



**KARBON NEGATİF (K-) AGREGALI HAFİF
BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Melik CAMCI

Danışman: Doç. Dr. Meral OLTULU
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2024

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**KARBON NEGATİF (K-) AGREGALI HAFİF BETONLARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

(Investigation of Mechanical Properties of Lightweight Concretes With Carbon Negative (C-)
Aggregate)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Melik CAMCI

Danışman: Doç. Dr. Meral OLTULU

Erzurum
Nisan, 2024

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Melik CAMCI tarafından hazırlanan “Karbon Negatif (K-) Agregalı Hafif Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı çalışması 18/04/2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Malzeme Bilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Cenk KARAKURT <i>Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Meral OLTULU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Fatma KARAGÖL <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır

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

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak *Doç. Dr. Meral OLTULU* danışmanlığında sunulan “Karbon Negatif (K-) Agregalı Hafif Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	13	30
Kuramsal Temeller	9	30
Materyal ve Metot	11	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	6	20
Sonuçlar ve Öneriler	2	20
Tezin Geneli	24	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Melik CAMCI	Doç. Dr. Meral OLTULU
18.4.2024	18.4.2024
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

TEŞEKKÜR

Karbon negatif (K-) agregalı hafif betonların mekanik özelliklerinin incelenmesi konulu yüksek lisans tez çalışmam boyunca bilgi ve deneyimleriyle katkılarını esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Meral OLTULU' ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez yazımı boyunca yönlendirmeleriyle önemli katkılar sağlayan Arş. Gör. Emrah TURAN hocama ve hep yanımda olan kıymetli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde bütün imkanları sağlayan Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne, Budaklar İnşaat Hafriyat Şirketi'ne ve Akalın Bims Blok Firması'na teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca bana hep güvenen, her zaman yanımda olan annem, kardeşlerim ve nişanlıma teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Melik CAMCI

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KARBON NEGATİF (K-) AGREGALI HAFİF BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Melik CAMCI

Danışman: Doç. Dr. Meral OLTULU

Amaç: Bitkisel atıkların yapı malzemesi olarak kullanımı, çevresel sürdürülebilirlik ve yenilenebilir kaynakların değerlendirilmesi amacıyla ilgi gören bir alan haline gelmiş olup bu atıkların kullanımı sürdürülebilirlik, yüksek enerji verimliliği ve ekonomik yönden önemlidir. Bu tez çalışmasında hafif beton karışımlarında alternatif malzeme (pomza agregası ve kenevir sapı) kullanarak hafif beton üretimi konusu ele alınmaktadır.

Yöntem: Çalışmada öncelikle pomza agregası ve kenevir sapı kullanılarak farklı beton karışımları hazırlanmıştır. Karışımların optimum oranları belirlenerek, sonraki aşamada hafif beton numuneleri üretilmiştir. Ön döküm deneyleri sonuçları değerlendirilerek %2,5, %5 ve %7,5 oranlarında kenevir sapı ikamesinin hafif betonlarda kullanılmasına karar verilmiştir. Deney numuneleri ilk olarak 100x100x400 mm boyutlarında üretilerek laboratuvar ortamında ve dış ortam koşullarında kür edilmiştir. Ayrıca karışım grupları bims blok boyutlarında (190x375x185 mm) da üretilerek laboratuvar ortamında kür edilmiştir. Elde edilen numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri, yapısal performansı ve ses yalıtımı gibi önemli özelliklerinin Türk Standartları Enstitüsü (TSE) normlarına uygunluğu incelenmiştir.

Bulgular: Yapılan deneyler sonucunda en düşük birim hacim ağırlığı kenevir sapının %7,5 oranında kullanıldığı, en yüksek basınç dayanım değerleri kenevir sapının %2,5 oranında kullanıldığı, en yüksek maksimum deformasyon değeri kenevir sapının %7,5 oranında kullanıldığı, en yüksek kırılma enerjisi kenevir sapının %2,5 oranında kullanıldığı gruplarda elde edilmiştir.

Sonuç: Çevresel sürdürülebilirlik açısından kenevir sapının hafif betonlarda kullanımı ile dayanımı iyileştirilmiş daha hafif ve sünek bims bloklar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hafif Beton, Bims, Kenevir, Karbon Negatif, Sürdürülebilirlik.

Nisan 2024, 90 Sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

INVESTIGATION of MECHANICAL PROPERTIES of LIGHTWEIGHT CONCRETES WITH CARBON NEGATIVE (C-) AGGREGATE

Melik CAMCI

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Meral OLTULU

Purpose: The use of plant wastes as building materials has become an area of interest for environmental sustainability and utilization of renewable resources. The use of these wastes is important in terms of sustainability, high energy efficiency and economic aspects. In this thesis, the production of lightweight concrete using alternative materials (pumice aggregate and hemp stalk) in lightweight concrete mixtures is discussed.

Method: In the study, different concrete mixtures were prepared using pumice aggregate and hemp stalks. The optimum proportions of the mixtures were determined and lightweight concrete specimens were produced in the next stage. The results of the pre-casting tests were evaluated and it was decided to use hemp stalk substitution at 2.5%, 5% and 7.5% in lightweight concretes. The test specimens were first produced in 100x100x400 mm dimensions and cured in laboratory environment and outdoor conditions. Mixture groups were also produced in pumice block sizes (190x375x185 mm) and cured in the laboratory environment. The physical and mechanical properties, structural performance and sound insulation properties of the specimens were examined for compliance with Turkish Standards Institute (TSE) norms.

Findings: According to the conducted experiments, the lowest unit volume weight was achieved when hemp stalk was used at a rate of 7.5%. The highest compressive strength values were obtained when hemp stalk was used at a rate of 2.5%. The highest maximum deformation value was achieved when hemp stalk was used at a rate of 7.5%. The highest fracture energy was obtained when hemp stalk was used at a rate of 2.5%.

Results: The utilization of hemp stalk in lightweight concrete has improved the strength and resulted in lighter and more flexible concrete blocks from an environmental sustainability perspective.

Keywords: Lightweight concrete, Lightweight concrete blocks, Hemp.

April 2024, 90 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	4
Beton	4
Betonun Sınıflandırılması	5
Hafif Betonlar ve Özellikleri.....	7
Hafif Beton Sınıfları.....	9
Hafif Betonun Özellikleri.....	11
Hafif Agrega.....	12
Pomza.....	14
Bims Blok	19
Sürdürülebilirlik ve Karbon Negatif Kavramı	21
Kenevir.....	23
Kenevirin Yapı Malzemesi Olarak Kullanımı	27
Kenevir Beton (Hempcrete)	28
Literatür Özeti	32
MATERYAL ve YÖNTEM	39
Materyal	39
Pomza.....	39
Çimento	40
Kenevir Sapı.....	40
Su	41
Yöntem.....	41
Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	41
Numunelerin Karışım Oranları	45

Boyut ve Tolerans Analizi	45
Konfigürasyon ve Görünüş Analizi	47
Birim Hacim Ağırlık Analizi	48
Ultrases Geçiş Hızı Deneyi	48
Basınç Dayanım Deneyi.....	49
Eğilme Dayanım Deneyi	50
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	51
Deney Sonuçları.....	51
Boyut ve Tolerans Analizi Sonuçları	51
Konfigürasyon ve Görünüş Analizi Sonuçları	53
Birim Hacim Ağırlık Sonuçları.....	53
Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları	56
Basınç Dayanım Sonuçları.....	57
Eğilme Dayanım Sonuçları	62
SONUÇ VE ÖNERİLER	67
Sonuç.....	67
Öneriler	67
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	78

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Hafif Beton İçin Basınç Dayanım Sınıfları	6
Tablo 2. Birim Hacim Kütlesine Göre Hafif Beton Sınıflandırılması	9
Tablo 3. Bazı Hafif Agregalar ve Özellikleri.....	13
Tablo 4. Pomza Agregasının Kimyasal Bileşenleri	15
Tablo 5. Ülkemizdeki Pomza Kayaçların Genel Fiziksel Özellikleri.....	18
Tablo 6. Ülkemizdeki Pomza Kayaçların Genel Kimyasal Özellikleri	19
Tablo 7. Kenevir Liflerinin Fiziksel Özellikleri	24
Tablo 8. Kenevirin Teknik Özellikleri.....	25
Tablo 9. İllere Göre Kenevir Üretimi	26
Tablo 10. Asidik Pomzaların Genel Özellikleri.....	39
Tablo 11. CEM 1 42,5 R Çimentosunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	40
Tablo 12. CEM 1 42,5 R Çimentosunun Basınç Dayanım Değerleri	40
Tablo 13. 1 m ³ İçin Karışım Oranları	45
Tablo 14. İzin Verilen Sapmalar (mm cinsinden).....	46
Tablo 15. Numunelere Ait Birim Boyutlar	52
Tablo 16. Numunelere Ait İç ve Dış Cidar Kalınlıkları	52
Tablo 17. Numunelerin Özellikleri	53
Tablo 18. Kiriş Numunelerin Birim Hacim Ağırlıkları	53
Tablo 19. Bims Blok Numunelerin Birim Hacim Ağırlıkları	54
Tablo 20. Numunelerin Ultrases Geçiş Hızı Değerleri.....	56
Tablo 21. Kiriş Numunelerine ait Basınç Dayanımı.....	58
Tablo 22. Bims Bloklara Ait Basınç Dayanımları	60
Tablo 23. Numunelere Ait Eğilme Dayanımları.....	63

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Doğal pomza taşı görünümü	14
Şekil 2. Asidik ve bazık pomza taşı görünümü	15
Şekil 3. Türkiye’deki illere göre pomza rezervlerinin yüzdesel dağılımı	17
Şekil 4. a. Basit lifleri olmayan, kenevir sapı b. İşlenmiş Kenevir Lifleri c. Yüksek yoğunluklu kenevir betonu yapmak için kenevir parçaları d. Kenevir lifleri	26
Şekil 5. Kenevir Betonu	29
Şekil 6. Granülometri eğrisi	39
Şekil 7. Kenevir sapı	41
Şekil 8. Pomza agregasının yıkanması ve elek analizi	42
Şekil 9. Pomza agregalarının fırınlama işlemi	43
Şekil 10. Numunelere ait görüntü.....	44
Şekil 11. Bims blok numunelerinin üretimi	44
Şekil 12. Blok elemanları boyutlar ve yüzeyler	46
Şekil 13. Blok elemanlarının boyut ölçüm yerleri	47
Şekil 14. Ultrases ölçüm cihazı	49
Şekil 15. Bims blokların yükleme düzeneği.....	50
Şekil 16. Kiriş numunelerin yükleme düzeneği	50
Şekil 17. Numunelerin ölçümü.....	52
Şekil 18. Kiriş numunelere ait birim hacim grafiği.....	55
Şekil 19. Bims bloklara ait birim hacim grafiği	55
Şekil 20. Numunelere ait ultrases geçiş hızı grafiği.....	56
Şekil 21. Basınç deneyi düzeneği.....	58
Şekil 22. Standart kür edilen numunelerin basınç dayanım	59
Şekil 23. Dış ortam koşullarında kür edilen numunelere ait basınç dayanımı	59
Şekil 24. Kür şartına göre basınç dayanım değişimi	60
Şekil 25. Bims bloklara ait basınç dayanımı (N/mm ²)	61
Şekil 26. Basınç dayanımı – ultrases geçiş hızı arasındaki korelasyon grafiği.....	62
Şekil 27. Deney numunesinin yükleme durumu	62
Şekil 28. Standart kür edilen numunelere ait yük deformasyon grafiği.....	63
Şekil 29. Dış ortam koşullarında kür edilen numunelere ait yük deformasyon grafiği.....	64
Şekil 30. Maksimum deformasyon.....	64
Şekil 31. Kırılma enerjisi	65
Şekil 32. Numunelerin deney sonrası görüntüleri	66

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BSD	Bims Sanayiciler Derneği
cm	Santimetre
cm ²	Santimetrekaire
cm ³	Santimetreküp
CCS	Karbon yakalama ve depolama
D.P.T	Devlet Planlama Teşkilatı
E	Elastisite modülü
EN	Avrupa Normları
FAO	Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü
f_{ck} küp	Küp şekilli numunenin 28 günlük karakteristik basınç dayanımı
f_{ck} sil	Silindir şekilli numunenin 28 günlük karakteristik basınç dayanımı
gr	Gram
KB	Kuru Birim Hacim
Kg	Kilogram
m ²	Metrekare
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
N	Newton
N.m	Newton.metre
THBB	Türkiye Hazır Beton Birliği
TAPGM	Tarım ve Orman Bakanlığı Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü
TOBB	Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği
TS	Türk Standardı
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UPV	Ultrasonik Dalga Hızı
V	Numune Hacmi
W	Watt
WK	Kurutulmuş Hacim
ε	Birim şekil değiştirme
μ s	Mikrosaniye
°C	Santigrat

GİRİŞ

Günümüzde sürdürülebilirlik anlayışı ile çevre dostu malzemelerin kullanımı, yapı sektöründe büyük bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, geleneksel yapı malzemelerinin yerini alabilecek alternatifler araştırılmaktadır. Beton, yapı sektöründe yaygın olarak kullanılan bir malzeme olmasına rağmen, üretimi ve kullanımı sürdürülebilirlik açısından bazı sorunları beraberinde getirebilmektedir. Bu sorunlardan biri de çimentonun yüksek enerji tüketimi ve karbon salınımıdır. Dünya genelinde açığa çıkan karbondioksit emisyonunun yaklaşık %5-8'i, beton üretimi sırasında kullanılan çimentonun üretim sürecinde ortaya çıkmaktadır (Scrivener and Kirkpatrick 2008). Çimentonun yapı malzemelerinde bağlayıcı olarak kullanılması, bazı kimyasal etkilere karşı istenilen dayanıklılığı gösterememesi gibi eksiklikleri de beraberinde getirmektedir (Tuyan 2017). Bu noktada çimento tüketiminin azaltılarak, sürdürülebilir çimento üretiminin artırılması her geçen gün daha da önem kazanmakta, farklı hammadde kullanımı, yeni seçenek olacak yakıt kullanımı, çimento bünyesindeki klinker kullanım miktarının azaltılması ve enerji verimliliği üzerine çalışmalar yürütülmektedir (Ekincioglu vd 2013).

Türkiye Hazır Beton Birliğinin 2022 yılına ait düzenlediği hazır beton sektör raporunda Avrupa Birliği üyesi olan bütün ülkelerin toplam hazır beton üretim miktarı 252,7 milyon metreküp olarak belirtilmiştir. Ülkemiz ise 105 milyon metreküp hazır beton üretimi ile bu kategoride birinci sınıfta bulunmaktadır (THBB 2023). 2021 yılında ülkemizin imzalamış olduğu Paris Anlaşması gereğince 2030 ve 2050 yılında sıfır karbon hedefine ulaşmak için yapı sektöründe beton kullanımının azaltılması bu kapsamda önemli rol oynamaktadır.

Beton yüksek dayanım ve dayanıklılığı gibi avantajları yanında ağırlığından dolayı temele fazla yük bindirmekte ve yapıya etkiyen deprem yükünü artırmaktadır. İnşaat sektöründe bu yüzden bazı yapı bileşenlerinin birim hacim ağırlığının yüksek değerde olması istenmemektedir. Yapıya etkiyen betonun birim hacim ağırlığından kaynaklanan bu yük hafif beton kullanımı ile azaltılabilir (Neville and Brooks 1987).

Ülkemizde son olarak 2023 yılında meydana gelen Kahramanmaraş merkezli 11 ili etkileyen depremler sonrasında T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı'nın yayınlamış olduğu rapora göre 500,000'den fazla yapı hasar görmüş, sosyal hayatı yeniden sağlamak için de bu bölgede 405,505 konut ve 83,149 köy evi inşa edileceği belirtilmiştir. İstanbul Teknik Üniversitesinin bu depremler için yayınladığı nihai raporda "İlgili hasarların önemli bir kısmının, taşıyıcı sistem elemanlarıyla dolgu duvar olarak kullanılan bims beton

blok tuğlalar arasındaki bağlantının deprem sırasında deformasyona izin vermeyecek şekilde inşa edilmiş olması nedeniyle meydana geldiği kanaatine varılmıştır.” denilmektedir (İTÜ Nihai Rapor 2023). Bu ifade her ne kadar taşıyıcı sistem elemanlarıyla bims beton blok tuğlalar arasındaki bağlantıdan bahsetmiş olsa da özellikle deprem bölgelerinde dolgu duvar kullanımında bims blokların özelliklerinin geliştirilmesi, daha sürdürülebilir malzemelerin kullanımı açısından değerlendirilmelidir.

Ülkemizde yaşanan depremler sonrasında pomzadan imal edilerek duvar dolgu malzemesi olarak kullanılan bims blokların mekanik özelliklerinin düşük olduğu, bu özelliklerin geliştirilmesi gerektiği ve sünekliliğinin artırılması gerçeğini göz önüne sermektedir. Birim hacim ağırlığının düşük olmasından dolayı yapı yükünü azaltarak deprem yükünü azaltmada önemli bir rol oynasa da mekanik özellikleri artırılmalıdır. Ayrıca hafif beton üretiminde doğal ve yapay olarak elde edilen diatomit, yüksek fırın cürufu, hızar talaşı, rende talaşı, pomza vb. hafif agregalar kullanılmaktadır. Böylece hem atık maddeler değerlendirilmekte hem de betonun bazı özellikleri değiştirilebilmektedir. Doğal bir malzeme olan pomza ile birlikte yine doğal bio-agrega bazlı ürünler kullanılarak hem çevreci hem de istenilen özelliklerdeki bims bloklar üretilmelidir.

Çevresel, ekonomik ve sosyal bileşenlerden oluşan sürdürülebilirlik kavramında doğal kaynakların ve kültürel mirasın korunmasında çevreye verilecek zararın en az düzeyde tutulması istenmektedir (Tufan ve Özel 2018). Bu kapsamda insanların yaşamını idame ettirmesi için gerekli olan başta barınak olmak üzere yaşama alanlarının inşasında kullanılan alışa gelmiş yapı malzemeleri dışında sürdürülebilir yapı malzemeleri kullanımına yönelim artmıştır. Sürdürülebilir yapı malzemeleri, kullanıldıkları süre zarfında enerji tüketimini minimum seviyede tutarak, hammaddelerin elde edilmesi, işlenmesi, kullanımı, bakım-onarımı ve atık oluşumu aşamalarında çevreye ve insan sağlığına zarar vermeden üretilen malzemelerdir (Sayar vd 2009). Sürdürülebilir yapı malzemelerinin seçimi için yeşil, ekolojik ve işlevsel özelliklerin sağlanmasına dayanan belirli kriterler geliştirilmiştir. Bu kriterler;

- Yapının fonksiyonel gereksinimlerini karşılamalı,
- Teknolojik özelliklere sahip olmalı,
- Geri dönüştürülebilir özelliğe sahip olmalı,
- Düşük toplam maliyete sahip olmalı,
- Malzeme tasarrufu sağlamalı,
- Düşük enerji tüketimi ve kirletici özelliği minimum seviyede olmalı, şeklinde sıralanabilir (Baharetha 2013).

Son yıllarda, araştırmacılar ve mühendisler, çevre dostu ve sürdürülebilir yapı malzemeleri geliştirmek için farklı yaklaşımlar araştırmaktadır. Bu araştırmalar sonucunda inşaat sektöründe bio-agregaların (kenevir, keten, bambu ve ayçiçeği gibi doğal ürünler) yapı malzemesi olarak kullanılabilceğini göstermektedir (Amziane and Arnaud 2013). Bu bağlamda, kenevir alternatif bir yapı malzemesi olarak dikkat çekmektedir. Kenevir bitkisinin tarımı çevresel açıdan olumlu etkiler sağlamaktadır. Kenevir bitkisi büyümeleri esnasında karbondioksit (CO₂) emdikleri için negatif karbondioksit emisyonuna sahiptir (Zahan et al. 2018). Bio-agrega olarak kullanılan kenevir bitkisi, enerji tüketimini minimize ederek çevre kirliliğine sebep olmadan sürdürülebilir inşaata imkân sunmaktadır (Bourhaneddine et al. 2017). Kenevir bitkisi, hızlı büyüme yeteneği, düşük su ve gübre gereksinimi gibi özellikleriyle bilinir. Ayrıca, kenevir bitkisinin sapı, lifli bir yapıya sahip olup, hafif ve dayanıklı bir malzeme olarak kullanılabilir. Kenevir, öncelikle çevre üzerindeki olumlu etkilerinden dolayı yeşil bina tasarımı alanında değerlendirilmektedir (Anonim 2021). Yetiştirilmesi kolay olan ve herhangi bir kimyasal işlem uygulanmasına gerek olmayan bir bitki olan kenevirin sapından elde edilen lif mukavemeti, dayanıklılığı ve nem toleransı ile iyi bilinir (Kozłowski et al. 2004; Grundvall 2016). Ayrıca yapısal olmayan beton bileşimlerinde agrega olarak da kullanılabilir (Delannoy et al. 2018). Kenevir inşaat sektöründe kenevir beton üretiminde “Hempcrete” olarak adlandırılmakta ve kullanılmaktadır. Yapı malzemelerinde kenevir sapı kullanımı hem sürdürülebilirlik hedeflerine yönelik yeni bir perspektif sunacak hem de gelecekteki araştırma ve uygulamalara ışık tutacaktır.

Bahsedilen bu sebeplerden dolayı pomzadan üretilen bims blokların kenevir sapı ile takviye edilerek çevre dostu ve sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesine katkı sağlama ve karbon negatif yapı malzemelerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Hafif beton karışımında kenevir sapsı kullanılarak üretilen bims blokların fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılarak literatürdeki eksik giderilmesi çalışmada amaçlanmaktadır.

KURAMSAL TEMELLER

Beton

İnsan var olduğu süreçten itibaren barınma gereksinimi ortaya çıkmıştır. Bu gereksinim koruma, güvenlik, mahremiyet, konfor ve yaşam faaliyetlerini yerine getirmek için uygun bir mekâna sahip olmayı içermektedir. Buzul çağında mağaralar ile giderilen bu gereksinimler zamanla yetersiz kalmış, ihtiyaçlara karşılık vermemeye başlamasıyla yeni barınma alanları bulma arayışları başlamıştır. Bu arayış insanoğlunu daha kolay ulaşabilecekleri ve şekil verebilecekleri malzemelere yöneltmiştir (Şimşek 2009).

Yaşadığı çevreye göre şekillenen yaşam alanları önce ahşap yapılara daha sonra çamurun bağlayıcılığı ile taş ve toprak yapılara dönmüştür (Bozkurt ve Sayın 2021). Çamurdan sonra kil bağlayıcı olarak kullanılırken bir doğa olayı sonucu kilin pişirilebileceği bulunmuştur. Bu sayede çimento 1824 yılında bir duvarcı ustası tarafından keşfedilmiştir. Çimentonun keşfedilmesinin ardından net tarih bilinemese de yine aynı yüzyılda betonun kullanımının temelleri atılmıştır (Erdoğan ve Erdoğan 2007).

Keşfi ve kullanımıyla beton hayatımızda vazgeçilmez bir yapı malzemesi olmuştur. Genellikle birleştirici özelliklere sahip hidrolik bir bağlayıcı olan çimentoyla birlikte kum ve agrega gibi malzemelerin su ile karıştırılmasıyla elde edilen, gerektiğinde kimyasal ve mineral bir katkı malzemelerinin de kullanıldığı bu karışım kompozit bir yapı malzemesidir (Kocataşkın 1991).

1824 yılında bulunan Portland çimentosuyla birlikte bu yıl modern beton gelişiminin başlangıç yılı olarak kabul edilmeye başlanmıştır (Herzog et al. 2004). 1854 yılında betona çelik takviye edilerek üretilen bir döşeme için ilk defa patent verilmiştir. Portland çimentosu ve agregadan yapılmış düz betona genellikle birinci nesil beton denmektedir. İkinci nesil beton çelik çubuk takviyeli betonu ifade etmektedir (Li 2011). Yapının tekniğine göre boyutları projelendirilen bir kalıp sisteminin içine yerleştirildikten sonra zamanla dayanım kazanan betonun karışımı yaklaşık hacimce %30-40 kaba agrega, %24-28 ince agrega, %7-15 çimento, %14-18 su ve %0,5-8 hava karışımından oluşmaktadır (Özkul vd 2004).

Çeşitli alanlarda kullanılabilen, dayanıklı, maliyet açısından verimli ve görsellik açısından uygun bir yapı bileşeni olan beton (Sev 2009), sudan sonra en büyük kullanım oranına sahip malzeme konumundadır (Aitein 2000). Yol, köprü, bina, baraj, tünel gibi birçok yapıda beton kullanımı yaygındır. Bunun nedeni, betonun sağlamlığı, kimyasal ve fiziksel kaynaklı etkilere karşı dayanıklılığı, kolay işlenebilir özellikleri ve temin kolaylığı gibi avantajlarıdır

(Şimşek 2009). Bu özellikleri barındırmasından dolayı çeşitli yapıların yapımında beton, günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesidir. Dünya üzerinde betonsuz bir çağdaş yaşamın sağlanması ve dönüştürülmesi mümkün değildir. Beton, sıkıştırma kuvvetine karşı yüksek dayanıklılığa sahiptir. Bu nedenle yapıların ağırlığını taşıyabilir ve uzun ömürlü olabilir. Beton, yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır ve yangına karşı dayanıklı bir bariyer oluşturabilir. Bu nedenle, yangın riski olan yapılar için tercih edilen bir malzemedir. İşlenebilirlik özelliği olan beton, döküm öncesi istenilen şekle ve boyuta getirilebilir. Bu, farklı tasarımların ve şekillerin elde edilmesini sağlar. Ayrıca beton, iyi bir ses ve ısı yalıtımı sağlar. Bu nedenle, enerji verimliliği ve konfor açısından avantajlıdır.

İnsanların ihtiyaçlarının sürekli değişimi ile yapı sektörünün gelişmesi beraberinde betonun özelliklerinin araştırılması ve geliştirilmesini kaçınılmaz kılmıştır. Tüm yapı malzemelerinde olduğu gibi betonunda bazı dezavantajları vardır. Üzerine gelen yük etkisi ile kalıcı deformasyonlara uğrayabilmesi, geçirimsizliği, çekme dayanımının düşük olması ve gevrek davranış göstermesi önemli dezavantajları olup ihmal edilmemelidir. Her geçen gün artarak devam eden akademik ve sektörel çalışmalar sonucunda yeni betonlar tasarlanmakta, olumsuz özellikleri iyileştirilmekte, mevcut olumlu özellikleri de geliştirilmektedir.

Betonun Sınıflandırılması

Günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesi olan betonun farklı özelliklerine göre farklı sınıflandırmalar yapılmaktadır. Bu sınıflandırmalardan birim hacim ağırlığına, basınç dayanımına, kıvamına, çevresel etki ve klorür sınıfına göre beton 5 sınıfa ayrılmıştır. (TS EN 206+A2 2021). Yapı ağırlığını azaltma amacı açısından beton birim hacim ağırlığına göre normal, ağır ve hafif beton olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır.

- Normal Beton: Genel inşaat uygulamalarında kullanılan standart betondur. Genellikle çimento, kum, çakıl ve su karışımından oluşur. Birim hacim ağırlığı (yoğunluğu), 2000 kg/m^3 'ten büyük, 2600 kg/m^3 'ten küçük olan betonlardır.
- Ağır beton: TS EN 206+A2 (2021) standardına göre doğal ya da yapay ağır agregalar kullanılarak etüv kurusu durumdaki birim hacim ağırlığı (yoğunluğu), 2600 kg/m^3 'ten büyük olan betonlar ağır betonlar olarak isimlendirilir.
- Hafif Beton: Hafif agregalar (örneğin, hafif agrega, köpük veya genleştirilmiş kil) kullanılarak veya beton içerisinde boşluklar oluşturularak üretilen düşük yoğunluklu bir beton türüdür. Daha düşük ağırlıkla birlikte iyi yalıtım özellikleri sunar. Etüv kurusu durumdaki birim hacim ağırlığı (yoğunluğu), $800\text{-}2000 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir (TS EN 206+A2 2021).

