



**GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİT ESASLI YENİ NESİL KOMPOZİT ISI
YALITIM PANELLERİNDE TERMAL İLETKENLİK DEĞERLERİN
İYİLEŞTİRİLMESİ**

Hazal Cemile TOPUZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

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

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Hazal Cemile TOPUZ

23/06/2022

GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİT ESASLI YENİ NESİL KOMPOZİT ISI YALITIM PANELLERİNDE TERMAL İLETKENLİK DEĞERLERİN İYİLEŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazal Cemile TOPUZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2022

ÖZET

Bu çalışma kapsamında, geliştirilmiş perlit esaslı köpük betonlara granül polistren köpük ve silika aerojel tabakası belirli oranlarda eklenerek, köpük betonlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Köpük betonlar 0,45 su/çimento oranında 480 kg/m^3 kuru yoğunluğa sahiptir. Deney programında fiziksel testler (kuru yoğunluk tayini, hacimce su emme ve kapiler su emme tayini, ultra geçiş hızı tayini), mekanik testler (eğilme ve basınç dayanımı tayini), durabilite testleri (asit direnci ve donma-çözünme direnci tayini), son olarak ısı iletkenlik katsayısının ve elektriksel iletkenlik katsayısının belirlenmesi için testler uygulanmıştır. Köpük beton numunelerindeki geliştirilmiş perlit oranı, granül polistren köpük oranı ve silika aerojel katkısı, elde edilen kuru yoğunluklarla ve iki farklı çimento türüne göre karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ayrıca mekanik özellikler için ise kür koşullarının dayanıma etkileri araştırılmıştır. Deneysel programa göre 360 adet numune üretilmiştir. Sonuç olarak, geliştirilmiş perlit ve granül polistren köpük kullanımının artması termal özellikleri iyileştirirken dayanımı olumsuz yönde etkilediği ortaya çıkmıştır. CEM II tip çimento kullanımı da tüm özellikleri olumlu etkilediği gözlemlenmiştir. En düşük ısı iletkenlik katsayısı, CEM II-Gp100Pk75 numaralı numunede $0,09848 \text{ W/m.K}$ olarak elde edilmiştir. Bu numunede, kuru yoğunluk değeri $427,67 \text{ kg/m}^3$ ve basınç dayanımı su kürü etkisi ile 2,1 MPa değerindedir. Tüm veriler değerlendirildiğinde köpük betonların ısı yalıtım paneli olarak kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır.

Bilim Kodu : 91127

Anahtar Kelimeler : Köpük beton, Geliştirilmiş perlit agregası, Granül polistren köpük, Silika aerojel, Isıl iletkenlik

Sayfa Adedi : 101

Danışman : Doç. Dr. Gökhan DURMUŞ

IMPROVING THERMAL CONDUCTIVITY VALUES IN EXPANDED PERLITE BASED NEW GENERATION COMPOSITE THERMAL INSULATION PANELS

(M. Sc. Thesis)

Hazal Cemile TOPUZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2022

ABSTRACT

Within the scope of this study, granular polystyrene foam and silica aerogel layers were added to the expanded perlite-based foam concrete in certain proportions, and their effects on foam concrete were investigated. It was applied in the experimental program that physical tests (detection of dry density, determination of water absorption by volume and capillary water absorption, determination of ultra-transition velocity), mechanical tests (detection of flexural and compressive strength), durability tests (determination of acid resistance and freeze-thaw resistance) and finally tests for determining the thermal conductivity coefficient and electrical conductivity coefficient. Expanded perlite ratio, granular polystyrene foam ratio and silica aerogel additive in foam concrete samples were compared with the obtained dry densities and two different cement types. In addition, the effects of curing conditions on strength were investigated for mechanical properties. 360 samples were produced according to the experimental program. As a result, it has been revealed that the increase in the use of expanded perlite and granular polystyrene foam improves the thermal properties and adversely affects the strength. It has been observed that the use of CEM II type cement has a positive effect on all properties. The lowest thermal conductivity coefficient was obtained as 0.09848 W/m.K in the sample numbered CEM II-Gp100Pk75. In this sample, the dry density value is 427.67 kg/m³ and the compressive strength is 2.1 MPa with the effect of water curing. When all the data were evaluated, it was concluded that foam concrete could be used as a thermal insulation panel.

Science Code : 91127

Key Words : Foam concrete, Expanded perlite aggregate, Granular polystyrene foam, Silica aerogel, Thermal conductivity

Page Number : 101

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Gökhan DURMUŞ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam için bana yol gösteren, bilgi ve birikimini tereddütsüzce aktaran, çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Gökhan DURMUŞ'a teşekkür ediyorum.

Her zaman yanımda olan, maddi ve manevi destek veren başta annem Şükran TOPUZ, babam Ramazan TOPUZ, abim Volkancan TOPUZ ve tüm aileme, ayrıca arkadaşlarım ve Vildan DOĞAN, Gülay ASLAN ve Duygu TALAY'a ve Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Laboratuvarı çalışanlarına sonsuz teşekkür ediyorum.

Çalışmamda kullanmak üzere malzeme desteği sağlayan Prof. Dr. Bilal DEMİREL hocama ve sayın Cihan OKUR'a teşekkür ediyorum.

Emek vererek yapmış olduğum bu çalışmanın, gelecekte yapılacak çalışmalar için yol göstermesini dilerim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
2.1. Isı Yalıtımı Kavramı	3
2.2. Isı Yalıtım Malzemeleri	4
2.2.1. Geleneksel ısı yalıtım malzemeleri.....	7
2.2.2. Yeni nesil ısı yalıtım malzemeleri	19
2.3. Hafif Beton.....	25
2.3.1. Hafif betonların sınıflandırılması	26
2.4. Köpük Beton	27
2.4.1. Köpük betonun özellikleri	28
2.4.1. Köpük betonun kullanım alanları	31
2.5. Isıl İletkenliğin Tespitinde Kullanılan Matematiksel Modeller	36
2.5.1. Seri ve paralel modeller	36
2.5.2. Geometrik ortalama model	37
2.5.3. Maxwell teorik modeli.....	37
2.5.4. Efektif ortam teorisi (EMT).....	38
2.5.5. Lewis ve Nielsen modeli	39

	Sayfa
2.5.6. Halpin-Tsai modeli	40
2.5.7. Levy modeli.....	41
2.5.8. Russell modeli	41
2.5.9. Diğer modeller	42
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	43
3.1. Malzemeler.....	43
3.1.1. Çimento	43
3.1.2. Genleştirilmiş perlit	43
3.1.3. Polistren köpük	45
3.1.4. Silika arojel	45
3.1.5. Su	46
3.1.6. Köpük ajanı.....	46
3.2. Yöntem.....	47
3.2.1. Köpük beton numunelerin üretimi.....	48
3.2.2. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi.....	50
3.2.3. Mekanik özelliklerin belirlenmesi	53
3.2.4. Termal özelliklerin belirlenmesi.....	54
3.2.5. Durabilite özelliklerinin belirlenmesi	55
3.2.6. Elektriksel özelliklerinin belirlenmesi.....	56
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	59
4.1. Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi.....	59
4.1.1. Kuru yoğunluk deney bulguları	59
4.1.2. Hacimce su emme deney bulguları.....	60
4.1.3. Kapiler su emme deney bulguları	62
4.1.4. Ultra geçiş hızı deney bulguları ve elastite modülünün belirlenmesi.....	63

	Sayfa
4.2. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi	65
4.2.1. Eğilme dayanımı deney bulguları	65
4.2.2. Basınç dayanımı deney bulguları	69
4.3. Termal Özelliklerin Belirlenmesi	72
4.3.1. Isıl iletkenlik katsayılarının belirlenmesine ait deney bulguları	72
4.4. Durabilite Özelliklerinin Belirlenmesi	74
4.4.1. Asit direncinin belirlenmesine ait deney bulguları	74
4.4.2. Donma-çözünme direncinin belirlenmesine ait deney bulguları	77
4.5. Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi	79
4.5.1. Elektriksel öz direncinin belirlenmesine ait deney bulguları	79
4.6. Isıl İletkenlik Katsayısının Matematiksel Modeller ile Karşılaştırılması	82
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	85
KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ	101

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Türkiye’de elektrik üretim-tüketim istatistikleri	3
Çizelge 2.2. Isı yalıtım malzemelerinin gelişimi	5
Çizelge 2.3. Isı yalıtım malzemelerinden beklenen özellikler	6
Çizelge 2.4. Isı yalıtım malzemelerinin eşdeğer ısıl geçirgenlik ($R_{eş}$) sağlayan kalınlıklarına göre maliyetleri	8
Çizelge 2.5. Ham perlitin fiziksel özellikleri	13
Çizelge 2.6. Genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri	13
Çizelge 2.7. Perlitin kimyasal bileşimi	13
Çizelge 2.8. 2013-2016 yılları arası perlit üretimi, ihracatı, ithalatı	14
Çizelge 2.9. Vakum yalıtım panellerinin maliyet örnekleri	21
Çizelge 2.10. EPS ve aerjel katkılı betonların özellikleri	23
Çizelge 2.11. Hafif betonların yoğunluklarına göre sınıflandırılması	26
Çizelge 2.12. LWC-FC özellikleri	32
Çizelge 2.13. Köpük beton ve tuğlanın özelliklerinin karşılaştırılması	33
Çizelge 2.14. Lewis-Nielsen modeli için bazı w değerleri	39
Çizelge 2.15. Lewis-Nielsen modeli için bazı V değerleri	40
Çizelge 3.1. CEM I ve CEM II çimentolarına ait özellikler	43
Çizelge 3.2. Genleştirilmiş perlit agregasının özellikleri	43
Çizelge 3.3. Genleştirilmiş perlitin kimyasal bileşimi	44
Çizelge 3.4. Granül polistren köpüğün fiziksel özellikleri	45
Çizelge 3.5. Silika aerjelin fiziksel özellikleri	46
Çizelge 3.6. Ankara şebeke suyu fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları	46
Çizelge 3.7. Lightcon 28 köpük ajanının özellikleri	46
Çizelge 3.8. Karışım oranları	48
Çizelge 4.1. Köpük betonlara ait ısı iletkenlik katsayıları λ (W/m.K)	72

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.2. Asit çözeltisinde bekleyen numunelerin basınç dayanımı değerleri.....	75
Çizelge 4.3. CEM I ve CEM II tipi çimentoların kullanıldığı köpük betonların elektriksel özdirenç değerleri (kohm.m).....	79

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Genleştirilmiş perlit agregasının gradasyonu	45
Şekil 4.1. Köpük betonların kuru yoğunluk değişimleri.....	59
Şekil 4.2. Köpük betonların hacimce su emme değerleri	61
Şekil 4.3. CEM I çimento tipine ait numunelerin KSE katsayıları ve kuru yoğunluk ilişkisi	62
Şekil 4.4. CEM II çimento tipine ait numunelerin KSE katsayıları ve kuru yoğunluk ilişkisi	62
Şekil 4.5. Köpük betonların UGH deney bulguları.....	63
Şekil 4.6. CEM I ve CEM II tip çimentoların kullanıldığı köpük betonların kuru yoğunluk-dinamik elastisite modülleri karşılaştırması.....	64
Şekil 4.7. Farklı kürlerde CEM I çimento tipinin kullanıldığı köpük betonların eğilme dayanımları	66
Şekil 4.8. Farklı kürlerde CEM II çimento tipinin kullanıldığı köpük betonların eğilme dayanımları	67
Şekil 4.9. Hava ve su kürünün eğilme dayanımına etkisi	68
Şekil 4.10. Farklı kürlerde CEM I çimento tipinin kullanıldığı köpük betonların basınç dayanımları.....	69
Şekil 4.11. Farklı kürlerde CEM II çimento tipinin kullanıldığı köpük betonların basınç dayanımları.....	70
Şekil 4.12. Hava kürü ve su kürünün basınç dayanımına etkisi	71
Şekil 4.13. CEM I çimento tipinin kullanıldığı köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları ve kuru yoğunluk karşılaştırması.....	73
Şekil 4.14. CEM II çimento tipinin kullanıldığı köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları ve kuru yoğunluk karşılaştırması.....	73
Şekil 4.15. CEM I çimento tipinin kullanıldığı köpük betonların asit sonrası dayanım kaybı (%)	75
Şekil 4.16. CEM II çimento tipinin kullanıldığı köpük betonların asit sonrası dayanım kaybı (%)	76
Şekil 4.17. CEM I tipi çimentonun kullanıldığı köpük betonların donma-çözünme sonrası kütle kaybı- kuru yoğunluk ilişkisi	77

Şekil	Sayfa
Şekil 4.18. CEM II tipi çimentonun kullanıldığı köpük betonların donma-çözünme sonrası kütle kaybı- kuru yoğunluk ilişkisi	78
Şekil 4.19. CEM I çimento tipinin kullanıldığı köpük betonların elektriksel iletkenlik-kuru yoğunluk karşılaştırması	80
Şekil 4.20. CEM II çimento tipinin kullanıldığı köpük betonların elektriksel iletkenlik-kuru yoğunluk karşılaştırması	81
Şekil 4.21. Isıl iletkenlik katsayısının matematiksel modellerle tespiti	82

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Taş yünü (a) ve cam yünü (b)	8
Resim 2.2. EPS köpük panel (a) ve XPS köpük panel (b)	9
Resim 2.3. Poliüretan köpük	10
Resim 2.4. Cam köpüğü	10
Resim 2.5. Fenol köpüğü	11
Resim 2.6. Perlit ürünleri	12
Resim 2.7. Vakum yalıtım paneli	20
Resim 2.8. Gazla doldurulmuş panel	21
Resim 2.9. Aerojel	22
Resim 2.10. Gazbeton sınıflandırılması	27
Resim 3.1. Numune üretim aşamaları	49
Resim 3.2. Isı yalıtım panellerinde silika aerojelin kullanımı	50
Resim 3.3. Isı akış ölçer yönteminin şematize edilmesi	54
Resim 3.4. Isıl iletkenlik katsayısının belirlenmesinde kullanılan cihaz	55
Resim 3.5. Asit çözeltisi içerisinde bekleyen köpük beton numuneleri	56
Resim 3.6. Elektriksel iletkenlik değerlerinin ölçülmesi	57
Resim 4.1. Eğilme testi sonucu kırılan numune örneği	68
Resim 4.2. Asit çözeltisine maruz kalan köpük beton numunelerin görünümü	75
Resim 4.3. Donma-çözünme döngüsüne maruz bırakılan köpük beton numune örnekleri	77

SİMGELER VE KISALTMALAR

Çalışmada kullanılan simgeler ve kısaltmalar açıklamaları ile birlikte aşağıda gösterilmiştir.

Simgeler

Açıklamalar

A	Yüzey alanı
E	Elastisite modülü
k	Kapiler su emme katsayısı
L	Uzunluk
M	Kütle
M₀	Numunenin ilk kütlesi
M_k	Etüvde kurutulmuş malzemenin kütlesi
R	Direnç
t	Zaman
V	Hacim
V	Ultra geçiş hızı
w	Su emme kapasitesi
ρ_k	Kuru yoğunluk
φ	Poisson oranı
σ_f	Eğilme dayanımı
σ_c	Basınç dayanımı
ω_m	Donma-çözünme sonucu kütle kaybı
δ	Elektriksel özdirenç
λ	Isıl iletkenlik katsayısı

Kısaltmalar

Açıklamalar

AB	Avrupa Birliği
ASTM	American Society for Testing and Materials
BDD	Basınç Dayanımı Değişimi
CEN	Avrupa Standart Komitesi

Kısaltmalar**Açıklamalar****DIN**

Alman Standartlar Enstitüsü

DPT

Devlet Planlama Teşkilatı

EPS

Genleştirilmiş Polistren Köpük

GP

Genleştirilmiş Perlit

IEA

Uluslararası Enerji Ajansı

ISO

Uluslararası Standart Örgütü

MTA

Maden Tetkik ve Arama

PK

Polistren Köpük

TEİAŞ

Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi

XPS

Ekstrüde Polistren Köpük

1. GİRİŞ

Ekonomik ve çevresel bozulmaların önümüzdeki yıllarda artacağı göz önünde bulundurularak, dünyada sürdürülebilirliğin sağlanması için önemli bir kavram olarak enerji tüketimi kavramı önümüze çıkmaktadır. Bu durumun inşaat sektöründeki etkileri; enerji verimli binalar ve termal performansı yüksek inşaat malzemeleri elde etmektir. Bu tür enerji verimliliği yüksek binalar elde etmenin en önemli yolu, yapıların ısı yalıtım özelliklerini iyileştirmektir. Binalardaki ısı kaybının azaltılması enerji tüketimini azaltmakta, ısıtma ve soğutma maliyetlerini düşürmektedir (Sengul, Azizi, Karaosmanoglu, ve Tasdemir, 2011).

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı “Enerji Verimliliği Stratejisi” belgesini, 24 Haziran 2004 yılında onaylayarak, Türkiye’deki nihai enerji tüketim sektörlerinin enerji verimliliğini, AB standartlarına çekmeyi hedeflemektedir. Devlet Planlama Teşkilatı raporlarına göre 2012-2020 Enerji Verimliliği Strateji Belgesi’nin amacı, enerji verimli yüksek binaların enerji taleplerini ve karbon emisyonlarını azaltmak ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanan sürdürülebilir çevre dostu binaları yaygınlaştırmaktır. Avrupa Komisyonu Enerji ve Ulaşım Genel Müdürlüğü’nün yaptığı çalışmalara göre, toplam enerji tüketim dağılımının %40’ı binalar, %32’si ulaşım ve %28’i endüstri sektörü olarak belirlenmiştir. Binalarda kullanılan enerjinin %85’inin ise ısıtma soğutma giderleri için harcandığını bildirmişlerdir.

Sürdürülebilirlik ve ekolojik tasarım konusunda son yıllarda inşaat sektöründe birçok çalışma ve uygulama bulunmaktadır. Yeşil bina tasarım standartlarına göre sertifika veren “Enerji ve Çevre Dostu Tasarımda Liderlik (Leadership in Energy and Environmental Design - LEED)”, “Bina Araştırmaları Kurumu Çevresel Değerlendirme Metodu (Building Research Establishment Environmental Assessment Method - BREAM)” gibi uluslararası yeşil bina değerlendirme sistemleri Türkiye’de de uygulanmaktadır. Yeşil bina tasarımında göz önüne alınan kriterler arasında, yapının enerji verimliliğini üst düzeyde tutmak amacını taşıyan termal konfor şartı bulunmaktadır (Arslan ve Aktaş, 2018). Yalıtım teknolojileri sayesinde termal konfor şartı sağlayan, enerji kaybı minimum olan yapılar elde etmek mümkündür.

Yapı yüklerini azaltmak, inşaat sektörü için en önemli özelliklerin başında gelmektedir. Son yıllarda, yapıların konfor ve dayanıklılık şartlarını optimumda tutarak, zati yükünü azaltmak amacıyla farklı yöntemlerle üretilen hafif blokların kullanımı ile ilgili çalışmalar giderek artmaktadır. Hafif betonlar ve içerisinde kullanılabilen hafif agregalar yüksek gözeneklilikleri, ısı, ses ve elektrik iletkenliklerinin az olması sebebiyle yalıtım amaçlı olarak da kullanılabilmektedir. Pomza, diyomit, vermikülit ve perlit gibi doğal hafif agregalar, hafif beton üretiminde kullanılabilen agregalardır.

Bu çalışmada hem enerji sürdürülebilirliği hem de yapı hafifliği sağlamak amacı ile hacminin büyük bir kısmı homojen gözeneklerden oluşan genleştirilmiş perlit esaslı köpük betonların özelliklerini granül polistren köpük ve silika aerojel ile geliştirmeyi hedefleyerek ısı yalıtım panelleri üretilmiştir. Literatür araştırmaları sonucunda elde edilen bilgiler sonucunda köpük beton tasarımı yapılmış ve üretilen köpük betonların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için kuru yoğunluk, su emme ve ultra geçiş hızı deneyleri, mekanik özelliklerinin belirlenmesi için eğilme ve basınç dayanımı deneyleri, durabilite özelliklerinin belirlenmesi için asit direnci ve donma çözünme direnci deneyleri uygulanmıştır. Termal özelliklerinin belirlenmesi için numunelerin ısı iletkenlik katsayıları ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesi için ise elektriksel özdirenç değerleri elde edilmiştir. Uygulanan deneyler sonucunda ulaşılan bulgular ayrıntılı şekilde incelenmiş ve bu çalışmanın literatüre kazandıracağı sonuçlar açıklanmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Isı yalıtım sistemlerine alternatif oluşturmak amacı ile geliştirilmiş perlit esaslı ısı yalıtım panellerinin, yeni nesil malzemelerle geliştirilmesi üzerine araştırma yapılmıştır.

2.1. Isı Yalıtımı Kavramı

Nüfus artışıındaki hız ve yaşam standartlarının iyileşmesi dünya çâğındaki enerji tüketimini artırmaktadır. İyileşen yaşam standartlarını sürdürmek ve geliştirmekte olan ülkelerin durumunu iyileştirmek için optimum enerji tüketiminden kaçınmadan, enerjiyi verimli bir şekilde kullanmak gerekmektedir. Enerji tüketimi dört ana sektörden kaynaklanmaktadır: Endüstri, yapı, ulaşım ve tarım (Ucar ve Balo, 2010). Yapı sektörü, yenilenemeyen malzemelerin ve enerji kaynaklarının kullanılması sonucunda, hava, su, toprak kirliliğine, atık üretimi yoluyla önemli bir çevresel etkiye sebep olmaktadır.

Günümüzde yapı sektörü için enerji tüketimini önemli ölçüde azaltmak ve bu azaltma sağlanırken termal konfor gereksinimlerini göz ardı etmemek, önemli bir kavram olarak ortaya çıkmaktadır. Isıtma ve soğutma, Avrupa Birliği'nin nihai enerji kullanımının en az %40'ını oluşturmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'na göre, enerji tüketimi 2030 yılına kadar istenmeyen bir şekilde %50'ye ulaşacağı varsayılmıştır (Lakatos ve Kovacs, 2021). Ülkemizde ise hızla artan nüfus ve dinamik bir ekonomik gelişme, her yıl artan enerji talebiyle doğru orantılıdır. Türkiye'de kişi başına düşen enerji üretimi ve tüketiminin yıllar içerisindeki değişimi Çizelge 2.1'de verilmiştir. Enerji tüketiminin önemli bir kısmının ısıtma ve soğutma için kullanıldığı göz önüne alınarak bu konuda önlemler almak gerekmektedir. Isıtma ve soğutma için kullanılan enerjinin minimuma indirilmesi ısı yalıtım kavramı ile ilişkilendirilebilir.

Çizelge 2.1. Türkiye'de elektrik üretim-tüketim istatistikleri (TEİAŞ, 2020)

Yıl	Nüfus ($\times 10^6$)	Kişi başına düşen enerji üretimi (kWh)	Kişi başına düşen enerji tüketimi (kWh)
1980	44,437	520	550
1990	56,473	1019	1006
2000	67,845	1841	1891
2010	73,723	2865	2854

Çizelge 2.1. (devam) Türkiye’de elektrik üretim-tüketim istatistikleri (TEİAŞ, 2020)

Yıl	Nüfus ($\times 10^6$)	Kişi başına düşen enerji üretimi (kWh)	Kişi başına düşen enerji tüketimi (kWh)
2015	78,741	3325	3375
2020	83,614	3668	3661

Isı bir enerji türüdür ve sıcaklık farkı bulunan ortamlarda yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru transfer gerçekleşir. İki ortam arasında gerçekleşen bu ısı transferinin engellenmesi ise ısı yalıtımı olarak ifade edilir. Genel olarak ısı yalıtımı, ortamdaki ısının dış ortama aktarılmasını engeller (Bayrakçı, Davraz, ve Başpınar, 2011).

Isı yalıtımı ile ilgili standart, Türkiye’de ilk olarak 1970 yılında, TS 825 “Binalarda Isı Yalıtım Kuralları” adı altında ortaya çıkmıştır. Takip eden yıllarda Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ve Bayındırlık ve İskân Bakanlığı tarafından bu standarda yeni maddeler eklenmiştir. 1998’de ise Türk Standartları Enstitüsü TS 825 üzerinde kapsamlı bir yenileme çalışması yaptıktan sonra Bayındırlık ve İskân Bakanlığına bu standardın zorunlu bir standart olması için teklif sunmuştur ve 1999 yılında Resmî Gazetede yayımlanarak uygulanmaya başlamıştır. Bu yıldan itibaren yapılan yapılarda uygulanan bu standartla büyük ölçüde enerji tasarrufu sağlandığı gözlemlenmiştir (Akıncı, 2007).

2.2. Isı Yalıtım Malzemeleri

ISO ve CEN standartlarına göre yapılan sınıflandırmada:

- Isıl iletkenlik katsayısı, $\lambda > 0,065$ W/m.K ise “yapı malzemesi”,
- Isıl iletkenlik katsayısı, $\lambda < 0,065$ W/m.K ise “ısı yalıtım malzemesi” olarak tanımlanmaktadır.

DIN 4108’e göre ise ısıl iletkenlik katsayısı $\lambda < 0,1$ W/m.K olan yapı malzemeleri ısı yalıtım malzemesi olarak ifade edilmektedir (Bektaş, 2018).

Yalıtım malzemeleri, ilk çağlardan bu yana insanların korunma için kullandığı malzemelerdir. Sanayi devrimi (19. yy) sonrasında artan enerji tüketimi sonucu oluşan krizlerin önlenmesi amacıyla enerji tasarrufu ve ısı kayıplarının azaltılması fikri doğmuştur, bu durum ısı yalıtım malzemelerinin endüstriyel üretimi ve kullanımının

başlamasını sağlamıştır. Plastik kökenli ısı yalıtım malzemeleri 1950’li yıllarda plastik üretimin artmasıyla olmuştur. Ancak ilerleyen yıllarda bu malzemelerin üretiminde ortaya çıkan sera gazı emisyonunun (özellikle CO₂) çevreyi olumsuz etkilediği görülerek doğal malzemelere geri dönüş başlamış ve bu konuyla ilgili araştırma ve geliştirme çalışmaları halen devam etmektedir (Bozsaky, 2010). Isı yalıtımı malzemelerinin tarihsel gelişimi Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Isı yalıtım malzemelerinin gelişimi (Bozsaky, 2010)

Tarih	Gelişim Sebebi	Gelişme	Yalıtım Malzemesi
M.Ö 7000 ve öncesi	Göçebe hayat	Kıyafet için malzeme ihtiyacı	Hayvan derileri, kürk, yün
M.Ö 7000 M.S. 1870	Yerleşik hayata geçiş	Dayanıklı malzeme gereksinimi	Toprak, ahşap, tuğla,
		Bitkisel lifler	Saman, deniz yosunu, saz
1870-1950	Sanayi devrimi Isı kayıp hesabı yapılması	İlk kullanılan doğal yalıtım malzemeleri	Saz, mantar, ahşap yünü, keten levhalar, selüloz
		Tuğla duvarların gelişmesi	Delikli tuğla, gazbeton
		İlk yapay yalıtım malzemesi üretimi	Asbest, cam yünü, taş yünü, genleştirilmiş cam, genleştirilmiş kil ve perlit
1950-2000	Plastiklerin yaygınlaşması	Yapay malzemelerin gelişmesi Plastik köpükler	Polistren, poliüretan, polyester, polietilen, fenolik, melamin köpükler
2000 ve sonrası	CO ₂ salınımı sonucu iklim değişikliği ve küresel ısınma	Doğal malzemelerin öne çıkması	Selüloz yalıtımlar, mantar, saman, ahşap yünü
		İleri teknoloji ürünlerin gelişmesi	Saydam yalıtım malzemeleri, vakum yalıtım panelleri, arojeller vs.

Isı transfer koşullarında kararlı halde davranarak bina kabuğundaki ısı akışı ve sıcaklık dağılımını sağlayan ısı yalıtım malzemesi özelliği, ısı iletkenliktir (λ (W/m.K)). Binanın dış duvarları; güneş ışınları, ortamdaki hava sıcaklığı ve nemden kaynaklanan ısı geçişine sürekli maruz kalmaktadır. Yalıtımlı duvarlı binalar, belirli bir termal dirence ve ısı iletkenliğine karşı dinamik bir yapıya sahiptir. Kalın ve termal açıdan daha dirençli katmanlardan oluşan duvarlar, ısı dalgasını yavaşlatır ve yapı içerisindeki ısı akışını önemli

ölçüde azaltır. Bu durum yapının hem konforu hem de enerji verimliliği için önemlidir (Savic, Antonijevic, Jelic, ve Zakic, 2020).

Yapılarda, kullanıma uygun olarak ısı yalıtımı için kullanılan malzemelerden beklenen performans özellikleri bulunmaktadır. Bu özelliklerin tümünün aynı malzemede olması mümkün değildir. Bu durumda da optimum koşulları sağlayacak malzeme seçimi önem arz etmektedir. Isı yalıtımı için kullanılacak malzemelerden beklenen özellikler Çizelge 2.3’de belirtilmiştir.

Çizelge 2.3. Isı yalıtım malzemelerinden beklenen özellikler (Ülker, 2009)

Fiziksel işlevsellik	Yüksek ısı tutuculuk
	Düşük birim ağırlık
	Koşullara uygun buhar geçirimsizliği
	Yeterli basınç ve çekme mukavemeti
	Boyutsal kararlılık
Dayanıklılık	Su ve neme dayanıklılık
	Kimyasal etkilere dayanıklılık
	Biyolojik etkilere dayanıklılık
	Yüksek sıcaklığa (yangın emniyeti) dayanıklılık
	Çürümezlik
Ekolojik açıdan uygunluk	Uzun ömürlülük
	Çevre ve ekosistem açısından zararsızlık
	Sağlık açısından zararsızlık
	Az enerji tüketimi
	Kullanım sonrası değerlendirilebilirlik
Uygulama kolaylığı	Kolay işlenebilirlik
	Üzerine işlem uygulanmasına olanak sunması
Ekonomiklik	Ucuzluk
	Kolay temin edilebilme

Isı yalıtım malzemelerinde, yapı elemanlarının ısıl iletkenlik direncinin artırılması temel amaçtır. Yapılarda kullanılan malzemelerin yalıtım özelliklerini ısıl iletkenlik katsayıları belirlemektedir. Kullanılacak malzemenin ısıl iletkenlik katsayısı ile yalıtım özelliği arasında ters bir orantı bulunmaktadır, ısıl iletkenlik katsayısı ne kadar düşüğe yalıtım özelliği o kadar yüksektir (Bayrakçı ve diğerleri, 2011). Ülkemizde duvar, döşeme ve çatılarda yaygın olarak cam yünü ve taş yünü gibi mineral yünler, genleştirilmiş polistren

köpük (EPS), ekstrüde polistren köpük (XPS), poliüretan köpük (PUR) gibi köpük paneller, cam köpüğü, fenol köpüğü, mantar panel, perlit agregası ve hafif beton elemanlar gibi geleneksel ısı yalıtım malzemeleri kullanılmaktadır. Vakum yalıtım panelleri, gazla doldurulmuş paneller, nano gözenekli malzemeler günümüzün son teknolojisiyle ortaya çıkan ve gelişmekte olan malzemelerdir (Jelle, Gustavsen, Grynning, ve Wegger, 2010).

2.2.1. Geleneksel ısı yalıtım malzemeleri

Geleneksel ısı yalıtım malzemeleri, kullanım kolaylığı ve ekonomik koşullar göz önüne alındığında, dünyada ve ülkemizde uygulamalarda en çok tercih edilen malzemelerdir. Mineral yünler, polistren köpükler (EPS, XPS), poliüretan köpükler, cam köpüğü, fenol köpüğü ve perlit geleneksel ısı yalıtım malzemelerine örnek olabilir.

Mineral yünler

Hafif ve yumuşak mineral yünler, levha olarak üretilen, boşluklu yapılarda dolgu malzemesi olarak kullanılan cam yünü ve taş yünü kapsamaktadır. Cam yünü, borosilikat camın 1400°C’de pişirilmesiyle oluşan liflerden; taş yünü ise 1500°C’de eriyen diyabaz veya dolerit taşlarının liflerinden üretilmektedir. Mineral yünlerin ısı iletkenlik katsayıları 30-40 mW/m.K değerleri arasındadır. Isıl iletkenlik değerleri sıcaklık, nem içeriği ve kütle yoğunluğuna göre değişmektedir (Jelle, 2011).

Ayowera ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, mineral yünlerin çimento harcı içerisinde kullanımının ısı yalıtım ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiş ve şu sonuçlar elde edilmiştir. Harç içerisinde kullanılan mineral yün oranının ağırlıkça %10 ve %50 oranlarında değişmesi ile ısı iletkenlik katsayı değerleri %65 ve %70 oranlarında düşmüş ve ısı iletkenlik katsayısı en düşük 0.294 W/m.K değerinde elde edilmiştir. Buna karşın eğilme ve basınç mukavemeti değerleri ise olumsuz etkilenecek mineral yün oranının artmasıyla azalmıştır (Awoyera ve diğerleri, 2022).

Geleneksel ısı yalıtım malzemelerinden XPS, taş yünü ve perlitin eşdeğer ısı geçirgenlik değerleri sağlayan kalınlıklardaki maliyetleri Çizelge 2.4’te incelenmiştir. Karşılaştırma için 30-32 kg/m³ yoğunluklu ve kapalı gözenekli XPS, 150 kg/m³ yoğunluklu sıkıştırılmış taşıyıcı ve 130 kg/m³ yoğunluklu 1-2 mm boyutlu perlit agregası kullanılmıştır. En

ekonomik ısı yalıtım malzemesi çizelgeye göre XPS olarak belirlenmiştir (Bayrakçı ve diğerleri, 2011).

