



T.C.

KAHRAMANMARAŞ İSTİKLAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİYEL ATIK İÇEREN YENİ NESİL
ÇİMENTOSUZ BAĞLAYICI İLE
BİMSBLOK (BRİKET) ÜRETİMİ

MUHAMMED TAHA KAÇARLAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

KAHRAMANMARAŞ 2024

T.C.
KAHRAMANMARAŞ İSTİKLAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİYEL ATIK İÇEREN YENİ NESİL
ÇİMENTOSUZ BAĞLAYICI İLE
BİMSBLOK (BRİKET) ÜRETİMİ

MUHAMMED TAHA KAÇARLAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

KAHRAMANMARAŞ 2024

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

MUHAMMED TAHA KAÇARLAR

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bilgilerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ENDÜSTRİYEL ATIK İÇEREN YENİ NESİL ÇİMENTOSUZ BAĞLAYICI İLE BİMSBLOK (BRİKET) ÜRETİMİ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

MUHAMMED TAHA KAÇARLAR

ÖZET

Bu tez çalışmasında inşaat sektöründe kullanılan en yaygın malzemelerden biri olan briket üretimine yeni bir yaklaşım getirilmesi amaçlanmıştır. Briket üretiminde temel bağlayıcı malzeme çimento ve kullanılan agrega pomza (bims) agregasıdır. Çimento kullanımı, üretim süreçlerinden kaynaklı sebeplerle Dünya sürdürülebilirlik hedeflerine ters düşmektedir. Dolayısıyla günümüzde çimentoya alternatif bağlayıcıların geliştirilmesi üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır. Bu bakımdan, briket üretiminde de çimentonun azaltılması ve hatta tamamen kaldırılması faydalı olacaktır. Çalışmada, çimento yerine demir çelik endüstrisinin bir atığı olan yüksek fırın cürufu (YFC) ve tarımsal bir atık olan fındık kabuğunun külü (FTK) kullanılmıştır. Bu iki malzemenin seçimi, YFC'nin yapısında bulunan CaO ile FTK'nın yapısındaki potasyumun birlikte aktifleşip, çimento yerine değerlendirilebilme potansiyeli taşımalarıdır. Bu amaçla, çimento yerine farklı oranlarda kısmen veya tamamen bu atık malzemeler kullanılarak briketler üretilmiştir. Üretilen briketlerin boyut ve konfigürasyon analizleri, birim hacim kütle testleri, su emme, porozite, kılcal su emme, ısıl iletim katsayısı ve basınç dayanımı testleri uygulanmıştır. Bağlayıcı fazların priz süreleri incelenmiştir. Aynı zamanda seçilmiş örneklerin X-ışını kırılımı (XRD) analizleri ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülemeleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, FTK ve YFC kullanımı ile üretilen briketlerin basınç dayanımlarında önemli bir artış olmadığını göstermiştir. Ancak üretilen malzemelerin hafiflik özelliklerinin ön planda olduğu uygulamalarda kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Briket, Fındık Kabuğu Külü, Cüruf, Mühendislik Özellikleri

Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Temmuz/2024

Danışman: Doç. Dr. Ahmet Hayrullah SEVİNÇ

Sayfa Sayısı: 63

**BIMSBLOCK (BRICKET) PRODUCTION WITH NEW GENERATION
CEMENTLESS BINDER CONTAINING INDUSTRIAL WASTE
(M.Sc. THESIS)**

MUHAMMED TAHA KAÇARLAR

ABSTRACT

This thesis aims to introduce a new approach to producing briquettes, one of the most used materials in the construction industry. Cement is the primary binding material in traditional briquette production, and pumice aggregate is typically used. However, due to the environmental impacts associated with cement production, its use conflicts with global sustainability goals. As a result, research has increasingly focused on developing alternative binders to replace cement. In this context, reducing or eliminating cement in briquette production could benefit. In this study, blast furnace slag (BFS), a waste product from the iron and steel industry, and hazelnut shell ash (HSA), an agricultural waste, were used as substitutes for cement. The selection of these two materials is based on the potential of CaO in BFS and the potassium in HSA to activate together, making them viable alternatives to cement. Briquettes were produced by partially or completely replacing cement with these waste materials in varying proportions. The produced briquettes underwent dimensional and configuration analyses, bulk density tests, water absorption, porosity, capillary water absorption, thermal conductivity, and compressive strength tests. The setting times of the binder phases were also examined. Additionally, selected samples were analyzed using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The results indicated that the use of HSA and BFS did not significantly improve the compressive strength of the briquettes. However, they suggested that the produced materials could be suitable for applications with prioritized lightweight properties.

Keywords: Briquette, Hazelnut shell ash, Slag, Engineering Properties

Kahramanmaraş İstiklal University

Institute of Graduate Studies

Department of Material Science and Engineering, July/2024

Supervisor: Associate Prof. Dr. Ahmet Hayrullah SEVİNÇ

Page number: 63

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi ve birikimlerinden faydalandığım, tez çalışmamın tüm safhalarında bilimsel desteğinin yanı sıra anlayış ve sabrını esirgemeyen, çalışmanın etkin bir şekilde ilerleyişi için fedakârlıklardan kaçınmayan, kendisiyle çalışmaktan onur duyduğum tez danışmanım Sayın hocam Doç. Dr. Ahmet Hayrullah SEVİNÇ'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen her koşulda yanımda olan çok değerli aileme ve dostlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Muhammed Taha KAÇARLAR

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı	1
1.2. Beton	2
1.2.1. Hafif Betonlar	3
1.3. Briketler	4
1.3.1. Tanım ve Sınıflandırma	5
1.3.2. İnşaat Sektöründe Kullanımı	6
1.3.3. Üretim Süreci	8
1.3.4. Briketlerden Beklenen Özellikler	8
1.3.5. Briket Kullanımının Sağladığı Avantajlar	10
1.3.6. Briketlerde Kalite Kontrol Esasları	10
1.4. Biyokütle	14
1.4.1. Tanım	14
1.4.2. Biyokütlenin Önemi	14
1.4.3. Biyokütle Kaynakları	15
1.4.4. Biyokütlenin Avantajları	15
1.4.5. Bir Biyokütle Kaynağı Olarak Fındık Kabuğu	16
2. LİTERATÜR ÖZETLERİ	18
3. MATERYAL ve METOT	25
3.1. Materyal	25
3.1.1. Çimento	25
3.1.2. Yüksek fırın cürufu	26
3.1.3. Öğütülmüş fındık kabuğu külü	26

3.1.4.	Pomza agregası	28
3.1.5.	Karışım Suyu	29
3.2.	Metot	29
3.2.1.	Briketlerinin üretilmesi	29
3.2.2.	Briketlerin boyutlarının ölçülmesi ve konfigürasyon analizi	31
3.2.3.	Briketlerin birim hacim kütle deneyi	32
3.2.4.	Briketlerin su emme ve porozite deneyi	33
3.2.5.	Briketlerin kılcal su emme deneyi	34
3.2.6.	Briketlerin ısı iletim katsayısı tayini	35
3.2.7.	Briketlerin basınç dayanımı deneyi	36
3.2.8.	Bağlayıcı malzemelerin priz süresi tayini	37
3.2.9.	Bağlayıcı malzemelerin iç yapı incelemeleri	37
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA	38
4.1.	Briketlerin Boyut, Tolerans ve Konfigürasyon Analizleri	38
4.2.	Briketlerin Birim Hacim Kütle Testi Sonuçları	40
4.3.	Su Emme ve Porozite Testi Sonuçları	43
4.4.	Briketlerin Kılcal Su Emme Test Sonuçları	44
4.5.	Briketlerin Isıl İletim Katsayılarının Analizi	46
4.6.	Briketlerin Basınç Dayanımı Testi Sonuçları	47
4.7.	Bağlayıcı Fazların Priz Süresi İncelemeleri	48
4.8.	X-Işını Kırınımı (XRD) Analizleri	49
4.9.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri	51
5.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	54
	KAYNAKLAR	55
	ÖZGEÇMİŞ	63

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.2. Briket örnekleri	4
Şekil 1.3. Briket çeşitleri	6
Şekil 1.4. Briket çeşitleri	7
Şekil 1.5. Bimsblok kaldırım elemanları	8
Şekil 1.6. Tam otomasyonlu briket üretim tesisinin şeması	8
Şekil 1.7. Briket elemanların boyutlarının isimlendirilmesi	10
Şekil 1.8. Boşluklu briket elemanlarda boyutlandırma terimleri.....	11
Şekil 3.1 Portland çimentosuna ait SEM görüntüleri a) 2000 büyütme b) 10000 büyütme	25
Şekil 3.2 Yüksek fırın cürufuna ait a) SEM görüntüsü b) malzeme görseli.....	26
Şekil 3.3 Öğütülmüş külün elde edilme aşamaları	27
Şekil 3.4 Öğütülmüş külün SEM taraması a) 2000 büyütme b) 10000 büyütme.....	28
Şekil 3.5 a) Elek sarsma cihazı b) pomza agregası.....	28
Şekil 3.6 Malzemelerin hassas tartılması ve karışım mikserinin görüntüleri.....	30
Şekil 3.7 Bant sistemi ve üretim sistemi.....	30
Şekil 3.8 Presten çıkan numuneler ve sertleşmiş numuneler	31
Şekil 3.9 Numunelerin boyutlarının kontrolü ve standartlara uygunluğunun incelenmesi .	32
Şekil 3.10 Briketlerin suda bekletilmesi ve kuru numuneler	33
Şekil 3.11 Briketlerin suya doygun halde ve su içinde tartılması.....	34
Şekil 3.12 Kılcal su emme deneyi	35
Şekil 3.13 Isı iletkenlik ölçüm cihazı	36
Şekil 3.14 Basınç presı	36
Şekil 3.15 Basınç deneyi sonrası kırılan bimsler.....	37
Şekil 3.16 Vicat deneyi.....	37
Şekil 4.1 Üretilen briketlerin boyutları (yükseklik = 175mm).....	38
Şekil 4.2 Seçilen hamur örneklerinin XRD analizleri	50

Şekil 4.3 Referans örneğine ait SEM görüntüleri a) 2000 büyütme b) 5000 büyütme c) 10000 büyütme d) 20000 büyütme.....	51
Şekil 4.4 1 numaralı örneğe ait SEM görüntüleri a) 2000 büyütme b) 5000 büyütme c) 10000 büyütme d) 20000 büyütme.....	52
Şekil 4.5 3 numaralı örneğe ait SEM görüntüleri a) 2000 büyütme b) 5000 büyütme c) 10000 büyütme d) 20000 büyütme.....	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 1.1. Bazı duvar elemanlarının ısı iletkenlik değ erleri	9
Çizelge 1.2. Tahmini basınç dayanımı değ erlerine göre kullanılacak yü kleme hızları	13
Çizelge 3.1 Çimentonun teknik özellikleri	25
Çizelge 3.2 Yüksek fır ın cürufunun teknik özellikleri	26
Çizelge 3.3 Öğütölmüş külün kimyasal ve fiziksel analizi	27
Çizelge 3.4 Pomzanın elek analizi ve teknik özellikleri.....	29
Çizelge 3.5 1 m ³ briket ü retimi için karış ım hesabı	29
Çizelge 4.1 TS EN 771-3 standardına göre sapma miktarları	38
Çizelge 4.2 Briketlerin boyut toleransları	39
Çizelge 4.3 Briketlerin genel boyut ve tolerans değ erlendirmesi.....	39
Çizelge 4.4 Briketlerin konfigürasyon analizleri.....	40
Çizelge 4.5 Briketlerin birim hacim kütle testi sonuçları	41
Çizelge 4.6 Briketlerin birim hacim kütle testi sapma değ erleri	42
Çizelge 4.7 Briketlerin su emme ve porozite sonuçları.....	43
Çizelge 4.8 Briketlerin kılcal su emme testi sonuçları	45
Çizelge 4.9 Briketlerin ısı iletim katsayıları.....	46
Çizelge 4.10 Briketlerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değ erleri	47
Çizelge 4.11 Bağ layıcı fazların priz baş langıç ve priz bitiş süreleri	48

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

%	: Yüzde
µm	: Mikron
ASTM	: American Society of Testing Materials
cal	: Kalori
CO₂	: Karbon dioksit
C-S-H	: Tobermorit (Kalsiyum silikat hidrat)
dk	: Dakika
EN	: European Norms
FKT	: Fındık kabuğu taban külü
g	: Gram
K	: Kelvin
KOH	: Potasyum hidroksit
m	: Metre
MPa	: Megapascal
N	: Newton
NaOH	: Sodyum hidroksit
°C	: Santigrat derece
s	: Saniye
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu

TS	: Türk Standartları
W	: Watt
XRD	: X-ışını Difraksiyonu
YFC	: Yüksek fırın cürufu

1. GİRİŞ

İnsanlık tarihinin başlangıcından bu yana, çevresel etkenlerden (yağmur, kar, rüzgar, vahşi hayvanlar vb.) korunmak ve barınma ihtiyacını karşılayabilmek için yapılar yapma ihtiyacı duyulmuştur. Zaman geçtikçe bu yapıların kapsamı, niteliği ve yapım teknikleri önemli ölçüde gelişmiş ve farklılaşmıştır. Ahşap, taş, kerpiç, tuğla, briket, gaz beton gibi birçok yapı malzemesi kullanılarak yığma yapı tekniğiyle yapılar yapılabileceği gibi, günümüzde daha çok beton ve yapı çeliklerinin birlikte kullanılması ile imal edilen betonarme sistemler veya çelik sistemler yaygınlaşmıştır. Binanın taşıyıcı olan kısmında çoğunlukla betonarme veya çelik elemanlar tercih edilirken, farklı ihtiyaçlara binaen bölme elemanı olarak kullanmak veya yük taşımak amacıyla briket ve tuğla gibi elemanlara da sıklıkla başvurulmaktadır.

Bu tür elemanların yapı ağırlığını artırmaması için görece hafif olması tercih edilir. Bu nedenle briket gibi elemanlar bims olarak da adlandırılan pomza agregası ile üretilmektedir. Pomza agregasının kullanımı ile üretilmesinden dolayı briketler, “bimsblok” olarak da adlandırılmaktadırlar. Briket bu hafif agregaların birbirine bağlanması için çimento kullanılmaktadır. Dolayısıyla hafif agrega olan pomza ile üretilen briketler hafif betonlar sınıfında yer alabilirler ve aynı zamanda hafif betonların taşıdığı özellikleri taşıyabilirler. Diğer taraftan briket üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan çimentonun, üretim süreçlerinde çevreye zarar verici sera gazları salınımına katkı yaptığı bilinmektedir. Son yıllarda çimento kullanımının azaltılabilmesi veya daha çevreci çimentoların imal edilebilmesi için birçok çalışma yapılmaktadır. Bununla birlikte, bazı araştırmacılar çimentonun tamamen sistemden çıkarıldığı, çimentosuz bağlayıcılar üzerine çalışmalarını sürdürmektedirler. Burada ortak amaç, yukarıda bahsedilen, yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinin mevcut kalitelerinden ödün vermeksizin, daha çevreci ürünler ortaya koyabilmek ve daha sürdürülebilir yapılar üretimine imkan oluşturmaktır.

1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın temel amacı inşaat sektöründe yaygın bir biçimde kullanılan briket üretiminde, karışım dizaynında ve hammaddelerde yapılacak bazı değişiklikler ile yeni bir ürün ortaya koymaktır. Burada yapılacak değişikliklerin temel amacı sürdürülebilirlik ve ekonomiklik pencerelerinden bakarak mevcut ürünün modifiye edilmesidir. Bu kapsamda briketin bağlayıcı fazı olan hamur kısmını olabildiğince çimentosuzlaştırmak, çimento yerine yeni nesil çimentosuz bağlayıcıları kullanabilmektir. Çimentosuz bağlayıcıların

önemli bir kısmında kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesini sağlamak amacıyla alkali özelliğe sahip kimyasallar tercih edilmektedir. Bir başka sorun ise bu reaksiyonların tam olarak gelişmesini sağlamak adına genellikle ısıt işlemler uygulanmasıdır. Bu durumları ortadan kaldırabilmek için, bir biyokütle atığı olan fındık kabuğu taban külü (FTK) ile çimentosuz bağlayıcı üretiminde sıklıkla kullanılan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) beraber değerlendirilip, kimyasal aktifleşmenin gerçekleşmesi sağlanacaktır. Bu amaçla esas aktifleştirilecek malzeme olan YFC'nin yerine %25 ve %50 oranlarında FTK ikame edilerek mevcut aktifleşme durumu gözlenecektir. Bu üretilen yeni çimentosuz bağlayıcı ise briket üretiminde çimentonun yerine %0, %50 ve %100 oranlarında kullanılacaktır. Bunun sonucu olarak tamamen çimento ile üretilmiş, kısmen çimento ile üretilmiş ve çimentonun hiç kullanılmadığı briketler ortaya konularak, bu ürünlerin özelliklerinin karşılaştırılması imkanı oluşacaktır. Böylelikle üretilen briketlerin, fiziksel ve mekanik özelliklerinden ödün vermeden, daha çevreci ve daha ekonomik ürünler haline gelmesini sağlamak bu tezin en temel amacıdır.

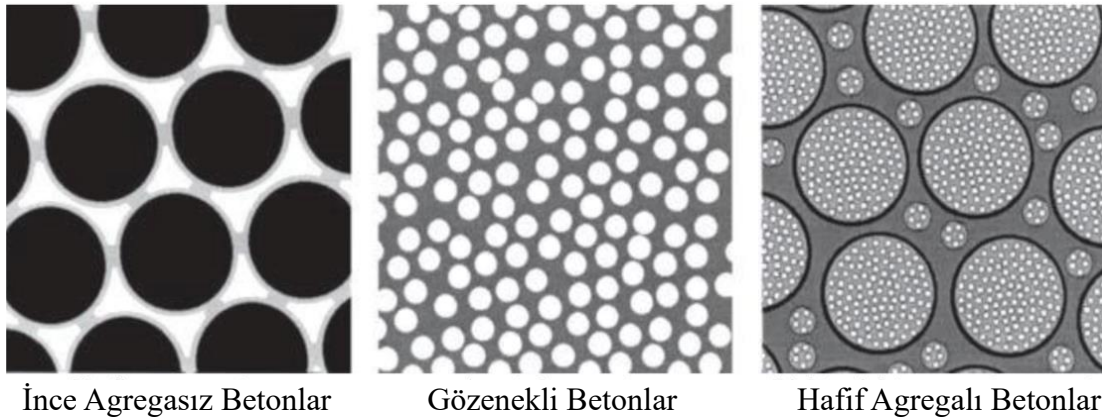
1.2. Beton

Beton, kum, çakıl, kırmataş gibi agregalar, su, çimento ve ihtiyaç duyulması halinde diğer bir takım katkıların bir araya gelmesiyle oluşan yapı malzemesidir (Neville, 2011). Günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesi betondur. Bunun sebebi beton hammaddelerinin kolay bulunur olması, görece ekonomik bir ürün olması, şekil verme kolaylığı ve sertleşme sonrası elde edilen yüksek dayanım ve dayanıklılıktır (Erdoğan, 2003). Her ne kadar dayanımı yüksek olsa da beton elemanların, özellikle de betonarme olarak inşaat çelikleri ile kullanıldıklarında yapı ağırlığını artırıcı bir etkiler vardır. Bu durum yapının kendi ağırlığının yüksek olmasına, dolayısıyla eleman ve temel boyutlarının artmasına neden olmaktadır (Şimşek, 2000). Betonda kullanılan agregalar birim ağırlıklarına göre hafif, normal ağırlıklı ve ağır agregalar olmak üzere üçe ayrılır. Genel olarak yaygın, ekonomik ve gerekli teknik özelliklere sahip olması bakımından normal ağırlıklı agregaların kullanımı tercih edilmektedir. Fakat beton ağırlığını ve dolayısıyla betonarme elemanların zati yükünü, buna bağlı olarak da yapı ağırlığını düşürmek için imkan ölçüsünde hafif agregalar ve hafif betonların kullanımı önemlidir (Şimşek, 2000; Tuna, 1993).

