



T.C.
KIRSEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI



**PERLİT TABANLI HAFİF BETONLARDA
GRANÜLER AEROJELİN
KULLANILABİLİRLİĞİ**

YASİR PAZAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KIRSEHİR

2025



T.C.
KIRSEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI



**PERLİT TABANLI HAFİF BETONLARDA
GRANÜLER AEROJELİN
KULLANILABİLİRLİĞİ**

YASİR PAZAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÇAĞLAR

KIRSEHİR

2025

KIRŞEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesini okuduğumu ve anladığımı ve Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tez olarak sunduğum bu çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda bu konuda hakkımda yapılacak tüm yasal işlemleri ve aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

04/08/2025

Yasir PAZAR

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa No

İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	I
TEŞEKKÜR	III
ÖZET	IV
TABLolar DİZİNİ.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	IX
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Hafif Beton.....	4
1.1.1. Hafif betonun tanımı.....	4
1.1.2. Hafif betonun tarihçesi ve örnekleri	8
1.2. Perlit	17
1.2.1. Perlit tanımı	17
1.2.2. Perlitin özellikleri	19
1.2.3. Perlit rezervleri	21
1.2.4. Perlitin kullanım alanı	22
1.3. Aerojel.....	25
1.3.1. Aerojelin tanımı.....	25
1.3.2. Aerojel çeşitleri	27
1.3.3. Aerojelin kullanım alanları.....	30
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	33
2.1. Hafif Beton Üretiminde Perlit Kullanımı ile İlgili Çalışmalar.....	33
2.2. Hafif Beton Üretiminde Aerojel Kullanımı ile İlgili Çalışmalar	42
3. MATERYAL VE METOT	47
3.1. Materyal	47
3.1.1. Perlit	47
3.1.2. Granüler aerojel	48
3.1.3. Çimento	49
3.1.4. Kum	51
3.1.5. Katkı maddesi (Süperplastikleştirici)	51
3.1.6. Karışım suyu.....	52
3.2. Metot	52
3.2.1. Referans ve granüler aerojel katkılı hafif beton numunelerinin üretilmesi ...	52
3.2.2. Numunelere uygulanan deneyler	57

4. BULGULAR VE TARTIŞMA	65
4.1. Hafif Beton Numunelerine Uygulanan Fiziksel Deneylein Sonuçları.....	65
4.1.1. Yoğunluk.....	65
4.1.2. Porozite	66
4.1.3. Su emme (ağırlıkça)	67
4.1.4. Komposite	68
4.1.5. Donma özölmenin basınç dayanımına etkisi.....	69
4.1.6. Isı iletim katsayısı tayini	71
4.2. Hafif Beton Numunelerine Uygulanan Mekanik Deneylein Sonuçları	72
4.2.1. Basınç dayanımı	72
4.2.2. Yarmada ekme dayanımı	73
4.3. SEM Analizi.....	74
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR	83
EKLER	95
ÖZGEÇMİŞ	97

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisansa başlamamda ve yüksek lisans ders sürecinde kendisini tanıdığım günden bu yana gösterdiği sakin ve sabırlı hali ile her zaman bana örnek olmasının yanı sıra bir bilim insanının nasıl çalışması gerektiğini kendisinden öğrendiğim değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÇAĞLAR'a büyük bir içtenlikle teşekkür ederim. Tezimin şekillenmesinde ve nihai hale gelmesinde katkıları olan değerli jüri üyelerim Doç. Dr. Esin İLHAN ve Dr. Öğr. Üyesi Selim CEMALGİL'e teşekkürlerimi içtenlikle sunarım.

Eğitim hayatım boyunca beni hiç yalnız bırakmayan, desteklerini ve sevgilerini her daim hissettiğim annem Ülkü PAZAR'a ve babam Adnan PAZAR'a sonsuz teşekkür ederim.

Tezimi, ailem başta olmak üzere özellikle eşim Özge PAZAR'a ithaf ederim.

Ağustos, 2025

Yasir PAZAR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PERLİT TABANLI HAFİF BETONLARDA GRANÜLER AEROJELİN KULLANILABİLİRLİĞİ

Yasir PAZAR

KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÇAĞLAR
Yıl: 2025, Sayfa: 97
Jüri: Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÇAĞLAR
Doç. Dr. Esin İLHAN
Dr. Öğr. Üyesi Selim CEMALGİL

Bu tez çalışmasında, perlit tabanlı hafif betonlarda granüler arojelin kullanılabilirliğinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda, yoğunluğu düşük, termal özelliği iyileştirilmiş hafif beton üretimi amaçlanmıştır. Çalışmada ilk olarak katkılı numunelerin kıyaslanması için Referans (REF) numunesi üretilmiştir. Ardından, belirli oranlarda (%2, %4, %6, %8 ve %10) granüler arojel ikame edilerek hafif beton numuneleri üretilmiştir. Numunelerin fiziksel özelliklerinin tespiti için, yoğunluk, porozite, kompasite, Su emme (ağırlıkça), donma çözülmenin basınç dayanımına etkisi ve ısı iletim katsayısı tayini deneyleri uygulanmıştır. Mekanik özelliklerin tespiti için, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca numunelerin mikro yapısının incelenmesi için SEM analizi yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, düşük yoğunluklu, yüksek poroziteli ve düşük ısı iletim katsayısına sahip hafif beton numuneleri elde edilmiştir. HB2, HB4, HB6 ve HB8 numunelerinin orta dayanımlı hafif beton, HB10 numunesinin az dayanımlı hafif beton sınıfında yer aldığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Granüler arojel, Perlit, Hafif beton, Fiziksel özellik, Mekanik özellik

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

USABILITY OF GRANULAR AEROGEL IN PERLITE-BASED LIGHTWEIGHT CONCRETES

Yasir PAZAR

KIRŞEHİR AHI EVRAN UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Hakan ÇAĞLAR
Year: 2025, Pages: 97
Juries: Assist. Prof. Dr. Hakan ÇAĞLAR
Assoc. Prof. Dr. Esin İLHAN
Assist. Prof. Dr. Selim CEMALGİL

In this thesis study, it is targeted to investigate the usability of granular aerogel in perlite-based lightweight concretes. In line with this goal, the production of low density, thermally improved lightweight concrete was aimed. In the study, firstly, Reference (REF) sample was produced for comparison of the additive samples. Then, lightweight concrete samples were produced by substituting granular aerogel in certain ratios (2%, 4%, 6%, 8% and 10%). To determine the physical properties of the samples, density, porosity, compactness, water absorption (by weight), the effect of freezing and thawing on compressive strength and thermal conductivity coefficient determination tests were applied. To determine the mechanical properties, compressive strength and splitting tensile strength tests were applied. In addition, SEM analysis was performed to examine the microstructure of the samples. As a result of the study, lightweight concrete samples with low density, high porosity and low thermal conductivity were obtained. It was determined that HB2, HB4, HB6 and HB8 samples were in the medium strength lightweight concrete class, and HB10 sample was in the low strength lightweight concrete class.

Key Words: Granular aerogel, Perlite, Lightweight concrete, Physical property, Mechanical property

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Perlitin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	20
Tablo 1.2. Perlit üretimi yapan ülkeler.....	21
Tablo 1.3. Türkiye’de perlit rezervleri.....	22
Tablo 1.4. Silika arojelinin özellikleri.....	27
Tablo 3.1. Perlitlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	48
Tablo 3.2. Granüler arojelin teknik özellikleri.....	49
Tablo 3.3. DeneYlerde kullanılan çimentonun özellikleri.....	50
Tablo 3.4. Doğal kumun fiziksel özellikleri.....	51
Tablo 3.5. Katkı maddesinin özellikleri.....	52
Tablo 3.6. Hafif beton üretim reçetesi.....	53
Tablo 4.1. Donma çözülme deneyi öncesi ve sonrası basınç dayanım değerleri.....	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Hafif betonun sınıflandırılması.....	6
Şekil 1.2.	Cosa limanı haritası.....	9
Şekil 1.3.	Ayasofya Camii.....	10
Şekil 1.4.	Pantheon (Roma).....	11
Şekil 1.5.	Pont du Gard (Roma).....	12
Şekil 1.6.	Colosseum.....	13
Şekil 1.7.	Prudential Life Binası.....	15
Şekil 1.8.	Statler Hilton Oteli.....	15
Şekil 1.9.	Stolmen Köprüsü.....	16
Şekil 1.10.	Heidrun gergi bacak platformu.....	17
Şekil 1.11.	Ham perlit.....	18
Şekil 1.12.	Perlitin kullanım alanları.....	24
Şekil 1.13.	Aerojel.....	25
Şekil 1.14.	Aerojelin üretimi.....	26
Şekil 1.15.	Silika aerojel.....	28
Şekil 1.16.	Alümina aerojeller.....	29
Şekil 1.17.	Karbon aerojel.....	30
Şekil 1.18.	Bazı aerojel formları.....	31
Şekil 3.1.	Kullanılan perlit.....	47
Şekil 3.2.	Kullanılan granüler aerojel.....	49
Şekil 3.3.	Kullanılan çimento.....	50
Şekil 3.4.	Kullanılan kum agregası.....	51
Şekil 3.5.	Kullanılan katkı maddesi.....	52
Şekil 3.6.	Hafif beton numunelerinin hazırlanması	54
Şekil 3.7.	Küp numuneler	54
Şekil 3.8.	Silindir numune kalıbı	55
Şekil 3.9.	Hafif betonun kalıplanması.....	56
Şekil 3.10.	Üretilen küp ve silindir numuneler	57
Şekil 3.11.	Hafif beton numunelerinin kürlenmesi.....	57
Şekil 3.12.	Donma çözülme kabini.....	60
Şekil 3.13.	a) Hot Disk TPS 2500S cihazı, b) ısı iletkenliğinin ölçüm alanı	61
Şekil 3.14.	Silindir numunenin basınç dayanımı deneyi.....	62

Şekil 4.1.	Numunelerin yoğunluk grafiği.....	66
Şekil 4.2.	Numunelerinin porozite grafiği.....	67
Şekil 4.3.	Numunelerin su emme (ağırlıkça) grafiği.....	68
Şekil 4.4.	Numunelerin kompasite grafiği.....	69
Şekil 4.5.	Numunelerin donma çözümlme sonrası basınç dayanımı grafiği	70
Şekil 4.6.	Numunelerin donma çözümlmenin basınç dayanımına etkisi grafiği	71
Şekil 4.7.	Numunelerin ısı iletim katsayısı grafiği.....	72
Şekil 4.8.	Numunelerin basınç dayanım grafiği.....	73
Şekil 4.9.	Numunelerin yarmada çekme dayanımı grafiği.....	74
Şekil 4.10.	REF ve arojel katkılı hafif beton numunelerinin SEM görüntüleri.....	78

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
Al_2O_3	: Alüminyum oksit
Fe_2O_3	: Demir oksit
db	: Desibel
CaO	: Kalsiyum oksit
MgO	: Magnezyum oksit
MPa	: Megapaskal
μ	: Mikron
K_2O	: Potasyum oksit
SiO_2	: Silisyum oksit
Na_2O	: Sodyum oksit

Kısaltmalar	Açıklama
ACI	: Amerika Beton Enstitüsü
AS	: Asidik Pomza
DPT	: Devlet Planlama Teşkilatı
EPA	: Genleştirilmiş Perlit Agregası
FA	: Uçucu Kül
LWC	: Hafif Ağırlıklı Beton
MÖ	: Milattan Önce
MS	: Milattan Sonra
MTES	: Metiltrietoksi
NWC	: Normal Ağırlıklı Beton
OPC	: Sıradan Portland Çimento
PEDS	: Polietoksidisilakson
RF	: Resolsinol Formaldehit
SCLC	: Kendiliğinden Yerleşen Hafif Beton
SF	: Silis Dumanı
TEO	: Tetraetoksi Silan
TMOS	: Tetrametoksi Silan

1. GİRİŞ

Hafif betonu, modern beton teknolojisinin yeni bir icadı değildir, hatta Hristiyanlık öncesine kadar uzanmaktadır. Sümerlerin Babil'i, İstanbul'daki Ayasofya veya Romalıların Pantheon'u gibi şaheserlerde cüruf veya pomza gibi doğal agregalar kullanılmıştır. Hafif betonuna olan talep, özellikle ısı yalıtım özellikleri ve düşük yoğunluk gibi avantajları nedeniyle zamanla artmıştır. Ayrıca son yıllarda açık deniz inşaatlarında önemli bir yapısal malzeme haline gelmiştir (Okuyucu ve ark., 2011).

Önümüzdeki yüzyılda, çok yönlülüğüyle dikkat çeken hafif betonun tercih edilen malzeme olacağı öngörülmektedir. Sadece baskın bir malzeme olmak için geliştirilmekle kalmamakta, aynı zamanda ekonomi, teknoloji ve çevre koruma ve iyileştirme açısından da birçok fayda sağlamaktadır. Hafif beton yapısal uygulamalarda kullanıldığında betonun yoğunluğu genellikle mukavemetinden daha önemlidir. Mukavemetten ödün vermeden yoğunluğu azaltarak yapının kendi ağırlığını, tabanının boyutunu ve bina masraflarını azaltmak mümkündür. Hafif beton, genellikle bir yapının ölü ağırlığını azaltmak ve deprem hasarı riskini düşürmek için kullanılmaktadır. Bunun nedeni, inşaat mühendisliği yapılarını etkileyecek sismik basınçların bu tür yapıların kütlesiyle orantılı olmasıdır. Bu nedenle hafif beton sıklıkla kullanılan bir malzemedir (Saikiran ve Rajeshwari, 2023).

Hafif beton, daha düşük ağırlık, geliştirilmiş dayanıklılık, daha uzun açıklıklar, daha az sayıda iskele ve köprü yapılarının devamı sağlayan bir inşaat malzemesi olarak oldukça faydalıdır. Hafif beton, beton segmentlerinin boyutundaki bozulma, donatı oranları, kalıplama ve iskele, temel giderleri ve düşük nakliye ve inşaat maliyetinin sağladığı tasarruflar gibi faydalarıyla ilgili çok sayıda ilgi çekici konudan biri olarak tanımlanabilmektedir. Kolon ve kiriş boyutlarındaki değişiklikler hacimli bir alana yol açmakta ve öz ağırlıktaki azalmalar bina yapılarındaki sismik direnci iyileştirebilmektedir (Qasim, (2018).

Hafif beton kullanımının kiriş, kolon, plaka ve temellerin kesit alanını azaltarak yapının ölü yükünü azaltması ve son olarak hem basitleştirme hem de ekonomik açıdan inşaatı etkileyen çelik donatının kullanımında olası bir azalma sağlaması gerçeğiyle ilgili olarak, hafif betonun geliştirilmesine daha fazla dikkat edilmiştir (Rossignolo ve ark., 2002; Cui ve ark., 2012). Yapı ölü ağırlığının azaltılması, hem köprülerin daha fazla açıklığa sahip olmasını hem de daha yüksek binalar ve hatta yapıları etkileyecek deprem kuvvetlerinin yapıların kütlesiyle doğru orantılı olması nedeniyle deprem hasarları riskini azaltır (Chia ve Zhang, 2002). Ayrıca, hafif beton kullanımı, hafif agregada bulunan hava

boşlukları nedeniyle daha yüksek mukavemet/ağırlık oranı, daha iyi çekme mukavemeti kapasitesi, üstün ısı ve ses izolasyon özellikleri sağlar (Yıldırım, 2012) Öte yandan hafif betonun yüksek geçirgenliği, betonun su emmesini ve zararlı maddelerin betona girmesini sağlayarak, klorürün betona nüfuz etmesi yoluyla betonun bozulmasına ve donatı çeliğinin korozyona uğramasına neden olmaktadır (Demirbağ ve ark., 2008).

Hafif beton, yapıların genel ağırlığını azaltma, ısı yalıtımını iyileştirme ve çeşitli uygulamalar için yeterli mukavemeti korurken işlenebilirliği artırma potansiyel faydaları nedeniyle inşaat sektöründe önemli ilgi görmüştür (Sai ve ark., (2025). Hafif beton üretmek için hafif agregalar kullanılmaktadır (Pramusanto ve ark., 2020). Benzersiz fiziksel özelliklere sahip volkanik bir cam malzemesi olan doğal perlit, umut verici bir alternatif agrega olarak ortaya çıkmıştır. Perlit, düşük yoğunluğu, yüksek gözenekliliği ve mükemmel ısı yalıtım özellikleriyle bilinmektedir. Bu da onu hafif beton formülasyonlarında kullanım için ideal bir aday yapmaktadır (Sai ve ark., 2025). Ayrıca bu özellikler, perlitli hafif malzemelerde bir agrega olduğu için inşaat sektörü için uygun bir malzeme haline getirmektedir. Perlit, çevreyi kirletmeyen veya organik bileşenler içermeyen doğal, çevre dostu bir maddedir (Ismael, 2025).

Hafif beton üretiminde alternatif olarak kullanılan ve tez çalışması kapsamında değerlendirilen bir diğer malzeme de arojeldir. Nano gözenekli yumuşak malzemeler olan arojeller 90 yıldan uzun bir süre önce keşfedildi (Schmidt ve Schwertfeger, 1998). Köpük benzeri yarı saydam malzeme olan arojeller %99,9'u hava olan çok büyük bir yüzey alanına sahip benzersiz bir malzemedir. Silika arojel yaygın olarak kullanılan bir malzemedir ve yüksek özgül yüzey alanı, yüksek gözeneklilik, düşük yoğunluklu yüksek termal yalıtım değeri, ultra düşük dielektrik sabiti ve düşük kırılma indeksi gibi benzersiz özelliklere sahiptir (Oral, 2021).

Tezin Amacı;

Bu tez çalışmasında; doğal kaynaklarımızdan olan perlit agrega olarak ve granüler arojelin farklı oranlarda (%2, %4, %6, %8 ve %10) agrega ikame malzemesi olarak kullanılması sonucu hafif beton üretimi hedeflenmiştir. Üretilen bu hafif betonun fiziksel ve mekanik özellikleri ve yapısal karakterizasyonu araştırılmıştır. Mekanik özelliklerin tespiti için Yarmada Çekme Dayanımı ve Basınç Dayanımı deneyleri gerçekleştirilecektir. Fiziksel farklılıkların tespiti için ise, yoğunluk, su emme (ağırlıkça), porozite, komposite, donma çözünmenin basınç dayanımına etkisi ve ısı iletim katsayısı tayini deneylerinin yapılmıştır. Malzeme içerisinde meydana gelen yapıları incelemek

için SEM görüntülerinin alınmış ve yorumlanmıştır. Çalışma sonucunda fiziksel ve mekanik açıdan hafif betona göre daha üstün özellikli, termal iletkenliği iyileştirilmiş hafif beton elde edilmesi amaçlanmıştır.

Tezin Önemi;

Bu tez çalışması uygulamaya geçirildiğinde;

- Üretilen hafif beton yapının zati yükünü düşürecek, bu durum temele aktarılan yüklerin azalmasına faydalı olacaktır.
- Hafif betonla üretilen yapının depremler sırasında alacağı yatay kuvvetler düşük olacak ve bu yatay kuvvetlerin etkisinde oluşan kesit etkileri de küçük olacaktır. Böylelikle üretilen hafif beton yatay yönlü kuvvetlere dayanım gösterecektir.
- Uygulama kolaylığına sahip hafif betonun yapı malzemesi olarak kullanılması ile malzeme yönünden ekonomik kazançlar elde edilecektir.
- Depreme karşı dayanıklılık ve ses yalıtımı için ikinci bir yalıtım malzemesi kullanımının ortadan kalkması sağlayacaktır.
- Deprem etkisi, ekonomiklik, ısı ve ses izolasyonu, donma-çözülme gibi birçok problemin çözümünde önemli bir rol oynayacaktır.
- Doğal hammaddelerimizden olan perlit ve nano teknolojik malzeme olan aerojel ile üretilen hafif beton ile sürdürülebilir yapı üretimine katkıda bulunulacaktır.
- Bina yapımında kullanılan bu malzemeler gelecek kuşaklara daha iyi bir çevre bırakılması bakımından önem taşımaktadır.
- Yeni bir malzeme üretiminde yurt dışından malzeme almak yerine yerel hammaddelerimizin üretime katılması da ülke ekonomisine katkıda bulunacaktır.
- Deneyler sonucunda yeni bir malzeme üretimine veya mevcut malzemede iyileştirmeye gidilmesi teknolojiye; tez sonunda elde edilen verilerin bilimsel ortama aktarılması ile bilime katkı sağlanacaktır.

Tezin Kapsamı;

Tez çalışması kapsamında üretilen hafif beton numunelerinde agrega olarak Erzincan il sınırları içerisinde alınan ham perlit kullanılmıştır. Kum agregası Ankara il sınırları içerisinde temin edilmiştir. Böylelikle tezin kapsamı Erzincan ili perlit ve Ankara ili kumu olarak belirlenmiş ve tezin sınırları çizilmiştir. Bunun yanı sıra te 5 bölümden oluşmaktadır.

Giriş; tezde birinci bölümüdür. Bu bölümde hafif beton, perlit ve arojel gibi terimler hakkında bilgiler verilmiştir. Bölüm içerisinde tezin amacı, önemi ve kapsamı ayrı ayrı belirtilmiştir.

Önceki Çalışmalar; ikinci bölümde tez hakkında yapılan literatür taraması takdim edilmiştir. Bu kapsamda, hafif beton, perlit ve arojel ile ilgili kitaplar, tezler, sempozyumlar, internet ortamında ve dergilerde yayınlanmış ulusal ve uluslararası makaleler incelenmiş ve özet halinde sunulmuştur.

Materyal ve Metot; tezde üçüncü bölüm materyal ve yöntem bölümüdür. Materyal başlığı altında perlit, arojel, çimento, agrega, kum ve karışım suyunun tanımı yapılmıştır. Perlitin genel yapısı, Dünya’da ve Türkiye’de rezervleri, kullanım alanları tek tek başlıklar halinde sunulmuştur. Tez çalışmasında kullanılacak olan agrega, çimento ve karışım suyunun özelliklerine değinilmiştir. Metot kısmı üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada; referans adı verilen (REF) hafif beton numuneleri (perlit malzemesi agrega olarak kullanılacak) üretilmiştir. İkinci aşamada; Referans numunelerine %2, %4, %6, %8 ve %10 oranında arojel agregaya ikame edilerek katkılı numune üretimi yapılmıştır. Üçüncü aşamada ise; üretilen numunelere uygulanan fiziksel, mekanik ve yapısal karakterizasyon deneyleri uygulanmıştır.

Araştırma Sonuçları ve Tartışma; tezde bu başlık altında, üretilen numunelerin deney sonuçları ayrı ayrı başlıklar halinde değerlendirilmiştir. Numunelere uygulanan deneyler sonucu elde edilen bulgular, tablolar ve grafikler şeklinde sunulmuştur. Ayrıca üretilen katkılı numunelerin mikro yapısı çekilen SEM görüntüleri üzerinden yorumlanmıştır. Tartışma kısmında ise literatürdeki diğer yayınlarla karşılaştırma yapılmıştır.

Sonuç ve Öneriler; bu bölüm tezde son bölümdür. Bu bölümde yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen veriler sunulmuş ve gelecek çalışmalarda neler yapılabileceği konusunda önerilerde bulunulmuştur.

1.1. Hafif Beton

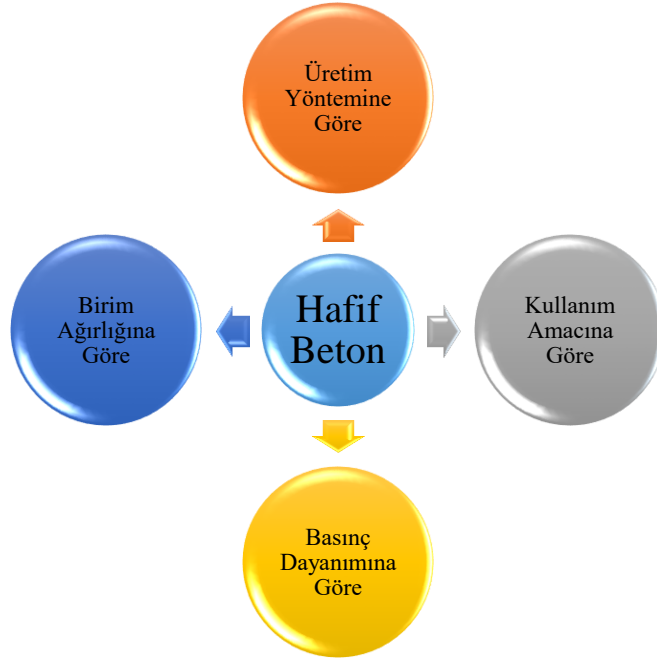
1.1.1. Hafif betonun tanımı

Beton; agrega, çimento, su ve gerektiğinde kimyasal ve mineral katkı maddelerinden oluşan, karışımı belirli prensiplere göre tasarlanıp uygun şartlarda elde edilen kompozit bir yapı malzemesidir (Kocataşkın, 1991). Betonun üretilme amacı ne olursa olsun işlenebilir, dayanıklı ve dış etkenlere karşı dirençli olma özelliklerine sahip olması gerekmektedir. Bileşenleri bakımından sadece su, çimento ve agregadan oluşan

betona bazı kimyasal ve mineral katkı maddeleri eklenerek istenilen bazı özellikler kazanılabilir ve bazı özellikler iyileştirilebilir (Felekoğlu ve Baradan, 2004). Böylelikle özel betonlar elde edilmektedir. Özel beton, normal beton bileşenleri, karıştırma, montaj ve kütleme işlemleriyle her zaman karşılanamayan özel performans ve kıvam standartlarını karşılaması gereken betonlar olarak tanımlanmaktadır (Özel Betonlar, 2025). Özel beton çeşitleri arasında hafif beton, ultra hafif beton, kütle beton, vakumlu beton, silindirle sıkıştırılmış beton, lifli beton, püskürtme beton ve nükleer beton yer almaktadır. Tez çalışması kapsamında özel beton türlerinden hafif beton incelenmektedir.

Hafif beton, daha yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve üstün ısı ve ses yalıtım özellikleri gibi avantajları nedeniyle modern inşaat ve binalarda birçok önemli uygulamaya sahiptir (Narayanan ve Ramamurthy, 2000; Kılıç ve ark., 2003). Hafif beton, diğerlerinin yanı sıra, normal agrega (yani kum ve kaya) yerine kısmen veya tamamen pomza, diatomit, volkanik cüruf ve perlit gibi hafif agregalar kullanılarak hazırlanabilmektedir (Chandra ve Berntsson, 2002). Hafif agregaların betona dahil edilmesi, kullanılan agregaların doğasına bağlı olarak agregalar ve bağlayıcı faz arasında olası etkileşimleri de beraberinde getirdiğinden, farklı uygulamalar için hafif beton oldukça önemlidir.

Hafif beton genellikle beton matrisinde ve/veya hafif agregalarda büyük miktarda hava boşluğu olması nedeniyle geleneksel betona kıyasla üstün termal yalıtım özelliklerine sahiptir (Gao ve ark., 2014). Bu özellik, hem termal yalıtımı hem de yük taşıma özelliğini benzersiz bir malzemeyle elde etmenin çok cazip olduğu enerji açısından verimli binalarla ilgili olarak özellikle önemlidir (Jelle, 2011). Hafif betonlar, üretim yöntemleri, kullanım amacı, birim ağırlığı ve basınç dayanımına göre sınıflandırılmaktadır (Şekil 1.1) (Mehta ve Monteiro, 2006; Ayodele, 2016; Topal, 2023).