Çizelge 2.4. Isı yalıtım malzemelerinin eşdeğer ısıl geçirgenlik ($R_{eş}$) sağlayan kalınlıklarına göre maliyetleri (Bayrakçı ve diğerleri, 2011)

Yalıtım Malzemesi	λ (mW/m.K)	d (mm)	$R_{eş}$ (m ² K/mW)	Birim Fiyatı (€/m ²)	Maliyet (€/m ²)
XPS	35	175	5	2,2	15,40
Taş yünü	40	200	5	6,7	53,60
Perlit	67	225	5	1,6	21,44



(a)

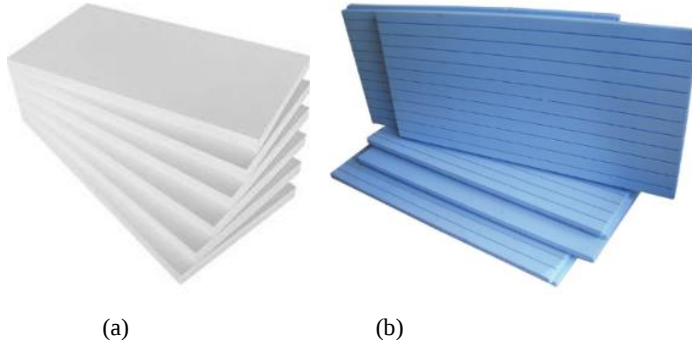


(b)

Resim 2.1. Taş yünü (a) ve cam yünü (b)

Polistren köpükler

Organik plastikten üretilen polistren köpükler, yalıtım amacıyla, genişletilmiş polistren köpük (EPS) ve ekstrüde polistren köpük (XPS) olmak üzere iki türde üretilmektedir. Hafif, enerji açısından verimli ve uygun maliyetli genişletilmiş polistren köpük, ısı ve ses yalıtımında kullanılmaktadır. Ham petrolün su buharıyla ısıtılarak genişletilmesiyle elde edilmektedir. EPS panelleri kısmen açık gözeneklere sahiptir ve ısıl iletkenlik katsayıları 30-40 mW/m.K değerleri arasındadır. Ekstrüde polistren köpük, erimiş polistrenin bir gazla basınç altında ekstrüde edilmesiyle üretilmektedir. XPS panelleri kapalı gözenekli bir yapıya sahiptir ve ısıl iletkenlik katsayıları 25-35 mW/m.K değerleri arasındadır (Abu-Jdayil, Mourad, Hittini, Hassan, ve Hameedi, 2019).



Resim 2.2. EPS köpük panel (a) ve XPS köpük panel (b)

Granül polistren köpük, ısı yalıtım özellikleri, nem direnci, kimyasal direnç, hafiflik ve düşük maliyet gibi iyi özellikleriyle inşaat, otomotiv sektörü ve denizcilik alanlarında oldukça yaygın olarak kullanılan bir malzemedir (L. Y. Wang ve diğerleri, 2018). Özellikle hafiflikleri sebebiyle, beton içerisinde agrega olarak kullanıldığında, beton yoğunluğunda bir düşüş meydana getirmekte aynı zamanda betonun durabilite özelliklerine de katkı sağlamaktadır (Ravindrarajah, 1999).

Schackow ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, EPS hafif beton içerisinde agrega olarak kullanılmış, mekanik ve termal özellikleri etkisi incelenmiştir. EPS içeren hafif betonların, normal betondan ($3,5 \text{ W/m.K}$) 7 kat daha düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip olduğu tespit edilmiştir. Hacimce %65 oranda EPS kullanılarak oluşturulan hafif betonda $0,50 \text{ W/m.K}$ elde edilen ısı iletkenlik katsayısı, EPS miktarının azalmasıyla yükselmiştir. %55-%65 oranlarında kullanılan EPS miktarıyla hafif betonların basınç dayanımı değerleri ise $7,74 \text{ MPa}$ ve $15,55 \text{ MPa}$ arasında değişmektedir ve EPS miktarının artması mukavemeti düşürmüştür (Schackow, Effting, Folgueras, Guths, ve Mendes, 2014).

Poliüretan köpükler

Açık veya kapalı gözenekli olarak üretilebilen, içeriğinde poliöl ve izosiyanürat adı verilen iki kimyasal malzeme bulunan poliüretan köpükler, bu iki kimyasal malzemenin karıştırılarak, hava yardımıyla köpürüp sertleştirilmesiyle elde edilmektedir. Yapıda boşlukların sınırlı olduğu fakat ısı yalıtımı istenen yerlerde uygulanabilmektedir. Yoğunlukları $30\text{-}150 \text{ kg/m}^3$, ısı iletkenlik katsayıları ise $21\text{-}30 \text{ mW/m.K}$ değerleri arasında değişmektedir (Ülker, 2009).



Resim 2.3. Poliüretan köpük

Zhang ve diğerleri farklı yoğunluklarda üretilen poliüretan köpüklerin ısı iletkenliklerinin, sıcaklık ve nem ile değişimi üzerine çalışma yapmışlardır. -40°C ile 70°C arasında değişen sıcaklıklarda elde edilen sonuçlara göre; 20°C sıcaklıkta, $29,5 \text{ kg/m}^3$ yoğunluklu üretilen poliüretan köpükler, $0,0221 \text{ W/m.K}$ gibi oldukça düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip olmuşlardır. Sıcaklığın artması poliüretan köpüklerin ısı iletkenlik katsayılarını artırmıştır. Nemli ortam, poliüretan köpüklerin ısı yalıtım kapasitesini düşürmektedir. %30-90 değerleri arasında neme maruz bırakılan poliüretan köpüklerde, maksimum %2 su alımında, ısı iletkenlik katsayısını %10-18 oranında yükseltmektedir (Zhang, Fang, Li, ve Tao, 2017).

Cam köpüğü

Kuvars kumu, dolomit, kalsiyum ve sodyum karbonattan oluşan cam köpüğü, hücresel camsı yapıda bir ısı yalıtım malzemesidir. Kuvars kumu, dolomit, kalsiyum ve sodyum karbonat 1400°C 'de pişirilip camlaştırıldıktan sonra soğutulup kırılır ve toz haline getirilir. Kırılıp toz haline gelen malzemeler 1000°C 'de tekrar pişirilirken içerisine eklenen karbon, oksitlenerek gözenek yapısını oluşturur. Kapalı gözeneklere sahip olan cam köpüğü yüksek basınç dayanımına da sahiptir. Cam köpüğünün yoğunluğu $100\text{-}500 \text{ kg/m}^3$, ısı iletkenlik katsayısı ise $45\text{-}60 \text{ mW/m.K}$ değerleri arasında değişmektedir (Akıncı, 2007; Özer ve Özgünler Acun, 2019).

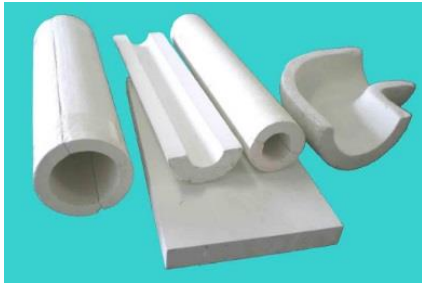


Resim 2.4. Cam köpüğü

Yüksek basınç mukavemetine sahip olan kapalı gözenekli cam köpüğünün açık gözenekli olarak üretildiğinde, basınç mukavemeti ve ısı iletkenlik katsayısının değışimi üzerine çalışma yapan Konig ve diğeri ş u sonuçları elde etmişlerdir: 117 kg/m³ yoğunlukta ve hacimce %95,8 gözenekli cam köpüğünün ısı iletkenlik katsayısı 54,3 mW/m.K ve basınç dayanımı ~0,7 MPa değeriindedir. Basınç mukavemetinin düşüklüğü cam köpüğün gözenek boyutlarındaki düzensizlikle ilişkilendirilmiştir (Konig ve diğeri, 2019).

Fenol köpüğü

Açık ve kapalı gözenekli olarak üretilebilen fenol köpük, fenolformaldehit bakalitine şişirici ve sertleştirici maddelerin katılmasıyla elde edilir. Düşük yoğunluklu fenol köpükler, 30-60 kg/m³ değeri arasında yoğunluğa ve 18-31 mW/m.K değeri arasında ısı iletkenlik katsayısına sahiptir. Yüksek yoğunluklu fenol köpükler ise 80-120 kg/m³ değeri arasında yoğunluğa ve 24-32 mW/m.K değeri arasında ısı iletkenlik katsayısına sahiptir. Basınç dayanımı fenol köpüğün gözeneklerinin kapalı veya açık olma durumuna bağlıdır (Ülker, 2009).



Resim 2.5. Fenol köpüğü

Perlit

Asidik karakterli volkanik bir cam türü olan perlit, ismini bazı perlit tiplerinin kırıldığında inci parlaklığında küçük küreler elde edilmesi sebebiyle inci anlamına gelen “perle” kelimesinden almıştır (MTA). Perlit kelimesi hem ham perlit hem genişletilmiş perlit için ve ayrıca obsidian ve pitchstone gibi su alıp genişlebilen kayalar için de kullanılmaktadır. Granit magmanın yüzeyde donmasıyla ham perlit oluşmaktadır. Ham perlitin 0,0-2,5 mm’lik boyutlarda kırılıp, değışik aralıklı eleklerden geçirilerek boyutlandırılmasıyla kırılmış-elenmiş perlit meydana gelmektedir. Perlit esas olarak kristal yapılıdır fakat soğuma işleminin çabukluğu nedeniyle camsı bir hal kazanmaktadır. İçerisinde %2-5

oranında bileşik halinde su bulundurması, perlitin kararlı halde olmasını sağlamaktadır. Özgöl ağırlığı 2,2-2,4 arasında olup içerisindeki çatlaklar nedeniyle kırılgan yapıdadır. Ham perlit 750-1000 °C arasında perlit cinsine göre, ani bir şekilde pişirildiğinde, içerisindeki suyun buharlaşarak çıkmasıyla patlayarak, hacim olarak 5-30 kat büyümektedir. Bu şekilde oluşan perlit çok gözenekli ve oldukça hafif bir yapıdadır ve genişleştirilmiş perlit olarak adlandırılmaktadır. Genleştirilmiş perlit inşaat sektöründe, sanayide ve ziraatta kullanılmaktadır (Kırimer, 1976; Orhun, 1969).



Resim 2.6. Perlit ürünleri

Perlitin özellikleri

Ham perlit ve genişleştirilmiş perlit belirli fiziksel özelliklere ve kimyasal özelliklere sahiptir.

Fiziksel özellikler

Perlit, 80-240 kg/m³ değerleri arasında yoğunluğa sahip olan hafif bir malzemedir. Isı geçirgenliği az olup ısı iletkenlik katsayısı oldukça düşüktür. Perlitin belirli bir sıcaklığa kadar yapısında değişiklik gözlenmez, ateşe karşı dayanıklıdır. Sıcaklık 840°C'yi geçtiğinde yumuşamaya başlar ve 1200-1300°C'lerde eriyik hale geçer. Gözeneklerinden dolayı su emme kapasitesi yüksektir, ağırlıkça %10-30 oranlarında su emebilir. Ham perlitin fiziksel özellikleri Çizelge 2.5 ile ve genişleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri Çizelge 2.6 ile verilmiştir.

Çizelge 2.5. Ham perlitin fiziksel özellikleri (Kalaycı, 2016)

Fiziksel Özellikler	
Renk	Gri, siyah ve gri tonlar
Yumuşama noktası	800-1100°C
Ergime noktası	1315-1390°C
pH	6,6-8,0
Spesifik ısı	0,20 kcal/kg°C
Özgül ağırlık	2,2-2,4
Yoğunluk	1400-1700 kg/m ³
Serbest nem %	0,5
Ağırlık kaybı	%0,5

Çizelge 2.6. Genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri (Çelik, 2018)

Fiziksel Özellikler	
Renk	Beyaz
Yumuşama noktası	871-1093°C
Ergime noktası	1260-1343°C
pH	6,5-8,0
Spesifik ısı	837 J/kg°C
Özgül ağırlık	2,2-2,4
Yoğunluk	32-400 kg/m ³
Su emme %	40-60
Isıl iletkenlik	40-60 mW/m.K

Kimyasal özellikler

Ham veya genleştirilmiş perlit ve farklı orjinli perlitler bileşimlerindeki farklılıklar nedeniyle farklı özelliklere sahiptirler, kimyasal olarak oldukça saftırlar. Kimyasal bakımdan perlit, içeriğinde bileşik halde su bulunan alüminyum silikattır. Perlitin kimyasal içeriği, riyolit, liporit, kuvars ve latit gibi volkanik kayalarla benzerlik göstermektedir (Köktürk, 1997). Çizelge 2.7’de perlitin kimyasal bileşimi gösterilmiştir.

Çizelge 2.7. Perlitin kimyasal bileşimi (Kalaycı, 2016)

Kimyasal İçerik %	
SiO ₂	60-80

Çizelge 2.7. (devam) Perlitin kimyasal bileşimi (Kalaycı, 2016)

Kimyasal İçerik %	
Al ₂ O ₃	10-18
H ₂	2-8
Na ₂ O	3-5
K ₂ O	3-5
Az miktarda Cao, MgO, Fe ₂ O, TiO ₂ , MnO ₂ , SiO ₃	

Perlit rezervleri

Dünyada değişik ülkelerde olmak üzere 7,7 milyar ton perlit rezervi bulunmaktadır. ABD Jeolojik Araştırma Kurumu'nun çalışmalarına göre dünyada en büyük perlit rezervleri ülkemizde bulunmaktadır. Bu oran dünyada bulunan rezervlerin yarısında daha fazlasını kapsamaktadır. Ülkemizde bulunan perlit rezervi, değişik genleşme oranlarında, yaklaşık olarak 6 milyar tondur. En önemli perlit yatakları:

- Cumaovası,
- Manisa,
- Soma,
- İzmir-Bergama-Dikili,
- Eskişehir-Üçsaray-Beşsaray,
- Kütahya,
- Konya,
- Erzincan'dır.

Son yıllarda Türkiye'de üretilen tüvenan perlit miktarı, 480 bin ton/yıl civarındadır (DPT, 2015). Yıllar bazında perlit üretim, ihracat ve ithalat miktarları Çizelge 2.8 ile verilmiştir.

Çizelge 2.8. 2013-2016 yılları arası perlit üretimi, ihracatı, ithalatı (DPT, 2015)

Yıl	Üretim (×10 ³ ton)	İhracat (×10 ³ ton)	İthalat (ton)
2013	1075,949	384,505	76,786
2014	897,125	418,095	1381,752
2015	843,242	416,635	76,092
2016	1066,251	407,274	81,63

Dünyada üretilen 1,8 milyon ton perlitin %60'ı sıva ve beton agregası olarak, %23'ü filtre malzemesi, %8'i yalıtım malzemesi üretiminde, %4 ü de tarımda kullanılmaktadır.

Perlitin işlenmesi

Genleştirilmiş perlitin oluşturulması iki aşamadan oluşmaktadır. Perlit yataklarından çıkarılan perlit üzerinde kırma işlemi ve daha sonra genleştirme işlemi uygulanmaktadır.

Madencilik ve kırma

Perlit cevheri masif lav akıntıları şeklinde geniş bölgede yataklar halinde bulunur. Perlit madenciliği bir açık işletmedir ve cevheri kolay bulunur. Çıkarılan cevherler kırıcılardan geçirilerek istenilen boyutlarda elenerek sınıflandırılır. Perlit kırılğan bir yapıya sahip olduğundan, kırıldıktan sonraki toz oranını azaltmak amacıyla kırma işlemi sırasında eleme yapılarak belli iri tanelerinin altında kalanlar ayrılmalıdır. Kırma işlemi yapılacak olan perlit cevheri nemli ise kırma işlemi yapılmadan önce kurutulmalıdır. Kırma ve eleme işlemleri yaş metodla da yapılabilmektedir ancak kurutma için kullanılan enerjinin fazla olması bu yöntemin dezavantajıdır (Kırimer, 1976).

Genleştirme

Genleştirilmiş perlit çok hafif olduğundan nakliyesi masraflıdır, bu yüzden genleştirme tesisleri malzemenin kullanılacağı yere yakın yapılmalıdır. Perlitin genleştirilmesi fırınlarda iki aşamada yapılmaktadır:

- Ön ısıtma
- Genleştirme

Ön ısıtma işlemi 350-600°C fırınlarda, perlitin içeriğinde bulunan bağıl suyu uçurmak için yapılır. Ön ısıtma işlemi yapılan perlitte, perlit yumuşayınca kadar pişirilip mevcut su muhtevası azaltıldığından, genleşme sırasında şok ısıya maruz kalıp kırılmanın önüne geçilir. Perlit, ön ısıtma işleminden sonra direk olarak genleşme fırınlarına gider. Genleştirilme işlemi 700-1200°C fırınlarda, perlitin içeriğindeki öz suyunun ani buharlaşmasıyla çok kısa süre içerisinde, mısır taneleri gibi patlayarak hacmi 30 kata kadar

artmaktadır ve böylece genişletilmiş perlit hafif, gözenekli ve camsı yapıya sahip olur. Genleştirme işlemi sırasında:

- Kullanılan perlitin cinsi,
- Isıtma süresi,
- Tane iriliği,
- Gençleşme sıcaklığı

önemli rol oynar.

Genleştirme için yatay sabit fırın, aynı akımlı döner fırın veya dikey fırın kullanılabilir. M.T.A. Enstitüsünde kullanılan fırın bütan-hava karışımı kullanılarak gerekli enerji sağlanan dikey bir fırındır (Kırimer, 1976; Orhun, 1969; Kaya, 2019).

Perlitin kullanım alanları

Perlit rezervlerinin çok olduğu, deprem kuşağı üzerinde yer alan ve karasal iklim koşullarının yoğun yaşandığı ülkemizde perlitin önemi yeterli ölçüde anlaşılmamakta ve bu ürünler inşaat sektöründe yeterli oranda kullanılmamaktadır. Perlitin kullanıldığı hafif yapı elemanları ve beton agregaları daha çok modern inşaat teknolojilerinin kullanıldığı, inşaatlarda tercih edilmekte ve kullanılan yerlerde önemli ölçüde ısı ve ses yalıtımı sağladığı gözlenmektedir (DPT, 2018).

Perlitin fiziksel ve kimyasal özellikleri göz önüne alındığında birçok alanda kullanılabilirliği mümkündür. Gıda, ilaç ve kimyasal madde üretiminde, inşaat sektöründe yalıtım amaçlı, tekstil sektöründe ağartıcı, tarımda ekonomik sulama, sanayide fırın izolasyon uygulamalarında gibi birçok alanda kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe yalıtım amacıyla ana malzeme olarak kullanılabildiği gibi yapıdaki donatılarda yük azaltıcı katkı malzemesi olarak da kullanılabilmektedir (Uluer ve diğerleri, 2018).

Amerikan Perlit Enstitüsü tarafından yapılan çalışmalara göre, 1 cm kalınlığında perlit sıvasının 8-10 cm tuğla duvara, 18 cm kalınlığında betonarme perdeye, 25 taş duvara ısı iletkenliği bakımından eşdeğer olduğu saptanmıştır.

Altuncu ve diğerkleri genleştirilmiş perlit ile yzeye kaplama ve tesviye harcı olarak kullanılan şap harcı ¼retmiřler ve şap harcının birim hacim ağırlığını azaltarak ısı ve ses izolasyonu sağlamayı hedeflemişlerdir. Harç içerisinde kullanılan CEN standart kumu yerine genleştirilmiş perlit kullanılarak oluşturulan şap harcının $1,669-2,192 \text{ g/cm}^3$ yoğunluk değerlerinde, $0,151-0,249$ ses yutma katsayısına ve $0,446-0,817 \text{ W/m.K}$ ısı iletkenlik katsayılarına sahip olmuştur (Altuncu, ¼cal, Saplıoğlu, İnce, ve evikbaş, 2021).

elik ve arkadaşları duvar ¼rg¼ elemanlarında, genleştirilmiş perlitin kullanılabilirliği konusunda çalışma yapmışlardır. Bu kapsamda 200°C 'de 50 bar basınç altında 1 saat s¼re ile pişirilen, su/katı oranı 1,0 değerinde olan numunelerde, en d¼ř¼k birim hacim ağırlık $522,5\pm 48,3 \text{ kg/m}^3$ ve en y¼ksek basınç dayanımı $12,13\pm 0,13 \text{ kg/cm}^2$ olarak bulunmuştur. Yapılan deneyler sonucunda pişme sıcaklığının artmasının yoğunluğunun azalmasına sebep olduğu, sıkıştırma basıncının artmasının ise yoğunluğu artırdığı ve iki durumda da basınç dayanımının azaldığı g¼zlemlenmiřtir. Daha d¼ř¼k yoğunluk ve daha y¼ksek mukavemet değerlerinin elde edilmesi için farklı bağlayıcıların katkı olarak kullanılabilereği ¼nerisinde bulunulmuştur (elik, Kılıç, ve Akkurt, 2014).

Yıldırım ve Baba genleştirilmiş perlit agregalı ve bims agregalı hafif kompozit harçlar ¼retip bu harçların ¼zellikleriyle ilgili incelemede bulunmuşlardır. 250 dozajlı harçlarda belirli oranlarda genleştirilmiş perlit agregası ve bims agregası kullanılarak ¼retilen numunelerde genleştirilmiş perlit agregasının oranı azaldığında kuru birim ağırlığın arttığı ve ısı iletkenlik katsayısının da olumsuz y¼nde etkilendiği saptanmıştır. %50 oranlarında karışıma eklenen bims ve genleştirilmiş perlit agregalarının en uygun sonucu verdiğini g¼zlemlenmiřlerdir. Isı iletkenliğinin standartlara uygun olduğu ve daha sonra yapılacak çalışmalarda ise basınç dayanımının artırılması konusunda fikirler geliştirilmesinin uygun olduğu kanısına varılmıştır (Yıldırım ve Baba, 2018).

Huang ve diğerkleri soğuk b¼lgelerde kullanılabilerecek, d¼ř¼k ısı iletkenliğe sahip genleştirilmiş perlit kalsiyum s¼lfoal¼minat (CSA) imento esaslı harçlarda agrega yerine kullanarak yeni bir yapı malzemesi elde etmek amacıyla çalışma yapmışlardır. ¼retilen harçlar 23°C , 0°C ve -10°C 'de k¼rlenerek, termal ¼zellikleri ve mekanik ¼zellikleri incelenmiştir. Genleştirilmiş perlit içermeyen -10°C 'de k¼rlen CSA imento harcında $15,7 \text{ MPa}$ değerinde basınç dayanımı elde edilmiş, genleştirilmiş perlit miktarı

artırıldığında bu dayanım değeri düşmüştür. 23°C’de kürlenmiş 28 günlük harçlarda, %0, %30, %60 ve %100 genleştirilmiş perlit oranların ısı iletkenlik katsayıları sırasıyla 0,97 W/m.K, 0,57 W/m.K, 0,29 W/m.K ve 0,13 W/m.K olarak tespit edilmiştir. Genleştirilmiş perlit içeren CSA çimentolu harçların ısı iletkenliği, Portland çimentosu kullanılarak hazırlanan harcın ısı iletkenliğinden (1,83 W/m.K) %47 oranında daha düşük olarak gözlemlenmiştir (G. P. Huang, Pudasainee, Gupta, ve Liu, 2021).

Gökçe ve arkadaşları genleştirilmiş perlit, ham perlit agregalı hafif betonlarda ham perlit yerine kullanarak, bu değişimin hafif betonda etkisini incelemiştir. Farklı özelliklerde genleştirilmiş perlit agregasını, %10 oranında ham perlit yerine kullanarak fiziksel ve mekanik özelliklere etkisini gözlemlemiştir. Hazırlanan hafif beton numunelerinde 1,841-1,903 g/cm³ yoğunluk elde edilmiş ve genleştirilmiş perlit agregasının betonun yoğunluğunu azalttığı, su emme değerlerini artırdığı, basınç dayanımını azalttığı belirlenmiştir. Uygun genleştirilmiş perlit agregası seçiminde ise ham perlit yerine kullanılabilirliğinin olumlu olacağı sonucuna varılmıştır (Gökçe, Şimşek, Durmuş, ve Demir, 2010).

Durmuş ve Çelik genleştirilmiş perlit agregalı betonların farklı sıcaklıklarda davranışı üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada üç farklı beton sınıfında (C16/20, C20/25, C40/50) betonlar üreterek, 100°C, 300°C ve 500°C’lerde betonun davranışını incelemiştir. Fırın ve ateş olarak iki yöntemle yapılan deneylerde fırın ile verilen yüksek sıcaklıkta kütle kaybının daha fazla olduğu belirlenmiş, genleştirilmiş perlit içeren numunelerde ise bu değerin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebi olarak genleştirilmiş perlitin yüksek sıcaklığa karşı betondaki boşlukları doldurarak koruduğu belirtilmiştir (Durmuş ve Çelik, 2019).

Kabay ve Kızılkant genleştirilmiş perlit hafif bloklarda agrega olarak kullanmış ve mekanik ve fiziksel özelliklerini incelemiştir. Bağlayıcı olarak çimento ve uçucu kül kullanarak, su/bağlayıcı oranı 0,40 olan, perlit hacimce %40, %50 ve %60 oranlarda harca ekleyerek blok numuneler elde etmişler ve mekanik ve fiziksel deneyler uygulanmıştır. Genleştirilmiş perlitin hafif blokta kullanımının uygun olduğu, genleştirilmiş perlit oranı arttığında mukavemet değerlerinin düştüğü, %50 oranda kullanıldığında daha düşük çimento oranıyla çevreci bir ürün elde edilebileceği, su emme ve ısı iletkenlik konusunda

gazbetona kıyasla daha üstün özelliklere sahip olduğu sonucuna varılmıştır (Kabay ve Kızılkant, 2019).

Xiong ve diğerleri dış cephede genişletilmiş perlitin kullanılabilirliğini ve ıslanma-kuruma durumunda genişletilmiş perlitin gözenek yapısındaki değişimi, su emme özelliklerini ve neme karşı etkilerini incelemişlerdir. Bu kapsamda genişletilmiş perlit agregalı yalıtım numunelerine 160 döngü ıslanma-kurumaya tabi tutulmuştur. Genleştirilmiş perlitli yalıtım harcı içinde 1 μ m'den küçük olan gözenekler, harcın yapısındaki değişimi belirlemiştir. 1 μ m boyutundaki gözenekler ıslanma-kuruma işlemi sırasında hacim olarak önce azalmış ve daha sonra artmış ve önemli ölçüde değişime uğramıştır. 10 μ m boyutundaki gözeneklerdeki su emme, nemden etkilenme durumları ise 0,1 μ m boyutundaki gözeneklerin etkisiyle oluşmuştur. Bu durumda Xiong vd. genişletilmiş perlitli ısı yalıtım harcının gözenek boyutunu üç sınıfa ayırmıştır: 0,01-0,1 μ m, 0,1-10 μ m, 10-1000 μ m. Dış cephede ısı yalıtımı için kullanılabilecek olan genişletilmiş perlitli ısı yalıtım harcının sınıflandırılan gözenek boyutları referans alınarak üretim yapılabilir (Xiong, Yuan, Xu, ve Wen, 2021).

2.2.2. Yeni nesil ısı yalıtım malzemeleri

Son yıllarda, hafiflik, incelik ve düşük ısıl iletkenlik elde etmek amacı ile yenilikçi çözümler üreten ısı yalıtım malzemeleri üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Vakum yalıtım panelleri, gaz doldurulmuş paneller ve aerogeller bu malzemelere örnek olarak gösterilebilir.

Vakum yalıtım panelleri

Vakum yalıtım panelleri, gözenekli iç dolgu malzemesinin, gaz giderici malzeme kullanılarak veya tek başına bir dış kaplamayla vakumlanarak ve sızdırmazlığı sağlanarak dış ortama kapatılmasıyla oluşturulur. Geleneksel yalıtım malzemelerine göre ısıl iletkenlik performansı daha yüksek malzemelerdir. Isıl iletkenlik katsayıları 4 mW/m.K gibi çok küçük değerlere ulaşabilmektedir. Isıl iletkenlik katsayısının çok düşük olmasından dolayı, daha hafif ve küçük kesitlerde yüksek ısı direnci sağlamaktadır. Ülkemizde henüz endüstriyel alanda uygulama bulunmamakta ve vakum yalıtım panelleriyle ilgili çalışmalar devam etmektedir (Bayrakçı ve diğerleri, 2011; Delikanlı, 2015).



Resim 2.7. Vakum yalıtım paneli

Jelle, mineral yün kullanılarak yapılan yalıtım katmanı ile buna eşdeğer nitelikte vakum yalıtım panelleri kullanarak iki sistem arasındaki maliyeti karşılaştırmıştır. 35 cm kalınlığındaki mineral yünün performansı, 6 cm kalınlığında vakum yalıtım paneli ile sağlanmaktadır. Fakat vakum yalıtım panellerinin birim fiyatı, mineral yünün birim fiyatının yaklaşık 10 katıdır. Yapılan çalışmaya göre vakum yalıtım panelinin daha ince kullanılmasıyla kazanılan alan ile yapının değerinin artması, vakum yalıtım paneli ve mineral yün arasındaki maliyet farkından daha yüksektir (Jelle, 2011).

Alam ve arkadaşları yaptığı çalışmada, vakum yalıtım panellerinin yüksek maliyetini düşürmek amacı ile vakum yalıtım panellerinin çekirdek bölgesinde silis dumanı yerine, geliştirilmiş perlit kullanımını ve termal özelliklere etkisini incelemiştir. Çekirdek dolgusu için geliştirilmiş perlit, dumanlanmış (fumed) silika, polyester elyaf ve silon karbür kullanılarak kompozit malzeme hazırlanmıştır. Kütlece %60 oranında geliştirilmiş perlit kullanımı ile atmosferik basınç altında 0,053 W/m.K değerinde elde edilen ısı iletkenlik katsayısı, geliştirilmiş perlit oranın %30 oranında kullanılmasıyla ~%46 azalarak 0,028 W/m.K değerine düşmüştür. Vakum yalıtım panellerinin geliştirilmiş perlit kullanımı ile maliyetinin %20 oranında azaltılabileceği ifade edilmiştir (Alam, Singh, Brunner, ve Naziris, 2014).

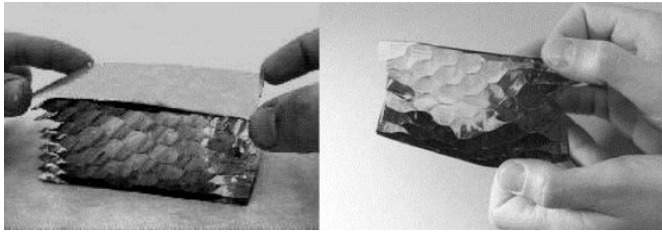
Vakum yalıtım panellerinin çekirdeğinde kullanılan farklı malzemelere göre maliyet örnekleri Çizelge 2.9'da verilmiştir. Aerojel ve dumanlanmış silika ile çekirdeği oluşturulan vakum yalıtım panelleri, eşdeğer ısı geçirgenlik direnci değerlerine göre karşılaştırılmıştır. Aerojel kullanılan vakum yalıtım panellerinin maliyetlerinin oldukça fazla olduğu belirlenmiştir (Bayrakçı ve diğerleri, 2011).

Çizelge 2.9. Vakum yalıtım panellerinin maliyet örnekleri (Bayrakçı ve diğerleri, 2011)

Yalıtım Malzemesi	λ (mW/m.K)	d (mm)	$R_{eş}$ (m ² K/mW)	Birim Fiyatı (€/m ²)	Maliyet (€/m ²)
VYP _{FS}	5	25	5	50	60
VYP _{AJ}	4,5	22,5	5	150	135

Gaz doldurulmuş paneller

Gazla doldurulmuş paneller (Gas-Filled Panels (GFP)), bir bariyer zarfından ve yansıtıcı katmanlar arasına doldurulmuş gazdan oluşur. Bu gazlar, havadan daha az termal iletken, argon (Ar), kripton (Kr) ve ksenon (Xe) gibi gazlar olabilir. Gazın yüzeyini kapatan ve radyasyon bağlı ısı transferini azaltmak için düşük emisyonlu bir bariyer kullanılmakta hem esnek hem sert olarak elde edilebilmektedir. Literatüre geçmiş elde edilen en düşük ısı iletkenlik gazla doldurulmuş paneller için 0,012 W/m.K'dir. Gazla doldurulmuş paneller, yüksek performanslı termal yalıtım sağlayabilecek gelecek vaat eden bir uygulamadır (Jelle, 2011; Griffith, Turler, ve Arasteh, 1993).



Resim 2.8. Gazla doldurulmuş panel

Beatens ve arkadaşları gaz doldurulmuş panellerde kullanılan gazların ısı iletkenlik katsayısına etkisini, hava ve argon gazı kullanarak incelemişlerdir. Hava ile doldurulan panellerde 0,046 W/m.K ısı iletkenlik katsayısı elde edilirken, argon gazı ile doldurulan panellerde bu değer 0,040 W/m.K değerindedir. Ayrıca, asal gazların kullanımının, 45 mm kalınlığında gaz doldurulmuş panelde maliyeti iki kat artırdığını bildirmişlerdir (Baetens, Jelle, Gustavsen, ve Grynning, 2010).

Aerojel

İlk kez 1930'ların başında Kistler tarafından üretilen aerojel, havanın üç katı kadar yoğunluğa sahip, üç boyutlu nano-gözenekli, yapısının %95'i gözenek olabilen çok hafif

bir malzemedir. Yüksek yüzey alanı ve yüzey gözenekliliği ile de düşük ısı iletkenliğe sahip olması aerjeli enerji verimliliği için önemli bir malzeme olarak ortaya çıkarmaktadır. Aerjel, alümina, krom, kalay, oksit, karbon ve silika gibi malzemelerle, hirofilik veya hidrofobik olarak üretilebilmektedir (Y. Y. Wang ve diğerleri, 2019; Al Zaidi, Demirel, ve Atis, 2019; Liu, Zhu, Cui, Shen, ve Tan, 2018).



Resim 2.9. Aerjel

Öncelikle elektronik, kimya ve otomotiv gibi farklı sektörlerde kullanılmaya başlanan silika aerjeller, sonraki dönemlerde çimento esaslı yapı malzemelerinde üstün yalıtım özellikleri nedeniyle kullanılmaya başlanmıştır. Silika aerjeller $0,003-0,015 \text{ g/cm}^3$ gibi düşük yoğunluğa ve $0,013-0,02 \text{ W/m.K}$ ısı iletkenliğe sahip nano gözenekli oldukça iyi ısı yalıtım malzemesidir. Düşük tokluk derecesine sahip aerjeller, yüksek sertlik/yoğunluk oranında, oldukça kırılgan malzemeler olarak bilinir. Aerjel kompozit malzemelerin uygulanmasına ilişkin son yıllarda yapılan çalışmalar, yapılarda enerji verimliliğini artırma açısından büyük önem taşımaktadır (Al Zaidi ve diğerleri, 2019; Liu ve diğerleri, 2018; Y. Huang ve Niu, 2015; Cuce, Cuce, Wood, ve Riffat, 2014; Kim, Seo, Cha, ve Kim, 2013).

