

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LİNYİT YAKAN TERMİK SANTRAL UÇUCU
KÜLLERİNDEN KİREÇ KATKISI İLE HAFİF
TUĞLA ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

Yasin ÇİNÇİN

Ağustos, 2015
İZMİR

LİNYİT YAKAN TERMİK SANTRAL UÇUCU KÜLLERİNDEN KİREÇ KATKISI İLE HAFİF TUĞLA ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Cevher Hazırlama Programı

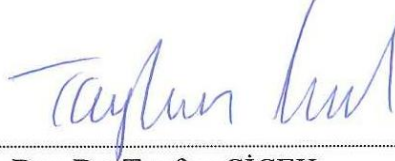
Yasin ÇİNÇİN

Ağustos, 2015

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

YASİN ÇİNÇİN, tarafından DOÇ.DR. TAYFUN ÇİÇEK yönetiminde hazırlanan “LİNYİT YAKAN TERMİK SANTRAL UÇUCU KÜLLERİNDEN KİREÇ KATKISI İLE HAFİF TUĞLA ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Doç.Dr. Tayfun ÇİÇEK

Yönetici

Prof.Dr. Mehmet ZARCIERİ

Jüri Üyesi

Doç.Dr. Serdar AYDIN

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez çalışmamı yaptığım süre boyunca, desteklerini esirgemeyen ve her zaman destek olan mesleki gelişimime bilgi ve tecrübesiyle katkı sağlayan ve daima olumlu yaklaşımlarıyla beni yönlendiren danışmanım Sayın Doç. Dr. Tayfun ÇİÇEK'e teşekkür ederim. Konu ile ilgili bilgilerini benimle paylaşan Sayın Prof. Dr. Mehmet TANRIVERDİ'ye teşekkür ederim. Deney aşamasında bana yardımcı olan, bilgi ve tecrübesini paylaşan Araştırma Görevlisi Dr. Öznur Önel'e teşekkür ederim. Erasmus eğitim programı döneminde araştırma ve çalışmalarına destek olan Dr. Volker Vogt ve Müh. Boris Breitenstein teşekkürlerimi sunarım. Tez yazım aşamasında bana destek olan Araş. Gör. Roda Gökçe Yılmaz'a teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen değerli anneme, babama, kardeşlerime ve dayım Mehmet İzmir'e teşekkür ederim.

Bu çalışma 111M694 proje numarası ile TÜBİTAK tarafından desteklenen projenin bir bölümünü içermektedir.

Yasin ÇİNÇİN

LİNYİT YAKAN TERMİK SANTRAL UÇUCU KÜLLERİNDEN KİREÇ KATKISI İLE HAFİF TUĞLA ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZ

Dünyada yaklaşık olarak yılda 600 milyon ton uçucu kül atığı açığa çıktığı bilinmektedir. Ülkemizde ortaya çıkan uçucu kül miktarı ise yılda ortalama 13 milyon ton kadardır. Bu miktardaki uçucu küllerin çok az kısmı üretime dahil edilmektedir.

Bu çalışmada kömür yakan termik santraller için büyük sorun teşkil eden uçucu küllerden hafif ve ısı yalıtımı yüksek özellikte tuğla üretimi araştırılmıştır. Türkiye’de faaliyet göstermekte olan Seyitömer, Soma ve Yatağan Termik Santraller’in uçucu külleri ve sönmüş kireç kullanılmıştır. Kür kabiniinde kürleme yöntemi ve yüksek basınçlı otoklavda kürleme yöntemi kullanılarak çeşitli deney şartlarında tuğla üretimi denenmiştir. Öncelikle küçük boyutta tuğla örnekleri üretilmiş ve optimum şartlar belirlenmiştir. Tespit edilen bu şartlarda gerçek boyutta tuğla örnekleri üretilmiş ve bu örnekler standart testlere tabi tutulmuştur. Buna ek olarak kurulabilecek endüstriyel boyutta tuğla üretiminin ekonomik değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışma sonucunda üretilmiş olan tuğlaların, gazbetona alternatif ürün olabileceği düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Uçucu kül, kireç, tuğla, otoklav

INVESTIGATION INTO PRODUCTION OF LIGHT WEIGHT BRICKS FROM LIME AND FLY ASH OF LIGNITE FIRED THERMAL POWER PLANTS

ABSTRACT

It is known that nearly 600 million tons of fly ash is produced as waste in the world per-annum. In Turkey, however, the annual production of fly ash is, on average, 13 million tons. Yet only a very small amount of this quantity is utilized.

In this study, the production of lightweight high thermal insulating bricks made of fly ash that constitutes a great problem for coal-fired thermal power plants, is examined. Using fly ash from Seyitömer, Soma and Yatağan Thermal Power Plants, brick production through method of curing in the curing cabin and in high pressure autoclave, is tested in various experimental circumstances. Firstly, small bricks were produced and the optimum conditions were determined. In the optimum conditions that were determined, real-size bricks were produced and these samples were subjected to standard tests. Additionally, an economic evaluation of industrial size bricks was made. As a result of this study, it is found that fly ash bricks could be an alternative product to cellular concrete.

Keywords: Fly ash, lime, brick, autoclave

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
1.1 Genel Bilgiler	1
1.2 Önceki Çalışmalar	4
BÖLÜM İKİ - UÇUCU KÜL	9
2.1 Uçucu Küllerin Sınıflandırması.....	11
2.2 Uçucu Kül Özellikleri	12
2.2.1 Fiziksel Özellikleri.....	12
2.2.2 Kimyasal Özellikleri	13
2.2.3 Minerolojik Özellikleri	14
BÖLÜM ÜÇ - MALZEME VE METHOD.....	15
3.1 Malzeme	15
3.2 Uçucu Küllerin Karakterizasyonu	15
3.2.1 Elek Analizleri ve Fraksiyonel Kimyasal Analizler	15
3.2.2 Uçucu Küllerin Yoğunluk Ölçümü	20
3.2.3 Uçucu Küllerin Minerolojik Bileşimlerinin Tespiti, XRD Analizleri	21
3.2.4 Uçucu Küllerin Morfolojik Özellikleri, Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Çalışmaları	23

3.3 Yardımcı Malzemelerin Özellikleri.....	32
3.3.1 Toz Kireç	32
3.3.2 Alçı.....	32
3.4 Laboratuvar Ölçekte Oryantasyon Niteliğinde Tuğla Üretim Denemeleri	33
3.4.1 Kür Kabininde Uçucu Kül-Kireç Tuğlası Örnekleri Üretim Denemeleri..	33
3.5 Otoklavda Uçucu Küllü Tuğla Eldesine Yönelik Testler.....	36
3.5.1 Otoklavda Uçucu Külden Tuğla Üretimi Denemeleri	37
3.6 Büyük Boyutta Tuğla Üretimi	46
3.6.1 Tek Eksenli Basınç Dayanım Testleri.....	50
3.6.2 Eğilme Dayanımı Testleri	50
3.6.3 Donma Çözülme Testleri	51
3.6.4 Birim Hacim Ağırlık ve Kütlece Su Emme Oranları Tespiti.....	54
3.6.5 Tuğlaların Isıl İletkenlik Katsayılarının Tespiti.....	54
3.6.6 Büyük Boyut Tuğlaların XRD Analizleri	55
3.7 Zig zag Havalı Separatörle Uçucu Küldeki Karbonun Kazanımı Üzerine Yapılan Çalışma	59
BÖLÜM DÖRT - MALİYET ANALİZİ.....	64
BÖLÜM BEŞ - SONUÇLAR	68
KAYNAKLAR	72

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu gücü.....	1
Şekil 1.2 Ülkemiz’deki elektrik enerjisi kurulu gücünün değişimi.....	2
Şekil 2.1 Kömürle çalışan bir termik santralin diyagramı	10
Şekil 3.1 Soma Termik Santrali uçucu külü tane boyu dağılım eğrisi.....	17
Şekil 3.2 Seyitömer Termik Santrali uçucu külü tane boyu dağılım eğrisi	18
Şekil 3.3 Yatağan Termik Santrali uçucu külü tane boyu dağılım eğrisi.....	19
Şekil 3.4 Soma Termik Santrali uçucu külü X-Işınları difraktogramı	21
Şekil 3.5 Seyitömer Termik Santrali uçucu külü X-Işınları difraktogramı.....	22
Şekil 3.6 Yatağan Termik Santrali uçucu külü X-Işınları difraktogramı.....	23
Şekil 3.7 Soma Termik Santrali uçucu külü SEM görüntüsü	24
Şekil 3.8 Soma Termik Santrali uçucu külünde mikro analizi yapılan 1, 2 ve 3 parçacıklar	24
Şekil 3.9 Seyitömer Termik Santrali uçucu külü SEM görüntüsü	27
Şekil 3.10 Yatağan Termik Santrali uçucu külü SEM görüntüsü	29
Şekil 3.11 Kurlama öncesi tuğla örnekleri.....	33
Şekil 3.12 ELE marka buharlı otoklav ve tuğla haznesi	36
Şekil 3.13 Seyitömer uçucu külü ile elde edilen tuğlalarda presleme basıncının dayanım ve birim hacim ağırlığına etkisi	41
Şekil 3.14 Soma uçucu külü ile hazırlanan tuğlalarda otoklav sonrası görünümü	42
Şekil 3.15 Seyitömer uçucu külü ile hazırlanan tuğlalarda otoklav basıncının dayanım ve birim hacim ağırlığına etkisi	43
Şekil 3.16 Seyitömer uçucu küllü tuğlaların otoklavda 12 bar basınç kalma süresinin birim hacim ağırlığı ve dayanıma etkileri	45
Şekil 3.17 Otoklavın imalat ve yerleşim aşamaları.....	47
Şekil 3.18 Kül harcının karılması ve kalıba konulan kül harcının preslenmesi.....	48
Şekil 3.19 Büyük boy tuğlalar için harç hazırlama ve tuğla şekillendirme	48
Şekil 3.20 Tuğlaların otoklava yüklenmesi.....	49
Şekil 3.21 Otoklav ve kür kabini içinde elde edilmiş tuğla örnekleri.....	49
Şekil 3.22 Tek eksenli basınç ve eğilme dayanım testleri	51

Şekil 3.23 Tuğla numunelerinin dondurucu içindeki görüntüsü.....	52
Şekil 3.24 25. donma-çözülme döngüsü sonrasında Seyitömer ve Yatağan otoklav tuğla örneklerinin görüntüsü	52
Şekil 3.25 25. donma-çözülme testi Seyitömer ve Soma kür kabini tuğla örneklerinin görüntüsü.....	53
Şekil 3.26 ShowaDenko K.K. Shoterm QTM-D2 Isıl iletkenlik ölçüm cihazı.....	54
Şekil 3.27 Soma uçucu küllü otoklavda üretilmiş büyük boyut tuğlanın X-Işını difraktogramı	56
Şekil 3.28 Seyitömer uçucu küllü otoklavda üretilmiş gerçek boyut tuğlanın X-Işını difraktogramı.....	57
Şekil 3.29 Yatağan uçucu küllü otoklavda üretilmiş gerçek boyut tuğlanın X-Işını difraktogramı.....	57
Şekil 3.30 Seyitömer uçucu küllü tuğladatobermorit oluşumunun SEM görüntüsü..	58
Şekil 3.31 Soma uçucu küllü tuğladatobermorit oluşumunun SEM görüntüsü	58
Şekil 3.32 Laboratuvar tipi Zig zag havalı separatör	59
Şekil 3.33 Seyitömer ve Yatağan Termik Santrali'ne ait mikroskop görüntüleri.....	60
Şekil 3.34 Almanya'da incelenen üç farklı termik santral uçucu kül numunesinin mikroskop görüntüleri	60
Şekil 4.1 Uçucu kül/kireç tuğlası üretim tesis akım şeması.....	64

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1 Önemli linyit üreticisi ülkeler ve üretim miktarları (Milyon ton)	3
Tablo 2.1 UK'lerin fiziksel özellikleri	12
Tablo 2.2 Türkiye'deki bazı UK'lerin mineralojik kompozisyonları	14
Tablo 3.1 Soma Termik Santrali uçucu külü fraksiyonel kimyasal analizi	17
Tablo 3.2 Seyitömer Termik Santrali uçucu külü fraksiyonel kimyasal analizi	18
Tablo 3.3 Yatağan Termik Santrali uçucu külü fraksiyonel kimyasal analizi	20
Tablo 3.4 Uçucu küllerin ASTM C 618 standartına göre sınıflandırılması	20
Tablo 3.5 Uçucu küllerin yoğunluk ölçümü	21
Tablo 3.6 Soma UK 1 nolu parçacık noktasal analiz	25
Tablo 3.7 Soma UK 2 nolu parçacık noktasal analiz	25
Tablo 3.8 Soma UK 3 nolu parçacık noktasal analiz	26
Tablo 3.9 Seyitömer UK 1 nolu parçacık noktasal analiz	27
Tablo 3.10 Seyitömer UK 2 nolu parçacık noktasal analiz	28
Tablo 3.11 Seyitömer UK 3 nolu parçacık noktasal analiz	28
Tablo 3.12 Yatağan UK 1 nolu parçacık noktasal analiz	30
Tablo 3.13 Yatağan UK 2 nolu parçacık noktasal analiz	31
Tablo 3.14 Yatağan UK 3 nolu parçacık noktasal analiz	31
Tablo 3.15 Yapı alçısının kimyasal analizi	32
Tablo 3.16 Kür kabini testleri şartları, (UK: uçucu kül, K: kireç, A: Alçı)	34
Tablo 3.17 28 gün buhar kürü sertlik değerleri	34
Tablo 3.18 28 gün %95 nem kütleme tuğla örnekleri birim hacim ağırlıkları ve genleşme	35
Tablo 3.19 Soma uçucu külü +kireç katkılı tuğlalar	38
Tablo 3.20 Seyitömer uçucu külü +kireç katkılı tuğlalar	39
Tablo 3.21 % 88 Soma uçucu külü + %12 kireç katkılı tuğlalarda optimum presleme basıncının tespiti	40
Tablo 3.22 % 88 Seyitömer uçucu külü + % 12 kireç katkılı tuğlalarda optimum presleme basıncının tespiti	40
Tablo 3.23 Soma uçucu küllü tuğlalarda optimum otoklav basıncının tespiti	42

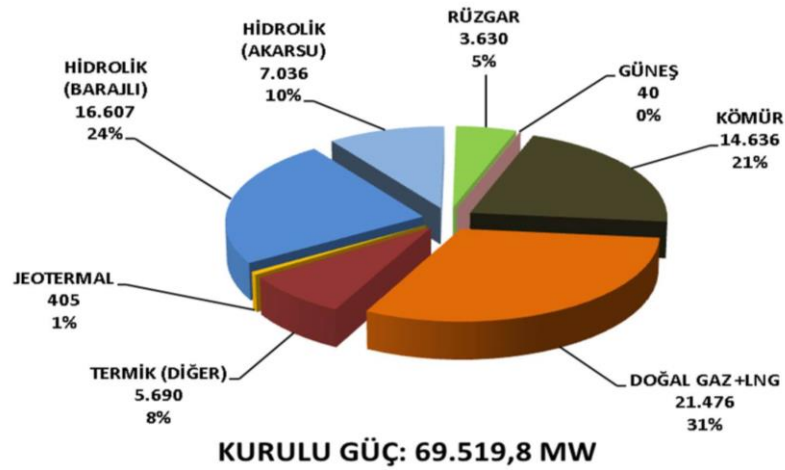
Tablo 3.24 Seyitömer uçucu küllü tuğlalarda optimum otoklav basıncının tespiti....	43
Tablo 3.25 Soma uçucu küllü tuğlalarda optimum kütleme süresinin tespiti.....	44
Tablo 3.26 Seyitömer uçucu küllü tuğlalarda optimum kütleme süresinin tespiti	45
Tablo 3.27 Otoklavda elde edilmiş tuğla örneklerinin su emme test değerleri.....	46
Tablo 3.28 Büyük boyutta tuğla üretim parametreleri	47
Tablo 3.29 Tek eksenli basınç dayanım testleri sonuçları	50
Tablo 3.30 Eğilme dayanım test sonuçları.....	50
Tablo 3.31 Tuğla örneklerinin donma-çözülme testleri sonrası kütle kayıpları	53
Tablo 3.32 Donma-çözülme testleri sonrası mekanik dayanım test sonuçları.....	53
Tablo 3.33 Tuğlaların birim hacim ağırlık ve kütleli su emme oranları.....	54
Tablo 3.34 Büyük boyut tuğlaların ısı iletkenlik katsayıları.....	55
Tablo 3.35 Termik santral 1'e ait olan külün kimyasal özellikleri	61
Tablo 3.36 Termik santral 2'e ait olan külün kimyasal özellikleri	61
Tablo 3.37 Termik santral 3'e ait olan külün kimyasal özellikleri	61
Tablo 3.38 Termik santral 1'in farklı emme kuvvetinde yapılan test sonuçları	62
Tablo 3.39 Termik santral 3'in farklı emme kuvvetinde yapılan test sonuçları	62
Tablo 4.1 Seyitömer uçucu kül/kireç otoklav tuğla tesis yatırım maliyeti hesabı	66
Tablo 4.2 Seyitömer uçucu kül/kireç otoklav tuğla üretim ve ürün üretim maliyeti hesabı.....	67
Tablo 5.1 Otoklavda elde edilen gerçek boyut (200 x 200 x 90-110 mm) tuğlaların optimum üretim şartları ve tespit edilen özellikleri	70

BÖLÜM BİR

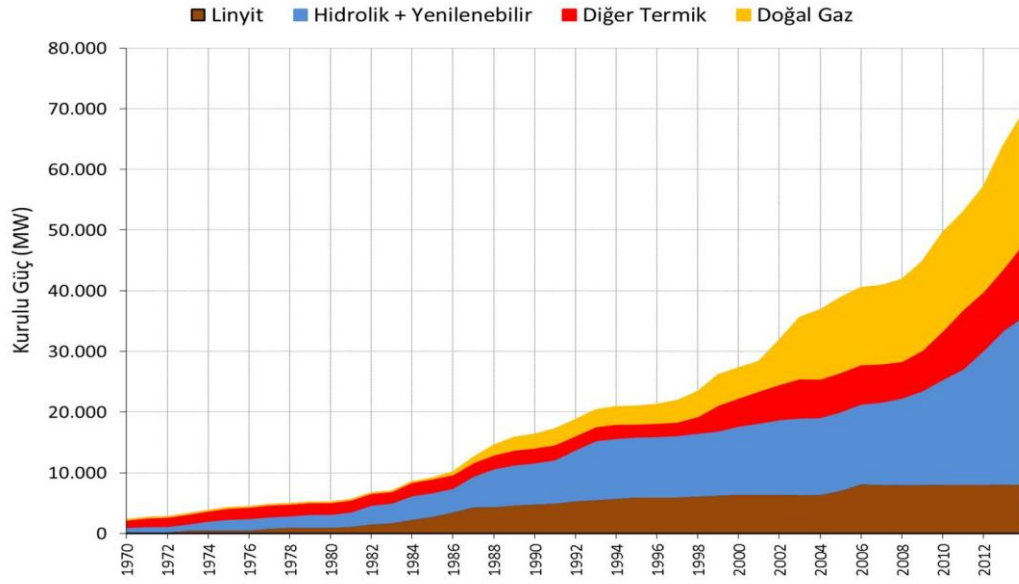
GİRİŞ

1.1 Genel Bilgiler

Enerji, sanayileşmenin alt yapısı olduğu kadar günlük hayatımızın vazgeçilmez bir unsurudur. Her alanda yer edindiği ve gün geçtikçe öneminin daha da arttığı yadsınamaz bir gerçektir. İnsanların ve yaşamın bu alanda gelişen ihtiyacına cevap vermek ülkelerin en önemli vazifesi haline gelmiştir. Gelişmiş olan ülkelerin ürettikleri enerji miktarları, üretim çeşitlilikleri irdelendiğinde enerjinin önemi daha iyi anlaşılmaktadır. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler için bu durum daha da zor bir hal almaktadır. Hızla büyüyen enerji ihtiyacı fakat aynı doğrultuda büyümeyen enerji üretimi ve üretilen enerjinin güvenli, ihtiyacı karşılar, ucuz ve çevreye duyarlı olması gerekmektedir. Haliyle bu durum dış ülkelere olan bağımlılığın artmasına sebep olmaktadır. Ülkemizde dışa bağımlılığını azaltacak veya dengede tutacak en büyük dayanağı kömür ve hidrolik yöntemle enerji üretmektir. Daha sonrasında gelişime açık olan diğer enerji üretim yöntemleridir. Son güncellemeler dikkate alındığında kömür tüketiminin % 21 gibi önemli bir paya sahip olduğu görülecektir (Şekil 1.1)(Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi [TEİAŞ], 2015). Şekil 1.2’den de uzun süre bu önemini koruyacağı açıkça görülmektedir.



Şekil 1.1 Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu gücü (TEİAŞ, 2015)



Şekil 1.2 Ülkemizdeki elektrik enerjisi kurulu gücünün değişimi (TEİAŞ, 2015)

2015 tarihli Taşkömürü Sektör Raporunda ülkemizin başta petrol olmak üzere fosil enerji kaynaklarında dışa bağımlılığının sürekli artmakta olduğu ve toplam ülke ithalatı içerisinde en önemli payın bu kaynaklara ayrıldığı belirtilmektedir. İzlenen enerji politikaları neticesinde ülkemizin enerji tüketiminde dışa bağımlılık oranının % 70’ler seviyesine kadar yükseldiği belirtilmektedir. Raporda Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesinin raporundan alıntı yaparak “Ülkemizin en büyük sorunlarından birisi, enerjide dışa bağımlılığımızın sürekli artmasıdır. 2007 yılında enerji talebinin karşılanmasında % 90 oranında fosil yakıtlar kullanılmıştır. Fosil kaynaklarda doğal gazda % 98, petrolde % 94 kömürde % 49 oranında dışa bağımlı durumdayız. Yerli kaynaklarımızdan en fazla kömür kaynağına sahip olduğumuz ve kaynaklarımızın daha düşük kalori ve yüksek nem ve kül içeriğine sahip linyitlerden oluştuğu dikkate alındığında kendi kaynaklarımızın özelliklerine uygun verimli, çevre dostu ekonomik temiz kömür teknolojilerinin geliştirilmesi, bu alanda yetişmiş insan gücü ve finans kaynaklarının artırılmasının önemini ortaya çıkarmaktadır.” tespit- önerilerine yer vermiştir (Taşkömürü Sektör Raporu [TSR], 2015).

