime sokulmadan önce çevresel sorunlara yol açmaması ve kömürü daha değerli hale getirmek için kömür zenginleştirme işlemi yapılması gerekmektedir. Kömürü zenginleştirmek için ham kömürden gereksiz maddelerin (gang mineraller) uzaklaştırılması gerekmektedir. Ham kömürlerin yüksek kül ve kükürt oranları nedeniyle zenginleştirilmeden kullanılması çevresel sorunlara yol açmaktadır. Kömür zenginleştirmede ilk önce mineralleri ayırmak için kırma ve öğütme işlemi yapılır. Öğütme ile mineraller kömür bünyesinde serbest hale gelir. Mineral maddeleri ayırmak için çoğunlukla fiziksel yöntemler kullanılmaktadır (Ünal vd. 2000).

Kırma ve öğütme işlemleri üç bölüme ayrılabilir: 1) Primer Kırma, madenden gelen cevher 100-150 mm. boyutlarına indirilir, 2) Sekonder Kırma, primer kırmadan gelen maddeler 10-15 mm. boyutlarına indirilir. 3) Öğütme aşamasında sekonder kırıcıdan gelen madde boyutu flotasyon işlemine uygun olacak inceliğe (yaklaşık 0,2 mm.) kadar indirilir (Orel ve İmre 1967).

Kırma işleminden geçen kömür, yıkama tesisine gönderilmeden önce 100 veya 150 mm açıklığa sahip bir elek kullanılarak elenir. Elek üstünde kalan malzeme elle ayıklama işlemine tabi tutulur ya da tamamı 100-150 mm altına kırılarak, elek altında kalan malzeme ile beraber yıkama tesisine gönderilir. Yıkama tesisine gönderilen kömür özelliklerine göre doğrudan veya önceden eleme işleminden geçirilerek yıkanır. İri kömür yıkama (boyutu 6-10-18 mm üstü) ağır ortam üniteleri veya jigler; ince kömür yıkama (boyutu 6-10-18 mm ile 0,5 mm arasında) sarsıntılı masalar, feldispatlı jigler, siklonlar ve sabit oluklar; Toz (çok ince) kömür yıkama flotasyon kullanılarak yapılmaktadır (Aykaç 2014).

Yaş yöntemlerde suyun neden olduğu atık sorunları, büyük hacimli havuzlara gereksinim, kömür neminin artması, kışın aşırı soğuk bölgelerde suyun donması yaş yöntemlerle zenginleştirmenin dezavantajlarındandır. Bu nedenle kuru zenginleştirme yöntemleri bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır (Arslan 2006). Kuru zenginleştirme yöntemlerinde, yan kayaç ile kömür arasındaki fiziksel özelliklerin (renk, sertlik, yoğunluk, esneklik, ufalanma direnci, manyetik duyarlılık ve elektriksel özellik) farklılığından yararlanılmaktadır (Tekir 2010).

2.3.3 Flotasyon İşlemi

Flotasyon işlemi pülp içerisinde bulunan havanın, hava kabarcıkları oluşturması ve hava kabarcığı ile temasa geçen maddeler yukarı doğru yükselirken, hava kabarcığı ile temas kurmayan maddelerin aşağı doğru alçalması ile gerçekleşmektedir (Yeşilyurt, 2014). Minerallerin yüzebilmeleri için su ile ıslanmaması gerekmektedir. Mineralin ıslanıp ıslanmaması katının yüzey özelliklerine bağlıdır. Katı yüzeyin moleküllerinin polar olup olmaması durumu mineralin yüzüp yüzemeyeceğini belirlemektedir. Kömürün katı yüzeyi polar olmadığı için flotasyon işlemine elverişlidir. Kömür cinsleri farklı flotasyon işlemine farklı tepkiler göstermektedir. Orta uçuculu kömürler flotasyon özelliği en iyi olan kömürlerdir. Flotasyon işlemi en zor olan kömür ise linyit kömürleridir (Öney ve Bilgin, 2016; Hacıfazlıoğlu, 2011).

2.3.4 Bitümlü Şistler

Bitümlü şistler; ince taneli ve yapraksı bir yapıda olan, kerojen içeren ve jeolojik evreler sonucunda meydana gelmiş sedimanter kayaçlardır. Kerojen içermeleri sebebiyle bitümlü

şistler kömürümsü bir enerji kaynağıdır (Ünal 2003). Bitümlü şistler yakıldıklarında %33 oranından fazla kül bırakan tortul kayaçlardır. Kuvars, feldspat, kil, karbonat ve pirit kayacı oluşturan başlıca minerallerdir. Kerojen kil minerallerine diğerlerinden daha bağlı yapıda bulunmaktadır (Şensöz 1994).

Bitümlü şistler termik santrallerde yakıt olarak kullanılmaktadır. Bitümlü şistler kömürde olduğu gibi ham olarak yakılarak değerlendirilmemektedir. Şistin yakılması için 450°C'ye ulaşan sıcaklıklar gereklidir. Bu sıcaklıklarda şistin organik yapısında bozulmalar meydana gelip şistin yanmaya fırsat bulamadan yanma gazlarını dışarı çıkarmaktadır. Yanma gazlarının içerisinde bozulma yaşamamış hidrokarbonlar bulunmaktadır. Bu nedenle bitümlü şisti yakmak çevre kirliliğine sebep olmaktadır ve yakma ile değerlendirilmemelidir. Kömürün yapısında bulunan inertinit ve vitrinit türü maseraller ise bitümlü şistlerde farklı oranlarda bulunmaktadır (Yanık 2008).

Bitümlü şistler, kömür sınıfından olmayan, petrol içerikli çözücüler ile çözünmeyen fakat oksijensiz ortamda petrokimyasal sıvı veren katı yakıtlardır (Kural, 1991). Bitümlü şistlerde mineraller bileşenleri ve kerojen dışında çok az miktarda karbontetraklorür ve koloform gibi çözücülerde çözünebilir bitüm içermektedir. Hidrokarbonlar ve çeşitli türevlerinden oluşan karbon sülfürde çözünme gösteren, az akışkan bir yapıya sahip, katı veya katımsı bir petrol ürünüdür. Bitümlü şistler uranyum, altın, vanadyum, nikel, demir, molibden ve alüminyum gibi metallerde içermektedir (Şensöz 1994). Bitümlü şistlerin özgül ağırlıkları 1,6-2,5 g/cm³ aralığındadır. Düşük özgül ağırlığa sahip bitümlü şistler organik madde içeriği zengin olan şistlerdir (Williams 1983).

2.4 Kömür Atıkları ve Değerlendirilmesi

Kömür madenciliği ve kömür zenginleştirme toprak, su ve hava kirliliğine yol açabilecek önemli miktarda atık üretmektedir. Kömür madenciliği atıkları ham kömürün bir parçası olduğundan, daha fazla kömür üretimi, daha fazla atık ortaya çıkarmaktadır (Ramadan ve ark. 2001; Haibin ve Zhenling 2010). Kömürün çıkartılması esnasında ortaya çıkan toprak, kaya atıkları (gang mineraller) ve düşük kalitede satılamayan kömürler katı atıklar olarak sınıflandırılmaktadır. Kömür yıkama ve hazırlama sırasında meydana gelen atıklar katı atıklardan farklı karakterdedir. İri tane boyutuna sahip atıklar yığınlar halinde açıkta

depolanmakta, daha sulu ve ince taneli çamur biçimindeki atıklar, atık barajlarına gönderilmekte veya filtrelanmaktadır (Çeçen 2014).

Taş kömürü madenciliği ve işlenmesinden kaynaklanan atıklar iki ana gruba ayrılabilir (Galos ve Szlugaj 2014):

- 1) Madencilik atıkları – doğrudan maden ocaklarının hazırlık çalışmalarından gelen toplam taş kömürü atığı miktarının %20'sini oluşturan, kaya türlerine ve çıkarılan yatakların jeolojik koşullarına bağlı olarak oldukça değişken kalite parametreleri sergileyen atıklardır. Bu tür atıkların tanecik oluşumu homojen değildir ve 500 mm'ye kadar ulaşabilir.
- 2) Zenginleştirme atıkları – zenginleştirme sürecinde kullanılan ekipmanının tipine ve uygulanan teknolojilere bağlı olarak değişim gösteren atıklardır üç alt gruba ayrılabilir:
 - a) Ağır ortam ayırmadan kaynaklanan iri taneli atıklar – homojen mineral bileşimli, 20–200 mm tane boyutu aralığında, %5-15 kömür, %1' den az kükürt ve %4-6 nem içeriğine sahip atıklardır.
 - b) Jiglerden gelen ince taneli atıklar-homojen mineral bileşimi, 20 mm'nin altında tane boyutuna sahip, iri taneli atıklara göre daha yüksek kömür, kükürt ve nem içeren atıklardır.
 - c) Çok ince taneli flotasyon atıkları – flotasyon reaktifleri ve flokülant kalıntılarının bulunduğu yüksek kömür, kükürt ve nem içeriğine sahip atıklardır.

Taş kömürü madenciliği ve zenginleştirme atıklarının yaklaşık %90'ını ağır ortam ayırıcılar ve jiglerden kaynaklanan işleme atıkları oluşturmaktadır. Yüzdürme atıkları %5 civarındadır, geri kalan kısmı ise maden atıkları oluşturmaktadır (Galos ve Szlugaj 2014).

Kömür ganginin kapsamlı kullanımı sadece kirlilik kaynaklarını kontrol etmekle kalmayıp, bununla birlikte ekonomik fayda da sağlamaktadır. Yüksek kalorifik değere sahip atık kayalar elektrik üretimi amacıyla akışkan yataklı kazanlar kullanılarak bertaraf edilebilmektedir. Elektrik üretiminde kullanıma uygun olmayan kömür gangi depolanmakta veya ağaçlandırmada kullanılmaktadır. Bir yan ürün olarak kömür gangi mineral bileşimleri oldukça karmaşıktır ve bulundukları habitata göre bileşimleri farklılık gösterebilir. Genellikle yüksek oranda silika ve alümina içerirler. Ana mineral bileşimleri kil minerali, karbonat mineralleri, pirit, kuvars, feldispat ve diğer eser elementlerdir. Gang mineral

bileşimi esas olarak kil mineralinden etkilenmektedir. Genellikle yaklaşık olarak %10-70 oranında kil, %20-30 oranında kuvars ve %10-20 oranında diğer mineraller ve karbonlu maddeleri içermektedir. Kimyasal bileşimi ve içeriğindeki K_2O , Na_2O , Fe_2O_3 , TiO_2 ve CaO gibi safsızlıkların düzeyine bağlı olarak gang, farklı ürünler yapmak için kullanılabilir. Tuğla, çimento, beton, seramik imalatında ayrıca dolgu, yol, kaldırım, temel ve bina inşaatları, pirit çıkarma, zeolit üretimi vb. birçok yerde alternatif agrega olarak kabul görmektedir. Üretim sürecinde, kömür gangı genellikle asit veya alkaliler ile kimyasal reaksiyonlar verirler. Ham gang genellikle kristal yapıda karbon ve mineral içerir, bu da düşük kimyasal reaktiviteye neden olmaktadır (Haibin ve Zhenling 2010, Li ve Han 2006, Huang ve ark. 2014, Zhang ve Ling 2020, Zhang ve ark. 2015).

Kil esaslı geleneksel seramik malzemeler bileşim ve hammadde değişimlerini kaldıracığından çeşitli endüstriyel atıkların kullanımı için ideal ürünlerdir. Geleneksel seramik ürünlerin mikroyapısı ve fiziko-mekanik özellikleri, yalnızca hammaddelerin mineralojik bileşimi ile değil, üretim süreci ve özellikle sinterleme sıcaklığı ile de ilgilidir. Geleneksel kil tuğlalar genellikle 900–1100 °C 'de sinterlenmektedir. Endüstriyel atıkların eklenmesi, sinterlenmiş tuğlaların özelliklerini geliştirebilmektedir, ancak optimum sinterleme sıcaklığı, endüstriyel atıkların kile olan yüzdesi ile değişmektedir (Xu ve ark. 2017). Kömür atıkların seramik ürünlerde kullanılabilirliğine yönelik araştırmalar artmaktadır.

Lemeshev ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada Moskova bölgesi kömür madenciliği atıklarının yapı seramiklerinin üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Ağırlıkça %20-50 arasında kömür atığı kile ilave edilerek hazırlanan karışımlar hidrolik preste 20, 30 ve 40 MPa basınçla şekillendirilmiş ve 950 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle sinterlenmiştir. Numunelerin küçülme, su emme, yoğunluk, gözenek ve basınç dayanımı değerleri ölçülmüştür. Analizler sonucunda kömür madenciliği atıklarının yapı seramikleri üretimde yüksek kaliteli hammadde kaynağı olabileceği sonucuna varmışlardır.

Xu ve ark. (2017) çalışmalarında Çin' de bulunan Pingdingshan kömür bölgesinden temin ettikleri kömür gangının tuğla üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Kömür gangı tozunu su ile karıştırmışlar soğuk preste 80 MPa basınç ile şekillendirdikleri numuneleri 900, 1000, 1100, 1200 ve 1250 °C sıcaklıklarda 1 °C/dk ısıtma hızıyla 2 saat süreyle sinterlemişlerdir. Üretilen tuğla örneklerinin mineralojik, fiziksel ve mikroyapısal

özelliklerini inceleyerek kömür gangının tek başına tuğla hammaddesi olabileceği sonucuna varmışlardır.

Stolboushkin ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada Rusya'da bulunan Abashevskaya tesisinden elde edilen atık kömür ile Korkino kömür madeninden elde edilen karbonlu arjilitleri tuğla üretiminde kullanmışlardır. Bu atıklara ağırlıkça %0-40 arasında plastik kil ilave edilerek çeşitli karışımlar oluşturulmuşlardır. Yarı kuru presleme yöntemiyle şekillendirilen atık kömür içeren tuğla örnekleri 9-11 MPa basma mukavemeti, %15-17 su emme ve 25 çevrimden az olmayan donma dayanımı değerleri göstermektedir.

Yoo ve ark. (2005) çalışmalarında Güney Kore'de bulunan Maro madeninden elde ettikleri kömür atıkları ile tuğla üretimi gerçekleştirmişlerdir. Tuğla kiline ağırlıkça %10-50 arasında kömür atığı ilave ederek disk şeklinde numuneler hazırlamışlardır. 900-1400 °C sıcaklık aralığında sinterlenen numunelerin su emme ve basma dayanımı değerleri ölçülmüştür. Tuğla örneklerinde kömür atığı içeriği arttıkça su emme değerleri artmakta, basınç dayanımı değerleri ise azalmaktadır. Tuğla kiline ağırlıkça %30'a kadar kömür atığı ilavesiyle hazırlanan ve 1300 °C'de sinterlenen tuğla örnekleri Kore Standartlarında birinci sınıf tuğla olabilecek özellikler göstermektedir.

3. MATERYAL METOD

3.1 Kullanılan Hammaddeler

Tuğla kili: Bartın İlinde faaliyet gösteren Üç Yıldız Tuğla Fabrikasından temin edilen tuğla kili standart numuneler ile kömür madenciliği atığı katkılı numunelerin üretiminde kullanılmıştır.

Kömür madenciliği atığı: Deneylerde kullanılan kömür madenciliği atıkları Amasra Taş Kömürü Kurumundan temin edilmiştir. Kömür çıkarma ve zenginleştirme işlemlerinin üç farklı aşamasında ortaya çıkan atıklardan 10-100 mm boyutlu şistler, 0,5-10 mm boyutlu şistler ve flotasyon (kömürü yıkama) işlemi sonucu açığa çıkan 0-0,5 mm boyutlu şistler öğütülerek tuğla üretiminde kullanılmıştır.

Kömür damarı içinde veya ara kesmede bulunan taşlı kısımlar genel olarak şistli kısımlar şeklinde ifade edilir. Şistler ince, paralel, tabakamsı yapısından dolayı yaprak şeklinde kolayca birbirinden ayrılabilen plâkalardan oluşan kristalin, makaslama kuvveti ve basınç altında yeniden kristalize olmuş sekonder kayalardır. Şistler, genellikle, killerin ve marnların başkalaşmasıyla oluşurlar (URL-1).

Deneylerde kullanılan kömür madenciliği atıklarından 10-100 mm boyutlu şistler Şist A, 0,5-10 mm boyutlu şistler Şist B ve 0-0,5 mm boyutlu şistler flotasyon numunesi olarak adlandırılmıştır. Atıkların ve tuğla kilinin kimyasal bileşimleri Bartın Çimento Fabrikasında yapılan analizler neticesinde belirlenmiştir. Hammaddelerin faz analizleri Rigaku Smartlab marka ve model cihazla yapılmıştır. Isıl işlem esnasında hammaddelerde meydana gelen reaksiyonlar Hitachi marka STA 7300 model termogravimetrik analiz cihazı ile tespit edilmiştir.

3.2 Tuğla Örneklerinin Hazırlanması

Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan tuğla kili ve kömür madenciliği atıkları yapılarında bulunan nemin uzaklaştırılması için Ecocell marka etüvde 100 °C sıcaklıkta 24 saat kurutma işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Kömür madencilik atıklarının ve kömür yıkama atıklarının etüvde kurutulması

Kurutulan hammaddeler bilyalı değirmende öğütüldükten (Şekil 3.2) sonra 150 µm açıklığa sahip elekten geçirilmiş ve elek altında kalan kısımlar tuğla üretiminde kullanılmıştır. Elde edilen tozların tane boyut dağılımı lazer difraksiyon yöntemi kullanılarak Malvern marka Mastersizer 3000 model partikül boyutu ölçüm cihazı ile ölçülmüştür.