Hidrofobik silika aerjeller köpük betonda düşük iletkenliğin yanı sıra nem direncinin artmasına da fayda sağlamakta fakat köpük betonun hazırlanması sırasındaki karıştırma işlemi, kullanılan aerjelin hirofilik olmasını gerektirmektedir. Hidrofobik silika aerjelin karıştırma sırasında kullanımı, köpük betonun matrisinde ciddi bir ayrışmaya ve köpük ajanlarıyla oluşturulan köpük yapısının bozulmasına sebep olmaktadır (Yoon, Lim, Jeong, ve Yang, 2020). Bu durum da köpük betonda kullanılmak istenen hidrofobik silika aerjelin kullanım şekli için yeni yöntemler araştırılmasına imkân sağlamaktadır.

Gao ve diğerleri silika aerjel ile hafif ve ısı yalıtımlı bir beton elde ederek inşaat uygulamalarında kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Aerjel içeriği değiştirilerek termal iletkenliği, yoğunluğu ve mekanik özellikleri kontrol edilebilen aerjel katkılı beton, bu

çalışmada %60 arojel içerikli, 1 g/cm³ yoğunluk 0,26 W/m.K ısı iletkenlik ve yaklaşık 8,3 MPa basınç dayanım değerlerine sahip olarak tasarlanarak kullanılmıştır. EPS kullanılarak üretilen betonlarla değerleri karşılaştırılmış ve arojelin yüksek maliyetinin inşaat sektöründe kullanılmasına engel teşkil etmesine rağmen özel bina uygulamalarında faydalı ürünler olabileceği sonucuna varılmıştır (Gao, Jelle, Gustavsen, ve Jacobsen, 2014). Çizelge 2.10 ile EPS ve arojel katkı ı betonların özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.10. EPS ve arojel katkı ı betonların özellikleri (Gao ve diğerleri, 2014)

Parametre	EPS Katkı ı Beton	Arojel Katkı ı Beton
Yoğunluk, kg/m ³	750	1000
Isı iletkenlik, W/m.K	0,26	0,26
Basınç dayanımı, MPa	5,8	8,3
Eğilme dayanımı, MPa	-	1,2
Yangın dayanıklılığı	Zayıf	İyi
Üretim maliyeti	Düşük	Yüksek

Al Zaidi ve diğerleri arojel ve uçucu kül kullanılarak üretilen harcın mekanik ve termal özelliklerini incelemişlerdir. Çimento hacminin %60'ı arojel, ağırlıkça %50'si kumun yerine uçucu kül kullanılması ve ağırlıkça %1-3 oranında nano-silika ile oluşturulan harcın, farklı kür koşullarına bağı ı mekanik ve termal özelliklerinde meydana gelen değı ışiklikler araştırılmıştır. En uygun kür koşulunun bir hafta suda ardından 28 gün havada beklemesiyle oluşmuştur. 7 gün suda bekletilip çıkarıldıktan sonra 21 gün oda koşullarında bekleyen numunelerin basınç dayanımlarının 29,3-30 MPa değerleri arasında değı ıştiğı , 28 gün kürlenmek üzere suda bekleyen ardında 1 gün oda koşullarında bekleyen numunelerin basınç dayanımlarının ise 26-28,9 MPa değerleri arasında değı ıştiğı gözlemlenmiştir. En düşük basınç dayanımları 20,9-27,2 MPa değerleri arasında değı ışen 25°C sıcaklık, %50 nem ve 7 gün suda bekleyen numunelerde ve bu yöntemle kürlenip 28 gün tekrar oda sıcaklığında bekleyenlerde ise en düşük ısı iletkenlik değerleri 0,762-0,865 W/m.K elde edilmiştir. Kür koşullarının beton numunelerinde etkili olduğı açıkça görülmüş, su moleküllerinin C-S-H jellerinin oluşmasında önemli katkı sağladığı sonucuna ulaşılmıştır (Al Zaidi ve diğerleri, 2019).

Wang ve arkadaşları arojellerin düşük yoğunluğu ve ısı iletkenlik değerlerinde yararlanmak amacıyla betonda kullanılabilirliği hakkında çalışma yapmışlardır. Bu

çalışmada beton üretiminde kullanılan kum hacminin %10, %20, %30, %40 %50 ve %60 oranlarında silika arojel ikame edilerek numuneler üretilmiş, ısı iletkenliğin sıcaklık (20-90°C) ve nem (%0-%100) ile değişimi incelenmiştir. Arojel oranının artması ısı iletkenlik katsayısını dūřürmūř, arojel oranı %0'dan %60 a çıktığında ısı iletkenlik %79,3 azalmıştır. Bağıl nemin artması, arojel katkısının arttığı numunelerde yoğunluk farkını artırmıştır. Sıcaklık değişimde ise sıcaklığın artması ısı iletkenliğini artırmış, arojel içeriğinin artması 20°C en dūřük değere ulaşmıştır (Y. Y. Wang ve diğerleri, 2019).

Bostancı silika arojel katkısının alkali-aktive edilmiş hibrit silis dumanı harçları üzerinde mekanik, termal iletkenlik ve mikro yapı özelliklerini incelemiştir. Arojel katkı oranlarını çimento ağırlılığının %0, %0,25, %0,50'si gibi dūřük düzeylerde tutarak, harç içerisine çimento ağırlılığınca %0,1 ve %0,2 dozajlarında sodyum karbonat eklenmiştir. 2,7 ve 28 gün küre tabi tutulan, %0,25 oranında arojel katkılı numunelerde maksimum %2,4 basınç kaybına karşılık %28 termal yalıtım gelişimi gözlenmiştir. Hibrit silis dumanı harçlarında jel gözenek oluşumu %40 oranındadır, jel gözenek oluşumunun yüksek seviyede olması kapiler gözeneklerin oluşumunu sınırlamakta ve böylece silika arojel katkısının basınç dayanımındaki olumsuz etkisi önlenebilmektedir. Yapılan çalışma önceki çalışmalarda kullanılan kum-arjel değişimine alternatif bir çözümluştur (Bostancı, 2021).

Gomes, Colen, Silva ve Pedroso ısı yalıtım harçlarını silika arojel ve EPS bazlı üreterek farklı kür ortamları ve nem değerleri için ısı iletkenlik tespitinde farklı yöntemler kullanarak ısı iletkenlik katsayılarına, arojel katkısının ve nem içeriğinin etkilerini incelemişlerdir. %100 silika arojel içeren harçların ısı iletkenlik katsayısının EPS içeren harçlardan %55 daha dūřük olduğu tespit edilmiştir. Isı yalıtım harçlarına silika arojel katkısı nem içeriğinde yüksek hassasiyete sebep olmuştur. Isı iletkenlik katsayısının tespiti için kullanılan kararlı durum yöntemi Isı Akış Ölçer (HFM) ve geçici hal durumu Deđiřtirilmiř Geçici Düzlem Kaynağı (MTPS), Geçici Çizgi Kaynağı (TLS) yöntemleri karşılaştırıldığında, minimum ısı iletkenlik katsayıları EPS kullanılan harçlarda 0,052 W/m.K değerı ile METPS yöntemiyle, EPS-Silika arojel kullanılan harçlarda ise 0,028 W/m.K değerı ile HFM yöntemiyle elde edilmiştir. Kararlı hal yöntemi geçici yöntemlere göre daha dūřük sonuçlar vermiştir ve geçici yöntemleri küçük numuneler için daha uygun olacağı önerilmiştir (Gomes, Flores-Colen, da Silva, ve Pedroso, 2018).

Jia ve Li aerojel ve genleştirilmiş perlitli çimento esaslı harçlarda kullanıp termal özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Aerojel ve genleştirilmiş perlitli birlikte kullanmanın yüksek termal performansı daha düşük maliyet ile elde edilmesine imkân sağlamıştır. Hidrofobik aerojel/genleştirilmiş perlit kompozit malzemesinin, harcın taze karışımının işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilediği, silis dumanı katkısının bu durumun önlenmesi için bir yöntem olabileceği sonucuna varılmıştır. 524-951 kg/m³ değerleri arasında yoğunluğa sahip olan aerojel/genleştirilmiş perlit kompozit malzemesinin basınç dayanımı değerleri 3,79-14,47 MPa arasında, ısı iletkenlik katsayıları ise 0,1063-0,1953 W/m.K arasında bulunmuştur. Aerojelin elde edilen malzemede karalı durumu sebebiyle ısı iletkenlik değerleri, genleştirilmiş perlitli çimento esaslı kompozitlere göre %10,8-%28,5 azaldığı gözlenmiştir (Jia ve Li, 2021).

Chen ve diğerleri genleştirilmiş perlit ve silika aerojel içeren uçucu kül bazlı hafif duvar malzemeleri üretmek amacıyla çalışma yapmışlardır. 119 kg/m³ yoğunluğa ve 0,0277 W/m.K ısı iletkenlik katsayısına sahip silika aerojel, genleştirilmiş perlitin yüzeyine emprenye yöntemiyle sentezlenerek, optimize edilmiş %20 GP/Silika aerojel oranında uçucu kül bazlı duvar panelleri üretimine eklenmiştir. Üretilen hafif duvar malzemelerinin 335 kg/m³ yoğunlukta basınç dayanımları 0,88 MPa ve ısı iletkenlik katsayıları önemli ölçüde az olarak 0,050 W/m.K bulunmuştur. Genleştirilmiş perlit ve silika areojel kompozitinden oluşan uçucu kül bazlı duvar malzemelerinin, binada termal izolasyon için verimli bir şekilde kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır (Chen ve diğerleri, 2020).

2.3. Hafif Beton

Beton kolay uygulanma ve diğer yapı malzemelerine göre düşük maliyeti dolayısıyla inşaat sektöründe ülkemizde ve dünyada kullanılan en yaygın yapı malzemesidir. Beton içerisinde kullanılan agregaların yüksek birim ağırlığa sahip olması, taşıyıcılık için önemli olmasına karşın, agregalar içerisinde bulunan boşlukların az olmasından dolayı ısı iletkenlik katsayılarının yüksek olmasına sebep olmaktadır. (Serin, Çankıran, Başyigit, Taş, ve Fenkli, 2007; Karthika ve diğerleri, 2021). Hafif beton, yoğunluğu etüv kurusu durumunda 300-2000 kg/m³ arasında olan, 1-60 MPa değerleri arasında basınç dayanımına sahip ve 0,2-1,0 W/m.K ısı iletkenlik değerlerinde betonlardır. Hafif betonlar yapısal beton olarak kullanılmaktan ziyade üstün termal özelliklerinden dolayı yapı sisteminde yalıtımın geliştirilmesi için kullanılmaktadır (Clarke, 1993).

2.3.1. Hafif betonların sınıflandırılması

Hafif betonların birçok çeşidi bulunduğundan yoğunlukları, dayanımları, yapıda kullanımı ve üretim yöntemlerine göre sınıflandırılmıştır.

Yoğunlukları ve dayanımları da baz alınarak yapısal hafif beton ve yalıtım hafif betonu olarak ayrılmıştır.

- Yoğunlukları $1600-200 \text{ kg/m}^3$ arasında olan, 15 MPa 'dan büyük basınç dayanımına sahip ve ısı iletkenlik değerleri aranmayan hafif betonlar yapısal hafif beton olarak,
- Yoğunlukları 1600 kg/m^3 ten az, basınç dayanımı $3,5 \text{ MPa}$ 'da fazla ve ısı iletkenlik katsayısı $0,75 \text{ W/m.K}$ 'dan küçük olan betonlar hem yapısal hem yalıtım hafif betonu olarak,
- Yoğunlukları 1450 kg/m^3 ten az, en az $0,5 \text{ MPa}$ dayanıma sahip ve $0,30 \text{ W/m.K}$ ısı iletkenlik değerlerine sahip betonlar ise yalıtım hafif betonu olarak sınıflandırılmıştır (Clarke, 1993).

Hafif betonlar, “TS EN 206+A2 2021 Beton- Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk” yönetmeliğine göre, yoğunluk sınıfları D 1,0 ve D 2,0 arasında isimlendirilip yoğunluk değişimine göre sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma şekli Çizelge 2.11’de verilmiştir.

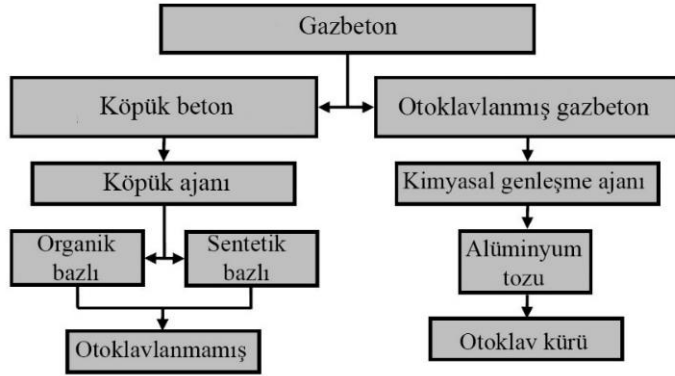
Çizelge 2.11. Hafif betonların yoğunluklarına göre sınıflandırılması (TS EN 206+A2)

Yoğunluk sınıfı	D 1,0	D 1,2	D 1,4	D 1,6	D 1,8	D 2,0
Yoğunluk Aralığı	$\geq 800 \text{ ve}$	$> 1000 \text{ ve}$	$> 1200 \text{ ve}$	$> 1400 \text{ ve}$	$> 1600 \text{ ve}$	$> 1800 \text{ ve}$
(EN 12390-7) kg/m^3	≤ 1000	≤ 1200	≤ 1400	≤ 1600	≤ 1800	≤ 2000

Üretim yöntemlerine göre hafif betonlar üç sınıfa ayrılmıştır:

- Betonda kullanılan normal agrega yerine, özgül ağırlığı $2,6$ ‘dan daha düşük olan hafif agregalar kullanılarak üretilen hafif agregalı beton,
- Beton veya harç kütlesi içinde fiziksel veya kimyasal yollarla elde edilen hava boşlukları oluşturularak üretilen; hücreli, köpük veya gazbeton olarak bilinen betonlar,
- Beton karışımından ince agrega olan kumun kaldırılmasıyla oluşturulan kumsuz beton olarak adlandırılan betonlardır (Mohammed ve Hamad, 2014).

İçerisinde hava boşlukları bulunan gazbetonlar üretim yöntemlerine göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma otoklavlanmamış gazbeton (köpük beton) ve otoklavlanmış gazbeton şeklindedir.



Resim 2.10. Gazbeton sınıflandırılması

2.4. Köpük Beton

Köpük beton TS 13655'e göre, çimento ve/veya kireç gibi hidrolik bağlayıcının, silis esaslı ince malzeme, gözenek (kapalı boşluk) oluşturan malzeme ve su ile karıştırılmasıyla elde edilen malzemedir. Net kuru birim kütlesi $300-1000 \text{ kg/m}^3$ arasında değişebilen ve en az 1,5 MPa basınç dayanımına sahip olması gerekmektedir.

Köpük beton, kimyasal bir köpürtme maddesi kullanılarak, çimento harcına büyük hacimlerde havanın sürüklenmesiyle elde edilir. Yüksek hacimli hava sürüklenmesi düşük yoğunluğa, yüksek poroziteye ancak düşük dayanıma sebep olmaktadır (Kearsley ve Wainwright, 2001a).

Köpük beton; toplam hacminin en az %20'si mekanik yollarla üretilen hava kabarcıklarından oluşan, homojen gözenek yapısına sahip çimento harcından oluşan, istenilen yoğunlukta tasarlanabilen hafif bir malzemedir. İyi termal ve akustik değerlere, kendiliğinden yerleşme dolayısıyla üretim kolaylığına sahip olan köpük beton, yapılarda ara bölme veya taşıyıcı duvar olarak kullanılabilir (Mydin ve Wang, 2012).

Köpük betonu, hava sürükleyici katkı veya hafif agrega kullanılarak üretilen hafif betonlardan ayıran özelliği, taze beton harcına veya çimento harcına önceden hazırlanan

doğrudan köpük ajanlarıyla oluşturulan köpüklerin katılarak sertleştirilmiş bir yapı oluşturmasıdır. Köpük ajanı, düşük yoğunluklu hafif beton üretmek amacıyla kullanılan, koyu renkli, vinilik reçine ve alkilaril sülfonattan oluşan bir katkı malzemesidir. Bu katkıları oluşturulmak istenen köpük betonun karma suyuna ilave edilip, kuvvetli bir karıştırma sonucunda köpük oluştururlar. Köpük ajanlarıyla beton içerisinde oluşturulan hava içeren gözenekler sertleşmiş betonun hacimce %10-90'ını kaplar. Bu durum köpük betonun ısı iletkenliği, ses emme ve soğurma, durabilite özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir (Hou, Li, Lu, ve Niu, 2021; Akman ve Akçay, 2005).

Köpük beton üretiminde kullanılan köpük ajanları sentetik, bitkisel veya hayvansal (protein) bazlı yüzey aktif maddeler olarak sınıflandırılırlar. Protein ve sentetik esaslı köpük ajanları, köpük beton üretiminde yaygın olarak kullanılan türlerdir. Protein esaslı köpük ajanları hayvan kanının reçinesinden elde edilirken, sentetik esaslı köpük ajanları ise genellikle suyun yüzey gerilimini azaltan sodyum lauret sülfat içerir. Köpük ajanının çeşidi ve köpük betonun özelliklerine etkisiyle ilgili birçok çalışma yapılmış ve bu çalışmalar doğrultusunda basınç dayanımı ve yoğunluk arasında bir ilişki olduğu saptanmıştır. Yoğunluğun azalmasıyla sertlik ve basınç dayanımının azaldığı, bu durumun su/çimento oranı ve köpük hacmiyle doğru orantılı olduğu ortaya çıkmıştır (Hashim ve Tantray, 2021; Siva, Ramamurthy, ve Dhamodharan, 2017).

2.4.1. Köpük betonun özellikleri

Köpük beton, taze ve sertleşmiş haldeyken farklı özelliklere sahiptir.

Taze beton özellikleri

Köpük beton taze haldeki özellikleri işlenebilirlik ve kıvam, yoğunluk, kütleme ve hisdatasyon ısı başlıkları altında incelenebilir.

İşlenebilirlik ve kıvam

Taze betonun en önemli özelliği olan işlenebilirlik; kıvam, akışkanlık, pompalanabilirlik ve sıkışabilirlik kavramlarını da içerisinde barındırır. Kıvam işlenebilirliğin ölçüsü olarak bilinmektedir. Köpük betonda kıvam üzerindeki etkili en önemli faktörler bileşenlerin uyumu ve su içeriğidir. Karışım içeriği, kıvam gereksinimleri, kimyasal katkıları ve köpük kararlılığına bağlı olarak köpük betonda su/çimento oranı 0,4-0,8 arasındadır. Köpük

betonda su içeriğinin artırılması döküm sırasında işlenebilirlik performansı etkilemekte ve köpük beton içerisindeki hava kabarcıklarının ayrışmasına sebep olabilmektedir. Köpük eklenmeden önceki karışımda çok az su kullanılması ise çimentonun nem ihtiyacını köpükten karşılayıp betonun çökmesine sebep olabilmektedir (Amran, Farzadnia, ve Ali, 2015; Wee, Babu, Tamilselvan, ve Lim, 2006).

Yoğunluk

Köpük betonun kuru yoğunluğu, 400-1800 kg/m³ değerleri arasında olabilmektedir. Taze yoğunluk ve kuru yoğunluk arasında farkın 100-120 kg/m³'ü aşmaması önerilmektedir. Köpük betonda yoğunluk ve basınç dayanımı arasında doğru bir orantı bulunmaktadır, yoğunluk azaldıkça, sertlik ve basınç dayanımı da buna paralel azalmaktadır (Amran ve diğerleri, 2015; Kearsley ve Wainwright, 2001b).

Kürleme

Köpük beton sertleşirken içerisindeki hava kabarcıkları şekil değiştirerek parçalanır ve mevcut suyunu serbest bırakır. Serbest haldeki su çimento tarafından emilerek hidrasyona katkı sağlar. Köpük betonlar su ile kürlenmeye bu yüzden daha az ihtiyaç duyarlar ancak kuru kürlenme ve su ile kürlenme karşılaştırıldığında su ile kürlenmede betonun mukavemetinde artış olduğu gözlenmiştir (Jones ve McCarthy, 2005).

Hidrasyon ısısı

Hidrasyon çimento tanelerinin su ile tepkimeye girmesi sonucu oluşan kimyasal bir olaydır. Köpük betonlarda yüksek hava hacmi nedeniyle hidrasyon olayı uzun sürer ve beton içerisinde yüksek sıcaklıklar oluşur. Hidrasyon ısısı yoğunluk ile doğrudan ilgilidir. Köpük betonda yoğunluğun azalması beton içerisindeki sıcaklık değişimin azalmasına katkı sağlamaktadır, uçucu kül katkısı betonun iç sıcaklığının azalmasında etkilidir (Jones ve McCarthy, 2005).

Sertleşmiş beton özellikleri

Köpük betonun sertleşmiş haldeki özellikleri dayanım ve elastisite modülü, gözeneklilik ve su emme, termal ve akustik özellikler ve yangın direnci başlıkları altında incelenebilir.

Dayanım ve elastisite modülü

Köpük betonda dayanımı etkileyen başlıca unsurlar; köpük ajanı ve kullanılan oran, harç karışım oranı, s/ç oranı ile yoğunluk ve kürleme yöntemleridir. Ağırlıklı olarak yoğunlukla ilişkilendirilen basınç dayanımı 0,34-20 MPa değerleri arasında olabilmektedir. Kuru yoğunluğun azalmasıyla basınç dayanımının azaldığı farklı çalışmalarda gözlemlenmiştir. Köpük betonun basınç dayanımı kullanılan köpük ajanının türüne bağlı olarak da değişebilmektedir. Protein bazlı köpük ajanları kullanılarak üretilen köpük betonların basınç dayanımları, sentetik esaslı köpük ajanları kullanılarak üretilen köpük betonlara göre daha fazla olmaktadır (Kearsley ve Wainwright, 2001b; Jones ve McCarthy, 2005; Davraz, Kılıçarslan, ve Kuru, 2015).

Köpük betonun statik elastisite modülü normal betona göre, ince agrega içermemesinden dolayı düşüktür. 500-1500 kg/m³ değerleri arasında kuru yoğunluğa sahip köpük betonların elastisite modülleri 1000-8000 MPa değerleri arasındadır (Kearsley ve Mostert, 2005).

Gözeneklilik ve su emme

Köpük betonun gözenek yapısı, jel gözenekleri ve kılcal gözeneklerden oluşmaktadır. Gözeneklerin miktarı, büyüklüğü, dağılımı ve birbirleriyle olan bağlantıları, köpük betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Yüksek hava içeriğine sahip köpük betonlarda bulunan büyük hava boşlukları, kullanılan malzemelerin homojen olarak dağılmasını engellemektedir, ince kum veya uçucu kül kullanmak bu durumun önüne geçebilmektedir. Uçucu kül kullanımı hava kabarcıklarının üst üste binmelerini engelleyerek, beton içerisinde düzgün dağılmalarını sağlamaktadır. Köpük betonda yoğunluğun azalmasıyla gözeneklerin artmasına karşın su emme miktarı azalmaktadır. Köpük hacminin artması, jel gözeneklerini artırırken kılcal gözenekleri azaltması, su emiliminin azalmasının sebebi olarak görülmektedir (Nambiar ve Ramamurthy, 2007).

Termal özellikler

Köpük beton içerisinde barındırdığı gözenekleri sayesinde düşük ısı iletkenlik katsayısına sahiptir ve bu yüzden iyi bir yalıtım malzemesidir. Kuru yoğunluğu 600-1600 kg/m³ arasında olan köpük betonlarda ısı iletkenlik katsayısı 0,1-0,7 W/m.K değerli arasında

değişmektedir. Köpük betonun ısı iletkenlik katsayısı, normal betonların %5'i ile %30'u arasındadır (Ören, 2017).

Akustik özellikler

Sesin köpük betondan iletimi, yoğunluk ve frekansa bağlı olup, duvarın sertliğine ve iç direncine bağlıdır. Köpük betonun ses emme özelliği, normal betona kıyasla daha yüksektir. 400-700 kg/m³ değerleri arasında yoğunluğa sahip köpük betonların ses emme katsayılarının 0,20-0,30 değerleri arasında olduğu, betonun yoğunluğunun azalmasıyla ses emme katsayılarının arttığı gözlemlenmiştir (Raj, Sathyan, ve Mini, 2019).

Yangın direnci

Köpük betonun gözenekli yapısı, yüksek sıcaklıklarda ısı transferini etkilediğinden yangına dayanıklılıkta önemli bir avantaj sağlar. Köpük betonun düşük yoğunluklarda, normal betonlara göre yangın direncinin daha fazla olduğu, yoğunluğun artmasıyla ise bu eğilimin tersine döndüğü, yapılan bir çalışmada belirtilmiştir (Sayadi, Tapia, Neitzert, ve Clifton, 2016).

2.4.1. Köpük betonun kullanım alanları

Yapılarda zemin, iç ve dış duvarlar gibi yerlerde, taş, tuğla, bims, tesviye betonu, mantolama gibi geleneksel yapı malzemelerinin yerine, hafif, ısı yalıtım ve ses yalıtım özellikleri yüksek, çevreye zararlı bir etkisi bulunmayan köpük betonlar kullanılabilir. Endüstriyel yapılarda akustik yalıtım, zeminlerde hafiflik istenen durumlar, boruların geçirimsizlik yalıtımı, yangına maruz kalan yerler, ısı farkının fazla olduğu yerler, dolgu betonunda termal izolasyon, hafif döşeme ve duvar üretimi amacıyla köpük beton kullanılmaktadır. Ayrıca tünel, maden kuyu boşluklarının doldurulması, zemin ıslahı, yol ve kaldırım tabanları, yol altı tesviye-izolasyon amacıyla da kullanılabilir (Amran ve diğerleri, 2015).

Köpük betonlar, yoğunluklarına göre kullanım alanları olarak ayrılabilir:

- 400 kg/m³ ile 600 kg/m³ yoğunluk arasında tavan ve yer döşemesinde ısı ve ses yalıtımı amaçlı,

- 600 kg/m³ ile 900 kg/m³ yoğunluk arasında blok ve panel üretiminde,
- 900 kg/m³ ile 1200 kg/m³ yoğunluk arasında yapıda dış ve bölme duvar olarak ve blok ve panel üretiminde,
- 1200 kg/m³ ile 1600 kg/m³ yoğunluk arasında yapıda taşıyıcı duvar olarak ve blok ve panel üretiminde

kullanılmaktadır (Bekaroğlu, 2012).

Pan ve diğerleri Portland çimentosu kullanarak çok düşük yoğunlukta köpük beton üretmek amacıyla deneysel çalışma yapmışlardır. Hızlı sertleşen ve önceki çalışmalarda kullanılan sülfatlı çimentosu gibi özel çimento yerine Portland çimentosu kullanarak köpük betonun özelliklerini incelemişlerdir. 150-300 kg/m³ değerleri arasında oldukça düşük yoğunluklarda üretilen köpük betonlarda 28 gün kür sonucunda 0,33-1,10 MPa değerleri arasında basınç dayanımı elde edilmiştir. Su emme değerleri %6,6 ile %8,3 arasında değişirken ısı iletkenlik katsayıları 0,05-0,07 W/m.K değerleri arasındadır (Pan, Li, ve Liu, 2014).

Strzalkowski, Sikora, Chung ve Abd Elrahman yaptığı çalışmada hafif agrega ile üretilmiş beton ve köpük betonun termal performansını karşılaştırmışlardır. Kuru yoğunlukları 500 kg/m³, 750 kg/m³ ve 1000 kg/m³ olarak tasarlanan köpük betonlar (FC) ile aynı kuru yoğunlukta hafif agregalı beton (LWC) üretmişlerdir. Isıl iletkenlik katsayıları yoğunluklarına göre yakın değerlere sahip olmalarına rağmen özgül ısılarının farklılığı sebebiyle termal performanslarının farklı olacağı sonucuna varmışlardır. Yapılan çalışma ile elde edilen sonuçlar Çizelge 2.12 ile gösterilmiştir. Yalıtım malzemesi olarak kullanılabilecek bu iki malzemenin mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesini daha faydalı sonuçlar için önermişlerdir (Strzalkowski, Sikora, Chung, ve Abd Elrahman, 2021).

Çizelge 2.12. LWC-FC özellikleri (Strzalkowski ve diğerleri, 2021)

Malzeme	Kuru yoğunluk (kg/m ³)	Isıl iletkenlik (W/m.K)	Özgül ısı (J/kg.K)
FC500 (500 kg/m ³)	505	0,14	0,413
FC750 (750 kg/m ³)	785	0,24	0,427
FC1000 (1000 kg/m ³)	930	0,31	0,339
LWC500 (500 kg/m ³)	500	0,14	0,309

Çizelge 2.12. (devam) LWC-FC özellikleri (Strzalkowski ve diğerleri, 2021)

Malzeme	Kuru yoğunluk (kg/m ³)	Isıl iletkenlik (W/m.K)	Özgül ısı (J/kg.K)
LWC750 (750 kg/m ³)	695	0,22	0,301
LWC1000 (1000 kg/m ³)	940	0,33	0,289

Demir ve arkadaşları köpük betonun reolojik özellikleriyle ilgili çalışma yapmışlardır. Deneysel yöntemlerle elde ettikleri sonuçlara göre; köpük beton karışımında akışkanlaştırıcı kullanmak daha az su gereksinimi sağlamakta, harç yoğunluğu azaldığında yani köpük miktarı artırıldığında aynı akışkanlık için su miktarı artmakta, harç yoğunluğu azaldığında akış yoğunluğu artmakta akışkanlık azalmakta, normal betonlar gibi köpük betonlarda da su/bağlayıcı oranının artması mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir. Marsh Hunisi kullanılarak yapılan denemelerde akış süresinin 1 dakikayı geçmesi durumunda harcın yüksek viskoziteye sahip olduğu ve mekanik özellikleri olumsuz etkilediği, 25 saniyeden az olan akış süresinde harcın akışkan olmasına ve bir süre sonra kalıpta çökmesine neden olmaktadır (Demir, Başpınar, ve Kahraman, 2017).

Kumar, Arunkumar ve Senthil farklı yoğunluklardaki köpük betonların mekanik özelliklerinin ve termal özelliklerinin kil tuğla ile karşılaştırılması üzerine bir çalışma yapmışlardır. %15, %17 ve %20 oranlarında hava içeriğine sahip üretilen köpük betonlarda 860-1245 kg/m³ kuru yoğunlukta, ısı iletkenlik katsayıları 0,021-0,035 W/m.K değerleri arasında değişmektedir. Köpük betonların basınç dayanımları ise 2,36-6,5 MPa değerleri arasındadır. Yaygın kullanılan, 1. Sınıf ve 2. Sınıf kil tuğlalar ile karşılaştırıldığında (Çizelge 2.13) köpük beton kullanımının hafifliklerinden dolayı yapının ölü yüklerini %50 oranda azaltabileceği, düşük ısı iletkenlik katsayıları sebebiyle iklimlendirme maliyetlerini minimuma indirebileceği ve köpük betonların pürüzsüz yüzeyi sayesinde sıva maliyetlerini düşürebileceği sonucuna varılmıştır (Kumar, Arunkumar, ve Senthil, 2018).

Çizelge 2.13. Köpük beton ve tuğlanın özelliklerinin karşılaştırılması (Kumar ve diğerleri, 2018)

Özellik	Yaygın tuğla	2. Sınıf tuğla	1. Sınıf tuğla	Köpük beton
Kuru yoğunluk (kg/m ³)		1600-1920		860-1245
Isıl iletkenlik (W/m.K)		0,6-1,0		0,021-0,035
Basınç dayanımı (MPa)	3,5	7,5	10	2,36-6,5

Li ve diğerleri köpük betonu oluşturmak için kullanılacak köpük gazı ve çimento tipinin ısı iletkenliğe araştırmak amacı ile bir çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında köpük gazı oluşturmak için hava ($\lambda:0,0242$ W/m.K), oksijen ($\lambda:0,0240$ W/m.K), hidrojen ($\lambda:0,01760$ W/m.K) ve karbondioksit ($\lambda:0,0143$ W/m.K) gazları ve magnezyum fosfat çimentosu ($\lambda:1,236$ W/m.K) Portland çimentosu ($\lambda:0,4544$ W/m.K), sülföalüminat çimentosu ($\lambda:0,4307$ W/m.K) kullanılmıştır. Köpük betonun ısı iletkenliğinin köpük gazının ısı iletkenliği ile doğru orantılı olduğunu ve aralarındaki ilişkinin yüksek korelasyon katsayısına sahip olduğunu incelemişlerdir. Kapalı gözeneklere sahip, hidrojen veya karbondioksit gazı kullanılan köpük betonların ısı iletkenliği, betonun yaşı arttıkça yükselmiş ve köpük gazı olarak hava kullanılan köpük betonlara yaklaştığı gözlemlenmiştir. Magnezyum fosfat çimentosunun kullanımında daha yüksek ısı iletkenlik katsayısı elde edilirken, diğer çimentolarda yakın sonuçlar elde edilmiştir. Daha düşük ısı iletkenliğe sahip çimento kullanımı ile düşük ısı iletkenliğe sahip köpük beton üretilbileceği sonucuna ulaşmışlardır (Xu, Duan, ve Li, 2022).

Hashim ve Tantray köpük beton üretiminde kullanılan protein ve sentetik bazlı köpük ajanlarının, köpük beton üzerinde etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. 600-1200 kg/m³ yoğunluklar arasında değişen köpük beton üretiminde, köpük ajanı miktarı 30-112 kg/m³ değerleri arasında değişmiştir. Köpük stabilitesi ve mukavemet değerleri sentetik bazlı ajanın kullanıldığı köpük betonlara göre protein bazlı ajanın kullanıldığı köpük betonlarda daha iyi sonuçlar vermiştir. 1200 kg/m³ yoğunlukta protein bazlı ajanın kullanıldığı köpük betonda sentetik bazlı ajanın kullanıldığı köpük betondan %13 daha yüksek mukavemet elde edilmiş, kuruna büzülmesi değerlerinde aynı şekilde protein bazlı ajanın kullanıldığı köpük betonlarda %29 daha düşük değerler elde edilmiştir. Protein bazlı köpük ajanı kullanımı köpük betonun özelliklerini geliştireceği ortaya çıkmıştır (Hashim ve Tantray, 2021).