Ülkelerin elektrik üretiminde ve ısınma amaçlı kullanılan linyitte sıralamasına bakıldığında Almanya 182,6 milyon tonluk üretimiyle 1. sırayı almıştır. Ülkemiz de önemli linyit üreticisi ülkelerden biri olup, 2013 yılında 63,0 milyon ton üretim

gerçekleştirmiştir. Tablo 1.1’de Dünya linyit kömürü üretimi ve önemli linyit kömürü üreticisi ülkelerin üretim miktarları verilmiştir (TSR, 2015). Enerji üretiminde önemli bir role sahip olan termik santraller, işlem sonrası ortaya çıkardıkları önemli miktarda uçucu kül ile önemli bir sorun teşkil etmektedir. İşlem sonrası ortaya çıkan kül miktarları ise dünyada yılda 600 milyon ton, ülkemizde ise kurulu ve kömürle çalışan 11 termik santralden yıllık ortalama 13 milyon ton kadar uçucu kül artık açığa çıkmaktadır. Ancak bu miktar doğalgaz santrallerinin devreye girmesi ile yıldan yıla değişim göstermektedir (Türker ve ark., 2009).

Tablo 1.1 Önemli linyit kömürü üreticisi ülkeler ve üretim miktarları (Milyon ton), (TSR, 2015)

	1990	2000	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Avustralya	45,9	67,2	72,4	64,0	72,1	71,0	71,3	62,5
Çek Cum.	78,9	50,3	47,5	45,4	43,8	46,6	43,5	40,3
Almanya	357,4	167,6	175,3	169,8	169,4	176,5	185,4	182,6
Yunanistan	51,8	63,8	65,7	64,7	56,5	58,7	62,9	53,5
Polonya	67,5	59,4	59,6	57,1	56,5	62,8	64,2	65,8
Türkiye	79,9	77,6	68,6	65,7	69,7	72,6	68,1	63,0
ABD	79,9	77,6	68,6	65,7	71,0	73,6	71,6	69,8
Rusya	134,3	87,7	82,5	68,1	76,1	76,4	77,3	73,1
Diğer	285,2	255,1	324,3	312,5	245,9	272,8	244,5	229,4
Dünya	1.181,3	906,8	964,7	913,2	861,0	911,0	888,8	840,0

Ülkemizde uçucu külün başta yapı malzemesi ve beton üretiminde katkı malzemesi olarak kullanım miktarları, Almanya, Hollanda, Belçika, İngiltere, ABD ve Çin gibi ülkelerin kullanım miktarı ile karşılaştırıldığında bu değerlerin oldukça düşük oranında kaldığı görülmektedir (Tütünlü ve Atalay, 2001; Aruntaş, 2006; Lingbawan, 2009). Dünyada kömür yanması sonrası ortaya çıkan uçucu külün toplamda % 25’ten daha azı farklı alanlarda değerlendirilmektedir. Almanya, Hollanda ve Belçika’da ise üretilen toplam uçucu külün yıllık %95’inden fazlası, İngiltere’de ise yıllık üretimin yaklaşık olarak %50’si değerlendirilmektedir. Büyük miktarlarda uçucu kül üretilen ABD ve Çin’de ise üretilen külün yaklaşık olarak % 32 ve % 40’ının kullanıldığı görülmektedir (Iyer ve Scott, 2001; Vom, 1998;

McCarthy ve Dhir, 1999; Taneja, 1998; Bhattacharjee, 2002). Bu nedenle uçucu külün, yapı elemanları üretmek için ana hammadde olarak yaygın kullanılması, çevreyi önemli ölçüde kirleten bir malzemeyi değerlendirmek açısından çevresel kaygılara iyi bir çözüm olacaktır. Örneğin, uçucu külün yapı tuğlası üretiminde kullanılması hammadde olarak değerlendirilmesi için geniş fırsatlar yaratmanın yanında, aynı zamanda kömüre dayalı enerji santrallerinin yarattığı çevre kirliliği kontrolüne önemli katkı sağlayacaktır.

1.2 Önceki Çalışmalar

Uçucu kül miktarının her geçen gün katlanarak artması ve bunun sonucunda yaşanan depolama alanı problemleri, doğaya veya bitki örtüsüne verebileceği zarardan doğan endişeler gibi sorunlar meydana gelmiştir. Bu alanda ortaya çıkan ihtiyaç üzerine, akademik alanda uçucu küllerin ekonomik değer kazanması ve aynı zamanda çevreye verdiği etkileri önlemek için ulusal ve uluslararası birçok çalışma yapılmıştır. Bunun yanı sıra yapılan çalışmaların asıl amacı uçucu külü ana ve/veya yan ürün olarak yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlamaktır. Yapılan çalışmalar öncelikli olarak uçucu küllerin özellikleri, sınıflandırılması ve kullanım alanlarının tespit edilmesi üzerinedir. Bu alanda yapılmış olan çalışmaların bazıları aşağıda yer almaktadır.

Tokay ve Çetin (1991), Soma – B ve Tunçbilek Termik santrallerinden alınan küller ile çalışmışlardır. Uçucu küllerin pozolanik özelliğinden yola çıkarak uçucu kül kireç karışımından üretilen preslenmiş duvar blok elemanlarının basınç dayanımı ve su emme özellikleri araştırmışlardır. Küllerin değişik oranlarda kireç ve toplam katı oranın % 10'u kadar su ile karıştırması ve preslenmesi sonucunda klasik tuğla boyutlarında ürünler üretilmiştir. Tuğlalara ilk 6 saat buhar kürü ve deney gününe kadar da rutubetli kür uygulanmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre iki uçucu külün duvar blok üretiminde kullanılabileceğini tespit etmişlerdir.

Bayat (1998), Türkiye'nin doğu-orta ve batı kısımlarındaki linyit ve bitümlü kömür alanlarından aldığı 7 farklı uçucu kül örneğinin mineralojik, morfolojik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini karşılaştırmıştır. X-ray Difraktometresi ile yapılan çalışmalar sonucunda uçucu küllerin; anhidrit, kireç, kuvars, hematit+ferrit spinel içerdiğini tespit etmiştir. Ayrıca uçucu küllerin yoğunluk dağılımları, su içindeki pH özellikleri ve çözünürlükleri incelenmiştir. Uçucu küllerin çimento içinde bağlayıcı olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca Karadeniz kıyılarındaki toprakların pH'ını yükseltmek amacıyla ve atık suların arıtılmasında kullanılabileceğini ileri sürmüştür.

Çiçek ve Tanrıverdi (2004), Termik santraller için büyük bir sorun teşkil eden uçucu küllerin hafif ve ısı yalıtımı yüksek tuğla olarak değerlendirilebilirliğini araştırmışlardır. Seyitömer uçucu külü ile tespit edilen oranlarda kum ve sönmüş kireç karışımlarının yüksek basınçta buhar ile kürlenmesi yöntemi kullanılarak nitelikli tuğla üretilebilirliğin tespit araştırılması yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda ümit verici sonuçlar elde edildiği iddia edilmiştir.

Ünal ve Uygunoğlu (2004), Soma Termik Santrali'ne ait uçucu kül, agrega ve PKÇ 32.5 çimentosu kullanılarak üretilen betonların özelliklerinde uçucu kül katkısının etkisini araştırmışlardır. Elde ettikleri test sonuçlarına göre; uçucu külün % 10-20 oranında yan ürün olarak çimentonun yanında kullanılması durumunda, beton özelliklerinde olumsuz bir etki gözlenmemiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında uçucu külün beton veya çimento üretiminde değerlendirilmesinin önemli oranda katma değer sağlayacağı iddiasında bulunmuşlardır.

Bentli ve ark. (2005), Seyitömer termik santral uçucu küllerinin kimyasal ve mineralojik özelliklerini tespit etmişler ve inşaat tuğlası yapımında katkı maddesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Seyitömer termik santraline ait uçucu baca külü ile endüstriyel çaptaki tuğla fabrikasında dört farklı reçetede % 2.5, % 5, % 10 ve % 15 baca küllü tuğlalar hazırlamışlar ve uçucu kül katkılı tuğla reçeteleri ile fabrikada üretilen referans tuğlanın fiziksel ve mekanik testlerini laboratuvarında karşılaştırmışlardır. Bu testler sonucunda referans tuğlaya göre uçucu kül ilavesi;

birim hacim ağırlığı çok az miktarda artış gözlemlenirken, kuruma, pişme ve toplam küçülmede belirgin bir farklılık tespit edilmemiştir. Uçucu kül ilavesi, üretilen tüm reçete tuğlalarda su emme miktarını referans tuğlaya göre azaltmış, buna karşılık tuğlaların hiçbirinde referans tuğlada elde edilen dayanım değerine ulaşamamıştır.

Yıldız (2006), Tez çalışmasında, puzolanik katkı malzemesi olarak diatomit, yüksek fırın cürufu ve uçucu külün beton özelliklerine etkisinin araştırılması yapılmıştır. Bu amaçla; puzolanlar, çimento yerine ağırlıkça % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranlarında ilave edilerek beton karışımları üretilmiştir. Üretilen betonlar ile 10x10x10 cm boyutlarında küp numuneler hazırlanmış ve bu numuneler, laboratuvarında 28, 90 ve 180 gün kür edildikten sonra basınç ve aşınma dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre üretilen betonlar arasında en yüksek basınç ve aşınma dayanımları % 10 Çankırı diatomit ikameli betonda elde edilmiştir.

Yüksel ve ark. (2006), Kazan altı külünün (KAK) briket üretiminde, ince agrega olarak değerlendirilme olanağı araştırılması yapılmıştır. Kazan altı külünün kum ile yer değiştirmesinin deneysel olarak incelenmesi yapmışlardır. KAK kum ile çeşitli oranlarda hacimce yer değiştirilerek TS406'ya uygun olarak bir sıra boşluklu beton briket numuneleri üretmişlerdir. Üretilen numunelerle birim hacim ağırlığı, basınç dayanımı ve dona dayanıklılık deneyleri yapmışlardır. Buna ek olarak, KAK yer değiştirmeli briketlerin maliyet analizleri, hafifliği ve bunlara ilişkin örnek uygulama sonuçlarını incelemişlerdir. KAK yer değiştirmeli briketlerin basınç dayanımı ve donma-çözülme dayanıklılığı düşmekle birlikte ilgili standardın öngördüğü en düşük koşulları sağlayan briket üretilebilmektedir. Maliyetinin düşüklüğü, çevreci bir yanı olması, yapı ağırlığını düşürmesi gibi önemli sayılan olumlu sonuçlara da ulaşmışlardır.

Ağar (2007), Seyitömer Termik Santrali uçucu külleri ile Kütahya Emet Bor İşletmesine ait bor atıklarından kaba kil atık ve atık barajı atıklarının fiziksel ve kimyasal özellikleri incelemiştir. Uçucu kül ve bor atıklarını belirli oranlarda karıştırarak tuğla yapımında kullanılabilirliğini araştırmıştır. Testler sonucunda bor atıklarının direk kullanımının tuğla dayanımını olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Buna çözüm olarak bor atıkları 700 °C’de kalsine edilmiştir. Kalsine sonrası bor atıklarından hazırlanan tuğlalardan olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Kaba kil katkılı uçucu küllü tuğlaların basınç dayanımlarının, atık barajı katkılı tuğlalara göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Geliştirilen tuğla tipinin ekonomiye katma değer getirecek bir ürün olarak inşaat sektöründe kullanılabileceği savunulmuştur.

Demir ve ark., (2008), Seyitömer Termik santraline ait uçucu külün ve tuğla kilinin karakterizasyon çalışması yapılarak yapı tuğlası üretiminde kullanılabilirliğine ilişkin deneysel çalışmalar yapılmıştır. Uçucu külün mineralojik, fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. ASTM C-618’e göre F tipi UK sınıfına girdiği belirlenmiştir. Yapılan ön deneylerden uçucu küle belli oranlarda tuğla kili ilave edilerek yapı tuğlası üretiminde kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Görhan ve ark., (2008), yapmış oldukları çalışmada uçucu külün sınıflandırılması ve kullanım alanları araştırılmıştır. Buna göre uçucu kül yaygın olarak inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Çimento ve beton üretimi, gazbeton ve tuğla üretimi, zemin ve yol stabilizasyonu uygulamaları, hafif agrega üretimi vb. alanlarda yaygın kullanıma sahip olduğu tespit edilmiştir.

Ulusoy (2008), yapmış olduğu tez çalışmasında, atık uçucu-tekstil külü ve bazaltik pomzanın, yüksek kalitede pişmiş kil tuğlaların üretiminde katkı olarak kullanılabilirliğinin araştırılmasını amaçlamıştır. Katkılı/katkısız kil tuğlalar eşit miktarlarda, ayrı ve beraber olmak üzere, % 5, 10 ve 20 oranlarında kül ve bazaltik pomza katılarak üretmiştir. Her numune 8 saatlik süreçlerde 700, 900 ve 1050 °C sıcaklıklarda pişirilmiştir. Kütle yoğunluğu, zararlı kireç-manyezi, rötire, su emme, basınç ve eğilme mukavemeti, donma-çözülme testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları standart değerler ile karşılaştırılmış ve sonuçlar tatmin edici bulunmuştur.

Sonuç olarak tekstil külü ve bazaltik pomzanın ikisi ve belirlenen oranda uçucu külün uygun katkıları olduğu ve pişmiş tuğla üretiminde faydalı bir şekilde kullanılabileceği neticesine ulaşmıştır.

Zeybek (2009), çalışmasında geopolimerizasyon yöntemini araştırarak, C ve F sınıfı uçucu külün yüksek dayanımlı yapı tuğlası üretiminde değerlendirilmesi yapılmıştır. F sınıfı uçucu külden üretilen Si / Al molar oranının 2 olduğu geopolimer tuğlalar 60 °C sıcaklıkta etüvde 24 saat uygulanan ısı işlem sonrasında optimum basınç dayanımı değerini 45 MPa düzeyinde sonuç elde edilmiştir. Suda çözme kurutma ve öğütme işlemleri sonrasında C sınıfı uçucu küllerle üretilen geopolimer tuğlaların geleneksel tuğla malzeme standartlarına ulaştığı sonucuna varılmıştır.

Aytekin (2009), Afşin-Elbistan Termik Santralinden alınan uçucu küllerinin killi zeminlerin ıslahında kullanımını araştırmıştır. Bu amaçla illit ağırlıklı Almanpınarı kiline uçucu kül eklenerek hazırlanan yapay zeminler kürde bekletildikten (1-8-16-32 gün) sonra zemin sınıflama, konsolidasyon ve üç eksenli basınç deneylerine tabi tutularak fiziko-mekanik özellikleri araştırılmıştır. Uçucu kül eklenerek hazırlanan yapay zemin örneklerinde kesme mukavemetinin ve konsolidasyon hızının arttığı; permeabilitenin ise azaldığı saptanmıştır. Ayrıca sonuçlar artan bekleme süresinin malzemenin mukavemetini daha da artırdığını göstermiştir. Tez çalışması neticesinde, Afşin – Elbistan Termik Santralı uçucu külünün zemin stabilizasyon çalışmalarında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

BÖLÜM İKİ

UÇUCU KÜL

Uçucu kül, gelişen yakma sistemleri ile termik santrallerde pulverize halindeki kömürün yanması sonucu meydana gelen ve baca gazları ile taşınan ince boyuttaki kül tanecikleridir. Bu ince boyuttaki kül tanecikleri siklon veya elektro filtrelerle toplanır temiz havaya karışması önlenir. Önemli bir yan ürün olan uçucu küller, kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu meydana gelen ergimiş malzemenin soğuyarak, gaz akışı ile kısmen veya tamamen küresel şekilli kül taneciklerine dönüşmesidir. Bu kül tanecikleri çok ince (0,5 - 150 μm) olup, baca gazları ile sürüklenmeleri nedeniyle, uçucu kül olarak adlandırılmaktadır (Türker ve ark., 2009). Uçucu kül parçacıkları, büyük miktarda bu yaklaşık olarak % 50 – 70 oranında amorf, alimüna silikat içerikli küresel tanecikler (microspheres) içerir. Daha az miktarda ise kuvars, manyetit gibi mineraller ve yanmamış karbon parçacıkları içermektedir (Bayat, 1995). Elektro filtreler veya mekanik yöntemler sayesinde atmosfere çıkışları engellenen uçucu küller, filtrelerin alt kısmında bulunan haznelere toplanır ve santral dışında depolanırlar. Uçucu küller, toplam külün % 75 - 80'ni oluştururlar (Kızgut ve ark., 2001).

Şekil 2.1’de kömür ile çalışan bir termik santrale ait akım şeması verilmiştir. Burada kömürün yanması, yanma sonrası enerji üretimi ve uçucu kül atığının oluşmasını içeren tüm aşamalar gösterilmiştir (Wikipedia, 2015).

2.1 Uçucu Küllerin Sınıflandırması

Uçucu küllerin temel olarak yapısında bulunan bileşenlerin SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO yüzde miktarları dikkate alınarak sınıflandırılmaktadır. Bu standartlar, Türk standardı olan TSE EN 197-1 ve Amerikan standardı olan ASTM C 168'dir.

TS EN 197-1'e göre sınıflandırmada uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki farklı şekilde sınıflandırılır. V sınıfı uçucu küllerin genel özellikleri, puzolanik özelliğe sahip olması ve küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz halinde bulunmalarıdır. Esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşur. Geri kalanı ise demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının % 10'dan az, reaktif silis miktarının %25'ten fazla olması gerekmektedir. W sınıfı küller ise, hidrolik veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz halinde bulunur. Esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının % 10'dan fazla, reaktif silis miktarının da % 25'ten fazla olması gerekmektedir (Türker ve ark., 2003).

Uçucu küller ASTM C618'e göre F ve C olmak üzere iki genel sınıfa ayrılmaktadır. F sınıfı uçucu küller, taş kömürünün yakılması sonucu elde edilirler ve % 10'dan daha az CaO içerdikleri için düşük kireç külü olarak da isimlendirilirler. Ayrıca toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi % 70'ten fazla olan uçucu küller bu sınıfa girmektedir. Bu küllerin bünyesinde serbest kireç (CaO) bulunmadığından kendi kendine sertleşme özelliğine sahip değildirler ve ancak sulu ortamda kireçle reaksiyona girerek sertleşme gösterirler. Puzolanik reaksiyonlar normal koşullarda çok yavaştır. C sınıfı uçucu küller ise linyit kömürünün yakılması sonucu elde edilmekte olup, bünyesinde %10'dan daha fazla CaO bulundurlar ve bundan dolayı da yüksek kireçli uçucu kül olarak da tanımlanmaktadırlar. Aynı zamanda toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50'den fazla olan küllerdir. C sınıfı uçucu küller serbest kireç nedeniyle kendi kendine çimentolaşma özelliğine sahiptirler (Alkaya, 2009).

2.2 Uçucu Kül Özellikleri

2.2.1 Fiziksel Özellikleri

Uçucu küllerin (UK) renkleri, açık bejden kahverengiye, griden siyaha kadar değişiklik gösterilebilir. İçindeki yanmamış karbon miktarı arttıkça uçucu küllerin renkleri koyulaşır. İçindeki karbon miktarı yakılan kömüre ve yanış özelliğine bağlıdır. İyi yanma sonrası ortaya çıkan uçucu kül diğerine göre daha açık renktedir. Diğer bir deyişle yanmamış karbon miktarı artıkça kül koyu renk alır. UK % 60-90 camsı bileşen içeren çok ince taneciklerden meydana gelmektedir (Lea, 1980). Uçucu külün incelik miktarı iki nedenle açıklanabilir, öncelikle kazana verilen kömürün öğütölme derecesidir. Diğer bir neden ise küllerin mümkün olabildiğince bacadan kaçmasına engel olunarak tutulması olarak açıklanabilir. Sonuç olarak öğütme artıkça ve bacadan kaçan kısım azaldıkça incelik artar. Çapları 1-200 μm arasında değişiklik gösteren, camsı ve çoğunlukla küresel karakterdeki parçacıklardır. Yoğunluğu ise 2,2 - 2,7 g/cm^3 olan küresel şekillidir (Tablo 2.1)(Elektrik İşleri Etüd İdaresi [EİE], 1979, Artuntaş, 2006).

Tablo 2.1 UK'lerin fiziksel özellikleri (Artuntaş, 2006)

Çap (μm)	Şekil	Renk	Yoğunluk (g/cm^3)	İncelik
1-200	Yuvarlak	Gri	2,2-2,7	Çimento inceliğinde

2.2.2 Kimyasal Özellikleri

Uçucu külün kimyasal bileşimi, yakılan kömürün yapısına, kömür içerisinde bulunan ve yanıcı olmayan bileşenlere ve yanmanın etkili olup/olmamasına bağlıdır. Uçucu külde bulunan temel bileşenler; SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO bileşenleri olmaktadır. Birçok uçucu külün %85'inden daha fazla bir kısmı; SiO_2 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , Al_2O_3 , SO_3 'ün yer aldığı kimyasal bileşenlerden oluşmaktadır (Burnet, 1986). Bu bileşenlerin miktarları uçucu külün tipine göre değişiklik göstermektedir. Ayrıca MgO , SO_3 alkali oksitler de minör bileşen olarak yer almaktadır. Uçucu küldeki temel oksitlerden; SiO_2 %25-60, Al_2O_3 %10-30, Fe_2O_3 %1-15 ve CaO , % 1-40 oranlarında bulunmaktadır. Belirtilen farklı aralıktaki değerler uçucu külün tipini belirlemekte kullanılmaktadır (Türker ve ark., 2003).