Şekil 3.2: Kurutulan hammaddelerin bilyalı değirmende öğütülmesi

Tuğla örnekleri Tablo 3.1’ de belirtilen reçetelerde verilen hammadde oranlarına göre hazırlanmıştır. Reçetelere göre tartımı yapılan tuğla kili ve kömür madenciliği atıkları homojen bir yapı elde edilinceye kadar karıştırılmıştır. Toplam ağırlığın %15’i oranında su püskürtülerek karışımlar nemlendirilmiştir. Hazırlanan nemli karışımlardan manuel hidrolik pres ile 22 mm çap ve 10 mm yüksekliğe sahip kalıp kullanılarak 50 bar basınç altında tuğla numuneleri şekillendirilmiştir (Şekil 3.3).

Kalıptan çıkarılan numuneler şekillendirme neminin uzaklaştırılması için bir gece boyunca ortam koşullarında bekletilmiş daha sonra ise Nüve-FN500 marka ve model etüvde 100°C/24saat kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Kurutulan numuneler Panosan marka laboratuvar tipi elektrikli fırında 2,5 °C/dak. ısıtma hızı ile 950, 1050 ve 1150 °C sıcaklıklara çıkılmak ve bu sıcaklıklarda 2 saat süre ile bekletilmek suretiyle pişirilmiştir (Şekil 3.4).

Tablo 3.1: Kömür madenciliği atığı içeren tuğla karışımları (%ağırlıkça)

Karışım Kodu	Tuğla kili	Şist A	Şist B	Flotasyon
Std	100	0	0	0
A1	90	10	0	0
A2	80	20	0	0
A3	70	30	0	0
A4	60	40	0	0
A5	50	50	0	0
A6	0	100	0	0
B1	90	0	10	0
B2	80	0	20	0
B3	70	0	30	0
B4	60	0	40	0
B5	50	0	50	0
B6	0	0	100	0
F1	95	0	0	5
F2	90	0	0	10
F3	85	0	0	15
F4	80	0	0	20
F5	75	0	0	25
F6	0	0	0	100



Şekil 3.3: 50 bar basınç altında preste basılan tuğla numuneleri



Şekil 3.4: Tuğla numunelerinin pişirmek için fırına yerleştirilirken ve pişirme işlemi sonrası durumu

3.3 Pişmiş Tuğla Örneklerine Uygulanan Testler

Pişmiş tuğla örneklerinin karakterizasyonu için kızdırma kaybı, kuru küçülme ve pişme küçülmesi, yığın yoğunluk, basma mukavemeti, su emme ve görünür gözeneklilik değerleri tespit edilmiştir. Faz (XRD) analizleri ve mikroyapı (SEM) incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

3.3.1 Kızdırma Kaybı

Kızdırma kaybı oranları, TS 4790'e göre örneklerin pişirilme öncesi ve sonrası ağırlıkları tartılarak belirlenmiştir. Her bir örnek grubundan ikişer numuneye kızdırma kaybı testi uygulanmış ve elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır. Kızdırma kaybı Eşitlik (3.1)'de verilen denkleme göre hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Kızdırma Kaybı} = \left(1 - \left(\frac{W_p}{W_k} \right) \right) \times 100 \quad (3.1)$$

W_k : Kuru numune ağırlığı (g)

W_p : Pişmiş numune ağırlığı (g)

3.3.2. Hacim Küçülmesi

Hazırlanan numunelerin kurutma ve pişirme işlemleri sonrasında kumpas kullanılarak boyutları ölçülmüş ve % hacim küçülmesi değerleri Eşitlik (3.2) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Hacim Küçülmesi} = \left(\frac{l_1 - l_2}{l_1} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

l_1 : Kuru numune boyu (mm)

l_2 : Pişmiş numune boyu (mm)

3.3.3 Su Emme, Yığın Yoğunluk ve Görünür Gözeneklilik

Test aşamaları Arşimet prensibine göre uygulanmış olup ASTM standartları baz alınmıştır. Pişirilen tuğla numuneleri etüvde 100 °C sıcaklıkta 24 saat süre ile kurutulup tartılmıştır. Tuğla numuneleri 24 saat su içerisinde bekletildikten sonra 3 saat süre ile kaynatılarak suya doymun hale getirilmiştir. Daha sonra numunelerin su içerisindeki asılı ağırlıkları tartılmıştır. Bir bez yardımıyla fazla suyu alınan numuneler tartılarak yaş ağırlıkları saptanmıştır. Yapılan bu ölçümler neticesinde Arşimet prensibine göre numunelerin su emme (Eşitlik 3.3), yığın yoğunluk (Eşitlik 3.4) ve görünür gözeneklilik (Eşitlik 3.5) oranları tespit edilmiştir.

$$\% \text{ Su emme} = \left(\frac{W_c - W_a}{W_a} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

$$\text{Yığın yoğunluk} = \left(\frac{W_a}{W_c - W_b} \right) \times DH2O \quad (3.4)$$

$$\% \text{ Görünür Gözeneklilik} = \left(\frac{W_c - W_a}{W_c - W_b} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

W_a : Kuru numunenin havadaki ağırlığı

W_b : Su ile sızdırılmış numunenin asılı haldeki ağırlığı

W_c : Su ile sızdırılmış numunenin havadaki ağırlığı

3.3.4 Basma Mukavemeti

Basma mukavemeti ölçümü TS EN 772-1' e göre, bilgisayar kontrollü basınç presi kullanılarak yapılmıştır. Kırılma yükünün yüzey alanına bölünmesiyle pişmiş tuğla örneklerinin basma mukavemeti değerleri hesaplanmıştır. Her bir örnek grubundan ikişer tanesinin basma mukavemeti değerleri belirlenip ortalaması alınmıştır.

3.3.5. Faz analizi

Farklı sıcaklıklarda pişirilen standart tuğla ve ağırlıkça %100 oranında Şist A, Şist B ve Flotasyon atığı içeren örneklerde meydana gelen fazların analizleri Rigaku-SmartLab marka X-ışınları difraktometresi kullanılarak tespit edilmiştir. Toz numuneler 20, 5°'den 70°'ye tarama hızı 10°/dak ile incelenmiştir.

3.3.6. Mikroyapı analizi

Mikroyapısal analizler Tescan marka MAIA3 XMU model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak ikincil elektronlarla görüntüleme tekniği ile kırık yüzeyler incelenerek gerçekleştirilmiştir. Ayrıca numunelere elektron mikroskobunda bulunan Oxford, Xmax 50 EDS dedektörü kullanılarak kimyasal analiz yapılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Hammaddelere Uygulanan Test Sonuçları

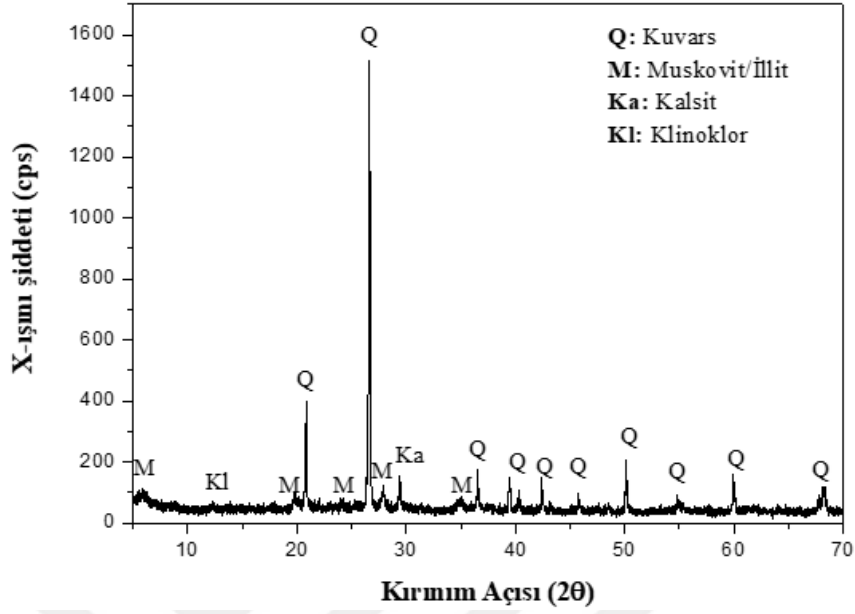
Atıkların ve tuğla kilinin kimyasal bileşim sonuçları Tablo 4.1’de gösterilmiştir. Kömür madencilik atığı örneklerinin (şistlerin) boyutu 10-100 mm’den 0-0,5 mm’ye azaldığında örneklerin SiO₂ miktarı azalırken kızdırma kaybı artmaktadır. Kızdırma kaybındaki artışın şist örneklerinde bulunan kalıntı kömür miktarının fazla olması nedeniyle yapıda bulunan karbonun yüksek sıcaklıklarda yanarak uzaklaşması sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir.

Tablo 4.1: Kullanılan hammaddelerin kimyasal analizleri (% ağırlıkça)

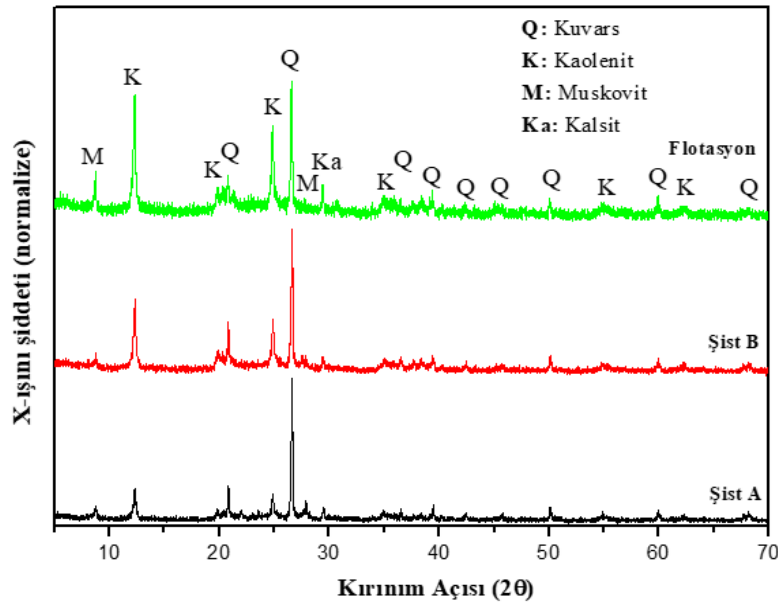
Bileşim	Kil	Şist A	Şist B	Flotasyon
SiO ₂	62,28	48,63	39,64	28,95
AlO ₂	14,81	26,31	32,18	28,38
Fe ₂ O ₃	5,38	4,97	3,63	5,51
CaO	5,29	3,88	3,37	4,98
MgO	1,43	1,99	1,51	1,69
SO ₃	0,08	0,15	0,10	0,03
Na ₂ O	1,10	1,50	1,01	0,59
K ₂ O	1,84	2,40	1,74	1,41
Cr ₂ O ₃	0,02	0,02	0,02	0,02
Mn ₂ O ₃	0,08	0,08	0,05	0,06
P ₂ O ₅	0,03	0,13	0,04	0,08
TiO ₂	0,67	1,00	0,81	0,79
Kızdırma Kaybı	6,87	8,84	15,72	27,27
TOPLAM	99,88	99,90	99,82	99,76

Şekil 3.1 ve 3.2’de hammaddelerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. Tuğla killin yapısında kuvars, muskovit/illit, klinoklor ve kalsit fazları belirlenmiştir (Şekil 3.1). Kömür

madenciliği atıklarının XRD analiz (Şekil 3.2) sonuçlarına göre yapıda kuvars, kaolenit, muskovit ve kalsit fazları belirlenmiştir.



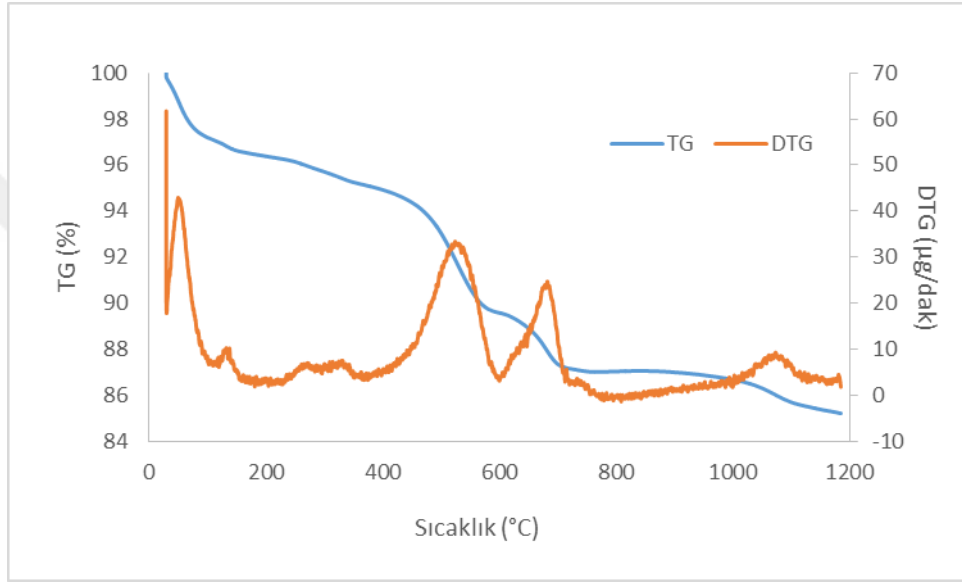
Şekil 4.1: Tuğla kiline ait XRD paterni



Şekil 4.2: Kömür madenciliği atıklarına ait XRD paterni

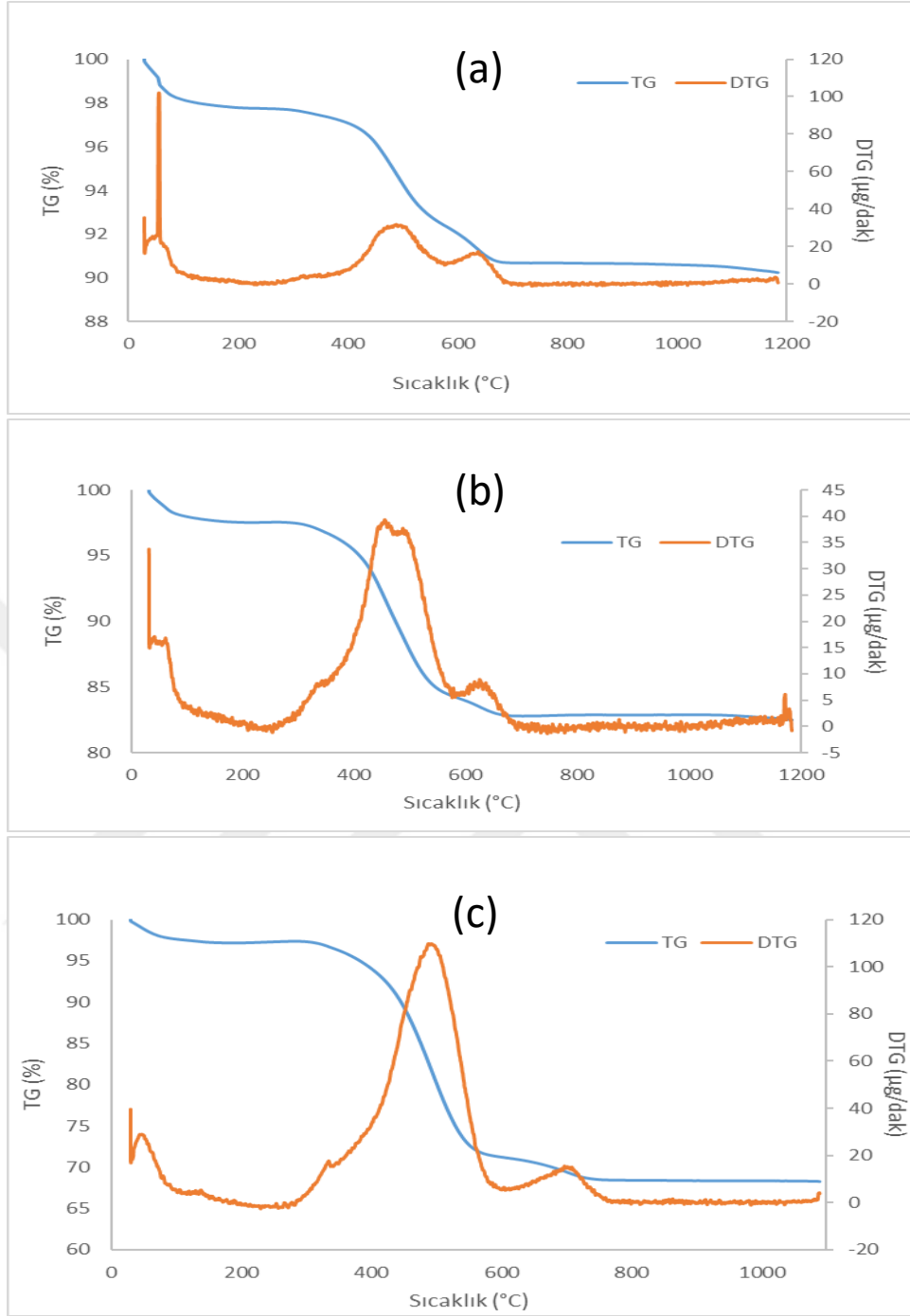
Isıl işlem sırasında hammaddelerde gerçekleşen reaksiyonlara ait grafikler Şekil 4.3 ve 4.4'de görülmektedir. Kilin TG-DTG eğrisi (Şekil 4.3), 1200°C için yaklaşık %15'lik bir

toplam ağırlık kaybını göstermiştir. 20-200°C arasında kil minerallerinin dehidrasyonu sonucu yaklaşık %4 oranında kütle kaybı bulunmaktadır. Bu kayıp kil tabaka yüzeyleri üzerinde fiziksel olarak emilen serbest suyun uzaklaşması sonucu ortaya çıkmaktadır. 400-600°C aralığındaki yaklaşık %4,9 oranındaki kütle kaybı, tabakalı yapıya sahip kil minerallerinin tabakaları arasında bulunan kimyasal su moleküllerinin uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır. 600-750°C arasında yaklaşık %2,6 oranındaki kütle kaybı ise muhtemelen karbonatların ayrışmasını göstermektedir.