Gencel ve diğerleri köpük betonda çimento kullanımının sürdürülebilir ve geri dönüştürülmüş agregalar ile azaltılmasını amaçlayarak, geri dönüştürülmüş ince beton agregası, kalker ve taban külü kumu kullanarak köpük beton üretmişlerdir. Köpük betonların fiziko-mekanik ve termo-dayanıklılık özelliklerini belirlemek için deneyler uygulamışlardır. Geri dönüştürülmüş ince beton agregası ve taban külü kumu kullanımının artması ile işlenebilirliğin azaldığı gözlemlenmiştir. %100 kireçtaşı kumu kullanılan köpük betonun, geri dönüştürülmüş ince agrega ve taban külü kullanımına oranla daha yüksek

eğilme ve basınç mukavemeti gösterdiğini ve geri dönüştürülmüş ince agreganın mukavemet üzerinde olumsuz etkisinin daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Kullanılan agregaların Üretilen köpük betonların fiziko-dayanıklılık gerektirmeyen termo-akustik direnç gerektiren alanlarla kullanılabileceğini önermişlerdir (Gencel ve diğerleri, 2022).

Kılıçer pomza ve genleştirilmiş perlitin köpük ajanı kullanılarak oluşturulan köpük betonlarda agrega olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Pomza ve genleştirilmiş perlitin %30'a kadar çimento ile yer değiştirmesiyle oluşturulan köpük betonlarda 728 kg/m^3 yoğunlukta 3,1 MPa basınç dayanımına, genleştirilmiş perlit agregalı köpük betonlarda da 273 kg/m^3 yoğunlukta 0,078 W/m.K ısı iletkenlik katsayısına ulaşılmıştır (Kılıçer, 2018).

Sayadi ve diğerleri köpük betonda genleştirilmiş polistren köpük kullanarak, betonda termal, mekanik ve yangın özellikleri ile ilgili inceleme yapmışlardır. Yoğunlukları $150\text{-}1200 \text{ kg/m}^3$ değerleri arasında, %0-82,22 oranların arasında polistren köpüklü, 0,33 s/ç oranına sahip numuneler üretilmiştir. Polistren köpüğün hidrofobik yapıya sahip olması düşük ara yüzey bağ kuvvetine neden olmuş ve köpük betonun basınç dayanımı polistren köpüğün artmasıyla azalmıştır. Basınç dayanımının aksine polistren köpüğün hacminin artışı köpük betonun düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip olmasını sağlamıştır. En yüksek %82 oranında kullanılan polistren köpük ile en düşük ısı iletkenlik katsayısı 0,0848 w/m.K elde edilmiştir. Köpük beton yüksek sıcaklığa maruz kaldığında içerisindeki polistren köpükler küçülerek mukavemet kaybına neden olmuş, köpük beton içerisindeki hacmi arttıkça da yangın direnci düşmüştür (Sayadi ve diğerleri, 2016).

Li ve diğerleri arojel içeren köpük betonun termal özellikleri ve mikro yapısını incelemişlerdir. Bu kapsamda; 198 kg/m^3 gibi çok düşük yoğunlukta ve 0,049 W/m.K ısı iletkenlik katsayısına sahip süper yalıtkan arojel köpük betonu üretmişlerdir. Bu değerler köpük betona kıyasla %50 daha düşük olduğu gözlenmiştir. Gözenekliliğin sabit olması koşuluyla çimento içeriği azaltılıp, arojel miktarının artırılması, termal iletkenlik değerlerinin daha da azaltılabileceği ve çevre dostu, neredeyse sıfır enerji tüketimi ile arojel köpük betonun yaygın olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Li ve diğerleri, 2019).

Tan ve diğerleri yüksek sıcaklıkta köpük betonun özelliklerini belirlemek için çalışma yapmışlardır. Bu amaçla $300\text{-}450\text{-}600\text{-}800 \text{ kg/m}^3$ yoğunluklarda köpük beton üretip,

üretileen köpük betonları ortam sıcaklığı, 200°C, 400°C ve 600°C’de görünüm, basınç dayanımı ve elastisite modülü değışimi incelenmiştir. Düşük sıcaklıkta (200°C) köpük beton görünümünde fazla değışiklik olmazken, sıcaklık arttıkça yüksek yoğunluklu köpük betonlarda çatlaklar gözenirken, düşük yoğunluklu köpük betonlarda yüzeyde dökölme meydana gelmiştir. Sıcaklığın artması, köpük betonların yoğunluğu azaltmış, yoğunluğun azalmasıyla birlikte üretileen tüm numunelerin basınç dayanımı ve elastik modülü de azaltmıştır (Tan ve diğlerleri, 2017).

2.5. Isıl İletkenliğin Tespitinde Kullanılan Matematiksel Modeller

Malzemelerin efektif ısı iletkenliklerini elde etmek amacıyla birçok model kullanılmaktadır. Bu matematiksel modeller birçok malzemelerin ısı iletkenlik ve hacim değlerlerini kullanarak bu değleri tahmin ederken bazıları da bu değlere ilaveten şekil, boyut, temas etkisi gibi değlere ihtiyaç duymaktadır. Matematiksel modellerin hangisinin daha doğru sonuç vereceğı uygulama yöntemi ve uygulama aralığı dikkate alınarak seçilmelidir. Başlıca modelleri, aritmetik ve geometrik ortalama modeller, seri ve paralel modeller, Maxwell modeli, Russell modeli ve Efektif ortam teorii (EMT) modeli en çok kullanılan modellerdir. Maxwell modeli kullanılarak ortaya çıkan modeller ise Maxwell-Eucken 1, 2 modeli, Levy modeli, Nielsen modeli, Halpin-Tsai modeli gibi yaklaşımlardır (Karaağaç, Uluer, Durmuş, ve Aktaş, 2016; Yüksel, 2010).

2.5.1. Seri ve paralel modeller

Hacim oranları ve ısı iletkenlik parametrelerinin kullanıldığı başlıca modellerdir. Isı akış yönüne dik veya paralel düzenlenen iki bileşenli malzemede seri ve paralel model oluşturulmaktadır. Seri ve paralel model, ağırlıklı aritmetik ortalama ve harmonik ortalama ile verilmektedir (Bart, 1994).

$$k_{e\ seri} = \left[\frac{V_d}{k_d} + \frac{\varepsilon}{k_s} \right]^{-1} \quad (2.1)$$

$$k_{e\ paralel} = V_d \times k_d + \varepsilon \times k_s \quad (2.2)$$

Burada;

k_s : Sürekli fazın ısı iletkenliğini,

k_d : Dolgu fazının ısı iletkenliğini,

ε : Sürekli fazın hacim oranını göstermektedir.

2.5.2. Geometrik ortalama model

Etken ısı iletkenlik geometrik ortalama ile bileşenlerin ısı iletkenlik ve hacim değerleriyle elde edilmektedir. Bu model Shing vd. tarafından verilmektedir (Shing, Shing, ve Chaudhary, 1998).

$$k_e = k_s^\varepsilon \times k_d^{(1-\varepsilon)} \quad (2.3)$$

Bu fazların ağırlıklı geometrik ortalaması Kohout vd. tarafından ısı iletkenlik değerini ortaya çıkardığı ifade edilmektedir (Kohout, Collier, ve Stepanek, 2004).

$$k_e = \prod_{i=k,sv,g} k_i^{V_i} \quad (2.4)$$

Burada;

k_e : Efektif ısı iletkenliği,

V_i : i değerinin hacim oranını,

k_i : i değerinin ısı iletkenliğini göstermektedir.

2.5.3. Maxwell teorik modeli

Maxwell, potansiyel teoriyi kullanarak rastgele dağılmış homojen ve sürekli bir ortamdaki birbiriyle etkileşimi olmayan homojen küreler için, dağılı fazların birbiriyle temassız olduğu, seyrek fazlar için bir ortalama alan yaklaşım elde etmiştir (Maxwell, 1994).

$$k_e = k_s \left[\frac{2k_s + k_d - 2(k_s - k_d) \times V_d}{2k_s + k_d + (k_s - k_d) \times V_d} \right] \quad (2.5)$$

Burada;

V_d ve $(1-\varepsilon)$: Dağılı fazın hacim oranını göstermektedir.

Bu teorik model düşük dağılımlı dolgu fazlarında efektif ısı iletkenliği etkili şekilde tahmin etmektedir. Yüksek konsantrasyonlu dolgu fazlarına sahip malzemelerde, dolgu

parçaları birbiriyle temas halinde veya ısı akış yönünde iletim zincirleri oluşturmaktadır. Bu teorik model efektif ısıl iletkenliği bu yüzden düşük tahmin etmektedir. Beck, Maxwell modelinin iki bileşeninden birinin gözenekliliğinin 0,25 ve ısıl iletkenlik oranının (k_d / k_s) 10^3 'ü aşmadığı zaman güvenilir sonuçlar vereceğini belirtmiştir (Beck, 1976).

Maxwell teorik modeline, Carson vd. j parametresiyle tanımlayarak (2 katsayısı yerine kullanılan $(j-1)$ katsayısı) Maxwell-Hamilton modelini elde etmişlerdir (Carson, Lovatt, Tanner, ve Cleland, 2003).

Modifiye edilmiş Maxwell modelinde ise Maxwell modelinde kullanılan 2 katsayısı yerine $[j^2 / (1-j^2)]$ katsayısı kullanılmıştır. Seyrek dağılımlara sahip malzemeler için uygun olan bu modelde j parametresi, malzeme içerisinde ısı iletim yollarının niteliğinin ölçüsü olarak tanımlanmaktadır (Carson, Lovatt, Tanner, ve Cleland, 2006).

Maxwell-Eucken modeli Maxwell-Eucken 1 ve 2 denklemleri olarak iki şekilde tanımlanmıştır. Maxwell-Eucken 1 modeli sürekli faz olarak havanın kullanıldığı bir modeldir. Maxwell-Eucken 2 modeli izotropik iç gözenekli malzemeler için üst sınırı oluşturken Maxwell-Eucken 1 modeli ise alt sınır olarak verilmektedir (Carson ve diğerleri, 2006).

$$k_e = k_d \left[\frac{2k_d + k_s - 2(k_d - k_s) \times \varepsilon}{2k_d + k_s + (k_d - k_s) \times \varepsilon} \right] \quad (2.6)$$

Burada;

k_d : Dağılılı fazın ısıl iletkenliğini,

k_s : Sürekli ortamın ısıl iletkenliğini göstermektedir.

2.5.4. Efektif ortam teorisi (EMT)

Efektif ortam teorisi sürekli ya da dağılılı faz gelişigüzel dağılmış heterojen malzemeyi göstermektedir. Malzemenin bileşenlerinin bağıl miktarına bağlı olarak, bileşenlerden biri sürekli ısı iletim yolları oluşturabilmektedir. Efektif ortam teorisi (EMT) Eşitlik 2.7 ile verilmektedir (Carson ve diğerleri, 2006).

$$\sum_i V_i \frac{k_i - k_e}{k_i + 2k_e} = 0 \quad (2.7)$$

İki bileşenli malzeme için Eşitlik 2.8 ile verilebilir.

$$k_e = \frac{1}{4} [(3\varepsilon - 1)k_s + (3(1 - \varepsilon) - 1)k_d + \sqrt{[(3\varepsilon - 1)k_s + (3(1 - \varepsilon) - 1)k_d]^2 + 8k_s k_d}] \quad (2.8)$$

Bu denklemde k_s sürekli faz olarak havanın ısı iletkenliği ve k_d dağılı faz olarak yoğuşan sıvının ısı iletkenliği ile tanımlanmaktadır.

Carson vd. bu modelin modifiye edilmiş denklemini, modele F parametresi ekleyerek esnek bir model, k_e (k_i , v_i , F) oluşturmuşlardır. Eşitlik 2.8'de 2 sayısı yerine $[F / (1-F)]$ kullanılmıştır (Carson ve diğerleri, 2006).

2.5.5. Lewis ve Nielsen modeli

Nielsen modelinde gözenekli bir malzemenin ısı iletkenliği, sürekli ortamın ve dolgu fazının ısı iletkenliği ile ilişkilendirilmiştir.

$$k_e = k_s \left[\frac{(1 + A B V_d)}{[1 - C B V_d]} \right] \quad (2.9)$$

Burada B ve C parametreleri Eşitlik 2.10 ve Eşitlik 2.11 ile verilmiştir:

$$B = k_s \left[\frac{((k_d/k_s) - 1)}{((k_d/k_s) + w)} \right] \quad (2.10)$$

$$C = 1 + [(1 - V_M)/V_M^2] V_d \quad (2.11)$$

V_M dolgu fazının maksimum paketlenme oranı, w dolgu parçacıklarının geometrisine bağlı boyutsal şekil faktörü olarak tanımlanmıştır (Çizelge 2.14 ve Çizelge 2.15). w değeri bazı parçacıklar için 2 ve 0,5 olarak verilmektedir (Nielsen, 1974; Lewis ve Nielsen, 1970).

Çizelge 2.14. Lewis-Nielsen modeli için bazı w değerleri (Nielsen, 1974)

Dağılı Faz Türü	Isı Akış Yönü	W
Küre	Her yönde	1,50
Kümelenmiş küreler	Her yönde	2,50

Çizelge 2.14. (devam) Lewis-Nielsen modeli için bazı w değerleri (Nielsen, 1974)

Dağılı Faz Türü	Isı Akış Yönü	W
Gelişigüzel düzenlenmiş çubuk		
Görünüş oranı:2	Her yönde	1,58
Görünüş oranı:4	Her yönde	2,08
Görünüş oranı:6	Her yönde	2,80
Görünüş oranı:10	Her yönde	4,93
Görünüş oranı:15	Her yönde	8,38
Eş eksenli fiber	Fibere dik	2L/D (L:boy, D:çap)
Eş eksenli fiber	Fibere paralel	0,50

Çizelge 2.15. Lewis-Nielsen modeli için bazı V değerleri (Nielsen, 1974)

Parçacık Şekli	Paketleme Tipi	V
Küre	Heksagonal	0,7405
Küre	Yüzey merkezli kübik	0,7405
Küre	Hacim merkezli kübik	0,60
Küre	Basit kübik	0,524
Küre	Rastgele (yakın)	0,637
Küre	Rastgele (uzak)	0,601
Çubuk ya da fiber	Eşeksenli heksagonal	0,907
Çubuk ya da fiber	Eşeksenli basit kübik	0,785
Çubuk ya da fiber	Eşeksenli rastgele	0,85
Çubuk ya da fiber	Üç boyutlu rastgele	0,52

2.5.6. Halpin-Tsai modeli

Halpin-Tsai modeli tek yönlü kısa lifli malzemelerin ısı iletkenliklerini tanımlamak için kullanılmaktadır (Halpin, 1969).

$$k_e = \frac{1+2\left(\frac{L}{d_d}\right)\mu V_d}{1-\mu V_d} k_s \quad (2.12)$$

$$\mu = \frac{\left(\frac{k_d}{k_s}\right)-1}{\left(\frac{k_d}{k_s}\right)+2\left(\frac{L}{d_d}\right)} \quad (2.13)$$

Burada, d_d dolgu lif çapını göstermektedir.

Lif takviyeli malzemelerin enine ısı iletkenlikleri bu modelde $2(L/d_d)$ yerine ξ kullanılarak elde edilmiştir. Aşağıda ξ ile ilgili bağıntı verilmiştir (Gemci, 1996).

$$\log \xi = \sqrt{3} \log \left(\frac{a}{b} \right) \quad (2.14)$$

Burada, a ve b değerleri lif eksenine paralel ve dik yöndeki ölçüm katsayılarıdır.

2.5.7. Levy modeli

Levy modeli, Maxwell-Eucken modeli baz alınarak sürekli ve dağılı fazlar arasında simetri sağlamak amacıyla oluşturulmuştur. Maxwell-Eucken modelindeki iki denklemden hangisinin kullanılacağını ortadan kaldırmak için bu iki denklem bir denklem olarak ele alınmıştır. Bu denklem Eşitlik 2.15, Eşitlik 2.16 ve Eşitlik 2.17 ile verilmiştir (Levy, 1981).

$$k_e = k_d \left[\frac{2k_d + k_s - 2(k_d - k_s) F}{2k_d + k_s + (k_d - k_s) F} \right] \quad (2.15)$$

$$F = \left[\left(\frac{2}{G} \right) - 1 + 2V_d - \sqrt{\left(\left(\frac{2}{G} \right) - 1 + 2V_d \right)^2 - \left(\frac{8V_d}{G} \right)} \right] / 2 \quad (2.16)$$

$$G = \frac{(k_d - k_s)^2}{(k_d + k_s)^2 + \left(\frac{k_d k_s}{2} \right)} \quad (2.17)$$

Pham ve Willix, Levy modelindeki k_s ve k_d değerlerini yer değiştirerek efektif ısı iletkenlik denklemi oluşturmuştur (Pham ve Willix, 1989).

2.5.8. Russell modeli

Russell modeli elektrik analogisi kullanılarak, sürekli ortamda aynı boyutlu dağılı izole küplerin olduğu varsayılarak elde edilmiştir. Bu model Eşitlik 2.19 ile verilmektedir (Tavman, 1998; Russel, 1935).

$$k_e = k_s \left[\frac{V_d^{2/3} + \left(\frac{k_s}{k_d} \right) \left(1 - V_d^{2/3} \right)}{V_d^{2/3} - V_d + \left(\frac{k_s}{k_d} \right) \left(1 - V_d^{2/3} + V_d \right)} \right] \quad (2.19)$$

2.5.9. Diğer modeller

Tüm gözenekli ya da kompozit malzemeler için tek bir model elde etmek mümkün değildir ancak efektif ısı iletkenlik modelleri uygulama aralığı ile sınıflandırılabilir (Carson ve diğerleri, 2006; Yüksel ve Avcı, 2010).

- Basit ve temel bileşenleri içeren efektif ısı iletkenlik modelleri
- Ekstra parametre içeren efektif ısı iletkenlik modelleri
- Bir bileşen verisi isteyen efektif ısı iletkenlik modelleri
- Isı transfer mekanizmaları içeren efektif ısı iletkenlik modelleri.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Malzemeler

Köpük beton üretiminde kullanılan çimento, genleştirilmiş perlit, granül polistren köpük, aerogel, su ve köpük ajanının fiziksel ve kimyasal özellikleri bu bölümde detaylı şekilde incelenmiştir.

3.1.1. Çimento

Köpük beton numunelerinin üretiminde bağlayıcı olarak BAŞTAŞ firmasına ait CEM I 42,5 R Portland Çimento ve CEM II A-M (V-L) 42,5 R Portland Kompoze Çimento olmak üzeri iki tip çimento kullanılmıştır. Portland kompoze çimento içerisinde bulunan tras ve kalkerden dolayı uzun süreli mukavemeti ve Portland çimentoya kıyasla dayanımı daha yüksektir. Çizelge 3.1’de kullanılan çimentoların fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. CEM I ve CEM II çimentolarına ait özellikler

Mekanik ve Fiziksel Özellikleri		
Çimento çeşidi	CEM I	CEM II
Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	3600	4200
Priz başlangıç süresi (dk)	160	130
Hacimce genleşme miktarı (mm)	0-2	0-2
Basınç dayanımı 2 Gün (N/mm ²)	29	30
Basınç dayanımı 28 Gün (N/mm ²)	48	58

3.1.2. Genleştirilmiş perlit

Genleştirilmiş perlit agregası Kütahya merkezli GENPER firmasından temin edilmiştir. Numune üretiminde kullanılan genleştirilmiş perlitin, fiziksel ve kimyasal özellikleri ve kimyasal bileşimi Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Genleştirilmiş perlit agregasının özellikleri

Fiziksel Özellik	Toz Genleştirilmiş Perlit	Granüler Genleştirilmiş Perlit
Renk	Beyaz	Beyaz

Çizelge 3.2. (devam) Genleştirilmiş perlit agregasının özellikleri

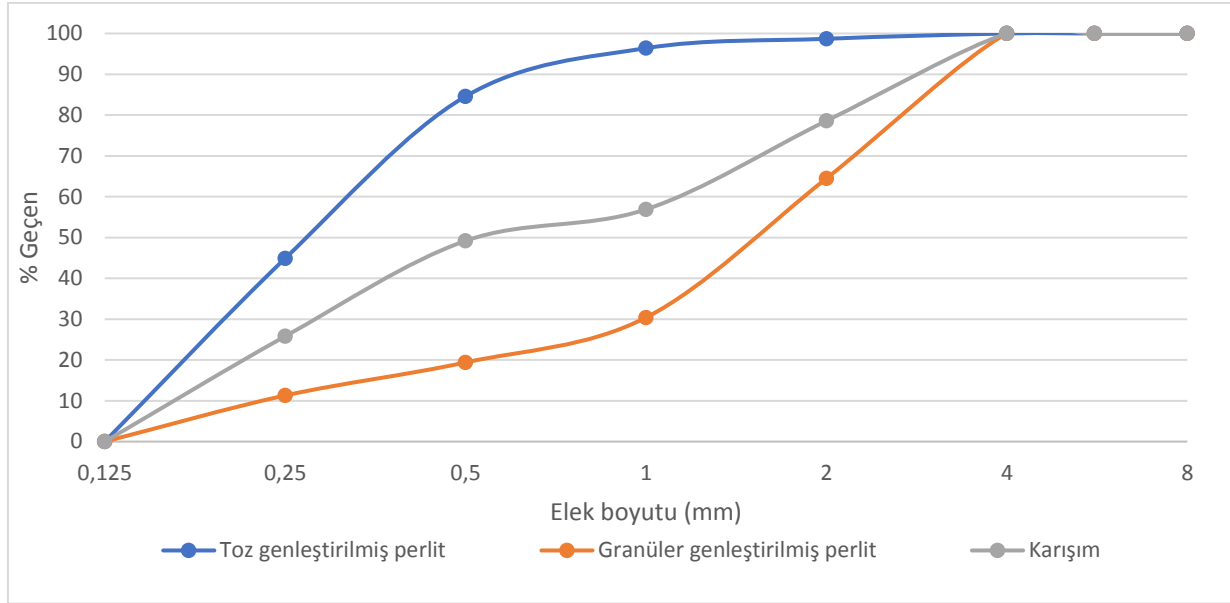
Fiziksel Özellik	Toz Genleştirilmiş Perlit	Granüler Genleştirilmiş Perlit
Sertlik	5,15	5,23
pH	7,26	7,08
Kuru yoğunluk, kg/m ³	51,48	112,45
Su emme (%)	55	66
Yapısal bozulma	885	900
Erime noktası	1075	1150
Ateşe dayanım	Yanmaz	Yanmaz
Isıl iletkenlik katsayısı, mW/m.K	43,321	47,982

Çizelge 3.2 incelendiğinde genleştirilmiş perlitin düşük yoğunluğa ve düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip olması, köpük betonla birlikte hedeflenen optimum hafiflikte maksimum ısı yalıtım özelliğine sahip paneller üretebilmek için uygun bir malzeme olduğunu göstermektedir. A1 yanmaz sınıfında olan genleştirilmiş perlitin 885-900°C'lere kadar mevcut yapı kararlılığını koruyabildiği bunun da olası yangın durumunda bir avantaj sağlayacağı düşünülmektedir (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3. Genleştirilmiş perlitin kimyasal bileşimi

Bileşenler %	Toz ve Granül Genleştirilmiş Perlit
SiO ₂	71-74
Al ₂ O ₃	1214
K ₂ O	5-6
Na ₂ O	3,4
MgO	0,10-0,20
CaO	0,8-1,0
Fe ₂ O ₃	0,5-1
TiO ₂	0,009-0,012
Kızdırma kaybı	3-4

Köpük beton üretiminde kullanılan genleştirilmiş perlitin toz, granüler ve karışım halinde tane büyüklüklerine ilişkin değerler Şekil 3.1'de verilmiştir. Agregalar tane boyutlarına göre iri, ince ve tüvenan olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. 4 mm tane boyutundan küçük olan malzemeler ince agrega olarak adlandırılır. En iri tane boyutu 4 mm tane boyutunda olan genleştirilmiş perlit agregası ince taneli bir yapı malzemesidir.



Şekil 3.1. Genleştirilmiş perlit agregasının gradasyonu

3.1.3. Polistren köpük

Üretilen numunelerde boncuk strafor adıyla bilinen granül polistren köpük kullanılmıştır. Çizelge 3.4'te granül polistren köpüğün fiziksel özellikleri verilmiştir. Isıl iletkenlik katsayıları ve yoğunluklarının düşük olması, yine genleştirilmiş perlit gibi, hafif yapı malzemesi üretimi için uygun bir malzeme olmalarını sağlamaktadır.

Çizelge 3.4. Granül polistren köpüğün fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	
Yoğunluk, kg/m ³	20
Isıl iletkenlik katsayısı, mW/m.k	37
Su buharı iletim difüzyonu direnç faktörü (μ)	30-70

3.1.4. Silika arojel

Rem Tech Co, L.t.d. firmasına ait silika arojelin fiziksel özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir. Toz ve granül yapıda silika arojeller üretilebilmektedir. Granül arojellerin boyutlarının düzensiz olması betonda kullanımı açısından dezavantaj yaratmaktadır. Hidrofilik veya hidrofobik yapıda olabilen arojellerin yüksek ısı yalıtımı sağlayabilmesi için hidrofobik olması gerekmektedir. Hidrofobik yapıdaki arojeller ayrıca su ve nem

emilimini önlemede de yardımcı olmaktadır. Çalışmada kullanılan silika aerogel, toz yapıda hidrofobik bir aerogeldir.

Çizelge 3.5. Silika aerogelin fiziksel özellikleri

Silika aerogelin Fiziksel Özellikleri	
Silika oranı (% ağırlık)	40
pH	9,4
Viskozite, cP	6
Yoğunluk, g/cm ³	1,3

3.1.5. Su

Numunelerin hazırlanmasında su, Ankara Büyükşehir Belediyesine ait şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Çizelge 3.6’da 01.01.2021 tarihine ait ASKİ’nin Yenimahalle bölgesinde bulunan sudan yaptığı kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları verilmiştir.

Çizelge 3.6. Ankara şebeke suyu fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları

Parametre	Analiz Sonucu	TS 266 Sınır Değerler	EPA Sınır Değerler
Bulanıklık (NTU)	0,30	1,0	5
Klor (mg/L)	0,6	-	-
İletkenlik (25 °C, mS/m)	49,2	250	-
Amonyum (mg/L)	<0,06	0,5	-
Nitrit (mg/L)	<0,006	0,5	3,3
Sülfat (mg/L)	87,6	250	250
Demir (µg/L)	<5	200	300
Alüminyum (µg/L)	44	200	200

3.1.6. Köpük ajanı

Köpük beton içerisindeki hava boşluklarını oluşturacak köpük üretiminde, köpük ajanı olarak sentetik bazlı bir köpük ajanı (Aydos®-Lightcon 28) kullanılmıştır (Çizelge 3.7).

Çizelge 3.7. Lightcon 28 köpük ajanının özellikleri

Kimyasal İçeriği	Sentetik sıvı hava sürükleyici
Görünüm-Renk	Şeffaf, soluk kahverengi sıvı

Çizelge 3.7. (devam) Lightcon 28 köpük ajanının özellikleri

Yoğunluk	1,03±0,02 kg/l (ISO 758)
pH	5,0±1 (TS 6365 EN1262)
Klor içeriği	<%0,1 (TS EN 480-10)
Alkali içeriği	<%5,0 (TS EN 480-12)
Donma noktası	-5°C
Korozyon davranışı	Sadece TS EN 934-1 Ek A.1’de verilen bileşenleri içerir.
Tehlikeli maddeler	Tamamen Ek ZA’ye uygundur.
+20°C’de, %50 bağıl nem koşullarında elde edilmiştir.	

Köpük beton tasarımında bulunan parametreler, köpük ağırlığı 80-90 gr/lt olacak şekilde köpük ajanının kütlece %2,5 oranında su ile köpürtülmesiyle elde edilebileceğini göstermiştir.

Köpük betonun performansı, köpük yapıcı maddenin doğası ve dozajından önemli ölçüde etkilenmektedir. Protein ve sentetik esaslı köpük ajanları köpük beton üretiminde oldukça yaygın kullanılmaktadır. Bu katkıları su ile karıştırılarak oluşturulabileceği gibi, betonun karma suyuna ilave edilerek de kullanılabilirler (Akman ve Akçay, 2005; Hashim ve Tantray, 2021).

3.2. Yöntem

Köpük betonların karışım tasarımı elde edilirken mevcut çalışmalar göz önüne alınmıştır. Tasarım oranlarını belirlemek amacıyla ön çalışmalar yapılmıştır. Harç içerisinde kullanılacak olan genleştirilmiş perlit ve granül polistren köpük oranları bu ön çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. Ön çalışmalarda elde edilen bulgular neticesinde köpük oranı, köpük karıştırma süresi, s/ç oranı, köpük, harç ve agregaların en uygun birleşim koşulları belirlenmiştir.

Köpük beton numuneleri, sabit s/ç oranında agregaların oranları değiştirilerek toplamda 360 adet üretilmiştir. Her seri için agrega oranları %25-%20 oranlarda azaltılarak oluşturulmuştur. Köpük betonların tasarımı 1 m³ beton 480 kg olacak şekilde sabit yoğunlukta hazırlanmıştır. Çimento harcı 0,45 s/ç oranında tasarlandığında köpük betonun s/ç oranı 0,57 olarak elde edilmiştir. Köpük hacmi köpük beton içerisinde %50-55 oranda

olacak şekilde numuneler üretilmiştir. Deneylerde kullanılacak karışım oranları ve isimlendirmeler Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Karışım oranları

Numune	Kullanılan Malzemeler (kg) (1 m ³ köpük beton için)			
	Çimento	Genleştirilmiş perlit agregası	Granül polistren köpük	Su
C1GP100PK75	250	130	97,5	112,5
C1GP100PK50	250	130	65	112,5
C1GP100PK30	250	130	39	112,5
C1GP75PK75	250	97,5	97,5	112,5
C1GP75PK50	250	97,5	65	112,5
C1GP75PK30	250	97,5	39	112,5
C1GP50PK75	250	65	97,5	112,5
C1GP50PK50	250	65	65	112,5
C1GP50PK30	250	65	39	112,5
C2GP100PK75	250	130	97,5	112,5
C2GP100PK50	250	130	65	112,5
C2GP100PK30	250	130	39	112,5
C2GP75PK75	250	97,5	97,5	112,5
C2GP75PK50	250	97,5	65	112,5
C2GP75PK30	250	97,5	39	112,5
C2GP50PK75	250	65	97,5	112,5
C2GP50PK50	250	65	65	112,5
C2GP50PK30	250	65	39	112,5

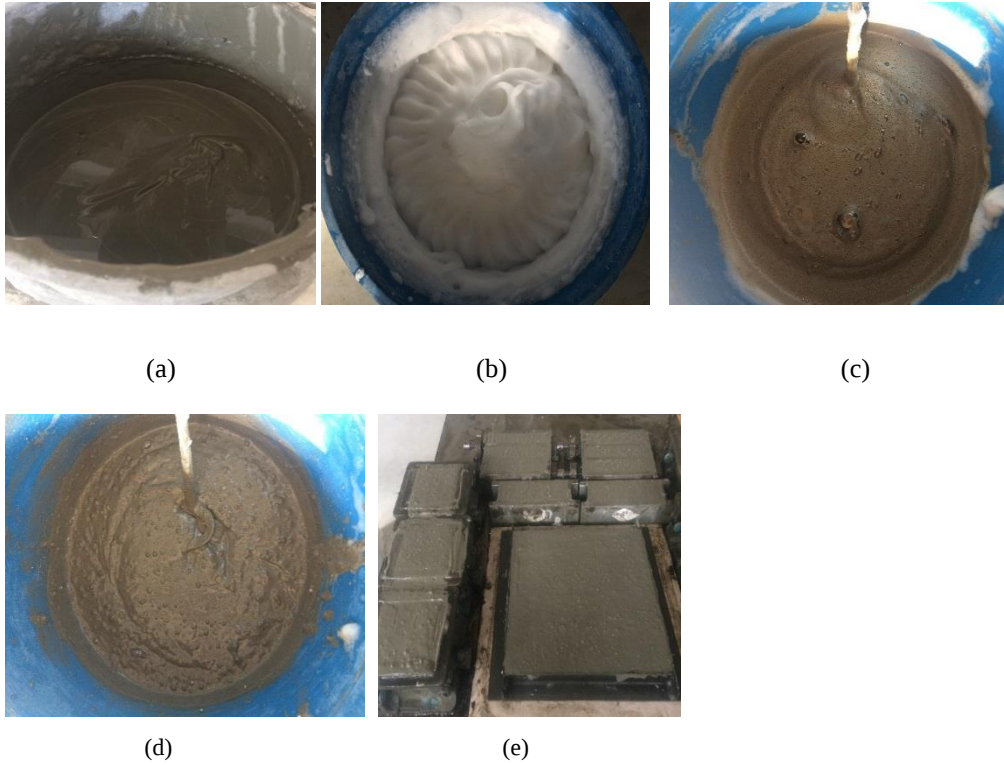
Numune isimlendirilmesinde bazı kısaltmalar kullanılmıştır. Burada C; çimento tipini, GP; genleştirilmiş perlit agregasını, PK; granül polistren köpüğü temsil etmektedir. Örneğin; C2GP75PK30 etiketli numune içerisinde, CEM II Portland kompoze çimento, tasarımda bulunan agrega miktarının %75 oranında genleştirilmiş perlit agregası ve yine tasarımda bulunan agrega miktarının %30 oranında granül polistren köpük kullanılmıştır.