Uçucu kül bacadan toplanırken; içinde bazı yanmamış karbon partikülleri de uçucu külün önemli bir bileşenini oluştururlar. Kullanılan kömüre bağlı olarak bazı tiplerinde yüksek miktarda CaO bulunabilmektedir (Aytekin, 2009). Kızdırma kaybı, esas olarak kömürdeki yanmamış karbona karşılık gelmekle birlikte, kömürdeki hidratlar veya karbonatların bozunması ile ortaya çıkan bağlanmamış su veya CO_2 kaybını da içine almaktadır. Kızdırma kaybı, % 1.0-10 arasında değişmektedir (Türker ve ark., 2009).

Uçucu küller, yapay puzolan özelliğe sahiptir ve içerisinde bulunan aluminatlar ve amorf karakterli silikat mineraller küle puzolanik özellik sağladığı düşünülmektedir (Lea, F., 1980). Puzolanik özelliğe sahip bu uçucu küller sönmüş kireçle hidratasyon reaksiyonuna girerek suda sertleşme özelliği gösterirler (Topçu ve Canbaz, 2001). Su varlığında kireç ve silika arasında meydana gelen reaksiyon $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ (C-S-H) formülüne dayanmaktadır (Ball ve Carroll, 1999; Baoju ve ark., 2001; Ma ve Brown, 1997; Peng ve ark., 1999). Bu da uçucu küllerin yapı malzemesinde kullanılmasında önemli bir avantaj sağlamaktadır.

2.2.3 Minerolojik Özellikleri

Uçucu küllerin puzolanik özellikleri, kimyasal bileşiminden daha çok mineralojik yapıları ile ilişkilidir. Düşük kireçli uçucu küller ana aktif bileşeni, silis ve aluminadan oluşan amorf ya da camsı fazdır. Bu tip uçucu küller, rutubetli ortamda sönmüş kireç (Ca(OH)_2) ile reaksiyona girdikleri için puzolanik özelliğe sahiptirler. Yüksek kireçli uçucu küller ise, hem puzolanik özellik gösterirler hem de sahip oldukları serbest kireç, trikalsiyum aluminat, amorf silis ve alumina vb. sebebiyle kendi başlarına bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip olabilirler (Tokyay ve Erdoğan, 1998).

Camsı faz miktarı düşük kireçli uçucu küllerinde, yüksek kireçli uçucu küllerden daha fazladır. Düşük kireçli uçucu küllerde mineral faz olarak; camsı faz, mullit ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_2O_4), kuvarz (SiO_2) vb. mineraller varken, yüksek kireçli uçucu küllerde ise sayılanlara ek olarak serbest kireç (CaO), anhidrit (CaSO_4), trikalsiyum aluminat ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$), plajiyoklaz, gehlenit, feldspat gibi kalsiyum silikatlar bulunmaktadır (Artuntaş, 2006). Türkiye'deki bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları Tablo 2.2'de verilmiştir (Tokyay, 1993).

Tablo 2.2 Türkiye'deki bazı UK'lerin mineralojik kompozisyonları (Artuntaş, 2006)

Mineral %	Uçucu kül					
	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma B	Tunçbilek	Yatağan
Mullit	0,1	18,1	1,2	4,3	8,8	6
Kuvarz	4,50	10,9	5,6	5,1	13,9	22,4
Manyetit	0,8	0,2	2,5	0,6	4,1	2,9
Hematit	4	0,1	6	2	3	7
Anhidrit	12,2	-	9,3	7,4	-	-
Serbest CaO	18,6	0,7	5,5	9,8	0,9	1
Plajiyoklaz	~28	-	~15	~20	-	~25
Camsı ve amorf faz	~30	~70	~50	~50	~70	~35

BÖLÜM ÜÇ

MALZEME VE METHOD

3.1 Malzeme

Deneysel çalışmalar Soma, Seyitömer ve Yatağan Termik Santralleri'nden temin edilen uçucu küller ile yapılmıştır. Uçucu kül numuneleri ve Kimtaş A.Ş./ Torbalı Kireç Fabrikası'ndan temin edilen sönmüş kireç numunesi, malzeme deposunda hava ve nem almayacak şekilde kapalı varillerde stoklanmıştır. Öncelikle küllerin karakteristik özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla bir takım deneysel çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen deneysel çalışmalar neticesinde uçucu küllerin hangi sınıfa dahil olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra yardımcı malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Tuğla üretimi laboratuvar boyutta yapıldıktan sonra çalışmalar neticesinde büyük boyutta da yapılmıştır. Yapılan tez çalışmasına ek olarak tuğla üretiminde kullanılan uçucu küllerden (0/212µm) artakalan (212/800µm) uçucu küller ile ek çalışma yapılmıştır. Yapılan ek çalışmanın amacı kül içerisinde bulunan yanmamış kömürün ayrılmasıdır.

3.2 Uçucu Küllerin Karakterizasyonu

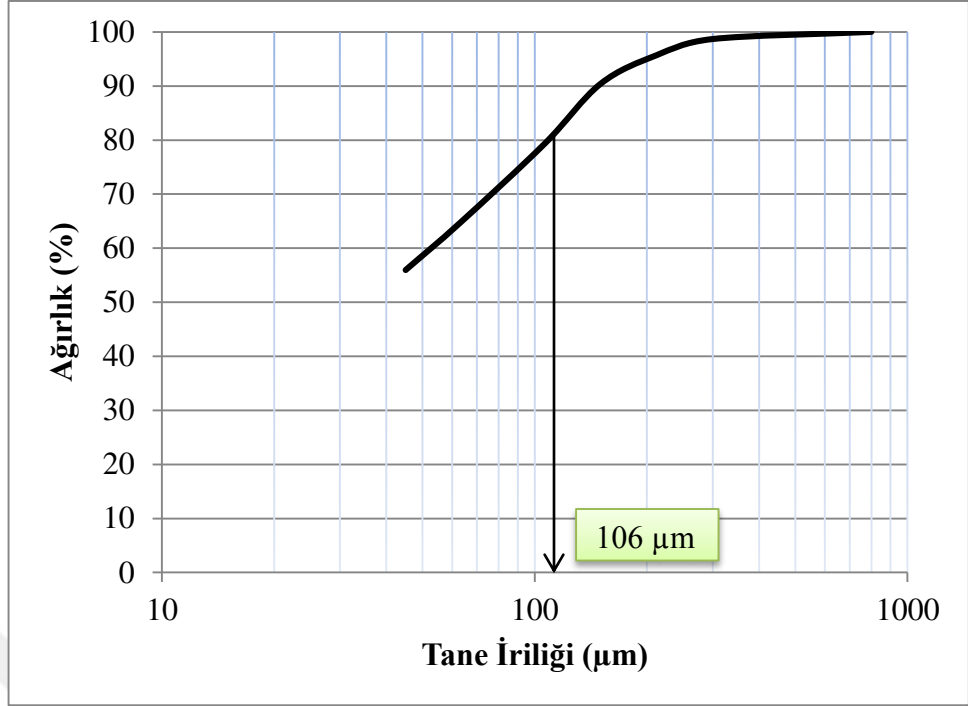
3.2.1 Elek Analizleri ve Fraksiyonel Kimyasal Analizler

Termik santrallerden getirilen uçucu küllerin kimyasal analizleri elek fraksiyonlarına ayrıldıktan sonra ayrı ayrı yapılmıştır. Temel oksit analizleri Perkin Elmer marka Atomik Absorbsiyon Spektrometresi (AAS) ve yaş analiz metodları (serbest kireç, SO₃) kullanılarak yapılmıştır. Kızdırma kaybı (KK) 1000 °C'de kül fırınında yapılmıştır. Analizlerde TS EN 451-1 ve TS 687 standartlarındaki metotlar kullanılmıştır. Sonuçlar ASTM C 618 standardı baz alınarak değerlendirilip, uçucu küllerin hangi sınıfa dahil oldukları tespit edilmiştir.

3.2.1.1 Soma Uçucu Külü

Soma uçucu külünün tane boyutu incelendiğinde, külün tamamı 800 µm altında olup 0/212 µm fraksiyonu külün % 95,7'sini teşkil etmektedir (Şekil 3.1). İri fraksiyonlarda yanmamış karbon oranının yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Tuğla üretimi için uygun olan fraksiyon aralığının 0/212 µm olduğu tespit edilmiştir. Bu fraksiyon aralığında uçucu kül % 0,46 yanmamış kömür içermektedir. Bu fraksiyonun serbest kireç oranı % 9,18 olarak analiz edilmiştir. Külün 0/45 µm elek fraksiyonundaki SO₃ oranı diğer fraksiyonlara kıyasla oldukça yüksektir (% 4,03). Bu kömürün yanması sonucunda ortaya çıkan SO₂ gazının, külün ince fraksiyonlarında bulunan CaO tarafından yüksek özgül yüzey alanı sebebiyle tercihli olarak CaSO₄ halinde absorblanmasından kaynaklanıyor olabilir. Külün içerdiği diğer elementlerin elek fraksiyonlarına göre dağılımları homojendir.

Soma külünün 0/212 µm elek fraksiyonu incelendiğinde SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ (S+A+F) oranı toplamda % 52,75'tir. S+A+F oranının % 50 üzerinde ve CaO oranının % 10'dan yüksek olması (% 39,63), Soma uçucu külünü ASTM C 618 standardına göre C sınıfı yüksek kireçli uçucu kül sınıfına dahil etmektedir (Tablo 3.1).



Şekil 3.1 Soma Termik Santrali uçucu külü tane boyu dağılım eğrisi

Tablo 3.1 Soma Termik Santrali uçucu külü fraksiyonel kimyasal analizi

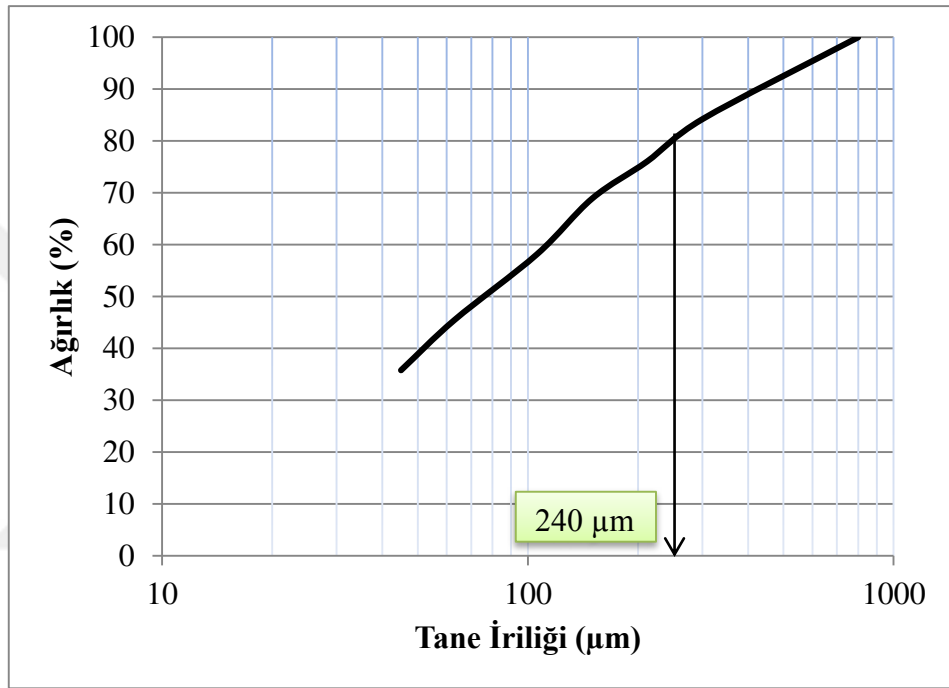
Tane Boyutu (µm)	Ağırlık (%)	KK (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Serbest CaO (%)
800/300	1,32	13,51					
300/212	3	1,99					
212/150	5,3	0,69	36,34	14,11	38,69	5,01	
150/106	11,13	0,45	36,42	14,54	38,22	5,19	
106/63	14,57	0,29	32,53	14,75	41,05	6,15	
63/45	8,73	0,24	33,52	14,79	39,63	6,2	
45/0	55,94	0,52	31,23	15,25	39,63	4,88	
212/0	95,67	0,46	32,52	14,99	39,63	5,24	9,18

3.2.1.2 Seyitömer Uçucu Külü

Seyitömer uçucu külünün elek analizi yapıldığında, külün tamamının 800 µm altında olduğu ve 0/212 µm fraksiyonu külün % 76,06'sını teşkil ettiği tespit edilmiştir (Şekil 3.2). İri fraksiyonlarda yanmamış karbon oranı oldukça yüksek olup (800/212 µm : % 8,41), 0/212 µm elek farksiyonu % 1,75 yanmamış kömür

içermektedir. Bu fraksiyonun serbest kireç oranı sadece % 0,32 olarak analiz edilmiştir.

Külün 0/212 μm elek fraksiyonunda $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ (S+A+F) oranı toplamda % 83,99'dur. S+A+F oranının % 70'in üzerinde ve CaO oranının % 10'dan düşük olması (% 5,34) sebebi ile Seyitömer uçucu külünün, ASTM C 618 standartına göre F sınıfı düşük kireçli uçucu kül sınıfı olduğu tespit edilmiştir (Tablo 3.2).



Şekil 3.2 Seyitömer Termik Santrali uçucu külü tane boyu dağılım eğrisi

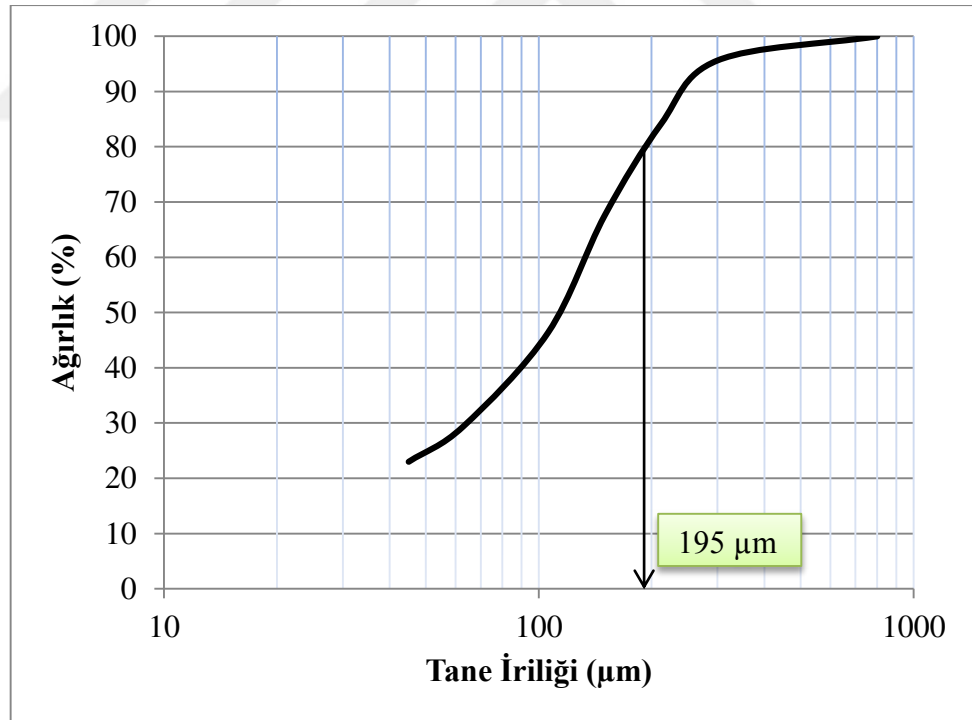
Tablo 3.2 Seyitömer Termik Santrali uçucu külü fraksiyonel kimyasal analizi

Tane Boyutu (μm)	Ağırlık (%)	KK (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	CaO (%)	Fe_2O_3 (%)	Serbest CaO (%)
800/300	15,8	10,08					
300/212	8,14	5,17					
212/150	7,15	3,5	58,94	17,27	3,97	8,96	
150/106	10,75	2,19	57,63	17,56	5,16	9,55	
106/63	12,7	1,5	55,53	17,42	5,32	9,7	
63/45	9,7	1,25	57	17,7	5,55	9,59	
45/0	35,76	1,5	52,97	17,13	5,62	10,53	
212/0	76,06	1,75	56,67	17,33	5,34	9,99	0,32

3.2.1.3 Yatağan Uçucu Külü

Yapılan elek analizi sonucunda Yatağan uçucu külünün tamamının 800 µm altında olduğu ve 0/212 µm fraksiyonu külün % 84,14'ünü teşkil ettiği gözlemlenmiştir (Şekil 3.3). İri fraksiyonlarda yanmamış karbon oranı % 1,12 olup, 0/212 µm elek fraksiyonu % 0,71 yanmamış kömür içermektedir. Bu fraksiyonun serbest kireç oranı % 2,18 olarak analiz edilmiştir. Külün içerdiği diğer elementlerin elek fraksiyonlarına göre dağılımlarında bir anormallik tespit edilmemiştir.

Yatağan külünün 0/212 µm elek fraksiyonunda $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (S+A+F) oranı toplamda % 77,77'dir. S+A+F oranının % 70 üzerinde ve CaO oranının % 10'dan yüksek olması (% 14,97) sebebi ile Yatağan uçucu külü, ASTM C 618 standartına göre F sınıfı silissi kül ile C sınıfı kireçsi kül sınıfı arasında bir nitelik göstermektedir (Tablo 3.3).



Şekil 3.3 Yatağan Termik Santrali uçucu külü tane boyu dağılım eğrisi

Tablo 3.3 Yatağan Termik Santrali uçucu külü fraksiyonel kimyasal analizi

Tane Boyutu (μm)	Ağırlık (%)	KK (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Serbest CaO (%)
800/300	4,36	1,97					
300/212	11,5	0,8					
212/150	16,55	0,77	50,68	17,99	17,42	6,8	
150/106	21,17	0,6	54,77	15,99	16,11	6,33	
106/63	16,99	0,66	51,84	16,84	17,35	6,88	
63/45	6,42	0,87	54,84	15,42	16,07	6,33	
45/0	23,01	0,77	53,28	22,13	10,08	6,6	
212/0	84,14	0,71	52,97	18,19	14,97	6,61	2,18

Yapılan tespitler sonucunda termik santrallere ait uçucu küllerin sınıflandırılması tablo 3.4'te olduğu gibi özetlenebilir.

Tablo 3.4 Uçucu küllerin ASTM C 618 standartına göre sınıflandırılması

Numuneler	Ağ. (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Sınıfı
Soma	95,67	32,52	14,99	5,24	39,63	C
Seyitömer	76,06	56,67	17,33	9,99	5,34	F
Yatağan	84,14	52,97	18,19	6,61	14,97	F-C

3.2.2 Uçucu Küllerin Yoğunluk Ölçümü

Yoğunluk ölçümü için Micromeritics marka AccuPyc II 1340 model He-Piknometresi cihazlar kullanılmıştır. Yapılan yoğunluk ölçümlerinde, 0/212 μm fraksiyonlu Seyitömer külünün 2,2 g/cm³ ile en hafif kül ve yığın yoğunluğunun da bu sebepten sıkıştırılmış halde dahi sadece 0,7 g/cm³ olduğu tespit edilmiştir (Tablo 3.5). Bu düşük yoğunluk, kısmen Seyitömer uçucu külünün diğer uçucu küllere nazaran içerdiği yüksek karbon oranına bağlanabilir (KK %1,75). Yığın yoğunluğu açısından bakıldığında Seyitömer uçucu külü hafif tuğla üretimi için idealdir. Yatağan uçucu külü de hafif tuğla üretimi için uygun özellik göstermektedir.

Tablo 3.5 Uçucu küllerin yoğunluk ölçümü

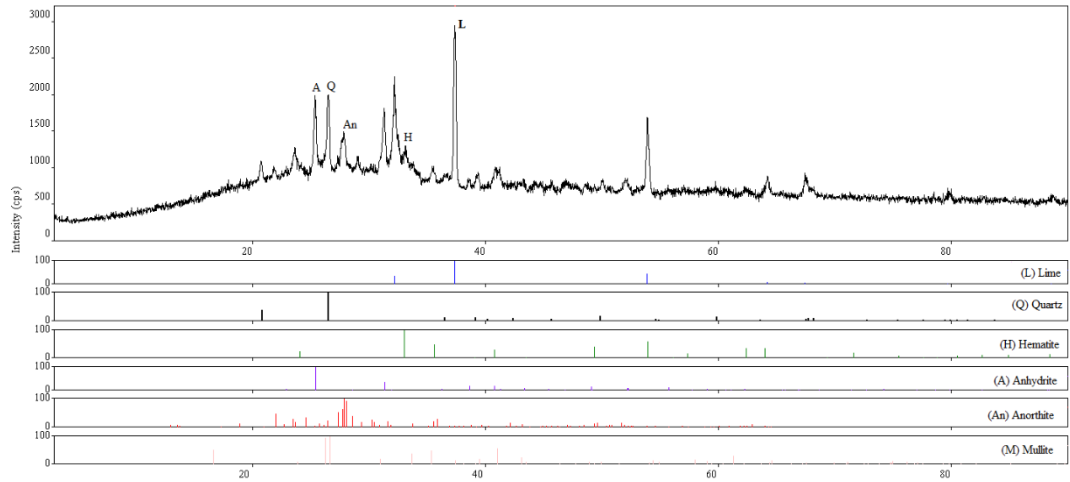
	Özgül ağırlık g/cm^3	Yığın yoğ. sıkıştırılmış g/cm^3	Yığın yoğ. gevşek g/cm^3
Soma	2,6661	1,46	1,25
Seyitömer	2,1888	0,70	0,60
Yatağan	2,3527	1,12	0,90

3.2.3 Uçucu Küllerin Mineralojik Bileşimlerinin Tespiti, XRD Analizleri

Uçucu küllerin mineralojik bileşimi, RigakuMiniflex II marka (Cu-X ışın tüplü, 30kV, 15 mA) X-ışınları difraktometresinde toz difraksiyon yöntemiyle ($0-90^\circ$ 2θ aralığında) tespit edilmiştir.