1.2.1. Hafif Betonlar

Birim ağırlığı normal ağırlıklı betonlardan belirgin biçimde düşük olan betonlara hafif betonlar denilmektedir. Genel olarak hafif betonların birim ağırlığını sınırı 1800 kg/m^3 olarak kabul edilmektedir. Bu değerden daha küçük birim ağırlığa sahip betonlar hafif betonlar olarak adlandırılabilir (Ağırdır, 1989). Hafif betonların ağırlıklarının düşük olmasını sağlayan temel sistem, yapısında bulunan gözeneklerdir. Bu gözenekler üretim tekniğine bağlı olarak çimento hamuru ile agregası arasında, çimento hamurunun kendisinde veya agreganın kendisinde bulunabilir. Buna göre üç tür hafif beton üretimi yapılabilir (Al-Handhal, 2022);

- İnce Agregasız Hafif Betonlar: Bu tür hafif betonlar çimento, iri agregalar (boyutu 10 mm'den 20 mm'ye kadar olan) ve su kullanılarak üretilirler. Agregası taneleri bir miktar çimento hamuru ile kaplanmıştır ve kenetlenmeyi sağlayan bu kısımdır
- Gözenekli Betonlar: Bu tür betonlar iri agregası içermezler. Sadece çimento hamuru ve ince agregası barındırırlar. Bu tür betonlar otoklav kullanılarak üretilebileceği gibi, çeşitli kimyasal yöntemlerle de yapıya hava kabarcıkları sürüklenmesi ile de üretilmektedirler.
- Hafif agregalı betonlar: Bu tür betonlar, betonun yapısındaki geleneksel agregalar ile hafif ve gözenekli agregaların yer değiştirilmesi ile üretilirler. Böylelikle betonun toplan ağırlığı azaltılmış olur.



Şekil 1.1. Hafif betonların üretim yöntemleri (Mohammed ve Hamad, 2014)

Hafif ağırlıklı agregaların kullanımı ile hafif beton üretimi diğer yöntemlere nazaran daha yaygın bir yöntemdir. Betonda hafif ağırlıklı agregalar kullanılarak ağırlığı düşürmenin en önemli getirilerinden birisi yapının zati ağırlığının azalmasıdır. Böylece kirişler, kolonlar, döşemeler ve temellerin kesitlerinde küçülmeler sağlanabilir. Aynı zamanda

kullanılacak donatı miktarında da azalma meydana gelecektir. Bu gibi durumların ekonomik açıdan da fayda sağlıyor olması hafif agregalı betonların geliştirilmesine önem verilmesini sağlamıştır. Yapı ağırlığının düşürülmüş olması köprü açıklıklarının uzatılmasına, yüksek binaların deprem riskinin azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Çünkü deprem hasarına neden olan deprem kuvvetleri yapıya, o yapının ağırlığı ile doğru orantılı olarak etki etmektedir (Yıldırım, 2012).

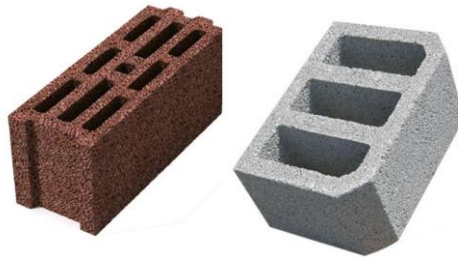
Hafif betonun temel uygulama alanları üçe ayrılabilir (Yılmaz, 2024);

- Yapısal elemanların imalatında (kolon, giriş, perde duvarlar, döşemeler, temeller vb.)
- Prefabrik panel elemanlar ve bölme elemanları
- Açıklığı fazla olan imalatlarda, öngerme veya ardgerme teknikleri ile kullanılarak, büyük açıklıkların geçilmesi.

Türkiye pek çok farklı türde hafif agrega kaynaklarına sahiptir. Bunlardan en yaygını ve tanınanı pomza, bir diğer adıyla bimstir. Pomza agregaları volkanik olaylar sonucu oluşmuş içerisinde çok miktarda gözenek barındıran hafif bir volkanik kayadır. Fiziksel ve kimyasal etkilere dayanıklı, zararsız, uzun ömürlü, yüksek sıcaklıklara karşı dirençlidir. Özellikle de ısı ve ses yalıtımı özelliği sağlamaktadır. Bu nedenle hafif ve yalıtım özelliği yüksek yapı elemanı üretiminde çokça tercih edilmektedir. Pomza agregası kullanılarak üretilen en önemli yapı elemanlarından biri de briketler, diğer adıyla bimsbloklardır.

1.3. Briketler

Briketler uzunca bir süredir dünyanın çeşitli yerlerinde önemli bir yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. İç mekan konforu bakımından, gözenekli bir malzeme olması sebebiyle nem dengesinin sağlayıp, iklimlendirme özelliğine sahip ve nefes alan bir yapı oluşturarak, sağlıklı bir yaşam ortamı sunmaktadır (Kocaman, 2009).



Şekil 1.2. Briket örnekleri (Kocaman, 2009)

1.3.1. Tanım ve Sınıflandırma

Briketler , çimento, pomza agregaları ve su karışımının belli bir basınç altında, vibrasyon uygulanarak sıkıştırılması ile üretilen yapı elemanlarıdır. Tuğlar vb. bölme malzemeleri gibi herhangi bir pişirme işlemine tabi tutulmazlar. Kalıplandıktan sonra yeterli mukavemete ulaşıncaya kadar kürlenirler ve daha sonra kullanıma hazır hale gelirler. Briketler TS EN 771-3'e göre teçhizatlı ve teçhizatsız bimsblok elemanları olmak üzere 2 sınıf ayrılırlar;

Teçhizatlı Bimsblok Elemanları;

- Kapı ve pencere lentoları
- Döşeme plakaları
- Çatı plakaları
- Düşey duvar elemanları
- Yatay duvar elemanları

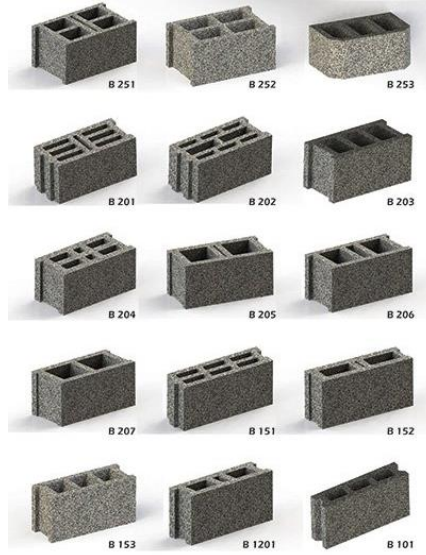
şeklindedir.

Teçhizatsız Bimsblok Elemanları;

- Boşluklu duvar blokları
- Boşlukları dolgulu duvar blokları
- Dolu duvar blokları
- Özel yarıklı duvar blokları
- Asmolen bloklar

şeklindedir.

Daha önceki standartlarda ise briketler bims tuğlalar, boşluklu duvar bimsblokları ve asmolen blokları şeklinde üç sınıfa ayrılmaktaydı (TS 2823).



Şekil 1.3. Briket çeşitleri (URL-1)

1.3.2. İnşaat Sektöründe Kullanımı

a) Duvar bloğu olarak kullanımı:

Briketler, piyasada bulunan diğer duvar yapımında kullanılan malzemelere göre daha ekonomik bir seçenektir. Geçmeli briketler, harç kullanımını ortadan kaldırarak ekonomiklik, hız ve işçilikten kazanç sağlar. Bu bakımdan avantajlıdır. Ayrıca, ısı yalıtım katsayılarının daha iyi olması nedeniyle tuğlaya nazaran enerji sarfiyatını azaltır. Ses yalıtım performansları tuğlaya kıyasla yarı yarıya daha yüksektir. Günümüzde hızlı yapılaşma ve insanların küçük alanlarda birlikte yaşaması nedeniyle ses yalıtımının önemi büyüktür. Briketlerin bileşiminde yalnızca çimento, pomza ve su bulunması, insan sağlığına zarar verme potansiyelini ortadan kaldırır. Briketlerle inşa edilen duvarlar, gözenekli yapıları sayesinde yapının nefes almasını sağlar ve böylece ortamda bir nem dengesi oluşturmuş olur (Kocaman, 2009).

b) Asmolen malzemesi olarak kullanımı

Yüksek ısı ve ses yalıtımı sağlaması nedeniyle briketlerin asmolen malzemesi olarak kullanımı önemli avantajlar sunar. Ayrıca, asmolenlerde briket kullanımı tavanın düz görünmesini sağlayarak estetiğe katkıda bulunur. (Kocaman, 2009).

c) Baca elemanı olarak kullanımı

Bacalarda kullanılan elemanlar geleneksel amaçlarla veya doğal gaz bacaları için kullanıldığında farklı özellikler taşır. Doğal gaz için kullanılan elemanlar daha iyi yalıtım

özelliklerine sahip hafif malzemelerden üretilmelidir. Bacaların pomza agregası içeren briketlerden üretilmesi bu sorunu çözebilmektedir (Gündüz, 2005; Kocaman, 2009).

d) Lento elemanı olarak kullanımı

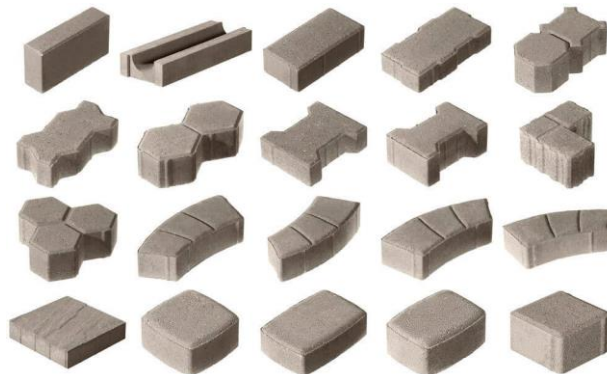
Bilinen lentolar, geleneksel betonun ve donatının kullanılmasıyla üretilmektedir. Geleneksel betondan üretilen ve içerisinde donatı bulunan bu tür elemanlar ağır olurlar, bu da uygulama zorluklarına yol açmaktadır. Ayrıca, duvarlarda ısı köprüsü oluşturarak lento yüzeyinde nem oluşumuna neden olmaktadır. Bu problemin aşılabilmesi için lentoların briketlerden üretilmesi gündeme gelmiş ve oldukça faydalı olmuştur (Kocaman, 2009).

e) Peyzaj mimarisi ve dekoratif amaçlı kullanımı

Hafif beton mamulü bahçe mobilyaları, sütunlar, banklar, korkuluklar ve çiçeklikler gibi peyzaj ürünlerinin bimsblok kullanılarak üretilmesi oldukça yaygındır (Şekil 1.4.). Ayrıca, parklarda kaldırım elemanı olarak sıklıkla tercih edilmektedir (Şekil 1.5.). Bu tercihlerin başlıca nedenleri, bimsblokların imalatının kolay olması, hafifliği, sağlamlığı ve donma-çözülme etkisine karşı dayanıklılığıdır.



Şekil 1.4. Briket çeşitleri (URL-2)

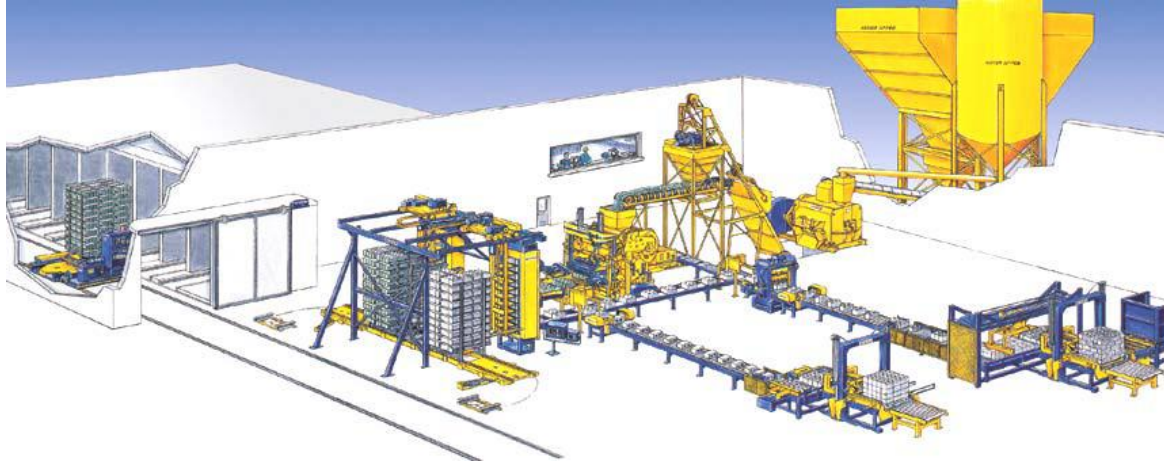


Şekil 1.5. Bimsblok kaldırım elemanları (URL-3)

1.3.3. Üretim Süreci

Genel olarak briket üretim tesislerinde izlenen süreçler aşağıdaki şekildedir (Toklu, 2009);

- 1- Karışım reçetesindeki verilerin bilgisayara yüklenmesi, agrega, çimento dozajı ve su miktarlarının tespit edilmesi.
- 2- Miktarı belirlenen agregaların skrayperlere yüklenmesi.
- 3- Mikser ünitesine agregaların boşaltılması, çimento ile karıştırılması ve son olarak suyunun eklenmesi.
- 4- Hazırlanan karışımın preslenme silolarına boşaltılması, karışımın kalıplara alınarak şekillendirilmesi.
- 5- Yaş ürünleri elevatöre yüklenmesi ve priz kamaralarında stoklanması
- 6- Burada ilk mukavemetlerini kazanan elemanların taşıyıcılar vasıtasıyla paketleme ünitesine yönlendirilmesi, paketleme ve istifleme işlemlerinin gerçekleştirilmesi.
- 7- Stok alanına sevk edilen ürünlerin nihai mukavemetlerini kazanmaları için 28 gün bekletilmeleri.



Şekil 1.6. Tam otomasyonlu briket üretim tesisinin şeması (Toklu, 2009)

1.3.4. Briketlerden Beklenen Özellikler

a) Birim hacim ağırlık

Türlerine göre briketlerin olması gereken birim hacim ağırlıkları, normal briktlerde $0,8 \text{ kg/dm}^3$, tek sıra boşluklu briketlerde $0,8 \text{ kg/dm}^3$, iki sıra boşluklu briketlerde $0,9 \text{ kg/dm}^3$, üç

sıra boşluklu briketlerde 1,0 kg/dm³ ve asmolen briketlerinde 0,7 – 0,9 kg/m³ olmalıdır (Çiçek, 2002).

b) Rötire

Briketlerin, yapısında pomza agregası barındırdığından büzülme göstermemektedir. Böylece herhangi bir büzülme çatlağı da oluşmamaktadır. Islanma-kuruma çevrimleri yapıldığından oluşan şişme ve büzülme sonucu meydana gelen şekil değişiminin 0,05 mm'yi aşmadığı gözlemlenmiştir (Çiçek, 2002).

c) Isıl iletkenlik

Briketler, birim ağırlıklarının düşük olması ve gözenekli yapıları nedeniyle mükemmel ısı yalıtım özelliklerine sahiptir. Briketlerin içerdiği pomza agregaları yapısında çok sayıda boşluk içermektedir. Ayrıca bu boşluklar oldukça homojen bir biçimde dağılmıştır. Bu durum ısı iletim katsayısını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu durum, yakıt tüketimini azaltmakta, yapılarda pencere genişliklerinin artırılmasına ve duvar kalınlıklarının inceltilmesine olanak sağlamaktadır (Binboğa, 2019). Çizelge 1.1. bazı duvar elemanlarının ısı iletkenlik katsayılarını göstermektedir

Çizelge 1.1. Bazı duvar elemanlarının ısı iletkenlik değerleri (Binboğa, 2019)

Duvar Elemanı	Isıl iletkenlik değeri (kcal/mh°C)
Tuğla	0,39 – 1,03
Gaz beton	0,17 – 0,25
Genleştirilmiş perlitli bloklar	0,22 – 0,30
Tek sıra boşluklu briketler	0,25 – 0,27
İki sıra boşluklu briketler	0,22 – 0,25
Üç sıra boşluklu briketler	0,20 – 0,24
Asmolen briketleri	0,19 – 0,20

d) Ses yalıtımı ve akustik

Tıpkı ısı iletim katsayısında olduğu gibi, briketlerde bulunan agregaların boşluklu yapısı, ağırlığının yüksek olmaması ve kristal boşluk suyu içermemesi, ses yalıtımının da çok iyi olmasına neden olmaktadır. Bahsedilen özelliklerin briket ile üretilmiş duvarların yüzeyine çarpan ses dalgalarının sönümlenmesine neden olmaktadır. Böylece, briketlerin yapı akustiğine ve ses yalıtımına da katkı sağladığı bilinmektedir (Çiçek, 2002).

e) Nem ve buhar geçirgenliği

Briketler, içerdikleri pomza agregaları sayesinde ortamın nem dengesini korumada önemli bir işlev görürler. Ortamın nem seviyesi yükseldiğinde, bu nemin bir kısmını bünyelerine

hapsederek denge sağlarlar. Benzer şekilde, ortamın nemi azaldığında ise, bünyelerindeki fazla nemi serbest bırakarak ortamın nem seviyesini dengelerler. Briketlerin gözenek yapısı, birbirinden bağımsız boşluklar içermekte olup, bu boşluklar zar ile yalıtılmış olduğundan suyu ve su buharını barındırmazlar (Çiçek, 2002).

1.3.5. Briket Kullanımının Sağladığı Avantajlar

Briket kullanılması ile elde edilebilecek avantajlar aşağıdaki gibidir (Gündüz, 1998; Binboğa, 2019).

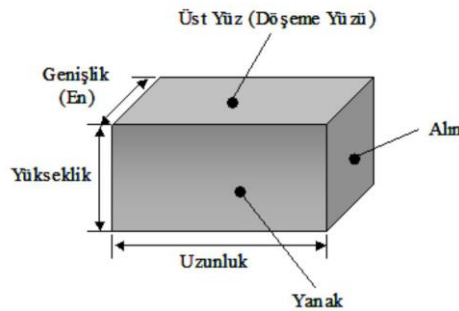
- Briket diğer hafif yalıtım malzemelerine göre ekonomik olarak avantajlıdır.
- Isıl iletim katsayısı düşüktür. Bu iyi bir ısı yalıtım sağlamasına neden olur. Briket kullanımı ile pencere boyutlarını büyütme ve duvar kalınlıklarını küçültme mümkün olabilir.
- Yapısının gözenekli olması, ses yalıtımı ve ses emiciliği özellikleri kazandırır.
- Benzer hacme ve fiziksel özelliklere sahip normal agregalar ile üretilen elemanlara göre daha hafiftir.
- Yüzeyi düzgün olduğu için sıva tasarrufu sağlar ve işçiliği kolaylaştırır.
- Basınç dayanımı yüksektir (25 – 70 MPa).
- Donma – çözülme direnci yüksek bir malzemedir.

1.3.6. Briketlerde kalite kontrol esasları

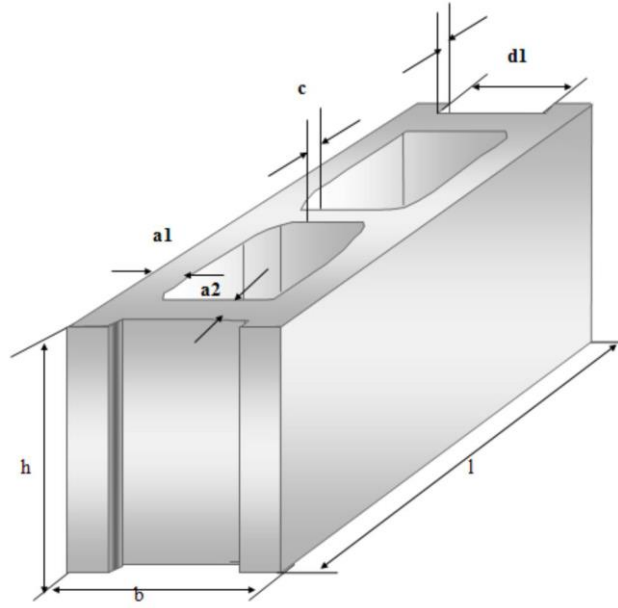
Briketlerin kalite kontrolleri, belli başlı bazı özelliklerinin standart değerlere uygunluğunun incelenmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu özellikler ve istenilen değerler aşağıda verildiği gibidir.

a) Boyutlar

Briket elemanlarda boyutlar Şekil 1.7 ve boşluklu elemanlarda Şekil 1.8.'de verildiği gibi isimlendirilirler.