3.2.1. Köpük beton numunelerin üretimi

Köpük beton numunelerinin üretimi Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Beton Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Karışım oranları belirlendikten sonra numuneler üretilmiştir. Her bir seri için yapılacak deneylere uygun olarak; 100×100×100 mm'lik 6 adet küp numune, 50×50×50 mm'lik 6 adet küp numune, 40×40×160 mm'lik 6 adet prizma numune, 30×300×300 mm'lik 2 adet prizma numune üretilmiştir. Deney numuneleri üretilirken şu sıralama uygulanmıştır:

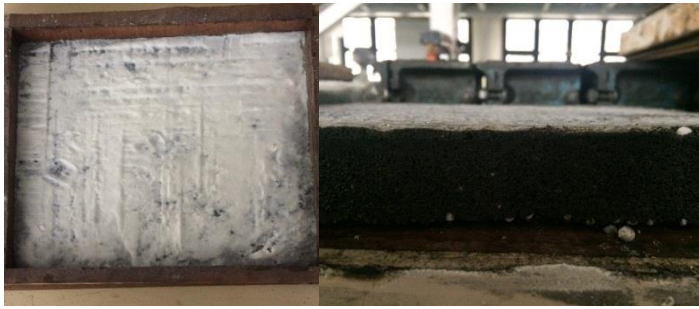
- Çimento ve su, çimento mikserinde harç haline getirilmiştir (a).
- Köpük ajanı su ile karıştırılıp tasarımda elde edilen verilere uygun olarak 5,48 dakika el mikseriyle köpürtülmüştür (b).
- Hazırlanan çimento harcı ile köpük birleştirilmiştir. Bu sırada köpük ve harcın homojen şekilde karışmasına özen gösterilmiştir (c).
- Genleştirilmiş perlit ve granül polistren köpük belirlenen oranlarda karışıma eklenmiştir (d).
- Yağlanan kalıpların içerisine köpük beton dökülmüştür. Bu aşamada kalıplara betonun tam yerleşmesi için şişleme uygulanmıştır (e).
- 24 saat sonra köpük beton numuneleri kalıptan çıkarılmıştır ve kür ortamına bırakılmıştır.



Resim 3.1. Numune üretim aşamaları

Eğilme ve basınç mukavemeti deneyleri için üretilen numunelerde kür koşullarını incelemek amacı ile, üretilen köpük beton numunelerin bir kısmı 28 gün kür havuzunda, bir kısmı ise 28 gün laboratuvar ortamında bekletilmiştir.

Resim 3.2’de üretilen köpük beton ısı yalıtım panellerinde silika arojel etkisini incelemek amacı ile panel üzerine 5 mm kalınlıkta olmak üzere, tabaka halinde serilen silika arojel gösterilmektedir. Silika arojelin hafıflığı sebebiyle tabaka üzerinde deformasyon olmaması için üzeri kalıp kapağı ile örtülmüştür.



Resim 3.2. Isı yalıtım panellerinde silika arojelin kullanımı

3.2.2. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi

Köpük beton numunelerinin fiziksel özellikleri, kuru yoğunluk, hacimce su emme, kapiler su emme ve ultra geçiş hızı deneyleri uygulanarak belirlenmiştir.

Betonun kuru yoğunluğunun belirlenmesi

Hazırlanan köpük beton numunelerinin yoğunluğu, TS EN 12390-7’ye uygun olarak yapılmıştır. Numunelerin kuru yoğunluğunun bulunabilmesi için 24 saat etüvde 105°C’de bekletilmiştir. Boyutları kumpas yardımıyla, kütleleri de elektronik hassas terazide ölçülmüştür. Birim ağırlıklar her deney grubu için en çok altı adet numune için hesaplanmış ve ortalamaları alınmıştır (Eşitlik 3.1).

$$\rho_k = \frac{M_k}{V} \quad (3.1)$$

Burada;

ρ_k : Sertleşmiş betonun kuru yoğunluğu, (g/cm³)

M_k : Kuru kütle, (g)

V: Hacmi (cm³) göstermektedir.

Hacimce su emme tayini

Sertleşmiş 28 günlük köpük beton numuneleri etüvde 24 saat 105°C’de bekletildikten sonra kütleleri hassas terazi yardımıyla ölçülmüştür. Etüvden çıkarılan köpük beton numuneleri 24 saat suda bekletildikten sonra kütleleri tekrar ölçülmüştür. Elde edilen veriler Eşitlik 3.2 ile köpük beton numunelerinin hacimce su emme yüzdeleri belirlenmiştir.

$$w = \frac{(M_1 - M_2)}{M_2} \quad (3.2)$$

Burada;

M₁: Numunenin kuru ağırlığını, (g)

M₂: Numunenin doygun ağırlığını (g) göstermektedir.

Kapiler su emme tayini

Sertleşmiş 100×100×100 mm boyutlarındaki 28 günlük köpük beton numuneleri 24 saat etüvde bekletildikten sonra tabanından 5 mm’lik kısmı suya daldırılıp 1, 5, 10, 15, 35, 50, 65, 80 ve 100 dk boyunca kütle artış değerleri ölçülüp, Eşitlik 3.3 ile numunelerin kapiler su emme değerleri (KSE) bulunmuştur.

$$k = \frac{(Q/A)^2}{t} \quad (3.3)$$

Burada;

k: Beton doğal taş ve yapay taş kagir birimlerin kapiler su emme katsayısı, ($\frac{g^2}{s \times cm^4}$)

Q: Numunenin t süreyle emdiği su miktarı, (g)

A: Numunenin suya temas ettirilen yüzeyinin alanı, (cm²)

t: Numunenin suya temas ettirilme süresini (s) göstermektedir.

Elde edilen zaman ve kapiler su emme verileri ile çizilen grafiğin eğimi, köpük betonların kapiler su emme potansiyellerini ortaya çıkarmaktadır.

Ultra geçiş hızı (UGH) tayini

Köpük beton numunelerinde ultra geçiş hızı deneyi 28 gün sertleşmiş numuneler üzerinde TS EN 12504-4 ve ASTM C597 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Numune boyutları göz önüne alınarak (100×100×100 mm’lik küp) direk uygulama yapılmıştır.

Ultra geçiş hızı deney cihazı 0,1 µs duyarlılıkta ölçüm yapmaktadır. Ölçüm yapılmadan önce numune boyutları herhangi bir deformasyona karşı kumpas yardımıyla ölçülmüştür. Ölçüm sırasında numune yüzeylerine jel sürülerek ölçüm sabitliği sağlanmıştır. Köpük beton numuneleri, ses verici ve alıcı probaların arasına yerleştirilerek ölçüm yapılmıştır.

$$V = \frac{L}{t} \quad (3.4)$$

Burada;

L: Numune karşılıklı yüzeyleri arasındaki mesafeyi, (m)

t: Geçiş süresini (sn) göstermektedir.

Malzemelerin elastisite modülünün değeri yükseldikçe yani rijitlik arttıkça, elastik şekil değiştirmeye karşı direnci de o kadar fazla olur ve malzemenin deforme olması zorlaşır. Elastisite modülü değeri malzemelerin gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden hesaplanabildiği gibi ultra geçiş hızı verileri ile de bulunabilmektedir (Eşitlik 3.5).

$$E = \frac{V^2 \times \rho_k \times (1 + \varphi) \times (1 - 2\varphi)}{(1 - \varphi)} \times 10^{-6} \quad (3.5)$$

Burada;

E: Dinamik elastisite modülünü, (MPa)

V: Ultra geçiş hızının, (m/sn)

ρ_k : Kuru birim ağırlığını, (kg/m³)

φ : Poisson oranını göstermektedir.

Poisson oranı hafif betonlarda 0,15 ile 0,30 arasında değişmekte olup bu çalışmada köpük betonlar için önerilen 0,2 kullanılmıştır.

3.2.3. Mekanik özelliklerin belirlenmesi

Köpük beton numunelerinin mekanik özellikleri, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri sonucunda belirlenmiştir.

Eğilme ve basınç dayanımı tayini

Köpük beton numunelerine 28 gün kür sonrasında eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır.

Eğilme dayanımı için numune deney cihazına, uzun eksenli mesnet silindirlerine gelecek şekilde yerleştirilmiştir. 50 ± 10 N/s olacak şekilde yük yüklenmiştir. Eşitlik 3.6 ile köpük beton numunesinin eğilme dayanımı hesaplanmıştır. Deney uygulandıktan sonra iki parçaya ayrılan numunelere basınç testi yapılmıştır.

$$\sigma_f = \frac{1,5 \times F_f \times L}{b^3} \quad (3.6)$$

Burada;

σ_f : Eğilme dayanımı, (MPa)

F_f : Prizma kırıldığı anda ortasına uygulanan yük, (N)

L : Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık, (mm)

b : Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğunu (mm) göstermektedir.

Basınç dayanımı için yarım prizma numuneler iki çelik plaka arasına merkezlenerek deney uygulanmıştır. Yük 2400 ± 200 N/s hızda düzgün şekilde prizma kırılana kadar artırılmıştır ve maksimum yük kaydedilmiştir. Köpük beton numunelerinin basınç dayanımı Eşitlik 3.7 ile hesaplanmıştır.

$$\sigma_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3.7)$$

Burada;

σ_c : Basınç dayanımı, (MPa)

F_c : Kırılmadaki en büyük yük, (N)

1600: Plakanın kesit alanını (40×40 mm²) göstermektedir.

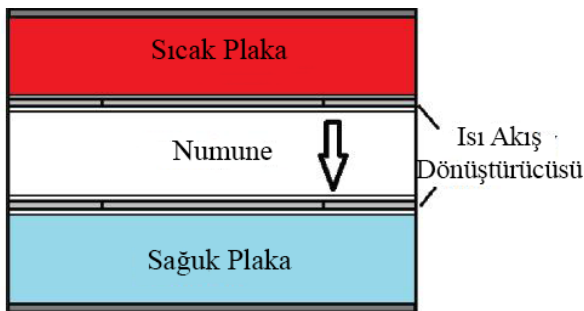
3.2.4. Termal özelliklerin belirlenmesi

Köpük beton numunelerinin termal özellikleri, ısı iletkenlik katsayılarının bulunması ile elde edilmiştir. Isıl iletkenlik katsayısının belirlenmesi için Isı Akış Ölçer yöntemi kullanılmıştır.

Isıl iletkenlik katsayısının belirlenmesi

Malzemelerin ısı iletkenlik katsayısının belirlenmesi için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler karalı ve geçici hal durum yöntemleri olarak iki başlıkta toplanmaktadır. Kararlı hal yöntemleri matematiksel olarak kolay çözüm sağladıkları için yaygın olarak kullanılmaktadır (Yüksel, 2016).

Isı Akış Ölçer (Heat Flow Meters HFM) yöntemi termal direnç boyunca sıcaklıkta bir düşüşün ölçümüne dayalı olarak ısı akışının çıkarılmasıdır. Farklı sıcaklıklardaki iki plaka arasına malzeme yerleştirilir, biri ısıtılır, diğeri soğutulur. Isı akışını ölçmek amacıyla ısı akışı dönüştürücüleri kullanılır. Plakaların sıcaklığı sabit değere ulaştığında istenilen noktada ayarlanır. Kararlı hal koşulları sistemin her noktasında ısı akışı eşit olduğunda oluşur. Termal denge sağlandığında sabit koşullar altında deney uygulanır. Isıl iletkenliği etkileyen faktörler bu yöntemde sabit durum sıcaklığı, numunenin kalınlığı, numunenin ölçülen alanı ve plaka sıcaklığı olarak sıralanabilir (Yüksel, 2016).



Resim 3.3. Isı akış ölçer yönteminin şematize edilmesi

Köpük beton numunelerin ısı iletkenlik katsayısının bulunmasında, ASTM C518, JIS A1412, ISO 8301 ve DIN 12667 standartlarına uygun LINSEIS HFM300 cihazı kullanılmıştır. Bu cihazın ölçüm prensibi sıcak ve soğuk plakalar arasına numunenin yerleştirilmesi ve ısı akışının ölçülmesidir. Cihazın (Resim 3.4) plakaları arasındaki ısı farkı 20 °C olup üst plaka 30 °C ve alt plaka 10 °C'dir.

Isıl iletkenlik katsayısının belirlenmesi için üretilen 300×300×30 mm boyutlarında numunelerin hatasız sonuçlar elde etmek amacıyla yüzey düzgünlüğüne önem verilmiştir. Deneyler TS EN 12664, TS EN 12667 standartları baz alınarak yapılmıştır.



Resim 3.4. Isıl iletkenlik katsayısının belirlenmesinde kullanılan cihaz

3.2.5. Durabilite özelliklerinin belirlenmesi

Köpük beton numunelerinin durabilite özelliklerinin belirlenmesi amacı ile asit direnci ve donma-çözünme direnci deneyleri uygulanmıştır.

Asit direncinin belirlenmesi

28 gün kürde bekletilen 50×50×50 mm'lik küp köpük beton numuneleri %1'lik H₂SO₄ çözeltisi içinde 7 ve 28 gün bekletilmiştir. Deneyler ASTM C267 standardına uygun olarak yapılmıştır. Asit çözeltisi içerisinde bekleyen köpük beton numunelerinin basınç dayanımları ölçülmüştür. Deney sonrası numunelerde basınç dayanımı değişim oranları incelenmiştir (Eşitlik 3.8).

$$BDD \% = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_1} \times 100 \quad (3.8)$$

Burada;

BDD: Basınç dayanımı değişimini, (%)

σ_1 : Asit çözeltisinde beklemeden önceki basınç dayanımını, (MPa)

σ_2 : Asit çözeltisinde bekledikten sonraki basınç dayanımını (MPa) göstermektedir.



Resim 3.5. Asit çözeltisi içerisinde bekleyen köpük beton numuneleri

Donma çözünme direncinin belirlenmesi

Köpük beton numuneleri 28 gün küre tabii tutulup deney öncesinde kütleleri ölçülmüştür. ASTM C666-97 standardına uygun olarak yapılan deneylerde 30 donma-çözünme döngüsü uygulanmıştır. +15°C ile -15°C değişen sıcaklık aralığında uygulanan döngüler sonrasında tekrar ölçülen kütle verileri Eşitlik 3.9’da kullanılarak köpük betonların donma-çözünme sonucunda kütle kayıp oranları belirlenmiştir.

$$\omega_m = \frac{M_n - M_0}{M_0} \quad (3.9)$$

Burada,

ω_m : Kütle kaybını

M_n : n. Döngü sonrası kütleyi, (g)

M_0 : Deney uygulanmadan önceki kütleyi (g) göstermektedir.

Köpük beton içerisinde fazla miktarda bulunan gözeneklerden dolayı büyük su emme değerlerine sahip olmaktadır. Su donma sırasında hacim olarak genişlemektedir. Hacim genişmesi beton içerisinde çekme gerilmeleri oluşturarak betonda çatlaklar olmasına sebep olmaktadır.

3.2.6. Elektriksel özelliklerinin belirlenmesi

Köpük beton numunelerinin elektriksel özellikleri, elektriksel öz direnç değerinin elde edilmesi ile belirlenmiştir.

Elektriksel özdirenç değerinin belirlenmesi

Köpük beton numunelerinin elektriksel direnç değerlerinin belirlenmesinde Wolfgang Warmbier METRISO 3000 cihazı kullanılmıştır. Yüzey üzerinde iki nokta arasında 1 kilo Ω – 1,2 tera Ω değer aralığında ölçüm yapabilen cihazda, ölçüm gerilimi 10-500 V arasında değişebilmektedir. Cihazın probaları köpük beton yüzeyinin üzerinde iki noktaya yerleştirilip 10V gerilim değerinde elektriksel direnç değerleri (R) elde edilmiştir (ASTM C1760).



Resim 3.6. Elektriksel iletkenlik değerlerinin ölçülmesi

Direnç değerleri ölçülen köpük betonların elektriksel özdirençleri Eşitlik 3.10 ile belirlenmiştir.

$$\delta = R \frac{A}{L} \quad (3.10)$$

Burada,

δ : Elektriksel özdirenci, (kohm.m)

R: Direnci, (kohm)

A: Yüzey alanını, (m²)

L: Problar arası mesafeyi, (m) göstermektedir.

Elektrik iletkenliği, direncin tersi olarak ifade edilir ($\sigma=1/\delta$). Bir malzemenin elektriksel direnci ne kadar düşüğe, o kadar iyi iletkenidir. Nemli bir beton iyi bir iletken gibi davranabilmekte 100 ohm.m kadar düşük dirence sahip olabilmektedir. Hava ile kurutulmuş betonda elektriksel direnç değerleri 10⁴ ohm.m olurken fırın kurusu betonlar yaklaşık 10⁹ ohm.m dirence sahip olmaktadır. Betonun doygunluk oranının yüksek olması,

içerisinde geniş ve fazla gözeneklere sahip olması, daha düşük özdirence ve yüksek iletkenliğe sahip olmasını sağlamaktadır (Neville, 2011).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

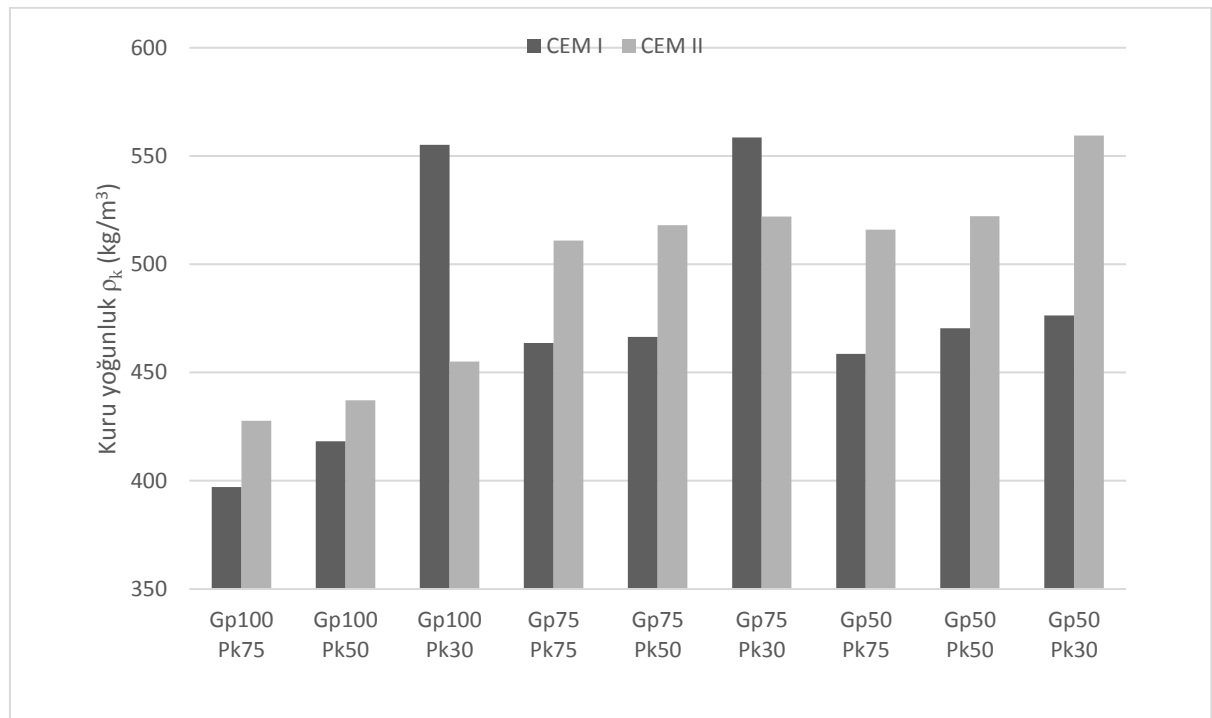
Köpük beton numunelerinin fiziksel, mekanik, termal, durabilite ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesine ait deney bulguları incelenmiş ve sonuçlar tartışılmıştır. Termal özelliklerin belirlenmesi için elde edilen ısı iletkenlik katsayıları, literatürdeki matematiksel modellerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

4.1. Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

Köpük betonların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacı ile yapılan kuru yoğunluk, hacimce su emme, kapiler su emme ve ultra geçiş hızı deneylerine ait bulgular, bu kısımda incelenmiştir.

4.1.1. Kuru yoğunluk deney bulguları

Köpük betonların kuru yoğunluklarının bulunması deneylerinde, genleştirilmiş perlit agregası, granül polistren köpük ve çimento tipinin kuru yoğunluğa etkisi incelenmiştir. Elde edilen veriler Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Köpük betonların kuru yoğunluk değişimleri

Köpük betonların tasarım kuru yoğunluğu 480 kg/m^3 olarak kullanılmıştır. Kuru yoğunluk değerleri, kullanılan malzemeler ve malzemelerin birim hacim ağırlıklarına bağlı olarak farklılık göstermiştir. Köpük betonlar hafif beton sınıfında yer almaktadır. Elde edilen tüm kuru yoğunluklarla köpük betonlar hafif beton sınıfına ($300\text{-}1800 \text{ kg/m}^3$ (Amran ve diğerleri, 2015)) girmektedir.

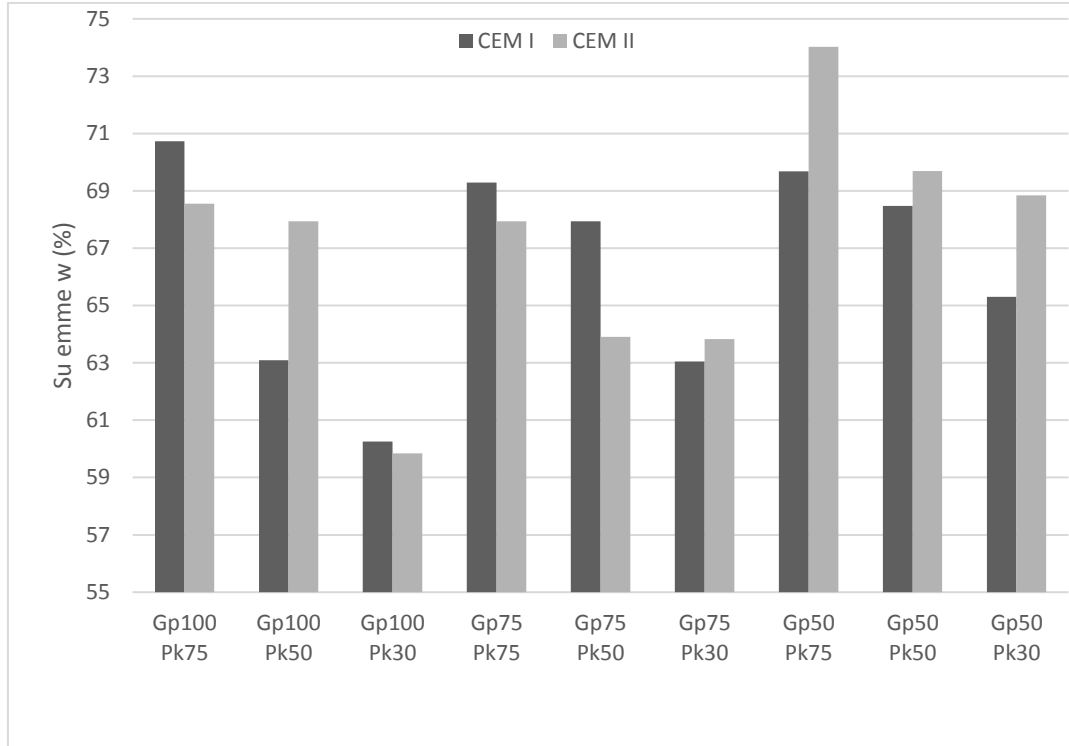
Şekil 4.1'deki grafik incelendiğinde genleştirilmiş perlit agregasının kullanım oranı arttığında köpük betonların kuru yoğunlukları azaldığı, yine aynı şekilde granül polistren köpüğün kullanım oranı arttığında da köpük betonların kuru yoğunluklarının azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin köpük betonlarda kullanılan genleştirilmiş perlit agregası ve granül polistren köpüğün birim hacim ağırlıklarından, miktarı artırıldığında yerine geçen çimentonun birim hacim ağırlığının daha düşük bir değere sahip olması ile ilişkilendirilebilir.

En düşük kuru yoğunluğa sahip olan köpük beton CEM I Portland çimentosunun kullanıldığı Gp100Pk75 numaralı karışımda $397,16 \text{ kg/m}^3$ olarak gözlemlenmiştir. Bu karışımda tasarımda bulunan agrega miktarıyla aynı oranda genleştirilmiş perlit agregası ve yine tasarımda bulunan agrega miktarının %75 oranında granül polistren köpük kullanılmıştır. Köpük betonlarda en yüksek kuru yoğunluk ise CEM II Portland kompoze çimentosunun kullanıldığı Gp50Pk30 numaralı karışımda $559,5 \text{ kg/m}^3$ olarak bulunmuştur. Karışım içerisinde tasarımda bulunan agrega miktarının %50 oranında genleştirilmiş perlit agregası ve %30 oranında granül polistren köpük kullanılmıştır.

Çimento tipinin köpük betonların kuru yoğunluk değerlerini etkilediği gözlemlenmiştir. CEM I Portland çimentosunun kullanıldığı köpük betonlarda kuru yoğunluk değerleri, CEM II Portland kompoze çimentosunun kullanıldığı köpük betonların kuru yoğunluk değerlerinden çoğunlukla daha düşük olarak elde edilmiştir.

4.1.2. Hacimce su emme deney bulguları

Köpük betonların su emme yüzdeleri kullanılan agreg ve çimento tipine göre incelenmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Köpük betonların hacimce su emme değerleri

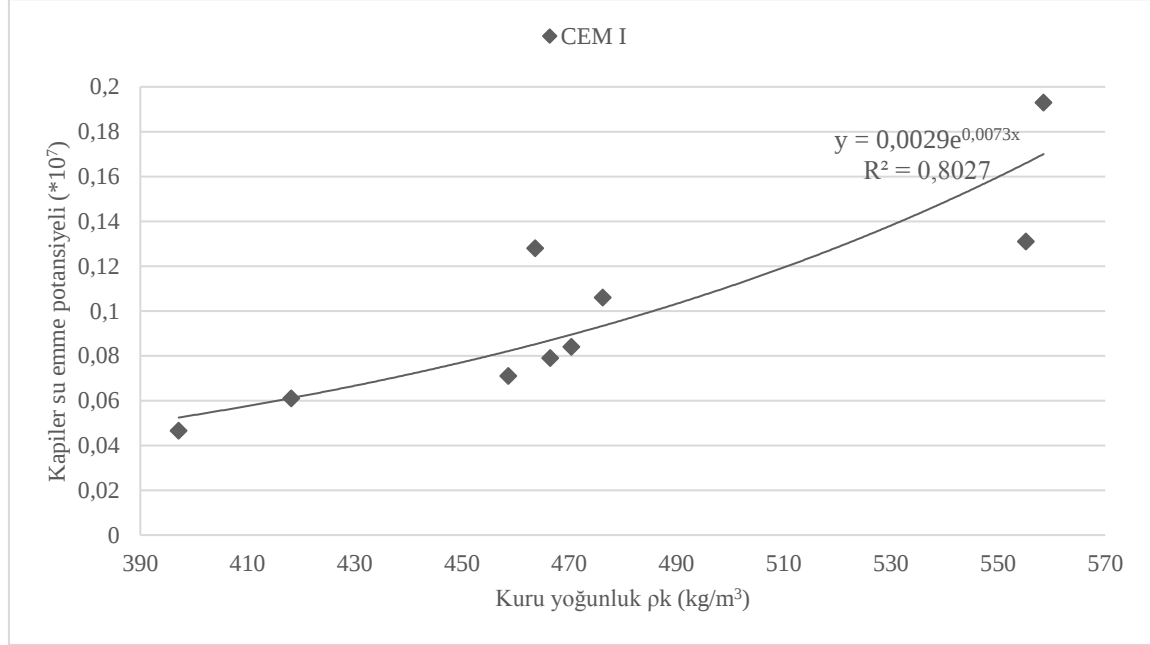
Köpük betonların hacimce su emme değerleri oldukça yüksek oranda, %59 ile %74 değerleri arasında değişmektedir. Köpük betonun su emme oranları boşluk yapıları ve boşluk oranlarıyla yakından ilişkilidir. Yüksek poroziteye sahip betonlar yüksek su emme değerlerine sahip olmaktadır. En yüksek su emme değerine sahip köpük beton numunesi, CEM II tipi çimentonun kullanıldığı Gp50Pk75 numaralı içeriğinde köpük beton tasarımında kullanılan agreganın %50 oranında genleştirilmiş perlit agregası ve %75 oranında granül polistren köpük bulunan numunede %74 değerindedir.

Köpük betonlarda polistren köpük miktarının azalması ile su emme yüzdesini her iki çimento tipinde de azaltmıştır. Genleştirilmiş perlit miktarına göre incelendiğinde ise; polistren köpüğün %30 oranda kullanıldığı numunelerde genleştirilmiş perlit miktarının azalması su emme yüzdesini arttırmıştır.

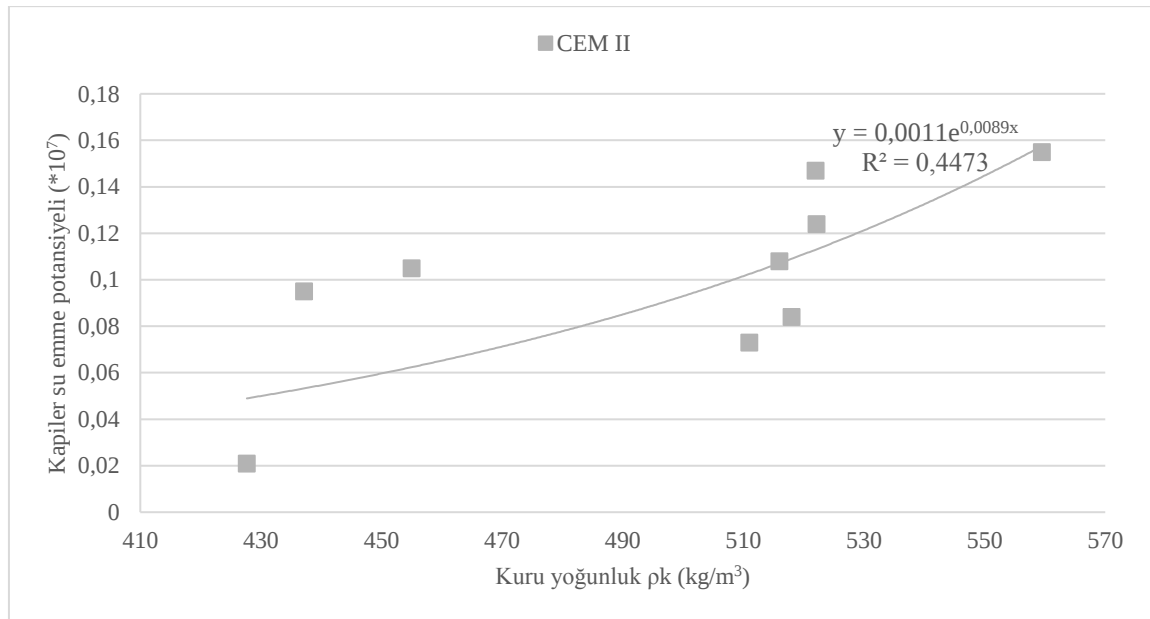
Yapılan bir çalışmada köpük betonda ilk 6 saatte su emme miktarının tamamlandığı ve sonraki 48 saat içinde herhangi bir değişiklik gözlemlenmediği incelenmiştir. Su itici maddeler kullanılarak bu değerleri azaltmayı amaçlamışlardır (Ma ve Chen, 2016).

4.1.3. Kapiler su emme deney bulguları

Köpük betonların kapiler su emme katsayıları kullanılan agrega oranlarının değişimine göre Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilen grafiklerde incelenmiştir.



Şekil 4.3. CEM I çimento tipine ait numunelerin KSE katsayıları ve kuru yoğunluk ilişkisi



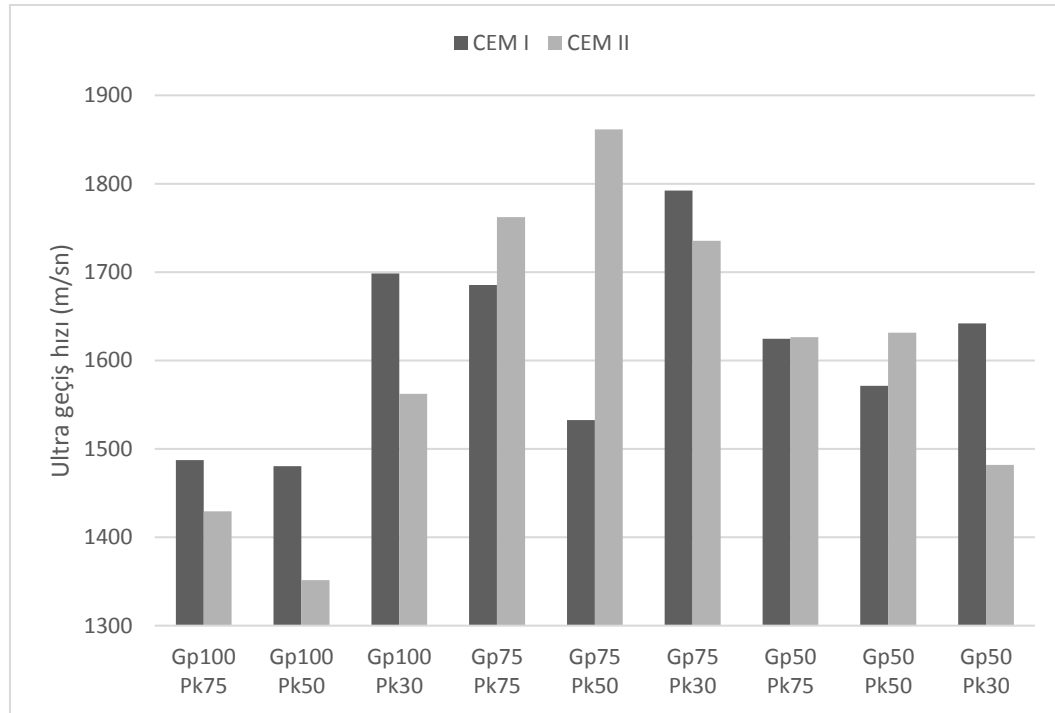
Şekil 4.4. CEM II çimento tipine ait numunelerin KSE katsayıları ve kuru yoğunluk ilişkisi

Köpük beton numunelerinin kapiler su emme katsayıları ile kuru yoğunlukları karşılaştırmalı olarak incelendiğinde kuru yoğunluğun artması kapiler su emme potansiyelini artırmıştır. CEM I tipi çimento kullanılan köpük beton numunelerinde kapiler su emme potansiyelleri 0,045 ile 0,193 ($\times 10^7$) değerleri arasında değişmektedir. CEM II tip çimento kullanılan köpük beton numunelerinde ise bu değerler 0,020 ile 0,155 ($\times 10^7$) değer aralığındadır.