3.2.3.1 Soma Uçucu Külü

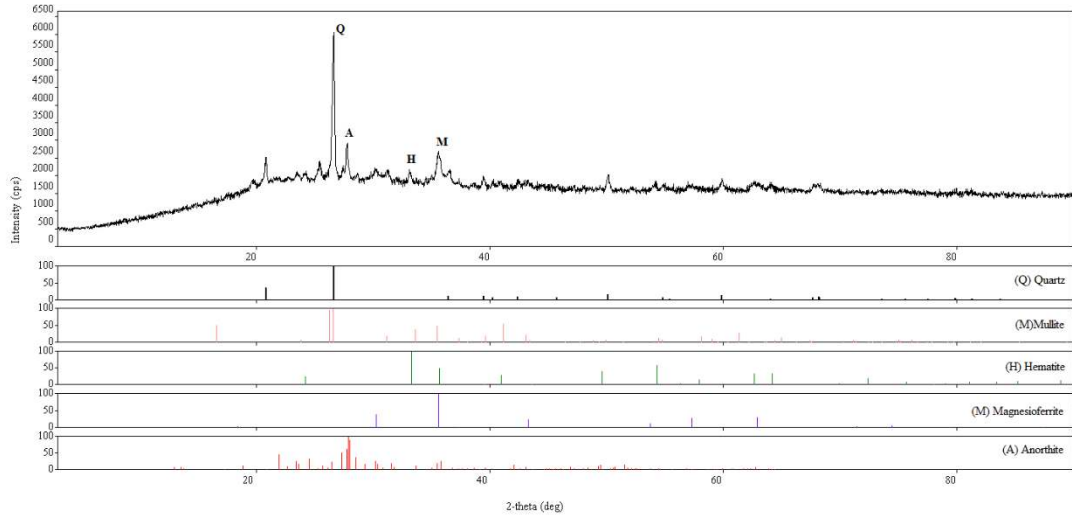
Soma uçucu külünde tespit edilen ana mineral fazları Kireç (CaO), Kuvars (SiO_2), Hematit (Fe_2O_3), Anhidrit (CaSO_4), Anortit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) ve Mullittir ($\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}$) Şekil 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3.4 Soma Termik Santrali uçucu külü X-Işınları difraktogramı

3.2.3.2 Seyitömer Uçucu Külü

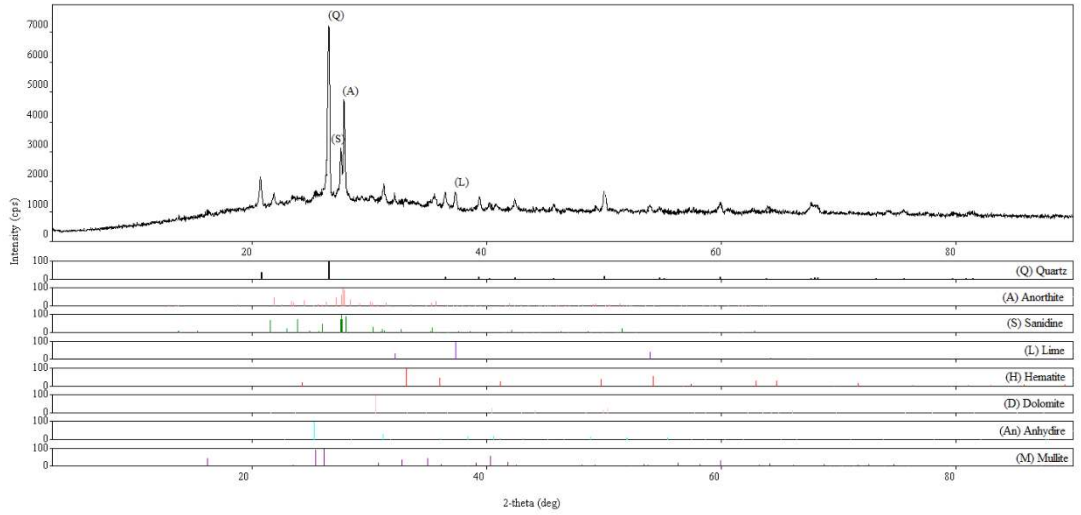
Şekil 3.5'te görüldüğü üzere, Seyitömer uçucu külünde Kuvars (SiO_2), Hematit (Fe_2O_3), Anortit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), Mullit ($\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}$) ve Magnesioferrit ($\text{MgFe}^{3+}\text{O}_4$) ana fazlar olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3.5 Seyitömer Termik Santrali uçucu külü X-Işınları difraktogramı

3.2.3.3 Yatağan Uçucu Külü

Yatağan uçucu külünde Kuvars (SiO_2), Kireç (CaO), Hematit (Fe_2O_3), Anortit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), Sanidin [$(\text{K},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$], Mullit ($\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}$), Anhidrit (CaSO_4) ve Dolomit (CaMgCO_3) mineral fazları tespit edilmiştir (Şekil 3.6).



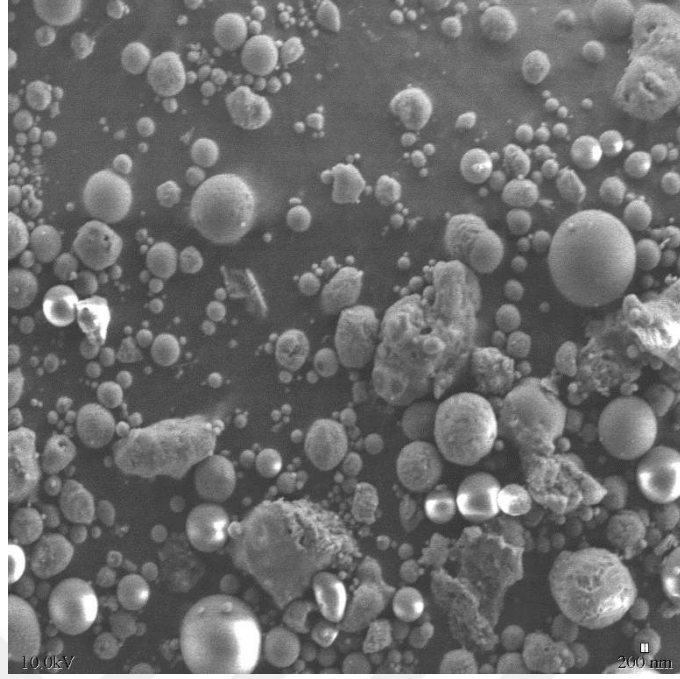
Şekil 3.6 Yatağan Termik Santrali uçucu külü X-Işınları difraktogramı

3.2.4 Uçucu Küllerin Morfolojik Özellikleri, Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Çalışmaları

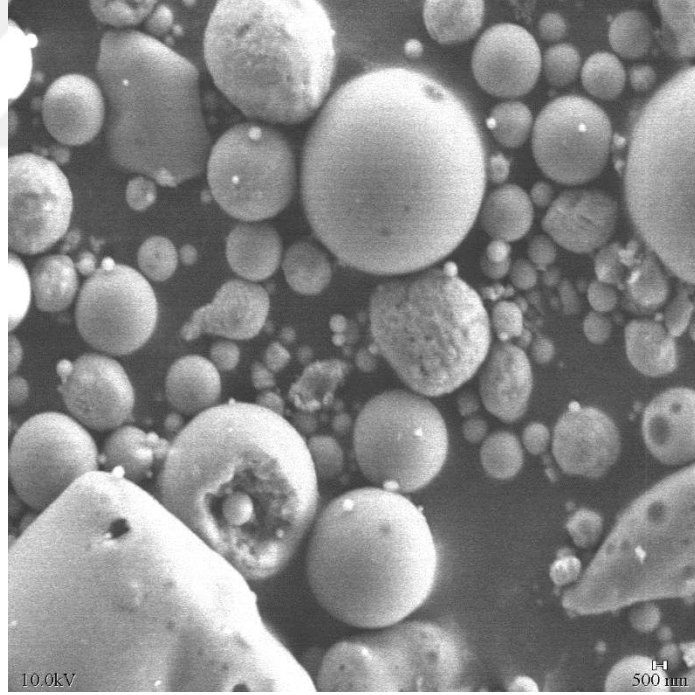
Uçucu kül numunelerinin yüzey yapıları Jeol JXA733 Superprob marka taramalı elektron mikroskopunda, ikincil elektron görüntüsü yöntemiyle incelenmiştir.

3.2.4.1 Soma Uçucu Külü

Soma uçucu külü morfolojik analizinde külün, büyüklükleri 0,2-30 μm arasında değişen çoğunluğu yüzeyi pürüzsüz küresel taneciklerden (mikrosferler) oluştuğu gözlenmiştir. Mikrosferlerin bazılarının pleosferler (içi daha küçük mikrosferlerle dolu) olduğu gözlenmiştir. Kül ayrıca şekilsiz köşeli tanecikler de ihtiva etmektedir. Senosferlerin (içi boşluklu küreler) potasyumca zengin kalsiyum alumino silikatlar olduğu yapılan mikro analizlerden belirlenmiştir. Pürüzlü ve köşeli yapıların Anhidrit, kuvars, serbest kireç olduğu görülmüştür (Şekil 3.7-3.8), (Tablo 3.6-3.8).



Şekil 3.7 Soma Termik Santrali uçucu külü SEM görüntüsü



Şekil 3.8 Soma Termik Santrali uçucu külünde mikro analizi yapılan 1, 2 ve 3 parçacıklar

Tablo 3.6 Soma UK 1 nolu parçacık noktasal analiz

2400x

Bileşen	Konsantre
	%
Na ₂ O	0,000
MgO	3,936
Al ₂ O ₃	15,698
SiO ₂	40,875
CaO	27,406
S	1,713
K	10,372
Fe	0,000
Cu	0,000
	100,000

Element	Yoğunluk	Atomsal
	g/cm ³	%
O	0,00	55,991
Na	0,00	0,000
Mg	0,41	2,270
Al	0,63	7,157
Si	4,04	15,814
S	0,28	1,242
K	1,20	6,166
Ca	1,86	11,360
Fe	0,00	0,000
Cu	0,00	0,000
Toplam		100,000

Tablo 3.7 Soma UK 2 nolu parçacık noktasal analiz

2400x

Bileşen	Konsantre
	%
Na ₂ O	0,000
MgO	0,924
Al ₂ O ₃	17,996
SiO ₂	38,274
CaO	37,163
S	2,493
K	3,150
Fe	0,000
Cu	0,000
	100,000

Element	Yoğunluk	Atomsal	Konsantre
	g/cm ³	%	%
O	0,00	57,577	39,824
Na	0,00	0,000	0,000
Mg	0,07	0,530	0,557
Al	1,47	8,166	9,525
Si	2,96	14,735	17,891
S	0,32	1,798	2,493
K	0,29	1,863	3,150
Ca	2,00	15,330	26,561
Fe	0,00	0,000	0,000
Cu	0,00	0,000	0,000
Toplam		100,000	100,000

Tablo 3.8 Soma UK 3 nolu parçacık noktasal analiz

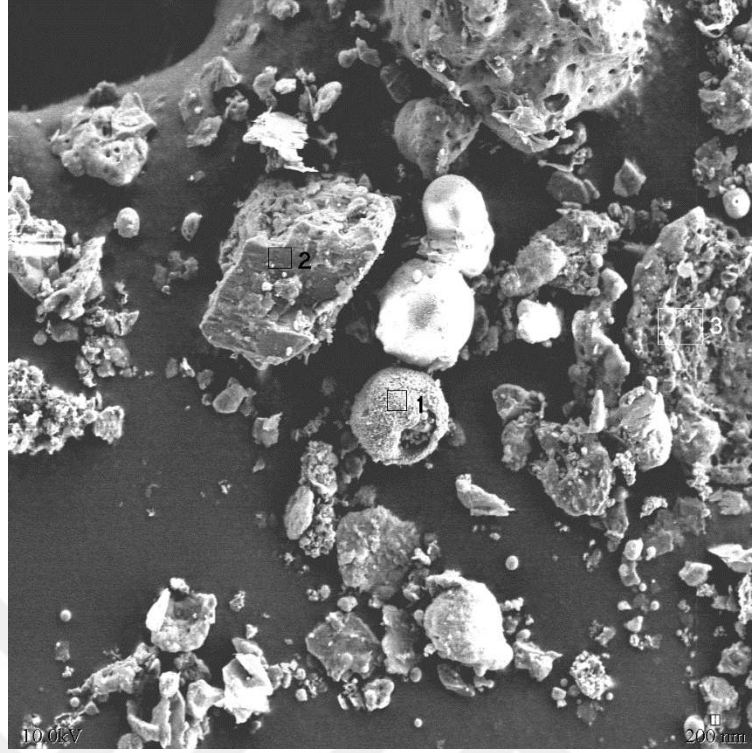
2400x

Bileşen	Konsantre
	%
Na ₂ O	2,482
MgO	3,513
Al ₂ O ₃	7,405
SiO ₂	9,335
CaO	59,060
S	14,041
K	4,164
Fe	0,000
Cu	0,000
	100,000

Element	Yoğunluk	Atomsal	Konsantre
	g/cm ³	%	%
O	0,06	45,277	27,341
Na	0,14	2,122	1,842
Mg	0,27	2,310	2,119
Al	0,57	3,848	3,919
Si	0,71	4,116	4,363
S	1,82	11,601	14,041
K	0,38	2,822	4,164
Ca	3,09	27,904	42,211
Fe	0,00	0,000	0,000
Cu	0,00	0,000	0,000
Toplam		100,000	100,000

3.2.4.2 Seyitömer Uçucu Külü

Seyitömer külü incelendiğinde, külün az miktarda mikrosfer içermesine karşın çok miktarda gözenekli parçacıklar ihtiva ettiği gözlemlenmiştir. Şekilsiz gözenekli taneciklerin, yapılan mikro analizlerde, Kalsiyum aluminasilikat, Anhidrit, kaolinitten oluşmuş mullit, yanmamış karbon oldukları tespit edilmiştir (Şekil 3.9), (Tablo 3.9-3.11).



Şekil 3.9 Seyitömer Termik Santrali uçucu külü SEM görüntüsü

Tablo 3.9 Seyitömer UK 1 nolu parçacık noktasal analiz

540x					
Bileşen	Konsantre	Element	Yoğunluk	Atomsal	Konsantre
	%		g/cm ³	%	%
Na ₂ O	0,000	O	0,00	38,593	22,332
MgO	2,387	Na	0,00	0,000	0,000
Al ₂ O ₃	2,620	Mg	0,40	1,637	1,439
SiO ₂	10,077	Al	0,45	1,421	1,386
CaO	51,826	Si	1,72	4,637	4,71
S	30,686	S	8,60	26,458	30,686
K	2,405	K	0,46	1,701	2,405
Fe	0,000	Ca	5,79	25,553	37,04
Cu	0,000	Fe	0,00	0,000	0,000
Zn	0,000	Cu	0,00	0,000	0,000
	100,000	Zn	0,00	0,000	0,000
		Toplam		100,000	100,000

Tablo 3.10 Seyitömer UK 2 nolu parçacık noktasal analiz

540x

Bileşen	Konsantre
	%
Na ₂ O	1,145
MgO	9,229
Al ₂ O ₃	10,712
SiO ₂	49,283
CaO	12,038
S	2,492
K	0,222
Fe	14,579
Cu	0,000
Zn	0,000
	100,000

Element	Yoğunluk	Atomsal	Konsantre
	g/cm ³	%	%
O	0,00	56,500	38,759
Na	0,16	1,087	1,072
Mg	1,35	5,341	5,566
Al	1,57	4,901	5,669
Si	7,08	19,131	23,037
S	0,58	1,812	2,492
K	0,04	0,132	0,222
Ca	1,24	5,007	8,604
Fe	0,33	6,089	14,579
Cu	0,00	0,000	0,000
Zn	0,00	0,000	0,000
Toplam		100,000	100,000

Tablo 3.11 Seyitömer UK 3 nolu parçacık noktasal analiz

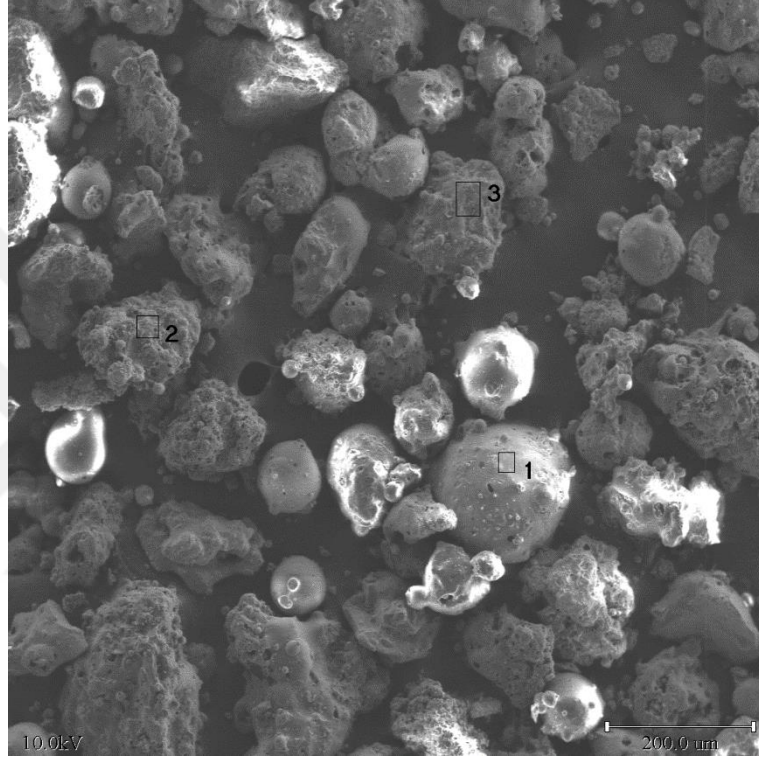
540x

Bileşen	Konsantre
	%
Na ₂ O	0,000
MgO	4,733
Al ₂ O ₃	24,096
SiO ₂	60,712
CaO	3,713
S	2,252
K	4,494
Fe	0,000
Cu	0,000
Zn	0,000
	100,000

Element	Yoğunluk	Atomsal	Konsantre
	g/cm ³	%	%
O	0,00	61,137	46,613
Na	0,00	0,000	0,000
Mg	0,70	2,464	2,854
Al	3,54	9,919	12,753
Si	8,18	21,204	28,379
S	0,48	1,474	2,252
K	0,69	2,412	4,494
Ca	0,35	1,390	2,654
Fe	0,00	0,000	0,000
Cu	0,00	0,000	0,000
Zn	0,00	0,000	0,000
Toplam		100,000	100,000

3.2.4.3 Yatağan UK

Yatağan uçucu külü incelendiğinde, mikrosfer tanecikler az miktarda olup kül genelinde şekilsiz gözenekli taneciklerden oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.10). Yapılan mikro analizler sonucunda kalsiyum alumina silikat ve alüminyum silikat oluşumlarının çoğunlukta olduğu tespit edilmiştir (Tablo 3.12-3.14).



Şekil 3.10 Yatağan Termik Santrali uçucu külü SEM görüntüsü

Tablo 3.12 Yatağan UK 1 nolu parçacık noktasal analiz

100x

Bileşen	Konsantre
	%
Na ₂ O	0,908
MgO	1,247
Al ₂ O ₃	25,807
SiO ₂	53,584
CaO	12,604
S	2,045
K	3,804
Fe	0,000
Cu	0,000
	100,000

Element	Yoğunluk	Atomsal	Konsantre
	g/cm ³	%	%
O	0,00	60,404	45,010
Na	0,16	0,629	0,674
Mg	0,29	9,665	0,752
Al	5,93	10,869	13,659
Si	11,29	19,149	25,048
S	0,69	1,369	2,045
K	0,93	2,089	3,804
Ca	1,85	4,826	9,008
Fe	0,00	0,000	0,000
Cu	0,00	0,000	0,000
Toplam		100,000	100,000

Tablo 3.13 Yatağan UK 2 nolu parçacık noktasal analiz

100x

Bileşen	Konsantre
	%
Na ₂ O	0,000
MgO	0,000
Al ₂ O ₃	26,455
SiO ₂	41,249
CaO	24,535
S	2,050
K	5,711
Fe	0,000
Cu	0,000
	100,000

Element	Yoğunluk	Atomsal	Konsantre
	g/cm ³	%	%
O	0,00	58,283	41,420
Na	0,00	0,000	0,000
Mg	0,00	0,000	0,000
Al	1,79	11,683	14,001
Si	2,57	15,456	19,282
S	0,21	1,439	2,050
K	0,42	3,288	5,711
Ca	1,07	9,850	17,535
Fe	0,00	0,000	0,000
Cu	0,00	0,000	0,000
Toplam		100,000	100,000

Tablo 3.14 Yatağan UK 3 nolu parçacık noktasal analiz

100x

Bileşen	Konsantre
	%
Na ₂ O	0,533
MgO	2,957
Al ₂ O ₃	22,961
SiO ₂	43,350
CaO	7,012
S	1,417
K	2,445
Fe	19,324
Cu	0,000
	100,000

Element	Yoğunluk	Atomsal	Konsantre
	g/cm ³	%	%
O	0,00	55,824	37,207
Na	0,12	0,413	0,396
Mg	0,86	1,761	1,783
Al	6,85	10,812	12,152
Si	12,27	17,320	20,264
S	66,00	1,061	1,417
K	0,83	1,501	2,445
Ca	1,45	3,002	5,011
Fe	0,88	8,307	19,324
Cu	0,00	0,000	0,000
Toplam		100,000	100,000

3.3 Yardımcı Malzemelerin Özellikleri

3.3.1 Toz Kireç

Tuğla üretiminde uçucu küle yardımcı malzeme olarak kullanılan kireç Torbalı Kimtaş A.Ş. Kireç Fabrikası'ndan alınmıştır. Çok ince tane boyutlu kirecin özellikleri şunlardır;

Tane boyutu < 30 mikron, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oranı: % 90, CaO oranı: % 66,26

3.3.2 Alçı

Alçı, testlerde kullanılmak üzere alınmış olan alçının kimyasal özellikleri Tablo 3.15'te verilmiştir. Kullanılan alçının cinsi yapı alçısıdır.