Şekil 1.7. Briket elemanların boyutlarının isimlendirilmesi (Toklu, 2009)



- | | |
|-----------------------------|---|
| l: Blok boyu | c:İç et kalınlığı |
| b:Blok eni | d1: Alın yüzeyindeki harç cebi |
| h: Blok yüksekliği | e: Alın yüzeyindeki harç cebi derinliği |
| a1: Boyuna dış et kalınlığı | a2: Enine dış et kalınlığı |

Şekil 1.8. Boşluklu briket elemanlarda boyutlandırma terimleri (Toklu, 2009)

Blok elemanların boyutlarını belirlemek için bloğun eni, boyu ve yüksekliğinin ölçülmesi yeterlidir. Ölçümler hassasiyeti 0,2 mm olmalıdır. Elemanın yüzeyinde girinti ve çıkıntılar varsa, bu unsurlar ölçüm sırasında göz ardı edilir. Boşluklu elemanlarda ise dış ve iç et kalınlığı kontrol edilmelidir. Yapılan kalınlık ölçümleri üç ayrı noktadan gerçekleştirilir ve en yakın 0,2 mm'ye yuvarlanır. Sürekli olmayan boşlukların derinlikleri ise iki ayrı noktadan ölçülür ve yuvarlama en yakın 0,5 mm'ye yapılır. Bu ölçümlerde TS EN 771'de belirtilen boyut sapma değerleri ve toleranslar dikkate alınır (Toklu, 2009; TS EN 771, 2005).

b) Şekil, biçim ve geometrik özellikler

Üretilen bir briketin geometrik şekli oval, kare veya dikdörtgen prizma oluşuna göre belirlenir. Bununla beraber elemanın içinin dolu veya boş olması da bir parametredir. Boşluk içeren elemanlarda boşluklardan kaynaklanan çukurlar ve et kalınlıkları toplan hacim hesaplarında etkilidir. Briketler, kullanım amaçlarına göre bloklar halinde üretilebileceği gibi bazen oluklar içeren şekilde, oval yapıda ya da birbirine kilitlenebilecek biçimde de üretilebilirler.

TS EN 772-16 standardına göre, eğer üretilen briket düzgün şekilli ise et kalınlığı 20 mm'den az olmamalıdır. Bunun sebebi, daha düşük et kalınlıkları ile üretim yapıldığında mekanik

özelliklerin zayıflaması ve dayanım kaybı meydana gelmesidir. Bunun dışında, boşluklu bir briket elemanı dikkate alındığında, barındırdığı çukurların hacminin toplan hacminin %20'sinden fazlasına karşılık gelmesi istenmez (Toklu, 2009).

c) Birim hacim ağırlık

Bir briket elemanın tamamen kurutulmuş haldeki ağırlığının, hacmine oranlanması o elemanın birim hacim ağırlığını verir. Birimi çoğunlukla kg/m^3 'tür. İki farklı hesaplama biçimi bulunmaktadır. Bunlar “net kuru birim hacim ağırlık” ve brüt birim hacim ağırlık” hesaplama yöntemleridir. Eğer elemanın akustik performansı gibi durumlar ön planda ise ve bunlar dikkate alınacaksa, bu gibi durumlarda net birim hacim ağırlık üzerinden analizle yapılması istenir. Elemanın ısı yalıtımı, yangın direnci veya nakliyesi gibi durumlarda ise brüt birim hacim ağırlığı dikkate alınır (TS EN 772-13, 2002).

Net kuru birim hacim ağırlık (ρ_{net}) hesaplarında, elemanın geometrik ölçülerinin çarpımı sonucu elde edilen görünür hacminden tüm boşluklarının hacmi çıkarılır ve böylece V_n değeri hesaplanır. Etüv kurusu ağırlık ise m_{kuru} olarak ifade edilir ve aşağıdaki eşitlik kullanılarak net kuru birim hacim ağırlık hesaplanır:

$$\rho_{net} = \frac{m_{kuru}}{V_n} \quad (1.1)$$

Brüt birim hacim ağırlık ($\rho_{brüt}$) hesaplarında ise, elemanın uygulama sırasında harç ile dolacak tüm boşluk ve oyuntuları toplam hacimden çıkarılarak V_g değeri hesaplanır. Daha sonra aşağıdaki eşitlik kullanılır:

$$\rho_g = \frac{m_{kuru}}{V_g} \quad (1.2)$$

d) Basınç dayanımı

Briketlerde basınç dayanımı değerinin en az 20 MPa olması istenmektedir. Bir briket grubunda ise ortalama dayanım değerinin 25 MPa olması istenmektedir. Eğer kullanılacak briket asmolen briketi ise, bu briketlerde ayrıca kesme dayanımı için de 20 MPa alt sınırı belirlenmiştir (Gündüz, 1998; Çiçek, 2002).

Briketlere basınç dayanımı testi uygulanırken düz bir yüzeye basınç uygulanması istenir. Eğer istenilen düzlük mevcut değilse, yüzey bir miktar aşındırma suretiyle düzeltilir. Başka bir yöntem ise düz bir zemin elde edebilmek için başlıklama yapılmasıdır. Yüklemenin yapılacağı yüzey, eğer boşluk ve çukur içeriyorsa, bu boşluk ve çukurlar toplamı, toplam yükleme alanının %35'ini aşmamalıdır. Eğer test uygulanacak briket bu sınırı aşıyorsa,

mevcut boşluklar harç ile doldurularak bu sınır sağlanmalıdır. Bu işlem için veya başlıklamada kullanılacak harcın dayanımı da en azından briketin tahmini dayanımı veya minimum 30 MPa olacak şekilde ayarlanmalıdır. Standartlarda basınç dayanımı testlerinde uygulanacak yükleme hızları, tahmini dayanım değerlerine bağlı olarak çizelge şeklinde verilmiştir. Deney hızları bu durum gözetilerek ayarlanmalıdır (Çizelge 1.2) (Binboğa, 2019).

Çizelge 1.2. Tahmini basınç dayanımı değerlerine göre kullanılacak yükleme hızları (TS EN 772-1, 2002)

Tahmini basınç dayanımı değeri (MPa)	Yükleme hızı (MPa/s)
<10	0,05
11-20	0,15
21-40	0,3
41-80	0,6
>80	1,0

e) Durabilite özellikleri

Briketlerin karşılaşılabileceği en büyük dayanıklılık sorunları donma-çözülme ve boyut değişimidir. Ayrıca iklim koşulları nedeniyle nemden etkilenebilirler. Boşluklu bir yapıya sahip olan briketlere işleyen nem, soğuk havalarda donabilir ve buzlanma meydana getirebilir. Serbest su buz haline geçerken yaklaşık %9 oranında hacim genişmesi gösterir. Eğer elemanın boşlukları doymun durumdaysa, oluşan bu genişleme iç gerilmelere neden olacak, boşluk çeperlerinde meydana gelen bu basınç bulunduğu bölümün çekme gerilmesini aştığında çatlaklar meydana gelecektir. Oluşan çatlaklar sonucu, dökülmeler, parça kopmaları ve kabuk atmalar gerçekleşebilir. En tehlikeli durum ise boşluklarda bulunan serbest suyun havanın ısınması ve soğumasına bağlı olarak sürekli bir donma-çözülme döngüsü göstermesidir. Bir diğer problem ise aşırı sıcaklarda meydana gelebilecek termal genişlemelerdir. Mevsim geçişleri, gece-gündüz sıcaklık farkının yüksek olması gibi durumlarda oluşacak hacim değişiklikleri briketlerde çatlamalara yol açabilir. Bu yüzden briketlerin belirtilen olumsuzluklara karşı direnci tespit edilmelidir (Toklu, 2009).

f) Su emme

Briketler pomza agregası içermektedir. Bu agregalar oldukça boşluklu agregalar olduğundan, agregaların su emme performansı briketin su emme performansının belirlenmesinde büyük rol oynamaktadır. Agregaların su emmesi bütün briketin genel performansı üzerinde etkilidir. Örneğin briketin su emme kapasitesi yüksekse donma-çözünmeye karşı direnci, termal özellikleri ve mekanik dayanımı olumsuz etkilenebilir. Bu

nedenle su emmesinin olabildiğince düşük olması yapı ve eleman sağlığı açısından önemlidir (TS EN 772-11, 2002; Binboğa, 2019).

g) Ses yutma

Bir malzemenin yüzeyine çarpan ses dalgaları, o malzeme tarafından absorbe edilmeye çalışılır. Ancak bir kısmı geri yansır. Bu performans malzemenin akustik performansını belirler. Günümüzde yapı malzemelerinin ses yutma özelliklerinin iyi olması, gürültü kirliliği ile mücadelede oldukça önemli bir parametredir. Yüzeye çarpan ses dalgalarının ne kadarının yansıtıldığı, o malzemenin ses yutma katsayısını belirler. Briketlerde bulunan pomza agregalarının boşluklu yapısı elemanın da ses yutma kapasitesinin iyi bir düzeyde olmasını sağlamaktadır (Uğur, 2001; Binboğa, 2019).

h) Yangın direnci

Briketler TS EN 13501-1 standardına göre "A1 sınıfı" yanmaz malzeme kategorisindedirler. Bunun sebebi yapısında herhangi bir organik madde bulunmamasıdır. Bu durum, briketlerin yanmaz özellikte ve alev almayan, duman çıkartmayan malzemeler olmasını sağlamaktadır (Toklu, 2009).

1.4. Biyokütle

1.4.1. Tanım

Biyokütle hem florayı hem de faunayı içeren biyolojik bir maddedir. Biyokütle kaynakları arasında odun ve odun atıkları, tarımsal ürünler, su bitkileri, enerji bitkileri ve hayvan atıkları bulunmaktadır. Fotosentez sırasında havadaki CO₂, su ve güneş ışığı birbirleriyle reaksiyona girerek karbonhidratları oluşturur. Güneş ışığından gelen güneş enerjisi, karbon, hidrojen ve oksijen molekülleri arasındaki kimyasal bağlarda depolanır. Depolanan bu kimyasal enerji, biyolojik ve kimyasal işlemlerle bağların kırılmasıyla açığa çıkar. Oksijen molekülü karbonhidratlı ürünlerdeki karbonu oksitleyerek karbondioksit üretir ve karbondioksit başka bir biyokütle tarafından yeniden emilir. Ya bu biyokütle türleri genel olarak sürdürülebilir ve yenilenebilir organik maddeler olarak adlandırılır. Kuru biyokütle için yanma ve piroliz uygun iken nem içeriği yüksek biyokütle için fermentasyon tercih edilmektedir (Dal, 2018).

1.4.2. Biyokütlenin Önemi

Günümüzde, dünya ekonomisi büyük ölçüde fosil yakıtlar üzerine kuruludur. Ancak, fosil yakıt kaynakları doğal gereği tükenme eğilimindedir. Kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil

yakıtların dünya genelindeki rezervlerinin sırasıyla 200 yıl, 40-45 yıl ve 60 yıl kadar yeterli olabileceği tahmin edilmektedir. Enerjide dışa bağımlı olmak istemeyen ülkeler ve fosil yakıtların kullanımı sonucu ortaya çıkan çevresel sorunlar nedeniyle, dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelme eğilimi artmaktadır. Günümüzde güneş, rüzgâr ve dalga gibi yenilenebilir enerji kaynakları arasında en dikkat çekici olanı, çeşitlilik göstermesi, bol ve her yerde bulunabilir olması gibi avantajları nedeniyle biyokütle temelli yakıtlardır. Yapılan araştırmalar biyokütlenin potansiyelinin kullanılan enerjinin altı katı kadar olduğunu, Türkiye'nin yerli kaynakları ile bir biyokütle politikası izlemesi durumunda potansiyelinin oldukça yeterli olduğu belirlenmiştir. Özet olarak biyokütleyle dayalı enerji politikalarının tercihi, enerji ihtiyacındaki artışa istinaden dışa bağımlılığı azaltmak, ulusal enerji güvenliğini garanti altına almak ve artan çevre sorunlarına önlem almak ile doğrudan ilgilidir (Işıtan, 2016).

1.4.3. Biyokütle Kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında biyokütle önemli bir yere sahiptir. Nötr karbon salınımı, düşük maliyeti, bol miktarda ve yaygın olarak bulunabilirliği nedeniyle güneş, rüzgâr ve dalga enerjisi gibi diğer yenilenebilir enerji türlerine göre daha avantajlıdır. Başlıca biyokütle kaynakları bitkisel atıklar, hayvansal atıklar ve şehir ile endüstri atıklarıdır. Türkiye, biyokütle kaynakları açısından zengin bir ülke olmasına rağmen bu kaynaklar yeterince iyi değerlendirilmemektedir. Ülkemizde biyokütlenin büyük bölümünü tarım endüstrisi atıkları oluşturmaktadır. Ayrıca, Türkiye'deki mevcut tarımsal ve hayvansal atıkların, ülkenin enerji tüketiminin %22-27'sine yaklaşık olarak eşdeğer olduğu tahmin edilmektedir (Işıtan, 2016).

1.4.4. Biyokütlenin Avantajları

Ham biyokütle, petrolden önemli ölçüde daha az enerji içeriğine sahip olsa da, fosil yakıtlara kıyasla bazı önemli avantajlara sahiptir. Biyokütle, dünya çapında büyük rezervlere sahip yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Ucuz ve bol olmasıyla birlikte enerji ve kimyasalların önemli bir kaynağını teşkil eder. (Şensöz ve Angın, 2008; Işıtan, 2016)

Biyokütle üç ana nedenden dolayı cazip bir hammadde olarak görülmektedir. Birincisi, gelecekte sürdürülebilir bir şekilde geliştirilebilecek yenilenebilir bir kaynak olmasıdır. İkincisi, olumlu çevresel özellikleri sayesinde sera gazı emisyonlarını azaltması ve fosil yakıtlara bağlı olarak oluşan NO_x ve SO_x emisyonlarını düşürme potansiyeline sahip olmasıdır. Biyokütle, daha az sülfür ve ağır metal içerir. Üçüncüsü, fosil yakıt fiyatlarının

gelecekte artmasına karşı ekonomik potansiyel sunmasıdır. Biyokütlenin alternatif enerji kaynağı olarak öne çıkmasındaki diğer önemli nedenlerden biri de atmosfere yeni CO₂ salınımı yapmamasıdır. Biyokütle yandığında açığa çıkan karbon, atmosfere geri döner ve büyüyen bitkilerin yeni türlerine dönüşebilir. Bu nedenle, biyokütlenin enerji için kullanılması sıfır net CO₂ emisyonuna yol açabilir (Güney, 2013; Demirbaş, 2008; Tonbul, 2008; Işıtan, 2016)

Ayrıca, biyokütle depolamaya gönderilen atık miktarını ve yabancı petrole olan bağımlılığı azaltır. Biyokütle enerjisi, tarım bölgelerinde yeni iş alanları sağlayarak ekonomiyi canlandırmaya da yardımcı olacaktır (Türkoğlu, 2010).

1.4.5. Bir Biyokütle Kaynağı Olarak Fındık Kabuğu

1.4.5.1 Fındık

Fındık (*Corylus avellana* L.), Betulaceae (huşgiller) familyasına ait olup, bademden sonra en fazla üretilen sert kabuklu meyvedir (Shahidi ve ark., 2007). Dünya genelinde Türkiye, İtalya, Azerbaycan, İspanya ve Gürcistan gibi ülkelerde çeşitli fındık türleri yetiştirilmektedir. Fındık üretimi ve ihracatı yapan başlıca ülkeler ise Türkiye, İtalya, Azerbaycan, ABD ve Şili'dir. Fındığın 2500 yıl önce doğu karadeniz bölgesinde üretimine başlandığı, ilk üretimlerin ise Giresun bölgesinde yapıldığı bilinmektedir. Daha sonrasında önemli bir ürün olması sebebiyle Ordu, Trabzon, Samsun ve Rize gibi illerde de üretimi yaygınlaşmıştır (Kıngır, 2021; Şahin, 2023). Dünya genelinde, Türkiye, İspanya, İtalya, ABD, Çin, İran, Azerbaycan, Fransa ve Avustralya gibi ülkelerde fındık yetiştirilmektedir. Günümüzde, dünya genelinde yıllık fındık üretimi yaklaşık 1 milyon ton olup, bu miktarın %70'i Türkiye'de üretilmektedir. İtalya ve ABD ise daha düşük üretim oranlarına sahiptir (Özocak, 2021).

Beslenme açısından oldukça önemli olan fındığın yenilebilir iç kısmı, meyvenin yaklaşık %50'sini oluşturur. İç fındık oranları şu şekildedir: %2-6,5 su, %1-3 kül, %10-24 protein, %50-73 yağ, %10-22 karbonhidrat ve %1-3 selüloz (Baş ve ark, 1986). Fındık, potasyum, magnezyum, kalsiyum, selenyum, bitkisel protein, doymamış yağ asitleri, E ve B vitaminleri gibi besin maddelerini içerir. Ayrıca protein, yağ, karbonhidrat ve mineraller de bulunmaktadır. Fındığın yüksek orandaki doymamış yağ içeriği, kalp ve damar sağlığı için oldukça faydalıdır. Fındık kabuğundaki fitokimyasal maddeler, güçlü antioksidan özellikleriyle kansere karşı koruyucu etki sağlar (Karaosmanoğlu ve Üstün, 2017; Özocak, 2021).

Belirtilen özellikleri nedeniyle fındık üretimi yaygınlığını korumaktadır. 2016 yılı verilerine göre, ülkemizdeki fındık üretiminin %40'ı Doğu Karadeniz, %33'ü Doğu Marmara ve %27'si Batı Karadeniz bölgelerinden sağlanmıştır. TÜİK raporlarına göre, Türkiye'de toplam 33 ilde fındık yetiştiriciliği yapılmaktadır. Bu iller arasında, üretim alanı dağılımında %32 ile Ordu, %17 ile Giresun, %13 ile Samsun, %10 ile Sakarya, %9 ile Düzce, %9 ile Trabzon ve geri kalan %10'unda diğer iller bulunmaktadır (Özocak, 2021). Fındık, genellikle şekerleme ve çikolata üretiminde hammadde olarak kullanılmaktadır. Atıştırmalık olarak tüketimi ise daha düşük düzeydedir. Türkiye, dünyada hem atıştırmalık hem de gıda sanayinde hammadde olarak kullanılabilecek fındık üretiminde lider konumdadır. İşlenmiş fındık ürünleri de dikkate alındığında, dünya fındık piyasasının %80'i Türkiye'nin üretimiyle karşılanmaktadır.

1.4.5.2 Fındık kabuğu

Fındık, iç meyve ve dış kabuk olmak üzere iki kısımdan oluşur. Meyve elde edildikten sonra ortaya çıkan en önemli atık, fındık kabuğudur. Türkiye'de yıllık ortalama 600.000 ton fındık üretilmekte olup, kabuklu fındığın yaklaşık %50'si kabuk olarak değerlendirilirse, bu üretim sonucunda yıllık yaklaşık 300.000 ton fındık kabuğu ortaya çıkmaktadır. Fındık kabukları genellikle yerel olarak yakılarak ısı elde edilmekte, ancak bilinen endüstriyel bir kullanım alanı bulunmamaktadır. İçerdikleri lignin ve karbonhidrat bileşimleri nedeniyle fındık kabukları, biyorafineri yaklaşımı ile yüksek katma değerli bileşiklerin eldesinde ham madde olarak kullanılabilir (Hoşgün ve Bozan, 2017; Özocak, 2021). Fındık kabuğu, Türkiye'de fındık üretilen bölgelerde değerli ve yüksek kalorili (4.100–4.400 cal/g) bir yakacak olarak kullanılmaktadır. Genellikle doğrudan yakılmakta olan fındık kabuğu, daha yüksek ısı ve enerji elde etmek amacıyla briket haline getirilerek de kullanılmaktadır (Topçuoğlu, 2008; Özocak, 2021).

2. LİTERATÜR ÖZETLERİ

2.1. Briket Üretimi ile İlgili Çalışmalar

Literatürde briket üretimi, briket performansı ve briket hammaddelerinin geliştirilmesi gibi konularda bazı araştırmalar bulunmaktadır. Bu araştırmaların kısa özetleri aşağıda verildiği gibidir;

Ağırdır (1989), Altınapa bimsini kullanarak hafif beton üretimini araştırmıştır. Mevcut agreganın bims üretiminde kullanımı için agrega özellikleri ve üretilen nihai ürünün standartlara uygunluğu incelenmiştir.