Şekil 1.1. Hafif betonun sınıflandırılması

Üretim yöntemine göre hafif beton türleri;

- *Hafif agrega betonlar*; normal ağırlıktaki agrega yerine düşük özgül ağırlığa sahip hafif agrega kullanımını içerir. Bu tip betona genellikle hafif agrega beton denir.
- Beton veya harç kütlelerinin içinde kabarcık boşlukları oluşturarak üretilen hafif betonlar (havalandırılmış, hücreli, köpüklü veya gaz beton).
- Karışımdan ince agregayı çıkararak oluşturulan ve böylece sıradan ağırlıktaki iri agreganın sadece karışım için kullanıldığı hafif betonlar. (İnce olmayan beton veya pervious beton) (Slaby ve ark., 2008; Neville ve Brooks, 2010).

Kullanım amacına göre hafif beton türleri;

- *Yapısal hafif beton*; 28 günlük silindir basınç dayanımı 17 MPa veya daha fazla olan, yoğunluk aralığı yaklaşık 1400-1800 kg/m³ olan betonlardır. ACI 213R-03, yapısal hafif betonlarının pratik olarak kabul edilebilmesi için 28 günlük basınç dayanımının 17 MPa'dan fazla ve 28 günlük, hava kurumuş birim ağırlığının 1850 kg/m³'ten fazla olmaması gerektiğini belirtmektedir (ACI Komitesi 213, 1987).
- *Yapısal/yalıtımsal hafif beton*; 7-14 MPa arasında bir basınç dayanımına ve 500-800 kg/m³ arasında bir yoğunluk aralığına sahiptir.

- *Yalıtım betonu*; 0,7-7 MPa arasında bir basınç dayanımına ve 800 kg/m³'ten düşük bir yoğunluğa sahip betonlardır. Bu betonların termal katsayısı yaklaşık 0,3 J/m²sn°C/m'nin altında olmalıdır (Neville ve Brooks, 2010).

Basınç dayanımına göre hafif betonlar;

- Düşük dayanımlı hafif betonlar; Basınç dayanımları 20 MPa'dan az olan hafif betonlardır.
- Orta dayanımlı hafif betonlar; Basınç dayanımları 20 – 40 MPa arasında değişen hafif betonlardır.
- Yüksek dayanımlı hafif betonlar; Basınç dayanımları 40 MPa'dan fazla olan hafif betonlardır.

Birim Ağırlığına göre hafif betonlar;

- *Düşük birim ağırlığa sahip hafif betonlar*; Çok hafif yapısal olmayan düşük birim ağırlığa sahip hafif betonlar, esas olarak yalıtım amaçları için kullanılmaktadır. Bu betonların birim ağırlıkları 250-750 kg/m³ arasında değişmektedir. Düşük birim ağırlıkları ile, nadiren 800 kg/m³'ü aştığında, ısı iletkenliği düşüktür (Aşık, 2006)
- *Orta birim ağırlığa sahip hafif betonlar*; Bu betonların birim ağırlıkları 1000-1400 kg/m³ arasında değişmektedir. Bunlar bazen "dolgu" betonları olarak tasarlanmaktadır. (Aşık, 2006)
- *Yüksek birim ağırlığa sahip betonlar*; Bu betonların birim ağırlıkları 1500-2000 kg/m³ arasında değişmektedir (Sari ve Paşamehmetoğlu, 2005).

Hafif betonların ısı yalıtımı, düşük yoğunluk, ısı şoku direnci, yangın direnci ve deformasyonla ilgili özellikleri önemli avantajlardır. Günümüzde, LWC hala gelişmiş ülkelerdeki binalarda ölü yükü azaltmak için kullanılırken, termal yalıtım için LWC ve bloklar üretme çabaları yapılmaktadır. Hafif betonun bir yapı malzemesi olarak kullanılmasının, binanın kendi yükünün azaltılması nedeniyle malzeme açısından ekonomi ve yüksek ısı ve ses yalıtım özelliği gibi çeşitli faydaları vardır (Bomhard, 1980).

Hafif betonun normal betona göre avantajları

- Birim hacimdeki toplam malzeme ağırlığının azalması nedeniyle, beton kalıbında taze betonun daha düşük basıncı meydana gelmekte, bu da üretim ve yerleştirmeyi kolaylaştırmaktadır.

- LWC ile üretilen beton elemanların birim ağırlığının düşük olması nedeniyle, yatay ve düşey yapısal yükler azalmaktadır. Bu azalma ile temeller ve diğer yapısal elemanlar daha küçük boyutlarda tasarlanmakta ve daha ekonomik olmaktadır.
- Perlit agregalı hafif beton düşük ısı iletkenliğine ve yüksek ses yalıtımına sahiptir.
- Yangın dayanımı normal betona göre daha yüksektir.

Hafif betonun normal betona göre dezavantajları

- Hafif betonun gözenekli yapısı nedeniyle, sıradan betona kıyasla daha düşük mukavemete sahiptir.
- Hafif betonlar aşınmaya karşı zayıftır.
- Hafif betonun elastiklik modülü normal betona göre düşüktür (Taşdemir, 1982) (Topal, 2023).

1.1.2. Hafif betonun tarihçesi ve örnekleri

Hafif beton, beton teknolojisinde yeni bir buluş değildir. Antik çağlardan beri bilinmektedir. Bu nedenle LWAC kullanımıyla ilgili çok sayıda referans bulmak mümkündür. Pomza, cüruf vb. gibi volkanik kökenli doğal agregalar kullanılarak yapılmıştır. Sümerler bunu MÖ 3. binyılda Babil'i inşa ederken kullanmışlardır. Yunanlılar ve Romalılar inşaatlarda pomza kullanmışlardır. Bu muhteşem antik yapılardan bazıları hala varlığını sürdürmektedir. M.Ö. 273 yılında İtalya'nın batı kıyısında inşa edilen Cosa limanı (Şekil 1.2), Türkiye'de İstanbul'da bulunan ve İmparator Justinian tarafından M.S. 4. yüzyılda yaptırılan Ayasofya Camii (Şekil 1.3), M.S. 118-128 yıllarında inşa edilen Roma tapınağı Pantheon (Şekil 1.4) M.S. 14 yılında inşa edilen prestijli su kemeri Pont du Gard (Şekil 1.5) ve MS 70 ile 82 yılları arasında inşa edilen büyük Roma amfi tiyatrosu Colosseum (Şekil 1.6) tarihi hafif beton yapılarına örnek olarak verilebilmektedir (Chandra ve Berntsson, 2002; Aşık, 2006; Eser, 2014).



Şekil 1.3. Ayasofya Camii (Web ileti 2)



Şekil 1.4. Pantheon (Roma) (Web İleti 3)



Şekil 1.5. Pont du Gard (Roma) (Web İleti 4)



Şekil 1.6. Colosseum (Web İleti 5)

Cosa Limanının tasarımcıları, hafif agregaların deniz yapılarında kullanılmasının daha uygun olduğunu farkındaydı. İnşaat için yerel olarak bulunan agregaları (plaj kumu ve çakıl) kullanmak yerine, inşaatçılar 40 km uzaklıkta bulunan volkanik kaynaklardan

doğal hafif agregalar (pomza ve cüruf) getirmişlerdir. Liman, yaklaşık 2 bin yıl boyunca yüzey aşınması dışında doğanın kuvvetlerine direnen dört iskeleden oluşmakta ve artık yalnızca siltasyon nedeniyle terk edilmiş durumdadır (ACI Komitesi 213, 2003).

Pantheon'un inşası M.Ö. 27 yılında tamamlanmıştır. Yaklaşık 2 bin yıldır en yüksek rekor olan 43,3 m çapında bir kubbesi bulunmaktadır. İnşaatçılar, kubbenin tabanından tepesine doğru azalan sırada değişen yoğunluklarda hafif agregalar kullanmışlardır. Başka bir deyişle, gerilimlerin daha yüksek olduğu tabana yakın yerlerde daha yüksek yoğunluklu agregalar kullanılmış; gerilimlerin daha düşük olduğu tepeye yakın yerlerde ise daha düşük yoğunluklu agregalar kullanmışlardır (Holm & Bremner, 2000). Pantheon bugün bile hala manevi amaçlar için kullanılmaktadır (ACI Committee 213, 2003; Eser, 2014).

50 bin kişilik oturma kapasitesine sahip devasa büyüklükteki antik bir amfi tiyatro olan Coliseum, MS 75 ila 80 yıllarında inşa edilmiştir. Coliseum'un temelinde, agrega olarak kırılmış volkanik lav kullanılan hafif bir betondan yapılmıştır. Benzer şekilde, duvarlarında kullanılan agregalar gözenekli, kırılmış tuğlalardan yapılmıştır. Duvarlar arasındaki boşluklar ve tonozlar gözenekli tuf kesme taştan yapılmıştır (ACI Committee 213, 2003).

20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren, birçok çok katlı bina yapısal hafif beton kullanılarak inşa edilmiştir. Örnekler arasında, Chicago'da bulunan hafif beton zeminlere sahip 42 katlı Prudential Life Binası (Şekil 1.7) ve Dallas'ta bulunan tamamı hafif beton çerçeve ve düz plaka zeminlere sahip 18 katlı Statler Hilton Oteli (Şekil 1.8) yer almaktadır (Eser, 2014).



Şekil 1.7. Prudential Life Binası (Web İleti 6)



Şekil 1.8. Statler Hilton Oteli (Web İleti 7)

Günümüzde yapısal hafif betonun uygulamaları sadece yüksek binalara değil aynı zamanda köprülere ve deniz yapılarına da yayılmıştır. Stolmen Köprüsü (Şekil 1.9) ve Heidrun Gergi Bacak Platformu (Şekil 1.10) son uygulamaların önemli örnekleridir (Eser, 2014).

Stolmen Köprüsü 1998 yılında Norveç'te inşa edilmiştir. 301 m ana açıklık uzunluğuna ve 467 m toplam uzunluğa sahiptir. Bu, serbest konsol beton köprüler için dünya rekorudur. Ana açıklığın ortasındaki 184 m'lik kısım yüksek dayanımlı hafif betonla inşa edilmiştir. Stolmen Köprüsü'nün inşasında 1600 m³ hafif beton kullanılmıştır. 28 günlük ortalama basınç küp dayanımı 70,4 MPa ve 28 günlük suyla kürlenmiş numunelerin ortalama yoğunluğu 1940 kg/m³tür (ESCSI, 2010).



Şekil 1.9. Stolmen köprüsü (Web İleti 8)



Şekil 1.10. Heidrun Gergi Bacak Platformu (Web İleti 9)

1.2. Perlit

1.2.1. Perlit tanımı

Perlit, hidratlı bir volkanik camdır ve genellikle soğan kabuğu çatlaklarını yoğunlaştıran sedefli, camsı bir parlaklığa sahiptir. Volkanik lavın hızlı soğuması ve katılaşması sonucu oluşan perlit, içinde su hapsolmuş alümina-silikat bileşiminde doğal bir volkanik camdır. Perlit Şekil 1.11'de sunulan açık gri renkli bir volkanik kayadır. İnci anlamına gelen ismi 'perle' kelimesinden türemiştir. Bazı perlit türleri çatladığında inci parlaklığı gibi küçük küreler oluşur ve sonuç olarak perlit ismi verilmiştir (Gül, 2016) Perlit, nitrat sülfat, fosfor, ağır metaller, radyoaktif elementler ve organik madde içermemektedir. (DPT, 2001). Yapısı volkanik kökenli amorf bir alüminosilikattır. Oldukça gözenekli bir yapıya, düşük yoğunluğa, düşük maliyete ve iyi termal güvenilirliğe sahiptir (Karaman ve ark. 2011; Güneri, 2022).



Şekil 1.11. Ham perlit (Bergama Perlit, 2025)

Perlit, magmatik olaylar sırasında yüksek basınçlı gazlarla hareket eden volkanların ana bileşenlerinden biridir. Volkanik aktivitelerde, erimiş magma, magmanın merkezinde toplanan gazlar aracılığıyla yukarı doğru hareket eder. Bu volkanik malzemeler farklı özelliklere sahiptir. Perlitin homojen olmayan yapısı bu çeşitlilikle açıklanabilir (Sağlık, 2009). Perlit cevherleri, asidik magmatik kayalarla birlikte yerinde bulunur ve SiO_2 açısından zengin perlitin kimyasal özellikleri, magmatik kökenini kanıtlar. Perlitin camsı dokusu, magmanın hızlı soğumasıyla ilişkilidir (Karaman ve Kibici, 1999).

Perlit, yapısında 0,02-0,05 su içeriği bulunan belirsiz volkanik cam kayadan elde edilen doğal olarak oluşan bir mineraldir. Volkanik cam ayrıca "obsidiyen" olarak adlandırılmaktadır. Magna'nın yeryüzüne sunulduğunda meydana gelen ani bir soğumasından sonra oluşur, volkandaki bileşenlere ve kapanımlara bağlı olarak, volkanik cam sarı, koyu, turuncu, mavi-kırmızı vb. olabilir ve soğuma gelişimi sırasında somutlaşabilir. (Murımı, 2020).

Perlit, dikkat çekici özellikleri nedeniyle çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan benzersiz ve çok yönlü bir mineraldir. Perlitin birincil özelliği, yaklaşık 240 kg/m^3 lük düşük bir yoğunluğa neden olan gözenekli yapısıdır. Düşük yoğunluk, üstün ısı yalıtım özellikleri ve daha yüksek gözenek sayısı ile birleştiğinde, onu çeşitli uygulamalar için düşük yoğunluklu bir mineral dolgu maddesi olarak ideal bir seçim haline getirir (Topçu ve Işıkdağ, 2008; Şengul ve ark., 2011; Jedidi ve ark., 2015).

Türkiye'de perlit çalışmaları 1950'lere kadar uzanmaktadır. Türkiye'de çok çeşitli perlitler mevcuttur. Türkiye'de bulunan perlit türleri aşağıda listelenmiştir (Sağlık, 2009)

- Granül Perlit
- Püskürtülmüş Perlit
- Eşmerkezli Yapılı Perlit
- Camsılaştırılmış Perlit
- Fenikristalin Perlit
- Kumlu Perlit

Perlit içinde tutulan kimyasal su genellikle 900 °C ila 1000 °C aralığındaki sıcaklıklarda kaynadığında, ortaya çıkan buhar yumuşamış kayanın içinde köpük benzeri bir yapı oluşturmak için kabarcıklar oluşturmaktadır. Bu kabarcıkların oluşumu perlitin orijinal hacminin 15-20 katına kadar genişlemesini sağlar. Bu yeni malzemeye "genişletilmiş perlit" denir (Aşık, 2006; Ismael, 2025). Genleştirilmiş perlitin genel gözenekliliği %84 ile %98 arasında değişmektedir (Beikircher ve Demharter 2013; Allameh-Haery ve ark. 2017).

Genleşmiş perlitlerin matris yapısı havayı (ki bu çok kötü bir ısı iletkenidir) hapseder ve bu da perlitlere düşük ısı iletkenlik özellikleri ve hafiflik kazandırmaktadır. Genleştirilmiş perlitler ayrıca yanmazdır ve ısı koruması için kullanılmaktadır (Jedidi ve ark., 2015). Farklı durumlarda, perlitler, genişletilmiş perlit parçacıklarının duvar ile boş kaplar arasındaki boş deliği doldurduğu boşluklar için serbest dolgu olarak kullanılmakta ve ısı ve ses yalıtımını yönetmektedir (Murımı, 2020).

1.2.2. Perlitin özellikleri

Perlit, mineral katkı maddesi olarak uygunluğunu artıran birçok fiziksel özelliğe sahiptir. Yoğunluk aralığı 32-400 kg/m³'tür ve bu diğer hammaddelerin çoğuna kıyasla oldukça düşüktür. Ek olarak, perlit 6,5 ila 8 arasında değişen pH değerleri ve 2,2 ila 2,4 arasında özgül ağırlık sergiler (Rashad, 2016). Mineral, diğer malzemelere kıyasla oldukça yüksek olan %35-50'lik bir WA kapasitesi göstermektedir. Perlitin k değeri oldukça düşüktür ve 24°C'de 0,04 ila 0,06 W/mK arasında değişmektedir (Ismael, 2025). Perlitin kimyasal yapısı SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, Na₂O, K₂O, MgO gibi bileşikler içermektedir (Mekaddem ve ark., 2019).

Perlit, özellikle Türkiye'de bu özelliklere uyan böyle bir puzolandır (Erdoğan ve Sağlık, 2013). Perlit, %70 - %75 SiO₂, %12 - %18 Al₂O₃ ve daha az miktarda sodyum,

demir, magnezyum, kalsiyum ve potasyum içeren volkanik bir camsı kayadır (Rashad, 2016; Şengül, 2018).

Kimyasal olarak, genellikle %12-18 alüminyum oksit, daha az miktarda potasyum ve sodyum oksitleri, daha az miktarda demir, magnezyum, kalsiyum ve titanyum içeren amorf silikadan oluşan inorganik bir malzemedir. Perlit yavaşça ısıtıldığında, su yavaş yavaş salınmakta ve hiçbir genleşme meydana gelmemektedir (Ismael, 2025).

Perlit, ısıtılardan sonra düşük yoğunluklu ve gözenekli bir yapıya dönüşmekte ve rengi griden beyaza dönmektedir (Tekin ve ark., 2006; Liu ve ark., 2016). %2-5 su içerdiği tanımlanan perlit, dünyanın dört bir yanında 60 milyon yıldan daha eski camsı, riyolitik, yüksek silika volkanik kayalarda bulunmaktadır (Ismael, 2025). Perlitin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1.1'de gösterilmiştir (Sağlık, 2009; Gül, 2016).

Tablo 1.1. Perlitin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Fiziksel Özellik	Açıklama
Renk	Siyah, gri ve grinin tonları
Yumuşama Noktası	800 – 1100 °C
Erime Noktası	1325 – 1390 °C
PH	6,6 – 8, 0
Sertlik	-
Özgül Isı	0,2 kcal/ kg°C
Özgül Ağırlık	2200 – 2400 kg/m ³
Isıl İletkenliği	-
Asitte Çözülme	Sıcak konsantre alkali, mineral konsantre asitlerde az erirken, seyreltik mineral veya konsantre zayıf asitlerde çok az erirler.
Kimyasal Formülü	
SiO ₂	73,8
Al ₂ O ₃	13,9
Fe ₂ O ₃	0,9
Ca	0,9
MgO	0,3
Na ₂ O	4,7
K ₂ O	4,3
H ₂ O	<1,0
As	<0,001
Ba	<0,1
B	<0,01
Cl	<0,0005
Cr	<0,007
Cu	<0,0015
Ga	<0,05
Pb	<0,001

1.2.3. Perlit rezervleri

Perlit yatakları dünya çapında çok sayıda yerde bulunur; ancak, genişletilmiş ürünler yalnızca gelişen endüstriyel kapasitelere sahip ülkelerde mevcuttur (Topçu ve Işıkdag, 2008).

Dünya'nın ürettiği değerlendirilen meblağa bağlı olarak, ana perlit üreticileri Dünya üretiminde Çin (%35), Yunanistan (%30), Türkiye (%20) ve ABD (%10) paya sahiptir (Murımı, 2020). Tablo 1.2'de perlit üretimi yapan ülkeler verilmiştir.

Tablo 1.2. Perlit üretimi yapan ülkeler (USGS, 2015)

Ülkeler	2011	2012	2013	2014	2015
Türkiye	702.673	887.600	1.075.949	897.125	925.000
Bulgaristan	---	4.000	5.000	5.000	5.000
Çin	2.500.000	2.100.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000
Yunanistan	842.870	876.396	890.000	985.328	1.000.000
Macaristan	39.254	40.129	35.957	37.957	40.000
Ermenistan	229	181	53	14	20
İran	20.000	30.000	55.100	55.000	60.000
Meksika	31.779	29.950	27.200	26.000	26.000
Filipinler	6.279	9.221	14.249	17.194	19.000
Slovakya	23.000	24.000	16.000	17.000	18.000
ABD	420.000	393.000	419.000	462.000	459.000
Zimbamve	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Toplam	4.587.084	4.395.477	4.339.508	4.254.118	4.353.020

Dünya perlit rezervlerinin yaklaşık 8 milyar ton olduğu tahmin edilmektedir ve bunun 5,7 milyar tonu Türkiye'de bulunmaktadır. Bu da dünya rezervlerinin yaklaşık %70'inden fazlasına denk gelmektedir (Gül, 2016; Şengül, 2018). Altı ülke tüm perlitin %97'sini üretmektedir: Türkiye, Yunanistan, ABD, Japonya, İtalya ve Macaristan (Rashad, 2016).

Tablo 1.3. Türkiye'deki perlit rezervlerini göstermektedir. Dünya ile karşılaştırıldığında Türkiye'deki perlit rezervinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle perlit Türkiye için önemli bir mineraldir.

Türkiye'de perlit, %33,9'u Kars-sarıkamış (2.043.000.000 Ton), %23,2'si Van (1.400.000.000 Ton), %15,6'sı Bitlis (940.000.000 Ton), %13,3, Erzurum (386.824.000 Ton) %6,4 ve Nevşehir'de (800.000.000 Ton) olmak üzere muazzam tonlarda çıkarılmaktadır (Murımı, 2020).

Tablo 1.3. Türkiye’de perlit rezervleri

Perlit Kaynağı	Rezerv (Ton)	Oran (%)
Kars-Sarıkamış	2.043.000.000	33.9
Van-Erciş	1.400.000.000	23.2
Bitlis-Adilcevaz ve Tatvan	940.000.000	15.6
Nevşehir-Derinkuyu-Acıgöl	800.000.000	13.3
Erzurum-Pasinler	386.824.000	6.4
Çankırı-Orta-Kalfat	128.200.000	2.1
İzmir-Bergama-Cumaovası-Foça	88.000.000	1.5
Erzincan-Mollatepe	71.500.000	1.2
Ankara-Çubuk	51.000.000	0.8
Ankara Kızılcahamam-Güvem	31.500.000	0.5
Balıkesir-Savaştepe	26.000.000	0.4
Balıkesir-Sındırgı	21.206.000	0.4
Manisa-Saruhanlı	17.700.000	0.3
Kütahya-Avdan	11.500.000	0.2
Ankara-Kızılcahamam-Çamkoru	8.000.000	0.1
Ankara-Kızılcahamam-Korkmazlar	3.700.000	0.1
Toplam	6.028.130.000	100

1.2.4. Perlitin kullanım alanı

Türkiye, dünyanın en zengin perlit rezervlerine sahip ülkelerinden biridir. Ülkemiz perlit açısından zengin kaynaklara ve kapasiteye sahip olmasına rağmen iç talep çok sınırlı kalmaktadır. Çok iyi bir yalıtım malzemesi olan perlit, iç tüketimde gerekli ivmeyi yakalayamamıştır (DPT, 2001).

Perlit, inşaat, tarım, tıp, kimya ve beslenme, seramik ve cam ve metal endüstrilerinde, filtre malzemesi, dolgu maddesi, yalıtım malzemesi, katkı maddesi vb. olarak kullanılmaktadır. Ancak perlitin kullanıldığı hemen hemen tüm yollar, düşük yoğunluk, gözenekli yapı, yangına dayanıklılık vb. gibi fiziksel özelliklerinden yararlanmaktadır. İnşaat alanında bile perlitin en çok tercih edilen kullanımı yalıtkan veya hafif beton agregası olarak kullanılmasıdır (Sağlık, 2009)

Üretilen perlitin yarısından fazlası inşaat sektöründe, özellikle yalıtım levhalarında, sıvalarda ve betonlarda agrega olarak kullanılmaktadır (Güneri, 2022).

Perlit, betonda balast olarak düzenli bir şekilde kullanılmaktadır. Çatı güvertelerinde ısı yalıtımı için kullanıldığında, dış yüzeyler için alçı ve Portland betonuyla karıştırılabilmektedir. Örneğin şaftlar ve bölümler yangına dayanıklı ve su geçirmez hale getirilebilmektedir. Perlitin çatı güvertesinde ısı yalıtkanı olarak kullanılmasının arkasındaki motivasyon, perlitlerin ısı hasarlarını önlemesi ve dolayısıyla kış aylarında evlerde enerji tüketimini korumasıdır (Jedidi ve ark., 2015).

Perlitin diğer uygulamaları arasında betonlaştırılmış gazın raylarda taşınması ve toksinlerin adsorpsiyonu için kriyojenik kullanım yer almaktadır. Ayrıca perlit

kaplamalar adsorpsiyon özellikleriyle etraftaki havayı filtrelemektedir. Perlitler, arıtma amacıyla suya, nem adsorpsiyonu ve kokuyu azaltmak için toprağa çok iyi bir şekilde dahil edilebilmektedir (Murımı, 2020).

İnşaat sektöründe beton, çimento ve harçla birlikte karıştırılarak hafiflik özelliklerini, akustiği, yangına karşı geçirimsizliği ve tüm kompozit blokta ısı yalıtımını iyileştirmektedir. Perlit ayrıca düşük kalınlığı ve ısı yalıtım özellikleri nedeniyle çatı koruma kaplaması ve soğutucular olarak da uygulanmaktadır.

Termal yalıtım özellikleri sayesinde enerji jeoyapıları için tampon malzemelerde katkı maddesi olarak kullanılabilir (Güneri, 2022). Tarımda, su sistemi ve toprağı kalıplamak için kullanılmaktadır (Murımı, 2020). Perlitin kullanım alanları Şekil 1.12’de özetlenmiştir (Gül, 2016).