Tablo 3.15 Yapı alçısının kimyasal analizi

	%
CaO	37,14
SO ₃	55,49
MgO	0,26
Na ₂ O	0,02
K ₂ O	0,005
Fe ₂ O ₃	0,04
Al ₂ O ₃ +SiO ₂	0,25
KK (600 °C)	6,76

3.4 Laboratuvar Ölçekte Oryantasyon Niteliğinde Tuğla Üretim Denemeleri

3.4.1 Kür Kabininde Uçucu Kül-Kireç Tuğlası Örnekleri Üretim Denemeleri

Yapılmış olan testlerde uçucu küller ile çeşitli kireç oranlarında ve düşük basınçta şekillendirilmiş tuğlalar için üretim denemeleri yapılmıştır. Yapılan tuğlalar Nüve marka TK252 tipi kür kabininde kürlenme (50° , % 95 nem) işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan testler sonucunda elde edilen tuğla örnekleri ile tuğlaların şekil değişimleri ve sağlamlıkları açısından incelenmesi yapılmıştır. Üretilmiş olan tuğla örnekleri 45 mm çapında ve 100 mm boyunda bir kalıpta ve hidrolik pres yardımıyla 1000 kg basınç uygulanarak (yaklaşık 65 kgf/cm^2) hazırlanmıştır (Şekil 3.11, Tablo 3.16).

Yapılan bu testlerin amacı bir sonraki aşama olan basınçlı buharlı otoklav testlere yol göstermesidir. Yapılan testlerle, uçucu küllerin kireçle olan reaksiyonlarını nem oranı sabit bir ortamda gözlemlemek ve ön bilgi elde etmektir.



Şekil 3.11 Kırılma öncesi tuğla örnekleri

Tablo 3.16 Kür kabini testleri şartları, (UK: uçucu kül, K: kireç, A: Alçı)

Numune Kodu	UK (%)	K (%)	A (%)	Su (%)	Kürleme Süresi (gün)	Kürleme sonu Nem (%)
Soma 1	100	0	0	16,76	28	3,72
Soma 2	92	8	0	15,02	28	3,73
Soma 3	90	10	0	14,72	28	4,31
Soma 4	88	12	0	15,57	28	4,18
Soma 5	83	12	5	17,14	28	3,41
Seyit 1	100	0	0	22,44	28	0,92
Seyit 2	92	8	0	28,67	28	6,93
Seyit 3	90	10	0	26,11	28	7,58
Seyit 4	88	12	0	32,31	28	5,79
Seyit 5	83	12	5	27,74	28	7,02
Yatağ 1	100	0	0	19,11	28	1,71
Yatağ 2	92	8	0	20,23	28	3,20
Yatağ 3	90	10	0	22,78	28	3,96
Yatağ 4	88	12	0	17,56	28	3,55
Yatağ 5	83	12	5	19,10	28	2,74

Üretilmiş olan tuğlaların sertlik tespiti birbiri ile kıyaslanarak yapılmıştır. Sertlik derecelendirilmesi yumuşak, orta sert, sert ve çok sert terimleri kullanılarak tanımlanmıştır (Tablo 3.17). Bu tespit için, keskin bir bıçak ve küçük bir testereden yararlanılmıştır.

Tablo 3.17 28 gün buhar kürü sertlik değerleri

Numune Kodu	1	2	3	4	5
Soma	Dağıldı	Dağıldı	Dağıldı	Dağıldı	Yumuşak
Seyitömer	Dağıldı	Çok sert	Çok sert	Çok sert	Çok sert
Yatağan	Dağıldı	Orta sert	Orta sert	Orta sert	Sert

Yapılan testler sonucunda Soma küllerinden elde edilen 28 gün % 95 nem oranında kütleme ile yapılan tuğlalarda aşırı bir genleşme olduğu görülmektedir (Tablo 3.18). Yatağan külünde genleşmenin düşük olduğu, Seyitömer külünden ise elde edilen tuğlalarda dikkate değer bir genleşme olmadığı tespit edilmiştir. Alçı ilavesinin genleşme gösteren tuğla örnekleri üzerinde genleşmeyi azaltıcı etkisi olduğu tespit edilmiştir. Yeterli sağlamlık ve düşük genleşme gösteren tuğlalardan Seyitömer uçucu küllü tuğlalar 0,73-1 g/cm³, Yatağan uçucu küllü tuğlalar ise 0,92-1,15 g/cm³ birim hacim ağırlık tespit edilmiştir.

Tablo 3.18 28 gün %95 nem kütleme tuğla örnekleri birim hacim ağırlıkları ve genleşme

Numune Kodu	R (cm)	H(cm)	V(cm ³)	Ağırlık (g)	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	Çaptan Genleşme (%)
Soma 1	5,26	3,97	86,22	90,57	16	16,89
Soma 2	5,43	4,53	104,85	102,64	0,98	20,67
Soma 3	ÖA	ÖA	ÖA	ÖA	ÖA	ÖA
Soma 4	ÖA	ÖA	ÖA	ÖA	ÖA	ÖA
Soma 5	4,93	4,18	79,19	101,54	1,27	9,56
Seyitömer 1	4,51	4,92	78,38	57,44	0,73	0,22
Seyitömer 2	4,50	5,08	80,79	70,76	0,88	0
Seyitömer 3	4,50	4,68	74,57	63,71	0,85	0
Seyitömer 4	4,51	5,12	81,85	81,9	1,00	0,22
Seyitömer 5	4,50	4,89	77,79	76,49	0,98	0
Yatağan 1	4,62	5,6	93,58	86,06	0,92	2,67
Yatağan 2	4,53	5,03	81,12	85,27	1,05	0,67
Yatağan 3	4,54	4,86	78,64	89,60	1,14	0,89
Yatağan 4	4,55	4,89	79,25	86,19	1,09	1,11
Yatağan 5	4,54	4,24	68,72	79,04	1,15	0,89

ÖA: Ölçüm alınmadı

3.5 Otoklavda Uçucu Küllü Tuğla Eldesine Yönelik Testler

Çalışmada otoklavda uçucu küllü tuğla eldesine yönelik testler yapılmıştır. Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları göz önüne alınarak çeşitli karışım oranları, presleme basıncı, otoklav şartları ve kürleme süresi gibi parametrelerin optimum değerleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Optimum parametrelerin tespitinde öncelikli olarak tuğla örneklerinin mekanik dayanımları ve birim hacim ağırlıkları değerlendirilmelerde belirleyici kriter olarak kullanılmıştır.

Laboratuvar çalışmalarında Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Laboratuvar olanaklarından yararlanılmıştır. Kimyasal ve XRD analizleri yine aynı bölümün laboratuvarlarında yaptırılmıştır. Buharlı otoklav testleri ELE marka otomatik basınç kontrollü otoklavda yapılmıştır. Şekil 3.12’de otoklav ve tuğla haznesi görülmektedir.



Şekil 3.12 ELE marka buharlı otoklav ve tuğla haznesi

3.5.1 Otoklavda Uçucu Külden Tuğla Üretimi Denemeleri

Yapılan bu çalışmanın amacı uçucu küllerden buharlı otoklavda yüksek dayanımlı ve hafif tuğlaların optimum üretim parametrelerinin belirlenmesidir. Yol gösterici nitelikteki yapılmış olan ön çalışmalar neticesinde otoklav testlerinde kullanılabilecek şu önemli sonuçlar çıkarımında bulunulmuştur:

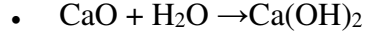
- Yüksek oranda serbest CaO içeren küller ile düşük sıcaklık kürlemesinde olumlu sonuçlar alınamamıştır.
- Düşük CaO içeren Seyitömer külü ile düşük sıcaklıkta küreme ile tatmin edici sağlamlıkta tuğlaların elde edilmesi mümkündür.
- Yüksek oranda serbest CaO içeren Soma uçucu külünden harç ön küreme yöntemi ile kireç katkısız tuğla üretimi mümkün görünmektedir.

Elde edilen tespitlerin ışığında buharlı otoklavda tuğla üretim aşamasına geçilmiştir. Test planları elde edilen tespitler dikkat alınarak şekillendirilmiştir.

3.5.2.1 Optimum Hammadde Karışım Oranlarının Tespiti

Önce Soma uçucu külünden tuğla üretime yönelik, uçucu kül + kireç karışım oranlarını belirlemek için % 88 uçucu kül + %12 kireç, % 90 uçucu kül + % 10 kireç ve % 92 uçucu kül + % 8 kireç ilavesi ile hazırlanan tuğlalar 62,5 kgf/cm² basınç altında preslendikten sonra 6 saat süre ile 12 bar buhar basıncı altında otoklavda kürlemeye tabi tutulmuştur. Elde edilen tuğlalar (T1-T2-T3) Tablo 3.19'da verilmiştir. Tablodaki verilerden ve elde edilen tuğlaların resimlerinden de görüleceği üzere tuğlalar çatlaklı bir yapıda oluşmuştur. Birim hacim ağırlığı ve dayanımı ile ilgili ölçüm alınamamıştır. Bu test serisinde, ön araştırmalarda düşük sıcaklık kürlemesinde de benzer sonuçlar alındığından Soma külünden hiçbir ön işlem yapmadan yüksek basınçta buharlı ortamda (otoklav) kürlenmesi ile iyi kalitede tuğla eldesinin mümkün olmadığı tespit edilmiştir. Bu sebepten otoklav testleri devamında tuğlaların çatlaması ve genleşmesine neden olan serbest CaO'ın bertarafı için Soma külü ile hazırlanan tuğlalarda tuğla harçları 2 gün boyunca kür

kabininde ön kürlemeye tabi tutulmuştur. Tuğla  retimi öncesi serbest CaO'ın  n kürleme ile Ca (OH)₂'e dönüştürülmesi amaçlanmaktadır.



Seyitömer uçucu külü hammadde oran testleri için % 88 k l % 12 kireç, % 90 k l % 10 kireç ve % 92 k l % 8 kireç ilavesi ile hazırlanan tuğlalar 62,5 kgf/cm² basınç altında preslendikten sonra 12 bar da 6 saat süre ile buharlı otaklav k r ne tabi tutulmuştur. Elde edilen tuğlaların basınç dayanımı ve birim hacim ağırlık değerleri Tablo 3.20'de verilmiştir. Tablodan da anlaşılacağı üzere % 88 k l % 12 kireç oranında birim hacim ağırlık ve dayanım değerleri açısından en iyi tuğlalar elde edilmiştir.

Tablo 3.19 Soma uçucu külü +kireç katkılı tuğlalar

Numune	Numune içeriği	Birim Hacim Ağ. (g/cm ³)	Dayanım (kgf/cm ²)
T1	Soma % 88 K�l, % 12 Kireç 12 bar 6 saat, 62,5 kgf/cm ²	�l��m Alınamadı	�l��m Alınamadı
T2	Soma % 90 K�l, % 10 Kireç 12 bar 6 saat, 62,5 kgf/cm ²	�l��m Alınamadı	�l��m Alınamadı
T3	Soma % 92 K�l, % 8 Kireç 12 bar 6 saat, 62,5 kgf/cm ²	�l��m Alınamadı	�l��m Alınamadı

Tablo 3.20 Seyitömer uçucu külü +kireç katkılı tuğlalar

Numune	Numune içeriği	Birim Hacim Ağ. (g/cm ³)	Dayanım (kgf/cm ²)
T4	Seyitömer % 88 Kül, 12 Kireç 12 bar 6 saat, 62,5 kgf/cm ²	1,062	125,5
T5	Seyitömer % 90 Kül, % 10 Kireç 12 bar 6 saat, 62,5 kgf/cm ²	0,967	67,1
T6	Seyitömer % 92 Kül, % 8 Kireç 12 bar 6 saat, 62,5 kgf/cm ²	0,982	64,1

Yapılan testler sonucunda, Seyitömer uçucu külü ile yapılan tuğlalar için % 12 kireç karışım oranı optimum olarak belirlenmiştir.

3.5.2.2 Optimum Presleme Basıncının Tespiti

Bu aşamada tuğlaların presleme basıncı ile birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı arasındaki ilişki araştırılması amaçlanmıştır. Daha önceki deneyimlerimizi de göz önüne de bulundurarak optimum hammadde oranlarını 46,9 kgf/cm², 93,8 kgf/cm² ve 125 kgf/cm² basınç olarak belirlenmiştir. Bu basınçlar altında preslenen tuğlalar 12 bar basınç altında 6 saat süreyle otoklavda kürlenmiştir (Tablo 3.21 ve 3.22). Daha önceki testlerde 62,5 kgf/cm² presleme basıncında elde edilen tuğlaların özellikleri de tablolara dahil edilmiştir.

Tablo 3.21 % 88 Soma uçucu külü + % 12 kireç katkılı tuğlalarda optimum presleme basıncının tespiti

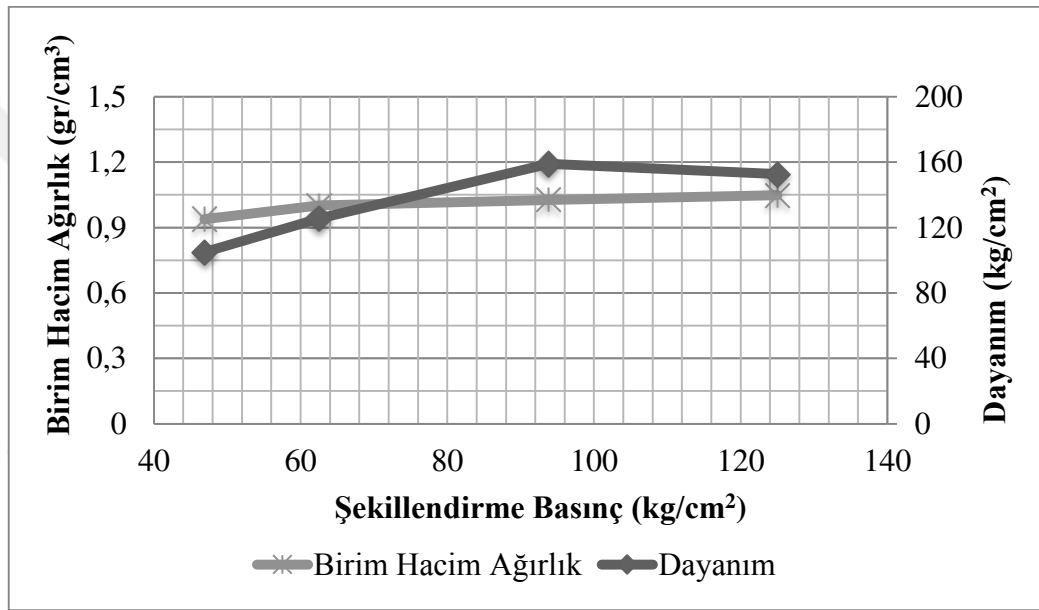
Numune	Numune içeriği	Birim Hacim Ağ. (g/cm ³)	Dayanım (kgf/cm ²)
T 7	Soma % 88 Kül, % 12 Kireç 12 bar 6 saat, 46,9 kgf/cm ²	Ölçüm Alınamadı	Ölçüm Alınamadı
T1	Soma % 88 Kül, % 12 Kireç 12 bar 6 saat, 62,5 kgf/cm ²	Ölçüm Alınamadı	Ölçüm Alınamadı
T 8	Soma % 88 Kül, % 12 Kireç 12 bar 6 saat, 93,8 kgf/cm ²	Ölçüm Alınamadı	Ölçüm Alınamadı
T 9	Soma % 88 Kül, % 12 Kireç 12 bar 6 saat, 125,0 kgf/cm ²	Ölçüm Alınamadı	Ölçüm Alınamadı

Yapılan testlerde Soma uçucu külü ile başarılı bir sonuç elde edilememiştir. Üretilen tuğlalarda aşırı genleşme ve çatlak oluşumu tespit edilmiştir. Bu sonuçlara dayanarak Soma uçucu küllü tuğla testlerinde kireç katkısı yapılmadan ve harcın ön kürlenmesi yapılarak testlere devam edilmiştir.

Tablo 3.22 % 88 Seyitömer uçucu külü + % 12 kireç katkılı tuğlalarda optimum presleme basıncının tespiti

Numune	Numune içeriği	Birim Hacim Ağ. (g/cm ³)	Dayanım (kgf/cm ²)
T10	Seyitömer % 88 Kül, % 12 Kireç 12 bar 6 saat, 46,9 kgf/cm ²	0,939	104,9
T4	Seyitömer % 88 Kül, % 12 Kireç 12 bar 6 saat, 62,5 kgf/cm ²	1,002	125,5
T11	Seyitömer % 88 Kül, % 12 Kireç 12 bar 6 saat, 93,8 kgf/cm ²	1,027	158,9
T12	Seyitömer % 88 Kül, % 12 Kireç 12 bar 6 saat, 125,0 kgf/cm ²	1,048	152,7

Seyitömer uçucu külü ile optimum kireç katkı oranında yapılan testlerde 105-159 kgf/cm² arasında basınç dayanımına sahip, birim hacim ağırlıkları 0,939-1,048 g/cm³ aralığında olan tuğlalar elde edilmiştir (Tablo 3.22, Şekil 3.13). Preslenme basıncı 62,5 kgf/cm² yeterli dayanımı sağladığı için optimum kabul edilmiştir. Seyitömer uçucu külü için, basınç dayanımı 125,5 kgf/cm² ve birim hacim ağırlığı 1,002 g/cm³ olan tuğlanın elde edildiği 62,5 kgf/cm² presleme basıncı optimum olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.13 Seyitömer uçucu külü ile elde edilen tuğlalarda presleme basıncının dayanım ve birim hacim ağırlığına etkisi

3.5.2.3 Optimum Otoklav Buhar Basıncının Tespiti

Otoklav buhar basıncının tespiti olan bu aşamada, önceki çalışmalar sonucunda belirlenen optimum karışım oranları ve presleme basıncı değerleri kullanılmıştır. Optimum şartlarda hazırlanan tuğla örnekleri 6 saat süre ile 6-8-10 ve 12 bar basınç altında kürlenme testlerine tabi tutulmuştur. Bu aşamada yapılan araştırmaların sonuçları Tablo 3.23-3.24 ve Şekil 3.15'te verilmiştir.

Test sonuçları Tablo 3.23'ten görüldüğü üzere Soma külü ile kireç katkısız ve harç ön kürlemeli tuğlalarda başarılı bir sonuç alınamadı. Bu nedenle bu aşamada Soma uçucu külü için optimum otoklav basıncı belirlenemedi (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 Soma uçucu külü ile hazırlanan tuğlalarda otoklav sonrası görünümü

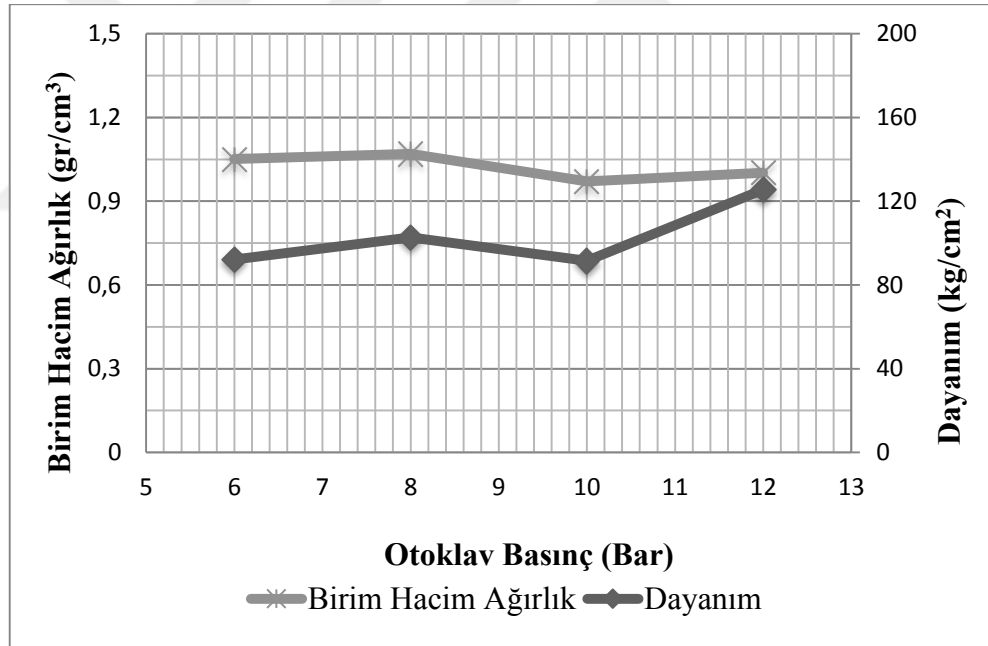
Seyitömer uçucu külü için, % 12 kireç katkılı üretilen tuğlalar için optimum otoklav basıncı Tablo 3.24 ve Şekil 3.15'te görülen sonuçlara göre 12 bar olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.23 Soma uçucu küllü tuğlalarda optimum otoklav basıncının tespiti

Numune	Numune içeriği	Birim Hacim Ağ. (g/cm ³)	Dayanım (kgf/cm ²)
T19	Soma % 100 Kül, % 0 Kireç 6 bar 6 saat 62,5 kgf/cm ²	Ölçüm Alınamadı	Ölçüm Alınamadı
T22	Soma % 100 Kül, % 0 Kireç 8 bar 6 saat 62,5 kgf/cm ²	Ölçüm Alınamadı	Ölçüm Alınamadı
T25	Soma % 100 Kül, % 0 Kireç 10 bar 6 saat 62,5 kgf/cm ²	Ölçüm Alınamadı	Ölçüm Alınamadı
T1	Soma % 88 Kül, % 12 Kireç 12 bar 6 saat 62,5 kgf/cm ²	Ölçüm Alınamadı	Ölçüm Alınamadı

Tablo 3.24 Seyitömer uçucu küllü tuğlalarda optimum otoklav basıncının tespiti

Numune	Numune içeriği	Birim Hacim Ağ. (g/cm ³)	Dayanım (kgf/cm ²)
T20	Seyitömer % 88 Kül, % 12 Kireç 6 bar 6 saat 62,5 kgf/cm ²	1,051	92,2
T23	Seyitömer % 88 Kül, %12 Kireç 8 bar 6 saat 62,5 kgf/cm ²	1,069	102,7
T26	Seyitömer % 88 Kül, % 12 Kireç 10 bar 6 saat 62,5 kgf/cm ²	0,971	91,5
T4	Seyitömer % 88 Kül, %12 Kireç 12 bar 6 saat 62,5 kgf/cm ²	1,002	125,5



Şekil 3.15 Seyitömer uçucu külü ile hazırlanan tuğlalarda otoklav basıncının dayanım ve birim hacim ağırlığına etkisi

3.5.2.4 Optimum Kürleme Süresinin Tespiti

Bu bölümünde kürleme süresinin tuğla dayanımına ve birim hacim ağırlığına etkileri araştırılması amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada şimdiye kadar tespit edilen optimum şartlarda hazırlanmış olan Soma ve Seyitömer uçucu küllü tuğlalar 12 bar otoklav basıncında 2-4-6-8 saat sürelerle otoklavda kürlenmiştir. Soma uçucu küllü tuğla harçlarına 2 gün süre ile k r kabiniinde  n kürleme işlemi yapılmıştır. Bu testlerin sonuçları Tablo 3.25-3.26'da ve şekil 3.16'da verilmiştir.

 nceki test sonuçlarına benzer şekilde Soma uçucu külü ile yapılan tuğlalar çatlaklı yapıda çıktıklarından ölçüm alınamamıştır (Tablo 3.25).

