

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**POMZA VE PERLİT AGREGASI İÇEREN MİNERAL KATKILI TAŞIYICI HAFİF
BETONLARIN ENERJİ PERFORMANSI AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Safa NAYIR

**ARALIK 2021
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**POMZA VE PERLİT AGREGASI İÇEREN MİNERAL KATKILI TAŞIYICI HAFİF
BETONLARIN ENERJİ PERFORMANSI AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ**

İnş. Yük. Müh. Safa NAYIR

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 02 / 12 / 2021

Tezin Savunma Tarihi : 23 / 12 / 2021

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU

Trabzon 2021

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışmada pomza ve perlit agregası içeren farklı mineral katkılı taşıyıcı hafif betonlar normal ağırlıklı beton ile karşılaştırmalı olacak şekilde enerji performansı açısından değerlendirilmiştir.

Doktora danışmanlığımı üstlenerek ders ve konu seçiminde yardımcı olan, çalışmalarımın yürütülmesi esnasında bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım ve manevi desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU'ya teşekkür eder saygılarımı sunarım. Kıymetli vakitlerini ayırarak tez izleme jürimi oluşturan ve fikirleri ile bana yön veren Sayın Dr. Öğr. Üyesi Şirin KURBETCİ ve Prof. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU hocama teşekkür ederim.

Deneylerin bir bölümünü gerçekleştirdiğim Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi ve Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesine katkılarından dolayı teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Yardımlarından dolayı başta Arş. Gör. Dr. Ufuk KANDİL, Arş. Gör. Memduh NAS doktora öğrencisi Vahiddin Alperen BAKİ, Doç. Dr. İlker USTABAŞ olmak üzere, Ömer GEBİÇ ve Akif TÜRK'e teşekkür ederim.

Doktora çalışmamda her koşulda yanımda olan, sevincimi ve üzüntümü beraber paylaştığım hayat arkadaşım ve biricik eşim Ayşegül NAYIR'a ve bugünlere gelmemde maddi ve manevi desteğini esirgemeyen annem Selma NAYIR, babam Mehmet NAYIR ve ablalarım Buşra Gül GÜNGÖR ve Şöhret Merve ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Safa NAYIR

Trabzon 2021

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Pomza ve Perlit Agregası İçeren Mineral Katkılı Taşıyıcı Hafif Betonların Enerji Performansı Açısından Değerlendirilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 23/12/2021.

Safa NAYIR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Amaç ve Kapsam.....	2
2. HAFİF BETON	3
2.1. Tarihçe.....	3
2.2. Hafif Beton Üretiminde Kullanılan Agregalar	7
2.2.1. Doğal Hafif Agregalar	8
2.2.2. Yapay Hafif Agregalar	9
2.3. Hafif Betonların Avantaj ve Dezavantajları	10
2.4. Hafif Betonların Üretimi ve Sınıflandırılması	11
2.4.1. Taşıyıcı Hafif Beton	14
2.5. Taşıyıcı Hafif Betonların Mühendislik Özellikleri	15
2.5.1. İşlenebilirlik.....	15
2.5.2. Birim Hacim Ağırlık	15
2.5.3. Su Emme	15
2.5.4. Dayanım	16
2.5.5. Elastisite Modülü ve Poisson Oranı	19
2.5.6. Sünme ve Rötme	20
2.5.7. Isıl Özellikler.....	20
2.5.8. Yangın Dayanımı	22
2.5.9. Aşınma Dayanımı.....	22

2.6.	Binalarda Enerji Performansı	23
2.7.	Literatür Özeti	27
3.	DENEYSEL ÇALIŞMA	38
3.1.	Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler	40
3.1.1.	Agrega	40
3.1.2.	Çimento	45
3.1.3.	Su.....	46
3.1.4.	Mineral Katkılar	46
3.1.5.	Kimyasal Katkı	48
3.2.	Gerçekleştirilen Ön Çalışmalar	48
3.3.	Taşıyıcı Hafif Beton Tasarımı, Hazırlanması ve Üretimi	49
3.4.	Taze Beton Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler	53
3.4.1.	Çökme (Slump) Deneyi.....	53
3.4.2.	Birim Ağırlık Deneyi.....	54
3.5.	Sertleşmiş Beton Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler.....	54
3.5.1.	Basınç Dayanımı Deneyi	54
3.5.2.	Eğilme Dayanımı Deneyi	56
3.5.3.	Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi.....	57
3.5.4.	Su Emme Oranı ve Porozitenin Belirlenmesi.....	58
3.5.5.	Kılcal Su Emme Deneyi	59
3.5.6.	Hızlı Klor Geçirimsizliği Deneyi	60
3.5.7.	Aşınma (Böhme) Deneyi	61
3.5.8.	Basınç Altında Su İşleme Derinliği Tayini	62
3.5.9.	Isı İletkenlik Deneyi	64
3.6.	Design Builder Enerji Simülasyon Yazılımı	66
4.	DENEY SONUÇLARI.....	67
4.1.	Taze Beton Deney Sonuçları.....	67
4.1.1.	Çökme (Slump)	67
4.1.2.	Birim Ağırlık	68
4.2.	Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	68
4.2.1.	Basınç Dayanımı Deney Sonuçları.....	68
4.2.2.	Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları.....	69
4.2.3.	Yarmada Çekme Dayanımı Deney Sonuçları	69

4.2.4.	Su Emme ve Porozite Ölçümleri	70
4.2.5.	Kılcallık Katsayısı Ölçümleri	70
4.2.6.	Hızlı Klorür Geçirimsiliği Ölçümleri	71
4.2.7.	Aşınma Deneyi Sonuçları.....	71
4.2.8.	Basınç Altında Su İşleme Derinliği Ölçümleri.....	72
4.2.9.	Isı İletkenlik Katsayısı Ölçümleri.....	73
5.	İRDELEME VE YORUM.....	74
5.1.	Basınç Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi	74
5.2.	Yapısal Verimlilik	77
5.3.	Eğilme Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi	79
5.4.	Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	81
5.5.	Su Emme ve Porozite Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	84
5.6.	Kılcallık Ölçümlerinin Değerlendirilmesi.....	87
5.7.	Hızlı Klorür Geçirimsiliği Ölçümlerinin Değerlendirilmesi	90
5.8.	Aşınma Ölçümlerinin Değerlendirilmesi	93
5.9.	Basınç Altında Su İşleme Derinliği Ölçümlerinin Değerlendirilmesi.....	94
5.10.	Isı İletkenlik Ölçümlerinin Değerlendirilmesi	97
5.11.	Isı İletkenlik-Birim Ağırlık İlişkisinin Değerlendirilmesi.....	101
5.12.	Taşıyıcı Hafif Betonların Enerji Performansı	104
5.12.1.	Bina Bilgisi.....	104
5.12.2.	Meteorolojik Veri	106
5.12.3.	Dış Duvardaki Isı Kaybı Değerlendirilmesi.....	107
5.12.4.	Isıtma Döneminde Dış Duvarda Oluşan Isı Kaybı Değerlendirilmesi.....	109
5.12.5.	Isıtma Yükleri.....	111
5.12.6.	Soğutma Yükleri.....	114
5.12.7.	Aylık ve Yıllık Enerji Tüketiminin Karşılaştırılması.....	117
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	121
7.	KAYNAKLAR.....	124
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

POMZA VE PERLİT AGREGASI İÇEREN MİNERAL KATKILI TAŞIYICI HAFİF
BETONLARIN ENERJİ PERFORMANSI AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Safa NAYIR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU
2021, 133 Sayfa

Bu çalışmada pomza ve perlit agregası içeren mineral katkılı taşıyıcı hafif beton üretimi ve bu taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı beton ile karşılaştırmalı olarak enerji performansı açısından değerlendirmesi amaçlanmıştır. Taşıyıcı hafif beton üretiminde mineral katkı olarak uçucu kül ve metakaolin kullanılmıştır. Üretilen betonlar üzerinde çökme, birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, su emme, porozite, kılcal su emme, hızlı klorür geçirimsizliği, aşınma, basınç altında su işleme derinliği ve ısı iletkenlik katsayısı karakteristikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Üretilen betonlara ilişkin belirlenen ısı iletkenlik katsayıları ve birim ağırlıklar bir örnek daire için enerji performansı değerlendirmesi yapmak amacıyla DesignBuilder programında kullanılmıştır. Örnek daire için enerji performansı ve enerji verimliliği, taşıyıcı hafif beton ve normal ağırlıklı beton kullanılması durumunda karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Değerlendirmede örnek dairenin dış duvarındaki ısı kayıpları, ısıtma dönemi dış duvardaki ısı kayıpları, ısıtma yükleri, soğutma yükleri, aylık ve yıllık toplam ısıtma/soğutma yükleri dikkate alınmıştır. Üretilen hafif betonlar ilgili standartta taşıyıcı hafif betonlar için öngörülen sınır şartları sağlamıştır. Mineral katkıların taşıyıcı hafif betonun özellikle durabilite özelliklerinde belirgin bir iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. Normal ağırlıklı betona kıyasla, tüm taşıyıcı hafif betonlar örnek daire için daha az toplam yıllık enerji tüketmiştir. Normal ağırlıklı betona kıyasla, taşıyıcı hafif betonların örnek daire için yıllık %23 ila %30 oranında enerji tasarrufu sağladığı tespit edilmiştir. Toplam soğutma yükleri açısından bir değerlendirme yapıldığında soğutma yükü ihtiyacının beton bileşimi açısından önemli derecede etkilenmediği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: : Pomza, Perlit, Dayanım, Taşıyıcı hafif beton, Enerji performansı, Isıtma ve soğutma yükü

PhD Thesis

SUMMARY

EVALUATION OF MINERAL ADDITIVES ADDED STRUCTURAL LIGHTWEIGHT CONCRETE CONTAINING PUMICE AND PERLITE AGGREGATES IN TERMS OF ENERGY PERFORMANCE

Safa NAYIR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU
2021, 133 Pages

In this study, it is aimed to produce mineral additives added structural lightweight concrete containing pumice and perlite aggregate and to evaluate these structural lightweight concretes in terms of energy performance in comparison with normal weight concrete. Fly ash and metakaolin were used as mineral additives. The characteristics of slump, unit weight, compressive strength, flexural strength, splitting tensile strength, water absorption, porosity, capillary water absorption, rapid chloride permeability, abrasion, water penetration depth under pressure and thermal conductivity coefficient were determined experimentally. The thermal conductivity coefficients and unit weights determined for the produced concretes were used in the DesignBuilder program to evaluate the energy performance for a sample flat. Energy performance and energy efficiency for the sample flat were evaluated comparatively in case of using structural lightweight concrete and normal weight concrete. In the evaluation, heat losses on the outer wall of the sample flat, heat losses on the outer wall during the heating period, heating loads, cooling loads, monthly and annual total heating/cooling loads were taken into consideration. The produced lightweight concretes have met the critical conditions stipulated in the relevant standard for structural lightweight concretes. It has been determined that mineral additives provide a significant improvement especially in the durability properties of lightweight concrete. Compared to normal weight concrete, all lightweight concretes consumed less total annual energy for the sample flat. Compared to normal weight concrete, it has been determined that structural lightweight concrete provides 23% to 30% annual energy savings for the sample flat. When an evaluation is made in terms of total cooling loads, it is seen that the cooling load requirement is not significantly affected in terms of concrete composition.

Keywords: Pumice, Perlite, Strength, Structural lightweight concrete, Energy performance, Heating and cooling load

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1.	Roma dönemine ait Pantheon Tapınağı.....	3
Şekil 2.2.	Hafif beton kullanılarak inşaa edilen Park Plaza oteli	4
Şekil 2.3.	1919 yılında yapılan Selma adlı gemi	5
Şekil 2.4.	Oakland Körfez Köprüsü, San Francisco	6
Şekil 2.5.	Stolmen Köprüsü, Norveç	6
Şekil 2.6.	Heidrun Tension Leg Platformu	7
Şekil 2.7.	Türkiyede’ki mevcut pomza ve perlit yataklarına ilişkin harita.....	9
Şekil 2.8.	Hafif betonların birim hacim ağırlıklarına göre sınıflandırılması	13
Şekil 2.9.	Hafif ve geleneksel betonda gerilme dağılımları	18
Şekil 2.10.	Hafif ve geleneksel betonda çatlamanın şematik gösterimi	18
Şekil 2.11.	Türkiye’de enerji tüketiminin sektörel dağılımı.....	25
Şekil 2.12.	Binada yaklaşık kayıpları	26
Şekil 3.1.	Gerçekleştirilen çalışmaya ilişkin deney programı	39
Şekil 3.2.	Deneyde kullanılan pomza agregası.....	41
Şekil 3.3.	Deneysel çalışmada kullanılan pomza ve perlit agregaları	42
Şekil 3.4.	Taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılan karışım agregasına ilişkin granülometrik bileşim ve ilgili sınır eğrileri.....	43
Şekil 3.5.	Pomza agregasına ilişkin XRD analizi.....	44
Şekil 3.6.	Perlit agregasına ilişkin XRD analizi	45
Şekil 3.7.	Seyitömer uçucu külüne ait XRD analizi	47
Şekil 3.8.	Metakaolien ait XRD analizi	47
Şekil 3.9.	Üretimlerde kullanılan mikser, üretilen taze beton ve betonun kalıplara alınması.....	50
Şekil 3.10.	Üretim sonrası kalıplarında numuneler	51
Şekil 3.11.	Kalıplarından çıkarılmış numuneler.....	51
Şekil 3.12.	Isı iletkenlik katsayısı ve basınç dayanımı için hazırlanan numuneler	52
Şekil 3.13.	Çökme konisi ve çökme deneyi.....	54
Şekil 3.14.	Basınç dayanımı deneyinde kullanılan pres ve deney düzeneği	55
Şekil 3.15.	Basınç dayanımı deneyinin gerçekleştirilmesi	56