Betonun en önemli özelliğinden olan basınç dayanımı, normal beton, ağır beton ve hafif beton için ayrı ayrı sınıflandırılmıştır. Sınıflandırmada, çapı 150 mm ve yüksekliği 300 mm olan silindir şekilli numunenin 28 günlük karakteristik basınç dayanımı ($f_{ck\ sil}$) veya kenar uzunluğu 150 mm olan küp şekilli numunenin 28 günlük karakteristik basınç dayanımı ($f_{ck\ küp}$) olmak üzere silindir ve küp dayanımı belirlenmiştir. Hafif beton için dayanım sınıfları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Hafif Beton İçin Basınç Dayanım Sınıfları (TS EN 206+A2)

Basınç Dayanım Sınıfı	En düşük karakteristik Silindir Dayanımı $f_{ck\ sil}$ (N/mm²)	En Düşük Karakteristik Küp Dayanımı $f_{ck\ küp}$ (N/mm²)
LC8/9	8	9
LC12/13	12	13
LC16/18	16	18
LC20/22	20	22
LC25/28	25	28
LC30/33	30	33
LC35/38	35	38
LC40/44	40	44
LC45/50	45	50
LC50/55	50	55
LC50/60	55	60
LC60/66	60	66
LC70/77	70	77
LC80/88	80	88

Beton, inşaat endüstrisinde geniş bir kullanım yelpazesine sahip olmakla birlikte çok amaçlı bir malzemedir. Ancak, uygun şekilde tasarlanması, uygulanması ve bakımı önemlidir. Yapıların güvenliği ve dayanıklılığı için betonun doğru şekilde kullanılması büyük önem taşır. Geleneksel beton üstün özelliklerine rağmen belirli durumlarda aranan özellikleri tam anlamıyla sağlayamayabilir veya gereksinimleri karşılamada kısıtlamaları olabilir. Betonun dezavantajlarının olduğu bu durumlara ağırlık, çatlama ve darbe dayanımı, yüksek işçilik maliyetleri, bakım ve onarım ve sınırlı estetik çeşitliliğinin azlığı örnek olarak verilebilir. Geleneksel betonun yoğun bir malzeme olduğu bilinmekte ve yapısal uygulamalarda ağırlık sorunu yaratabilir. Ayrıca geleneksel beton kırılğan bir yapıya sahip olmasından darbeye veya yüksek gerilmelere maruz kaldığında çatlamaya eğilimlidir. Betonun doğal olarak gri ve görece sert bir görünüme sahip olması nedeniyle özellikle mimari açıdan özgün veya dekoratif bir görünüm istendiğinde, geleneksel beton bu gereksinimleri karşılamada yetersiz

kalabilmektedir. Bu gibi durumlarda betonun üretiminde kullanılan malzemelerden üretim yöntemine değin değışiklikler gerekmektedir. Geleneksel beton üretiminden farklı olan bu betonlar özel beton olarak adlandırılır. Bu durumlarda kullanılan özel betonlar, geleneksel betona kıyasla durumu kurtaracak önemli bir alternatif olmaktadır. Özel betonlara hafif betonlar, ağır betonlar, prepakt (önceden yerleştirilmiş agregalı) betonlar, lifli betonlar ve kendiliğinden yerleşen betonlar örnek verilebilir (Şimşek 2009).

Betonun kompozit bir malzeme olma özelliğinden istifade edilerek farklı malzemeler ile belirli oranlarda karıştırılarak betonun karakteristik özellikleri istenilen özellikteki betonun üretimine olanak sağlamaktadır. Yapıda birim hacim ağırlığının düşük olması istenilen durumlarda ihtiyaca cevap verebilmesi adına özel beton olan hafif betonlar kullanılmakta ve sürekli olarak geliştirilmektedir.

Hafif Betonlar ve Özellikleri

Hafif beton, standart betona göre daha düşük bir yoğunluğa sahip olan özel bir beton türüdür. Hafif beton, beton karışımına hafif agregaların yanı sıra hafifleştirici fiziksel veya kimyasal malzemelerin eklenmesiyle elde edilir. Birim hacim ağırlığı (yoğunluğu) 2000 kg/m^3 den düşük olan ve $300\text{-}2000 \text{ kg/m}^3$ arasında değışkenlik gösteren, 28 günlük silindir basınç dayanımı 17 MPa 'dan yüksek olan betonlar hafif beton olarak adlandırılmaktadır (Newman and Choo 2003). TS EN 206+A2 (2021) standardına göre de etüv kurusu durumunda yoğunluğu 800 kg/cm^3 den büyük 2000 kg/cm^3 den küçük olan beton olarak adlandırılmıştır. Hafif betonlar; hafif agrega kullanılarak, köpüklü beton üreterek, gaz beton üretimi ve kum kullanmayarak boşluklu beton elde edilerek üretilebilmektedir (Baradan vd 2015). Hafif betonun kullanılmasıyla;

- Yapı öz ağırlığı azalarak kesitlerde küçölme sağlanır bu da donatı ekonomisini olumlu şekilde etkiler, hafif beton kullanılarak yapılan yapılar, daha hafif olmaları nedeniyle daha az malzeme ve daha küçük temel gerektirebilir (Postacıoğlu 1987),
- Ses, ısı ve yangına karşı dayanıklılık karakteristiğinde gelişmeler olmakta ve önemli derecede avantajlar sağlanır,
- Yapının hem öz hem zati ağırlığının azalmasından dolayı meydana gelecek depremlerden daha az etkilenererek, can ve mal kaybı daha az olur,
- Yalıtım uygulamaları için, iyi bir ses ve ısı yalıtımı sağlar (Turgutalp 1978). Bu nedenle, duvarlar, döşemeler veya çatılar gibi yalıtım özellikleri önemli olan bölgelerde tercih edilebilir. İzolasyon için farklı bir malzeme daha kullanılmayacağından ekonomi sağlanır,

- Beton bünyesinde oluşan bağımsız boşluklar su ile tamamen dolmadığından yangına ve donma çözölmeye dayanımı daha fazla olur, donmadan dolayı meydana gelecek olan içsel gerilmelerden daha az etkilenir,
- Kalıp kesitlerinde azalma sağlanacağından kalıp ve iskele işçiliği ve malzeme maliyeti düşürür (Baradan vd 2015),
- Hafif beton, peyzaj ve bahçe uygulamalarında kullanılabilir. Bahçe sınırları, çitler, süs havuzları, merdivenler ve diğer peyzaj elemanları için hafif beton kullanılarak dayanıklı ve estetik yapılar oluşturulabilir (Özünel ve İmat 2016),
- Hafif beton, enerji verimliliğini artırabilir ve iç mekanlarda daha konforlu bir ortam oluşturabilir.

Hafif betonun normal betonlara göre bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Hafif betonların boşluk miktarının fazla olması ve hafif agrega ile üretilmesinden dolayı normal betona göre daha düşük basınç dayanımına sahip olabilir. Bu nedenle, yapısal uygulamalarda dikkatlice değerlendirilmeli, uygun tasarım ve takviye yöntemleri kullanılmalıdır. Hafif beton, gözenekli yapısı nedeniyle daha yüksek su emme kapasitesine sahip olabilir. Bu durum nem sorunlarına neden olabilir ve betonun dayanıklılığını etkileyebilir. Sünme ve rötne değerleri normal betona göre daha yüksektir. Elastisite modülleri de yine normal betona göre daha düşüktür ve daha fazla şekil değiştirirler (Baradan vd 2015).

Hafif beton, özel uygulamalar, belirli yapısal gereksinimler ve tasarım ihtiyaçları için bir seçenek olabilir, ancak kullanıldığı alan ve gereksinimler dikkate alınmalıdır. Yapısal uygulamalarda kullanılacaksa, mühendislik değerlendirmeleri ve testler yapılmalıdır.

Hafif betonun kökenleri, 19. yüzyılın sonlarına kadar uzanmaktadır. 1840'larda, İngiliz mühendis ve mucit John Smeaton, kömür ve hava kabarcıkları ekleyerek betonun yoğunluğunu azaltan bir yöntem geliştirmiştir. Ancak, hafif betonun modern kullanımı ve gelişimi 20. yüzyılın başlarında hız kazanmıştır (Li 2011).

İkinci Dünya Savaşı sırasında hafif beton, savaş sonrası inşaat faaliyetlerinde yaygın olarak kullanılmıştır. Savaş sonrası dönemde konutların hızla inşa edilmesi gerektiğinden, hafif beton bu talebi karşılamak için ideal bir seçenek olmuştur (Yolcu ve Girgin 2017).

1950'lerde, hafif betonun kullanımı daha da yaygınlaşmıştır. Araştırmalar ve gelişmeler, hafif betonun farklı türlerinin ve bileşenlerinin keşfedilmesini sağlamıştır. Özellikle hafif agrega betonu bu dönemde popülerlik kazanmıştır. Başlangıçta perlit, pomza, tuf vb. volkanik kökenli kayalar, hafif agrega olarak kullanılmıştır. Bu hafif agregalar ince ve iri agrega yerine

kullanılmıştır. Hafif agregaların büyük bir kısmı ince boyutta kullanılmıştır ayrıca bu agregalar puzolanik aktiviteye sahiptir (Chandra and Berntsson 2003).

Günümüzde, hafif beton birçok farklı uygulamada kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe, yapıların ağırlığını azaltmak, enerji verimliliğini artırmak ve ses yalıtımı sağlamak için tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir. Ayrıca, peyzaj uygulamalarında, yolların hafifletilmesinde ve ses yalıtım panellerinin üretiminde de kullanılmaktadır. Hafif betonla yapılmış günümüze kadar ulaşabilen ve yakın zamanlarda hafif beton ile yapılan çok miktarda yapı bulunmaktadır (Gül ve Geçten 1994; Öztok 1997). Amerika’da bulunan Park Plaza Hotel ve Marina City Towers, Avusturya’da bulunan Australia Square bunlara örnek olarak verilebilir. Dünyada hafif beton ile yapılmış en yüksek bina Huston’da bulunan ve 218 metre yüksekliğine sahip One Shell Tower’dır.

Hafif beton sürekli olarak gelişen bir alandır, yeni teknolojiler ve malzemelerle birlikte daha da ilerlemektedir. Böylece daha dayanıklı, enerji verimliliği yüksek ve çevre dostu yapı malzemelerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Hafif Beton Sınıfları

Hafif beton, yoğunluğuna, kullanılan hafif agregaya ve karışım bileşenlerine bağlı olarak farklı sınıflara ayrılabilir. Hafif betonlar genellikle birim ağırlık değerlerine ve dayanım özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Yalıtım betonlarından taşıyıcı özelliği bulunanlara kadar tüm hafif betonlar, özellikle birim ağırlık açısından farklı kabullere tabidir.

Birim hacim ağırlığına göre hafif betonlar birim ağırlıkları $300\text{kg/m}^3 - 800\text{ kg/m}^3$ arasında olanlar yalıtım betonu, 800 kg/m^3 - 1400 kg/m^3 olanlar orta mukavemetli hafif beton, 1400 kg/m^3 den büyük olanlar taşıyıcı hafif beton olarak adlandırılmıştır (Taşdemir 1982). Taşıyıcı hafif betonların birim ağırlığı 1450 - 1800 kg/m^3 arasında değişir ve genellikle birim ağırlık 1600 - 1800 kg/m^3 değerleri arasındadır. Ayrıca dayanım değerleri 7 - 17 N/mm^2 arasında kalan betonlar yalıtım betonu ile orta dayanımlı beton sınıfına girerler (Neville 1975). TS-EN 206+A2 (2021) standardına göre birim hacim kütesine göre hafif betonlar 800 kg/m^3 ’ten 2000 kg/m^3 ’e kadar altı farklı sınıfta gösterilmiş ve bu sınıflandırılma Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Birim Hacim Kütesine Göre Hafif Beton Sınıflandırılması (TS EN 206+A2)

Birim Hacim Kütesi Sınıfı	D 1.0	D 1.2	D 1.4	D 1.6	D 1.8	D 2.0
Birim Hacim Kütle Sınırları (aralığı)- kg/m^3	≥ 800 ≤ 1000	>1000 ≤ 1200	>1200 ≤ 1400	>1400 ≤ 1600	>1600 ≤ 1800	>1800 ≤ 2000

Birim hacim ağırlık değerlerine, basınç dayanımlarına göre sınıflandırılan hafif betonlar üretim yöntemlerine göre de sınıflandırılır. Bu sınıflandırılma, ince agrega olmadan üretilen, hafif agrega kullanılarak üretilen ve yapay olarak üretilen hafif betonlar olmak üzere üç ayrı gruba ayrılmıştır (Uygunoğlu 2008).

Literatürde en sık rastlanılan hafif beton sınıfları aşağıda verilmiştir:

1. Hafif Agregalı Beton (Lightweight Aggregate Concrete): Hafif agregaların kullanıldığı beton türüdür. Hafif agregalar, düşük yoğunluğa sahip malzemelerdir ve betonun genel yoğunluğunu düşürür. Hafif agrega betonu, yapısal ve yalıtım uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Betonun dayanıklılığı, kullanılan hafif agreganın türüne ve betonun bileşimine bağlı olarak değişebilir. Hafif agregaların bazıları doğal olarak mevcutken bazıları da doğal malzemelerden veya endüstriyel yan ürünlerden üretilir. Diatomit, pomza, volkanik cüruf ve tuf doğal agregalar grubundandır. Diatomit dışında geriye kalanlar tümü volkanik kökenlidir. Yapısal betonda kullanılan doğal malzemelerden elde edilmiş olan hafif agregalar ise genleştirilmiş kil, şeyl ve arduvazdır. Genleştirilmiş şeyl ve kil agregası ile üretilen beton diğer hafif agregalarla üretilmiş betonlara göre daha yüksek dayanıma sahiptir (Neville 1995).

2. Hücresel Beton (Cellular Concrete): Hücresel beton, beton karışımına hava kabarcıkları eklenerek üretilen bir hafif beton türüdür. Bu kabarcıklar, betonun yoğunluğunu azaltır ve aynı zamanda betonun yalıtım özelliklerini artırır. Hücresel beton, dolgu, yalıtım ve ses emilimi gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Hücresel beton, hafif agrega betonuna kıyasla daha düşük yoğunluk ve daha yüksek yalıtım özellikleri sunar (Bekaroğlu 2012).

3. Yüksek Mukavemetli Hafif Beton (High-Strength Lightweight Concrete): Yüksek mukavemet gerektiren uygulamalar için özel olarak formüle edilen bu beton, özel olarak seçilen hafif agregalar ve uygun katkı maddeleri kullanılarak üretilir. Bu beton türü, hafif yapılarda ve köprülerde kullanılan strüktürel elemanlarda yaygın olarak kullanılır. Genellikle çelik lif ilavesiyle betonda basınç ve çekme değerleri iyileştirilerek mukavemet normal betona yaklaştırılır. Yüksek mukavemetli hafif betonlarda, lifler yardımı ile taze haldeki betonun işlenebilirlik özelliği artırılabilir, kıvam ve segregasyonu azaltılır (Şatır 2000). Bu etkiler ise kullanılan lifin cins ve miktarına göre değişmektedir (Chen and Liu 2005).

4. Köpük Beton (Foamed Concrete): Beton karışımına köpük eklenerek üretilen bir hafif beton çeşididir. Köpük, betonun içinde homojen bir şekilde dağılır ve betonda hava kabarcıklarının oluşmasına neden olur. Bu kabarcıklar, betonun yoğunluğunu azaltır ve hafif bir yapı malzemesi elde edilir. İhtiva ettiği kabarcıklardan oluşan kapalı gözenekler bulundurulur ve bu gözenekler betonun hacmen %75- %80'ini oluşturur (Ekinci 2013). Taze halde köpük betonlar düşük viskoziteye sahiptir. Sertleşmiş halde yoğunluğu ve ısı iletkenliği düşük

değerlerdedir. Genelde 1- 43 MPa (28 günlük basınç dayanımı) değerinde basınç mukavemetine ve 300-1600 kg/m³ arasında yoğunluğa sahiptir (Oğuz 2019). Köpük beton, dolgu malzemesi olarak kullanıldığı dolgu uygulamalarında yaygın olarak kullanılır.

Bu sınıflandırmalar, hafif betonun farklı özelliklerini ve kullanım alanlarını göstermektedir. Seçilecek olan hafif beton türü, yapılan uygulamanın gereksinimlerine ve beklentilere bağlı olarak belirlenmelidir. Hafif beton, çimento, su, agrega ve hafif agrega kullanılarak üretilen bir beton türüdür (Sağlam vd 2022).

Hafif Betonun Özellikleri

Hafif betonun fiziksel ve mekaniksel özellikleri, kullanılan bileşenlere ve karışım oranlarına bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Buna rağmen hafif betonlar genelde aşağıdaki özelliklere sahip olma eğilimindedirler:

1. Yoğunluk: Hafif beton, geleneksel ağır betona kıyasla daha düşük yoğunluğa sahiptir. Yoğunluk, hafif agreganın türüne ve oranına bağlı olarak değişir. Hafif betonun yoğunluğu genellikle 300 kg/m³ ile 2000 kg/m³ arasında değişebilir (Newman and Choo 2003).

2. Mukavemet (Dayanım): Hafif betonun mukavemeti, kullanılan malzemelerin ve karışım oranlarının yanı sıra betonun yoğunluğuna da bağlıdır. Genellikle, hafif betonun mukavemeti 0,3 MPa ile 70 MPa arasında değişir. Yüksek mukavemetli hafif betonlar, daha yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılan özel formülasyonlardır ve mukavemetleri genellikle 40 MPa'nın üzerindedir (Neville 1995).

3. Isıl Özellikler: Hafif beton, genellikle iyi bir termal yalıtım özelliğine sahiptir. Hafif agregalar ve hava boşlukları, betonun termal iletkenliğini azaltır, bu da ısı transferini engeller. Bu, enerji verimliliğini artırır ve yapıların ısı kontrolünde yardımcı olur (Öztürk 2019).

4. Ses Yalıtımı: Hafif beton, iyi bir ses yalıtımı sağlayabilir. Hava boşlukları ve hafif agregalar, ses dalgalarının yayılmasını engeller ve yapının içindeki veya dışındaki sesin emilimini artırır. Bu özellik, ses izolasyonu gerektiren uygulamalarda kullanılmasını sağlar (Gündüz vd 1998).

5. Aşınma Direnci: Hafif beton, aşınma direnci konusunda geleneksel ağır betona kıyasla daha düşük olabilir. Bu nedenle, yüzeylerin aşınmaya maruz kalacağı uygulamalarda ek koruyucu kaplamalar veya yüzey işlemleri gerekebilir (Kadiroğlu 2006).

6. İşlenebilirlik ve Elastiklik: Hafif beton genellikle işlenebilir bir malzemedir. İyi işlenebilirlik, düşük yoğunluğu nedeniyle hafif betonun kolayca dökülmesini ve yerleştirilmesini sağlar (Uygunoğlu 2008).

Hafif betonun spesifik özellikleri, kullanılan bileşenler, karışım oranları, katkı maddeleri ve uygulama amaçlarına bağlı olarak yukarıda bahsedilen özelliklerden farklılık gösterebilir. Hafif betonun elde edilmesinde genel olarak hafif agregalar kullanılmaktadır.

Hafif Agregalar

Hafif agregalar, hafif betonun üretiminde kullanılan malzemedir. Hafif agregalar, TS EN 206+A2 (2021) “Beton” standardına ve TS EN 13055 (2016) “Hafif Agregalar” standardına göre tanımı tane yoğunluğu 2000 kg/m^3 ’ü veya gevşek yığın yoğunluğu 1200 kg/m^3 ’ü aşmayan düşük yoğunluğa sahip olan agregalardır. Ayrıca betonun genel yoğunluğunu azaltan mineral kökenli malzemelerdir (Neville 1995). Hafif agregalar, betonun ağırlığını azaltarak pek çok avantaj sağlar, özellikle yapısal performans, enerji verimliliği ve taşıma kolaylığı gibi alanlarda önemli bir rol oynar.

Hafif agregalar başlıca beş gruba ayrılabilir. Bunlar;

- Doğal hafif agregalar: Pomza, volkanik tüf ve cüruf,
- Doğal malzemelerden üretilen yapay hafif agregalar: Genleştirilmiş perlit, genişletilmiş kil, şist ve arduvaz,
- Endüstriyel atıklardan oluşan hafif agregalar: cüruf, uçucu kül,
- Organik hafif agregalar: Fındık kabuğu, bambu, keten ve kenevir,
- Polimer kökenli malzemeler: strafor köpük ve plastik atıklar (Ceylan 2005).

Hafif agregalar, normal agregalar yerine boşluk miktarı çok daha yüksek, genellikle doğal veya yapay kaynaklardan elde edilir. Yaygın olarak kullanılan hafif agregaların bazı örnekleri aşağıda verilmiştir (Neville 1995).

Genleşmiş Kil (Expanded Clay): Genleşmiş kil, doğal kilin yüksek sıcaklıkta ısıtılmasıyla elde edilen bir hafif agregadır. Kil parçacıkları, ısınma sırasında kabarcıklar oluşturarak genişler. Bu kabarcıklar, genleşmiş kilin düşük yoğunluğunu sağlar. Genleşmiş kil, hafif beton, hafif dolgu malzemeleri ve yalıtım uygulamalarında sıklıkla kullanılır.

Perlit (Perlite): Perlit, volkanik camın yüksek sıcaklıkta şişirilmesiyle elde edilen bir hafif agregadır. Şişirme işlemi, perlit parçacıklarında hava kabarcıklarının oluşmasını sağlar. Perlit, hafif beton, hafif sıva ve yalıtım malzemelerinde kullanılır.

Vermikülit (Vermiculite): Vermikülit, mika mineralinin ısıtılmasıyla elde edilen bir kil minerali olup tabakalı bir yapıya sahip hafif agregadır. Isıtma işlemi, vermikülit parçacıklarının genişlemesine, tabakaların birbirini iterek hava boşluklarının oluşmasına ve

hacimce 30 kat artışa neden olur (Baradan vd 2015). Vermikülit, hafif beton, hafif dolgu malzemeleri ve yalıtım uygulamalarında kullanılır.

Polistiren Köpük Boncukları (Expanded Polystyrene Beads): Polistiren köpük boncukları, polistiren malzemenin ısıtılmasıyla şişirilerek elde edilen bir hafif agrega türüdür. Bu boncuklar, hafif beton ve hafif dolgu malzemelerinde kullanılarak düşük yoğunluklu yapılar oluşturmayı sağlar (Canbaz ve Ezici 2022).

Mindess et al. (2002) tarafından verilen bazı hafif agregaların kuru birim hacim ağırlık değerleri, kaynağı ve su emme özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Bazı Hafif Agregalar ve Özellikleri

Agrega	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Kaynak	Su Emme (%)
Genleştirilmiş kil, Şeyl, Silt	550-1050	İşlenmiş Doğal	5-15
Cüruf	500-1000	Sanayi atığı	5-25
Sinterlenmiş uçucu kül	600-1000	Sanayi atığı	14-24
Tabakalarına ayrılmış vermikülit	65-250	İşlenmiş Doğal	20-35
Genleştirilmiş Perlit	65-250	İşlenmiş Doğal	10-50
Sünger taşı	-	Doğal	-
Genleştirilmiş cam	250-500	Sentetik	5-10
Genleştirilmiş polistiren tanesi	30-150	Sentetik	-
Tuğla kırıkları	~750	Sanayi atığı	19-36

Hafif agregaların kullanıldığı betonların dayanımı düşük olmasına rağmen yüksek performanslı hafif betonun üretilebileceği konusunda son zamanlarda pek çok çalışma yapılmıştır. Örneğin pomza ile metakaolin, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve hiper akışkanlaştırıcı kullanılarak üretilen betonların su/bağlayıcı oranı 0,25-0,35 değerlerinde ve dayanımı da 20 MPa ile 79 MPa değerlerini aldığı görülmüştür. (Yolcu 2018).

Hafif agregalar, hafif betonun yoğunluğunu azaltırken aynı zamanda termal yalıtım ve ses yalıtımı özellikleri sağlar. Ayrıca, hafif agregaların taşınması ve yerleştirilmesi normal agregaya göre daha kolaydır. Ancak, hafif agregaların mukavemeti genellikle geleneksel ağır agregalardan daha düşüktür, bu nedenle yapısal uygulamalarda dikkatli bir şekilde kullanılmalıdır. Dünyada ve ülkemizde hafif beton üretiminde kullanılan hafif agregaların büyük bir bölümünü pomza agregası oluşturmaktadır.

Pomza

Pomza, hafif beton üretiminde kullanılan bir hafif agrega türüdür. Pomza, volkanik bir kayadır ve volkanik patlamalar sırasında lavın hızla soğuması ve gaz kabarcıklarının oluşmasıyla birlikte oluşur. Pomza iri agregasının, ince agregasının ve tozunun özgül ağırlığı sırasıyla 0,82 gr/cm³ ile 2,17 gr/cm³, 1,18 gr/cm³ ile 2,52 gr/cm³ ve 2,04 gr/cm³ ile 2,85 gr/cm³ arasında değişmekte (Rashad 2019) ise de birim hacim ağırlığı genellikle 1 gr/cm³'ten daha azdır (TS EN 771-3+A1 2015). Maksimum gözenekliliği %85'e ulaşabilir, bu da toplam hacmin %85'inin hava içerdiği ve sadece %15'inin katı malzeme içerdiği anlamına gelir (Klaus and Gernot 1990). Pomza agregası, betonun ağırlığını azaltarak yapısal performansı iyileştirirken aynı zamanda enerji verimliliği de sağlar. Pomza ayrıca iyi bir termal yalıtım özelliğine sahiptir ve ses yalıtımı sağlama potansiyeline sahiptir (Bilgil vd 2015).

Pomza, genellikle silisyum dioksit (SiO₂) ile başlayan ve alüminyum oksit (Al₂O₃), demir oksit (Fe₂O₃), kalsiyum oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO), potasyum oksit (K₂O) ve sodyum oksit (Na₂O) gibi elementleri içeren bir bileşimden oluşur ve bu elementlerin pomza içerisindeki oranları Tablo 4'te verilmiştir (BSD 2006). Bünyesindeki silis oranı rengini etkileyen bir faktör olup, beyaz, kirli beyaz, açık gri ve grimsi renklere sahip olabilir (Şekil 1). Pomza volkanik oluşum mekanizmasına göre asidik ve bazik karakterli olabilir. Asidik pomzalar genellikle açık renkte ve yeryüzünde en yaygın olarak bulunan pomza oluşumlarıdır (Gündüz vd 1998). Bazik pomzalar ise genellikle koyu renklerde olmaktadır (Şekil 2).



Şekil 1. Doğal pomza taşı görünümü (Rashad 2019)

Tablo 4. Pomza Agregasının Kimyasal Bileşenleri

Kimyasal Bileşenler	
Silisyum dioksit (SiO_2)	52-75
Alüminyum oksit (Al_2O_3)	11,0-17,0
Demir oksit (Fe_2O_3)	0,5-5,0
Kalsiyum oksit (CaO)	1,0-8
Magnezyum oksit (MgO)	0,5-3
Sodyum oksit + Potasyum oksit ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)	3-9
Titanyum oksit (TiO_2)	<1
Sülfür trioksit (SO_3)	<1
Ateş Zaiyatı (A.Z.)	1-3

Pomza inşaat yapılarında çok eski uygarlıklar tarafından kullanılmıştır. Van gölü havzasında yaşayan uygarlıklar ülkemizde pomza agregasını inşaat yapılarında ilk kullanan uygarlıklardan olmuştur. Yapılan araştırmalarda Urartular döneminde yapılarda ve gıdaların muhafaza edilerek bozulmadan saklandığı depolarda, yalıtım malzemesi olarak tercih edildiği görülmüştür. Bu bölgede yapılan arkeolojik çalışmalarda depolama için kullanılan diğer ürünlerin alt bölümleri ve etrafının geniş bir pomza taşı katmanı ile kaplandığı ortaya çıkarılmıştır (Belli 2007).

**Şekil 2.** Asidik ve bazik pomza taşı görünümü

Hafif betonda pomza kullanımı, yapıların hafif olması, daha iyi ısı yalıtımı sağlaması ve daha kolay işlenebilmesi gibi avantajlar sunar. Ancak pomzanın mukavemeti geleneksel ağır agregalara kıyasla daha düşüktür, bu nedenle yapısal uygulamalar için uygun karışım oranları ve kalite kontrolleri dikkatlice yapılmalıdır. Pomza, hafif betonun yanı sıra hafif dolgu malzemeleri, yalıtım panelleri ve hafif tuğlalar gibi diğer inşaat uygulamalarında da kullanılabilir.

Gündüz (2008), yapmış olduğu bir çalışmada agrega olarak pomza, bağlayıcı olarak imento kullanarak ürettiği numunelerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Farklı oranlarda yaptığı karışımlar ile ideal karışımın %25 ince, %25 orta irilikte ve %50 kaba agrega olacak şekilde olduğunu söylemiştir. Numunelerde kullanılan agrega oranının imento oranına göre azalmasının basınç dayanımını arttırdığını ve ısı yalıtım özelliğini de geliştirdiğini saptamıştır. Ayrıca agrega/imento karışım oranında 25:1 oranına kadar olan karışımların taşıyıcı özellikteki elemanlarda, bu orandan daha fazla olan agrega/imento karışımlarının ise taşıyıcı özelliği olmayan veya taşıyıcı özellik istenmeyen blok elemanlarında kullanılmasının uygun olacağını tespit etmiştir.

Cavaleri et al. (2003), yaptığı çalışmada pomzanın yapısal hafif beton elemanlarının yapımında bir seçenek olup olamayacağını araştırmıştır. Yaptıkları deneyler sonucunda yapısal hafif betonların mekanik ve fiziksel özelliklerini karşılaştırmış ve yapısal panellerde kullanılabilirliğini, özellikle pomza kaynaklarının bulunduğu bölgelerde yatay yüklere karşı aşırı dayanım gerekmeyen yapısal elemanlarda kullanılmasının iyi bir seçenek olacağını belirtmiştir.

Bu çalışmaların yanı sıra imento esaslı olmayan bağlayıcılar ile evre dostu, karbon negatif özelliği bulunan malzeme üretme isteği artış göstermekte ve yapılan bazı araştırmalar pomza agregasının öğütölerek bağlayıcı olarak da kullanılabileceğini göstermektedir (Abbas et al. 2023).

Pomza, geniş bir kullanım yelpazesine sahip olan bir malzemedir. Pomzanın yaygın olarak kullanıldığı bazı alanlar şu şekildedir;

1. Yapı Malzemeleri: Pomza, hafif betonun üretiminde kullanılan önemli bir bileşendir. Hafif beton, yapıların daha hafif olmasını sağlar, enerji verimliliğini artırır, ısı ve ses izolasyonu sağlar. Pomza ayrıca hafif dolgu malzemeleri, yalıtım panelleri, hafif tuğlalar ve prefabrike yapı elemanları gibi diğer yapı malzemelerinde de kullanılabilir (Gündüz vd 1998).

