



**KENEVİR LİFİNİN KÖPÜK BETON
ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İrem AKDERE

Danışman

Prof. Dr. İsmail DEMİR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2023

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KENEVİR LİFİNİN KÖPÜK BETON ÜRETİMİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİ

İrem AKDERE

Danışman
Prof. Dr. İsmail DEMİR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2023

TEZ ONAY SAYFASI

İrem AKDERE tarafından hazırlanan “Kenevir Lifinin Köpük Beton Üretiminde Kullanılabilirliği” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 11 / 07 / 2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. İsmail DEMİR

Başkan : Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ
Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Prof. Dr. İsmail DEMİR
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Raif BOĞA
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

11 / 07 / 2023

İrem AKDERE

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KENEVİR LİFİNİN KÖPÜK BETON ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ

İrem AKDERE

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İsmail DEMİR

Günümüzde enerji etkin yapı malzemelerinin üretimi ve kullanımı önem taşımaktadır. Çünkü enerji fiyatları giderek artmaktadır. Bu sebeple yapıların inşası ve hizmet ömrü boyunca enerji verimliliğinin yüksek olması istenir. Enerji verimliliğini arttırmak için yapılan uygulamaların başında yalıtım uygulaması gelir. Yapılarda duvar malzemesi olarak tuğla yerine gazbeton, köpük beton ve benzeri blokların kullanımı yapının yalıtım performansını arttırmaktadır. Köpük beton mekanik, akustik, termal ve fiziksel özellikleri sebebiyle inşaat sektöründe potansiyel kullanım avantajlarına sahiptir. Köpük beton üretiminde bağlayıcı olarak çimento, dolgu malzemesi olarak ince taneli mineral malzemeler kullanılır. Köpük harici malzemeler karıştırılarak akıcı kıvamda harç elde edildikten sonra köpük ilave edilerek homojen olan hafif bir harç elde edilir. Oluşabilecek rötre çatlaklarını önlemek amacı ile karışıma belli oranlarda lif katılır. Genellikle polipropilen, polietilen, cam elyaf ve benzeri lifler kullanılır. Bu çalışmada köpük beton üretiminde organik kökenli doğal bir lif olan kenevir lifi kullanılmıştır. Kenevir bitkisinden elde edilen kenevir lifinin kullanılması ile üretilen hafif beton malzemenin fonksiyonel, ekonomik ve çevreci olması hedeflenmiştir. Kenevir lifi farklı oranlarda ve farklı karışım reçetelerinde köpük betona eklenmiştir. Deneysel çalışmada 7 seri numune üretilmiştir. CEM I 42,5 R tipi portland çimentosu, öğütülerek suda bekletilmiş kenevir, sentetik esaslı köpük ajanı ve akışkanlaştırıcı katkı belli oranlarda kullanılmıştır. Çalışmada uçucu kül ve mermer tozu mineral dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Numunelerin üretim aşamasında; köpük yoğunluğu, taze haldeki harcın litre ağırlığı, yayılma çapı, akış süreleri ve çökme durumları gözlemlenmiştir. Deney örnekleri

laboratuvar koşullarında kr edilmiştir. Köpük beton numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri test edilerek belirlenmiştir. Kenevir lifinin köpük beton üretiminde kullanımı sürdürülebilir üretim için önem taşımaktadır.

2023, xi + 102 sayfa

Anahtar Kelimeler: Organik esaslı malzemeler, Hafif beton, Kenevir, Yalıtım blokları



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

THE USABILITY OF HEMP FIBER IN THE PRODUCTION OF FOAM CONCRETE

İrem AKDERE

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. İsmail DEMİR

Today, the production and use of energy-efficient building materials is important. Because energy prices are increasing day by day. For this reason, it is desirable to have high energy efficiency throughout the construction and service life of structures. Insulation is one of the most important applications to increase energy efficiency. The use of aerated concrete, foam concrete and similar blocks instead of bricks as wall material in buildings increases the insulation performance of the building. Foam concrete has potential usage advantages in the construction industry due to its mechanical, acoustic, thermal and physical properties. In the production of foam concrete, cement is used as a binder and fine-grained mineral materials are used as filling material. After mixing the materials other than foam, a flowing mortar is obtained, and a homogeneous light mortar is obtained by adding foam. In order to prevent shrinkage cracks that may occur, fiber is added to the mixture in certain proportions. Generally, polypropylene, polyethylene, glass fiber and similar fibers are used. In this study, hemp fiber, a natural fiber of organic origin, was used in the production of foam concrete. It is aimed that the lightweight concrete material produced by using hemp fiber obtained from the hemp plant is functional, economical and environmentally friendly. Hemp fiber was added to the foam concrete in different proportions and in different mixture recipes. In the experimental study, 7 serial samples were produced. CEM I 42.5 R type portland cement, ground hemp soaked in water, synthetic based foaming agent and plasticizer additives

were used in certain proportions. In the study, fly ash and marble dust were used as mineral filling materials. During the production phase of the samples; foam density, liter weight of fresh mortar, spreading diameter, flow times and collapse conditions were observed. Experimental samples were cured under laboratory conditions. The physical and mechanical properties of the foam concrete samples were determined by testing. The use of hemp fiber in foam concrete production is important for sustainable production.

2023, xi + 102 pages

Keywords: Organic based materials, Lightweight concrete, Hemp, Insulation blocks



TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İsmail DEMİR’e, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Mustafa Serhat BAŞPINAR’a, Sayın Arş. Grv. Erhan KAHRAMAN’a, Sayın Bülent YEŞİLAY’a her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İrem AKDERE
Afyonkarahisar, 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
RESİMLER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	7
2.1 Beton.....	7
2.1.1 Betonda Liflerin Kullanımı.....	9
2.2 Hafif Beton.....	10
2.2.1 Hafif Betonun Tarihçesi	10
2.2.2 Hafif Betonun Üretim Yöntemleri	11
2.2.2.1 Hafif Agrega Kullanılarak Üretilen Hafif Betonlar	11
2.2.2.2 Hava Kabarcığı Oluşturan Katkı Kullanılarak Üretilen Hafif Betonlar	12
2.2.2.3 Kumsuz Betonlar	13
2.2.3 Hafif Betonların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri	13
2.2.4 Hafif Betonların Sınıflandırılması	14
2.3 Köpük Beton	16
2.3.1 Köpük Betonun Tarihçesi.....	17
2.3.2 Köpük Betonun Üretimi	18
2.3.3 Köpük Betonun Özellikleri.....	23
2.3.3.1 Köpük Betonun Taze Haldeki Özellikleri.....	23
2.3.3.2 Köpük Betonun Sertleşmiş Haldeki Özellikleri	25
2.3.4 Köpük Beton ile İlgili Çalışmalar	30
2.4 Kenevir.....	31
2.4.1 Kenevir Bitkisinin Sınıflandırılması	33
2.4.2 Kenevir Bitkisinin Özellikleri.....	33
2.4.3 Kenevir Bitkisinin Kullanım Alanları	35
2.4.4 Kenevir Bitkisinin İnşaat Sektöründe Kullanımı	35

2.4.5 Kenevir Beton (Hempcrete).....	38
3. MATERYAL ve METOT	53
3.1 Materyal	53
3.1.1 Çimento	53
3.1.2 Kenevir	54
3.1.3 Akışkanlaştırıcı Katkı.....	56
3.1.4 Uçucu Kül.....	56
3.1.5 Mermer Tozu	57
3.2 Metot.....	58
3.2.1 Karışımların Hazırlanması.....	58
3.2.2 Karışım Oranları	61
3.2.3 Uygulanan Analiz ve Deneyler	62
3.2.3.1 Marsh Konisi	62
3.2.3.2 Yayılma Deneyi.....	63
3.2.3.3 Birim Hacim Ağırlık Deneyi.....	64
3.2.3.4 Basınç Mukavemeti Deneyi	65
3.2.3.5 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi	66
3.2.3.6 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve XRD (X Işınları Kırınım) Analizleri	67
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	69
4.1 Taze Beton Deneyleri	69
4.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	70
4.2.1 Birim Hacim Ağırlık	70
4.2.2 Basınç Dayanımı	71
4.2.3 Ultrases Geçiş Hızı.....	71
4.2.4 Birim Hacim Ağırlık – Basınç Dayanımı İlişkisi	71
4.2.5 Birim Hacim Ağırlık – Ultrases Geçiş Hızı İlişkisi	72
4.2.6 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X Işını Kırınımı (XRD) İncelemeleri	73
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	78
6. KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

CBD	Cannabidiol
CO ₂	Karbondioksit
CaCl ₂	Kalsiyum Klorür
Ca(OH) ₂	Kalsiyum Hidroksit
CSH	Kalsiyum-Silikat-Hidrat
dB	Desibel
MPa	Megapaskal
NaOH	Sodyum Hidroksit
THC	Tetrahydrocannabinol
µm	Mikrometre

Kısaltmalar

AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ACI	American Concrete Institue
ASTM	American Society for Testing and Materials
BRE	Building Research Establishment
EN	Europe Norm
ERMCO	European Ready Mixed Concrete Organization
EU	Europa
FRC	Fiber Reinforced Concrete
LCA	Life Cycle Assasement
LWC	Lightweight Concrete
MT	Mermer Tozu
pH	Power of Hydrogen
SEM	Scanning Electron Microscope
TFC	Total Fixed Cost
THBB	Türkiye Hazır Beton Birliği
TS	Türk Standartları
UK	Uçucu Kül
UV	Ultraviyole

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Köpük Beton Üretim Yöntemleri (Mohammed ve Hamad 2014).	19
Şekil 4. 1 Birim Hacim Ağırlık – Basınç Dayanımı Grafiği.	71
Şekil 4. 2 Birim Hacim Ağırlık – Ultrases Geçiş Hızı Grafiği.	73
Şekil 4. 3 3 Seri Numaralı Numunenin Optik Mikroskop Görüntüleri.	74
Şekil 4. 4 3 Seri Numaralı Numunenin XRD Analizi.	74
Şekil 4. 5 3 Seri Numaralı Numunenin CSH Jel Yapısı.	75
Şekil 4. 6 3 Seri Numaralı Numunenin SEM Görüntüsü ve Çubuksu Bölgenin EDX Analizi.	75
Şekil 4. 7 5 Seri Numaralı Numunenin Optik Mikroskop Görüntüleri.	76
Şekil 4. 8 5 Seri Numaralı Numunenin XRD Analizi.	76
Şekil 4. 9 5 Seri Numaralı Numunenin SEM Görüntüsü.	77

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1 Hafif Beton Sınıfları (Topçu 2006).....	16
Çizelge 3. 1 CEM 1 42,5 R Tipi Çimentonun Fiziksel Özellikleri.	53
Çizelge 3. 2 CEM 1 42,5 R Tipi Çimentonun Kimyasal Özellikleri.	54
Çizelge 3. 3 Seytömer Uçucu Külünün Kimyasal Özellikleri.	57
Çizelge 3. 4 Kullanılan Malzemeler ve Kullanım Miktarları.....	61
Çizelge 3. 5 Köpük Beton Harcının Akış Sınıfları (Jones vd. 2005).	63
Çizelge 4. 1 Taze Haldeki Köpük Beton Harcının Fiziksel Özellikleri.....	69
Çizelge 4. 2 Sertleşmiş Beton Deneyleri Sonucu Elde Edilen Veriler.	70



RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2. 1 Kenevir Bitkisi (İnt. Kyn. 2).....	32
Resim 2. 2 Kenevir Lifi (İnt. Kyn. 4) (a) ve Optik Mikroskop Görüntüsü (b).	37
Resim 2. 3 Kenevir Beton Blokları (İnt. Kyn. 6).	41
Resim 3. 1 Kenevir Sapları.	54
Resim 3. 2 Öğütücü.	55
Resim 3. 3 Elde edilen kenevir lifi (a) ve kenevir lifinin öğütülmüş hali (b).	55
Resim 3. 4 Öğütülmüş ve Tartılmış Kenevir Lifi (a) ve Suda Bekletilmiş Kenevir Lifi (b).	56
Resim 3. 5 Uçucu Kül (a) ve Mermer Tozu (b).	57
Resim 3. 6 Beton Mikseri.	58
Resim 3. 7 Köpük Jeneratörü (a) ve Üretilen Kararlı Haldeki Köpük (b).....	59
Resim 3. 8 Köpük Eklenmemiş Harç (a) ve Üretilen Köpük Beton (b).	60
Resim 3. 9 Kalıplanmış ve Etiketlenmiş Numuneler.	60
Resim 3. 10 Lif katkısı içermeyen köpük beton ön deneme örneklerinde ortaya çıkan kılcal çatlaklar.	61
Resim 3. 11 Marsh Konisi Ebatları (a) ve Marsh Konisi Uygulaması (b).	62
Resim 3. 12 Çökme Hunisi.	64
Resim 3. 13 Yayılma 1 Ölçümü (a) ve Yayılma 2 Ölçümü (b).	64
Resim 3. 14 Beton Basınç Presi.	65
Resim 3. 15 Beton Numuneye Basınç Yüğü Uygulaması (Erdoğan 2015).....	66
Resim 3. 16 Ultrases Deney Cihazı (a) ve Ultrases Deney Cihazı Çalışma Mekanizması (b) (Abdullah vd. 2016).	67
Resim 3. 17 SEM Cihazı.....	68
Resim 3. 18 XRD Cihazı.	68

1. GİRİŞ

İnsanlar barınma ihtiyacını karşılamak için yapılara, sağlam ve güvenli yapılar elde etmek için ise malzemelere ihtiyaç duymaktadır (Gül 2018). İnşaat sektöründe en çok kullanılan yapı malzemesi betondur (Şimşek 2016). Avrupa Hazır Beton Birliğinin (ERMCO) yayınladığı 2022 yılı verilerine göre; Avrupa Birliği (AB) üyesi olan bütün ülkelerin toplam hazır beton üretim miktarı 252,7 milyon metreküp iken, Türkiye 105 milyon metreküp hazır beton üretimi ile AB ülkeleri arasında birinci sıradadır. Türkiye’yi izleyen Almanya 54,2 milyon metreküp üretim ile ikinci, Fransa 40,6 milyon metreküp hazır beton üretimi ile üçüncüdür ve bu değerler her geçen sene artmaktadır (THBB 2022).

Beton; agrega, çimento, su ve katkı maddelerinin belli oranlarda, homojen olarak karıştırılması ile elde edilen bir yapı malzemesidir. Beton başlangıçta plastik kıvamlıdır, zamanla içeriğindeki çimentonun su ile yaptığı reaksiyon olan hidrasyon sonucunda katılaşp sertleşir (TS-1247 1984). Betonda katkı maddesi olarak mineral katkıları veya kimyasal katkıları kullanılabilir.

Betonun pek çok avantajı vardır ancak genellikle yüksek dayanımı ve dayanıklılığı için tercih edilmektedir. Avantajlarının yanında dezavantajları da bulunan betonun dezavantajlarından biri ağırlığıdır. Yüksek birim hacim ağırlığı sebebiyle hem temele fazla yük bindirilmekte hem de yapıya etkiyen deprem yükü gibi yükler artmaktadır. Yapılarda betonun birim hacim ağırlığı azaltılarak yapıya etkiyen toplam yükün azaltılması istenir. Yapıya etkiyen yüklerin en önemlisi olan ölü yükler hafif beton kullanımı azaltılabilir ve bu sayede de taşıyıcı elemanların boyutları küçültülerek ekonomik kazanç sağlanabilir (Neville ve Brooks 1987).

Betonun birim hacim ağırlığı beton içerisinde boşluk oluşturmak gibi farklı yöntemlerle azaltılabilmektedir. Bu yöntemler kullanılarak üretilen ve birim hacim ağırlığı 2000 kg/m³’ten daha düşük olan betonlara “Hafif beton” denilmektedir (Baradan vd. 2012). TS EN 206-1’de ise Hafif beton; Etüv kurusu haldeki birim hacim ağırlığı 800-2000 kg/m³ aralığında olan beton olarak tanımlanmıştır.

Hafif betonların çok sayıda türleri bulunmaktadır. Bu sebeple değişik sınıflamaları yapılabilmektedir. Dayanımlarına, birim hacim ağırlıklarına ve üretim şekillerine göre sınıflandırılabilirler. Üretim şekillerine göre hafif betonlar; Betonun ince agregalarını çıkararak üretilen hafif betonlar, hafif agregası kullanılarak üretilen hafif betonlar ve kimyasal katkı kullanımı ile üretilen hafif betonlar olarak sınıflandırılabilirler. Kimyasal katkı kullanımı ile üretilen hafif betonlar, gazbeton ve köpük beton şeklinde üretilirler.

Gazbeton; çimento, bileşiminde silis oranı yüksek olan kum (kuvars, silis kumu, kuvarsit gibi), kireç, su, alçıtaşı ve alüminyum tozu gibi bünyede hava boşluğu oluşturan bir katkı maddesi içeren karışımın basınçlı buhar kürü uygulanarak otoklavlarda sertleştirilmesi ile elde edilen gözenekli, hafif beton sınıfında yer alan yapı malzemesidir (Osmanoğlu 2019).

Köpük beton ise; bağlayıcı, su, ince agregası, katkı (mineral veya puzolanik, kimyasal) ve köpük kimyasalı kullanılarak farklı üretim teknikleri ile elde edilen, gözenekli yapıda olan hafif beton çeşididir (Demir vd. 2019).

Her iki yöntemde de harçta hava kabarcığı oluşturularak birim hacim ağırlık düşürülür. Köpük beton, Gazbetona göre düşük maliyetlidir. Ayrıca hammadde çokluğu ve bulunabilirliği, atık madde kullanım imkânı sağlaması, uygun kür şartları gibi etkenler Köpük betonu cazip ve ekonomik kılmaktadır.

Hafif betonun kullanımı günümüzde oldukça yaygınlaşmıştır. Hafif betonun diğer betonlara kıyasla daha düşük birim hacim ağırlıkta olması sebebiyle temel ve kalıp boyutlarında küçülme sağlaması, sıkıştırmaya gerek olmaması sayesinde uygulamasının kolay olması ile işçilik maliyetinden kazanç sağlaması ve yalıtım özelliklerinin daha iyi olması gibi avantajları vardır (Temiz ve Akçakale 2014). Hafif betonlar düşük birim hacim ağırlıklarına rağmen yüksek mukavemet gösterirler ve yüksek poroziteye sahip olmaları ile yalıtım özelliği gösterirler. Ayrıca hafif betonlar çevresel etkilere, suya, dona ve yangına karşı dayanıklıdır. Sayısız avantajının yanında hafif betonların kimyasal kullanımı ile daha yüksek maliyet, daha düşük dayanım, daha fazla gözeneklilik, daha

yüksek rötire, daha yüksek segregasyon (ayrışma) riski ve yapımında daha fazla özen gösterilmesi gerekliliği gibi dezavantajları da vardır.

Hafif betonların bazı sorunlarının çözümü için lif katkısı kullanılabilir. Eklenen lif katkısı taze haldeki betonun akışkanlık özelliklerini etkileyerek hücresel yapının stabilitesini (kararlılığını) artırıcı etki yapar ve büzülme (rötire) önler. Lif katkısı plastik haldeki hafif betonun mekanik özelliklerini ve erken yaşlardaki dayanımını geliştirir. Ayrıca sertleşmiş haldeki hafif betonun darbe dayanımını, çatlama sonrası eğilme ve çekme dayanımını, pullanma direncini ve enerji soğurma kabiliyetini geliştirmektedir. Hafif betonda kullanılacak lif tipine bağlı olarak, ideal hava içeriği ve su/bağlayıcı oranı bulunarak, uygun mukavemet değeri, birim hacim ağırlık, işlenebilirlik, süneklik ve maliyet sağlanabilmektedir (Alkayış ve Başyigit 2021, Altun 2006).

Hafif beton karışımlarında; alkaliye dayanıklı cam, akrilik, elyaf, çelik, karbon, polyester, aramit, polipropilen, polietilen gibi sentetik elyaflar, rafine ya da ham selüloz, hindistan cevizi ve bambu gibi doğal lifler kullanılabilir. Ayrıca doğal lif olarak kenevir lifleri de kullanılabilir. Bütün lif çeşitlerinin kendilerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Son yıllarda enerji tasarrufu, çevreci tutum ve ekonomiklik gibi sebeplerden dolayı doğal liflerin kullanımına yönelme görülmektedir (Demir ve Doğan 2020).

İnşaat sektörü en çok enerji tüketen ve çevreye zarar veren sektörlerden biridir. Avrupa'daki CO₂ emisyonlarının yaklaşık %40'ından sorumludur. İklim değişikliği ve yenilenemeyen kaynakların tükenmesi tehditleri altında, yasa koyucular ve politikacılar, inşaat sektörünün çevre üzerindeki etkisini azaltmak için bina ile ilgili düzenlemeleri ve standartları değiştirmeye devam etmektedir. Avrupa Birliği (AB), 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarını 1990 yılına kıyasla %40 oranında azaltmayı taahhüt etmiştir. Bu sebeple daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir (EU Commission 2015). Bu değişimlerin yanı sıra, inşa edilen yapılardaki inovasyonun ana etkenlerinden biri olan mimari uygulamalar da inşaatda daha sürdürülebilir malzemelerin kullanımına ve tasarımlara doğru kaymaktadır. Bu ekonomik ve çevresel zararların giderilmesi için çevre dostu olan yenilenebilir malzemelerin kullanılması gerektiği açıktır. Yenilenebilir

malzemeler, tükenebilecek kaynakları kullanmamanın çevresel yararını sunar. Özellikle, hızlı bir şekilde yenilenebilen malzemeler, hızlı bir şekilde büyüyen ve yavaş büyüyen ürünlere kıyasla malzeme üretmek için mütevazı miktarda arazi kullanmanın avantajını taşıyan malzemelerdir. Ayrıca, keten veya kenevir gibi bitki bazlı malzemeler, büyümeleri sırasında CO₂ emdikleri için genellikle küçük, hatta negatif CO₂ emisyonuna sahiptir (Zahan vd. 2018). Birçok bina yönetmeliği, inşaat sektöründe enerji verimliliğini arttırmak için üstün fiziksel özelliklere sahip biyo-bazlı malzemelerin kullanımına teşvik etmektedir. Ayrıca yapılarda biyo-bazlı, düşük karbonlu malzemelerin kullanılması yalıtım seviyesini, ses emilimini artırır ve bunlara ek olarak bu doğal malzeme hafif, düşük yoğunluklu olduğu için bina yapısının ağırlığını azaltır (Amziane ve Arnaud 2013). Biyo-agrega bazlı yapı malzemeleri, enerji tüketimini azaltarak ve aynı zamanda enerji verimliliğini ek çevre kirliliğine neden olmadan elde ederek daha sürdürülebilir inşaatı imkân sunar (Bourhaneddine vd. 2017). Bu gibi sebeplerden dolayı günümüzde inşaat sektöründe çevresel faydası yüksek olan ve doğal kaynakların korunmasını sağlayan biyo-materyallerin kullanımı araştırma konularında sık sık yer almaktadır. Bu materyallerden biri de hızlı şekilde yenilenebilen bir malzeme olan kenevirdir. Kenevir lifleri inşaat sektöründe kullanılabilen ve yüksek başarı sağlayan materyallerden biridir. Kenevir lifleri diğer lif türlerine göre daha güçlü, daha hafif ve daha ucuz olacak şekilde imal edilebilir olduğundan avantajlıdır.

Kenevir, Cannabaceae ailesinden olan ve çok yönlü kullanım potansiyeline sahip bir endüstri bitkisidir. Otsu yapıdaki kenevir, tek yıllık bitkilerdendir ve bilinen en eski bitkilerden biridir. Kenevir inşaat sektöründen başlayarak gıda, biyoyakıt, otomotiv, tekstil, kozmetik ve kâğıt sektörüne kadar oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. Ekolojik olarak ve topografi ihtiyaçları bakımından oldukça kanaatkâr olan kenevirin uyum sağlama kabiliyeti yüksektir. Kaliteli bir lif kaynağı olan endüstriyel kenevir, günümüzde endüstriye önemli ölçüde katkı sağlamıştır. Narkotik özelliklerinden dolayı pek çok ülkede yasaklanan geleneksel kenevirin yerine, endüstriyel kenevir tarımı son yıllardaki gelişim sayesinde her geçen gün artmaktadır ve ekonomiye önemli derecede katkı sağlamaktadır (Göre ve Kurt 2021).

Tek yıllık bir bitki olarak bilinen kenevir, kısa gün bitkisidir. 3-4 ayda yetişir ve yılda 3 kere hasat imkânı sağlar. Çabuk ve çok uzayan bir bitki olan kenevirin boyu 50-300 cm kadar olabilmektedir. Hızlı uzayan ve senede birden fazla hasat edilen kenevir verimli bir bitkidir. Fazla bakım istemez. Gübre ve su ihtiyacı düşüktür. Kenevir bitkisi minimum alandan maksimum verim alabilmeyi sağlar. Kenevir %25 oranında protein içeriğine sahiptir (Karakaş 2018). Bu oran böcekler ve güvelerin gelmeyeceği kadar düşüktür. Bu sayede çevreye ve bitkilere zarar veren tarım ilaçları kullanılmaz. Kenevirin ağır metalleri topraktan temizlediği ve toprağı havalandırdığı bilinmektedir. Bu sayede kendinden sonra ekilecek ürünün verimini arttırmaya yardımcı olur. Ayrıca kenevir büyüme aşamasında yüksek miktarda CO₂ tutarak (emerek, bağlayarak) havayı temizler.

Kenevir lifi yüksek mukavemet, dayanıklılık, iyi elektrostatik özellikler, anti alerjik özelliği, emicilik ve UV koruma sağlayan doğal bir liftir. Kenevir bitkisinin uzun ve odunsu olan gövdesi liflerle çevrilidir. Belirli işlemlerden geçer, kıymık ve lifler elde edilerek kullanılabilecek hale gelir. Kenevirin lifleri rami, jüt ve keten gibi bir bast lifidir. Tüm bast lifi bitkilerinde sapın dış kısmında olan uzun, ince bast lifleri ve iç kısmında da oduna benzeyen iç çekirdeğin lifleri bulunur. Kenevir lifinin teknik ve fiziksel özellikleri, geleneksel lif ürünlerin üretiminde olduğu kadar modern ürünlerin üretiminde de kullanılmasını sağlar (ORAN 2019).

İnşaat sektöründe kenevir; beton, tuğla, yalıtım panelleri gibi ürünlerin üretiminde kullanılabilmektedir. Kenevir liflerinin, kıymıklarının ve parçalarının kullanımı ile daha üstün özelliklere sahip malzemeler üretilebilmektedir. Kenevir katkılı malzemelerin geleneksel malzemelere göre daha hafif olduğu, daha sağlam olduğu, daha düşük ısı ve ses iletkenliğine sahip olduğu ve bu sayede daha iyi yalıtım özellikleri sergilediği, daha iyi higroskopik özellikler gösterdiği, daha esnek olduğu tespit edilmiştir. Kenevir katkılı ürünlerin yüksek su emme, düşük mekanik özellik göstermesi gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Ancak optimize edildiğinde kaliteli ürünler üretilebilmektedir. Kenevir kullanımı ile ekonomik, çevreci ve fonksiyonel ürünler üretilebilmektedir. Ek olarak kenevirin inşaat malzemelerinde tarımsal atık olarak da kullanılabilmesi, endüstriyel kenevirin kullanımı için geniş bir pazara katkıda bulunmaktadır (Demirbek ve Bulut 2021, Şahinöz 2022).

Kenevirin inşaat malzemelerinde kullanılması ile sağlanan avantajlardan özellikle ikisi göze çarpmaktadır. Bunlar yalıtım özelliği ve düşük yoğunluğa sahip olmasıdır. Düşük iletkenliğe sahip olduğu için kenevir bitkisi sıklıkla yalıtım levhalarında ve dolgu malzemesi olarak kullanılır. Binalarda yalıtım, özellikle ısı yalıtımı, enerji tüketimi ile doğrudan bağlantılı olduğu için oldukça önemlidir. Çünkü günümüzde en pahalı şey enerjidir. Isı yalıtım malzemelerinin kullanılması ısıtma talebini azaltır, böylece binanın çalışması sırasında daha az enerji harcanarak ekolojik ayak izi azaltılır ve ekonomik fayda sağlanır. Isı yalıtım levhaları keten, kenevir veya ayçiçeği gibi bitkilerden elde edilen biyo-malzemesi kullanılarak üretilir (Hroudova ve Zach 2014, Binici vd. 2014). Bu malzemelerin üretiminde liflerin kullanılması için ek işlem gerekmemektedir. Bitki kökenli malzemelerin (keten, kenevir gibi) kompozit dolgu malzemesi veya ahşap çerçeve dolgusu olarak kullanımı da giderek popülerleşmektedir (Allin 2005, Sodagar vd. 2011). Duvarların bitki malzemeleriyle doldurulması genellikle yeterli ısı ve ses yalıtımı sağlamak için yeterlidir. Ek olarak, bu malzeme bir evdeki nem seviyesini düzenlemek için kullanılabilir, böylece sıradan duvarlara sahip evlerle ilgili konforu artırır (Evrard ve de Herde 2010). Kireç ve kil gibi doğal bağlayıcılar genellikle dolgu malzemeleri ile birlikte kullanılır. İyi termal özellikleri sayesinde kenevir bazlı kompozitlerin kullanımı ile ek yalıtıma ihtiyaç duyulmamaktadır (Arnaud ve Gourlay 2012, Arizzi vd. 2015).

Kenevir, inşaat sektöründe sıklıkla “Hempcrete” olarak adlandırılan “Kenevir beton” üretiminde kullanılır. Hempcrete (Kenevir beton) inşaat ve yalıtım malzemesi olarak kullanılan, kenevir lifleri ve bağlayıcı (genellikle kum, puzolan, çimento, hatta alçı ve kireç de eklenen) karışımıdır. Hempcrete malzemesinin çok iyi ısı yalıtım özelliklerine sahip olduğu bilinmektedir. Termal özelliklerine ek olarak, kenevir beton bloğu, bazı beton agrega malzemelerinin kenevir lifleri veya kıymıkları ile kısmen ikame edilmesi nedeniyle hafif bir malzeme olarak düşünülebilir (Allin 2005).

Bu çalışmada kenevir liflerinin hafif betonun bir çeşidi olan köpük beton üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Üretilen köpük beton karışımlarında kenevir lifleri kullanılmıştır. Üretilen malzemenin dayanım ve dayanıklılık özellikleri araştırılmıştır. Literatürdeki eksikliğin giderilmesi hedeflenmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Beton

Beton, karışım oranlarının hesapları belirli yöntemlere göre yapılan; agrega, su, çimento ve kimyasal katkıları kullanılarak üretilen, istenen yerin şekil ve boyutuna göre yerleştirilen, prizini uygun kür koşulları altında tamamlamasıyla elde edilen kompozit bir malzemedir. Kimyasal katkıların yanında mineral katkıları da kullanılabilir ve kullanımı oldukça yaygındır. Beton karışımı hazırlandığı esnada plastik (akışkan) kıvamlı olup, daha sonra çimentonun suyla reaksiyonu olan hidrasyon sebebiyle sertleşen bir yapı malzemesidir (Gülşahin 2006). Beton bünyesinde iri agrega iskeleti oluşturur, ince agrega dolgu malzemesidir ve iri agregaların arasını harç ve hava ile birlikte doldurur, su çimentonun hidrasyonunda görev alır ve işlenebilirliği düzenler, çimento bağlayıcıdır ve agregaların arasını doldurarak birbirine bağlar. Kimyasal katkıları betonun istenilen özelliklerini geliştirmek için tercih edilebilir. Mineral katkıları ise puzolanik reaksiyona girerek daha sağlam yapı oluşturması ve filler (dolgu) malzemesi olarak boşlukları doldurması için tercih edilebilir.

Beton yapı malzemesi inşaat sektöründe en çok kullanılan malzemedir (Şimşek 2016). Dünyada her yıl insan başına 1 m³ beton üretimi yapılmaktadır. Diğer yapı malzemelerine göre daha çok tercih edilme nedenleri; ekonomiklik, dayanım, dayanıklılık, kolay şekil verilebilme gibi özellikleridir (Özkul vd. 2004). Ayrıca betonu oluşturan bileşenlerin hammaddeleri doğada bol miktarda bulunabildiği için, ulaşılması kolaydır. Ancak her bir ton çimento yaklaşık 900 kg CO₂ ürettiği için beton, çevreye en çok zarar veren malzemelerden biri sayılmaktadır (Aitcin 2000).