Gençer (2000), pomza agregalı briketler kullanarak yapılan yığma yapıların deprem performansını incelemek amacıyla bir yığma yapı modeli hazırlamış ve testlerini sarsma tablası ile gerçekleştirmiştir. Araştırmada, bu yapıların deprem davranışları üzerinde en önemli etkenlerin blokların basınç dayanımı ve boşluk oranları olduğu vurgulanmıştır. Briketlerin boşluklarına bir miktar harç girmesiyle yatay yüklere karşı dayanımın arttığı tespit edilmiştir. Önceki tuğla kullanılan yığma yapı deneylerinde elde edilen sonuçların alt ve üst sınırlarına bakıldığında, briket esaslı yığma yapılardan elde edilen değerlerin de bu sınırlar içinde kaldığı ifade edilmiştir.

Çiçek (2002), agregası pomza olan briketler, pişmiş topraktan üretilmiş tuğlalar, bazı perlitli yapı malzemeleri ve gazbetonların mekanik, kimyasal ve fiziksel özelliklerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. Değerlendirmelerinde, pomza agregası kullanılarak üretilmiş olan briketleri ısı ve ses yalıtımı özelliklerinin oldukça iyi olduğu belirtilmiştir. Türkiye'nin zengin pomza yataklarına sahip olmasının bu bağlamda değerlendirilebileceğine işaret etmiştir. Ayrıca üretilen malzemeler görece daha hafif olduğundan yapı iskelet sisteminin ağırlığını düşüreceği ve bununla donatılandırmada ekonomiklik sağlayacağı belirtilmiştir. Bununla birlikte farklı iklim şartlarından kaynaklı büzülme ve genleşmeye, ayrıca yangına karşı dayanıklı olmasının büyük bir avantaj olduğu vurgulanmıştır. En büyük dezavantajının ise su ile temas durumundaki belirsiz davranışları olduğu ifade edilmiştir.

Sancak (2005), pomza agregaları içeren briketlerde değişen oranlarda silis dumanı kullanımının etkilerini araştırmıştır. Çalışmada, %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı kullanılarak briketler üretilmiş 100 – 1000 °C arası yüksek sıcaklık testleri ve korozyon, kenetlenme değerlendirmeleri yapılmıştır. Sonuçlara göre, silis dumanı kullanımı, normal betona göre %23 oranında dayanım kaybı yaşayan briketlerde %48-65 arası basınç dayanımı

artışı sağlamıştır. Silis dumanı, donatı aderansını artırmış, korozyon performansını iyileştirmiş ve klorür ile karbonatlaşma miktarlarını azaltmıştır. Ancak, yüksek sıcaklık performansı olumsuz etkilenmiştir.

Kıvrak (2006), Çayırhan uçucu külü ve Isparta pomzası kullanarak briket üretmiştir. Çalışmada, çimentonun ağırlıkça %0, 5, 10, 15, 20 ve 25'i oranında uçucu kül kullanılmıştır. Üretilen briket örnekleri üzerinde birim hacim ağırlık, basınç dayanımı ve ısı iletkenlik testleri yapılmıştır. Sonuçlar, elde edilen en önemli avantajın birim hacim ağırlıkları olduğunu göstermiştir. Ayrıca, uçucu kül içeren briketlerin ısı iletkenlik değerleri bir miktar iyileşmiş olsa da, bu iyileşmenin istenilen düzeyde olmadığı görülmüştür.

Gündüz ve ark. (2006), bims blok üretiminde geleneksel yöntemden farklı olarak sadece pomza agregası değil, bununla birlikte çeşitli oranlarda genleştirilmiş perlit kullanarak örnekler üretmişlerdir. Ürettikleri örneklerin mühendislik özelliklerini incelediklerinde genleştirilmiş perlit agregası katkısının bims blok üretimi açısından önemli avantajlar sağladığını gözlemlemişlerdir.

Mor (2007), briketlerin ısı iletim katsayılarının iyileştirilebilmesi için üzerlerinde bulunan boşluklara çeşitli ısı yalıtım malzemeleri eklemiştir. Sektörde yaygın olarak kullanılan tuğla, strafor, gazbeton gibi malzemelerin termal iletim katsayıları referans alınarak, geleneksel briketlerin boşlukları cam yünü ve poliüretan ile doldurulmuş, böylece elde edilen ürünler ile bilinen ürünler karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, boşlukları doldurularak üretilen yeni ürünlerin daha düşük termal iletim katsayılarına sahip olduğu tespit edilmiştir.

Kocaman (2009), pomza agregası ve pomza agregası ile üretilen bimsbeton ürünlerinin inşaat sektöründeki kullanımını mimari ve sürdürülebilirlik açısından değerlendirmiştir. Çalışma, pomza agregasının inşaat sektöründe geniş bir kullanım alanına sahip olduğunu ve Türkiye'nin bu alanda büyük bir maden rezervine sahip olduğunu vurgulamaktadır. Hafif beton agregası, yalıtım malzemesi, dolgu, sıva, beton katkısı ve prefabrike hammaddesi olarak pomza kullanımının yaygınlaştırılması gerektiği ve bu konuda daha fazla araştırma yapılmasının önemi üzerinde durulmuştur.

Toklu (2009), pomza agregasından bims blok üretimi yapan bir tesiste, tüvenan olarak kullanılan agregayı yıkayıp safsızlıklarından arındırmış ve bu şekilde üretim prosesine sokmuştur. Tüvenan pomza agregası ve yıkanmış pomza agregası ile üretilmiş bims blokların özelliklerini karşılaştırmıştır. Elde edilen ürünleri standartlara uygunluğunu ele almıştır.

Binboğa (2019), Afşin-Elbistan termik santralinden elde edilen atık uçucu kül ve taban küllerinin duvar briketi üretiminde kullanımını araştırmıştır. Adı geçen her iki malzeme de farklı oranlarda bims yerine kullanılmıştır. %40 uçucu kül ve %10 taban külünün kullanıldığı briketlerin basınç dayanımı ve birim ağırlık yönünden optimum oran olduğu tespit edilmiştir.

Akyüncü (2019), normal agregalı beton blok ile değişik oranlard pomza içeren beton blokları karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Özel bir kapalı sistem oluşturularak yangın direnci incelemesi yapılmıştır. Üretilen blokların yüzey sıcaklığı ölçümleri yapılmıştır. Hafif beton bloklarda tuğlalara göre yüzey sıcaklığının %50 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Yangın etkisi sonra basınç dayanımları incelendiğinde ise hafif beton bloklarda basınç dayanımı kaybının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Kayan (2019), Bitlis bölgesinde yer alan pomza agregasını kullanarak bims blok üretmiş ve ürettiği örneklerin mekanik dayanımlarının düşük olması nedeniyle %2, %3, %5 ve %7 oranlarında çelik lif eklemiştir. Ürettikleri örneklere fiziksel ve mekanik testler uygulamış, lif kullanımının bims blokların basınç dayanımı gibi kritik özelliklerinde iyileşmelere yol açtığını tespit etmiştir.

Denktaş (2019), bims blok üretiminde uçucu kül kullanımının etkilerini araştırmıştır. Bims blok karışımında çimento yerine %20, %30 ve %40 oranlarında uçucu kül ikame etmiş, üretilen örneklerin birim ağırlıklarını ve basınç dayanım değerlerini incelemiştir. Sonuç olarak, genel özellikler incelendiğinde, bims blok üretiminde %30 gibi bir oranda uçucu kül ikamesinin mümkün olduğunu ifade etmiştir.

Kamacı (2021), duvarlarda ısı yalıtım elemanı olarak kullanılan çeşitli ticari elemanları, birçok standart teste tabi tutarak, malzeme performanslarını değerlendirmiş ve karşılaştırmalarını yapmıştır. Buna göre bims blokların daha çok yığma ve karkas yapılar kullanılmasının uygun olacağını tavsiye etmiştir.

Turğut ve ark. (2022), beton sektöründe kullanım olmayan Sivas – Kangal termik santrali uçucu külünün atık cam tozu ve kireç ile birlikte kullanılarak kendiliğinden yerleşen briket malzemesi üretimini araştırmışlardır. Sonuç olarak %66 uçucu kül, %7 kireç ve %27 cam tozu kullanmak suretiyle 67,5 MPa basınç dayanımı veren (56 günlük) briketler üretmeleri mümkün olmuştur. Aynı zamanda fiziksel ve iç yapı özelliklerini de inceleyerek ürettikleri malzemenin konut sektöründe kullanılabilir olduğu sonucuna varmışlardır.

2.2. Fındık Kabuğu ve Külü ile İlgili Çalışmalar

Literatürde fındık kabuğu atıklarının ve fındık kabuğu yakımından ortaya çıkan külün değerlendirilmesi üzerine farklı disiplinlerde yapılmış bazı çalışmalar bulunmaktadır. Bunlardan bir kısmının özetleri aşağıda verildiği gibidir;

Bayrak ve ark. (2006), sentetik çözeltilerden Cr(IV) adsorbe edebilmek için aktifleştirilmiş fındık kabuğu külü ve aktif bentonit kullanımını araştırmışlardır. Bu amaç için iki farklı boyutta fındık kabuğu külü hazırlayarak termal işleminden geçirmişlerdir Fındık kabuğu külü ile maksimum giderimi pH 3 seviyesinde elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Bakisgan ve ark. (2009), çeşitli tarımsal kül atıklarının içeriklerini incelemişlerdir. Bunlar buğday samanı, zeytin küspesi ve fındık kabuğudur. Bu ürünlerin biyokütle ortalama kül değerleri sırasıyla %7,9, %3,9 ve %1,2 olarak ifade edilmiştir. Yapılan birçok kimyasal analiz ve mikroyapı incelemesi sonucunda küllerin içeriğindeki en yüksek elementin Fe, onu takip eden ikinci elementin ise Mn olduğunu tespit etmişlerdir.

Şencan (2011), çalışmasında ağır metalleri (Kurşun II) sulu çözeltilerden uzaklaştırmak için atık fındık kabuklarına işlem uygulayarak aktif karbon eldesi ve bunun performansını incelemiştir. Atık fındık kabuklarını 250 ve 700 °C'de ısıtma işlemiyle aktive edip, farklı kimyasallar ile kimyasal aktivasyona maruz bırakmıştır. Mikrodalga ve ultrason tekniklerinden de faydalanarak aktif karbon elde etmiştir ve Pb(II) adsorpsiyon kapasitesi üzerine çalışılmıştır.

Çam (2017), çalışmasında kil esaslı tuğla üretimi yapılırken mukavemet özelliklerini artırmak amacıyla atık kırmızı çamur, diğer taraftan bünyede boşluk oluşturmaya ve ısı yalıtım özelliği kazandırması amacıyla fındık kabuğu kullanmıştır. Fındık kabuğunun tuğla üretimi esnasında yanarak boşluklar oluşturmaya hedeflenmiştir. Böylece hem ısı yalıtım özelliğinin geliştirilmesi hem de atıkların değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Farklı oranlarda fındık kabuğu ve kırmızı çamur, temel üretim hammaddesi olan kil yerine kullanılmıştır. Ağırlıkça %10 fındık kabuğu ve %30 kırmızı çamur barındıran karışımda yüksek gözenekli ürünler elde edilmiştir. Mekanik özellikleri bakımından da bu karışımın kullanıma uygun olduğu rapor edilmiştir.

Şengün (2018), fındık kabuğu atıklarını değerlendirmek için, fındık kabuğundan ekstrasyon yöntemi ile fenolik ve antioksidan bileşiklerin eldesini araştırmıştır. Yapılan çalışma sonucunda 4 g fındık kabuğu ve 250 ml çözücü kullanılarak en başarılı sonucu elde ettiğini ifade etmiştir.

Dal (2018), fındık kabuğu atıklarını değerlendirmek için kritiküsti etanol, asteton ve bu çözüngenlerin karışımlarını kullanarak üretilecek biyo-yağ üzerine araştırmalar yapmıştır. Bu ürünün verimi, atık dönüşüm oranı ve dağılımı, reaksiyon sıcaklığı ve süresi, çözüngen oranlarının nasıl etkilendiğini araştırmıştır.

Baran ve ark. (2020), çimentolu sistemlerde atık fındık kabuğu külünün kullanımı araştırmışlardır. Karışımlarında çimento yerine %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında fındık kabuğu külü kullanmışlar, örneklerin fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Fındık kabuğu külünün su ihtiyacını artırdığı, diğer taraftan priz süresini önemli ölçüde azalttığını gözlemlemişlerdir. Fındık kabuğu külünün %5'in üzerinde kullanılmasının yetersiz bir basınç dayanımı oluşturduğunu rapor etmişlerdir. Bu külün kimyasal kompozisyonu itibariyle puzolanik özelliğe haiz olmadığı, diğer taraftan bir priz hızlandırıcı olarak kullanılabileceği rapor edilmiştir.

Durmaz ve Baran (2020), yol altyapı dolgusu için yetersiz, yüksek plastisiteli bir killi zeminde stabilizasyon için fındık kabuğu külünün kullanımını araştırmışlardır. Ağırlıkça %3, %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35 ve %40 oranlarında fındık kabuğu külü içeren zemin karışımları hazırlamışlar ve zemin özelliklerini incelemişlerdir. Genel olarak en uygun sonuçların %15 oranında fındık kabuğu külü içeren zeminlerden elde edildiğini rapor etmişlerdir. Böylece fındık kabuğu külünün zemin iyileştirilmesi ve zeminlerin amaca uygun hale getirilmesi çalışmalarında kullanılabilirliğini ortaya koymuşlardır.

Gündoğan (2021), fındık kabuğu külü ve atık geri kazan külünü (kromit cevheri işlenmesi sonucu oluşan) esnek üst yapı kaplamalarında filler malzeme olarak kullanımı üzerine çalışmıştır. BU kapsamda kalker filler malzemesi yerine farklı oranlarda harmanlamak suretiyle fındık kabuğu külü ve atık geri kazan külü kullanmıştır. Üretilen örneklerde fındık kabuğu külü agrega yüzeyini kaplamış ve agrega-bitüm birleşimini zayıflayarak ürünün kalıcılığını olumsuz etkilemiştir. Atık geri kazan külünün ise stabilite değerlerini artırıp, boşluk değerlerini azalttığı görülmüştür.

Özocak (2021), enerji elde etmek adına yakılan fındık kabuklarının ve briketlenmiş fındık kabuklarının oluşturdukları küllerin analizini yaparak yüksek miktarda silis içerdiğini, bu nedenle puzolanik özellik taşıyabileceğini belirtmiştir. Üretilen beton örneklerde %5, %10, %15 ve %20 oranlarında fındık kabuğu külünü çimento ile ikame etmiştir. Yapılan testler sonucunda %10'a kadar fındık kabuğu külü ve %5'e kadar fındık kabuğu briket külü kullanımı ile üretilen betonların C25 sınıfına uygun olduğu rapor edilmiştir.

Yalçın (2022), tarımsal atıkların inşaat sektöründe kullanılabilirliğinin araştırılması ve çevre kirliliğinin azaltılmasına katkıda bulunmak amacıyla, çimento, reçine epoksi ve 0-2 mm boyut aralığına sahip fındık kabuğu kullanarak kompozitler üretmiştir. Aynı zamanda çalışmasının bir diğer bölümünde ise bu kompozitleri yüksek fırın cürufu da ekleyerek üretmiştir. Sonuç olarak çimentolu kompozitlerde fındık kabuğu kullanımının mümkün olduğunu bu çalışmanın en önemli bulgusu olarak ortaya koymuşlardır.

Yurt ve Bekar (2022), atık fındık kabuğu külü ile alkalilerle aktive edilmiş çimentosun beton üretimi üzerine çalışmışlardır. Atık fındık kabuğu külünü, metakaolin ve yüksek fırın cürufu ile aktifleştirip, 3, 7 ve 28 gün boyunca farklı kür şartlarında kürlemişlerdir. Sonuç olarak kürleme yönteminin fiziksel ve mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisi olduğunu, fındık kabuğu külü ile üretilen bu betonların etkin bir biçimde kullanılabileceğini ve özellikle aşınma direnci konusunda iyi sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Miladinovic ve ark. (2022), atık fındık kabuğu külünü kullanılmış Ayçiçek yağının biyodizele transesterifikasyonunda yeni bir baz kataliz olarak kullanımını araştırmışlardır.

Şahin (2023), yaptığı çalışmada atık fındık kabuklarını değerlendirmek için alkali ekstraksiyon yöntemini kullanmış ve lignoselülozik bileşikler elde etmiştir. Bu bileşikleri elde ederken deneysel tasarım ile farklı parametrelerin etkinliklerini de incelemiştir. Ayrıca üretilen fındık kabuğu tozu ve ham fındık kabuğu tozunun kitosan ambalaj film yapısında dolgu maddesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır.

Pala (2023), fındık kabuğu ve fındık kabuğu kullanarak üretilen aktif karbonu sulu çözeltilerde boyar madde giderici olacak kullanmış ve performansını değerlendirmiştir. Üretilen ürünlerin bazı boyları içeren tekstil işlemlerinde, atıksu arıtımından güvenle kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Tanyıldızı ve ark. (2024), yol kaplamalarının altında bulunan zeminlerde meydana gelen şişme-büzülme hareketinin kaplamalara ciddi bir zarar verdiği, bunu azaltmak için zeminlerin stabilize edilmeleri gerektiğini ifade etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada yol kaplamalarının altında bulunan zeminlerin stabilizasyon için atık fındık kabuğu külünü kullanmışlardır. Toprağa ağırlıkça %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında atık fındık kabuğu külü eklenmiştir. Her ne kadar fındık kabuğu külü basınç dayanımında bir düşüşe neden olsa da şişme-büzülme performansı oldukça iyileşmiştir. Aynı zamanda artan fındık kabuğu külünün ıslanma kuruma performansını da geliştirdiği görülmüştür. Belli bir fındık kabuğu külü oranına kadar zemin oturmalarının da düştüğü rapor edilmiştir.

Omur ve ark. (2024), atık fındık kabuğu külünün alkalilerle aktifleştirilmiş malzeme üretiminde alternatif bir aktifleştirici olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Böylece ticari olarak elde edilen aktifleştiricilere bir alternatif geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Yüksek fırın cürufunu NaOH ve KOH ile aktifleştirerek fındık kabuğu külü ile aktifleştirilmiş örneklerle karşılaştırmışlardır. 28 günlük test sonuçları fındık kabuğu külü ile aktifleştirilmiş örneklerin 28 gün sonunda 2 mol NaOH ve 2,2 mol KOH içeren örneklere denk olduğu ve 26,8 MPa'ya kadar basınç dayanımı verebildiği rapor edilmiştir.

3. MATERYAL ve METOT

3.1. Materyal

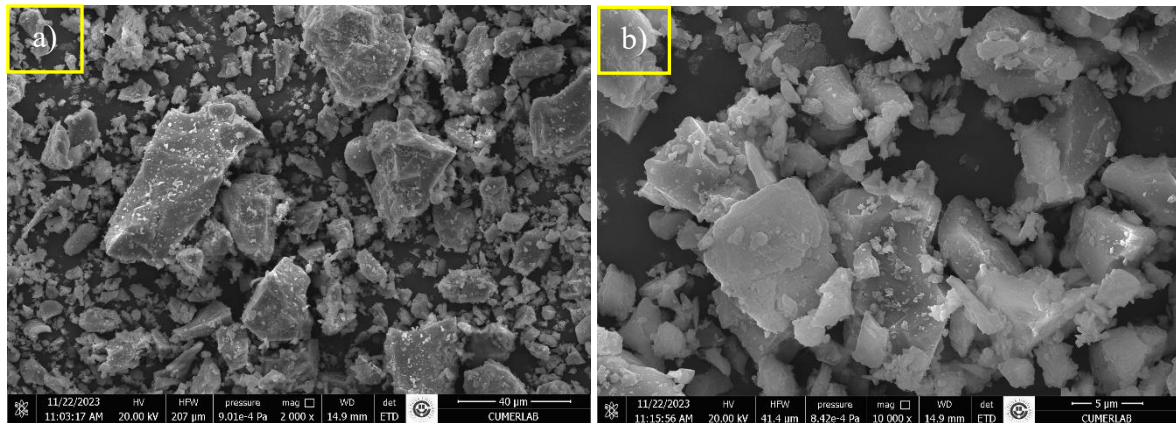
Bu bölümde, briket üretiminde kullanılan çimento, yüksek fırın cürufu, fındık kabuğu külü, pomza ve karışım suyu ile ilgili bilgiler verilmiştir.