Şekil 3.16.	Eğilme deneyi düzeneği	57
Şekil 3.17.	Eğilme deney düzeneğinde numunenin konumlandırılması	57
Şekil 3.18.	Yarmada çekme deneyi düzeneği ve deney sonunda numunenin durumu.....	58
Şekil 3.19.	Kılcal su emme deneyi düzeneği.....	60
Şekil 3.20.	Hızlı klor geçirimliliği deney düzeneği.....	61
Şekil 3.21.	Aşınma (Böhme) cihazı.....	62
Şekil 3.22.	Deney sonunda numunelerinin yüzeylerinin görünümü	62
Şekil 3.23.	Basınç altında su işleme derinliği tayini deney düzeneği.....	63
Şekil 3.24.	Su işleme derinliği tayini deneyi sonrası beton örnek kesitleri.....	63
Şekil 3.25.	Isı akış ölçer çalışma prensibinin şematik gösterimi.....	64
Şekil 3.26.	Isı iletkenlik katsayısının ölçümünde kullanılan cihaz.....	65
Şekil 3.27.	Isı iletkenlik katsayısı ölçümünde kullanılan numuneler	66
Şekil 5.1.	350 dozajlı betonlara ilişkin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları	75
Şekil 5.2.	450 dozajlı betonlara ilişkin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları	76
Şekil 5.3.	350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin eğilme dayanımları	80
Şekil 5.4.	450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin eğilme dayanımları	81
Şekil 5.5.	350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin yarmada çekme dayanımları.....	82
Şekil 5.6.	450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin yarmada çekme dayanımları.....	83
Şekil 5.7.	350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin su emme değerleri.....	85
Şekil 5.8.	450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin su emme değerleri.....	86
Şekil 5.9.	350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin porozite değerleri.....	87
Şekil 5.10.	450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin porozite değerleri.....	87
Şekil 5.11.	350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin kılcallık katsayıları	88
Şekil 5.12.	450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin kılcallık katsayıları	89
Şekil 5.13.	350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin hızlı klorür geçirimlilikleri	91
Şekil 5.14.	450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin hızlı klorür geçirimlilikleri	92
Şekil 5.15.	350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin aşınma kaybı	93
Şekil 5.16.	450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin aşınma kaybı	94
Şekil 5.17.	350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin su işleme derinliği ölçümleri	95
Şekil 5.18.	450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin su işleme derinliği ölçümleri	96
Şekil 5.19.	350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ait ısı iletkenlik katsayıları	98
Şekil 5.20.	450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ait ısı iletkenlik katsayıları	99

Şekil 5.21.	350 dozajlı taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla ısı iletkenliklerindeki değişim	100
Şekil 5.22.	450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla ısı iletkenliklerindeki değişim	101
Şekil 5.23.	350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlar için ısı iletkenlik-birim ağırlık ilişkisi	102
Şekil 5.24.	450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlar için ısı iletkenlik-birim ağırlık ilişkisi	103
Şekil 5.25.	Tasarlanan dairenin üç boyutlu görünümü	105
Şekil 5.26.	Tasarlanan dairenin kat planı	105
Şekil 5.27.	Normal ağırlıklı beton ve 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonların yıllık ısı kaybı ve normal ağırlıklı betonunkine kıyasla yüzde olarak değişim	108
Şekil 5.28.	Normal ağırlıklı beton ve 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların yıllık ısı kaybı ve normal ağırlıklı betonunkine kıyasla yüzde olarak değişim	109
Şekil 5.29.	350 dozajlı taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla ısıtma döneminde ısı kaybındaki kazanç	110
Şekil 5.30.	450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla ısıtma döneminde ısıtma kaybındaki kazanç	111
Şekil 5.31.	Normal ağırlıklı beton ve 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonların yıllık ısıtma ve ısıtma dönemindeki toplam ısıtma yükleri	112
Şekil 5.32.	Normal ağırlıklı beton ve 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların yıllık ısıtma ve ısıtma dönemindeki toplam ısıtma yükleri	113
Şekil 5.33.	Normal ağırlıklı beton ve 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonların yıllık soğutma ve soğutma dönemindeki toplam soğutma yükleri	115
Şekil 5.34.	Normal ağırlıklı beton ve 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların yıllık soğutma ve soğutma dönemindeki toplam soğutma yükleri	116
Şekil 5.35.	Toplam aylık enerji yükleri	118
Şekil 5.36.	Normal ağırlıklı beton ve 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlar için belirlenen yıllık enerji tüketimleri	119
Şekil 5.37.	Normal ağırlıklı beton ve 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlar için belirlenen yıllık enerji tüketimleri	120

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 2.1.	Hafif betonların basınç dayanımlarına göre sınıflandırılması.....	12
Tablo 2.2.	Hafif betonların yoğunluklarına göre sınıflandırılması.....	12
Tablo 2.3.	Taşıyıcı hafif betonlar için yapılan tanımlar	14
Tablo 2.4.	Hafif betonlar için basınç dayanımı-çimento miktarı arasındaki ilişki.....	17
Tablo 2.5.	Geleneksel ve hafif betona ilişkin termal özellikler.....	21
Tablo 3.1.	Gerçekleştirilen taze beton deneyleri ve ilgili standartlar	40
Tablo 3.2.	Gerçekleştirilen sertleşmiş beton deneyleri ve ilgili standartlar	40
Tablo 3.3.	Taşıyıcı hafif beton üretimde kullanılan karışım agregasına ilişkin granülometrik bileşim.....	42
Tablo 3.4.	Perlit ve pomza agregalarına ait kimyasal analizler	44
Tablo 3.5.	Kullanılan çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri	45
Tablo 3.6.	Uçucu kül ve metakaoline ilişkin kimyasal özellikler	46
Tablo 3.7.	Kimyasal katkı maddesine ait özellikler	48
Tablo 3.8.	Deneysel çalışma kapsamında gerçekleştirilen üretimler (kg/m ³)	53
Tablo 4.1.	Karışımlara ilişkin ölçülen çökme değerleri	67
Tablo 4.2.	Karışımlara ilişkin ölçülen birim ağırlıklar.....	68
Tablo 4.3.	Karışımlara ilişkin ölçülen basınç dayanımları	69
Tablo 4.4.	Karışımlara ilişkin ölçülen eğilme dayanımları	69
Tablo 4.5.	Karışımlara ilişkin ölçülen yarmada çekme dayanımları.....	70
Tablo 4.6.	Karışımlara ilişkin belirlenen su emme ve porozite değerleri	70
Tablo 4.7.	Karışımlara ilişkin ölçülen kılcallık katsayıları	71
Tablo 4.8.	Karışımlara ilişkin ölçülen hızlı klorür geçirimlilik değerleri	71
Tablo 4.9.	Ölçülen aşınma değerleri	72
Tablo 4.10.	Karışımlara ilişkin ölçülen su işleme derinliği değerleri	72
Tablo 4.11.	Normal ve taşıyıcı hafif betonlara ilişkin ısı iletkenlik katsayıları	73
Tablo 5.1.	Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin hesaplanan yapısal verimlilik.....	78
Tablo 5.2.	Betonların geçirimliliklerine ilişkin sınıflandırma	90
Tablo 5.3.	Su işleme derinliği ile betonun geçirimliliğinin ilişkilendirilmesi	95

Tablo 5.4.	Yapı elemanları için U ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) değerleri	106
Tablo 5.5.	Ankara ili için aylık meteorolojik veriler	107



SEMBOLLER DİZİNİ

ASHRAE	: American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers (Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Derneği)
C	: Coulomb
K	: Kuvars
MK	: Metakaolin
NAB	: Normal Ağırlıklı Beton
S/B	: Su/Bağlayıcı
THB	: Taşıyıcı Hafif Beton
UK	: Uçucu Kül
UKMK	: Uçucu Kül+Metakaolin
XRD	: X-Ray Diffraction (X-ışını Kırınım yöntemi)
XRF	: X-Ray Fluorescence (X-ışını Floresans Spektrometresi)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Beton; yüksek dayanımı, dayanıklılığı, kolay uygulanabilirliği ve rakip malzemelere kıyasla ucuz olması gibi sahip olduğu özellikler itibariyle yaygın uygulama alanı olan geleneksel bir yapı malzemesidir. Özellikle çevresel etkilere karşı dayanıklı olması, dolayısıyla uzun ömürlü olması ve ekonomik olması tercih edilmesinde en önemli nedenlerdir. Geleneksel betonun birim hacim ağırlığının yüksek olması nedeniyle yapının zati (ölü) yükü artmaktadır. Zati yükün artması depremin neden olduğu yatay kuvvetlerde ciddi artışlara neden olmaktadır. Depreme bağlı olarak yatay kuvvetlerin şiddetinde meydana gelen artış özellikle yakın zamanlarda sıkça gözlemlenen ve şahit olunan bir durumdur. Bu durum ülkemiz gibi aktif deprem kuşağında yeralan ülkelerde önemli can ve mal kaybına neden olmaktadır. Yapının zati yükünde önemli miktarda azalmaya neden olması nedeniyle son yıllarda özel bir beton türü olan taşıyıcı hafif betonun yapıların taşıyıcı sisteminde kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu şekilde bina zati yükünde meydana gelen azalma sonuçta yapı elemanlarının kesitlerinde hatırı sayılır küçülmeler sağlamaktadır. Yapı elemanlarının kesitinde meydana gelen azalma hem depremin neden olacağı hasarın az olması açısından hem de ekonomik açıdan sağlayacağı fayda bakımından son derece önemlidir (Hüsem, 1995) (Akkaş 2011).

Hafif beton genellikle yalnızca iri agrega kullanılarak ya da normal ağırlıklı agreganın yerine belli oranlarda hafif agrega kullanılarak üretilebilmektedir. Kullanılan agregalar doğal veya yapay kökenli olabilmektedir. Hafif beton üretiminde pomza, diatomit, volkanik tüf, volkanik cüruf gibi doğal agregalar kullanılabildiği gibi genleştirilmiş perlit, genleştirilmiş kil, şist gibi yapay hafif agregalar kullanılmaktadır (Esmailzadeh, 2013).

Taşıyıcı hafif betonun geleneksel betona kıyasla düşük birim hacim ağırlık ve yalıtım özellikleri gibi bazı üstün özellikleri vardır. Bu özellikleri sayesinde taşıyıcı hafif beton dünyada inşaat sektöründe önemli rol oynamakta ve birçok uygulamada yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Yüksek üretim potansiyeli, jeolojik yapısı ve fazla miktarda rezervi dikkate alındığında, ülkemizde taşıyıcı hafif betona yeterince önem verilmediği

görülmektedir. Ülkemizde taşıyıcı hafif beton yerine daha çok düşük dayanımlı ve yalıtım amaçlı hafif beton uygulamaları mevcuttur (Kaldı, 2011).

Gelişen beton endüstrisi sayesinde taşıyıcı hafif betonun bazı özelliklerini değiştirmek ve zayıf yönlerini iyileştirmek amacıyla üretiminde farklı mineral ve kimyasal katkıları kullanılmaktadır. Bu şekilde daha üstün özellikli ve nitelikli taşıyıcı hafif beton üretimi mümkün hale gelmektedir. Sonuçta çevresel etkilere dayanıklı, yeterli dayanıma sahip ve ekonomik yapı elemanlarının üretimi mümkün olmaktadır (Yazıcıoğlu ve Bozkurt, 2006).

1.2. Amaç ve Kapsam

Çalışmada, pomza ve ham perlit agregası kullanarak bileşim itibarıyla farklı taşıyıcı hafif beton üretimi amaçlanmış ve üretilen bu betonların enerji performansı değerlendirilmiştir. Taşıyıcı hafif beton üretiminde mineral katkı olarak uçucu kül ve metakaolin kullanılmıştır. Ayrıca karşılaştırma amacı ile çalışmada normal ağırlıklı beton üretimi de gerçekleştirilmiştir. Üretilen betonlar üzerinde çökme, birim hacim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, su emme yüzdesi, porozite, kılcal su emme, hızlı klorür geçirimsizliği, aşınma, basınç altında su işleme derinliği ve ısı iletkenlik katsayısı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen betonların belirlenen birim hacim ağırlık ve ısı iletkenlik özellikleri tasarlanan bir örnek daire için enerji simülasyon yazılımı DesignBuilder programı vasıtasıyla enerji verimliliği değerlendirmede kullanılmıştır (URL-1, 2020). Bu kapsamda üretilen taşıyıcı hafif betonlarla tasarlanan örnek dairenin normal ağırlıklı betonla tasarlanan örnek daireye kıyasla sağlanan enerji verimliliği ve performansı kıyaslamalı olarak değerlendirilmiştir.

2. HAFİF BETON

2.1. Tarihçe

Hafif betonun kullanımı milattan önce 3000’li yıllara dayandığı bilinmektedir. Hafif agreganın bina inşasında ilk kullanımı Romalılarla başlamıştır. Romalılar, 2000 yıl kadar önce Şekil 2.1’de görülen Pantheon gibi gösterişli bir yapı inşasında pomza kullanmışlardır. Pantheon tapınağının 43 m açıklıklı kubbesinin yapımında pomza kullanılarak kubbenin hafiflemesi sağlanmıştır. Bunun yanı sıra üçüncü yüzyılda Babil sarayları, dördüncü yüzyılda Bizanslılar tarafından yapılan İstanbul’daki Ayasofya ve Meksika’daki Maya Piramitlerinde de hafif beton kullanılmıştır (Holm vd., 1984) (Chandra ve Berntsson, 2002) (Ulus, 2007).



Şekil 2.1. Roma dönemine ait Pantheon Tapınağı

İşlenmiş hafif agreganın üretimi ilk defa I. Dünya Savaşı sırasında Amerika Birleşik Devletlerinde ve yaklaşık 20 yıl kadar sonra Atlantik’in doğu tarafında gerçekleştirilmiştir. Hafif agregalı beton üretimi Amerika Birleşik Devletlerinde ve Kanada’da birçok sayıda köprü ve yüksek katlı bina inşasında kullanılmıştır (Holm vd., 1984).

Hafif beton kullanılarak inşa edilmiş ilk yüksek katlı bina St. Louis'deki Park Plaza oteli Şekil 2.2’de verilmektedir. Bu otel hafif betonun yüksek yapılarda güvenilir ve

ekonomik olarak kullanılabileceğini gösteren çarpıcı bir örnektir. 1929'da 28 katlı olarak inşa edilen bu otelin hem çerçeve hem de zemin sistemlerinin yapımında yoğun bir biçimde hafif beton kullanılmıştır (Arslan, 2007) (URL-2, 2020).