2. Yalıtım Malzemeleri: Pomza, termal yalıtım malzemelerinin üretiminde kullanılır. Pomza yalıtım panelleri, çatı izolasyonu, döşeme izolasyonu ve duvar izolasyonu gibi uygulamalarda kullanılabilir. Pomza, düşük ısı iletim katsayısı ve hafifliği sayesinde enerji tasarrufu sağlayan etkili bir yalıtım malzemesidir (Bilgil vd 2015).

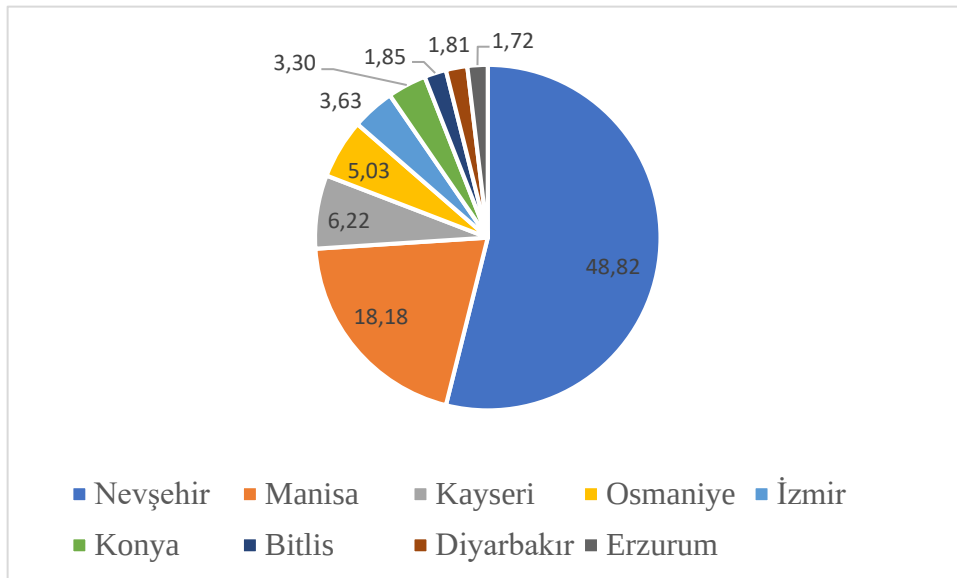
3. Bahçecilik ve Peyzaj: Pomza, bahçecilik ve peyzaj uygulamalarında da kullanılır. Hafif yapısı sayesinde toprakta iyi bir drene sahip olmayı sağlar. Toprak karışımlarına katılarak toprağın havalanmasını ve su tutma kapasitesini artırır. Ayrıca pomza, bitki köklerinin sağlıklı bir şekilde büyümesine yardımcı olur.

4. Hafif Dolgu Malzemeleri: Pomza, hafif dolgu malzemelerinin üretiminde kullanılır. Hafif dolgu malzemeleri, zemin iyileştirme, drenaj uygulamaları, otoparklar ve spor sahalarının alt dolgu tabakaları gibi alanlarda kullanılır. Pomza, düşük yoğunluğuyla zemin mukavemetini artırırken ağırlığı azaltır ve yer altı suyu drenajını iyileştirir (Gündüz vd 1998).

5. Perlit ve Vermikülit Alternatifi: Özellikle yalıtım malzemeleri ile hafif beton üretiminde pomza; perlit ve vermikülit gibi diğer hafif agregaların yerine kullanılabilecek alternatif bir hafif agregası olarak tercih edilebilir.

Pomzanın kullanımı, malzemenin özelliklerine, yerel kaynaklara ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle pomza, popüleritesini kaybetmemekte ve dünya üzerinde elliden fazla sanayi alanında değişik amaçlarda halen kullanılmaktadır. Pomza taşının, düşük birim hacim ağırlığı, ses ve ısı izolasyonun da başarılı olması, yüzeyinin pürüzlü olmasından dolayı kolay sıva tutması ve diğer seçeneklerine göre daha ekonomik oluşu tercih edilirliliğini arttırmıştır. Pomza çimento ile preslenerek hızlı ve kolay işçilik gerektiren dekoratif yapı elemanlarının üretiminde de kullanılmaktadır (Köse vd 1997).

Türkiye, pomza üretimi ve kullanımı açısından zengin kaynaklara sahip olan bir ülkedir. Türkiye'de pomza, özellikle Kayseri, Nevşehir, Aksaray, Niğde ve Malatya gibi bölgelerde bulunur. İç Anadolu bölgesi en fazla olmakla birlikte Bitlis, Diyarbakır ve Balıkesir'de üretim faaliyetleri bulunmaktadır. Bu bölgeler, volkanik aktivitenin yoğun olduğu alanlardır ve bu nedenle pomza kaynaklarına sahiptir. Şekil 3'te ülkemizde bulunan pomza rezervlerinin yüzdesel olarak dağılımı verilmiştir (Eroğlu ve Şahiner 2020).



Şekil 3. Türkiye'deki illere göre pomza rezervlerinin yüzdesel dağılımı

Pomzanın dünya genelinde belirlenen rezervi yaklaşık 18 milyar ton civarındadır. ABD, Türkiye ve İtalya pomza kaynaklarının en fazla bulunduğu ülkeler arasında bulunmaktadır. Ülkemizdeki pomza rezervinin 2,8 milyar ton civarında olduğu bilinmektedir. Verilere göre ülkemizdeki pomza rezervi miktarı, Dünya pomza rezervinin %15,8'ine tekabül etmektedir. Türkiye ile İtalya pomza üretimi konusunda en çok söz sahibi olan ülkedir (Crangle 2012). Dünya'da 2018 yılında pomza ve ilişkili materyallerin üretimi 18,1 milyon ton olarak gerçekleşmiştir (Eroğlu ve Şahiner 2020). Maden ve Petrol işleri genel müdürlüğü verilerine göre 2012 yılında 12,2 milyon ton pomza üretilmiş daha sonraki yıllarda ise giderek azalmıştır. Ülkemizde maden ocaklarından çıkarılan pomzanın yaklaşık %80'i inşaat endüstrisinde kullanılmakta, yukarıda detaylı bir biçimde anlatıldığı üzere inşaat sektöründe pomza; hafif beton, hafif dolgu malzemeleri ve yalıtım panelleri gibi yapı malzemelerinin üretiminde daha sık kullanılmaktadır. Ayrıca, bahçecilik ve peyzaj uygulamalarında toprak iyileştirme amacıyla da kullanılmaktadır.

Pomza, Türkiye'de yerel olarak çıkarılan bir malzemedir ve genellikle çevresel etkileri minimize etmek amacıyla sürdürülebilir bir şekilde işlenir. Pomza çıkarma ve işleme süreçleri, yerel yönetmeliklere ve çevre koruma standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmektedir. Ülkemizdeki pomza kayaçlarının genel fiziksel özellikleri Tablo 5'te, kimyasal özellikleri ise Tablo 6'da verilmiştir (BSD 2006).

Tablo 5. Ülkemizdeki Pomza Kayaçların Genel Fiziksel Özellikleri

Fiziksel Özellikler	
Renk	Açık griden, Kirli beyaza
Kristal Şekli	Amorf
Kristal Suyu	Yok
Sertlik (MOHS)	5,5-6,0
K.B Hacim Ağırlığı (gr/cm³)	0,32-0,97
Gerçek Özgül ağırlığı (gr/cm³)	2,15-2,65
Porozite (%)	45-90
Rötre (mm/m)	<1
Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0,08-0,20
Isınma Isısı (cal/gr.°C)	0,24-0,28
Ses Yalıtımı (dB)	40-55
Su Emme (Ağırlıkça %)	30-70
Buhar Difüzyon Katsayısı	5-10

Tablo 6. Ülkemizdeki Pomza Kayaçların Genel Kimyasal Özellikleri

Kimyasal Özellikler	
PH	7-7,3
Radyoaktivite	Yok
Suda Çözünen Madde Miktarı (Ağırlıkça %)	≤0,15
Asitte Çözünen Madde Miktarı (Ağırlıkça %)	≤2,9
Uçucu Madde (Ağırlıkça %)	Yok
Asitlerle Etkileşim (*)	İnert.
Alevlenme Derecesi (°C)	Yok
Ergime Derecesi(°C)	>900

(*) Pomza sadece hidroflorik asit ile etkileşerek toksik silikon tetraflorit gazı çıkarır.

Türkiye'nin pomza kaynakları, yerel inşaat sektörüne malzeme sağlamakla birlikte, aynı zamanda ihracat potansiyeline de sahiptir. Türk pomzası, kaliteli ve uygun maliyetli bir hafif agrega olarak uluslararası pazarda talep görmektedir. Ayrıca hafif olduğu için nakliyesi çok daha kolaydır. Pomza, inşaat endüstrisinde sıkça tercih edilmektedir. Hafif beton kullanımının önemi anlaşılmasıyla yukarıda bahsedilen kullanım alanları içerisinde pomzanın büyük bir bölümü bims blok üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. İç ve dış duvar bölmelerinde, asmolen döşemelerde kullanılabilen bims bloklar hafif yapı elemanı olarak birçok yapıda tercih edilmektedir (Ceylan 2005).

Bims Blok

Türkiye'de pomza, bims olarak da adlandırılan hafif betonun üretiminde kullanılan önemli bir bileşendir. Pomza agregasının yapılarda kullanılan tipine, Latince aynı anlama gelen pumex, pumic sözcüklerinden türetilen Almancadan dilimize girmiş olan “bims” adı verilmektedir. Bims bloklar yapıların hafif olmasını sağlar, enerji verimliliğini artırır, ısı ve ses yalıtımını sağlar. Ayrıca, bims blokların kolay işlenebilmesi ve taşınabilmesi, inşaat süreçlerini hızlandırır ve maliyetleri düşürür.

Bims; pomza agregası, çimento, su ve bazen diğer katkı maddelerinin birlikte karıştırılmasıyla elde edilen hafif yapı malzemesidir. Pomza, betona hafiflik, yalıtım özellikleri ve işlenebilirlik gibi avantajlar sağlar. Bims blok duvar elemanlarının üretimi TS EN 773-3+A1 (2015) standartlarına göre yapılmaktadır. Yapı elemanı olarak değerlendirilmesi, sıva tutma özelliği ve doğal şartlardan çok etkilenmemesinden kaynaklanmaktadır (Gündüz 2005). Bu nedenle, pomza bazlı hafif beton, Türkiye'de çeşitli inşaat projelerinde kullanılan popüler bir malzemedir. Pomza bazlı hafif betonun üretimi, pomza agregasının diğer malzemelerle

kariştırılması ve uygun oranlarda beton karişımının hazırlanmasıyla gerçekleştirilir. Pomza agregası farklı boyutlarda granüller içerebilir.

Pomza bazlı bims blok  retimi, Türkiye'de çeşitli fabrikalarda gerçekleştirilir. Bu fabrikalar, pomza kaynaklarına yakın bölgelerde kurulur ve pomza agregası temin edilerek bims üretimi yapılır. Üretilen bims bloklar, inşaat sektöründe duvarlar, döşeme panelleri, çatılar ve diğ r uygulamalarda kullanılır. Türkiye'de üretilen bims, genellikle farklı boyutlarda ve özelliklerdedir. Boyutları ve içeriğindeki malzemeleri üreticiye ve kullanım yerlerine bağı olarak değışebilir. Bims bloklar boyut, şekil ve geometrik durumlarına göre dolgulu bims bloklar, boşluklu duvar bims blokları, dolu duvar blokları, asmolen bims blokları ve özel yarıklı dolu duvar blokları olarak sınıflandırabiliriz. Boşluklu duvar bims bloklar ve dolgulu bims bloklar şekil, form ve boşluk konumuna göre tek sıra, iki sıra, üç sıra ve dört sıra boşluklu olarak üretilmektedir (TS EN 773-3+A1 2015). Ses ve ısı yalıtımlarını artırmak için boşluklu duvar bims bloklarının boşluklarında şaşırtma yapılmaktadır.

Bims blok üretim tesisleri özellikle pomza madenlerine yakın olup, genel olarak şu aşamalardan geçerek üretilir:

Ocaktan ıkarılan pomza agregası önce kırılır eleme işlemi gerçekleştirildikten sonra dane boyutlarına göre depolanır. Üretici firmanın karişım reçetesine göre malzemeler kariştırıcıya konularak vibrasyon ve kalıp işlemi gerçekleştirilir. Daha sonra kurutma ve paketleme işlemleri gerçekleştirilir. Kurutma işlemi elevatör ya da forkliftler yardımıyla kapalı bir alana alınarak, 15 C sıcaklığında ve 3 gün süreyle bekletilerek yapılır. Yaz mevsiminde ise doğıal olarak kurutulur (Uzun 2008).

Bims bloklar en çok duvar ve döşeme malzemesi olarak kullanılır. Bims blokların birim hacim ağırlığının düşük olması yapıdaki yük miktarını hafifletilmektedir. Pomza agregası kullanılarak elde edilen ve sadece bağılayıcı madde kullanılarak elde edilen bims blokların basınç dayanım değıerleri oldukça düşüktür (Kayan vd 2019). Türkiye'de üretilen bims bloklarının birim hacim ağırlığı pomza agregasının özelliğine göre genellikle 800-1000 kg/cm³ aralığında, basınç dayanımı ise genellikle 2-10 N/mm² aralığında değışmektedir. Bu dayanım değıerleri, blokların kullanım amacına ve projenin gerekliliklerine bağı olarak farklılık gösterebilir. Bims bloklarının bükülme dayanımı genellikle 0.5-2 N/mm² aralığında, çekme dayanımı genellikle 0.2-1 N/mm² aralığında değışmektedir (Gündüz 1998).

Sürdürülebilirlik ve Karbon Negatif Kavramı

Son yıllarda yapılan çalışmalarda önemli bir bulgu olduğu vurgulanan sürdürülebilirlik kavramı için farklı kurumlar ve farklı sözlükler birçok tanımlama yapmıştır. Sürdürülebilirlik kavramının en kapsamlı tanımı; sürekli olarak gelişime açık olan insan ihtiyaçlarının, gelecek kuşaklara kendi ihtiyaçlarını karşılayabilme kabiliyetini riske atmadan yani gelecek kuşakların yaşamlarına zarar vermeden karşılanabilmesi olarak kabul edilmektedir (Aydın 2017).

Sürdürülebilirlik doğal kaynakların ve tarihi mirasın korunarak gelecek nesillere aktarılmasını hedeflerken aynı zamanda ekonomik ve sosyal boyutunun etkilerinin de korunmasını amaçlar (Hürol 2014). Bu bağlamda sürdürülebilir bir yapı, yapıda kullanılan malzemelerin özelliğinde bir değişim, kaynağında ise eksilme olmadan yapının sürekli var olacak şekilde bir sistemin özelliklerini taşıması olarak ifade edilebilir (Nicholson 2004). Sürdürülebilir yapı malzemeleri kullanımı ile konforu yüksek, termal ve akustik özellikleri iyileştirilmiş, insan sağlığına ve çevre kirliliğine neden olmayan yapılar inşa edilebilir. Sıkıştırılmış toprak, bambu, kenevir, ahşap miselyum ve kerpiç sürdürülebilir yapı malzemelerine örnek olarak verilebilir (Çuçen ve Solak 2023). Akademik ve sektörel çalışmalar ile bu yapı malzemeleri daha çok dikkat çekmekte ve yapıların inşasında daha çok kullanılmaya başlanmıştır.

İnşaat sektöründe sürdürülebilirlik kavramı, çevresel, ekonomik ve sosyal etkileri dengede tutarak bugünkü ihtiyaçları karşılarken gelecek nesillerin ihtiyaçlarını da göz önünde bulundurmaya amaçlar. Sürdürülebilir yapı malzemeleri ise çevre dostu, enerji verimli, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen veya geri dönüştürülebilir özelliklere sahip malzemelerdir. Bu malzemeler, inşaat sektöründe kullanıldığında çevresel etkileri en aza indirir, enerji tüketimini azaltır, doğal kaynakları korur ve insan sağlığına zarar vermez. Örnek olarak, yenilenebilir kaynaklardan üretilen ahşap malzemeler, enerji verimliliği sağlayan yalıtım malzemeleri ve geri dönüştürülebilir beton gibi yapı malzemeleri sürdürülebilirlik ilkesine uygun örneklerdir. Bu malzemeler, inşaat projelerinde kullanılarak çevresel etkilerin azaltılmasına ve daha sürdürülebilir bir geleceğe katkıda bulunulmasına yardımcı olur. Ayrıca sürdürülebilir yapı malzemelerinin kullanımı kadar tükenebilir kaynakların kullanımı da en düşük seviyelerde tutulmalıdır (Anik et al. 1996).

Gelişen teknoloji ve sanayileşmeyle birlikte popüler hale gelen sürdürülebilirlik Anayasamızın 56. Maddesinde vurgulanarak her vatandaşın çevreyi geliştirip çevre sağlığını korumasının ve çevre kirliliğini önlemesinin bir ödevi olduğu belirtilmiştir. Ayrıca Resmî Gazetede yayınlanan Yapı Malzemeleri Yönetmeliğinde doğal kaynakların sürdürülebilir bir

şekilde kullanımı hangi hususlar göz önünde bulundurularak tasarlanacağı, yapılacağı ve yıkılacağı belirlenmiştir. Bu hususlar şu şekildedir;

1. Yapı işlerinin malzemeleri ve bölümleri yıkımdan sonra yeniden kullanılabilir veya geri dönüştürülebilir olmalıdır.
2. Yapı işleri dayanıklı olmalıdır.
3. Yapı işlerinde çevreye uyumlu ham madde ve ikincil maddeler kullanılmalıdır (Yapı Malzemeleri Yönetmeliği 2013).

İnşaat sektöründe sürdürülebilirlik için doğal malzemelerin kullanımı önemli bir adımdır, ancak yapım aşamasından yıkım aşamasına kadar olan tüm süreç dikkate alınması gereken bir faktördür. Doğal malzemelerin kullanımı sürdürülebilirlik açısından çeşitli faydalar sağlayabilir fakat bu malzemelerin doğru bir şekilde bakım-onarımının yapılması, imha edilmesi veya geri dönüştürülmesi de önemlidir.

Bununla birlikte dünya nüfusunun sürekli artması ile antropojenik (insan eylemi veya eylemsizliğinden kaynaklı) etkiler artmış ve bu da çevre kirliliğini artırmıştır. Çevre kirliliğinin artması insanlarda zamanla çevre bilincini oluşturmuştur. Sağlıklı ve temiz bir çevrede yaşamak önemli kriter haline gelmiş ve ülkeler bunun için çalışmalar yapmaya başlamıştır. 1987 yılında ‘Ortak Geleceğimiz’ adıyla Birleşmiş Milletler Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu toplanmış, kalkınma ve çevrenin durumu arasındaki ilişki üzerine çalışmalar yapılmıştır. Daha sonra 1992 yılında sürekli gelişen dünya ile çevre sorunları ele alınmış ve birbirleriyle ilişkisinin birlikte değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. 1997 yılında ise dünya devletleri bir araya gelerek iklim değişikliği ile mücadele konusunda bir adım atarak Kyoto protokolü oluşturulmuştur. 2005 yılında yürürlüğe giren bu protokole ülkemiz 2009 yılında taraf olmuştur (Anonim 2023).

Çevre kirliliğinin bir sonucu olarak doğal kaynaklar tükenmekte ve iklim değişikliği meydana gelmektedir. İklim değişikliğinin sebeplerinden birinin sera gazı emisyonu olduğu bilinmektedir. Karbondioksit, sera gazlarından en önemlisi olup, atmosferde birikerek ısınmaya ve iklim değişikliğine yol açar. Çimento üretimi, insan kaynaklı CO₂ emisyonunun %5 ile %6’sını oluşturmaktadır. Çimento kullanılarak elde edilen beton üretimi yılda kişi başı 1 tonun üzerindedir. Yılda 3x10¹² kg çimento üretilmekte ve üretilen her 10 kg çimento 9 kg CO₂ salınımı gerçekleştirmektedir (Salas et al. 2016).

Sanayileşme ve şehirleşmenin bir sonucu olarak doğal kaynakların aşırı ve düşüncesizce kullanılması nedeniyle atık miktarları devamlı artış eğilimi göstermektedir. Küresel çapta meydana gelen atık sorunu, gelişen teknoloji ve yeni yapı malzeme arayışları atık malzemelerin veya organik malzemelerin geleneksel yapı malzemeleri ile kullanımının önünü açmıştır.

Organik atık olan yer fıstığı kabuğu külü, pirinç kabuğu, şeker kamışı küspesi, Hindistan cevizi kabuğu birçok araştırmada betona ilave edilerek yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır (Demir ve Elmalı 2020). Ayrıca organik atıkların geri dönüştürülmesi ve inşaat malzemeleri üretimi arasında bir bağlantı sağlamak için bims bloklar tercih edilebilmektedir.

Geleneksel inşaat uygulamalarından kaynaklanan ağır sera gazı emisyonları karbon nötr ve karbon negatif yapı malzemeleri üzerinde araştırmalara yol açmıştır. Sürdürülebilirlik içerisinde tanımlayabileceğimiz karbon negatiflik (K-) kavramı, atmosferdeki karbondioksit miktarını azaltma yeteneğidir. Bu kavram, küresel iklim değişikliğiyle mücadele etmek ve karbon emisyonlarını dengelemek amacıyla ortaya çıkmıştır. Karbon negatiflik, sadece karbon emisyonlarını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda atmosferden karbonu geri yakalayıp net bir azalma sağlar.

Karbon negatiflik çeşitli teknolojiler ve yöntemler aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Bunlar arasında ağaçlandırma ve orman restorasyonu, bio-enerji, karbon yakalama ve depolama (CCS), karbon tutuculuğu olan bitkileri yetiştirme, karbonat mineralizasyonu gibi yöntemler bulunur.

İnşaat sektöründe sürdürülebilirliği teşvik etmek, çevresel etkileri azaltmak ve karbon tutuculuğu olan malzemelerin geleneksel betonda kullanımını artırmak önem arz etmektedir. Bu amaçla yapı malzemelerinin bir kısmı yerine organik kökenli malzemeler kullanılmaktadır. Kenevir bitkisi de bunlardan birisidir. Kenevirin çimentolu malzemelerde dolgu malzemesi olarak kullanımının yanı sıra kenevir sapının da çimento hidratasyonu üzerindeki etkilerinin olduğu gözlenmiştir (Khestl 2013). Ancak bu bitkinin yapı malzemeleri bilhassa hafif yapı malzemeleri üzerindeki etkilerinin daha detaylı incelenmesine ihtiyaç vardır.

Kenevir

Kenevir, Cannabis sativa bitkisinin bir türüdür. Çift çenekli, $2n=20$ kromozomlu tek yıllık tohumu ve lifleri için üretilen, doğal olarak yetişen bir bitki olan kenevir, binlerce yıldır insanlar tarafından çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Arkeolojik kazılarda M.Ö. 8000 yıllarında tarihlenmiş ve araştırmalarda kenevirden yapılmış kumaş kalıntıları bulunmuştur (TAPGM 2019). Kenevir, Sümer tabletlerinde bahsedilen dört önemli bitkiden biridir. İncilin ilk kopyalarında kenevirden yapılan kağıtların kullanıldığı bilinmektedir (Ranalli and Venturi 2004). Tüm dünyaya yayılmış olan kenevirin ana vatanı Asya'dır (Acar ve Dönmez 2016). Kenevir, lif, tohum ve uyuşturucu etkisi olan bir bileşik olan tetrahidrokanabinol (THC) açısından zengin içeriği nedeniyle dikkat çekmektedir. Kenevir bitkisi, hızlı bir şekilde büyüeyebilen ve az su tüketen bir bitki olduğu için tarım açısından sürdürülebilir özelliktedir.

Ayrıca, kenevir yetiştirildiğinde toprağı iyileştirme özelliğine de sahiptir. Kenevir bitkisinin ekimi oldukça faydalı olabilir. Çok az bakım gerektirir ve herhangi bir kimyasal gübreye veya böcek ilacına ihtiyaç duymaz. Farklı sektörlerde kullanım amacıyla tüm dünyada ekimi yaygınlaşmasına (Komsı 2018) rağmen kenevirin kullanımı, ülkelere ve yerel yasalara göre büyük ölçüde değişir. Bazı ülkelerde kenevir tamamen yasaklanmışken, diğer ülkelerde tıbbi veya endüstriyel amaçlarla yetiştirilmesine izin verilmektedir. Kenevir kullanımıyla ilgili olarak, yerel yasalar ve düzenlemeler göz önünde bulundurulmalıdır.

Ekonomik, sağlam, verimli, dayanıklı, çevreci ve sürdürülebilir bir bitki olan kenevir, atmosferden CO₂ tutar (emer, kilitler). 1000 m²'lik kenevir 25000 m²'lik ormana eş değer oksijen üretebilirken, bir dönümlük kenevir dört dönüm ağaca eş kâğıt üretebilir. Ayrıca kenevir çok iyi bir radyasyon temizleyicidir (Ulaş 2018). Jami (2016) yaptığı bir çalışma ile kenevir çekirdeğinin %45 karbon içerdiğini göstermiştir. Bu 1 kg kenevir çekirdeğinin bitkinin büyüme sürecinde gerçekleştireceğı fotosentez ile yaklaşık 1,6 kg ile 1,8 kg karbondioksiti tuttuğı söylenebilmektedir.

Kenevir lifi, kenevir bitkisinin saplarından elde edilen doğal bir lif türüdür. Kenevir lifleri doğal olarak çeşitli renklere sahip olabilir. Bu nedenle, kenevirden yapılan ürünler genellikle doğal renklerini korur. Ancak, kenevir lifleri boyanabilir ve istenen renkler elde edilebilir. Kenevir lifi, dayanıklılığı, nefes alabilirliği ve çevresel dostu yapısı nedeniyle çeşitli endüstrilerde kullanılır. Tekstil ürünleri, kâğıt, halat, ip, inşaat malzemeleri gibi alanlarda kullanılan kenevir lifi, doğal ve sürdürülebilir bir malzeme seçeneğı olarak kabul edilir (Gedik vd 2010). Kenevir liflerine ait fiziksel özellikler Tablo 7'de teknik özellikler Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 7. Kenevir Liflerinin Fiziksel Özellikleri (Gedik vd 2010)

Teknik lif uzunluğu (cm)	İşlem görmüş lif uzunluğu (cm)	Kuru özgül mukavemet	Yaş özgül mukavemet (% kuru)	E- Modül (Mpa)	Yıllık lif verimi (kg/hektar)
100-300	65-75	35-70	105	12,7	3000

Kenevir lifleri, selüloz adı verilen karmaşık bir polisakkaritten oluşur. Selüloz, bitkilerin hücre duvarlarında bulunan temel yapısal bileşendir. Kenevir lifleri ayrıca hemiselüloz, lignin, pektin ve diğer yan bileşikler içerir (Ulaş 2018). Kenevir lifleri, yaklaşık olarak %65-70 oranında selüloz, %20-25 oranında hemiselüloz ve %5-20 oranında lignin içerir. Bu bileşenler, kenevir lifinin kimyasal yapısını oluşturan ana bileşenlerdir (Sedan et al. 2008). Kenevir lifleri doğal olarak beyazdan kahverengiye kadar değişen renklere sahip olabilir. Renk, bitkinin

çeşidine, yetiştirme koşullarına ve işleme yöntemlerine bağlı olarak değişebilir. Ayrıca bitkinin kısımları arasında da kimyasal yapı değişiklik gösterebilir (Keller et al. 2001).

Tablo 8. Kenevirin Teknik Özellikleri (Abbott 2014).

Yoğunluk	275 kg/m ³
Bükülme mukavemeti	0,3-0,4 N/mm ²
Termal iletkenlik	0,06 W/m.K
Isı kapasitesi	1500 – 1700 J/kg
Ortalama akustik soğurma katsayısı	0,69 NRC
Hava geçirgenliği	0,75 gm/m ² /mm Hg
Buhar difüzyon direnci μ	24,2 gm/m ² /mm Hg
Yangın derecelendirmesi (BS EN 1365-1:1999)	1 hr
Karbon yakalama	130 kg CO ₂ /m ³
Hava sızdırmazlığı	<2m ³ /m ² .hr.@50pa

Kenevir lifinin kullanılacağı endüstrilerde kimyasal ve fiziksel özellikleri son derece önemlidir. Kenevir gıda, içecek, kozmetik, gıda takviyesi, ilaç, sabun, boya ve yapı malzemesi olarak birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır.

Ülkemizde kenevir yetiştiriciliği ve kontrolü Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığının yönetmeliğine tabi olmakla birlikte Amasya, Antalya Bartın, Burdur, Çorum, İzmir, Karabük, Kastamonu, Kayseri, Kütahya, Malatya, Ordu, Rize, Samsun, Sinop, Tokat, Uşak, Yozgat ve Zonguldak illerinde ve bu illerin bütün ilçelerinde yapılmaktadır (Tablo 9). Ülkemizdeki Kenevir üretimi 1961 yılında lif üretimi 7.100 hektar alan da 10.700 ton, tohum üretimi 13.700 hektar alanda 5.000 ton iken 2017 yılında 10 hektar alanda 8 ton lif üretimi, 2 hektar alanda 1 ton tohum üretimi yapılmıştır (FAO 2020). Yıllar geçtikçe azalan kenevir üretimi son yıllarda öneminin tekrar anlaşılmasından dolayı teşviklerle artırılmak istenmektedir.