<p>Ortam ve Düşük Sıcaklık Yalıtımı</p>	<p>Tarımsal Katkı Maddesi ve Takviyesi</p>	<p>Orta ila Yüksek Sıcaklık Yalıtımı</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Çatı döşemesi • Beton zemin dolgusu • Beton bloklar • Perlit asfalt • Bitümlü perlit, • Duvar panellerinde çekirdek dolgusu • Boşluk duvar yalıtımları, • Soğutma tesisleri • Taşınabilir buz kutuları • Konteynerler 	<ul style="list-style-type: none"> • Kümes hayvanı kumu takviyesi • Koku ve nemi azaltan adsorban • Hayvan yemi topaklanmayı önleyici madde ve dolgu maddesi • Besin maddeleri ve ilaçlar için taşıyıcı 	<ul style="list-style-type: none"> • Kapitone şiltelerde ve sertleştirilmiş bileşimlerde kazan kaplamaları, • Koaksiyel borularda boru kaplamaları • Basınçla kalıplanmış boru yarım bölümleri • Dökme boru izolasyonu
<p>Yüksek Sıcaklık Yalıtımı</p>	<p>Petrol Kuyusu İyileştirmeleri</p>	<p>Yangına dayanıklılık</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Dökümhane maçaları ve kalıpları • Fırınlr • Pota üstleri 	<ul style="list-style-type: none"> • Petrol kuyusu çimentolaması • Düşük yoğunluklu çamur 	<ul style="list-style-type: none"> • Kasalarda, odalarda, kapılarda, baca astarlarında yangın izolasyonu
<p>Akustik</p>	<p>Bahçecilik</p>	<p>Sıvı Filtrasyonu</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Sıvalar, harçlar, alçıpanlar, tavan döşemeleri ve üst duvar izolasyonu • Otoyol ses emici duvarlar 	<ul style="list-style-type: none"> • Bitki köklendirme • Tohum başlatma ortamı • Yetiştirme ortamı • Toprak düzenleyici • Tohum kaplama • Hidroponik • Yeşil çatılar 	<ul style="list-style-type: none"> • Bira, şarap, yenilebilir yağlar, sitrik asit, şeker, yağlar, ilaçlar, meyve suları, glikoz, kimyasallar, şıra, yüzme havuzu suyu, içme suyu, yağmur suyu akışı, biyodizel

Şekil 1.12. Perlitin kullanım alanları

1.3. Aerojel

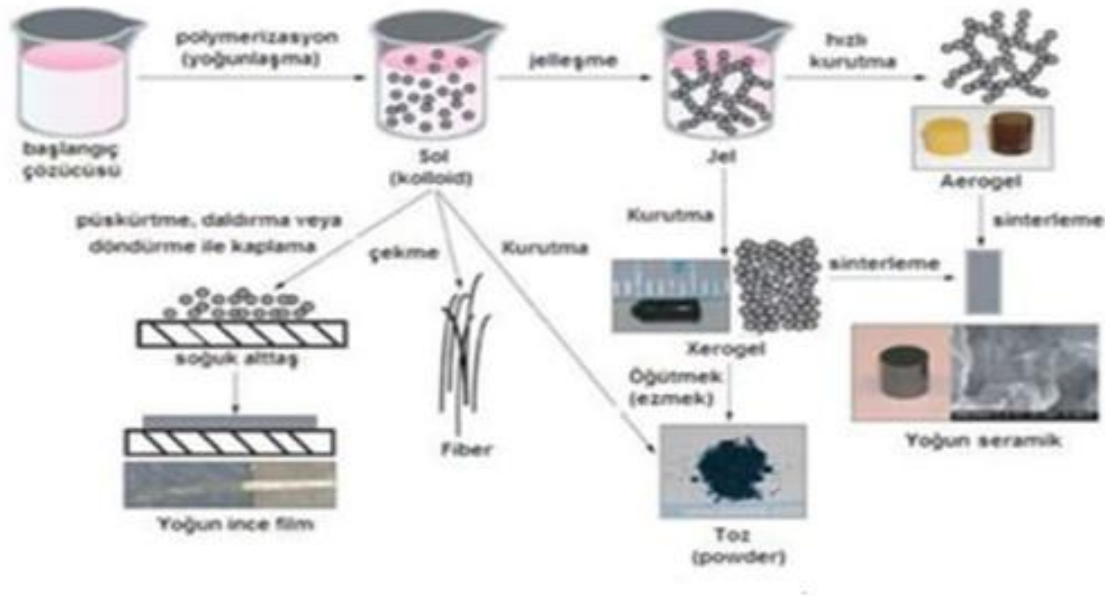
1.3.1. Aerojelin tanımı

Aerojeller, 1930'larda Samuel Stephens Kistler tarafından keşfedilmiştir (Kistler, 1932). Köpük benzeri yapı ve görünüşleri nedeniyle donmuş duman olarak bilinmektedirler. Şekil 1.13'de verilen aerojeller, inci kolyeye benzeyen bir ağdan oluşan son derece gözenekli bir yapıya sahiplerdir. Aerojeller çok hafif ve düşük yoğunluğa sahip olmalarına rağmen çok fazla basınç taşıyabilmektedirler (Ahmad ve ark., 2023).



Şekil 1.13. Aerojel (Çalapkulu, 2024)

Gözenekli, düşük yoğunluklu ve köpük benzeri bir yapıya sahip aerojeller, genellikle sol-jel yöntemi ile elde edilirler (Şekil 1.14) (Alan, 2022).



Şekil 1.14. Aerojelin üretimi (Çalapkulu, 2024)

Sol-jel yöntemiyle aerogel üretim adımları:

- **Sol hazırlama;** Bir öncül malzemeden türetilen katı nano ölçekli parçacıkların bir çözöcü içinde dağılması nedeniyle kolloidal bir süspansiyon oluşmaktadır (Alan, 2022). Öncül, esas olarak silikon alkoksittir ve yüksek saflıkta bulunmaktadır. Aerojeller, TEOS'un (tetraetoksi silan), TMOS'un (tetrametoksi silan) ve PEDS'in (polietoksidisiloksan) üç farklı öncüsünden elde edilmektedir. TMOS, TEOS'tan daha hızlı hidrolize uğramaktadır. MTES (metiltrietoksi silan), TEOS'tan daha büyük bir yüzey alanına sahip daha esnek ağlar için kullanılmaktadır. TMOS'a metiltrimetoksi silan (MTMS) eklenmesi, aerogelin hidrofobitesini artırmaktadır (Dorcheh ve Abbasi, 2008).
- **Soldan jele geçiş (jelleşme);** Bir asit veya baz katalizörü eklenmesiyle çapraz bağlama ve dallanma parçacıkları oluşmakta ve bu da polimerizasyonu başlatarak birbirine bağlı bir zincir yapısı oluşturmaktadır (Pierre ve Pajonk, 2002).
- **Jelin eskimesi (Yaşlandırma);** Jel, omurgasını ve mekanik mukavemetini artırmak için ana çözeltisinde eskitilmektedir (Akgöl, 2023)
- **Jelin kurutulması;** Çözöcü, jelin gözeneklerinden jel kırılmasını önleyecek şekilde uzaklaştırılmaktadır. Başlıca bilinen üç farklı kurutma türü vardır. Bunlar; ortam basıncında kurutma, CO₂ ile süperkritik kurutma ve dondurarak kurutmadır. Hepsi farklı koşullarda çalışmaktadır. Kurutma işlemi sırasında, jel

ağının çatlaması, sıvı-buhar arayüzleri tarafından ince gözeneklerde kurulan kılcal kuvvetler nedeniyle meydana gelmektedir (Dervin ve Pillai, 2017).

Aerojel, yüksek özgül yüzey alanı, yüksek gözeneklilik, düşük yoğunluk, düşük dielektrik sabiti ve mükemmel termal yalıtım özelliklerine sahip nano gözenekli bir malzemedir. Son derece yüksek gözeneklilikleri nedeniyle düşük termal iletkenlikle çok iyi termal yalıtım göstermektedir (Alan, 2022). Tablo 1.4’de aerojelin teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. 4. Silika aerojelinin özellikleri (Oral, 2021; Çelik, 2020)

Özellik	Değer	Yorum
Görünür Yoğunluk	0.003–0.35 g/cm ³	En yaygın yoğunluk ~0,1 g/cm ³ tür
İç Yüzey Alanı	600–1000 m ² /g	
% Katılar	%0.13–15	Genellikle %5 (95% boş alan)
Ortalama gözenek çapı	~20 nm	BET yöntemi ile belirlendiği üzere
Birincil parçacık çapı	2–5 nm	Elektron mikroskobu ile belirlendi
Kırılma indeksi	1.0–1.08	
Isıl genleşme katsayısı	2.0–4.0 x 10 ⁻⁶	
Dielektrik sabiti	~1.1	0,1 g/cm ³ yoğunluk için
Ses hızı	100 m/s	0,07 g/cm ³ yoğunluk için
Porozite	%80-99.8	
Isı iletkenliği	0.017 – 0.021 W/m.K	
Isıl direnç	500 °C	
Young Modülü	0.002 – 100 MPa	
Poisson oranı	0.2	
Optik özellik	>90%	

1.3.2. Aerojel çeşitleri

Aerojeller doğal ya da yapay hammaddelerden sentezlenebilmektedir. İlk üretilen aerojel silika esaslı olsa da, günümüzde aerojel üretiminde kullanılmakta olan başlangıç malzemeleri oldukça çeşitlenmiştir. Aerojeller, içerdikleri kimyasal bileşime göre çeşitlere ayrılmaktadır. Bunlar;

- Silika aerojel,
- Alümina aerojel,
- Karbon aerojel
- Diğer aerojellerdir (nanotüp, yarı iletken metal ve polimer aerojeller gibi).

1.3.2.1.Silika Aerojeller

Silika arojeller, silika esaslı hammadde öncülleri kullanılarak üretilen, yalıtım kabiliyeti yüksek, düşük kırılma indisine, gözenekli yapı ve düşük yoğunluğa ($0,03-0,35 \text{ g/cm}^3$) sahip nano yapılı malzemelerdir. Gözenekli yapıya sahip olmaları yaklaşık $500-1500 \text{ m}^2/\text{g}$ aralığında geniş bir yüzey alanına sahip olmalarını da sağlamaktadır. Ortalama gözenek çaplarının 20 nm , partikül boyutunun ise $2-10 \text{ nm}$ aralığında olduğu söylenebilmektedir (He ve ark., 2015). Çoğunlukla silikon, silika veya silikat formunda bulunabilmektedir. Silika arojel, kimyasal olarak sodyum silikat (su camı) ile aynıdır (Prevolnik ve ark., 2014). Şekil 1.15’de örnek bir silika arojel görüntüsü verilmiştir.



Şekil 1.15. Silika arojel (Kılınç,2024)

1.3.2.2. Alümina Aerojeller

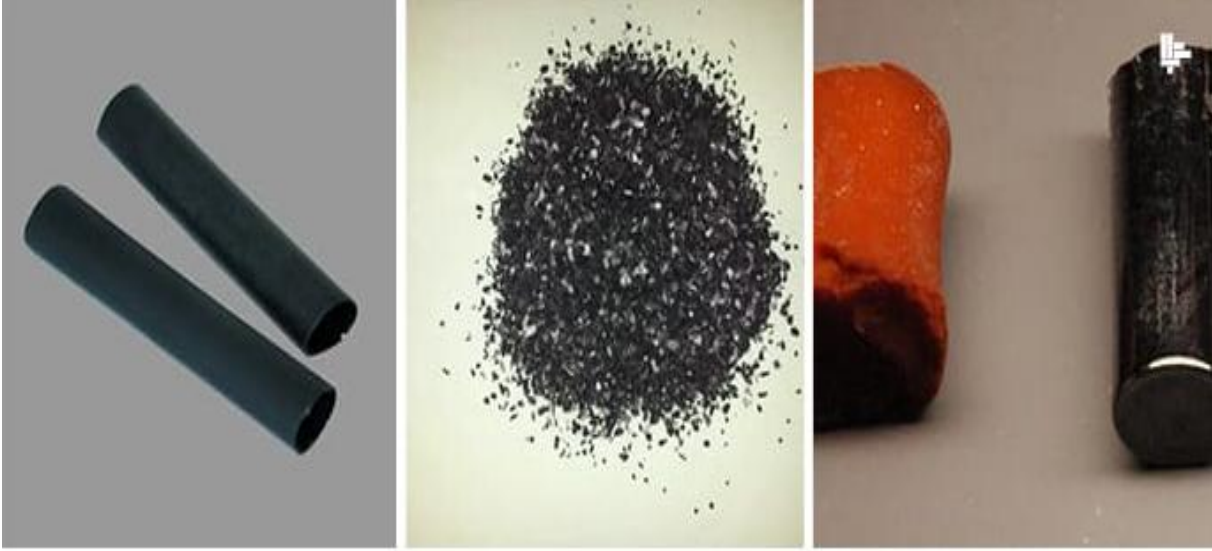
Alümina arojeller yüksek yüzey alanına sahip olup; çoğunlukla Bayer prosesi ile üretilen alüminadan üretilebilmektedir. Üretim esnasında yapıda kalan kalıntılar (safsızlık), alüminanın çeşitli uygulamalardaki kullanımını negatif olarak etkileyebilmektedir. Şekil 1.16’da verilen alümina esaslı arojeller yüksek yüzey alanı haricinde, yüksek mukavemete ve gelişmiş termal kararlılığa da sahiptirler. Alüminanın bu özelliklerinden sebep düşük yoğunlukta alümina arojeller üretilebilmektedir (Poco ve ark., 2001; Kılınç, 2024)



Şekil 1.16. Alümina aerojeller (Öz ve ark., 2018)

1.3.2.3. Karbon Aerojeller

Şekil 1.17’de verilen karbon aerojeller, düşük yoğunluklu ($0,1 \text{ g/cm}^3$ civarında), yüksek yüzey alanı ($\sim 300\text{-}3000 \text{ m}^2/\text{g}$) ve kontrol edilebilir bir gözenek yapısına sahip olup; katı hal, yaprak veya toz formlarında üretilebilmektedirler. Organik aerojellerin pirolizi yöntemi ile elde edilirler. Resorsinol formaldehit (RF) aerojeller genellikle karbon aerojel üretiminde başlangıç maddesi olarak tercih edilirler. Üretim koşullarına göre fiziksel özellikleri değişebilen karbon aerojeller, yüksek elektrik iletkenliği de gösterebilmektedirler. Karbon aerojeller farklı fiziksel özelliklerde ve fiziksel formlarda (karbon kağıtların karbon aerojellere emdirilmesiyle oluşan karbon aerojel kompozit kağıtları gibi) üretilebilmektedirler. Oldukça mukavemetli bir yapıya sahip olan karbon aerojeller kızılötesi spektrumunda siyah olmaları sebebiyle solar enerji depolayıcı olarak kullanılabilirler. Enerjiyi absorbe edebilme yetenekleri sayesinde güvenlik alanında da önemli bir yere sahiptirler. Ses yalıtımında ve cam malzemelerle birlikte kullanımları da mümkündür. Karbon aerojellerin çevre dostu oluşu, tercih edilmelerinde önemli bir etken olup; atık su arıtımında, bazı organik kirleticilerin uzaklaştırılmasında ve iyon giderme teknolojisinde de oldukça verimlidirler (Kılınç, 2024).



Şekil 1.17. Karbon aerjel (Çalapkulu, 2024)

1.3.2.4. Diğer Aerojeller

Karbon, silika ve alümina aerjeller haricinde nanotüp, yarı iletken metal ve polimer aerjeller diğer aerjel çeşitlerinden sayılmaktadır (Aegerter ve ark., 2011). Bunların yanı sıra yarı iletken bakır içerikli metal aerjeller ve nanotüp aerjeller verilebilmektedir. İlk olarak 2002 yılında üretilen bakır içerikli metal aerjeller geçirgenlik, optik saydamlık ve fotoluminesans özellikleri açısından benzersiz bir yapıya sahiptir. Farklı metodlarla nanotüp ve aerjelin bir araya gelmesi sağlanmıştır. Bu malzeme mezo gözeneğe sahip olmamasından ve tek parça olamamasından dolayı bilinen aerjel tanımına uymamış donmuş duman tanımı yerine elastik duman olarak adlandırılmıştır.

1.3.3. Aerojelin kullanım alanları

Aerjeller son ürün olarak toz aerjeller, granül aerjeller, battaniye formu, panel formu ve bloklar (monolitler) formunda bulunabilmektedir (Alan, 2022). Aerojellerin farklı formları Şekil 1.18'de gösterilmiştir.



Şekil 1.18. Bazı aerojel formları

Aerojeller yüksek gözenekliliğe, düşük yoğunluğa, dolayısıyla düşük ısı iletkenliğe sahiptirler (Riffat ve Qiu, 2013; Mercan, 2021). Bu mükemmel özellikler yalıtım, havacılık ve uzay uygulamalarında, elektronik, kimyasal, biyomedikal uygulamalar, gıda ile ilgili teknolojiler, dış giyim ve monolit, toz veya film uygulama formlarında inşaatta dikkat çekmektedir (Stergar ve Maver, 2016).

Aerojeller, üstün yalıtım yeteneklerine bağlı olarak yapı sektöründe giderek artan bir pazara sahiptirler. Örneğin, 20 mm kalınlığında aerojel içeren bir termal yalıtım malzemesi %90 ısı tüketimi azalmasına yol açmaktadır (Cuce ve ark., 2014). Alan tasarrufunun gerekli olduğu hem dış hem de içyapı parçalarına monte edilmektedir. Bu nedenle, aerojel, binalardaki cephelerde, çatılarda ve pencerelerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Mercan, 2021).

Aerogeller gözenekli yapıları nedeniyle katalizörler, adsorbanlar, sensörler, yakıt depolama uygulamaları ve iyon değişimi uygulamaları için kullanılmaktadır. Şeffaf olmaları aerogelin avantajlarından biridir. Bu özellik aerogellerin optik uygulamalarda ve dedektörlerde kullanılmasına olanak tanımaktadır (Alan, 2022). Aşağıda aerogel kullanım alanları sıralanmıştır;

- Yalıtım
- Termal yalıtım malzemesi
- Süper yalıtım malzemesi
- Akustik yalıtım malzemesi
- Optik uygulamalar
- Biyomedikal uygulamalar
- Petrokimya tesisleri
- İlaç uygulamaları
- Uzay uygulamaları
- Hoparlörler
- Sanat
- Kimyasal sensörler
- Elektrik uygulamaları

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Tez çalışması ile ilgili geçmişten günümüze kadar yapılmış olan ulusal ve uluslararası akademik çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiş, elde edilen sonuçlar özet formuna getirilerek başlıklar halinde sunulmuştur.

2.1. Hafif Beton Üretiminde Perlit Kullanımı ile İlgili Çalışmalar

Şengül ve ark., (2011) yılında yapmış olduğu çalışmada, geliştirilmiş perlitin hafif betonun mekanik özellikleri ve ısı iletkenliği üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmada, doğal agrega yerine kısmen geliştirilmiş perlit kullanmışlardır. Karışımların basınç dayanımı, elastisite modülü, su emme, ısı iletkenlik ve kılcallık katsayısını belirlemişlerdir. Deneyle sonuçunda, basınç dayanımı ve elastisite modülünün perlit içeriğinin artmasıyla azaldığını tespit etmişlerdir. Perlit içeriğinin artmasıyla, Su emme ve sorptivite katsayısının arttığını bildirmişlerdir. Ayrıca, perlit kullanımıyla ısı iletkenliğin önemli ölçüde iyileştiğini ve ısı iletkenlik ile birim ağırlık arasında güçlü bir ilişki olduğunu ifade etmişlerdir.

Topçu ve Işıkdag (2011), yapmış oldukları çalışmada, çimento tipleri (CEM II 32.5R ve CEM I 42.5R), dozajlar (300, 350 ve 400) ve ikame oranları (0, 15, 30, 45 ve 60) dikkate alınarak geliştirilmiş perlit agregası (EPA) içeren betonun özelliklerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, geliştirilmiş perlit agregalı betonun mekanik özelliklerde bazı kayıplarına rağmen yeterli ikame oranlarında hafif beton olarak kullanılabilirliğini bildirmişlerdir.

İbrahim ve ark., (2020) yapmış oldukları çalışmada, ağırlıkça %0 ila %20 aralığında genişletilmiş perlit agregası (EPA) ekleyerek dayanıklı yapısal hafif beton (LWC) üretmişlerdir. Klorür ortamına maruz kaldığında dayanıklılığını sağlamak için beton düşük su-çimento oranıyla üretilmiş ve sıradan Portland çimentosu (OPC) sırasıyla %50 ve %7 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBFS) ve silika dumanı (SF) ile değiştirmişlerdir. Betonun mekanik özellikleri ve dayanıklılığı, birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, kuruma büzülmesi, klorür geçirgenliğini değerlendirmişlerdir. Çalışma sonuçları;

- Betonun birim ağırlığının normal ağırlıklı betona (NWC) kıyasla %20 ila %30 oranında azaldığını,
- Geliştirilen LWC'nin basınç dayanımı, özellikle %10 ve %15 perlit agregası içeren karışımlar olmak üzere yapısal beton olarak kullanılmaya yeterli olduğunu,
- LWC'nin NWC'ye kıyasla üstün termal yalıtım özellikleri olduğunu,

- Betona EPA'nın daha fazla dahil edilmesi, sismik yükleme altında daha iyi davranışlar sergilediğini göstermiştir.

Jedidi ve ark., (2025), yapmış oldukları çalışmada, genişletilmiş perlit agregası (EPA) dozajının farklı yaşlarda hafif betonun basınç dayanımı ve termofiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. İlk olarak, genişletilmiş perlit beton (EPC) için uygun karıştırma prosedürünün seçimini yapmışlardır. Daha sonra, 0,70 su-çimento oranında altı set kübik numune ve altı set paralel yüzölçümlü numune hazırlanmıştır. Ardından kumun hacimce %0 ile %80 arasında değişen EPA ile kum değiştirme yüzdelerini kullanmışlardır. Basınç dayanımı, ısı iletkenlik ve ısı difüzyon katsayısını belirlemişlerdir. Hazırladıkları karışımların birim ağırlıkları 560 ile 1510 kg/m³ arasında değişmiştir. Çalışma sonucunda, Perlit içeriğinin artmasıyla basınç dayanımının azaldığını bildirmişlerdir. Ayrıca doğal agreganın EPA ile değiştirilmesinin hafif betonun ısı direncini artırdığını ve sonuç olarak ısı yalıtımını iyileştirdiğini bildirmişlerdir.

Sriwattanapong ve ark., (2013), yapmış oldukları çalışmada, perlit katkılı hafif beton üretmişlerdir. Ürettikleri betonun 2000 kg/m³'ten daha az yoğunluğa ve en az 30 MPa'lık 28 günlük basınç dayanımına sahip olmasını hedeflemişlerdir. Referans betonunu 44 MPa'da basınç dayanımına sahip olacak şekilde tasarlamışlardır. Beton içerisine kum yerine kütlece %30, %40 ve %50 oranında perlit ikame etmişlerdir. Çalışma sonucunda; kumun %30 ila %50'sinin perlit ile değiştirilmesiyle basınç dayanımının %125 oranında yoğunluğun ise 2086-1917 kg/m³'e düştüğünü bildirmişlerdir. Basınç dayanımını 84,1 MPa'dan 53,9-40,3 MPa'ya düşürdüğünü tespit etmişlerdir.

Demirboğa ve Gül (2003), çalışmalarında, genişletilmiş perlit ve pomza agregası (PA) karışımlarından hafif beton üretmiş, ürettikleri betonların ısı iletkenlik katsayılarını ölçmüşlerdir. Silika dumanı (SF) ve C sınıfı uçucu külün (FA) hafif agregası betonunun (LWAC) ısı iletkenliği üzerindeki etkisini belirlemek için, çimento yerine %10, %20 ve %30 oranında SF ve FA eklemişlerdir. Çalışmada sonuç olarak;

- En yüksek ısı iletkenlik 0,3178 W/mK olarak sadece PA ve düz çimento içeren numunelerde gözlemlendiğini
- Çimento yerine SF ve FA'nın artmasıyla azaldı.
- En düşük ısı iletkenlik değeri (0,1472 W/mK), PA yerine genişletilmiş perlit agregası (EPA) ve çimento yerine %70 çimento + %30 FA ile hazırlanan numunelerde elde edildiğini
- Hem SF hem de FA'nın ısı iletkenlik üzerinde azaltıcı etkisi olduğunu,

- EPA (PA yerine kullanılan) betonun ısı iletkenliğinin %43,5 oranında azalttığını bildirmiştir.

Khonsari ve ark. (2010), yapmış oldukları makalede, hafif betonda (LWC) agrega olarak Genişletilmiş Perlit (EP) kullanımının etkilerine araştırmışlardır. Ürettikleri karışımların, 2 farklı kütleme koşulunda 7 ve 28 gün sonra basınç dayanımı, 7 ve 28 gün sonra ayrılma çekme dayanımı, su emiciliği (normal ve çatlak) ve sülfat saldırısı değerlerini belirlemiştir. Çimentolu malzeme içeriğini 390 kg/m³'te sabit tutmuş, Portland çimentosunun ağırlıkça %2,5'u oranında süperplastikleştiricisi kullanmışlardır. En iyi karıştırma yaklaşımını bulmak için beş farklı çok aşamalı karıştırma yaklaşımı uygulamışlardır. Genişletilmiş Perlit Agregası (EPA), iri agregaların yerine ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %30 ve %40 oranında kullanmışlardır. Ayrıca, %10 perlit içeren numuneler için, 'kancalı çelik', 'dalgalı çelik' ve 'Polipropilen lifler' eklemenin etkileri araştırmışlardır.

Barnat-Hunek ve ark. (2018), çalışmalarında hafif gözenekli perlit agregasının ve yaygın olarak kullanılan iki tip lifin, kendiliğinden yerleşen hafif betonun (SCLC) fiziksel ve mekanik özellikleri, don dayanıklılığı ve mikro yapısı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneysel araştırmayı, %0,5 ila %1 bazalt lif (BF) ve/veya %0,5 çelik lif (SF) içeriğine sahip SCLC ve lif takviyeli SCLC'den yapılmış küpler ve prizmatik numuneler üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada %5 ve %15 olmak üzere iki değişken içerikli ince perlit agregası kullanmışlardır. Taze haldeki SCLC'lerde işlenebilirlik (çökme-akış ve t500 değerleri) deneyleri yapmışlardır. Sonuç olarak; Perlit agregalı hibrit lif takviyeli SCLC, lifsiz SCLC'ye kıyasla daha sünek bir davranış gösterdiğini ve liflerin, eğilme çekme dayanımı testi sırasında çatlakları köprülediğini tespit etmişlerdir. BF, gözenekli SCLC'yi don saldırısına karşı başarıyla korurken, SF hasara yenik düştüğünü ifade etmişlerdir.

Okuyucu ve ark., (2011), çalışmalarında, betonarme çerçeveli yapıların sismik güçlendirme amaçları için lif takviyeli yarı hafif betonun bazı özelliklerini araştırmışlardır. Hem hafif agrega hem de tamamlayıcı çimentolama malzemesi olarak geliştirilmemiş perlit içeren yarı hafif betonu, polipropilen ve çelik liflerle ayrı ayrı güçlendirmişlerdir. Silindir numuneler üzerinde basınç dayanımı, yarıma çekme dayanımı ve elastisite modülü ölçümleri yapmışlardır. Çalışma sonunda silindir test sonuçlarının, geliştirilmemiş perlit tozu ikamesi durumunda 28 günlük basınç dayanımında önemli bir artış sağladığını, buna paralel olarak daha düşük çekme dayanımı ve elastiklik modülü elde edildiğini ifade etmişlerdir. Tokluk test sonuçlarından, elyaf

kullanımı durumunda sismik güçlendirme amaçları için polipropilen elyaf takviyeli yarı hafif betonun üstün olduğunu anlamışlardır.

Benjeddou ve ark., (2023), çalışmalarında mermer atıklarının (MWS) ezilmesiyle elde edilen kum ve genişletilmiş perlit agregası (EPA) kullanarak hafif beton üretmişlerdir. İlk olarak, mermer atık kumunun ve genişletilmiş perlit agregasının mekanik, kimyasal ve fiziksel özelliklerini belirlemişlerdir. Ardından en iyi hidrolik özellikleri elde etmeye odaklanarak optimum karışımı bulmak için EPA yüzdesini (%0, 20, 40, 60, 80 ve 100) değiştirilerek farklı beton karışımları hazırlamışlardır. Bunun yanı sıra çalışmada, test edilen beton numunelerinin termal ve akustik özelliklerini (farklı frekanslarda termal iletkenlik, termal difüzyivite, özgül ısı kapasitesi ve ses azaltma indeksi) araştırmışlardır. Çalışma sonunda;

- Mermer atıklarının ezilmesiyle elde edilen kumun kullanılması durumunda, termal ve akustik izolasyonlu hafif beton elde edilebileceği,
- Betona %20'den fazla EPA agregası eklenmesiyle, ısıyı depolama kapasitesine sahip ve daha iyi termal performans üreten termal izolasyonlu hafif betonun geliştirilebileceği,
- %20'den fazla EPA agregası içeren beton karışımının, akustik izolasyonlu hafif beton sınıfına girebileceği,
- MW ve EPA bazlı çimentonun, ekonomik ve çevresel açıdan faydalı olan daha iyi işlenebilirlik ve enerji tasarrufu nitelikleri sağladığı
- İnşaat bütçesinin azalmasına ve uzun vadeli hammadde sürdürülebilirliğinin iyileştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

Qasim, (2018), makalelerinde, hafif beton üretiminde kullanılan kaba agreganın %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranında perlit ile değiştirilmesinin hafif betonun basınç dayanımı ve yoğunluğu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Perlit tozunun etkisinin yanı sıra, %0, %1.0 ve %2.0 oranında çelik lif etkisini de araştırmışlardır. Çalışmada, genişletilmiş perlit tozu içeren ve artan çelik lif içeriğinin basınç dayanımını arttırdığı ve hafif betonların iyi performans gösterdiği sonucuna varmışlardır.