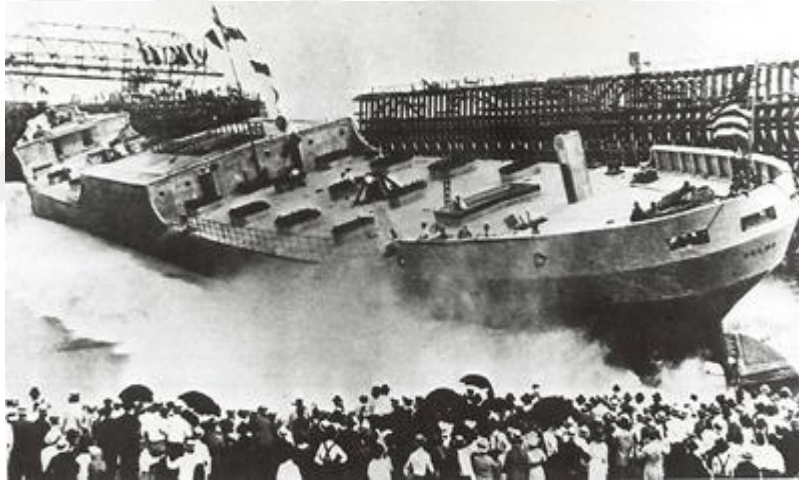
Şekil 2.2. Hafif beton kullanılarak inşa edilen Park Plaza oteli

Japonya'da hafif agregalı betonlar yaklaşık 40-45 yıldır yoğun bir biçimde kullanılmaktadır. Benzer şekilde Avustralya'da da yaklaşık 30 yıldır hafif agregalı betonlar tercih edilmektedir. Doğal olarak hafif agrega türü tercihi ilgili yörede mevcut doğal agrega türü ile ilişkilidir. İngiltere'de tuğla ve klinker üretimi, bunun yanı sıra yüksek fırın cürufu gibi işlenmiş alt ürün ve işlenmiş agrega gibi diğer alanlarda kullanımı mevcuttur. Günümüze kadar hem atık ürün alanında hem de işlenmiş agrega alanındaki üretim çeşitlenmiş ve bu kapsamda üretilen agregalar daha yaygın kullanılır hale gelmiştir. Bu tür malzemelerin hafif beton üretiminde kullanımı işlenmiş endüstriyel atıkların bertaraf sorununu ortadan kaldırmış ve sonuç olarak doğal agregalara olan gereksinimi azaltmıştır (Clarke, 2010).

Geleneksel betona kıyasla tasarımında ve uygulamadaki zorluğu gibi yanlış öngörüler hafif beton üretiminin uygulamada sınırlı kalmasının en önemli nedenlerini oluşturmaktadır. Ancak 1991 yılında Amerikan Beton Derneği'nin Hafif Beton

Komitesi'nce bu yanlış öngörülerin giderilmesi noktasında önemli adımlar atılmıştır. Bu bağlamda dernek “Tasarım Mühendisinin Dikkat Etmesi Gerekenler” adlı bir çalışma yayınlamıştır. Bu çalışma ileride Hafif Betona Giriş kitabının ve 1980 yılında Beton Bilgilendirme Dokümanı olarak yayımlanan “Yapısal Beton Olarak Hafif Agregalı Beton” başlıklı bir raporun devamı niteliğindedir (Clarke, 2010).

Hafif beton zati yükte sağlamış olduğu azalma ve ekonomi sayesinde ve bunun yanı sıra gelişen teknoloji ile birlikte yüksek katlı yapı inşasına olanak sağlamaktadır. Özellikle II. Dünya savaşı sonrası hafif beton ile üretilen yapı stoğunda önemli artışlar yaşanmıştır. Hafif betonun kullanılmasıyla sağlanan yenikliklerin artmasıyla birlikte çok katlı yapıların yanı sıra deniz yapılarında da kullanım alanları oluşmuştur. Buna örnek olarak Amerika Birleşik Devletlerinde geliştirilmiş şeyl agregası kullanılarak üretilen ve Şekil 2.3’de verilen Selma adlı gemi verilebilir (URL-3, 2020).



Şekil 2.3. 1919 yılında yapılan Selma adlı gemi

Yapımında hafif beton kullanılan ve 1939 yılında Francisco’da hizmete giren Oakland Körfez köprüsü Şekil 2.4’de verilmektedir. Bu köprü yapımında hafif beton kullanmak suretiyle eleman kesitlerinde azalmalar sağlanmış ve bu şekilde maliyet açısından önemli tasarruf sağlanmıştır (URL-4, 2020).



Şekil 2.4. Oakland Körfez Köprüsü, San Francisco

1998 yılında Norveç'te inşa edilen Stolmen Köprüsü Şekil 2.5'de görülmektedir. Köprü'nün ana açıklığı 301 m ve toplam uzunluğu 467 m olup bu özelliği ile serbest konsollu beton köprüler açısından dünyada ilktir. Ana açıklığın ortasındaki 184 m'lik kısım LC60 sınıf yüksek mukavemetli hafif betondan inşa edilmiştir. Köprü yapımında 1600 m³ hafif beton kullanılmıştır. 28 günlük ortalama küp basınç dayanımı 70,4 MPa olup 28 gün suda kür gören numunelerin ortalama yoğunluğu 1940 kg/m³ mertebesindedir (URL-5, 2020).



Şekil 2.5. Stolmen Köprüsü, Norveç

Hafif agregalı betonun açık deniz yapılarında kullanımı 1995 yılında başlamıştır. Dünyada ilk beton gövdeli, çekme kazıklı Heidrun Tension Leg isimli platform Şekil

2.6’da görülmektedir. Platform kabloları 345 m derinlikte zemine ankre edilmiş olup yapımında 67500 m³ hafif beton kullanılmıştır (URL-6, 2020).



Şekil 2.6. Heidrun Tension Leg Platformu

2.2. Hafif Beton Üretiminde Kullanılan Agregalar

Hafif agregalar, TS EN 13055 standardında çimento, su ve gerektiği zaman katkı maddeleri ile birlikte hafif beton imalatında kullanılan inorganik malzemelerdir. Bunlar gevşek birim ağırlığı en fazla 1200 kg/m³ olan ve tane yoğunluğu 2000 kg/m³’ü aşmayan ve genellikle kırılmış ya da kırılmamış olarak kullanılabilir (BSI 92/17688, 1992) (TS EN 13055, 2016). İlgili şartnamede hafif ince agregalar için maksimum gevşek birim hacim ağırlığı 1120 kg/m³ olarak verilirken iri agregalar için ise bu değer 880 kg/m³ olarak verilmektedir (ASTM C330, 2017).

Hafif agregalar, doğadan doğal yolla ya da endüstriyel doğal veya atık malzemelerin ısıtılma tabii tutulmasıyla elde edilirler. Doğal kaynaklı hafif agregaların esasını volkanik orijinli kayalar oluşturmaktadır. Yapay agregalar elde edildikleri hammadde ve genişlemeyi sağlayan üretim yöntemi yoluyla elde edilmektedir. Taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılan şist, arduvaz ve kil gibi yapay hafif agregalar döner fırında genişletilerek elde edilirler (Chandra ve Berntsson, 2002).

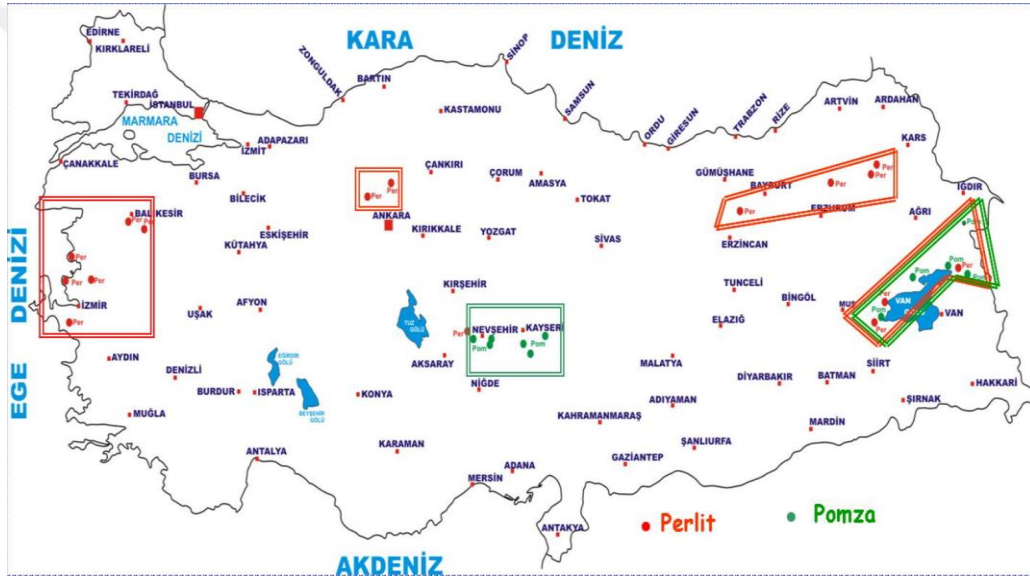
2.2.1. Doğal Hafif Agregalar

Doğal agregalar genellikle volkanik kökenli oldukları için yalnızca belli bölgelerde bulunmaktadır. Doğal agregalar kullanılırken kırma, eleme ve öğütme işlemleri dışında başka herhangi bir işleme tabi tutulmamaktadır. Pomza ve perlit agregası bilinen en eski doğal hafif agregaların başında gelmektedir. Bu agregalar hafif olması ve belirli bir dayanımı sağlaması koşuluyla hafif beton üretimlerinde kullanılmaktadır. Hafif agregaların fiziksel, mekanik, kimyasal özellikleri temin edildikleri bölgelere göre değişkenlik göstermektedir (Neville, 1994; Uygunoğlu 2008).

Yapı malzemesi olarak kullanılan en eski malzemelerden biri pomzadır. Pomza ismi İtalyanca kökenlidir. Türkçe’de ise süngertaşı, köpük taşı, hışırtaşı, nasırtaşı olarak bilinmektedir. Pomza doğal olarak farklı sektörlerde kullanılması yanı sıra kırma, eleme ve öğütme süreci sonrası beton üretimde kullanılabilecek hale getirilerek pomza agregası olarak da kullanılmaktadır. Pomza agregası endüstride yeni olmamasına rağmen ülkemizde kullanımı son 20-25 yılda önem kazanmıştır. Pomza agregası Antik Yunan ve Roma dönemlerinde amfi tiyatrolar, tapınaklar, su kemerleri, hamamlar, mahzenler ve konut inşasında yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Pomza, boşluklu, süngerimsi fiziksel ve kimyasal etkenlere karşı dayanıklı, gözenekli ve camsı özellikli volkanik bir kayaç olup gözenekler genellikle birbirleriyle bağlantılı değildir. Oluşumu esnasında ani soğumaya bağlı olarak içindeki gazların ani olarak bünyeyi terk etmesi sonucu bünyesinde makro ölçekten mikro ölçeğe kadar sayısız gözenek oluşmaktadır. Pomzanın geçirimsizliği düşük, ısı ve ses yalıtımı oldukça yüksektir (Gönen, 2009; URL-7, 2020).

Volkanik faaliyetler neticesinde asidik ve bazik olmak üzere iki tür pomza oluşur. Bazik pomzaya bazaltik pomza veya scoria da denilmektedir. Bazaltik pomza koyu veya kahverengimsi ya da siyahımsı renkte olabilmektedir. Yoğunluğu 1-2 gr/cm³ civarındadır. Asidik pomza ise yeryüzünde daha yaygın olarak bulunan türüdür. Beyaz veya kirli beyaz renkte olabilmektedir. Asidik karakterli pomzalarda silis oranı daha yüksek olup inşaat sektöründe yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Yoğunlukları 0.5-1 gr/cm³ arasındadır. Diğer taraftan bazik karakterli pomzalarda alüminyum, demir, kalsiyum ve magnezyum bileşenleri daha yüksek oranda bulunması nedeniyle tarım vb. gibi diğer endüstriyel alanlarda da kullanılmaktadır (URL-7, 2020).

Perlit silis kökenli volkanik bir camdır. Perlit ismi inci anlamına gelen “pearl” kelimesinden türetilmiştir. Zira perlit tanecikleri kırıldıkları zaman inci parlaklığında küçük taneler şeklinde elde edilmektedir. Perlit, ısı etkisiyle genleşebilen, genleştiğinde çok hafif ve gözenekli bir yapı kazanan bir kayadır. Perlit agregası ham perlit olarak ya da genleştirilerek kullanılmaktadır. Çeşitli perlit kayaları renk ve yapı itibariyle birbirinden farklılık gösterir. Ham perlitin rengi saydam açık griden parlak siyaha kadar değişebilmektedir. Perlit bünyesinde %2 ila %6 oranında su bulunmaktadır (URL-8, 2020) (Mehta ve Monteiro, 2006). Türkiye’de bulunan pomza ve perlit yataklarına ilişkin harita Şekil 2.7’de verilmektedir (URL-9, 2020).



Şekil 2.7. Türkiye’de mevcut pomza ve perlit yataklarına ilişkin harita

2.2.2. Yapay Hafif Agregalar

Yapay hafif agregalar genellikle ısıtma işleminden geçerler. Bazı hallerde sinterleşme, gaz veya köpük yardımıyla gözenekleştirilerek kırılmış veya kırılmamış agregalar halinde bulunurlar. Genleştirilmiş perlit, genleştirilmiş kil, genleştirilmiş şist yapay hafif agregalara tipik örneklerdir. Bunun yanı sıra termik santral külleri de bu sınıfta yer almaktadır.

Yüksek fırın cürufu, demir-çelik tesislerinin yüksek fırınlarında demir üretimi esnasında açığa çıkan yan üründür. Cüruf 1400-1500°C’de ergimiş durumda bir yüzey dokuya sahip, gözenekli, bal peteği görünümünde ve gri renge sahip hafif bir agrega haline

dönüşmektedir. Termik santrallerde elektrik üretiminde pulverize kömür kullanılmaktadır. Pulverize yakıt külü, pulverize kömürün yakılması sonucu elde edilen atık kısımdır. Pulverize yakıt tozu su ile birlikte pelletleme işlemi görür. Pelletleme işleminden sonra 1200-1300°C’de yatay ızgaralar içinde yakılır. Daha sonra öğütüldükten sonra elenerek farklı tane boyutlarında depolanır ve bu şekilde hafif agrega olarak kullanılır (Mercan, 2007) (Şapçı, 2008).

2.3. Hafif Betonun Avantaj ve Dezavantajları

Beton teknolojisinde sağlanan ilerlemeye paralel olarak kullanımı yaygınlaşan hafif betonun bazı avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Hafif Betonun Avantajları:

- Geleneksel betona kıyasla birim hacim ağırlıkları daha düşük olması nedeniyle hafif betonla üretilen yapı elemanlarının zati yükü azalmaktadır. Bu nedenle yapı elemanlarının kesitlerinin küçülmesi nedeniyle malzeme tasarrufu sağlayarak ekonomi yapılabilir.
- Yapının zati yükünde sağlanan azalmaya paralel olarak deprem kuvvetleri de azalmakta ve depremin yapı üzerindeki yıkıcı etkisi zayıflamaktadır.
- Isı iletkenlik katsayısının düşük olması dolayısıyla ısı ve ses yalıtımı sağlanmak mümkündür.
- Yangına karşı dayanıklılık artmaktadır.
- Hafiflikleri nedeniyle taşınması, yerleştirilmesi kolay olup yerleştirme esnasında kalıba uyguladıkları basınç daha düşüktür.
- Üretimlerinde atık ürünler kullanıldığında hafif betonlar çevresel açıdan da yarar sağlamaktadır.