Geleneksel betonların taşıyıcı özelliklerinin yani dayanımlarının yüksek olmasına karşın, birim hacim ağırlıklarının fazla olması düşey taşıyıcı elemanların boyutlarını büyüttüğü için özellikle yüksek yapıların inşasında problem olmaktadır. Bu tarz yüksek yapılarda temel maliyeti artmaktadır ve normale göre büyük olan açıklıklarda eğilme elemanları kendi ağırlıklarını taşıyamaz hale gelmektedir. Ayrıca geleneksel betonarme yapılara gelen deprem yükleri kütle ile doğru orantılı olduğu için daha büyük değerlerde

olmaktadır (Hüsem 1995). Normal betonların birim hacim ağırlıkları düşürülerek yapılar hafifletilebilir. Böylece taşıyıcı sistem elemanlarının kesitleri küçülecektir ve daha ekonomik yapılar inşa edilebilecektir. Betonların birim hacim ağırlıklarının azalması ile iletim de azalacaktır. Yani yalıtım değerleri artacaktır (Konuk vd 2002).

Bilimsel çalışmaların artması ve teknolojinin gelişmesi sonucunda farklı özelliklere sahip birçok beton çeşidi üretilmiştir (Baradan ve Yazıcı 2003). Beton teknolojisinde yakın zamanda gündeme gelen bu betonlara “Özel betonlar” denilmektedir (Yazıcıoğlu ve Bozkurt 2005). Püskürtme beton, ağır beton, kendiliğinden yerleşen beton, polimer beton, su altı betonu, lifli beton ve hafif beton özel beton türlerinden birkaçıdır (Yılmaz 2017, Aruntaş vd. 2007).

Günümüzde betonun pek çok çeşidi bulunmaktadır ve betonları sınıflandırmak için de farklı özelliklerine göre farklı sınıflandırmalar yapılabilmektedir. Bu sınıflandırmalardan biri ağırlıklarına göre sınıflandırmadır. Ağırlıklarına göre betonlar TS EN 206-1’de 3 sınıfa ayrılmıştır. Bu sınıflar standartta şu şekildedir;

- Hafif beton: Etüv kurusu haldeki birim hacim ağırlığı $800-2000 \text{ kg/m}^3$ arasında olan beton. Hafif betonlarda farklı üretim şekilleri tercih edilebilir, kullanılan agreganın bir kısmı veya tamamı hafif agrega olabilir.
- Normal beton: Etüv kurusu haldeki birim hacim ağırlığı $2000-2600 \text{ kg/m}^3$ arasında olan beton.
- Ağır beton: Etüv kurusu haldeki birim hacim ağırlığı 2600 kg/m^3 ’ten daha büyük olan beton.

İnşaat sektöründe beton, üretim sürecinde büyük miktarlarda agrega kullanımı nedeniyle yenilenemeyen doğal kaynakların tükenmesine katkıda bulunan ana bileşenlerden biridir. Ayrıca çimento üretimi küresel ısınmayı ve iklim değişikliğini etkileyen sera gazı üretimine katkıda bulunur, yani her bir ton çimento üretimi yaklaşık bir ton CO_2 emisyonu ile sonuçlanır. Yani; inşaat için beton kullanmak, malzemenin hızlı bir biçimde tükenmesine neden olur, doğa ve çevre üzerinde ciddi çevresel etkilere yol açar (Awwad vd. 2013).

Sürdürülebilir malzemeler ve binalar, başlangıç maliyetinin daha düşük olduğu geleneksel malzemelere kıyasla uzun vadede uygun maliyeti ve dayanıklılığı ile karakterize edilir. Sürdürülebilir beton malzeme, mevcut beton malzemeden geri dönüştürülmüş bir beton veya atık malzemelerin birleştirilmesi ve doğal agregaların kullanımının azaltılması ile üretilen yeşil bir tür beton olarak tanımlanabilir. Genel olarak, doğal kaynaklardan tasarruf ederken kabul edilebilir bir performansa sahip yeni bir malzeme üretmek ilgi çekicidir. Agregaların azaltılması, sürdürülebilir çıkarların bir kısmı ile iyi bir uyum sağlarken, tarımsal liflerin kullanımı tarımsal faaliyetlerin gelişimi ve tarımın refahı ile aynı çıkarı sağlar (Awwad vd. 2013). Mevcut eğilim; çok yüksek mukavemetli ve daha az dayanıklı betonların yerine, yüksek performanslı ve dayanıklı betonlar üretmektir. Dayanıklı betonun; donma-çözülme etkilerine ve çevresel etkilere daha uzun süre dayanması, klorürlere, kimyasal saldırılara, dinamik ve darbe yüklerine maruz kaldığında bozulmadan kalitesini aynen sürdürmesi beklenir.

2.1.1 Betonda Liflerin Kullanımı

Betonun çatlak oluşumunu önlemek, çekme mukavemetini, sünekliğini ve dayanıklılığını arttırmak gibi bazı özelliklerini geliştirmek için çeşitli özelliklere sahip lifler kullanılabilir (Ezeldin ve Balaguru 1989, Bentur ve Mindess 2006). Betona belirli oranlarda eklenen liflerin dayanıklı ve iyi mekanik özelliklere sahip olmasının yanında beton içerisinde kolayca ve homojen dağılabilmesi beklenir (Wang vd. 2000). Betonda kullanılabilen lif çeşitleri arasında cam, çelik, karbon, polimer lifler (akrilik, aramid, naylon, polyester, polipropilen, polietilen, polietilen tereftalat, poliamid, polivinil alkol, poliakrilonitril gibi), doğal lifler (bambu, hindistan cevizi, keten, kenevir, jüt gibi) sayılabilmektedir (Demir ve Doğan 2021).

Özel beton çeşitlerinden biri olan Lifli beton (Fiber Reinforced Concrete-FRC) lif, agrega ve hidrolik çimento kullanılarak üretilen beton olarak tanımlanır (ACI Comite 544 2002). Lifli betonların performansı, üretiminde kullanılan lif türüne göre değişkenlik gösterebilmektedir (Madhavi vd. 2015). Lif takviyeli çimentolu kompozitlerin çeşitli yapısal uygulamalar için kullanımı tüm dünyada yaygınlaşmıştır. Kompozitin dayanım, süneklik ve gerilim aktarımı performansı temel olarak yüzey yapışma özelliklerine bağlı

olarak lif ve matris uyumluluğuna bağlıdır. İyi kenetleme, çimentolu kompozit matrisindeki life etkili gerilim aktarımı sağlar (Demir ve Doğan 2021, Kawamata vd. 2001, Song vd. 2011).

2.2 Hafif Beton

Beton içerisinde, birim hacim ağırlığının azaltılması için, farklı yöntemlerle boşluklar oluşturulmaktadır. Bu yöntemler kullanılarak üretilen ve birim hacim ağırlığı 2000 kg/m³'ten daha düşük olan betonlar “Hafif beton” olarak tanımlanmaktadır (Baradan vd. 2012). TS EN 206-1’de ise hafif beton, etüv kurusu haldeki birim hacim ağırlığı 800 ile 2000 kg/m³ arasında olan beton olarak geçer.

Bazı standartlarda hafif betonlar yerine taşıyıcı hafif betonlar sınıflandırılmıştır. TS 2511’e göre taşıyıcı hafif beton, karakteristik basınç dayanımı 16 MPa’dan büyük olan ve hava kurusu haldeki birim hacim ağırlığı 1900 kg/m³’ten küçük olan hafif agregalı betonlar olarak tanımlanmıştır. ACI 213R-03’e göre ise 28 günlük basınç dayanımı 17 MPa’dan daha büyük olan ve hava kurusu haldeki birim hacim ağırlığı 1120-1960 kg/m³ arasında olan betonlara taşıyıcı hafif betonlar denilmektedir.

2.2.1 Hafif Betonun Tarihçesi

Hafif Betonun (Lightweight Concrete-LWC) kullanım tarihi M.Ö. 3000’e, insanlık tarihinin en eski uygarlıklarından biri olan İndus Vadisi Uygarlığı dönemine, Hindistan civarında olan Harappa ve Mohenjo-Daro gibi yerleşim yerlerinin inşasına kadar dayanır. Avrupa’da ise 2000 yıl önce Kolezyum ve Pantheon Tapınağının inşasında Romalılar tarafından kullanıldığı tespit edilmiştir. Bilinen ilk taşıyıcı özellikli hafif betonların pomza, tüf ve cüruf gibi volkanik doğal kaynaklardan elde edildiği görülmüştür. Bu malzemeler hem iri agregata olarak hem de ince agregata olarak kullanılmıştır. Bu malzemeler ince agregata olarak kullanıldığında “aktif puzolanik madde” olarak görev yaparlar, hidrasyon sonucu Ca(OH)₂ (Kalsiyum Hidroksit-Sönmüş Kireç) ve CSH (Kalsiyum-Silikat-Hidrat) üretirler. CSH gözenek yapısını değiştirir, dayanım ve dayanıklılığı arttırarak yapıyı güçlendirir (Chandra ve Bernsson 2002).

Hafif beton üretimi dünyada 20. Yüzyılın başlarında, taşıyıcı hafif beton üretimi ise İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra başlamıştır. Özellikle temellerin problem yarattığı yerlerde, taşıyıcı hafif betonlar ekonomik çözümler getirmiştir. Bu saptama yapıldıktan sonra hafif beton, başta ABD (Amerika Birleşik Devletleri) olmak üzere birçok ülkede kullanılmaya başlanmıştır. Hafif beton ekonomik, çevresel ve teknik avantajları ile çok yönlü kullanımı olan bir malzeme olmuştur. Yapılarda hafif beton kullanımı, son zamanlarda daha fazla tercih edilmektedir (Haque vd. 2004).

2.2.2 Hafif Betonun Üretim Yöntemleri

Üretim yöntemlerine göre Hafif betonlar üçe ayrılır;

- 1) Hafif agregalar kullanılarak üretilen hafif betonlar
- 2) Hava kabarcığı oluşturan katkı kullanılarak üretilen hafif betonlar
- 3) Kumsuz hafif betonlar

2.2.2.1 Hafif Agregalar Kullanılarak Üretilen Hafif Betonlar

TS 2511'de taşıyıcı hafif betonlar, birim hacim ağırlığı 1900 kg/m^3 'ten küçük olan ve karakteristik basınç dayanımı 16 MPa 'dan büyük olan hafif agregalı betonlar olarak tanımlanmıştır. Hafif beton üretiminde kullanılan agregaların karakteristik özellikleri hafif betonların özelliklerini doğrudan etkilemektedir (Ören ve Gençel 2017). Öyle ki, hafif betonlar isimlendirilirken içerdiği agrega türü dikkate alınır; Uçucu kül betonu, bims betonu, odun talaşı betonu ve genleştirilmiş kil betonu gibi. Taşıyıcı hafif betonlarda değişik kombinasyonlar ile farklı tasarımlar yapılabilmektedir. Tamamen hafif agregalar kullanılabilir, hafif ve normal ağırlıklı agregalar birlikte kullanılabilir. Genellikle iri agreganın hafif, ince agreganın ise normal ağırlıklı seçildiği görülmektedir. Betonarme yapılarda hafif agregalı beton kullanımı hakkındaki çalışmalar devam etmektedir (Demirboğa vd. 2001).

Hafif Agregalar Standardı olan TS 1114 EN 13055-1'e göre hafif agregalar; hafif beton üretiminde çimento, su ve katkı maddeleri ile birlikte kullanılan, tane yoğunluğu 2000

kg/m³'ten veya gevşek birim ağırlığı 1200 kg/m³'ten küçük olan, kırılmamış veya kırılmış şekilde olabilen, inorganik, gözenekli agregalar olarak tanımlanmaktadır. Doğal (Tabii) agregalar ve Yapay (Sunî) agregalar olarak iki sınıfa ayrılmaktadır;

- Doğal (tabii) agregalar mineral kaynaklardan elde edilen, mekanik işlem dışında işlem görmemiş olan agregalardır. Volkanik kökenli olma veya olmama durumlarına göre sınıflandırılabilirler. Oluşumları sırasında gözenekli bir yapı kazanmış olan doğal hafif agregalar kırılmış veya kırılmamış biçimde bulunabilirler. Lav cürufu, sünger taşı, pomza (bims), diatomit, volkanik tüf doğal hafif agregalara örnek gösterilebilir.
- Yapay (sunî) agregalar mineral kökenli, ısı işlem gibi endüstriyel işlemler sonucu elde edilmiş olan agregalardır. Genleşme özelliği olan malzemeler ısı işleminden geçirilir. Genleştirilmiş perlit, genleştirilmiş kil, vermikülit, arduvaz, şeyl yapay hafif agregalara örnek gösterilebilir.

2.2.2.2 Hava Kabarcığı Oluşturan Katkı Kullanılarak Üretilen Hafif Betonlar

Beton içerisine hava kabarcığı oluşturma özelliği olan bazı katkıları eklenerek hafif beton üretilmektedir. Bu yöntemle üretilen hafif betonlarda, harçta hava kabarcığı oluşturularak birim hacim ağırlık düşürülür. Kimyasal katkı kullanımı ile üretilen hafif betonlar köpük beton ve gazbeton şeklinde üretilirler. Bu iki sınıf arasındaki temel fark hava kabarcıklarının oluşturulma şekli ve uygulanan kür koşullarıdır.

Gazbeton; çimento, bileşeninde silis oranı yüksek olan kum (kuvars, silis kumu, kuvarsit gibi), kireç, su, alçıtaşı ve alüminyum tozu gibi bünyede boşluk oluşturan bir katkı maddesi ile oluşturulan harcın otoklavlarda basınçlı buhar kürü edilerek sertleştirilmesi ile elde edilen gözenekli, hafif beton sınıfında yer alan yapı malzemesidir.

Köpük beton ise; Bağlayıcı, su, agrega (ince), mineral veya puzolanik katkı, kimyasal katkı ve köpük kimyasalı kullanarak farklı üretim teknikleri ile elde edilen, gözenekli yapıda olan hafif beton çeşididir. Birim hacim ağırlığı, köpük katkısı veya hava

sürükleyici ile azaltılır (Ramamurthy vd. 2009). Üretilen köpük beton bloklar dayanım kazanması için genellikle atmosfer basıncında kür edilir. Köpük beton, Gazbetona göre düşük maliyetlidir. Ayrıca hammadde çokluğu ve bulunabilirliği, atık madde kullanım imkânı sağlaması, uygun kür şartları gibi etkenler köpük betonu ekonomik (bu nedenle de cazip) kılmaktadır.

2.2.2.3 Kumsuz Betonlar

Özel bir hafif beton tipi olan kumsuz betonlarda genellikle 8-20 mm boyutlu agregalar kullanılır, ince agregalar kullanılmaz. Birim hacim ağırlığı 1700-1800 kg/m³ olan ve oldukça kuru karışımı olan bu betonların basınç dayanımları 5-20 MPa'dır. Bu betonlarda normal ağırlıklı veya hafif agregalar kullanılabilir.

2.2.3 Hafif Betonların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

Hafif betonların birim hacim ağırlıkları kullanılan agrega tipi, üretim yöntemi gibi etkenlere bağlı olarak 550-1850 kg/m³ arasında değişebilir. Düşük birim hacim ağırlık sayesinde yapının tüm ağırlığı azaltılarak yapıya etkiyen deprem yükü gibi yükler azaltılmış olur. Deprem sırasında daha küçük dinamik yükler oluştuğu için dinamik etkiler azalır ve bu dinamik etkilerin oluşturacağı gerilmeler küçülür (TS 2511 1977, TS EN 206-1 2002). Hafif betonların kullanımı ile yapıya etkiyen yükler azaltıldığı için de taşıyıcı elemanların kesit alanlarında, temel boyutlarında ve donatı miktarında azalma sağlanır. Ayrıca kalıp kesitindeki azalmaya bağlı olarak kalıp ve iskele maliyetlerinde de azalma sağlanır. Böylece hafif betonların kullanımının mekanik avantajına ek olarak ekonomik avantaj da sağlanır. Hafif betonların birim hacim ağırlıklarının düşük olması; taşınmasının ve yerleştirilmesinin daha kolay olmasına, fabrikasyon üretime olanak sağlamasına katkıda bulunur.

Hafif betonların iletkenlik katsayıları düşük olduğu için ses ve ısı yalıtım özellikleri normal ağırlıklı betonlara göre daha iyidir. Hafif agrega türlerinin en yüksek birim hacim ağırlığa sahip olanı kullanılsa dahi yalıtım değerleri normal betonlara göre daha iyidir.

Yalıtım özelliğini içerdği boşluklar sayesinde kazanmaktadır. Hafif beton kullanımı ekstra bir yalıtım malzemesi kullanma ihtiyacını ortadan kaldırır.

Hafif betonlar sahip oldukları gözenekli yapıdan dolayı donma-çözünme etkilerine ve yangın gibi çevresel etkilere dayanıklıdır. Ancak dayanımları, elastisite modülleri ve aşınmaya karşı dirençleri normal betonlara göre düşük, rötre ve sünme değerleri ise daha yüksektir. Ayrıca su ve nem için yalıtıma daha çok ihtiyaç duyarlar. Hafif betonların ayrışma riski daha yüksek olduğu için daha fazla özen isterler (Kadiroğlu 2006).

Hafif betonların üretimi sırasında karşılaşılan en sıkıntılı durum; işlenebilirlik sorunudur. İşlenebilme; taze haldeki betonun segregasyon gibi olumsuz durumlarla karşılaşmadan karılması, kalıbına yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve yüzeyinin düzeltilmesi için gereken akıcılıkta olduğunu gösteren bir değerdir. Taze haldeki betonun işlenebilirliğini karışım oranları, agrega tane dağılımı, kullanılan agreganın özellikleri, kullanılan çimentonun özellikleri, hava miktarı ve dağılımı, zaman, sıcaklık ve kullanılan katkıları etkiler. Yeterli işlenebilirlik değerine sahip olmayan beton yeterli dayanım ve dayanıklılığı göstermez. Yeterli işlenebilirlik değerine sahip olan betonlar ise az enerjiyle karıştırılabilir ve kalıbına yerleştirilebilir (Öztürk 2012). Hafif betonların işlenebilirlik değerlerini olumsuz etkileyen etkenlerden biri de agregaların düzgün olmayan ve gözenekli yapıları olabilir. Hem homojen bir karışım elde etmeyi zorlaştırır hem de karışımdaki suyu emerek harcın kuru olmasına ve bu durumun yol açabileceği segregasyon (ayrışma) gibi sorunlara sebep olur. Karışımda fazla su kullanıldığında, segregasyon problemi ile karşılaşılır ve yüksek çökme değerleri görülür.

2.2.4 Hafif Betonların Sınıflandırılması

Hafif betonun çok sayıda türleri bulunmaktadır. Bu yüzden değişik sınıflamaları yapılabilmektedir (Ören ve Gençel 2017). Üretim yöntemlerine göre, basınç dayanımlarına göre, birim hacim ağırlıklarına (yoğunluklarına) göre, kullanım amaçlarına göre ve daha birçok farklı şekilde sınıflandırılabilirler. Üretim yöntemlerine göre hafif betonlar; hafif agrega ile üretilen hafif betonlar, ince malzemesi olmayan hafif betonlar, kimyasal katkı kullanımı ile üretilen hafif betonlar; köpük beton ve gazbeton

olarak sınıflandırılmaktadır (Chandra ve Berntsson 2002). Rilem hafif betonları sınıflandırırken dayanımlarını ve birim hacim ağırlıklarını baz almıştır. Hafif betonları yapısal, yalıtım ve yapısal-yalıtım betonu olarak sınıflandırmıştır (Rilem 1972).

Hafif betonlar, TS EN 206-1’de yoğunluklarına (birim hacim ağırlıklarına) ve basınç dayanımlarına göre sınıflandırılmışlardır. Bir betonun hafif beton olarak sayılabilmesi için birim hacim ağırlık değerinin $800-2000 \text{ kg/m}^3$ aralığında, karakteristik basınç dayanımının ise küp numune ($150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ boyutlarında) için $9-88 \text{ N/mm}^2$ arasında olması gerekmektedir. Birim hacim ağırlığı $800-1400 \text{ kg/m}^3$ ve basınç dayanımı 10 MPa ’dan daha düşük olan hafif betonlar “yalıtım betonu” olarak sınıflandırılırlar. Birim hacim ağırlığı $1400-1600 \text{ kg/m}^3$ ve basınç dayanımı $10-16 \text{ MPa}$ aralığında olan hafif betonlar “yarı taşıyıcı hafif beton” olarak sınıflandırılırlar. Birim hacim ağırlığı $1600-1900 \text{ kg/m}^3$ ve basınç dayanımı 17 MPa ’dan daha yüksek olan hafif betonlar ise “taşıyıcı veya yapısal hafif beton” olarak sınıflandırılırlar (Şimşek 2004).

Topçu ise Hafif betonları; Taşıyıcı hafif beton ve Taşıyıcı olmayan hafif beton şeklinde sınıflandırmıştır. Bu sınıflandırmayı yaparken ise birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı değerlerini göz önüne almıştır. Bu sınıflandırmaya göre taşıyıcı hafif betonlar; birim hacim ağırlığı 1840 kg/m^3 ’ün altında ve basınç dayanımı 18 MPa ’ın üstünde olan betonlardır. Topçu’ya göre hafif betonların birim hacim ağırlıkları $300-1800 \text{ kg/m}^3$ arasında değişebilmektedir. Taşıyıcı olan hafif betonların birim hacim ağırlıklarında ise bu değer $1450-1800 \text{ kg/m}^3$ aralığında olabilmekle birlikte, genellikle $1600-1700 \text{ kg/m}^3$ arasındadır (Topçu 2006). Topçu’nun yaptığı bir sınıflandırma Çizelge 2.1’de verilmiştir. Bu sınıflandırmada farklı birim hacim ağırlığa sahip olan hafif betonların basınç dayanımları göz önüne alınmıştır. Çizelge 2.1’de verilmiş olan beton sınıflarından S1, S2 ve S3 sınıfı hafif betonlar yalıtım için kullanılırlar. S4, S5 ve S6 sınıfı hafif betonlar ise taşıyıcı hafif betonlardır. S2 ve S3 sınıfı olan betonlar, orta dayanımlı sayılırlar. S1 ve S2 sınıfı hafif betonlar taşıyıcı olarak tasarlanmamasına rağmen duvar malzemesi olarak kullanılabilir. S4 ve üstü sınıflar için endüstriyel olarak üretilmiş yapay hafif agregalar kullanılmalıdır (Topçu 2006).

Çizelge 2. 1 Hafif Beton Sınıfları (Topçu 2006).

Hafif Beton Sınıfı	Birim Hacim Ağırlık kg/m³	Basınç Dayanımı MPa
S1	≤800	1-7
S2	800-1200	7-10
S3	1000-1400	10-14
S4	1300-1600	14-25
S5	1500-1800	25-40
S6	1800-2000	40-70

2.3 Köpük Beton

Köpük beton; çimento, sürfaktan, su ile (mineral katkı, kum ya da ince agrega da ilave edilebilir) ısıtıl işlem uygulamadan üretilen ve hacimce %75-80 oranında bağımsız hava boşlukları içeren bir tür hafif betondur (Davraz vd. 2015). Sürfaktan yüzey aktif madde anlamına gelmektedir. Köpük beton üretiminde sürfaktan madde olarak köpük ajanı kullanılır.

TS 13655 (2015) standardında köpük beton; kireç ve/veya çimento gibi hidrolik bir bağlayıcının, gözenek (kapalı hava boşluğu) oluşturan bir malzeme, su ve silis esaslı ince malzeme ile karıştırılması ile elde edilen malzeme olarak tanımlanmıştır. Standarda göre köpük betonunu basınç dayanımı 1,5 MPa ve kuru birim hacim ağırlığı 300-1000 kg/m³ arasında olmalıdır. İngiliz Çimento Birliği'ne (BCA) göre ise köpük beton; tescilli veya standart bir karıştırma ünitesinde, çimento harcının içerisine önceden oluşturulmuş köpüğün katılması ile elde edilen malzemedir (British Cement Association 1994).

Köpük betonunun inşaat sektöründe oldukça geniş olan kullanım alanlarından bazıları; dolgu betonu, köprü yapımı, ısı ve ses yalıtımı, çatı yalıtımı, yol inşaatı, birçok altyapı uygulaması, yumuşak zemin tabanı, duvar blokları, prekast ve yerinde döküm uygulamaları, prefabrik yapı elemanı üretimi, asmolen tavan, duvar blokları, yalıtım tesviye betonu, paneller şeklinde sayılabilir (İnt. Kyn. 1, Davraz vd. 2015).

2.3.1 Köpük Betonun Tarihçesi

Köpük betonun uzun sayılabilecek bir geçmişi vardır. Romalılar, yaklaşık 2000 yıl önce kireç, su, küçük boyutlu çakıl ve kaba kum karışımını kullanarak beton üretiyorlardı. Bu karışıma hayvan kanı ekleyince, daha dayanıklı ve daha kolay uygulanabilen bir beton elde ettiklerini, beton bünyede ise küçük hava kabarcıklarının oluştuğunu fark ettiler (Aldridge 2005). 1900'li yılların başlarında Danimarka ve İsveç'te hava içeriği yüksek olan çimento esaslı malzemelerin imalatı ve ticareti başlamıştır. Daha sonra Axel Eriksson 1923 yılında patentini alana kadar bu alanda önemli bir gelişme olmamıştır (Beningfield vd. 2005, Jones vd. 2005). Bu alanda alınan ilk patent 1923'de "yalıtım malzemesi olarak kullanılmak" amacı ile alınmıştır (Valore 1954). Daha sonralarda da zamanla artan ilgi söz konusu olmuştur. Kanada, Meksika ve Güney Amerika'da köpük betonun kullanımı bir hayli yaygınlaşmıştır. Dünyanın diğer bölgelerinde de (özellikle depremlerin ve kasırgaların çok olduğu, kötü hava koşullarına sahip yerlerde) popülerleşmektedir. Son 5 yılda köpük betona olan ilgi ve bu alandaki gelişim büyük ölçüde artmıştır (Ören ve Gençel 2017).

Köpük beton üzerinde yapılan ilk kapsamlı inceleme 1954 yılında Valore tarafından sunulmuştur. Daha sonra Short, Kinniburgh ve Rudnai tarafından gözenekli betonun özellikleri, bileşimi ve kullanımını özetleyen ayrıntılı bir çalışma 1963 yılında yürütülmüştür. Ancak bu çalışmada hücreli yapının oluşumuna değinilmemiştir. (Rudnai 1963, Short ve Kinniburgh 1963).

Köpük beton üretilmeye başlandığı ilk zamanlarda yalıtım ve filler (dolgu) malzemesi olarak öngörülmüştür. Ancak yapısal özellikleri, atık malzeme kullanımına (uçucu kül gibi) imkân sağlaması ve hafif bünyesi sayesinde farklı amaçlar için kullanımına ilgi artmıştır (Ramamurthy vd. 2009). Ayrıca teknolojinin gelişmesi, daha iyi kalitede yüzey aktif maddeler (köpük katkısı) üretilmesine ve üretim ekipmanlarının gelişmesine katkı sağladığı için köpük betonun büyük ölçeklerde üretimine imkân sağlamıştır (Khayat ve Assaad 2002).

Köpük beton ile ilgili bilimsel çalışmalar ülkemizde sınırlıdır. Bu nedenle kullanımı da sınırlı kalmıştır. Ancak çevreci çalışmalara verilen önem arttığı için son zamanlarda köpük betona gösterilen ilgi de artmıştır. İleride bilimsel çalışmaların yürütülmesi ve yayınlanmasının artması ile kullanımı yaygınlaşacaktır.

2.3.2 Köpük Betonun Üretimi

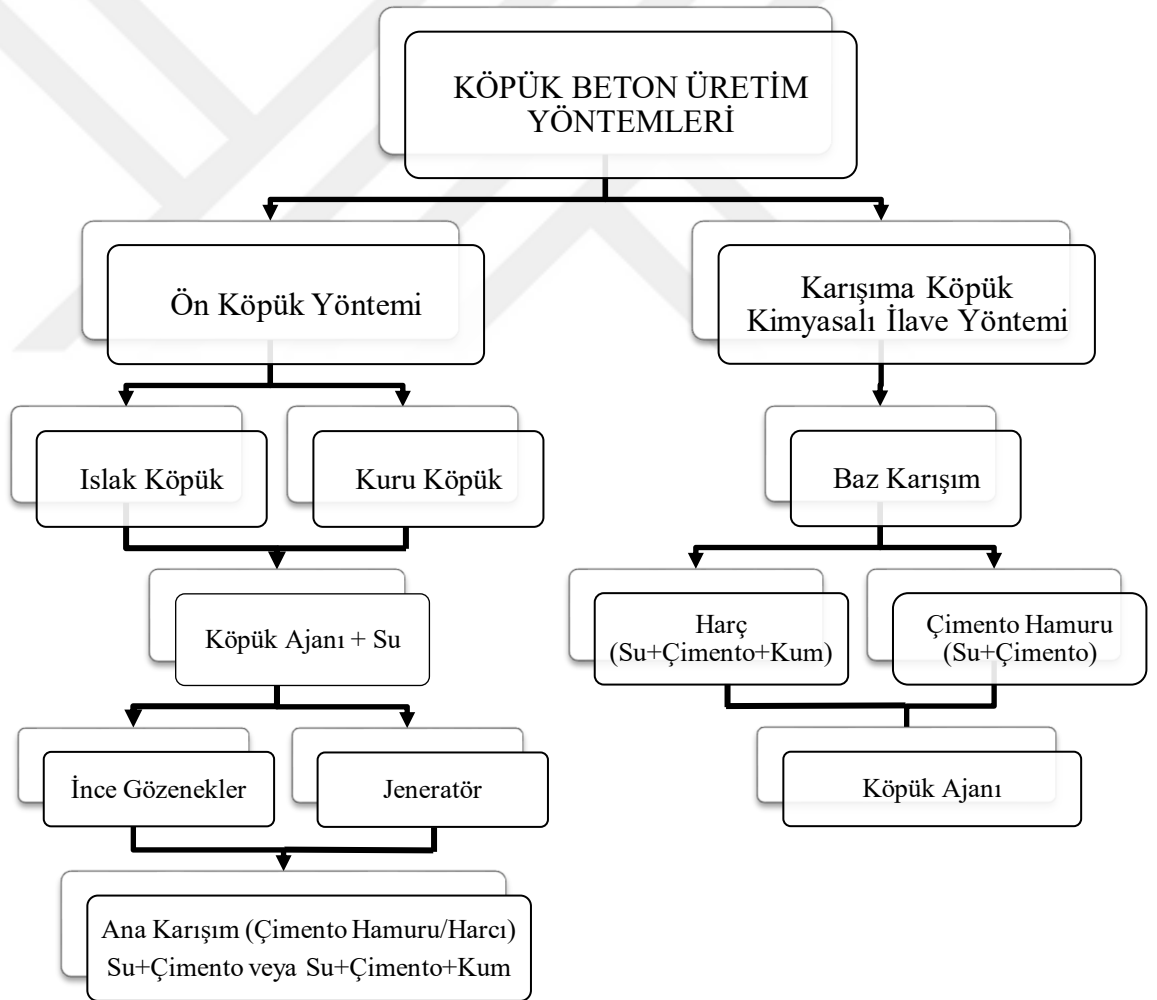
Köpük beton üretilirken kullanılan temel malzemeler; çimento harcı, kimyasal katkıları ve önceden üretilmiş köpük veya karışımın içerisine direkt olarak ilave edilen köpürtme ajanıdır. Çimento harcı; çimento, su ve ince kum içeren taze haldeki harç olarak tarif edilir. Bu harca ek olarak; betonun ağırlığını azaltmak için kararlı halde köpük veya köpürtme ajanı ilave edilir (Sari ve Sani 2017). Köpük katkıları; su ile seyreltilerek köpük jeneratöründen hava akımı yardımıyla geçirilen, tıraş köpüğüne benzer bir kararlı köpük oluşturan yüzey aktif (sürfaktan) maddelerdir (Demir 2014).