Tablo 9. İllere Göre Kenevir Üretimi (Anonim 2019)

İL/ YIL	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Kenevir Tohumu Üretimi (ton)														
Kastamonu	9	3	2	2	2									
Kütahya	1	1												
Samsun	20	9	11	22	10	3	7	8	4	1	1	1	1	1
Çorum	0	0												
Toplam	30	13	13	24	12	3	7	8	4	1	1	1	1	1
Kenevir Lifi Üretimi (ton)														
Kastamonu	508	6	8	5	4									
Kütahya	1	1												
Samsun	90	47	52	33	17	4	10	16	6	1	1	1	7	7
Çorum	1	1												
Toplam	600	55	60	38	21	4	10	16	6	1	1	1	7	7

Kenevir lifinin yapısı ve özellikleri yetiştirildiği bölge ve kullanım amacına göre değişiklik göstermektedir. Kenevir lifleri genellikle uzun ve ince liflerdir. Ortalama olarak, kenevir liflerinin uzunluğu 2 ila 4 metreye kadar çıkabilir. Kalınlıkları ise yaklaşık 16 ila 50 mikrometre arasında değişebilir. Kenevir lifleri diğer bitki liflerine kıyasla daha yüksek bir mukavemete ve dayanıklılığa sahiplerdir (Gedik vd 2010). Bu dayanıklılık, kenevir liflerini dayanıklı tekstil ürünleri, halatlar ve inşaat malzemeleri için ideal bir seçenek haline getirir. Şekil 4'te çeşitli şekilde işlenen kenevir sapları gösterilmektedir (Jami et al. 2018). Kenevir liflerinin uygun işleme yöntemleriyle (örneğin nemlendirme ve termal işlem) elastikiyeti artırılabilir. Kenevir lifleri, yüksek ısıya dayanıklıdır. Bu özellik, kenevirden yapılan ürünlerin ısıya, alevlere ve yanmaya karşı dayanıklı olmasını sağlar. Kenevir sapı ve lifleri Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. a. Basit lifleri olmayan, kenevir sapı b. İşlenmiş Kenevir Lifleri c. Yüksek yoğunluklu kenevir betonu yapmak için kenevir parçaları d. Kenevir lifleri (Jami et al. 2018)

Kenevir lifleri, dayanıklılıkları, nefes alabilirlikleri ve çevre dostu olmaları nedeniyle inşaat sektöründe tercih edilen bir malzemedir. Kolay bir şekilde yetiştirilebilen ve kimyasal işlem uygulanmadan kullanılabilen bir bitki olan kenevirin sapından elde edilen lifin, mukavemetli ve nem toleransı yüksektir. Yapısal anlamda bu lifler, fiziksel işlemle geçirilerek daha sonra beton, kireç, kil veya diğer bağlayıcı maddelerle birleştirilerek yapı malzemesi oluşturulur. Bu malzemeler arasında kenevir betonu (hemcrete), kenevir tuğlası ve kenevir panelleri bulunur (Kozłowski et al. 2004; Grundvall 2016).

Kenevirin Yapı Malzemesi Olarak Kullanımı

Kenevir sapları, çeşitli yapısal uygulamalarda kullanılan dayanıklı ve çevre dostu bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Ağ, ip, tekstil ve kâğıt üretimi alanında kullanılan kenevirin inşaat sektöründe yapı malzemesi olarak kullanımı 1500 yıl öncelerine dayanmaktadır. Fransızlar tarafından binlerce yıl öncesinden kullanıldığı bilinen kenevir ayrıca Hindistan'da bulunan tarihi Elloro mağarasının sıvasında kenevir lifinin en az %10 oranında kullanılarak mağara içerisindeki nemin dengelenmesi sağlanmış ve böceklerle karşı koruma sağlanmıştır (Teweri 2018). Kenevirin yapı malzemesi olarak kullanımı Avrupa'dan tüm dünyaya yayılırken, artık sadece onarımlar için değil, yeni inşaat yapımlarında da kenevir sapı tercih edilen bir yapı malzemesi haline gelmiştir (Zuo 2014).

Binlerce yıldır yapı malzemesi olarak kullanılan betonun dayanıklılığı sürekli olarak geliştirilmiştir. Beton harcının içerisine fiber ve bio malzemeler eklenerek betonun fiziksel dayanımı artırılması en bilindik yöntemdir. Tek başına gevrek olan beton, bu özelliği geliştirilmek için fiber ve bio malzemelerle takviye edilerek sünek özellik kazanarak daha fazla yükü taşıyabilir. Beton karışımında çelik fiberler, doğal fiberler (talaş, saman, ketencik, kenevir) ve yapay fiberler (cam yünü, plastik kökenli fiberler) gibi ürünler beton bileşiminde kullanılmaktadır (Gedik 2012).

Biyokompozit bir malzeme olan kenevir, atık ürün olarak değerlendirilmekte, çevreye zarar vermemesiyle yapı sektöründe doğal lif olarak betonda katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır (Gül 2008). Kenevir sapları, kenevir hurdası veya kenevir kökleri ile kullanılarak kenevir betonu (hemcrete) olarak bilinen bir yapı malzemesi üretiminde kullanılır. Kenevir betonu, kenevir lifleri ve bağlayıcı bir malzeme olan kireç veya çimento gibi maddelerin karışımından oluşur. Kenevir betonu, hafif, yalıtımlı ve dayanıklı bir yapı malzemesidir ve duvarlar, zeminler ve çatılar gibi birçok yapısal elemanda kullanılabilir.

Kenevir saplarından yapılan kenevir levhaları, ahşap veya diğer yapı malzemelerinin yerine geçebilen çevre dostu bir alternatif oluşturur. Kenevir lifleri, bir bağlayıcı madde ile

birleştirilerek sıkıştırılır ve levha formunda üretilir. Bu levhalar, mobilya, iç mekân kaplamaları, zemin döşemeleri ve diğer yapısal uygulamalarda kullanılabilir (Amaducci and Gusovius, 2010).

Yapı malzemesi olarak kenevir sapları, yüksek izolasyon özellikleri nedeniyle ısı ve ses izolasyon malzemeleri olarak kullanılabilir. Kenevir lifleri, levha veya paneller halinde sıkıştırılarak izolasyon malzemesi olarak kullanılabilir. Bu malzeme, binalarda enerji verimliliğini artırabilir ve iç mekanlarda daha iyi bir akustik performans sağlayabilir (Awwad et al. 2012).

Güncel bir uygulama olarak kenevir saplarının yapı malzemesi olarak kullanımı, çevresel sürdürülebilirlik, dayanıklılık, izolasyon özellikleri ve düşük çevresel etki gibi avantajlar sunar. Bu nedenle, kenevir saplarından yapılan ürünler, yeşil ve sürdürülebilir inşaat uygulamalarında giderek daha popüler hale gelmektedir. Farklı disiplinlerle uyumluluğu son zamanlarda mühendislik ürün tasarımında tercih edilebilirliğini arttırmıştır (Al-Oqla and Sapuan 2014). Hatta son dönemlerde kenevirin kullanıldığı özel betonlarda bulunmaktadır.

Kenevir Beton (Hempcrete)

Tarih boyunca betonun kompozit bir malzeme olma özelliğinden faydalanılarak farklı özelliklere sahip malzemeler oluşturulmuştur. 1980'lerden günümüze en çok kullanılan biyo-agrega bazlı yapı malzemelerinden biri de kenevir betonudur (Dartois et al. 2017). Kenevir betonu, kenevir sapları (kenevir hurdası) ve kireç veya çimento gibi bağlayıcı maddelerin karışımından oluşan bir yapı malzemesidir. Kenevir sapları ve bağlayıcı maddelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan kenevir betonu, hafif, yalıtım özelliği yüksek ve çevre dostu bir yapı malzemesidir. (Allin 2012). Kenevir bitkisi, hızla büyüyen bir bitki olduğu için yenilenebilir bir kaynak olarak kabul edilir. Ayrıca, kenevir bitkisi, fotosentez yoluyla atmosferden karbondioksit emerek büyür, bu da karbon ayak izini azaltır. Kenevir sapı kullanılarak üretilen beton geleneksel yapı malzemelerine göre daha düşük çevresel etkiye sahiptir. 1 m³ kenevir beton üretmek için 1000 litre kenevir lifi kullanılması gerekmekte, 1 m³ kenevir beton duvarında yaklaşık olarak 180 kg CO₂ tutulabilmektedir (Demir ve Elmalı 2020).

Kenevir betonu kullanımının kesin tarihi bilinmemekle beraber (Allin 2005), 1980'lerin ortalarında Fransa'da ortaya çıkan bu beton başlangıçta, nefes alabilen bir sıva malzemesine ihtiyaç duyan eski saman kompozit binalar için bir onarım malzemesi olarak kullanılmıştır. Betonun aksine, kenevir betonu taşıyıcı bir malzeme değildir. Kenevir betonunun püskürtülmesi en gelişmiş üretim yöntemidir (Allin 2012). Diğer üretim yöntemleri; Yerinde

Döküm, Sprey Beton, Blok üretim ve Prefabrikasyonu olup, yerinde döküm yöntemi en yaygın yöntemlerin başında gelmektedir. Şekil 5’te blok olarak üretilen kenevir betonu verilmiştir.



Şekil 5. Kenevir betonu (Anonymous 2023)

Kenevir betonunun yoğunluğu $0,3 \text{ gr/cm}^3$ ile $0,9 \text{ gr/cm}^3$ arasında değişmekte olup yoğunluk değeri 1 gr/cm^3 değerinin altında kaldığından hafif malzeme özelliği göstermektedir. Kenevir betonunun yoğunluğundaki bu değişim aralığı malzemenin uygulamalarındaki çok yönlülüğü göstermektedir. Kenevir betonunun düşük yoğunluğunun karakteristik nedeni, kenevirin yaklaşık $0,11 \text{ gr/cm}^3$ gibi çok hafif bir yoğunluğa sahip olması ve kireç gibi ($0,9 \text{ gr/cm}^3$) hafif bağlayıcıların kullanılmasıdır (Picandet 2017). Bu yönüyle oldukça hafif bir yapı malzemesidir. Kenevir, düşük yoğunluklu bir malzeme olduğundan, inşaat malzemelerinin ağırlığını azaltır. Bu da yapıların daha hafif olmasını ve taşıyıcı sistemlere daha az yük gelmesini sağlar. Kenevir betonu, düşük doz bağlayıcı kullanılarak elde edildiğinde, yüksek deformasyon ve zayıf mekanik özellikler sergilemektedir (Amziane and Arnould 2013).

Kür koşulları, kullanılan bağlayıcı tipi, liflerin uzunluğu ve kalınlığı kenevir betonunun basınç dayanımını etkilemektedir (Arnaud, and Gourlay 2012). Kenevir betonun termal ve akustik özellikler gibi bazı mükemmel özelliklere sahip olduğu kanıtlanırsa da basınç dayanımı gibi mekanik özellikleri düşüktür (Chabannes et al. 2017). Yüksek hidrolik özelliği bulunan bağlayıcı kullanarak basınç dayanımı artırılabilirken kılcal etki azaltılır (Walker and Pavia 2012). Kenevir betonunun düşük basınç dayanımının nedeni kenevir saplarının esnekliğinin fazla olması ve bu parçacıkların beton içerisinde kusurlu yerleşme ihtimalinden kaynaklanmaktadır (Bouloc 2006). Kenevir betonu üretiminde kireç bağlayıcı olarak kullanıldığında ilerleyen zamanlarda karbonatlaşma meydana gelir. Karbonatlaşma sonrasında oluşan kireçtaşı mikro boyuttaki bağlara mukavemet kazandırır ve dayanımı artırır (Jami vd 2018).

Kenevir betonu için eksenel basınç dayanım değerleri yaklaşık 0,2-0,9 MPa arasındadır ve elastisite modülü için eksenel basınç dayanımı 12,65-49,40 MPa aralığındadır (de Bruijn et al. 2008; Tronet et al. 2016). Basınç dayanımı farklı parametrelere bağlı olmakla birlikte karışım oranları ve karıştırma yöntemiyle kenevir betonunun basınç dayanımı 0,2-6,94 MPa arasında da değişebilir. Araştırmacılar yoğunluk ile basınç dayanımı arasında doğrusal bir ilişki belirlemişlerdir. Kenevir beton karışımlarının çoğu, herhangi bir sıkıştırma yapılmadan üretildiğinde, sıkıştırılmış karışımlara kıyasla düşük elastisite modülü ve basınç dayanımına sahip olma eğilimindedir. Ayrıca sıkıştırma yoğunluğu arttıkça kenevir betonun yoğunluğunun arttığı bulunmuştur (Jami et al. 2018).

Kenevir betonu için yapılan çalışmalarda çalışmacılar farklı karışım oranları bildirmişlerdir. Ip ve Miller (2012) kenevir -kireç duvar yapılarının yaşam döngüsü ve sera gazı emisyonlarını değerlendirmek için bağlayıcıyı 50 kg, keneviri 30 kg ve karışım suyunu 75 kg olarak kullanmışlardır. Collet ve Pretot (2014) ise kenevir betonların ısı iletkenliğinin yoğunluk ve su içeriğine göre değişimini inceledikleri çalışmalarında bağlayıcıyı 45 kg, keneviri 20,4 kg ve karışım suyunu 67 kg olarak kullanarak çalışmalarını yapmışlardır.

Kenevir betonu yüksek yalıtım değerlerine sahiptir. Kenevir sapları (kıymıkları), hava kabarcıkları içeren doğal bir yapıya sahiptir, bu da malzemenin iyi bir termal yalıtım sağlamasını sağlar. Kenevir betonu aynı zamanda nem ve su buharı geçirgenliği de sunar, bu da yapıların doğal olarak nefes almasını ve nem dengesini korumasını sağlar. Kenevir liflerinin boyutu mekanik ve termal iletkenlik değerlerini etkilemektedir (Bourdout 2017).

Wooley (2012) yaptığı çalışma ile kenevir betonunun termal performansını etkileyen önemli özelliklerinin, parçacık boyutu, nem içeriği, kenevirin bağlayıcı oranları, karıştırma, yerleştirme ve sıkıştırma yöntemleri olduğunu ifade etmiştir. Kenevir betonunun yoğunluğu öncelikle bağlayıcının oranına, nem içeriğinin seviyesine ve sıkıştırma derecesine (gevşek dolu veya sıkıştırılmış) bağlıdır. Bunlardan herhangi biri arttığında, yoğunluk ve sonuç olarak termal iletkenlik (k) değerleri artar. Ayrıca, yalıtımın mukavemetten daha önemli olduğu yerlerde (çatıda olduğu gibi) tipik olarak az miktarda bağlayıcı içeren kenevir betonu, gevşek dolgu/çok hafif sıkıştırılmış ve tamamen kurutulmuş bir durumda kullanılır, bu da düşük yoğunluğa ve düşük ısı iletkenliğine yol açar. Buna karşılık hem yalıtım hem de yapısal bütünlüğün eşit derecede önemli olduğu durumlarda (duvar), daha yüksek yoğunluklu kenevir betonu, daha fazla bağlayıcı ve daha fazla sıkıştırma gereklidir (Woolley 2012; Sparrow and Stanwix 2014).

Kenevir betonu, duvar panelleri, dökme beton yerine kullanılan dolgu malzemesi, çatı izolasyonu ve iç mekân kaplamaları gibi birçok yapısal uygulamada kullanılabilir. Yalıtım ve

hafiflik özellikleri nedeniyle, özellikle enerji verimliliği yüksek ve sürdürülebilir binaların inşasında tercih edilir. Kenevir betonu geleneksel betondan daha fazla esneklik gösterir, birkaç saat içinde kürlenir, betonun ağırlığının sadece yedide biri ağırlığındadır. Kenevir betonu ömrünün sonunda doğal bir ürün olarak kolayca parçalanabilir ve yeni bir yapıda yeniden kullanılabilir veya alternatif olarak toprağa kireç ve organik madde katkısında bulunabilir (Kenter 2015).

Kenevir betonu ile yapılan yapılar, yapıların inşasıyla ilgili diğer tüm süreçlerden kaynaklanan karbon emisyonlarını telafi edebilir, dolayısı ile karbon nötr bina elde etme hedefi için bu beton önemli miktarda kullanılabilir (Jami et al. 2018). Kenevir betonu, çevresel sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve doğal yalıtım özellikleri gibi avantajları nedeniyle giderek daha popüler hale gelmektedir. Ancak, kenevir betonunun geleneksel yapı malzemelerine göre bazı sınırlamaları ve uygulama yönergeleri olabilir. Bu nedenle, kenevir betonu uygulamalarında tecrübe ve profesyonel destek önemlidir. Kenevir betonun bazı önemli özellikleri şöyle sıralanabilir.

1. İnşaat Süreci: Kenevir betonunun üretim süreci, kenevir saplarının (kenevir bitkisinin odunumsu gövdesi) bağlayıcı maddeyle, genellikle kireç veya çimento ile ve su ile karıştırılmasıyla gerçekleşir. Karışım daha sonra kalıplara sıkıştırılır veya ahşap veya taş duvar çerçevelerde dolum malzemesi olarak kullanılır. Sıkıştırıldıktan sonra, kenevir betonu malzemesi bir süre kurumaya bırakılır ve sertleşir (Evrard 2005).

2. Esneklik ve Yapısal Performans: Kenevir betonu, doğal yapısı gereği esnek bir malzemedir ve yapısal performansı açısından bazı avantajlar sağlar. Esnekliği sayesinde, yapısal hareketlere ve yer değişikliklerine uyum sağlayabilir. Bu da çatlak oluşumunu azaltabilir ve yapıyı deprem ve diğer doğal etkilere karşı daha dirençli hale getirebilir. Kenevir betonu yarı sünek davranış gösterir ve yapısal özellikleri çok değişmeden aynı formda tekrar kullanılabilir (Manohari et al. 2016).

3. Nem ve Hava Geçirgenliği: Kenevir betonu, yüksek higroskopik özelliklere sahiptir, yani havadaki nemin emilimini ve salınımını sağlar. Bu, iç mekandaki nem dengesini koruma ve konforlu bir yaşam ortamı sağlama açısından önemlidir. Aynı zamanda hava geçirgen bir malzeme olduğundan, yapıların doğal olarak nefes almasını sağlar ve iç mekândaki hava kalitesini iyileştirebilir (Colinart et al. 2012).

4. Yangın Dayanıklılığı: Kenevir sapları, yangına kendiliğinden dayanıklı bir yapıya sahiptir. Kenevir betonu, kenevir kullanılarak üretildiği için, yangına karşı doğal bir direnç sunar. Alevleri yavaşlatır ve yangının yayılmasını engeller. Bu özellik, yapıların yangın güvenliği açısından önemli bir avantajdır. Yapılan bir çalışmada BS EN 1365-1:1999' a uygun

olarak kenevir betonu yangına maruz bırakılmış ve 73 dakika yangına karşı direnç göstermiştir (Sparrow ve Stanwix 2014).

5. Sürdürülebilirlik: Kenevir betonu, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunar. Kenevir bitkisi, hızla büyüyen ve karbon emisyonlarını azaltan bir bitkidir. Ayrıca, kenevir sapının kullanılması, atık yönetimini iyileştirir ve doğal kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlar. Kenevir betonu, enerji verimli ve çevre dostu binaların inşası için bir seçenek olarak tercih edilmektedir (Ip ve Miller 2012).

Kenevir betonunun yaşam döngüsü analizlerinin (Life Cycle Assessment-LCA) araştırılması ve değerlendirilmesi için de daha fazla çalışma yapılması ve bilgi eksikliklerinin giderilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Literatür Özeti

Tez konusu ile ilgili olarak pomza agregası, kenevir sapı, bims blok ve kenevir betonu çalışmaları aşağıda özetlenmiştir.

Şahin (1996), hafif beton üretiminde kullanılabilirliği ve puzolanik aktiviteye sahip olup olmadığı araştırılan pomza agregasını incelemiştir. Bu amaçla, %75 normal agrega ve %25 pomza agregasından oluşan karışımlara bir dizi deney yapılmış ve çimentonun dozajı değiştirilerek fiziksel ve mekanik özellikler üstündeki etkisi incelenmiştir. Bulunan sonuçlar, pomza agregasının ikame oranının artmasıyla basınç dayanımının azaldığını göstermektedir. Ayrıca, %25 ve %100 pomza agregası içeren numunelerin birim ağırlıklarının normal portland çimentosu harcının birim ağırlığına göre sırasıyla %12 ve %41,5 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, çimento içerisine eklenen pomzanın ikame oranının artmasıyla 28 günlük basınç dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir.

Campione et al. (2001) 3-7 ve 7-10 mm boyutunda pomza agregası içeren hafif betonların çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğunu incelediği çalışmalarında, hacimce %0,5, %1 ve %2 oranında çelik lif kullanmıştır. Çelik lif ile hafif betonun tüm mekanik özelliklerini artırdığını bildirmiştir. %2 çelik lif katkısının çekme dayanımında %17,62 ve eğilme dayanımında %43 artışa neden olduğunu ifade etmişlerdir.

Bayülke (2003) dolgu duvar malzemelerinin değişken ve düşük dayanımlarından dolayı yapı tasarımında yalıtım özellikleri dışındaki özellikleri çok dikkate alınmasa da yapının deprem ve rijitlik gibi birçok özelliğine olumlu katkısı bulunduğunu, deprem yüklerine karşı taşıma güçlerine ulaşana dek perde duvar gibi davrandıklarını ifade etmiştir. Dolgu duvar elemanlarının birleşiminden meydana gelen derzlere etki eden paralel ve dik yüklere karşı gösterdikleri dayanım kesme ve basınç dayanımı olarak ifade edildiğini söylemiştir.

Ünal vd (2003) hafif beton blok üretimi için diyatomit ve pomza agregası kullanılmıştır. Pomzalı karışımlarda bağlayıcı dozajı 250 ve 300 kg/m³ olarak belirlenerek 5-10 mm agrega oranını sabit tutulmuş, diğer boyutların oranlarında değişiklikler yapılmıştır. Çalışma deneylerin tamamlanmasının ardından pomza ve diyatomitten üretilen hafif beton elemanlarının tuğla gibi bölme elemanlar olacak şekilde kullanılabileceği ve daha iyi yalıtım özelliklerine sahip olmasının avantaj olacağı sonucuna ulaşmışlardır.

Şahin vd (2007) 200 ve 250 kg/m³ çimento dozajlı, PVC atıklarının karışımdaki iri agrega ağırlığına oranla %0, %10, %20, ve %30 oranlarında eklenmesiyle üretilen hafif betonların birim hacim ağırlık ve basınç dayanımını araştırdığı çalışmada PVC atıklarının oranı arttıkça hafif betonun birim hacim ağırlığının ve basınç dayanımının arttığını belirlerken su emme miktarının azaldığını göstermiştir. 200 kg/m³ çimento dozajlı karışımlarda üretilen hafif betonun birim hacim ağırlığı 760-792 kg/m³ bulunurken, 250 kg/m³ çimento dozajlı karışımlarda hafif betonun birim hacim ağırlığını 853-883 kg/m³ arasında elde etmişlerdir. Fazla dayanım gerektirmeyen yapılarda duvar malzemesi olarak kullanılarak atık PVC'nin çevreye olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılacağını belirtmişlerdir.

Alkaya (2010) hafif beton üretiminde ayçiçek sapının kullanımını incelediği yüksek lisans tezinde 300 dozlu hafif betonlar için ayçiçek sapının karışımdaki oranının %20'nin altında, 400 dozlu hafif betonlar için %40'ın altında taşıyıcı elemanlarda kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Ürettiği numunelerin basınç dayanımları 300 doz için en çok 322 kg/cm² olurken 400 doz için 498 kg/cm² olmuştur. Karışımdaki ayçiçek oranının artmasıyla su emme oranının da artmasının ayçiçek sapının boşluklu bir yapıda olmasından kaynaklandığını belirtmiştir.

Demirel (2013) yaptığı çalışmada EPS ve bims bloklardan oluşan 180x390x150 mm boyutlarındaki sandviç tipi yalıtım tuğlası ile daha hafif bir blok üretirken hem daha iyi ısı yalıtımı hem de kabul görececek basınç değerlerine ulaşmayı amaçlamıştır. Çalışmasında basınç dayanım değerlerini 1,76-1,78 N/mm² arasında bulurken, ağırlığı 5,5 kg ile 9,3 kg arasında olan numuneler üretmiştir. Sayısal ve deneysel değerlere göre ısı transferini minimuma indirecek hem de basınç dayanımını sağlayacak optimum kalınlık değerlerinin EPS için 40 mm, bims blok için ise 20 mm olduğunu belirtmişlerdir.

Sarı ve Paşamehmetoğlu (2005) agrega ve katkılarının pomzalı hafif beton üzerindeki etkilerini inceledikleri bir çalışma yapmışlardır. Optimum karışım oranı için pomza agregasını 0-4 mm, 4-8 mm ve 8-16 mm boyut aralığında kullanmışlardır. Bims blokların mukavemet-yoğunluk oranının ve işlenebilirliğinin artması için süper akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkıları kullandıkları çalışmaları minimum basınç dayanımını 6,56 N/mm² ve yoğunluğu

1300 kg/m³ olan bims bloklar üretmişlerdir. Granülometri ve katkı ilavesinin bims bloklarda mukavemet ve yoğunluk üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Korkmaz vd (2018) hafif beton üretiminde atık olarak genellikle yakıt olarak kullanılan findık kabuğu kullanarak elde ettiği betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini incelediği çalışmada findık kabuğu oranını arttıkça birim hacim ağırlık ve basınç dayanımında azalma meydana geldiğini bildirmiştir. En çok kütlece %50 findık kabuğu kullanılarak birim hacim ağırlığın referans numuneye göre %25 azalma meydana gelmiş, basınç dayanımı ise 20 MPa olan beton üretmiştir. Bu değeri hafif betonlar için iyi bir sonuç olarak değerlendirmiştir.

Türkel ve Kadiroğlu (2007) poza agregasını kullanarak taşıyıcı özelliklere sahip hafif beton üretmeyi amaçladıkları çalışmalarında silis dumanı ve uçucu kül kullanmışlardır. Pomza kullanarak taşıyıcı hafif betonlar için belirtilen 17,2 MPa dayanımının üstünde değerler elde etmişlerdir ve TS EN 206+A2 (2021) standardına göre LC20/22 ve LC25/28 dayanım sınıfında taşıyıcı hafif beton üretebileceğini göstermişlerdir.

Çiçek ve Gönül (2018) yaptıkları çalışmada hafif betonların yüksek dayanımlı üretim olanaklarını inceledikleri çalışmada agrega olarak skoria kullanmışlardır. Katkısız ve hiper akışkanlaştırıcı kullanarak test numuneleri hazırlamışlardır. Katkısız olarak ürettikleri numunelerde 44,09-50,99 MPa değerleri elde ederken hiper akışkanlaştırıcı ile ürettikleri numunelerde 56,21-66,26 MPa dayanım değerleri elde ederek yüksek dayanımlı yarı hafif beton üretilabileceğini bildirmişlerdir.

Abbas et al. (2023) doğal agregaları kullanarak düşük karbonlu hafif agregalı beton geliştirmek ve mekanik performansını değerlendirmek için deneysel bir araştırma yapmıştır. Karışımda Lytag olarak bilinen uçucu kül bazlı agrega ile betonda kullanılan geleneksel çimento esaslı bağlayıcılar yerine pomzanın puzolanik özelliklerinden faydalanılarak öğütülmüş pomza bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonrasında LC30/33 dayanım sınıfı hedeflenerek yoğunluğu 1800 kg/m³' ten az olan hafif agregalı beton üretilmiştir. Pomza tozunun çimento yerine kullanılabilme potansiyeli ortaya çıkarılmıştır. Pomza agregası ve öğütülmüş tozunun karbon ayak izinde olumlu etkileri vurgulanmıştır.

Nguyen et al. (2009) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, kenevir betonunun mekanik özelliklerinin değişkenliği üzerinde çalışılmıştır. Araştırma, basınç dayanımı, malzeme yoğunluğu ve Young Modülü gibi özelliklerine istatistiksel olarak yaklaşmıştır. Araştırmacı, kenevir parçacıkları ve lifleri üzerinde çalışmalar yürütmüş ve bu ikisi arasında yoğunluk açısından bir fark olmadığı sonucuna varmıştır. Numunelerin yoğunluğunun aynı koşullar altında %2'den daha az fark gösterdiğini ve 90 günlük sonuçlarda 450-800 kg/m³ aralığında olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, basınç dayanımını etkileyen parametreleri inceleyen

araştırmacı, kenevir betonunun düşük rijitlikte olduğu için basınç ve eğilme dayanımının 0,2-3,6 MPa aralığında olduğunu ve çok sünek bir davranış sergilediğini açıklamıştır. Mekanik olarak, kenevir betonunun elastoplastik davranış sergilemesi nedeniyle yapısal destek olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Çalışmada, kurutma şartları, kenevir betonunun üretiminden sonra geçen süre ve kenevir taneciklerinin boyutunun kenevir betonunun mekanik davranışını etkilediğinden bahsetmiştir.

Murphy et al. (2010), kenevir kireç karışımının fiziksel ve mekanik özelliğini inceledikleri çalışmada sürdürülebilir olmayan yapı malzemelerinin yerini alabilecek bio-atık malzemelerin eğilme ve basınç dayanımlarını incelemiştir. Kireç/kenevir oranını 1:9, 1:1 ve 3:1 olarak belirlemişlerdir. İçerikteki kenevir oranının artması ile basınç dayanımının 2 MPa'nın altına düşerek sürekli olarak azaldığını, eğilme dayanımlarının ise kenevir oranının artmasıyla arasında çok fazla farklılık olmadığını bildirmiştir.