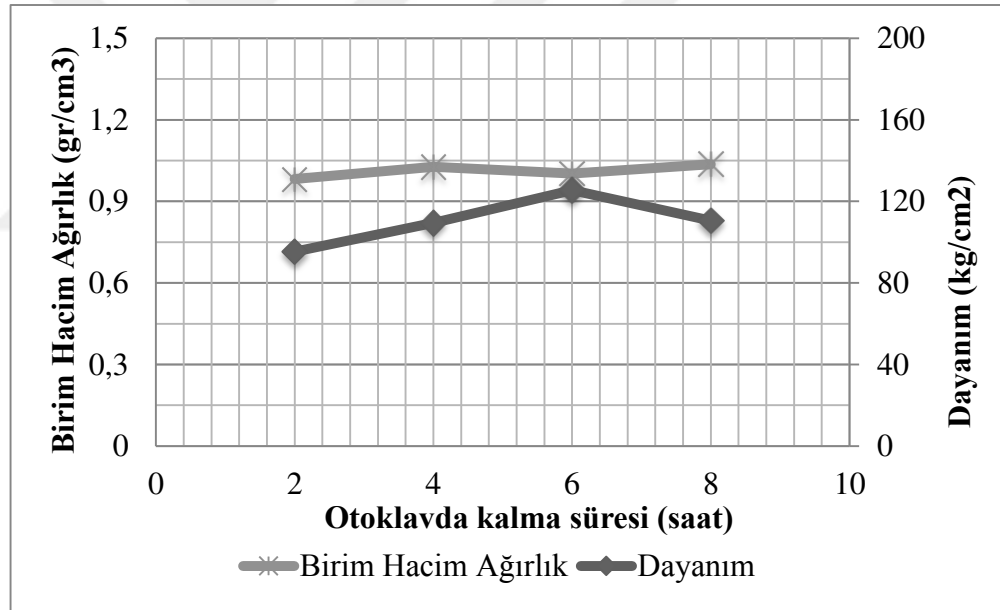
Tablo 3.25 Soma uçucu küllü tuğlalarda optimum kürleme süresinin tespiti

Numune	Numune içeriği	Birim Hacim Ağ. (g/cm ³)	Dayanım (kgf/cm ²)
T28	Soma % 100 K�l, % 0 Kireç 12 bar 2 saat 62,5 kgf/cm ²	�l�m Alınamadı	�l�m Alınamadı
T31	Soma % 100 K�l, % 0 Kireç 12 bar 4 saat 62,5 kgf/cm ²	�l�m Alınamadı	�l�m Alınamadı
T1	Soma % 88 K�l, % 12 Kireç 12 bar 6 saat 62,5 kgf/cm ²	�l�m Alınamadı	�l�m Alınamadı
T34	Soma % 100 K�l, % 0 Kireç 12 bar 8 saat 62,5 kgf/cm ²	�l�m Alınamadı	�l�m Alınamadı

Seyitömer uçucu k lleriyle yapılan tuğlaların 2 saatlik otoklavda kalma süresi 95,3 kgf/cm² basınç dayanımları ölçülmüş 6 saatlik testlerde ise dayanımlar 125,5 kgf/cm² maksimum değere ulaşmıştır. 8 saatlik testlerde basınç dayanımlarında tuğlalarda az miktarda düşüş olduğu tespit edilmiştir. Seyitömer uçucu k lleriyle yapılan tuğlalar için optimum süre 6 saat olarak belirlenmiştir (Tablo 3.26).

Tablo 3.26 Seyitömer uçucu küllü tuğlalarda optimum kürleme süresinin tespiti

Numune	Numune içeriği	Birim Hacim Ağ. (g/cm ³)	Dayanım (kgf/cm ²)
T29	Seyitömer % 88 Kül, % 12 Kireç 12 bar 2 saat 62,5 kgf/cm ²	0,982	95,3
T32	Seyitömer % 88 Kül, % 12 Kireç 12 bar 4 saat 62,5 kgf/cm ²	1,027	109,4
T4	Seyitömer % 88 Kül, %12 Kireç 12 bar 6 saat 62,5 kgf/cm ²	1,002	125,5
T35	Seyitömer % 88 Kül, %12 Kireç 12 bar 8 saat 62,5 kgf/cm ²	1,037	110,5



Şekil 3.16 Seyitömer uçucu küllü tuğlaların otoklavda 12 bar basınç kalma süresinin birim hacim ağırlığı ve dayanıma etkileri

3.5.2.7 Su Emme Testleri

Otoklavda optimum şartlarda yapılan Seyitömer uçucu küllü tuğla örneklerinin kütlece su emme oranı % 57,34 olarak tespit edilmiştir (Tablo 3.27).

Tablo 3.27 Otoklavda elde edilmiş tuğla örneklerinin su emme test değerleri

Kütlece Su Emme Deney Sonuçları			
Tuğla Kodu	Numune	Birim Hacim Ağırlığı (g/cm³)	Kütlece Su emme (%)
T4	Seyitömer	1,002	57,34

3.6 Büyük Boyutta Tuğla Üretimi

Yapılan çalışmaların bu bölümünde, önceki çalışmalar sonucunda elde edilen optimum üretim şartlarına göre büyük boyutta tuğla üretiminin araştırılmasıdır. Çalışmalarda; Soma, Seyitömer ve Yatağan termik santrallerine ait uçucu külleri kullanılarak büyük boyutlu (200 x 200 x 90 -110 mm) 100 civarında tuğla üretilmiştir.

Büyük boyut tuğla üretimi temel aşamaları aşağıda verilmiştir;

- Gerçek boyutta pan tipi mikserde % 20 civarında nemde harç karıştırma,
- Yapılması gerekiyorsa ön kürlenme, harcın kür kabinde belirli bir süre (2-4 gün) ile kürlenmesi,
- Ön kürlenme yapılan harcın tekrar % 20 nem civarına nemlendirilip gereken katkı maddeleri ile karıştırılması,
- 200 x 200 x 200 mm ebadındaki kalıpta hidrolik preste 62,5 kgf/cm² basınçta şekillendirme ve 200 x 200 x 90-110 mm ebadında, 5 kg civarında tuğla eldesi,
- Yaş tuğlaların buharlı otoklavda 12 bar basınçta 6 saat süre ile kürlenmesi.

Tuğla üretim parametrelerinin detayları aşağıda verilmiştir. Üretim parametrelerinin seçimi küçük boyutta silindirik tuğla testlerinde elde edilen optimum parametre verilerine uygun olarak yapılmıştır (Tablo 3.28).

Tablo 3.28 Büyük boyutta tuğla üretim parametreleri

Parametreler	Soma UK Tuğla	Yatağan UK Tuğla	Seyitömer UK Tuğla
Uçucu Kül (%)	95	88	88
Kireç (%)	5	12	12
Alçı (%)	0	0	0
Harç Nem (%)	20	20	20
Ön Kürleme (gün)	4	2	Yok
Presleme öncesi nem (%)	20	20	20
Presleme Basıncı (kgf/cm ²)	62,5	62,5	62,5
Otoklav Basıncı (kgf/cm ²)	12	12	12
Kürleme Süresi (saat)	6	6	6

Şekil 3.17’de büyük boyut tuğla üretimde kullanılacak olan buharlı otoklavın yapım ve montaj çalışmalarına ait görüntüler yer almaktadır.

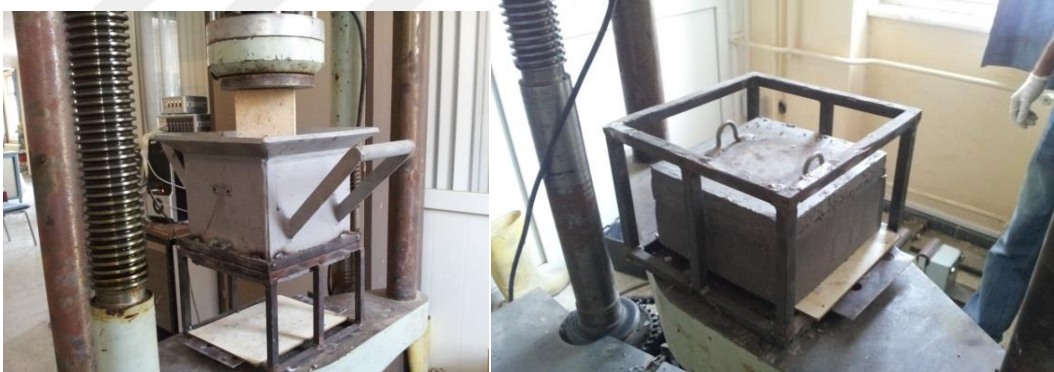


Şekil 3.17 Otoklavın imalat ve yerleşim aşamaları

Şekil 3.18-20'de büyük boyutta tuğla üretimi çalışmalarına ait görüntüler yer almaktadır. Bu görüntülerde külün harç haline getirilmesi, tuğla kalıbına dökülüp preslenmesi yer almaktadır. Daha sonrasında kür kabinine veya otoklava yerleştirirken çekilmiş görüntüler yer almaktadır.



Şekil 3.18 Kül harcının karılması ve kalıba konulan kül harcının preslenmesi



Şekil 3.19 Büyük boy tuğlalar için harç hazırlama ve tuğla şekillendirme



Şekil 3.20 Tuğlaların otoklava yüklenmesi

Nihai olarak elde edilen farklı özellikteki tuğların görüntüleri yer almaktadır (Şekil 3.21). Görüntüde ek çalışma olarak yapılmış olan delikli tuğlalar, sandviç tuğlalar ve proje kapsamında olan diğer tuğlalar da yer almaktadır.



Şekil 3.21 Otoklav ve kür kabinde elde edilmiş tuğla örnekleri

3.6.1 Tek Eksenli Basınç Dayanım Testleri

Yapılan testlerde modifiye edilmiş bilgisayar destekli hidrolik pres kullanılmıştır. Tek eksenli basınç dayanım ve eğilme dayanım testleri yapılmıştır (Şekil 3.22). Testlerde her bir tuğla çeşidi için on adet 70x70x70 mm ebadında örnekler kullanılmıştır. Tablo 3.29’da tuğla türleri ve ortalama tek eksenli basınç dayanımları verilmiştir.

Tablo 3.29 Tek eksenli basınç dayanım testleri sonuçları

	Mekanik Dayanım (kgf/cm ²)
Soma	115,2
Seyitömer	76,5
Yatağan	93,2

3.6.2 Eğilme Dayanımı Testleri

Eğilme dayanımı testlerinde tuğlalardan kesilmiş olan 200x100x50 mm ebadında tuğla örnekleri prese yerleştirilerek üzerine yük uygulanmıştır (Şekil3. 22). Test sonuçları Tablo 3.30’da yer almaktadır.

Tablo 3.30 Eğilme dayanım test sonuçları

	Eğilme Dayanım (kgf/cm ²)
Soma	4,4
Seyitömer	5,6
Yatağan	29,3



Şekil 3.22 Tek eksenli basınç ve eğilme dayanım testleri

Elde edilen test neticesinde Soma ve Seyitömer otoklav tuğlalarının eğilme dayanım değerlerinin Yatağan tuğlasına kıyasla düşük olduğu gözlemlenmiştir.

3.6.3 Donma Çözülme Testleri

Donma çözülme testi için, üretilmiş olan büyük boyutta tuğlalardan 70x70x70 mm ebatlarında küpler kesilmiştir. Elde edilen bu numuneler 25 günlük donma çözülme testlerine tabi tutulmuştur. Numuneler TS EN 13755 Madde 7’de tarif edildiği şekilde suya doygün hale getirilip dondurucuya konulmuştur (Şekil 3.23). Dondurucudaki sıcaklık -20°C ’ye düştükten sonra numuneler yaklaşık 2 saat bu sıcaklıkta bekletilmiştir. Bu süre sonunda dondurucudan çıkarılıp $(20 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki su içerisinde, tamamı su altında kalacak şekilde batırılıp en az 2 saat bu şekilde bekletilerek buzların tamamen çözülmesi sağlanmıştır. Bu işlemlerin ardından numuneler tekrar dondurucuya konularak -20°C ’a kadar soğutulmuştur. Bu şekilde donma ve çözülme işlemi 25 kez tekrarlanarak her defasında tuğla örneklerinde meydana gelen gözle görülür değişiklikler kaydedilmiştir ve kütle kayıpları not edilmiştir.



Şekil 3.23 Tuğla numunelerinin dondurucu içindeki görüntüsü

25. döngü sonrasında donma – çözülme testlerinde sadece Yatağan otoklav tuğla numuneleri sağlam kalmıştır. Diğer tuğla türlerinde ise büyük oranda parçalanmalar meydana gelmiştir. Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'te donma-çözülme testleri sonrası tuğlaların görüntüleri görülmektedir.



Şekil 3.24 25. donma-çözülme döngüsü sonrasında Seyitömer ve Yatağan otoklav tuğla örneklerinin görüntüsü



Şekil 3.25 25. donma-çözülme testi Seyitömer ve Soma kür kabini tuğla örneklerinin görüntüsü

Döngü bitimi sonrası sonra tuğla numuneleri 70⁰C‘de kurutulmuştur. Donma-çözülme testleri sonucunda meydana gelen kütle kayıpları Tablo 3.31‘de verilmiştir. Donma-çözülme testleri sonunda sadece Yatağan uçucu külünden elde edilen tuğlalar sağlam kaldığından bu tuğlaların donma-çözülme sonrası tek eksenli basınç dayanım testleri yapılmıştır. Testlerin sonuçları Tablo 3.32‘de görülmektedir.

Tablo 3.31 Tuğla örneklerinin donma-çözülme testleri sonrası kütle kayıpları

	Donma-çözülme kütle kaybı (%)
Soma	5,18
Seyitömer	9,53
Yatağan	4,85

Tablo 3.32 Donma-çözülme testleri sonrası mekanik dayanım test sonuçları

	Mekanik Dayanım (kgf/cm ²)
Soma	Ölçüm alınamadı
Seyitömer	Ölçüm alınamadı
Yatağan	97,7

3.6.4 Birim Hacim Ağırlık ve Kütlece Su Emme Oranları Tespiti

Birim hacim ağırlık ve su emme oranı tespiti için her kül çeşidi için 5'er adet gerçek boyut tuğla kullanılmıştır. Tuğlaların hacmi, tuğla ebadı ölçümleri ve ağırlıkları, 70 °C 'de kurutulduktan sonra tartılarak tespit edilmiştir. Su emme testi, tuğlalar 24 saat suda bekletilerek yapılmıştır. Yapılan ölçüm ve testlerin sonuçları Tablo 3.33'te verilmiştir.

Tablo 3.33 Tuğlaların birim hacim ağırlık ve kütlece su emme oranları

	Birim hacim ağırlık g/cm ³	Kütlece su emme oranı %
Soma	1,34	23,75
Seyitömer	0,97	60,87
Yatağan	1,27	34,78

Test sonuçları karşılaştırıldıklarında Seyitömer uçucu külünün kütlece su emme oranının en yüksek olduğu görülmektedir. Yığın yoğunluğu en düşük olan Seyitömer uçucu külünde otoklavda 0,97 g/cm³ birim hacim ağırlığında oldukça hafif tuğlalar üretilebilmiştir.

3.6.5 Tuğlaların Isıl İletkenlik Katsayılarının Tespiti

Üretilmiş olan büyük boyutta tuğlaların ısı iletkenlik katsayılarının tespitinde Şekil 3.26'da görülen ShowaDenko K.K. Shoterm QTM-D2 cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.26 ShowaDenko K.K. Shoterm QTM-D2 Isıl iletkenlik ölçüm cihazı

Isıl iletkenlik ölçme cihazı, hot wire yöntemine dayanmaktadır ve 0,02-10 W/mK aralığında ısı iletkenlik katsayısını ölçebilmektedir. Büyük boyut tuğlalarda tespit edilen ısı iletkenlik katsayıları Tablo 3.34’te verilmiştir.

Tablo 3.34 Büyük boyut tuğlaların ısı iletkenlik katsayıları

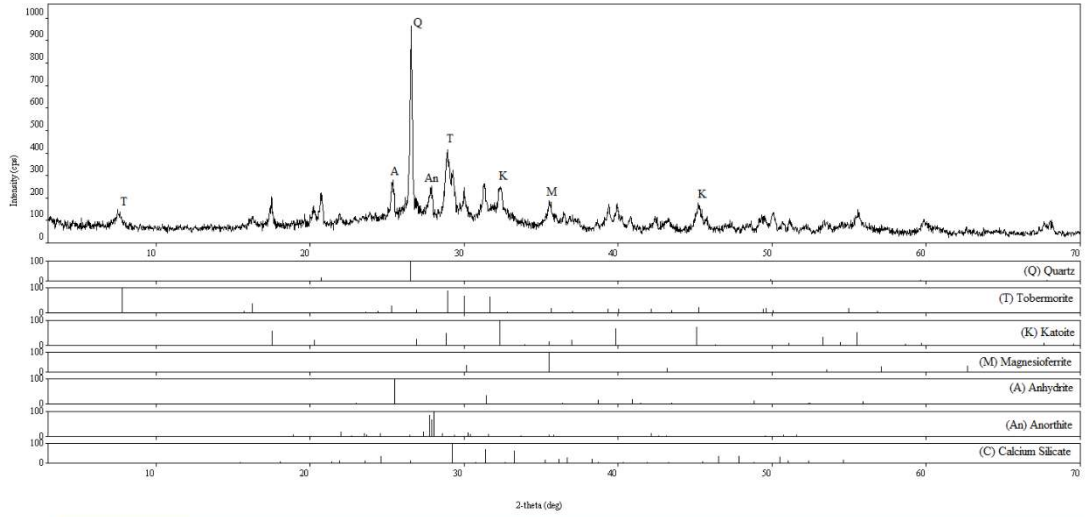
	Isıl iletkenlik katsayısı W/mK
Soma	0,378
Seyitömer	0,225
Yatağan	0,323

3.6.6 Büyük Boyut Tuğlaların XRD Analizleri

Üretilen tuğlaların mineralojik bileşimi, RigakuMiniflex II marka (Cu-X ışın tüplü, 30kV, 15 mA) X-ışınları difraktometresinde toz difraksiyon yöntemiyle 0-90° 2θ aralığında tespit edilmiştir.

3.6.6.1 Otoklavda Elde Edilen Tuğlaların XRD Analizleri

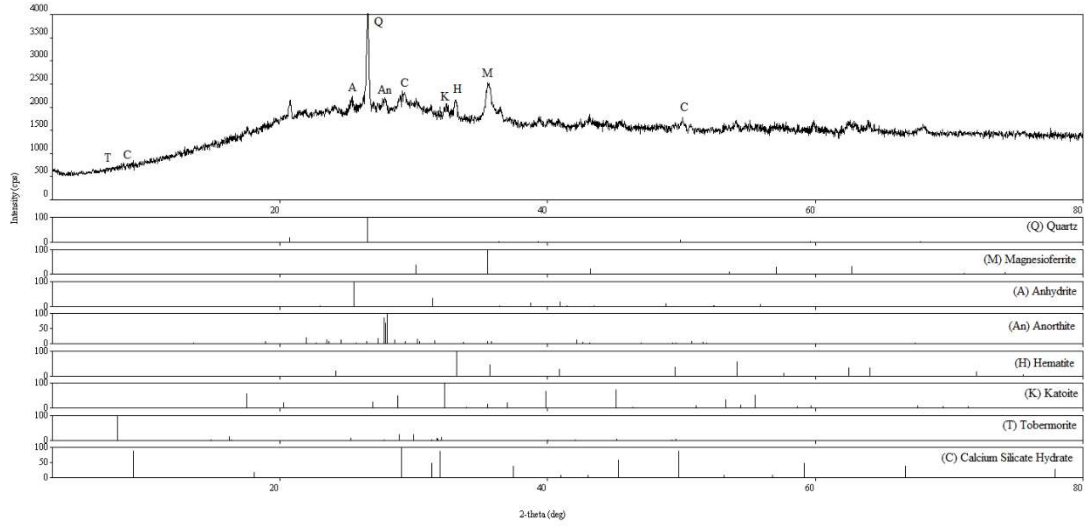
3.5.6.1.1 Soma Otoklav Tuğla. Soma otoklav tuğlanın Kuvars (SiO₂), Anhidrit (CaSO₄), Katoit (Ca_{2,93}Al_{1,97}Si_{6,64}O_{2,56}).(OH)_{9,44}), Anortit (CaAl₂Si₂O₈), Tobermorit (9A, Ca₄(Si₆ O₁₅)(OH)₂ (H₂O)₅, Magnesioferrit (MgFe³⁺O₄), ana fazlar olarak tespit edilmiştir (Şekil 3.27).