Köpük betonun kapiler su emme miktarlarının gözenek miktarıyla ilgili çalışma yapan Nambiar ve arkadaşları, gözeneklerin birbirleriyle bağlantılı olduğunda su absorpsiyonunun yüksek olduğu, gözeneklerin süreksiz olduğunda ise bu değer daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. Kaersley ve arkadaşları ise kapiler su emme miktarlarının köpük betonun yoğunluğuna bağlı olduğu sonucuna varmışlardır (Kearsley ve Wainwright, 2001a; Nambiar ve Ramamurthy, 2007).

4.1.4. Ultra geçiş hızı deney bulguları ve elastite modülünün belirlenmesi

Köpük betonların ultra geçiş hızı deney verileri çimento tipi ve kullanılan agrega oranlarının değişimine yönelik incelenmiştir.

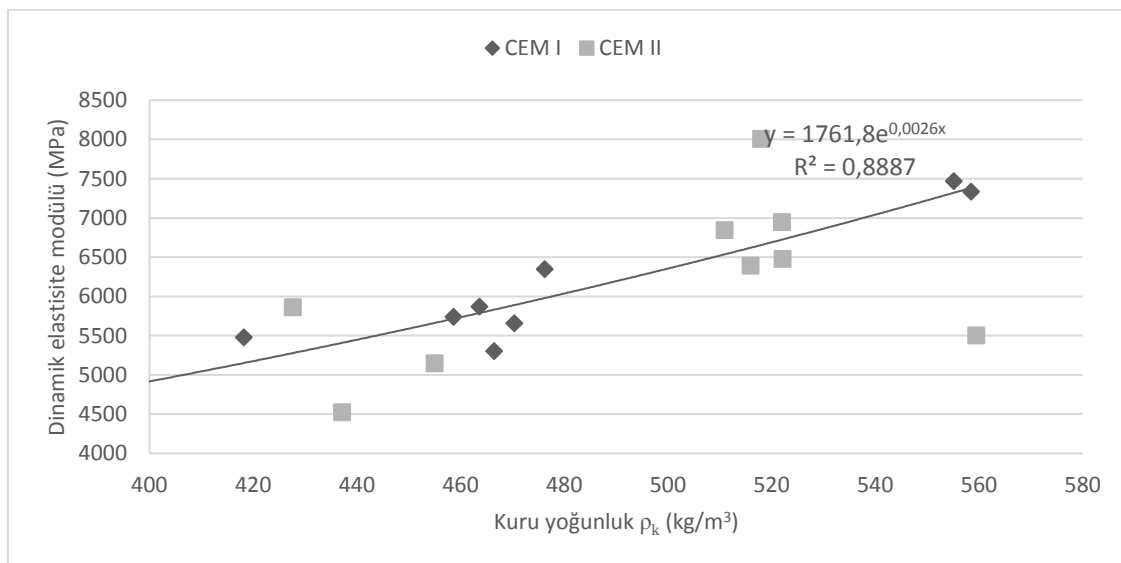


Şekil 4.5. Köpük betonların UGH deney bulguları

Köpük betonların ultra geçiş hızı bulguları incelendiğinde değerlerin 1300 m/sn ve 1900 m/sn değiştiği gözlemlenmektedir. Ultra geçiş hızı köpük betonların boşluk yapıları hakkında bilgi vermektedir. Köpük betonlarda boşluk miktarlarının fazla olması ultra geçiş süresini kısaltmaktadır. Normal bir betonda bu değer 3500 m/sn olduğu bilinmektedir. Genleştirilmiş perlit kullanımına göre incelendiğinde, genleştirilmiş perlit miktarının azalması ile ultra geçiş hızı değeri belli bir miktar artıp daha sonra düşmüştür. Bu durum iki tip çimento için de aynı şekildedir. Polistren köpük kullanımında ise düzenli bir artış veya azalış gözlenmemektedir.

Ultra geçiş hızının en fazla olduğu köpük beton karışımı CEM II Portland kompoze çimento tipinin kullanıldığı, genleştirilmiş perlit agregasının tasarımda elde edilen agrega oranının %25 azaltılarak ve granül polistren köpüğünde %50 azaltılarak kullanıldığı Gp75Pk50 numaralı numuneye ait 1861,4 m/sn olarak elde edilmiştir.

Ultra geçiş hızı bulgularıyla elde edilen dinamik elastisite modülü değerlerinin köpük beton numunelerinin kuru yoğunluklarıyla ilişkisi Şekil 4.6'daki grafik ile incelenmiştir. Köpük betonda elastisite modülü 500 kg/m^3 ile 1600 kg/m^3 yoğunlukları arasında 1000–12000 MPa değerleri arasında gözlemlenebilir. Köpük betonların elastisite modülü normal yoğunluktaki betonların elastisite modülünden %25 daha azdır (Brady, Watts, ve Jones, 2001).



Şekil 4.6. CEM I ve CEM II tip çimentoların kullanıldığı köpük betonların kuru yoğunluk-dinamik elastisite modülleri karşılaştırması

CEM I tipi çimentonun kullanıldığı köpük beton numunelerinde dinamik elastisite modülü değerleri 5500 MPa ve 7500 MPa değerleri arasında değişmektedir. Köpük betonun kuru yoğunluk değerlerinin artması belirli bir noktaya kadar dinamik elastisite modülü değerini azaltmakta ve bu değerden sonra da artırmaktadır. Köpük beton numunelerinde maksimum kuru yoğunluğa sahip Gp75Pk30 numaralı numunede dinamik elastisite modülü değeri de maksimum değere ulaşmıştır.

CEM II tipi çimentonun kullanıldığı köpük beton numunelerinde dinamik elastisite modülü değerleri 4500 MPa ve 8000 MPa değerleri arasında değişmektedir. Köpük beton numunelerinde maksimum dinamik elastisite modülüne sahip numune 518 kg/m³ yoğunluğa sahip olan Gp75Pk50 numaralı numunedir. CEM II tipi çimentonun kullanıldığı köpük beton numunelerinde CEM I tipi çimentonun kullanıldığı köpük beton numuneleri gibi düzenli bir artış veya azalış gözlemlenmemiştir.

CEM I ve CEM II tip çimento kullanımı karşılaştırıldığında Gp100Pk30 ve Gp75Pk50 numuneleri dışında birbirine yakın değerler elde edilmiştir.

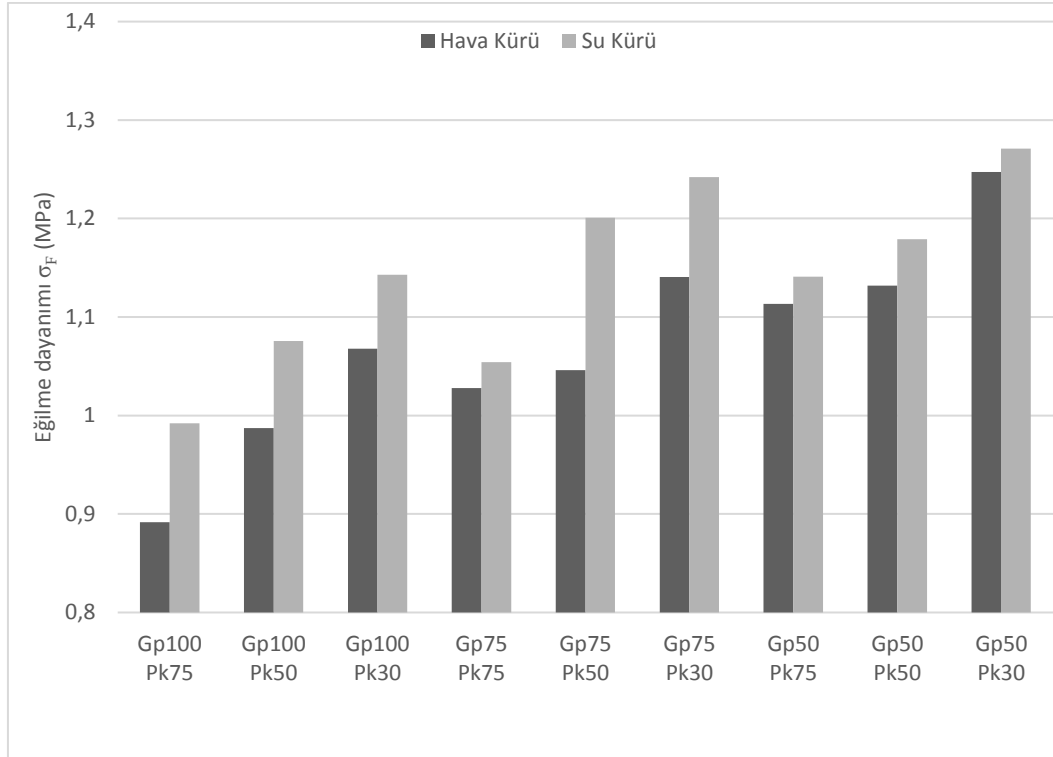
4.2. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Köpük betonlara ait eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneylerine ait veriler sırasıyla incelenmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

4.2.1. Eğilme dayanımı deney bulguları

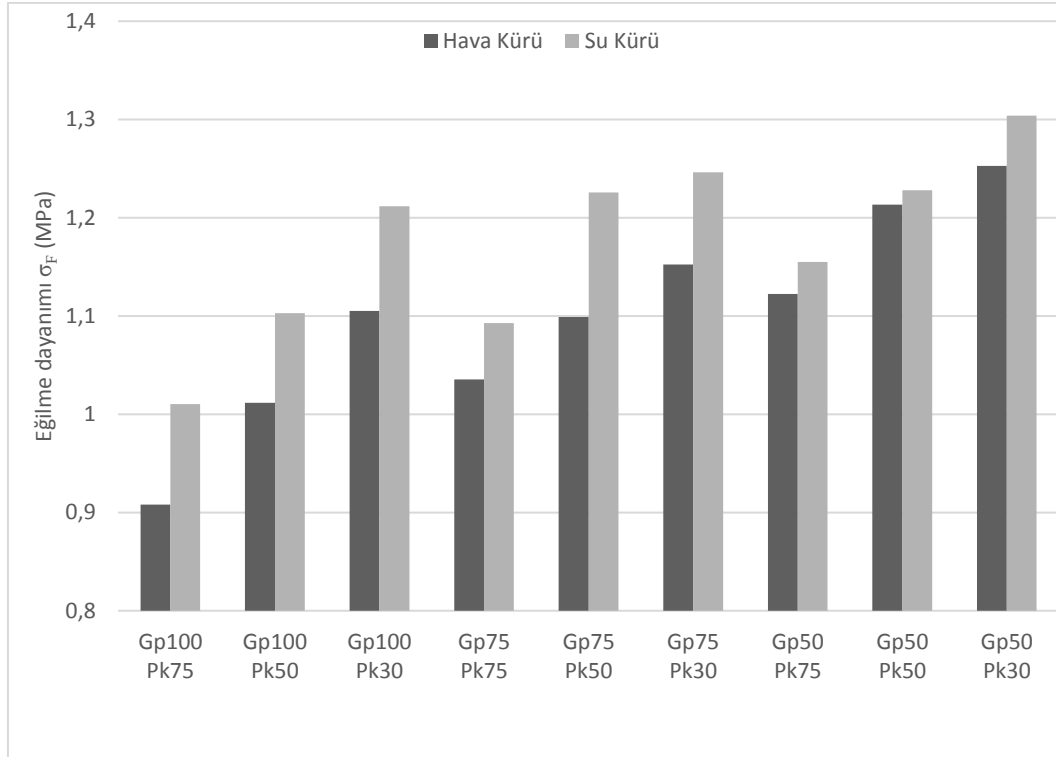
Köpük beton numunelerinin çimento tipi ve kullanılan agrega oranlarına göre eğilme dayanımları farklı kür koşulları için incelenmiştir.

Köpük beton numunelerinden bir grup numune 28 gün su kürüne tabi tutulurken, farklı bir grup numune ise 28 gün laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Farklı kür koşullarına ait numunelerin eğilme dayanımları CEM I tipi çimentosu için Şekil 4.7’de CEM II tipi çimento için Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Farklı kürlerde CEM I çimento tipinin kullanıldığı köpük betonların eğilme dayanımları

CEM I tipi çimentonun kullanıldığı köpük beton numunelerinin eğilme dayanımları hava kürü uygulamasında 0,8918 MPa ve 1,24735 MPa değerleri arasında değişmektedir. 28 gün hava kürü sonrasında en yüksek eğilme dayanımı, köpük beton tasarımında elde edilen agrega oranının 0,50 oranında azaltılarak genişletilmiş perlit ve agreganın %30 oranında granül polistren köpük kullanılmasıyla oluşturulan Gp50Pk30 numaralı numunede 1,24735 MPa değerindedir. 28 gün su kürü uygulanan numunelerde eğilme dayanımı ise 0,99216 MPa ve 1,27101 MPa değerleri arasında değişmektedir. En yüksek eğilme dayanımı ise Gp50Pk30 (%50 genişletilmiş perlit agregası ve %30 granül polistren köpük) numaralı numunede 1,27101 MPa'dır.



Şekil 4.8. Farklı kürlerde CEM II çimento tipinin kullanıldığı köpük betonların eğilme dayanımları

CEM II tipi çimentonun kullanıldığı köpük beton numunelerinin eğilme dayanımları hava kürü uygulamasında 0,90792 MPa ve 1,25268 MPa değerleri arasında değişmektedir. 28 gün hava kürü sonrasında en yüksek eğilme dayanımı, köpük beton tasarımında elde edilen agrega oranının %50 azaltılarak geliştirilmiş perlit ve agreganın %30 oranında granül polistren köpük kullanılmasıyla oluşturulan Gp50Pk30 numaralı numunede 1,25268 MPa değerindedir. 28 gün su kürü uygulanan numunelerde eğilme dayanımı ise 1,01049 MPa ve 1,3039 MPa değerleri arasında değişmektedir. En yüksek eğilme dayanımı ise yine hava küründe olduğu gibi Gp50Pk30 (%50 geliştirilmiş perlit ve %30 granül polistren köpük) numaralı numunede 1,3039 MPa değerindedir.

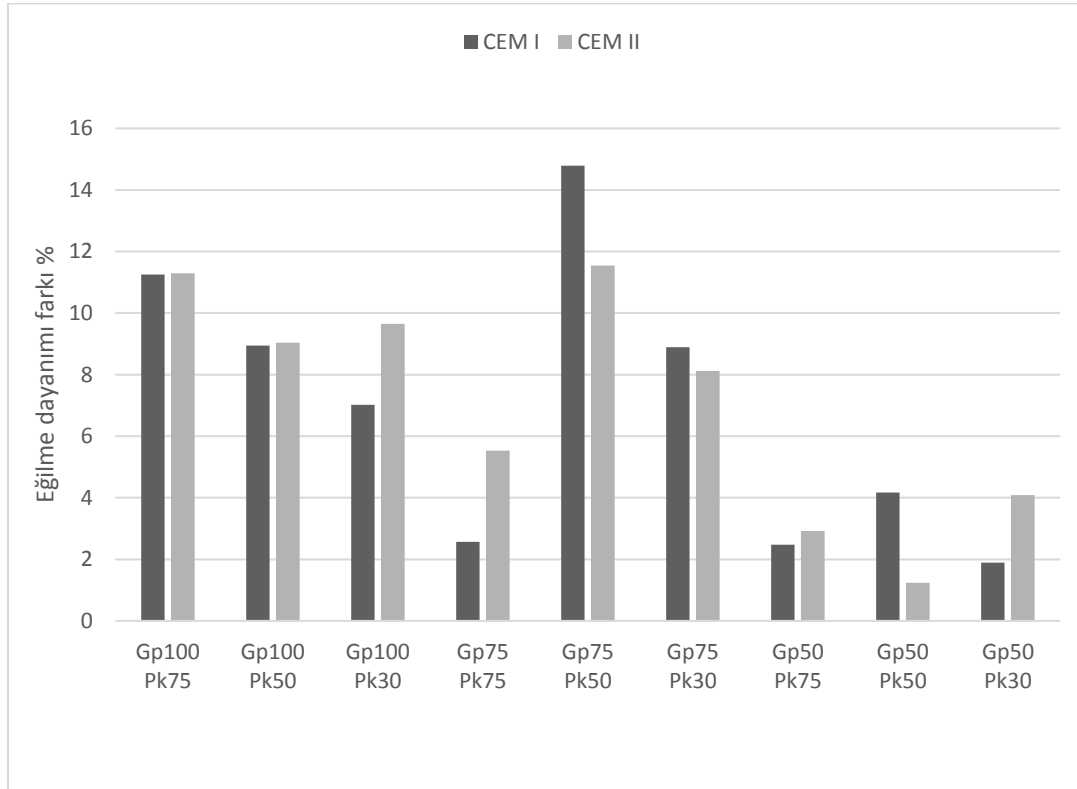
Köpük betonların eğilme dayanımlarını farklı kür koşullarına göre inceleyen Falliano ve arkadaşları yaptığı çalışma sonucunda; 400-800 kg/m³ yoğunlukta hava küründe bırakılan numunelerde 0,2-2 MPa değerlerinde eğilme mukavemeti elde ederken, su küründe bu değerler 0,2-2,5 MPa değer aralığındadır (Falliano, De Domenico, Ricciardi, ve Gugliandolo, 2019).

Köpük beton numunelerinde eğilme dayanımları, harç içerisinde kullanılan genleştirilmiş perlit agregası ve granül polistren köpük miktarının artmasıyla azalmaktadır. Bu durum düşük arayüz bağ kuvvetinden kaynaklanmaktadır. Polistren köpüklerin hidrofobikliği tutunmayı azalttığından, kırılmalar agrega ve harç birleşim kısmından gerçekleşmiştir (Resim 4.1).



Resim 4.1. Eğilme testi sonucu kırılan numune örneği

Çimento tipinin eğilme dayanımına etkisi incelendiğinde, CEM I tipinin kullanıldığı köpük betonlarda eğilme dayanımı değerleri CEM II tipinin kullanıldığı köpük betonlardaki eğilme dayanımı değerlerine göre daha düşük değerler elde edilmiştir (Şekil 4.9).



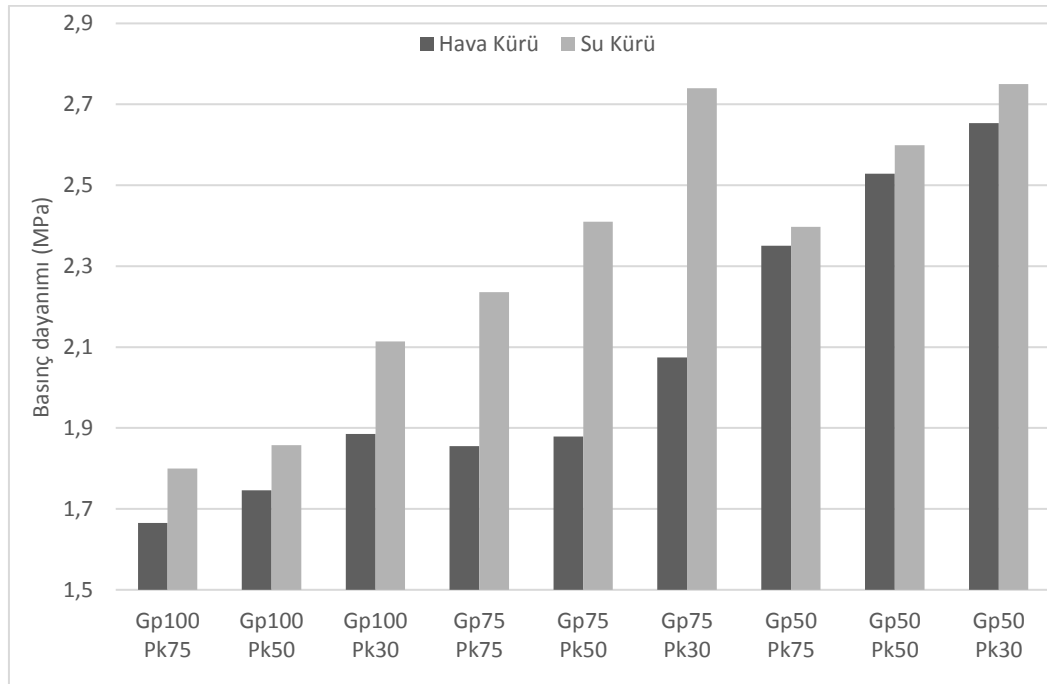
Şekil 4.9. Hava ve su kürünün eğilme dayanımına etkisi

Hava kürü ve su kürüne tabi tutulan numunelerin eğilme dayanımları karşılaştırıldığında (Şekil 4.9) CEM I tipi çimentonun kullanıldığı köpük beton numunelerinde, %2-%14 değer aralığında su kürü uygulanan numunelerde eğilme dayanımı artışı gözlemlenmiştir. Eğilme dayanımı artışının en fazla olduğu numune Gp75Pk50 numaralı numunede %14'tür. CEM II tipi çimento kullanımında ise bu değerler %1-%12 aralığındadır. En fazla eğilme dayanımı artışı %12 ile yine Gp75Pk50 numaralı numunededir.

4.2.2. Basınç dayanımı deney bulguları

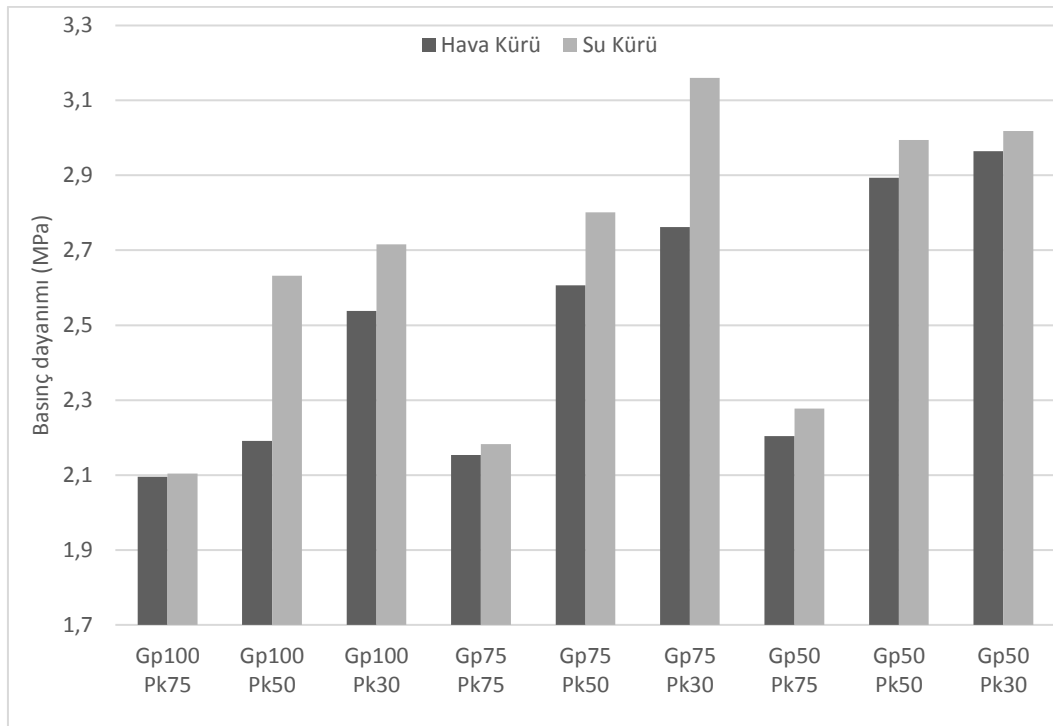
Köpük betonun basınç dayanımı üzerindeki en etkili parametreler genel gözeneklilik, agrega ve dolgu maddelerinin varlığı, s/ç oranı ve kür koşullarıdır (Brady ve diğerleri, 2001). Köpük beton numunelerinin çimento tipi ve kullanılan agrega oranlarına göre basınç dayanımları farklı kür koşulları için incelenmiştir.

Köpük beton numunelerinden bir grup numune 28 gün su kürüne tabi tutulurken, farklı bir grup numune ise 28 gün laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Farklı kür koşullarına ait numunelerin basınç dayanımları CEM I tipi çimentosu için Şekil 4.10'da ve CEM II tipi çimento için Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.10. Farklı kürlerde CEM I çimento tipinin kullanıldığı köpük betonların basınç dayanımları

CEM I tipi çimentonun kullanıldığı köpük beton numunelerinin basınç dayanımları hava kürü uygulamasında 1,666 ve 2,654 MPa değerleri arasında değişmektedir. 28 gün hava kürü sonrasında en yüksek basınç dayanımı, köpük beton tasarımında elde edilen agrega oranının 0,50 oranında azaltılarak genişletilmiş perlit ve agreganın %30 oranında granül polistren köpük kullanılmasıyla oluşturulan Gp50Pk30 numaralı numunede 2,654 MPa değerindedir. 28 gün su kürü uygulanan numunelerde basınç dayanımı ise 1,799 MPa ve 2,75 MPa değerleri arasında değişmektedir. En yüksek basınç dayanımı ise Gp50Pk30 (%50 genişletilmiş perlit agregası ve %30 granül polistren köpük) numaralı numunede 2,75 MPa'dır.

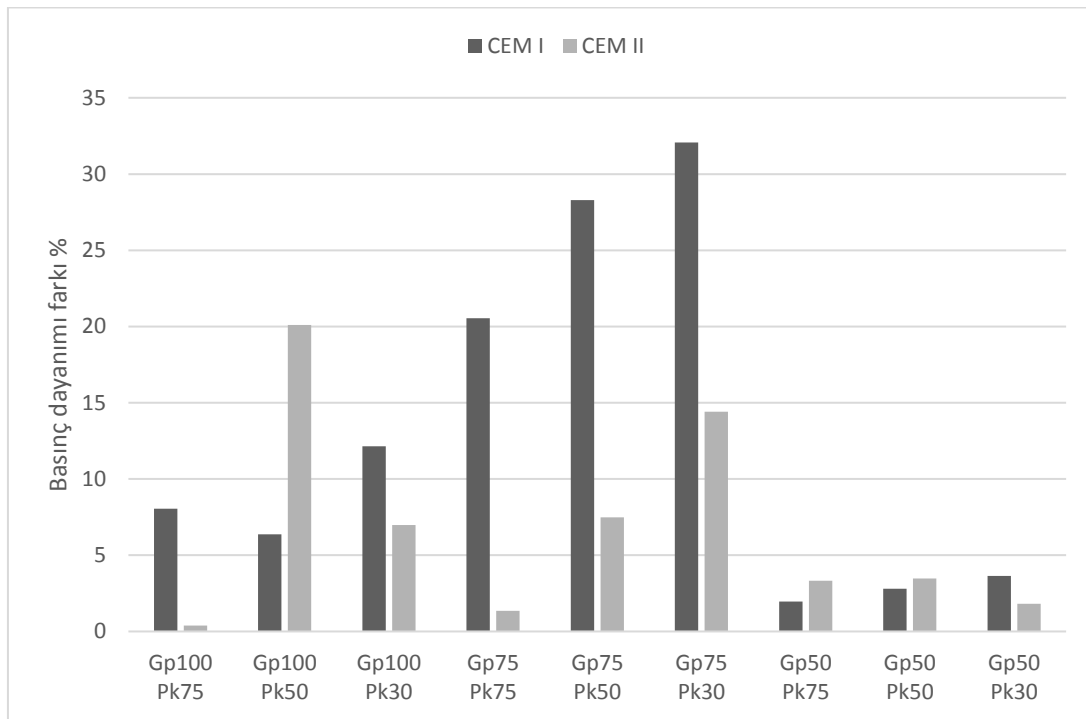


Şekil 4.11. Farklı kürlerde CEM II çimento tipinin kullanıldığı köpük betonların basınç dayanımları

CEM II tipi çimentonun kullanıldığı köpük beton numunelerinin basınç dayanımları hava kürü uygulamasında 2,095 MPa ve 2,965 MPa değerleri arasında değişmektedir. 28 gün hava kürü sonrasında en yüksek basınç dayanımı, köpük beton tasarımında elde edilen agrega oranının %50 azaltılarak genişletilmiş perlit ve agreganın %30 oranında granül polistren köpük kullanılmasıyla oluşturulan Gp50Pk30 numaralı numunede 2,965 MPa değerindedir. 28 gün su kürü uygulanan numunelerde basınç dayanımı ise 2,104 MPa ve 3,16 MPa değerleri arasında değişmektedir. En yüksek basınç dayanımı agrega oranının 0,25 azaltılarak kullanılan genişletilmiş perlit agregası ve %30 oranda kullanılan granül

polistren köpük ile oluşturulmuş Gp75Pk30 numaralı numunede 3,16 Mpa olarak elde edilmiştir.

Falliano ve diğerleri köpük betonda farklı kür koşulları ve farklı çimento tiplerinin basınç dayanımına etkilerini incelemişlerdir. CEM I tip çimentoya göre CEM II tip çimento ile üç kat daha fazla mukavemet elde etmişlerdir. Köpük betonlarda hava ve su kürü ile karşılaştırıldığında ise hava küründe daha düşük mukavemete sahip olduğunu gözlemlemişlerdir (Falliano, De Domenico, Ricciardi, ve Gugliandolo, 2018).



Şekil 4.12. Hava kürü ve su kürünün basınç dayanımına etkisi

Şekil 4.12’de hava ve su kürünün basınç dayanımına etkisinin grafiksel gösterimi bulunmaktadır. Hava ve su kürü karşılaştırıldığında, su kürüne tabi tutulan köpük beton numunelerinin basınç dayanımlarında, CEM I çimento tipinde en az %2 ile en fazla %32 olmak üzere su kürü uygulamasında daha yüksek değerler elde edilmiştir ve en fazla değişim %32 ile Gp75Pk30 numaralı numunede gerçekleşmiştir. CEM II tipi çimentonun kullanıldığı köpük betonlarda ise bu değerler %0,5 ile %20 değerleri arasındadır ve en fazla dayanım artışı %20 ile Gp100Pk50 numaralı numunededir.

4.3. Termal Özelliklerin Belirlenmesi

Köpük betonların termal özelliklerinin belirlenmesi amacı ile yapılan ısı iletkenlik katsayılarının belirlenmesine ait deney bulguları bu kısımda incelenmiştir.

4.3.1. Isı iletkenlik katsayılarının belirlenmesine ait deney bulguları

Köpük beton numunelerinde ısı iletkenlik katsayıları farklı çimento tipleri ve kullanılan agrega oranlarına yönelik olarak incelenmiştir (Çizelge 4.1). İncelenen bir diğer konu da üretilen panellerin yüzeylerine tabaka halinde kullanılan silika arojel etkisidir (Şekil 4.13 ve Şekil 4.14).

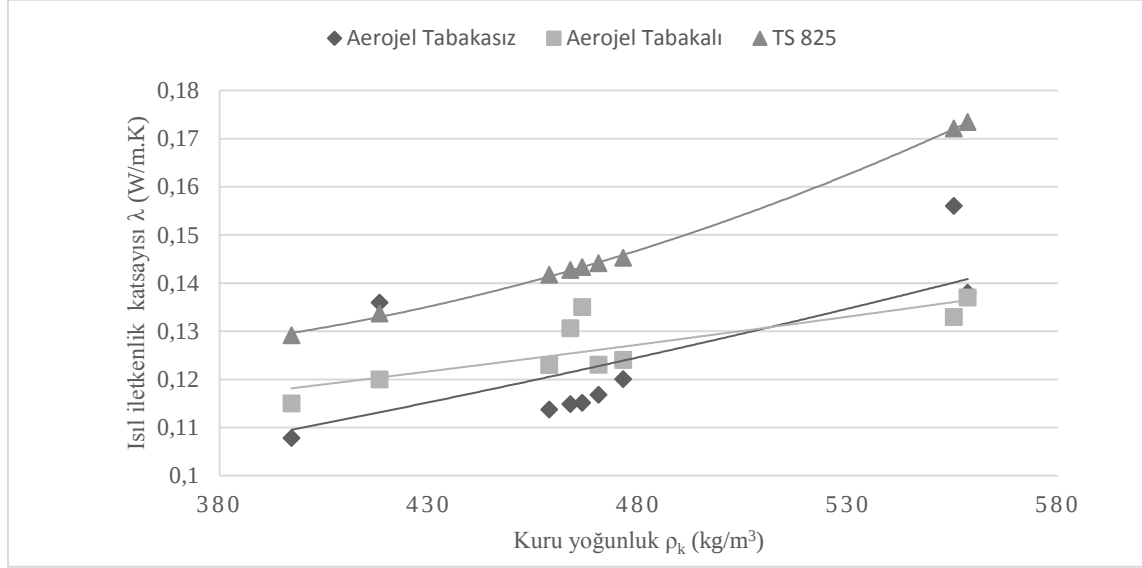
Çizelge 4.1. Köpük betonlara ait ısı iletkenlik katsayıları λ (W/m.K)

(W/m.K)	CEM I		CEM II	
	Arojel tabakasız	Arojel tabakalı	Arojel tabakasız	Arojel tabakalı
Gp100Pk75	0,10777	0,115	0,09848	0,12059
Gp100Pk50	0,13595	0,12	0,1144	0,12839
Gp100Pk30	0,156	0,13294	0,116952	0,13176
Gp75Pk75	0,11483	0,13063	0,10985	0,12937
Gp75Pk50	0,11511	0,135	0,12114	0,13447
Gp75Pk30	0,138	0,137	0,12201	0,13511
Gp50Pk75	0,11373	0,12293	0,11106	0,134
Gp50Pk50	0,11676	0,12304	0,11214	0,138
Gp50Pk30	0,12003	0,124	0,11572	0,139

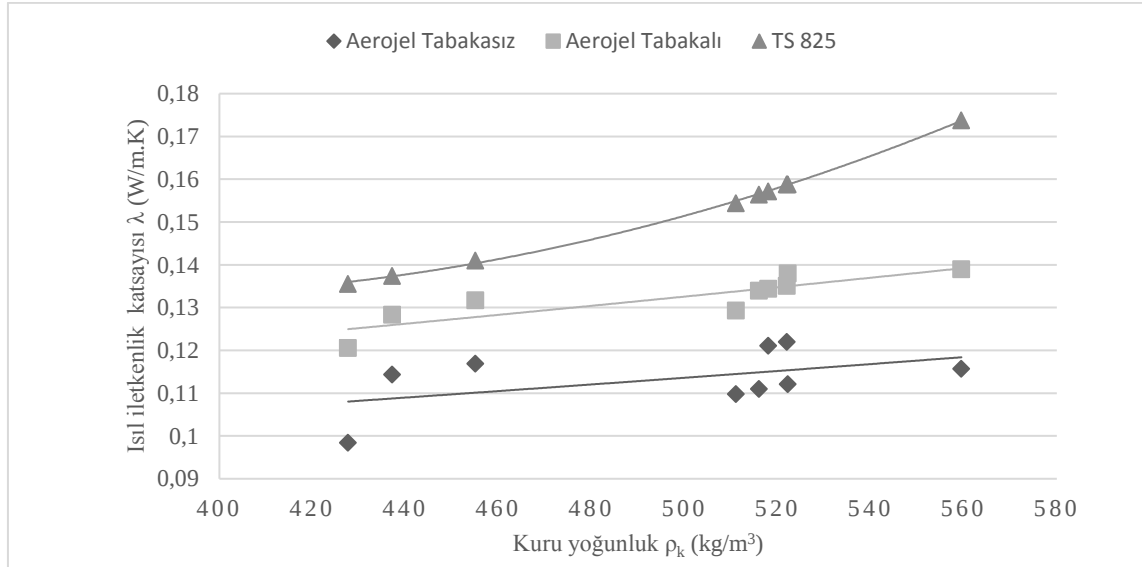
Çizelge 4.1 incelendiğinde en düşük ısı iletkenlik katsayısının CEM II Portland kompoze çimentosunun kullanıldığı, harç içerisinde köpük beton tasarım hesabında bulunan agrega miktarıyla aynı oranda genleştirilmiş perlit agregası ve %25 oranında azaltılarak kullanılan granül polistren köpük bulunan Gp100Pk75 numaralı karışımda, 0,09848 W/m.K olduğu gözlemlenmiştir. Hazırlanan köpük beton numunelerinde granül polistren köpüğün artması ısı iletkenlik katsayısının azalmasını sağlamış, genleştirilmiş perlit agregasının azaltılarak kullanılması da ısı iletkenlik katsayısının artmasına sebep olmuştur. Genleştirilmiş perlit agregasının ve granül polistren köpüğün ısı iletkenlik katsayılarının düşük olması, beton karışımında oranının artması durumunda, köpük beton numunesinin de ısı iletkenlik katsayısının düşmesinin sebebi olduğu düşünülmektedir.