Köpük beton farklı üretim yöntemleri ile üretilir; Ön köpük yöntemi ve Karışıma köpük kimyasalı ilave yöntemi. Köpük betonun üretim yöntemlerinin Mohammed ve Hamad (2014) tarafından oluşturulmuş şeması Şekil 2.1’de sunulmuştur.

Karışıma köpük kimyasalı ilave edilen yöntemde, kullanılacak köpük kimyasalı (yüzey aktif madde) karıştırma işlemi esnasında su, agrega ve çimento ile birlikte yüksek hızla karıştırılır. Sürfaktan olarak da adlandırılabilen yüzey aktif bir madde olan köpük ajanı karışımın içerisinde köpürerek mikro boyutlu, birbirinden bağımsız hava boşluklarını oluşturur. Yaygın olarak kullanılan bu yöntem, basittir ve standartlaştırılmıştır (Panesar 2013). Bu yöntemin uygulaması basit olsa da birim hacim ağırlığı kontrol etmek oldukça zordur ve ön köpük yöntemine göre daha fazla köpük ajanı kullanımı gerektirmektedir.

Ön köpük yönteminde ise; önceden üretilen kararlı haldeki köpük, harcın (baz karışım: su+bağlayıcı+kum) içerisine katılır ve homojen karışım elde edilinceye kadar karıştırılarak köpük beton elde edilir. Bu yöntemde köpüğü üretmeden önce harcı hazırlamak ve homojen bir şekilde karıştırmak önem arz eder. Bu yöntemde ıslak köpük veya kuru köpük kullanılabilir. Islak köpük yönteminde su ile seyreltilen köpük

ajanı ince hasır üzerine püskürtülür ve 2-5 mm çaplı gözeneklere sahip köpük üretilir. Islak köpüğün gözeneklerinin geniş yapıda olmasından dolayı yoğunluğu düşük olması istenen (1100 kg/m^3 'ün altında) köpük betonların üretimi için tavsiye edilmez (Ören ve Gençel 2017). Kuru köpük yönteminde ise köpük, su ile seyreltilen köpük ajanı çözeltisinin köpük jeneratöründe basınçlı hava ile püskürtülmesi sayesinde elde edilir (Kuzielová vd. 2016). Kuru köpük görünüş açısından tıraş köpüğüne benzemektedir ve kararlı gözenek yapısı ıslak köpükten daha küçüktür. Kuru köpüğün gözenek boyutları 1 mm'den daha küçüktür (Ören ve Gençel 2017). Kuru köpük yöntemi ile daha kararlı köpük elde edildiği için daha çok tercih edilir.



Şekil 2. 1 Köpük Beton Üretim Yöntemleri (Mohammed ve Hamad 2014).

Köpük üretmek için kullanılan iki tane jeneratör sistemi mevcuttur. Sistemlerin ilkinde köpük çözeltisi (köpük ajanı+su) basınçlı hava ile bir mikser hattından geçirilerek köpük üretilir. Köpük çözeltisi 40 katına kadar büyür ve düşük yoğunluklu köpük üretilmiş olur. İkinci sistemde ise köpük çözeltisi (köpük ajanı+su) içinde bulaşık teline benzeyen tel örgü bulunan bir tüp içerisine püskürtülür. Üretilen köpük, harç ile homojen olacak şekilde karıştırılır ve köpük beton elde edilir. Üretilen köpük çimento harcına ilave edilip karıştırıldığında yapıyı sertleştiren reaksiyonlar başlar. Kullanılan köpüğün üretim aşamaları sırasında kararlı (gözeneklerini muhafaza edebilen) ve beton prizini alana kadar da kararlı halini sürdürebilen bir yapıda olması önemlidir. Eğer üretim sürecinde köpük kararsız hale gelirse, çökme görülebilir (Atabey 2018).

Köpük beton üretiminde köpük ajanlarının görevi; mikro boyutlu kapalı hava kabarcıklarının oluşmasını sağlamak ve bu kabarcıkların stabilitesini arttırmaya ek olarak yüzey gerilimini de azaltmaktır. Köpük betonda genellikle yüzey aktif madde olarak sentetik esaslı veya protein esaslı köpük ajanları kullanılır. Her iki türden olan köpük ajanları da yüzey gerilimini düşürür ve böylelikle kararlı hava kabarcıklarının oluşumunu kolaylaştırır (Panesar 2013). Sentetik ve protein esaslı köpük ajanlarının ikisinin de kullanımı dünya çapında mevcuttur.

Sentetik esaslı köpük ajanları güçlü hidrofilik özellik gösterirler ve su içinde kolayca çözünürler. Mikro boyutlu hava kabarcıklarını oluşturan çözücü maddelerdir. Ancak sentetik maddelerin taze betona eklenmesinde dikkatli olunması gerekmektedir. Çünkü çimento ile kimyasal maddenin uyumu, betonun mikro yapısı ve istenen miktarda hava sürüklemek için çok önemlidir (Panesar 2013). Sentetik köpük ajanı kullanılarak üretilen köpükler yaklaşık olarak 40 g/L civarında olan yoğunluğa sahiplerdir. Köpük yoğunluğu, köpüğün litredeki ağırlığının ölçülmesi ile bulunur. Sentetik köpük ajanı kullanılarak üretilen köpükler, birim hacim ağırlığı 1000 kg/m^3 'ün üstünde olan hafif betonlarda çok iyi mukavemet ve kararlılık gösterirler (Brady ve Jones 2001). Sentetik esaslı köpük ajanlarının kullanımı diğer köpük kimyasallarına göre daha kolaydır, daha ucuzdur, üretimi için daha az enerji harcanır ve daha uzun süre depolanabilirler. Ancak aşırı sıcaklıklara daha duyarlıdır (Ören ve Gençel 2017).

Protein esaslı köpük ajanların çalışma şekli sentetik esaslı köpük ajanların çalışma şeklinden farklıdır. Protein esaslı köpük ajanları, içeriğindeki proteinlerin bozunması ile kapalı hava kabarcıkları üretirler. Protein moleküllerinin peptit bağları kırılır, hidrofobik küçük moleküller oluşur. Bu işlem sırasında çözeltinin yüzey gerilimi düşer ve kararlı hava kabarcıkları oluşur. Protein esaslı köpük ajanları pH ve sıcaklık değerlerinden etkilenmektedirler. Protein esaslı bir köpük ajanı su ile hacimce 1/40 oranında seyreltilir ise 70 g/L yoğunlukta kararlı köpük elde edilebilir (Bing vd. 2012). Protein esaslı köpük ajanları hayvansal kökenli protein kullanılarak üretilir. Üretimi sırasında kullanılan farklı hammaddeler ve farklı karışımlar hem kalitenin değişkenlik göstermesine hem de yoğun kokuya yol açar. Hayvansal protein kökenli köpük ajanları, protein yapısının içine suyu alıp tutabilme özelliğine sahiptirler. Bu sebeple bu tür köpük ajanları ile daha güçlü betonlar üretilebilmektedir. Protein yapının içinde tutulan su hidrasyon işlemi için köpükten ayrılır ve çimento tanecikleri tarafından kolaylıkla kullanılır. Bu durum hava kabarcıklarının etrafında oluşan hidrasyon ürünleri (C-S-H ve CH) sayesinde güçlü mikro boyutlu gözenek yapısı oluşmasını sağlar (Ören ve Gençel 2017).

Köpük beton üretiminde dikkat edilen noktalardan birisi köpüğün yoğunluğudur. Köpüğün yoğunluğu, elde edilen kararlı haldeki köpüğün litredeki ağırlığı (g/L) ölçülerek belirlenir. Köpük ajanı ile suyun seyreltme oranı değiştirilerek farklı yoğunluklarda köpük üretilebilmektedir. Düşük yoğunluklu olan köpükler betonda çökmeye neden olabilir. Taze haldeki çimento harcının içeriğinde bulunan katı tanecikler yerçekiminin etkisiyle köpük bünyede tutunamaz ve priz başlamadan önce tabana çöker. Yüksek yoğunluklu köpükler ise yoğunluğu dolayısıyla hava kabarcıklarını birleştirerek sertleşmiş bünyede gözenek yapısını büyütür. Gözenek yapısının büyümesi mekanik ve fiziksel özellikleri olumsuz etkiler. Köpük betonda kullanılacak köpüklerin üretiminde çok büyük boyutlu hava kabarcıklarının oluşması istenen bir durum değildir. Çünkü büyük boyutlu hava kabarcıkları, küçük boyutlu olan hava kabarcıklarına göre daha az kararlıdır ve beton üretimi sırasında çökme olasılığını arttırırlar. Üretim aşamaları sırasında çok fazla çökme yaşanır, üretilen köpük beton beklenenden düşük performans gösterebilir (Timbrell 2007). Köpük beton taze haldeyken kendiliğinden akacak kadar akışkan olduğu kadar, segregasyona ve deformasyona engel olacak kadar da kararlı olmalıdır (Rousesel 2007).

Kararlılık; üretilmiş köpüğün ve köpük betonun taze haldeki koşullarını tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Köpük hacmi fazla olan (%50'sinden fazla) betonlarda kararlılığın, beton özellikleri üzerinde oldukça etkili olması beklenir (Aldridge 2005). Köpük betonun kararlılığı üç faktöre bağlıdır; köpük miktarı, su miktarı ve karışımda kullanılan katı bileşenler. Amran vd. (2015), köpük betonun kararlı bir yapıya sahip olmasında etkili olan parametreleri; köpük oluşturmak için seçilen yöntem, karışım oranları ve kullanılacak köpük ajanının cinsi olarak ifade etmişlerdir. Üretilen köpük yeterince kararlı, sıkı ve katı bir yapıda olmalıdır, çimentonun yaptığı basınca priz süresince karşı koymalı ve gözenekli bir yapı kazanabilmelidir (Ramamurthy vd. 2009, Mohammed ve Hamad 2014). Bu sebeple kullanılan köpük ve köpük ajanı kaliteli olmalıdır. Özellikle son 20 yılda bu konuda büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Geliştirilen ekipmanlar ve köpük ajanı formülasyonları sayesinde günümüzde çok kaliteli köpükler üretilmektedir.

Köpük üretiminde ve köpük betonun baz karışımının (su+bağlayıcı+kum) içeriğinde kullanılacak su içilebilecek nitelikte olmalıdır. Alkalileri, asitleri, tuzları, yağ moleküllerini ve diğer zararlı organik maddeleri fazla miktarda içermemelidir. İşilemeyen sular da uygun özellikleri taşıyor ise kullanılabilir (Karl ve Worner 1993).

Köpük betonun bazı özelliklerini geliştirmek için mineral ve kimyasal katkıları kullanılır. Silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve metakaolin gibi malzemeler puzolanik özellikleri sayesinde mineral katkı olarak kullanılır. Kimyasal katkıları; mineral katkıları, çimento, su ve agregalar dışında, karışımı karıştırmadan önce veya karıştırma sırasında eklenen toz veya sıvı formda olabilen maddeler olarak tanımlanabilir. Kullanım miktarı çimentonun dozajına göre belirlenir. Katkıları genellikle beton özelliklerini geliştirmek ve betonun maliyetini azaltmak amacıyla karışıma eklenir. Betonun karıştırılması ve kalıbına yerleştirilmesi için gereken süre boyunca istenen özellikleri geliştirmek için (kıvam, işlenebilme, kalıba yerleşme, erken ya da geç priz alma, su azaltma gibi özellikler) kullanılmaktadır (Demir vd. 2019). Türkiye Standartlarında betonda kullanılan katkıları, kullanılış amaçlarına göre sınıflandırılmışlardır. Çalışmada kullanılan Yüksek oranda su azaltıcı/Süper akışkanlaştırıcı katkıları Türk Standartlarında; Betonda çökmeyi/yayılmayı su miktarı değişmeden yüksek oranda yüksek oranda arttıran veya su

miktarının kıvamı değiştirmeden yüksek oranda azaltılmasını sağlayan veya her iki etkiyi bir arada sağlayabilen katkılar olarak tanımlanmıştır (TS EN 934-2 2010).

2.3.3 Köpük Betonun Özellikleri

Köpük betonun karakteristiği taze ve sertleşmiş hallerdeki özelliklerinin yanında; karışım bileşimi, kullanılan malzemelerin kalitesi, üretim prosesi gibi parametrelere de bağlıdır.

2.3.3.1 Köpük Betonun Taze Haldeki Özellikleri

Taze haldeki köpük betonun en önemli özelliklerinden birisi işlenebilirliğidir. İşlenebilirlik segregasyon gibi zorlayıcı durumlarla karşılaşmadan betonun karıştırılması, taşınması, kalıbına yerleştirilmesi ve yüzeyinin düzeltilmesi işlemlerine verilen isimdir. İşlenebilirlik kavramı; akışkanlık, kıvam ve sıkıştırılabilme kavramlarını da içine alan bir kavramdır (Oğuz 2019). Köpük beton kalıbına yerleştirilmesi kolaydır, sıkıştırılmaya ihtiyaç duymaz.

Taze haldeki köpük beton harcının akma özellikleri, geleneksel beton harcının akma özelliklerinden farklıdır. Taze haldeki köpük beton akma dayanımı düşük olduğu için serbest akış özelliği gösteren, kendiliğinden yayılan ve kendiliğinden kalıbına yerleşen bir betondur (British Cement Association 1994). Taze haldeki köpük betonun akış özelliklerini etkileyen; çimento tipi, su/çimento oranı, filler malzeme tipi, su/ince malzeme oranı, kullanılan köpük ajanının tipi, elde edilen köpüğün yoğunluğu, taze haldeki harç yoğunluğu gibi pek çok faktör vardır (Demir vd. 2017).

Köpük beton kendiliğinden yerleşen beton gibi tasarlanır. İstenen akışkanlık ve sıkışma özelliklerini sağlamak için; köpük miktarı ve su içeriği ayarlanır. İstenen özelliklere sahip olan köpük betonu üretmek için herhangi bir hesap yapılmamaktadır, deneme-yanılma yöntemi benimsenmiştir (Nehdi vd. 2001).

İstenilen akışkanlığın sağlanabilmesi için Su/çimento oranı oldukça önemlidir. Su/çimento oranı pek çok nihai özelliği etkiler. Bu sebeple su/çimento oranına dikkat

edilmelidir. Köpük beton karışımında çok az miktarda su kullanılması çimento tanelerinin hidratasyon için gerekli olan suyu köpükten karşılamasına sebep olabilir. Bu durum köpüğün çökmesine sebep olabilir (Wee vd. 2006). Koyu kıvamlı bir köpük beton karışımında, hava kabarcıklarının sönümlenmesi sebebiyle, aşırı akışkan kıvamlı bir köpük beton karışımında ise bünyedeki taneciklerin hava kabarcıklarına tutunamaması sebebiyle segregasyona yol açtığı görülebilmektedir (Demir vd. 2017).

Köpük betonun akış davranışı köpük miktarına da bağlıdır. Karışımında kullanılan köpük miktarı artınca; hava hacmi artacak, yoğunluğun azalması ile kohezyon artacak ve hava kabarcıkları-katı taneler arasındaki adezyon kuvvetleri artarak harcın kıvamını arttıracaktır. Böylelikle akışkanlık değeri azalacaktır (Karl ve Worner 1993, Demir vd. 2017).

Karıştırma süresi de işlenebilirlik üzerinde oldukça etkili bir parametredir. Ne kadar artar ise hava akışı da o kadar artar. Ancak kritik sınıra ulaşıldığında (maksimum hava içeriği) yapılan fazla karıştırma, elde edilen havanın kaybına yol açar. Bu davranış, hava tutucu maddenin veya köpüğün türüne, verimine ve miktarında da bağlıdır (Beningfield vd. 2005).

İşlenebilirliği ve kıvamı iyileştirmek için bazı katkılar kullanılabilmektedir. Köpük betonda akışkanlaştırıcılar, su azaltıcı katkılar, priz hızlandırıcı katkılar ve hava sürükleyici katılara ilaveten lif katkıları da sıklıkla kullanılabilmektedir (Demir vd. 2019). Lif katkıları hücresel yapının stabilitesini arttırmak ve mekanik özellikleri geliştirmek için kullanılır. Rötire çatlaklarını engelleyici etki yapar.

Yoğunluk yani birim hacim ağırlık köpük betonun nihai özelliklerini en çok etkileyen faktörler arasındadır. Yoğunluk hem taze harç özelliği hem de sertleşmiş beton özelliği olarak sayılabilir. Köpük betonun üretim aşamasında litredeki ağırlığı baz alınarak eklenecek köpük miktarı belirlenir. Üretildikten sonra ise beton ağırlığının beton hacmine bölünmesi ile birim hacim ağırlık belirlenmiş olur. Birim hacim ağırlık değerleri genellikle dayanım ile doğrudan ilişkilidir. Kearsley ve Mostert 2005’de yaptıkları çalışma sonucu; farklı karışımlar için köpük betonun taze haldeki birim hacim ağırlığı ve

sertleşmiş haldeki birim hacim ağırlığı arasındaki ilişkinin doğrusal olduğunu bildirmişlerdir.

Hidratasyon; çimento taneciklerinin su ile yaptıkları ve reaksiyon sonucu ısı açığa çıkaran ekzotermik bir tepkimedir (Binici vd. 2005). Gözenekli betonlarda hidratasyon ısısı normal betonlara göre daha fazla parametreden etkilenmektedir. Isı kapasitesi, yoğunluk, kullanılan agreganın tipi ve miktarı gibi faktörlerden etkilenir. Köpük beton normal betona göre daha değişkendir. Hidratasyon ısısı ve uygun kürlenme şartları sağlanamaz ise köpük betonda rötre çatlaklarının oluşumu artar. Köpük beton ince malzemesinin çok olmasından dolayı rötre çatlakları oluşturmaya yatkındır. Bu sebeple ısıdan, iri malzemeli olanlara göre daha çabuk etkilenmektedir. Rötre çatlaklarının artması ile dayanım ve dayanıklılık olumsuz etkilenir. Bu sebeple köpük betonun priz sürecinde ve sonrasında uygun hidratasyon koşullarının sağlanması önemlidir (Oğuz 2019).

Köpük betonun sahip olduğu yüksek hava hacmi, hidratasyon ısısının kolay dağılmasını engeller ve beton içinde yüksek sıcaklıkların oluşmasına neden olur. Köpük betonların hidratasyon süreçleri, termal karakteristikleri ve birim hacim ağırlıkları arasındaki ilişkilerin incelenmesi için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir (Panesar 2013).

Kür aşaması ve kürlenme koşulları köpük beton gibi hassasiyeti yüksek olan betonlar için önem arz eder. Uygun kür koşulları sağlanamaz ise beton yüzeyinde çatlakların görülmesi muhtemeldir. Köpük betonda genellikle otoklavsız kürler tercih edilir. Oda sıcaklığında kür uygulanabilir. Jones ve McCarthy (2005)'nin yaptığı araştırma sonuçlarına göre su içerisinde kür uygulanan numunelerde, diğer kürlenme koşulları uygulanan numunelere göre daha yüksek mukavemet değerleri elde edilebilmektedir.

2.3.3.2 Köpük Betonun Sertleşmiş Haldeki Özellikleri

Köpük betonun basınç dayanımını etkileyen en önemli faktör yoğunluğu yani birim hacim ağırlığıdır. Birim hacim ağırlığının azalması ile basınç dayanımı üstel olarak azalır (Bing vd. 2012). Kearsley ve Wainwright (2002) yaptıkları çalışmalar sonucunda köpük betonda, normal betonlarda olduğu gibi, basınç dayanımı ile porozite arasında bir ilişki

olduğunu ortaya koymuşlardır. Betonun porozitesi azaldıkça, basınç mukavemetinin arttığını bildirmişlerdir. Yani köpük betonda hava kabarcıklarının hacmi azaltılarak basınç dayanımı arttırılabilmektedir.

Köpük betonda basınç dayanımı ile karışım suyu arasında ters bir orantı bulunmaktadır. Karışım suyu, ince ve iri agrega tanelerin yüzeyini ıslatır, çimento tanelerine bağlayıcı özellik kazandırır, hidrasyon reaksiyonunun oluşumunu sağlar. Betonun kıvamı, karışım suyu arttıkça artar. Eğer karışım suyu miktarı olması gerekenden fazla olur ise; beton yüzeyinde gözenekli bir yapı oluşur. Eğer karışım suyu miktarı olması gerekenden az olur ise; agrega tanelerinin yüzeyleri tam olarak ıslanmaz, çimento taneleri hidrasyonunu yapamaz ve böylelikle çimento-agrega aderansı zayıf olur. Bu durumda köpük beton yeterli dayanımı kazanamaz. Köpük beton dayanımı etkileyen en önemli faktörlerden biri de su/çimento oranı sayılmaktadır. Su/çimento oranının artması ile de betondaki boşluk oranı artarak basınç mukavemetini düşürmektedir. Su/çimento oranının azalması ile beton mukavemeti artmaktadır. Ancak su/çimento oranı fazla azalır ise köpük betonun basınç mukavemetinde düşme görülecektir (Oğuz 2019).

Su azaltıcı katkı maddeleri, normal ağırlıklı betonlarda olduğu gibi, köpük betonlarda kullanılabilir. Ancak köpük betonda kullanılan kimyasal katkı maddeleri, köpük stabilitesini olumsuz etkilediği için kullanımına temkinli yaklaşmakta fayda vardır.

Köpük betonda boşluklar ve boşlukların hacmi, basınç mukavemetini etkileyen önemli parametrelerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucu elde ettikleri bilgilere göre Sayadi vd. (2016), köpük betonların termal ve mekanik özelliklerini içeriğindeki çimento miktarı ve köpük hacminin doğrudan etkilediğini bildirmişlerdir. Köpük içeriği, basınç mukavemetini etkilemektedir (Ören ve Gençel 2017). Daha küçük boyutlu hava boşlukları sayesinde, daha yüksek basınç dayanımları elde edilmektedir. Daha büyük boyutlu hava boşlukları içeren köpük betonlarda ise daha düşük basınç dayanımı elde edilmektedir (Kuzielová vd. 2016). Kullanılan köpük ajanının türü de köpük betonda basınç mukavemetini etkiler. Protein esaslı olan köpük ajanlarının, sentetik esaslı köpük ajanlarına göre basınç dayanımında daha başarılı sonuçlar göstermiştir (Jones ve McCarthy 2005).

Elastisite modülü, betonun basınç dayanımı ile direkt olarak bağlantılıdır. Birim uzamaya karşılık gelen gerilme olarak tanımlanır. Köpük betonun elastisite modülünün, normal betonun elastisite modülünden daha düşük olmasının sebebi iri agrega içermemesi olarak açıklanabilir. Köpük beton, aynı gerilme değerlerinde, normal betona göre daha çok şekil değiştirmektedir (Dikici 2010). Yapılan çalışmalar sonucunda; 500-1500 kg/m³ aralığında birim hacim ağırlığına sahip olan köpük betonların elastisite modülleri 1000-8000 MPa olarak elde edilmiştir. Köpük betonda hava kabarcıkları, basınç dayanımını elastisite modülünden daha çok etkiler (Ören ve Gençel 2017).

Mikro boyutlu hava kabarcığı içeren pek çok madde gibi, köpük beton da çok iyi bir yalıtıcıdır. Hatta köpük beton, termal yalıtım özellikleri ile öne çıkan bir maddedir. Köpük beton kapalı hava boşluğu içeren bir yapıya sahip olduğu için iletkenlik değerleri düşüktür. Bu da köpük betonu oldukça iyi bir yalıtkan yapar. Birim hacim ağırlığı 600-1600 kg/m³ arasında olan köpük betonlarda 0,1-0,7 W/mK aralığında ısı iletkenlik değerleri elde edilmiştir. Birim hacim ağırlığı 1000-1200 kg/m³ aralığında olan köpük betonlarda ise 0,23-0,42 W/mK aralığında ısı iletkenlik değerleri elde edilmiştir. Isı iletkenlik değerlerinin birim hacim ağırlığın azalması ile azaldığı gözlemlenmiştir (Jones ve McCarthy 2005, ASTM C618-05 2005). Köpük betonun ısı iletkenlik değerlerinin, normal betonun ısı iletkenlik değerlerinden 5 kat daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Yani köpük beton, normal betondan 5 kat daha fazla yalıtım özelliği göstermektedir. Bu bilgi pratikte; normal beton ile köpük betonun yalıtım özelliğini yakalamak için 5 kat daha kalın olan birimlere ihtiyaç duyulacağı anlamına gelmektedir (Dede 2019).

Porozite, gözeneklilik anlamına gelen bir tanımdır. Köpük betonda gözenek, kapalı hava boşluklarının temsil eden bir ifade olarak bilinmektedir. Köpük betonlarda (hafif betonlarda) hava miktarı ASTM C173'e göre belirlenir. Köpük betonlarda hava miktarı %75 seviyelerine yaklaşabilmektedir. Köpük betonun gözenek yapısı; kılcal boşluklar, hava boşlukları ve jel boşluklarından oluşmaktadır. Literatürde basınç dayanımı ile porozite arasındaki ilişkiyi inceleyen pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar sonucu araştırmacılar, beton porozitesinde olan bir azalmanın basınç mukavemetini arttırdığını tespit etmişlerdir (Hoff 1972, Kearsley ve Wainwright 2002, Wee vd. 2006).

Nambiar ve Ramamurthy (2007) yaptıkları çalışmada, köpük betonun hava boşluğu yapısını incelemişlerdir. Köpük betonun mekanik özelliklerini ve birim hacim ağırlığını; kapalı boşlukların miktarı, boyutu, hacmi ve aralığının etkilediğini, hava boşluklarının şekillerinin ise etkilemediğini belirtmişlerdir.

Köpük betonun su emme kapasitesi ile birim hacim ağırlığı ilişkilidir. Birim hacim ağırlığının azalması, su emme kapasitesinin artmasına neden olabilir. 700 kg/m^3 birim hacim ağırlığına sahip bir köpük betonun su emme değeri %35 gibi yüksek bir değerde olabiliyorken; 1800 kg/m^3 birim hacim ağırlığına sahip bir köpük betonun su emme değeri %15 gibi düşük bir değer alabilir (Wee vd. 2006). Köpük betonda çimento harcının hacmi, su emme değerini etkiler. Çimento harcının hacmi daha düşük olan köpük betonlarda kılcal boşlukların hacmi de daha düşük olur, kapalı hava kabarcığı hacmi daha yüksek olduğundan su emme değerinin de azalması beklenir (Jones ve McCarthy 2005).

Köpük betonların, yangına dayanma özellikleri oldukça iyidir. Normal ağırlıklı betona kıyasla, düşük ve yüksek sıcaklıklarda çok daha iyi bir performans sergilemektedirler.

Rötre, beton bünyesindeki suyun yükten bağımsız olarak hidrasyon ve kuruma ile bünyeyi terk etmesidir. Rötre sonucu hacimsel değişimler görülür. Köpük betonda rötre olayı, normal betonlara göre daha çok yaşanmaktadır. Bu durum çimento oranının, nispeten, daha yüksek olmasından, iri taneli agregaların eksikliğinden ve yüksek su miktarından kaynaklanmaktadır (Gelim 2011). Köpük beton yüksek miktarda ince malzeme içerir. Çimento ve ince agrega miktarı yüksek, iri agrega miktarı ise düşüktür. Bu sebeple rötresi normal ağırlıklı betona göre daha fazladır. Rötre olayı köpük betonlar için yüksek risk teşkil etmektedir. Köpük betonların ortalama rötrelerini ACI 523.2R-96 (1996) %0,2 ile sınırlandırmıştır. Otoklav kürü ile rötre azaltılabilmektedir.

Rötreyi arttıran sebeplerden biri de köpük miktarıdır. Köpük miktarı arttıkça (birim hacim ağırlık azaldıkça) ve sıcaklık da arttıkça, rötrede de artış görülür. Köpük betonda büzülmeyi arttıran etken, kullanılan ince malzemenin yüksek olmasıyla artan toplam yüzey alanı olarak ifade edilebilir. Normal betona göre oldukça düşük olan mukavemet değerleri nedeniyle köpük betonda, yüksek büzülmenin (nedeni ince malzemenin yüksek

miktarda kullanımı) neden olduğu iç gerilmelerin, köpük beton bünyesinin mukavemet değerlerini aştığı durumlarda büzülme çatlakları meydana gelir (Demir 2014).

Çimento hamurunun rötre gelişimini arttıran etken çimento miktarının artmasıdır. Bu sebeple çimento dozajının 300 kg/m^3 'ü aşmaması gerekmektedir. Rötre gelişimini sınırlamak için su azaltıcı kimyasalların kullanımı ile su/çimento oranının düşürülmesi yerinde bir hareket olacaktır (Demir 2014).

Köpük betonun rötre değerlerini arttıran etkenlerden biri de karışımda kullanılan köpüğün yoğunluğudur. Köpük yoğunluğunun düşük olduğu durumlarda ($45\text{-}50 \text{ g/L}$ 'den daha düşük), rötre çatlakları artış göstermektedir. $60\text{-}70 \text{ g/L}$ 'den daha yüksek yoğunluğa sahip köpüklerin kullanılması daha uygun olacaktır (Demir 2014).

Lee ve Hung (2005), birim hacim ağırlığı $1500\text{-}1600 \text{ kg/m}^3$ aralığında olan köpük betonlarda, su/bağlayıcı oranının $0,65\text{-}0,70$ aralığında ve kum/çimento oranı 2 olduğunda; köpük betonun kuruma büzülmesi değerinin $\%0,09$ 'dan daha az olduğunu rapor etmişlerdir.

Köpük beton mikro boyutlu olan kapalı küçük hava kabarcıkları içeren homojen bir yapıya sahiptir. Genellikle küresel şekilli olan bu hava kabarcıklarının çapları $0,1\text{-}1 \text{ mm}$ aralığındadır. Bu hücre yapısı malzemenin; basınç dayanımını, fiziksel özelliklerini, ısı iletkenliğini, hafifliğini ve çevresel etkilere karşı dayanıklılığını etkiler. Dayanıklılık özelliklerinden biri olan donmaya karşı direnci etkileyen sebeplerden biri gözenek yapısı ve dağılımıdır. Köpük betonun gözenek yapısı da donma olayı sırasında ozmotik ve hidrolik basınç için alan sağlamaya elverişli olduğundan, donma-çözünme direnci yüksektir (Jones ve McCarthy 2005).

Donma-Çözünme direncinin belirlenmesinde geçirgenlik ve yoğunluk en önemli etken değildir. Soğurma derinliği daha önemli bir etkendir. Donma-Çözünme çevrimine dayanıklı olan köpük beton üretmek için; basınç dayanımı, absorpsiyon olayı ve absorpsiyon derinliği de göz ardı edilmemelidir (Ören ve Gençel 2017).

2.3.4 Köpük Beton ile İlgili Çalışmalar

Panesar (2013), köpük betonun mekanik özelliklerini ve yalıtım özelliklerini incelemiştir. Yaptığı çalışmalar sonucu köpük betonun hafif yapısal uygulamalarda kullanım için iyi bir potansiyele sahip olduğunu bildirmiştir. Ancak kullanılan köpük kimyasal türünün, köpük beton üzerindeki etkisinin çok fazla olduğunu da bildirmiştir.

Niu vd. 2016'da yaptıkları bir çalışmada içeriğinde portland çimentosu kullanılan ve önceden oluşturulmuş köpük ilavesiyle üretilen köpük betonun taze haldeki özelliklerini, sertleşmiş haldeki özelliklerini ve hava boşluğu yapısını incelemiştir. %88,5-95,4 oranında gözenek içeren köpük betonun; ısı iletkenliği 0,036-0,063 W/mK aralığında ve basınç dayanımı 0,12-0,75 MPa aralığında bulunmuştur.

Nambiar ve Ramamurthy (2007), yapmış oldukları çalışmada köpük betona ince malzeme olarak kum yerine uçucu kül eklemiştir. Ürettikleri köpük betonda yaptıkları incelemeler sonucunda uçucu kül kullanılan köpük betonlarda daha küçük boyutlu ve daha düzenli hava boşluğu dağılımı elde etmişlerdir. Küçük boyutlu hava dağılımına sahip köpük betonların daha yüksek basınç mukavemeti gösterdiğini ortaya çıkarmışlardır. Bunlara ek olarak; litredeki ağırlığı (yoğunluğu) daha yüksek olan köpük hacimlerinde, kabarcıkların birleşmesi ile daha büyük boyutlu hava kabarcıkları oluşabileceği ve bu sebepten dolayı da köpük betondan elde edilen basınç mukavemetinin düşebileceğini de eklemiştir.