3.1.1. Çimento

Çalışmada, Çimentaş Grup Elâzığ Çimento fabrikasında üretilen CEM I 42,5 R Portland Çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun teknik özellikleri Çizelge 3.1’de ve SEM görüntüsü Şekil 3.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 Çimentonun teknik özellikleri

Kimyasal Özellikler	
Oksitler	İçerik (%)
SiO ₂	15,64
Al ₂ O ₃	3,64
Fe ₂ O ₃	4,37
CaO	66,58
SO ₃	2,59
MgO	1,80
K ₂ O	0,88
Na ₂ O	0,32
MnO	0,14
TiO ₂	0,28
Kızdırma Kaybı (%)	3,41
Fiziksel Özellikler	
Özgül Ağırlık	3,13
İncelik (cm ² /g)	3646



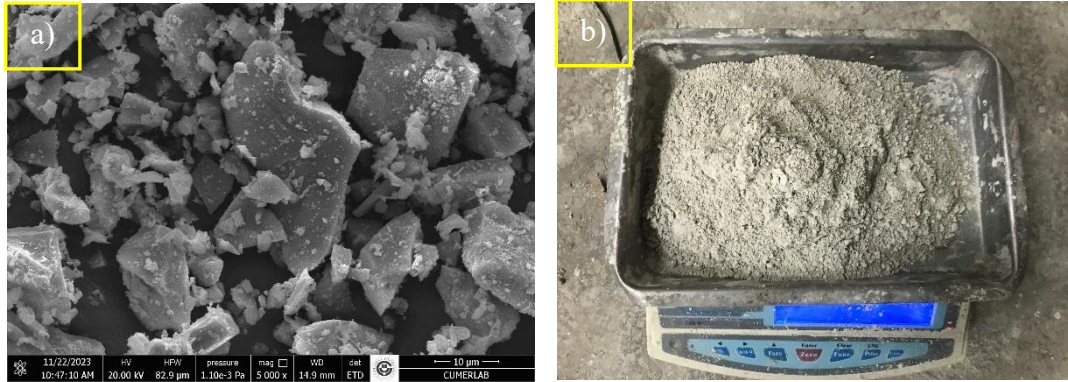
Şekil 3.1 Portland çimentosuna ait SEM görüntüleri a) 2000 büyütme b) 10000 büyütme

3.1.2. Yüksek fırın cürufu

Demir-Çelik endüstrisinin bir atığı olan yüksek fırın cürufu Karçimsa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş'den temin edilmiştir. YFC'nin teknik özellikleri Çizelge 3.2'de ve SEM görüntüsü ve hammadde görseli Şekil 3.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2 Yüksek fırın cürufunun teknik özellikleri

Kimyasal Özellikler	
Oksitler	İçerik (%)
SiO ₂	31,42
Al ₂ O ₃	9,72
Fe ₂ O ₃	1,58
CaO	40,59
SO ₃	0,51
MgO	5,67
K ₂ O	0,93
Na ₂ O	0,46
MnO	3,05
TiO ₂	1,60
Kızdırma Kaybı	3,97
Fiziksel Özellikler	
Özgül Ağırlık	2,87
İncelik (cm ² /g)	5078



Şekil 3.2 Yüksek fırın cürufuna ait a) SEM görüntüsü b) malzeme görseli

3.1.3. Öğütülmüş fındık kabuğu külü

Ekmek fırınları bölgesel olarak fırın yakıtı olarak farklı malzemeler tercih etmektedir. Ancak tez çalışmasının yürütüldüğü Elbistan bölgesi ve diğer birçok bölgede yakıt olarak fındık kabuğu tercih edilmektedir. Fındık kabuğu yakıt olarak kullanıldıktan sonra önemli miktarda atık kül ortaya çıkmaktadır. Çalışmada kullanılan fındık kabuğu külü Elbistan bölgesinde ticari faaliyet gösteren ekmek fırından tedarik edilmiştir. 1,0 mm kare gözlü elek yardımı ile kül içerisinde bulunan iri ve yanmamış parçalar ayrılmıştır. Elenmiş kül bilyeli değirmende

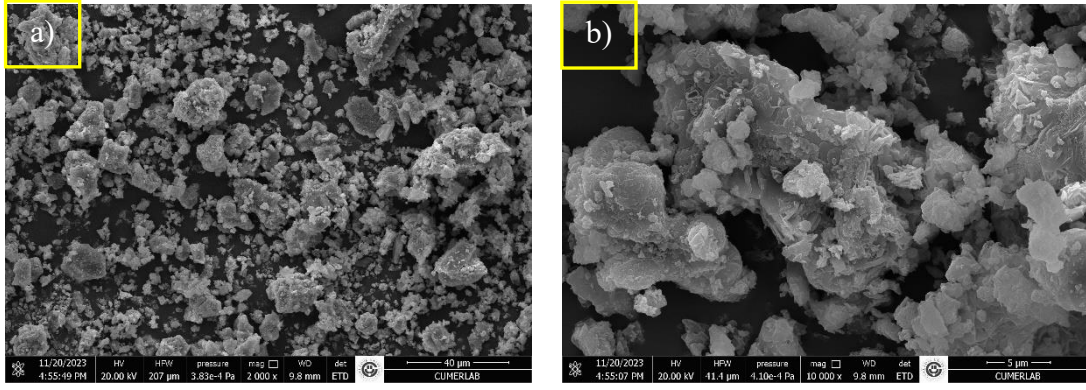
35 dakika boyunca öğütülmüştür. Külün öğütme işlemine kadar tabi tutulduğu aşamalar Şekil 3.3'te verilmiştir. Öğütülmüş külün fiziksel ve kimyasal analizi Çizelge 3.3'te ve SEM görüntüsü Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.3 Öğütülmüş külün elde edilme aşamaları

Çizelge 3.3 Öğütülmüş külün kimyasal ve fiziksel analizi

Kimyasal Özellikler	
Oksitler	İçerik (%)
CaO	35,03
K ₂ O	24,16
SiO ₂	3,92
MgO	3,83
Fe ₂ O ₃	3,51
SO ₃	1,58
Al ₂ O ₃	1,29
MnO	0,66
TiO ₂	0,36
Na ₂ O	0,27
Cr ₂ O ₃	0,14
Kızdırma Kaybı (%)	22,30
Fiziksel Özellikler	
Özgül Ağırlık	2,55
İncelik (cm ² /g)	3615



Şekil 3.4 Öğütülmüş külün SEM taraması a) 2000 büyütme b) 10000 büyütme

3.1.4. Pomza agregası

Çalışmadan kullanılan agrega gri renkli asidik pomza agregasıdır (Şekil 3.5b). En büyük tane çapı 12,5 mm olan pomza agregası kullanılmış ve agrega Kayseri bölgesinden elde edilmiştir. Pomza agregasının su emme ve özgül ağırlıkları TS EN 1097-6 (2022) standardına, elek analizleri TS EN 13055 (2016) ve TS EN 933-1 (2012) standartlarına göre yapılmıştır. Agregaların tane boyutları ASTM C 330'a göre uygun olarak belirlenmiştir. Pomza agregasının elek analizi Çizelge 3.4'te ve teknik özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5 a) Elek sarsma cihazı b) pomza agregası

Çizelge 3.4 Pomzanın elek analizi ve teknik özellikleri

Elek no (mm)	Geçen (%)	ASTM C 330'a göre sınır değerler		
		Elek no (mm)	Üst	Alt
16	100	19	100	100
11,2	93,8	12,5	100	95
8	75,2	9,5	-	-
5,6	66,7	4,75	80	50
4	58,4	0,3	20	5
2	40,9	0,15	15	2
1	34,7	0,075	10	0
0,5	18,5			
0,25	7,6			
0,075	2,4			
Fiziksel Özellikler	0-4 mm		4-12,5 mm	
Özgül Ağırlık	1,60		1,09	
Su emme (%)	23,66		38,71	

3.1.5. Karışım Suyu

Çalışmada kullanılan su, musluk suyudur ve TS EN 1008 standardına uygundur.

3.2. Metot

3.2.1. Briketlerinin üretilmesi

Asidik pomza agregası ile üretilen briketlerin agrega miktarı sabit tutularak çimento yerine ağırlıkça %50 ve %100 oranlarında öğütülmüş yüksek fırın cürufu (C) ve öğütülmüş fındık kabuğu külü (H) karışımı ile ikame edilmiştir. Bu karışımın birincisi %25'i H ve %75'i C, ikincisi ise %50'si H ve %50'si C olacak şekilde tasarlanmıştır. Her bir karışım için 16 adet 36,5x19x17,5 cm boyutlarında briket imal edilmiştir. Karışım hesapları TS 2511 standardına göre belirlenmiş ve 5 farklı karışım olarak hazırlanmıştır. 1 m³ briket üretimi için karışım hesapları Çizelge 3.5'te sunulmuştur.

Çizelge 3.5 1 m³ briket üretimi için karışım hesabı

Karışım	Bileşenler (kg/m ³)				
	Çimento	Fındık Kabuğu Külü	Cüruf	Pomza (0-12,5 mm)	Su
R	200	-	-	1032	160
1	100	25	75	1032	162
2	100	50	50	1032	164
3	-	50	150	1032	164
4	-	100	100	1032	168

Karışımlar üretimine başlamadan önce pomza agregasının karışım suyunu azaltmaması için doyma suyu verilmelidir. Bu su miktarı sıcaklık, nem, agregaların su emme değerlerine ve tane boyutlarına göre değiştiği unutulmamalıdır. Malzemeler Çizelge 3.5'e göre hassas bir şekilde tartılarak kuru karışım mikserine konulur (Şekil 3.6). Kuru karışım mikserde homojen oluncaya kadar karıştırılır ardından su ilave edilir ve tekrar karıştırılır. Karışım homojen hale geldikten sonra mikserde taşıma bandına iletilir. Karışım bant yardımı ile pres makinesinin haznesine aktarılır ve ardından titreşim verilerek preslenir (Şekil 3.7).



Şekil 3.6 Malzemelerin hassas tartılması ve karışım mikserinin görüntüleri



Şekil 3.7 Bant sistemi ve üretim sistemi

Briketler preslendikten sonra ahşap plakaların üzerine yerleştirilir ve forklift yardımı ile uygun bir yere konulur (Şekil 3.8).

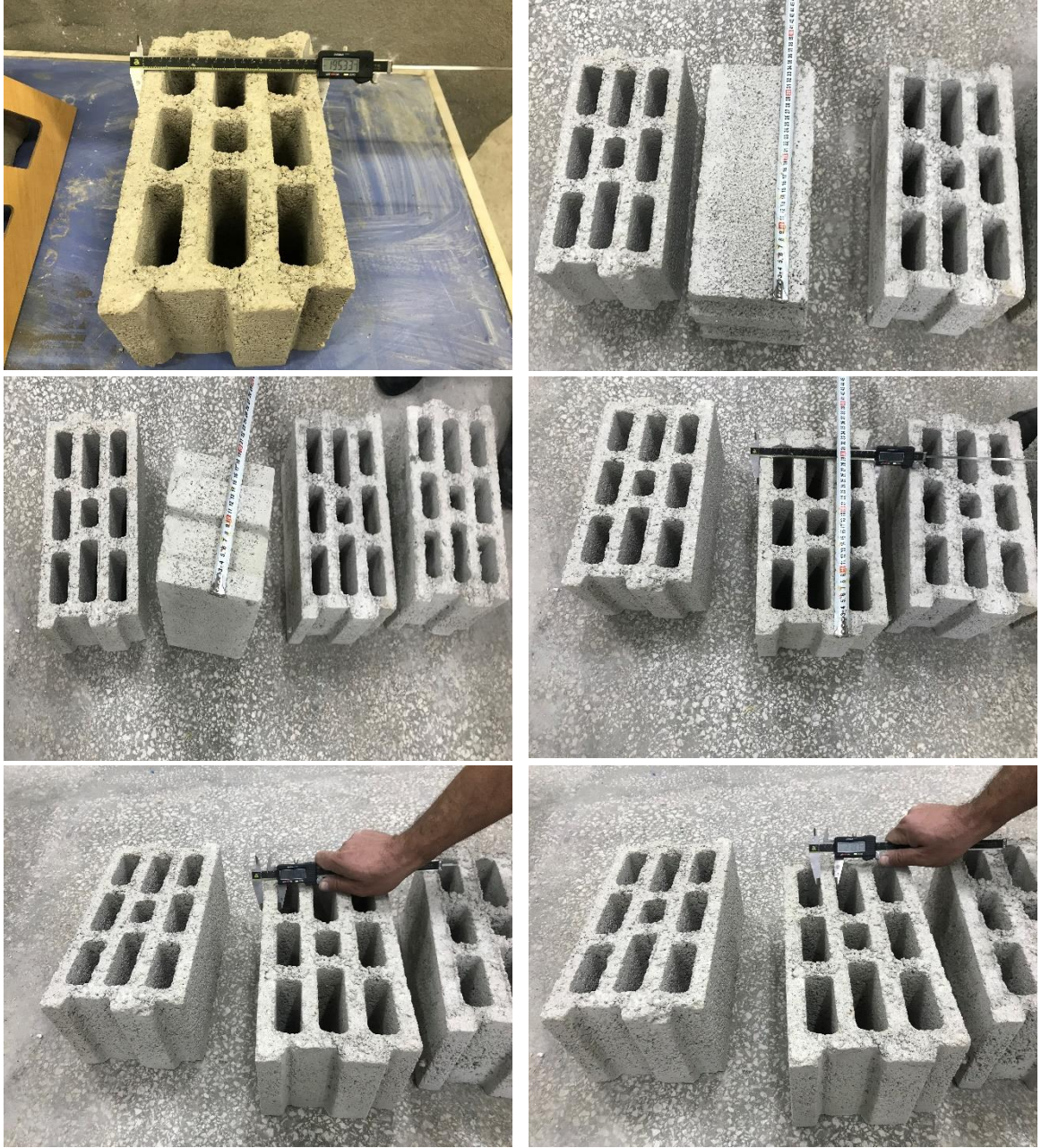


Şekil 3.8 Presten çıkan numuneler ve sertleşmiş numuneler

Üretilen briketler bir gün boyunca dış ortam şartlarında bekletilmiştir. Referans numunesi üretim yapıldıktan bir gün sonra sulanarak kürlenmiştir. Diğer örnekler ise referans numunesi gibi yeterli dayanıma ulaşamadıklarından, dağılma riskine karşın üretimden beş gün sonra ancak sulanabilmiştir. Sulama işlemleri bütün gruplar için bir kez uygulanmıştır. İlk bir haftalık süre sonrasında referans numunesi hariç diğer numuneler haftada üç gün bir kez olmak üzere sulanmıştır. Bu işlem deney gününe kadar devam ettirilmiştir.

3.2.2. Briketlerin boyutlarının ölçülmesi ve konfigürasyon analizi

Briket numunelerinin boyut kontrolü TS EN 772-2 ve TS EN 772-16 (2012) standartlarına göre yapılmıştır. Briketlerin uzunluk, genişlik ve yükseklikleri (uçtan uca olacak şekilde), iç ve dış cidar kalınlıkları kumpas ve cetvel ile ölçülmüştür (Şekil 3.9). Briketlerin dikdörtgen prizması şeklinde olup olmadığı, kenar ve köşe düzgünlüğü incelenmiştir. Yarık, döküntü ve çatlak analizi görsel olarak yapılmıştır. Numunelerin gönye yardımı ile dik açıdan sapma oranları ölçülmüştür. Üretilen briketlerin tamamının standartlara uygunluğu kontrol edilmiştir.



Şekil 3.9 Numunelerin boyutlarının kontrolü ve standartlara uygunluğunun incelenmesi

3.2.3. Briketlerin birim hacim kütle deneyi

Briket numunelerinin birim hacim kütle deneyi TS EN 772-13 (2002) standardına uygun şekilde yapılmıştır. Numuneler hassas bir şekilde boyutları ölçülerek hacimleri belirlenmiştir. Briketler 105 ± 5 °C sıcaklıkta 24 saat etüvde kurutulmuştur. Briketlerin kuru ağırlıkları hassas terazi ile ölçülmüş ve denklem 3.1 ile birim hacim kütleleri hesaplanmıştır.

$$BHK = \frac{M}{V} \quad (3.1)$$

Burada;

BHK: Briketin birim hacim kütlesi (kg/m^3)

M: Briketin kütlesi (kg)

V: Briketin hacmi (m^3)'dir.

3.2.4. Briketlerin su emme ve porozite deneyi

Briketler 20 ± 2 °C sıcaklıktaki su içerisinde 24 saat süre ile bekletilmiştir (Şekil 3.10). Her bir numunenin dış kısımları silinerek yüzeyi kuru doygun halde tartılmıştır (m_d) (Şekil 3.10). Ardından numunelerin Arşimet prensibi ile sudaki ağırlıkları hassas terazi ile ölçülmüştür (m_s) (Şekil 3.11). Numuneler 105 ± 5 °C sıcaklıktaki etüv içerisinde 24 saat boyunca kurutulmuştur (Şekil 3.10). Oda sıcaklığına erişen numuneler tartılarak kuru ağırlıkları belirlenmiştir (m_k). Briketlerin su emme oranları denklem 3.2'ye ve porozite oranları denklem 3.3'e göre hesaplanmıştır.

$$S = \frac{m_d - m_k}{m_k} \quad (3.2)$$

$$P = \frac{m_d - m_k}{m_d - m_s} \quad (3.3)$$

Burada,

S: Ağırlıkça su emme (%)

P: Porozite (%)

m_d : Briketin doygun kütlesi (g)

m_s : Briketin su içerisindeki kütlesi (g)

m_k : Briketin kuru kütlesi (g)'dir.



Şekil 3.10 Briketlerin suda bekletilmesi ve kuru numuneler



Şekil 3.11 Briketlerin suya doymun halde ve su içinde tartılması

3.2.5. Briketlerin kılcal su emme deneyi

Briketlerin kılcal su emme deneyi TS EN 771-3 (2012) ve TS EN 772-11 (2012) standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Numuneler kuru hale getirilmek için 105 ± 5 °C sıcaklıkta 24 saat süre boyunca etüve konulmuştur (M_k). Briketlerin su içinde kalacak olan yüzeylerine su itici malzeme sürülmüştür. TS EN 772-16 (2012) standardına göre briketlerin su içerisinde kalacak kısımların boyutları ölçülmüş ve brüt yüzey alanı (A_s) hesaplanmış ve su içerisine 5 ± 1 mm derinlikte olacak şekilde mesnetlerin üzerinde konulmuştur. Deney esnasında su seviyesinin sabit kalmasına dikkat edilmiştir. Numuneler su içerisinde belli bir süre bekletilmiş (t), suya batan yüzey kurulanmış ve ardından tartılmıştır (M_s) (Şekil 3.12). Briketlerin kılcal su emme katsayıları ve ilk su emme hızları denklem 3.4'e göre hesaplanmıştır.

$$K = \frac{M_s - M_k}{A_s \times t} \quad (3.4)$$

Burada,

K: Kılcal su emme katsayısı ($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

M_k : Briketin kuru kütlesi (g)

M_s : Briketin deney sonrasındaki kütlesi (g)

t: Briketin su içerisinde bekletme süresi (s)

A_s : Briketin brüt yüzey alanı (m^2)'dir.



Şekil 3.12 Kılcal su emme deneyi

3.2.6. Briketlerin ısı iletim katsayısı tayini

Isı iletim katsayılarını belirlemek için briketler etüvde 105 ± 5 °C sıcaklıkta kurutulmuştur. Numuneler üç göz odadan oluşan ısı iletkenlik ölçüm cihazı içerisine orta odacığa yerleştirilmiştir (Şekil 3.13). Birinci göz oda fanlı ısıtıcı yardımıyla belirli sıcaklıklara kadar ısıtılmaktadır. Burada numune yüzey sıcaklığı ölçen üç adet sıcaklık sensörü bulunmaktadır. Üçüncü göz oda ise sadece numune yüzeyini ölçebilen sıcaklık sensörleri vardır. Briket numune cihaza yerleştirildikten sonra belirli bir sıcaklığa getirilmiş ve ardından belirli süreler sonunda sıcaklık göstergeleri kaydedilmiştir. Numunelerin ısı iletim katsayısı değerleri denklem 3.5'e göre hesaplanmıştır.

$$\lambda = \frac{Q \times t}{\Delta t \times A} \quad (3.5)$$

Burada,

λ : Isı iletkenlik katsayısı (w/(m.K))

Q: Geçen ısı (w)

t: Briketin kalınlığı (m)

Δt : Isı farkı (K)

A: Briketin ısı geçen yüzey alanı (m²)’dır.