Uluslu ve ark., (2018), çalışmalarında, yüksek dayanımlı hafif betonda su/çimento oranına göre radyasyon etkilerini araştırmışlardır. Ayrıca, perlit agrega ile üretilen yüksek dayanımlı hafif beton numunelerinin kütle zayıflama katsayıları belirlemişlerdir. Yüksek saflıkta bir germanyum dedektörü kullanarak yaptıkları çalışmada on farklı gama ışını enerjisi kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, beton numunelerinin kütle zayıflama

katsayılarının artan foton enerjileriyle azaldığını tespit etmişlerdir. Perlit agrega ile elde edilen betonun radyasyondan korunmak için kullanılabileceğini bildirmişlerdir.

Tapan ve Engin (2019), çalışmalarında, farklı boyutlardaki genişleştirilmiş perlit agregaları ve çeşitli katkı maddeleri kullanılarak ısı yalıtım özelliklerine sahip ultra hafif beton (ULWC) üretmişlerdir. Numunelere basınç dayanımı, 4 nokta eğilme dayanımı, donma ve çözülme dayanımı, su emme özelliği, kuru birim ağırlığı, ultra ses hızları ve ısı iletkenliği deneyleri uygulamışlardır. Çalışma sonucunda;

- Genleştirilmiş perlit agrega çapı arttıkça boşluk hacmi düzgünlüğü, su emme yüzdesi ve donma-çözülme direncinin arttığı,
- ULWC numunelerinin birim hacim ağırlığı, ultrason hız hızları, ısı iletkenlik ve basınç dayanımının azaldığı,
- 15 donma ve çözülme çevrimi sonrasında basınç dayanımı kaybının % 5 ile % 47 arasında, ağırlık kaybının ise % 1 ile % 3,5 arasında olduğu,
- Bir metreküp beton karışımına 4,5 kg hava sürükleyici malzeme kullanımının en ideal oran olduğu,
- hacimce % 0,01'den fazla polipropilen lif kullanımının taze beton karışımlarında çökmelere neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Alyousef ve ark. (2019), çalışmalarında, atık mermer kırma işleminden (SWM) elde edilen kum, doğal kum ve genişleştirilmiş perlit agregası (EPA)'nı karıştırarak hafif betondan (LC) yeni bir yalıtım blok zemin üretmişlerdir. İlk olarak, belirli bir yalıtım LC için doğal kum, SWM ve EPA'nın optimum karışım oranını belirlemişlerdir. SWM'nin doğal kuma hacim oranı %0, 20, 40, 60, 80 ve 100 oranlarında değiştirerek plaka ve kübik numuneler hazırlamışlardır. Basınç dayanımı, ısı iletkenlik, ısı yayılma, özgül ısı kapasitesi ve farklı frekanslardaki ses azaltma indeksi gibi mekanik ve fiziksel deneyler uygulamışlardır. Çalışma sonucunda, SWM'nin dahil edilmesinin LC'nin mekanik özelliklerini ve ısı yalıtımını doğal kuma kıyasla önemli ölçüde iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, mevcut yalıtım blok döşemelerinin kompozit döşemelerde kullanılmasının mümkün olduğunu bildirmişlerdir.

Othman ve ark., (2020), çalışmalarında, yapısal kullanım için hafif beton üretmek amacıyla LECA ve EPA kullanmışlardır. Ürettikleri betonların yoğunluğunu, beton kalitesini ve dayanımını, küp basınç testi ve UPV testi gerçekleştirerek gözlemlemişlerdir. Çalışmada iki aşamalı deneyler yürütmüşlerdir. İlk aşamada, normal iri agrega yerine LECA, ikinci aşamada, kum yerine EPA kullanılmıştır. Çalışma sonucunda; optimum hafif beton karışımının %60 LECA ve %50 EPA olduğu tespit

edilmiştir. Kısacası, hafif beton karışımına LECA ve EPA'nın eklenmesi küpün basınç dayanımını azaltmış, yoğunluğunu düşürmüş, çökme değerini ve ultrasonik darbenin seyahat süresini artırmıştır.

Pramusanto ve ark., (2020), çalışmalarında, geliştirilmiş perlit belirli oranlarda doğal kum ile değiştirerek hafif beton üretmişlerdir. Ürettikleri hafif betonların yoğunluk, mekanik ve emilim özelliklerini belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda; geliştirilmiş perlitin beton yoğunluğunu düşürdüğünü, genişmiş perlit agregası arttıkça mukavemetin azaldığını bildirmişlerdir.

Top ve ark., (2020), yapmış oldukları çalışmada, uçucu kül atıklarını hafif agregalarla (geliştirilmiş perlit (EP) ve asidik pomza (AP)) birlikte kullanarak hafif jeopolimer beton üretimi yapmışlardır. Ürettikleri hafif jeopolimer betonu, kütleme sıcaklığına, katı/sıvı oranına ve alkali aktivatör konsantrasyonuna bağlı olarak incelemişlerdir. Üretilen her jeopolimer betonun mikro yapısal özelliklerini SEM, EDS ve lazer parçacık boyutu analizleri kullanılarak karakterize etmişlerdir. Betonun özelliklerini, tek eksenli basınç dayanımı (UCS), nokta yük dayanımı (PLS), ses hızı (SS), Mohs sertliği (MH) ve su emme (WAR) oranı sonuçlarına göre değerlendirmişlerdir. Ayrıca hidrofilik yapıda olan EP agregalarının ön ıslatılmasının etkileri de incelemişlerdir. Ön ıslatma sonucunda, kimyasal kullanımının %32,5 oranında azaldığını bildirmişlerdir. Hafif jeopolimer betonların UCS'lerinin 10-50 MPa aralığında olduğunu, birim ağırlıklarının 1250 ile 1700 kg/m³ arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. AP agregaları yerine EP agregaları ilavesiyle daha hafif betonlar elde edildiğini ifade etmişlerdir.

Alsarayreh ve ark., (2020), yapmış oldukları makalede, Palmiye Yağı Klinkeri (POC) ve Genleştirilmiş Perlit Agregasını (EPA), yapısal hafif beton üretiminde ince ve iri agrega olarak kullanmışlardır. Çalışmalarında POC iri agregayı kısmen Normal Kaba Agregası (NCA) ile değiştirerek hafif betonun mukavemetini arttırmayı amaçlamışlardır. Yoğunluğu azaltmak için (EPA) kısmen (POC) ince agrega ile değiştirmişlerdir. Çalışmalarında üç fazlı karışımlar hazırlamışlardır. İlk fazda, normal ağırlıktaki beton karışımı ve %100 ince ve kaba (POC) agrega içeren (POC) hafif beton karışımı üretmişlerdir. İkinci fazda, (POC) kaba agreganın farklı yüzdelere (NCA) ile kısmen değiştirmişlerdir. Üçüncü fazda, ikinci fazdaki optimum karışımda (POC) ince agreganın (EPA) ile değiştirmişlerdir. 7 ve 28 günlük hafif betonların yoğunluk, mukavemet ve kalitesini test etmişlerdir. Çalışma sonucunda, POC kaba agreganın %10'unun (NCA) ile değiştirilmesiyle, mukavemette 27,7 MPa'dan 35,49 MPa'ya önemli bir artış sağladığını

bildirmişlerdir. Ayrıca, POC ince agreganın EPA ile değiştirilmesiyle, yoğunlukta 1900 kg/m³'ten 1847 kg/m³'e bir azalma sağladığını tespit etmişlerdir.

Yan ve ark., (2022), yapmış oldukları çalışmada, EPA içeren hafif betonu, çimento tipleri (CEM II 32.5R ve CEM I 42.5R), dozlar (%0, 2, %4 ve %6) ve ikame oranları açısından incelemiştir. 28 günlük sürenin sonunda, 150 mm 150 mm 150 mm'lik küp numunelere yıkıcı ve tahribatsız testler uygulamışlardır. Çalışma sonucunda, perlit miktarının artmasıyla (yüzde 45'ten yüzde 60'a) beton yoğunluğunun azaldığını tespit etmişlerdir. Perlitin eklenmesi agrega-matris temasını güçlendirdiğini, ancak belirgin bir ITZ olmadığını tespit etmişlerdir. İyi performans gösteren genişletilmiş perlit tozu ve çelik lifler içeren betonlarda artan bir basınç dayanımı olduğunu bildirmişlerdir.

Sharma ve ark., (2022), makalelerinde, ince agregaları genişmiş perlit ve pomza ile değiştirerek hafif beton (LWC) üretmişlerdir. Çalışmada iki farklı hafif beton üretimi yapmışlardır. İlk olarak, ince agrega yerine %0, %25, %50 ve %100 oranlarında genişmiş perlit kullanmışlardır. İkinci olarak, doğal kum genişmiş perlit ve pomza ile eşit oranlarda değiştirilerek hafif beton üretilmiştir. Çalışma sonucunda;

- Genleşmiş perlitin dahil edilmesiyle, gelişmiş LWC'nin yoğunluğunun 2200 kg/m³'ün altına etkili bir şekilde düştüğünü,
- Genleşmiş perlit ve pomza kullanılarak hazırlanan karışımın yoğunluğunun, yalnızca LWC içeren genişmiş perlitin yoğunluğundan biraz daha fazla olduğunu,
- LWC'ye pomzanın dahil edilmesiyle puzolanik reaktiviteyi sağladığı ve yalnızca genişletilmiş perlit içeren LWC'den daha iyi mukavemet ve dayanıklılık özellikleri gösterdiğini,
- Mikro yapı özellikleri, gözenekli hafif malzemenin varlığının geleneksel betona kıyasla arayüz geçiş bölgesini (ITZ) iyileştiremediğini ortaya koymuşlardır.

Bakhshi ve ark., (2023), yapmış oldukları çalışmada, Perlit Hafif Beton (PLWC) karışımının farklı bileşenlerinin yoğunluk, basınç dayanımı, enerji dağılım kapasitesi ve enerji dağılım oranı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. PLWC'nin basınç dayanımı ve enerji dağılım kapasitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda;

- Genleşmiş Perlitin varlığının basınç dayanımı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmasına rağmen, betonun enerji dağıtma potansiyelini iyileştirdiği,
- Genleştirilmiş Perlit betonun enerji dağılım oranını artırdığını ve çatlak yayılmasını kontrol ettiğini,

- Sırasıyla 1761 kg/m³ ve 21,3 MPa hacim yoğunluğu ve basınç dayanımı değerlerine sahip optimize edilmiş karışımın, 0,1118 J'lik daha yüksek enerji dağılım kapasitesini gösterdiğini bildirmişlerdir.

Kadela ve ark., (2023), çalışmalarında, Portland çimentosu, musluk suyu, hafif perlit agregaları ve çelik kord lifler kullanarak hafif beton üretmişlerdir. İki farklı çelik kord lif ilavesi (%1,3 ve %2,6 beton ağırlığı) kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, çelik kord lif ilaveli perlit agrega bazlı hafif beton numuneleri basınç (18-48%), çekme (25-52%) ve eğilme dayanımında (%26-41) önemli bir artış olduğunu ifade etmişlerdir. Çelik kord lifleri beton matrisine eklendikten sonra daha yüksek ısı iletkenliği ve ısı yayılımı olduğunu bildirmişlerdir. Bu değişikliklerden sonra özgül ısı değerlerinin düştüğünü tesbit etmişlerdir. En yüksek ısı iletkenlik ve ısı yayılma değerleri, %2,6 oranında çelik kord lifleri eklenerek modifiye edilen numunelerde elde edildiğini, değerlerinin sırasıyla $0,912 \pm 0,002$ W/mK ve $0,562 \pm 0,002$ $\mu\text{m}^2/\text{s}$ olduğunu tespit etmişlerdir.

Saikiran ve Rajeshwari (2023), çalışmalarında doğal perlit agregası kullanarak yapısal hafif beton üretimi yapmışlardır. Doğal perlit agregasını toz haline getirerek çimento yerine kullanmışlardır. Deneyler sonucunda, doğal perlit agregasının içerdiği nitelikler nedeniyle yapısal hafif beton üretmek için kullanılabilirliğini ifade etmişlerdir. Çalışma sonucunda, doğal perlit agregasının, 20 MPa ile 40 MPa arasında değişen silindirik basınç dayanımına sahip hafif beton üretmek için kullanılabilirliğini bildirmişlerdir.

Bulut, (2024), çalışmalarında, tamamen doğal perlit kullanarak hafif agrega beton kompozitleri üretmişlerdir. Ürettikleri numunelerin mekanik, geçirgenlik ve dayanıklılık özelliklerini araştırmışlardır. Beton üretiminde %10, %20, %30, %40, %50, %75 ve %100 oranlarında doğal perlit agregası kullanmışlardır. 28-56-90 günlük betonlar üzerinde basınç dayanımı, ultrasonik darbe hızı (UPV), dinamik elastisite modülü, kılcal emilim, elektriksel özdirenç, asit ve sülfat saldırı testleri yapmışlardır. Çalışma sonucunda,

- ✓ En yüksek basınç dayanımı değerinin %10 doğal perlit kullanılarak 90 gün sonra elde edildiğini (NP10/90 için 62,42 MPa),
- ✓ 90 gün (NP100/90 için 35 GPa) kürlenmiş betonların dinamik elastisite modülündeki artışın, 28 gün (NP100/28 için 30,7 GPa) kürlenmiş betonlara kıyasla %14'e kadar çıkabildiğini,
- ✓ Kılcal emilim katsayılarının tüm betonlarda ileri yaşlarda azaldığını,

- ✓ %100 doğal perlit içeren betonun elektriksel özdirenç değeri (NP100/90 için 139,75 k Ω -m), kontrol betonundan (C/90 için 58,14 k Ω -m) %140 daha yüksek olduğunu,
- ✓ İleri yaşlarda doğal perlit kullanımının artırılmasıyla yalıtım amaçlı beton üretilbileceğini,
- ✓ %75 ve %100 doğal perlit içeren betonların asit ve sülfat ataklarına karşı yüksek direnç gösterdiğini bildirmişlerdir.

Al-Daraji ve Aljalawi (2024), çalışmalarında, çimento ağırlığının üç yüzdesi (% 0,5, % 1 ve % 1,5) ile Kevlar 49 liflerinin eklenmesinin hafif agregalı betonun (HAB) işlenebilirliği, kuru yoğunluğu, çekme ve basınç dayanımı üzerindeki etkisi araştırmışlardır. Çalışma sonucunda; Farklı oranlarda Kevlar liflerinin kullanımının mekanik özellikleri iyileştirdiğini, dayanıklılığı önemli ölçüde artırdığını ve HAB'nin işlenebilirliğini azalttığını bildirmiştir. 7 ve 28 gün sonra, % 0,5 lif eklenen numunelerin basınç dayanımındaki artışın sırasıyla % 19 ve % 15 olduğu, % 1 eklendiğinde ise % 10 ve % 6 olduğunu tespit etmişlerdir. 7 ve 28 gün sonra, %1,5'te, elyaf aglomerasyonu nedeniyle basınç dayanımında bir azalma olduğunu ifade etmişlerdir.

Qasim ve Fawzi (2024), çalışmalarında, sürdürülebilir malzemeler ve alkali dirençli cam elyaflarının perlit katkılı hafif betona eklenmesinin etkisi incelenmişlerdir. Perlit katkılı hafif beton, Portland çimentosu, metakaolin (puzolanik malzemeler olarak çimento ağırlığının %15'ini değiştirmiştir), iri ve ince perlit agregası, süperplastikleştirici ve yerel kül (dolgu maddesi olarak kullanılmış ve %10 oranında çimento ağırlığı ile değiştirilmiştir) kombinasyonu kullanılarak üretilmiştir. Ürettikleri numunelere çökme, yoğunluk, eğilme dayanımı, yarıma çekme dayanımı, basınç dayanımı ve ısı iletkenlik deneyleri uygulamışlardır. Çimento/perlit oranını (hacimsel oran) 1:2 olarak belirlemişlerdir. Betonu, hacim olarak %1 alkali dirençli cam elyafı ile güçlendirilmişlerdir. Çalışma sonucunda;

- Betona sürdürülebilir malzemelerin eklenmesinin silindir basınç dayanımını 7, 28 ve 60 gün için sırasıyla (%57,75, %41,76 ve %44,82) oranında artırdığını,
- Hem çekme hem de eğilme dayanımının sırasıyla (7, 28 ve 60 gün) (%37,28, %30,33 ve %34,5), (%36,05, %68,22 ve %56,52) oranında arttığını,
- Alkali dirençli cam elyafların eklenmesi ise basınç, çekme ve eğilme dayanımını (7, 28 ve 60 gün) sırasıyla (%61,5, %43,58, %47,45), (%61,54, %44,08 ve %52,71) ve (%113,95, %124,3 ve %97,85) oranında arttırdığını,

- Yoğunluğun sürdürülebilir malzemeler ve lifler eklenerek artırıldığını ancak yapısal hafif betonun (ASTM C330) sınırları içinde kaldığını,
- Isıl iletkenlik de sürdürülebilir malzemeler ve cam lifleri eklendikten sonra referans karışımla karşılaştırıldığında arttığını ancak yalıtım betonunun sınırları içinde kaldığını bildirmişlerdir.

Sai ve ark., (2025), çalışmalarında, hem doğal perlit agregasının hem de perlit tozunun hafif betonun işlenebilirliği, basınç dayanımı, yoğunluğu, ısı iletkenliği ve dayanıklılığı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Perlit agregasının ve perlit tozunun betona farklı kütleme dönemlerinde çökme, yoğunluk ve basınç dayanımı testleri uygulamışlardır. Çalışma sonucunda, doğal perlit agregası ve perlit tozunun beton yoğunluğunu %25-50 oranında azalttığını bildirmişlerdir. İşlenebilirlik (çökme) özelliğinin %30 perlit ikamesi için %33,3 oranında arttığını ifade etmişlerdir. 100 donma-çözülme döngüsünden sonra kütle kaybının %40 perlit ikamesinden sonra %11'e yükseldiğini, perlit içeriğinin arttıkça su emiliminin de önemli ölçüde arttığını ve perlit su emiliminin %40'ında %10,5'e çıktığını tespit etmişlerdir.

2.2. Hafif Beton Üretiminde Aerojel Kullanımı ile İlgili Çalışmalar

Çimen (2023), tez çalışmasında, Bayburt Taşı (BT) atıkları ile silika aerojel (SA) sentezi yapmıştır. Belirli oranlarda SA'nın hafif betonuna ikamesinin ısı ve ses yalıtımına, dayanımına ve porozite gibi özelliklere etkisini araştırmıştır. Numunelere fiziksel (birim hacim ağırlık, porozite, su emme, termal iletkenlik ve ultrases geçiş hızı), mekanik (basınç dayanımı) deneyleri uygulanmış ve sonuçlar ANOVA analizi ile yorumlamıştır. Çalışma sonucunda, ısı yalıtımının (%3, 350 ve 0,40) seviyeleriyle optimum olacağını tespit etmiştir. (%3) SA ikamesinin hafif betonda: (%46) termal iletkenlik değerini iyileştirdiği, porozitesini (%31,48) artırdığı ve basınç dayanımında (9,72 MPa) azalma yaşanmasına neden olduğunu bildirmiştir. Karakterizasyon incelemelerinde: SA'nın hidrofobik ve iyi adsorpsiyon özelliğe olduğu, beton içerisinde SA'nın etrafında gözenekli yapının oluştuğu ve SA konsantrasyonunun artması ile betonda çoklu kristal yapının arttığı, bu artışın malzemenin mekanik dayanımında azalmaya neden olduğunu tespit etmiştir.

Jiang ve ark., (2022), yapmış oldukları çalışmada, bilye yuvarlama yöntemi kullanarak Aerojel takviyeli Epoksi Makroküreler (AR-EMS) elde etmişlerdir. Hafif betonu, AR-EMS, çimento ve içi boş cam boncukların kalıp içerisinde karıştırılmasıyla hazırlamışlardır. Deneyde, AR-EMS'nin ve farklı tipteki içi boş cam mikrokürelerin

(HGMS) istifleme hacim oranı, iç çapı, duvar kalınlığı, matristeki farklı cam elyaf (GF) içeriği ve uzunluğu gibi etki eden faktörler incelemişlerdir. Çalışmada sonuç olarak, AR-EMS'nin beton matrisine iyi bağlandığını ve uzun elyafların eklenmesinin hafif betonun basınç dayanımını etkili bir şekilde iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Hafif beton, %2 ağırlık oranında 12 mm GF ve 9–10 mm-2 katman-%90 AR-EMS ile hazırlandıklarında, hem yüksek dayanım (11,46 MPa) hem de düşük yoğunluk (0,897 g/cm³) elde etmişlerdir. Ayrıca, GF içermeyen beton ile EPS dolgulu betonu karşılaştırdıklarında basınç dayanımlarının sırasıyla %69 ve %398 oranında arttığını tespit etmişlerdir.

Chen ve Yu (2024), yapmış oldukları çalışmada, hidrofobik silika aerojel kullanılarak bir biyo-lifin (miskantus) yüzey modifikasyon yöntemini araştırmışlardır. Hafif betonda mekanik ve yalıtım performansı değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda, silika aerojel modifiye edilmiş miskantus lifinin hem basınç hem de eğilme dayanımını artırdığını tespit etmiştir. Aynı zamanda betonun yalıtım performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini bildirmişlerdir.

Strzałkowski ve Garbalińska (2016), yapmış oldukları çalışmada, uçucu kül agregası kullanılarak ürettikleri hafif betonuna aerojel parçacıklarının eklenmesinin etkisini araştırmışlardır. 28 günlük numunelerin termal özellikleri, 7 ve 28 günlük numunelerin ise basınç dayanım değerlerini belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda, beton kompozitlerine aerojel parçacıkları eklemenin termal parametreleri iyileştirmek için uygun bir yöntem olduğunu bildirmişlerdir. Termal iletkenlik katsayılarını, arojelsiz kontrol numuneleriyle karşılaştırdıklarında iki kat daha küçük olduğunu tespit etmişlerdir. Aerojel ilavesinin, basınç dayanımında kontrol numunelerinin yaklaşık %30'u kadar bir azalmaya neden olduğunu ifade etmişlerdir.

Adhikary ve ark., (2020a), çalışmalarında, genişmiş cam agregaları, silika-aerojel ve prefabrik plastik kabarcıklar olmak üzere üç farklı malzemeyi agrega ve ince dolgu maddesi olarak kullanmış ve ultra hafif beton üretmişlerdir. Hafif/ultra hafif betonun hidratasyon süreci üzerinde aerojel parçacıklarının etkisini analiz etmek için taramalı mikroskopi, termografi, yarı adiabatik kalorimetri testleri ve beton numunelerinin XRD analizi yapmışlardır. Çalışma sonucunda, çimentonun %15'ine kadarının aerojel parçacıkları ile değiştirilmesinin betonun basınç dayanımının %42'den fazla düşmesine neden olduğunu bildirmişlerdir. Daha yüksek aerojel parçacıkları içeriği genişmiş cam agrega ile birlikte kullanıldığında 800 kg/m³'ten daha düşük beton yoğunluğuna ulaşılabileceğini tespit etmişlerdir.

Adhikary ve ark., (2020b), çalışmalarında, farklı boyutlarda genişletilmiş cam agregalar ve silika aerojel kullanılarak iki farklı hafif beton numunesi serisi hazırlamışlardır. İlk seride hafif betonu, $787,5 \text{ kg/m}^3$ bağlayıcı malzeme hacmine sahip genişletilmiş cam agregaların ayrı ayrı ve farklı boyutlarda kombinasyonları kullanarak hazırlamışlardır. İkinci beton numune serisinde, hafif betonda bağlayıcı malzeme hacminin etkisini anlamak için 500 kg/m^3 bağlayıcı malzeme hacmine sahip daha küçük boyutlu genişletilmiş cam agregaların ayrı ayrı ve kombinasyonlarını kullanarak hazırlamışlardır. Çalışma sonucunda, hafif betonun basınç dayanımının ve akışkanlığının agrega boyutundan ve özelliklerinden büyük ölçüde etkilendiğini ifade etmişlerdir. Taramalı elektron mikroskobu görüntülerinden, aerogel parçacığının çok kırılğan bir malzeme olduğunu ve çimentolu malzemelerle daha düşük yapışkanlık özelliklerine sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Rudžionis ve Tučkutė, (2020), çalışmalarında, karbon nanotüplerin genişletilmiş cam ve silika aerojel esaslı hafif agrega betonun özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Hafif beton üretiminde, genişletilmiş cam (%55) ve hidrofobik silika aerojel parçacıklarının (%45) kombinasyonları hafif agregalar olarak kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, karbon nano tüplerin (CNT) ikame edilmesinin aerojel esaslı hafif betonun mekanik ve mikro yapısal performansını önemli ölçüde etkilediğini tespit etmişlerdir. Karbon nanotüplerin eklenmesiyle basınç dayanımında yaklaşık %41'lik bir iyileşme olduğunu bildirmişlerdir.

Kumar ve ark., (2023), yapmış oldukları çalışmada, Kaprik Asit (CA) Faz Değişim Malzemelerini (PCM) entegre ederek silika aerojel hafif beton panellerin (SAGP) termal enerji depolama kapasitesini artırmayı amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda, SAGP'ye %60 CAHEP entegrasyonunun, CAHEP'siz referans SAGP'ye kıyasla sırasıyla %43 ve %56 daha yüksek termal depolama ve ataletle sonuçlandığını tespit etmişlerdir. Geliştirilen HRSP'lerin termal yalıtım ve sıva uygulamaları için kabul edilebilir basınç dayanımına ve kuruma büzülmesine sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Shohan ve ark., (2024), yapmış oldukları çalışmada, çeşitli seviyelerde (%5-25) dehidrate çimento tozu (DCP) ve aerojel (AG) ile çift kancalı uçlu çelik lifleri (DHE-SF'ler) birleştirerek böyle bir UHPLC geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmaları sonucunda,

- ✓ Daha yüksek DCP ve AG içeriği ile akışkanlığın azaldığını,
- ✓ %5, %10 ve %15 DCP ve AG'nin, daha iyi paketleme ve bağ oluşumu yoluyla basınç dayanımını (%17,3) iyileştirdiğini

- ✓ Daha fazla DCP ve AG ile yoğunluğun %8,3'e kadar düştüğünü,
- ✓ Değiştirilmiş karışımların sülfat saldırısına direndiğini ve basınç dayanımını arttırdığını,
- ✓ 1000 °C'de yalnızca %75,4 kütle kaybıyla termal kararlılık iyileşirken, termal iletkenlik 0,274 W/m·°C'ye düştüğünü,
- ✓ Modifiye karışımlarda ses emilimi ve gözenek hacminin arttığını,
- ✓ X-ışını kırınımı analizinde, artan DCP ve AG ile daha yüksek kristal fazlar gösterdiğini tespit etmişlerdir.

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde tezde kullanılan materyaller ve kullanılan yöntemden bahsedilmiştir. Materyal başlığı altında tezde kullanılan perlit, aerojel, çimento, kum, katkı maddesi ve karışım suyu hakkında bilgiler verilmiştir. Metot kısmında ise referans ve katkılı hafif beton numunelerinin üretimi ve numunelere uygulanan deneyler hakkında bilgiler sunulmuştur.