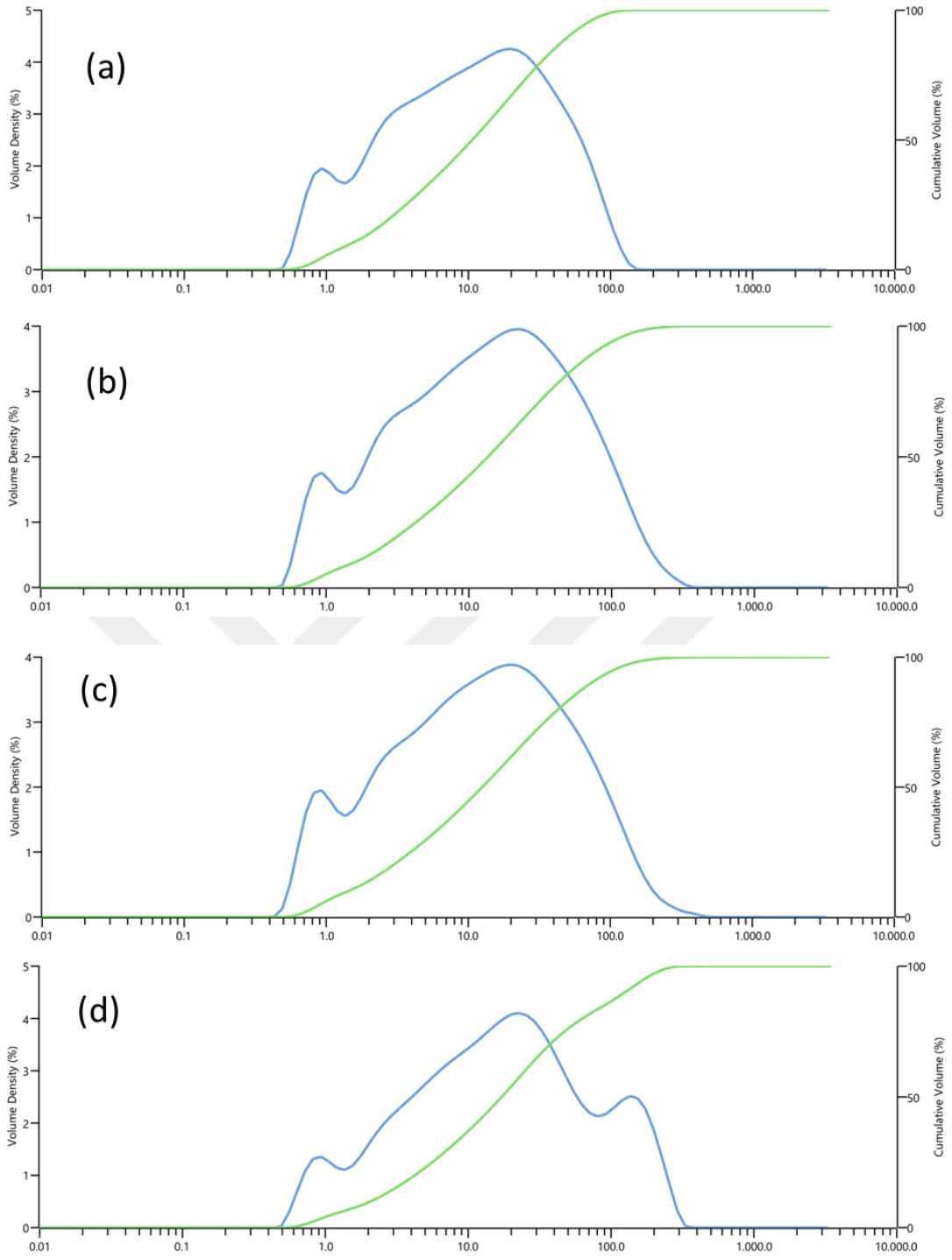
Şekil 4.3: Tuğla kiline ait termogravimetrik analiz grafiği

Kömür madenciliği atıklarının TG-DTG eğrileri (Şekil 4.3) incelendiğinde 20-100 °C arasında fiziksel suyun uzaklaşması sonucu bir endotermik pik ve kütle kaybı görülmektedir. 350-600 °C aralığında şistlerin yapısında bulunan kil minerallerinin içerdiği kimyasal bağlı suyun uzaklaşması sonucu (kaolen – metakaolen dönüşümü) bir endotermik pik ve kütle kaybı meydana gelmektedir. Bu sıcaklık aralığında kömür madenciliği atıklarında bulunan kalıntı kömür miktarının artmasına bağlı olarak yapıdaki karbonun uzaklaşmasının Şist B ve Flotasyon örneklerinde ortaya çıkan kütle kaybını artırdığı düşünülmektedir. 600-750°C arasında atıklarda bulunan kalsitin ayrışması ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) sonucu kütle kaybı görülmektedir. Li ve arkadaşları Çin'in Zhungeer bölgesinden temin edilen kömür gangının termal aktivasyon sürecini inceledikleri çalışmada uyguladıkları termal analiz neticesinde benzer sonuçlar elde etmişlerdir (Li ve ark. 2016).



Şekil 4.4: Kömür atıklarına ait termogravimetrik analiz grafikleri a) Şist A, b) Şist B ve c) Flotasyon

Tuğlaların üretiminde kullanılan öğütülmüş hammaddelerin partikül boyutu ölçüm sonuçları Şekil 4.5’ de gösterilmiştir. Tablo 4.2’de ölçümler neticesinde elde edilen ortalama tane boyut dağılımı (d (10), d (50), d (90)) değerleri verilmiştir.



Şekil 4.5: Hammaddelerin tane boyutu analizi (a) Tuğla kili, (b) Şist A, (c) Şist B, (d) Flotasyon

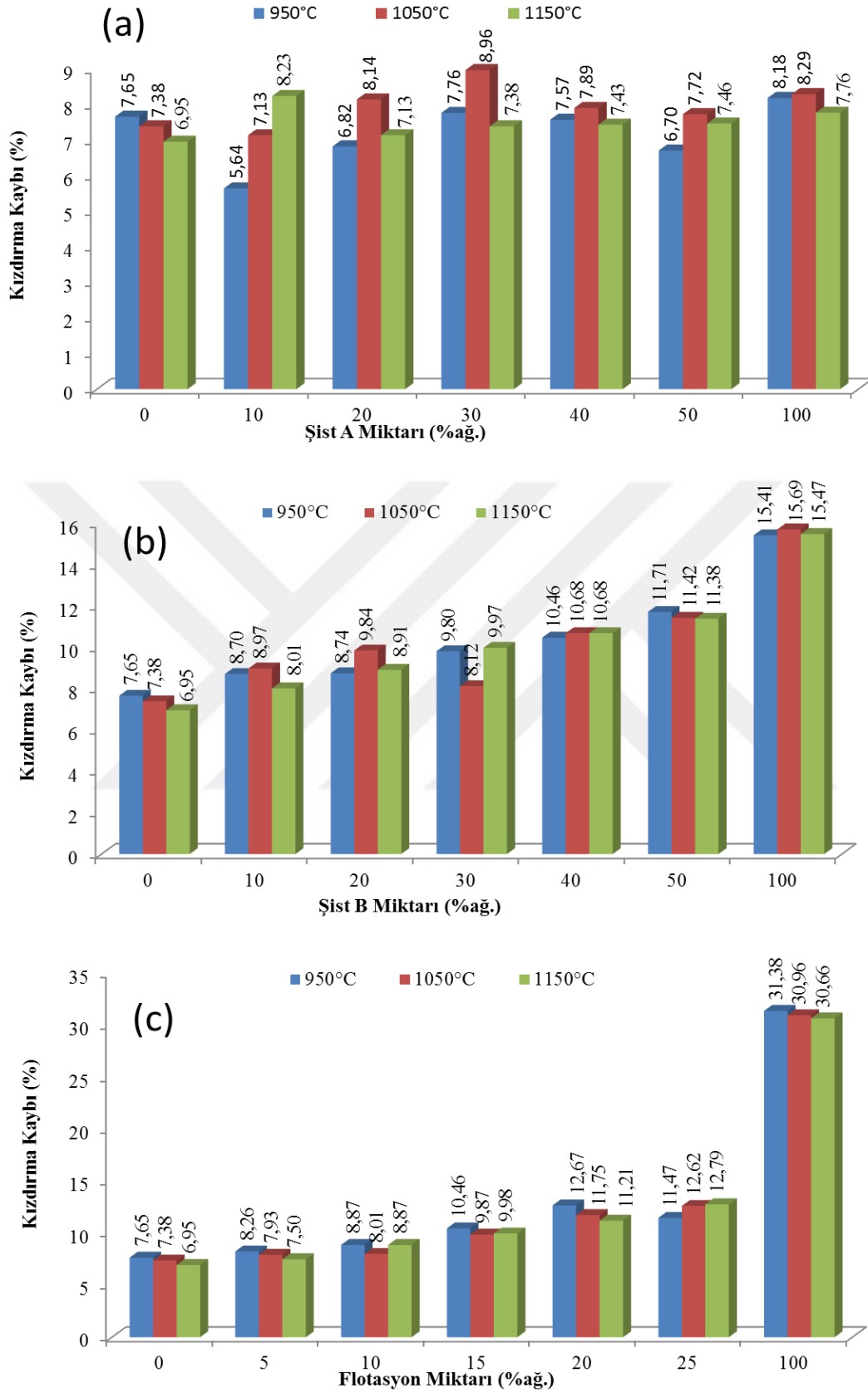
Tablo 4.2: Hammaddelerin ortalama tane boyut dağılımları

Tane Boyut Dağılımı (µm)			
Hammadde	d ₍₁₀₎	d ₍₅₀₎	d ₍₉₀₎
Tuğla Kili	1,49	10,6	50,8
Şist A	1,64	13,6	75,9
Şist B	1,43	12,6	73,2
Flotasyon	2,07	17,2	125

4.2 Üretilen Tuğla Örneklerine Uygulanan Testlerin Sonuçları

4.2.1 Kızdırma Kaybı Değerleri

Tuğla karışımlarında kızdırma kaybı organiklerin yanması (400–550 °C), karbonatların ayrışması ve kil minerallerinde tabakalar arası kimyasal suyun uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır. Kızdırma kaybı oranlarında pişirme sıcaklığına bağlı olarak farklılıklar meydana gelmiştir (Şekil 4.6). Şist A katkılı örneklerde en yüksek kızdırma kaybı 1050°C pişirim sıcaklığında (ağırlıkça %30 atık katkılı numunede %8,96 oranında) meydana gelmiştir. Kızdırma kaybı oranları standart numunelerde %7,6 – 6,9 arasında olup Tablo 1’de verilen kimyasal analiz sonuçlarıyla uygunluk göstermektedir. Kızdırma kaybı Şist B ve Flotasyon atığı katkılı numunelerde atık miktarındaki artışa bağlı olarak yükselmektedir. Küçük boyutlu kömür madenciliği atıklarında (0,5-10 mm boyutlu şistler ve 0-0,5 mm boyutlu şistler) kalıntı kömür içeriğinin fazla olması neticesinde yüksek sıcaklıklarda serbest karbonun uzaklaşması kızdırma kaybını arttırmaktadır. En yüksek kızdırma kaybı flotasyon atıklarını içeren numunelerde gerçekleşmiştir. Tablo 4.1’de verilen kimyasal analiz sonuçları ile termogravimetrik analiz sonuçları elde edilen bulguları desteklemektedir. Sıcaklık artışının kızdırma kaybı değerleri üzerinde önemli bir etkisi görülmemektedir.

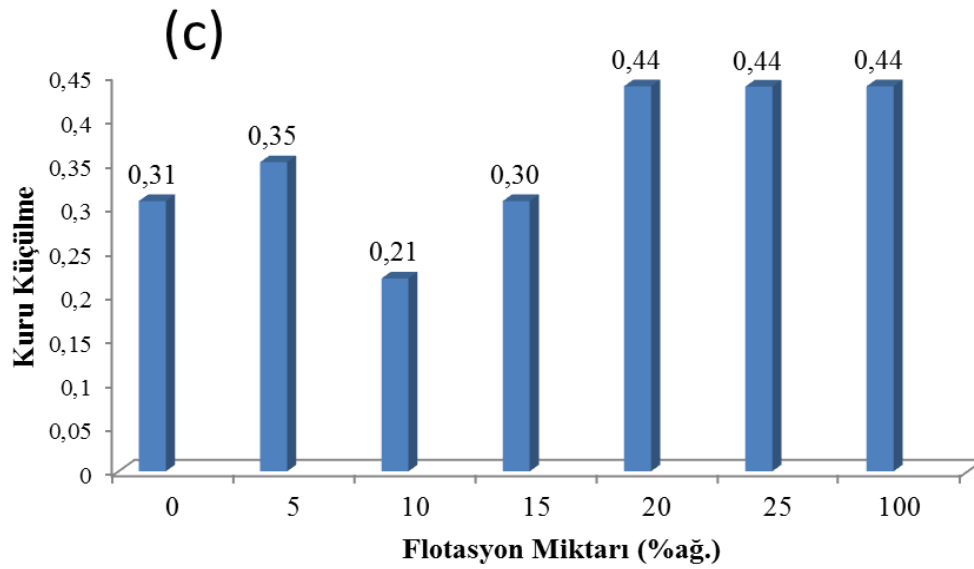
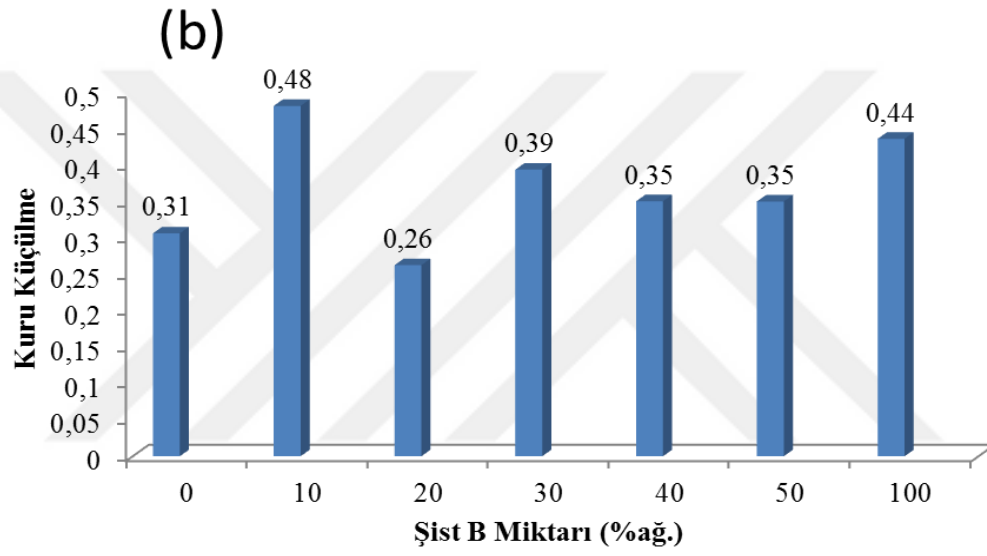
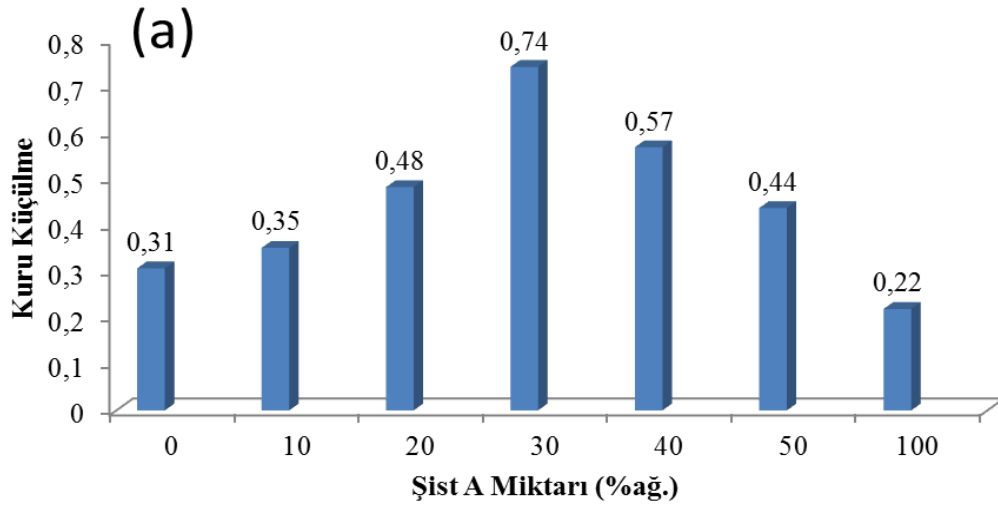