Hafif Betonun Dezavantajları:

- Boşluklu bir yapıya sahip oldukları için aşınmaya karşı dayanıksızdırlar.

- Geleneksel betonun aksine hafif agregâ ara yüzey ve çimento hamuru ile karşılaştırıldığında en zayıf halka durumundadır. Bundan dolayı dayanım olumsuz etkilenmektedir.
- Elastisite modülleri düşüktür.
- Geleneksel betona kıyasla daha fazla çimento gerekmektedir. Bu nedenle yüksek miktarda hidrasyon ısı açığa çıkar. Bunun yanı sıra fazla çimento kullanımı maliyetin artmasına neden olmaktadır.
- Hafif agregalar belli bölgelerde mevcuttur. Rezervin yetersiz olduğu bölgelerde hafif beton üretimi ekstra maliyet gerektirir.
- Betonda ayrışma riski daha yüksektir.
- Betonda sünme ve rötre daha yüksektir.
- Üretimlerde karışım suyu miktarı ve kıvam daha sıkı kontrol gerektirir ve aynı zamanda yerleştirme işleminde nitelikli işçilik kaçınılmazdır.

2.4. Hafif Betonların Üretimi ve Sınıflandırılması

Üretim yöntemine göre hafif betonlar kendi aralarında sınıflandırılmaktadır (Neville ve Brooks, 2010). Bağlayıcı hamurun genişletilmesiyle oluşturulan ve gözenekli beton olarak da bilinen köpük ve gaz beton gibi hafif betonlar üretilebilmektedir. Bunun yanı sıra karışımında yalnızca normal ağırlıklı iri agregâ kullanılarak (ince agregasız beton) da hafif beton üretilebilmektedir. Yine normal ağırlıklı agregâ yerine hafif agregâ kullanılarak da hafif agregalı beton üretilebilir.

Üretimlerde yalnızca iri agregâ kullanarak (8-20 mm) üretilen ve üniform boşluklara sahip olmayan betonlara ince agregasız beton denilmektedir. İnce agregasız beton, düşük çimento içeriğine sahip olup fazla miktarda boşluk içermektedir. Bu nedenle ince agregasız betonların birim hacim ağırlıkları, dayanımları ve ısı iletkenlik katsayıları düşüktür. Dayanımları düşük olduğu için taşıyıcı olmayan yapı elemanları (duvarlar, çerçeve yapılarda dolgu panelleri) üretiminde kullanılmaktadır. Gözenekli ve iri taneli yapısı nedeniyle ince agregasız betonda kapiler su hareketi sınırlı düzeyde kalmaktadır.

Vibrasyon çimento hamuru ile iri agregâ tanelerinin ayrışmasına neden olduğundan ince agregasız betonlara vibrasyon uygulanmamaktadır. Taze haldeki ince agregasız

betonun kohezyonu düşüktür. Yeterli dayanıma ulaşınca kadar kalıbın sökülmemesi önerilmektedir (Baradan vd., 2012).

Hafif beton normal ağırlıklı agregaya yerine boşluk yüzdesi yüksek doğal veya yapay hafif agregaya kullanılarak da üretilir. Bu durumda pomza, diatomit, volkanik cüruf, tuf, vermikülit, perlit gibi agregalar yaygın olarak kullanılmaktadır.

Hafif betonların basınç dayanımlarına göre TS EN 206’da yapılan sınıflandırma Tablo 2.1’de verilmektedir. Sınıflandırma, standart kür gören çapı 150 mm ve yüksekliği 300 mm silindir numuneler veya 150 mm küp numuneler üzerinde 28 gün sonunda ölçülen dayanımlar dikkate alınarak yapılmaktadır (TS EN 206, 2017).

Tablo 2.1. Hafif betonların basınç dayanımlarına göre sınıflandırması

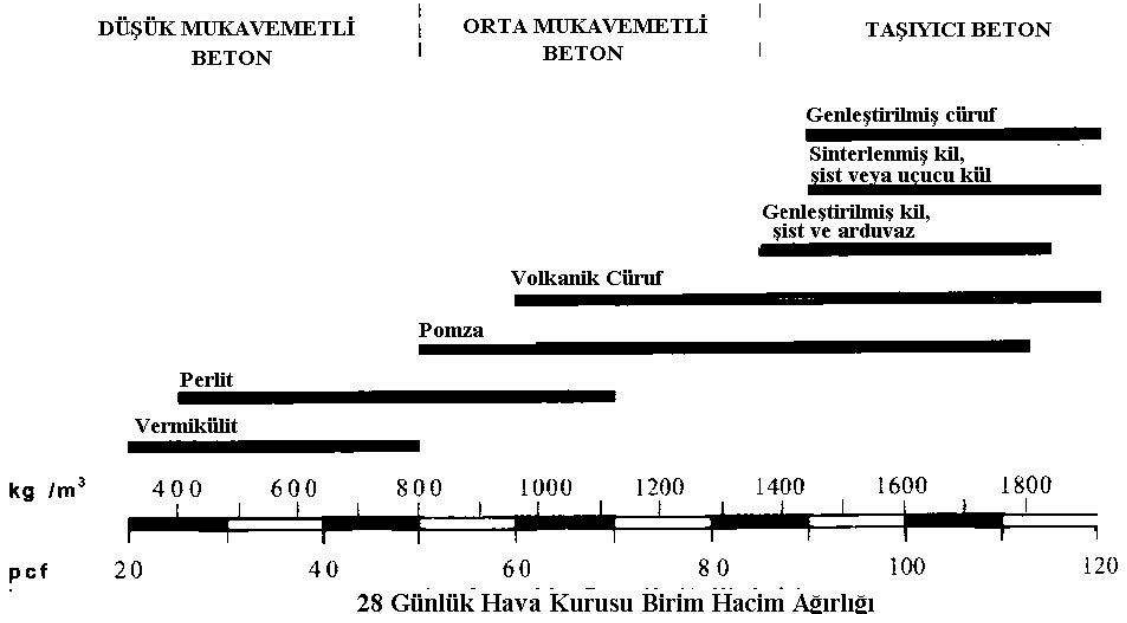
Basınç Dayanımı Sınıfı	En düşük karakteristik silindir dayanımı ($f_{ck,sil}$) (N/mm ²)	En düşük karakteristik küp dayanımı ($f_{ck,küp}$) (N/mm ²)
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

Hafif betonların birim hacim ağırlıklarına göre TS EN 206’da yapılan sınıflandırma Tablo 2.2’de verilmektedir.

Tablo 2.2. Hafif betonların yoğunluklarına göre sınıflandırması

Yoğunluk Sınıfı	D 1.0	D 1.2	D 1.4	D 1.6	D 1.8	D 2.0
Yoğunluk (kg/m ³)	≥800 ve ≤ 1000	≥1000 ve ≤ 1200	≥1200 ve ≤ 1400	≥1400 ve ≤ 1600	≥1600 ve ≤ 1800	≥1800 ve ≤ 2000

ACI Komitesi ilgili raporda hafif betonlar, kullanılan agrega birim hacim ağırlığına göre düşük mukavemetli, orta mukavemetli, taşıyıcı beton olarak üç ayrı grupta toplanmaktadır. Şekil 2.8’de hafif beton için yapılan sınıflandırmanın yanı sıra her bir sınıfın 28 günlük havada kuru birim hacim ağırlıkları yaklaşık olarak verilmektedir. Sınıflandırmada verilen sınırların kesin sınırlar olarak kabul edilmemesi gerektiği vurgulanmaktadır (ACI 213R-87, 1999).



Şekil 2.8. Hafif betonların birim hacim ağırlıklarına göre sınıflandırılması

Düşük dayanımlı betonlar genellikle yalıtım amaçlı kullanılmaktadır. Bu betonların hava kuru maksimum birim hacim ağırlıkları 800 kg/m^3 mertebesinde olup nadiren bu değeri aşarlar.

Orta mukavemetli betonların kullanımı makul derecede basınç dayanımı gerektirir ve bu nedenle taşıyıcı ve düşük dayanımlı betonların arasına düşmektedir. Bu aralıktaki betonlar bazen dolgu betonları olarak da adlandırılır. Bu tip betonların yalıtım özellikleri de orta düzeydedir.

Taşıyıcı hafif betonlar, kil, şeyl cüruf, pomza ve scoria gibi dayanımları nispeten daha yüksek olan hafif agregalarla üretilir. İlgili raporda taşıyıcı hafif beton, 28 günlük minimum basınç dayanımı 17.24 MPa, yoğunluğu $1120\text{-}1960 \text{ kg/m}^3$ arasında değişen, tamamı hafif agrega veya normal agrega yerine belli oranlarda hafif agrega kullanarak üretilen beton olarak tanımlanmaktadır (ACI 213R-87, 1999).

2.4.1. Taşıyıcı Hafif Beton

Taşıyıcı hafif beton üretimi 20. yüzyılda yapay agregaların üretimi ile başlamıştır. Akabinde beton teknolojisinde yaşanan gelişmeleri takiben taşıyıcı hafif beton üretiminde yapay agregaların yanı sıra doğal hafif agregalar ve kimyasal katkıları da kullanılmaya başlanmıştır.

Günümüzde taşıyıcı hafif beton çok katlı bina çerçeveleri ve döşemeleri, perde duvarları, kabuk çatılar, katlanmış plakalar, köprü tabliyeleri ve kirişler, her türden öngerilmeli veya prekast elemanlar ve deniz yapıları dâhil olmak üzere birçok uygulamada kullanılmaktadır (ACI 213R-14, 2014).

Betonarme yapılarda zati ağırlıkta %25'e varan oranlarda sağladığı azalma nedeniyle taşıyıcı hafif beton kullanımında belirgin artış görülmektedir. Zati ağırlıkta sağlanan azalma sayesinde taşıyıcı eleman kesitleri küçülmekte ve bu sonuçta maliyet önemli mertebede düşmektedir (İlgün, 1992). Taşıyıcı hafif betonun yapıda ilk kullanımı döşemelerde olmuştur. Döşemeler hacimsel olarak yapının önemli bir kısmını oluşturduğu için yapının zati yükünde ciddi bir azalma oluşmaktadır. Zati yükte meydana gelen azalmaya paralel olarak depremin şiddetinde de azalma söz konusudur. Taşıyıcı hafif beton kullanmak suretiyle belirli kalınlıkta ve yeterli yalıtım özelliğine sahip panel eleman üretimi mümkündür.

Taşıyıcı hafif betonlar için farklı standartlarda yapılan tanımlar Tablo 2.3'de verilmektedir.

Tablo 2.3. Taşıyıcı hafif betonlar için yapılan tanımlar

İlgili standart	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Minimum Basınç Dayanımı (MPa)
ACI 213R-87	1440-1920 (hava kurusu)	17.2
ACI 213R-14	-	21
TS 2511	1400-2000	Yapıların taşıyıcı kısımlarında kullanılmaya yeterli dayanıma sahip olan hafif beton

Taşıyıcı hafif betonun birim hacim ağırlığı, düşük yoğunluklu betona kıyasla büyük olduğu için yalıtım verimi daha düşük olduğu ifade edilmektedir. Bununla birlikte, taşıyıcı

hafif betonun ısı iletkenliğinin normal ağırlıklı betondan önemli ölçüde düşük olduğu belirtilmektedir (ACI 213R-87, 1999).

2.5. Taşıyıcı Hafif Betonların Mühendislik Özellikleri

2.5.1. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik taze betonun en önemli özelliğidir. Yeterli işlenebilirlik sağlanmadan geleneksel betonda olduğu gibi hafif betonun sertleşmiş özelliklerinin tatmin edici olmasını beklemek fazla iyimserlik olur. Hafif betonun reolojik davranışı geleneksel betonunkinden oldukça farklıdır. Aynı çökme değerine sahip geleneksel betonla karşılaştırıldığında hafif betonun işlenebilirliğinin daha iyi olduğu görülür (Neville, 1994).

Yüksek çökmeli hafif beton üretiminde iri hafif agregalar hamur içerisinde yüzdüklerinden dolayı ayrışma eğilimi sorun olmaya başlar. Tasarlanacak ve üretilecek olan yüksek çökmeli hafif beton için bu husus dikkate alınmalıdır. Böylesi durumlarda hava sürükleyici kimyasal katkı kullanmak suretiyle ayrışma sorununun giderilebileceği ifade edilmektedir. Bunun yanı sıra özellikle vibrasyon da ayrışmaya neden olabilmektedir (Kocaman, 2000).

2.5.2. Birim Hacim Ağırlık

Hafif betonun birim hacim ağırlığı beton üretiminde kullanılan malzemelerin özelliklerine ve karışım oranlarına bağlı olarak değişmektedir. Birim hacim ağırlığa etkiyen en önemli faktör üretimde kullanılan hafif agreganın yoğunluğudur. Bunun yanı sıra çimento miktarı, agrega granülometrisi, agreganın nem oranı, su/çimento veya su/bağlayıcı oranı, mineral ve kimyasal katkıların fiziksel özellikleri etkiyen diğer faktörlerdir (Uygunoğlu, 2008).

2.5.3. Su Emme

Hafif betonun su emmesi, karışım da kullanılan hafif agreganın su emme kapasitesi ve su/çimento oranına bağlı olarak değişmektedir. Betonun nem muhtevası betonun

fiziksel, mekanik ve ısı özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle betonun nem muhtevasının su emme değerinden yüksek olması istenmez.

Hafif betonda kullanılan agreganın boşluk yapısı su emme oranını oldukça etkilemektedir. Bu oran agregadaki boşluk hacmine, boşlukların dağılımına ve boşlukların birbiriyle bağlantılı olup olmadığına bağlı olarak değişmektedir. Aynı agrega oranına sahip diatomit agregası ile üretilen hafif betonların su emmesinin pomza agregası ile üretilenlere kıyasla yüksek olmasının sebebi agregaların gözenekli yapısı dolayısıyladır. Bunun yanı sıra kullanılan agreganın fiziksel özellikleri de su emme üzerinde oldukça etkilidir (Topçu ve Uygunoğlu, 2007).