Arnaud ve Gourlay (2012) isimli araştırmacılar kenevir betonunun mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında ürettikleri malzemelerde 21 gün ile 24 ay arasında değişen sürelerde 0,35 MPa ile 0,85 MPa arasında basınç dayanımları elde etmişlerdir. Ayrıca imalat sırasında uygulanan sıkıştırma enerjisinin artmasıyla maksimum basınç dayanımının da arttığı görülmüştür. 0,6-1 MPa sıkıştırma basıncı için basınç dayanımının 3 MPa çıktığı belirtilmiştir. Kenevir betonunun hamur halindeyken kalıptan çıkarılmadan önce 48 saat boyunca sıkıştırılmasıyla 28 günlük basınç dayanımının 3,5 MPa'nın üzerinde sonuçlar verdiği açıklanmıştır. Araştırmacılar, erken yaşlarda kenevir betonunun çok sünek bir davranış sergilediğini ifade etmişlerdir.

Kenevir betonu düşük bir verimliliğe ve yüksek bir termal atalete sahiptir, bu nedenle ısınması uzun sürmez ve bir kez ısıtıldığında, ortam sıcaklığı düştüğünde ısıyı yavaşça serbest bırakır (Evrard,2008). Bu nedenle, kenevir betonu ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılmak üzere önerilmiştir (Amziane and Arnaud 2013).

1980'ler den bu yana en çok kullanılan biyo-agrega bazlı yapı malzemelerinden biri (Dartois et al. 2017) olan kenevir betonu, genellikle kenevir sapı, kireç bağlayıcı ve sudan oluşan ısı ve ses yalıtım sistemi olarak kullanım potansiyeline sahip biyo-agrega bazlı bir kompozit doğal bir yapı malzemesidir (Amziane and Arnaud 2013). 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 bildirilmiştir. 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 and Pretot 2014). 200-840 kg/m³ arasındaki kuru birim hacim ağırlıklı kenevir betonun ısı iletkenlik değerleri 0,06-0,19 W/mK arasında bulunmuştur (Arnaud 2000). Kenevir betonu, düşük ısı iletkenliği ve yüksek ses emilimi gibi birçok farklı avantaja sahipken, yüksek karbon tutuculuğu ile karbon negatif bir malzemedir (Ujwal and Dhakal 2016). Yeni bir malzeme gibi görünse de gerçekte kenevir betonu, çok eski, doğal bir kompozit yapı malzemesinin modern bir versiyonudur (Sparrow and Stanwix 2014).

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 (Jami et al. 2018). Kenevir betonun mekanik özellikleri, kenevir liflerinin eklenmesi ve karışımdaki bağlayıcı madde oranının arttırılmasıyla geliştirilebilir (Gregor 2014).

Ip ve Miller (2012) yaptığı bir çalışmada 24,8 kg kenevir 54,5 kg kireç karışımından oluşan 1m x 1m x 0.3m boyutlarında bir fonksiyonel duvar ünitesinin 827,71 kg karbondioksiti depoladığını göstermiştir. Bu sadece büyüme, üretim ve kireç üretimi gibi süreçler sırasında yayılan 46,43 kg karbondioksiti telafi etmekle kalmayıp, aynı zamanda fazladan 36,08 kg karbondioksiti de depolayacağını göstermiştir.

Chabannes et al. (2016) yaptıkları çalışmada kenevir veya pirinç kabuğu kullanarak elde ettikleri numunelerin mekanik özellikleri ile bağlayıcı olarak kullanılan kirecin sertleşmesini incelemişlerdir. Kontrolü sağlanan kür odasında ve açık havada bekletilerek kür şartlarının etkisinin basınç dayanımı üzerindeki etkisini de araştırmışlar ve elde edilen değerlerin yakın olduğunu belirtmişlerdir. Kenevir betonlarının dayanımının pirinç kabuğu ile elde edilen numunelerin dayanımından iki kat yüksek olduğu vurgulanmıştır.

Williams et al. (2018) yapmış oldukları çalışma ile kenevir-kireç karışımının basınç dayanımı ve eğilme dayanımı üzerinde bağlayıcı oranı ve kenevirin parçacık boyutunun etkisini incelemiştir. Kütle olarak bağlayıcı/agrega oranlarını 1,8:1, 2,2:1 ve 2,6:1 olacak şekilde belirlemişlerdir. Bağlayıcı oranının ve parçacık boyutlarının karışımın özelliklerinin etkilediği açıklanmıştır. Bağlayıcı oranının arttırılmasıyla eğilme mukavemetinin arttığı, daha sert ve daha yoğun bir kompozit malzeme olduğu değerlendirilmiştir.

Novakova ve Sal (2019) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, kenevir betonu üretimi için hidrolik kireç yerine çimento kullanılmıştır. Beton karışımı hazırlanırken, 1 m³ beton için 80 kg su kullanılması planlanmış ancak kenevirin suyu emmesi nedeniyle 1 m³ beton için 167 kg su kullanılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Çalışma kapsamında, 0,44 oranında kenevir beton-su karışımıyla 6 adet örnek hazırlanmıştır. Araştırma sonucunda, kenevir parçalarının hafif betonda dolgu maddesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, kenevir betonunun hem hidrolik kireç hem de çimento ile kullanılabileceği belirtilmiştir; ancak sadece çimento kullanıldığında karıştırma işleminin daha zahmetli ve uzun sürebileceği ifade edilmiştir. Üretilen kenevir betonunun mukavemetinin hafif betonun mukavemetine yakın olduğu vurgulanmıştır. Bu nedenle, kenevir betonunun taşıyıcı beton olarak değil sadece dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Kenevir betonunun zeminlerde, duvarlarda ve sıva üzeri çatılarda rahatlıkla kullanılabileceği ifade edilmiştir. Duvarlarda kullanımının taşıyıcı eleman olarak değil dolgu malzemesi olarak yapılması gerektiği ve bağlayıcının çimento olduğunda dayanımda artış olduğu belirtilmiştir. Üretilen kenevir betonunun ortalama basınç dayanım değerinin 1,13 MPa olduğu, beton boşluklu bloklarda 3-4 MPa, gözenekli betonda 2-5 MPa ve köpük betonda 0,5-1,5 MPa aralığında değiştiği belirtilmiştir. Çalışmada, kenevir betonunun basınç dayanımının köpük betona yakın olması nedeniyle taşıyıcı eleman olarak kullanılamayacağı ifade edilmiştir.

Şahin (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, endüstriyel kenevir saplarının farklı bağlayıcılarla birlikte kenevir betonu üretiminde nasıl değerlendirilebileceği incelenmiştir. Bu çalışmada, geleneksel betonun çevresel etkisini azaltma amacıyla bitki bazlı agrega kullanımı üzerinde durulmuştur. Araştırmacı, Türkiye'de yetiştirilen kenevir bitkisinin atık olan saplarının kenevir betonu üretiminde kullanılmasını hedeflemiştir. Çimento, kireç ve hidrolik kireç olmak üzere üç farklı bağlayıcı ile toplamda yedi farklı bağlayıcı kombinasyonu oluşturulmuş ve bu kenevir betonlarının birim hacim ağırlığı, basınç dayanımı ve kapiler su emme gibi fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Üretilen numuneler laboratuvar şartlarındaki hava koşullarında 28 gün boyunca kür edilmiştir. 28 günlük kür sürecinin sonunda, elde edilen numunelerin birim hacim ağırlığı 401-455 kg/m³, basınç dayanımları 0,08-0,28 MPa ve kapiler su emme katsayıları ise 2,45-4,47 kg/m².s^{1/2} aralığında değiştiği belirlenmiştir. Hidrolik bağlayıcı oranının azalmasıyla birlikte, basınç dayanımının ve birim hacim ağırlıklarının azaldığı gözlemlenmiştir.

Literatür bilgisi ışığı altında sürdürülebilir yapı malzemelerinin kullanımı ve özellikle karbon negatif malzemelerin kullanımı ve yaygınlaştırılması gerekmektedir. Bu amaçla bims blok üretiminde pomza ve kenevir sapı agrega olarak bir araya getirilerek yapı sektöründe

olumsuz çevresel etkiler azaltılabilir, karbon salınımı telafi edilerek karbon negatif hedeflere ulaşmaya katkı sağlanabilir.



MATERYAL ve YÖNTEM

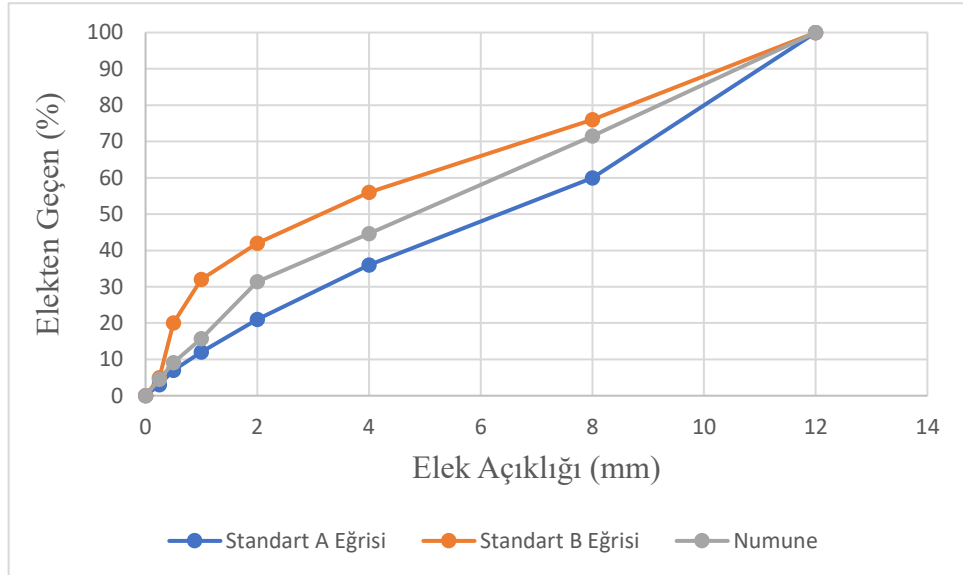
Materyal

Pomza

Deneylerde kullanılan pomza agregası, Bitlis yöresinden elde edilen pomza olup; 0-4 mm, 4-8 mm ve 8-12 mm'lik tane sınıflarına ayrılarak kullanılmıştır. Bu tez çalışması esnasında kullanılan pomzanın kimyasal özellikleri Tablo 10'da (Efe 2011) TS 706 EN 12620+A1 standardına göre granülometri eğrisi ise Şekil 6'da aşağıda gösterilmiştir.

Tablo 10. Asidik Pomzaların Genel Özellikleri

Asidik Pomza İçeriği	Bileşen (%)
SiO ₂	70,0
Al ₂ O ₃	14,0
FeO ₃	2,5
CaO	0,9
Na ₂ O+K ₂	9,0
MgO	0,6
Kızdırma Kaybı	3,0



Şekil 6. Granülometri eğrisi

Çimento

Bu çalışmada bağlayıcı olarak kullanılan CEM 1 42,5 R çimentosu Erzurum Aşkale Çimento fabrikasından temin edilmiştir. Su/çimento oranı düşük bir karışım yapıldığından dayanımı yüksek olan çimento sınıfı kullanılmıştır. TS EN 197-1 (2012) bileşim, özellikler ve uygunluk kriterlerine uygunluğu kontrol edilen CEM 1 42,5 R çimentosunun aynı fabrikada yaptırılan fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 11’de, basınç dayanım değerleri ise Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 11. CEM 1 42,5 R Çimentosunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Oksitler	Bileşen (%)
SiO ₂	20,96
Al ₂ O ₃	3,82
Fe ₂ O ₃	3,71
CaO	63,37
MgO	3,67
SO ₃	2,91
K ₂ O + Na ₂ O	0,40
Kızdırma Kaybı (%)	0,80
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0,36
Serbest CaO	0,89

Tablo 12. CEM 1 42,5 R Çimentosunun Basınç Dayanım Değerleri

Priz Süresi(dak.)		Özgül Ağırlık	Özgül Yüzey (cm ² /g)	Basınç Dayanımı (MPa)	
Başlama	Bitiş	3,06	3420	2 gün	28 gün
162	195			28	60

Kenevir Sapı

Kullanılan kenevir sapsarı işlenmiş olarak Samsun ili T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğünden temin edilmiştir. Beton içerisinde kenevir lif kullanılan çalışmalar incelendiğinde liflerin uzunluğunun genellikle 50-80 mm uzunluğunda olduğu görülmektedir (Alkan 2021; Karşin 2022). Bu çalışmada maksimum boyut 60 mm olacak şekilde hazırlanmıştır. Deneyde kullanılan işlenmiş haldeki kenevir sapı Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Kenevir sapı

Su

Hafif beton üretiminde TS EN 1008 (2003)'e uygun Erzurum ili, şebeke suyu temin edilerek kullanılmıştır.

Yöntem

Laboratuvar çalışmaları beş aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalar aşağıda gösterildiği şekilde ilerlemiştir.

1. Aşama: Deneysel çalışmada kullanılacak malzemelerin temini ve laboratuvara getirilmesi
2. Aşama: Pomza- çimento- su karışımının optimum değerlerinin belirlenmesi
3. Aşama: Kenevir sapı karışım oranlarının belirlenmesi
4. Aşama: Kiriş ve küp numunelerin hazırlanması ve deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi
5. Aşama: Bims blokların üretimi ve deneysel çalışmalarının gerçekleştirilmesi

Deney Numunelerinin Hazırlanması

1. aşamada laboratuvara getirilen pomza agregası öncelikle Şekil 8'de gösterildiği gibi yıkanmış, üzerindeki tozlardan arındırılmış, kuru birim hacim ağırlığına ulaşması amacıyla 105 derecede 24 saat bekletildikten sonra (Şekil 9) agregalar TS ISO 3310-1 (2019)'a uygun metal

tel örgülü elekler ile maksimum tane ϕ apına uygun olarak standart eğriler arasında kalmak üzere tane ϕ aplarına ayrılmıştır (Şekil 8).

2. aşamada optimum pomza, çimento ve su karışım oranını belirlemek için ön deneyler yapılmıştır. Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvarında yapılan bu ön deneylerde 10x10x40 cm'lik dikdörtgen ve 10x10x10 cm'lik küp numuneler üretilmiştir. Ön deneylerde pomzanın su emme kapasitesinin belirlenmesi ve çimento miktarının azaltılması için çalışmalar yapılmıştır. Su/çimento oranı sırasıyla 0,55, 0,75 ve 0,85 olarak kullanılmış ve çimento miktarının en az seviyede tutulması için 0,85 oranı seçilmiştir.

3. Aşamada kenevir sapının pomza yerine ikame edilme oranları belirlenmiştir. Pomza agregalarının bünyesinde birbirinden bağımsız çok fazla gözenek bulundurması ve kenevir sapları ile çimento hamuru arasında su taşınımının olmasından dolayı yapılan literatür araştırmalarındaki karışım oranlarında su/çimento oranı tam doğrulukta hesaplanamadığı ancak deneme-yanılma yolu ile ideal su miktarına ulaşılabileceği görülmüştür (Seng and Magniot 2019; Faure et al. 2012). Bu doğrultuda pomza ve kenevir sapının su emme oranının %15'in üzerinde olduğundan (Gökçe ve Can 2009; Şahin 2022) karışım suyu miktarı en uygun yöntem olarak ön deneyler sonucunda bulunmuştur. Kenevir sapı kullanım oranı belirli bir yüzdeyi aştığında çimento matrisi ile tam olarak sarılamadığından dağıldığı gözlenmiştir. Sonuç olarak su/çimento oranı 0,85, kenevir sapının pomza agregası yerine ikame oranları hacimce %2,5, %5 ve %7,5 olarak belirlenmiştir.



Şekil 8. Pomza agregasının yıkanması ve elek analizi



Şekil 9. Pomza agregalarının fırınlama işlemi

4. aşamada ön deneyler sonrası bulunan karışım oranları ile 10x10x40 cm'lik kiriş kalıplarında biri referans numune olmak üzere toplam 4 deney grubu ve her bir grupta 8 adet toplam 32 numune olacak şekilde dökümler yapılmıştır (Şekil 10). Betonun dayanımını kazanma sürecinde kür edilmesi önemlidir. Piyasada üretilen bims bloklar için yeterince depolama alanı olmadığından bazı üretim tesislerinde 3 gün sonunda dış ortam koşullarında kür edilmektedir. Bu nedenle numunelerden farklı kür koşullarını kıyaslayabilmek maksadıyla her grup için 4 numune laboratuvar ortamında $18\pm 2^{\circ}\text{C}$ ve rölatif bağıl nem $\%45\pm 10$ da kür edilmiş, diğer 4 numune ise atmosferik ortamda sıcaklık en yüksek 22°C en düşük 6°C , rölatif bağıl nem değerleri ortalama $\%77$ gr/m^3 ve ortalama rüzgâr hızı 2,6 km/saat de dış ortam koşullarında kür edilmiştir. Dış ortam koşullarına ait değerler Erzurum Meteoroloji Müdürlüğü'nden alınmıştır. Kullanılacak malzemeler karışım oranlarına göre ayrı ayrı hazırlanmış ve nemlendirilen betonyer içine dökülerek homojen bir karışım olması için 1 dakika karıştırılmıştır. Belirlenen su miktarı karışıma üç seferde ve yavaş yavaş ilave edilerek 2 dakika boyunca karıştırılmıştır. Betonyer içindeki karışım bir mala yardımı ile iki tabaka halinde sıkıştırılarak numune kaplarına yerleştirilmiştir. Tabakalar sıkıştırma çubuğu yardımı ile en az 25'er defa olacak şekilde şişlenmiş, boşluk kalmaması için tokmak ile hafifçe vurulduktan sonra mala ile yüzey düzeltilmiştir.

Deneyde numuneler için seçilen kodlamalarda K keneviri, sonraki sayısal ifade pomza yerine ikame edilen kenevir sapının % oranını, NK laboratuvar ortamındaki iç ortam kür şartını, DK dış ortam koşullarındaki kür şartını, NB laboratuvar ortamında kür edilen bims blokları ifade etmektedir. Bu kodlamaya göre laboratuvar ortamında kür edilen numuneler içeriğinde

bulunan kenevir sapı oranına göre K0NK, K2,5NK, K5NK ve K7,5NK olarak, dış ortam koşullarında kür edilen numuneler içeriğindeki kenevir oranına göre K0DK, K2,5DK, K5DK ve K7,5DK olarak adlandırılmış bims blok için üretilen numuneler ise yine aynı şekilde K0NB, K2,5NB, K5NB ve K7,5NB olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 10. Numunelere ait görüntü

5. aşamada belirlenen kenevir betonu grupları için Erzurum Aziziye ilçesi Ilıca mevkinde hizmet veren Akalın Bims Blok üretim tesislerinde Şekil 11’de gösterilen briket makinesi ile 190x375x185 mm boyutlarında bims bloklar üretilmiştir.



Şekil 11. Bims blok numunelerinin üretimi

Numunelerin Karışım Oranları

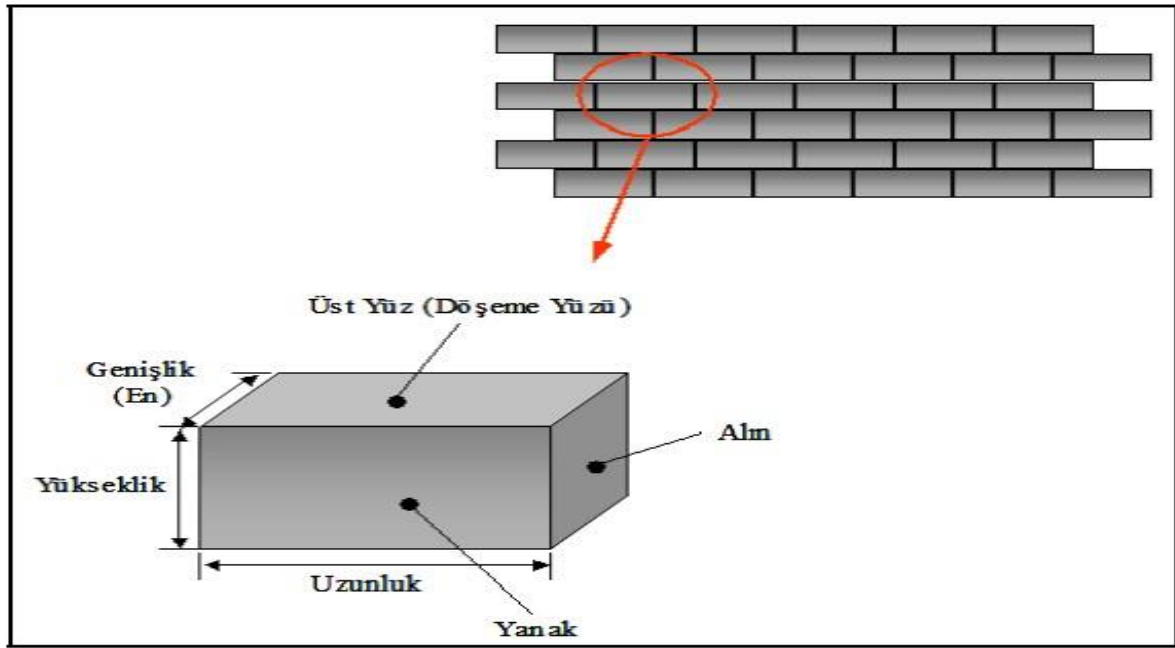
Alkan (2021)'nın ve Karşın (2022)'in yaptığı çalışmalardan hareketle ön deneylerde kenevir sapsları için ideal karışım hesapları yapılmıştır. Çimento dozajı sabit tutulmuş ve pomza agregası yerine %2,5, %5 ve %7,5 oranlarında işlenmiş halde gelen kenevir sapsları eklenmiştir. TS 802 (2016) standardının mutlak hacim metoduna göre çimento, su, hava ve agrega hacminin toplamı 1m³ olacak şekilde hesaplanmış ve malzemelerin ağırlıkları Tablo 13'te verilmiştir.

Tablo 13. 1 m³ İçin Karışım Oranları

Numune adı	Pomza (0-4) (kg)	Pomza (4-12) (kg)	Kenevir sapı(kg)	Çimento (kg)	Su/Çimento oranı
K0NB K0DK K0NK	225,0	525,0	0	137,5	0,85
K2,5NB K2,5DK K2,5NK	210,0	487,5	27,5	137,5	0,85
K5NB K5DK K5NK	187,5	452,5	55,0	137,5	0,85
K7,5NB K7,5DK K7,5NK	178,75	417,5	82,5	137,5	0,85

Boyut ve Tolerans Analizi

Bims bloklar için TS EN 772-2 (2000) standartlarına göre boşluk oranının belirlenmesi işlemleri ve TS EN 772-16 (2012) standartlarına göre boyutların tayini ve tolerans analizi yapılmıştır. Bir blok elemanın boyut tayini için genellikle blok uzunluğu, genişliği ve yükseklik değeri ölçülmektedir. Bu boyutlara anma boyutları denilmekte ve Şekil 12'de gösterilen anma boyutları terminolojisi kullanılmaktadır. Her bir blok elemanının yan kenarları Şekil 13'te gösterildiği biçimde ölçümleri 0,2 mm hassasiyetle yapılmaktadır. Sonrasında, her numunenin yaklaşık ortasından en az birer ölçüm alınır.



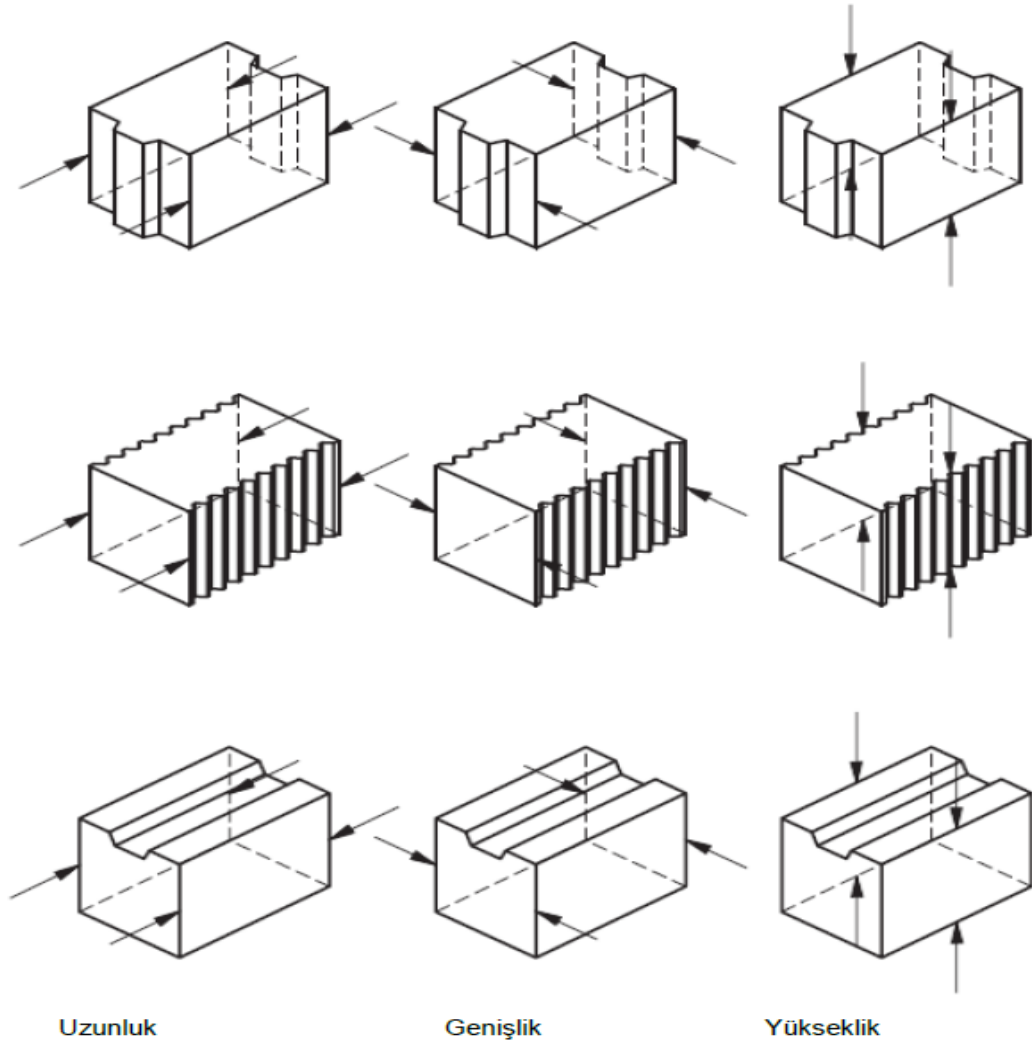
Şekil 12. Blok elemanları boyutlar ve yüzeyler

Düğüün yüzeyli olmayan numunelerin uzunluk (l_u), genişlik (w_u) ve yüksekliğı (h_u) Şekil 13'te gösterilen yerlerden ölçölerek belirlenmiştir. Deneyin ilk aşamasında bir cetvel yardımıyla tüm boyutlar ölçölümüş ikinci aşamada ise tüm cidar kalınlıkları ölçölerek not edilmiştir.

Ölçme işlemlerinde, TS EN 772-16'ya uygun ölçüm hassasiyetini sağılayan cihazlar kullanılır. İç ve dış et kalınlıklarının ölçölmesinde kullanılan cihazın çenesinin en az 10 mm uzunlukta olması istenir. Ölçüm sonuçları TS EN 771-3+A1 standardında belirtilen ve Tablo 14'te verilen toleranslara uygunluğu kontrol edilmiştir.

Tablo 14. İzin Verilen Sapmalar (mm cinsinden)

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



Şekil 13. Blok elemanlarının boyut ölçüm yerleri

Konfigürasyon ve Görünüş Analizi

Üretimi gerçekleştirilmiş olan tüm numuneler için TS EN 771-3+A1 (2015) standartlarına göre şekil, yüzey boşluğu, renk ve piyasa şartlarına uygunluğu konfigürasyon analizi ile tespit edilmiş ve özellikleri tanımlanmıştır. Blok elemanının boyutlandırılması esas alınarak dikdörtgen prizmatik, kare prizmatik ve oval prizmatik şekillerden hangisi olduğu tanımlanır. Bims blokların yapısal olarak boşluklu ya da dolu olduğu belirtilir. Düzgün şekilli boşluklu bims blok elemanlarının boşluk oranları TS EN 772-16 (2012) standardında öngörülen ölçme yöntemine göre ölçülerek değeri belirlenir. Bims blok elemanlarının bir veya her iki döşeme yüzeyinde tasarlanarak oluşturulan çukurların toplam hacmi, bims bloğun uzunluk, genişlik ve yükseklik değerlerinin çarpımı ile elde edilen brüt hacminin %20'sini geçmemesi gerekmektedir. Üretilen deney numunelerinin piyasada bulunan eş değer ürünlerle arasında fark olup olmadığı değerlendirilmeye çalışılmıştır.

Bims bloklar için yüzeylerin görünüş kontrollerinin yapılması ise daha önce uygunluğu onaylanmış numunelerle yan yana getirilerek 3 metre mesafeden normal gün ışığında gözle kıyaslanarak kontrolünün yapılabilirliği belirtilmiştir (Kayan 2019).