Şekil 4.6: Kömür madenciliği a) Şist A, b) Şist B, c) Flotasyon atığı katkılı tuğla numunelerinin farklı pişirim sıcaklıklarında kızdırma kaybı oranları

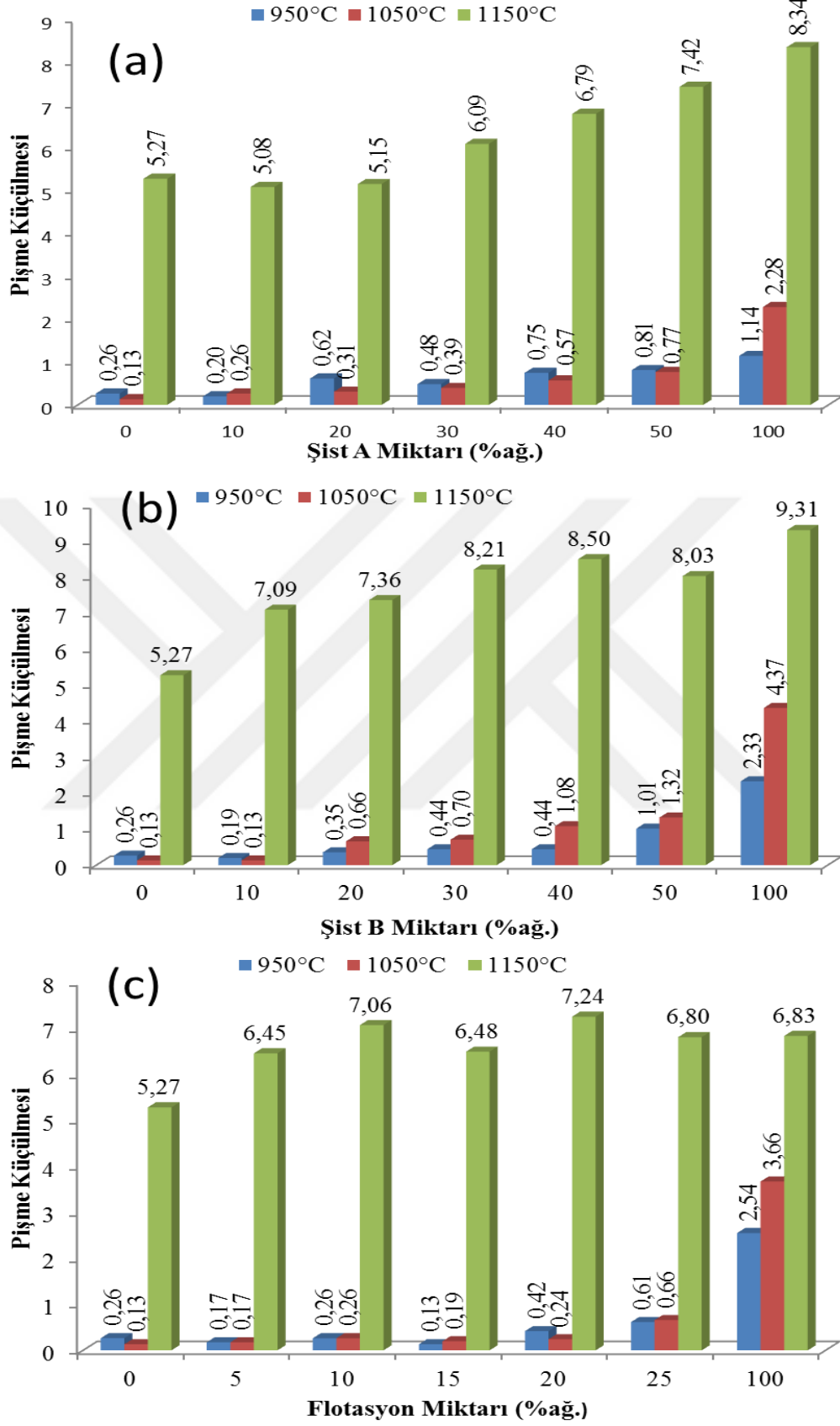
4.2.2 Küçülme Değerleri

Farklı oranlarda kömür madenciliği atığı içeren tuğla numunelerinin kuru küçülme değerleri Şekil 4.7’de görülmektedir. Standart numunenin kuru küçülme değeri %0,31’dir. Kuru küçülme değerleri artan oranlarda Şist A içeren tuğla numunelerinde %0,22 ile %0,74 arasında, Şist B içeren tuğla numunelerinde %0,26 ile %0,48 arasında, Flotasyon atığı içeren tuğla numunelerinde ise %0,21 ile %0,43 arasında değişmektedir.

Farklı oranlarda kömür madenciliği atığı içeren üç farklı sıcaklıkta pişirilmiş tuğla numunelerinin pişme küçülmesi değerleri Şekil 4.8’de verilmektedir. Tüm örneklerde atık miktarının artması ve sıcaklığın yükselmesi pişme küçülmesi değerlerini arttırmaktadır. En fazla artış 1150 °C’de pişirilen numunelerde saptanmıştır. Bu sıcaklıkta ergitici özelliğe sahip alkali ve toprak alkali oksitler ile Fe_2O_3 ’in sinterleme sürecinde sıvı faz oluşturduğu ve partikül yeniden düzenlenmesini destekleyerek pişme küçülmesini arttırdığı düşünülmektedir.



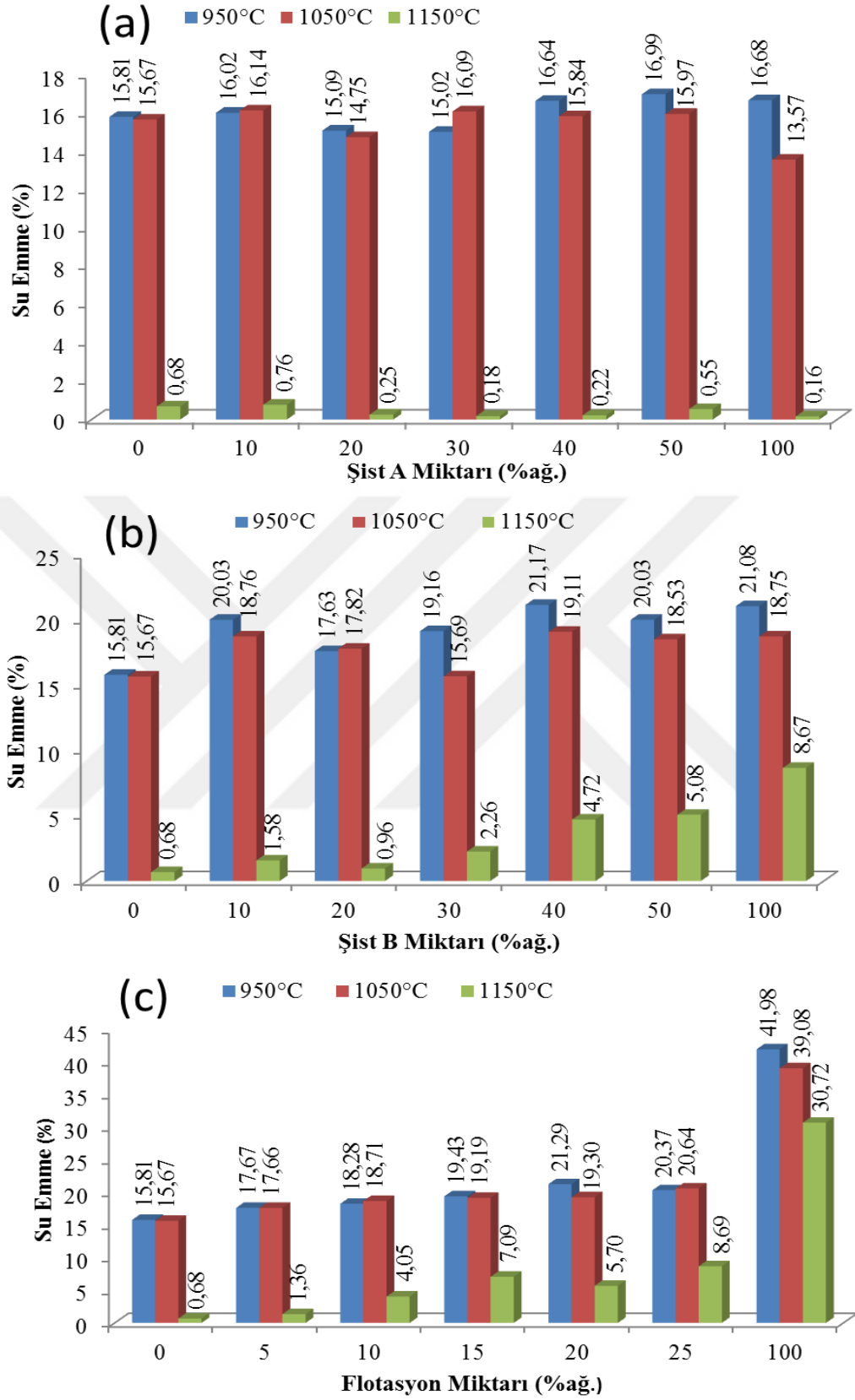
Şekil 4.7: Kömür madenciliği a) Şist A, b) Şist B, c) Flotasyon atığı katkılı tuğla numunelerinin kuru küçülme oranları



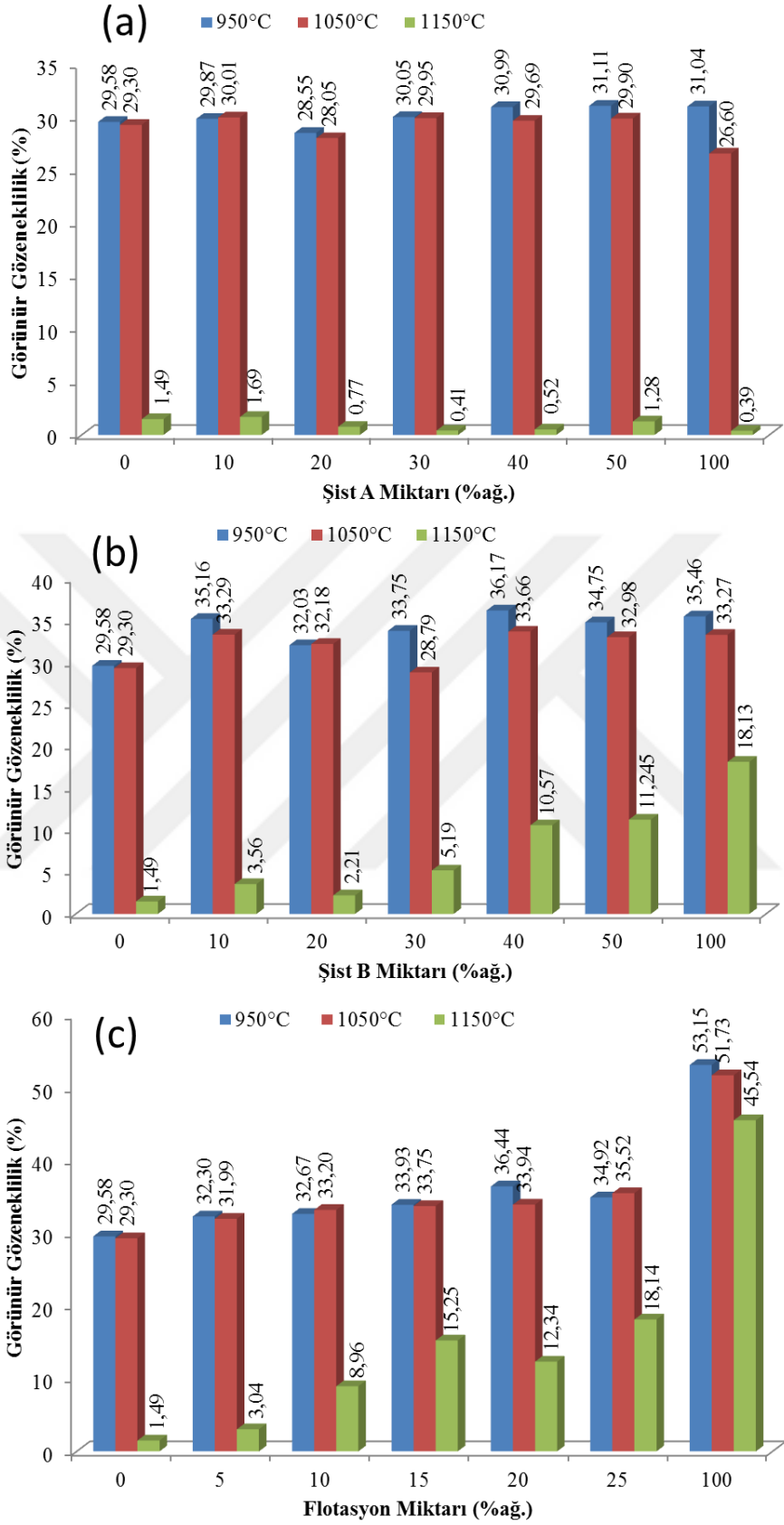
Şekil 4.8: Kömür madenciliği a) Şist A, b) Şist B, c) Flotasyon atığı katkılı tuğla numunelerinin pişme küçülmesi oranları

4.2.3 Su Emme ve Görünür Gözeneklilik Değerleri

Kömür madenciliği atığı içeren üç farklı sıcaklıkta pişmiş tuğla numunelerinin su emme ve görünür gözeneklilik oranları Şekil 4.9 ve 4.10'de verilmektedir. Buna göre, 950, 1050 ve 1150°C'de pişen numunelerde artan oranlarda Şist A ilavesi su emme ve gözenek değerlerini çok fazla etkilememiştir. Çıkan sonuçlar standart numune ile oldukça benzerdir. Tuğla kili ve Şist A'nın kimyasal bileşimine bakıldığında kızdırma kaybını arttıran uçucu bileşenlerin az olduğu SiO_2 ve Al_2O_3 oranlarının yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle pişirim davranışları benzerlik göstermektedir. Artan oranlarda Şist B ve Flotasyon katkısı her üç sıcaklıkta da su emme ve gözenek oranlarını arttırmaktadır. Bu atıklar Şist A'ya göre daha yüksek miktarda kalıntı kömür içermekte ve ısı işlem esnasında karbonun uzaklaşması numunelerdeki gözenek miktarını ve bunun sonucunda su emme değerlerini arttırmaktadır. Pişme sıcaklığının 1150°C'ye yükselmesi tüm numunelerde su emme ve gözenek oranlarında önemli bir düşüşe yol açmıştır. Bu durum sıcaklığın artmasıyla birlikte bünye yoğunlaşmasının arttığını göstermektedir. Tuğla kili ve kömür madenciliği atıklarında bulunan alkali ve toprak alkali oksitler ile Fe_2O_3 sıvı faz sinterlemesi için oldukça önemli ergiticilerdir. Bünyede alkali oksit, toprak alkali oksit ve Fe_2O_3 miktarlarının artması oluşan sıvı faz miktarını arttırmakta ve sinterleme sıcaklığını azaltmaktadır (Baccour ve ark. 2008). Sinterleme süresince sıvı faz oluşumu, yoğunlaşma ve küçülme meydana getirmekte; yüzey gerilimi ve kapilarite etkisi ile tanelerin yeniden düzenlenmesini sağlamakta bu durum gözenek miktarının azalmasına yol açmaktadır (Salem ve ark. 2009, Baccour ve ark. 2008). Şist B ve Flotasyon olarak isimlendirilen atıklarda uçucu bileşenlerin fazla olması gözenek miktarını artırmaktadır. Ayrıca bu atıklarda SiO_2 oranının az olması nedeniyle (Tablo 4.1) 1150°C'de gözeneklerin kapanıp yoğunlaşmanın sağlanmasına yetecek miktarda camsı faz oluşmamaktadır. Flotasyon atıklarının öğütülerek 150 μm 'lik elekten geçirilmesi sonucu elde edilen tozların ortalama tane boyut dağılımları diğer hammaddelerin öğütülmesi sonucu elde edilen tozlara göre daha büyüktür (Tablo 4.2). Tane boyutunun büyümesi reaksiyon hızını yavaşlatırken sinterlenmenin daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmesine neden olmaktadır. Tane boyut dağılımındaki değişimler; homojenite, paketlenme, gözenek, gözenek-boyutu dağılımı, aglomerasyon ve yüzey alanı üzerinde etkilidir. Tane boyutundaki azalma farklı mineraller arasında teması arttırmakta, reaksiyon gerçekleştirme olasılıklarını yükselmekte, bu durum ise sinterleme hızını artırmaktadır (Villegas-Palacio ve Dinger 1996).