2.5.4. Dayanım

Hafif betonun basınç dayanımı geleneksel betonda olduğu gibi çimento miktarı, su/çimento oranı, granülometrik bileşim, hava miktarı, kür şekli ve süresi gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Hafif ve geleneksel beton arasındaki fark hafif betondaki çimento hamuru ile hafif agrega arasındaki etkileşimden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle agrega türü ile ilgili etkinin iyi irdelenmesi gerekmektedir (Eser, 2014).

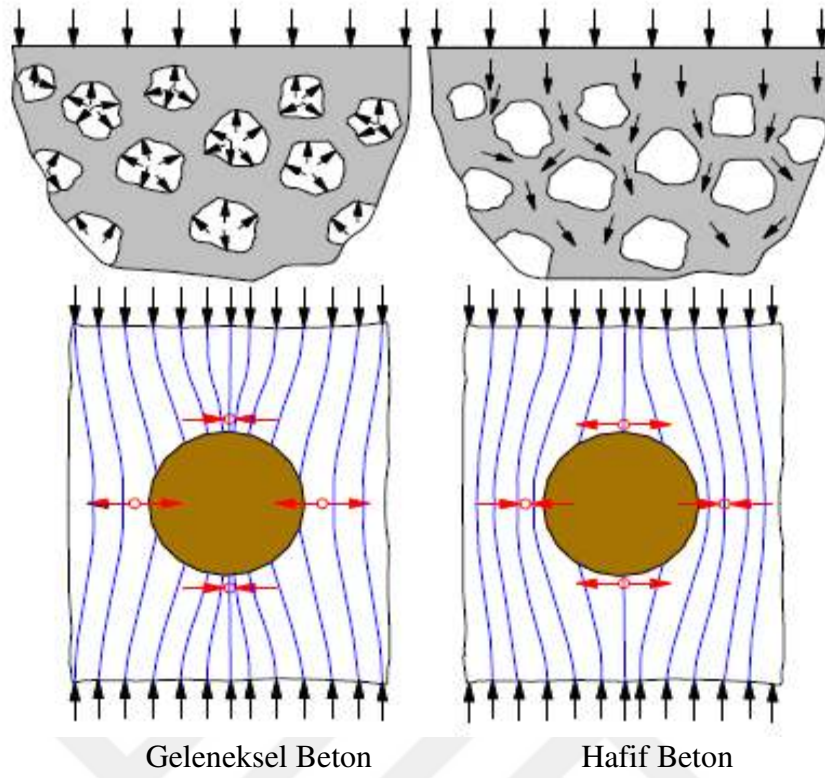
Belli bir dayanım ve kıvam için çimento ve su miktarının sertleşmiş betonun dayanımı üzerinde önemli etkisi vardır. Hafif betondaki karışım oranları su/çimento oranından ziyade belli bir çökme için kullanılan çimento miktarı ile ifade edilir. Bunun yanı sıra betondaki çimento miktarını kullanılan agreganın dayanımı ve agrega taneleri arasındaki boşluk miktarı önemli ölçüde etkilemektedir (Sönemzoğlu, 2005). Karışımında yalnızca suyu artırmak çökmenin ve aynı zamanda efektif su/çimento oranının artması anlamına gelir. Günümüzde yapısal uygulamalar için üretilen belli basınç dayanımına sahip betonlar makul çimento miktarı ve hafif agrega kullanılarak elde edilebilir. Hava sürükleyici katkıları bu amaç için avantajlı görülebilir.

Tablo 2.4'de çökmesi 75-100 mm ve %5-7 hava içeriğine sahip hafif betonlar için basınç dayanımı-çimento ilişkisi verilmektedir (ACI213R-87, 1999). İlgili raporda verilen ilişkinin bir öneri niteliğinde olduğu ve özel durumlar için danışmanlık alınması gerektiği belirtilmektedir.

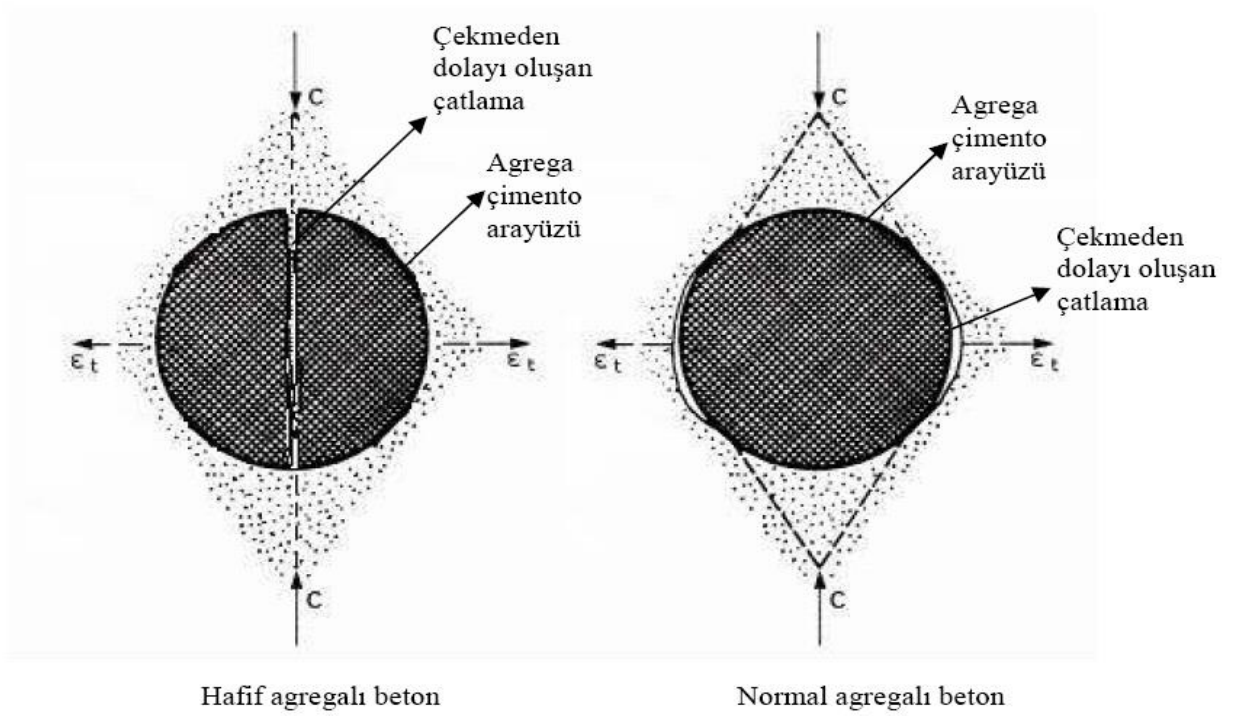
Tablo 2.4. Hafif betonlar için basınç dayanımı-çimento miktarı arasındaki ilişki

Basınç dayanımı (28 gün) (MPa)	Çimento miktarı (kg/m ³)	
	Hepsi ince agregalı	Kuru ince agregalı
17.24	237-303	237-303
20.68	261-332	249-332
27.58	314-392	291-392
34.47	374-445	356-445
41.37	439-498	415-498

Agrega, geleneksel betonun hacminin yaklaşık %70-80'nini oluşturmaktadır. Bu nedenle betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi son derece önemlidir. Aynı karışım oranlarında hafif agregalar kullanılarak üretilen hafif betonun dayanımı geleneksel betonun basınç dayanımına kıyasla daha düşüktür. Bu doğrudan kullanılan agreganın dayanımı ile ilişkilidir. Çünkü betonun dayanımını betonun en zayıf bileşeni belirler (Cui vd. 2012). Hafif betonda agreganın dayanımı harç dayanımından düşük olduğundan kuvvet etkisinde kırılma agregası-çimento ara yüzeyinde başlar. Kırılma, betona uygulanan kuvvete paralel düz çizgiler halinde belirginleşir. Şekil 2.9'da kuvvet etkisinde hafif ve geleneksel betondaki gerilme dağılımları verilmektedir. Geleneksel betonda agregası dayanımı harç ve ara yüzey dayanımından yüksek olduğu için kırılma en zayıf halka olan ara yüzeyde başlar. Geleneksel betonda yük altında oluşan gerilmeler köşe noktalardan iç kısımlara doğrudur. Şekil 2.10'da hafif ve normal agregalı betonda meydana gelen çatlak dağılımları verilmektedir (Gerritse, 1981) (Uygunoğlu, 2008).



Şekil 2.9. Hafif ve geleneksel betonda gerilme dağılımları (Gerritse,1981)



Şekil 2.10. Hafif ve geleneksel betonda çatlamanın şematik gösterimi

Hafif betonun dayanımı üretilen hafif betonun birim hacim ağırlığı ile doğrudan ilişkilidir. Kullanılan hafif agreganın birim hacim ağırlığı arttıkça betonun dayanımı artar.

2.5.5. Elastisite Modülü ve Poisson Oranı

Yük etkisinde malzeme şekil değiştirmeye zorlanır. Uygulanan yük kaldırıldığında meydana gelen şekil değiştirmelerin tamamı geri gelebildiği gibi kalıcı şekil değiştirmeler de meydana gelebilmektedir. Yük kaldırıldığında cisim orijinal boyutlarına dönüyorsa davranış elastik, şekil değiştirmelerin tamamı kalıcı ise davranış plastiktir. Düşük gerilme düzeyinde şekil değiştirmeler genellikle elastik olup Hooke Yasası, $\sigma = E \times \epsilon$, geçerlidir. Burada E, elastisite modülü olup kuvvet altında şekil değiştirmenin göstergesi olarak değerlendirilir.

Betonun elastisite modülü, betonun yapısında mevcut agrega ve çimento fazlarının miktarına ve bunların elastisite modüllerine bağlıdır. Betonun dayanımı azaldıkça gerilme-şekil değiştirme eğrisindeki doğrusal bölgenin değişim aralığı da azalır. Hafif betonun dayanımı arttıkça aynı gerilme altında şekil değiştirme yeteneği azalır. Kırmataş, kum gibi agregalarla kıyaslandığında hafif agregalar daha kırılğan yapıda olduğundan daha düşük basınç dayanımına sahiptirler. Böylece aynı gerilme altında hafif betonların şekil değiştirme yetenekleri normal betonlara göre daha yüksek olmaktadır. Bundan dolayı hafif betonun elastisite modülü geleneksel betonunkine kıyasla daha düşüktür (Haque vd. 2004).

Hafif betonun elastisite modülü aynı dayanımdaki geleneksel betonunkine kıyasla %50-75 mertebesinde daha düşüktür. İlgili standartlar elastisite modülü hesabını basınç dayanımı ve birim hacim ağırlık cinsinden veren formüller önermektedir. Fakat agrega tipi, nem muhtevası vb. faktörlerden dolayı %25'e varan oranda sapmaların olabileceği ifade edilmektedir (Holm ve Bremmer, 2000) (ACI 213R-14, 2014).

Hafif betonun rezonans frekans yöntemiyle belirlenen Poisson oranının betonun yaşı, dayanımı ve kullanılan agrega türü ile çok az farklılık gösterdiği ve değerinin 0.16 ile 0.25 arasında değiştiği belirtilmektedir. Poisson oranı hesaplarda genellikle 0.20 olarak kabul edilmektedir (Reichard, 1964) (ACI213R-14, 2014).

2.5.6. Sünme ve Rötire

Hafif betonda sünme geleneksel betona kıyasla daha büyüktür. Bunun nedeni çimento miktarının fazla olması ve hafif agreganın normal agregaya göre daha yumuşak olmasıdır. Hafif betonun sünmesi geleneksel betonunkinin yaklaşık 1.15 katı kadardır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deney sonuçlarına kıyasla gerçek yapıda meydana gelen sünme daha düşük düzeyde gerçekleşmektedir. Kür rejimi, eleman kesit boyutları, mesnetleme koşulları, gerilme düzeyi, donatı miktarı, yapı elemanının biçimi vb. etkenler bu farklılığın meydana gelmesinde etkili olmaktadır (Clarke, 2010).

İnce taneli hafif agrega ile üretilen hafif betonun rötresi geleneksel betonunkinden yaklaşık 1.5 kat daha yüksektir. Hafif beton üretiminde ince taneli hafif agrega yerine doğal agrega kullanılması halinde betonun rötresi geleneksel betonun rötresi ile yakın değerler almaktadır. Taze beton katılırken doğal ortamda sünme ve rötire birlikte gerçekleşir. Hafif agrega gözeneklerinde mevcut su kuruma sonucu betonun ihtiyaç duyduğu suyu karşılar. Kuruma sonucu oluşan rötire gerilmeleri sünme etkisiyle azalır ve bunun sonucunda betonda çekme şekil değiştirme kapasitesi artar.

Yerinde yapıda meydana gelen rötire miktarı, laboratuvar da deneysel olarak elde edilenle karşılaştırıldığında sünmede olduğu gibi daha iyimser sonuçlar elde edilmektedir. Yapılan başka bir çalışmada kür rejiminin hafif betonun rötresi üzerinde önemli bir etkisinin olduğu belirtilmektedir. Üretimi takiben 1 gün buhar kür ve 6 gün nem ortamında bekletilen numunelerin standart 7 gün nem ortamında kür gören numunelere kıyasla yaklaşık %20 daha az rötire gösterdiği rapor edilmektedir (Holm ve Bremmer, 2000).

2.5.7. Isıl Özellikler

Isı iletkenlik, özgül ısı, ısı yayılımı ve birim hacim ağırlık yapının önemli termofiziksel özelliklerindendir (Yunsheng ve Chung, 2000). Hafif betonun ısı özellikleri agrega tipi, agreganın karışımındaki oranı ve nem içeriğine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Isı iletkenlik yapıdan ziyade malzemeye özgü bir değerdir. Yapı malzemelerinin ısı iletkenlikleri malzeme bünyesindeki boşlukların geometrisine, büyüklüğüne, dağılışına, boşlukların birbirleriyle köprülenmiş olup olmadığına, malzemenin nem içeriğine ve birim hacim ağırlığına bağlı olarak farklılık gösterir (ACI213R-14, 2014) (Kocaman, 2000).

Hafif agregalı boşluklarındaki su nedeniyle hafif agregalı geleneksel agregaya kıyasla daha yüksek özgül ısıya sahiptir. Bünyesinde mevcut boşluk miktarı fazla olduğundan doğal agregaya kıyasla hafif agregada ısı geçişi daha yavaş gerçekleşir. Bu durum hafif agreganın normal agregaya kıyasla ısı iletkenliğinin düşük olmasına neden olmaktadır. Taşıyıcı hafif betonun ısı iletkenliği geleneksel betonun ısı iletkenliğinin yaklaşık %50'si mertebesinde dir. Bundan dolayıdır ki binalarda hafif betonun yalıtım özelliğinden sıkça yararlanılmaktadır (Mehta ve Monteiro, 2006).