Davraz vd. (2015), köpük betonun sertleşmiş haldeki birim hacim ağırlığının azalması ile basınç dayanımının azaldığını savunmuşlardır. Köpük betonların farklı oranlardaki tasarımları için, su/çimento oranı, agrega türü ve çimento dozajı sabit kalmak koşuluyla, birim hacim ağırlık-basınç dayanımı ilişkisinin doğrusal olduğunu belirtmişlerdir.

Awang vd. (2012) yaptıkları çalışmada içeriğinde çimento, kireç, uçucu kül, polipropilen elyaf lif ve önceden üretilmiş köpük olan köpük beton karışımlarını kullanarak; 600, 1000 ve 1400 kg/m³ birim hacim ağırlıklı numuneler üretmişlerdir. Üretilen bütün numuneler için sabit 0,45 su/çimento oranı ve 1/1,5 çimento/kum oranı kullanılmıştır. Farklı birim

hacim ağırlığa sahip olan köpük betonların farklı mekanik özellikler gösterdiğini tespit etmişlerdir. Düşük birim hacim ağırlığa sahip olan köpük betonların mekanik özelliklerinin düşük olduğunu ancak daha fazla mikro boyutta hava kabarcığı içerdiği için termal özelliklerinin iyi olduğunu söylemişlerdir. Uçucu kül kullanılan numunelerde; hava kabarcığı dağılımının geliştiğini, kütleme sürelerinin -puzolanik reaksiyonlar nedeniyle- arttığını, eğilme ve basınç dayanımlarının arttığını fark etmişlerdir. Kireç kullanılan numunelerde ise kirecin ilavesinin mekanik faydası direkt olarak olmasa da pozolanik reaksiyonu hızlandırarak köpük betonun erken dayanım kazanmasını sağladığı gözlemlenmiştir. Polipropilen elyaf liflerin hidroforik (su iten) özelliği sayesinde köpük beton bünyede daha fazla gözeneklilik oluşturduğu ve böylelikle basınç dayanımını etkilediği ifade edilmiştir. Yüksek birim hacim ağırlıklarda liflerin mekanik özelliklere pek fazla fayda sağlamadığını, düşük birim hacim ağırlıklarda ise etkili olduğu da eklenmiştir.

Kuzielová vd. (2016), yaptıkları çalışmada sabit tutulan su/çimento oranı (0,55) ile farklı miktarlarda su kullanarak, farklı karışımlar elde etmişlerdir. Protein esaslı köpük ajanı ve portland çimentosunu kullanmayı tercih etmişlerdir. Elde edilen numuneler üzerinde; basınç dayanımı, kütle yoğunluğu (birim hacim ağırlığı), mikro yapı, köpük stabilitesi, köpük ajanı konsantrasyonunun etkisi incelenmiştir. Düşük konsantrasyonda kullanılan köpük ajanı, köpük stabilitesini arttırmış ve hidrasyonu hızlandırmıştır. Böylelikle mekanik özellikleri direkt olmasa da dolaylı yoldan geliştirmiştir.

2.4 Kenevir

Kenevir (Cannabis, Kanabis), Cannabaceae ailesinden olan çift çenekli, tek yıllık ve odunsu bir endüstri bitkisidir (Resim 2.1). Çok yönlü kullanıma sahip olan kenevirin mazisi, yapılan arkeolojik çalışmalara göre M.Ö. 8000 yıllarına kadar dayanır. Çeşitli yollarla tüm dünyaya yayılan kenevirin anavatanı Asya'dır (Acar ve Dönmez 2016). İnsanlık tarihi boyunca kullanılmış olan en eski lif bitkilerinden biri olan kenevir yetiştirilen ilk kültür bitkisidir. Kenevir, Sümer tabletlerinde bahsedilen dört önemli bitkiden biridir. Yetiştirimi ve kullanımı yaygın iken izlenen politikalardan dolayı bir dönem (1930'lardan sonra) yasaklanmıştır. Ancak faydaları anlaşıncaya, eksikliği

hissedilmiş ve tekrardan yetiştirilmeye başlanmıştır. Ekim alanı geniş coğrafik alana yayılmış olan kenevirin tarımı Kutuplardan Ekvator'a kadar yapılmaktadır. Rusya küresel üretimin yaklaşık %33'ünü oluşturarak, günümüzün en büyük kenevir lifi üreticisi konumundadır. Çin, İtalya, Fransa, Yugoslavya, Japonya, Peru ve Almanya gibi ülkelerde de önemli miktarlarda kenevir lifi üretimi yapılmaktadır. Türkiye'de kenevir bitkisinin yetiştirilmesi izin ile mümkün olabilmektedir. Kastamonu başta olmak üzere 19 şehirde üretimine izin verilmektedir. Son zamanlarda çiftçiler kenevir üretimine teşvik edilmektedir (Ulaş 2019, Demir ve Doğan 2020, Pappu vd. 2019).



Resim 2. 1 Kenevir Bitkisi (İnt. Kyn. 2).

Kenevirden lif üretimi tekstil, kâğıtlar, halatlar ve yelkenlere kadar değişebilen kullanımlar için yüzyıllardır yapılmaktadır. Kenevirin kullanımı o kadar eskidir ki, İncil'in ilk kopyalarında kenevirden yapılan kâğıtların kullanıldığı söylenir (Ranalli ve Venturi 2004).

2.4.1 Kenevir Bitkisinin Sınıflandırılması

Kenevir bitkisinin sınıflandırılması konusunda sık sık fikir ayrılıkları yaşanmaktadır. En kapsamlı sınıflandırma ile kenevir; Kültür keneviri, Hint keneviri, Dev kenevir, Yabani kenevir olarak dört gruba ayrılabilir (Ulaş 2019).

Kenevir bitkisi içeriğinde CBD (Cannabidiol) ve THC (Tetrahydrocannabinol) olarak adlandırılan kimyasal maddeler bulunmaktadır. Psikoaktif bir madde olan THC, uyuşturucu olarak kullanılır. Buna karşın psikoaktif olmayan CBD ise tıbbi amaçlarla kullanılabilen bir maddedir. Uyuşturucu yapımında kullanılan kenevir türünün içeriğinde %5-20 arasında THC maddesi bulunurken, endüstriyel kullanım amacı ile üretilen kenevirlerde bu oran %0,3' n altındadır. Bu yüzden uyuşturucu madde üretiminde kullanılamazlar ( nt. Kyn. 3). Dünyadaki çoğu ülke, endüstriyel amaçlarla kullanım için %0,2 eşiğini dikkate alır (Cherney ve Small 2016).  lk olarak 1976 yılında, endüstriyel kenevir ile uyuşturucu yapımında kullanılan kenevirin arasında ayırım yapmak için, Kanada ve ABD (Amerika Birleşik Devletleri) THC limitini %0,3 olarak belirlemişlerdir (Small ve Cronquist 1976). Cannabis indica (Hint keneviri) olarak bilinen kenevir türü, uyuşturucu yapımında sıklıkla kullanılmaktadır. Cannabis sativa olarak bilinen kenevir türü ise, lif üretiminde ve endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır (Acar ve Dönmez 2016).

2.4.2 Kenevir Bitkisinin  zellikleri

Kısa gün bitkisi olan kenevirin bitki boyu; türüne, yetiştirme koşullarına ve eşeyine bağlı olarak 50-300 cm aralığında değişkenlik gösterir. Kenevir, en hızlı büyüyen ve en verimli bitkilerden biridir. Yaklaşık dört ayda büyür ve böylelikle senede üç defa hasat edebilme imkânı sağlar. Kuraklığa dayanıklıdır, az sulama gerektirir. Düşük gübreleme ihtiya ı ile ekonomiktir. Düşük protein içermesi nedeniyle böcekler ve güveler tarafından yenmez. Bu özelliği sayesinde çevreye ve canlılara zararlı tarım ilacı kullanımını önlemektedir. Kenevir, güçlü ve uzun liflerle çevrili, odunsu gövdeye sahiptir. Bazı işlemlerden geçirilerek kıymık ve lif elde edilir. Tohum ve kıymık ticari değer taşımaktadır, ancak kenevirin en değerli kısımları liflerdir. Lif için yetiştirilen kenevirin kütlesinin %66,7'si

kıymık, %29'u lif ve %4,3'ü tozdur. (Valle-Zermeno vd. 2016, Arrigoni vd. 2016, Deitch 2003, Gross ve Walker 2014, Bourdot vd. 2017, Murphy ve Norton 2008).

Kenevirin erkek ve dişi bitkisi bulunmaktadır. Ekilen tohumlardan genellikle %65-70 oranında dişi bitki, %30-35 oranında erkek bitki elde edilmektedir. Üretici tohumu tarlaya saçarken seçim yapma şansına sahip değildir (Aytaç 2018). Erkek bitkiler polen üretirler ve genelde tohum elde etmek için kullanılırlar. Dişi bitkiler ise daha çok endüstriyel amaçlarla kullanılırlar. Dişi bitkiler, erkek bitkilere göre fiziksel açıdan daha büyüklüdür. Ekonomik, sağlam, verimli, dayanıklı, çevreci ve sürdürülebilir bir bitki olan kenevir, atmosferden CO₂ tutar (emer, kilitler). Oksijen üretimine de oldukça katkıda bulunan kenevirin 1 dönümü ile 25 dönümlük ormanın ürettiği kadar oksijen üretilir. Ayrıca kenevir çok iyi bir radyasyon temizleyicidir (Ulaş 2019).

Kenevir mahsulünün arazi ıslahı, toprak temizleme, ağır metallerle kirlenmiş olan araziyi iyileştirmek (fitoremediation) ve yabani otlara, zararlılara ve mantarlara karşı direnç gibi birçok çevresel faydaya sahip olduğu bilinmektedir. Kolay bir şekilde yetiştirilebilir ve kimyasal işlem uygulanmadan kullanılabilir bir bitki olan kenevirin sapından elde edilen lif mukavemeti, dayanıklılığı ve nem toleransı ile iyi bilinir (Kozlowski vd. 2004, Grundvall 2016).

Kenevir tohumları yüksek besin değerlerine sahiptirler. Kenevir tohumundan çıkarılan kenevir yağı mükemmel ve benzersiz bir yağ asidi profiline sahiptir. İnsan ve hayvan gıdası olarak kullanılabilir (Callaway 2004).

Bitkisel doğası nedeniyle, kenevir bitkisinin özelliklerinde değişkenlik olabileceği unutulmamalıdır (Evrard 2003). Buna ek olarak, Evrard, bitki sapını kenevir kıymığına dönüştürmek için kullanılan işlem türünün, parçacıkların tane büyüklüğü, artık lif oranı, ortalama lif uzunluğu, ince parçacıkların derecesi, ince parçacıkların bileşimi ve diğer organik veya mineral esaslı bileşenlerin varlığı gibi çeşitli faktörleri etkileyeceğinin belirtmektedir.

2.4.3 Kenevir Bitkisinin Kullanım Alanları

Kenevirin 25.000'den fazla ürünün elde edilmesinde kullanıldığı iddia edilmektedir. Kenevirin tohumu kozmetik endüstrisinde, ilaç makina ve boya endüstrisinde, yağ ve alkol üretiminde, gıda endüstrisinde, gıda takviyesi üretiminde kullanılır. Tohumundan elde edilen yağ ise biyo-yakıt üretiminde kullanılır. Kenevirin sapları dokuma, tekstil, kâğıt, otomotiv, inşaat sektörlerinde ve savunma sanayisinde değerlendirilir. Kenevir kullanımı ile petro-kimya ve petrol kullanımına bir alternatif üretilebilir. Ek olarak kenevir hayvancılıkta yem olarak, elektrik üretiminde, asfalt ve yol yapımında ve bunlar gibi daha birçok alanda kullanılır (U.S. Congressional Research Service 2019, Demir ve Doğan 2020).

Kenevir liflerinin katma değeri yüksek olan ürünlerin üretiminde tercih edilme sebepleri arasında; yüksek mukavemet, iyi elektrostatik özellikler, nem çekme özelliği, anti-alerjik özelliği, nefes alabilmesi, UV koruma, anti-bakteriyel özelliği sayılabilir (Ebskamp 2002, Gedik vd. 2010, Şahinbaşkan 2019). Kenevir lifleri oldukça sağlıklıdır. Kenevirin sapları ve lifleri, çevre dostu malzeme sınıfında yer alırlar. Çevre dostu olma özelliği ile kenevir, jeo-tekstil ürünleri, yalıtım malzemeleri ve endüstriyel ürünler (kâğıt gibi) için tamamen yenilenebilen bir kaynak olmaktadır (Göre ve Kurt 2021).

2.4.4 Kenevir Bitkisinin İnşaat Sektöründe Kullanımı

Kenevir ile yapılan inşaat ürünleri mimarların, geliştiricilerin, yüklenicilerin ve müşterilerin takdir edeceği; sürdürülebilirlik, ekonomiklik, konfor ve sağlık nitelikleri ile birlikte kolay uygulama, dayanıklılık ve estetik performans özellikleri sunar (İnt. Kyn. 5). Kenevir lifleri, yapı malzemelerini güçlendirmek için, bin yıldan uzun süredir kullanılmaktadır (Rashid vd. 2017). Kenevir kıymıkları ilk olarak 1990'ların başlarında Fransa'da betonu hafifletmek için tanıtıldı (Evrard 2006).

Yapılarda kenevir gibi düşük karbonlu malzemelerin kullanılması, ilk olarak, yalıtım seviyesini ve ses emilimini artırır. İkincil olarak ise, bu doğal malzeme hafif, düşük yoğunluklu (birim hacim ağırlıklı) bir agrega kullanımını sağladığı için bina yapısının

ağırlığını azaltır. Bu özelliklerinden dolayı Avrupa’da özellikle Fransa’da kenevir, keten, bambu ve ayçiçeği gibi biyo-agregaların inşaat sektöründe kullanımı artmaktadır (Amziane ve Arnaud 2013). Yalıtım ve termal özellikleri yüksek olmasından ötürü kenevir gibi bitki bazlı malzemeler, yapısal olmayan beton karışımlarında agrega olarak sıklıkla kullanılabilir (Delannoy vd. 2018).

İnşaatla biyo-bazlı malzemelerin kullanımı; enerji tüketimini azaltmakta ve aynı zamanda ek çevre kirliliğine neden olmadan enerji verimliliğini sağlamaktadır, bina ısıtma ve iklimlendirmesi için gerekli olan enerji tüketimini azaltmaktadır, kullanılan ekipmanları aşındırmamaktadır, nispeten düşük maliyet sağlamaktadır, üretilen yapı malzemelerinde yüksek dayanım ve dayanıklılık sağlamaktadır (Amziane ve Arnaud 2013, Bourhaneddine vd. 2017, Ku ve Wang 2011, Mansor vd. 2018). Biyo-agrega çeşitlerinden biri kenevirdir. Kenevir bazlı malzemeler geleneksel malzemelere göre çevre dostu binalar inşa etmek için oldukça avantajlı malzemelerdir. Kenevir tarafından ömrü boyunca emilen CO₂ miktarı, kenevirin hasatı, nakliyesi ve inşaat aşaması sırasında ortaya çıkan CO₂’den fazladır. Bu da kenevir ürünlerini karbon-negatif bir malzeme yapmaktadır (Collet vd. 2009, Boutin ve Flamin 2005).

Kenevir kıymıkları (Resim 2.2 (a)) uygulama ve karışımda kullanılmadan önce doğru şekilde hazırlanmalıdır. Öncelikle, kenevir bitkileri birkaç hafta tarladan geçirilmelidir. Retting, sak liflerini birbirine bağlayan pektinöz maddelerin ayrışması ve bozunma sürecidir. Bu işlem, mikroorganizmaların toprakta ve gövdelerde hareket etmesiyle gerçekleşir. Bu işlem liflerin, bitkinin odunsu çekirdeğinden ayrılmasını kolaylaştırmak ve basitleştirmek için gereklidir. Daha sonra bu ayrılmış odunsu çubuklar kırılır ve küçük parçalar halinde öğütülür, bunlara boyutlarına göre kıymık ya da lif adı verilir. Uygulanan bu işlemlerin ardından elde edilen kenevir ürünleri, kenevir betonda (hempcrete) kullanılmak için hazır hale gelmiş olur (Protchenko 2019).

Düşük yoğunluklu (birim hacim ağırlıklı) kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan kenevir lifinin malzemeye dayanım ve dayanıklılık sağladığı bilinmektedir (Vantreesse 2002, Santos 2008, Spoljaric vd. 2009). Çevresel etkilere karşı dayanıklı oluşu, düşük ısı iletim katsayısı ve düşük biyolojik bozunabilirlik özellikleri sayesinde daha uzun süre

kullanılabilir. Optik Mikroskop görüntüsü Resim 2.2 (b) ile verilen kenevir lifi, ısı yalıtım malzemesi olarak -özellikle diğer bitkisel liflerden- yüksek performans gösterir (Kymäläinen ve Sjöberg 2008). Kenevir lifleri ses geçirmez özellikte olduğu için ses yalıtımı istenen yerlerde kullanılabilir. Bu üstün özellikleri sayesinde kenevir lifleri, inşaat sektöründe yalıtım malzemesi olarak tercih edilir. Yalıtım malzemesi kullanımı otomatik olarak yakıt tüketimini azaltmaya yardımcı olur. Yalıtım malzemesi olarak kullanımının dışında kenevir liflerinden tuğla, sunta, hafif ve oldukça sağlam olan tahtalar üretilir. Ayrıca kenevir lifleri sıvalardaki büzülmeyle azaltmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Sağladığı yalıtım ve higroskopik avantajlarına karşın kenevirin yüksek su emme dezavantajı bulunmaktadır. Gözenekli yapısı ve güçlü kapilarite etkisi, kendi ağırlığının beş katı kadar su emmesine yol açabilir (Seng vd. 2019, Faurre vd. 2012). Bir malzemenin içeriğinde yüksek nem tutma kapasitesine sahip malzemelerin olması, bu malzemenin higrotermal davranışını iyileştirmeye yardımcı olur ve nihai yapının çevresel faydalarını artırır (Nguyen vd. 2017). Kenevir de genel olarak yüksek nem tutma kapasitesine sahip bir malzemedir.



Resim 2. 2 Kenevir Lifi (İnt. Kyn. 4) (a) ve Optik Mikroskop Görüntüsü (b).

Düşük birim hacim ağırlığı, yüksek mukavemeti ve dayanıklılığının yanı sıra kenevir liflerinin nispeten düşük maliyetli olması, yenilenebilir kaynaklardan olması ve atıklarının biyolojik olarak %100 parçalanabilir olması nedeniyle inşaat sektöründe avantajlı bir malzeme olduğu garanti edilmektedir. Bununla birlikte, kenevir liflerinin

başlıca dezavantajları arasında; bazı özelliklerinde görülen değişkenlikler, sentetik liflere göre daha düşük olan mekanik özellikleri ve anizotropik yapısı sayılabilir (Khan vd. 2018). Bu özellikler büyüme koşulları, olgunluk dereceleri ve hasat yöntemleri gibi birçok parametreye bağlıdır (Mochane vd. 2019). Her zaman aynı özelliği göstermedikleri için, standartize etmek mümkün değildir. Ayrıca biyolojik bozunabilirlik sorunu uzun süreli kullanım uygulamaları için araştırılması gereken bir konudur. Ele alınması gereken bir başka konu ise; kenevir kullanılarak üretilen kompozit yapı malzemelerin nihai özelliklerinin tekrar elde edilebilirliğidir (Manania vd. 2019). Endüstriyel kenevirin uygulama alanlarını arttırmak ve istenen özelliklerini geliştirmek için çok daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç vardır.

Kenevirin inşaat sektöründe kullanımı ile ilgili en çok ilgi çeken malzemelerin başında kenevir beton (hempcrete) gelmektedir. Kenevir kullanılarak üretilen beton duvar blokları herhangi bir inşaat işinde, bölme ve dış cephe için, yük taşıyıcı olmayan elemanlar olarak kullanılır. Duvarların termal özellikleri geliştirilir ise klima talebi azalır, yakıt talebi ve tüketimi azalarak tasarruf sağlanmış olur. Kenevirin duvar bloklarına eklenmesi ile gelişmiş yalıtım özelliklerine sahip hafif duvar blokları üretilmiş olur (Manohari vd. 2016). Kenevir beton, yangına en dayanıklı biyo-bazlı yalıtım malzemelerinden biridir (Motori vd. 2012).

2.4.5 Kenevir Beton (Hempcrete)

Kenevir beton; kenevir kıymıkları, su ve bağlayıcı malzemeden elde edilen kompozit bir malzeme olarak tanımlanan, 1980'lerden bu yana en çok kullanılan biyo-agrega bazlı yapı malzemelerinden biridir (Dartois vd. 2017).

Kenevirden yapılmış beton ile ilgili yapılan araştırmalar, inşaat alanında çevreci ve sürdürülebilir kalkınma politikasının bir parçasıdır. Kenevir beton yenilenebilir kaynaklara dayalı, iyi teknik özelliklere sahip olan bir malzemedir. Kenevirin beton duvar bloklarında kullanılması, agregaların azaltılmasına ve doğal kaynakların korunmasına katkı sağlar. Kenevir beton gibi biyo-bazlı malzemelerin kullanımı, sürdürülebilir kalkınmanın gereksinimlerini karşılamak için çözümler sunmaya izin verir. Ayrıca

endüstriyel kenevir kullanımı için yeni ve geniş bir pazara katkıda bulunur (Awwad vd. 2013, Bennai vd. 2019).

Yapı malzemesi endüstrisi en büyük CO₂ üreticilerinden biri olduğundan, negatif CO₂ üretim değerine sahip olan, yani CO₂ emici yeni malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir. Kenevir betonu (Hempcrete), negatif CO₂ emisyon değerine ve düşük ısı iletkenliğine sahip olduğu için aranan çözümlerden biri olabilmektedir. Kenevir beton ve kireç içerikli bir bağlayıcı ile yapılan evler üç şekilde karbon negatif özellik gösterir; ahşap çerçeve kullanılması, kenevir kullanılması ve bağlayıcıda kullanılan kirecin karbonatlaşması için havadan CO₂ (karbondioksit) kapması. Ayrıca kullanımı tercih edilmeyen malzemelerin üretiminde açığa çıkacak olan CO₂ de engellenmiş olur. Kenevir beton karışımı karbonatlaşma adı verilen süreçte atmosferden karbondioksiti (CO₂) emmeye ve depolamaya devam eder. Bu, duvarın binanın bir karbon tutma bileşeni olarak ayrıcalığını arttırmakta ve sürdürülebilir özelliklerine katkıda bulunmaktadır.

Karbon ayak izini azaltmayı sağlayan kenevir betonun üretiminde kullanılan her 1 ton kenevir kıymığı (lifi) için yaklaşık 1,8 ton CO₂ tutulur ve 1 m³ kenevir beton üretmek için yaklaşık 1000 litre kenevir kıymığı (lifi) kullanımı gerekmektedir. Bu bağlamda 1 m³ kenevir beton duvarında yaklaşık olarak 180 kg CO₂ tutulduğu söylenebilmektedir. Kenevir beton duvar üretiminde kullanılan diğer malzemelerin üretimi aşamasında ortaya çıkan CO₂ ve kirecin karbonatlaşması göz önüne alındığında, bir m³ kenevir betonun 18 kg CO₂ tuttuğu söylenebilmektedir (Demir ve Doğan 2020). Kenevir beton son yıllarda daha çok tanınmasına ve popülerlik kazanmasına rağmen, hala küresel CO₂ (karbondioksit) emisyonlarının azalmasına önemli ölçüde katkıda bulunabilecek miktarlarda kullanılmamaktadır. Bunun nedenlerinden biri, kenevir betonun düşük mekanik mukavemetidir, bu da sadece düşük katlı binalarda, uygun destekleyici bir taşıyıcı çerçeve ile kullanılabildiği anlamına gelmektedir.

Kenevir beton bina sisteminin kullanımının kesin tarihi bilinmemektedir (Allin 2005). Kenevir beton kullanımı, 1950'lerde ve 1960'larda ahşap çerçeveli binalarda yapılan restorasyonların çimento ile yapıldığında felaket sonuçlara yol açtığı görülmesi sonucu orijinal malzemelerin taklit edilmesi gerekliliğinden kaynaklandı. Kenevir betonun doğal

esneklik ve buhar geçirgenliği özellikleri ile orijinal yapı malzemelerini tamamladığı bulunmuştur. İnşaat sektöründe kenevir betonun, orijinal dolgu malzemelerinden daha tutarlı davranış sergilediği kabul edilmektedir (Hirst 2013). Kenevir beton kullanımının ilk örneği 1986'da Fransa'da Nogent-sur-Seine'deki Maison de la Turque'nin, yenilikçi biri olan Charles Rasetti tarafından yenilenmesi ile oldu (Ceyte 2008). Allin (2012) kenevirden yapılmış ilk yeni yapının 1989 yılında Tours (Fransa) yakınlarında inşa edildiğini bildirmiştir. O zamandan beri Fransa'nın her yerinde yüzlerce kenevir beton ev inşa edildi. Büyük Britanya ise bu yeni sayılabilecek ürünün en hızlı yayıldığı ikinci ülkedir (Gołębiewski 2018).

Kenevir beton; Yerinde döküm, Sprey betonu, Blok üretim ve Prefabrikasyon üretim yöntemleri ile uygulanabilir. Yerinde döküm yöntemi en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Prefabrik kenevir beton bloklarının üretimi ve kullanımı ise son birkaç yılda artış göstermiştir. Prefabrik kenevir beton blokları (Resim 2.3) uygulaması en hızlı olan üretim yöntemi olarak düşünülebilir. İlk olarak, kenevir beton karışımı üretim fabrikasında özel köpüklere veya kalıplara dökülür ve bir süre kurumaya bırakılır. Bloklar kullanıma hazır olduğunda, kullanılacağı şantiyeye taşınır ve taşıyıcı çerçeveye monte edilir (Protchenko 2019). Bir bina güçlendirme veya restorasyon yaparken, ısı yalıtımını arttırmak için dış veya iç duvarlarda kenevir beton blokları kullanmak mümkündür. Dikdörtgen şekilli blokların montajı, diğer duvar yapılarında olduğu gibi kademeli ve kilitli birleşim yerlerine ihtiyaç duyar. Ayrıca, karışıma bitkisel bir bileşen eklendiğinden, bloklar nemden ve yükselen sudan korunmalıdır. Bu nedenle, duvar ve zemin arasındaki bağlantılar, kılcal boşluklardan su yükselmesinin ve duvar tabanındaki su temasını önlemek için tasarlanmalıdır. Aynı nedenle, kenevir beton blokları zemin seviyesinin üzerinde monte edilmelidir. Dış duvarlar, kenevir kıymıklarının çürümesini önlemek için kum ve kireç sıvaları ile yağmurdan korunmalıdır (Arrigoni vd. 2017).



Resim 2. 3 Kenevir Beton Blokları (İnt. Kyn. 6).

Püskürtme yöntemi yaygın sayılabilecek kullanıma ve birçok avantaja sahiptir. Yerinde yapılan uygulamalarda özel beton püskürtme makinesi kullanılır. Kenevir beton uygulanmadan önce, yük taşıyıcı bir çerçeve inşa edilmelidir. Daha sonra bu çerçeveye bir taraftan kontrplak levha yapıştırılır. Böyle bir kalıp oluşturulduktan sonra kenevir beton püskürtülür. Bu işlemde kenevir beton karışımı püskürtülünce kontrplak duvara yapışır ve kuruması için bırakılır. Kenevir betonun bu şekilde uygulanması inşaat süresini büyük ölçüde kısaltır ve insan gücünden (karıştırmak ve uygulamak için gerekli olan) tasarruf sağlar (Protchenko 2019). Püskürtme yöntemi (Sprey yöntemi) hızlı bir yöntemdir. Kısa kuruma süresi ve daha düşük birim hacim ağırlığı ile çalışma imkânı sağlar. Allin (2012)'e göre en gelişmiş kenevir beton üretim yöntemi püskürtme yöntemidir.

Sıkıştırma yöntemi ise, kenevir beton dökmenin en klasik ve basit yoludur. Bir kenevir beton bloğun istenen boyutuna göre ahşap kalıp yapılmalıdır. Daha sonra karışım hazırlanır ve elle dökülerek dikkatlice sıkıştırılır. Bu yöntem kenevir betonun en iyi ve en etkili özelliklerine ulaşmasını sağlar. Büyük hava boşluklarından kaçmak ve nihai ürünün performansını arttırmak için malzemenin elle dökülmesi sayesinde malzemeyi kalıba eşit dağıtmak mümkündür (Protchenko 2019). Bu yöntem için gerekli olan uzun kuruma süresi ise bir dezavantaj teşkil etmektedir.

Kenevir betonun inşaatta sağladığı avantajlar;

- Düşük ağırlık (birim hacim ağırlık, yoğunluk)
- Kesiti azalan bina elemanları sayesinde ekonomiklik
- Düşük karbon ayak izi
- Basit inşaat uygulaması
- Nefes alabilen yapı
- Termal ve akustik yalıtkanlık
- Ses emme özelliği
- Atık azaltma ile çevreci tutum
- Yangına karşı dayanıklılık
- İyi higrotermal özellikler
- Böceklerle ve kemirgenlere karşı dayanıklılık
- Toksik olmama özelliği
- Geri dönüştürülebilirlik (Yenilenebilirlik)
- Uzun ömürlü yapı
- Küf oluşumunu engelleyebilme
- Tuz maruziyetine ve mikrobiyal saldırı nedeniyle oluşacak biyolojik bozunmaya karşı direnç
- Donma-Çözünme direnci
- Nem tutma özelliği
- CO₂ tutabilme özelliği
- Zaman içerisinde bozulmama özelliği
- Enerji tüketimini azaltma (%15'e kadar)
- Sürdürülebilirlik
- Ortamın havasını düzenleyebilmesi ile konforu arttırması
- Dayanıklılık
- Estetik görünüm

Kenevir beton duvarlar, zeminler ve çatılarda kullanılabilir. Kenevir beton, dış ve iç duvarların yanı sıra döşeme veya çatı yalıtımı oluşturmak için de kullanılabilir (Bedliva ve Isaacs 2014, Magwood 2016). Kenevir betonun uygun karışım oranları binada

kullanım yerine göre farklılık göstermektedir. Çatı yalıtımında kıymıkların birbirine kenetlenmesi için az miktarda bağlayıcı kullanılır. Duvarda daha yüksek termal ve mekanik özellikler beklenirken, zemin yalıtımında ise en yüksek mekanik özellikleri elde edebilmek için yüksek oranda bağlayıcı kullanılır (Colinart vd. 2012).

Kenevir beton, iyi bir termal performansın yanı sıra sağlıklı bir iç mekân iklimi sağlamak için termal ve higroskopik özelliklerin bir kombinasyonunu kullanan buhar geçirgen veya “nefes alabilen” bir yapı malzemesi örneğidir (Ahlberg vd. 2014).

Kenevir betonun malzeme özellikleri çeşitli faktörlere bağlıdır: yoğunluk (birim hacim ağırlık), bağlayıcı tipi, bağlayıcı/kenevir oranı, karışım suyu, kenevir özellikleri, üretim yöntemi, kür koşulları ve yaş. Bağlayıcı tipi, kenevir betonun özelliklerini ve mikro yapısını etkiler. Hidrolik özelliği yüksek olan bağlayıcı kullanımı basınç dayanımını artırır ve kılcal etkiyi azaltır. Kireç ve çimento+kireç harçlarında olduğu gibi, bu muhtemelen hidratların varlığından kaynaklanmaktadır (Walker ve Pavia 2012).