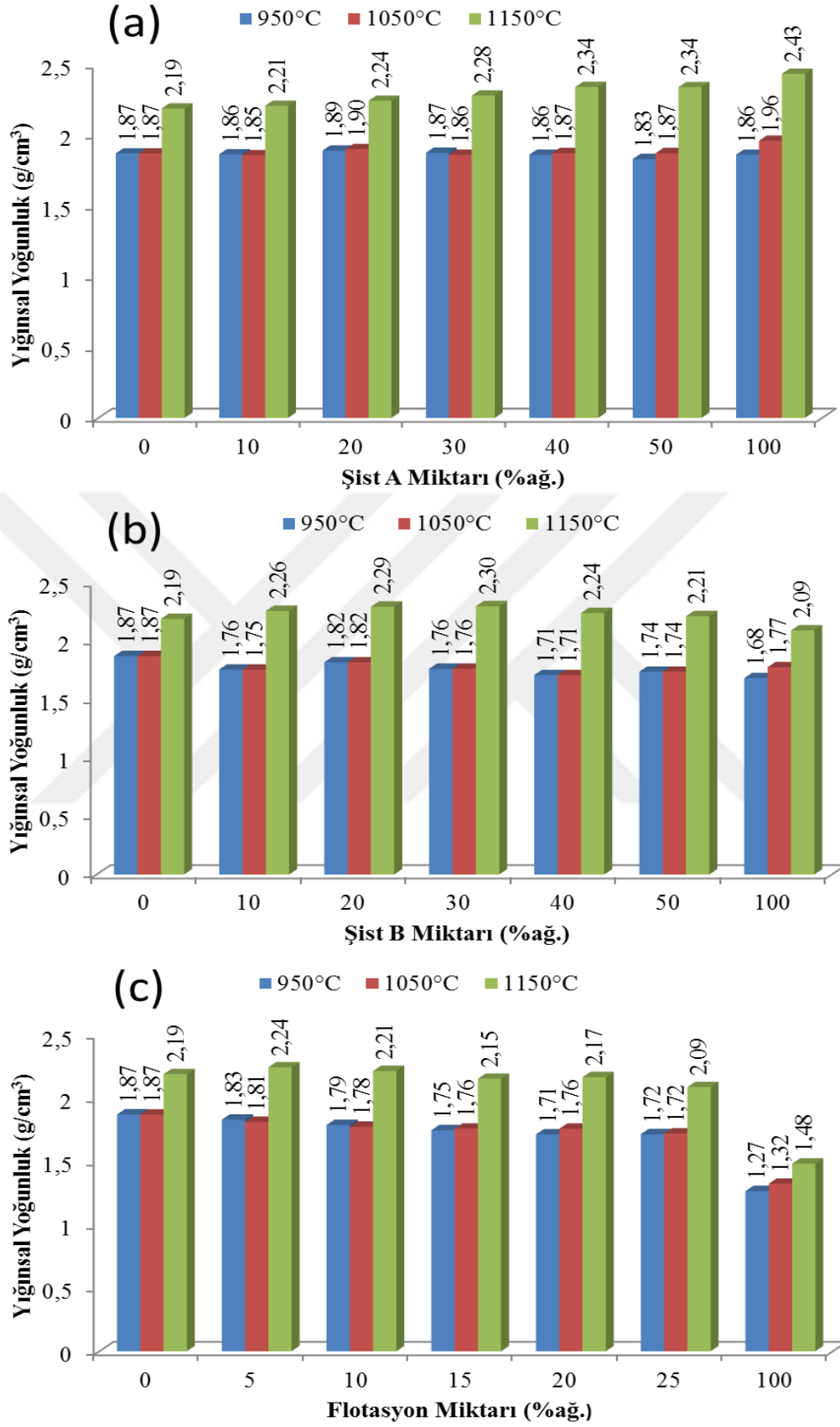
Şekil 4.9: Kömür madenciliği a) Şist A, b) Şist B, c) Flotasyon atığı katkılı tuğla numunelerinin farklı pişirim sıcaklıklarında su emme oranları



Şekil 4.10: Kömür madenciliği a) Şist A, b) Şist B, c) Flotasyon atığı katkılı tuğla numunelerinin farklı pişirim sıcaklıklarında görünür gözeneklilik oranları

4.2.4 Yığın Yoğunluk Değerleri

Şekil 4.11’de kömür madenciliği atığı içeren üç farklı sıcaklıkta pişirilen tuğla numunelerinin yığın yoğunluk değerleri verilmektedir. Grafikler incelendiğinde 950, 1050 ve 1150°C’de pişen numunelerde artan oranlarda Şist A ilavesi yığın yoğunluk değerlerini çok fazla etkilememiştir. Çıkan sonuçlar standart numune ile oldukça benzerdir. Artan oranlarda Şist B ve Flotasyon katkısı her üç sıcaklıkta da yoğunluk değerlerini azaltmaktadır. Sinterleme sırasında kömür madenciliği atıkları ve tuğla killinden gelen uçucu bileşenler bünyenin gözenekli olmasına yol açmaktadır. Oluşan boşluklar ve gözenekler sinterleme sürecinde tamamıyla kapatılamadığından yoğunluğu düşük bir yapı ortaya çıkmaktadır. Sıcaklığın 1150°C’ye yükselmesi tüm numunelerde yığın yoğunluk değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Sıcaklığın 1150°C’ye yükselmesi sıvı faz miktarını arttırmaktadır. Meydana gelen sıvı faz, partikül yeniden düzenlenmesi ve etkili paketlenme sağlayarak yüksek yoğunluklu bir yapı meydana getirmektedir (Nour ve Awad 2008).



Şekil 4.11: Kömür madenciliği a) Şist A, b) Şist B, c) Flotasyon atığı katkılı tuğla numunelerinin farklı pişirim sıcaklıklarında yığın yoğunluk oranları

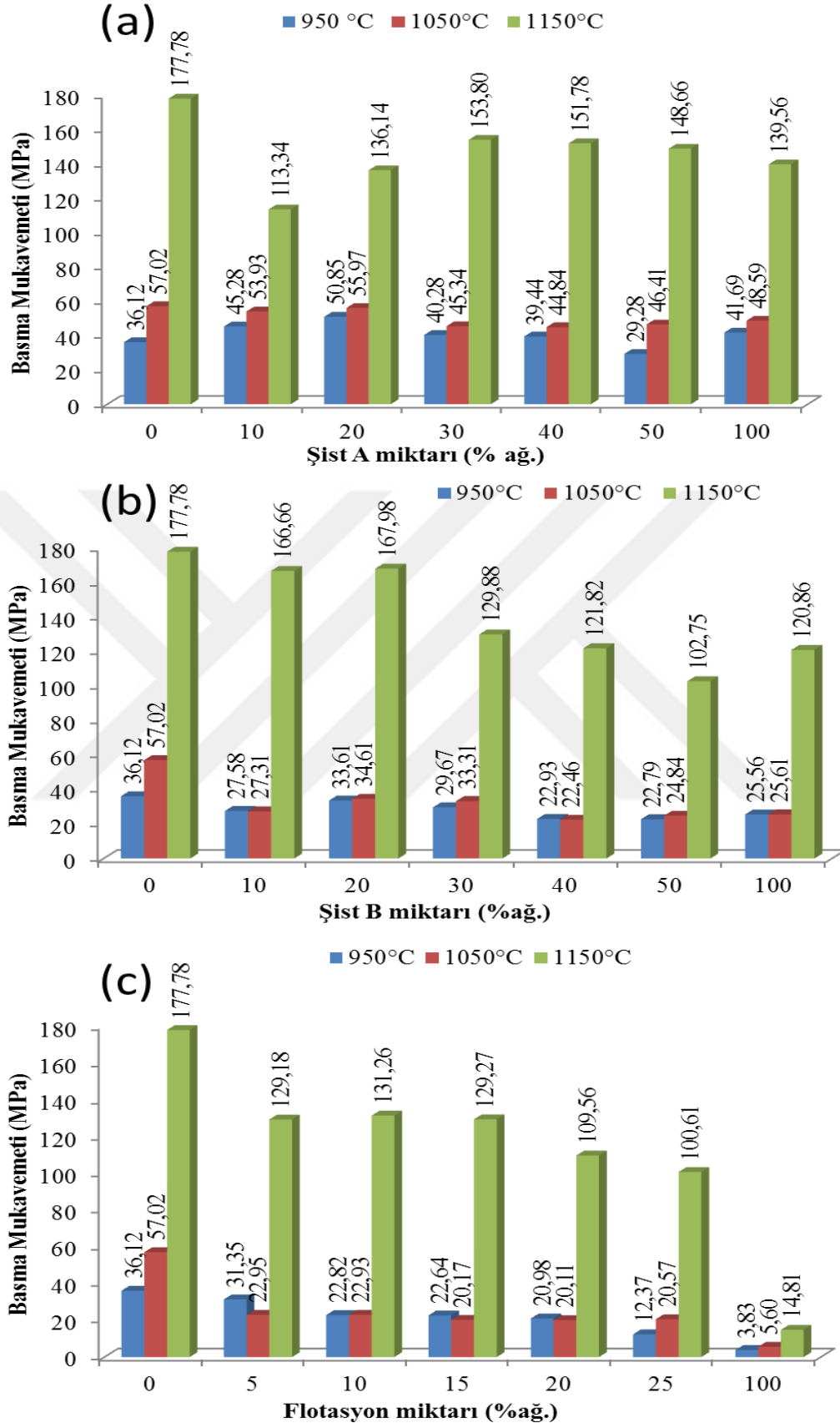
4.2.5 Basma Mukavemeti Değerleri

Basma mukavemeti, yapı malzemelerinde kalite kontrolü için kullanılan önemli bir test yöntemidir. Tuğlaların üretim yöntemi, sinterleme sıcaklığı, gözenek miktarları ve gözeneklerin ürün içerisindeki yeri basma mukavemeti üzerinde etkili olan parametrelerdendir. Kömür madenciliği atığı içeren üç farklı sıcaklıkta pişirilmiş tuğla numunelerinin basma mukavemeti değerleri Şekil 4.12’ de verilmektedir. Grafikler incelendiğinde Standart tuğla örneklerinin basma mukavemeti değerlerinin 36,12-177,78 MPa arasında değiştiği görülmektedir. Pişme sıcaklığının artması mukavemet değerlerini arttırmaktadır. En yüksek mukavemet değeri 1150 °C’ de pişirilen numunelerde elde edilmiştir. Tuğla üretiminde kullanılan kil içerisinde var olan alkali ve toprak alkali oksitler ile Fe₂O₃ ergitici özellikleri sayesinde sıvı faz oluşumu sağlamaktadır. Sinterleme esnasında oluşan sıvı faz gözeneklerin kapatılmasını sağlamakta ve soğutma esnasında nispeten yüksek mukavemetli bir camsı faz oluşturarak basma dayanımını arttırmaktadır.

Şist A katkılı tuğla örneklerinin basma mukavemeti değerleri incelendiğinde 950°C’ de %40 katkı oranına kadar basma mukavemeti değerleri standart tuğla örneklerinden yüksek çıkmıştır. Şist A katkısı %20 oranına kadar mukavemeti arttırmaktadır. %30-50 arasında yapılan ilaveler ise mukavemette düşüşe yol açmıştır. 1050 ve 1150 °C’ ler de ise Şist A katkılı örneklerin basma mukavemeti değerleri standart örneklere göre düşüş göstermiştir. En yüksek mukavemet 1050°C’ de %20 katkı oranında, 1150°C’ de ise %30 katkı oranında elde edilmiştir. Bu katkı oranlarından sonra yapılan ilaveler ise mukavemette düşüşe neden olmaktadır. Ağırlıkça %100 oranında Şist A içeren numunelerde sıcaklığın artması mukavemeti arttırmaktadır. 950°C’ de mukavemet değeri standart tuğla örneğinden yüksek çıkmıştır. Bu durum Şist A’nın tek başına tuğla yapımında kullanılabileceğini göstermektedir. Kızdırma kaybı, küçülme, su emme, görünür gözeneklilik ve yoğunluk ölçüm sonuçları varılan kanıyı destekler niteliktedir.

Şist B ve Flotasyon atığı katkılı tuğla örneklerinin basma mukavemeti değerleri incelendiğinde, sabit bir sıcaklıkta, artan atık miktarları ile basma dayanımının azaldığı, tersine, sabit atık miktarında, basma dayanımının artan pişme sıcaklığı ile arttığı görülmektedir. Her iki atık içinde basma dayanımı sabit atık miktarında 950-1050 °C arasında neredeyse aynıdır. Bununla birlikte, 1150 °C’ de basma dayanımı 950 °C ve 1050 °C’ ye kıyasla oldukça yükselmektedir. Şist B ve Flotasyon atıklarının barındırdığı kalıntı

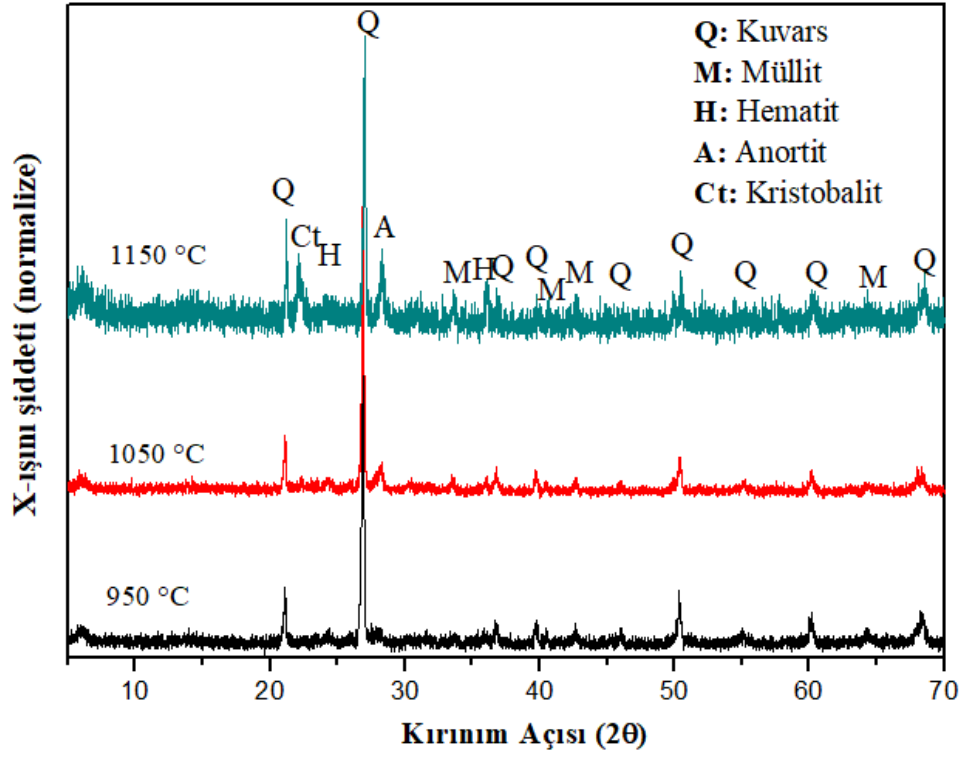
kömür oranları Şist A'ya göre oldukça yüksektir bu durum kızdırma kaybının artmasına (Tablo 4.1) ve yüksek sıcaklıklarda kömürün yanarak uzaklaşmasına bağlı olarak gözeneklilikte artışa sebep olmaktadır. Basma dayanımı gözenek miktarının artması birlikte azalmaktadır. Kimyasal bileşimde bulunan alkali ve toprak alkali oksitler ile Fe_2O_3 miktarları gözeneklerin kapanmasını sağlayacak yeterli miktarda sıvı faz oluşumunu sağlayamamaktadır. Sıcaklığın yükselmesiyle birlikte sıvı faz artış göstermekle birlikte standart numune ve Şist A içeren numunelere göre basma mukavemeti değerleri düşük olmaktadır. En yüksek kalıntı kömür miktarına sahip olan Flotasyon atıklarının artan oranlarda kullanıldığı numunelerde basma mukavemeti standart numuneye göre oldukça düşüş göstermektedir. Türk Standartlarına (TS EN 771-1) göre tuğlalar en az 7 MPa basınç dayanımına sahip olmalıdır. Ağırlıkça %100 oranında Flotasyon atığı içeren 950 ve 1050 °C sıcaklıklarda pişirilmiş numuneler dışında tüm numuneler gereken basma dayanımına sahiptir.