Termal yayını m yerel sıcaklık değişiminine bağılı olup malzeme boyunca ısı değişiminin nasıl yayıldığını göstermektedir. Hafif betonun termal yayını mı betonun ısı iletkenliği, birim hacim ağırlığı ve özgül ısısına bağılı olarak değişmektedir. Hafif betonun geleneksel betona kıyasla birim hacim ağırlığı ve ısı iletkenliği daha düşük ve aynı zamanda özgül ısısı daha yüksek olduğundan termal yayını mı geleneksel betona kıyasla daha düşüktür. Bu bağlamda hafif betonda yerel sıcaklık değişimi geleneksel betona kıyasla daha yavaş gerçekleşmektedir (ACI213R-14, 2014).

Bazı araştırmacılar tarafından agreganın mineralojik yapısının ısı iletkenlik üzerinde etkili olduğu ve buna ek olarak betonun birim hacim ağırlığı, agreganın cinsi ve betonun nem içeriği de etkileyen diğ er faktörler olarak değ erlendirildiğ i ifade edilmektedir.

Tablo 2.5'de, birim hacim ağırlığ a bağılı olarak geleneksel ve hafif agregalı betonların ısı iletkenliklerinin değ işimi verilmektedir. Isı iletkenliğ in birim hacim ağırlıktan önemli derecede etkilendiğ i ve tasarım aşamasında belirli bir değ erin seçilmesinin oldukça güç olabileceğ i vurgulanmaktadır (Cavalline vd. 2017).

Tablo 2.5. Geleneksel ve hafif betona ilişkin termal özellikler

Malzeme	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Isıl Kapasite (J/kgK)
Normal Ağırlıklı Beton (Geleneksel Beton)	2400	1.4-2.9	-
	2240	1.3-2.6	800-1000
	2080	1.0-1.9	-
Hafif Agregalı Beton (Genleştirilmiş kil, şeyl, cüruf, pomza, scoria)	1920	0.9-1.3	840
	1600	0.68-0.89	-
	1280	0.48-0.59	
	960	0.30-0.36	

Isıl genleşme katsayısı agreganın genleşme karakteristiği ile beton karışımındaki hacimsel oranı ve betonun nem içeriğine bağlıdır. Hafif betonun ısı genleşme katsayısı geleneksel betonun ısı genleşme katsayısından küçüktür. Kullanılan agregaya tipine bağlı olarak hafif betonun ısı genleşme katsayısı 7×10^{-6} ila 11×10^{-6} mm/mm/°C arasında değişmektedir.

2.5.8. Yangın Dayanımı

Mineral kökenli agregaya kullanılarak üretilen betonların yangına karşı dayanıklılıkları organik kökenli agregaya ile üretilen betonlara kıyasla daha yüksektir. Bu kapsamda etkiyen faktörlerin kullanılan malzemenin ısı iletkenlik katsayısı ve ısı genleşme katsayısı olduğu belirtilmektedir (Urhan, 1993). Belirli bir yangın yükünde hafif betonun yangına direnme süresi normal betona kıyasla %20-30 oranında daha uzun olduğu ifade edilmektedir (Konuk, 2003).

Geleneksel betona kıyasla hafif beton yangına karşı daha dayanıklıdır. Bunun nedenleri şu şekilde özetlenebilir:

- Hafif betonun ısı iletkenliğinin geleneksel betona kıyasla daha düşük olması,
- Hafif betonun ısı genleşmesinin geleneksel betona kıyasla daha düşük olması,
- Hafif agreganın yangına karşı normal agregaya kıyasla daha stabil olması,
- Hafif betonun geleneksel betona kıyasla sahip olduğu üstün özellikleri sayesinde dah az yüzey dökülmelerinin meydana gelmesi

olarak verilebilir (ACI216-1-07, 2007) (Clarke, 2010).

2.5.9. Aşınma Dayanımı

Çimento hamuru/agrega arasındaki aderans dayanımı, agregaya sertliği ve tokluk betonun aşınma direncini belirleyen faktörlerdir. Taşıyıcı hafif agregaların çoğunun sertliği Mohs sertlik skalasında yaklaşık olarak kuvarsa (sertlik numarası 7) karşılık gelen katılmış camı yapı özelliğindedir. Hafif agreganın gözenekli yapısı nedeniyle dayanımı normal agregadan düşüktür. Harç fazı kalitesini ve betonun yüzeyini iyileştirmek suretiyle hafif betonun bu dezavantajı kısmen giderilebilir. Ağır trafik yüküne maruz köprü tabliyelerinde kullanılan taşıyıcı hafif beton ile geleneksel betonun karşılaştırıldığı bir

çalışmada hafif betonun tatmin edici bir performans gösterdiği rapor edilmektedir. Ancak çelik tekerlekli araçların kullanıldığı ortamlarda bazı önlemlerin alınmasının gerekliliği vurgulanmaktadır (Holm ve Bremner, 2000).

2.6. Binalarda Enerji Performansı

Endüstri, ulaşım, inşaat, tarım vb. sektörlerde yaşanan teknolojik gelişmeler ve nüfus artışı dünyadaki enerji tüketimini önemli ölçüde arttırmaktadır. Artan enerji ihtiyacı ve yaşam standartlarının yükselmesi, enerjinin verimli kullanılmaması, küresel ısınma, iklim değişiklikleri, ozon tabakasının incelenmesi gibi çeşitli hayati sorunların oluşmasına neden olmaktadır. Yaşanan çevre sorunları ve enerji tüketimi birçok ülkenin gündemine gelmiş ve bu kapsamda pekçok ülke bu konulara ilişkin çeşitli kanun, yönetmelik ve standartlar hazırlayarak uygulamaya koymuşlardır (Kalfa, 2014 ve Ustaoglu vd. 2020).

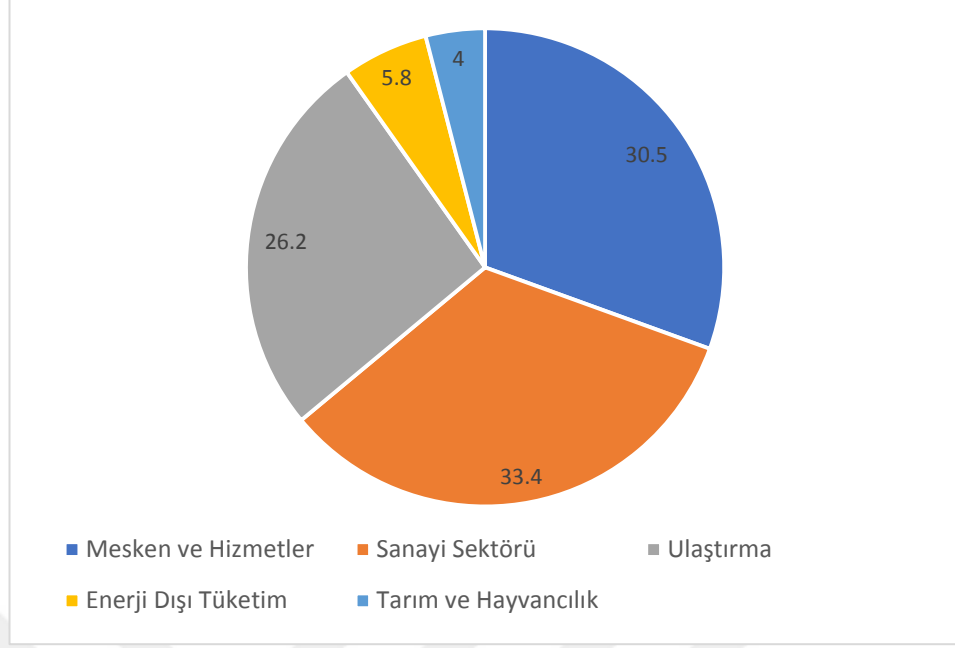
Binaların enerji performansını artırmak amacıyla Avrupa Birliği tarafından binaların enerji performansı direktifi ve enerji verimliliği direktifini içeren yasal bir çerçeve oluşturulmuştur. Bu kapsamda 2050 yılına kadar yüksek enerji verimli karbondan arındırılmış bina stoğuna sahip olmak, yatırım kararları ile istikrarlı bir ortam oluşturmak ve tüketicilerin, işletmelerin enerji ve ekonomik bakımdan tasarruf sağlaması için bilinçli seçimler yapması amaçlanmaktadır. İlgili yönetmeliklerdeki kuralların binalara uygulanmasıyla birlikte binalar 40 sene öncesine kıyasla yarısı kadar enerji tüketildiği rapor edilmektedir (EU Directive, 2010). Binalara ilişkin enerji performansı direktifi, Avrupa Birliği hükümetlerini binalardaki enerji performansını arttırmada ve mevcut binaların enerji verimliliği açısından durumunu iyileştirmede yardımcı olacak çeşitli politika ve düzenlemeleri kapsamaktadır. Bu kapsamda AB ülkeleri, yeni ve mevcut binalarda ısıtma ve soğutma sistemleri, çatılar ve duvarlar gibi bina elemanlarının değiştirilerek ve/veya iyileştirilerek en uygun maliyetli minimum enerji performansı ihtiyacının belirlenmesi gerektiği ifade edilmektedir. 31 Aralık 2018'den sonra tüm yeni kamu binalarının, 31 Aralık 2020'den sonraki tüm yeni binaların neredeyse sıfır enerji tüketen binalar olması gerektiği ifade edilmektedir. İlgili komisyonca neredeyse sıfır enerji tüketen binaları yüksek enerji performanslı olarak tanımlanmaktadır. Bu binaların ihtiyaç duyduğu düşük enerji miktarı da genellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından gelmektedir. AB ülkeleri binaların enerji verimliliğini ve performansını artırmak amacıyla ulusal mali önlemlerin listelenmesi gerektiği belirtilmektedir. Diğer bir düzenleme ise

binalar satılırken veya kiralanırken enerji performans sertifikasının gerekli olması kararının alınmış olmasıdır.

2007 yılında Türkiye’de enerji verimliliği ile ilgili kanunlar ve yönetmelikler çıkarılmış olup “Enerji Verimliliği Kanunu” kabul edilmiştir. Kabul edilen kanunun amacı, enerjinin verimli ve etkin bir şekilde kullanılması, enerji tüketimi konusunda yapılan israfların önlenmesi, enerji maliyet yükünün ekonomi üzerindeki yükünün azaltılması ve çevrenin korunması için enerji kaynaklarının ve üretilen enerjinin verimli kullanılmasıdır. Bu kanunla birlikte “Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği” çıkarılmıştır. Bu yönetmelikte de binalarda enerjinin verimli kullanılması, israfın ve çevresel sorunların önlenmesi ile ilgili düzenlemeler ele alınmaktadır. İlgili yönetmelikte mekanik tesisat, aydınlatma ve elektrik tesisatı gibi enerji tüketimini ilgilendiren konularda binanın enerji kimlik belgesinin hazırlanması ve bu belgenin hazırlanması ve hesaplanmasına ilişkin standart yöntemleri ve enerjinin verimli kullanılması konusunda farkındalığın artırılması hususlarını kapsamaktadır.

Son 10 yıl değerlendirildiğinde dünyada tüketilen toplam enerjinin yaklaşık %30 ila %40’ı bina sektörü tarafından tüketilmektedir (Schwarz ve Alers, 2009). Gelişmiş ülkelerde binalarda tüketilen ısıtma, havalandırma, klima sistemleri toplam binada tüketilen enerjinin yaklaşık %50’si mertebesinde olduğu belirtilmektedir (Peres-Lombard vd., 2008). Türkiye’de binalarda tüketilen enerji miktarı sürekli artmakta 2001 ila 2011 yılları arasında binalarda tüketilen enerji %48 oranında artmıştır.

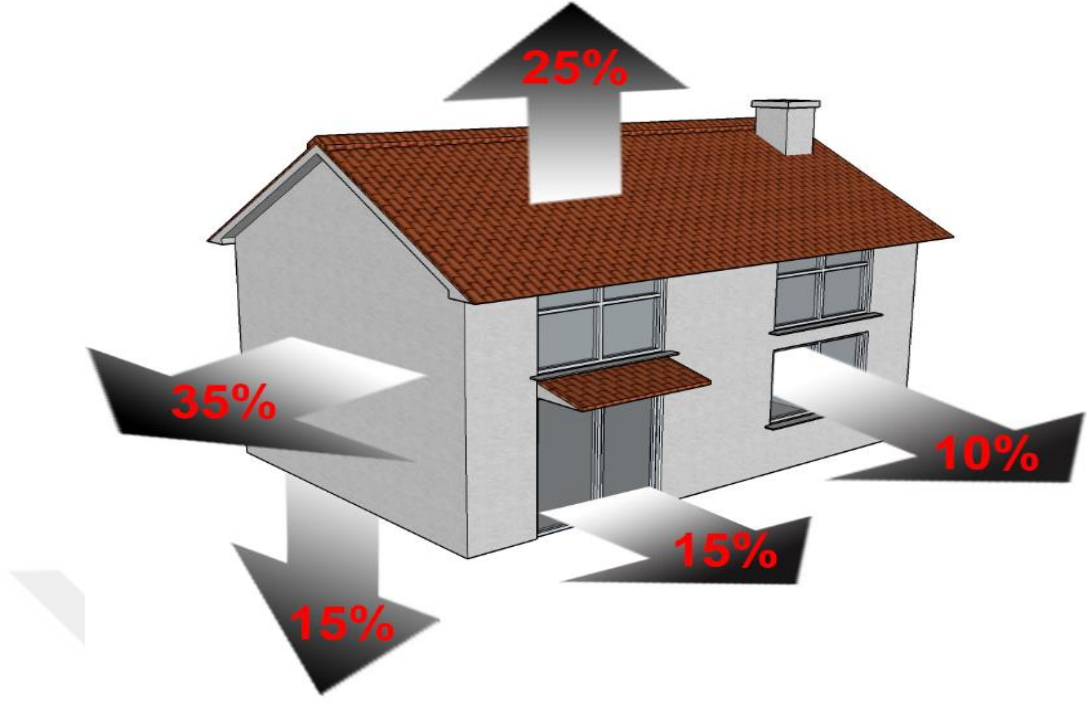
Şekil 2.11’de Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 2018 yılında toplam enerji tüketiminin sektörel dağılımı verilmektedir. Toplam enerji tüketimi açısından en yüksek tüketimin %33.4 ile sanayi sektöründe ve %30.5 ile mesken ve hizmet sektöründe gerçekleşmektedir. Geçmiş yıllar incelendiğinde mesken ve hizmet kısmında enerji tüketiminin yıllar geçtikçe artış eğiliminde olduğu görülmektedir (URL-10, 2021). Bu kapsamda enerji tüketiminde büyük bir rolü olan binalarda enerji tüketimini azaltılması için proje ve uygulama aşamasında gerekli önlemlerin alınması önem taşımaktadır. Türkiye’deki binaların enerji etkinliği üzerine yapılan bir çalışmada, Türkiye’de tüketilen toplam enerjinin yaklaşık %31’nin binalarda tüketildiği belirtilmektedir. Bu nedenle binaların enerji ihtiyacı ve sera gazı etkisini azaltmada önemli bir unsur olduğu belirtilmektedir (Evin ve Ucar, 2019).