Yapılan deneysel çalışmalarda karışım oranlarına bağlı olarak kenevir betonun yoğunluğu (birim hacim ağırlığı) 300-600 kg/m³ olarak elde edilmiştir. Manohari ve arkadaşlarının (2016) yaptığı çalışmada ise kenevir beton blokların ortalama yoğunluğu 817 kg/m³ olarak bulunmuştur. Sudan daha az yoğunluğa sahip olan kenevir beton blokların yüzebildiği görülmüştür. Aynı çalışmada yoğunluğun numunenin su içeriğinden etkilendiği de bildirildi. Gözeneklilik oranı minimum %65 olarak elde edilen kenevir betonun sıcaklığı 23°C ve bağıl nem oranı %50 iken termal iletkenliği 0,07-0,2 W/mK olarak bulunmuştur (Allin 2005, Collet 2004, Cerezo 2005). 200-840 kg/m³ arasındaki kuru birim hacim ağırlıklı kenevir betonun ısı iletkenlik değerleri 0,06-0,19 W/mK arasında bulunmuştur (Arnaud 2000, Cerezo 2005).

Kenevir kompozitlerinde yapıştırıcı olarak çeşitli bağlayıcılar kullanılabilir. Bazı yaygın bağlayıcılar; Portland çimentosu ve kireç, hatta daha spesifik olarak sönmüş kireç (Ca(OH)₂)’dir (Komsı 2018). Kireç etkisi sayesinde, kenevir yavaş yavaş mineralleşir, inert hale gelir, çürüme ve küf oluşumu risklerini azaltır (Evrard 2005). Bağlayıcı olarak kireç kullanılarak üretilen kenevir betonu, kireç içeriği nedeniyle, birkaç yıl içerisinde

karbonatlaşma meydana gelerek kireçtaşı oluşturmaları sayesinde yapı matrisindeki yapıya ve mikro boyuttaki bağlara dayanım verir. Yıllar içindeki bu mukavemet artışı, zamanla artacak olan dayanıklılığın göstergesidir (Jami vd. 2018).

Esnek kenevir ve daha sert bir bağlayıcıdan oluşan hempcrete (kenevir beton), stres altında yüksek deformasyon veya kırılma göstermemesi ve yüksek sünekliği nedeniyle diğer yapı malzemelerinden farklı kırılma davranışını gösteren bir yapıdır (Arnaud ve Amziane 2013). Geleneksel beton ani kırılma davranışını gösteren bir yapıdır. Kenevir beton ise bunun aksine yarı sünek davranış gösterir. Kenevir beton yarı sünek davranışını nedeniyle, yapısal özelliklerini çok fazla etkilemeden aynı formda yeniden kullanılabilir (Manohari vd. 2016).

Kenevir betonun termal ve akustik özellikler gibi bazı mükemmel özelliklere sahip olduğu kanıtlanırsa da basınç dayanımı gibi zayıf mekanik özelliklere sahiptir (Chabannes vd. 2017). Geleneksel malzemeler ile karşılaştırıldığında kenevir betonun elastisite modülü ve basınç dayanımı gibi mekanik özellikleri, normal beton karışımlarından daha düşüktür. Kenevir betonu için eksenel basınç dayanımı için elde edilen değerler yaklaşık 0,2-0,9 MPa arasındadır ve elastisite modülü için elde edilen değerler ise 12,65-49,40 MPa aralığındadır (Tronet vd. 2016, de Bruijn vd. 2008). Kenevir betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek ve dayanımını etkileyen parametreleri incelemek için çeşitli araştırma projeleri yürütülmüştür.

Jami ve arkadaşları (2018)'na göre Kenevir betonun (Hempcrete) basınç dayanımı 0,2-6,94 MPa arasında değişebilir veya daha da yüksek olabilir. Basınç dayanımı birkaç farklı faktöre bağlı olabilir. Çoğunlukla, bileşenlerin karıştırma oranları ve karıştırma yöntemleri ile ilgilidir. Kenevir betonun basınç dayanımı; kenevir parçacıklarına, bağlayıcı içeriğine, kimyasal bileşime, kurutma koşullarına, karıştırmaya ve uygulama yöntemine bağlıdır. Bu parametrelerden birinin değişmesi ile basınç dayanımında bir değişiklik görülecektir. Kenevir betonun mekanik özellikleri, kenevir liflerinin eklenmesi ve karışımdaki bağlayıcı madde oranının artırılmasıyla geliştirilebilir (Gregor 2014). Sertleşme aşamasında meydana gelen reaksiyonlar nedeniyle hidratların artmasıyla, maksimum basınç dayanımına ulaşılması aylar, hatta yıllar alabilir. Bununla birlikte,

basınç dayanımının artışıyla, bileşenlerin oranına bağlı olan akustik, termal ve diğer özellikler de etkilenecektir.

Bouloc (2006)'a göre kenevir betonun düşük basınç dayanımı muhtemelen agregaların (kenevir ürünleri) yüksek esnekliğinden ve bu parçacıkların kusurlu yerleşmesinden kaynaklanmaktadır.

Bileşenlerin yoğunluğu ve malzemenin sıkıştırılması malzemenin mukavemetinde önemli bir rol oynar. Basınç dayanımını arttırmaya yönelik çalışmaların en büyük dezavantajı yoğunluğun artması ile malzeme ağırlığının artmasıdır. Nguyen ve arkadaşları (2009), kenevir parçacığının hacminin %60'ının havadan oluştuğunu bildirmişlerdir. 2010'da yaptıkları çalışmada ise, kenevir betonun sıkıştırma etkisi altında değişen mekanik ve fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Taze haldeki beton harcının sıkıştırılmasının, malzeme içindeki boşlukların hacmini azaltarak kenevir betonun basınç dayanımını önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir. Ancak akustik ve termal iletkenlik de artmıştır. Sıkıştırma işlemi, üretilen malzemenin mekanik mukavemetini önemli ölçüde arttırabilir. Sıkıştırma yoğunluğu arttırıldıkça, karışım daha tutarlı, masif ve yoğun hale gelir. Araştırmalar, herhangi bir sıkıştırma yapılmadan imal edilen kenevir beton yapılarının, sıkıştırılmış olanlara göre daha düşük elastisite ve stabiliteye sahip olduğunu göstermiştir (Jami vd. 2018).

Kenevir beton yük taşımayan bir malzemedir. Doğası gereği yapının yüküne karşı direnmesi ve dayanması zordur. Çerçeve gibi yükü taşıyan, destekleyici bir yapıya sahip olması gerekir (Protchenko 2019). Hatta Cerezo (2005)'nin yaptığı açıklamaya göre; Kenevir beton esas olarak, yük taşıyan bir ahşap çerçeve ile birlikte termal ve akustik yalıtımı sağlamak için, geleneksel malzeme ile yapılmış bir yük taşıyıcı duvarın üzerine ek katman olarak kullanılmaktadır. Bileşimine bağlı olarak, zeminlerde ve çatılarda kullanılabilir.

Kenevir beton ortam hava kalitesini arttıran özellikte bir malzemedir, yüksek nem transfer ve depolama kapasitesine sahiptir ve bu nedenle mükemmel (veya neredeyse mükemmel) nem düzenleyicidir. Tran-le vd. (2019), kenevir betonun doğal olarak higroskopik

olduğunu, çünkü iç mekânların bağıl nemini kabul edilebilir konfor aralığında tutmak için, hava koşullarına bağlı olarak, su buharını serbest bıraktığını ve emdiğini bildirmişlerdir. Kenevir beton duvarlar bir binanın iç mekândaki higrotermal performansını arttırabilmektedirler. Dhakal vd. (2017) kenevir betonun yüksek termal ataleti sayesinde kısa sürede ısındığını ve ortam sıcaklığı değiştiğinde, sıcaklığını uzun süre koruduğunu bildirmiştir. Bu malzeme, ısı iletimini ve böylelikle de kışın ısı kayıplarını azaltan ve yazın ısı dalgalarından koruyan düşük ısı iletkenliğine sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı kenevir betonu; yalıtım, enerji verimliliği, yalıtım kapasitesi ve yeşil malzeme özelliklerinin iyi bir kombinasyonu olarak düşünülebilir (Collet 2004, Cerezo 2005, Evrard 2008).

İletkenlik kenevir kompozitlerinin termal özellikleri ile ilgili birçok çalışmanın odak noktasıdır. İletkenlik, yoğunluk ile doğrusal bir şekilde artar. Yoğunluğun artmasıyla ısı transferi ara yüzü daha sıkı, daha bağlı hale geldiği için ısı transferi kolaylaşır. Gözenekler içerisinde hapsolan nem, kenevir betona termal kütle kazandırır (Latif vd. 2015). Düşük yoğunluğa sahip karışımlar ($220-275 \text{ kg/m}^3$) için iletkenlik değeri $0,05-0,06 \text{ W/mK}$ arasında ve daha yüksek yoğunluklu karışımlar ($450-550 \text{ kg/m}^3$) için iletkenlik değeri ise $0,11-0,16 \text{ W/mK}$ arasında değişkenlik göstermektedir. Aynı zamanda, nem içeriği ve kenevir betonun bileşimi de iletkenliği etkileyen parametreler arasında yer almaktadır (Collet ve Pretot 2014). Nem içeriği suyun daha yüksek iletkenliği nedeniyle kompozitin termal iletkenliğini arttırmaktadır (Maalouf 2011). Ayrıca termal iletkenlik, kullanılan bağlayıcı tipine göre de değişir. Kireç bazlı bağlayıcılar, daha düşük yoğunluk sağlaması sayesinde daha düşük iletkenlik değerleri gösterirler (Walker ve Pavia 2014).

Kenevir beton mikro boyutlu, %60-90 aralığında hava boşluğu içeriği ile karakterize edilir (Glé 2013). Bu gözeneklilik durumu aşağıdaki gibi ayrılır;

- Betondaki kenevir parçacıklarının kusurlu konumlanması nedeniyle oluşan makro gözenekler (birkaç mm çapında)
- Kenevir kıymıkları ve bağlayıcı içinde oluşan mezoporlar ($0,01-0,1 \text{ mm}$ çapında)
- Bağlayıcı matriste, hidratlar arasındaki mikro gözenekler ($0,01 \text{ }\mu\text{m}$ 'den küçük)

Açık gözeneklilik yüksek geçirgenlik ve akustik emilim sağlar (Glé vd. 2011). Kenevir liflerinin su emme etkileri yüksek açık gözenekliliğin bir sonucu olarak ele alınır ve kenevir betonun higrik dinamikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu bilinmektedir (Evrard 2003). Kenevir beton karmaşık bir mikro yapıya sahip, heterojenik ve anizotropiktir. Bağlayıcı ve kenevir kıymıkları, farklı koşullarda farklı davranışlar sergiler (Bennai vd. 2016).

Kinnane vd. (2016), kenevir betonun geleneksel betondan daha iyi ses emme özelliklerine sahip olduğunu, gözeneklilik oranı ve yoğunluk (birim hacim ağırlık) gibi fiziksel parametrelerin akustik emilimi etkilemediğini bildirmişlerdir. Ek olarak, kirecin bağlayıcı olarak tercih edildiği kenevir betonun, portland çimentosu kullanılarak üretilen kenevir betondan daha iyi akustik emilime sahip olduğunu da bulmuşlardır.

Kenevir/bağlayıcı oranı, Kenevir betonun kalitesinde ve ses emilim miktarında son derece önemli bir rol oynamaktadır. Parabesh KC (2016) tarafından yapılan çalışmada farklı maddelerin ses azaltma (emilim) miktarları kıyaslanmıştır. En iyi ses yalıtımı performansı, farklı türden kenevir parçalarının karıştırıldığı kenevir beton bloğu ile elde edilmiştir. Bu yöntem sayesinde ses emme yeteneklerini malzemenin mekanik özelliklerini etkilemeden artırma imkânı sağlanabilmektedir. Ancak yine de daha detaylı inceleme ve araştırmalar hala gereklidir. Parabesh KC (2016) tarafından kenevir beton bloğu ile inşa edilen duvarın ses testlerinde elde edildiği ve hesaplandığı üzere; gürültü düzeyi kaybı 46 dB, siren gibi yüksek frekanslı seslerin kaybı 44 dB, trafik gibi düşük frekanslı seslerin kaybı ise 39 dB bulunmuştur.

Sağladığı yalıtım ve higroskopik avantajlarına karşın kenevir betonun, yüksek su emme dezavantajı bulunmaktadır. Gözenekli yapısı ve güçlü kapilarite etkisi kendi ağırlığının 5 katı kadar su emmeye yol açmaktadır. Bu durumu önlemek için karışımda kullanılan aşırı su, uygun olmayacak şekilde kuruma ve sertleşme süresini uzatmaktadır. Bağlayıcı olarak kirecin tercih edildiği kenevir betonda, kirecin sönmesi için daha fazla miktarda su kullanılması kuruma ve sertleşme süresini birkaç aya kadar uzatabilmektedir. Ayrıca, kenevir kıymığı ve çimento hamuru arasında su alışverişi olduğu göz önüne alındığında

karışım suyunu idealleştirmek mümkün değildir. Ancak deneme-yanılma yolu ile ideal su miktarına ulaşılabilir (Seng vd. 2019, Faure vd. 2012).

Kenevir betonun en önemli özelliklerinden biri, yeniden kullanılabilme yeteneğidir. Fiziksel yetenekleri ve içeriğindeki ana malzemelerinin özellikleri nedeniyle, kenevir beton yeniden karıştırılabilir, başka herhangi bir karışımda yeniden kullanılabilir. Kenevir betonun kırılması çok kolay olduğundan, eski yapılar yıkılabilir veya sökülebilir. Bu adımlardan sonra eski beton yeniden karıştırılarak yeni bir agrega eklenebilir ve böylelikle yeni bir karışım elde edilebilir (Protchenko 2019).

İngiltere'deki BRE Group (British Research Establishment) tarafından, BS EN 1365-1:1999'a uygun olarak 3x3 m² boyutlu kenevir beton (hemcrete) duvarın kullanıldığı çeşitli araştırmalar ve yangın testleri yapılmıştır. Duvar yangına maruz bırakılmıştır ve 73 dakika boyunca direndiği gözlemlenmiştir (Sparrow ve Stanwix 2014). Başka bir test Fransa'da, Centre Techniques du Bois et de l'Ameublement tarafından yapılmıştır. Çalışma sonucunda M1 olarak sınıflandırılan bloklar M0 sınıfına yükseltilmiştir. Bu sınıflarda yer alan malzemeler “yanıcı olmayan malzeme” olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca çalışmada malzemenin toksik ve yanıcı dumanlar yaymadığı da gözlemlenmiştir. (Daly vd. 2009).

Kenevir betonun fiziksel özellikleri; düşük termal ve akustik iletkenlik, orta-düşük yoğunluk, yüksek özgül ısı, nem seviyesini düzenleme ve ani ısı değişimlerini engelleyerek bina konforu sağlayan termal kütledir. Isı köprüsü oluşmaması ve hava sızdırmazlığı sayesinde ısı kayıplarını önler. Malzemeye buhar geçirgenliği sağlayan higroskopik özelliği sayesinde bina içerisindeki nemin iklimlendirme konforunda olmasını sağlar (Walker ve Pavia 2014, Shea vd. 2012, Evrard 2006).

Bileşen miktarları, bağlayıcı, kenevir kalitesi ve uzunluğu, kullanılan kenevir oranı, üretim yöntemi gibi özellikler kenevir betonun mekanik, termal ve akustik özellikler de dahil olmak üzere, genel performansını önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle, farklı işlevlere sahip, farklı termal ve mekanik yükler altında olan yapı elemanları için farklı bileşenlerde kenevir beton üretilebilmektedir. Örneğin çatı ve duvarlar için daha yüksek termal yalıtım

özellikleri arzu edilirken, zeminler için daha yüksek mukavemet ve akustik yalıtım özellikleri gerekmektedir. Çatı, duvar ve zemin için yoğunluğunun (birim hacim ağırlığın) yüksek olması gerekmektedir. İç ve dış sıvalarda kullanılması için ise, birim hacim ağırlığı düşük olmalıdır (Magwood 2016, Arrigoni vd. 2017).

Amziane ve Arnaud (2013) düşük doz bağlayıcı ile üretilen kenevir betonun çok zayıf mekanik özellikler gösterdiğini ve deformasyonun çok yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Yüksek dozda bağlayıcı ile üretilen kenevir betonun mekanik performansının, bağlayıcının performansı ile doğru orantılı olarak arttığını da bildirmişlerdir.

Kenevir betonun basınç dayanımını arttırmanın farklı yolları vardır. Bu yollar; bağlayıcıların farklı karışımlarını kullanmak, uygun puzolanlar veya katkı maddeleri eklemek olarak ifade edilebilir. Betonda yaygın olarak kullanılan puzolanlar uçucu kül ve silis dumanıdır. Betonun mekanik mukavemetinin artışına katkıda bulunurlar (Almgren vd. 2007). Arnaud ve Gourlay (2012) kür koşullarının, kullanılan suyun, kenevir boyutlarının da kenevir betonun basınç dayanımını etkilediğini bulmuştur. Bu parametreleri göz önüne alan Arnaud ve Gourlay (2012), 21 günden 1 yıla kadar belirli aralıklarda ölçüm yaparak 0,35-0,85 MPa arasında basınç dayanımı değerleri elde etmişlerdir.

Üretim sürecinde sıkıştırma işlemi uygulamak, kenevir betonun maksimum basınç dayanımını arttırabilmektedir. Nguyen vd. (2017) kenevir betonda sıkıştırma işleminin bir taraftan dayanımın artmasına izin verdiğini, diğer taraftan ise hava hacminin azalmasına bağlı olarak termal yalıtkanlığın azaldığını vurgulamışlardır.

Awwad ve arkadaşları tarafından (2010, 2011, 2012) yapılan araştırmalarda beton karışımlarına dahil edilen kenevir liflerinin davranışı incelenmiştir. Esneklik, çökme, termal özellikler, sıkıştırma, dayanım gibi özellikler üzerine deneyler yapılmıştır. Kenevir liflerinin varlığı malzemenin mukavemet, işlenebilirlik ve iletkenlik gibi özelliklerini etkilemiştir. Kenevir liflerinin eklenmesi ve agrega azaltılması ile basınç dayanımı azalmıştır. Eğilme dayanımı performansında ise daha az etkili olmuştur. Eğilme dayanımı önemli ölçüde azalmamıştır ve numuneler kırılma olmayan plastik kırılma

davranışı sergilemiştir. Kenevir liflerinin kullanımı ile malzemenin termal iletkenliği de azalmıştır, yani daha iyi yalıtım özelliği göstermiştir. Bu durum klima talebinin azalmasını mümkün kılabilir. Araştırma sonucunda görülen yalıtım ve daha düşük ağırlık sayesinde, yazarlar bölme işleri için kullanılan yapısal olmayan elemanlar için beton duvar bloklarına kenevir malzemesinin kullanımını önermektedirler.

Kenevir betonun su içeriği iletkenlik özelliklerini etkilemektedir. Rahim vd. (2016) yaptıkları çalışmada su içeriğinde olan %8'lik artışın, iletkenlik değerlerinin yaklaşık %10 oranında arttırdığını bulmuşlardır. Suyun en iyi iletkenler arasında sayılması bu durumu açıklamaktadır. Gourlay vd. (2017) kenevir betonda su miktarının, termal ve akustik özelliklere etkisini inceledikleri çalışmaları sonucunda; su içeriğinin artması ile termal iletkenliğin arttığını, akustik özelliklerin ise su içeriğinden etkilenmediğini bulmuşlardır. Piot vd. (2017) suyu emen bir dış kaplama veya sıva seçmenin kenevir beton duvarın termal iletkenliğini arttırdığını bildirmişlerdir. Su emici bir dış kaplama seçilmesinin oluşturacağı bir başka risk ise, kaplamanın hemen altında küf oluşmasıdır. Kenevir beton duvarların beklenen performansı göstermesi için su ile teması kesilmelidir. Collet ve Pretot (2014), kenevir betonun termal iletkenliğinin karışım oranlarına, yoğunluğuna (birim hacim ağırlık) ve su içeriğine bağlı olduğunu bulmuşlardır. Özellikle su içeriğinin, bağıl neme bağlı olarak %15-20 oranında artan termal iletkenlik üzerinde yoğunluğa göre daha düşük bir etkiye sahip olduğunu savunmuşlardır. Bu etki yapının enerji verimliliğini ve çevresel performansını arttırmak için modelleme sürecinde dikkate alınmalıdır.

Elfordy vd. (2008) kenevir betonun yoğunluğu (birim hacim ağırlık) ve ısı iletkenliği arasındaki ilişkiyi incelemiş ve çalışma sonuçlarını sunmuşlardır. Isı iletkenliğinin yoğunluk ile doğru orantılı olarak arttığını bulmuşlardır. Ayrıca iletkenliğin su içeriğinden de etkilendiğini bildirmişlerdir. Kuru numuneler için iletim katsayısını 0,110 W/mK olarak, %100 iletimde olan numuneler için ise iletim katsayısını 0,317 W/mK olarak bulmuşlardır. Page vd. (2017) yaptıkları çalışmalarda 245 kg/m³ yoğunluktaki kenevir betonun iletim katsayısını 0,057 W/mK, 400 kg/m³ yoğunluktaki kenevir betonun iletim katsayısını ise 0,086 W/mK olarak bulmuşlardır.

Williams vd. (2018) kenevir betonun karışım oranlarının termal iletkenliği üzerindeki etkisini araştırmak için, kullanılabilecek farklı kenevir türleri ve oranlarını kullanarak beş farklı tasarıma sahip kenevir beton karışımı geliştirmişlerdir. Çalışma kenevir/bağlayıcı oranının 1/1,8 olduğunda ısı iletkenliğinin 0,11 W/mK, 1/2,6 olduğunda ise 0,13 W/mK değerine yükseldiğini göstermiştir. Yani bağlayıcı oranının artması ile ısı iletkenliğinin arttığı görülmüştür.

Komsi (2018)'nin lisans tezinde yaptığı testler, kenevir beton malzemenin termal özelliklerini araştırmıştır. Tez çalışması kapsamında püskürtme tipi kenevir betonun termal özelliklerini laboratuvar ve yerinde incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda; püskürtme tipi kenevir betonun bir konutta yalıtım malzemesi olarak iyi performans gösterdiği görülmüştür. Çalışma sadece laboratuvarda yapılan çalışmaların yetersizliğini gün yüzüne çıkarmıştır.

Jami ve arkadaşları tarafından 2016'da yapılan bir çalışmada; kenevir bitkisinin büyümesi sırasında bir kilogram kenevir kıymığının, fotosentez sayesinde, 1,6-1,8 kilogram CO₂ (karbondioksit) tuttuğu görülmüştür. 2012 yılında Ip ve Miller tarafından yapılan bir başka çalışmada ise, 1x1x0,3 m³ boyutlu olan kenevir beton duvarının 82,71 kilogram CO₂ tuttuğu tespit edilmiştir. Bu iki çalışmadan hareketle; kenevir beton kullanılan yapıların, inşaat ile ilgili tüm süreçlerden kaynaklanan karbon emisyonlarını önemli ölçüde telafi ettiği söylenebilmektedir.

Protchenko (2019) yaptığı tez çalışması kapsamında kenevir, su ve kireç bazlı bağlayıcı kullanılarak üretilen kenevir betonun otoyolda gürültü bariyeri olarak kullanımını incelemek adına bir prototip üretmiştir. Çalışma sonucunda yazar kenevir beton gürültü bariyeri duvarının; kuru iklime sahip ülkelerde başarıyla kullanılabileceğini, CO₂ tutma kabiliyeti ve benzersiz ses emme özellikleri ile çevre dostu, sürdürülebilir bir yapı inşa edilebileceğini tespit etmiştir. Böyle bir yapının; çevresel etkisi daha düşük ve sürdürülebilir bir yol inşaatına katkıda bulunabileceği ifade edilmiştir.

Literatürdeki sonuçlar, kenevir beton özelliklerinin değerlerinin değişken olduklarını ve birçok faktöre bağlı olduğunu göstermektedir. Test aletleri ve denemelerle üretim

yapılması nedeniyle de sonuçların değişkenlik gösterebileceğini dikkate alarak, literatürde çok fazla çalışmanın olmadığı açıktır. Farklı laboratuvarlar tarafından elde edilen sonuçlar, basınç dayanımı ve yoğunluk (birim hacim ağırlık) değerlerinin tekrarlanabilir olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, elastisite modülü değerleri mükemmelden çok kötüye kadar değişebilmektedir (Niyigena vd. 2016). Günümüzde hala kenevir bazlı malzemelerle ilgili konularda bilgi eksikliği olduğu ve kenevir betonun ömür boyunca performansının (Life Cycle Assasement-LCA) daha fazla araştırılmasına ihtiyaç olduğu açıktır.



3. MATERYAL ve METOT

Tezin bu bölümünde, çalışma kapsamında kullanılmış olan malzemeler açıklanmıştır. Malzeme özellikleri ve uygulama yöntemlerine ilişkin bilgiler sunulmuştur.

3.1 Materyal

Bu bölümde numuneleri üretmek için kullanılan malzemeler açıklanmıştır. Numuneleri üretmek için; çimento, kenevir lifi, akışkanlaştırıcı katkı, köpük kimyasalı, uçucu kül, mermer tozu ve su kullanılmıştır.

3.1.1 Çimento

Karışımlarda bağlayıcı olarak kullanılan CEM 1 42,5 R Tipi portland çimentosu, Afyon Çimsa Çimento Fabrikasından temin edilmiştir. Geç priz alan bir malzeme olan köpük betonun prizini hızlı alması istendiği için erken dayanımı yüksek R tipi çimento tercih edilmiştir. Kullanılan çimento TS EN 197-1 standartına uygundur. Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de CEM 1 42,5 R tipi çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3. 1 CEM 1 42,5 R Tipi Çimentonun Fiziksel Özellikleri.

DENEY		SONUÇ
Kıvamlilik Suyu (%)		30
Özgül Yüzey (cm ² /gr)		3685
Priz Süresi	Başlangıç	2 saat 52 dakika
	Bitiş	4 saat 36 dakika
Yoğunluk (kg/dm ³)		3,07
Basınç Mukavemeti	2 günlük	
	7 günlük	26,5
İncelik	No 70’de kalan	38,7
		0,13
	No 200’de kalan	3,15

Çizelge 3. 2 CEM 1 42,5 R Tipi Çimentonun Kimyasal Özellikleri.

OKSİT	%
CaO	64,13
SiO ₂	18,48
Al ₂ O ₃	4,40
SO ₃	3,51
Fe ₂ O ₃	3,12
MgO	1,35
Serbest CaO	1,34
K ₂ O	0,78
Na ₂ O	0,44
Cl ⁻	0,006

3.1.2 Kenevir

Çalışmada kullanılan endüstriyel tipteki kenevir Resim 3.1’de gösterildiği gibi “kurutulmuş bitki sapı” şeklinde temin edilmiştir. Kenevir bitkisinin gövdesinden elde edilen kenevir lifleri köpük beton karışımlarında kullanılmıştır. Kenevir bitkisini köpük betonda kullanabilmek için ön hazırlık yapılmıştır. Temin edilen ürün önce laboratuvar tipi öğütücüde (Resim 3.2) öğütülmüştür. Laboratuvar tipi öğütücü haznesindeki dönen bıçaklar sayesinde öğütme işlemini yapabilmektedir. Öğütme işleminden önce kenevir sapları rahat öğütülebilmesi için yaklaşık 10 cm uzunlukta olacak şekilde kesilmiştir, ardından öğütme işlemi (Resim 3.3) uygulanmıştır.



Resim 3. 1 Kenevir Sapları.



Resim 3. 2 Öğütücü.



(a)



(b)

Resim 3. 3 Elde edilen kenevir lifi (a) ve kenevir lifinin öğütülmüş hali (b).

Kullanılacak miktarda kenevir lifi yaklaşık 8-10 mm boyutlarında olacak şekilde öğütüldükten sonra bir litrelik kaplarda 2 saat suda bekletilmiştir. Resim 3.4 (a)'da kenevirin öğütülmüş halinin tartım işlemi, Resim 3.4 (b)'de ise öğütülmüş ve tartılmış kenevirin suda bekletme işlemi verilmiştir. Bu işlemlerden sonra kenevir parçacıkları tamamen suya doygun hale geldiği için, hidrasyon işlemini olumsuz etkilemesinin önüne geçilmiştir.



(a)

(b)

Resim 3. 4 Öğütülmüş ve Tartılmış Kenevir Lifi (a) ve Suda Bekletilmiş Kenevir Lifi (b).

3.1.3 Akışkanlaştırıcı Katkı

Çalışma kapsamında köpük betonun stabilitesini etkilemeyecek ve standartlara uygun olan polikarboksilik esaslı bir süper akışkanlaştırıcı katkı tercih edilmiştir.

3.1.4 Uçucu Kül

Tez çalışmasında bazı serilerde uçucu kül (Resim 3.5 (a)) kullanılmıştır. Kullanılan uçucu kül Seyitömer Termik Santralinden temin edilmiştir. Uçucu Külün kimyasal analiz değerleri Çizelge 3.3 ile verilmiştir. Bir mineral katkı olan uçucu kül, puzolanik özelliği nedeniyle karışıma eklenmiştir. Karışımında puzolanik reaksiyona girerek ileri zamanlardaki dayanımı arttırmasının yanı sıra ince taneli boyutu ile filler (dolgu) malzemesi görevi görmektedir. Ayrıca uçucu külün beton içerisinde gözenekleri düzenlediğine dair görüşler de bulunmaktadır (Nambiar ve Ramamurthy 2007). Böylelikle taze haldeki harcın kıvamı üzerinde, sertleşmiş betonun ise gözenek yapısı üzerinde etkili olmaktadır.

Çizelge 3. 3 Seyitömer Uçucu Külünün Kimyasal Özellikleri.

OKSİT	%
SiO ₂	56,02
Al ₂ O ₃	22,34
Fe ₂ O ₃	9,85
CaO	2,11
MgO	3,75
Na ₂ O	0,19
K ₂ O	2,08
SO ₃	0,58
LOI	1,02

3.1.5 Mermer Tozu

Tez çalışmasında bazı serilerde mermer tozu (Resim 3.5 (b)) kullanılmıştır. Kullanılan mermer tozu Afyonkarahisar İncehisar bölgesi mermer işletmelerinden temin edilmiştir. Oldukça ince olan taneleri sayesinde filler (dolgu) malzemesi görevi görmektedir.



(a)

(b)

Resim 3. 5 Uçucu Kül (a) ve Mermer Tozu (b).

3.2 Metot

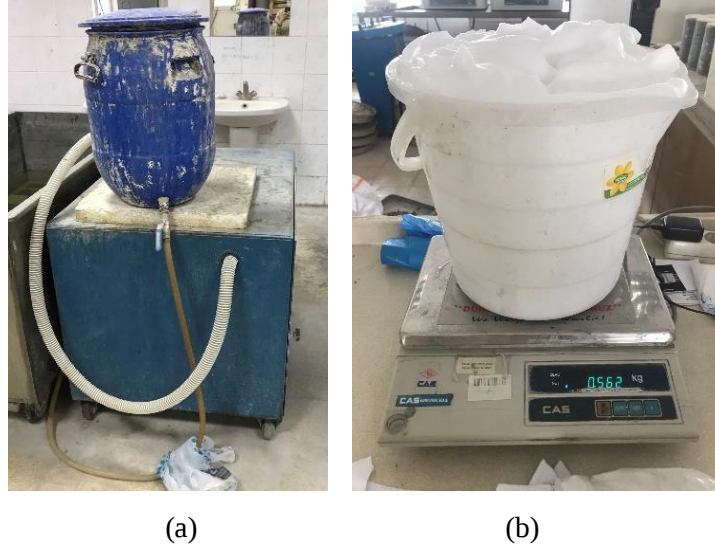
Bu bölümde karışımların hazırlanması, karışım oranları, tez çalışmasının deney aşamasında uygulanan analiz ve deneyler sunulmuştur.