Birim Hacim Ağırlık Analizi

Üretilen tüm numuneler için TS EN 771-3+A1 (2015) standardına uygun bir şekilde, numunelerin boyutları 0,1 mm hassasiyetle kumpas yardımı ile ölçülmüş ve hacmi bulunmuştur. Etüv sonrasında değişmez hacme gelen numuneler soğuduktan sonra 0,1 gr hassasiyetli ölçüm yapan elektronik terazide tartılmıştır. Tartım sonuçları kaydedilerek TS EN TS EN 772-13 (2002) standardına göre kütle (gr), numune hacmine (cm³) bölünerek birim hacim ağırlık değerleri elde edilmiştir. Numunelerin kuru birim ağırlığı denklem (1) yardımı ile hesaplanmıştır.

$$KB = \frac{WK}{V} \quad (1)$$

KB: Kuru birim hacim (gr/cm³)

WK: Numunenin kurutulmuş kütlesi (gr)

V: Numunenin hacmi (cm³)

Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Numunelerin ses yalıtım özelliklerinin belirlenmesi için ultrases geçiş hızı deneyi TS EN 12504-4 (2021)'e göre yapılmıştır. Şekil 14'te gösterilen 0,1-9999 µs ölçüm aralığına sahip ultrases test cihazı Qust-120+ ile numunenin içerisine gönderilen ses dalgaların yüzeyler arası geçme süresi ölçülüp, dalga hızı hesaplanmaktadır. Bulunan bu ses dalga hızı ile numunenin basınç dayanımı ve boşluklu yapısı hakkında yorum yapılır. Deney yapılırken ilk önce numunenin düzgün iki yüzeyi seçilir, proplar tam karşılıklı gelecek şekilde yüzeyin pürüzlülüğünün giderilmesi ve cihazın proplarıyla daha iyi temas etmesi için belirlenen bu noktalara gres yağı sürülür ve ölçüm yapılır. Aletin göstergesinden okunan ultrasonik dalga hızı (UPV) değerleri metre/saniye olarak okunmuştur ve denklem (2) yardımı ile hesaplanmıştır.

$$V = \frac{L}{t} \quad (2)$$

V: Ultrases hızı (metre/saniye)

L: Numunenin boyu (metre)

t: Ultrases geçiş süresi (saniye)



Şekil 14. Ultrases ölçüm cihazı

Basınç Dayanım Deneyi

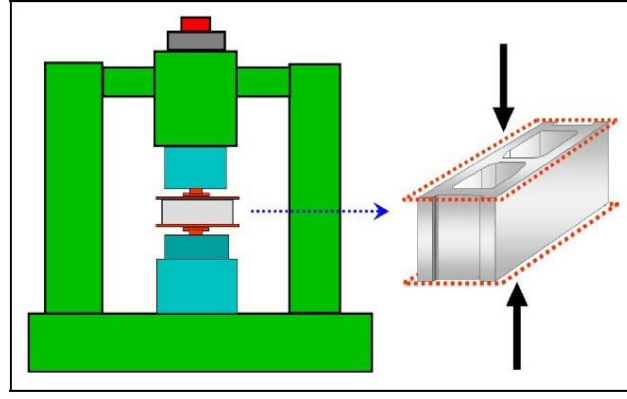
Numunelerin boyutları 0,1 mm hassasiyetle ölçülerek basınç uygulanacak yüzeyin brüt alanı tespit edilmektedir. Bims blokların basınç testi için düzgün bir cam yüzeyi yardımı ile deneye hazır hale getirilmektedir. Deney, basınç deney pres düzeneğinde numuneler kırılana dek yükleme hızı 0,05 MPa/s ve saniyede en fazla 1 MPa olacak şekilde TS EN 772-1+A1 (2015) standardına uygun olarak Şekil 15'te gösterilen bims blokların yükleme düzeneğine göre gerçekleştirilmektedir. Basınç dayanımı (σ_m), denklem (3) ile hesaplanmıştır.

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A_0} \quad (3)$$

σ_m : Basınç dayanımı (N/mm²)

F_m : Kuvvet (N)

A_0 : Numunenin en kesit alanı (mm²)



Şekil 15. Bims blokların yükleme düzeneği (Toklu 2009)

Eğilme Dayanım Deneyi

Kiriş numunelerine ait eğilme deneyi TS EN 12390-5 (2019) standardına göre deney numunelerinin malzeme mukavemeti ve numunelerin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini belirlemek üzere yapılmıştır. Numunenin tam orasından yapılan yükleme ile oluşan sehim değerleri kaydedilerek gerekli grafikler oluşturulmuştur. Üretilen kiriş numunelerin eğilme testleri tek pistonlu basma ve eğilme test cihazı ile deneysel prosedürleri gerçekleştirilmiş ve Şekil 16’da kiriş numunelere ait yükleme düzeneği gösterilmiştir. Deneysel numunelerde kullanılan bu cihaz otomatik hız ayarlı olup 1000 ton kapasitededir. Eğilme dayanımı (σ_b), denklem (4)’den yararlanılarak hesaplanmıştır.

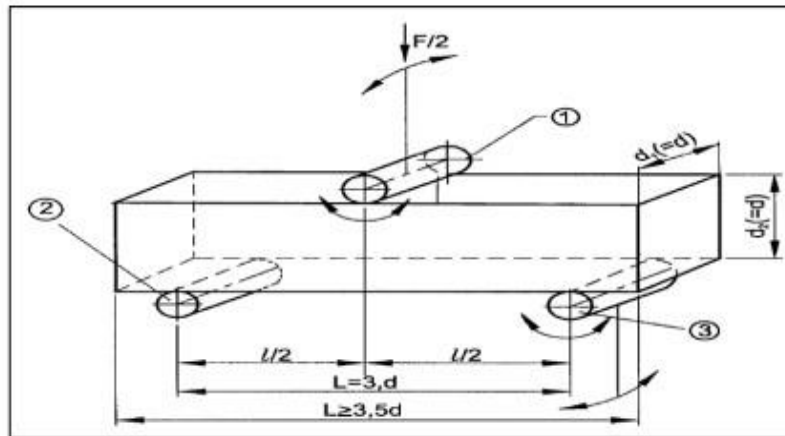
$$\sigma_b = \frac{3F_m L}{2bd^2} \quad (4)$$

F_m : Kuvvet (Newton)

L : mesnetler arası açıklık (mm)

b : deney numunesinin genişliği (mm)

d : deney numunesinin kalınlığı (mm)



Şekil 16. Kiriş numunelerin yükleme düzeneği (TS EN 12390-5)

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çalışma kapsamında üretilen tüm numunelere ait deney sonuçları aşağıda verilerek irdelenmiştir.

Deney Sonuçları

Boyut ve Tolerans Analizi Sonuçları

Bims blok olarak üretilen numuneler için materyal ve yöntem kısmında verilen TS EN 772-16 (2012) standardında belirtildiği gibi uzunluk, genişlik ve yükseklik ölçümleri cetvel yardımı ile, numunenin tüm cidar kalınlıkları (iç cidar kalınlığı, dış cidar enine doğru olan kalınlığı ve dış cidar boyuna doğru olan kalınlıkları) ise kumpas yardımı ile Şekil 17’de örnekleri verildiği gibi ölçülmüştür. Tablo 15’te blokların 190x375x185 mm referans aralığındaki boyutları ve Tablo 16’da ise cidar kalınlıkları gösterilmiştir. Deney için üretilen tüm numunelerin kenevir sapı kullanılan numuneler de dahil olmak üzere boyutlarında tolerans dışı herhangi bir fark tespit edilememiştir.



Şekil 17. Numunelerin ölçümü



Şekil 17. Numunelerin ölçümü (devamı)

Tablo 15. Numunelere Ait Birim Boyutlar

Numune Adı	Numunelerin Birim Boyutları			Maksimum Ölçüm Hatası (mm)
	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)	
K0NB	375,04	185,20	190,04	0,1
K2,5NB	375,17	185,22	190,09	0,1
K5NB	375,13	185,21	190,09	0,1
K7,5NB	374,97	185,27	190,07	0,1

Tablo 15 incelendiğinde uzunluk, genişlik ve yükseklik boyutlarının tamamında izin verilen sapma aralığında kaldığı ayrıca TS EN 771-3+A1 (2015) standardında belirtilen D4 tolerans kategori sınıfına uygun olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 16. Numunelere Ait İç ve Dış Cidar Kalınlıkları

Boyut (mm)	Numune			
	K0NB	K2,5NB	K5NB	K7,5NB
İç Cidarın Kalınlığı	0,20	0,21	0,21	0,22
Dış Cidarların Kalınlığı (Enine)	0,20	0,20	0,20	0,21
Dış Cidarların Kalınlığı (Boyuna)	0,20	0,20	0,21	0,22

TS EN 771-3+A1 standartlarında belirtildiği üzere numunenin iç cidar kalınlıkları ve dış cidarların kalınlığı beyan edilmelidir. Tablo 16'da numune üzerinde tasarlanarak oluşturulmuş boşluklar ile dolu malzeme kısmı olan iç cidar kalınlığı ve numunenin dış yüzeyi ile tasarlanarak oluşturulmuş boşluklar arasındaki dolu malzeme kısmı olan dış cidar kalınlığı ölçülmüş ve ilgili standartta belirtilen sapma miktarı olan $\pm \%10$ 'dan daha fazla sapmadığı görülmüştür.

Konfigürasyon ve Görünüş Analizi Sonuçları

Bims blok olarak dökülen tüm numunelerin konfigürasyon ve görünüş analizi için şekli, yüzeyindeki boşlukları, rengi ve aynı zamanda piyasa şartlarına uygunluğu TS EN 771-3+A1 (2015) standardına göre 3 metre mesafeden normal gün ışığında incelenerek tespiti yapılmıştır. Üretilen ürünlerin A firmasından temin edilen eşdeğer ürünler ile karşılaştırılmalı analizleri Tablo 17’de sunulmuştur.

Tablo 17. Numunelerin Özellikleri

Analize Esas Özellikler	Numune Adı			
	K0NB	K2,5NB	K5NB	K7,5NB
Şekil	Dikdörtgen Prizma	Dikdörtgen Prizma	Dikdörtgen Prizma	Dikdörtgen Prizma
Yüzeysel Boşluklar	Az	Kısmen Az	Kısmen Az	Kısmen Çok
Renk	Gri	Gri	Gri	Gri
Piyasa Şartlarına Uygunluk	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun

Üretilen bloklar piyasada bulunan ve bilinen eşdeğer bims bloklarla karşılaştırıldığı zaman şekil, yüzeysel boşluk ve renk olarak uygunluğu görülmüştür. Ancak sonuçlar içerisinde kenevir ikamesinin en fazla olduğu K7,5NB numunesinin yüzeyindeki yüzeysel boşluklar kısmen çok olarak belirlenmiştir. Üretilen bims bloklar dikdörtgen prizmatik, boşluklu ve harç cepli olacak şekilde üretilmiştir.

Birim Hacim Ağırlık Sonuçları

Üretilen hafif betonların birim hacim ağırlıkları materyal ve yöntem kısmında belirtilen ve TS EN 772-13 (2002) standardına uygun olarak bulunmuş ve sonuçları kiriş numuneler için Tablo 18’de, bims blok numuneleri için Tablo 19’da gösterilmiştir.

Tablo 18. Kiriş Numunelerin Birim Hacim Ağırlıkları

Numune Adı	Uzunluk (cm)	Genişlik (cm)	Yükseklik (cm)	Hacim (cm ³)	Kuru Ağırlık (Ortalama) (gr)	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Ağırlık Farkı %
K0NK	40	10	10	4000	3599,5	0,89	0
K2,5NK	40	10	10	4000	3195,0	0,79	11
K5NK	40	10	10	4000	2935,0	0,73	17
K7,5NK	40	10	10	4000	2827,0	0,70	21
K0DK	40	10	10	4000	3719,0	0,92	0
K2,5DK	40	10	10	4000	3545,5	0,88	4
K5DK	40	10	10	4000	3167,5	0,79	14
K7,5DK	40	10	10	4000	2955,5	0,73	20

Kiriş numunelerinde birim hacim ağırlığı 0,92 gr/cm³ ile 0,70 gr/cm³ arasında bulunmuştur. Tablo 18’de ki sonuçlara bakıldığında laboratuvar ortamında kür edilen numunelerde kenevirsiz kontrol gruplarına göre %11 ile %21 arasında, dış ortam koşullarında kür edilen numunelerde ise kenevirsiz kontrol gruplarına göre %4 ile %20 arasında birim hacim ağırlığın düştüğü görülmüştür. Laboratuvar ortamında kür edilen kiriş numunelerinde K0NK’ya göre K2,5NK %11, K5NK %17 ve K7,5NK %21 oranında birim hacim ağırlığı azalmıştır. Dış ortam koşullarında kür edilen kiriş numunelerinde K0DK’ya göre K2,5DK %4, K5DK %14 ve K7,5DK %20 oranında birim hacim ağırlığı azalmıştır. Numunelerde en düşük birim hacim ağırlığı K7,5NK kodlu numunede, en yüksek birim hacim ağırlığı K0DK kodlu numunede elde edilmiştir. Üretilen numunelerin birim hacim ağırlık değerlerine bakıldığı zaman TS EN 206+A2 (2021) standardına göre D 1.0 sınıfına ve yalıtım betonu sınıfına girmektedir.

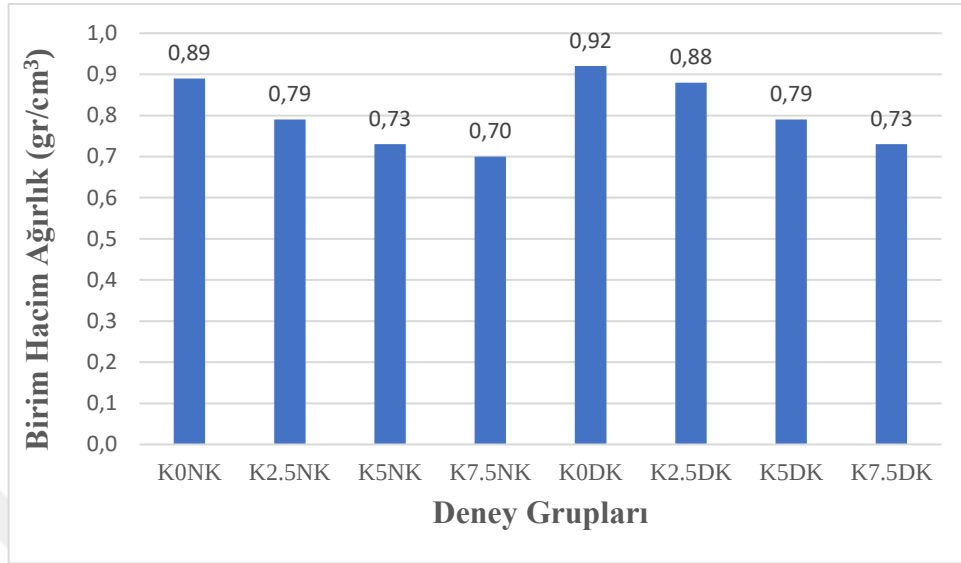
Tablo 19. Bims Blok Numunelerin Birim Hacim Ağırlıkları

Numune Adı	Uzunluk (cm)	Genişlik (cm)	Yükseklik (cm)	Hacim (cm ³)	Kuru Ağırlık (Ortalama) (gr)	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Ağırlık Farkı %
K0NB	37,5	19	18,5	13181,25	9083,5	0,689	0
K2,5NB	37,5	19	18,5	13181,25	8457,7	0,641	6
K5NB	37,5	19	18,5	13181,25	7657,5	0,580	15
K7,5NB	37,5	19	18,5	13181,25	7703,6	0,584	15

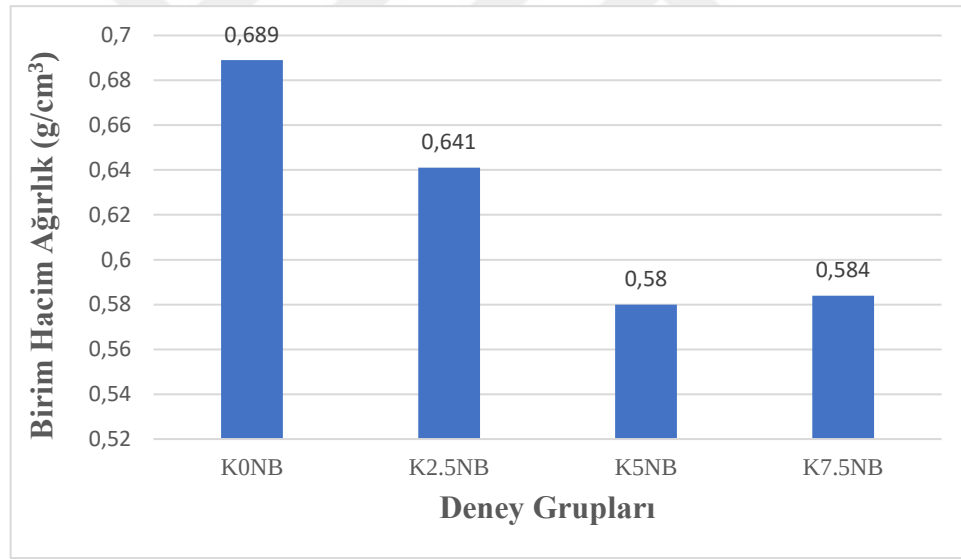
Tablo 19’da ki sonuçlara bakıldığında bims bloklar içinde kenevir sapı ikame oranının artmasıyla birim hacim ağırlığı %6 ile %15 arasında düştüğü görülmüştür. Bims bloklar için referans grubu olan K0NB’ye göre K2,5NB %6, K5NB %15 ve K7,5NB %15 oranında birim hacim ağırlığı azalmıştır. Bims blok numunelerinde birim hacim ağırlığı 0,689 gr/cm³ ile 0,584 gr/cm³ aralığında bulunmuştur. Bims bloklarda en yüksek birim hacim ağırlığı K0NB kodlu numunelerde, en düşük birim hacim ağırlığı K7,5NB kodlu numunelerde elde edilmiştir.

Pomza agregası her ne kadar hafif agrega olsa da kenevir sapı daha hafif bir yapıda olduğundan birim hacim ağırlık değeri düşmüştür. Birim hacim ağırlığı gruplarına göre referans grup olan K0NB, K0NK ve K0DK numunelerinde sırasıyla 0,689 gr/cm³, 0,89 gr/cm³, 0,92 gr/cm³ ile en yüksek değerde olurken, en düşük birim hacim ağırlıkları kenevir oranının en fazla olduğu K7,5NB numunesinde 0,584 gr/cm³, K7,5NK numunesinde 0,70 gr/cm³ ve K7,5DK numunesinde 0,73 gr/cm³ olmuştur. Bu sonuçlar tezin amacını doğrular niteliktedir. Akdere (2023) yapmış olduğu kenevir lifinin köpük beton üretiminde kullanılabilirliğini araştırdığı çalışmada 0,35 gr/cm³ ile 0,43 gr/cm³ arasında birim hacim ağırlık değerleri bularak kenevir lifi kullanılarak düşük birim hacim ağırlığına sahip hafif beton üretilebileceğini söylemiştir. Birim hacim ağırlığının azalmasıyla binaya gelen ölü yük ciddi anlamda azaltılabilecektir. Bu

ölü yükün azaltılması ile projelendirilen ve tasarlanan yapılarda taşıyıcı sistem buna göre boyutlandırılarak ekonomi sağlanacaktır. Şekil 18’de kiriş numunelere ait, Şekil 19’da Bims bloklara ait birim hacim ağırlık grafikleri verilmiştir.



Şekil 18. Kiriş numunelere ait birim hacim ağırlık değerleri grafiği



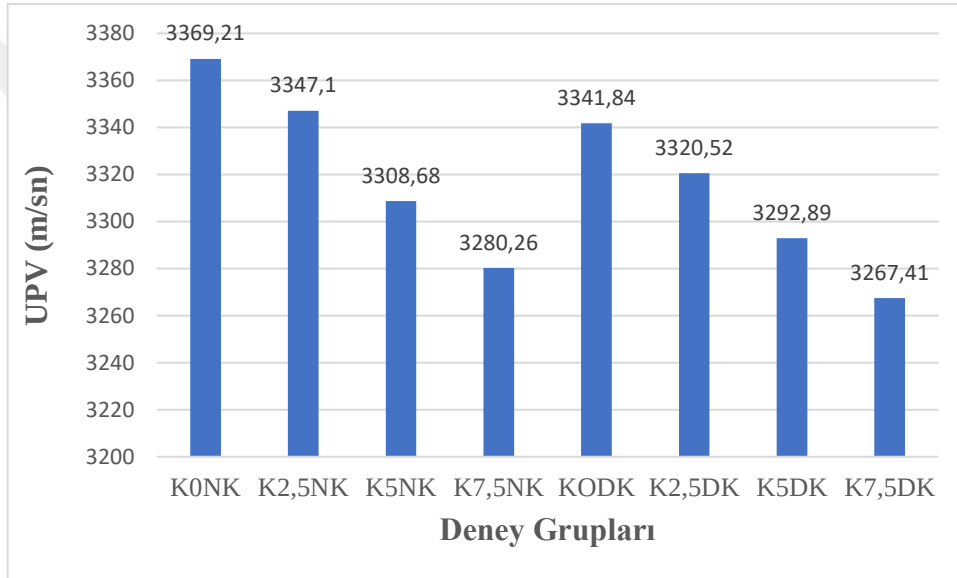
Şekil 19. Bims bloklara ait birim hacim ağırlık değerleri grafiği

Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları

Üretimi yapılmış olan kiriş numuneleri için TS EN 12504-4 standardına uygun olarak Qust-120+ cihazı ile yapılan UPV deneylerin sonuçları aşağıda Tablo 20’de verilen gibidir.

Tablo 20. Numunelerin Ultrases Geçiş Hızı Değerleri

Numune Adı	UPV (Ortalama) (m/sn)
K0NK	3369,21
K2,5NK	3347,10
K5NK	3308,68
K7,5NK	3280,26
K0DK	3341,84
K2,5DK	3320,52
K5DK	3292,89
K7,5DK	3267,41



Şekil 20. Numunelere ait ultrases geçiş hızı değerleri grafiği

Numunelere ait UPV grafiği Şekil 20’de verilmiş olup kenevir sapı kullanımı ile numune içinden geçen ultrases dalga hızında azalma meydana gelmiştir. Laboratuvar ortamında kür edilen numunelerde 3280 m/sn ile 3369,21 m/sn’ye, dış ortam koşullarında kür edilen numunelerde ise 3267,41 m/sn ile 3341,84 m/sn’ye aralığında UPV değerleri elde edilmiştir. En düşük UPV değeri 3267,41 m/sn ile K7,5DK kodlu numunesinde, en yüksek UPV değeri ise 3369,21 m/sn ile K0NK kodlu numunesinde elde edilmiştir.

Dış ortam koşullarında kür edilen numuneler, aynı oranda kenevir sapı kullanılarak içerde laboratuvar ortamında kür edilen numunelere göre daha düşük UPV sonuçları vermiştir. Bunun nedeni dış ortam koşullarında kür edilen numunelerin daha boşluklu bir yapıda olmasıdır. Numunelerin bir yüzeyinden gönderilen ultrases dalgaları karşı yüzeye ilerlerken karşılaştığı boşlukların etrafından dolaşacağından boşluklu yapının fazla olması yüzeyler

arasındaki yolu artırmış hızı azaltmıştır. K7,5DK kodlu numunenin en düşük UPV değeri alması boşluk oranının en yüksek oranda olduğunu ortaya koymuştur. Laboratuvar ortamında kür edilen numunelerin dış ortam koşullarında kür edilen numunelere göre UPV değerinin daha fazla olmasının en önemli nedeni çimento ve su arasındaki reaksiyonlar sonucunda oluşan hidratasyon ürünlerinin boşlukları doldurduğu, çimento hamurunun bağlayıcılığını sağladığı, dayanımı arttırdığı ve dolayısıyla çimento hamurundaki kapiler boşluk oranını azalttığı olarak açıklanabilir.

Genel olarak çok yüksek hızların (>4570 m/s) basınç dayanımı yüksek ve düşük hızların (<3050 m/s) basınç dayanımı düşük betonun göstergesi olduğu bilinmektedir (Temiz 2014). Sonuçlarda bu bilgiyi ve tezdeki öngörüyü desteklemektedir. Tüm numunelerin ultrases hızı düşük sayılır. Pomzanın boşluklu yapısı onun ses yalıtımı için kullanılmasının bir sebebidir. Pomza agregasının kenevir sapı ile kullanımı UPV değerlerini daha da düşürmüştür. Gökçe ve Can (2009) pomza agregası üzerinde yaptıkları çalışmada 3499 m/sn ile 3330 m/sn arasında ultrases geçiş hızı değerleri bulmuşlardır. Türkmenoğlu vd (2015) ise Van pomzası kullanarak ürettikleri hafif betonlarda 3250 m/sn ile 3180 m/sn arasında ultrases geçiş hızı değerlerini bildirmişlerdir. Akdere (2023) ise kenevir lifinin köpük beton üretiminde kullanılabilirliğini araştırdığı çalışmada 1350 m/sn ile 1720 m/sn arasında değerler bulunduğunu belirtmiştir.

Bims blokların sünekliğinin ultrases geçiş hızı performansı ile paralel şekilde iyileştirdiği düşünülebilir. Bims bloklar, elastik deformasyonlarını absorbe ederek ve titreşimleri azaltarak yüksek ses geçirgenliği seviyesini azaltabilir.

Basınç Dayanım Sonuçları

Basınç dayanım deneyi üretilen küp ve bims blok numuneler için TS EN 772-1A+1 (2015) standardına göre yapılmıştır (Şekil 21). Döşeme yüzündeki çukurlar haricindeki net yükleme alanı, brüt döşeme yüzey alanının %35'inden büyük olduğu için bu çukurlarla ilgili bir işlem yapılmadan deneye tabi tutulmuştur. Bulunan sonuçlar kiriş numuneler için Tablo 21'de, bims blok numuneler için Tablo 22'de verilmiştir.

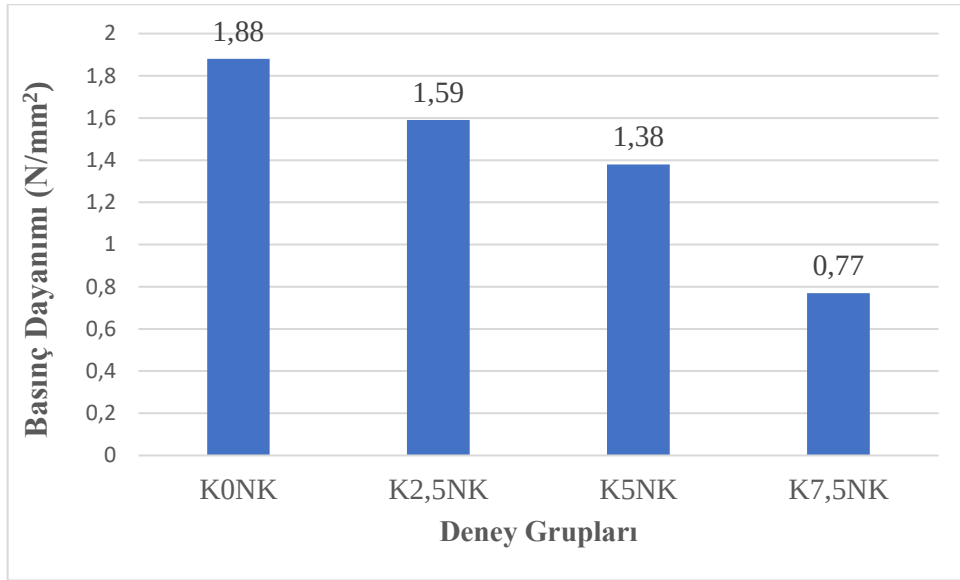


Şekil 21. Basınç deneyi düzeneği

Tablo 21. Kiriş Numunelerine ait Basınç Dayanımı

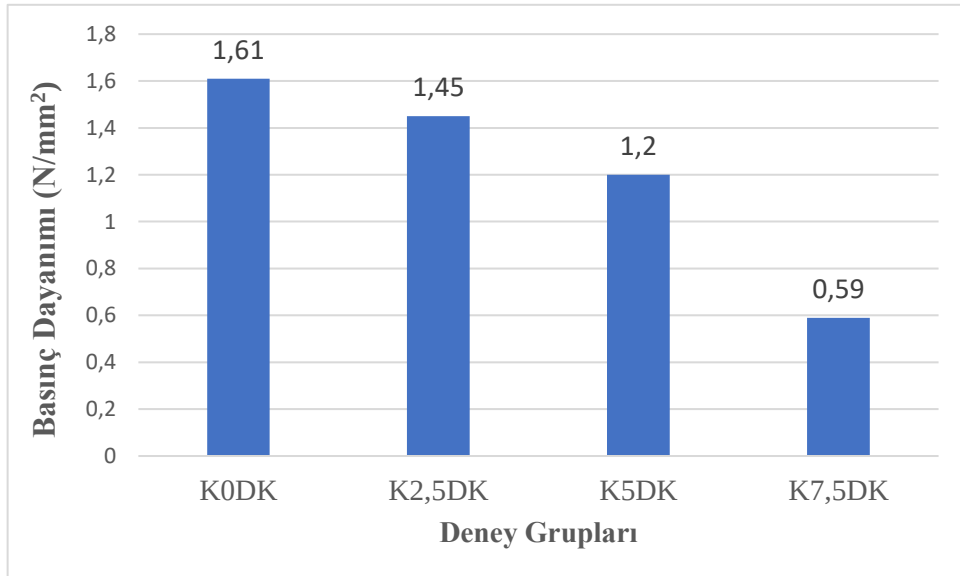
Numune Adı	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Deneye Tabi Yüzey Alanı (mm ²)	Basınç Dayanımı	
				Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (N/mm ²)
K0NK	100	100	10000	18801	1,88
K2,5NK	100	100	10000	15900	1,59
K5NK	100	100	10000	13802	1,38
K7,5NK	100	100	10000	7700	0,77
K0DK	100	100	10000	16103	1,61
K2,5DK	100	100	10000	14500	1,45
K5DK	100	100	10000	12040	1,20
K7,5DK	100	100	10000	5940	0,59

Laboratuvar ortamında kür edilen numuneler için Şekil 22’de basınç dayanım grafikleri oluşturulmuştur. Sonuçlara göre basınç dayanımı 1.88 N/mm² ile 0,77 N/mm² aralığında bulunmuştur. En yüksek dayanım 1,88 N/mm² ile K0NK kodlu numunesinde, en düşük dayanım ise 0,77 N/mm² ile K7,5NK kodlu numunesinden elde edilmiştir. Kenevir sapı ilaveli numunelerin basınç dayanımlarının %18 ile %59 oranları arasında düştüğü görülmüştür. Referans numunesi olan K0NK’ya kıyasla K5NK numunesinin %26, K2,5NK numunesinin %18 ve K7,5NK numunesinin %59 oranında olmak üzere basınç dayanımları azalmıştır.