Şekil 3.13 Isı iletkenlik ölçüm cihazı

3.2.7. Briketlerin basınç dayanımı deneyi

TS EN 771-3 (2012) ve TS EN 772-1:2011+A1 (2015) standartlarına göre briketlerin basınç dayanımı belirlenmiştir (Şekil 3.14). Numunelerin basınç dayanım değerleri denklem 3.6’ya göre hesaplanmıştır. Basınç dayanımı sonrasında kırılan numuneler Şekil 3.15’te gösterilmiştir.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.6)$$

Burada,

σ : Gerilme (MPa)

P: Maksimum kuvvet (N)

A: Numuneni kuvvet uygulanan yüzey alanı (mm²)’dır.



Şekil 3.14 Basınç presi



Şekil 3.15 Basınç deneyi sonrası kırılan bimsler

3.2.8. Bağlayıcı malzemelerin priz süresi tayini

Briketlerin üretiminde kullanılan bağlayıcı malzemelerin priz süreleri TS EN 196-3 (2017) standardına göre tayin edilmiştir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 Vicat deneyi

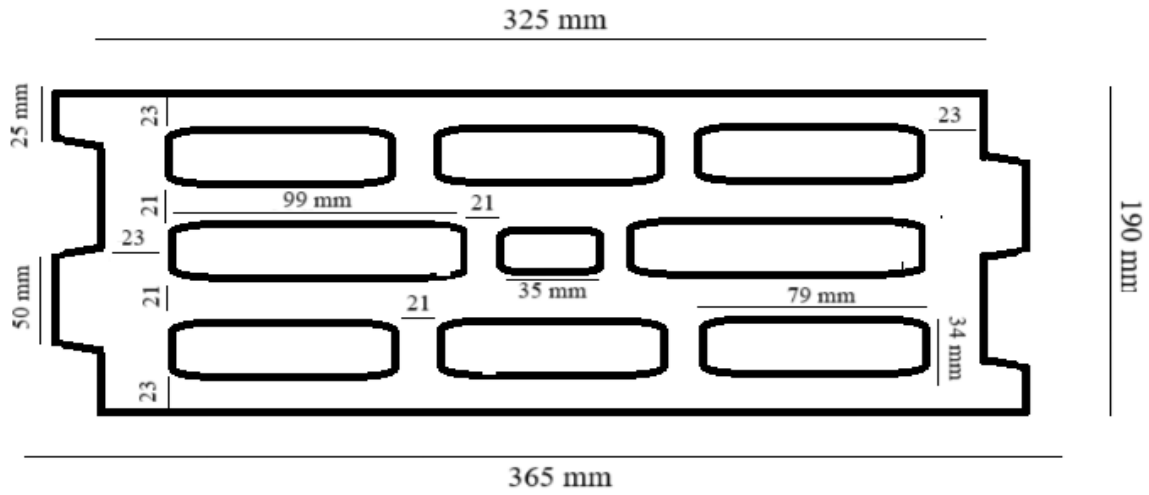
3.2.9. Bağlayıcı malzemelerin iç yapı incelemeleri

Briketlerin üretiminde kullanılan bağlayıcı malzemelerden hamur üretilerek 7 ve 28 gün süreyle kürlenmiştir. Belli karışımların mikro yapısındaki oluşumları görüntülemek amacıyla SEM incelemeleri yapılmıştır. Bununla birlikte yine aynı karışımlardan alınan hamur örnekleri öğütülerek toz hale getirilmiş ($<45 \mu\text{m}$) ve oluşan fazların incelenerek değerlendirilmesi için XRD analizleri uygulanmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Briketlerin Boyut, Tolerans ve Konfigürasyon Analizleri

Briketler Şekil 4.1’de verilen ölçülere sahiptirler. Belirtilen boyutlara göre yapılan üretimler, boyut kontrolleri standartlarına göre analiz edilmişlerdir. TS EN 771-3 standardında verilen sapma miktarları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bunun için uzunluk, genişlik ve yükseklik değerleri ölçülmüştür. Briketlerin boyut toleransları Çizelge 4.2’de verildiği gibidir.



Şekil 4.1 Üretilen briketlerin boyutları (yükseklik = 175mm)

Çizelge 4.1 TS EN 771-3 standardına göre sapma miktarları (mm)

Tolerans Sınıfı	D1	D2	D3	D4
Uzunluk	+3 -5	+1 -3	+1 -3	+1 -3
Genişlik	+3 -5	+1 -3	+1 -3	+1 -3
Yükseklik	+3 -5	±2	±1,5	±1

Çizelge 4.2 Briketlerin boyut toleransları

Numuneler	Uzunluk Kontrolü sapma oranları (365 mm)						Ortalama Sapma
R	+1	0	+1	0	+1	0	+0,5
1	0	+1	0	0	0	+1	+0,33
2	0	0	+1	+1	+1	0	+0,5
3	0	0	+1	0	0	0	+0,17
4	0	+1	0	0	+1	0	+0,33
Numuneler	Genişlik Kontrolü sapma oranları (190 mm)						Ortalama Sapma
R	-1	-1	0	-1	0	-1	-0,67
1	-1	-1	0	-1	0	0	-0,5
2	0	-1	0	-1	-1	0	-0,5
3	-1	-1	-1	0	-1	0	-0,67
4	-1	-1	-1	0	-1	-1	-0,83
Numuneler	Yükseklik Kontrolü sapma oranları (175 mm)						Ortalama Sapma
R	+1	0	0	+2	+1	+1	+0,83
1	+2	+1	0	+1	+1	+1	+1
2	+1	+1	+2	0	0	+1	0,83
3	+1	+1	+1	+2	0	+1	1
4	0	+2	0	+1	+1	+1	+0,83

Briketlerin yapılan ölçümlere göre gene boyut ve tolerans değerlendirmeleri Çizelge 4.3'te verildiği gibidir.

Çizelge 4.3 Briketlerin genel boyut ve tolerans değerlendirmesi

Numuneler	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)	Tolerans Sınıfı
R	365,5	189,33	175,83	D4
1	365,33	189,5	176	D4
2	365,5	189,5	175,83	D4
3	365,17	189,33	176	D4
4	365,33	189,17	175,83	D4

Çizelge 4.3'te verilen genel değerlendirmeye göre alınan ölçümler ve ortalama değerlerin tamamı TS EN 771-3 standardında izin verilen sınırlar dahilindedir. Burada tolerans değerleri hassasiyet artacak şekilde D1'den D4' olmak üzere 4 sınıfa ayrılmıştır. Çalışma kapsamında üretilen örneklerin tamamı tolerans değerlerinin en düşük olduğu, yani hassasiyetin en yüksek olduğu D4 sınıfına uyum göstermektedir.

Briketlerin tamamı boşluklu ve lamba zıvanalı formlu ve dikdörtgen prizmatik şekle sahiptir. Üretilen örneklerin konfigürasyon analizleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 Briketlerin konfigürasyon analizleri

Numuneler	Toplam Boşluk Oranı (%)	En Büyük Boşluk Oranı (%)	Toplam Oyuk Oranı (%)	İç cidar Kalınlığı (mm)	Dış cidar Kalınlığı (mm)		Döşeme Yüzü Toplam Boşluk Oranı (%)
					Enine	Boyuna	
R	29,63	4,41	5,47	21,97	23,01	22,98	36,67
1	29,59	4,31	5,49	21,95	22,97	22,99	36,58
2	29,25	4,23	5,39	21,98	22,99	22,98	36,42
3	29,74	4,26	5,43	21,99	22,97	22,99	36,61
4	29,67	4,35	5,54	21,96	22,98	23,00	36,74

Briketlerin konfigürasyon analiz sonuçlarının incelendiğinde referans örneğin ile diğer örnekler arasındaki farklılıkların oldukça küçük olduğu görülmektedir. Toplam boşluk oranı bakımından maksimum %0,38’lik bir sapma görülürken, en büyük boşluk oranının se maksimum %0,08 saptığı gözlenmiştir. Diğer taraftan Toplam oyuk oranı %0,06 ve iç cidar kalınlığı 0,04 mm’den daha büyük bir sapma göstermemiştir. Dış cidar kalınlığı enine en fazla 0,04 mm ve boyuna ise en fazla 0,01 mm sapmıştır. Döşeme yüzü toplam boşluk oranında ise bu sapma maksimum %0,16’dır.

4.2. Briketlerin Birim Hacim Kütle Testi Sonuçları

Briket numunelerin birim hacim kütle testi sonuçları Çizelge 4.5’te verilmiştir. Briketlerin birim hacim kütle testi sapma değerleri ise Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.5 Briketlerin birim hacim kütle testi sonuçları

Numune	Boyutlar (mm ³)	Kuru Kütle (g)	Toplam Boşluk Hacmi (mm ³)	Net Hacim (mm ³)	Net Kuru Birim Hacim Kütle (kg/m ³)	Brüt Hacim (mm ³)	Brüt Kuru Birim Hacim Kütle (kg/m ³)
R	365,9x189,1x176,9	6996,1	3651372,2	8588638	814,6	12240010,0	571,6
R	365,1x190,1x175,9	7018,4	3632141,8	8576287	818,3	12208429,2	574,9
R	366,1x189,9x175,1	7097,2	3610507,6	8562863	840,5	12173370,5	591,2
Ortalama					824,5		579,2
1	364,9x189,1x175,1	6836,3	3608103,8	8474250	806,7	12082353,5	565,8
1	365,1x190,0x176,9	6957,4	3641757,0	8629619	806,2	12271376,1	567,0
1	365,0x189,9x176,1	6887,9	3629738,0	8576369	803,1	12206107,4	564,3
Ortalama					805,4		565,7
2	365,9x189,9x175,9	6801,4	3627334,2	8594974	791,3	12222307,7	556,5
2	365,1x189,9x176,9	6855,3	3639353,2	8625564	794,8	12264917,5	558,9
2	365,9x189,1x176,1	6817,9	3620122,8	8564534	796,1	12184656,6	559,5
Ortalama					794,1		558,3
3	366,1x190,1x175,0	6597,8	3603296,2	8575936	769,3	12179231,8	541,7
3	365,1x190,1x176,9	6643,2	3648968,4	8628866	769,9	12277834,7	541,1
3	364,9x188,9x175,1	6603,6	3605700,0	8463875	780,2	12069574,7	547,1
Ortalama					773,1		543,3
4	365,9x189,9x175,9	6515,7	3624930,4	8597377	757,9	12222307,7	533,1
4	365,9x189,1x175,1	6496,2	3610507,6	8504957	763,8	12115464,9	536,2
4	365,9x189,1x176,9	6573,8	3651372,2	8588638	765,4	12240010,0	537,1
Ortalama					762,4		535,5

Çizelge 4.6 Briketlerin birim hacim kütle testi sapma değerleri

Numune	Net Kuru Birim Hacim Kütle sapma değeri (%)	Brüt Kuru Birim Hacim Kütle sapma değeri (%)
R	-1,20	-1,32
R	-0,75	-0,75
R	1,94	2,07
Ortalama	1,30	1,38
1	0,17	0,02
1	0,11	0,22
1	-0,28	-0,25
Ortalama	0,19	0,16
2	-0,34	-0,33
2	0,09	0,11
2	0,25	0,22
Ortalama	0,23	0,22
3	-0,49	-0,29
3	-0,42	-0,41
3	0,91	0,70
Ortalama	0,61	0,47
4	-0,59	-0,44
4	0,19	0,14
4	0,40	0,30
Ortalama	0,39	0,29

TS EN 771-3 standardı brüt kuru birim hacim kütle değerlerinin en fazla 1000 kg/m³ olması gerektiğini belirtmektedir. Buna göre elde edilen değerler bu üst sınırdan %42,08 - %46,45 arasında daha azdır. Üst sınıra göre en düşük değer 4 numaralı örnekten elde edilmiştir. En düşük değer ise R örneğinden elde edilmiştir. YFC ve FTK kullanımı brüt kütlede düşüşe neden olmuştur. Yine aynı standarda göre brüt kuru birim hacim ağırlık sapma değerinin %10'dan fazla olmasına izin verilmemektedir. Çizelge 4.6'da verilen ortalama değerlerin tamamı %1,5 seviyesinin bile altındadır. Bu nedenle üretilen örnekler standartlara uygunluk göstermektedir.

4.3. Su Emme ve Porozite Testi Sonuçları

Üretilen örneklere 7 ve 28. günlerde uygulanan su emme ve porozite testlerinin sonuçları Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 Briketlerin su emme ve porozite sonuçları

Numune	7 Günlük		28 Günlük	
	Su emme (%)	Porozite (%)	Su emme (%)	Porozite (%)
R	31,45	30,53	28,58	27,62
R	33,00	31,69	30,38	29,65
R	31,78	30,36	28,92	27,88
Ortalama	32,08	30,86	29,29	28,38
1	40,32	39,14	37,44	37,26
1	38,84	37,69	38,45	37,72
1	37,87	36,41	35,97	34,61
Ortalama	39,01	37,75	37,29	36,53
2	41,49	40,94	39,76	38,72
2	43,64	42,45	41,29	40,91
2	42,33	41,06	40,15	39,02
Ortalama	42,49	41,48	40,40	39,55
3	46,79	45,60	43,54	42,17
3	48,97	47,69	46,77	45,89
3	46,44	45,61	45,12	43,98
Ortalama	47,40	46,30	45,14	44,01
4	49,61	48,34	47,06	46,18
4	50,40	49,61	48,17	47,69
4	49,97	48,51	47,86	46,65
Ortalama	49,99	48,82	47,70	46,84

Örneklerin porozite sonuçları incelendiğinde hem 7. günde hem de 28. günde FTK kullanımına bağlı olarak artmaktadır. 28 günlük sonuçlar, reaksiyonların ilerlemesine bağlı olarak daha düşük çıkmıştır. 1 ve 2 no’lu örnekte kullanılan çimento miktarı yarıya düşürülmüş ve yerine katkılar kullanılmıştır. Bu durum su ihtiyacında bir miktar artışa neden olmuştur. 1 ve 2 no’lu numune kendi arasında karşılaştırıldığında ise karışımdaki toplam FTK oranının arttığı görülmektedir. Buna bağlı olarak da 28 günlük sonuçlar incelendiğinde

porozitede referans örneğe göre %39,4 porozite artışı olduğu gözlenmektedir. Bu artış 1 no'lu örnekte %28,7'dir. Diğer taraftan 3 ve 4 no'lu numuneden ise çimento kullanımı tamamen kaldırılmış, bağlayıcı olarak katkıları kullanılmıştır. Bu durum porozitenin daha büyük değerler almasına neden olmuştur. Bu artış sırasıyla %55,1 ve %65'dir. Yine her iki karışım kendi içerisinde değerlendirildiğinde FTK miktarının fazla olduğu 4 no'lu numune daha yüksek porozite değeri vermiştir. Halihazırda YFC reaksiyonlarının çimento reaksiyonları kadar iyi olmadığı bilinmektedir. Bu durum çimento bağlayıcılı briketler ile katkılı briketler karşılaştırıldığında porozite artışını anlamlı kılmaktadır. Aynı zamanda 1 ve 2 ile 3 ve 4 no'lu numuneler arasındaki farklılıklar FTK'nın reaksiyonlarda yeterince yer alamadığı düşüncesini doğurmuştur. Diğer bir faktör ise YFC ve FTK'nın inceliklerinin farklı olması (bkz. Çizelge 3.3 ve 3.4), YFC'nin görece daha ince olmasından kaynaklı oluşturduğu dolgu etkisi olarak değerlendirilebilir. Su emme değerleri incelendiğinde porozite sonuçlarına oldukça benzer bir durum görülmektedir. Çimentonun azaltılması ve FTK miktarındaki artış su emme değerlerinde artışa neden olmuştur. 28 günlük su emme değerleri referans örneği ile karşılaştırıldığında 4 örnek için sırasıyla %27,3, %37,9, %54,1 ve %62,9 oranlarında artış gözlemlenmiştir.

4.4. Briketlerin Kılcal Su Emme Test Sonuçları

Briketlere uygulanan kılcal su emme testi sonuçları Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8 Briketlerin kılcal su emme testi sonuçları

Numune	Brüt Alan (mm ²)	Sabit Kuru Kütle (g)	Batırma Süresi (s)	Deney Sonrası Numune Ağırlığı (g)	İlk Su Emme Hızı kg/(m ² .dk)	Kılcal su emme g/(m ² *s ^{0,5})
R	65472,3	7196,6	600	7467,7	4,14	169,04
R	65550,0	7019,6	600	7345,6	4,97	203,03
R	69105,5	7089,7	600	7394,7	4,41	180,18
Ortalama					4,51	184,09
1	65440,0	6975,1	600	7341,3	5,60	228,45
1	65472,3	6897,6	600	7246,1	5,32	217,31
1	65645,0	6911,5	600	7301,1	5,93	242,29
Ortalama					5,62	229,35
2	65548,1	6859,6	600	7444,7	8,93	364,41
2	65299,5	6798,5	600	7402,5	9,25	377,62
2	66066,9	6828,2	600	7370,2	8,20	334,92
Ortalama					8,79	358,98
3	65337,8	6549,5	600	7201,7	9,98	407,51
3	65409,7	6628,1	600	7252,0	9,54	389,40
3	65220,6	6657,3	600	7312,9	10,05	410,37
Ortalama					9,86	402,43
4	69109,5	6477,8	600	7238,8	11,01	449,54
4	69109,5	6522,7	600	7260,9	10,68	436,07
4	69109,5	6581,3	600	7315,9	10,63	433,95
Ortalama					10,77	439,86

Briketler ile ilgili Türk Standartları'nda kılcal su emmeye dair sınır değerler bulunmamakla birlikte genel olarak üreticinin kendi beyan ettiği değerlerin sağlanması esas alınmaktadır. Bu çalışmada referans örneğinden 4,51 kg/m².dk ilk su emme hızı elde edilmiştir. Bu değer Görhan (2011) tarafından yapılan çalışmada bulunan tuğla örneklerinin değerlerine göre yüksek kalırken (0,29-0,68 kg/m².dk), briket üretimi üzerine Binboğa'nın (2019) yaptığı çalışmadaki örneklere göre oldukça iyidir (ortalama 10,0 kg/m².dk). Tıpkı atmosferik su emme testlerinde olduğu gibi kılcal su emme hızları ve değerleri referans örneğinden 4 numaralı örneğe doğru yükselmektedir. İlk su emme hızları referans örneğine göre sırasıyla %24,1, %94,9, %116,3 ve %138,8 oranlarında artmıştır. Bu durum iri boyutlu boşluk miktarının artmasının yanı sıra kılcal boşlukların miktarında da bir artış olduğunu ifade etmektedir.

4.5. Briketlerin ısı iletim katsayılarının Analizi

Briketlerin ısı iletim katsayıları Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9 Briketlerin ısı iletim katsayıları

Numune	1. numune W/(m.K)	2. numune W/(m.K)	3. numune W/(m.K)	Ortalama W/(m.K)	Standart Sapma
R	0,2017	0,1844	0,1805	0,1889	0,0113
1	0,1785	0,1618	0,1691	0,1698	0,0084
2	0,1371	0,1449	0,1306	0,1375	0,0072
3	0,1285	0,1213	0,1174	0,1224	0,0056
4	0,1241	0,1197	0,1109	0,1182	0,0067

Üretilen örneklerin ısı iletim katsayıları 0,1182 – 0,1889 W/m.K arasında değişmektedir. En düşük ısı iletim katsayısı 4 numaralı örnekten elde edilmiştir. En yüksek değer ise referans örneğinden elde edilmiştir. Bilindiği üzere çimento esaslı malzemelerde boşluk yapısı ile ısı iletkenlik katsayısı arasında bir ilişki bulunmaktadır. Malzemenin boşluk yapısı ısı iletkenlik katsayısını etkileyen temel faktörlerden biridir. Üretilen briketlerin porozitesi bölüm 4.3’te verilmişti. Elde edilen ısı iletkenlik katsayı eğilimleri de bu bölümde verilen porozite değerleri ile uyumluluk içerisindedir (Asadi ve ark., 2018). Duran-Herrera ve ark. (2015) uçucu kül içeren hafif agregalı betonlarının ısı iletim katsayılarının 0,16-0,31 W/m.K arasında değiştiğini rapor etmişlerdir. Bir yalıtım malzemesi olarak kullanılan otoklav betonunun ise ısı iletim katsayısının 0,09 – 0,2 W/m.K arasında değiştiği rapor edilmiştir (450 – 750 kg/m³ yoğunluk aralığında) (Ahmed ve Kamau, 2017). Bazı yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayıları şu şekildedir (Asadi ve ark., 2018): Mineral yünü: 0,03-0,04 W/m.K, Selüloz yalıtım: 0,04 – 0,05 W/m.K, Mantar: 0,04-0,05 W/m.K, EPS: 0,03 – 0,04 W/m.K, Poliüretan: 0,02 – 0,03 W/m.K, Ahşap: 0,014 W/m.K, Seramik tuğla: 1,10 W/m.K. Briketler için hazırlanmış Türk Standartları’nda herhangi bir ısı iletim katsayısı kısıtlaması olmamasına rağmen binalarda ısı yalıtım kurallarından bahseden TS 825’e göre 600 kg/m³ yoğunluğuna sahip briketler için 0,26 W/m.K, 700 kg/m³ için 0,28 W/m.K ve 800 kg/m³ için 0,30 W/m.K değerleri istenmektedir. Isı yalıtımı amacıyla kullanılacak briketlerde ise 0,28 - 0,30 W/m.K değerleri istenmektedir. Bu değerler ve üretilen tüm örneklerin birim hacim kütlelerinin 600 kg/m³’ten biraz küçük olduğu göz önüne alındığında yapılan çalışmada en yüksek ısı iletim katsayısının 0,1889 W/m.K olması umut vericidir.