Silika arojel tabakasının kullanılmadığı köpük beton numunelerinde çimento tipi karşılaştırıldığında CEM II kompoze Portland çimentosunun kullanıldığı karışımlarda daha

düşük ısı iletkenlik katsayısı elde edilmiştir. Örneğin, Gp75Pk75 numaralı numunelerde CEM I tipi çimento kullanımında 0,11483 W/m.K ısı iletkenlik katsayısına sahipken, CEM II tipi çimento kullanımı bu değeri %4,5 azaltarak 0,10985 W/m.K olmasını sağlamıştır.



Şekil 4.13. CEM I çimento tipinin kullanıldığı köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları ve kuru yoğunluk karşılaştırması



Şekil 4.14. CEM II çimento tipinin kullanıldığı köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları ve kuru yoğunluk karşılaştırması

Şekilde verilen grafiklerde yoğunluk ve ısı iletkenlik katsayısı karşılaştırmalı olarak incelendiğinde köpük betonda kuru yoğunluğun düşük olmasıyla ısı iletkenlik katsayısının değerinin de düştüğü gözlenmiştir. TS 825’de bulunan referans değere kıyasla daha düşük ısı iletkenlik katsayıları elde edilmiştir. CEM I tipi çimentonun kullanıldığı 418,2 kg/m³ kuru yoğunluğa sahip Gp100Pk50 numaralı numune bu değerin üstünde, 0,136 W/m.K değerine sahiptir.

Yapılan önceki çalışmalarda köpük betonlarda ağırlıkça %10 perlit katkısı, basınç mukavemetini önemli ölçüde azaltmadan ısı iletkenliğin %15 oranda azalmasını sağlamıştır. Köpük betona eklenen polistren köpük miktarında %54 oranında artış ile 2,5 kat daha düşük ısı iletkenlik değerleri elde edilmiştir (Sayadi ve diğerleri, 2016; Rozycka ve Pichor, 2016).

Köpük betonlarda tabaka olarak kullanılan silika arojelinde her iki çimento tipinde de ısı iletkenlik katsayısı üzerinde pozitif bir etkisi görülmemiştir. Silika arojel tabakasının kullanıldığı köpük beton numunelerinde silika arojel tabakasının kullanılmadığı numunelere kıyasla, CEM I tipi çimentonun kullanıldığı Gp100Pk50 ve Gp100Pk30 numuneleri dışında, en az %3 ve en fazla %23 olmak üzere daha yüksek ısı iletkenlik katsayı değerleri gözlemlenmiştir. Silika arojelinde hidrofobluğu köpük beton yüzeyine tutunmayı olumsuz etkileyerek beton yüzeyinde ısı geçişlerine sebep olduğu düşünülmektedir.

4.4. Durabilite Özelliklerinin Belirlenmesi

Köpük betonların durabilite özelliklerinin belirlenmesi için yapılan asit direnci ve donma-çözünme direnci deneylerine ait sonuçlar incelenmiş ve yorumlanmıştır.

4.4.1. Asit direncinin belirlenmesine ait deney bulguları

Köpük beton numunelerinde çimento tipi ve kullanılan agrega değişimlerine göre asit çözeltisi içerisinde bekleyen numunelerin dayanım kayıpları incelenmiştir. Köpük beton numuneleri asit çözeltisine bekletildikten sonra betonda renk değişimleri gözlemlenmiştir.

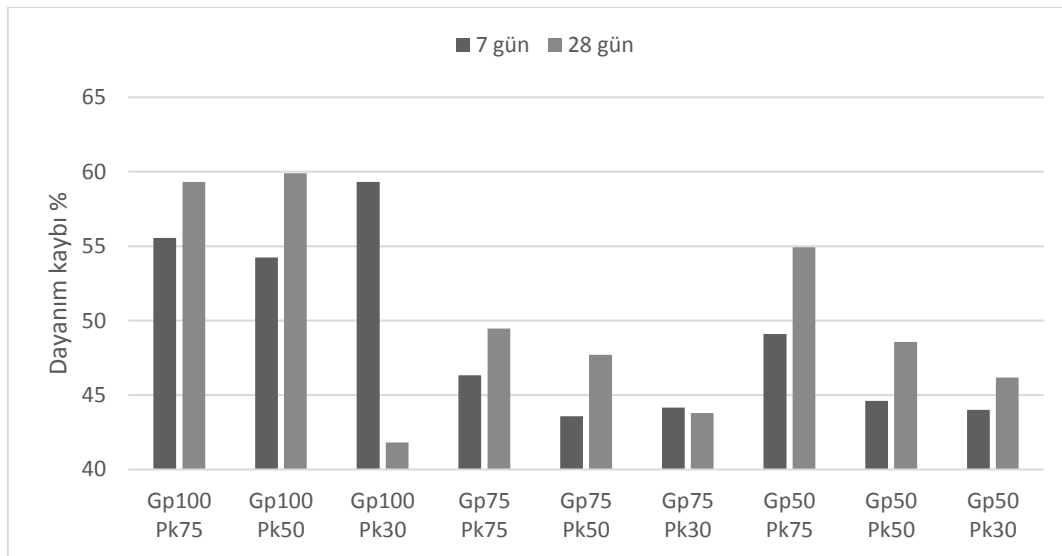


Resim 4.2. Asit çözeltisine maruz kalan köpük beton numunelerinin görünümü

Çizelge 4.2. Asit çözeltisinde bekleyen numunelerin basınç dayanımı değerleri

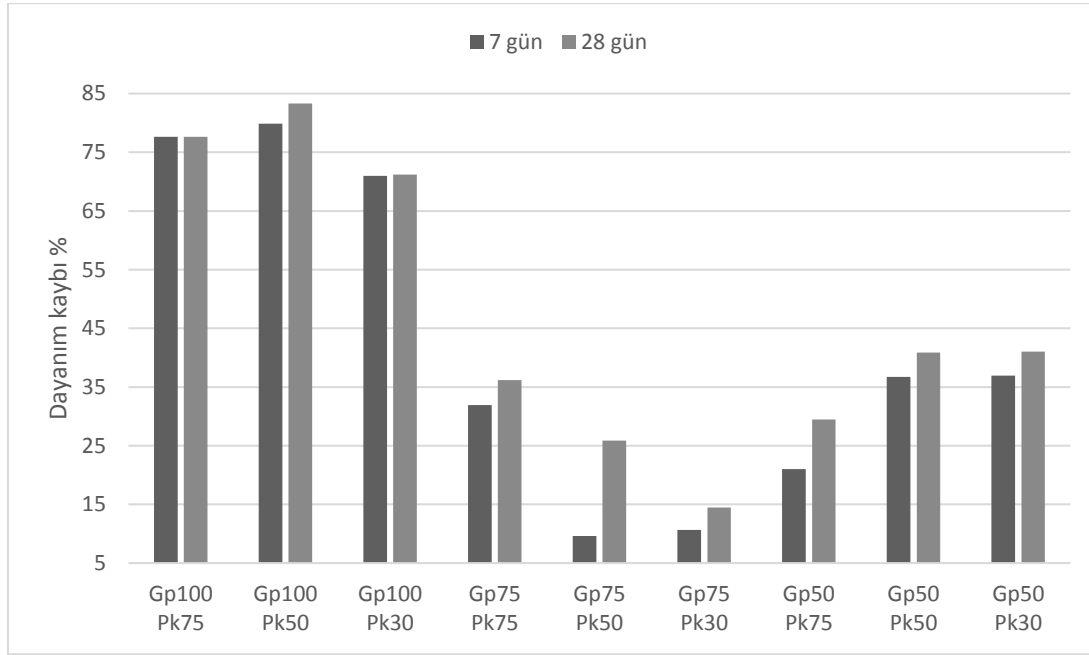
(MPa)	CEM I		CEM II	
	7 gün	28 gün	7 gün	28 gün
Gp100Pk75	0,8	0,732	0,47	0,46
Gp100Pk50	0,85	0,745	0,53	0,44
Gp100Pk30	0,86	1,23	0,788	0,7828
Gp75Pk75	1,2	1,13	1,486	1,393
Gp75Pk50	1,36	1,26	2,532	2,077
Gp75Pk30	1,53	1,54	2,823	2,703
Gp50Pk75	1,22	1,08	1,799	1,606
Gp50Pk50	1,44	1,337	1,895	1,77
Gp50Pk30	1,54	1,48	1,903	1,78

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da köpük beton numunelerinin basınç dayanım kayıpları 7 ve 28 gün için verilmiştir.



Şekil 4.15. CEM I çimento tipinin kullanıldığı köpük betonların asit sonrası dayanım kaybı (%)

Köpük beton numuneleri CEM I tipi çimento kullanımında, asit çözeltisinde bekletildikten sonra en fazla basınç dayanımı kaybı 7 gün için %59 oranla Gp100Pk30 numaralı numunede gerçekleşmiştir. Buna karşın Gp75Pk50 numaralı numunede %43 değerinde en az dayanım kaybı olmuştur. 28 gün asit çözeltisinde bekleyen numunelerde ise en fazla kayıp %60 değeriyle Gp100Pk50 numaralı numunede buna karşın en az kayıp %41 ile 7 günde en fazla kayıp veren Gp100Pk30 numaralı numunededir.



Şekil 4.16. CEM II çimento tipinin kullanıldığı köpük betonların asit sonrası dayanım kaybı (%)

CEM II tipi çimento kullanılan köpük beton numuneleri asit çözeltisinde bekletildikten sonra en fazla basınç dayanımı kaybı 7 ve 28 gün için aynı oranda değişmiştir. 7 gün asit çözeltisinde bekleyen numunelerde %79 oranla en fazla dayanım kaybı Gp100Pk50 numaralı numunede gerçekleşmiştir. Buna karşın Gp75Pk50 numaralı numunede %9 değerinde en az dayanım kaybı olmuştur. 28 gün asit çözeltisinde bekleyen numunelerde ise en fazla kayıp %82 değeriyle yine Gp100Pk50 numaralı numunede, en az kayıp %14 ile Gp75Pk30 numaralı numunededir.

Aravind ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada köpük betonların asit direnci incelenmiştir. Erken yaşlarda %5 oranında basınç dayanımı kaybı gözlemlenirken, bu değer ileriki yaşlarda %28 değerine kadar çıkmıştır (Aravind, Sathyan, ve Mini, 2019).

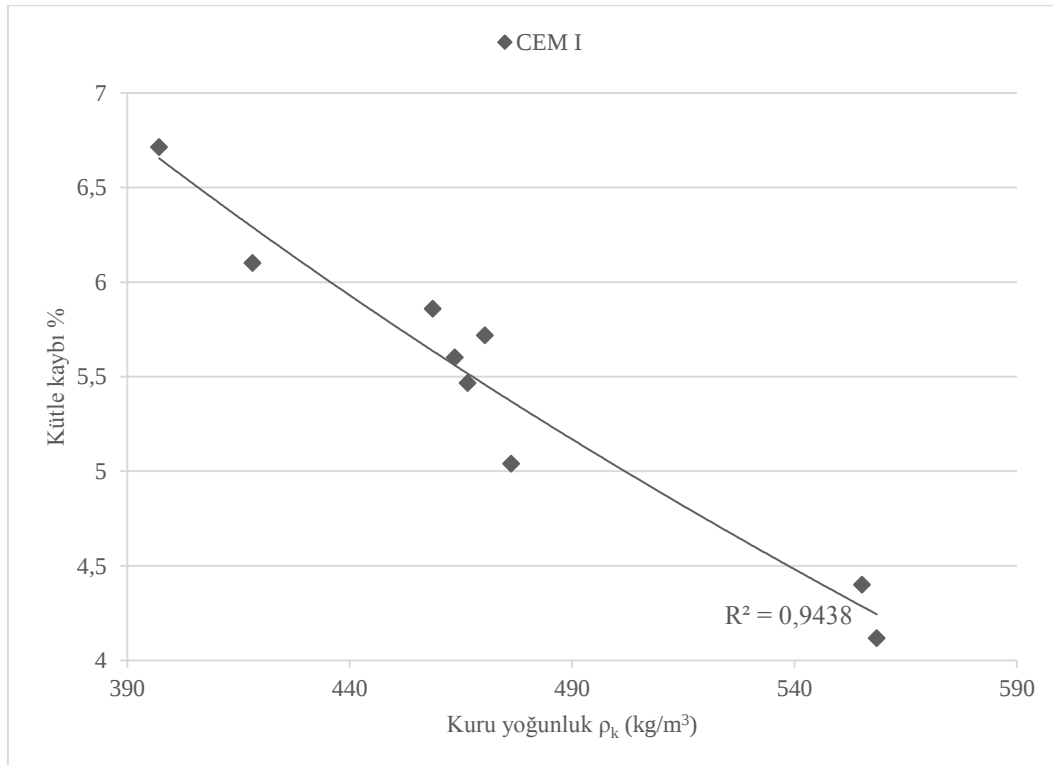
4.4.2. Donma-çözünme direncinin belirlenmesine ait deney bulguları

Köpük beton numuneleri donma-çözünme döngülerine maruz bırakıldıktan sonra kütle kayıplarının kuru yoğunluk ile ilişkisi incelenmiştir (Şekil 4.17 ve Şekil 4.18).

Donma-çözünme döngüleri sonrasında köpük beton numunelerinde gözle görülür şekil bozulmaları ve kütle kayıpları mevcuttur.

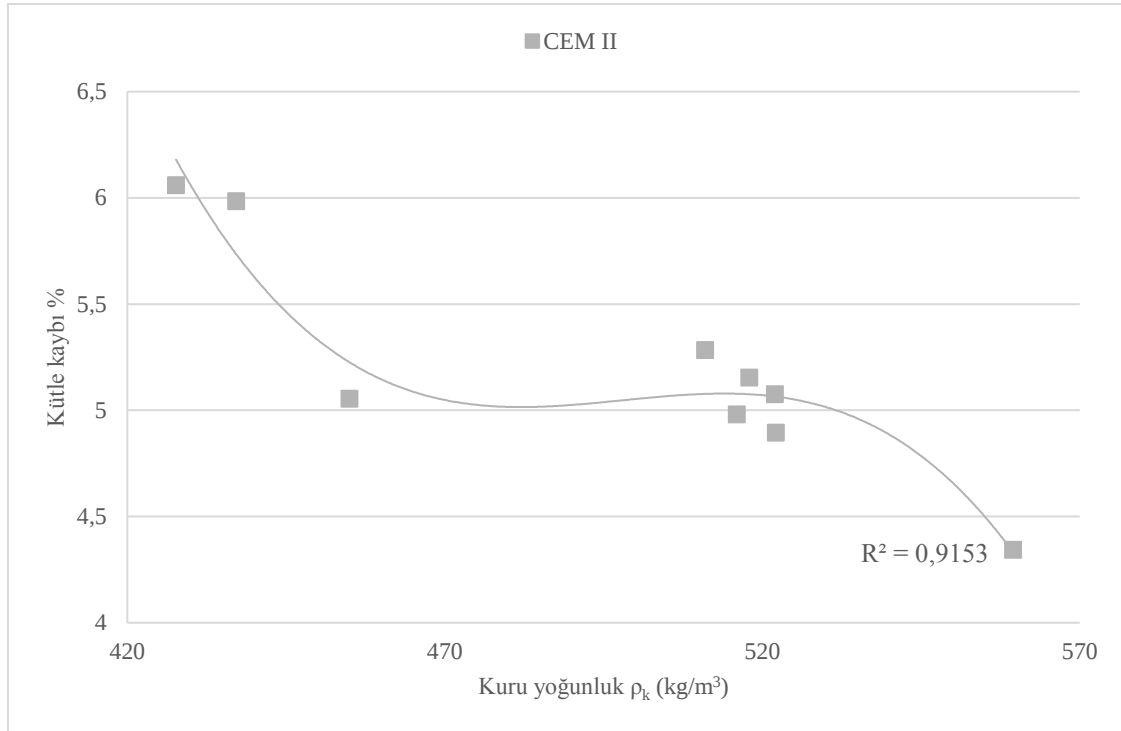


Resim 4.3. Donma-çözünme döngüsüne maruz bırakılan köpük beton numune örnekleri



Şekil 4.17. CEM I tipi çimentonun kullanıldığı köpük betonların donma-çözünme sonrası kütle kaybı- kuru yoğunluk ilişkisi

CEM I tipi çimentonun kullanıldığı köpük beton numunelerinde donma-çözünme döngüleri sonrasında incelenen kütle kayıplarının %6,71 ile %4,11 değerleri arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Kuru yoğunluğun artması kütle kayıp oranlarını azaltmıştır, en yüksek kayıp Gp100Pk75 numaralı numunede %6,71 değerinde ve en düşük kayıp oranı %4,11 ile Gp75Pk30 numaralı numunededir.



Şekil 4.18. CEM II tipi çimentonun kullanıldığı köpük betonların donma-çözünme sonrası kütle kaybı- kuru yoğunluk ilişkisi

CEM II tipi çimentonun kullanıldığı köpük beton numunelerinde donma-çözünme döngüleri sonrasında incelenen kütle kayıplarının %6,06 ile %4,34 değerleri arasında değişmiştir. Kuru yoğunluğun artması CEM I tipi çimento kullanımında olduğu gibi kütle kayıp oranlarını azaltmıştır. En yüksek kayıp Gp100Pk75 numaralı numunede %6,06 değerinde elde edilirken en düşük kayıp oranı %4,34 ile Gp50Pk30 numaralı numunededir.

CEM I ve CEM II tipi çimentoların kullanımının donma-çözünme sonrası etkisi incelendiğinde kütle kayıp oranların birbirine yakın olduğu, yüksek donma-çözünme direnci istenen köpük betonlarda CEM II tip çimento kullanımının daha verimli sonuçlar verebileceği saptanmıştır.

Gong ve Zhang köpük betonun donma-çözünme direnci üzerine çalışma yapmış ve köpük betonun gözenek yapısının ve gözenekliliğinin etkilerini incelemişlerdir. Köpük betonda donma-çözünme döngüsü sonrası %3,69 oranında maksimum kütle kaybı gözlemlenmiştir. Pozolanik katkı eklenmesinin donma-çözünme direncini artırdığını ve bu oranı %1,76 ve %1,99 değerlerine düşürdüğü sonucuna ulaşmışlardır (Gong ve Zhang, 2019).

4.5. Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Köpük betonlara ait elektriksel özdirenç değerleri bu bölümde incelenmiştir.

4.5.1. Elektriksel özdirençinin belirlenmesine ait deney bulguları

Köpük beton numunelerine ait elde edilen elektriksel özdirenç değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Elde edilen değerler çimento tipi, kullanılan agregalar ve silika aerojel katkısı üzerinden incelenmiştir.

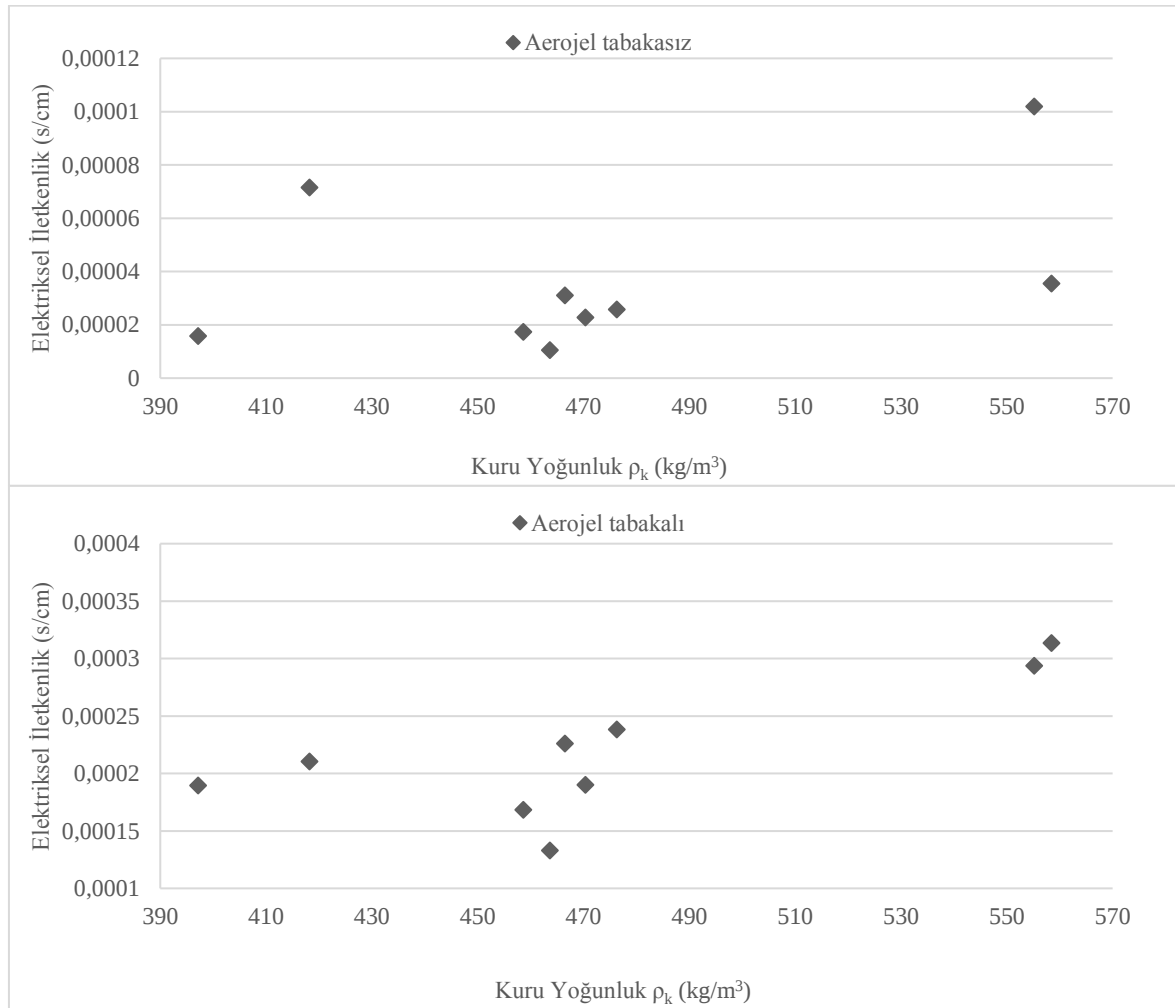
Çizelge 4.3. CEM I ve CEM II tipi çimentoların kullanıldığı köpük betonların elektriksel özdirenç değerleri (kohm.m)

(kohm.m)	CEM I		CEM II	
	Aerojel tabakasız	Aerojel tabakalı	Aerojel tabakasız	Aerojel tabakalı
Gp100Pk75	6360	528	15000	253,5
Gp100Pk50	1399,5	475,5	4785	133,5
Gp100Pk30	981	340,5	2767,5	45,9
Gp75Pk75	9585	753	10911	13,95
Gp75Pk50	3228	442,5	10485	7,56
Gp75Pk30	2823	319,05	6780	7,11
Gp50Pk75	5775	594,45	7935	18,15
Gp50Pk50	4410	526,35	3750	2,385
Gp50Pk30	388,5	419,7	625,5	1,8

Silika aerojel tabakasının bulunmadığı köpük beton numunelerinde CEM I tipi çimentonun kullanımında CEM II tipi çimento kullanımına göre daha düşük elektriksel özdirenç değerleri elde edilmiştir. Düşük elektriksel özdirenç değerleri yüksek iletkenlik anlamına gelmektedir. En düşük elektriksel özdirenç değeri 388,5 kohm.m ile CEM I tipi çimento ile oluşturulmuş Gp50Pk30 numaralı numuneye aittir, en yüksek elektriksel özdirenç değeri ise CEM II tipi çimentonun kullanıldığı Gp100Pk75 numaralı numunede 15000

kohm.m'dir. Silika aerojel tabakasının kullanımı köpük betonların elektriksel özdirenç değerlerini yüksek oranda düşürmüştür. Silika aerojel kullanılan numunelerde, elektriksel özdirenç değerleri CEM II tipi çimento kullanımında daha düşük elde edilmiştir. En düşük elektriksel özdirenç değeri CEM II tipi çimentonun kullanıldığı Gp50Pk30 numaralı köpük beton numunesinde 1,8 kohm.m ve en yüksek elektriksel özdirenç değeri 753 kohm.m ile CEM I tipi çimentonun kullanıldığı Gp75Pk75 numaralı köpük beton numunesine aittir.

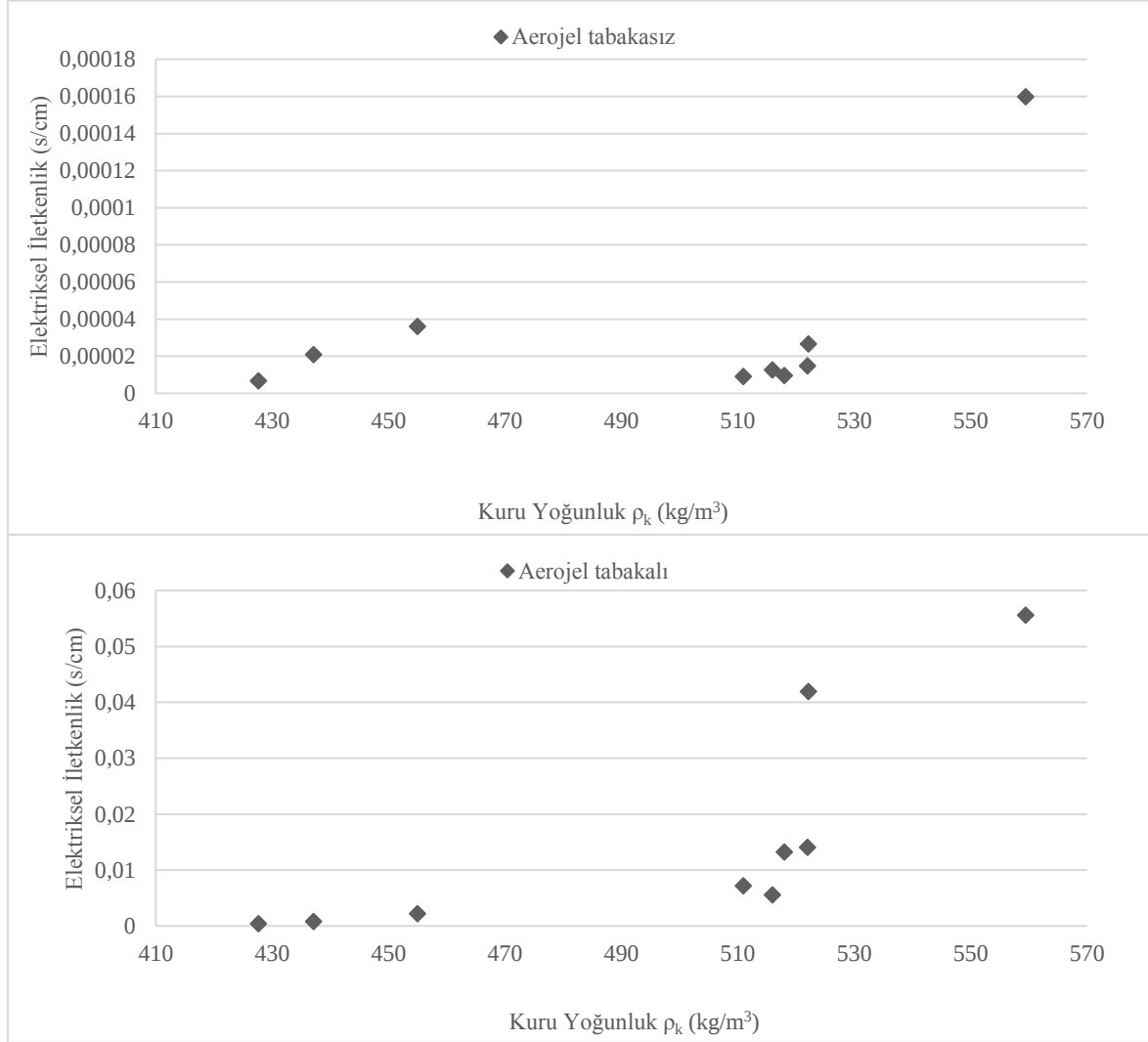
Elektriksel özdirenç değerleriyle elde edilen elektriksel iletkenlik değerleri Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de grafikte köpük beton numunelerinin kuru yoğunlukları ile birlikte verilmiştir.



Şekil 4.19. CEM I çimento tipinin kullanıldığı köpük betonların elektriksel iletkenlik-kuru yoğunluk karşılaştırması

Elektriksel iletkenlik değerleri CEM I tipi çimentonun kullanıldığı köpük beton numunelerinde silika aerojel kullanımı ile artmıştır. Kuru yoğunluğun artması elektriksel iletkenlik değerlerini artırmış, en yüksek kuru yoğunluk 558,5 kg/m³ değerinde Gp75Pk30

numaralı numunede $31,34 \times 10^{-5}$ s/cm olarak elde edilmiştir. Silika arojel tabakasının kullanılmadığı köpük beton numunelerinde, en yüksek elektriksel iletkenlik değeri $555,2 \text{ kg/m}^3$ kuru yoğunluğa sahip Gp100Pk30 numaralı numunede $101,9 \times 10^{-5}$ s/cm'dir.



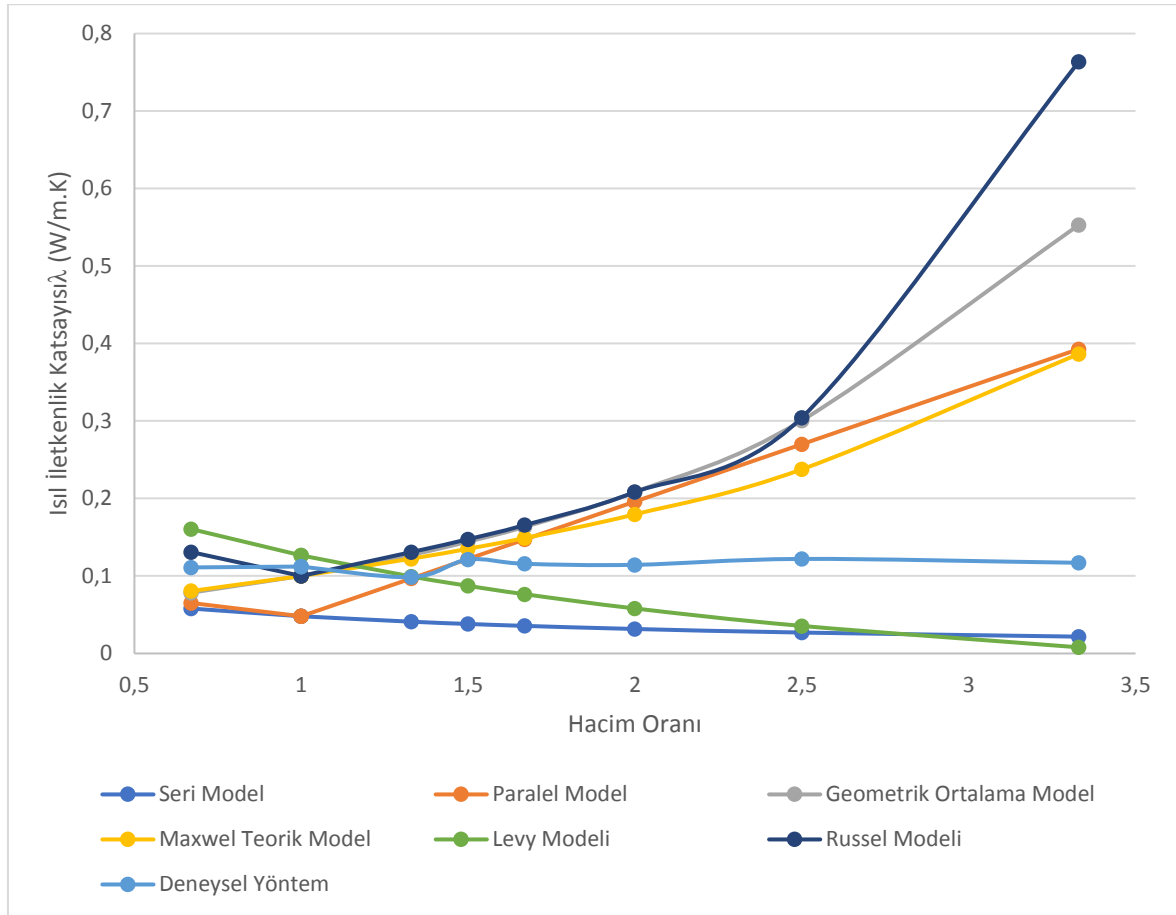
Şekil 4.20. CEM II çimento tipinin kullanıldığı köpük betonların elektriksel iletkenlik-kuru yoğunluk karşılaştırması

CEM II tipi çimentonun kullanıldığı köpük beton numunelerinde elektriksel iletkenlik değerlerinin silika arojel kullanımıyla oldukça arttığı, aynı zamanda CEM I tipi çimento kullanımında da olduğu gibi kuru yoğunluğun artmasıyla da arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek elektriksel iletkenlik değeri en yüksek kuru yoğunluğa ($559,5 \text{ kg/m}^3$) sahip olan Gp50Pk30 numaralı numunede $55,55 \times 10^{-3}$ s/cm'dir.