Şekil 2.11. Türkiye’de enerji tüketiminin sektörel dağılımı

Binalardaki enerji tüketimi binanın dizaynı, binanın konumu ve açısı, bulunduğu iklimsel bölge ve bunun gibi birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Binaların yeterince yalıtımının olmaması, pencerelerin monte edilirken oluşan boşluklar ve ısı köprüleri enerji kayıplarına sebep olabilmektedir. Duvar kısmında oluşabilecek ısı kayıpları ise kullanılan malzemenin ısı iletkenlik katsayısının düşürülmesiyle azaltılabilmektedir (Braulio-Gonzalo ve Bovea 2017).

Binalarda ısı kaybına neden diğer önemli bir faktör yapı elemanlarıdır. Zira yapılarda ısı kaybı duvar, çatı, döşeme, zemin, kapı ve pencere gibi yapı elemanlarından oluşmaktadır. Binaların mimari yapısına bağlı olmak kaydıyla genellikle en yüksek ısı kaybı dış duvarlarda meydana gelmektedir (Can ve Engin, 2013). Binaların kat yüksekliği veya tek katlı olması durumunda ısı kaybında farklılık olabilmektedir (Yaman vd., 2015). Binalarda yaklaşık ısı kayıp oranları Şekil 2.12’de verilmektedir.



Şekil 2.12. Binada yaklaşık ısı kayıpları

Binalarda enerji performansını değerlendirmek ve karşılaştırma yapmak amacıyla ilgili binanın tükettiği yıllık veya aylık enerji miktarının bilinmesi gerekmektedir. Binalardaki enerji tüketiminde en büyük paylardan biri de gerekli konfor şartlarının (ısıtma ve soğutma) sürekliliğini sağlamaktır. Avrupa Birliğinin 2050 yılına kadar temiz ve karbon-nötr bir ekonomiye geçme hedefinde ısıtma ve soğutma önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle binalarda ve endüstrideki ısıtma ve soğutma Avrupa Birliği ülkelerinde enerji tüketiminin yarısını oluşturmaktadır (URL-11, 2021).

Binalarda enerji performansının belirlenmesinde ısıtma ve soğutma yükleri kullanılmaktadır. Isıtma yükü, iç ortamda belirlenen konfor şartlarını sürdürebilmek için ortama verilmesi gereken ısı miktarı, soğutma yükü ise belirlenen şartlarda ortamdan uzaklaştırılması gereken ısı miktarı olarak tanımlanmaktadır (ASHRAE, 2010). Tasarlanan binanın veya konutun ısıtma ve soğutma yükleri farklı enerji simülasyon programları yardımıyla hesaplanabilmektedir.

Binalarda enerji tüketimini azaltmak için çeşitli yöntemler ve teknolojik gelişmeler devam etmektedir. Tüketimi azaltmak için kullanılan yalıtım malzemeleri dışında tercih edilen yapı malzemelerinin de binalarda enerji tüketimi açısından önem arz etmektedir. Bu kapsamda geleneksel yapı malzemeleri yerine enerji tüketimini azaltacak daha düşük ısı

iletkenliğe sahip enerji verimliliği yüksek yapı malzemelerinin önemi gün geçtikçe artmaktadır (Ustaoğlu vd., 2020) (Yüksek, 2015).

2.7. Literatür Özeti

Genleştirilmiş perlit agregalı betonun basınç dayanımı ve ısı iletkenliği üzerine yapılan bir çalışmada (Demirboğa ve Gül, 2003) mineral katkı olarak uçucu kül ve silis dumanı kullanılmıştır. Çalışmada uçucu kül işlenebilirliği artırırken silis dumanının azalttığı ve silis dumanı ile uçucu kül ikame oranı arttıkça betonun hem birim hacim ağırlığının hem de ısı iletkenliğinin azaldığı belirtilmektedir.

Farklı çimento miktarının, farklı kıvamın ve farklı oranlarda pomza agregası kullanmanın betonun birim hacim ağırlığına ve ısı iletkenliğine etkisi üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir (Uysal vd., 2004). Çalışmada pomza agregasının kullanım oranı arttıkça betonun hem birim hacim ağırlığının hem de ısı iletkenliğinin azaldığı belirtilmektedir. Karışımında kullanılan çimento miktarının artmasına bağlı olarak betonun birim hacim ağırlığı ve ısı iletkenliği artarken, kıvamın betonun birim hacim ağırlığına ve ısı iletkenliğine belirgin bir etkisinin olmadığı rapor edilmektedir.

Doğal perlit agregası ve perlit tozu kullanılarak taşıyıcı hafif beton üretmek amacıyla gerçekleştirilen bir çalışmada (Aşık, 2006) doğal perlit agregası ile taşıyıcı hafif beton üretiminin mümkün olduğu belirtilmektedir. Ayrıca perlit tozu kullanımı taşıyıcı hafif betonun performansını arttırdığı ve betonun birim hacim ağırlığını azalttığı rapor edilmektedir. Üretilen taşıyıcı hafif betonların elastisite modülü 13350 MPa ile 21300 MPa arasında değişmektedir. Bu değer geleneksel betonun elastisite modülünün yarısı mertebesindedir. Perlit tozu taşıyıcı hafif betonun kuruma büzülmesini azaltmaktadır. Üretilen taşıyıcı hafif betonun klorür geçirimsizliği ASTM C1202'e göre orta ve düşük sınıfta yer almaktadır. Hafif agrega gözenekli olmasına rağmen hafif betonun klorür geçirimsizliği geleneksel betonunkine kıyasla daha düşüktür. Bunun nedeni hafif agregadaki boşlukların köprülenmiş olmamasına bağlanmaktadır.

Ham perlit agregası kullanılarak yüksek dayanımlı hafif betonun üretilebilirliğine ilişkin gerçekleştirilen bir çalışmada (Ulus, 2007), perlit agregası ile birim hacim ağırlığı 1830 ila 1915 kg/m³ arasında değişen yüksek dayanımlı hafif beton üretmek için mineral katkı kullanmanın zorunlu olmadığı ancak süperakışkanlaştırıcı kullanmanın zorunlu olduğu belirtilmektedir. Silis dumanının betonun basınç ve çekme dayanımı ile elastisite

modülünde önemli artış sağlarken, sünekliğini azalttığı rapor edilmektedir. Çelik lif kullanımı hafif betonun basınç dayanımının artmasına herhangi bir katkı sağlamazken, çekme dayanımında %70 mertebesinde bir artış sağladığı belirtilmektedir. Betonun statik elastisite modülü 17-25 GPa arasından değişirken, dinamik elastisite modülü ise 22-35 GPa arasında değişmektedir.

Genleştirilmiş perlit agregasının hafif betonun özelliklerine etkisi üzerine yapılan bir çalışmada (Topçu ve Işıldag, 2008), genleştirilmiş perlit agregasının artan oranlarda kullanımı dayanımda azalmaya neden olurken hafiflikte olumlu katkı sağladığı belirtilmektedir. Dozaj artışına bağlı olarak basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve elastisite modülünün arttığı rapor edilmektedir. Dozajın artmasıyla birlikte betonun birim hacim ağırlığı da artmaktadır. Çimento miktarı ve tipinin işlenebilirlik üzerine etkisinin önemli olmadığı ifade edilmektedir. Çalışmada genleştirilmiş perlit agregasının betonda ince agrega olarak kullanılabileceği belirtilmektedir.

Peres-Lombard vd. (2008), binaların enerji tüketimi üzerine yaptıkları araştırmada ticari ve meskûn binalardaki enerji tüketiminin gittikçe artış gösterdiği ve gelişmiş ülkelerde binaların enerji tüketiminin toplam tüketilen enerjinin %40'ı mertebesine ulaştığı ifade edilmektedir. Binalarda tüketilen enerji endüstri ve ulaşım sektörlerinde tüketilen enerjiyi aşmaktadır. Bu nedenle binalarda enerji verimliliği günümüzde hem ulusal hem de uluslararası düzeyde hayati önemde olduğu görülmektedir. Bina alanlarının artması ve bununla ilişkili olarak enerji ihtiyacının artması binalardaki enerji tüketiminin gelecek yıllarda öneminin artarak devam edeceğine işaret etmektedir. Bu nedenle binalarda enerji verimliliğinin artırılması noktasında hükümetlerin uygun politikalar üretmesinin önemli olduğu vurgulanmaktadır.

Yüksek sıcaklığın uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun basınç ve yarmada çekme dayanımına etkisi üzerine yapılan bir çalışmada (Tanyıldızı ve Coşkun, 2008), %10, %20 ve %30 oranlarında uçucu kül içeren numuneler 200°C, 400°C ve 800°C'ye maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık uygulanmayan numuneler üzerinde ölçülen en yüksek basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı %30 oranında uçucu kül içeren beton numunelerinde gerçekleşmiştir. Çalışmada uçucu külün yüksek sıcaklığın basınç dayanımı üzerindeki olumsuz etkisini dengelediği ifade edilmektedir. Bu etki uçucu külün pozzolanik etkisi ile açıklanmaktadır.

Taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi üzerine yapılan bir çalışmada (Dikici, 2010), pomza agregası ve değişik oranlarda mineral katkı kullanılarak

farklı bileşimde taşıyıcı hafif beton üretimi amaçlanmıştır. Üretilen betonlar su kürü ve buhar kürü olmak üzere iki farklı kür koşulunda tutulmuştur. Betonların ölçülen birim hacim ağırlığı 2000 kg/m^3 'ün altında çıktığı ve etüv kurusu kırılan numunelerin basınç dayanımı doygun yüzey kuru halde olanlara kıyasla yüksek çıktığı rapor edilmektedir. Eğilme ve yarmada çekme dayanımı ölçümleri tam tersi özellik gösterdiği ifade edilmektedir. Doygun yüzey kuru halde elastisite modülü ölçümleri etüv kurusu olanlara göre yüksek değerler verdiği belirtilmektedir. Taşıyıcı hafif betonda mineral katkı kullanımı maliyeti düşürdüğü ve çevrenin korunması açısından fayda sağladığı vurgulanmaktadır.

Hafif betonun mekanik özellikleri ve ısı iletkenlik katsayısına ilişkin yapılan bir çalışmada (Orcay, 2010), genleştirilmiş polistren kullanılarak birim hacim ağırlıkları 400 ila 1800 kg/m^3 arasında değişen beş farklı hafif beton üretilmiştir. Çalışmada hafif betonun birim hacim ağırlığının artmasına paralel olarak basınç dayanımının da arttığı belirtilmektedir. Genleştirilmiş polistren içeren tüm betonlar üzerinde elde edilen sonuçların hafif betonun ısı iletkenliğinin birim hacim ağırlığının artmasına bağlı olarak doğrusal artış gösterdiği belirtilmektedir. Bunun yanı sıra genleştirilmiş polistren miktarının artması ile kılcallık katsayısı önemli ölçüde azaldığı ifade edilmektedir. Basınç dayanımı sonuçları dikkate alınarak yapılan değerlendirmede genleştirilmiş polistren içeren betonun taşıyıcı hafif beton olarak kullanılmasının uygun olmadığı, dolgu ve tesviye çapı ya da bölme duvar elemanı olarak kullanılabileceği ifade edilmektedir.

Genleştirilmiş perlitin hafif betonun termal iletkenlik ve mekanik özelliklerine etkisi üzerine yapılan bir çalışmada (Şengül vd. 2011), birim ağırlığı $700\text{-}2000 \text{ kg/m}^3$ arasında değişen hafif betonlar üretilmiştir. Sabit su/çimento oranlı tüm karışımlarda artan perlit miktarı ile hafif betonun basınç dayanımı ve elastisite modülünün azaldığı buna karşın su emme ve kılcallık katsayısının artmış olduğu rapor edilmektedir. Ayrıca ısı iletkenlik ile birim hacim ağırlık arasında güçlü bir ilişkinin varlığı vurgulanmaktadır.

Taşıyıcı hafif beton tasarımı ve çok katlı binalarda kullanımı üzerine gerçekleştirilen bir deneysel çalışmada (Kaldı, 2011), iri agrega yerine hafif agrega kullanılarak LC20/22, LC25/28 ve LC30/33 sınıf taşıyıcı hafif betonlar üretilmiştir. Daha sonra C20/25, C25/30 ve C30/37 sınıfı geleneksel betonlar ile hafif betonların basınç ve eğilme dayanımları ile ultrasonik ses geçirimsizliği, sertleşmiş beton yoğunluğu, beton-donatı aderansı ve elastisite modülü değerlendirilmiştir. Çalışmada birim hacim ağırlıkları 1680 kg/m^3 ile 1787 kg/m^3 arasında değişen ve 28 günlük 150 mm küp basınç dayanımları 23.7 MPa ila 28.3 MPa

arasında olan taşıyıcı hafif betonlar üretilmiştir. Taşıyıcı hafif betonların ultrases geçiş hızının geleneksel betona kıyasla düşük olduğu belirlenmiştir Kür süresinin uzaması ile taşıyıcı hafif betonların basınç dayanımları, eğilme dayanımları ve ultrases geçiş hızlarının artış gösterdiği belirtilmektedir. Pomza miktarındaki değişim ultrases geçiş hızı üzerinde etkili olmuştur. LC 20/28 sınıf hafif betonun elastisite modülü C20/25 sınıf geleneksel betonun elastisite modülünden %37 oranında daha düşük olduğu rapor edilmiştir.