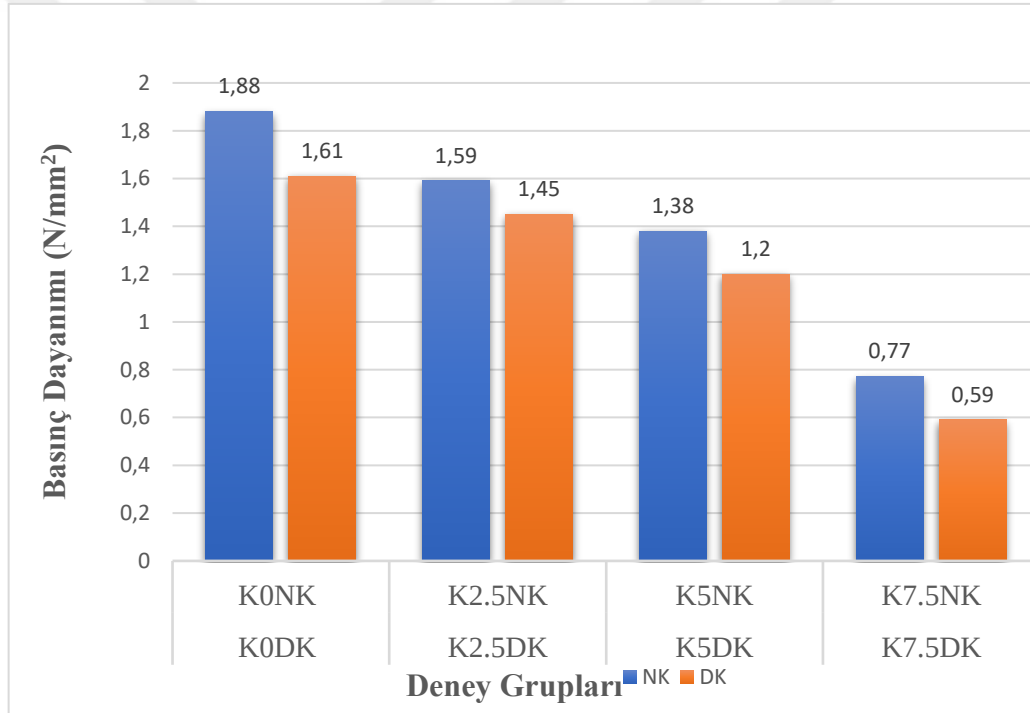
Şekil 22. Laboratuvar ortamında kür edilen numunelere ait basınç dayanım grafiği

Dış ortam koşullarında da kür edilerek test sonuçları Tablo 21’de verilen numuneler için Şekil 23’te gösterilen basınç dayanım grafiği oluşturulmuş ve en yüksek dayanım laboratuvar ortamında kür edilen numunelere benzerlik göstererek K0DK kodlu numunesinde $1,61 \text{ N/mm}^2$, en düşük dayanım ise K7,5DK kodlu numunesinde $0,59 \text{ N/mm}^2$ olarak elde edilmiştir. Numunelerin basınç dayanımları $1,88 \text{ N/mm}^2$ ile $0,77 \text{ N/mm}^2$ aralığında olmuştur. Basınç dayanımında %9 ile %63 arasında bir oranda azalma meydana gelmiştir. Kenevir sapı ilave oranı arttıkça basınç dayanımı düşüşünün yanında kür şartının da numuneler üzerindeki etkisi açıkça görülmüş laboratuvar ortamında kür yönteminin bims bloklar üzerinde pozitif etkisinin olduğu belirlenmiştir.



Şekil 23. Dış ortam koşullarında kür edilen numunelere ait basınç dayanım grafiği

Betonun dayanım kazanma sürecinde kür edilme koşullarının basınç dayanımını nasıl etkilediğini görmek için yapılan deneylerde laboratuvar ortamında kür edilen numunelerin dış ortam koşullarında kür edilen numunelere göre basınç dayanımları yüksek çıkmıştır (Şekil 24). K0NK ile K0DK kodlu numune grupları arasında %14'lük bir değişim olurken, K2,5NK ile KD2,5DK grubu arasında %9'luk bir fark ile en az değişimin olduğu numune grubu olmuştur. K5NK ile K5DK kodlu numuneler arasında %13'lük bir değişim olurken, K7,5NK ile K7,5DK kodlu numuneler arasında %23 oranı ile en fazla basınç değişiminin olduğu grup olmuştur. Bu sonuç aslında eklenen kenevir sapının bazı oranları için farklı kür şartlarının olumsuz etkisini nispeten azalttığının bir göstergesidir. Bu maksatla farklı kür şartlarının olumsuz etkisinin daha detaylı incelenmesine gerek olduğu aşikârdır. Laboratuvar ortamında kür edilen numunelerin basınç dayanımının daha yüksek çıkması betonun dayanım kazanırken ihtiyaç duyduğu su ve sıcaklık parametrelerinden kaynaklanmaktadır.

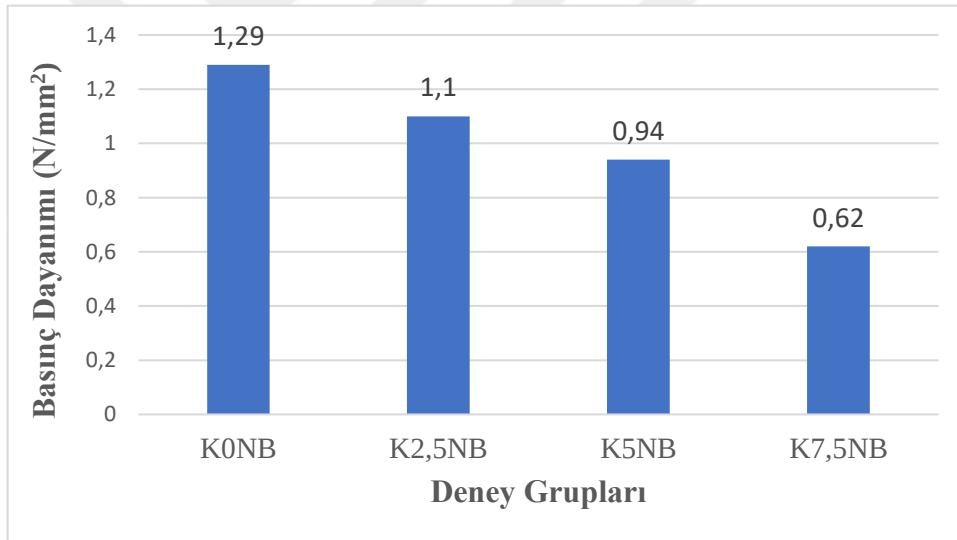


Şekil 24. Kür şartına göre basınç dayanımı değişim grafiği

Tablo 22. Bims Bloklara Ait Basınç Dayanımları

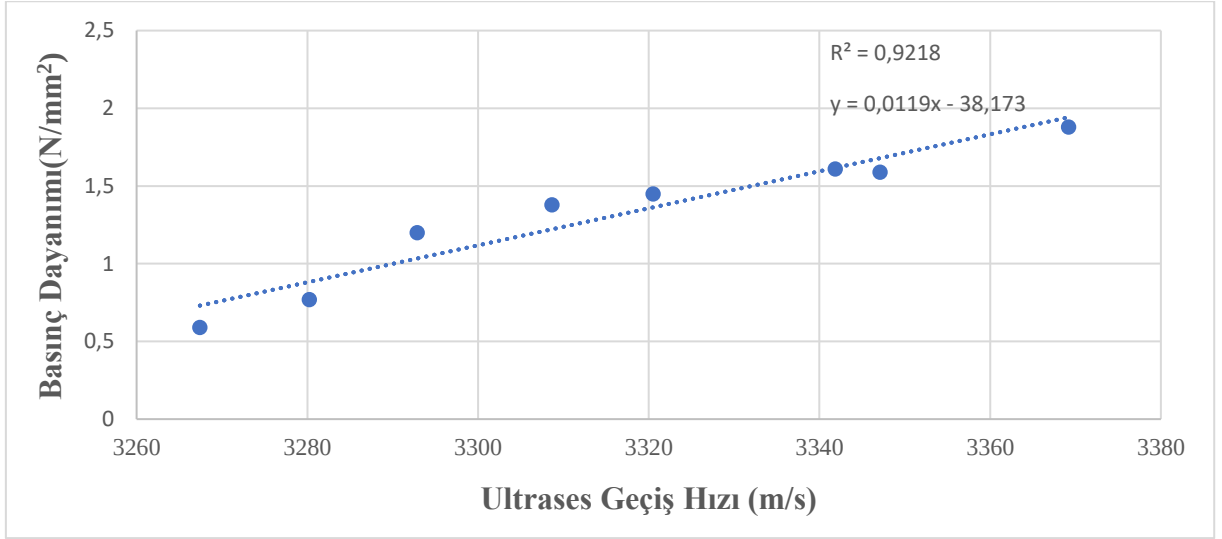
Numune Adı	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Deneye Tabi Yüzey Alanı (mm²)	Basınç Dayanımı	
				Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (N/mm²)
K0NB	375	190	71250	91912,5	1,29
K2,5NB	375	190	71250	78375,0	1,10
K5NB	375	190	71250	66975,0	0,94
K7,5NB	375	190	71250	44175,0	0,62
A Firma Ürünü	375	190	71250	59137,5	0,83

Yukarıda görülen Tablo 22’de sonuçları verilen basınç dayanım analizine göre aşağıda Şekil 25’te ki grafik oluşturulmuş ve bu basınç dayanım analiz grafiği incelendiğinde kenevir sapı ilaveli bims blokların referans numuneye nazaran basınç dayanımlarının %14 ile %51 arasında düştüğü görülmüştür. Referans numunesi K0NB’ye göre düşüş oranları K2,5NB grubunda %14, K5NB grubunda %27 ve K7,5NB grubunda %51 oranlarındadır. Kenevir sapı ilaveli numunelerin basınç dayanım ortalamaları A firmasından temin edilen numunelerin basınç dayanımı ortalama değerinden daha yüksek değerler vermiş, sadece K7,5NB grubu numunelerinin basınç dayanımı A firmasının numunelerine göre basınç dayanımı düşük çıkmıştır. Bu değerler piyasada yaygın olarak kullanılan bims bloklara nazaran çalışmada belirlenen karışım oranları ve kenevir sapı katkısının etkisinden kaynaklanmaktadır. Kenevir sapı kullanılmayan referans grubundan kenevir sapı oranının arttığı numunelere doğru basınç dayanımının giderek azalmasının sebebi, içerisinde kenevir sapı bulunan numunelerde çimento matrisinin kenevirleri yeteri kadar sarmaması ve kenevir liflerinin hafif beton içinde boşluk gibi davranmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 25. Bims bloklara ait basınç dayanım değerleri (N/mm²) grafiği

Ultrases geçiş hızı hafif beton içerisinde bulunan kusurlar, çatlaklar ve boşluklardan ultrases dalgaların yolundan sapmasıyla elde edilen verilerdir. Kenevir oranı artmasıyla birlikte hafif beton içerisinde boşluk oranı arttığından 3267,41 m/sn ile en düşük değeri kenevir oranının en yüksek olduğu K7,5DK kodlu numunede elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile Excel programı kullanılarak Şekil 26’da basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasında korelasyon kat sayısı (R^2) 0,9218 olarak bulunmuş ve aralarında pozitif çok yüksek bir korelasyon olduğunu göstermiştir. Basınç dayanımının artması için kullanılabilecek katkı maddeleri ile boşluk oranı azalabileceğinden ses dalgalarının karşı yüzeye ulaşma süresi kısalmayacağı şeklinde yorumlayabiliriz.



Şekil 26. Basınç dayanımı – ultras ses geçiş hızı arasındaki korelasyon grafiği

Eğilme Dayanım Sonuçları

Üretimi yapılan betonun eğilme dayanımı tayini TS EN 12390-5 (2019) standardına uygun olarak 40 x 10 x 10 cm kiriş numuneleri için açıklığın orta noktasından yüklenmiş, 3 noktalı eğilme dayanımı testi Şekil 27’de gösterilen şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 28’de laboratuvar ortamında kür edilen numunelerin, Şekil 29’da ise dış ortam koşullarında kür edilen numunelerin eğilme deneyleri sonucunda oluşturulan yük deformasyon grafikleri verilmiştir.

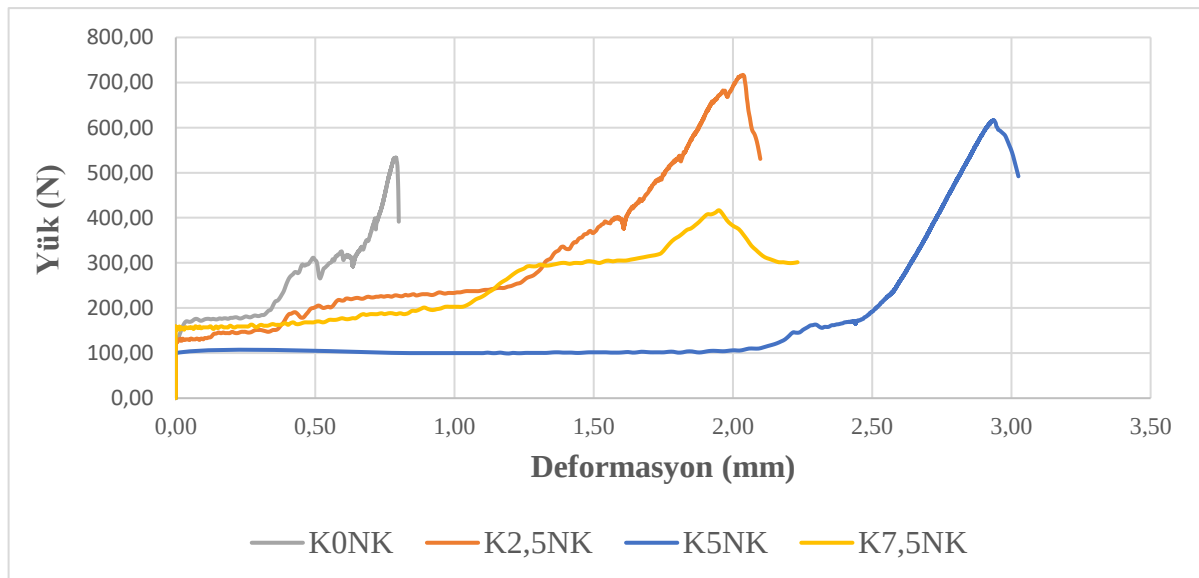


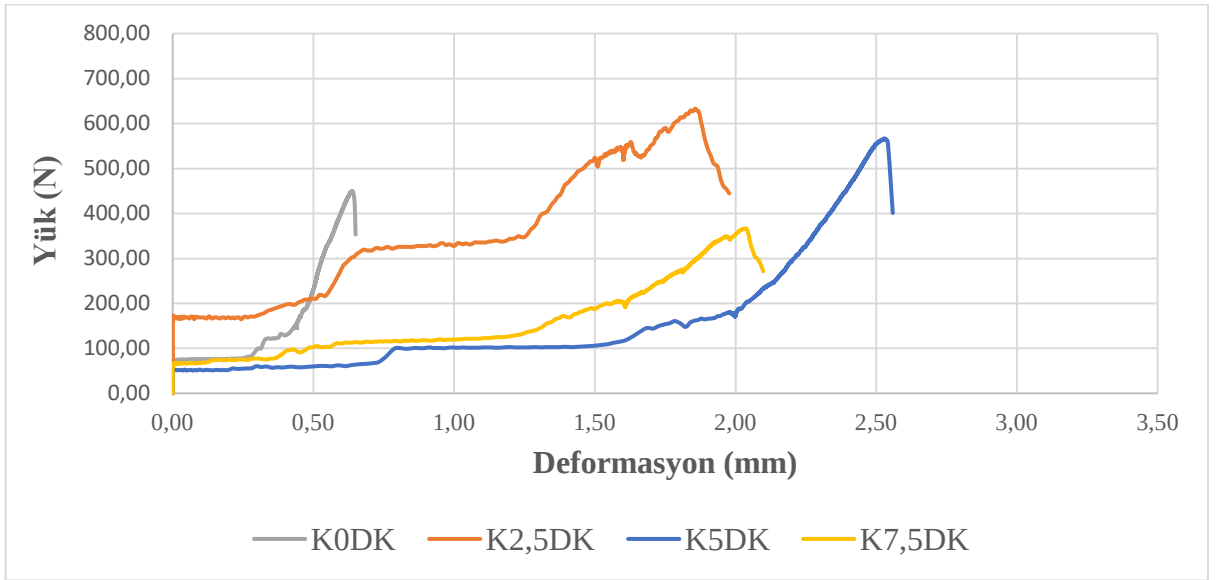
Şekil 27. Deney numunesinin yükleme durumu

Tablo 23. Numunelere Ait Eğilme Dayanımları

Numune Adı	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Kontrol numunesine göre değişim (%)
K0NK	0,32	0
K2,5NK	0,43	34
K5NK	0,37	13
K7,5NK	0,25	-21
K0DK	0,27	0
K2,5DK	0,38	40
K5DK	0,34	25
K7,5DK	0,22	-18

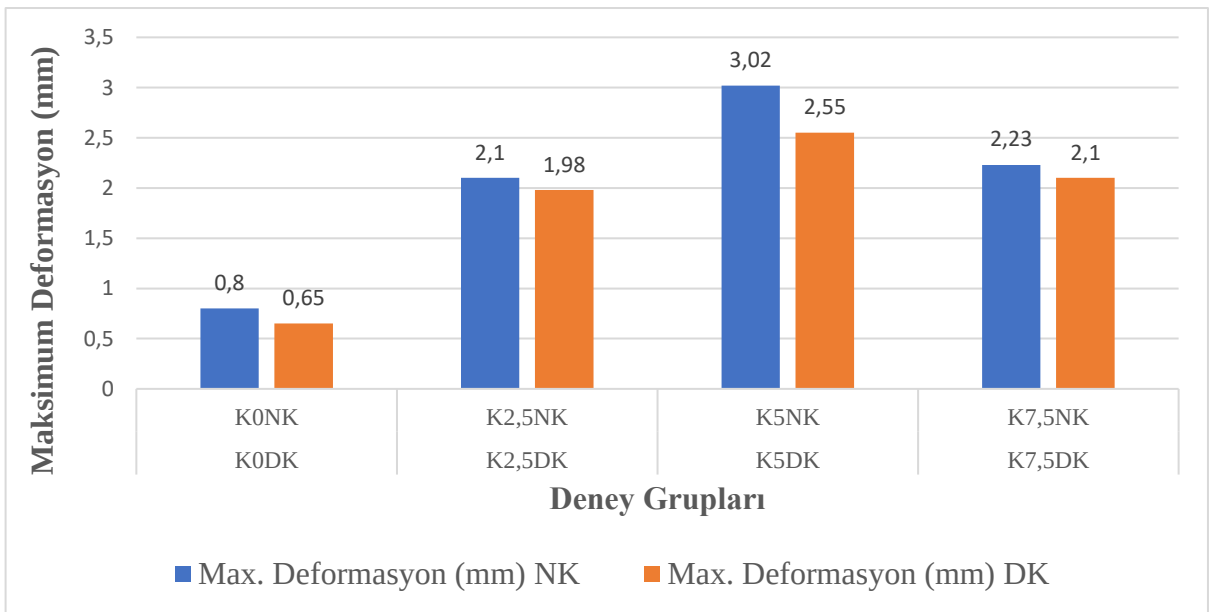
Eğilme dayanımı deney sonuçları Tablo 23 incelendiğinde eğilme dayanımı laboratuvar ortamında kür edilen numunelerde 0,25-0,43 N/mm² arasında, dış ortam koşullarında kür edilen numunelerde ise 0,22-0,38 N/mm² arasında değiştiği görülmektedir. Laboratuvar ortamında kür edilen numunelerde en yüksek eğilme dayanım değeri K2,5NK kodlu numunede 0,43 N/mm², en düşük eğilme dayanımı değeri K7,5NK kodlu numunede 0,25 N/mm² olmuştur. Dış ortam koşullarında kür edilen numunelerde yine aynı şekilde en yüksek eğilme dayanımı değeri K2,5DK kodlu numunede 0,38 N/mm², en düşük eğilme dayanımı değeri K7,5DK kodlu numunede 0,22 N/mm² olmuştur.

**Şekil 28.** Laboratuvar ortamında kür edilen numunelere ait yük deformasyon grafiği



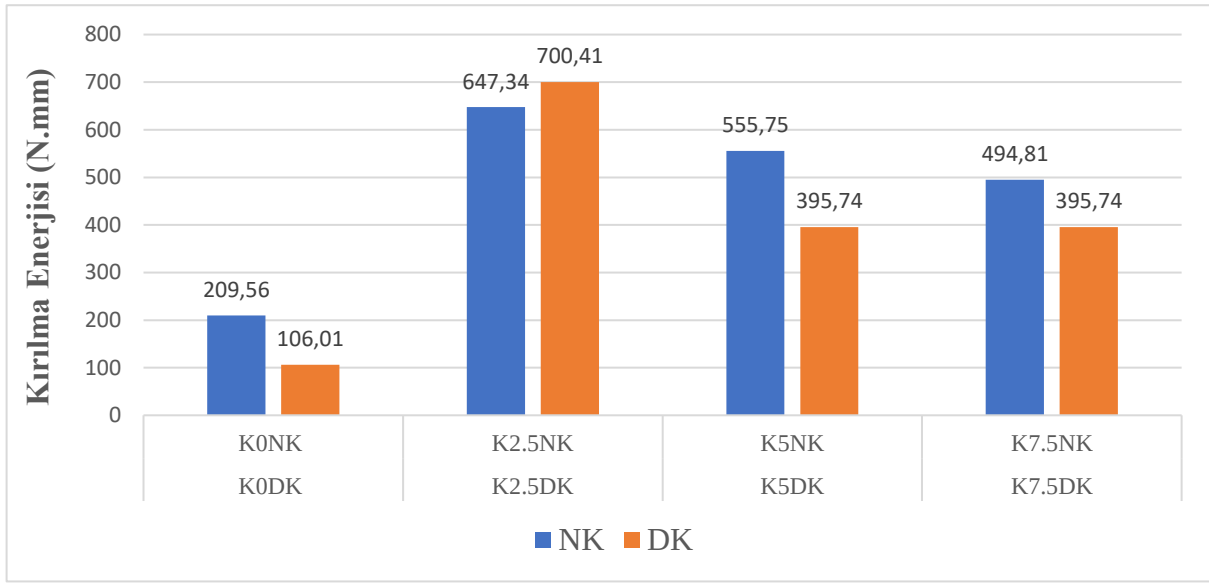
Şekil 29. Dış ortam koşullarında kür edilen numunelere ait yük deformasyon grafiği

Şekil 28 ve Şekil 29’da verilen grafikler incelendiğinde kenevir sapındaki lifsi yapılar gelen yükleri sağlam kesitlere ve kendi üstlerine alarak gevrek (anı) kırılmayı engellemiştir. Liflerin bu köprüleme yeteneği numunelerin deformasyon yeteneğini de artırmıştır. Bir diğer deyişle numunenin davranışı gevrekten süneğe şeklinde değişmiştir. Yığma yapıların taşıyıcı sistemleri olan duvarlarının, süneklik değerlerinin az ve yeterli kesme gerilmesi-kayma dayanımı kapasitesine sahip olmamaları sebebiyle depremlerden önemli ölçüde etkilendikleri bilinmektedir. Sünek bims bloklar, diğer yapısal bileşenlerle entegre olma yeteneğine sahip olduklarından betonarme veya çelik yapı sistemleriyle birlikte kullanıldıklarında, blokların sünekliği, yapısal bileşenler arasındaki gerilmeleri ve deformasyonları dağıtabilir. Bu yapıyı daha tutarlı ve dengeli hale getirecektir.



Şekil 30. Maksimum deformasyon grafiği

Şekil 30'da verilen maksimum deformasyon grafiği incelendiğinde K0NK=0,8 mm, K2,5NK=2,1 mm, K5NK=3,02 mm, K7,5NK=2,23 mm ve K0DK=0,65 mm, K2,5DK=1,98 mm, K5DK=2,55 mm ve K7,5DK=2,1 mm olarak bulunmuştur. Kenevir sapı kullanılmayan referans numunelerden, kenevir oranının arttığı numunelere göre, laboratuvar ortamında kür edilen numuneler dış ortam koşullarında kür edilen numunelere oranla yani K0NK, K0DK kodlu numuneye göre %18, K2,5NK, K2,5DK kodlu numuneye göre %5, K5NK, K5DK kodlu numuneye göre %15 ve K7,5NK, K7,5DK kodlu numuneye göre %5 oranında daha fazla deformasyona uğradığı görülmektedir. Aynı kür şartında kenevir kullanımı deformasyon miktarını artırmış en yüksek değer K5NK ve K5DK kodlu numune gruplarında görülmüştür.



Şekil 31. Kırılma enerjisi grafiği

Eğilme deneyinde numunenin deney başından kırılana kadar geçen sürede oluşan gerilim birim deformasyon eğrisinin altında kalan alan kırılma enerjisini verir (Barr et al. 1982). Şekil 31'de verilen grafiğe göre kırılma enerjisi en fazla K2,5NK ve K2,5DK kodlu numunelerde olduğu görülmektedir. Kenevir sapsı lif olarak kırılma enerjisini referans numunelere göre en çok %84 oranında artırmıştır. Laboratuvar ortamında kür edilen numuneler için referans numunelerine göre K2,5NK kodlu numune %67 oranında, K5NK kodlu numune %62 oranında ve K7,5NK kodlu numune %57 oranında artmıştır. Dış ortam koşullarında kür edilen numunelerde referans numunelerine göre K2,5DK kodlu numune %84 oranında, K5DK kodlu numune %73 oranında ve K7,5DK kodlu numune %73 oranında artmıştır. Kenevir sapsı oranının artması kırılma enerjisini olumlu yönde değiştirmekle birlikte kenevir sapsı oranının kırılma enerjisinde optimum değerinin %2,5 olduğu görülmüştür.

Beton içerisinde bulunan sürtünme kuvvetleri malzeme içerisinde bulunan mikro çatlaklar nedeniyle düzensizdir. Bu nedenle, beton içerisinde lifler kullanılarak zayıf bölgelerde

oluşan gerilme kuvvetlerini bir köprü gibi aktarması sağlanır (Altun ve ark. 2003). Beton içerisinde bulunan lifler gerilme kuvvetini aktararak toklukta artışa sebep olmuştur. Kenevir sapı kullanımı lif etkisi göstererek tüm numunelerde daha yüksek taşıma kapasitesine sahip sünek hafif betonlar elde edilmiştir.



Şekil 32. Numunelerin deney sonrası görüntüleri

Eğilme dayanımı deneyi sonrası kiriş numunesi yüzeyinde oluşan ve basınç dayanımı deneyi sonrası bims numunesi yüzeyinde oluşan çatlakların görünümü Şekil 32’de verilmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç

Bu çalışma kapsamında pomza agregası ve karbon negatif agreganın (kenevir sapı) birlikte kullanıldığı hafif beton özellikleri incelenmiştir. Hafif betondan istenilen mukavemet, yoğunluk ve diğer teknik özelliklerin sağlandığı yeni karışımlarla daha sürdürülebilir bir inşaat malzemesinin üretilbilmesinin gerçekleştirildiği bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Üretilen bloklar piyasada bulunan ve bilinen eşdeğer bims bloklarla karşılaştırıldığı zaman şekil, yüzeysel boşluk ve renk olarak uygun olduğu görülmüştür.
- Üretilen numunelerin birim hacim ağırlıkları $0,92 \text{ gr/cm}^3$ ile $0,70 \text{ gr/cm}^3$ arasında bulunmuştur. En düşük birim hacim ağırlığı K7,5NK kodlu numunede, en yüksek birim hacim ağırlığı K0DK kodlu numunede elde edilmiştir. Üretilen numunelerin birim hacim ağırlık değerlerine bakıldığı zaman TS EN 206+A2 (2021) standardına göre D 1.0 sınıfına ve yalıtım betonu sınıfına girmektedir.
- Bims bloklar içinde kenevir sapı ikame oranının artmasıyla birim hacim ağırlığı %6 ile %15 arasında düştüğü görülmüştür. Bims bloklarda en yüksek birim hacim ağırlığı K0NB kodlu numunelerde, en düşük birim hacim ağırlığı K7,5NB kodlu numunelerde elde edilmiştir. Birim hacim ağırlığının azalmasıyla binaya gelen ölü yük ciddi anlamda azaltılabilecektir. Bu ölü yükün azaltılması ile projelendirilen ve tasarlanan yapılarda taşıyıcı sistem buna göre boyutlandırılarak ekonomi sağlanacaktır.
- En düşük UPV değeri K7,5DK kodlu numunede, en yüksek UPV değeri ise K0NK kodlu numunede elde edilmiştir. Dış ortam koşullarında kür edilen numuneler, aynı oranda kenevir sapı kullanılarak laboratuvar ortamında kür edilen numunelere göre daha düşük UPV sonuçları vermiştir. Kenevir sapı kullanımı UPV değerlerini daha da düşürmüştür.
- Kenevir sapı ilaveli bims blokların referans numuneye nazaran basınç dayanımlarının %14 ile %51 arasında düştüğü görülmüştür. Ancak K7,5NB grubu hariç bu blokların basınç dayanım ortalamaları piyasada A firmasından temin edilen numunelerin basınç dayanımı değerinden daha yüksek değerlere sahip olduğu belirlenmiştir.