3.2.1 Karışımların Hazırlanması

Köpük beton elde etmek için deneysel metot tercih edilmiştir. Kullanılan malzemelerin kullanım oranları ön deneme yoluyla belirlenmiştir. Malzemeleri karıştırmak için Resim 3.6’de verilen yatay pan tipi hazneli beton mikseri kullanılmıştır. Köpük üretmek için ise Resim 3.7 (a)’da gösterilmiş olan köpük jeneratörü kullanılmıştır. Bu jeneratörde tel örgüden hava akımı ile birlikte köpük solüsyonu (suyla seyreltilmiş köpük ajanı) geçirilerek kararlı halde köpük üretilmiştir. Resim 3.7 (b)’de köpük jeneratörü ile üretilen kararlı haldeki köpük sunulmuştur. Köpüğü önceden hazırlamak köpüğün sönmeye yol açabileceği için, köpük üretimi harç hazırlama esnasında yapılmıştır.



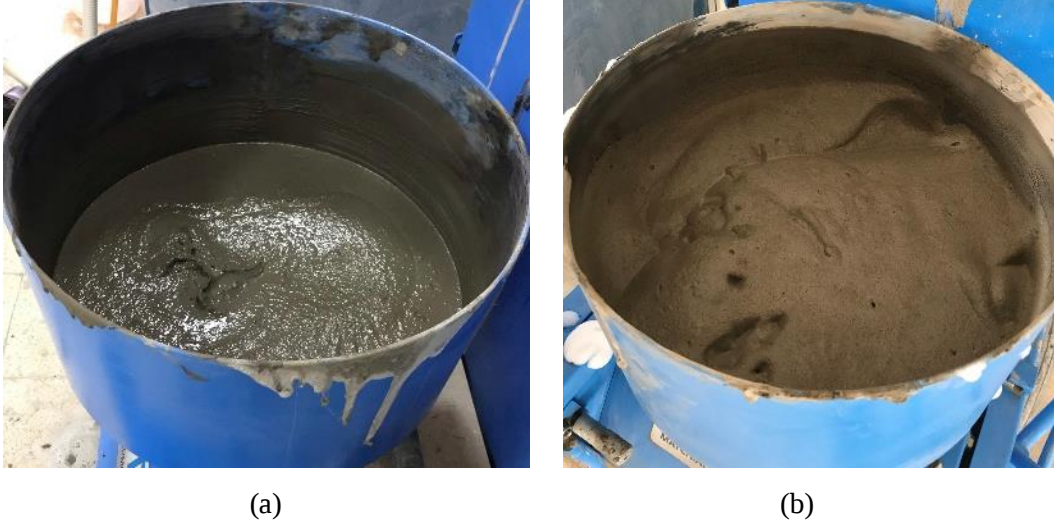
Resim 3. 6 Beton Mikseri.



Resim 3. 7 Köpük Jeneratörü (a) ve Üretilen Kararlı Haldeki Köpük (b).

Karışım hazırlanmadan önce, ön hazırlık olarak, 8-10 mm boyutlarında olacak şekilde öğütülmüş olan kenevir lifleri hazırlanmıştır. Kullanılacak miktarda kenevir lifi tartıldıktan sonra, suda bekletilerek doygun hale getirilmiştir. Böylelikle kenevir karışımında kullanmaya uygun hale gelmiştir. Ön hazırlık aşamasında kullanılacak diğer malzemeler de tartılarak hazır edilmiştir. Ayrıca bu aşamada kullanılacak kalıplar kuruyan betonun kalıptan çıkmasını kolaylaştırmak için yağlanmıştır.

Karışım hazırlanırken sırası ile su, süper akışkanlaştırıcı katkı, kenevir lifi, çimento, uçucu kül veya mermer tozu mikserde eklenmiştir. Bu malzemeler mikserde yaklaşık 5 dakika homojen hale gelene kadar karıştırılmıştır. Malzemeler karıştırıldıktan sonra baz karışım akışkan halde bir harç şeklinde elde edilmiştir (Resim 3.8 (a)). Bu harca yayılma deneyi uygulanmıştır. Jeneratörle elde edilen ve litredeki ağırlığı belirlenen kararlı köpük harca eklenerek tekrar homojen karışım elde edilinceye kadar 2-3 dakika karıştırılmıştır. Köpük beton harcı elde edilmiştir (Resim 3.8 (b)). Bu aşamada çok fazla karıştırma yapmak köpüğün stabilitesini etkileyeceği için doğru değildir. Karışım homojen hale gelene kadar karıştırmak yeterlidir. Elde edilen karışımın litredeki ağırlığı, akış süresi ve yayılma miktarı belirlenmiştir. Ardından kalıplanmış, yüzeyi düzeltilmiş ve etiketlenmiş halde oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır (Resim 3.9).

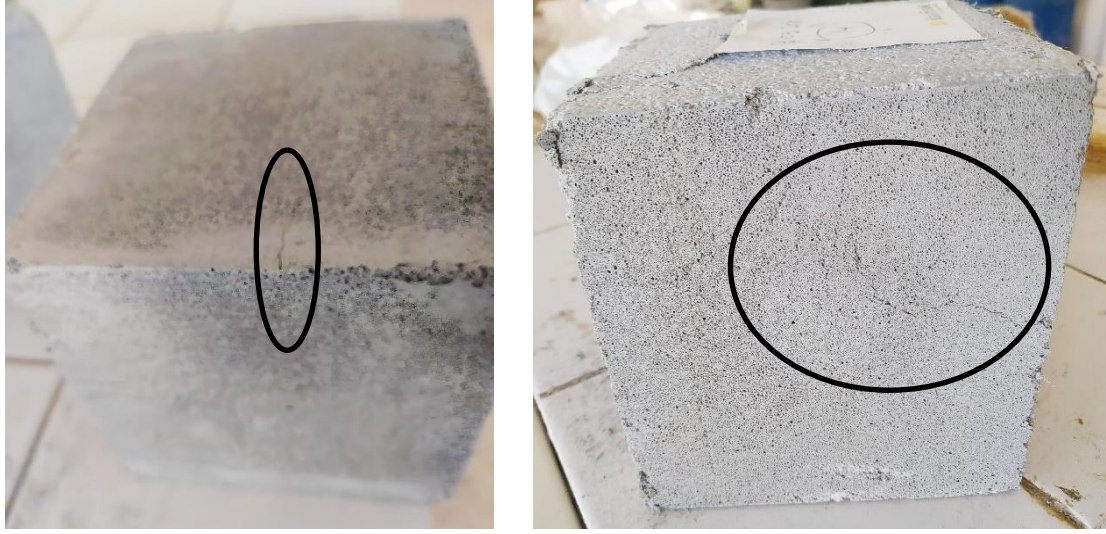


Resim 3. 8 Köpük Eklenmemiş Harç (a) ve Üretilen Köpük Beton (b).



Resim 3. 9 Kalıplanmış ve Etiketlenmiş Numuneler.

Köpük beton deney numunelerinin üretiminde önce içeriğinde lif katkısı olmayan deney örnekleri üretilmiştir. Bu örneklerde kılcal çatlaklar gelişmiştir (Resim 3.10). Ön deneme örneklerinde görülen çatlakların giderilmesi amacıyla daha sonra üretilen deney örneklerinde kenevir lifi kullanılarak deney numunelerinin üretimi yapılmıştır.



Resim 3. 10 Lif katkısı içermeyen köpük beton ön deneme örneklerinde ortaya çıkan kılcal çatlaklar.

3.2.2 Karışım Oranları

Tez çalışmasında hazırlanan karışımlarda kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin kullanım miktarları Çizelge 3.4’de sunulmuştur.

Çizelge 3. 4 Kullanılan Malzemeler ve Kullanım Miktarları.

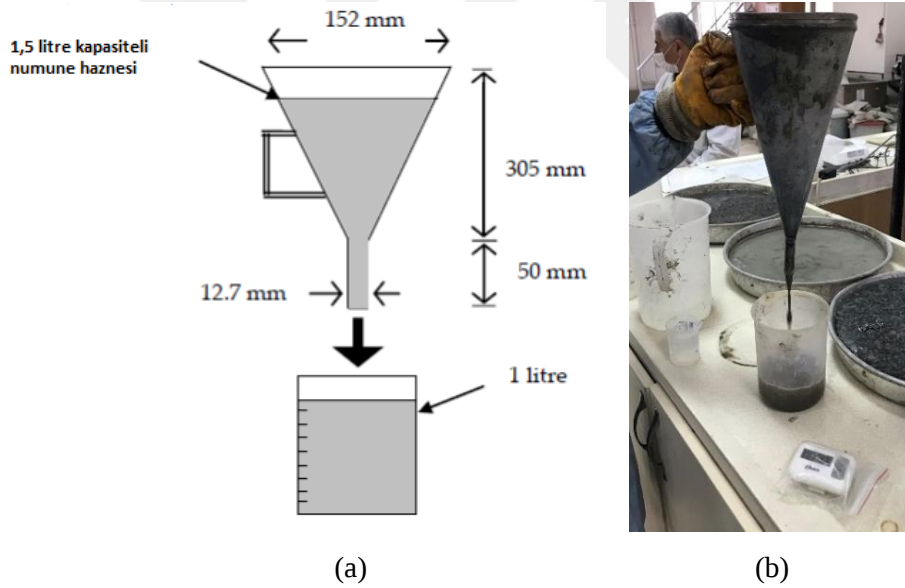
Seri No	Çimento (gr)	Kenevir Lifi (gr)	Akışkanlaştırıcı Katkı (gr)	Uçucu Kül (gr)	Mermer Tozu (gr)	Su (gr)	Su/Katı Oranı
1	5000	25	15	-	-	1500	0,30
2	5000	25	15	1000	-	3100	0,52
3	5000	25	15	1000	-	2750	0,46
4	5000	25	15	1000	-	2650	0,44
5	5000	25	-	-	1000	2300	0,38
6	5000	25	10	-	1000	2100	0,35
7	5000	25	15	-	1000	2000	0,33

Su/Katı Oranı: Su Miktarı / (Çimento+Diğer mineral katkılar)

3.2.3 Uygulanan Analiz ve Deneyler

3.2.3.1 Marsh Konisi

Taze haldeki köpük betonların akışkanlığını belirlemede kullanılan yaygın bir yöntemdir. Kesin sonuç vermemekle birlikte hızlı bir kontrol yöntemi sayılabilir. Özel ölçülere sahip bir huni kullanılarak yapılan bu deneyde akış süresinin yanında, akış davranışı da gözlemlenir. Deneyde kullanılan huni ebatları Resim 3.11 (a) ile gösterilmiştir. Temel olarak kalıplanmaya hazır haldeki betonun 1,5 litre hacimli bir huniden akış zamanının ve şeklinin kaydedilmesine dayanır. Resim 3.11 (b)'de gösterildiği gibi, özel ölçülere sahip olan huni köpük beton ile doldurulur ve sonra 1 litrelik başka bir kabı doldurması için akışına izin verilir. Böylelikle akış süresi ve şekli belirlenip not edilir. Marsh Konisi Deneyi uygulaması ASTM D6910-04 Standardına uygun olarak yapılmıştır.



Resim 3. 11 Marsh Konisi Ebatları (a) ve Marsh Konisi Uygulaması (b).

Köpük Beton harcının akış davranışına göre oluşturulmuş olan sınıflandırma Çizelge 3.5 ile verilmiştir. 1 litre harcın, kesiksiz bir şekilde, 1 dakikadan az bir sürede akması durumunda akış davranışı “sabit ve düzenli” olarak, akış süresi ile birlikte kayıt edilir (Jones vd. 2005). Akış süresi 1 dakikayı geçiyor ise “zor akan harç” olarak not edilir. Eğer hiç akış olmuyor ise veya akış oluyor ancak bir süre sonra duruyor ise “akış olmadı”

yazılır (Mohammad 2011). Akış şeklinin kesiksiz olması ve akış süresinin ne çok kısa ne de çok uzun olması istenir. Kısa akış süresi; köpük miktarının yetersizliğine ve litredeki ağırlığın fazla olacağına, uzun akış süresi ise; köpük miktarının fazla ve litredeki ağırlığın az olacağına işaret eder. Marsh konisi yöntemi bize kıvam ve yoğunluk hakkında bilgi verir. Fazla kısa akış sürelerine sahip olan harçlara köpük ekleyerek kıvam ayarlanır.

Çizelge 3. 5 Köpük Beton Harcının Akış Sınıfları (Jones vd. 2005).

Temel Sınıf	Tanımı	Alt Sınıf	Açıklama
1	Akış < 1 dk	A	Sabit ve Düzenli Akış
2	1 dk < Akış < 2 dk	B	Kesikli Akış
3	0,5 litre < Akış < 1 litre	C	Akışın Hafifçe Sıkıştırılarak Tamamlanması
4	Akış < 0,5 litre	-	Uygun Olmayan Akış
5	Akış yok	-	Uygun Olmayan Akış

3.2.3.2 Yayılma Deneyi

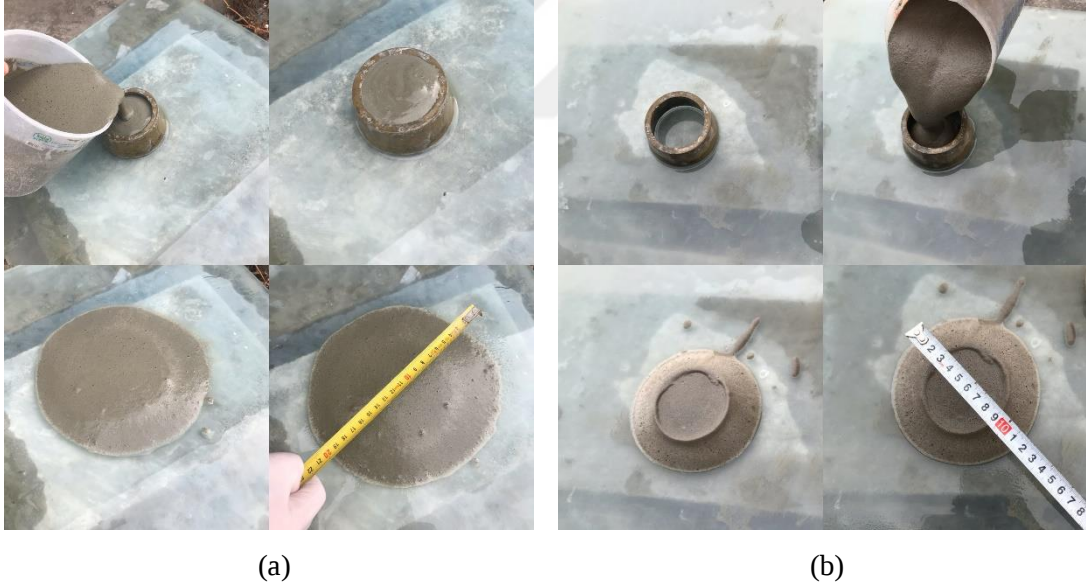
Yayılma deneyi ile litredeki ağırlığı ölçülmüş olan betonun, kendi ağırlığı ile yayılarak oluşturduğu çap ve bu çapın oluşması için geçen süre belirlenebilir. Bu deney genellikle taze haldeki kendiliğinden yerleşen betonlarda kullanılır. Köpük betonlar da kendiliğinden yerleşen beton olduğu için yayılma deneyi uygulanabilmektedir.

Yayılma deneyi TS EN 1015-3 (2000) standardına uygun olarak yapılmıştır. Bu deney için yüzeyi akmayı engellemeyecek bir tabla ve çökme hunisi (Resim 3.12) adı verilen taban çapı 10 cm, üst çapı 7 cm ve yüksekliği 6 cm olan kesik koni şeklinde bir kalıp kullanılır. Tablanın üzerine yerleştirilen kalıp taze haldeki harç ile doldurulur ve yüzeyi düzeltilir. Ardından kalıp tek hamle ile kaldırılır ve yayılması için beklenir. Yayılma tamamlandıktan sonra, yayılma çapı birkaç farklı yerden ölçülür ve ortalaması alınır. Elde edilen sonuçlar kaydedilerek deney tamamlanır. Bu deney kıvam ve işlenebilirlik hakkında fikir verir. Yayılma değerlerinin düşük olması taze haldeki harcın koyu kıvamda olduğunu, yüksek olması ise akışkan olduğunu gösterir.

Bu çalışmada yayılma hem köpük eklenmeden önce (yayılma 1) hem de köpük eklendikten sonra (yayılma 2) ölçülmüştür. Resim 3.13 (a) ile yayılma 1 ve Resim 3.13 (b) ile yayılma 2 ölçümleri verilmiştir.



Resim 3.12 Çökme Hunisi.



Resim 3.13 Yayılma 1 Ölçümü (a) ve Yayılma 2 Ölçümü (b).

3.2.3.3 Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Boyutları 15x15x15 cm³ olan kenevir lifi katkılı köpük beton numunelerinin birim hacim ağırlıkları hesaplanırken; önce deney numunelerinin sabit kütle halini almaları

sağlanmıştır. Etüvde, sabit ağırlığa gelinceye kadar 75°C sıcaklıkta kurutulan numuneler oda sıcaklığına gelebilmesi için soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan numuneler hassas terazi ile tartılmıştır ve ağırlıkları kaydedilmiştir. Kaydedilen bu etüv kurusu ağırlıkların numune hacmine bölünmesi ile kuru birim hacim ağırlıklar elde edilmiştir. Kenevir lifi katkılı köpük beton numunelerinin birim hacim ağırlıklarının tayini TS EN 772-13 (2002) standardına uygun olacak şekilde yapılmıştır.

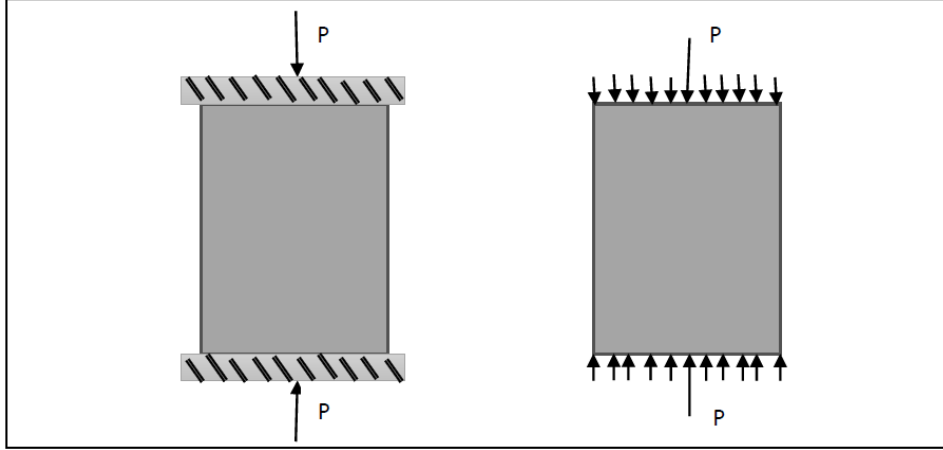
3.2.3.4 Basınç Mukavemeti Deneyi

Köpük beton numuneler oda sıcaklığında mukavemet kazanıncaya kadar 28 gün bekletilmiştir. Sertleşen numuneler yaklaşık 75°C sıcaklıkta, sabit kütleye ulaşana kadar kurutulmuştur. Kurutma işleminin ardından etüvden alınan numuneler ortam sıcaklığına ulaşınca kadar soğumaya bırakılmıştır. Numune deneye hazır hale getirildikten sonra tartılmıştır ve ağırlıkları kaydedilmiştir. Ardından basınç mukavemetini tespit etmek için Beton basınç presinde, numune kırılıncaya kadar üniform basınç yükü uygulanmıştır (Resim 3.14). Basınç dayanımını belirlemek için basınç kapasitesi 20 ton olan beton basınç presi kullanılmıştır. Basınç dayanımı belirlenirken 15x15x15 cm³ boyutlu numuneler kullanılmıştır. Deney esnasında gerilme artışı sabit (0,5 MPa/s) hızla, darbesiz ve sürekli olacak şekilde uygulanmıştır. Kenevir lifi katkılı köpük beton numunelerinin basınç dayanımı değerleri TS EN 772-1+A1 (2015) standardına uygun olacak şekilde belirlenmiştir.



Resim 3. 14 Beton Basınç Presi.

Beton numuneye uygulanan basınç yükü uygulaması Resim 3.15’de gösterilmiştir. Numune kırıldıktan sonra elde edilen kırılma yükü değerleri kaydedilmiştir. Kırılma anındaki yük değerinin, uygulama yapılan yüzey alanına oranı hesaplanarak basınç dayanım değerleri bulunmuştur.



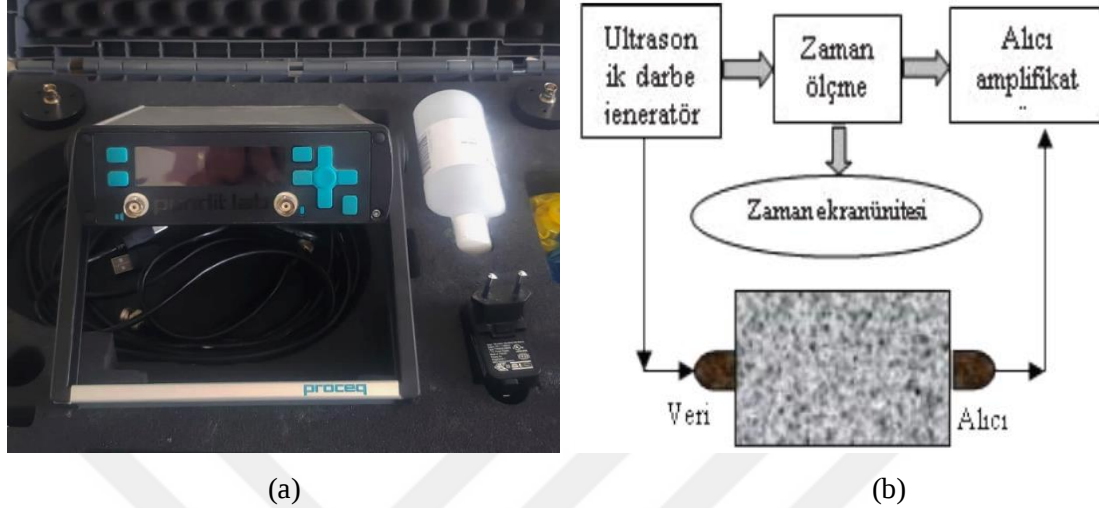
Resim 3. 15 Beton Numuneye Basınç Yükü Uygulaması (Erdoğan 2015).

3.2.3.5 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Sertleşmiş beton üzerinde uygulanan deneylerden biri olan ultrases geçiş hızı deneyi numuneye giren ses dalgalarının, uygulama yapılan iki yüzey arasındaki geçiş süresi ölçülerek, dalga hızının hesaplanması esasına dayanarak yapılır. Deney “Ultrases deney cihazı” ile yapılmaktadır. Ultrases deney cihazı (Resim 3.16 (a)), ses dalgalarının proplar arasındaki mesafeyi ne kadar zamanda aldığını mikrosaniye biriminde tespit eder ve cihaz ekranına yansıtır. Deney sonucunda ses dalgalarının proplar arası geçiş süresi elde edilmektedir. Geçiş hızının bulunması için, yüzeyler arası mesafe geçiş hızına bölünmelidir. Ultrases deney cihazının çalışma mekanizması Resim 3.16 (b)’de gösterilmiştir. Ultrases geçiş hızı deneyi, kenevir lifi katkılı köpük beton numunelerine uygulanırken TS EN 12504-4 (2021) standardına uygun olarak çalışılmıştır.

Ultrases geçiş hızı değerleri ile beton malzemenin özellikleri (basınç mukavemeti değeri gibi) arasında ilişki kurulabilmektedir (Erdoğan 2015). Kurulabilecek bu ilişkiler temelde betonun içerdiği boşlukların, betona etkileri üzerinde kurulur. Sesin geçiş hızı köpük

betonun yoğunluğuna, gözenekliliğine, gözenek yapısına, çatlama miktarına ve çatlak yapısına bağlı olarak değişmektedir.



Resim 3. 16 Ultrases Deney Cihazı (a) ve Ultrases Deney Cihazı Çalışma Mekanizması (b)
(Abdullah vd. 2016).

3.2.3.6 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve XRD (X Işınları Kırınım) Analizleri

Çalışmada üretilen kenevir lifi katkılı köpük beton numunelerinin mikroyapılarının incelemeleri Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope-SEM) ve X Işınları Kırınımı Cihazı (XRD) kullanılarak yapılmıştır. Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde yapılan analizler için Resim 3.17’de gösterilen LEO Marka 1430VP Model SEM Cihazı W (Tungsten) ve Resim 3.18’de gösterilen SHIMADZU marka X Işınları Kırınımı Cihazı kullanılmıştır. SEM ve XRD Analizleri için seçilen iki serinin (3 ve 5 numaralı) numuneleri kullanılmıştır.



Resim 3. 17 SEM Cihazı.



Resim 3. 18 XRD Cihazı.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, çalışmadan elde edilen veriler sunulmuştur. Çalışma kapsamında 7 seri kenevir lifi katkılı köpük beton numunesi üretilmiştir. Çalışmada taze ve sertleşmiş beton deneyleri ayrı ayrı yapılmıştır.

4.1 Taze Beton Deneyleri

Bu araştırmada kenevir lifi katkılı köpük beton taze haldeyken ve üretim aşamasındayken köpük yoğunluğu, harç ağırlığı, yayılma çapı (1 ve 2), akış süresi değerleri kaydedilmiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4. 1 Taze Haldeki Köpük Beton Harcının Fiziksel Özellikleri.

Seri No	Köpük Yoğunluğu (g/L)	Harç Ağırlığı (g/L)	Su/Katı Oranı	Yayılma 1 (cm)	Yayılma 2 (cm)	Akış Süresi (s)
1	55	650	0,30	25	22	18
2	50	375	0,52	15	13	35
3	50	465	0,46	15	12	Kesikli Akış
4	42	340	0,44	17	12	Kesikli Akış
5	55	500	0,38	15	13	48
6	50	400	0,35	16	14	49
7	50	430	0,33	26	14	48

Su/Katı Oranı: Su miktarı/Katı malzeme miktarı (Çimento+Mineral malzemeler)

Yayılma 1: Harca köpük eklenmeden önce yapılan yayılma ölçümü

Yayılma 2: Harca köpük eklendikten sonra yapılan yayılma ölçümü,

Köpük, köpük beton bünyesindeki en baskın malzemelerden biri olduğu için beton özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Harç karışımındaki köpük miktarı arttıkça harcın yoğunluğu azalmakta ve buna bağlı olarak akış süresi uzamakta ve yayılma değeri azalmaktadır.

Harç ağırlığı değerleri harcın son ağırlığını gösteren değerlerdir. Yayılma 1 değeri harca köpük eklenmeden yapılan bir değer olduğu için köpük yoğunluğu ve harç ağırlığı yayılma

1 değerlerini etkilememektedir. Yayılma değerlerini genel olarak su/katı oranı etkilemektedir. Yayılma 1 değerinin ölçülmesi deney esnasında yapılan bir otokontrol yöntemidir. Yayılma 1 ölçümü, harç için kullanılacak köpük miktarı hakkında ön fikir vermektedir.

4.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Bu çalışmada sertleşmiş betonun etüv kurusu ağırlığı ölçülmüştür. Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde basınç mukavemeti ve ultrases geçiş hızı deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar üzerinde hesaplamalar yaparak kenevir lifi katkılı hafif betonların birim hacim ağırlıkları, ultrases geçiş hızları ve basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Üretilen örnekler üzerinde sertleşmiş beton deneyleri uygulanmıştır. Sertleşmiş beton deneyleri sonucu elde edilen veriler çizelgelerle sunulmuştur. Birbirlerini etkileyen parametreler birlikte incelenmiş ve grafikler halinde sunulmuştur. Bir seri birden fazla numuneye sahip olduğu için elde edilen sonuçların ortalamaları kullanılmıştır.

4.2.1 Birim Hacim Ağırlık

Tez çalışması kapsamında üretilen numunelerin etüv kurusu ağırlıkları hassas terazi ile ölçüldükten sonra birim hacim ağırlık yani yoğunluk değerleri hesaplanmıştır. Birim hacim ağırlıklar hesaplanırken; ölçülen etüv kurusu ağırlıklar numune hacmine bölünmüştür. Hesaplanan birim hacim ağırlıklar, basınç dayanımı değerleri ve Ultrases geçiş hızı değerleri ile birlikte Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Elde edilen birim hacim ağırlıkların oldukça düşük olduğu açıkça görülebilmektedir. Agregası kullanılmadığı için bu durum oldukça normaldir.

Çizelge 4. 2 Sertleşmiş Beton Deneyleri Sonucu Elde Edilen Veriler.

Seri No	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)
1	352	1,62	1,66
2	440	1,65	1,61
3	445	1,76	1,58

4	380	1,52	1,35
5	390	1,63	1,72
6	430	1,58	1,42
7	380	1,45	1,55

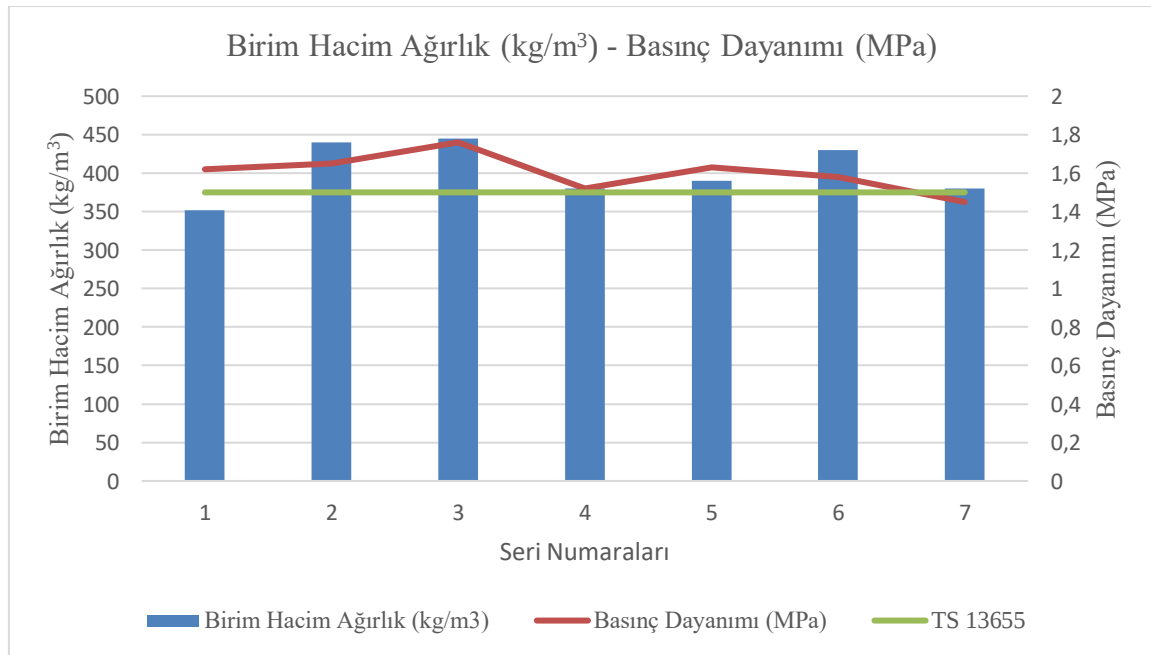
4.2.2 Basınç Dayanımı

Üretilen numunelerin kırılma yükleri basınç presinde ölçüldükten sonra kaydedilmiştir. Ardından elde edilen kırılma yükleri basınç uygulanan numune alanına bölünerek basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Hesaplanan basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Elde edilen değerler kenevir lifi katkılı hafif beton için standart değerlerini karşılamaktadır (TS 13655 2015).

4.2.3 Ultrases Geçiş Hızı

Tez çalışması kapsamında üretilmiş olan numuneler üzerinde ultrases geçiş hızı deneyi uygulanmıştır. Elde edilen veriler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

4.2.4 Birim Hacim Ağırlık – Basınç Dayanımı İlişkisi



Şekil 4. 1 Birim Hacim Ağırlık – Basınç Dayanımı Grafiği.