3.1. Materyal

3.1.1. Perlit

Çalışmada kullanılan perlit Erzincan ilinde bulunan PERSAN A.Ş firmasından temin edilmiştir. Perlit görüntüsü Şekil 3.1’de, fiziksel ve kimyasal özellikleri ise Tablo 3.1’de, verilmiştir. Tabloya göre perlit beyaz, gri ve tonları renklerinde bulunmaktadır. Özgül ağırlığı $1100-1200 \text{ kg/m}^3$ arasında değişen perlitin pH değeri 7.5-8.0 arasındadır. Kimyasal özelliklerine bakıldığında, %71,0 - %75,0 oranında silisyum oksit içerdiği görülmektedir. Silisyum oksitten sonra en yüksek oran %12,5-%18 ile alüminyum oksite aittir.



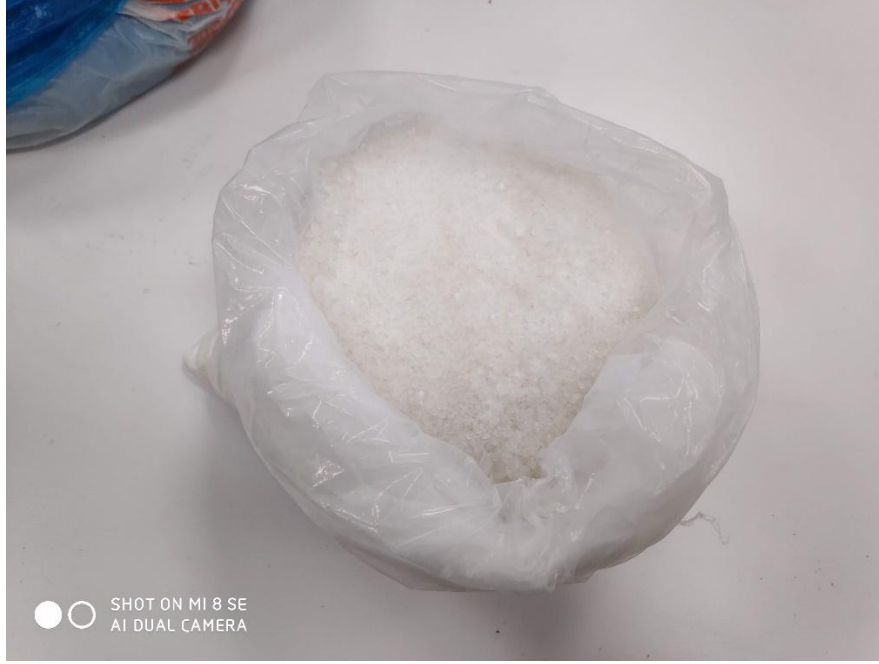
Şekil 3.1. Kullanılan perlit

Tablo 3.1. Perlitlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri (Persan, 2025)

Fiziksel özellikleri	Açıklama
Renk	Beyaz, gri ve tonları
Yumuşama noktası	870-1100 °C
Ergime noktası	1260-1343 °C
pH	7.5-8.0
Özgül ısı	0.2 Cal/g °C (837 J/Kg.k)
Özgül ağırlık	2.2-2.4 g/cc (1100-1200 Kg/m ³)
Refraktif İndeks	1.5
Serbest nem (%)	Maksimum 0.5
Ağırlık kaybı	İstenildiği kadar
Gevşek yoğunluk	32-400 kg/m ³ (Genleşmiş)
Isı iletkenliği	0.04 W/m.k (Genleşme)
	Konsantre sıcak alkali ve hidroklorik asitte erir.
	Konsantre mineral asitlerinde az erir (% 2)
Asitte erime özelliği	Seyreltik mineral veya konsantre zayıf asitlerde çok az erir (% 0.1)
Kimyasal formülü	Yüzde (%)
SiO ₂	71,0 - 75,0
AlO ₃	12,5 - 18,0
NaO ₃	2,9 - 4,0
K ₂ O	0,5 - 5,0
CaO	0,5 - 2,0
Fe ₂ O ₃	0,1 - 0,5
MgO	0,2 - 0,5
TiO ₂	0,03 - 0,2
MnO ₂	0,0 - 0,1
SO ₃	0,0 - 0,2
FeO	0,0 - 0,1
Cr	0,0 - 0,1
Ba	0,0 - 0,05
PbO	0,0 - 0,03/0,3
Serbest silis	0,0 - 0,2
Toplam klorürler	Eser - 0,2

3.1.2. Granüler arojel

Çalışmada kullanılan granüler arojeller Aerogel Türkiye firmasından satın alınmıştır. Kullanılan granüler arojel mekanik titreşimleri önlemekte ve ses yalıtımı sağlamaktadır. %90'dan fazla hava geçirgenliğine sahip olan granüler arojel, her türlü hava koşulunda ısı yalıtımı sağlamaktadır. İnsan sağlığına ve çevreye zararlı bir etkisi bulunmamaktadır. Kullanılan granüler arojelin görüntüsü Şekil 3.2'de, teknik özellikleri ise Tablo 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Kullanılan granüler aerogel

Tablo 3.2. Granüler aerogelin teknik özellikleri(Aerogel Türkiye, 2024)

Özellik	Değer
Çalışma ısı aralığı	-200 ile +650 °C arasında
Yoğunluk	1,115 g/cm ³
Isıl iletkenlik katsayısı	0,012-0,016 W/mK
Gözeneklilik	%90-95
Renk	Hafif krem
Buhar geçirgenliği	5-5,5µ
Isı sınıfı	A1
Sıkıştırma mukavemeti	40kPa
Ekolojik Etki	4,32 kg CO ₂ for kg
Öz ısı	1000 j/kg/K
Yüzey temas açısı	>165 degrees
Su geçirmez	superhydrophobic
Dielektrik sabiti	K<2
Ses Emilimi	-20 db (1/100) (500 Hz)

3.1.3. Çimento

Granüler aerogel katkılı hafif beton üretiminde Kocaeli ili Hereke ilçesinde bulunan Nuh Çimento fabrikası tarafından üretilen CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun görüntüsü Şekil 3.3’de, fiziksel ve kimyasal özellikleri ise Tablo 3.3’de sunulmuştur.



Şekil 3.3. Kullanılan çimento

Tablo 3.3. Deneylerde kullanılan çimentonun özellikleri

Kimyasal Bileşim %		
Bileşen	Çimento Nuh CEM I 42,5R	
CaO, toplam	63,41	
CaO, serbest	1,2	
SiO ₂ , toplam	20,22	
Al ₂ O ₃	5,67	
Fe ₂ O ₃	2,91	
MgO	0,96	
SO ₃	2,92	
Na ₂ O	Eser Miktarda	
K ₂ O		
Mn ₂ O ₃		
Kızdırma kaybı	3,32	
Çözünmeyen kalıntı	0,93	
Fiziksel ve Mekanik Özellikler		
Priz Başlangıcı (dakika)	235-180	
Priz sonu (dakika)	190-230	
Hacim genleşme (mm)	0-2	
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,19	
İncelik Blaine (cm ² /gr)	3654	
Basınç Dayanımı (MPa)	2-Gün	29,8
	7-Gün	49,6
	28-Gün	61,1

3.1.4. Kum

Üretilen referans ve katkıli hafif beton numunelerinin üretiminde ince agrega olarak Ankara ili dere kumu kullanılmıştır. Agrega boyutu 0/4 mm aralığında bulunmaktadır. Doğal kuma ait fiziksel özellikler Tablo 3.4’de, görüntüsü ise Şekil 3.4’de sunulmuştur.

Tablo 3.4. Doğal kumun fiziksel özellikleri

Fiziksel özellik	
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2.63
Su Emme (%)	1,5



Şekil 3.4. Kullanılan kum agregası

3.1.5. Katkı maddesi (Süperplastikleştirici)

Çalışma kapsamında üretilen referans ve katkıli hafif beton numunelerinin işlenebilirlik özelliğinin artırılması için çimento miktarının %1 i kadar katkı maddesi kullanılmıştır. Katkı maddesinin görüntüsü Şekil 3.5’de, özellikleri ise Tablo 5’de verilmiştir.



Şekil 3.5. Kullanılan katkı maddesi

Tablo 3.5. Katkı maddesinin özellikleri

Özellik	Değer/Açıklama
Görünüm	Koyu kahverengi sıvı
Yapısı	Naftalin Formaldehid Sulfonat Modifikasyonu
Sarfiyat miktarı	Çimento miktarına göre %0,8-1,5 aralığında
Yoğunluk	1,17±0,03 kg/lt
pH	7-9
Klorür	Yok
Uygulama sıcaklığı	+5 °C ile +35 °C

3.1.6. Karışım suyu

Granül aerojel katkılı tuğla numunelerinin üretiminde karışım suyu olarak Ankara ili içme suyu kullanılmıştır. Suyun berrak, temiz ve içilebilir kalitede olmasına dikkat edilmiştir.

3.2. Metot

3.2.1. Referans ve granüler aerojel katkılı hafif beton numunelerinin üretilmesi

Tez çalışması kapsamında üretilen hafif beton numuneleri hazırlanırken ASTM C192 “Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory/ Laboratuvarda Beton Test Numunelerinin Yapımı ve Kürlenmesine Yönelik Standart Uygulama” standardı baz alınmıştır. Hafif beton üretim reçetesi Tablo 3.6’da verilmiştir. Hafif beton üretiminde su/çimento oranı 0,50 olarak belirlenmiştir. Üretimde çimento miktarı 500 dozaj olarak tasarlanmıştır. Çimento miktarının %1 oranında süperplastikleştirici kullanılmıştır. Referans numunesi %90 oranında perlit malzemesinden %10 oranında kum malzemesinden üretilmiştir. 0,5–2 mm arasında değişen boyutlarda Ankara il sınırları içerisinde alınan kum kullanılmıştır. Çalışmada 2-

4 mm arasında değişen boyutlarda perlit ve granüler aerojel agrega olarak kullanılmış ve hafif beton üretilmiştir.

Tablo 3.6. Hafif beton üretim reçetesi

Numune Adı	Perlit (%)	Granül Aerojel (%)	Kum (%)	Çimento (%)	Süperplastikleştirici (%)	Su/Çimento (%)
REF	90	---	10	%99	%1	0,50
HB2	88	2	10	%99	%1	0,50
HB4	86	4	10	%99	%1	0,50
HB6	84	6	10	%99	%1	0,50
HB8	82	8	10	%99	%1	0,50
HB10	80	10	10	%99	%1	0,50

Kullanılan süperplastikleştiricinin ürün kılavuzu ve hafif agregaların emilim özellikleri dikkate alınmış ve üretime başlanmıştır.

Üretim süreci aşağıda sıralanmıştır.

- Aerojelin hafif ve hidrofobik yapısı nedeniyle, önce perlit, kum ve granül aerojel mikser içine konularak kuru karışım hazırlanmıştır.
- Kuru karışıma karışım suyunun yarısı eklenmiş ve karıştırma işlemine geçilmiştir.
- Agrega, su emiliminden kaynaklanan çökme kaybını azaltmak için mikser dönmeye devam ederken 3 dakika boyunca su emmeye bırakılmıştır (şekil 3.6).
- Üretim reğetesinde belirtilen miktarlardaki çimento mikser içerisine ilave edilmiştir.
- Süperplastikleştiricinin kılavuzunda önerildiği gibi, kalan karıştırma suyunun yarısı eklenmiş ve bileşenler 60 saniye daha karıştırılmıştır.
- Kalan karıştırma suyunun yarısı ve süperplastikleştirici miksere kademeli olarak ilave edilmiştir.
- Taze hafif betonun homojenliği sağlanana kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir.



Şekil 3.6. Hafif beton numunelerinin hazırlanması

Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen taze beton için iki farklı kalıp kullanılmıştır. Birinci kalıp 15x15x15 cm boyutlarında plastikten imal edilmiş küp kalıplardır (Şekil 3.7). İkinci kalıp türü ise 30 cm uzunluğunda ve 15 cm çapında silindirik kalıplardır (Şekil 3.8).



Şekil 3.7. Küp numuneler



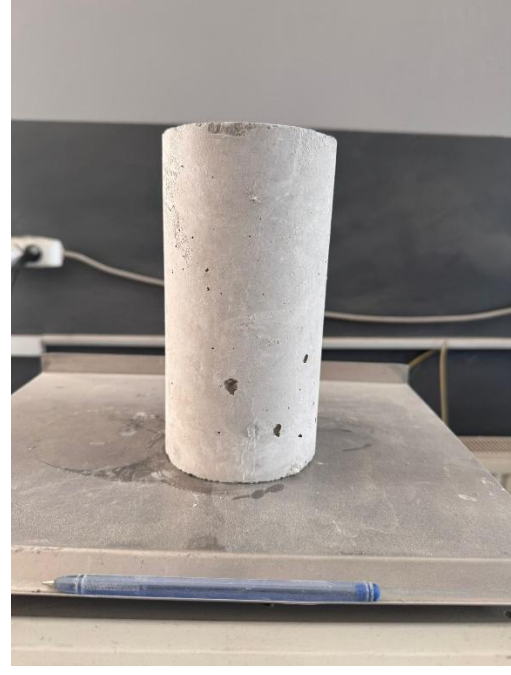
Şekil 3.8. Silindir numune kalıbı

Kalıplar iki eşit katman halinde doldurulmuş ve iyi sıkıştırmayı sağlamak ve ayrılmayı önlemek için kısa bir süre (3 saniye) elektrikli bir vibratörle sıkıştırılmıştır. Konsolidasyondan sonra fazla beton sıyrılmış ve mala yardımıyla bitirme işlemi yapılmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Hafif betonun kalıplanması

Numunelerin suyunun buharlaşmaması için üzerleri nemli bir bez ile örtülmüştür. Numuneler, oda sıcaklığında su buharıyla doymuş bir ortamda 24 saat boyunca kalıplarda bekletilmiş ve ardından kalıplardan çıkarılmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Üretilen küp ve silindir numuneler

Kalıptan çıkarılan numuneler 28 gün boyunca $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de su içerisinde kürlenmeye bırakılmıştır (Şekil 3.11). Her bir kompozisyon için üç özdeş numune elde edildi ve daha sonra karakterize edildi.



Şekil 3.11. Hafif beton numunelerinin kürlenmesi

3.2.2. Numunelere uygulanan deneyler

a) Yoğunluk

Referans ve katkılı hafif beton numunelerinin yoğunluğunun belirlenmesinde ASTM C 138 “*Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content*

(Gravimetric) of Concrete/ Betonun Yoğunluğu (Birim Ağırlık), Verim ve Hava İçeriği (Gravimetrik) için Standart Test Yöntemi” standardı kullanılmıştır. Standarda göre, hacmi bilinen bir çelik kap, taze karıştırılmış betonla yaklaşık olarak eşit üç katman halinde doldurulmaktadır. Ardından çökme testindeki aynı konsolidasyon uygulaması yapılmaktadır. Her katman 25 kez demir çubukla sıkıştırılmaktadır. 2. ve 3. katman çubukla sıkıştırılırken, çubuk bir önceki katmana yaklaşık 2,5 cm kadar nüfuz ettirilmektedir. Kap doldurulduktan sonra, fazla beton çıkarılmaktadır. Son olarak, taze betonla dolu kap tartılmaktadır (Mc). Kabin öz kütlesi (Mm) ve hacmi (Vm) tespit edildiğinde, betonun yoğunluğu aşağıdaki Formül 1’de yerine yazılarak hesaplanmaktadır.

$$Yoğunluk = (Mc - Mm) / Vm \quad \text{Formül 1}$$

b) Su emme (Ağırlıkça)

Tez çalışması kapsamında üretilen numunelerin su emme (ağırlıkça) değerlerinin tespiti için TS EN 12390-7 “Testing hardened concrete - Part 7: Density of hardened concrete/ Beton-Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş betonun yoğunluğunun tayini” standardı baz alınmıştır. 28 günlük referans ve katkıli hafif beton numuneleri kür havuzundan çıkarılmış ve kuru bir bezle yüzey kuru hale getirilmiştir. Ardından hassas terazide tartılmıştır (m₁). Arşimet kuralı uygulanarak su içerisinde tartma işlemi yapılmıştır (m₂). Daha sonra, numuneler etüv fırını içerisinde, 105 ± 5° C’de sabit ağırlığa gelinceye kadar bekletilmiştir. Etüvden çıkarılan numunelere tekrar tartma işlemi uygulanmıştır (m₃). Elde edilen sonuçlar aşağıda verilen Formül 2’de yerine yazılmış ve su emme (ağırlıkça) değeri hesaplanmıştır.

$$SE(\%) = \left(\frac{m_1 - m_3}{m_3} \right) \times 100 \quad \text{Formül 2}$$

c) Porozite

Referan ve katkıli numunelerin porozite değerinin tespiti için TS EN 12390-7 “Testing hardened concrete - Part 7: Density of hardened concrete/ Beton-Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş betonun yoğunluğunun tayini” standardı

kullanılmıştır. Numunelerin porozite deney aşamaları, su emme (ağırlıkça) deney aşamalarıyla aynı şekilde yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen veriler aşağıda verilen Formül 3’de yerine yazılarak hesaplanmıştır.

$$P (\%) = \left(\frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \right) \times 100 \quad \text{Formül 3}$$

d) Kompasite

Kompasite, doluluk oranı veya gözeneksiz oran olarak tanımlanabilmektedir. Bir başka deyişle kompasite, beton 1 m³ betondaki katı cisimlerin kapladığı hacimdir (Yılmaz, 2024). Kompasite deneyi çalışmada üretilen 28 günlük numunelerin kür havuzundan çıkarılmasıyla başlamıştır. Daha sonra numuneler kuru bir bez yardımıyla yüzey kuru hale getirilmiş ve tartma işlemi yapılmıştır. Ardında ±105 °C sıcaklıktaki etüv fırınında 24 saat boyunca bekletilmiştir. Süre sonunda numuneler fırından çıkarılmış ve ölçüm işlemi gerçekleştirilmiştir. Bulunan sonuçlar Formül 4 kullanılarak kompasite değeri hesaplanmıştır.

$$\text{Kompasite } (\%) = 100 - \text{Porozite} \quad \text{Formül 4}$$

e) Donma Çözülmenin Basınç Dayanımına Etkisi

Referans ve katkılı hafif beton numunelerinin donma-çözülme direnci deneyi için numunelere ASTM C666 “Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing/Betonun Hızlı Donma ve Çözölmeye Karşı Direnci için Standart Test Yöntemi” standardının A prosedürü uygulanmıştır. 28 günlük silindirik beton numunelerin her iki ucu kesildikten sonra Şekil 3.12’de verilen donma çözölmeye deney kabineine yerleştirilmiştir. Kabin içerisindeki numunelerin alt kısmı, deney boyunca 1 cm’lik bir su seviyesi içinde tutulmuştur. Hafif beton numuneleri 300 kez hızlı donma ve çözölmeye döngüsüne tabi tutulmuştur. Dayanıklılık değeri, numunelerin 300 kez donma çözölmeye maruz kalma döngüsünden sonra basınç dayanımının test edilmesiyle belirlenmiştir.



Şekil 3.12. Donma çözülme kabini

f) Isı İletim Katsayısı Tayini

Tez kapsamında üretilen numunelerin ısı iletim katsayısı Şekil 3.13’de verilen Hotdisk Termal Sabitler Analizörü (Model TPS 2500S) kullanarak analiz edilmiştir. Geçici bir düzlem kaynak tekniği uygulanmıştır (Gustafsson, 1991; Bentz, 2007). Deneyde, yarıçapı 3,189 mm olan bir disk tipi Kapton Sensörü 5465 kullanılmıştır. Hem ısı kaynağı hem de sıcaklık kaydedici olarak görev yapan sensör, iki numune parçası arasına yerleştirilmiştir. Ölçümler, 20 saniye boyunca 0,315 W’lık bir ısıtma gücü uygulanarak yapılmıştır. Numunelerin zaman fonksiyonu olarak sıcaklık artışı, numunelerin termal iletkenliğini hesaplamak için kaydedilmiştir. Farklı ölçüm yapılandırmaları kullanılmış ve elde edilen veriler, üç ayrı sonucun aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.



a)



b)

Şekil 3.13. a); Hot Disk TPS 2500S cihazı; b); ısı iletkenliğinin ölçüm alanı

g) Basınç Dayanımı

Tez çalışması kapsamında üretilen silindirik numunelerin basınç dayanım değerleri ASTM C39 “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens/ Silindirik Beton Numunelerinin Basınç Dayanımı İçin Standart Test Yöntemi” standardı kullanılmıştır. Basınç dayanımı deneyine başlanmadan önce, numuneler kür havuzundan çıkarılmış ve bir bez yardımıyla yüzey kuru hale getirilmiştir. Ardından ardından her iki ucu kesilmiş ve kükürt bileşiği ile kapatılmıştır. Daha sonra numunelere $0,25 \pm 0,05$ MPa/s sabit yükleme hızında yük uygulanmıştır (Şekil 3.14). Basınç dayanımı deneyi altı numune üzerinde gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınarak basınç dayanım değeri belirlenmiştir.



Şekil 3.14. Silindir numunenin basınç dayanımı deneyi

h) Yarmada Çekme Dayanımı

Referans ve katkı hafif beton numunelerinin yarma da çekme dayanımları ASTM C 496 “Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens/ Silindirik Beton Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımına Yönelik Standart Test Yöntemi” standardına göre belirlenmiştir. Yarmada çekme dayanımı deneyi, test makinesinde yan yatırılmış beton silindire çapraz olarak zıt basınç yüklerinin uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Kırılma veya yarıma, çapraz düzlem boyunca meydana gelmektedir. Numunelerin yarma da çekme dayanım değeri, aşağıdaki verilen Formül 5 kullanılarak elde edilir. Formülde yer alan f_{ct} yarmada çekme dayanımını, P toplam uygulanan yükü, D ve L silindir çapı ve uzunluğunu ifade etmektedir.

$$f_{ct} = 2P / \pi \times L \times D$$

Formül 5

ı) SEM Analizi

SEM, mikro uzay ve nano uzayın görünmez dünyalarının görülebildiği bir araçtır. Işık mikroskobu ile erişilemeyen ayrıntılar ve karmaşıklık SEM ile ortaya

çıkarılabilmektedir. Goldstein ve ark., (2003) SEM analizinin aşağıdaki işlemlerle elde edilebileceğini ifade etmiştir.

- Analiz, (100-30.000 elektron volt) aralığında bir elektron demeti (yüksek enerjili) uygulanarak yapılmaktadır. Genellikle elektron emisyonu için bir termal kaynak kullanılmaktadır.
- Silahtan üretilen nokta boyutu, keskin bir görüntü oluşturmak için çok büyüktür, bu nedenle SEM, noktayı sıkıştırmak ve odaklanmış elektronu numuneye yönlendirmek için merceklerle donatılmıştır. Çoğu SEM'in nokta boyutu (10 nm)'den küçüktür ve son mercekten toplanan elektronlar numuneyle etkileşime girmekte ve bir görüntü oluşturmak için kullanılan sinyalleri oluşturmak üzere (1 μm) derinliğe nüfuz etmektedir.
- Numunenin görüntüsü, elektron ışınının numunenin yüzeyinde dikdörtgen bir raster oluşana kadar düz çizgiler biçiminde ayrı konumlara hareket etmesine neden olan tarama bobinlerinin hareketine bağlı olarak nokta nokta oluşturulmaktadır. Tüm süreç, gereken büyütmeyle bağlıdır. Operatör daha yüksek bir büyütme görüntü talep ettiğinde, tarama bobinleri ışının daha küçük bir alanı çapraz olarak saptırmasını sağlamaktadır.
- Elektron dedektörü, taranan numuneden yayılan elektronları (sinyalleri) tespit etmek içindir. Dedektörlerin yokluğunda, elektron ışını ile numunenin yüzeyi arasındaki etkileşim nedeniyle üretilen her sinyal, tek başına bir görüntü üretebilmektedir. Bu da anlaşılmalıdır. SEM görüntü üretiminde hem ikincil elektronlar (SE) hem de geri saçılmış elektronlar (BSE) kullanılmaktadır. Toplayıcı ekrana pozitif bir voltaj yönlendirildiğinde, hem SE hem de BSE toplanacaktır. Ancak, toplayıcı ekrana negatif voltaj uygulandığında yalnızca BSE toplanacaktır.
- Sinyal daha sonra görüntüleme ekranında görüntülenmektedir. Operatör makul bir net görüntü elde edilene kadar parlaklığı ve yoğunluğu kontrol etmektedir. Numune içinde küçük ayrıntıların gerekli olduğu durumlarda, (10.000x) ötesinde büyütme uygulanmaktadır.
- Elektron voltaj modu (tabancadan yayılan) sağlanan ayrıntılar üzerinde etkilidir. (5 kV)'dan daha düşük hızlandırma voltajları kullanılırsa taranan görüntü yüzey bilgisi açısından zengin olacaktır. Buna karşılık, yüzeyin

altına nüfuz eden (15-30 kV) aralığındaki yüksek hızlandırma voltajları, yüzeyden yansıyan sinyalin numunenin iç kısmı hakkında ayrıntılar taşımamasını sağlayacaktır.

- SEM'den elde edilen kısmen üç boyutlu görüntü, numunenin topografisinin (şekil, boyut ve yüzey dokusu) açısından görselleştirilmesine bağlıdır. Bu, BSE ve SE sayısına bağlıdır. Şaşırtıcı bir şekilde, numune yüzeyinin eğim açısının yukarıda belirtilen sayıların her ikisini de artırmada ve sonuç olarak topoğrafik kontrastta doğrudan bir etkisi vardır. 50 dereceden 70 dereceye kadar olan bir eğim (veya eğim açısı olarak da adlandırılır) BSE ve SE sinyalinin sayısını zirveye çıkarmaktadır (Mohammed ve Abdullah, 2018).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, referans, perlit ve arojel katkılı hafif beton numunelerine uygulanan fiziksel ve mekanik deney sonuçları verilmiştir. Ayrıca SEM görüntülerinin analizi sunulmuştur. Bölüm içerisinde yer alan REF; referans numunesini, HB2; %2 oranında arojel katkılı hafif beton numunelerini, HB4; %4 oranında arojel katkılı hafif beton numunelerini, HB6; %6 oranında arojel katkılı hafif beton numunelerini, HB8; %8 oranında arojel katkılı hafif beton numunelerini, HB10; %10 oranında arojel katkılı hafif beton numunelerini ifade etmektedir.

4.1. Hafif Beton Numunelerine Uygulanan Fiziksel Deneylerin Sonuçları

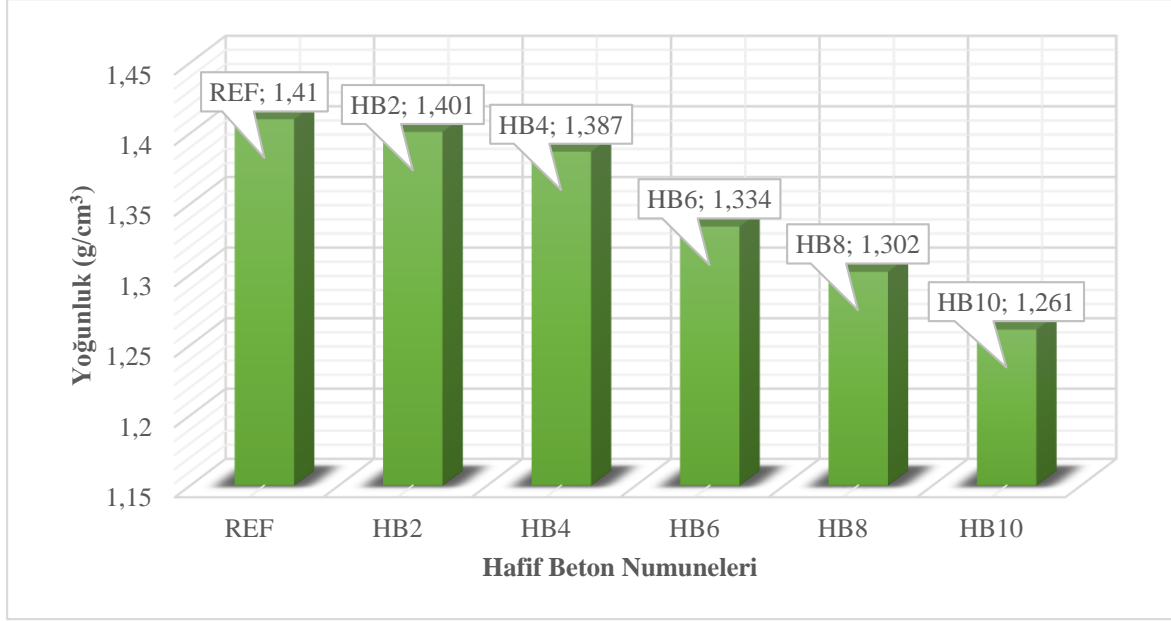
Bu bölümde, yoğunluk, su emme (ağırlıkça), porozite, kompasite, donma çözülmenin basınç dayanımına etkisi ve ısı iletim katsayısı tayini deney sonuçları verilmiştir.