Normal bir betonun sahip olduğu $\sim 1 \times 10^{-4}$ s/cm elektriksel iletkenlik katsayısının geliştirilmiş perlit ve granül polistren katkılı köpük betonlarda silika aerojel kullanımı ile yükseltilebileceği sonucuna varılabilir.

4.6. Isıl İletkenlik Katsayısının Matematiksel Modeller ile Karşılaştırılması

Isıl iletkenlik katsayısının tespitinde kullanılmak üzere birçok matematiksel model literatürde bulunmaktadır. Bu modeller, gözenekli ortamlarda dolgu maddelerin hacimsel oranları baz alınarak oluşturulmuştur. Köpük beton numunelerinde literatürde yer alan, Seri Model, Paralel Model, Geometrik Ortalama Model, Maxwel Teorik Model, Lewis ve Nielsen Modeli, Levy Modeli ve Russel Modeli ile ısı iletkenlik katsayısının tespiti için veriler elde edilmiştir. Geliştirilmiş perlit miktarı modellerde kullanılan hacimsel oran hesabında esas alınmıştır. Elde edilen veriler, deneyler sonucunda elde edilen veriler ile Şekil 4.21’de incelenmiştir.



Şekil 4.21. Isıl iletkenlik katsayısının matematiksel modellerle tespiti

Isıl iletkenlik deneyi sonucunda daha düşük veriler elde edilen CEM II numuneleri ile karşılaştırılma yapılmıştır. Köpük beton numuneleri için matematiksel modellerle elde edilen sonuçlar incelendiğinde, deney sonucunda elde edilen veriler ile matematiksel modeller ile elde edilen verilerden daha farklı sonuçlar olduğu gözlemlenmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen minimum ısı iletkenlik katsayısı CEM II çimento tipinin kullanıldığı Gp100Pk75 No'lu numunede 0,09848 W/m.K değerinde ve bu numune için en yakın değer Levy Modeli'inde elde edilen 0,09929 W/m.K değerindedir. Genleştirilmiş perlit hacim oranının arttığı durumda Seri Model ve Levy Modelinde ısı iletkenlik katsayısı düşme eğiliminde iken diğer modellerde daha yüksek değerler elde edilmiştir. Matematiksel modellerde yalnızca ısı iletkenlik katsayıları ve hacim oranları ile işlemlerin yapılması sonuçların farklılıklarının sebebi olabilir. Köpük betonun gözenek şekli, boyutu ve malzeme özellikleri ile ilgili farklı parametreler ile hesaplamalarda daha verimli sonuçlar elde edilebilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Genleştirilmiş perlit esaslı kompozit ısı yalıtım panelleri üretmek amacı ile üretilen köpük betonların fiziksel, mekanik, durabilite, termal ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesi için bir dizi deneyler uygulanmıştır. Numune üretiminde 480 kg/m^3 kuru yoğunluk baz alınmıştır. Bu deneyler sonucunda elde edilen veriler ile aşağıdaki sonuç ve önerilere ulaşılmıştır.

Genleştirilmiş perlit ve granül polistren köpük kullanılarak üretilen köpük betonun fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneyler ile ulaşılan sonuçlar:

- Köpük betonlarda genleştirilmiş perlit agregasının ve granül polistren köpük miktarının kullanımını arttırmak, yoğunluğun azalmasını sağlamaktadır, böylece daha hafif malzeme elde edilmektedir. Minimum kuru yoğunluk $397,16 \text{ kg/m}^3$ ile CEM I tipi çimento kullanımı ile elde edilmiştir. Minimum kuru yoğunluğa sahip köpük beton numunesinde, maksimum oranda genleştirilmiş perlit agregası ve granül polistren köpük kullanılmıştır (CEMI-Gp100Pk75).
- Köpük betonlar oldukça fazla gözenekli yapıya sahiptirler. Bu özellik köpük betonların su absorbe özelliği ile yakından ilişkilidir. Köpük beton içerisinde kullanılan genleştirilmiş perlit miktarının azalması ile su emme miktarının azaldığı gözlemlenmiştir. Genleştirilmiş perlitin su emme potansiyelinin daha fazla olduğu sonucuna ulaşılabilir.
- Kapiler su emme deney verilerine göre yoğunluğun artması kapiler su emme potansiyelini her iki tip çimentoda da artmıştır. CEM II tipi çimentonun kullanıldığı köpük beton numunelerinin kapiler su emme potansiyelinin daha düşük olması, çimentonun içeriğindeki puzolanlarla ilişkilendirilebilir. Bu durumda, puzolanik katkının kapiler su emme potansiyelini azalttığı sonucuna varılabilir.
- Ultra geçiş hızı deney sonuçları incelendiğinde, ultra geçiş hızı en fazla olan numune $1861,4 \text{ m/sn}$ hızla CEM II-Gp75Pk50 numunesidir. Bu numunenin en fazla boşluğa sahip olduğu söylenebilir. Ultra geçiş hızı sonuçlarına göre elde edilen dinamik elastisite modülü ise köpük betonların yoğunlukları ile ilişkilendirilmiştir. Kuru yoğunluğun artması dinamik elastisite modülünü her iki tip çimento için de arttırmıştır. En yüksek dinamik elastisite modülüne sahip numune CEM II-Gp7550

numaralı numunede 8000 MPa değerindedir. Bu değere sahip köpük beton numunesinde kuru yoğunluk değeri de 518 kg/m³'tür.

Genleştirilmiş perlit ve granül polistren köpük kullanılarak üretilen köpük betonun mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneyler ile ulaşılan sonuçlar:

- Eğilme dayanımı deney sonuçlarına göre, CEM II tip çimento kullanımı eğilme dayanımını artırmaktadır. Elde edilen en yüksek eğilme dayanımı, genleştirilmiş perlit ve polistren köpüğün en az kullanıldığı numunede 1,3039 MPa değerindedir. Genleştirilmiş perlitin dayanımının düşük olması ve granül polistren köpüklerin yüzeyinin tutunma kuvvetinin düşük olması sebebi ile, köpük beton içerisinde kullanım miktarın artması eğilme dayanımını olumsuz etkilemektedir. Ancak, termal özellikleri olumlu yönde etkilemesi sebebiyle granül polistren köpük ile matrisin arayüzey bölgesinde güçlendirilmesi için yeni çalışmalar yapılması önerilebilir. Köpük betonlara uygulanan kür koşulları da eğilme dayanımını etkileyen bir diğer faktördür. Su kürü uygulaması, köpük betonların eğilme dayanımlarını olumlu yönde etkilemiştir. Hava ve su kürü uygulaması karşılaştırıldığında, su kürü uygulanması ile eğilme dayanımı en fazla artan numune, CEM I-Gp75Pk50 numunesinde %14 değerindedir.
- Köpük betonlara uygulanan basınç dayanımı testlerine göre, eğilme dayanımında olduğu gibi, CEM II tip çimento kullanımı basınç dayanımı değerlerini arttırmıştır. Maksimum basınç dayanımı 3,16 MPa değeri ile CEM II-Gp75Pk30 numaralı numuneye aittir. Hava kürü ve su kürü uygulaması karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, su kürü uygulanan köpük beton numunelerinin basınç dayanımlarının arttığı gözlemlenmiştir. Basınç dayanımında en fazla artış en yüksek basınç dayanımı değerine sahip CEM II-Gp75Pk30 numaralı numunede %32 değerindedir. Granül polistren köpük miktarının kullanımının azaltılması ile basınç dayanımının artırılabilceği ulaşılan sonuçlar arasındadır.

Genleştirilmiş perlit ve granül polistren köpük kullanılarak üretilen köpük betonun termal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneyler ile ulaşılan sonuçlar:

- Isıl iletkenlik katsayıların belirlenmesi amacı ile ısı akış ölçme (Heat Flow Meters HFM) metodu ile deneyler uygulanmıştır. Genleştirilmiş perlit, granül polistren köpük ve silika aerojel katkısının incelenmesi sonucunda, en düşük ısı iletkenlik katsayısı

0,09848 W/m.K değeri ile CEM II tip çimentonun kullanıldığı Gp100Pk75 numaralı numuneye aittir. Köpük beton numunelerinin ısı iletkenlik katsayıları yoğunluklarına göre, TS 825’de bulunan genleştirilmiş perlit esaslı yapı malzemeleri için belirlenen ısı iletkenlik katsayı değerlerinden daha düşük elde edilmiştir. Köpük beton içerisinde genleştirilmiş perlit miktarının arttırılması ısı iletkenlik katsayısının düşmesini sağlamıştır. Granül polistren köpük miktarının arttırılması da ısı iletkenlik katsayısını olumlu biçimde etkilemiştir. Köpük betonlarda kuru yoğunluk ve ısı iletkenlik katsayısı arasında ters orantılı ilişki gözlemlenmiştir. Kuru yoğunluğun artması ısı iletkenlik katsayısının yükselmesine sebep olmuştur. Aerojel iyi yalıtım özelliklerine sahip dünyanın en hafif katı maddesidir. Köpük beton panellerinin üzerinde tabaka halinde kullanılan silika aerojel ise beklenilenin aksine ısı iletkenlik katsayılarını olumsuz yönde etkilemiştir. Silika aerojelin hidrofob oluşu, köpük beton ile silika aerojel tabakanın temas yüzeyinin tam olarak tutunamamasına sebep olup, ısı köprüleri oluşturarak ısı iletkenlik katsayısının yükselmesine sebep olduğu düşünülmektedir. Bu durumda, yapılacak çalışmalarda silika aerojelin yüzeye tutunma kuvvetini arttırabilecek yeni yöntemler üzerinde düşünülmelidir.

Genleştirilmiş perlit ve granül polistren köpük kullanılarak üretilen köpük betonun durabilite özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneyler ile ulaşılan sonuçlar:

- Köpük betonlara uygulanan asit direncinin belirlenmesi için yapılan deney sonucunda numuneler üzerinde renk değişimleri gözlemlenmiştir. Her iki tip çimento kullanımında da genleştirilmiş perlit ve granül polistren köpük miktarının değişimiyle dayanım kayıpları üzerinde düzenli bir artış veya azalış gözlemlenmemiştir. Dayanım kayıpları incelendiğinde, maksimum dayanım kaybı 28 gün çözeltide beklemesi sonucunda CEM II-Gp100Pk50 numunesinde %82 değerindedir. Minimum dayanım kaybı ise CEM II-Gp75Pk30 numunesinde %14 ile elde edilmiştir. Asit çözeltisine maruz kalabilecek ortamlarda genleştirilmiş perlit kullanımının azaltılması önerilebilir.
- Donma-çözünme direncinin belirlenmesine ait deney sonuçlarında köpük betonların kütle kayıpları ve yoğunluk ilişkisi incelenmiştir. Köpük beton numunelerine uygulanan döngüler sonucunda şekil bozukluklarına uğradığı gözlemlenmiştir. Köpük beton numunelerinin kuru yoğunluğunun artması, kütle kayıplarını azaltmıştır. En az kütle kaybı %4,11 değeri ile 558,5 kg/m³ kuru yoğunluktaki CEM I-Gp75Pk30

numunesine aittir. Çimento tipinin etkisi incelendiğinde, CEM II tip çimentonun kullanıldığı numunelerde daha düşük kütle kayıpları elde edilmesi ile puzolanik katkıların donma-çözünme direncini arttırdığı sonucuna ulaşılabılır.

Genleştirilmiş perlit ve granül polistren köpük kullanılarak üretilen köpük betonun elektriksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneyler ile ulaşılan sonuçlar:

- Köpük betonların elektriksel özdirenç deney verilerine göre, CEM II tip çimento kullanımı ile elektriksel özdirenç değerini azaltmak ve böylece elektriksel iletkenlik değerlerini yükseltmek mümkündür. Kuru yoğunluğun artması ise bu değerlerin yükselmesine sebep olmaktadır. Silika aerojel tabakasının kullanıldığı köpük betonlarda daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. En iyi sonuç CEM II-Gp50Pk30 numunesinde 1,8 kohm.m'dir. Silika aerojel tabakasının kullanılmadığı numunelerde ise minimum değer bu değer yaklaşık 215 katıdır. Düşük özdirenç yüksek iletkenlik sağlamaktadır, silika aerojel katkısı ile de bunu sağlamanın mümkün olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Köpük beton numunelerinde silika aerojel tabakasının kullanılması elektriksel iletkenliğin iyileştirilmesi için bir yöntem olabilir.

Genleştirilmiş perlit ve granül polistren köpük kullanılarak üretilen köpük betonun ısı iletkenlik katsayısını tespiti için kullanılan matematiksel modeller sonucu ulaşılan sonuçlar:

- Köpük betonların ısı iletkenlik katsayısının tespiti için literatürde birçok model bulunmaktadır. Bu yöntemlerden birkaçı ile uygulanan deneyler sonucunda elde edilen veriler karşılaştırıldığında, Seri Model ve Levy Modeli dışındaki modellerde hacim oranının artması ile sonuçlar arasındaki farklar artmıştır. Sebebi olarak modellerin hacim oranları ve malzemelerin ısı iletkenlik katsayılarını baz alarak hesaplanması gösterilebilir.

Genleştirilmiş perlit esaslı köpük beton numunelerinin fiziksel, mekanik, termal, durabilite ve elektriksel özelliklerini iyileştirmek amacı ile kullanılan granül polistren köpük ve silika aerojelin etkilerinin incelenmesi sonucunda ulaşılan veriler detaylı şekilde açıklanmış ve olumsuz yönler için öneriler sunulmuştur. Bu tez çalışması sayesinde, köpük betonlarla ilgili literatüre yeni bilgiler eklenerek ileriki çalışmalar için zemin oluşturulmuştur. Ayrıca,

köpük betonların sahip olduğu üstün termal özellikler sayesinde, inşaat sektöründe kullanılan enerjinin verimliliğine katkı da sağlayabilecektir.

KAYNAKLAR

1. 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.
2. Arslan, M. A., Aktaş, M. (2018). İnşaat sektöründe kullanılan yalıtım malzemelerinin ısı ve ses yalıtımı açısından değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 21(2), 299-320.
3. Ucar, A., Balo, F. (2010). Determination of the energy savings and the optimum insulation thickness in the four different insulated exterior walls. *Renewable Energy*, 35(1), 88-94.
4. Lakatos, A., Kovacs, Z. (2021). Comparison of thermal insulation performance of vacuum insulation panels with EPS protection layers measured with different methods. *Energy and Buildings*, 236.
5. İnternet: TEİAŞ. (2020). *Türkiye ve kişi başına kurulu güç-brüt üretim-arz-net tüketimin yular itibariyle gelişimi*. TEİAŞ. Web: <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>, Erişim Tarihi: 03.12.2021.
6. Bayrakçı, H. C., Davraz, M., Başpınar, E. (2011). Yeni nesil ısı yalıtım malzemesi: Vakum yalıtım paneli. *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, 1, 1-12.
7. Akıncı, H. (2007). *Günümüzde uygulanan ısı yalıtım malzemeleri, özellikleri, uygulama teknikleri ve fiyat analizleri*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 28-52.
8. Bektaş, V. (2018). *Binalarda kullanılan ısı yalıtım malzemelerinin karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik, 24-34.
9. Bozsaky, D. (2010). The historical development of thermal insulation materials. *Periodica Polytechnica Architecture*, 41, 49-56.
10. Savic, A., Antonijevic, D., Jelic, I., Zakic, D. (2020). Thermomechanical behavior of bio-fiber composite thermal insulation panels. *Energy and Buildings*, 229.
11. Ülker, S. (2009). *Isı yalıtım malzemelerinin özelliklerinin uygulamaya etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 46-55.
12. Jelle, B. P., Gustavsen, A., Grynning, S., Wegger, E. (2010). *Nanotechnology and possibilities for the thermal building insulation materials of tomorrow*. Zero Emission Building-Proceedings of Renewable Energy Conference, Trondheim, Norway, 121-132.
13. 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.

14. Awoyera, P. O., Akinrinadea, A. D., Galdino, A. G. S., Althoey, F., Kirgiz, M. S., Tayehe, A. B. (2022). Thermal insulation and mechanical characteristics of cement mortar reinforced with mineral wool and rice straw fibers. *Journal of Building Engineering*, 53.
15. Abu-Jdayil, B., Mourad, A. H., Hittini, W., Hassan, M., Hameedi, S. (2019). Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview. *Construction and Building Materials*, 214, 709-735.
16. Wang, L. Y., Wang, C., Liu, P. W., Jing, Z. J., Ge, X. S., Jiang, Y. J. (2018). The flame resistance properties of expandable polystyrene foams coated with a cheap and effective barrier layer. *Construction and Building Materials*, 176, 403-414.
17. Ravindrarajah, R. S. (1999). Bearing strength of concrete containing polystyrene aggregate. *Durability of Building Materials and Components-Proceedings*, 505-514.
18. Schackow, A., Effting, C., Folgueras, M. V., Guths, S., Mendes, G. A. (2014). Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent. *Construction and Building Materials*, 57, 190-197.
19. Zhang, H., Fang, W. Z., Li, Y. M., Tao, W. Q. (2017). Experimental study of the thermal conductivity of polyurethane foams. *Applied Thermal Engineering*, 115, 528-538.
20. Özer, N., Özgünler Acun, S. (2019). Yapılarda yaygın kullanılan ısı yalıtım malzemelerinin performans özelliklerinin duvar kesitleri üzerinde değerlendirilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24.
21. König, J., Nemanic, V., Zumer, M., Petersen, R. R., Ostergaard, M. B., Yue, Y. Z., Suvorov, D. (2019). Evaluation of the contributions to the effective thermal conductivity of an open-porous-type foamed glass. *Construction and Building Materials*, 214, 337-343.
22. Kırimer, H. (1976). Perlit. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 15, 37-44.
23. Orhun, O. (1969). Perlit. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 8, 213-222.
24. Kalaycı, F. (2016). *Perlit esaslı yalıtım malzemesi üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 53-55.
25. Çelik, D. N. (2018). *Genleştirilmiş perlit içeren geopolimer bağlayıcılı ısı yalıtım panellerinin geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 41-45.
26. Köktürk, U. (1997). *Endüstriyel hammaddeler 3. baskı*. İzmir: D.E.Ü Mühendislik Mimarlık Fakültesi Baskı Ünitesi, 256.
27. DPT. (2015). *Madencilik politikaları özel ihtisas komisyonu raporu*. Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara.

28. Kaya, E. S. (2019). *Ham perlit ve genleştirilmiş perlitin puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 4-7.
29. DPT. (2018). *Madencilik politikaları özel ihtisas komisyonu raporu*. Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara.
30. Uluer, O., Karaağaç, İ., Aktaş, M., Durmuş, G., Ağbulut, Ü., Khanlari, A., Çelik, D. N. (2018). Genleştirilmiş perlitin ısı yalıtım teknolojilerinde kullanılabilirliğinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24, 36-42.
31. Altuncı, Y. T., Öcal, C., Saplıoğlu, K., İnce, H. H., Çevikbaş, M. (2021). Genleştirilmiş cam agregalı ve genleştirilmiş perlit agregalı şap harçlarının performansla özelliklerinin belirlenmesi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8, 11-20.
32. Çelik, A. G., Kılıç, A. M., Akkurt, F. (2014). Yapı malzemesi üretiminde genleştirilmiş perlit agregası kullanılabilirliğinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi*, 29, 451-458.
33. Yıldırım, S. T., Baba, E. (2018). Bims agregalı ve genleştirilmiş perlit agregalı hafif kompozit harçların özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1, 47-52.
34. Huang, G. P., Pudasainee, D., Gupta, R., Liu, W. V. (2021). Thermal properties of calcium sulfoaluminate cement-based mortars incorporated with expanded perlite cured at cold temperatures. *Construction and Building Materials*, 274.
35. Gökçe, S., Şimşek, O., Durmuş, G., Demir, İ. (2010). Ham perlit agregalı hafif beton özelliklerine alternatif genleştirilmiş perlit kullanımının etkileri. *Politeknik Dergisi*, 13, 159-163.
36. Durmuş, G., Çelik, M. (2019). The investigation on the effects of different temperature types on concrete containing expanded perlite aggregate. *Düzce University Journal of Science & Technology*, 7, 302-313.
37. Kabay, N., Kızılkant, A. B. (2019). Mekanik ve fiziksel özellikleri bakımından genleştirilmiş perlit agregalı hafif blok. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24.
38. Xiong, H. R., Yuan, K. L., Xu, J. M., Wen, M. J. (2021). Pore structure, adsorption, and water absorption of expanded perlite mortar in external thermal insulation composite system during aging. *Cement & Concrete Composites*, 116.
39. Delikanlı, K. (2015). Nano gözenekli vakum yalıtım panelleri. *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, 5, 1-7.
40. Alam, M., Singh, H., Brunner, S., Naziris, C. (2014). Experimental characterisation and evaluation of the thermo-physical properties of expanded perlite-Fumed silica composite for effective vacuum insulation panel (VIP) core. *Energy and Buildings*, 69, 442-450.

41. Griffith, B., Turler, D., Arasteh, D. (1993). *Optimizing the effective conductivity and cost of gas-filled panel thermal insulations*. Proceedings of the 22nd International Thermal Conductivity Conference, Arizona State University, 1-12.
42. Baetens, R., Jelle, B. P., Gustavsen, A., Grynning, S. (2010). Gas-filled panels for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 42(11), 1969-1975.
43. Wang, Y. Y., Huang, J. J., Wang, D. J., Liu, Y. F., Zhao, Z. J., Liu, J. P. (2019). Experimental investigation on thermal conductivity of aerogel-incorporated concrete under various hygrothermal environment. *Energy*, 188.
44. Al Zaidi, A. K. A., Demirel, B., Atış, C. D. (2019). Effect of different storage methods on thermal and mechanical properties of mortar containing aerogel, fly ash and nano-silica. *Construction and Building Materials*, 199, 501-507.
45. Liu, S. J., Zhu, K. M., Cui, S., Shen, X. D., Tan, G. (2018). A novel building material with low thermal conductivity: Rapid synthesis of foam concrete reinforced silica aerogel and energy performance simulation. *Energy and Buildings*, 177, 385-393.
46. Huang, Y., Niu, J. L. (2015). Energy and visual performance of the silica aerogel glazing system in commercial buildings of Hong Kong. *Construction and Building Materials*, 94, 57-72.
47. Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J., Riffat, S. B. (2014). Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 34, 273-299.
48. Kim, S., Seo, J., Cha, J., Kim, S. (2013). Chemical retreating for gel-typed aerogel and insulation performance of cement containing aerogel. *Construction and Building Materials*, 40, 501-505.
49. Yoon, H. S., Lim, T. K., Jeong, S. M., Yang, K. H. (2020). Thermal transfer and moisture resistances of nano-aerogel-embedded foam concrete. *Construction and Building Materials*, 236.
50. Gao, T., Jelle, B. P., Gustavsen, A., Jacobsen, S. (2014). Aerogel-incorporated concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 52, 130-136.
51. Bostancı, L. (2021). Silika aerogel katkılı hibrit silis dumanı harçlarının mekanik, por Yapısı, termal iletkenlik ve mikro yapı özellikleri. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 12:1, 147-163.
52. Gomes, M. G., Flores-Colen, I., da Silva, F., Pedroso, M. (2018). Thermal conductivity measurement of thermal insulating mortars with EPS and silica aerogel by steady-state and transient methods. *Construction and Building Materials*, 172, 696-705.
53. Jia, G. H., Li, Z. (2021). Influence of the aerogel/expanded perlite composite as thermal insulation aggregate on the cement-based materials: Preparation, property, and microstructure. *Construction and Building Materials*, 273.

54. Chen, F. X., Zhang, Y. H., Liu, J. G., Wang, X. K., Chu, P. K., Chu, B. H., Zhang, N. (2020). Fly ash based lightweight wall materials incorporating expanded perlite/SiO₂ aerogel composite: Towards low thermal conductivity. *Construction and Building Materials*, 249.
55. Serin, G., Çankıran, O., Başıyigit, C., Taş, H. H., Fenkli, M. (2007). Normal, hafif ve yarı hafif beton blokların fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1, 15-22.
56. Karthika, R. B., Vidyapriya, V., Nandhini Sri, K. V., Merlin Grace Beaula, K., Harini, R., Sriram, M. (2021). Experimental study on lightweight concrete using pumice aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1606-1613.
57. Clarke, J. L. (1993). *Structural lightweight aggregate concrete*. U.K: Blackie Academic & Professional, 10-25.
58. Mohammed, J. H., Hamad, A. J. (2014). Materials, properties and application review of Lightweight concrete. *Revista Tecnica de la Facultad de Ingenieria Universidad del Zulia*, 37, 10-15.
59. Kearsley, E. P., Wainwright, P. J. (2001a). Porosity and permeability of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(5), 805-812.
60. Mydin, M. A. O., Wang, Y. C. (2012). Mechanical properties of foamed concrete exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 26(1), 638-654.
61. Hou, L., Li, J., Lu, Z. Y., Niu, Y. H. (2021). Influence of foaming agent on cement and foam concrete. *Construction and Building Materials*, 280.
62. Akman, M. S., Akçay, B. (2005). *Kimyasal beton katkılarının gelişimi ve çimentolarla uyumu*. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, 15-32.
63. Hashim, M., Tantray, M. (2021). Comparative study on the performance of protein and synthetic-based foaming agents used in foamed concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 14.
64. Siva, M., Ramamurthy, K., Dhamodharan, R. (2017). Development of a green foaming agent and its performance evaluation. *Cement & Concrete Composites*, 80, 245-257.
65. Amran, Y. H. M., Farzadnia, N., Ali, A. A. A. (2015). Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials*, 101, 990-1005.
66. Wee, T. H., Babu, D. S., Tamilselvan, T., Lim, H. S. (2006). Air-void system of foamed concrete and its effect on mechanical properties. *Aci Materials Journal*, 103(1), 45-52.
67. Kearsley, E. P., Wainwright, P. J. (2001b). The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(1), 105-112.

68. Jones, M. R., McCarthy, A. (2005). *Behavior and assessment of foamed concrete for construction application*. Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, University of Dundee, Scotland, 61-88.
69. Davraz, M., Kılıçarslan, Ş., Kuru, M. (2015). Farklı yoğunluklardaki köpük betonların dayanım ve ısı iletkenlik özellikleri. *Ulusal beton kongresi, Antalya*, 93, 102.
70. Kearsley, E. P., Mostert, H. F. (2005). *Opportunities for expanding the use of foamed concrete in the construction industry*. Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, University of Dundee, Scotland, 143-154.
71. Nambiar, E. K. K., Ramamurthy, K. (2007). Sorption characteristics of foam concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(9), 1341-1347.
72. Ören, O. H. (2017). *Granüle yüksek fırın cürufunun köpük beton özelliklerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın, 11-14.
73. Raj, A., Sathyan, D., Mini, K. M. (2019). Physical and functional characteristics of foam concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 221, 787-799.
74. Sayadi, A. A., Tapia, J. V., Neitzert, T. R., Clifton, G. C. (2016). Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 112, 716-724.
75. Bekaroğlu, M. (2012). *Kompozit yapıda pomza agregası içeren köpük betonun özellikleri ve teknik parametrelerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 23-25.
76. Pan, Z. H., Li, H. Z., Liu, W. Q. (2014). Preparation and characterization of super low density foamed concrete from Portland cement and admixtures. *Construction and Building Materials*, 72, 256-261.
77. Strzalkowski, J., Sikora, P., Chung, S. Y., Abd Elrahman, M. (2021). Thermal performance of building envelopes with structural layers of the same density: Lightweight aggregate concrete versus foamed concrete. *Building and Environment*, 196.
78. Demir, İ., Başpınar, M. S., Kahraman, E. (2017). Köpük betonun reolojik özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 38.
79. Kumar, N. V., Arunkumar, C., Senthil, S. S. (2018). Experimental Study on Mechanical and Thermal Behavior of Foamed Concrete. *Materials Today-Proceedings*, 5(2), 8753-8760.
80. Xu, L. L., Duan, Y., Li, Y. L. (2022). Porosity, gradient and impact velocity effects on compressive response of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 315.
81. Gencel, O., Balci, B., Bayraktar, O. Y., Nodehi, M., Sarı, A., Kaplan, G., Hekimoğlu, G., Gholampour, A., Benli, A., Ozbakkaloglu, T. (2022). The effect of limestone and bottom ash sand with recycled fine aggregate in foam concrete. *Journal of Building Engineering*, 104689.

82. Kılıçer, A. (2018). Pomza ve genişletilmiş perlit madenlerinin köpük betonda agrega olarak kullanılması. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23, 268-285.
83. Li, P. W., Wu, H. J., Liu, Y. C., Yang, J. M., Fang, Z. S., Lin, B. R. (2019). Preparation and optimization of ultra-light and thermal insulative aerogel foam concrete. *Construction and Building Materials*, 205, 529-542.
84. Tan, X. J., Chen, W. Z., Wang, J. H., Yang, D. S., Qi, X. Y., Ma, Y. S., Wang, X., Ma, S. S., Li, C. J. (2017). Influence of high temperature on the residual physical and mechanical properties of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 135, 203-211.
85. Karaağaç, İ., Uluer, O., Durmuş, G., Aktaş, M. (2016). Kompozit ısı yalıtım levhalarında ısı iletim katsayısı tespit yaklaşımları. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3, 133-142.
86. Yüksel, N. (2010). *Gözenekli yapılarda yapı ve işletme parametrelerinin ısı iletim katsayısına etkilerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 35-49.
87. Bart, G. C. J. (1994). *Thermal conduction in non homogeneous and phase change media*. Doctoral Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, 35-73.
88. Shing, K. J., Shing, R., Chaudhary, D. (1998). Heat conduction and a porosity correction term for spherical and cubic particles in a simple cubic packing. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31, 1681-1687.
89. Kohout, M., Collier, A. P., Stepanek, F. (2004). Effective thermal conductivity of wet particle assemblies. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(25), 5565-5574.
90. Beck, A. E. (1976). An improved method of computing the thermal conductivity of fluid-filled sedimentary rocks. *Geophysics*, 41, 133-144.
91. Carson, J. K., Lovatt, S. J., Tanner, D. J., Cleland, A. C. (2003). An analysis of the influence of material structure on the effective thermal conductivity of theoretical porous materials using finite element simulations. *International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid*, 26(8), 873-880.
92. Carson, J. K., Lovatt, S. J., Tanner, D. J., Cleland, A. C. (2006). Predicting the effective thermal conductivity of unfrozen, porous foods. *Journal of Food Engineering*, 75(3), 297-307.
93. Nielsen, L. E. (1974). Thermal and electrical conductivity of two-phase systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 13, 17-20.
94. Lewis, T. B., Nielsen, L. E. (1970). Dynamic mechanical properties of particulate-filled composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 14, 1449-1471.

95. Halpin, J. C. (1969). Stiffness and expansion estimates for oriented short fiber composites. *Journal of Composite Materials*, 3, 732-734.
96. Gemci, R. (1996). *Lif takviyeli polimer kompozit malzemelerde aşınma ve ısı iletimlerinin iyileştirilmesi*. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 102.
97. Levy, F. L. (1981). A modified Maxwell–Eucken Equation for calculating the thermal conductivity of two-component solutions or mixtures. *International Journal of Refrigeration*, 4, 223-225.
98. Pham, Q. T., Willix, J. (1989). Thermal conductivity of fresh lamb meat, offal and fat in the range -40 to +30°C: Measurements and correlations. *Journal of Food Science*, 54, 508-515.
99. Tavman, I. H. (1998). Effective thermal conductivity of isotropic polymer composites. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 25(5), 723-732.
100. Russel, H. W. (1935). Principles of heat flow in porous insulators. *Journal of the American Ceramic Society*, 18, 1-5.
101. Yüksel, N., Avcı, A. (2010). The present studies on effective thermal conductivities of porous mediums. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25, 331-346.
102. Yüksel, N. (2016). The Review of Some Commonly Used Methods and Techniques to Measure the Thermal Conductivity of Insulation Materials. *Insulation Materials in Context of Sustainability*, Chapter 6, 113-140.
103. Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete*. England: Longman London, 1140-1153.
104. Ma, C., Chen, B. (2016). Properties of foamed concrete containing water repellents. *Construction and Building Materials*, 123, 106-114.
105. Brady, K., Watts, G., Jones, M. R. (2001). *Specification for foamed concrete*. United Kingdom: TRL Limited Crowthorne, 2-9.
106. Falliano, D., De Domenico, D., Ricciardi, G., Gugliandolo, E. (2019). Compressive and flexural strength of fiber-reinforced foamed concrete: Effect of fiber content, curing conditions and dry density. *Construction and Building Materials*, 198, 479-493.
107. Falliano, D., De Domenico, D., Ricciardi, G., Gugliandolo, E. (2018). Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density. *Construction and Building Materials*, 165, 735-749.
108. Rozycka, A., Pichor, W. (2016). Effect of perlite waste addition on the properties of autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, 120, 65-71.
109. Aravind, N., Sathyan, D., Mini, K. M. (2019). Rice husk incorporated foam concrete wall panels as a thermal insulating material in buildings. *Indoor and Built Environment*, 29, 721-729.

110. Gong, J. Q., Zhang, W. J. (2019). The effects of pozzolanic powder on foam concrete pore structure and frost resistance. *Construction and Building Materials*, 208, 135-143.



GAZİ GELECEKTİR..