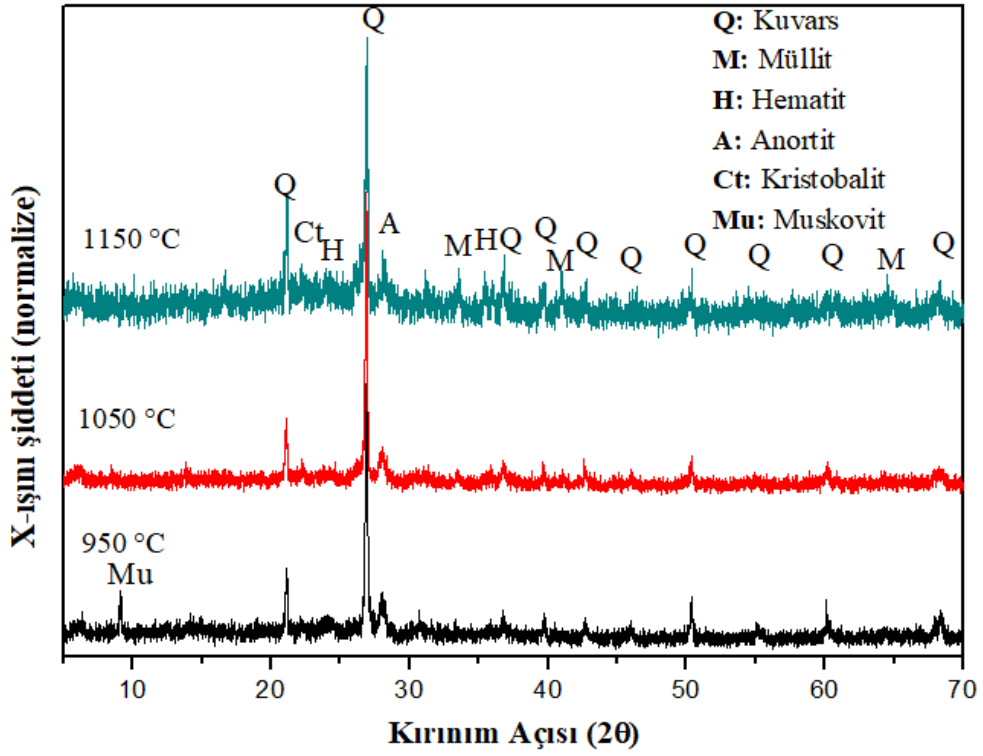
Şekil 4.12: Kömür madenciliği a) Şist A, b) Şist B, c) Flotasyon atığı katkılı tuğla numunelerinin farklı pişirim sıcaklıklarında basma mukavemeti değerleri

4.2.6 Pişmiş Tuğla Numunelerinin Mineralojik Faz Analizi

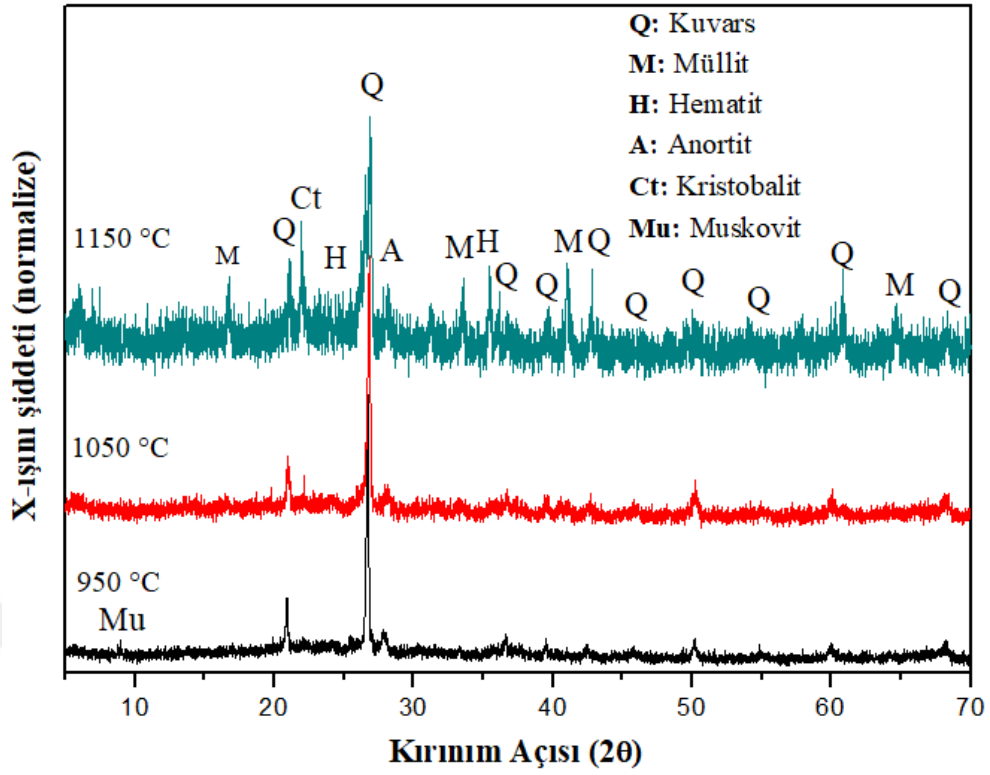
Farklı sıcaklıklarda pişirilen standart tuğla ve ağırlıkça %100 oranında Şist A, Şist B ve Flotasyon atığı içeren numunelerin XRD analiz sonuçları Şekil 4.13-4.16'da görülmektedir. Standart tuğla örnekleri incelendiğinde; numunelerde, kuvars, müllit, kristobalit, anortit ve hematit fazları tespit edilmiştir. Ağırlıkça %100 oranında Şist A, Şist B ve Flotasyon atığı içeren numunelere ait XRD analiz sonuçları incelendiğinde; numunelerde, kuvars, müllit, kristobalit, anortit, hematit ve muskovit fazları tespit edilmiştir. 950°C'ye kadar kömür madenciliği atıklarında bulunan muskovit fazı varlığını sürdürmektedir. Seramik bünyelerde sinterleme sıcaklığının artması hammaddelerin reaktif hale gelmesi için gerekli enerji eşiğinin geçilmesini sağlamaktadır. Bu durum var olan fazların kaybolması ve yeni fazların oluşmasına sebebiyet veren reaksiyon ve dönüşümlerin gerçekleşmesiyle sonuçlanır (Sousa ve Holanda 2005). Seramik yapılarda ortaya çıkan müllit fazı düşük sıcaklıkta kil kalıntılarından oluşursa birincil müllit, yüksek sıcaklıkta feldspatça zengin eriyikten çözünme, yeniden kristallenme yoluyla iğnemsî şekilde oluşursa ikincil müllit olarak adlandırılmaktadır (Kara ve ark. 2006, Carty ve Senapati 1998). XRD paternlerinde tespit edilen müllit fazı yaklaşık olarak 1000 °C civarında kalıntı kil tanelerinde meydana gelen birincil müllit fazıdır. Kil ve kömür madenciliği atıkları içerisinde bulunan kalsit (Şekil 4.1-4.2) 700 °C üzerinde CaO ve CO₂'e ayrışır. Açığa çıkan CaO killerin kristal yapısında bulunan kimyasal suyun uzaklaşması sonucu oluşan metakaolen ile reaksiyon vererek anortit fazını oluşturmaktadır (Traore ve ark. 2003; Sousa ve Holanda 2005; Kara ve ark. 2006). XRD piklerinde görülen hematit fazı hammaddelerin içerisinde bulunan Fe'nin ayrışması ve oksidasyonu sonucu oluşmaktadır (Xu ve ark. 2017). Ayrıca XRD paternleri incelendiğinde 1150°C'de pişirilen tüm örneklerde camsı fazın varlığı net bir şekilde görülmektedir.



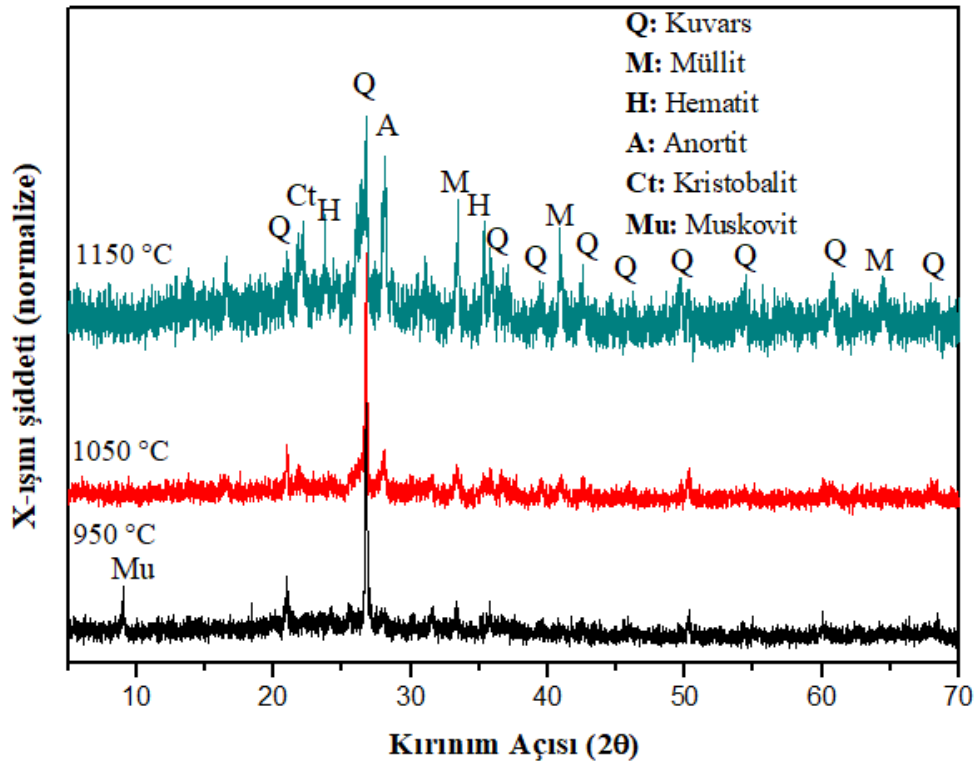
Şekil 4.13: Farklı sıcaklıklarda pişirilen standart tuğla örneklerine ait XRD paterni



Şekil 4.14: Farklı sıcaklıklarda pişirilen ağ. %100 oranında Şist A içeren tuğla örneklerine ait XRD paterni



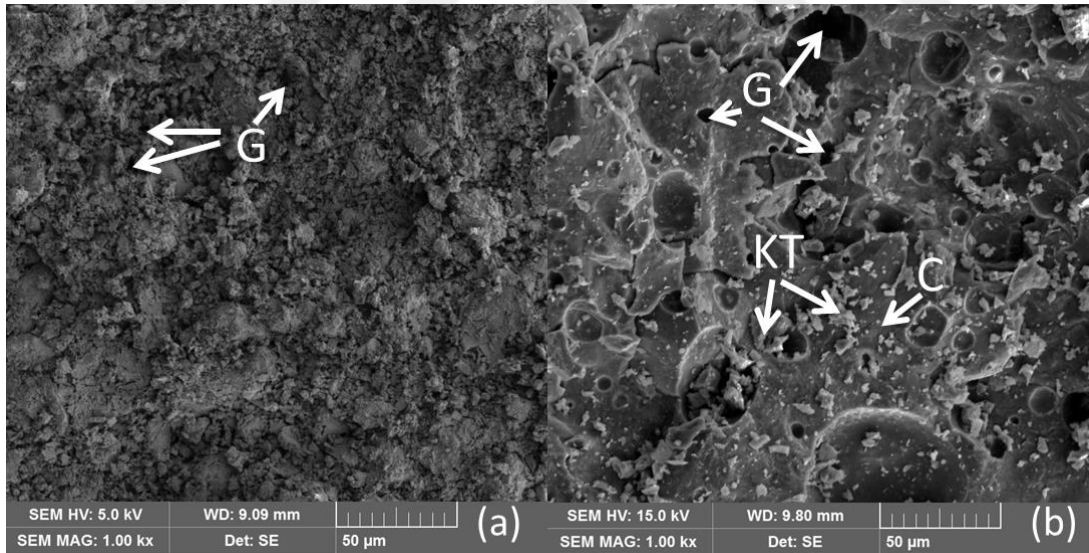
Şekil 4.15: Farklı sıcaklıklarda pişirilen ağırlık % 100 oranında Şist B içeren tuğla örneklerine ait XRD paterni



Şekil 4.16: Farklı sıcaklıklarda pişirilen ağırlık %100 oranında Flotasyon atığı içeren tuğla örneklerine ait XRD paterni

4.2.7 Pişmiş Tuğla Numunelerinin Mikroyapı Analizi

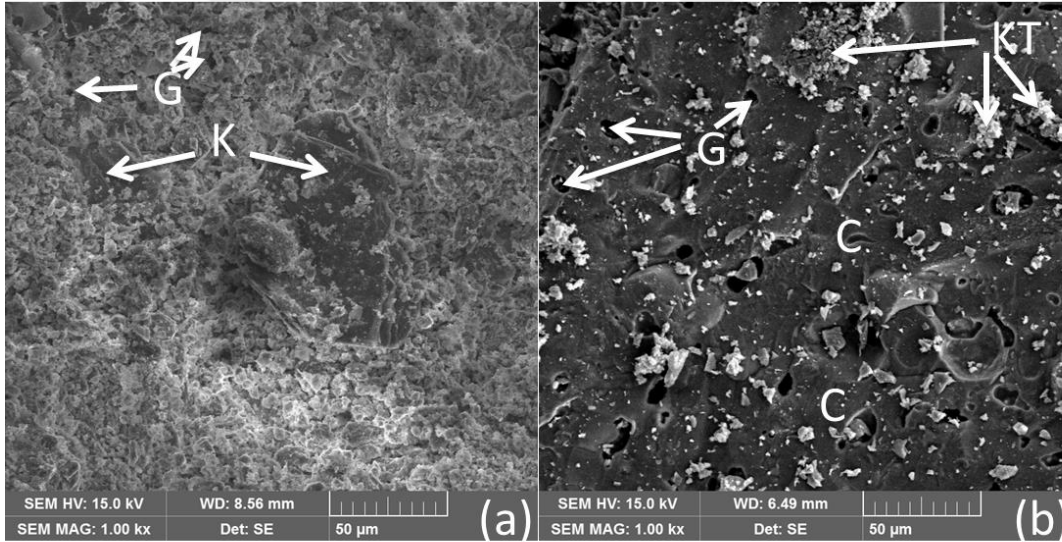
Şekil 4.17’de 950 ve 1150 °C sıcaklıklarda pişirilen standart tuğla örneklerinin kırık yüzeylerinden ikincil elektronlar ile alınmış taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri verilmiştir. 950 °C’de pişirilen standart tuğlanın düzensiz, gevşek, ince taneli ve gözenekli yapıya sahip olduğu, etkin bir sinterleşme ve yoğunlaşma gerçekleşmediği görülmektedir. Camsı faz gözlenmemektedir. Pişme sıcaklığı 1150 °C’ye yükseldiğinde sıcaklık artışıyla birlikte yoğunlaşmanın da arttığı görülmektedir. Tuğladaki gözeneklerin boyutu önemli ölçüde azalmış ve gözenekler yuvarlaklaşmıştır. Camsı fazın ortaya çıkması ile kristal taneleri birbirine bağlanır. Bu olaylar, sinterleme sıcaklığının artmasıyla, kil kimyasal bileşimine bağlı olarak (Tablo 4.1’de verilen kimyasal bileşime göre kil içerisinde toplam ergitici miktarı %15,04’tür. Kızdırma kaybı ise %6,87’dir.) yüksek miktarda düşük viskoziteli sıvı fazın ortaya çıkması sonucu gerçekleşmektedir. Oluşan sıvının yüzey gerilimi ve kapilerite, katı partikülleri birbirine yaklaştırmaya ve gözenekliliği azaltmaya yardımcı olur (Xu ve ark. 2017). Sonuçta tuğlanın fiziko-mekanik özellikleri bu duruma uygun olarak iyileşir.



Şekil 4.17: Pişirilmiş standart tuğla örneklerinin SEM görüntüsü a) 950°C b) 1150°C
(G: Gözenek, KT: Kristal Taneleri, C: Camsı Faz)

Şekil 4.18’de 950 ve 1150 °C sıcaklıklarda pişirilen ağırlıkça %100 oranında Şist A içeren numunelerin kırık yüzeylerinden alınmış ikincil elektron SEM görüntüleri verilmiştir. 950 °C’de pişirilen numune düzensiz, gevşek ve gözenekli yapıya sahiptir, camsı faz fark

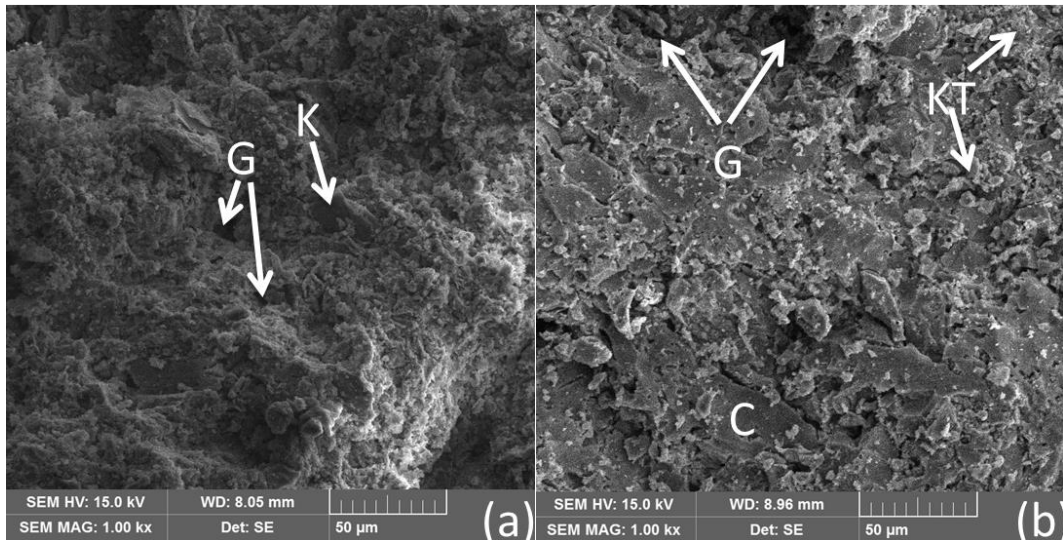
edilmemektedir, etkin bir sinterleşme ve yoğunlaşma gerçekleşmemiştir. Bu sıcaklıkta hemen hemen hiç sıvı eriyik oluşmamış ve sıvı faz sinterlemesi meydana gelmemiştir. Ayrıca gri renkte keskin kenarlı kalıntı kuvars taneleri mevcuttur. Sıcaklığın 1150 °C'ye yükselmesiyle birlikte sinterlenen tuğlanın mikroyapısı büyük ölçüde değişmiştir. Gözenekler neredeyse yuvarlak bir şekle sahiptir ve daha düşük sıcaklıkta sinterlenen tuğlalardan küçüktür. Kömür atığının kimyasal bileşimine bağlı olarak (Tablo 3.1 de verilen kimyasal bileşime göre Şist A içerisinde toplam ergitici miktarı %14,74'tür. Kızdırma kaybı ise %8,84'tür.) Çok miktarda camsı faz ortaya çıkmış ve tuğlanın matris aralığını doldurmuştur, böylece tuğla yoğunlaşmış ve mekanik mukavemeti artmıştır. Doğrusal küçülme değeri artarken su emme değeri ise önemli ölçüde azalmıştır. Elde edilen sonuçlar Xu ve ark. (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışma ile benzerlik göstermektedir.