Birim hacim ağırlık ile Basınç dayanımı değerlerinin birlikte değerlendirildiği Şekil 4.1 incelendiğinde 4 numaralı seride birim hacim ağırlığın (yoğunluğun) azalması ile basınç dayanımının azaldığı görülmektedir. Köpük beton numunelerde birim hacim ağırlık değerleri ile basınç dayanımı değerleri arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır; birim hacim ağırlık değerleri arttıkça basınç dayanımı değerleri de artış göstermektedir. Köpük betonlarda harç bileşeninin önemli bir kısmını harca katılan kararlı haldeki köpük oluşturmaktadır. Harç karışımına ilave edilen köpük miktarı arttıkça taze harcın ve buna bağlı olarak sertleşmiş köpük beton örneklerin birim hacim ağırlık değerlerinde azalma gerçekleşmiştir. Birim hacim ağırlık değerlerindeki azalmaya bağlı olarak da basınç dayanımı değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca bu seriye uçucu kül eklenmiştir. Uçucu külün yüzey alanı büyük olduğu ve kullanılan su miktarı arttırılmadığı için koyu kıvamda harç elde edilmiştir ve bu sebeple kesikli akış gözlemlenmiştir. Birim hacim ağırlığı düşük olan (380 kg/m^3) 4 numaralı seriden elde edilen basınç dayanımı (1,52 MPa) düşmüştür.

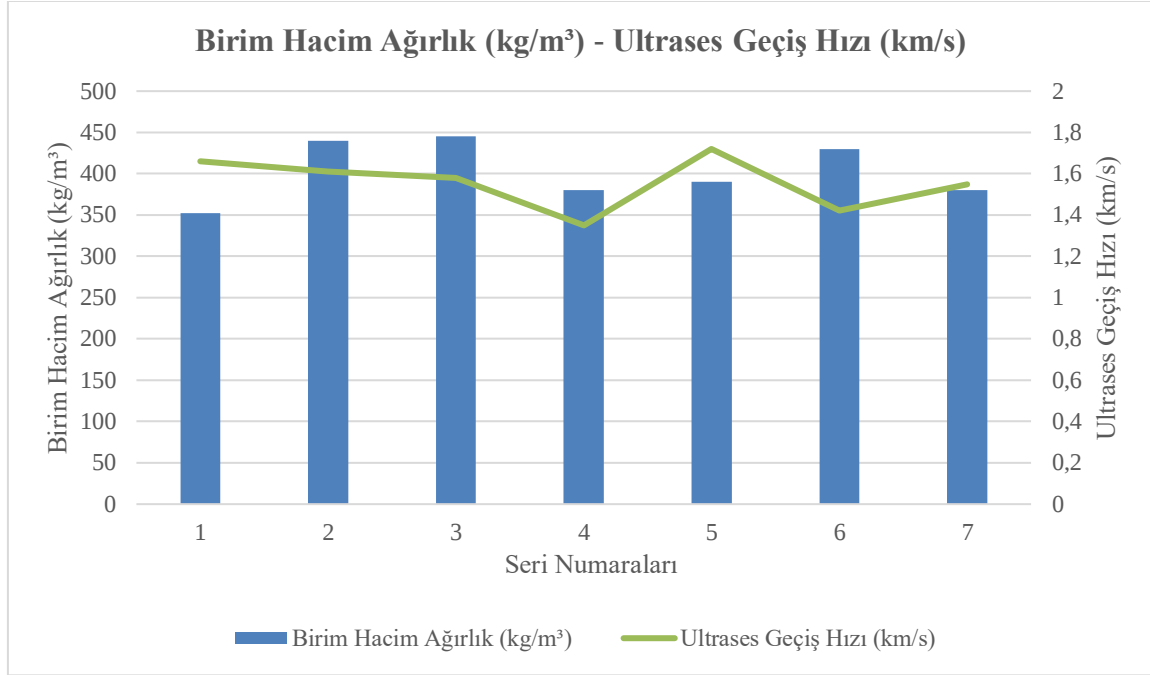
Mermer tozu katkılı 7 numaralı seride birim hacim ağırlık (380 kg/m^3) azalırken basınç dayanımı (1,45 MPa) da azalmıştır. Çalışmada elde edilen basınç dayanımı sadece bu seride TS 13655 standardı ile belirlenen köpük beton minimum basınç dayanımı değerinin (1,5 MPa) altına düşmüştür.

4.2.5 Birim Hacim Ağırlık – Ultrases Geçiş Hızı İlişkisi

Şekil 4.2’de sunulmuş olan grafikte birim hacim ağırlık değerleri ile ultrases geçiş hızı değerleri birlikte incelenmiştir. Ultrases geçiş hızı beton bünyenin yapısına bağlıdır. Birim hacim ağırlığın artması köpük beton bünyede gözenekliliğin azalmasına ve ultrases geçiş hızının artmasına sebep olması beklenmektedir. Ancak sadece birim hacim ağırlık etkili değildir; gözenek miktarı, gözeneklerin boyutu, şekli ve dağılımları da ultrases geçiş hızı değeri için önem taşımaktadır.

Elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri incelendiğinde en yüksek geçiş hızı değerini 1,72 km/s değeri ile 5 seri numaralı numune vermiştir. Yani ses dalgaları en hızlı 5 numaralı seriden geçmiştir. En düşük geçiş hızını ise 1,35 km/s değeri ile 4 numaralı seri vermiştir.

Yani ses dalgaları en yavaş 4 numaralı seriden geçmiştir. Elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri normal betona göre düşüktür. Çünkü üretilen numunelerin boşluk oranı yüksektir. Ses dalgaları boşlukta değil, maddesel ortamda iletildiği için gözenek oranı yüksek olan köpük beton numunelerde düşük geçiş hızı değerleri elde edilmiştir.



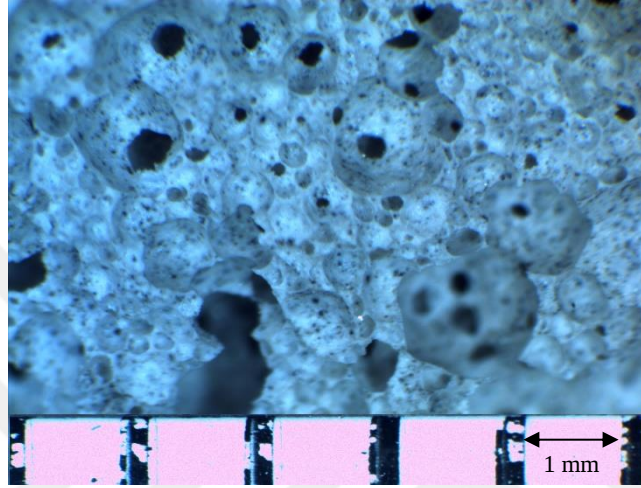
Şekil 4. 2 Birim Hacim Ağırlık – Ultrases Geçiş Hızı Grafiği.

Genel olarak birim hacim ağırlığının artması ile ultrases geçiş hızının artmaktadır (Şekil 4.2). Ancak bazı serilerde durumun daha farklı olduğu da görülebilmektedir. Bu farklılığın sebebi gözenek yapısının homojen olmamasına bağlı olduğu değerlendirilmiştir. Literatürde aynı veya benzer konuların denendiği hafif beton ile ilgili çalışmalar incelendiğinde elde edilen ultrases geçiş hızı değerlerinin yakın olduğu görülmektedir (Dede 2019, Türkmenoğlu vd. 2015).

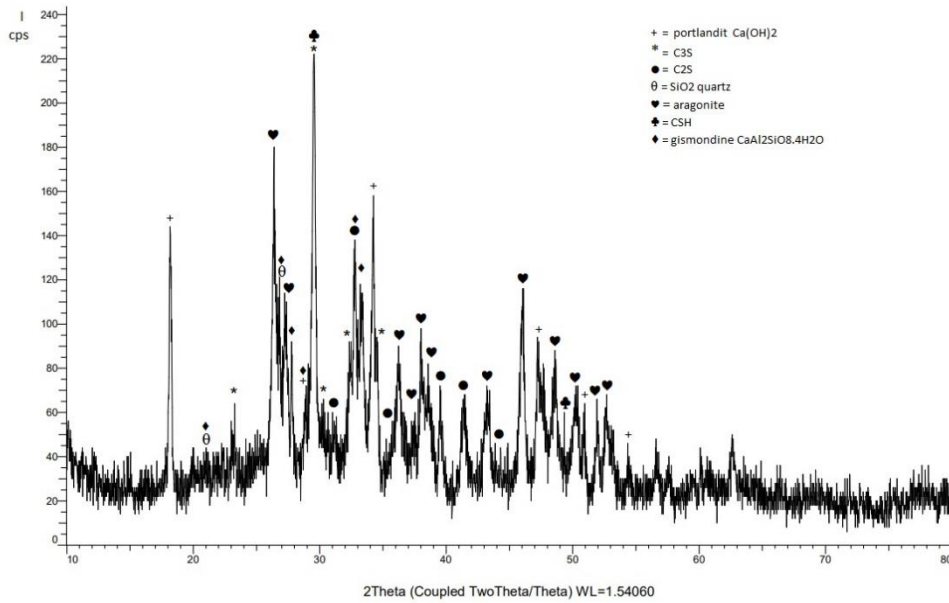
4.2.6 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X Işını Kırınımı (XRD) İncelemeleri

Uçucu kül katkılı örneğin (Seri 3) Optik Mikroskop görüntüleri Şekil 4.3 ile, XRD analizi ise Şekil 4.4 ile verilmiştir. XRD analizi incelendiğinde yapıda normal çimento hidratasyon fazlarının varlığı gözlenmektedir. Çimento hidratasyonu sonucu oluşan CSH

ve Ca(OH)_2 fazlarıyla birlikte hidrasyonunu tamamlamayan başlangıç çimento fazları da (C_3S , C_2S) yapıda gözlenmektedir. Çimentoya yapılan uçucu kül ilavesi nedeniyle kuvars fazı gözlenmektedir. Ancak hidrate olmuş çimento-uçucu kül karışımının mineralojik incelemelerinde, normal çimento hidrasyon yapısında gözlenmeyen Gismondine ve Aragonite fazlarının varlığı tespit edilmiştir (Şekil 4.4).

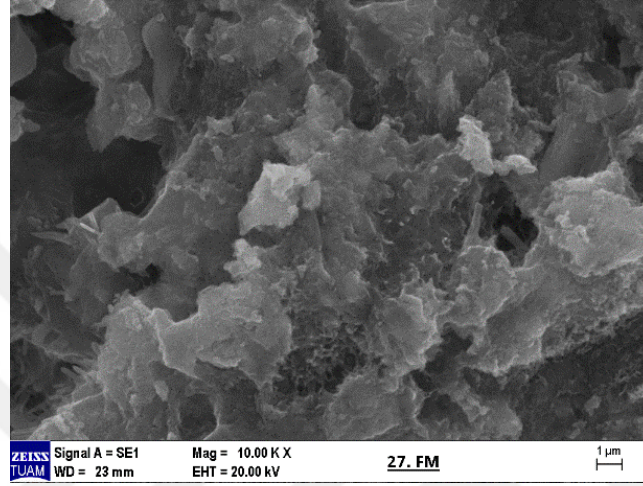


Şekil 4. 3 3 Seri Numaralı Numunenin Optik Mikroskop Görüntüleri.

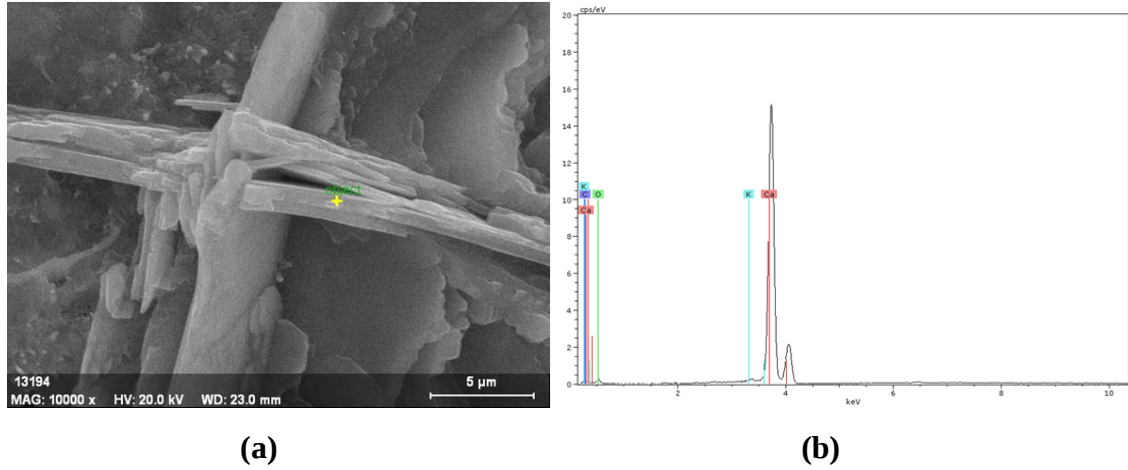


Şekil 4. 4 3 Seri Numaralı Numunenin XRD Analizi.

Şekil 4.5’de CSH hidratasyon fazlarının gözlemlendiği SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.6 (a)’da çubuksu-fiber formuna yakın yoğun aragonite faz oluşumları gözlenmektedir. Şekil 4.6 (b)’de ise aragonite faz bölgesinden alınan EDX analiz sonucu verilmiştir. EDX analizinden de gözlemlendiği gibi sadece yüksek Ca ve C piklerinin olması bölgenin CaCO_3 bileşiminden ibaret olduğunu ispatlamaktadır.



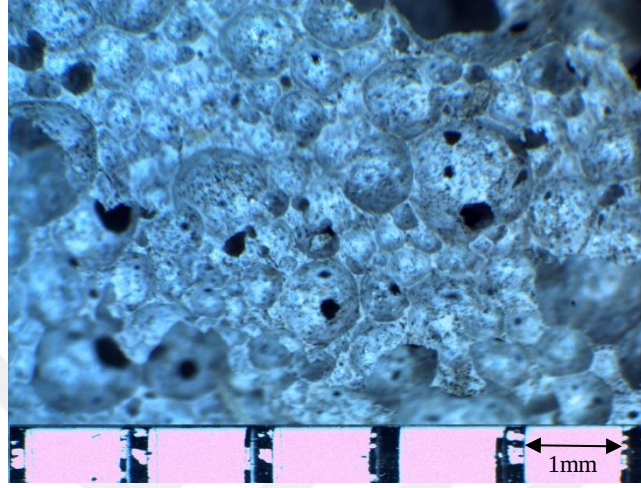
Şekil 4. 5 3 Seri Numaralı Numunenin CSH Jel Yapısı.



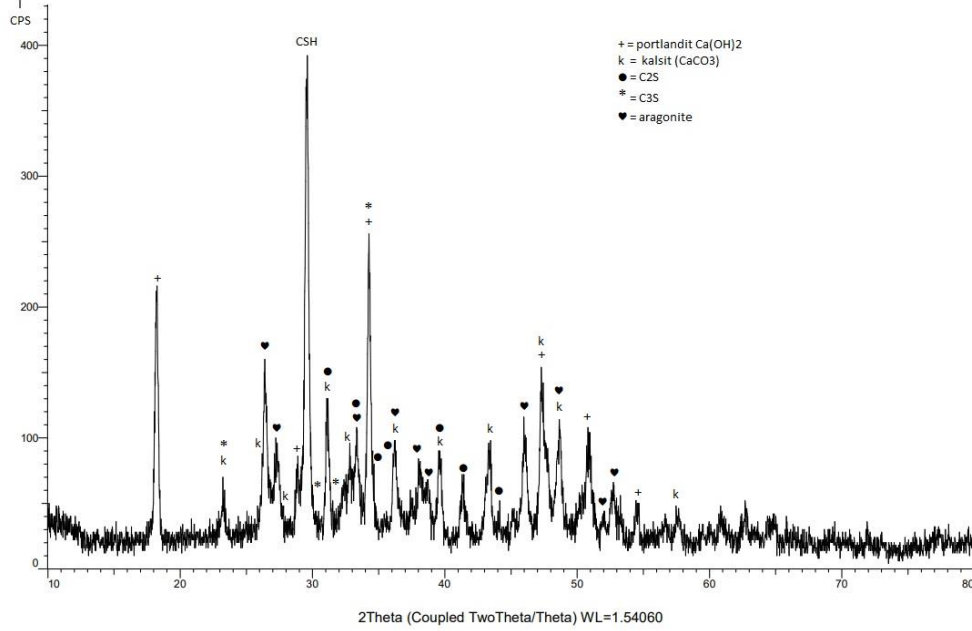
Şekil 4. 6 3 Seri Numaralı Numunenin SEM Görüntüsü ve Çubuksu Bölgenin EDX Analizi.

Mermer tozu katkılı örneğin (Seri 5) Optik Mikroskop görüntüleri Şekil 4.7 ile verilmiştir. Şekil 4.8 ile verilen XRD analizi incelendiğinde yapıda normal çimento hidratasyon fazlarının varlığı gözlenmektedir. Çimento hidratasyonu sonucu oluşan CSH ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fazlarıyla birlikte hidratasyonunu tamamlamayan başlangıç çimento fazları da (C_3S , C_2S)

yapıda gözlenmektedir. Çimento yapıları mermer tozu ilavesi nedeniyle kalsit fazı (CaCO_3) gözlenmektedir. Normal çimento hidratasyon yapısında gözlenmeyen Aragonite fazının varlığı tespit edilmiştir (Şekil 4.8).

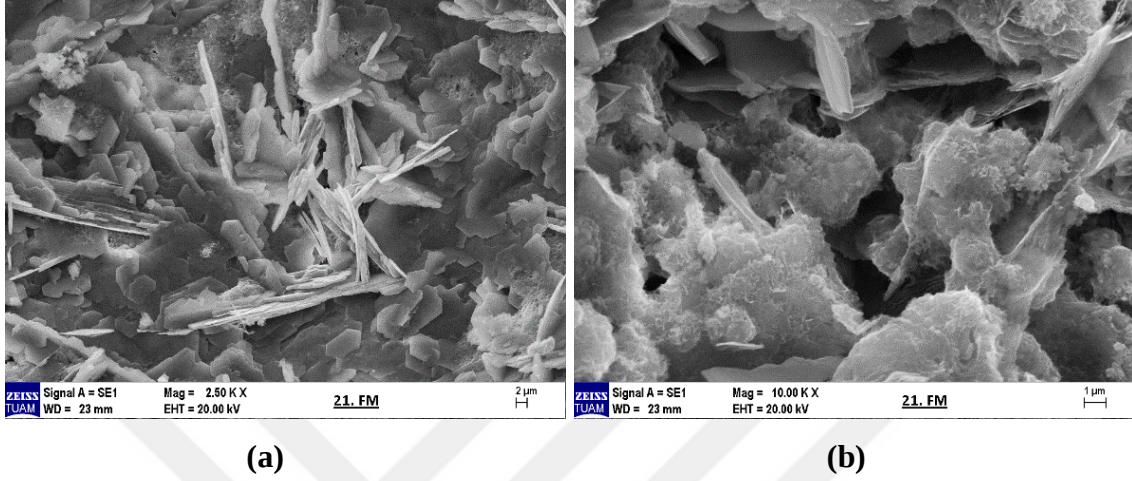


Şekil 4. 7 5 Seri Numaralı Numunenin Optik Mikroskop Görüntüleri.



Şekil 4. 8 5 Seri Numaralı Numunenin XRD Analizi.

Şekil 4.9 (a)'da 5 numaralı numunenin SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.9 (b)'de ise XRD analizini doğrulayacak şekilde Portlandit plakaları, CSH jel oluşumu, aragonit çubukları görüntüde izlenmektedir.



Şekil 4. 9 5 Seri Numaralı Numunenin SEM Görüntüsü.

Özellikle yüksek oranda uçucu kül veya cüruf içeren çimento karışımların belirli şartlardaki (sıcaklık buhar basıncı vb.) hidrasyonunda zeolit karakterli gismondine ve aragonit oluşumlarının varlığı birçok farklı çalışmada belirtilmiştir (Okoronkwo vd 2021, Tang vd 2016, Mohanraj vd 2010, Koçak ve Nas 2014, Liu vd 2021).

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında birim hacim ağırlık değerleri 352-445 kg/m³ aralığında, basınç dayanımı değerleri 1,45-1,76 MPa aralığında ve ultrases geçiş hızı değerleri 1,35-1,72 km/s aralığında olan “Kenevir lifi katkılı köpük beton” numuneleri üretilmiştir. Çalışma sonucunda kenevir liflerinin köpük betonda diğer ticari lifler yerine alternatif lif katkısı olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Kenevir lifinin organik kökenli doğal bir ürün olması sayesinde çevreye duyarlı, yeşil ürünlerin üretimi sürecine dahil edilmesi gerekliliği bu çalışmanın önemini ortaya koymaktadır.

Kenevir lifi katkılı köpük beton örnekleri üretilirken portland çimentosu (CEM 1 42,5 R tipi), uçucu kül, mermer tozu, kenevir lifi, süper akışkanlaştırıcı katkı ve su kullanılmıştır. Numunelerin üretiminde malzemelerin karışım oranlarını belirlemeyi sağlayan standart bir yöntem olmadığı için ön deneme çalışmaları yapılarak kullanılacak malzeme miktarları belirlenmiştir. İstenilen özelliklere sahip kenevir lifi katkılı köpük betonun üretiminde kullanılan malzeme miktarları, malzemelerin karışıma eklenme sırası, karışım hızı ve kürlenme koşulları nihai özellikleri etkilediğinden önem taşımaktadır. Bu sebeple üretim süreci dikkatli takip gerektirmektedir. Çalışmada üretilen kenevir lifi katkılı köpük beton numunelerinin taze haldeki harç özellikleri ve sertleşmiş haldeki beton özellikleri ayrı ayrı incelenmiştir. Taze haldeki harç özellikleri Yayılma deneyi ve Marsh konisi deneyi ile belirlenmiştir. Taze haldeki harç özellikleri üretilen karışımın kıvamı hakkında bilgi sağlamıştır. Sertleşmiş beton deneyleri sonucunda birim hacim ağırlık, basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı değerleri elde edilmiştir. İç yapı incelemeleri ise Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X Işını Kırınımı (XRD) yöntemleri ile yapılmıştır.

Birim hacim ağırlıkları 352-445 kg/m³ arasında olan köpük beton örnekleri üretilmiştir. Üretilen kenevir lifi katkılı köpük beton numunelerine uygulanan tek eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen basınç dayanımı değerleri 1,45-1,76 MPa arasında bulunmuştur. En yüksek birim hacim ağırlık (445 kg/m³) ve basınç dayanımı (1,76 MPa) değerleri uçucu kül katkılı 3 numaralı seri numuneleri ile elde edilmiştir. Bunun uçucu külün puzolanik özelliği ve düzgün yüzeyli tanecik yapısı sayesinde homojen gözenek

dağılımı sağlaması sayesinde olduğu değerlendirilmektedir. Uygulanan ultrases geçiş hızı deneyi sonucunda ise 1,35-1,72 km/s aralığında olan değerler elde edilmiştir.

TS 13655 (2015)'de köpük betonun en düşük basınç dayanımı 1,5 MPa olarak belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında üretilen kenevir lifi katkılı köpük beton serilerinde numunelerin basınç dayanımları 1,5 MPa değerine ulaşmış ve standart değerleri ile uyum sağlanmıştır. Literatürde 0,12-2,78 MPa aralığında basınç dayanımına sahip olan köpük beton numunelerinin üretildiği görülmektedir. Bu tez çalışması kapsamında ise 1,45-1,76 MPa aralığında basınç dayanımına sahip numunelerin üretimi başarıyla yapılmıştır. Böylelikle literatür değerleri bir kere daha desteklenmiştir. Ayrıca kenevir lifi katkılı betonların basınç dayanımının yaşına bağlı olarak arttığı göz önüne alınırsa basınç dayanımı değerlerinin zamanla artabileceği değerlendirilmektedir.

Ultrases geçiş hızı değerleri (1,35-1,72 km/s) incelendiğinde ise elde edilen değerlerin birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum üretilen numunelerin boşluk miktarlarının ve içyapılarının bütün serilerde birbirine yakın olduğunu göstermektedir. Kenevir lifi katkılı köpük beton numunelerinden elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri normal ağırlıklı beton numunelerine göre oldukça düşüktür. Yani ses dalgaları numune içinden daha yavaş geçmektedir. Bu durum köpük betonda daha fazla boşluğun bulunması ile açıklanmaktadır. Ses dalgalarının iletimi için maddesel ortama ihtiyaç vardır, boşlukta iletimi gerçekleşmemektedir. Yüksek miktarda hava boşluğu içermesi sayesinde üretilen kenevir lifi katkılı hafif beton numunelerinde ses dalgaları numune içinde daha yavaş iletilerek, daha düşük geçiş hızı değerleri kaydetmiştir. Bu sayede üretilen bu betonun akustik yalıtımının iyi olduğu kanısına varılabilmektedir. Literatürde köpük beton ile ilgili kayda geçmiş olan çalışmalarda elde edilen ultrases geçiş hızı değerlerinin yaklaşık olarak 1,80-1,95 km/s aralığında olduğu görülmektedir. Bu çalışmada elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri ise 1,35-1,72 km/s arasındadır. Elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri literatür değerlerine yakın olduğu için literatürü desteklemektedir.

Sonuç olarak tez çalışmasında seçilen bileşen oranları ile oldukça düşük birim hacim ağırlığa (352-445 kg/m³) sahip kenevir lifi katkılı hafif betonun üretilebildiği

görülmüştür. Elde edilen basınç değerleri (1,45-1,76 MPa) ve ultrases geçiş hızı değerleri (1,35-1,72 km/s) literatürdeki çalışmaları destekler niteliktedir. Kenevir lifi katkılı köpük betonların yalıtım malzemesi olarak da kullanılabileceği belirlenmiştir. Ancak hala literatürde kenevir lifi katkılı köpük beton ile ilgili bilgi eksikliği bulunmaktadır.



6. KAYNAKLAR

- Abdullah V, Aydın E, Bedirhanoglu İ, 2016, Beton Elastisite Modülünün Ultrasonik Ses Dalgası Yayılma Hızı ile Tahmin Edilmesi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 3, 475-484.
- Acar M, Dönmez A, 2016, Kenevire Farklı Bir Bakış, 2. Ulusal Biyoyakıtlar Sempozyumu, 27-30 Eylül 2016, Samsun, Türkiye, 265-270.
- ACI 523.2R-96, 1996, Guide for Precast Cellular Concrete Floor, Roof, and Wall Units, American Concrete Institute, Michigan, ABD.
- ACI 213R-03, 2003, Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete, American Concrete Institute, Michigan, ABD.
- ACI 544.1R-96, 2002, State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete Reported, ACI Structural Journal, American Concrete Institute, Michigan, ABD.
- Ahlberg J, Georges E, Norlén M, 2014, The Potential of Hemp Buildings in Different Climates, Uppsala Universitet, Teknisk- Naturvetenskapliga Fakultet, Bachelor's Thesis, 40p, Uppsala, Sweden.
- Aitcin P C, 2000, Cements of Yesterday and Today: Concrete of Tomorrow, Cement and Concrete Research, 30, 1349-1359.
- Aldrige D, Dhir R, Newlands M, McCarthy A, 2005, Introduction to Foamed Concrete: What, Why, How?, Use of Foamed Concrete in Construction, 1-14, University of Dundee, Scotland.
- Alkayış M H, Başyigit C, 2021, Lif Katkısının Beton Darbe Dayanımına Etkisi, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 24, 455-462.
- Allin S, 2005, Building with Hemp, Seed press, 192, Kerry, Ireland.
- Allin S, 2012, Building with Hemp, Seed Press, 192, Kerry, Ireland.
- Almgren T, Holmgren L, Martinsson J, 2007, Betong-Och Armeringsteknik, Concrete and Reinforcement Techniques, Sveriges Byggindustrier, 264p, Borås, Göteborg, Swedish.

- Amran Y H, Nima Farzadnia A A, Abang A, 2015, Properties and Applications of Foamed Concrete; a Review, *Construction and Building Materials*, 101, 990-1000.
- Amziane S, Arnaud L, 2013, *Bio-aggregate-Based Building Materials: Applications to Hemp Concretes*, Springer, Dordrecht, 263p, London.
- Altun F, 2006, Çelik Lifli Hafif Betonun Deneysel Araştırılması, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12, 333-339.
- Anonim, 2019, *Kenevir Yetiştiriciliği*, ORAN, Kayseri.
- Anonim, 2022, *Türkiye Hazır Beton Sektörü İstatistikleri*, THBB, İstanbul.
- Arizzi A, Cultrone G, Brummer M, Viles H A, 2015, A Chemical, Morphological and Mineralogical Study on the Interaction Between Hemp Hurds and Aerial and Natural Hydraulic Lime Particles: Implications for Mortar Manufacturing, *Construction and Building Materials*, 75, 375-384.
- Arnaud L, 2000, Mechanical and Thermal Properties of Hemp Mortars and Wools: Experimental and Theoretical Approaches, *Bioresource Hemp 2000& Other Fibre Crops*, 13 Eylül 2000, Wolfsburg.
- Arnaud L, Gourlay E, 2012, Experimental Study of Parameters Influencing Mechanical Properties of Hemp Concretes, *Construction and Building Materials*, 28, 50-56.
- Arnaud L, Amziane S, 2013, *Bio-Aggregate-Based Building Materials: Applications to Hemp Concretes*, ISTE Ltd and John Wiley and Sons, Inc, 332p, ABD.
- Arrigoni A, Pelosato R, Dotelli G, 2016, Hempcrete from Cradle to Grave: The Role of Carbonatation in The Material Sustainability, *International Conference on Sustainable Built Environment Strategies*, 7-11 March 2016, Hamburg.
- Arrigoni A, Pelosato R, Melià P, Ruggieri G, Sabbadini S, Dotelli G, 2017, Life Cycle Assessment of Natural Building Materials: The Role of Carbonation, Mixture Components and Transport in The Environmental Impacts of Hempcrete Blocks, *Journal of Cleaner Production*, 149, 1051-1061.

- Aruntaş H Y, Dayı M, Tekin İ, Birgül R, Şimşek O, 2007, Kendiliğinden Yerleşen Beton Özelliklerine Atık Mermer Tozunun Etkisi, 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, Ankara.
- ASTM C618-05, 2005, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, American Society for Testing and Materials, Pensilvanya, ABD.
- ASTM C173/C173M-16, 2016, Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method, American Society for Testing and Materials, Pensilvanya, ABD.
- ASTM D6910-04, Standart Test Method for Marsh Funnel Viscosity of Clay Construction Slurries, American Society for Testing and Materials, Pensilvanya, ABD.
- Atabey V, 2018, Mermer Atıklarından Köpük Beton Blok Üretimi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 70s, Afyonkarahisar.
- Aytaç S, 2018, Endüstriyel Kenevir Gerçeği ve Ülkemizdeki Durum, Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Endüstriyel Kenevir Gerçeği Paneli, 2-3 Mayıs 2018, Samsun.
- Awang H, Mydin A O, Roslan A F, 2012, Effect of Additives on Mechanical and Thermal Properties of Lightweight Foamed Concrete, Advances in Applied Science Research, 3, 3326-3338.
- Awwad E, Hamad B, Mabsout M, Khatib H, 2010, Sustainable Construction Material using Hemp Fibers-Preliminary Study, Proceedings of the Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Università Politecnica delle Marche, June 28-30, Ancona, Italy.
- Awwad E, Mabsout M, Hamad B, Khatib H, 2011, Preliminary Studies on the Use of Natural Fibers in Sustainable Concrete, The Lebanese Association for the Advancement of Science Journal, 12, June 2011.
- Awwad E, Hamad B, Mabsout M, Khatib H, 2012, Sustainable Concrete Using Hemp Fibers, Institution of Civil Engineers-Construction Materials Journal, 9p.