4.6. Briketlerin Basınç Dayanımı Testi Sonuçları

Basınç dayanımının ölçülmesinde, yükün uygulanacağı yüzeyin alanı, briketin uzunluğu ve genişliğinin çarpılmasıyla elde edilen mm² cinsinden brüt alan olarak hesaplanır. Döşeme yüzeyine dik olmayan yönde basınç yükü uygulanan briketin brüt alanı da benzer biçimde belirlenir, ancak bu hesaplama genişlik-yükseklik veya uzunluk-yükseklik ölçülerinden uygun olanı kullanarak yapılır. Ek olarak, harç ile doldurulacak çukurlar içeren briket örneklerinin net alanı, brüt alanın %35'inden daha büyükse, bu yüzeyin basınç dayanımı net yükleme alanı üzerinden hesaplanır. Çukurların net alanı, brüt alanın %35'inden daha küçükse, basınç dayanımı briketin brüt alanı kullanılarak belirlenir. Diğer durumlarda, doldurulması planlanmayan boşluklar veya çukurlar brüt alana dahil edilir. Basınç dayanımı en yakın 0.1 N/mm²'ye yuvarlatılarak ifade edilir. Buna göre yapılan hesaplar sonucu elde edilen 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10 Briketlerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri

Numune	Kırılma Yüğü (kN)		Basınç Dayanımı (MPa) Net Alana göre		Basınç Dayanımı (MPa) Brüt Alana göre	
	7 günlük	28 günlük	7 günlük	28 günlük	7 günlük	28 günlük
R	80,9	99,4	1,79	2,21	1,17	1,43
R	88,7	108,6	1,97	2,41	1,28	1,57
R	78,5	102,7	1,74	2,28	1,13	1,48
Ortalama	82,7	103,6	1,8	2,3	1,2	1,5
1	55,7	77,0	1,24	1,71	0,80	1,11
1	53,3	59,6	1,18	1,32	0,77	0,86
1	57,0	81,3	1,26	1,80	0,82	1,17
Ortalama	55,3	72,6	1,2	1,6	0,8	1,0
2	33,6	58,5	0,75	1,30	0,48	0,84
2	30,5	50,1	0,68	1,11	0,44	0,72
2	36,2	48,8	0,80	1,08	0,52	0,70
Ortalama	33,4	52,5	0,7	1,2	0,5	0,8
3	11,6	20,8	0,26	0,46	0,17	0,30
3	12,7	24,1	0,28	0,53	0,18	0,35
3	13,3	15,9	0,30	0,35	0,19	0,23
Ortalama	12,5	20,3	0,3	0,4	0,2	0,3
4	-	12,5	-	0,28	-	0,18
4	-	13,7	-	0,30	-	0,20
4	-	11,9	-	0,26	-	0,17
Ortalama	-	12,7	-	0,3	-	0,2

Briketler için hazırlanmış standartlarda basınç dayanımı için bir alt sınır bulunmamaktadır. Bunula birlikte TS EN 771-3'te basınç dayanımı ile ilgili aşağıdaki ifade kullanılmıştır:

“Kagir numunelerin basınç dayanımı, imalatçı tarafından N/mm^2 olarak beyan edilmelidir. Beyan değeri, birimlerin ortalama basınç dayanımı (%50 alta düşme oranlı) f_m veya karakteristik basınç dayanımı değeri (%5 oranlı alta düşme oranlı) f_c olmalıdır.”

Üretilen örneklerin basınç dayanımı değerleri 7 günlük basınç dayanımı değerleri 0,3 – 1,8 MPa (net alana göre) ve 0,2 – 1,2 MPa (brüt alana göre) ve arasında değişmektedir. 4 numaralı örnekten ise 7 günlük basınç dayanımı değeri alınamamıştır. 28 günlük basınç dayanımı değerleri ise 0,3 – 2,3 MPa (net alana göre) ve 0,2 – 1,5 MPa (brüt alana göre) arasında değişmektedir. Her iki yaş için de sonuçlar öncelikle çimento miktarının düşmesine bağlı olarak, daha sonra FTK miktarındaki artışa bağlı olarak azalmaktadır. 28 günlük değerler dikkate alındığında net alana göre yapılan hesaplarda çimento, FTK ve YFC hibrit karışımı ile üretilen numuneler de (1 ve 2 no'lu) sırasıyla %30,4 ve %47,8 düşüş gerçekleşmiştir. Çimento yerine tamamen katkı kullanımı sonucu mekanik özelliklerdeki düşüşün mertebesi artmıştır. 50 kg/m³ FTK ve 150 kg/m³ YFC kullanılan 3 numaralı örnekte bu düşüş %82,6'ya, FTK ve YFC 100'er kg/m³ olarak kullanıldığında ise %87 oranında düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum daha önce porozite artışı nedeniyle tahmin edilen (bkz. Bölüm 4.3.) FTK ve YFC'nin reaksiyonlarda yeterince yer almayışı ve aktifleşmeyişi düşüncesini doğrular niteliktedir.

4.7. Bağlayıcı Fazların Priz Süresi İncelemeleri

Çalışma kapsamında briket üretimi için kullanılan bağlayıcı fazların priz süreleri incelenmiştir. Elde edilen priz başlangıcı ve priz bitişi değerleri Çizelge 4.11'de verilmiştir.

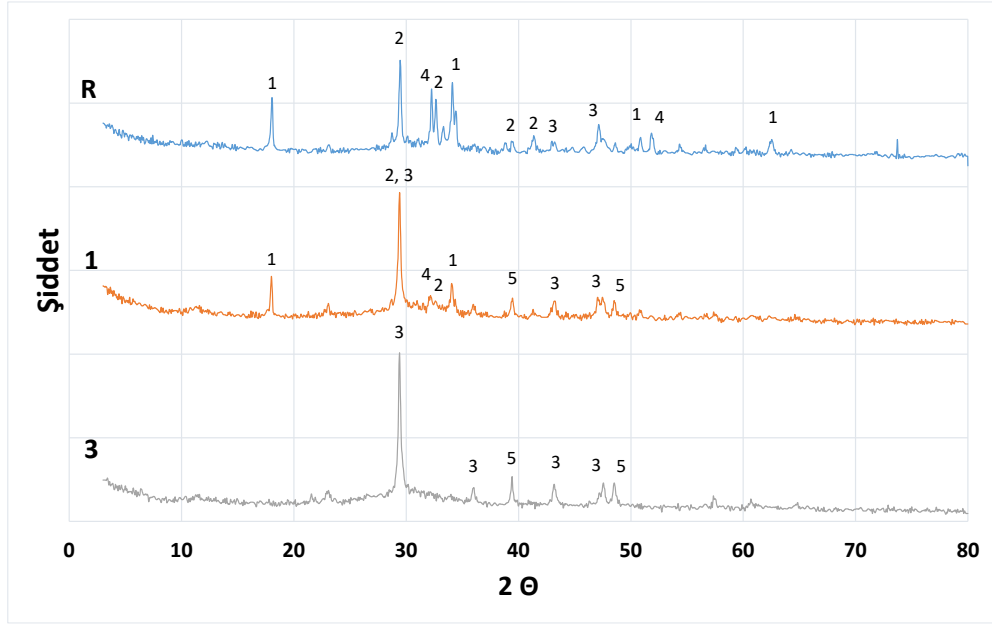
Çizelge 4.11 Bağlayıcı fazların priz başlangıç ve priz bitişi süreleri

Numuneler	Özellik	
	Priz Zamanı (± 5 dk)	
	Başlangıç (dk)	Bitiş (dk)
R	138	196
1	110	176
2	96	153
3	80	132
4	36	50

Çalışmada kullanılan bağlayıcılar, üretilen briketlerin priz sürelerini direkt olarak etkilemektedir. Üretilen elemanların kullanıma alınabilmesindeki en önemli etkenlerden birisi de priz süreleridir. Burada bağlayıcısı tamamen çimento olan sistemlerde priz başlangıcı 138 dk ve priz bitişi 196 dk olarak belirlenmiştir. Çimentonun azaltıldığı sistemlerde (1 ve 2 numaralı örnekler) sisteme eklenen YFC ve FTK'dan kaynaklı priz başlangıç ve bitişinde belirgin bir kısalma olmuştur. Özellikle FTK miktarındaki artış bu sürelerin kısalmasında etkin görülmektedir. Sistemde hiç çimentonun bulunmadığı, dolayısıyla FTK oranının daha da yükseldiği 3 ve 4 numaralı örnekler ise diğer örneklerle göre çok daha kısa sürelerde prizini tamamlamıştır. Özellikle FTK oranının en yüksek olduğu 4 numaralı örnek tamamen çimento ile üretilen referans örneğine nazaran %74 daha kısa sürede (102 dk daha kısa sürede) prize başlamış ve %75 daha kısa sürede (146 dk daha kısa sürede) prizini tamamlamıştır. Bu değerler inşaat sektörü ve inşaat malzemeleri sektörü gibi zamanın oldukça önemli olduğu sektörlerde oldukça kıymetli sürelerdir. Benzer bir durum Baran ve ark. (2020) tarafından da tespit edilmiş ve raporlanmıştır. Yaptıkları çalışmada %5 gibi küçük oranlarda fındık kabuğu külünün çimentolu sistemlere eklenmesi, priz başlangıç süresini %67 oranında kısaltmıştır. Kullanılan fındık kabuğu külü oranının %30 gibi yüksek oranlara çıkması ise priz başlangıç süresini %96'ya kadar kısaltmıştır. Yine küçük oranlarda kullanım priz bitiş süresini %51 kısaltırken, yüksek oranlarda kullanım %84 oranında kısaltmaya neden olmuştur. Sonuç olarak fındık kabuğu külünün çimentolu sistemlerde priz hızlandırıcı bir mekanizma geliştirdiği düşünülmüştür. Alkali içerikli katkıların çimentolu sistemlerde priz hızlandırıcı bir etki yaptıkları ifade edilmiştir. Fındık kabuğu külü de alkali içerikli bir katkı olduğundan, çimentolu sistemlerde priz hızlandırıcı vazifesi gördüğü belirtilmiştir.

4.8. X-Işını Kırınımı (XRD) Analizleri

Örneklerin faz analizlerini değerlendirebilmek için X-ışını kırınımı analizi (XRD) yapılmıştır. Bunun için tamamen çimento içeren referans örneği, çimentosu azaltılmış örnekler arasından 1 numaralı örnek ve hiç çimento içermeyen örneklerden ise 3 numaralı örnek seçilmiştir. Seçilen örneklerin 28 günlük hamur fazlarından alınan örnekler analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucu cihazın veri tabanı tarafından belirlenen fazlar işaretlenmiş ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



1: Portlandit 2: Tobermorit (C-S-H) 3: Kalsit 4: Etrenjit 5: C-A-S-H

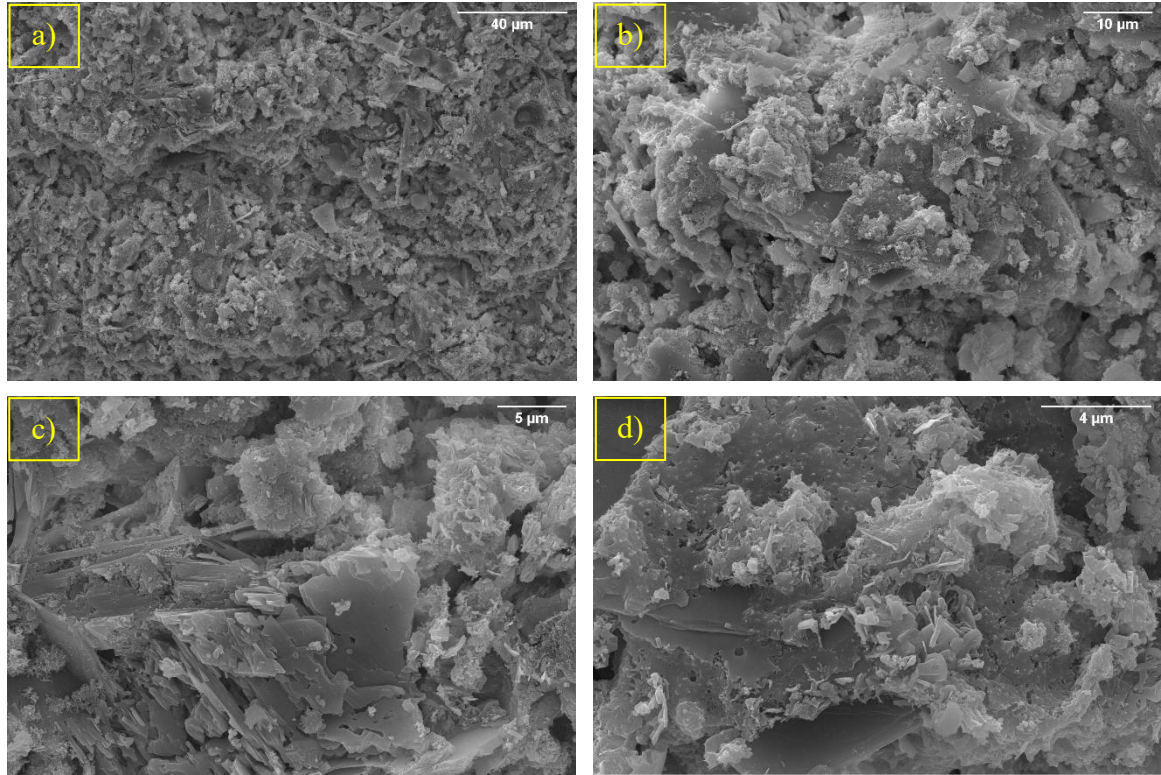
Şekil 4.2 Seçilen hamur örneklerinin XRD analizleri

Yapılan faz analizlerinde örneklerin yapısındaki çimentonun azaltılması ve tamamen karışımdan çıkartılması ile birtakım değişiklikler olduğu gözlenmektedir. Örneğin R ve 1 örneklerinde portlandit fazına rastlanmaktadır. Bu ürün çimento hidratasyonunun bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Fakat hiç çimento içermeyen 3 numaralı örnekte portlandit fazın rastlanılmamıştır. 1 numaralı örnekte ise R örneğine göre portlandit pikinin azaldığı gözlemlenmektedir. Bu durumun çimentonun azaltılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bir başka farklılık ise R ve 1 örneğinde etrenjite rastlanması, 3 örneğinde ise rastlanılmamasıdır. Etrenjit de bir hidratasyon reaksiyonu ürünüdür. Çimentonun azaltılmasına bağlı olarak 1 numaralı örnekte daha az pik görülmekte ve 3 numaralı örnekte etrenjit pikine rastlanılmamaktadır. Bunun dışında her üç örnekte de kalsiyum esaslı bileşenlerin baskınlığından kaynaklı kalsit fazı görülmektedir. R örneğinde en yüksek pik, bir hidratasyon ürünü olan ve yapının dayanım kazanmasını sağlayan tobermorit (C-S-H) olduğu belirlenmiştir. 1 numaralı örnekte çimentonun azatılmış olmasına karşın, aynı noktada büyük bir pik görülmektedir. Bunun sebebi tobermorit ile aynı noktada kalsit fazı da görülebilmektedir. Bu noktada çimentonun azaltılmasına bağlı olarak her ne kadar tobermoritin daha az olması beklense de kalsit varlığı tarafından gölgelendiği düşünülmektedir. 3 numaralı örnekte ise bu pik tamamen kalsite karşılık gelmektedir. 1 ve 3 no'lu örnekte, R örneğinde yeterince belirgin olmayan farklı bir pik tespit edilmiştir. Literatürde genelde bu bölgelerde C-A-S-H jellerinin piklerinin olduğu görülmüştür (Omur, 2024). FTK kullanılan çalışmalarda C-S-H jellerin yerine, oluşan dayanımın C-A-S-H jelleri

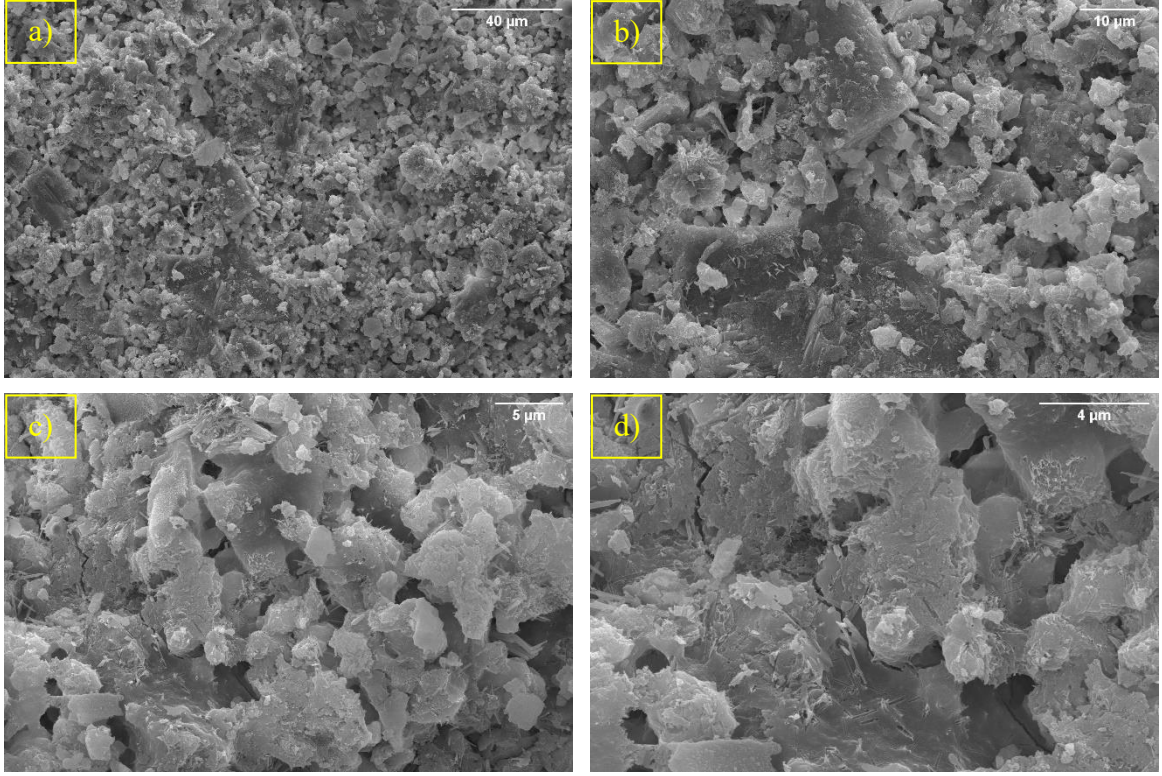
tarafından sağladığı düşünülmektedir. Her ne kadar bu jellerin yapısı yeterince kristal olmasa da, YFC içeren alkalilerle aktive edilmiş yapılarda bu zayıf kristal yapının güçlendiği rapor edilmiştir (Shi ve ark., 2006; Abdelqader ve ark., 2016, Sevinç, 2022). Bu nedenle bu örneklerden elde edilen dayanımların C-A-S-H jelleri ile sağlandığı düşünülebilir. Hatta 3 numaralı örnekte en büyük pikin aynı zamanda C-A-S-H jellerine de karşılık geldiği söylenebilir (Omur, 2024).