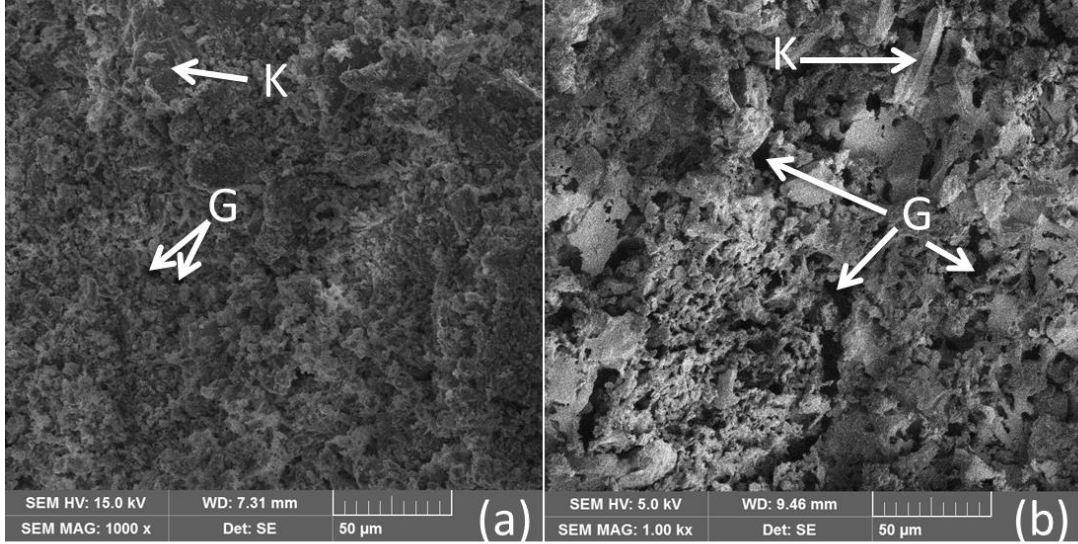
Şekil 4.18: Ağırlıkça %100 oranında Şist A içeren pişirilmiş tuğla örneklerinin SEM görüntüsü a) 950°C b) 1150°C (G: Gözenek, KT: Kristal Taneleri, C: Camsı Faz, K: Kuvars)

950°C'de pişirilen ağırlıkça %100 oranında Şist B ve Flotasyon atığı içeren numunelerin SEM görüntüleri (Şekil 4.19 ve Şekil 4.20), 950°C'de pişirilen ağırlıkça %100 oranında Şist A içeren numune ile benzerlik göstermektedir. Ancak bu numunelerde kalıntı kömür oranının artmasına bağlı olarak kimyasal bileşimde bulunan karbonun yanması ve gaz oluşumuna sebep olması sonucunda gözeneklerin daha fazla sayıda ve daha büyük olduğu görülmektedir. 1150°C'de pişirilen Şist B içeren tuğla numunesine ait görüntü (Şekil 4.19 (b)) incelendiğinde ise oluşan camsı fazın Şist A içeren numuneye göre azaldığı daha fazla

sayıda ve düzensiz şekilli gözenekler içerdiği görülmektedir. Kimyasal bileşimde bulunan SiO_2 'nin azalması oluşan camsı fazın miktarını etkilemektedir. Tablo 4.1'de verilen kimyasal bileşime göre Şist B'nin toplam ergitici miktarı %11,16'dır. Tablo incelendiğinde en az ergitici içeriği Şist B'de bulunmaktadır. Kalıntı kömür, karbonat ve organik madde içeriğine bağlı olarak kızdırma kaybı %15,72'ye yükselmiştir. Pişirme işlemi sırasında kalıntı kömürün ve organik maddelerin uzaklaşmasına bağlı olarak tuğla içerisindeki gözenekler artmış, toplam ergitici ve SiO_2 miktarının kil ve Şist A'ya göre az olması nedeniyle ortaya çıkan sıvı fazın miktarı azalmış ve gözenekleri kapatmaya yetmemiştir. Şekil 4.20 (b)'de 1150°C'de pişirilen ağırlıkça %100 Flotasyon atığı içeren tuğlanın SEM görüntüsü incelendiğinde camsı faz miktarının oldukça az olduğu, kalıntı kuvars tanelerinin bulunduğu ve çok sayıda şekilsiz büyük gözeneklerin olduğu görülmektedir. Flotasyon atığının kimyasal bileşimi incelendiğinde (Tablo 4.1) en düşük SiO_2 miktarına (%28,95) sahip olduğu görülmektedir. Toplam ergitici miktarı %14,18 olmasına rağmen SiO_2 miktarı az olduğundan oluşan camsı fazın miktarı da az olmaktadır. En yüksek kızdırma kaybı %27,27 ile Flotasyon atıklarındadır. Bu durum atık içerisinde bulunan kalıntı kömür ve organik madde miktarının oldukça fazla olduğunu göstermektedir. Bu nedenle tuğlalar oldukça yüksek oranda gözenek içermekte ve oluşan kısıtlı miktardaki camsı faz gözenekleri kapatamamaktadır.

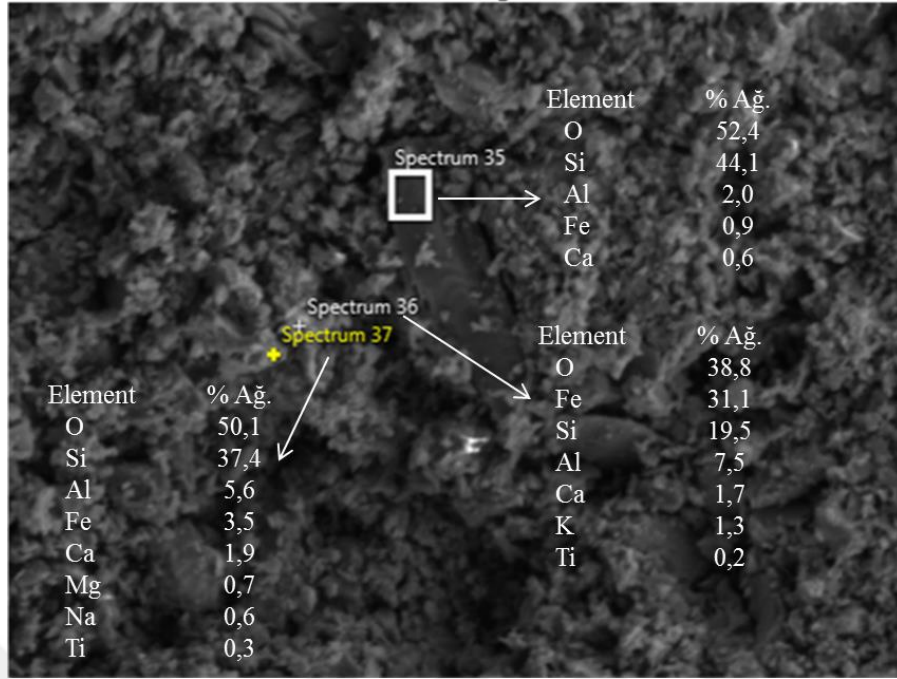


Şekil 4.19: Ağırlıkça %100 oranında Şist B içeren pişirilmiş tuğla örneklerinin SEM görüntüsü a) 950°C b) 1150°C (G: Gözenek, KT: Kristal Taneleri, C: Camsı Faz, K: Kuvars)



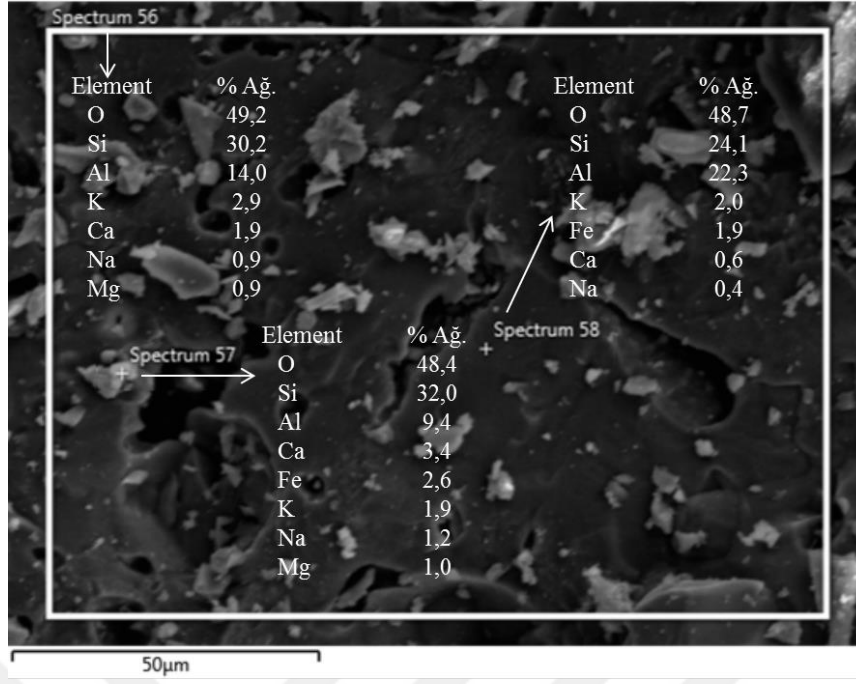
Şekil 4.20: Ağırlıkça %100 oranında Flotasyon atığı içeren pişirilmiş tuğla örneklerinin SEM görüntüsü a) 950°C b)1150°C (G: Gözenek, K: Kuvars)

Farklı sıcaklıklarda pişirilen tuğla örneklerinin SEM cihazında gerçekleştirilen EDS analiz sonuçları Şekil 4.21-Şekil 4.24’ de verilmektedir. Buna göre, Şekil 4.21’ da standart tuğla için seçilen bölgelerin elementel analiz sonucu görülmektedir. Spectrum 35 adlı bölgenin kalıntı kuvars (SiO_2) fazı olduğu, Spectrum 36 adlı bölgenin demirce zengin olduğu ve Spectrum 37 adlı bölgenin tuğla bünyesinin genelini oluşturan matris fazı olduğu düşünülmektedir.



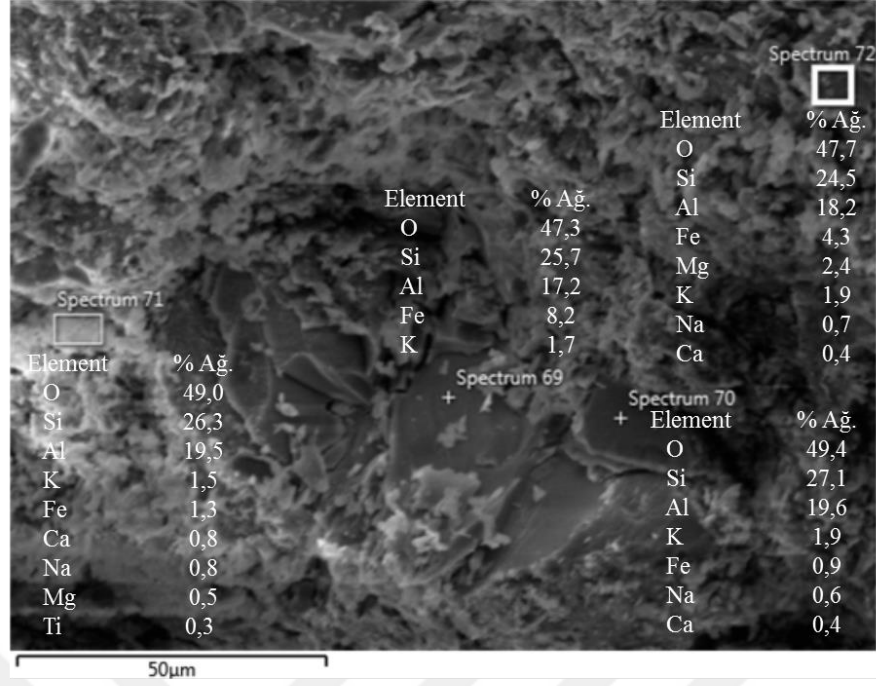
Şekil 4.21: 950°C’de pişirilmiş standart tuğla örneğinin EDS analizi

Şekil 4.22’ de 1150°C’de pişirilen ağırlıkça %100 oranında Şist A içeren numuneye ait seçilen bölgelerin elementel analiz sonucu görülmektedir. Spektrum 56 adlı bölgenin sinterlenmiş tuğlanın genel bileşimini, Spektrum 57 adlı bölgenin pişirim esnasında yaygın olarak ortaya çıkan kristal fazın kimyasal bileşimini, Spektrum 58 adlı bölgenin ise sinterleme esnasında oluşan camsı fazın bileşimini gösterdiği düşünülmektedir.



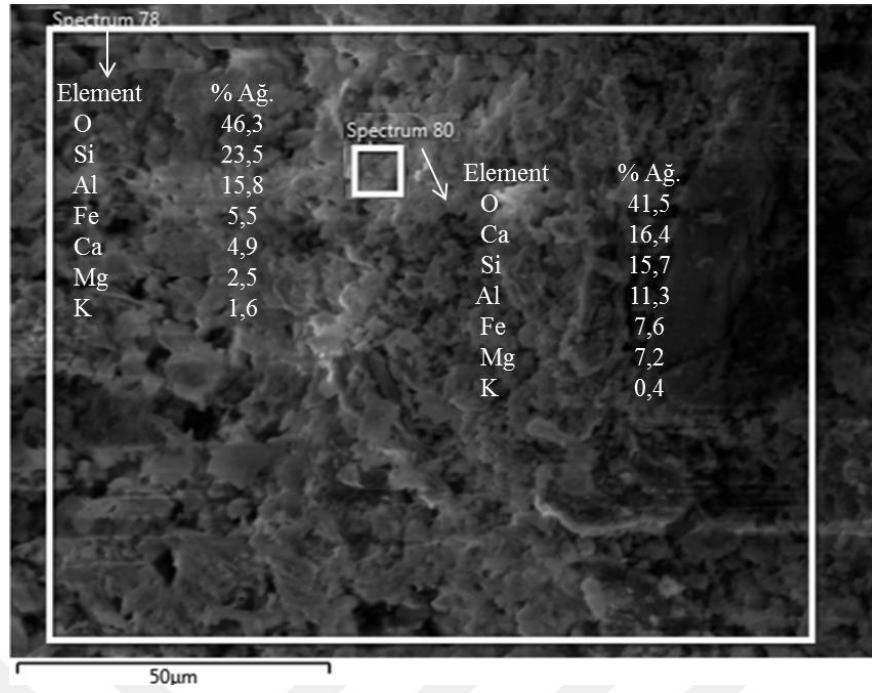
Şekil 4.22: Ağırlıkça %100 oranında Şist A içeren 1150°C pişirilmiş tuğla örneğinin EDS analizi

Şekil 4.23’ de 1050°C’de pişirilen ağırlıkça %100 oranında Şist B içeren numuneye ait seçilen bölgelerin elementel analiz sonucu görülmektedir. Spectrum 69 ve Spectrum 70 adlı bölgelerin sinterleme esnasında oluşan camsı fazın bileşimini belirttiği düşünülmektedir. Spectrum 71 ve Spectrum 72 adlı bölgelerin ise XRD analizi sonucu varlığı tespit edilen Şist B içerisinde bulunan kalıntı kaolenit taneleri üzerinde meydana gelen birincil müllit fazı ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.23: Ağırlıkça %100 oranında Şist B içeren 1050°C pişirilmiş tuğla örneğinin EDS analizi

Şekil 4.24' da 950°C'de pişirilen ağırlıkça %100 oranında Flotasyon atığı içeren numuneye ait seçilen bölgelerin elementel analiz sonucu görülmektedir. Spectrum 78 adlı bölgenin sinterlenmiş bünyenin genelini oluşturan matris olduğu görülmektedir. Spectrum 80 adlı bölgenin ise XRD analizi sonucu varlığı tespit edilen Flotasyon atığı içerisinde bulunan kalsitin ayrışması sonucu ortaya çıkan CaO'in metakaolen fazı ile reaksiyonu sonucu meydana gelen anortit fazı ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.24: Ağırlıkça %100 oranında Flotasyon atığı içeren 950°C pişirilmiş tuğla örneğinin EDS analizi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma sonucunda elde edilen bulgulara göre:

- Farklı oranlarda kömür madenciliği atığı içeren üç farklı sıcaklıkta pişirilmiş tüm örneklerde atık miktarının artması ve sıcaklığın yükselmesi pişme küçülmesi değerlerini arttırmaktadır.
- 950, 1050 ve 1150°C’de pişen numunelerde artan oranlarda Şist A ilavesi su emme ve gözenek değerlerini çok fazla değiştirmemektedir. Elde edilen sonuçlar standart numune ile oldukça benzerdir. Artan oranlarda Şist B ve Flotasyon atığı katkısı her üç sıcaklıkta da su emme ve gözenek oranlarını arttırmaktadır.
- Farklı sıcaklıklarda pişirilen numunelerde artan oranlarda Şist A ilavesi yığın yoğunluk değerlerini çok fazla değiştirmemektedir. Çıkan sonuçlar standart numune ile oldukça benzerdir. Artan oranlarda Şist B ve Flotasyon atığı katkısı her üç sıcaklıkta da yoğunluk değerlerini azaltmaktadır.
- Standart tuğla örneklerinin basma mukavemeti değerleri pişme sıcaklığının artmasıyla birlikte arttırmaktadır. 950°C’ de Şist A katkısı %20 oranına kadar mukavemeti arttırmaktadır. %30-50 arasında yapılan ilaveler ise mukavemette düşüşe yol açmıştır. 1050 ve 1150 °C’ler de ise Şist A katkılı örneklerin basma mukavemeti değerleri standart örneklerle göre düşüş göstermiştir. En yüksek mukavemet 1050°C’ de %20 katkı oranında, 1150°C’ de ise %30 katkı oranında elde edilmiştir. Ağırlıkça %100 oranında Şist A içeren numunelerde sıcaklığın artması mukavemeti arttırmaktadır. 950°C’ de mukavemet değeri standart tuğla örneğinden yüksek çıkmıştır.
- Şist B ve Flotasyon atığı katkılı tuğla örneklerinin basma mukavemeti değerleri incelendiğinde, sabit bir sıcaklıkta, artan atık miktarları ile basma dayanımının azaldığı, tersine, sabit atık miktarında, basma dayanımının artan pişme sıcaklığı ile arttığı görülmektedir. En yüksek kalıntı kömür miktarına sahip olan Flotasyon

atıklarının artan oranlarda kullanıldığı numunelerde basma mukavemeti standart numuneye göre oldukça düşüş göstermektedir.