Şekil 3.27 Soma uçucu küllü otoklavda üretilmiş büyük boyut tuğlanın X-Işını difraktogramı

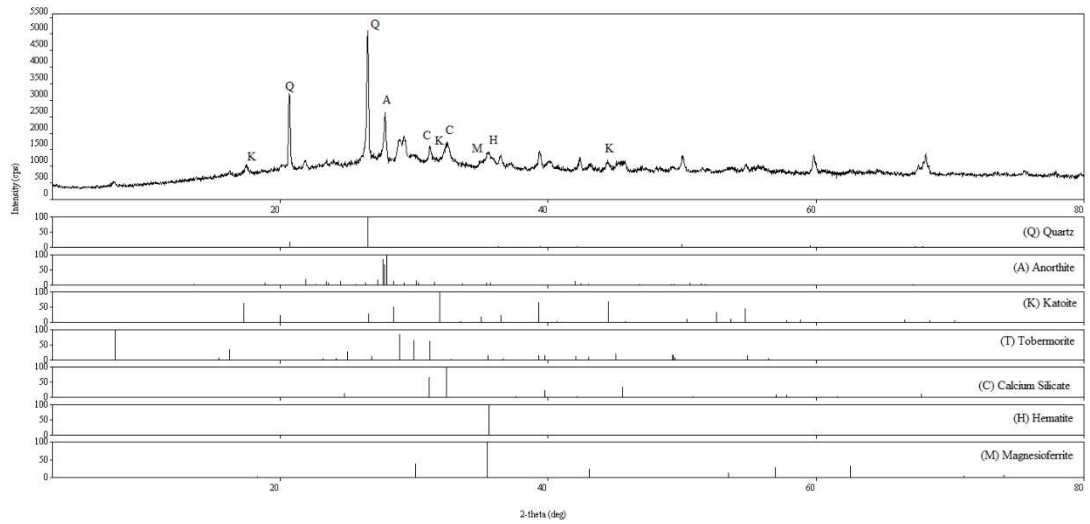
Otoklavda sağlam tuğla elde edilmesi yüksek buhar basıncında ve sıcaklıkta (180 -200 °C) çok miktarda oluşan Tobermorit C-S-H ve Katoit C-A-S-H fazlarının varlığına bağlanabilir.

3.6.6.1.2 Seyitömer Otoklav Tuğla. Seyitömer Otoklav kürü tuğlada Kuvars (SiO_2), Magnesioferit ($\text{MgFe}^{3+}\text{O}_4$), Anhidrit (CaSO_4), Anortit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), Hematit (Fe_2O_3),), Katoit ($\text{Ca}_{2.93}\text{Al}_{1.97}\text{Si}_{1.64}\text{O}_{2.56} \cdot (\text{OH})_{9.44}$), Tobermorit ($\text{Ca}_4(\text{Si}_6\text{O}_{15})(\text{OH})_2 (\text{H}_2\text{O})_5$), Kalsiyum Silika Hidrat ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2-4\text{H}_2\text{O}$) ana fazlar olarak tespit edilmiştir (Şekil 3.28).



Şekil 3.28 Seyitömer uçucu küllü otoklavda üretilmiş gerçek boyut tuğlanın X-Işını difraktogramı

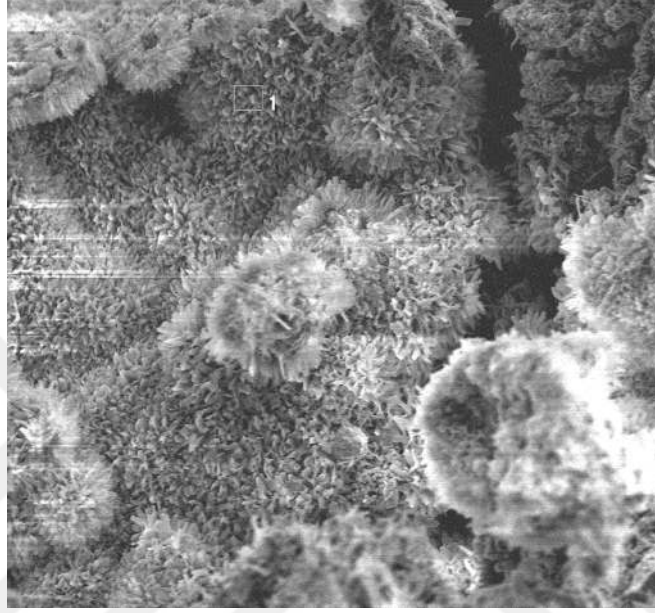
3.6.6.1.3 Yatağan Otoklav Tuğla. Şekil 3.29’da Yatağan Otoklav tuğlanın Kuvars (SiO_2), Anortit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), Katoit ($\text{Ca}_{2,93}\text{Al}_{1,97}\text{Si}_{6,40}\text{O}_{2,56}(\text{OH})_{9,44}$), Tobermorit (9A, $\text{Ca}_4(\text{Si}_6\text{O}_{15})(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_5$), Kalsiyum Silikat (Ca_2SiO_4), Hematit (Fe_2O_3), Magnesioferit ($\text{MgFe}^{3+}\text{O}_4$) içerdiği tespit edilmiştir.



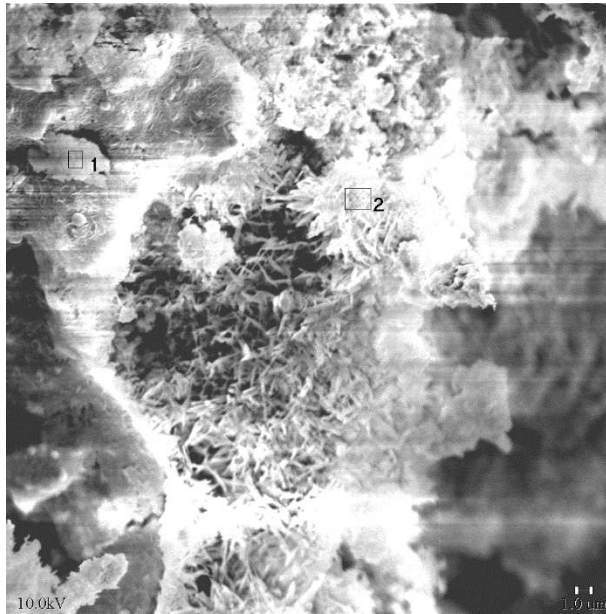
Şekil 3.29 Yatağan uçucu küllü otoklavda üretilmiş gerçek boyut tuğlanın X-Işını difraktogramı

3.6.6.2 Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Görüntüleri

Tuğla örneklerinin yüzey yapıları Jeol JXA733 Superprob marka taramalı elektron mikroskopunda, ikincil elektron görüntüsü yöntemiyle incelenmiştir (Şekil 3.30-3.31). SEM fotoğrafları ile tobermorit oluşumları gözlemlenmiştir.



Şekil 3.30 Soma uçucu küllü tuğlada tobermorit oluşumunun SEM görüntüsü



Şekil 3.31 Soma uçucu küllü tuğlada tobermorit oluşumunun SEM görüntüsü

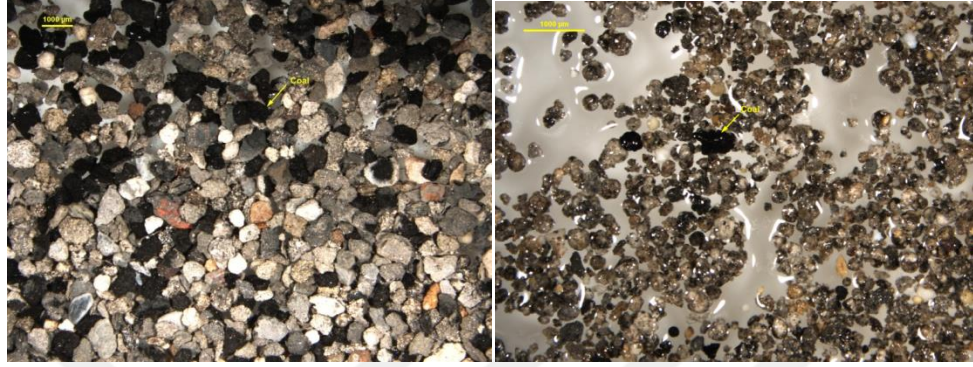
3.7 Zig zag Havalı Separatörle Uçucu Küldeki Karbonun Kazanımı Üzerine Yapılan Çalışma

Zig zag separatör yöntemi, kanal içerisinde oluşturan akıma beslenen malzemenin yoğunluk ve/veya tane boyut farkına dayalı olarak ayırma yöntemidir. Kanal içerisinde oluşturulan türbülans sayesinde ince veya hafif malzeme (karbon) üst akıma kapılarak üst hazneye toplanmaktadır. Ağır ve iri malzeme (kül) alt haznede toplanmaktadır (Şekil 3.32). Tez çalışmasının bu bölümünde tuğla üretimi sırasında içerisinde yanmamış kömür bulunması sebebi ile kullanılamayan uçucu küllerin (212/800 μm) tuğla üretimine dahil edilmesi amaçlanmıştır. Bu sebeple uçucu kül içerisinde bulunan kömürün Zig zag havalı separatör kullanılarak ayrılması hedeflenmiştir. Çalışma Erasmus programı kapsamında yapılmıştır ve Clausthal Teknik üniversitesi Mineral ve Atık İşleme bölümü laboratuvarları kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada tez kapsamında olan Seyitömer ve Yatağan uçucu külleri üzerinde yapılması planlanmıştır. Fakat tüm ön hazırlıklar yapılmasına rağmen numunelerin Almanya'ya gönderilmesinde yaşanan güçlüklerinden dolayı numuneler gönderilememiştir. Bu sebeple Almanya'da bulunan üç farklı termik santrale ait uçucu küller ile test çalışmaları yapılmıştır.

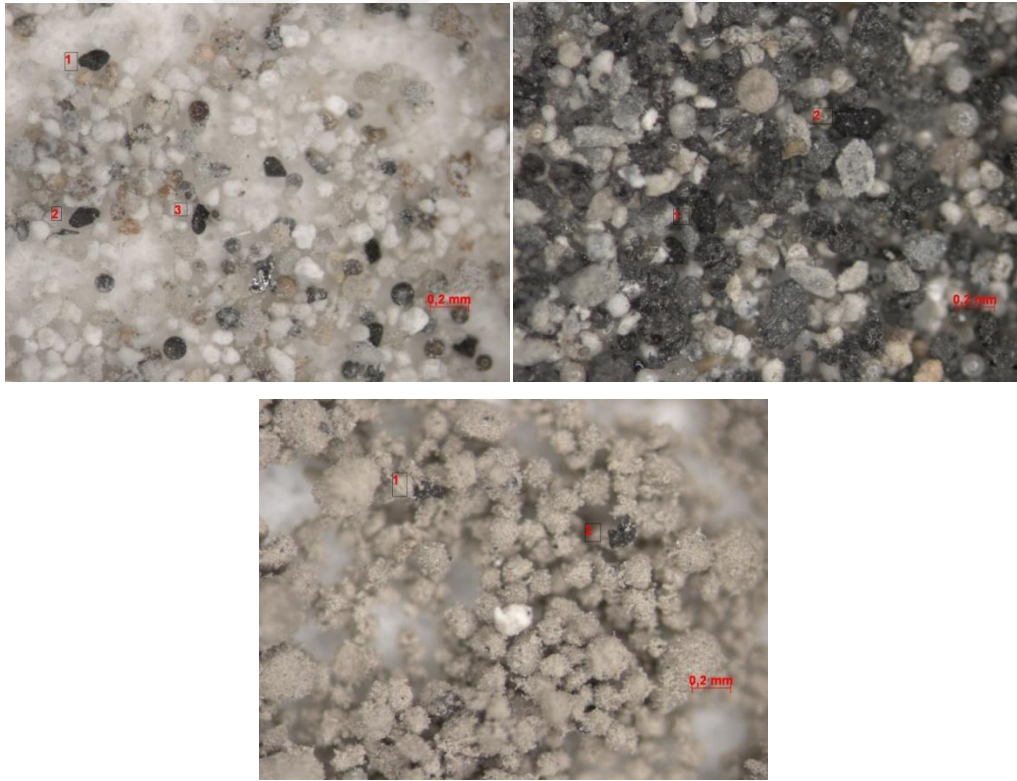


Şekil 3.32 Laboratuvar tipi Zig zag havalı separatör

Seyitömer ve Yatağan uçucu küllerine ait mikroskop görüntüleri Şekil 3.33'te görülmektedir. Almanya'da farklı santrallerden elde edilen uçucu küllerin mikroskop görüntüleri ise Şekil 3.34'de görülmektedir.



Şekil 3.33 Seyitömer ve Yatağan Termik Santrali'ne ait mikroskop görüntüleri



Şekil 3.34 Almanya'da incelenen üç farklı termik santral uçucu kül numunesinin mikroskop görüntüleri

Üç farklı santralden elde edilen uçucu küllerin özelliklerine bakıldığında tane boyutlarının Seyitömer ve Yatağan uçucu küllerine kıyasla çok ince olduğu görülmektedir. Uçucu küllerin içerdiği yanmamış karbon miktarına bakıldığında ise termik santral 1 ve 2'nin yanmamış karbon miktarı termik santral 3'e göre oldukça az olduğu görülmektedir (Tablo 3.35-3.37). Ayrıca yine aynı şekilde Tablo 3.35-3.37'e bakıldığında 2 nolu numunenin çok daha ince olduğu ve bu sebeple zig zag havalı seperatörle ayırmaya elverişli olmadığı anlaşılmıştır. Bu sebeple 2 nolu numune testin dışında tutulmuştur.

Tablo 3.35 Termik santral 1'e ait olan külün kimyasal özellikleri

Tane Boyutu (µm)	Ağırlık (%)	C (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
200	4,58	1,96	3,45	2,87	26,71	1,65
200/160	1,8	1,93	3,43	2,64	26,74	1,61
160/100	8,14	2,18	3,44	2,78	26,54	1,62
100/63	18,3	1,84	3,52	2,59	26,53	1,64
63	67,18	1,8	3,79	2,87	26,06	1,98

Tablo 3.36 Termik santral 2'e ait olan külün kimyasal özellikleri

Tane Boyutu (µm)	Ağırlık (%)	C (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
200	4,28	1,96	15,21	3,84	18,82	3,14
200/160	2,1	1,93	12,35	3,96	23,12	3,12
160/100	7,14	2,18	5,44	2,16	33,3	1,79
100/63	9,3	1,84	1,38	0,81	38,27	0,66
63	77,18	1,8	0,82	0,62	34,76	0,42

Tablo 3.37 Termik santral 3'e ait olan külün kimyasal özellikleri

Tane Boyutu (µm)	Ağırlık (%)	C (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
200	2,18	22,4	18,57	8,65	2,01	2,62
200/160	1,37	17,39	22,35	9,33	1,56	2,01
160/100	6,71	7,1	25,88	11,42	2,14	2,8
100/63	25,16	3,04	25,53	11,84	2,88	4,17
63	64,58	2,5	24,68	12,01	3,14	4,25

Testlerde kullanılan uçucu külün fraksiyon aralığı 100µm üstüdür. Cihazda basınç farkına dayalı emme gücü oluşmaktadır. Yapılan testlerde üç farklı basınç farkı kullanılmıştır (2,5, 4 ve 5 mbar).

Tablo 3.38 Termik santral 1'in farklı emme kuvvetinde yapılan test sonuçları

Termik santral 1			
	Basınç farkı (mbar)	Ag (%)	C %
Üst Akım	5	58,05	5,29
	4	35,75	5,5
	2,5	12,48	5,54
Alt Akım	5	41,95	4,89
	4	64,25	4,87
	2,5	87,52	5,1

Tablo 3.39 Termik santral 3'in farklı emme kuvvetinde yapılan test sonuçları

Termik santral 3			
	Basınç farkı (mbar)	Ag (%)	C %
Üst Akım	5	99,22	10,86
	4	62,70	11,94
	2,5	28,08	21,41
Alt Akım	5	0,78	1,6
	4	37,30	8,3
	2,5	71,92	9,12

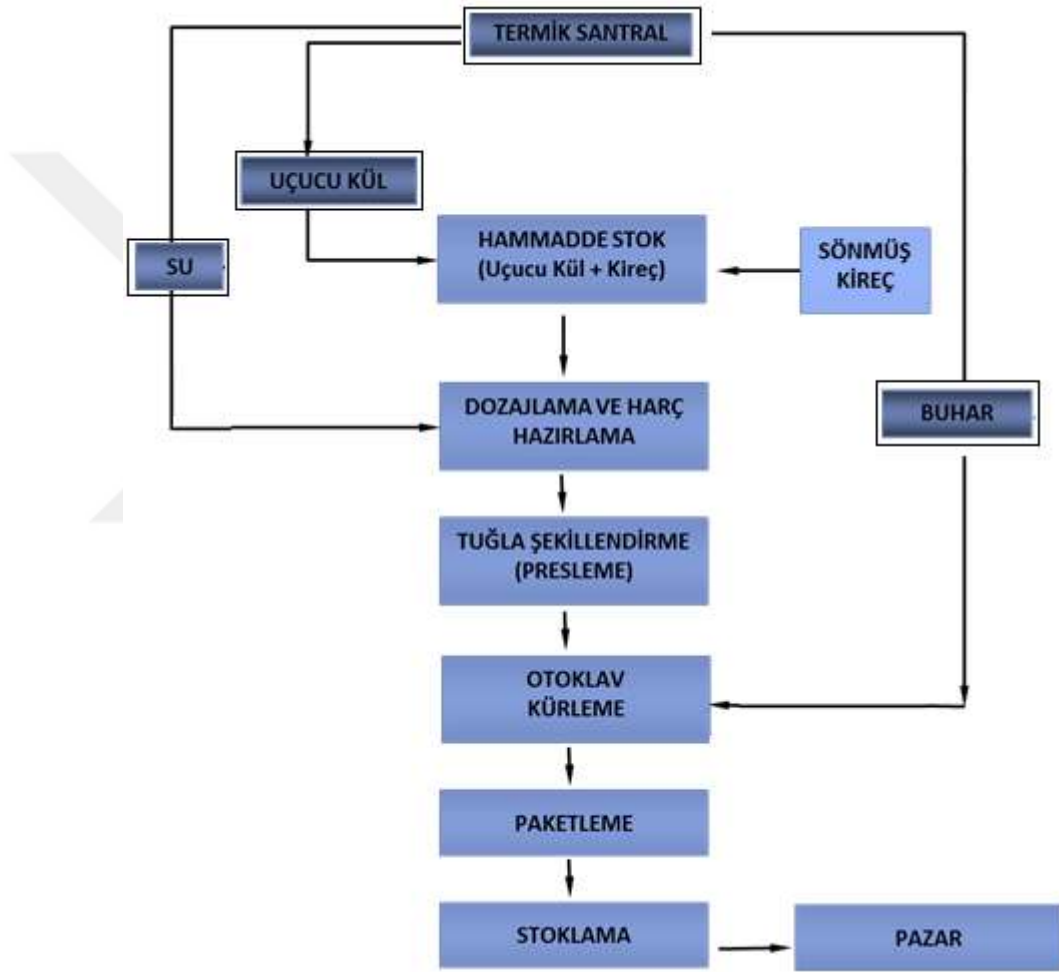
Zig zag havalı separatörle yapılan test sonuçları Tablo 3.38-3.39’da görülmektedir. Test sonuçları incelendiğinde 1 nolu numunede yeterli verim sağlanamadığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak çok ince tane boyutunda çalışma yapılması olarak düşünülmektedir. Ancak diğerlerine nazaran daha kaba olan 3 nolu santral külünde kısmi başarı sağlanmıştır. Tablo 3.9’da görüldüğü üzere cihazda 2.5 mbar fark basıncında karbon oranı yüksek ayırma işlemi gerçekleşmiştir. Alt akımda kalan külün miktarı % 71,92 ve yanmamış karbon değeri % 9,12 olarak tespit edilmiştir.



BÖLÜM DÖRT

MALİYET ANALİZİ

Bu bölümde Endüstriyel boyutta tuğla üretiminin ekonomik değerlendirmesi yapılmıştır. UK/Kireç tuğlası üretim tesisinin termik santral sahası içinde veya santral yanına kurulacak şekilde düşünülerek bir akım şeması kabaca Şekil 4.1'deki gibidir.



Şekil 4.1 Uçucu kül/kireç tuğlası üretim tesis akım şeması

Hazırlanan akım şemasına göre termik santralin uçucu külü tuğla tesisindeki uçucu kül silosuna pnömatik bir gönderici ile sevk edilecektir. Sönmüş toz kireç silobaslar ile sevk edilip tesisteki siloya kamyonlardan pnömatik olarak iletilecektir. Belirlenen miktarlarda uçucu kül ve kireç, tartım bantları vasıtasıyla sürekli çalışan yatay bir karıştırıcıda su ilavesi ile homojen bir şekilde karıştırılıp harç haline getirilecektir. Elde edilen UK/Kireç karışımı 5 dm^3 hacminde 2000 tuğla/saat ($10 \text{ m}^3/\text{saat}$) kapasitede tuğla şekillendiren 3 adet otomatik tuğla pres ünitesine sevk edilecektir. Preslenen tuğlalar, otoklav vagonlarına dizilecek ve kürlenmek üzere 2,7 m çapında 31 m uzunluğundaki 6 adet otoklava yüklenecektir.