- Awwad E, Choueiter D, Khatib H, 2013, Concrete Masonry Blocks Reinforced with Local Industrial Hemp Fibers and Hurds, Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 2013, Kyoto.
- Baradan B, Yazıcı H, 2003, Betonarme Yapılarda Durabilite ve TS EN 206-1 Standardının Getirdiği Yenilikler, TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri, 426, 62-69.
- Baradan B, Yazıcı H, Aydın S, 2012, Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, 2012.
- Bedliva H, Isaacs N, 2014, Hempcrete-an Environmentally Friendly Material?, enviBUILD, 1041, 83-86.
- Beningfield N, Gaimster R, Griffin P, 2005, Investigation Into the Air Void Characteristics of Foamed Concrete, International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, July 5, University of Dundee, Scotland, 51-60.
- Bennai F, Abahri K, Belarbi R, Tahakourt A, 2016, Periodic Homogenization for Heat, Air and Moisture Transfer of Porous Building Materials. Numerical Heat Transfer Part B-Fundamentals, 70, 420-440.
- Bennai F, El Hachem C, Abhari K, Belarbi R, 2019, Influence of Hydric Solicitations on the Morphological Behavior of Hemp Concrete, RILEM Technical Letters, 4, 16-21.
- Bentur A, Mindess S, 2006, Fiber Reinforced Cementitious Composites, CRC Press, 595, London.
- Bing C, Zhen W, Ning L, 2012, Experimental Research on Properties of High Strength Foamed Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 24, 113-118.
- Binici H, Çağatay İ H, Kaplan H, 2005, Çimentonun Hidratasyon Isısının Ölçümünde Kullanılan Yöntemlerin Karşılaştırılması, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12, 207-2016.
- Binici H, Eken M, Dolaz M, Aksogan O, Kara M, 2014, An Environmentally Friendly Thermal Insulation Material From Sunflower Stalk, Textile Waste and Stubble Fibres, Construction and Building Materials, 51, 24-33.

- Bouloc P, 2006, *Le Chanvre Industriel – Production et Utilisations*, Ed. France Agricole, 431, Paris, France.
- Bourdot A, Moussa T, Gacoin A, Maalouf C, Vazquez P, Thomachot-Schneider C, vd., 2017, Characterization of an Agro-Material for Building Envelope: Influence of Hemp/Starch Ratio and Hemp Shive Size on Physical, Mechanical, and Hygrothermal Properties, *Energy and Buildings*, 153: 501-512.
- Bourhaneddine H, Boudjemaa A, Abderrahim B, Karim B, 2017, Hygric Properties and Thermal Conductivity of A New Insulation Material for Building Based on Date Palm Concrete, *Construction and Building Materials*, 154, 963-971.
- Boutin M P, Flamin C, 2005, Examination of the Environmental Characteristics of A Banked Hempcrete Wall on a Wooden Skeleton, by Lifecycle Analysis: Feedback on the LCA experiment from 2005, *Bioaggregate- Based Building Materials*, John Wiley & Sons, Inc, 289-312, ABD.
- Brady K C, Jones M R, 2001, *Specification for Foamed Concrete*, TRL Limited, 62p, UK.
- British Cement Association, 1994, *Foamed concrete: Compositions and Properties*, Cambery, UK.
- de Bruijn P, 2008, *Hemp Concretes: Mechanical Properties using both Shives and Fibres*, Swedish University of Agricultural Sciences, Faculty of Landscape Planning, Horticulture and Agricultural Sciences, Bachelor's Thesis, 30, Alnarp, Sweden.
- Building Research Establishment, 2009, *Fire Resistance Test in Accordance with BS EN 1365- 1:1999 on a Lime Technology 3x3m Tradical-Hemcrete loaded wall*, Test Report 250990, UK.
- Callaway J, 2004, Hempseed as a Nutritional Resource: An Overview, *Euphytica*, 140, 65-72.
- Cerezo V, 2005, *Propriétés Mécaniques, Thermiques et Acoustiques d'un Matériau à Base de Particules Végétales: Approche Expérimentale et Modélisation Théorique*, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, L'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Ph. D Thesis, 227p, France.

- Ceyte I, 2008, Etat, Acteurs Privés et Innovation Dans le Domaine des Matériaux de Construction écologiques: Le Développement du Béton de Chanvre Depuis 1986, Institut d'Etudes Politiques de Lyon, L'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, (Master's-Politiques publiques et gouvernements comparés thesis), France.
- Chabannes M, Becquart F, Garcia-Diaz E, Abriak N, Clerc L, 2017, Experimental Investigation of The Shear Behaviour of Hemp and Rice Huskbased Concretes Using Triaxial Compression, *Construction and Building Materials*, 143, 621-632.
- Chandra S, Berntsson L, 2002, Lightweight Aggregate Concrete: Science, Technology and Applications, William Andrew Publishing, 136-138, Norwich, New York, USA.
- Cherney J, Small E, 2016, Industrial Hemp in North America: Production, Politics and Potential, *Agronomy*, 6, 58.
- Colinart T, Glouannec P, Chauvelon P, 2012, Influence of The Setting Process and The Formulation on The Drying of Hemp Concrete, *Construction and Building Materials*, 30, 372-380.
- Collet F, 2004, Caractérisation Hydrique et Thermique de Matériaux de Génie Civil à Faibles Impacts Environnementaux, devant l'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, Thèse de Doctorat, 164p, Rennes.
- Collet F, Pretot S, Chamoin J, Lanos C, 2009, Hydric Characterization of Sprayed Hempcrete, *Fourth International Building Physics Conference*, 15-18.
- Collet F, Prétot S, 2014, Thermal Conductivity Of Hemp Concretes: Variation With Formulation, Density And Water Content, *Construction and Building Materials*, 65: 612-619.
- Daly P, Ronchetti P, Woolley T, 2009, Hemp Lime Bio-compostie as a Building Material in Irish Construction, Wexford: Environmental Protection Agency, 2009-ET-DS-2-S2, Ireland.
- Dartois S, Mom S, Dumontet H, Hamida A B, 2017, An Iterative Micromechanical Modeling to Estimate The Thermal and Mechanical Poperties of Polydisperse Composites with Platy Particles: Application to Anisotropic Hemp and Lime Concretes, *Construction and Building Materials*, 152, 661-671.

- Davraz M, Kılınçarslan Ş, Kuru M, 2015, Farklı Yoğunluktaki Köpük Betonların Dayanım ve Isıl İletkenlik Özellikleri, 9. Ulusal Beton Kongresi, 16-18 Nisan 2015, Isparta, 93-102.
- Dede H, 2019, Köpük Beton Üretiminde Genleştirme Yönteminin Deneysel Yöntemlerle Optimize Edilmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 73 sayfa, Afyonkarahisar.
- Deitch R, 2003, Hemp: American History Revisited: The Plant with a Divided History, Algora Publications, 232p, New York.
- Delannoy G, Marceau S, Glé P, Gourlay E, Guéguen-Minerbe M, Diafi D, vd., 2018, Aging of Hemp Shiv Used for Concrete, Materials & Design, 160, 752-762.
- Demir İ, Doğan C, 2020, Physical and Mechanical Properties of Hempcrete, The Open Waste Management Journal, 13, 26-34.
- Demir İ, Doğan C, 2021, Polymer Fibers and Effects on the Properties of Concrete, Gümüşhane Fen Bilimleri Dergisi, 11, 438-451.
- Demir İ, 2014, Köpük Betonda Rötire Çatlaklarının Engellenmesi Hakkında Teknik Rapor.
- Demir İ, Başpınar M S, Kahraman E, 2017, Köpük Betonun Reolojik Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi, 38, 110-118.
- Demir İ, Başpınar M S, Kahraman E, 2019, Köpük Beton Üretiminde Uygun Akışkanlaştırıcı/Priz Hızlandırıcı Katkı Türünün Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19, 390-400.
- Demirbek D M, Bulut M O, 2021, Kenevir Liflerinin Eldesi, Özellikleri ve Kompozit Uygulama Alanları, Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences, 4, 176-191.
- Demirboğa R, Örüng İ, Gül R, 2001, Effects of Expanded Perlite Aggregate and Mineral Admixtures on The Compressive Strength of Low-Density Concretes, Cement and Concrete Research, 31, 1627-1632.

- Dhakal U, Berardi U, Gorgolewski M, Richman R, 2017, Hygrothermal Performance of Hempcrete for Ontario (Canada) Buildings, *Journal of Cleaner Production*, 142, 3655-3664, 2017.
- Dikici T, 2010, Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 103s, İzmir.
- Ebskamp M J M, 2002, Engineering Flax and Hemp for an Alternative to Cotton, *Trends in Biotechnology*, 20, 229-230.
- Elfordy S, Lucas F, Tancret F, Scudeller Y, Goudet L, 2008, Mechanical and Thermal Properties of Lime and Hemp Concrete (Hempcrete) Manufactured by a Projection Process, *Construction and Building Materials*, 22, 2116-2123.
- Erdoğan T Y, 2015, Beton, 5. Baskı, Metu Press, 741, Ankara.
- EU Commission, Intended Nationally Determined Contribution of the EU and its Member States, 2015.
- Evrard A, 2003, Beton de Chanvre: Synthèse de Propriétés Physiques, Saint Valerien: Association Construire en Chanvre, Saint Valérie. (in French).
- Evrard A, 2003, Hemp concretes: A synthesis of physical properties, Construire en Chanvre, Saint Valerin (in French).
- Evrard A, 2005, Lime and Hemp Concretes: Phenomena of Heat and Mass Transfer and Behavior under Dynamic Stresses, Master of Advanced Studies (DEA), Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium.
- Evrard A, 2006, Sorption Behaviour of Lime-Hemp Concrete and its Relation to Indoor Comfort and Energy Demand, PLEA 2006-The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, 6-8 September 2006, Geneva, Switzerland.
- Evrard A, 2008, Transient Hygrothermal Behaviour of Lime-Hemp materials, Université Catholique de Louvain, Ecole Polytechnique de Louvain, Unité d'Architecture, Ph. D. Thesis, 133p, Belgium.
- Evrard A, de Herde A, 2010, Hygrothermal Performance of Lime-Hemp Wall Assemblies, *Journal of Building Physics*, 34, 5-25.

- Ezeldin A S, Balaguru P N, 1989, Bond Behavior of Normal and High-Strength Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*.
- Faure P, Peter U, Lesueur D, Coussot P, 2012, Water Transfers within Hemp Lime Concrete followed by NMR, *Cement and Concrete Research*, 42, 1468-1474.
- Gedik G, Avinç O O, Yavaş A, 2010, Kenevir Lifinin Özellikleri ve Tekstil Endüstrisinde Kullanımıyla Sağladığı Avantajlar, *Tekstil Teknolojisi ve Elektronik Dergisi*, 4, 39-48.
- Gelim K A M, 2011, Mechanical And Physical Properties of Fly Ash Foamed Concrete, University Tun Hussein Onn, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Master Thesis, 79p, Malaysia.
- Glé P, Gourdon E, Arnaud L, 2011, Acoustical Properties of Materials Made of Vegetable Particles with Several Scales of Porosity, *Applied Acoustics*, 72, 249-259.
- Glé P, 2013, *Acoustique des Matériaux du Bâtiment à Base de Fibres et Particules Végétales-Outils de Caractérisation, Modélisation et Optimisation*, ENTPE, Génie Civil et Bâtiment, Ph. D. thesis, 165, in French.
- Gołębiewski M, 2018, Hemp-Lime Bio-Composites – Review and Analysis of World-Wide Architectural Examples, *Litteris Et Artibus*, 51-54.
- Gourlay E, Glé P, Marceau S, Foy C, Moscardelli S, 2017, Effect of Water Content on the Acoustical and Thermal Properties of Hemp Concretes, *Construction and Building Materials*, 139, 513-523.
- Göre M, Kurt O, 2021, Bitkisel Üretimde Yeni Bir Trend: Kenevir, *International Journal of Life Sciences and Biotechnology*, 4, 138-157.
- Gregor L, 2014, Performance of Hempcrete Walls Subjected to a Standard Time-Temperature Fire Curve, Victoria University, College of Engineering and Science, Master Thesis, 84p, Austria.
- Gross C, Walker P, 2014, Racking Performance of Timber Studwork and Hemp-Lime Walling, *Construction and Building Materials*, 66, 429-435.
- Grundvall M, 2016, Hemp Built, Chalmers University of Technology, Department of Architecture, Master Thesis, 136p, Göteborg.

- Gül M, 2018, Hafif Beton Agregası Olarak Atık Plastiklerin ve Pet'in Kullanımının Araştırılması, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 113s, Elazığ.
- Gülşahin S, 2006, Taze Betonda Segregasyonun Ölçülmesi ve Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 70s, İstanbul.
- Haque M N, Al-Khaiata H, Kayalı O, 2004, Strength and Durability of Lightweight Concrete, Cement & Concrete Composites, Elsevier Ltd., 26, 307-314.
- Hirst E, 2013, Characterisation of Hemp-Line as a Composite Building Material, University of Bath, Faculty of Engineering and Design, Department of Architecture and Civil Engineering, Doctor of Philosophy thesis, 214p, Baht.
- Hoff G C, 1972, Porosity-Strength Considerations for Cellular Concrete, Cement and Concrete Research, 2, 91-100.
- Hroudova J, Zach J, 2014, Acoustic and Thermal Insulating Materials Based On Natural Fibres Used in Floor Construction, World Academy of Science, Engineering and Technology, 8, 1152-1155.
- Hüsem M, 1995, Doğu Karadeniz Bölgesi Doğal Hafif Agregalarından Biriyle Yapılan Hafif Betonun Geleneksel Bir Betonla Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 170s, Trabzon.
- Ip K, Miller A, 2012, Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Hemp-Lime Wall Constructions in the UK, Resources, Conservation and Recycling, 69, 1-9.
- Jami T, Rawtani D, Agrawal Y K, 2016, Hemp Concrete: Carbon-Negative Construction, Emerging Materials Research, 5, 240-247.
- Jami T, Karade S, Singh L P, 2018, Hemp Concrete-A Traditional and Novel Green Building Material, Internataionl Conference on Advances in Construction Materials and Structures, 8, Roorke, India.

- Jones M R, McCarthy A, 2005, Utilising Unprocessed Low-Lime Coal Fly Ash in Foamed Concrete, *The Science and Technology of Fuel and Energy*, 84, 1398-1409.
- Jones M R, McCarthy A, 2005, Behavior and Assessment of Foamed Concrete for Construction Application, *International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction*, July 5, University of Dundee, Scotland, 61-88.
- Kadiroğlu İ, 2006, Kendiliğinden Yerleşen Normal Dayanımlı Hafif Beton Üzerine Deneysel Bir Çalışma, *Beton Köşesi*, 27, 40-48.
- Karakaş Ş, 2018, Sanayi Kenevir Yağının Elde Edilmesi ve Besleyici Özellikleri, *Tarım ve Orman Bakanlığı, İstanbul*.
- Karl S, Worner J D, 1993, Foamed Concrete-Mixing and Workability, *Bartos PJM, Special Concrete-Workability and Mixing*, 217-224, E&FN Spon, 288p, London.
- Kawamata A, Mihashi H, Kaneko Y, Kirikoshi K, 2001, Controlling Fracture Toughness of Matrix for Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites, *Engineering Fracture Mechanics*, 69, 249-265.
- KC P, 2016, Hempcrete Noise Barrier Wall for Highway Noise Insulation, *Research and Construction, Häme University of Applied Sciences, Construction Engineering, Bachelor's thesis*, 55, Finland.
- Kearsley E P, Wainwright P J, 2002, Ash Content for Optimum Strength of Foamed Concrete, *Cement and Concrete Research*, 32, 241-246.
- Kearsley E P, Mostert H F, 2005, Designing Mix Composition of Foamed Concrete with Fly Ash Contents, *International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction*, July 5, University of Dundee, Scotland, 29–36.
- Khan T, Hameed Sultan M T B, Arin A H, 2018, The Challenges of Natural Fiber in Manufacturing, Material Selection, and Technology Application: A Review, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 37, 770-779.
- Khayat K H, Assaad J, 2002, Air-Void Stability in Self-Consolidating Concrete, *ACI Materials Journal*, 4, 408-416.

- Kinnane O, Reilly A, Grimes J, Pavia S, Walker R, 2016, Acoustic Absorption of Hemp-Lime Construction, *Construction and Building Materials*, 122, 674-682.
- Koçak Y, Nas S, 2014, The effect of using fly ash on the strength and hydration characteristic of blendend cements, *Construction and Building Materials*, 73, 25-32.
- Komsi J, 2018, Thermal Properties of Hempcrete, a Case Study, Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, Building Services Engineering, Bachelor's Thesis, 29p, Helsinki.
- Konuk H, Özyurt N, Taşdemir C, Yüceer Z, Sönmez R, 2002, Hafif Betonların Taşıyıcılık Özellikleri, 1. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi, 9-13 Ekim, İstanbul.
- Kozłowski R, Przemysław B, Mackiewicz T M, 2004, IENICA Interactive European Network for Industrial Crops and their Applications, Report from Poland, Available from: <http://www.ienica.net/reports/poland.pdf>, accessed May 12th 2011.
- Ku H, Wang H, Pattarachaiyakoop N, Trada M, 2011, A Review on the Tensile Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites, *Composites Part B: Engineering*, 42, 856–873.
- Kuzielová E, Pach L, Palou M, 2016, Effect of Activated Foaming Agent on the Foam Concrete Properties, *Construction and Building Materials*, 125, 998-1004.
- Kymäläinen H R, Sjöberg A M, 2008, Flax and Hemp Fibres as Raw Materials for Thermal Insulations, *Building and Environment*, 43, 1261-1269.
- Latif E, Lawrence M, Shea A, Walker P, 2015, Moisture Buffer Potential of Experimental Wall Assemblies Incorporating Formulated Hemp-Lime, *Building and Environment*, 93, 199-209.
- Lee Y L, Hung Y T, 2005, Exploitation of Solid Wastes in Foamed Concrete: Challenges Ahead, *International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction*, July 5, University of Dundee, Scotland, 15-22.

- Liu W, Aldahri T, Xu C, Li C, Rohani S, 2021, Synthesis of sole gismondine-type zeolite from blast furnace slag during CO₂ mineralization process, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9, 104652.
- Maalouf C, 2011, Effect of Moisture Transfer on Thermal Inertia in Simple Layer Walls, Case of a Vegetal Fibre Material, *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 5, 33-47.
- Madhavi T C, Reddy M, Kumar P, Raju S, Mathur D, 2015, Behavior of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete, *International Journal of Applied Engineering Research*, 10, 22627-22638.
- Magwood C, 2016, *Essential Hempcrete Construction: The Complete Step-by-Step Guide*, New Society Publishers, 128p, Canada.
- Manania J, Manania A, Rodrigues L, 2019, Industrial Hemp Fibers: An Overview, *Fibers* 2019, 7, 106.
- Manohari N, Sunil H G, Rani D, Kumar A, 2016, Manufacturing of building blocks using Hempcrete, *International Journal of Latest Research in Engineering and Technology (IJLRET)*, 62-73.
- Mansor M R, Mastura M T, Sapuan S M, Zainudin A Z, 2018, *The Environmental Impact of Natural Fiber Composites through Life Cycle Assessment Analysis*, Elsevier, *Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, 257-285, 466, Amsterdam, The Netherlands.
- Mochane M J, Mokhena T C, Mokhothu T H, Mtibe A, Sadiku E R, Ray S S, vd., 2019, Recent Progress on Natural Fiber Hybrid Composites for Advanced Applications: A Review, *Express Polymer Letters*, 13, 159-198.
- Mohammad M, 2011, *Development of Foamed Concrete: Enabling and Supporting Design*, University of Dundee, Philosophy Division of Civil Engineering, A Thesis Presented in Application for The Degree of Doctor, 261p, Nethergate.
- Mohammed H J, Hamad A J, 2014, Materials, Properties and Application Review of Lightweight Concrete, *Revista Tecnica de La Facultad de Ingenieria Universidad Del Zulia*, 37, 10-15.

- Mohanraj K, Sivakumar G, Barathan S, 2010, Hydration Process of Fly Ash Blended Cement Composite, *Int. J. Chem. Sci.* 8, 589-601.
- Motori A, Manzi S, Montecchi M, Canti M, 2012, A Preliminary Study of Physical and Mechanical Properties of Sustainable Hemp Fibers Based Composite Materials for Building Insulated Walls, *ECCM 2012-Composites at Venice*, the 15th European Conference on Composite Materials, June, 24-28, Venice.
- Murphy R J, Norton A, 2008, Life Cycle Assessment of Natural Fibre Insulation Materials, SW7 2AZ, 79p, London, NNFCC.
- Nambiar E, Ramamurthy K, 2007, Air-Void Characterisation of Foam Concrete, *Cement and Concrete Research*, 37, 221-30.
- Nehdi M, Djebbar Y, Khan A, 2001, Neural Network Model for Preformed Foam Cellular Concrete, *ACI Materials Journal*, 98, 402-409.
- Neville A M, Brooks J J, 1987, *Concrete Technology*, Longman Group UK Limited, 464, UK.
- Nguyen T T, Picandet V, Amziane S, Baley C, 2009, Influence of Compactness and Hemp Hurd Characteristics on the Mechanical Properties of Lime and Hemp Concrete, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13, 1039-1050.
- Nguyen T, Picandet V, Carre P, Lecompte T, Amziane S, Baley C, 2010, Effect of Compaction on Mechanical and Thermal Properties of Hemp Concrete, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 14, 545-560.
- Nguyen D M, Grillet A C, Diep T M H, Thuc C N H, Woloszyn M, 2017, Hygrothermal Properties of Bio-Insulation Building Materials Based on Bamboo Fibers and Bio-Glues, *Construction and Building Materials*, 155, 852-866.
- Niu Y, Lu Z, Jiang J, Li J, Zhang Y, 2016, Study on the Preparation and Properties of High Porosity Foamed Concretes Based on Ordinary Portland cement, *Materials and Design*, 92, 949-959.
- Niyigena C, Amziane S, Chateauneuf A, Arnaud L, Bessette L, et al., 2016, Variability of the Mechanical Properties of Hemp Concrete, *Materials Today Communications*, Elsevier, 7, 122-133.

- Oğuz M, 2019, Geri Dönüştürülmüş Betonların Köpük Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 98s, Bartın.
- Okoronkwo M U, Mondal S K, Wang B, Ma H, Kumar A, 2021, Formation and Stability of Gismondine-Type Zeolite in Cementitious Systems, J Am Ceram Soc., 104, 1513–1525.
- Osmanoğlu O Y, 2019, Farklı Minerallerin ve Uçucu Külün Gazbeton Üretiminde Değerlendirilmesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 83s, Bilecik.
- Ören O H, Gençel O, 2017, Köpük Beton, Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi, 5, 129-136.
- Özkul H, Taşdemir M A, Tokyay M, Uyan M, 2004, Her Yönüyle Beton, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul.
- Öztürk M, 2012, Pomza ve Perlit İçerikli Hafif Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 47s, Tekirdağ.
- Page J, Sonebi M, Amziane S, 2017, Design and Multi-Physical Properties of a New Hybrid Hemp-Flax Composite Material, Construction and Building Materials, 139, 502-512.
- Panesar D K, 2013, Cellular Concrete Properties and The Effect of Synthetic and Protein Foaming Agents, Construction and Building Materials, 44, 575-584.
- Pappu A, Pickering K L, Thakur V K, 2019, Manufacturing and Characterization of Sustainable Hybrid Composites Using Sisal and Hemp Fibres as Reinforcement of Poly (Lactic Acid) Via Injection Moulding, Industrial Crops and Products, 137, 260-269.
- Piot A, Béjat T, Jay A, Bessette L, Wurtz E, Barnes-Davin L, 2017, Study of a Hempcrete Wall Exposed to Outdoor Climate: Effects of the coating, Construction and Building Materials, 139, 540-550.

- Protchenko T, 2019, Prototype of Hempcrete Noise Barrier Wall, HAMK Häme University of Applied Sciences, Construction Engineering, Bachelor's thesis, 56p, Visamäki.
- Rahim M, Douzane O, Le A D T, Promis G, Langlet T, 2016, Characterization and Comparison of Hygric Properties of Rape Straw Concrete and Hemp Concrete, *Construction and Building Materials*, 102, 679-687.
- Ramamurthy K, Nambiar E K, Ghandi I S R, 2009, A Classification of Studies on Properties of Foam Concrete, Cement and Concrete Composites, 31, 388-96.
- Ranalli P, Venturi G, 2004, Hemp as a Raw Material for Industrial Applications, *Euphytica*, 149, 1-6.
- Rashid B, Leman Z, Jawaid M, Ishak M R, Al-Oqla F M, 2017, Eco-Friendly Composites for Brake Pads from AgroWaste: A Review, *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 1-21.
- Rilem, 1972, Functional Classification of Lightweight Concretes, *Materials and Structures*, 5, 173-175.
- Rousesel N, 2007, Rheology of Fresh Concrete: From Measurements to Predictions of Casting Processes, *Materials and Structures*, 40, 1001-1012.
- Rudnai G, 1963, *Lightweight Concretes*, Akadémiai Kiadó, 271p, Budapest.
- Santos P A, Giriolli J C, Amarasekera J, Moraes G, 2008, Natural Fibers Plastic Composites in Automotive Applications, *SPE Automotive Composites Conference & Exhibition*, 16-18 September 2008, USA.
- Sari K, Sani A, 2017, Applications of Foamed Lightweight Concrete, *MATEC Web of Conferences*, 97, 1-5.
- Sayadi A A, Vilches T J, Neitzert T R, Clifton G C, 2016, Strength of Bearing Area and Locking Area of Galvanized Strips in Foamed Concrete, *Construction and Building Materials*, 114, 56-65.
- Seng B, Magniont C, Lorente S, 2019, Characterization of a Precast HempConcrete Block, Part II: Hygric Properties, *Journal of Building Engineering*, 24, 44.

- Shea A, Lawrence M, Walker P, 2012, Hygrothermal Performance of an Experimental Hemp-Lime Building, *Construction and Building Materials*, 36, 270-275.
- Short A, Kinniburgh W, 1963, *Lightweight Concrete*, CR Books, 368p, Londra.
- Small E, Cronquist A, 1976, *A Practical and Natural Taxonomy for Cannabis*, Wiley, 25, 405-435.
- Sodagar B, Rai D, Jones B, Wihan J, Fieldson R, 2011, The Carbon-Reduction Potential of Straw-Bale Housing, *Building Research and Information*, 39, 51-65.
- Song W, Gu A, Liang G, Yuan L, 2011, Effect of Surface Roughness on Interfacial Properties of Carbon Fibers Reinforced Epoxy Resin Composites, *Applied Surface Science*, 257, 4069-4074.
- Sparrow W, Stanwix A, 2014, *The Hempcrete Book, Designing and Building with Hemp-Lime*, Green Books, 368, UK.
- Spoljaric S, Genovese A, Shanks R A, 2009, Polypropylene-Microcrystalline Cellulose Composites with Enhanced Compatibility and Properties, *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40, 791-799.
- Şahinbaşkan Y B, 2019, Kenevir Dokuma Kumaşa Enzimatik Ön İşlemlerin Etkisi, *International Journal of Advanced Engineer Pure Science*, 3, 208-213.
- Şahinöz M, 2022, Bitkisel Atık Bazlı Malzemelerin Kompozit Panel Üretiminde Kullanılabilirliği ve Özelliklerin Geliştirilmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 132, Ankara.
- Şimşek O, 2004, *Beton ve Beton Teknolojisi*, Seçkin Yayınevi, 247s, Ankara.
- Şimşek O, 2016, *Beton ve Beton Teknolojisi*, Seçkin Yayınları, 359s, Ankara.
- Tang SW, Cai XH, He Z, Shao HY, Li ZJ, Chen E, 2016, Hydration process of fly ash blended cement pastes by impedance measurement, *Construction and Building Materials*, Volume 113, 939-950.
- Temiz H, Akçakale A H, 2014, Hafif Agregalı Betonun Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4, 7-20.
- Timbrell J, 2007, *Light Concrete LLC*, Private Communication.

- Topçu İ B, 2006, Beton, İnşaat Mühendisleri Odası Eskişehir Şubesi Yayınları, Uğur Ofset A.Ş., Eskişehir.
- Tran-le A D, Nguyen S, Langlet T, 2019, A Novel Anisotropic Analytical Model for Effective Thermal Conductivity Tensor of Dry Lime-Hemp Concrete with Preferred Spatial Distributions, Energy & Buildings, 182, 75-87.
- Tronet P, Lecompte T, Picandet V, Baley C, 2016, Study of Lime Hemp Concrete (LHC) Mix Design, Casting Process and Mechanical Behaviour, Cement and Concrete Composite, 67, 60-72.
- TS 2511, 1977, Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS-1247, 1984, Beton Yapım, Döküm ve Bakım Kuralları (Normal Hava Koşullarında), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 206-1, 2002, Beton-Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 772-1+A1, 2015, Kagit Birimler- Deney Metotları- Bölüm 1: Basınç Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 772-13, 2002, Kagit Birimler- Deney Metotları- Bölüm 13: Kagit Birimlerin Net ve Brüt Kuru Birim Hacim Ağırlıklarının Tayini (Doğal Taş Hariç), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 934-2, 2010, Kimyasal Katkılar- Beton, Harç ve Şerbet için- Bölüm 2: Beton katkıları- Tarifler ve özellikler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1015-3, 2000, Kagit Harcı- Deney Metotları- Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayıma Tablası ile), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12504-4, 2021, Yapılarda Beton Deneyleri, Bölüm 4: Ultrasonik Atılımı Dalga Hızının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 13655, 2015, Kagit Birimler-Özellikleri-Köpük Beton Kagit Birimler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS 1114 EN 13055-1, Hafif Agregalar-Bölüm 1: Beton, Harç ve Şerbette Kullanım için, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Türkmenoğlu Z F, Kılıç A M, Depçi T, 2015, Van Pomzası ve Mermer Tozu Atıkları ile Üretilmiş Kendiliğinden Yerleşen Hafif Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30, 105-116.
- Ulaş E, 2019, Mucize Bitki Kenevir, Gerçek Köye Dönüş Projesi, Hiperlink Eğitim İletişim Yayıncılık San. Paz. ve Tic. Ltd. Şti., 217s, İstanbul.
- U.S. Congressional Research Service, 2019, Defining “Industrial Hemp”: A Fact Sheet.
- Valle-Zermeno R D, Aubert J E, Laborel-Preneron A, Formosa J, Chimenos J M, 2016, Preliminary Study of the Mechanical and Hygrothermal Properties of Hemp-Magnesium Phosphate Cement, Construction and Building Materials, 105: 62-68.
- Valore R C, 1954, Cellular Concrete Part: 1 Composition and Methods of Production, ACI, 50, 773-796.
- Vantreese V L, 2002, Hemp Support: Evolution in EU Regulation, Journal of International Hemp Association, 7, 1-23.
- Yazıcıoğlu S, Bozkurt N, 2005, Pomza Taşı ile Elde Edilen Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi, 15-17 Eylül, Denizli.
- Yılmaz H, 2017, Çimento Türü ve Pomza Agregasının Beton Karakteristiklerine Etkisi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 116s, Düzce.
- Zahan A, Katsarou S, Julien A, 2018, Environmental Benefits of Using Cross-Laminated Timber with Hempcrete Insulation in Buildings, International Conference for Sustainable Design of the Built Environment, 10 December, 96-107.
- Walker R, Pavia S, 2012, Influence Of The Type Of Binder On The Properties Of Lime-Hemp Concrete, 2nd International Conference on Construction and Building Research, 14-16 November 2012, Valencia, Spain.
- Walker R, Pavia S, 2014, Moisture Transfer and Thermal Properties of Hemp-Lime Concretes, Construction and Building Materials, 64, 270-276.

- Walker R, Pavia S, 2014, Impact of Hydration on the Properties of Hemp-Lime Concrete, Civil Engineering Research in Ireland, 2014, 211-215, Belfast.
- Wang Y, Wu H C, Li V C, 2000, Concrete Reinforcement with Recycled Fibers, Journal of Materials in Civil Engineering.
- Wee T H, Babu D S, Tamilselvan T, Lim H S, 2006, Air-Void System of Foamed Concrete and its Effect on Mechanical Properties, ACI Material Journal, 103 ,45-52.
- Williams J, Lawrence M, Walker P, 2018, The Influence of Constituents on the Properties of the Bio-Aggregate Composite Hemp-Lime, Construction and Building Materials, 159, 9-17.

İnternet Kaynakları

- 1) www.foamconcrete.co.uk, 17.06.2021
- 2) www.imecemobil.com.tr, 29.12.2022
- 3) www.npistanbul.com/insanlik-tarihinin-en-eski-ham-maddesi-kenevir,
02.01.2023
- 4) <https://en.wikipedia.org/wiki/Shives>, 13.09.2022
- 5) www.lhoist.com, Lime Technology Ltd., 15.08.2021
- 6) <https://hempblock.co.uk/our-products>, 04.05.2023