4.1.1. Yoğunluk

Yoğunluk deneyi için 6 adet REF 30 adet katkılı hafif beton numunesi olmak üzere 36 adet numune kullanılmıştır. Deney sonuçlarının aritmetik ortalaması alınmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.1’de verilmiştir.

Grafikte, yoğunluk değerlerinin, 1410-1261 g/cm³ arasında değiştiği görülmektedir. En yüksek yoğunluk değeri REF numunesinden, en düşük yoğunluk değeri ise HB10 numunesinden elde edilmiştir.

Çalışmada, arojel miktarının artmasıyla katkılı hafif beton numunelerinin yoğunluk değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bu azalmaya granüler arojelin yoğunluğunun (0,01 ila 0,5 g/cm³) perlitin yoğunluğundan (1,1 g/ cm³) daha düşük olmasının neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.1. Numunelerin yoğunluk grafiği

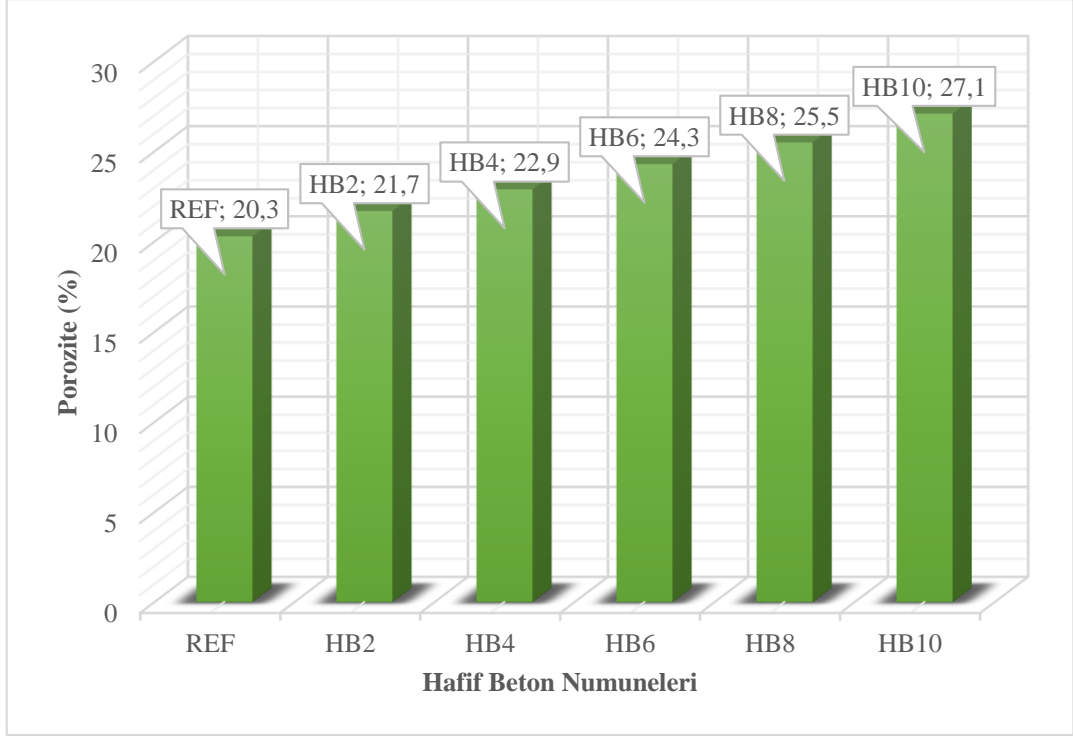
Sriwattanapong ve ark., (2013), İbrahim ve ark. (2020), Othman ve ark., (2020), Promusanta ve ark., (2020), Alsarayreh ve ark., (2020), Yan ve ark., (2022), Yan ve ark., (2022), Sharma ve ark., (2022), Sai ve ark., (2025) yaptıkları çalışmada perlit ikameli hafif betonların yoğunluğunun diğer hafif betonlara kıyasla daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Adhikary ve ark., (2020a) yılında yapmış olduğu çalışmada hafif betona aerjel ikamesinin yoğunluğu azalttığını bildirmiştir. Yapılan bu çalışmalar tez çalışmasında sonucunda elde edilen sonuçları desteklemektedir.

4.1.2. Porozite

Malzemenin boşluk yapısı anlamına gelen porozitenin değerleri Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekil toplam 36 numunenin aritmetik ortalaması alınarak oluşturulmuştur.

Şekilde verilen grafiğe göre, porozite değerleri %20,3 ila %27,1 arasında değişmektedir. En yüksek porozite değeri HB10 numunesinden, en düşük porozite değeri ise REF numunesinden elde edilmiştir. Porozite değerleri sırasıyla; %20,3, %21,7, %22,9, %24,3, %25,5, %27,1’dir.

Çalışmada, aerjel miktarının artmasıyla, porozite değerinde de arttığı tespit edilmiştir. Bu artışın nedeninin granüler aerjelin yüksek gözenekli yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir.

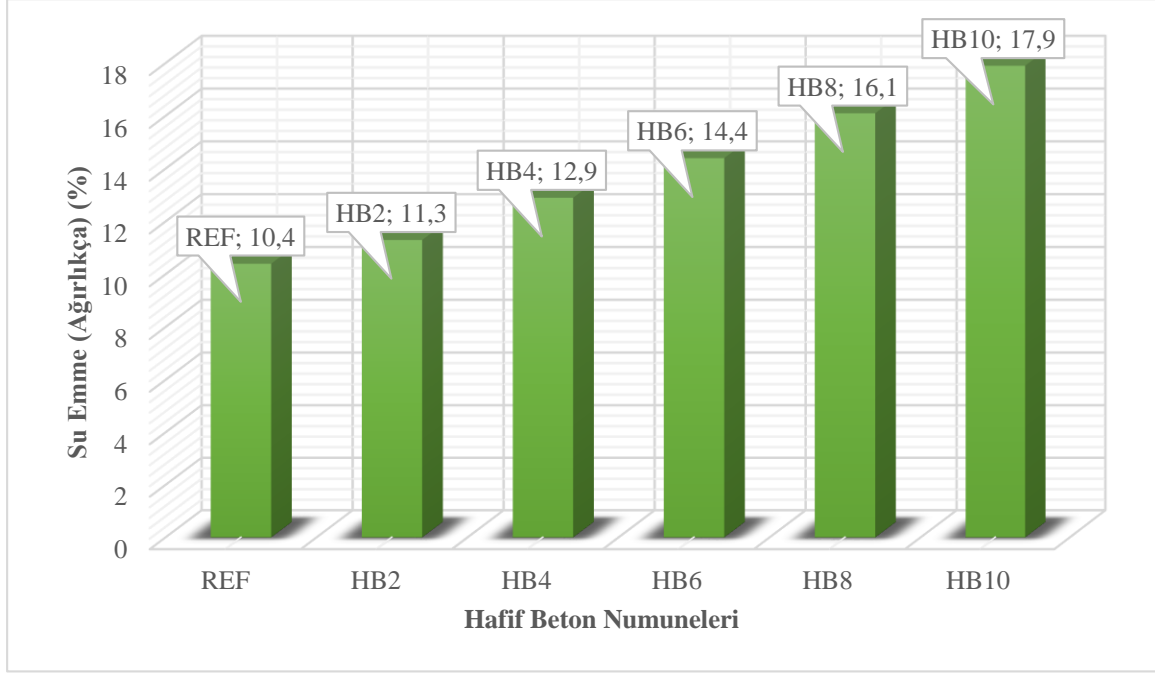


Şekil 4.2. Numunelerin porozite grafiği

Şengül ve ark., (2011) perlitin hafif betonun porozite değerini arttırdığını, Çimen, (2023) ise aerogelin hafif betonun porozite değerinde artış meydana getirdiğini ifade etmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar tez çalışmasıyla örtüşmektedir.

4.1.3. Su emme (ağırlıkça)

Şekil 4.3’de referans ve katkılı numunelere ait su emme (ağırlıkça) değerleri verilmiştir. Grafiğe göre, su emme (ağırlıkça) değerleri %10,4 ila %17,9 arasında değişmektedir. En yüksek su emilimi HB10 numunesinden elde edilirken, en düşük su emilimi REF numunesinden elde edilmiştir. Granüler aerogel miktarının artmasıyla su emme oranında artış meydana geldiği görülmüştür. Bu artışın nedeninin granüler aerogelin boşluklu yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.3. Numunelerin su emme (ağırlıkça) grafiği

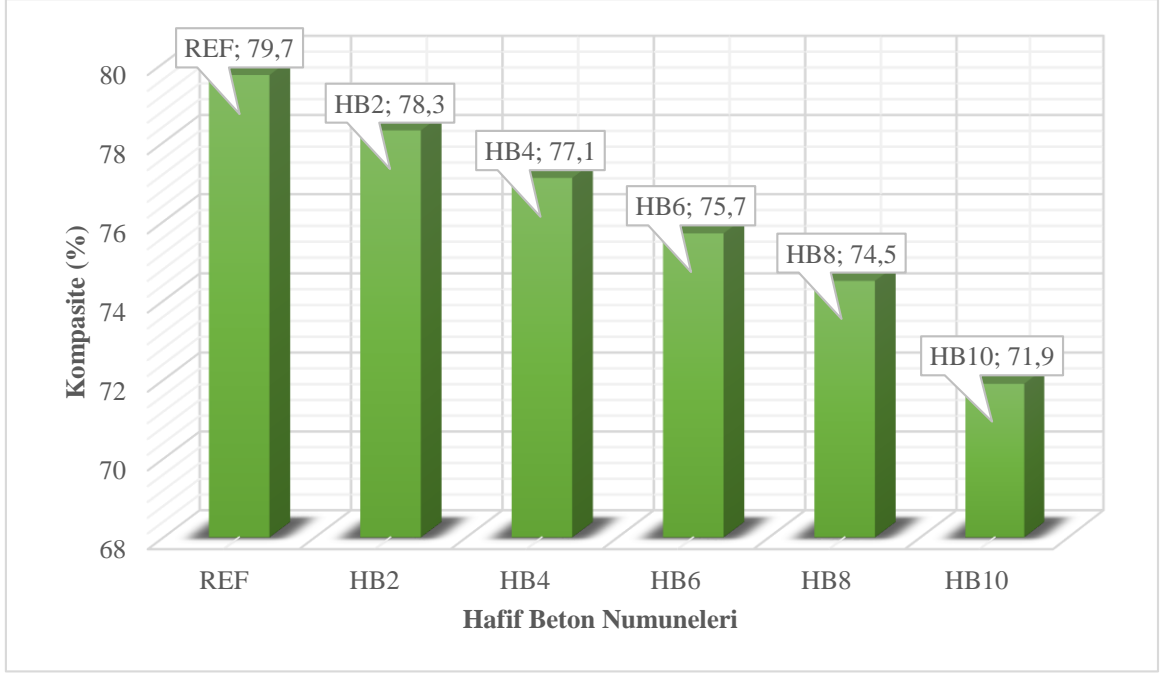
Şengül ve ark., (2011) ve Tapan ve Engin (2019) yapmış oldukları çalışmada perlitin su emme oranını arttırdığını ifade etmişlerdir. Çimen ve ark., (2023), yapmış olduğu çalışmada aerojelin hafif betonun su emme oranında artış meydana getirdiğini ifade etmiş ve tez çalışmasıyla paralel sonuçlar elde etmiştir.

4.1.4. Kompasite

Malzemenin doluluk oranı anlamına gelen kompasitenin değerleri Şekil 4.4'de verilmiştir. Şekil 4.4 36 hafif beton numunesinin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Şekle göre en yüksek kompasite değeri REF numunesinden, en düşük kompasite değeri ise HB10 numunesinden elde edilmiştir. Kompasite değerleri sırasıyla, %79,7, %78,3, %77,1, %75,7, %74,5, %74,5, %71,9'dur.

Grafikte, silika aerjel miktarının artmasıyla, kompasite değerinin azaldığı görülmüştür. Porozite ile bir bütün olan kompasite değeri, porozite değeri ile ters orantılıdır. Bir başka deyişle, porozite değerinin artması, kompasite değerinin azalmasına neden olmuştur.



Şekil 4.4. Numunelerin kompasite değerleri

4.1.5. Donma çözülmenin basınç dayanımına etkisi

Donma çözülmenin basınç dayanımına etkisi deneyi için toplam 36 adet numune kullanılmıştır. Numunelerin aritmetik ortalaması alınarak donma çözülmenin basınç dayanımına etkisi belirlenmiştir.

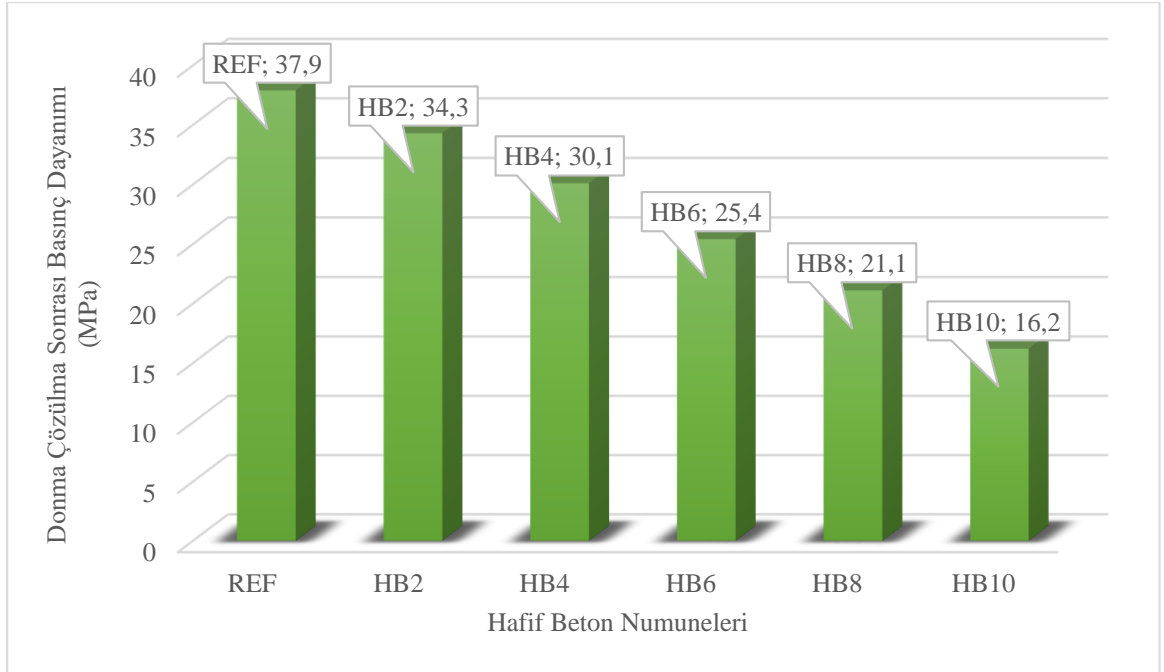
Hafif beton numunelerine 300 defa hızlı donma çözülme deneyi uygulandıktan sonra basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuş elde edilen değerler Tablo 4.1’de verilmiştir.

Donma çözülme öncesi ve sonrası basınç dayanımlarının yer aldığı Tabloya göre; donma çözülme sonrası basınç dayanımında çok büyük kayıplar yaşanmamıştır. Aerojel miktarının artmasıyla donma çözülme öncesi ve sonrası basınç dayanım farkının arttığı görülmüştür. Örneğin HB2 numunesinin donma çözülme öncesi ve sonrası dayanım farkı 2,6 MPa iken, HB10 numunesinin öncesi ve sonrası dayanım farkı 3,3 MPa olduğu görülmüştür.

Tablo 4.1. Donma çözülme deneyi öncesi ve sonrası basınç dayanım değerleri

Numune Adı	Donma çözülme öncesi basınç dayanımı (MPa)	Donma çözülme sonrası basınç dayanımı (MPa)
REF	39,4	37,9
HB2	36,9	34,3
HB4	32,8	30,1
HB6	28,4	25,4
HB8	24,2	21,1
HB10	19,5	16,2

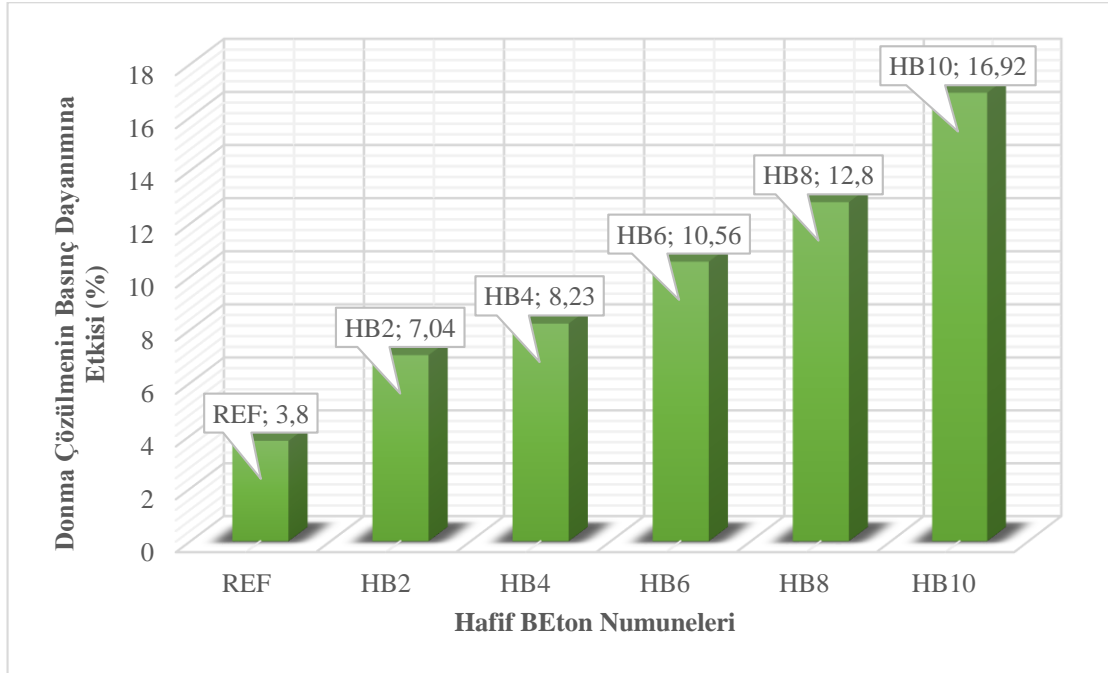
Şekil 4.5’de donma çözülme sonrası basınç dayanım değerlerinin verildiği grafik sunulmuştur. Grafığe göre; donma çözülme sonrası en yüksek basınç dayanımı REF numunesinden elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımı ise HB10 numunesine aittir. Elde edilen değerlere göre granüler arojel miktarının artmasıyla donma çözülme sonrası basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir.



Şekil 4.5. Numunelerin donma çözülme sonrası basınç dayanımı grafığı

Şekil 4.6’da donma çözülmenin basınç dayanımına etkisini gösteren grafik verilmiştir. Grafığe göre; donma çözülmenin basınç dayanımına etkisi değerinin %3,8 ila %16,92 arasında değiştiği görülmüştür. En yüksek etki oranı HB10 numunesinde görülmüştür. Granüler arojel miktarının artmasıyla donma çözülmenin basınç

dayanımına etkisi değerinde artış meydana geldiği görülmüştür. Bu artışa granüler arojelın kırılma dayanımının neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.6. Numuneleri donma çözülmenin basınç dayanımına etkisi grafiği

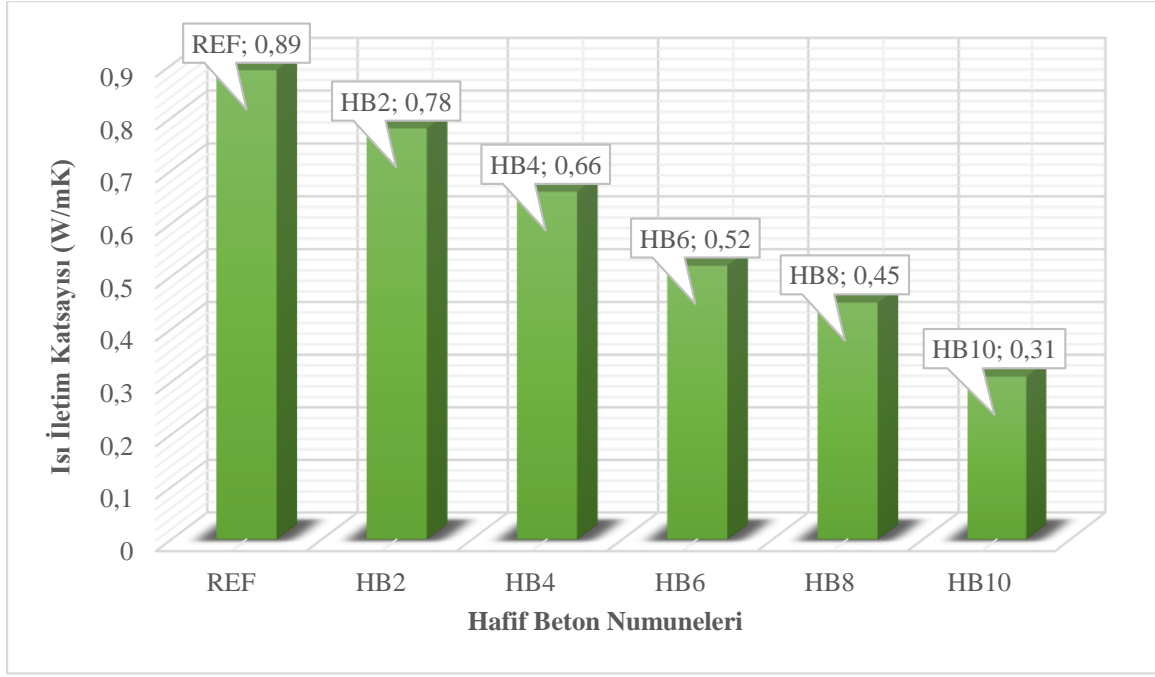
Barnat-Hunek ve ark., (2018) ve Tapan ve Engin (2019) yapmış oldukları çalışmadan elde ettikleri sonuçlar tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçları destekler niteliktedir.

4.1.6. Isı iletim katsayısı tayini

Isı iletim katsayısı tayini deneyinde 3 adet REF numunesi, 15 adet katkılı numune olmak üzere toplam 18 adet hafif beton numunesi kullanılmıştır. Numunelerin aritmetik ortalaması alınarak ısı iletim katsayısı değeri belirlenmiştir.

Referans ve katkılı numunelere ait ısı iletim katsayısı değerleri Şekil 4.7’de verilmiştir. Şekle göre arojel miktarının olmadığı REF numunesi, en yüksek ısı iletim katsayısına, arojel miktarının en yüksek olduğu HB10 numunesi ise en düşük ısı iletim katsayısına sahiptir. Bir başka deyişle; granüler arojel miktarının artması ısı iletim katsayısının azalmasına neden olmuş ve numunelerin termal özelliklerini iyileştirmiştir. Bu düşüşün nedeni, granüler arojel yapısının gözenekli olmasıdır.

Isı iletim katsayısının en düşük olduğu numune porozite değerinin en yüksek olduğu numunedir. Tez kapsamında yapılan deneylerden elde edilen sonuçların yer aldığı grafiklerde, porozite değeri en yüksek numunenin HB10 numunesinin en düşük ısı iletim katsayısına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7. Numunelerin ısı iletim katsayısı grafiği

Demirboğa ve Gül, (2003), Şengül ve ark., (2011), İbrahim ve ark., (2020), Jedidi ve ark., (2025) yıllarında yapmış oldukları çalışmada, perlitin betonların ısı iletim katsayısını düşürdüğünü bildirmişlerdir. Çimen (2023) yılında yapmış olduğu çalışmada aerogelin hafif betonun ısı iletim katsayısını düşürdüğünü ifade etmiştir. Bu çalışmalar tez çalışmasında elde edilen sonuçları doğrular niteliktedir.

4.2. Hafif Beton Numunelerine Uygulanan Mekanik Deneylerin Sonuçları

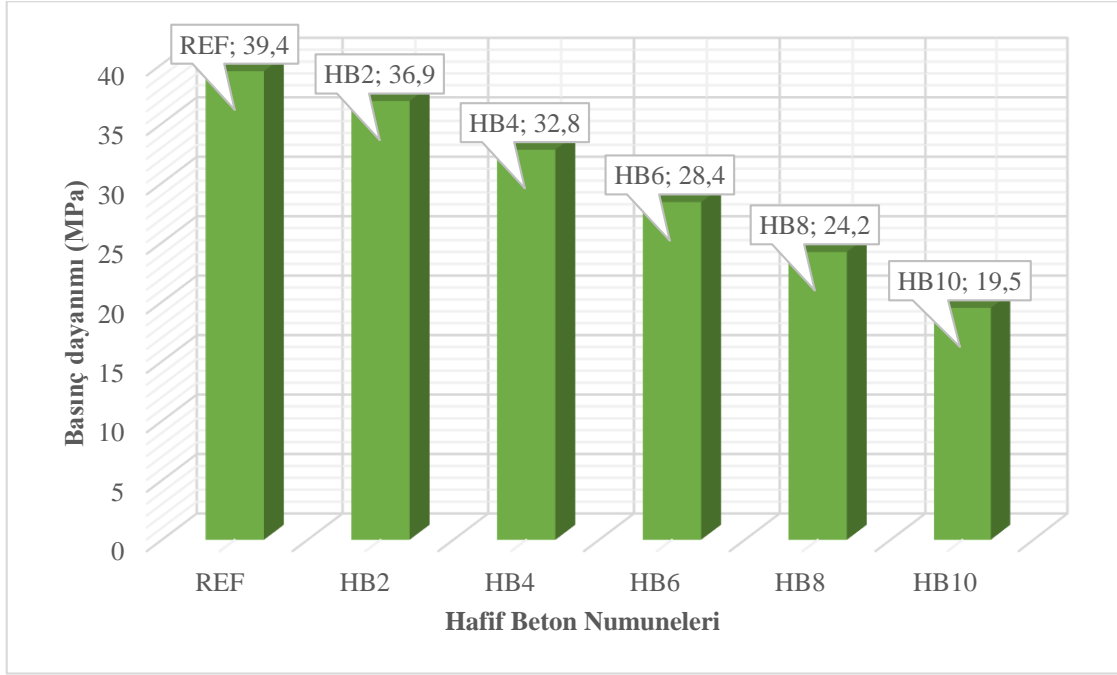
Bu bölümde hafif beton numunelerine uygulanan basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneylerinin sonuçları başlıklar halinde verilmiştir.