Otoklavların ihtiyacı olan 12 bar basınçtaki buhar termik santralin buhar kazanından çekilen bir buhar hattı üzerinden sağlanacaktır. Tuğlalar otoklavda 6 saat kürlenip, sertleştikten sonra otoklavlardan çıkartılıp paketleme ünitesine aktarılıp burada paletlenip paketlenildikten sonra ürün stok sahasına sevk edilecektir.

Seyitömer termik santralinde kurulacak $200\ 000 \text{ m}^3/\text{yıl}$ kapasiteli, $190 \times 190 \times 135$ mm ebadında yaklaşık $1000 \text{ kg}/\text{dm}^3$ birim hacim ağırlığında UK/kireç tuğlası üretimine uygun bir tesis için gerekli ekipmanların cinsleri ve özellikleri ile toplam tesis yatırım ve üretim maliyetinin dökümü verilmiştir (Tablo 4.1 ve Tablo 4.2). Hesaplardan görüleceği üzere bu tesisin yatırım maliyeti 6 milyon TL civarında, tuğla üretim birim maliyeti ise amortisman dahil $36 \text{ TL}/\text{m}^3$ mertebesinde olacaktır.

Tablo 4.1 Seyitömer uçucu kül/kireç otoklav tuğla tesis yatırım maliyeti hesabı

Ana Ekipmanlar	Özellikleri	Adet	Güç kW	Toplam Güç kW	Birim Maliyet TL	Toplam Maliyet TL
Uçucu kül silosu	200 m ³	1			150 000	150 000
UK silo üstü filtre	3000 m ³ /s	1	15	15	30 000	30 000
Kireç silosu	100 m ³	1			75 000	75 000
Kireç silosu filtre	3000 m ³ /s	1	15	15	30 000	30 000
UK tartım bandı	600x3000 mm	1	3	3	20 000	20 000
Kireç tartım bandı	600 x 3000 mm	1	3	3	20 000	20 000
Harç karıştırıcı sürekli tip	30 m ³ /saat	1	90	90	250 000	250 000
Otomatik tuğla presi besleme bandı	600 x 12000 mm	3	5,5	16,5	25 000	75 000
Otomatik tuğla presi	2000 tuğla/s, 10 m ³ /s	3	15	45	150 000	450 000
Otoklav	2,68 x 31 m, 175 m ³	6		0	400 000	2 400 000
Hidrolik ünite	100 bar	2	15	30	50 000	100 000
Kompresör	7 m ³ /dak	1	45	45	50 000	50 000
Uçucu kül pnömatik transport	30 m ³ /saat, max. 200 m	1	75	75	150 000	150 000
Diğer ekipmanlar, aydınlatma		1	100	100	100 000	100 000
Tahmini kurulu güç	A			438		
Çekilen güç (tahmini % 75 kurulu güç)	A x 0,75			328		
Toplam ekipman maliyet	B					3 900 000
Tesis toplam maliyet	B x 1,5					5 850 000

Tuğlalar % 40 oranın da delikli tipte ve 600 kg/m³ birim hacim ağırlıkta daha hafif tuğla üretilmesi planlanırsa önemli bir maliyet kalemi olan kireçten % 40 oranında ve elleçlenen kül miktarında düşüş olacaktır. Bu yolla elektrik enerjisi sarfiyatından ortalama olarak % 40 oranında tasarruf sağlanacağından üretim maliyeti 29 TL/m³ civarına düşebilecektir.

Tablo 4.2 Seyitömer uçucu kül/kireç otoklav tuğla üretim ve ürün üretim maliyeti hesabı

Üretim		
Net üretim	m ³ /saat	30
Net üretim	m ³ /gün	660
Net üretim	m ³ /ay	17 160
Net üretim	m ³ /yıl	205 920
Elektrik sarfiyat (+ % 25 emniyet)	kWh/m ³	18,2
Isıl enerji	kWh/ m ³	100
Personel , 1 Müh, 2 Teknisyen 27 işçi	TL/ay	79 500
Elektrik birim maliyet	TL/kWh	0,25
Kireç maliyet	TL/t	110
Kömür maliyet	TL/t, 2000 kcal/kg	50
Amortisman, 10 yıl	TL/yıl,	585 000
Ürün Birim Maliyet		
İşçilik maliyet	TL/m ³	4,6
Elektrik maliyet	TL/m ³	4,6
Isıl enerji maliyet	TL/m ³	2,2
Kireç maliyet	TL/m ³	13,2
Tamir bakım	TL/m ³	1,4
Ürün paketlenme	TL/m ³	7,5
Amortisman	TL/m ³	2,8
Toplam maliyet	TL/m³	36,3

Otoklav maliyetini ortadan kaldırmak için, tuğlaların atmosferik basınçta kürleme yolu tercih edilebilir. Bu durumda tuğlaların 4 hafta üstü kapalı ve nemli ortamda kürlenmeleri gerekli olacaktır. Buda oldukça büyük kürleme alanlarına ihtiyaç duyulacaktır. Bu şekilde tuğla üretiminde tesis yatırım maliyeti ekipman açısından azalmasına karşın tesisin kapladığı sahanın maliyeti ortaya çıkacaktır. Üretim maliyetinde otoklav safhasındaki maliyeti ortadan kalkarken buna karşılık açıkta alanda kürlemedeki yaklaşık 1 aylık tuğlanın (17 000 m³) elleçleme masrafları ortaya çıkacaktır.

BÖLÜM BEŞ

SONUÇLAR

Yapılmış olan tez çalışmasında Soma, Seyitömer ve Yatağan termik santralleri uçucu külleri kullanılarak araştırma yapılmıştır. Yapılan çalışmanın amacı kömürle çalışan termik santral uçucu küllerinin ucuz, hafif ve ısı yalıtımı yüksek tuğla olarak değerlendirilebilme imkânları araştırmaktır. Araştırma sonucunda bu küllerden yapı sektöründe kullanılabilecek özellikte tuğla üretiminde gerekli olan optimum parametreler belirlenmiş ve büyük boyutta tuğlalar pilot boyutta cihazlar kullanılarak üretilmiştir.

Tez çalışması sonucunda şu önemli sonuçlar elde edilmiştir;

Uçucu küllerin ASTM C 618 standardına göre sınıflandırmaları Soma uçucu külü C sınıfı, Seyitömer uçucu külü F sınıfı ve Yatağan uçucu külü C ve F sınıfı arasında bir nitelik göstermektedir.

Soma uçucu külünde tespit edilen ana mineral fazları Kireç (CaO), Kuvars (SiO₂), Hematit (Fe₂O₃), Anhidrit (CaSO₄), Anortit (CaAl₂Si₂O₈) ve Mullittir (Al₄Si₂O₁₀).

Morfolojik analizinde Soma uçucu külü, büyüklükleri 0,2-30 µm arasında değişen çoğunluğu yüzeyi pürüzsüz küresel taneciklerden (mikrosferler) oluştuğu gözlenmiştir. Mikrosferlerin bazılarının pleosferler (içi daha küçük mikrosferlerle dolu) olduğu gözlenmiştir. Kül ayrıca şekilsiz köşeli tanecikler de ihtiva etmektedir. Senosferlerin Potasyumca zengin Kalsiyum alumino silikatlar olduğu yapılan mikroanalizlerden belirlenmiştir. Pürüzlü ve köşeli yapıların Anhidrit, kuvars, serbest kireç olduğu görülmüştür.

Soma tuğla örneklerinde düşük kireç katkısında dahi kütleme sonrası tuğla örneklerinde kalan reaksiyona girmemiş serbest CaO miktarı oldukça yüksektir. Tuğlaların hacimsel genleşmesi ve çatlaklı yapı göstermeleri kütleme sonu tuğla bünyesinde kalan ve Ca(OH)₂ haline dönüşen yüksek miktardaki serbest CaO'ın bir sonucudur.

Serbest CaO'ın tuğla üretimi öncesi ön kürleme ile Ca (OH)₂'e dönüştürülmesi sayesinde problemlili olan Soma uçucu külünden büyük boyut tuğla üretiminde başarı elde edilmiştir.

Seyitömer uçucu külünde tespit edilen mineral fazları; Kuvars (SiO₂), Hematit (Fe₂O₃), Anortit (CaAl₂Si₂O₈), Mullit (Al₄Si₂O₁₀) ve Magnesioferrit (MgFe³⁺ O₄) ana fazlardır.

Seyitömer külü az miktarda mikrosfer içermesine karşın çok miktarda gözenekli parçacıklar ihtiva etmektedir. Şekilsiz gözenekli taneciklerin, yapılan mikro analizlerde, Kalsiyum alumina silikat, Anhidrit, kaolinitten oluşmuş mullit, yanmamış karbon oldukları tespit edilmiştir.

Yatağan uçucu külünde Kuvars (SiO₂), Kireç (CaO), Hematit (Fe₂O₃), Anortit (CaAl₂Si₂O₈), Sanidin [(K,Na)(Si,Al)₄O₈], Mullit (Al₄Si₂O₁₀), Anhidrit (CaSO₄) ve Dolomit (CaMgCO₃) mineral fazları tespit edilmiştir.

Yatağan uçucu külünde mikrosfer tanecikler az miktarda olup kül genelinde şekilsiz gözenekli taneciklerden oluşmuştur. Yapılan mikroanalizlerde kalsiyum alumina silikat ve alüminyum silikat oluşumlarının çoğunlukta olduğu tespit edilmiştir.

Buharlı otoklav ile tuğla üretiminde 12 bar basınç ve 6 saatlik kürleme süresinin her tipteki uçucu kül için yeterli olduğu tespit edilmiştir.

Otoklavda yüksek basınçta yapılan tuğla üretim denemelerinde Soma, Yatağan ve Seyitömer uçucu küllerinden yeterli dayanımda büyük boyutta tuğla üretimi mümkündür.

Buharlı otoklavda 12 bar buhar basıncında elde edilen tuğlalarda ise bağlayıcı fazların genellikle, Tobermorit (Ca₄(Si₆ O₁₅)(OH)₂ (H₂O)₅ ve Katoit (Ca_{2,93}Al_{1,97}Si_{6,40}O_{2,56}).(OH)_{9,44}) oldukları tespit edilmiştir.

Tablo 5.1 Otoklavda elde edilen gerçek boyut (200 x 200 x 90-110 mm) tuğlaların optimum üretim şartları ve tespit edilen özellikleri

Parametreler	Soma UK Tuğla	Yatağan UK Tuğla	Seyitömer UK Tuğla
Uçucu Kül (%)	95	88	88
Kireç (%)	5	12	12
Alçı (%)	0	0	0
Harç Nem (%)	20	20	20
Ön Kürleme (gün)	4	2	Yok
Presleme öncesi nem (%)	20	20	20
Presleme Basıncı (kgf/cm ²)	62,5	62,5	62,5
Otoklav Basıncı (kgf/cm ²)	12	12	12
Kürleme Süresi (saat)	6	6	6
Birim Hacim Ağırlığı (g/cm ³)	1,34	1,27	0,97
Isı İletkenlik (W/m ⁰ K)	0,378	0,323	0,225
Tek Eksenli Basma Dayanım (kgf/cm ²)	111,7	93,2	76,5
Eğilme Dayanımı (kgf/cm ²)	4,38	29,3	5,6
Su Emme Oranı (Ağ.%)	23,75	34,78	60,87
Donma ve Çözülme Sonrası Kütle kaybı (%)	5,18	4,85	9,53
Donma ve Çözülme Sonrası Mekanik Dayanım (kgf/cm ²)	ÖA	97,7	ÖA

ÖA:Ölçüm Alınamadı

Yapılan ön ekonomik değerlendirmelere sonucuna göre, termik santral sahası içinde veya yanında kurulmuş, 200 000 m³/yıl tuğla üretim kapasitesine sahip buharlı otoklav yöntemi ile hafif tuğla üreten bir tesisin ilk yatırım maliyeti 6 milyon TL ve tuğla üretim maliyetinin 30-35 TL/m³ civarında olacağı tahmin edilmektedir.

Otoklav yöntemi ile UK/kireç tuğlası üretimi yapan tesis günümüzde yoktur. Bu nedenle, bu plana dayalı geliştirilen tuğlanın tahmin edilen maliyetinin başka tesislerde elde edinilenlerle karşılaştırma imknı bulunmamaktadır. Fakat açıkta kürleme yöntemi ile özellikle Hindistan'da ucuz insan gücüne dayalı basit işletmelerde UK/kireç/alçı tuğla üretimi mevcuttur. Bu işletmelerdeki maliyetlerin bu çalışmadaki n ekonomik değerlendirmeye konu olan modern ve otoklav yöntemi kullanan bir tesisin maliyetleri ile karşılaştırılması sağlıklı olmayacaktır.

Ülkemizde, bu çalışmada geliştirilmiş olan tuğla özelliklerine en yakın olan tuğla tipi 600 kg/m³ birim hacim ağırlığı olan otoklavda üretilmiş gazbeton tuğlalar olup bu tuğlaların fiyatı 100-120 TL/m³ tür. Gazbeton tuğla üretim maliyetleri üzerine bilgi bulunmamaktadır.

Kömür yanma ürünlerinin özellikle yapı sektöründe kullanımı, termik santrallerin çevresel etkilerinin azaltılmasını, elektrik üretim maliyetinin azaltılmasını, doğadaki katı atıkların depolanma miktarının, atmosferdeki gaz emisyonunun azaltılmasını ve doğal kaynakların korunmasını sağlamaktadır. Uçucu küllü tuğlaların üretimi ile termik santral uçucu küllerinin çevresel olumsuzluklarını en aza indirmenin de yolu açılmış olacaktır. Uçucu küllü tuğlaların hammaddesi çok ucuz ve üretiminde harcanan enerji miktarı çok düşük olduğundan bu ürünün ülke ekonomisine ve çevreye katkısı büyük olacaktır. Ayrıca geleneksel tuğla üretiminde kullanılan kilin elde edildiği kil ocaklarının ve pişirmede ortaya çıkan atık gazların çevreye verdiği rahatsızlıkta kullanılan yöntemin düşük enerji gereksinimi nedeniyle azalma olacaktır.

Bu çalışmada üretilen tuğlalar dolu tuğlalar olup en düşük birim hacim ağırlıkları 1 kg/dm³ civarındadır. Yatay ve düşey delikli uçucu küllü tuğla üretimi ile gazbeton kadar hafif ve yeterli sağamlıkta üretim denemelerinin yapılması önerilir.

KAYNAKLAR

- Ağar, E. (2007). *Seyitömer termik santral uçucu küllerinin yapı sektöründe kullanılabilirliğinin araştırılması*. Dokuz Eylül Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Alkaya, D. (2009). Uçucu küllerin zemin iyileştirmesinde kullanılmasının incelenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5 (1), 61-72.
- Aruntaş, H. Y. (2006). Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi*, 21 (1), 193-203.
- ASTM C 618, (2000). *Standart specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete*.
- Aytekin, S. (2009). *Uçucu küllerinin killi zeminlerin ıslahında kullanımı*. Çukurova Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- Ball, M.C. ve Carroll, R.A. (1999). Studies of hydrothermal reactions of UK pulverized ashes. Part 1: Reactions between pulverized fuel ash and calcium hydroxide, *Advances in. Cement Research*, 11 (2), 53–61.
- Baoju, L., Youjun, X., Shiqiong, Z. ve Jian, L. (2001). Some factors affecting early compressive strength of steam-curing concrete with ultra fine fly ash. *Cement and Concrete Research*, 31 (10), 1455– 1458.
- Bayat, O. (1998). Characterisation of Turkish fly ashes. *Elsevier Science Ltd.*, 77 (9/10), 1059-1066.
- Bayat, O. (1995). Uçucu kül değerlendirmesinin maliyet analizi. *Madencilik Dergisi*, XXXIV (1), 21-36.

- Bentli, İ., Uyanık, A.O., Demir, U. ve Şahbaz, O. (2005). Seyitömer termik santrali uçucu küllerinin tuğla katkı hammaddesi olarak kullanımı. *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, İzmir.
- Burnet, G. (1986). Never technologies for resource recovery from coal combustion solid wastes. *Energy*, 11 (11/12), 1363-1375.
- Cengizler, H., Çiçek, T. ve Tanrıverdi, M. (2012). A Brief overview of fly ash brick production. *Proceedings of the 13th International Mineral Processing Symposium*.
- Çiçek, T. ve Tanrıverdi, M. (2004). Kömüre dayalı termik santral uçucu küllerinden otoklav yöntemi ile hafif tuğla üretimi. 5. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 76-82, İzmir
- Çiçek, T. ve Tanrıverdi, M. (2007). Lime based steam autoclaved fly ash bricks. *Construction and Building Materials*, 21 1295–1300.
- Demir, İ., Başpınar, M. S. ve Kahraman, E. (2008). Seyitömer uçucu külünün yapı tuğlası üretiminde kullanılabilirliğinin ön araştırılması. *VII. Uluslararası Katılımlı Seramik Kongresi*, 327 – 331.
- Elektrik İşleri Etüd İdaresi (EİE), (1979). *Türkiye uçucu küllerinin özellikleri ve kullanılma olanakları*. Genel Direktörlüğü, 81 45, Ankara.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar M. S. ve Demir, İ. (2008). Uçucu kül Bölüm I: Oluşumu, sınıflandırılması ve kullanım alanları. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (2), 85 – 94.
- Iyer, R.S. ve Scott, J.A. (2001). Power station fly ash — a review of value-added utilization outside of the construction industry. *Resources, Conserv Recycling*, 31, 217-28.

- Lea, F. (1980). *Lea's chemistry of cement and concrete*. London: John Wiley& Sons.
- Lingbawan, S.G. (2009). *Thermal properties of fly ash bricks initial thesis report*. ZACM 4451 Mechanical Engineering Project Thesis and Practical Experience Initial Thesis Report.
- Ma, W. ve Brown, P.W. (1997). Hydrothermal reactions of fly ash with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. *Cement Concrete Research*, 27, 1237–1248.
- McCarthy, M.J. ve Dhir, R.K. (1999). Towards maximizing the use of fly ash as a binder. *Fuel*, 78, 121-32.
- Peng, G., Feng, N. ve Chan, S.Y.N. (1999). Formation and strength of crystalline calcium silicate hydrate prepared by single autoclaving process. *Advances in Structural Engineering*, 2 (3), 191–197.
- Taneja, S.K. (1998). Appropriateness and need to promote fly ash based walling materials in Indian context. In: *Proceedings of National Seminar on New Materials and Technology in Building Industry*, New Delhi, 24-25.
- Taşkömürü sektör raporu*, (2015). T.C. Türkiye Taşkömürü Kurumu Genel Müdürlüğü.
- Toktay, M. ve Çetin, B. (1991). Preslenmiş, buhar kürü uygulanmış uçucu kül-kireç tuğlalarının dayanım ve su emme özellikleri. *Teknik Dergi, TMMOB. İnşaat Mühendisleri Odası*, 1, 385-394.
- Toktay, M. (1993). Betonda uçucu kül kullanımı (Türkiye Deneyimi). *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Ankara.

Tokyay, M. ve Erdoğan, K. (1998). *Türkiye termik santrallerinden elde edilen uçucu küllerin karakterizasyonu*. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB), Ankara.

Topçu, İ.B. ve Canbaz, M. (2001). Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri. *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, XIV, 2.

TSE EN- 771-1, (2005). *Specification for masonry units-Part 1 : Clay masonry units*.

Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğinobalı, A. (2003). *Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri*. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB), Ankara.

Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğinobalı, A. (2009). *Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri*. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB), Ankara.

Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ), (2015).
http://www.emo.org.tr/ekler/06fdc0d90b379c9_ek.pdf?tipi=41&turu=X&sube=0

Türkmenoğlu, M. (2010). *Uçucu küllerin liç karakteristiklerinin ve çevreye etkilerinin araştırılması*. Çukurova Üniversitesi, Doktora Tezi, Adana.

Tütünlü, F. ve Atalay, Ü. (2001). Utilization of fly ash in manufacturing of building bricks, *International Ash Utilization Symposium. Center for Applied Energy Research*, University of Kentucky, Lexington, Kentucky, USA

Ulusoy A. (2008). *Uçucu kül - tekstil fabrikası atık külü ve bazaltik pomzanın tuğla üretiminde katkı olarak kullanılması*. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş.

Ünal, O. ve Uygunoğlu, T. (2004). Soma termik santral atığı uçucu külün inşaat sektöründe değerlendirilmesi. *Türkiye 14. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı*, Zonguldak

Vom Berg, W. (1998). Utilization of fly ash in Europe, In: *Proceedings of International Conference on Fly Ash Disposal and Utilisation. Central Board of Irrigation and Power*, New Delhi.

Wikipedia, (2015). 15 Kasım 2014

<http://en.wikipedia.org/wiki/Image:PowerStation2.svg>.

Yazıcı, H. (2004). *Termik santral atığı yapay alçı-uçucu kül-taban külü esaslı yapı malzemesi geliştirilmesi*. Dokuz Eylül Üniversitesi, Doktora Tezi, İzmir.

Yıldız, E. (2006). *Farklı tipteki puzolanların betonun mekanik özelliklerine etkisi*. Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

Yüksel, İ., Özkan, Ö. ve Bilir, T. (2006). Kazanaltı külü ile tuğla üretimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 21 (3), 527-532.

Zal, B. (2010). *Zeolit, tras ve uçucu kül ile tuğla üretimi ve standard tuğla ile karşılaştırılması*. Çukurova Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Adana.

Zeybek, O. (2009). *Uçucu kül esaslı geopolimer tuğla üretimi*, Anadolu Üniversitesi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.