4.9. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri

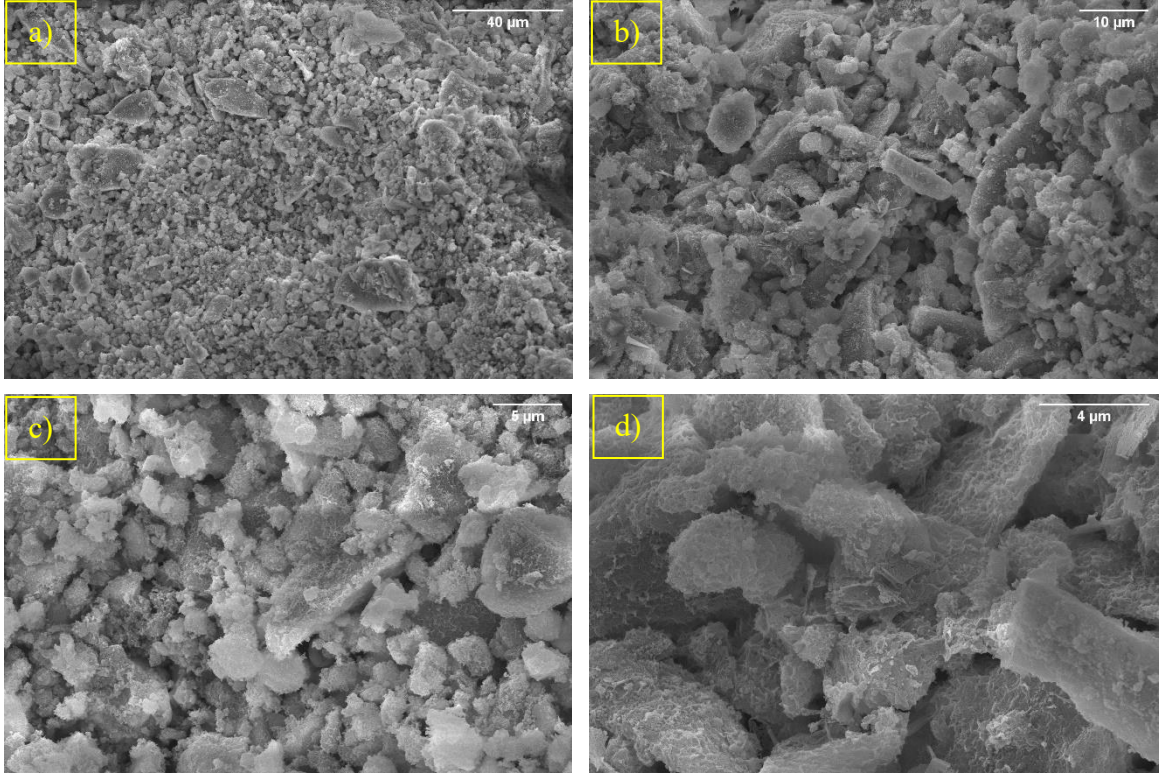
Üretilen örneklerin bağlayıcı fazlarının mikro yapı oluşumları, iç yapısındaki yoğunluk ve boşlukluluk durumlarını incelemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu görüntülemeleri yapılmıştır. Bu kapsamda XRD analizi yapılan serilerin aynıları tercih edilmiş ve bu örneklerden çeşitli büyütme ölçeklerinde görseller alınmıştır. Bu görseller Şekil 4.3'te verildiği gibidir.



Şekil 4.3 Referans örneğine ait SEM görüntüleri a) 2000 büyütme b) 5000 büyütme c) 10000 büyütme d) 20000 büyütme



Şekil 4.4 1 numaralı örneğe ait SEM görüntüleri a) 2000 büyütme b) 5000 büyütme
c) 10000 büyütme d) 20000 büyütme



Şekil 4.5 3 numaralı örneğe ait SEM görüntüleri a) 2000 büyütme b) 5000 büyütme
c) 10000 büyütme d) 20000 büyütme

Şekil 4.2’de verilen görüntülerde, tamamen çimento ile üretilmiş olan hamurların iç yapı görüntüleri görülmektedir. Buradaki oluşumlar çimento hidratasyonu sonucu oluşan, genel C-S-H yapısıdır. Hâkim fazın tüm yapıyı düzenli bir biçimde kapladığı görülmektedir. Şekil 4.3’te kısmen çimento ve kısmen katkı içeren örnek görülmektedir. Bu örnekten alınan görüntüler incelendiğinde Şekil 4.2’de bulunan çimento hidratasyon ürünlerine benzer ürünler görüldüğü gibi, bunun dışında taneli ve gevşek bir yapı görülmektedir. Yer yer sıkı ve düzenli ürünlerin varlığı görülürken, aralarda taneli ve birbirinden ayrık yapılar gözlenmektedir. Şekil 4.4’te ise yapının ciddi ölçüde taneli olduğu, tanelerin birbirleriyle bağlı görünmediği aralarında boşluklar olduğu gözlenmektedir. Şekil 4.2’de esas bağlayıcı yapının çimento olduğu görülmektedir. Şekil 4.3’te ise çimento varlığının etkisiyle bir miktar bağlanmış yapı gözlemlenirken kalan kısımların reaksiyonda yer almayan FTK olduğu değerlendirilebilir. Şekil 4.4’te ise bu yapı çok daha yaygındır. Birbirinden ayrık şekilde duran bu yapılar Şekil 3.2’de bulunan FTK’nın SEM görüntüsü ile karşılaştırıldığında, benzer yapılar olduğu görülmektedir. Bu durum FTK’nın reaksiyonlarda yer alamadığı fikrini desteklemektedir. Basınç dayanımı sonuçları ile değerlendirildiğinde, meydana gelen dayanım düşüşü, görüntülerdeki yapı ile de örtüşmektedir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada inşaat sektöründe oldukça yaygın biçimde kullanılan bir yapı malzemesi olan briketlerin üretiminde, yüksek fırın cürufu ve bunu aktifleştirmek için atık fındık kabuğu taban külünün kullanımı araştırılmıştır. Bu amaçla çimentolu ve çimentosuz briketlerin üretildiği çalışmada, yapılan laboratuvar testlerinden elde edilen veriler ışığında aşağıdaki sonuçlar sıralanabilir;

- Üretilen briketler boyut ve konfigürasyon bakımından standartlar ile iyi bir biçimde uyumluluk göstermektedir.
- FTK ve YFC kullanımı birim kütlesi daha düşük briketler üretimine olanak vermiştir.
- Çimentonun sistemden çıkartılması ve katkıların artırılması porozitenin, atmosferik ve kılcal su emmenin artışına neden olmuştur.
- FTK ve YFC kullanımı briketlerin ısı özelliklerini iyileştirmiş, ısı iletim katsayılarında düşüş sağlamıştır.
- Çimentonun sistemden çıkartılması ve katkı kullanılması briketlerin mekanik özelliklerini oldukça olumsuz etkilemiş, basınç dayanımlarında %87 oranına varan düşüşlere neden olmuştur.
- Briketlerin bağlayıcı fazlarının priz süreleri incelendiğinde katkı kullanımının priz süresini oldukça kısalttığı gözlemlenmiştir.
- Yapılan iç yapı incelemeleri FTK'nın reaksiyonlarda yeterince yer alamadığını düşündürmüştür. Görüntülerde çimentolu sistemlerin daha dolu ve düzenli, çimentonun azaltıldığı ve sistemden çıkartıldığı görüntülerde ise bağlanmanın yeterince gerçekleşmediği gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, üretilen FTK ve YFC içeren briketler, ısı yalıtım özelliğinin ve hafifliğin önemli olduğu uygulamalarda değerlendirilebilir. Aynı zamanda katkılı briketlerin priz sürelerinin oldukça kısa olmasının seri üretim ve piyasa ihtiyacının karşılanması noktasında önemli bir avantaj oluşturacağı söylenebilir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, araştırmanın daha ileri aşamalara taşınması gerektiğini göstermiştir. FTK'nın farklı mineral katkıları ile birlikte değerlendirilmesi, basınç dayanımı daha yüksek katkılı ürünler elde edilmesinde lif kullanılması gibi çalışmalar gelecek araştırmaların konusu olmalıdır.

KAYNAKLAR

- Abdelqader, A.F., Jin, F., Al-Tabaa, A., (2016). Development of greener alkali-activated cement: Utilisation of sodium carbonate for activating slag and fly ash mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 113, 66-75.
- Ağırdır, M.L., (1989). *Altınapa bims agregasından TS3234'e uygun hafif beton briket imali*. Yüksek Lisans Tezi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 73 s.
- Ahmed, A., Kamau, J. (2017). Properties of different mortars and their effect on the flexural strength of low density block walls. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 2 (5), 31-35.
- Akyüncü, V., (2019). *Pomza agregalı hafif beton blokların mekanik özelliklerinin ve yangın etkisi altındaki davranışının incelenmesi*. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8 (1), 147-157.
- Al-Handhal, M.O., (2022). *Effect of waste glass powder (WGP) on the strength and the mechanical properties of pumice lightweight concrete*, Yüksek Lisans Tezi. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 79 s.
- Asadi I., Shafigh, P., Abu Hassan Z.F., Mahyuddin, N. (2018). Thermal conductivity of concrete – A review. *Journal of Building Engineering*, 20, 81-93.
- ASTM C 330, 2012. Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete, American Society of Testing Materials, PA, USA.
- Bakışgan, C., Dumanlı, A.G., Yürüm, Y., (2009). Trace elements in Turkish biomass fuels: Ashes of wheat straw, olive bagasse and hazelnut shell. *Fuel*, 88, 1842-1851.
- Baran, Y., Gökçe, H.S., Durmaz, M., (2020). Physical and mechanical properties of cement containing regional hazelnut shell ash wastes. *Construction and Building Materials*, 259, 120965.
- Bayrak, Y., Yeşiloglu, Y., Gecgel, U., (2006). Adsorption behavior of Cr(VI) on activated hazelnutshell ash and activated bentonite. *Microporous and Mesoporous Materials*, 91, 107-110.

- Binboğa, A.B., (2019). *Afşin-Elbistan termik santral uçucu kül ve cürufunun duvar ve briket yapımında kullanılabilme imkanının araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 80 s.
- Çam, A. S., (2017). *Characterization of clay brick materials produces with red mud and nut Shell wastes for building applications*. Yüksek Lisans Tezi. İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 51 s.
- Çiçek, Y.E, (2002). *Pişmiş toprak, tuğla, bimsbeton, gazbeton ve perlitli yapı malzemelerinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 112 s.
- Dal, O., (2018). *Production of bio-oil from hazelnut shell waste by using supercritical ethanol, acetone and their mixtures*. Yüksek Lisans Tezi. İzmir Yüksel Teknoloji Enstitüsü. 59 s.
- Demirbaş, A., (2008). Importance of biomass energy sources for Turkey. *Energy Policy*, 36, 834-842.
- Denktaş, S., (2019). *Uçucu küllerin bims blok üretiminde kullanımı*. Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. 92 s.
- Duran-Herrera, A., Campos-Dimas, J.K., Valdez-Tamez, P., Bentz, D.P. (2015). Effect of a micro-copolymer addition on the thermal conductivity of fly ash mortars. *Journal of Building Physics*, 40(1), 3-16.
- Durmaz, M., Baran, Y., (2020). Stabilization and experimental study of clay soils with nutshell ash, *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, 7 (13), 77-96.
- Erdoğan T.Y. (2003). *Beton*, ODTÜ Yayınları, ISBN: 9789757064671 , Türkiye, 757 s.
- Gençer, Ö., (2000). *Pomza katkılı bimsbeton bloklar ile yapılmış yığma yapı üzerinde deprem etkisinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 76 s.

- Gündoğan, H., (2021). *Fındık kabuğu külü ve yüksek karbonlu ferrokrom üretim fırınlarında ortaya çıkan baca külünün asfalt betonunda filler olarak kullanımı*. Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 64 s.
- Gündüz, L., (1998). Hafif beton olarak pomza. *I. Isparta Pomza Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 103 – 107.
- Gündüz, L., (2005). *İnşaat sektöründe bimsblok*. Süleyman Demirel Üniversitesi Pomza Araştırma ve Uygulama Merkezi, Isparta.
- Gündüz, L., Şapcı, N., Bekar, M., İsker, M., (2006). Bimsbetonların genleştirilmiş perlit agregalar ile teknik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine teknik bir analiz. *IV. Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, 2-4 Aralık, İstanbul, Türkiye.
- Güney, M. Ş., (2013). Utilization of hazelnut husks as biomass. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 4, 72-77.
- Hoşgün, E.Z., Bozan, B. (2017). Düşük sıcaklık düşük zaman alkali ön işlemlerinin fındık kabuğunun bileşimi ve enzimatik hidrolizi üzerine etkisinin incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32: 517-529.
- Işıtan, S., (2016). *Endüstriyel biyokütle atıklarının pirolizi ve ürünlerinin karakterizasyonu*. Yüksek Lisan Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 93 s.
- Kamacı, G., (2021). *Değişik ısı yalıtımlı duvar elemanlarının mekanik ve fiziksel özelliklerinin deneysel incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. KTO Karatay Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. 73 s.
- Karaosmanoğlu, H., Üstün, N.Ş. (2017). Organik ve konvansiyonel fındıkların (*corylus avellana* l.) bazı fiziksel özellikleri. *Akademik Gıda Dergisi*, 15:4, 377-385.
- Kayan, Y., (2019). Bitlis pomzası ile üretilen bimslerin mekanik özelliklerinin deneysel olarak araştırılması ve geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 77 s.
- Kıngır, S., Şeyhanlıoğlu, H. Ö., Gör, R., (2021). Türkiye’de fındığın tarım turizmi (Agro Turizm) içindeki yeri, önemi ve turizme katım çabaları hakkında bir alan araştırması. *Seyahat ve Otel İşletmeciliği Dergisi*, 18(1), 206-223.

- Kıvrak, S.O., 2006. *Uçucu kül ve katkılı bimsblokların mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 71 s.
- Kocaman, P., (2009). *Bims agregaların ve bimsbeton ürünlerin mimarlık ve sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 204 s.
- Miladinovic, M.R., Kristic, J.B., Zdujic, M.V., Veselinovic, L.M., Velijovic, D.N., Bankovic-Ilic, I.B., Stamenkovic, O.S., Velijkovic, V.B., (2022). Transesterification of used cooking sunflower oil catalyzed by hazelnut shell ash. *Renewable Energy*, 183, 103-113.
- Mohammed, J.H., Hamad, A.J. (2014). Materials, properties and application review of lightweight concrete. *Technical Review of the Faculty of Engineering University of Zulia*, 37 (2): 10-15.
- Mor, R., (2007). *Bimsbetondan imal edilmiş yapı elemanlarının ısı iletim katsayılarının iyileştirme çalışmaları*. Yüksek Lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 78 s.
- Neville, A.M. (2011). *Properties of Concrete*, Pearson Education Limited, ISBN: 9780273755807, United Kingdom, 872 s.
- Omur, T., Kanat, D., Kabay, N., (2024). Innovative use of hazelnut shell ash as an alkali activator: A comparative analysis with commercial activators. *Journal of Building Engineering*, 90, 109466.
- Özocak, M., (2021). *Fındık kabuğu külünün puzolan malzeme olarak kullanılması ile üretilen betonun tarımsal yapılarda kullanılabilirliğinin araştırılması*. Doktora Tezi. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 104 s.
- Pala, Ö., (2023). *Fındık kabuğu ve fındık kabuğundan elde edilen aktif karbon ile sulu ortamdan boyar madde giderimi*. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 103 s.
- Sancak, E., (2005). *Silis Dumanı Katkılı Bimsbetonların Özellikleri*. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 187 s.

- Sevinc, A.H., (2022). Investigating the properties of GGBFS hazelnut ash-based cement-free mortars produced at ambient temperature under different curing conditions. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 34 (10), 04022268.
- Shahidi, F., Alasalvar, C., Liyana-Pathirana, C. M., (2007). Antioxidant phytochemicals in hazelnut kernel (*Corylus avellana* L.) and hazelnut byproducts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(4), 1212-1220.
- Shi, C., Krivenko, P.V., Roy, D., (2006). *Alkali-activated cements and concrete*, CRC Press, ISBN: 978042918712, İngiltere, 392 s.
- Şahin, M., (2023). *Fındık kabuğu atıklarının kitosan bazlı gıda ambalaj filmlerinde kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi. Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. 57 s.
- Şencan, A., (2011). *Fındık kabuğu ve fındık kabuğundan farklı yöntemlerle elde edilen aktif karbonun kurşun (II) sorpsiyon potansiyellerinin belirlenmesi*. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 139 s.
- Şengün, D., (2018). *Extraction of phenolic compounds from hazelnut shell waste*. Yüksek Lisans Tezi. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fen Bilimleri Enstitüsü. 61 s.
- Şensöz, S., Angin, D. (2008). Pyrolysis of safflower (*Charthamus tinctorius* L.) seed press cake in a fixed-bed reactor: Part 2. *Structural characterization of pyrolysis bio-oils*. *Bioresource Technology*, 99, 5498-5504.
- Şimşek, O. (2000), *Yapı Malzemeleri Cilt 2*, Ankara Üniversitesi Basımevi, ISBN: 9789750276644, Türkiye, 272 s.
- Tanyıldızı, M., Nasıroğlu, S., Zeybek, A., Gökalp, İ., (2024). Sustainable use of waste hazelnutshell ash in road construction to stabilize expansive subgrade. *Construction and Building Materials*, 432, 136663.
- Toklu, K., (2009). *Pomza taşından üretilen bims blok kalitesinin artırılma olanaklarının araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 82 s.
- Tonbul, Y., (2008). Pyrolysis of pistachio shell as a biomass. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 91, 641-647.

- Topçuoğlu, G., (2008). *Uluslararası piyasada fındığın Türkiye ekonomisine katkısı ve sorunları*. Yüksek Lisans Tezi. Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 81 s.
- TS 2511, 2017. Taşıyıcı hafif betonların karışım hesap esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1008, 2003. Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-6, 2022. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler – Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 13055, 2016. Hafif agregalar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-3, 2017. Çimento deney yöntemleri – Bölüm 3: Priz süreleri ve genleşme tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 771-1, 2005. Kagir birimler – Özellikler – Bölüm 1: Kil kagir birimler (Tuğlalar), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 771-3, 2015. Kagir birimler – Özellikler – Bölüm 3: Beton kagir birimler (Yoğun ve hafif agregalı, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 772-1, 2002. Kagir birimler – Deney metotları – Bölüm 1: Basınç dayanımı tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 772-11, 2012. Kagir birimler – Deney metotları – Bölüm 11: Betondan, yapay ve doğal taştan yapılmış kagir birimlerde kapiler su emme ve kil kagir birimlerde ilk su emme hızının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 772-13, 2002. Kagir birimler – Deney metotları – Bölüm 13: Kagir birimlerin net ve brüt birim hacim kütlelerinin tayini (doğal taş hariç), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 772-16, 2012. Kagir birimler – Deney yöntemleri – Bölüm 16: Boyutların tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS EN 772-2, 2000. Kagit birimler – Deney metotları – Bölüm 2: Beton kagit birimlerin boşluk alanı yüzdesinin tayini (kağıtta iz çıkarma metodu ile), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-1, 2012. Agregaların geometrik özellikleri için deneyler – Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılım tayini – Eleme metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tuna, M.E. (2009). *Betonarme*, ISBN: 9781111161248, Türkiye, 270 s.
- Turğut, P., Demir, F., Türk, K., (2022). Kendiliğinden yerleşen yüksek dayanımlı Portland çimentosuz briket malzemesi üretimi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 24 (72), 703-716.
- Türkoğlu, M., (2010). *Gıda sanayii biyokütle atıklarının enerji potansiyeli ve geri kazanımı*. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 171 s.
- Uğur, İ., (2001). *Doğal yapı ve kaplama taşların ses akustiği ve kayaç parametreleri ile ilişkisinin incelenmesi*. Doktora Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 273 s.
- URL-1: www.betonmaksan.com (Erişim tarihi: 27.05.2024).
- URL-2: <https://blog.nurserylive.com> (Erişim tarihi: 27.05.2024).
- URL-3: <https://www.homestratosphere.com> (Erişim tarihi: 27.05.2024).
- Yalçın, L., (2022). *Fındık kabuğu katkılı kompozit elemanların fiziksel, mekanik ve termal özelliklerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Malzeme Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. 45 s.
- Yıldırım, H., (2012). *Mechanical properties of lightweight concrete made with fiber reinforced fly ash pellets*. Yüksek Lisans Tezi. Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 104 s.
- Yılmaz, S.C., (2024). *Nevşehir bölgesi pomzası ve pirinç kabuğu külünün hafif beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 67 s.

Yurt, Ü., Bekar, F., (2022). Comparative study of hazelnut-shell biomass ash and metakaolin to improve the performance of alkali-activated concrete: A sustainable greener alternative. *Construction and Building Materials*, 320, 126230.