4.2.1. Basınç dayanımı

Hafif beton numunelerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde basınç dayanımı oldukça önemlidir. Tez çalışması kapsamında bir seri referans numune, 5 seri katkılı hafif beton numunesi olmak üzere 6 seri numune üretilmiştir. Her bir seri için 6 adet numune olmak üzere toplamda 36 adet numune kullanılmıştır. Numunelerin aritmetik ortalaması alınarak basınç dayanım değerleri belirlenmiştir.

Numunelere uygulanan basınç dayanım değeri tez çalışmasında üretilen referans ve katkılı hafif beton numunelerinin basınç dayanımı Şekil 4.8’de verilmiştir. Şekilde yer alan grafiğe göre; basınç dayanımı en yüksek olan numune 39,4 MPa ile REF numunesidir. En düşük basınç dayanım değeri 19,5 MPa ile HB10 numunesine aittir. Granüler aerogel miktarının artmasıyla basınç dayanım değerinin olumsuz yönde

etkilendiği görülmüştür. Granüler aerogelin çok kırılğan bir malzeme olması ve çimentolu malzemelerle daha düşük yapışkanlık özellikliliği göstermesi basınç dayanımındaki azalmanın nedeni olarak düşünülmüştür. REF, HB2, HB4, HB6 ve HB8 numunelerinin orta dayanımlı hafif beton HB10 numunesinin ise az dayanımlı hafif beton sınıfına girdiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.8. Numunelerin basınç dayanım grafiği

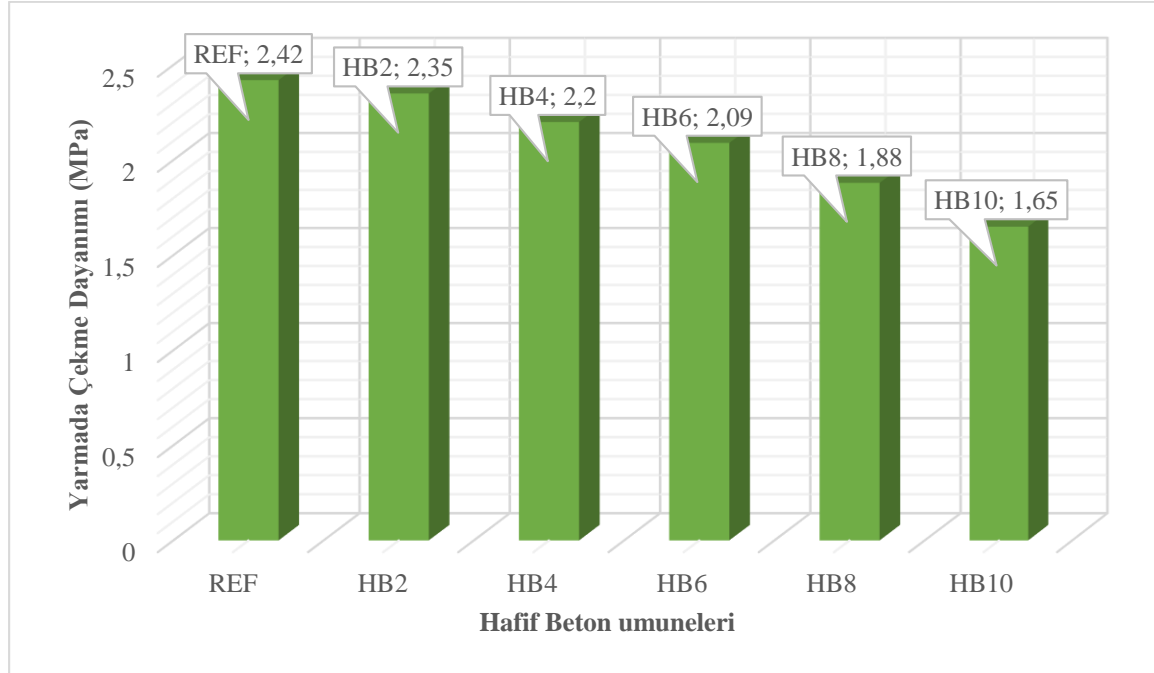
Şengül ve ark., (2011), Topçu ve Işıkdag (2011), Sriwattanapong ve ark., (2013), Strzalkowski ve Garbalinska (2016), Othman ve ark., (2020), Pramusanta ve ark., (2020), Bakhshi ve ark., (2023), Bakhshi ve ark., (2023), Jedidi ve ark., (2025) çalışmalarında hafif beton üretiminde perlit kullanımı ile basınç dayanımının azalacağını ifade etmişlerdir. Adhikary, (2020a), Adhikary, (2020b), çalışmalarında hafif beton içerisine aerjel ikamesinin betonun basınç dayanımını olumsuz yönde etkileyeceğini bildirmiştir. Çalışmaları tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlarla örtüşmektedir.

4.2.2. Yarmada çekme dayanımı

Toplam 36 adet referans ve katkı numunelere uygulanan yarmada çekme dayanımı deney sonuçlarının aritmetik ortalaması alınmış, elde edilen değerler Şekil 4.9'da verilmiştir.

Şekil incelendiğinde; en yüksek yarmada çekme dayanımının REF numunesinden elde edilirken en düşük yarmada çekme dayanımının HB10 numunesinden elde edildiği görülmüştür. Yarmada çekme dayanım değerleri sırasıyla 2,42 MPa; 2,35 MPa; 2,2 MPa;

1,88 MPa ve 1,65 MPa'dır. Granüler aerojel miktarının artmasıyla yarmada çekme dayanımının azaldığı görülmüştür. Yarmada çekme dayanımı sonuçları basınç dayanımına paralel ilerlemiştir.



Şekil 4.9. Numunelerin yarmada çekme dayanımı grafiği

Adhikary, (2020a) çalışmasında tez çalışmasıyla benzer sonuçlar elde etmiş, bu durum tez çalışmasını desteklemiştir.

4.3. SEM Analizi

REF ve aerojel katkıli hafif beton numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekle göre; REF numunesinin bozulmamış ince porlardan oluştuğu görülmektedir. REF numunesinin tabakalar şeklinde sıkı bağ dokusuna sahip olduğu anlaşılmaktadır. Kristal yapı özelliğinde olan numunede çok sayıda mikro porlar bulunmaktadır.

%2 oranında aerojel katkıli olan HB2 numunesinin SEM görüntüsünde, kırmızı ile işaretli olan bölgeler granüler arojelin net belirgin olduğu alanları göstermektedir. Görüntüde granüler arojellerin homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. REF numunesinde bulunan sıkı bağ yapısının HB2 numunesinde azaldığı görülmüştür. REF numunesine kıyasla mikro yapının daha az olduğu anlaşılmıştır.

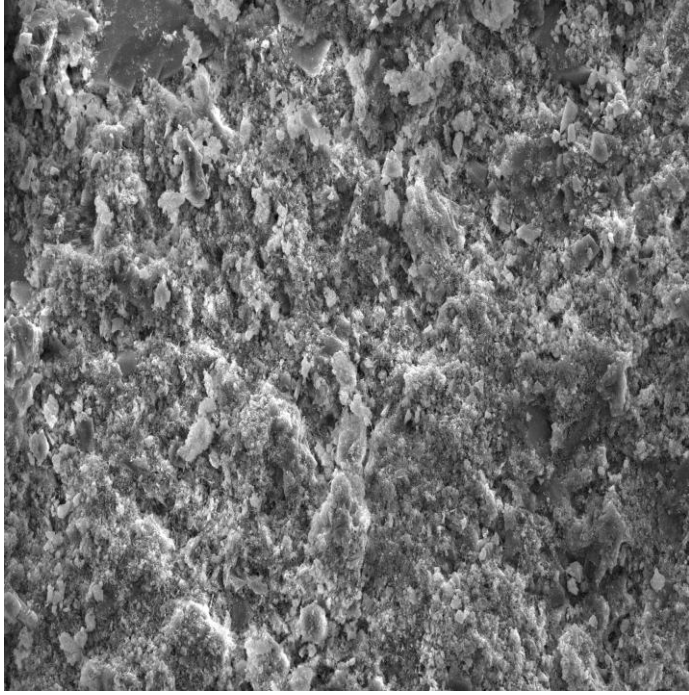
HB4 numunesinin SEM görüntüsünde, kırmızı ile işaretli alanlar hafif beton içerisindeki granüler arojellerin bir kısmını göstermektedir. HB4 numunesinde granüler

aerojelin homojen bir şekilde karıştığı görülmektedir. Makro yapıların arttığı görülen SEM görüntüsünde, sıkı bağ dokunun gevşek bağ dokuya dönüştüğü anlaşılmıştır.

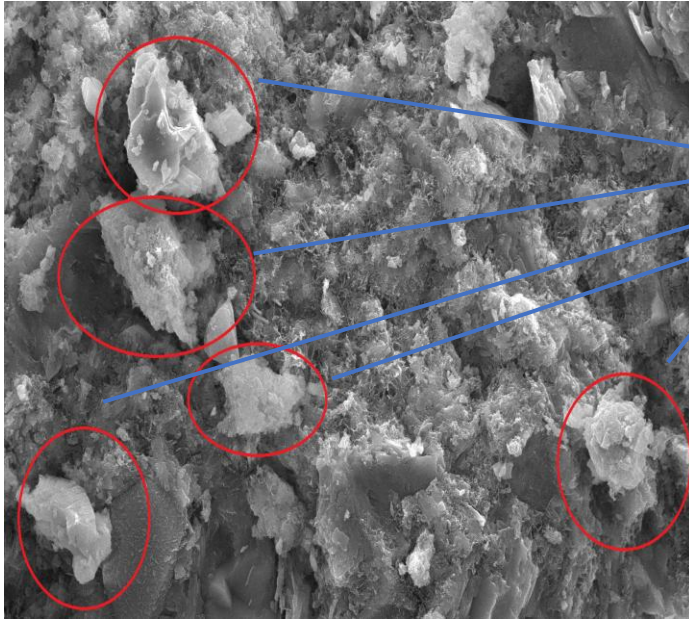
HB6 numunesinin SEM görüntüsünde; kırmızı ile işaretli alanlar hafif beton bünyesindeki granüler aerojellerin bir kısmını göstermektedir. HB6 numunesinin de homojen bir şekilde karıştırıldığı görülmüştür. Yoğun makro yapısı bulunan numunenin bağ yapısının gevşek olduğu anlaşılmıştır. REF numunesinde bulunan tabakalı yapının HB6 numunesinde oldukça azaldığı görülmüştür.

HB8 numunesinin SEM görüntüsünde; kırmızı ile işaretli alanlar granüler aerojellerin olduğu bazı bölgeleri göstermektedir. HB8 numunesinde granüler aerojelin homojen bir şekilde dağıldığı görülmüştür. HB8 numunesinin makro yapısının oldukça yoğun olduğu görülmektedir. Yer yer sıkı bağ dokusu görülsede gevşek bağ dokusunun yoğun olduğu anlaşılmaktadır. Tabakalı yapının çok azaldığı numunede kristal yapının oldukça fazla olduğu tespit edilmiştir.

HB10 numunesinin SEM görüntüsünde; kırmızı ile işaretli alanlar granüler aerojelin olduğu bazı yerleri göstermektedir. HB10 numunesinde granüler aerojelin homojen bir şekilde dağılım gösterdiği görülmüştür. HB10 numunesinin tabakalı yapısının amorf yapıya dönüştüğü anlaşılmıştır. HB10 numunesinin mikro yapısının neredeyse kalmadığı makro yapının çok fazla olduğu tespit edilmiştir. Makro yapının fazla olması numunenin basınç dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Basınç dayanım değerleri incelendiğinde, HB10 numunesinin en düşük basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür.

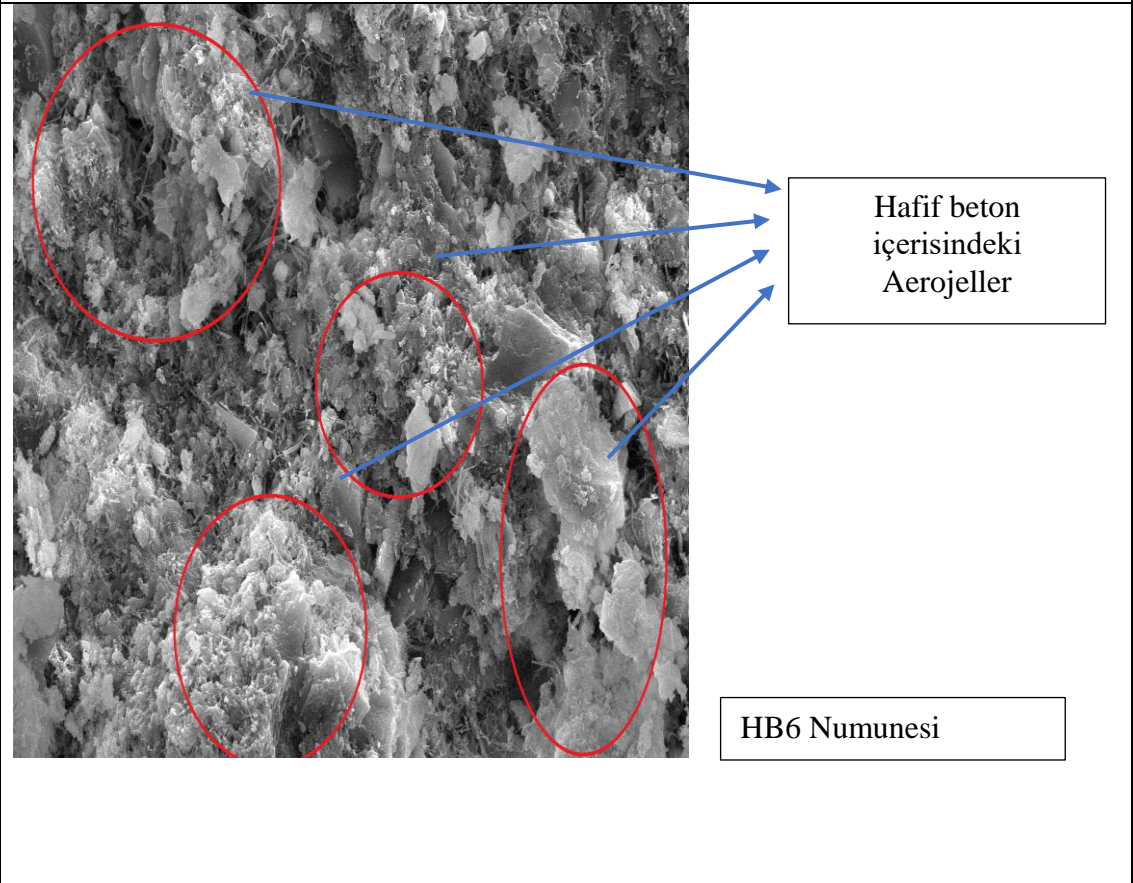
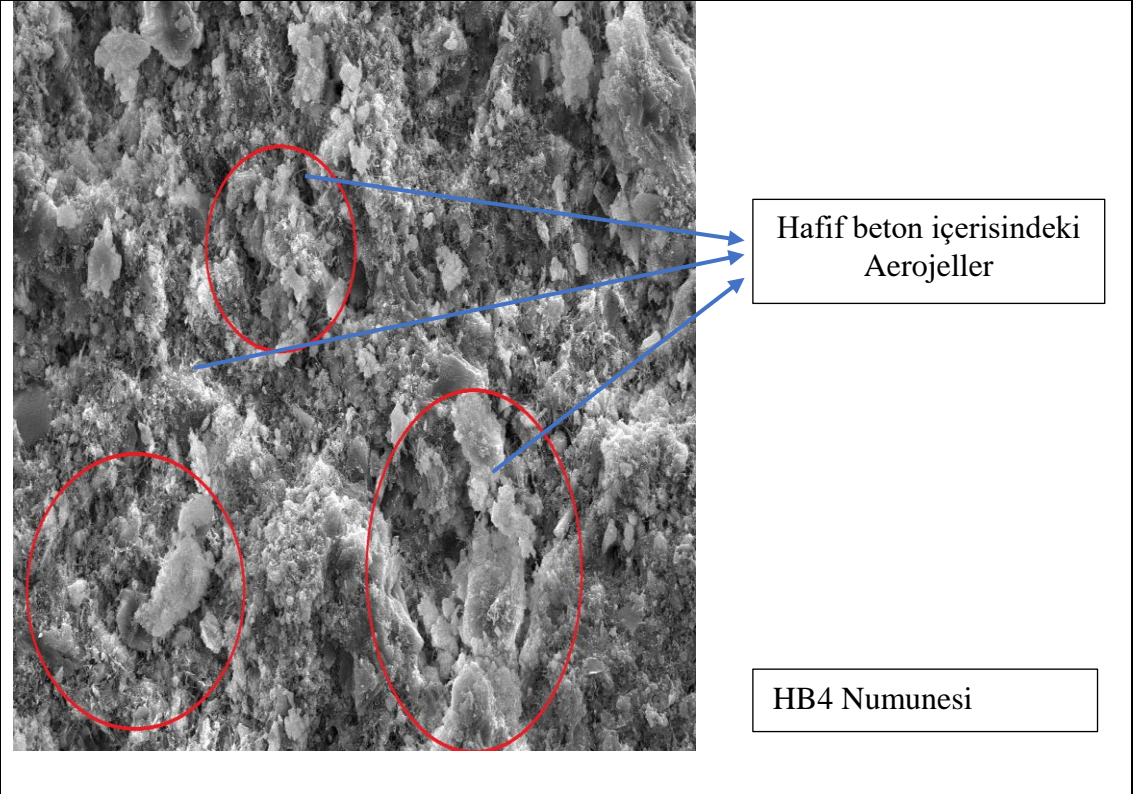


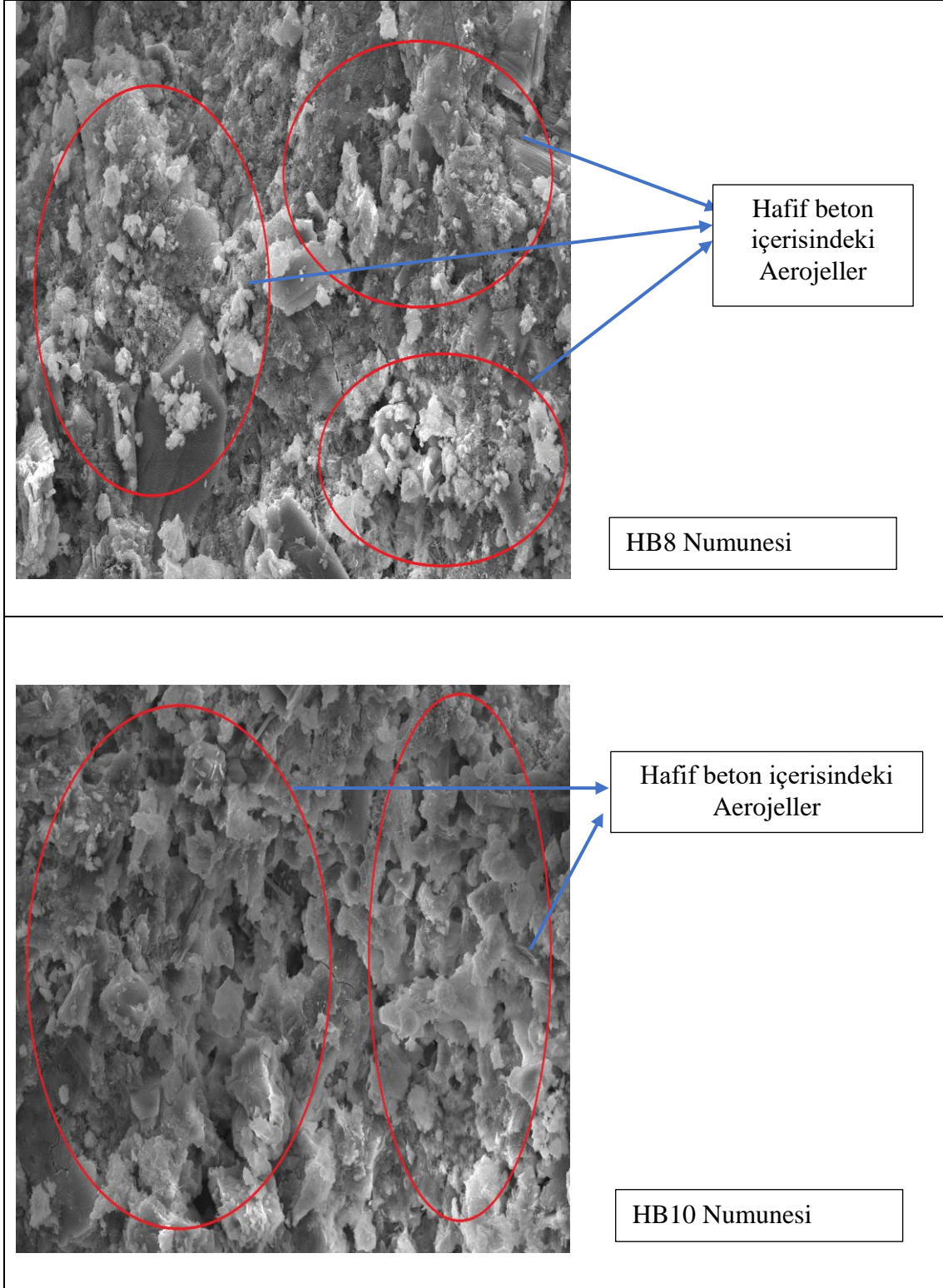
REF Numunesi



Hafif beton içerisindeki
Aerogeller

HB2 Numunesi





Şekil 4.10. REF ve aerjel katkılı hafif beton numunelerinin SEM görüntüleri

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, perlit tabanlı hafif beton bünyesine granüler arojel ikame edilmiş ve granüler arojelin hafif beton üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Granüler arojel miktarının artmasıyla, numunelerin yoğunluklarının azaldığı görülmüştür. En düşük yoğunluk %10 oranında granüler arojel ikameli HB10 numunesinden elde edilmiştir.
- Granüler arojelin yoğunluk değerini düşürmesi, hafif yapı malzemesi üretiminde rahatlıkla kullanılabileceğini göstermektedir.
- Porozite deney sonuçlarına göre hafif beton numunelerine granüler arojel ikamesiyle hafif betonun gözenek yapısının arttığı görülmüştür.
- Tüm numuneler arasında en düşük porozite değeri katkısız REF numunesinden elde edilmiştir.
- Granüler arojelin poroziteyi etkilemesi dolaylı olarak, yoğunluğu, basınç dayanımını, su emmeyi, kompasite değerini ve termal özelliğini etkilemektedir.
- Su emme (ağırlıkça) oranına bakıldığında, en yüksek su emme oranının HB10 numunesine ait olduğu görülmüştür. Yani granüler arojel miktarı arttıkça su emme oranı artmıştır.
- Numunelerin porozite değerleri ve su emme değerlerinin paralel doğrultuda etki ettiği görülmüştür.
- Kompasite değerlerine bakıldığında, porozite değerleriyle ters orantılı olarak değişmiştir. En yüksek değer REF numunesinden en düşük değer HB10 numunesinden elde edilmiştir.
- Granüler arojelin, donma çözülme deneyi sonrasında basınç dayanımını olumsuz yönde etkilediği anlaşılmıştır.
- Donma çözülmenin basınç dayanımına etkisi incelendiğinde, en büyük etkinin HB10 numunesinde gerçekleştiği anlaşılmıştır.
- Isı iletim katsayısı tayini değerleri analiz edildiğinde, en yüksek porozite değerine sahip HB10 numunesinin aynı zamanda en düşük ısı iletim katsayısına sahip olduğu görülmüştür.
- Tez çalışması kapsamında üretilen hafif betonun iyi düzeyde termal özelliklere sahip olduğu anlaşılmıştır.

- Porozite değerinin yüksek olması termal özelliğinin iyileşmesini sağlamıştır.
- Basınç dayanımı değerlerine bakıldığında; granüler aerojel miktarının artması hafif betonun basınç dayanımını azalttığı görülmüştür. En düşük basınç dayanımı HB10 numunesinden elde edilmiştir.
- REF, HB2, HB4, HB6 ve HB8 numunelerinin orta dayanımlı hafif beton, HB10 numunesinin ise az dayanımlı hafif beton sınıfına girdiği görülmüştür.
- Az dayanımlı hafif beton sınıfında yer alan HB10 numunesinin yalıtım betonu olarakta kullanılabileceği anlaşılmıştır.
- Yarmada çekme dayanımı değerleri incelendiğinde; basınç dayanımı ile paralel sonuçlar elde edildiği anlaşılmıştır. En yüksek yarmada çekme dayanımı REF numunesinden elde edilirken en düşük yarmada çekme dayanımı HB10 numunesinden elde edilmiştir.
- SEM görüntüleri incelendiğinde; tüm numunelerin homojen bir karışım elde edilerek üretildiği görülmüştür. REF numunesinin mikro gözenekli tabakalı ve kristal bir yapıda olduğu anlaşılmıştır. Granüler aerojel miktarı arttıkça mikro yapıların yerini makro yapılara, kristal yapının ise amorf yapıya dönüştüğü görülmüştür.
- Makro yapının en fazla olduğu HB10 numunesinin en düşük basınç dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Granüler aerojel ve perlitin yalıtım betonu olarak rahatlıkla kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.
- Granüler arojelin yapı malzemelerinin termal özelliklerinin iyileştirilmesinde rahatlıkla kullanılabileceği anlaşılmıştır.
- Perlit gibi doğal hammaddelerin hafif beton üretiminde kullanılması ile yerel kaynakların üretime katılması desteklenmektedir.
- Tez çalışması kapsamında yapılan araştırma literatürde kalmayıp, seri üretim aşamasına geçirilmelidir.
- Yerel hammaddelerin ve granüler aerojel gibi nano malzemelerin inşaat sektöründe kullanımı desteklenmelidir. Bu destekler sadece üniversite bazına kalmamalı kamu kurum ve kuruluşları da destek vermelidir.