- Farklı sıcaklıklarda pişirilen standart tuğla ve ağırlıkça %100 oranında Şist A, Şist B ve Flotasyon atığı içeren numunelere ait XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçlarına göre Standart tuğla numunesi kuvars, müllit, kristobalit, anortit ve hematit fazlarını içermektedir. Ağırlıkça %100 oranında Şist A, Şist B ve Flotasyon atığı içeren numuneler ise kuvars, müllit, kristobalit, anortit, hematit ve muskovit fazlarını içermektedir.
- Artan oranlarda Şist A ilavesi ile elde edilen numunelerin kızdırma kaybı, küçülme, su emme, görünür gözeneklilik, yoğunluk ve basma dayanımı ölçüm sonuçları standart numune ile mukayese edildiğinde benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bu durum Şist A'nın tek başına ve kil ile karışım halinde tuğla yapımında kullanılabileceğini göstermektedir.
- Şist B ve Flotasyon atıklarının artan oranlarda ilavesinin standart numuneye göre küçülme, su emme, görünür gözeneklilik değerlerini arttırdığı; yoğunluk ve basma dayanımı değerlerini ise düşürdüğü görülmektedir. Enerji verimliliğinin önem kazandığı günümüzde yapı malzemelerin düşük ısı iletim katsayısına sahip olması arzu edilmektedir. Gözenek miktarının fazla olması ısı iletkenlik katsayısını düşürerek yalıtım özelliğini arttırmaktadır. Atık içeren tuğlaların ısı iletkenlik katsayısı değerleri ölçümü için ayrıca bir çalışma yapılarak izolasyon özellikleri belirlenebilir.
- Çalışmanın teknik ve ekonomik uygulanabilirliğinin belirlenmesi açısından atık kullanımının endüstriyel ölçekte denenmesi önerilmektedir.
- Ülkemizin yüksek tonajlı atıkları olan kömür madenciliği atıklarının tuğla üretiminde kullanılması ile çevre kirliliğinin önüne geçilebilecek, atık malzemelerin alternatif hammadde olarak kullanılması doğal hammaddelerin daha az kullanımı ile kaynakların korunmasını sağlayacak ayrıca ülke ekonomisine katkıda bulunacaktır.

- Bunun yanı sıra Flotasyon atıklarının yüksek oranda kalıntı kömür içeriğinden dolayı gözenek miktarını arttırması nedeniyle diatomit, talaş, perlit ve kok kömürü tozu gibi gözenek yapıcı ilavelere alternatif bir malzeme olarak kullanımını içeren çalışmalar yürütülebilir.



KAYNAKLAR

- Arslan, V., (2006). Kuru Kömür Hazırlama Yöntemleri, *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 45(3), 9-18.
- Aykaç, U., (2014) Akışkan Yataklı Hava Bazlı Kömür Yıkama Sistemlerinde Akışkanlaştırma Karakteristiklerinin Kömür-inorganik Madde Ayrımına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 6 s.
- Baccour, H., Medhioub, M., Jamoussi, F. ve Mhiri, T. (2008). Densification behaviour of a red firing Tunisian Triassic clay, *Am. Jour. Appl. Sci.*, 5: 263-269.
- Carty, W.M., ve Senapati, U. (1998), “Porcelain-raw materials, processing, phase evolution, and mechanical behavior”, *J. Am. Ceram. Soc.*, 81, 3-20.
- Cultrone, G., Sebastian, E., (2009) “Fly ash addition in clayey materials to improve the quality of solid bricks”, *Construction and Building Materials*, 23: 1178-1184.
- Çeçen, F. (2014). Kömür Madenciliğinin Çevresel Etkileri, Geliyorum Diyen Facia, Boğaziçi Üniversitesi Soma Araştırma Grubu Raporu, 149-163.
- Çetiner, E.G., Ünver, B. ve Hindistan, B.A. (2006). “Maden atıkları ile ilgili mevzuat: Avrupa Birliği ve Türkiye”, *Madencilik*, 45, 23-34.
- Çit, İ. (2007). Polimerlerin Kömür Pirolizine Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Ankara, 120 s.
- Dengiz E (2009). Değirmisaz Kömür Üstü Atıklarının Tuğla Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya, 63 s.
- Diaz, J. J. C., Nieto, P. J. G., Biempica, C. B., Gero, M. B. P., (2007). “Analysis and optimization of the heat-insulating light concrete hallow brick walls design by the finite element method”, *Applied Thermal Engineering*, 27: 1445-1456.
- Dondi, M., Marsigli, M. and Fabbri, B., (1997). Recycling of industrial and urban wastes in brick production: A review, *Tile & Brick International*, 13: 218-309.
- Dönmez, S. (1993). Yapı Bilgisi 3. (Çeviri) Yüksek Öğretim Kurulu Yayını, Ankara, s. 149-173.
- Ekmekyapar. T. ve Örüng I (1993). İnşaat Malzeme Bilgisi. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ders Yayınları No: 145, Erzurum, 22-36.
- Ferreira, J.M.F., Torres, P.M.C., Silva, M.S. ve Labrincha, J.A. (2002). “Recycling of granite sludges in brick-type and floor tile-type ceramic formulations”, *Euroceram News*, 14: 1-4.

- Galos, K., & Szlugaj, J. (2014). Management of hard coal mining and processing wastes in Poland. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi-Mineral Resources Management*. 30:4, 51-64.
- Grimshaw, R.W., (1962). *The Chemistry Physics Of Clays*, Tech. Boks, 844 s.
- Güner, M. S., Süme, V. (2000). “Yapı Malzemesi ve Beton”, Aktif Yayınevi, ISBN: 975-6755-21-0.
- Görçiz, G., (2000). Ülkemizde Tuğla ve Kiremit Endüstrisi. TUKDER yayınları, Sayı: 9, Manisa, 26-32.
- Görhan, G., (2011). Çeltik Kavuzunun Tuğla Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 136 s.
- Hacıfazlıoğlu, H., (2011). Jameson Hücresinde Bitümlü Şlam Kömürün Flotasyonu İçin En Uygun Köpürtücü ve Toplayıcı Tipinin Araştırılması, *Mühendislik Dergisi*, 1, 33-43.
- Haibin, L., & Zhenling, L. (2010). Recycling utilization patterns of coal mining waste in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), 1331-1340.
- Huang, T., Lei, S. M., Ma, Q. L., & Wang, E. W. (2014). Progress of purification and applications of coal gangue. In *Advanced Materials Research* (Vol. 834, pp. 523-526). Trans Tech Publications Ltd.
- Hui, L. I. and Delong, X. U., (2009). The Future Resources for Eco-building Materials: II. Fly Ash and Coal Waste, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 24:667-672.
- Işık, İ., Şan, O., Gündüz, H., (1998). “Çini Masselerinin Bazı Fiziksel Özelliklerinin Hammadde Hazırlamada Uygulanan Değirmen Öğütme Hızının Etkisi”, II. Uluslararası Kütahya Çini Sempozyumu
- Işık, Ö. (2010). Konya Şerafeddin Camisi Yakınındaki Türbenin Tuğla Duvar Malzemesinin Arkeometrik Yönden Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Arkeometri Anabilim Dalı, Adana, 97 s.
- Karaman, S., (2006). “Yapı Tuğlalarında Renk Oluşumu”, *K.S.Ü. Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9 (1): 125-130.
- Kara, A., Özer, F., Kayacı, K. ve Özer, P., (2006). “Development of a multipurpose tile body: phase and microstructural development”, *Jour. Euro. Ceram. Soc.*, 26, 3769-3782.
- Köksay, M. (1994). Origin of coal, Orhan Kural (Ed.), İstanbul Technical University, Turkey, 39-45.
- Kural, O. (1991). *Linyit ve Kullanım Alanları*, Kurşit Matbaası, 975 s.

- Lemeshev, V. G., Gubin, I. K., Savel'ev, Yu. A., Tumanov, D. V. and Lemeshev, D. O. (2004), Utilization of Coal-Mining Waste in the Production of Building Ceramic Materials, *Glass and Ceramics*, 61, 9 – 10.
- Li, N., & Han, B. Q. (2006). Chinese research into utilisation of coal waste in ceramics, refractories and cements. *Advances in applied ceramics*, 105(1), 64-68.
- Li, L., Zhang, Yi., Zhang, Yo., Sun, J. ve Hao, Z. (2016). The thermal activation process of coal gangue selected from Zhungeer in China, *J Therm Anal Calorim* 126:1559–1566.
- Menezes, R.R., Santana, L.N.L., Neves, G.A. and Ferreira, H.C. (2012). Recycling of mine wastes as ceramic raw materials: An alternative to avoid environmental contamination, *Environmental Contamination*, Jatin Kumar Srivastava (Ed.), ISBN: 978-953-51-0120-8, InTech.
- Nour, W.M.N. ve Awad, H.M. (2008). “Effect of MgO on phase formation and mullite morphology of different Egyptian clays”, *J. Aust. Ceram. Soc.*, 44: 27-37.
- Orel, K., & Ümit, İ. M. R. E. (1967). Cevher Zenginleştirme Hakkında Ana Bilgiler. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 6(2), 125-133.
- Öney, Ö., Bilgin, E. (2016). İnce Taşkömürlerinin Optimal Flotasyon Parametrelerinin Verimlilik İndeksi ile Belirlenmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* 16(3): 759-769.
- Özçelik, N. (1975). İnşaat Bilgisi, İstanbul Üniversitesi, Orman Fakültesi, Yayın No: 211, İstanbul.
- Özmk, M. ve Aktaş, Z. (2006). Coal Froth Flotation: Effects of Reagent Adsorption on the Froth Structure, *Energ & Fuels*, 20, 1123-1130.
- Ramadan, A. M., Saleh, A. M., Taha, T. A., & Moharam, M. R. (2001). An attempt to improve mechanical properties of brick produced from El-Maghara coal washing plant waste. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 35, 153-160.
- Safiuddin, M., Jumaat, M. Z., Salam, M. A., Islam, M. S. and Hashim, R., (2010). Utilization of solid wastes in construction materials, *International Journal of the Physical Sciences*, 5(13): 1952-1963.
- Salem, A., Jazayeri, H.S., Rastelli, E. ve Timellini, G. (2009). “Dilatometric study of shrinkage during sintering process for porcelain stoneware body in presence of nepheline syenite”, *J. Mat. Process. Tech.*, 209: 1240-1246.
- Sarız, K. ve Nuhoglu, İ. (1992). Endüstriyel Hammadde Yatakları ve Madenciliği. *Anadolu Üniversitesi, Yayın No: 636*, Eskişehir.
- Segades, A.M. (2006). “Use of phase diagrams to guide ceramic production from wastes”, *Advances in Applied Ceramics*, 105: 46-54.

- Şensöz, S. (1994). “Bitümlü Şist ve Linyitlerden Birlikte Piroliz Yöntemiyle Sentetik Yakıt Eldesi” O.Ü.F.F. Kimya Müh. Böl. Doktora Tezi
- Sezgin N. (2020). *Maden Atık Çamurlarının Denizaltı Depolama Yöntemi ile Bertarafı Doğal Afetler ve Çevre Dergisi* 6(1): 209-217.
- Sousa, S.J.G. ve Holanda, J.N.F. (2005). “Sinlerini behaviour of porous wall tile bodies during fast single-firing process”, *Materials Research*, 8, 197-200.
- Stach, E., Mackowsky, M.T.H., Teichmuller, M., Taylor, G.H., Chandra, D. and Teichmuller, R. (1982). *Stach’s Textbook of Coal Petrology*, Gebrüder Borntraeger, Berlin, 535 p.
- Stolboushkin, A. Yu., Ivanova, A.I. and Fomina O.A. (2016). Use of Coal-Mining and Processing Wastes in Production of Bricks and Fuel for Their Burning, *Procedia Engineering* 150: 1496 – 1502.
- Şişman, C. B., Kocaman, İ., 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.
- Taylor, G.H., (1998). *Organic petrology*, Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- Traore, K., Kabre, T.S. ve Blanchart, P. (2003). “Gehlenite and anorthite crystallization from kaolinite and calcite mix”, *Ceramics International*, 29, 377-383.
- Tekir, U. (2010). *Kuru Yöntemle Kömür Zenginleştirmenin Türk Kömürlerine Uygulanması, Doktora Tezi, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Anabilim Dalı, İzmir, 144 s.*
- TS EN 771-1 *Kagir Birimler*, (2012). *Özellikler- Bölüm 1: Kil kâgir birimler (Tuğlalar)*. TSE, Ankara.
- Türköz, M. (2007). *Yüksek Plastisiteli Killerin Şişme Potansiyelinin Direkt Deneylerle Belirlenmesi ve Karşılaştırmalı Analiz. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 198 s.*
- URL-1 (2021), <http://www.etimaden.gov.tr/maden-terimleri-sozlugu/s-harfi-ile-baslayanlar-2>, Etimaden Maden Terimleri Sözlüğü.
- Uzun, D. (2002). *Linyit Özellikleri, Piroliz ve Yakma Koşullarının Kükürtlü Bileşiklerin Davranışına Etkisi. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 240 s.*
- Ünalın, G. (2003). *Türkiye Enerji Kaynaklarının Genel Değerlendirmesi, Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 27 (1).
- Ünalın, G., (2010). *Kömür Jeolojisi*, Ankara, 556 s.

- Ünal, İ., Aktaş, Z. ve Olcay, A., (2000). “Bitümlü Kömür ve Linyitlerin Yağ Aglomerasyonu”, Türkiye 12. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, Ed. T. Ünlü ve S. Kızılgut, Zonguldak, 251-260.
- Van Krevelen, D.W. (1961). Coal: Typology, Chemistry, Physics, Constitution. Elsevier, Amsterdam, 515 p.
- Villegas-Palacio, S. ve Dinger, D.R. (1996). “PSD effects on firing properties of porcelains I-II”, Am. Ceram. Soc. Bull., 75: 71-83.
- Yanık, J., Bozoğlu, C., (2008). Bitümlü Şist-Plastik Karışımlarının Pirolizi ve Piroliz Ürünlerinin Değerlendirilmesi, TÜBİTAK (107Y123), İzmir.
- Yağmurlu, F. (1983). Kömür Oluşumunun Fiziksel ve Kimyasal Koşulları. Yeryuvarı ve İnsan, 8(2): 13-17.
- Yeşilyurt, Z., (2014). Farklı Yapıdaki Non-İyonik Sürfaktanların Bitümlü Kömür Şlamı Üzerinde Flotasyon ve Gang Taşıma Davranışları ile Filtrasyon Performanslarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 109 s.
- Zhang, Y., Xu, L., Seetharaman, S., Liu, L., Wang, X., & Zhang, Z. (2015). Effects of chemistry and mineral on structural evolution and chemical reactivity of coal gangue during calcination: towards efficient utilization. Materials and Structures, 48(9), 2779-2793.
- Zhang, Y., & Ling, T. C. (2020). Reactivity activation of waste coal gangue and its impact on the properties of cement-based materials—a review. Construction and Building Materials, 234, 117424.
- Yoo J.W., Jung J.H. and Kim H.T. (2005). Synthesis and Characterization of Clay Brick Using Coal Wastes, Materials Science Forum ISSN: 1662-9752, 486-487: 403-406.
- Xu, H., Song, W., Cao, W., Shao, G., Lu, H., Yang, D., Chen, D. and Zhang, R. (2017). Utilization Of Coal Gangue For The Production Of Brick, Mater Cycles Waste Manag., 19:1270–1278.
- Wei, Q. and Gao, W. (2010). Synthesis of low-temperature, fast, single-firing body for porcelain stoneware tiles with coal gangue, Waste Management & Research, 28: 944–950.
- Williams, P.F. (1983). Oil Shales and their analysis, Fuel, 62, 756-770.