- Numunelere ait yük deformasyon değerleri incelendiğinde kenevir sapındaki lifsi yapıların gelen yükleri sağlam kesitlere ve kendi üstlerine alarak gevrek (anı) kırılmayı engellediği liflerin bu köprüleme yeteneğinin numunelerin deformasyon yeteneğini de arttırdığı belirlenmiştir.
- Maksimum deformasyon değeri %5 oranında kullanılan kenevir sapı gruplarında 3,02 ve 2,55 mm ile en yüksek değere ulaşmıştır. Kırılma enerjisi en yüksek değerlere %2,5 oranında kenevir sapı kullanımı olan numunelerde 700,41 ve 647,34 N.mm değerlerine ulaşmıştır. Kenevir sapı kullanılmayan referans numunesine göre bu değer en fazla 6,6 kat en az 3,7 kat artmıştır. Dolgu duvar olarak kullanılacak bims bloklar deprem anında sünekliliğinin artması ile daha olumlu sonuçlar verecektir.
- Kenevir sapı kullanılmayan referans numunelerden, kenevir oranının arttığı numunelere göre, laboratuvar ortamında kür edilen numuneler dış ortam koşullarında kür edilen numunelere oranla daha fazla deformasyona uğradığı da tespit edilmiştir.
- Kırılma enerjisi en fazla K2,5NK ve K2,5DK kodlu numunelerde görülmekte ve karbon negatif agregalı numunelerin kırılma enerjisini referans numunelere göre en çok %84 oranında artırdığı belirlenmiştir.
- Kenevir sapı kullanımı lif etkisi göstererek tüm numunelerde daha yüksek taşıma kapasitesine sahip sünek hafif betonlar elde edilmiştir.

Öneriler

Bu sonuçlar ışığında ileride yapılacak çalışmalar için;

Kenevir sapı içeren bims blokların diğer performans özellikleri (örn. yangına dayanıklılık, yalıtım veya nem direnci vb.) incelenerek uygulama için katkısı daha net belirlenmelidir. Üretilen hafif yapı malzemesinin yaşam boyu döngüsel analizi değerlendirilmelidir.

Karbon negatif agregalı bims blokları, farklı oranlarda farklı malzemelerle üretilerek özellikleri belirlenmelidir. Yine farklı kür şartlarında etkisi irdelenerek optimum kullanım oranının belirlenmesi gerekmektedir.

Malzeme üzerinde enstrümental analizler yapılarak özelliklerindeki değişim detaylıca irdelenmelidir.

KAYNAKLAR

- Abbas, A., Mahadevan, M., Prajapati, S., Ayati, B., Kanavaris, F., 2023. SynerCrete'23- International RILEM conference on synergising expertise towards sustainability and robustness of cement-based materials and concrete structures, Milos, Greece.
- Abbott, T., 2014., Hempcrete factsheet The Limecrete Company. Ashby St Mary, England: The Limecrete Company, URL: <http://limecrete.co.uk/hempcrete-factsheet/> (27.10. 2021).
- Acar, M., Dönmez, A., 2016. Kenevire Farklı Bir Bakış, 2. Ulusal Biyoyakıtlar Sempozyumu, 27-30 Eylül 2016, Samsun, Türkiye, 265-270.
- Aitcin, P.C., 2000, Cements of yesterday and today; concrete of tomorrow, Cement and Concrete Research, 30:1349-1359.
- Akdere, İ., 2023. Kenevir Lifinin Köpük Beton Üretiminde Kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Alkan, A., 2021. Kenevir Ürünlerinin Çimentolu Kompozitlerde Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yozgat.
- Alkaya, Ş., 2010. Hafif beton Üretiminde Organik Atıkların (Ayçiçek Sapı) Kullanılabilme Olanakları. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı, Tekirdağ.
- Allin S., 2005. Building with Hemp, Seed Press Rusheens, Kenmare, Co. Kerry, Ireland.
- Allin S., 2012. Building with hemp. Kenmare, Seed Press 2nd edition
- Al-Oqla, F. M., Sapuan, S. M. 2014. Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry. Journal of Cleaner Production, 66, 347-354.
- Altun, F., Özcan, M., Vekli, M., Karahan, O., 2003. Çelik Lif Katkılı C20 Betonunun Mekanik Özelliklerinin Deneysel Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 4(1-2):31-40, Afyon.
- Amaducci, S., Gusovius, H.J. 2010. Industrial Application of Natural Fibres: Properties and Technical Application, Chapter II Hemp – Cultivation, Extraction and Processing, Edited by Jöhn Mössig, Wiley Series in Renewable Resources, 109-135, United Kingdom.
- Amziane, S., Arnaud, L., 2013. Bio-aggregate-Based Building Materials: Applications to Hemp Concretes, Springer, Dordrecht, 263p, London.
- Anik, D., Boonstra, C., Mak, J., 1996. Handbook of Sustainable Building : An Environmental Preference Method for Selection of Materials for Use in Construction and Refurbishment, James&James(Science Publishers) Limited, London.
- Anonim., 2021. Kenevir, <https://en.wikipedia.org/wiki/Hemp> (30.09.2021).
- Anonim., 2023. İklim Değişikliği Başkanlığı, <https://iklim.gov.tr/kyoto-protokolu-i-35> (12.04.2023).
- Anonim., 2019. Kenevir Üretimi Değerlendirmesi ve Raporu, chrome-extension://efaidnbmnnnibpajpcgglecfindmkaj/https://www.ankaratb.org.tr/lib_upload

- Anonymous, 2023. The Constructor Buildings Ideas, <https://theconstructor.org/building/smart-materials/hempcrete-blocks-construction/34234/> (12.08.2023).
- Arnaud, L., 2000. Mechanical and Thermal Properties of Hemp Mortars and Wools: Experimental and Theoretical Approaches. Bioresource Hemp 2000 & other fibre crops, Wolfsburg. Nova Institut, Hürth, Germany.
- Arnaud, L. and Gourlay, E. 2012. Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. Construction and building materials, 28(1), 50-56.
- Awwad, E., Mabsout, M., Hamad, B., Farran, M. T. ve Khatib, H. (2012). Studies on fiber-reinforced concrete using industrial hemp fibers. Construction and Building Materials, 35, 710-717.
- Aydın, S., 2017. İletişim Yaklaşımıyla Sürdürülebilirlik Kavramı, Yeşil Kavramı ve YerelKüresel Yansımaları ile ilgili bir İnceleme Örneği. İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Baharetha, S. M., 2013. A Model For Selecting Sustainable Exterior Wall Building Materials Products In Hot, Humid Climate. King Fahd University of Petroleum And Minerals, Doctoral Dissertation, Saudi Arabia.
- Baradan, B., 2004. Yapı Malzemesi II. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Yayın No. 207.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S., 2015.Özel Betonlar. Beton. Mühendislik Fakültesi, İzmir, 655-765.
- Bayülke, N., 2003. Betonarme Yapının Dolgu Duvarı. Türkiye Mühendislik Haberleri, 4(426), 85-98.
- Bekaroğlu, M., 2012. Kompozit Yapıda Pomza Agregası İçeren Köpük Betonun Özellikleri ve Teknik Parametrelerinin İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Belli, O., 2007. Tarih Boyunca Van, Promat Basım Yayın Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul.
- Bilgil, A. Yeşilyurt, E., Gökçe, M.V., 2015. Production of Pumice-Based Geo-Polymer Concrete, International Conference on Cıvıl and Environmental Engineering, Dedeman Cappadocia Hotel, Nevşehir, Turkey 20-23 May, P. 1608-1614.
- Bims Sanayiciler Derneği (BSD) 2006. Türkiye odalar ve borsalar birliği Türkiye toprak sanayi meclisi pomza alt sektör raporu, Ankara.
- Boulloc, 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., Bliard, C., Merabtine, A., Lachi, M., Douzane, O., Karaky.,H., Polidori, G., 2017. Characterization of a hempbased agro-material: Influence of starch ratio and hemp shive size on physical, mechanical, and hygrothermal properties, Energy Build., vol. 153, pp. 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, Constructionand Building Materials, 154, 963-971.

- Bozkurt, N., Sayın, N., 2021. Günümüz Teknolojileri Çerçevesinde Çimento Dünyasındaki Gelişmelerin Araştırılması, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9 (2021): 1159–1173.
- BS EN 1365-1:1999 Yük taşıyan elemanlar için yangına dayanıklılık testleri-Duvarlar
- Campione, G., Miraglia, N., Papia, M., 2001. Mechanical properties of plain and deformed bars in lightweight pumice concrete with pumice stone or expanded clay aggregates, master. Struct.
- Canbaz, M., Ezici, M., 2022. Genleştirilmiş polistiren granülleri içeren hafif betonların sertleşmiş haldeki özellikleri esogü Müh Mim Fak Dergisi, 30(1), 31-38.
- Cavaleri, L., Miraglia, N., and Papia, M., 2003. Pumice concrete for structural wall panels, Engineering Structure, 25, 115-125.
- Ceylan, H., 2005. Farklı Pomza Agrega Türlerinden Elde Edilen Hafif Betonun Sıcaklık Etkisindeki Karakteristiği Doktora Tezi Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta.
- Chabannes, M., Becquart, F., Garcia-Diaz, E., Abriak, N., Clerc, L., 2017. Experimental Investigation of The Shear Behaviour of Hemp and Rice Husk based Concretes Using Triaxial Compression, Construction and Building Materials, 143, 621-632.
- Chabannes, M., Garcia-Diaz, E., Clerc, L., Bénézet, J. C., 2016. Effect of curing conditions and Ca (OH) 2-treated aggregates on mechanical properties of rice husk and hemp concretes using a lime-based binder. Construction and Building Materials, 102, 821-833.
- Chandra, S., Berntsson, L., 2003. Lightweight Aggregate Concrete. 430 p, Noyes Publications, USA.
- Chen, B., Liu, J., 2005. Contribution of Hybrid Fibers on the Properties of High Strength Lightweight Concrete Having Good Workability. Cement and Concrete Research, vol. 35, no. 5, pp. 913-917.
- 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., Pretot, S., 2014. Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content, Construction and building materials, 65.
- Crangle, R.D., 2012. Pumice and Pumicite, Minerals Yearbook, U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey.
- Çiçek, H., Gönül, İ. A., 2018. Skoria Agregası ile Yüksek Dayanımlı Yarı Hafif Beton Üretim Olanakları. Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 9:1, 439-450.
- Çücen, A., Solak, A. 2023. Sürdürülebilir Yapı Malzemeleri Üzerine Bir Araştırma. Teknik Bilimler Dergisi, 13 (1), 1-8.
- Dartois, S., Mom, S., Dumontet, H., Hamida, A. B., 2017. An Iterative Micromechanical Modeling to Estimate The Thermal and Mechanical Properties of Polydisperse Composites with Platy Particles: Application to Anisotropic Hemp and Lime Concretes, Construction and Building Materials, 152, 661-671.
- 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.
- Delannoy, G., Marceau, S., Glé, P., Gourlay, E., Guéguen-Minerbe, M., Diafi, D., 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., Elmalı, M., 2020. Organik Atıkların Yapı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 8(4), 1303 – 1311.
- Demirel, B., 2012. Optimization of the composite brick composed of expanded polystyrene and pumice blocks, Construction and building materials, 40, 306-313.
- Devlet Planlama Teşkilatı, 2001. XIII. Beş Yıllık Kalkınma Planı, “Pomza” Çalışma Grubu Raporu, Ankara.
- Efe, T., 2011. Edremit Travertenleri ve Van Gölü Kuzeyinde Yüzeyleyen Pomzaların Çimento Sektöründe Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Van.
- Ekinci, D., 2013. Türkiye’de köpük beton. Dünya İnşaat Dergisi, <http://www.dunyainsaat.com.tr/dergioku.php?haberid=4224> (14.07.2023).
- Ekincioğlu, O., Gürguna, A.P., Engin, Y., Tarhan, M., Kumbaracıbaşı, S., 2013. Approaches For Sustainable Cement Production – A Case Study From Turkey. Energy and Buildings, 66: 136–142.
- Erdoğan, S., Erdoğan T., 2007. Bağlayıcı Malzemelerin ve Betonun Onbin Yıllık Tarihi, Odtü Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Ankara.
- Eroğlu, G., Şahiner, M., 2020. Dünyada ve Türkiye’de Pomza. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, Ankara.
- 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.
- FAO, 2020. Food and Agriculture Organization of the United Nations, <https://www.fao.org>. (18.09.2023).
- Faure, P., F., Lesueur, D., Coussot, P., Peter, U., 2012. Water transfers within Hemp Lime Concrete followed by NMR, Cement and Concrete Research 42(11): 1468-1474.
- Gedik, G., Avinç, O.O., Yavaş, A., 2010. Kenevir lifinin özellikleri ve tekstil endüstrisinde kullanımıyla sağladığı avantajlar. Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi 4(3): 39-48.
- Gedik, G., 2012. Kenevir liflerinden üretilen kumaşların optimum ağartma koşullarının ve yöntemlerinin belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, Fen bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Gökçe, H., S., Can, Ö., 2009. Pomza Agregasının Farklı Zamanlardaki Su Emmelerinin Hafif Betonun Mekanik ve Fiziksel Özelliklerine Etkisi, Politeknik Dergisi, Sayı 4 293-298.
- Gregor, L., 2014. Performance of hempcrete walls subjected to a standard time-temperature fire curve. College of Engineering and Science, Victoria University.
- Grundvall, M., 2016. Hemp Built, Chalmers University of Technology, Department of Architecture, Master Thesis, 136, Göteborg.
- Gül, R., Geçten, O., 1994. Hafif agregalı betonun kullanılabilirliği, DSİ Teknik Bülteni, sayı 81, sayfa 31-36, Ankara.
- Gül, V., 2008. Karadeniz bölgesindeki bazı kenevir (Cannabis sativa L.) tohumlarının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi. Ordu: Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü / Ziraat Bölümü / Tarla Bitkileri Anabilim Dalı. Gündüz, L., 1998. Hafif beton olarak pomza, I. Isparta Pomza Sempozyumu Bildiriler Kitabı 26-28 Haziran 1997 Isparta, 103-107.

- Gündüz, L., Sarıışık, A., Tozaçan, B., Davraz, M., Uğur, İ., Çankıran, O., 1998. Pomza Teknolojisi, Cilt II, Isparta 206-288.
- Gündüz, L., 2008. The Effects of Pumice Aggregate/Cementations on the Low-Strength Concrete Properties, Science Direct Construction and Building Materials, 22, 135-142.
- Gündüz, L., 2008. Use of quartet blends containing fly ash, scoria, perlite pumice and cement to produce cellular hollow light weight masonry blocks for non-load bearing walls. Construction and Building Materials 22: 747-54.
- Herzog, T., Krippner, R., and Lang, W., 2004. Facade construction manual. Basel; Boston: Birkhäuser-Publishers for Architecture.
- Hürol, H.Y., 2014. A Study on Social Sustainability: The Case of Doğanbey Urban Renewal Project in Bursa. Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- İstanbul Teknik Üniversitesi Nihai rapor, 2023. 04.17 Mw 7,8 Kahramanmaraş (Pazarcık, Türkoğlu), Hatay (Kırıkhan), ve 13.24 Mw 7,7 Kahramanmaraş (Elbistan/Nurhak-Çardak) Depremleri, İstanbul.
- Ip, K., and Miller, A., 2012. Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime wall constructions in the UK, Resources, Conservation and Recycling, 1-9.
- Jami, T., 2016. A Study on Carbon Sequestration of Lime Hemp Concrete, MS Thesis, Inst. of R&D, Gujarat Forensic Sciences University, Gandhinagar, Gujarat, India.
- 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.
- Kadiroğlu İ., 2006. Kendiliğinden Yerleşen Normal Dayanımlı Hafif Beton Üzerine Deneysel Bir Çalışma, Beton Köşesi, 27, 40-48.
- Karşın, N., 2022. Kenevirin Yapı Malzemesi Olarak Beton Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Kayan, Y., 2019. Bitlis Pomzası ile Üretilen Bimslerin Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Araştırılması ve Geliştirilmesi Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır.
- Kayan, Y., Karşın, A., Işık, E., 2019. “Pomzadan İmal Edilmiş Çelik Lif Katkılı Bimsblokların Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, vol. 11, no. 2, 723730.
- Keller, A. Leupin, M., Mediavilla, V., Wintermantel, E. 2001. Influence of the growth stage of industrial hemp on chemical and physical properties of the fibres. Industrial Crops and Products 13(1): 35-48.
- Kenter, P., 2015. Championing Hemp: Ontario Builder Promoting Use of Hempcrete. <https://canada.constructconnect.com/dcn/news/projects/2015/03/championing-hemp-ontario-builder-promoting-use-of-hempcrete-1006745w> 01.03.2023
- Khestl, F., 2013. Hemp in the Cement Matrix, The Seventh International Structural Engineering and Construction Conference Technical University of Ostrava
- Klaus, G., Gernot, M., 1990. Building with pumice, A publication of Deutsches zentrum für entwicklungstechnologien- gate, GTZ, pp. 1-64.
- Kocataşkın, F., 1991. Betonun Dünyü Bugünü Yarını. 2. Ulusal Beton Kongresi. 27 Mayıs 1991, İstanbul, 23-41.

- Komsi, J., 2018. Thermal Properties of Hempcrete, a Case Study Helsinki Metropolia University of Applied Sciences Bachelor of Engineering Building Services Engineering Bachelor's Thesis, Helsinki.
- Korkmaz, Y., Sümer, M., Subaşı, S., 2018. Hafif Beton Üretiminde Granüle edilmiş Fındık Kabuğunun Kullanılabilirliğinin araştırılması. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 5 (2), 501-511.
- Kozłowski R, Przemysław B, Mackiewicz T M, 2004. IENICA Interactive European Network for Industrial Crops and their Applications, Report from Poland, <http://www.ienica.net/reports/poland.pdf> (12.08.2011).
- Köse, H., Pamukçu, Ç., Yalçın, N., Seçer, T., 1997. Pomza ve Yapı Malzemesi Olarak Kullanım Olanakları, Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, Ekim 16-17, İzmir.
- Li, Z., Dr., 2011. Advanced Concrete Technology.: John Wiley & Sons, Inc, New Jersey.
- 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.
- Mindess S., Young J.F., Darwin D., 2002. Concrete Second Edition. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ 07632.
- Murphy, F. and Pavia, S., Walker, R., 2010. An Assessment Of The Physical Properties Of Lime-Hemp Concrete, Proc. of BRI/CRI. Ní Nualláin, Walsh, West, Cannon, Caprani, McCabe eds. Cork 2010., 431-439.
- Neville, A. M., 1975. Properties of Concrete Pitman Publishing, London.
- Neville A M., Brooks J J., 1987. Concrete Technology, Longman Group UK Limited, 464, UK.
- Neville A.M., 1995. Properties of Concrete. Longman Scientific and Technical, New York
- Newman, J., Choo, BS., 2003. Advanced Concrete Technology 3: Processes.
- Nguyen, T. T., Picandet, V., Amziane, S., and 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(9), 1039-1050.
- Nicholson, L. A., 2004. Integrating Sustainable Building Design and Construction Principles into Engineering Technology and Construction Management Curricula, 9, 1.
- Novakova, P., Sal, J., 2019. Use of technical hemp for concrete – Hempcrete. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, (5) 603.
- Oğuz, M., 2019. Geri dönüştürülmüş betonların köpük betonda kullanılabilirliğinin araştırılması, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bartın.
- Özkul, H., Taşdemir, M.A., Tokyay, M., ve Uyan M., 2004. Her Yönüyle Beton, Türkiye Hazır Beton Birliği Yayını, İstanbul, 126.
- Öztok, İ., 1997. High Strength Lightweight Natural Aggregate Concrete. The Middle East Technical University, Department of Civil Engineering, Master Thesis, Ankara.
- Öztürk E, 2019. Yapılarda Hafif Beton Kullanımında Son Gelişmeler. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Özüal, S., İmat, F. 2016. Atık camlardan cam beton üreterek mimari ve dekoratif amaçlı olarak yararlanma. Turkish Studies International Periodical for the Languages, Literature and History of Turkish or Turkic. 11(2): 1049-1064.
- Picandet, V., 2017. Bulk Density and Compressibility, Bio aggregates Based Building Materials, RILEM State of the art Reports pp 111-124

- Postacıoğlu, B., 1987. Beton (Agregalar, Beton) Teknik Kitaplar Yayınevi İstanbul, Cilt 2, 404.
- Ranalli P, Venturi G, 2004. Hemp as a Raw Material for Industrial Applications, *Euphytica*, 149, 1-6.
- Rashad, A.M., 2019. A Short manuel on natural pumice as a lightweight aggregate, *journal of building engineering*, Egypt.
- Sağlam, R.N., Açıkgeçen Ulaş, M., Alyamaç, K.E., 2022. Hafif Beton Üretimi İçin Gerekli Olan Hafif Agregat Miktarının Yapay Sinir Ağı ile Tahmin Edilmesi, *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi* 34(2), 889-898.
- Salas, D., Ramirez, A., Rodríguez, C., Petroche, D., Boero, D., Duque-Rivera, A., 2016. Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: a literature review, *J. Clean. Prod.* 113.
- Sarı, D., Paşamehmetoğlu, A., G., 2005. The effects of gradation and admixture on the pumice lightweight aggregate concrete, *Cement and Concrete research*, 35, 936-942.
- Sayar, Z., Gültekin, A.B., Dikmen, Ç.B., 2009. Sürdürülebilir Mimarlık Kapsamında Ahşap ve PVC Doğramaların Değerlendirilmesi, 5. Uluslararası İleri Teknoloji Sempozyumu (İATS'09), 13-15 Mayıs, Karabük, 2067-2072.
- Sedan, D., Pagnoux, C., Smith, A., and Chotard, T., 2008. Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction, *J. Eur. Ceram. Soc.*, France, vol.28, no.1.183-192.
- Scrivener, K.L., Kirkpatrick, R.J., 2008. Innovation in use and research on cementitious material, *Cement and Concrete Research*, 38(2):128-136.
- Seng, B., Magniot, C., 2019. Characterization of a precast hemp concrete. Part 1: Physical and thermal properties, *Journal of Building Engineering* volume 24.
- Sev, A., 2009. Sürdürülebilir Mimarlık, 1. Baskı, Yem Yayınları, İstanbul, 223.
- Sparrow, W., Stanwix, A., 2014. The Hempcrete Book, Designing and Building with Hemp-Lime, Green Books, 368, UK.
- Şahin, R., 1996. Kocapınar Pomzası ile Üretilen Hafif Betonun Mukavemetinin Araştırılması, *Erzurum*.
- Şahin, S., Karaman, S., Örüng, İ., 2007. Atık PVC katkılı Hafif Betonların Özellikleri ve Tarımsal Yapılarda Kullanım Olanakları, *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 20074(2), 137-144.
- Şahin, M., 2022. Endüstriyel Kenevir Sapı Atığının Farklı Bağlayıcılar ile Kenevir Betonu Üretiminde Değerlendirilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(1), 233-243.
- Şapcı N., Davraz M., 2005. Pomza Madenciliği, Endüstrisi ve Türkiye Açısından Önemi (Gelişen Yeni Bir Sektör), *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET 2005, 09-12 Haziran 2005, İzmir*, s397-407.
- Şatır, Y., 2000. Taşıyıcı Hafif Betonlarda Çelik Lif Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, Türkiye.
- Şimşek O., 2009. Beton ve Beton Teknolojisi, Ankara, 21-263.
- Tarım ve Orman Bakanlığı Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü (TAPGM), 2019, Kenevir Tarımı, Ankara.
- Taşdemir, M.A., 1982. Taşıyıcı Hafif Betonların Elastik ve Elastik Olmayan Davranışları, Doktora Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.

- Temiz, H., Akçakale, A.H., 2014. Hafif Agregalı Betonun Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması, Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 4(2), 7-20.
- Teweri, A., 2018. Hemp–A Sustainable Building Material. Journal of Civil Engineering and Environmental Technology, 5: 327-332.
- THBB, 2023. Türkiye Hazır Beton Birliği Beton Kongresi, İstanbul.
- Toklu, K., 2009. Pomza Taşından Üretilen Bims Blok Kalitesinin Araştırılma Olanaklarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- 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 EN 13055, 2016. Hafif Agregalar, TSE, Ankara, 1-39
- TS 802, 2016. Beton Karşım Tasarımı Hesap Esasları, TSE, Ankara, 1-43
- TS EN 1008, 2003. Beton-Karma suyu-Numune alma, cihazlar ve beton kapasitesizi işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak korunmasının tayini kuralları, TSE, Ankara, 1-18
- TS EN 12390-5, 2019. Beton- Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini, TSE, Ankara, 1-13
- TS EN 12504-4, 2021. Yapılarda beton deneyleri- Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini, TSE, Ankara, 1-20
- TS EN 197-1, 2012. Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve kapsamlı kriterleri TSE, Ankara, 1-29
- TS EN 206+A2, 2021. Beton-Özellik, performans, imalat ve sistem, TSE, Ankara, 1-105
- TS EN 772-1+A1, 2015. Kagir birimler- Deney yöntemleri- Bölüm 1: Basınç dayanımının tayini, TSE, Ankara, 1-15
- TS EN 771-3+A1, 2015. Kagir birimleri- Özellikler- Bölüm 3: Beton Kagir birimleri (Yoğun ve hafif agregalı), TSE, Ankara, 1-43
- TS EN 772-13, 2002. Kagir birimleri- Deney metotları- Bölüm 13: Kagir birimlerin net ve brüt kuru hacim kütlelerin tayini (doğal taş hariç), TSE, Ankara, 1-6
- TS EN 772-16, 2012. Kagir birimleri- Deney metotları- Bölüm 16: Boyutların tayini, TSE, Ankara, 1-15
- TS EN 772-2, 2000. Kagir birimleri- Deney metotları- Bölüm 2: Beton kagir birimlerin alanı yüzdesinin tayini (kâğıtta iz çıkarma yöntemi ile), TSE, Ankara, 1-4
- TS ISO 3310-1, 2019. Deney elekleri- Teknik özellikler ve özellikler- Bölüm 1: Metal tel örgülü deney elekleri, 1-25
- Türkel, S., Kadiroğlu, B., 2007. Pomza Agregalı Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13 (3), 353-359.
- Türkmenoğlu, Z., F., Kılıç, A., M., Depci, T., 2015. Van Pomzası ve Mermer Tozu Atıkları ile Üretilmiş Kendiliğinden Yerleşen Hafif Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Adana. 30(1), 105-116.
- Tufan, M.Z., Özel, C., 2018. Sürdürülebilirlik Kavramı ve Yapı Malzemeleri İçin Sürdürülebilirlik Kriterleri. Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi, 2(1), 9-13.

- Turgutalp, Ü., 1978. Sarıkamış yöresi doğal hafif agregasıyla üretilen betonların tarımsal yapılarda kullanılabilme olanakları üzerine bir araştırma. Doçentlik Tezi, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Erzurum, (yayınlanmamış).
- Tuyan, M., 2017. Doğal ve Atık Malzemelerle Geopolimer Harç ve Beton Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Ulaş, E., 2018. Gerçek Köye Dönüş Projesi: Kenevir. Hatice Bahtiyar (Editör), Hiperlink Yayınları, İstanbul.
- Usgs, U.S., 2014. Geological Survey, Pumice and Pumicite, Mineral Commodity Summaries, February, 2.
- Uygunoğlu, T., 2008. Hafif agregalı kendiliğinden yerleşen betonların özellikleri, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Uzun, Ö., 2008. Bimsblok ile Örülen Dış Duvarların Yapısal Performansının Değerlendirilmesi Üzerine Bir Alan Araştırması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ünal O, Demir I, Uygunoğlu T, 2003. Pomza ve Diatomitin Hafif Blok Eleman Üretiminde Kullanılmasının Araştırılması. III. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, 3-4 Aralık 2003, İstanbul, 107–113.
- 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, Valencia, Spain.
- Williams, J., Lawrence, M. ve Walker, P., 2018. The influence of constituents on the properties of the bio-aggregate composite hemp-lime. Construction and Building Materials, 159, 9-17.
- Wooley, T., 2012. Low Impact Building: Housing using Renewable Materials, London, 54-78.
- Yapı Malzemeleri Yönetmeliği, 2013. Yapı malzemeleri yönetmeliği (305/2011/AB) Ankara
- Yolcu, C., 2018. Yüksek Performanslı Taşıyıcı Hafif Beton Üretiminde Pomza Agregaların Kullanılabilirliği, Mekanik Büyüklükleri ve Uygulama Kriterleri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yolcu, C., Girgin, Z.C., 2017. Dünyada Yapay Hafif Agregalı Yapısal Beton Uygulamaları ve Doğal Pomza Agreganın Kullanılabilirliği, Aurum Mühendislik sistemleri ve Mimarlık Dergisi, İstanbul, cilt 1 sayı 2, 59-67.
- 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.
- Zuo, J., 2014. Hemp In Construction. Faculty of Architecture & the Built Environment, Delft University of Technology Julianalaan, 134: 2628.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Melik CAMCI
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Erzurum Merkez Anadolu Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı (2024)
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Orta
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
İnşaat Mühendisleri Odası	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	