- Perlit ve granüler arojel sadece hafif beton değil diğer yapı malzemelerinin üretiminde hatta yapı elemanlarının üretiminde de kullanılmalıdır.
- Tez çalışması kapsamında elde edilen olumsuz sonuçların (düşük basınç dayanımı gibi) iyileştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmalıdır.
- Enerjinin son derece önemli olduğu şu günlerde, termal özellikleri iyileştirilmiş yapı malzemelerinin üretimi teşvik edilmelidir.
- Granüler arojel ve perlit sadece hafif beton üretiminde değil, tuğla, yalıtım malzemesi veya diğer özel betonların üretiminde de kullanımı konusunda desteklenmelidir.
- Üretilen hafif betonun 90, 120 ve daha uzun günlerdeki etkisi araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Aegerter, M. A., Leventis, N., & Koebel, M. M. (Eds.). (2011). *Aerogels Handbook*. Springer Science & Business Media.
- ACI Committee 213, (1987). *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete*, American Concrete Institute, America.
- Adhikary, S. K., Rudžionis, Ž., & Vaičiukynienė, D. (2020a). Development of flowable ultra-lightweight concrete using expanded glass aggregate, silica aerogel, and prefabricated plastic bubbles. *Journal of Building Engineering*, 31, 101399.
- Adhikary, S. K., & Rudžionis, Z. (2020b). Influence of expanded glass aggregate size, aerogel and binding materials volume on the properties of lightweight concrete. *Materials Today: Proceedings*, 32, 712-718.
- Ahmad, S., Ahmad, S., & Sheikh, J. N. (2023). Silica centered aerogels as advanced functional material and their applications: a review. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 611, 122322.
- Akgöl, Ü. (2023). *Synthesis Of Aerogel Coatings and Investigation of Anti-Icing Performances*, Master Thesis, Ege University Graduate School Of Natural And Applied Sciences, İzmir.
- Alan, S. (2022). *Energy Performance Analysis And Materials Characterization Of Aerogel Insulation Blankets*, Master Thesis, İzmir Institute of Technology, İzmir.
- Al-Daraji, M., & Aljalawi, N. (2024). The effect of kevlar fibers on the mechanical properties of lightweight Perlite Concrete. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(1), 12906-12910.
- Allameh-Haery, H., Kisi, E., Pineda, J., Suwal, L. P., & Fiedler, T. (2017). Elastic properties of green expanded perlite particle compacts. *Powder Technology*, 310, 329-342.
- Alsarayreh, A., BIN, M. L., Othman, R. B. A., Sulaiman, A. B., Poi-Ngian, S.H.E.K., & Mansour, H. (2020). Experimental investigation on structural lightweight aggregate concrete using palm-oil clinker and expanded perlite aggregates. *Journal of Engineering Science and Technology*, 6, 3741-3756.
- Alyousef, R., Benjeddou, O., Soussi, C., Khadimallah, M. A., & Jedidi, M. (2019). Experimental study of new insulation lightweight concrete block floor based on perlite aggregate, natural sand, and sand obtained from marble waste. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019(1), 8160461.

- ASTM C39, (2023), Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, American Society for Testing and Materials International, USA.
- ASTM C 138, (2023). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, American Society for Testing and Materials International, USA.
- ASTM C192, (2024), Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, American Society for Testing and Materials International, USA.
- ASTM C 496, (2017), Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, American Society for Testing and Materials International, USA.
- ASTM C 666, (2017). Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, American Society for Testing and Materials International, USA.
- Aşık, M. (2006). *Structural Lightweight Concrete With Natural Perlite Aggregate And Perlite Powder*, Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural And Applied Sciences, Ankara.
- Ayodele, O. A. (2016). *An Experimental Study on The Properties of Lightweight Concrete with Cold Banded Fly Ash Aggregate in Correlation with Normal Aggregate Concrete*, Master Thesis, University Of Gaziantep Graduate School Of Natural & Applied Sciences, Gaziantep.
- Bakhshi, M., Dalalbashi, A., & Soheili, H. (2023). Energy dissipation capacity of an optimized structural lightweight perlite concrete. *Construction and Building Materials*, 389, 131765.
- Barnat-Hunek, D., Góra, J., Andrzejuk, W., & Łagód, G. (2018). The microstructure-mechanical properties of hybrid fibres-reinforced self-compacting lightweight concrete with perlite aggregate. *Materials*, 11(7), 1093.
- Beikircher, T., & Demharter, M. (2013). Heat transport in evacuated perlite powders for super-insulated long-term storages up to 300° C. *Journal Of Heat Transfer*, 135(5), 051301.
- Bergama Perlit, (2025). Perlit. <https://www.bergamaperlit.com/hizmet/dokum-perlit>. Erişim tarihi:07.05.2025).

- Benjeddou, O., Ravindran, G., & Abdelzaher, M. A. (2023). Thermal and acoustic features of lightweight concrete based on marble wastes and expanded perlite aggregate. *Buildings*, 13(4), 992.
- Bentz, D. P. (2007). Transient plane source measurements of the thermal properties of hydrating cement pastes. *Materials And Structures*, 40, 1073-1080.
- Bomhard, H. (1980). Lightweight concrete structure, potentialities, limits and realities. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 2(4).
- Bulut, H. A. (2024). Examination of mechanical, permeability, and durability properties of sustainable lightweight concrete composites with natural perlite aggregate. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 48(3), 1329-1352.
- Chandra, S. & Berntsson, L. (2002). *Lightweight Aggregate Concrete*. New York: William Andrew Publishing; 2002.
- Chandra S. & Berntsson L. (2003). *Lightweight Aggregate Concrete*, Noyes Publications, New York, 2003.
- Chen, Y. X., & Yu, Q. (2024). Surface modification of miscanthus fiber with hydrophobic silica aerogel for high performance bio-lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 411, 134478.
- Chia, K. S., & Zhang, M. H. (2002). Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete. *Cement And Concrete Research*, 32(4), 639-645.
- Chindaprasirt, P., Nuaklong, P., Zaetang, Y., Sujumnongtokul, P., & Sata, V. (2015). Mechanical and thermal properties of recycling lightweight pervious concrete. *Arabian Journal For Science And Engineering*, 40, 443-450.
- Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J., & Riffat, S. B. (2014a). Optimizing insulation thickness and analysing environmental impacts of aerogel-based thermal superinsulation in buildings. *Energy and Buildings*, 77, 28–39.
- Cui, H. Z., Lo, T. Y., Memon, S. A., & Xu, W. (2012). Effect of lightweight aggregates on the mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete. *Construction And Building Materials*, 35, 149-158.
- Çalapkulu, S. (2024). Dünyanın en hafif katısı aerogel. <https://www.sektorumdergisi.com/dunyanin-en-hafif-katisi-aerogel/>.
- Çelik, E. (2020). *Synthesis of Graphene Aerogel and Its Applications*, Master Thesis, Koç University Graduate School of Sciences and Engineering, İstanbul.

- Çimen, S. (2023). *Volkanik Tüf Atıkları Kullanılarak Üretilen Silika Aerojel Katkılı Hafif Betonun Mühendislik Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bayburt.
- Demirboğa, R., & Gül, R. (2003). The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. *Cement And Concrete Research*, 33(5), 723-727.
- Demirdag, S., Ugur, I., & Sarac, S. (2008). The effects of cement/fly ash ratios on the volcanic slag aggregate lightweight concrete masonry units. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1730-1735.
- Dervin, S., & Pillai, S. C. (2017). An introduction to sol-gel processing for aerogels. Sol-gel materials for energy, *Environment And Electronic Applications*, 1-22.
- Dorcheh, A. S., & Abbasi, M. H. (2008). Silica aerogel; synthesis, properties and characterization. *Journal Of Materials Processing Technology*, 199(1-3), 10-26.
- DPT (Devlet Planlama Teşkilatı), (2001), Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Sekizinci Beş Yıllık (2001-2005) Kalkınma Planı, DPT: 2617-ÖİK: 628, Ankara, 73s.
- ESCSI. (2010). Structural Lightweight Concrete-Featured Projects. Retrieved 2013, from Expanded Shale, Clay and Slate Institute Web Site: <http://www.escsi.org/ContentPage.aspx?id=275>. Erişim Tarihi: 20.01.2025.
- Eser, H. (2014). *High Performance Structural Lightweight Concrete Utilizing Natural Perlite Aggregate And Perlite Powder*, Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural And Applied Sciences, Ankara.
- Felekoğlu, B., & Baradan, B. (2004). Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekanik Özellikleri. <https://www.thbbakademi.org/wp-content/uploads/2020/12/B2004.22.pdf>. Erişim tarihi: 25.01.2025.
- Gao, T., Jelle, B. P., Gustavsen, A., & Jacobsen, S. (2014). Aerogel-incorporated concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 52, 130-136.
- Goldstein, J.I., D.E. Newbury, P. Echlin, D.C. Joy, C.E. Lyman, E. Lifshin, L. Sawyer, and J.R. Michael. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, Kluwer Academic, New York. (2003).
- Gustafsson, S. E. (1991). Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials. *Review Of Scientific Instruments*, 62(3), 797-804.

- Gül, D. (2016). *Characterization And Expansion Behaviour Of Perlite*, Master Thesis, İzmir Institute of Technology, İzmir.
- Güneri, E. (2022). *Development Of Thermally Resistant Soil Material With Pumice, Perlite And Fiber Glass Additives*, PhD. Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University, İzmir.
- He, S., Huang, D., Bi, H., Li, Z., Yang, H., & Cheng, X. (2015). Synthesis And Characterization Of Silica Aerogels Dried Under Ambient Pressure Bed On Water Glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 410, 58-64.
- Holm, T. A., & Bremner, T. W. (2000). *State-Of-Art-Report On High-Strength, High-Durability Structural Low-Density Concrete For Applications In Severe Marine Environments*. U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center.
- Ibrahim, M., Ahmad, A., Barry, M. S., Alhems, L. M., & Mohamed Suhoothi, A. C. (2020). Durability of structural lightweight concrete containing expanded perlite aggregate. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14, 1-15.
- Ismael, S.N.I. (2025). *Utilization Of New Perlite Aggregate Strengthened By Cold-Bonding Process In Lightweight Self-Compacting Concrete Production*, Master Thesis, Harran University Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Şanlıurfa.
- Jelle, B. P. (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions—Properties, requirements and possibilities. *Energy and buildings*, 43(10), 2549-2563.
- Jassem, M., & Fawzi, N. M. (2024). Effect of expanded perlite aggregate and silica fume on some properties of lightweight concrete. *Journal of Engineering*, 30(05), 172-185.
- Jedidi, M., Benjeddou, O., & Soussi, C. (2015). Effect of expanded perlite aggregate dosage on properties of lightweight concrete. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 9(3), 278-291.
- Jiang, T., Wang, Y., Shi, S., Yuan, N., Ma, R., Wu, X., ... & Yu, J. (2022). Compressive behavior of lightweight concrete using aerogel-reinforced expanded polystyrene foams. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01557.
- Karaman, S., Karaipekli, A., Sarı, A., & Biçer, A. (2011). Polyethylene glycol (PEG)/diatomite composite as a novel form-stable phase change material for

- thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(7), 1647-1653.
- Karaman M.E & Kibici Y. (1999). *Temel Jeoloji Prensipleri*, Devran Matbaacılık, Ankara, 1999, (in Turkish).
- Kadela, M., Małek, M., Jackowski, M., Kunikowski, M., Klimek, A., Dudek, D., & Rośkowicz, M. (2023). Recycling of tire-derived fiber: The contribution of steel cord on the properties of lightweight concrete based on perlite aggregate. *Materials*, 16(5), 2124.
- Kılıç, A., Atış, C. D., Yaşar, E., & Özcan, F. (2003). High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures. *Cement And Concrete Research*, 33(10), 1595-1599.
- Kılınc, Ö. (2024). *Doğal Hammadde Ve Atıklardan Alümina-Silika Esaslı Aerojel Üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Kistler, S. S. (1932). Coherent Expanded Aerogels. *Rubber Chemistry and Technology*, 5 (4), 600–603.
- Khonsari, V., Eslami, E., & Anvari, A. (2010, May). *Effects Of Expanded Perlite Aggregate (EPA) On The Mechanical Behavior Of Lightweight Concrete*. In Proceedings of the 7th international conference on fracture and mechanics of concrete & concrete structure (FraMCoS-7), Jeju, Korea (pp. 1354-1361).
- Kocataşkın, F. (1991). *Betonun Dünü Bugünü Yarını*, 2. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton, Kardeşler Matbaası,(TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası) Sf, 23-42.
- Kumar, D., Alam, M., & Sanjayan, J. (2023). Experimental and numerical investigation of novel light weight concrete panels made with aerogel and phase change materials. *Energy and Buildings*, 283, 112836.
- Liu, J., Dong, Y., Dong, X., Hampshire, S., Zhu, L., Zhu, Z., & Li, L. (2016). Feasible recycling of industrial waste coal fly ash for preparation of anorthitecordierite based porous ceramic membrane supports with addition of dolomite. *Journal of the European Ceramic Society*, 36(4), 1059–1071.
- Mancı, A., & Saruşık, A. (2019). Investigation of the Effect of Cement Amount and Boron Waste on Early Strength of Pumice Aggregate Lightweight Concrete. *I Civiltech*, 124, 2019.

- Mehta, P., and Monteiro, P. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*, Third edition, McGraw-Hill, New York.
- Mekaddem, N., Ali, S. B., Fois, M., & Hannachi, A. (2019). Paraffin/expanded perlite/plaster as thermal energy storage composite. *Energy Procedia*, 157, 1118-1129.
- Mercan, E. (2021). *Production of Aerogel-Modified Expanded Perlite Aggregate and Clay (AEP/C) Board and Investigation of Physical and Mechanical Properties*, Master Thesis, Department of Interior Architecture and Environmental Design İhsan Doğramacı Bilkent University, Ankara.
- Mohammadi, Y., & Dadashi, M. (2018). The Effect of Steel Fibers and Nano-Silica on the Structural Lightweight Concrete Built with Different Combinations of Leca and Perlite. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 47(89), 75-84.
- Mohammed, A., & Abdullah, A. (2018, November). *Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review*. In Proceedings of the 2018 international conference on hydraulics and pneumatics—HERVEX, Băile Govora, Romania (Vol. 2018, pp. 7-9).
- Monteiro, P. (2006). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Publishing, 2006.
- Murımı, M. (2020). *Synthesis And Characterization Of Perlite Filled Bio-Based Polyurethane Composites With Low Thermal Conductivity*, Master Thesis, Istanbul University-Cerrahpasa Institute Of Graduate Studies, İstanbul.
- Narayanan, N., & Ramamurthy, K. (2000). Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, 22(5), 321-329.
- Neville, A.M. (1996). *Properties of concrete*, England: Addison Wesley Longman Limited, pp. 282–283.
- Neville, A., M., and Brooks, J. (2010). *Concrete Technology*, second edition, Prentice Hall, Pearson Education.
- Okuyucu, D., Turanlı, L., Uzal, B., & Tankut, T. (2011). Some characteristics of fibre-reinforced semi-lightweight concrete with unexpanded perlite. *Magazine of Concrete Research*, 63(11), 837-846.
- Oral, B. (2021). *Investigation Of The Effect Of Sepiolite Clay, Silica Aerogel Fillers And Cnsl Content On The Properties Of Organic Brake Pad Composites*, Master Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Ankara Yıldırım Beyazıt University, Ankara.

- Othman, M., Sarayreh, A., Abdullah, R., Sarbini, N., Yassin, M., & Ahmad, H. (2020). Experimental study on lightweight concrete using lightweight expanded clay aggregate (LECA) and expanded perlite aggregate (EPA). *Journal of Engineering Science and Technology (JESTEC)*, 15(2), 1186-1201.
- Öz, D. C., Öz, B., & Kaya, N. (2018). *Alümina Aerojellerin Fiziksel Özellikleri Üzerine Yaşlandırma Ve Kurutma Süresinin Etkisi*. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 20(1), 198-211.
- Özel Betonlar, (2025). Özel Betonlar. <https://www.thbbakademi.org/ozel-beton-cesitleri-avantajlari-ve-dezavantajlari/>. Erişim Tarihi: 27.12.2024.
- Persan, (2025). Perlitin fiziksel ve kimyasal özellikleri. <https://persanyapi.com.tr/urun-kategori/perlit-grubu/tasnif-edilmis-ham-perlit>. Erişim Tarihi:25.04.2025.
- Pierre, A. C., & Pajonk, G. M. (2002). Chemistry of aerogels and their applications. *Chemical Reviews*, 102(11), 4243-4266.
- Poco, J. F., Satcher Jr, J. H., & Hrubesh, L. W. (2001). Synthesis of high porosity, monolithic alumina aerogels. *Journal of non-crystalline solids*, 285(1-3), 57-63.
- Pramusanto, P., Nurrochman, A., Mamby, H. E., & Nugraha, P. (2020, April). *High Strength Lightweight Concrete With Expandable Perlite As The Aggregate*. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 830(4), p. 042040). IOP Publishing.
- Prevolnik, V., Zrim, P. K., & Rijavec, T. (2014). Textile technological properties of laminated silica aerogel blanket. *Contemporary Materials*, 5(1), 117-123.
- Qasim, O. A. (2018). Perlite powder and steel fiber effects on properties of light weight concrete. *Technology*, 9(1), 371-387.
- Qasim, A. J., & Fawzi, N. M. (2024). Influence of Sustainable Materials and Glass Fibers on Properties of Lightweight Perlite Concrete. *Journal of Engineering*, 30(10), 150-168.
- Rashad, A. M. (2016). A synopsis about perlite as building material – A best practice guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*, 121, 338–353.
- Riffat, S. B., & Qiu, G. (2013). A review of state-of-the-art aerogel applications in buildings. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 8(1), 1–6.
- Rossignolo, J. A., & Agnesini, M. V. (2002). Mechanical properties of polymer-modified lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 32(3), 329-334.

- Rudžionis, Ž., & Tučkutė, S. (2020). Effects of Carbon Nanotubes on the Properties of Lightweight Concrete Prepared With Expanded Glass and Hydrophobic Silica Aerogel.
- Sağlık, A.Ü. (2009). *Alkali-Silica Reactivity And Activation Of Ground Perlite-Containing Cementitious Mixtures*, Master Thesis, Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University, Ankara.
- Sai, K., Srikanth, K., & Chaitra, K. (2025). Effect of natural perlite aggregate and its powder on properties of light weight concrete. *International Journal of Advances in Agricultural Science and Technology*, 12(4), 124-129.
- Saikiran, M., & Rajeshwari, C. (2023). The Effects of Natural Perlite Aggregate and Perlite Powder on the Properties of Structural Light-Weight Concrete. *Innovations*, 74 October 2023, 72-81.
- Sari, D., & Pasamehmetoglu, A. G. (2005). The effects of gradation and admixture on the pumice lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 936-942.
- Schmidt, M., & Schwertfeger, F. (1998). Applications for silica aerogel products. *Journal Of Non-Crystalline Solids*, 225, 364-368.
- Sengul, O., Azizi, S., Karaosmanoglu, F., & Tasdemir, M. A. (2011). Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. *Energy and Buildings*, 43(2-3), 671-676.
- Sharma, B., Sharma, R., & Bansal, P. P. (2022). Effect of fine aggregate replacement with expanded perlite and pumice on the development of lightweight concrete. *Australian Journal of Civil Engineering*, 20(1), 115-129.
- Shohan, A. A. A., Zaid, O., Arbili, M. M., Alsulamy, S. H., & Ibrahim, W. M. (2024). Development of novel ultra-high-performance lightweight concrete modified with dehydrated cement powder and aerogel. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 13(3), 351-374.
- Slaby, A. A., Aziz, K. I., & Hadeed, A. F. (2008). Mechanical properties of porcelinite reinforced concrete beams. *Iraqi Journal of Civil Engineering*, (10), 1-24.
- Sriwattanapong, M., Sinsiri, T., Pantawee, S., & Chindaprasirt, P. (2013). A study of lightweight concrete admixed with perlite. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 20(3), 227-234.
- Stergar, J., & Maver, U. (2016). Review of aerogel-based materials in biomedical applications. *Journal of Sol-Gel Science Technology*, 77, 738–752.

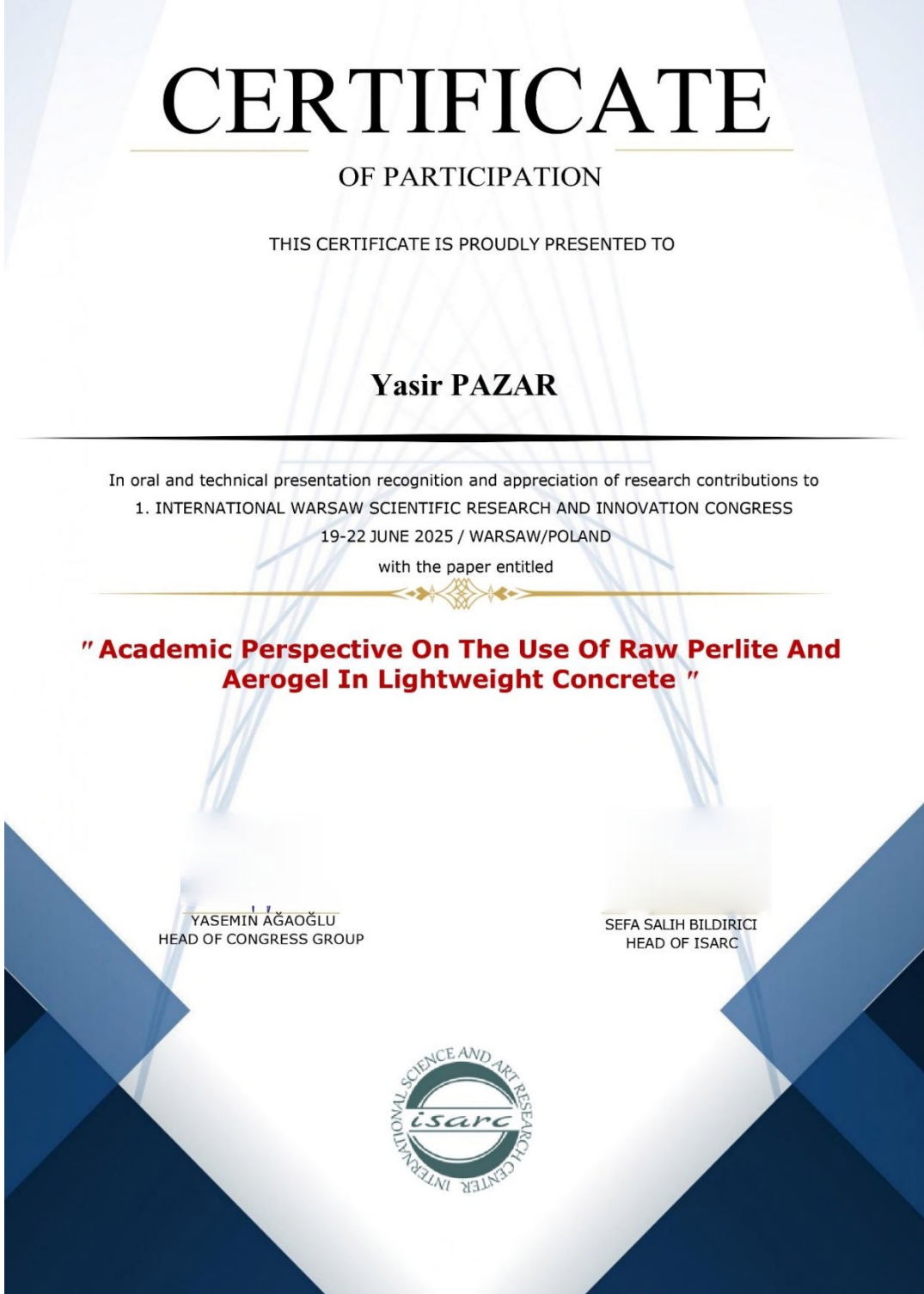
- Strzałkowski, J., & Garbalińska, H. (2016). Thermal and strength properties of lightweight concretes with the addition of aerogel particles. *Advances in Cement Research*, 28(9), 567-575.
- Şengül, K. (2018). *Influence Of Perlite Addition On The Strength Development And Thermal Stability Of Calcium Aluminate Cement Mortars*, Master Thesis, The Graduate Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University, Ankara.
- Tapan, M., & Engin, C. (2019). Effect of expanded perlite aggregate size on physical and mechanical properties of ultra lightweight concrete produced with expanded perlite aggregate. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(3), 845-855.
- Taşdemir, M.A. (1982). Taşıyıcı hafif agregalı betonların elastik ve elastik olmayan davranışları. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi.
- Tekin, N., Kadıncı, E., Demirbaş, Ö., Alkan, M., Kara, A., & Doğan, M. (2006). Surface properties of poly(vinylimidazole)-adsorbed expanded perlite. *Microporous and Mesoporous Materials*, 93(1-3), 125-133.
- Top, S., Vapur, H., Altiner, M., Kaya, D., & Ekicibil, A. (2020). Properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete prepared using pumice and expanded perlite as aggregates. *Journal of Molecular Structure*, 1202, 127236.
- Topçu, İ. B., & Işıkdag, B. (2008). Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete. *Journal Of Materials Processing Technology*, 204(1-3), 34-38.
- TS EN 12390-7, (2002). Testing hardened concrete - Part 7: Density of hardened concrete, Tüek Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Ulus, İ., Yılmaz, D., Uzunoğlu, Z., & Akaltun, Y. (2018). Determination of Mass Attenuation Coefficients of High Strength Lightweight Concrete Which Producing Using Raw Perlite Aggregate. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 11(3), 610-616.
- USGS, 2015 Minerals year book - Perlite (advance release), <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/perlite/myb1-2015-perli.pdf>, 2015.
- Web İleti 1. <http://www.poderesantapia.com/album/sur18.htm>. Erişim Tarihi:20.03.2025
- Web İleti 2. <https://www.diyenet.gov.tr/tr-tr/Kurumsal/Detay/29684/din-isleri-yuksekkurulundan-ayasofya-camii-ile-ilgili-aciklama>. Erişim Tarihi: 20.03.2025.
- Web İleti 3. <https://www.pantheonroma.com/home-eng/>. Erişim Tarihi:21.03.2025.

- Web İleti 4. https://en.wikipedia.org/wiki/Pont_du_Gard. Erişim Tarihi: 21.03.2025.
- Web İleti 5. <https://www.livescience.com/roman-colosseum>. Erişim Tarihi:22.03.2025.
- Web İleti 6. <https://buildingsdb.com/IL/chicago/one-prudential-plaza/>. Erişim Tarihi: 19.03.2025.
- Web İleti 7. <https://www.booking.com/hotel/us/the-statler-dallas-curio-collection-by-hilton.tr.html?activeTab=photosGallery>. Erişim Tarihi: 19.03.2025.
- Web İleti 8. https://en.wikipedia.org/wiki/Stolma_Bridge#/media/File:Stolmabrua01-edit.JPG. Erişim Tarihi: 19.03.2025.
- Web İleti 9. <https://www.offshore-mag.com/regional-reports/north-sea-europe/article/55039554/equinor-strengthening-position-in-heidrun-following-norway-field-transactions>. Erişim Tarihi:22.03.2025.
- Wolfthaler, A., Harsányi, P., & Schneider, M. (2023, October). *Development and Performance of High Strength Lightweight Concrete with Perlites*. In International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques (pp. 126-133). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Yan, G., Al-Mulali, M. Z., Madadi, A., Albaijan, I., Ali, H. E., Algarni, H., ... & Assilzadeh, H. (2022). Effect of perlite powder on properties of structural lightweight concrete with perlite aggregate. *Structural Engineering and Mechanics*, 84(3), 393-411.
- Yıldırım, H. (2012). *Mechanical Properties Of Lightweight Concrete Made With Fiber Reinforced Fly Ash Pellets*, Master Thesis, Graduate Program in Civil Engineering Boğaziçi University, İstanbul.
- Yılmaz, S.C. (2024). *Nevşehir Bölgesi Pomzası Ve Pirinç Kabuğu Külünün Hafif Beton Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırşehir.
- Yu, Q. L., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2015). Ultra-lightweight concrete: Conceptual design and performance evaluation. *Cement and Concrete Composites*, 61, 18-28.

EKLER

EK-1

- Kongre Katılım Belgesi



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER	
Adı Soyadı	Yasir PAZAR
Uyruğu	TC
Orcid Numarası	0009-0002-4052-6050

EĞİTİM BİLGİLERİ	
Lisans	
Üniversite	Yıldız Teknik Üniversitesi
Fakülte	İnşaat Fakültesi
Bölümü	İnşaat Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2016
Yüksek Lisans	
Üniversite	Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi
Enstitü	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Mezuniyet Yılı	2025

Tezden Üretilen Makaleler ve Bildiriler
Uluslararası Konferans ve Sempozyumlarda Sunulan Bildiriler Yasir PAZAR, Hakan Çağlar, Arzu ÇAĞLAR, "Academic Perspective On The Use Of Raw Perlite And Aerogel In Lightweight Concrete", Yayın Yeri: 1. International Warsaw Scientific Research And Innovation Congress, 2025