Pomza agregası ile üretilen hafif betonun taşıyıcılık özelliklerini belirlemek için gerçekleştirilen bir çalışmada (Akkaş, 2011), agrega ikamesi yapılarak üretilen pomza agregalı taşıyıcı betonların taşıyıcı yapı elemanlarında kullanılabilir olduğu ve taşıyıcılık özelliği ile standartlarda verilen ölçütlere uygun olduğu belirlenmiştir. Çalışmada pomza agregası ile üretilen taşıyıcı hafif betonun yapı elemanlarda kullanıldığında yapının zati yükünde önemli azalma sağladığı rapor edilmektedir. Ayrıca taşıyıcı hafif beton üretiminde çimento gereksinimindeki artış bir dezavantaj olarak görülmesine rağmen birim hacim ağırlıktaki azalma uzun vadede avantaj olarak değerlendirilmektedir.

Mineral katkılı hafif betonun karakteristikleri üzerine yapılan bir çalışmada (Shannag, 2011), silis dumanı ve uçucu kül kullanılmıştır. Ölçülen basınç dayanımları 22.5 ila 43 MPa arasında değişirken hava kurusu birim hacim ağırlık 1935 ila 1995 kg/m³ arasında değişmektedir. %5-15 oranında silis dumanı içeren taşıyıcı hafif betonların basınç dayanımları ve elastisite modülleri silis dumanı içermeyen betona kıyasla sırasıyla %57 ve %14 mertebesinde artışlar göstermiştir. %10 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun basınç dayanımı uçucu kül içermeyenlere göre %18 oranında düşük çıkarken elastisite modülünde herhangi bir fark gözlenmemiştir. Mineral katkıların tek başına kullanılması ile karşılaştırıldığında, iki mineral katkının birlikte kullanımının betonun dayanım ve rijitliği bakımından daha iyi performans gösterdiği ifade edilmektedir.

Taşıyıcı hafif betonun dayanım ve elastiklik özellikleri üzerine gerçekleştirilen bir çalışmada (Koçkal ve Özturan, 2011), üretilen tüm hafif betonların taze ve fırın kurusu birim hacim ağırlıkları 2000 kg/m³'den düşük çıkarken kullanılan agreganın düşük dayanım ve yüksek porozitesi nedeniyle betonun basınç dayanımı geleneksel betona kıyasla daha düşük çıkmıştır. Geleneksel beton ile karşılaştırıldığında, aynı çökme ve hava içeriğine sahip taşıyıcı hafif beton üretmek için daha az miktarda süperakışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkının kullanılması gerektiği belirtilmektedir.

Pomza ve perlit ile üretilen hafif betonun mekanik özelliklerinin incelendiği bir çalışmada (Öztürk, 2012), en yüksek birim hacim ağırlığın %15 kum ve % 85 pomza ile

Üretilen betonda, en düşük birim ağırlığın ise %15 kum ve % 85 EPS ile üretilen betonda elde edildiğı rapor edilmektedir. Elde edilen bulgulara göre hafif betonun az katlı binalarda iyi bir akustik özellik sağladığı için ses ve ısı yalıtımında, zemin yalıtımında kullanılabilmektedir. Yapının zati ağırlığını azalttığı için taşıyıcı sistemin düğüm noktalarında oluşan kuvvetleri (moment, aksenal kuvvet, kesme kuvveti) azaltıp taşıyıcı sistem kesit boyutlarını küçülttüğü için yüksek katlı binalarda tercih edilebileceğı vurgulanmaktadır.

Mineral katkılı hafif betona sülfat etkisi üzerine yapılan bir çalışmada (Esmailzadeh, 2013), farklı oranlarda silis dumanı ve uçucu kül ilaveli betonların basınç dayanımı, birim hacim ağırlık, kılcal su emme, ultrases geçiş süresine ilişkin değerlendirme yapılmıştır. Çalışmada üretilen betonlar standart kr ortamına ve sülfat etkisine maruz bırakılmıştır. Standart küre maruz betonlarda en yüksek dayanım %15 silis dumanı ilaveli betonlarda elde edilirken bunu sırasıyla %15 uçucu kül ilaveli, mineral katkı içermeyen, %30 silis dumanı ilaveli ve %30 uçucu kül ilaveli betonların takip ettiğı rapor edilmiştir. En düşük dayanımın %30 uçucu kül ilaveli betonlar üzerinde elde edildiğı belirtilmektedir. %5 ve %10 sodyum sülfat çözeltisinde tutulan betonlar erken yalarda standart küre maruz betonlara yakın dayanım değerleri verdiğı belirtilmektedir. İlerleyen zamanlarda ve 120 gün sonunda en iyi performans %15 silis dumanı ilaveli beton için elde edildiğı ifade edilmektedir.

Taşıyıcı hafif betonun basınç dayanımının ultrases geçiş hızı üzerinden değerlendirilmesine ilişkin yapılan bir çalışmada (Bogas vd., 2013), 3 ve 180 gün arasında basınç dayanımları 30 ila 80 MPa arasında değişen 84 karışım değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirme sonunda hafif betonun basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızının agrega hacmi ve su/imento oranının azalmasına bağlı olarak artış gsterdiğı belirlenmiştir. Çalışma sonunda beton tipi ve bileimden bağımsız olarak ultrases geçiş hızı vasıtasıyla basınç dayanımının tahmin edilebileceğı bir eşitlik önerilmektedir.

Metakaolin katkılı taşıyıcı hafif betonun yüksek sıcaklık etkisindeki davranışına ilişkin yapılan bir çalışmada (Ezgi Gültekin, 2014), yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış farklı oranlarda metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada %15'e kadar metakaolin ilavesinin betonun dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak tüm serilerde basınç dayanımı azalırken, tüm sıcaklıklarda en yüksek dayanım %15 metakaolin içeren betonlar üzerinde elde edilirken metakaolin oranı arttıkça porozite değerlerinde azalma meydana geldiğı belirtilmektedir.

Ayrıca metakaolin artışına bağlı olarak kılcallık katsayısında azalma eğilimi tespit edilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde metakolin oranı arttıkça beton içyapısında tabakalı bir görünümün meydana geldiği ve yine SEM görüntüleri sayesinde metakaolinin göstermiş olduğu puzolanik etkiden dolayı CH'nın azaldığı ve ilave amorf C-S-H jelinin arttığı rapor edilmektedir. Ayrıca SEM analizi ile metakaolin ikame oranı arttıkça beton içyapısının daha boşluksuz bir görünüm kazandığı ifade edilmektedir.

Doğal perlit agregası ve perlit tozu kullanılarak yüksek performanslı taşıyıcı hafif beton üretimine ilişkin yapılan bir çalışmada (Eser, 2014), doğal perlit agregasının yüksek performanslı hafif beton üretiminde kullanılabileceğinin altı çizilmektedir. Perlit tozu ve perlit agregası kullanılarak işlenebilir kendiliğinden yerleşen yüksek performanslı hafif beton üretiminin mümkün olabileceği belirtilmektedir. Doğal perlit agregası kullanılarak üretilen yüksek performanslı hafif betonun aynı dayanıma sahip geleneksel betona kıyasla yaklaşık %20 oranında daha hafif olduğu rapor edilmektedir. Aynı şekilde doğal perlit agregası kullanılarak üretilen yüksek performanslı hafif betonun elastisite modülünün aynı dayanıma sahip geleneksel betonun elastisite modülünün yaklaşık %50-60 kadarı olduğu ifade edilmektedir.

Hafif agregalı betonun mekanik ve termal özellikleri üzerine yapılan bir çalışmada (Nguyen vd., 2014), farklı hacimlerde olacak şekilde 3 tip hafif agregası (genleştirilmiş kil, şeyl ve pomza) kullanılmıştır. Üretilen hafif betonun mekanik ve ısı özellikleri beton üretiminde kullanılan agreganın hacmi, kalitesi ve kökenine bağlı olduğu belirtilmektedir. Deneysel çalışmada üretilen hafif agregalı betonlar LC20/22 ile LC40/44 sınıf betonlar olup ısı iletkenlik katsayıları 0.43 ile 0.73 W/mK arasında değiştiği belirtilmektedir.

Volkanik scoria agregası ile üretilen taşıyıcı hafif betonun mekanik ve durabilite özellikleri üzerine yapılan bir çalışmada (Bogas ve Gomes, 2015), dayanım sınıfı LC25/28 ile LC40/44 arasında değişen taşıyıcı hafif betonlar üretilmiştir. Üretilen taşıyıcı hafif betonların EN 206 standardına göre yoğunluk sınıfları D1.8 ile D2.0 arasında değiştiği belirtilmektedir. Çalışmada scoria agregası ile üretilen taşıyıcı hafif betonun geleneksel betona alternatif olabileceği vurgulanmaktadır.

Hafif agregalı betonun mekanik ve ısı özellikleri üzerine yapılan bir çalışmada (Oktay vd., 2015), farklı hafif agregalar (pomza, genleştirilmiş perlit, rubber agregası) farklı oranlarda kullanılarak hafif betonlar üretilmiştir. Çalışmada mineral katkı olarak da silis dumanı kullanılmıştır. Geleneksel betonunkine kıyaslandığında hafif betonların ısı iletkenlikleri ve ısı yalıtımlarında sırasıyla %82 ve %74 oranlarında bir azalmanın olduğu

rapor edilmiştir. Hafif betonun ısı özellikleri yalnızca yoğunluğa bağlı olmadığı bunun yanı sıra agrega-çimento hamuru aderansının da bu anlamda etkin bir parametre olduğu belirtilmektedir. Ayrıca silis dumanı ve hava sürükleyicinin ısı iletkenlik ve birim ağırlığın azalmasına neden olduğu ancak özgül ısıda artış sağladığı ifade edilmektedir. Bu durumun çimento ile karşılaştırıldığında silis dumanının daha küçük özgül ağırlığa sahip olduğu ile ilişkili olduğuna işaret etmektedir. Yapılan regresyon analizi vasıtasıyla ısı iletkenlik katsayısı ile birim hacim ağırlık arasında güçlü bir ilişkinin varlığına işaret edilirken, özgül ısı ile birim hacim ağırlık ters orantı olduğu belirtilmektedir.

Taşıyıcı hafif betonda metakaolinin etkinliği üzerine yapılan bir çalışmada (Keleştemur ve Demirel, 2015), metakaolin çimento ile %5, %10, %15 ve %20 oranında ikame edilerek kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada metakaolinin taşıyıcı hafif betonun basınç ve yarmada çekme dayanımını arttırdığını ve dayanım gelişimi bakımından optimum oranın %15 olduğu rapor edilmektedir. Metakaolin ikame oranının artışına bağlı olarak taşıyıcı hafif betonun ultrases geçiş hızında belirgin bir artış olduğu ancak metakaolin kullanımı ile taşıyıcı hafif betonun kılcallık ve porozite değerlerinin azaldığı belirtilmektedir. %15 oranında metakaolin kullanımı korozyon direncini artırdığı, bu orandan daha fazla miktarda metakaolin kullanmanın herhangi bir pozitif etkisinin gözlemlenmediği ifade edilmektedir.

Yapı malzemelerinin enerji verimliliği değerlendirilmesine ilişkin yapılan bir çalışmada (Yüksek, 2015), binaların yaşam döngüsünün her aşamasında enerji tükettiği belirtilmektedir. Bu enerji tüketiminde kullanılan yapı malzemeleri önemli bir paya sahiptir. Binalarda enerji açısından verimli malzeme tercihinin gelecekte enerji performansı açısından önemli katkı sağlayacağı vurgulanmaktadır. Bu bağlamda binalarda enerji verimli malzeme kullanımı ile fosil kaynaklı enerji kaynaklarının tüketimi azalacağı ve ayrıca küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi çevresel sorunların üstesinden gelinmesinde önemli katkı sağlanacağı belirtilmektedir.

Taşıyıcı hafif betonun ısı iletkenliği üzerine yapılan bir çalışmada (Real vd., 2016), farklı birim hacim ağırlık ve dayanım sınıfında betonlar değerlendirilmiştir. Hafif agrega tipine bağlı olarak üretilen taşıyıcı hafif betonların ısı iletkenlik katsayıları geleneksel betonunkinden yaklaşık %40-53 mertebesinde düşük olduğu ifade edilmektedir. Çalışmada hafif agrega miktarı ve boşluk miktarı arttıkça, su/bağlayıcı oranı düştükçe betonun ısı iletkenliğinde azalma eğilimi gözlemlendiği belirtilmektedir. Ayrıca betonun birim hacim ağırlığı, kum/hamur oranı ve su miktarı azaldıkça betonun ısı iletkenliğinin azaldığı

belirtilmektedir. Agrega porozitesinde ortalama %1’lik bir artış betonun ısı iletkenliğini yaklaşık %0.6 oranında azaltırken su miktarında %1’lik bir azalış ısı iletkenliğinde yaklaşık %3-9 mertebesinde azalmaya neden olduğu ifade edilmektedir.

Taşıyıcı hafif betonun binalardaki enerji verimliliği üzerine yapılan bir çalışmada (Real vd., 2016), karşılaştırma yapmak amacıyla geleneksel betonlar üretilmiştir. Üretilen betonların termal özellikleri deneysel çalışma kapsamında belirlenmiştir. Taşıyıcı hafif betonun ısı iletkenlik katsayısı ve ısı yayılımının geleneksel betona kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir. Taşıyıcı hafif betonun özgül ısı ise geleneksel betonunkinden daha yüksek çıkmıştır. Geleneksel beton yerine taşıyıcı hafif beton kullanıldığında binanın ısıtma enerjisi ihtiyacında %15’lere varan bir azalma sağlandığı belirtilmektedir. Bu kapsamda binalarda taşıyıcı hafif beton tercihi ile hem enerji ihtiyacında hem de zati yükte azalma sağlanacağı ve aynı zamanda çevresel ve ekonomik açıdan katkı sağlanabileceği ifade edilmektedir.

Hafif betonun mekanik özellikleri ve ısı iletkenlikleri üzerine karşılaştırmalı yapılan bir çalışmada (Taşdemir vd., 2017), pomza ve genleştirilmiş polystiren agrega olmak üzere iki farklı agrega kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada birim hacim ağırlıkları 300-1800 kg/m³ arasında değişen hafif betonlar üretilmiştir. Yine daha önceden çalışılmış genleştirilmiş perlit agrega ile üretilen betonların özellikleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Agrega tipi ve kullanım miktarına bağlı olarak betonların hem birim ağırlıkları azalmış hem de hafif agrega kullanımı ile ısı iletkenlik azalmıştır. Çalışmada birim hacim ağırlık ile ısı iletkenlik arasında iyi bir ilişki elde edilmiştir. Birim hacim ağırlığın azalmasına paralel olarak betonun basınç dayanımı ve elastisite modülü de azalmıştır. Genleşmiş polystiren içeren betonun basınç dayanımındaki azalma daha belirgin olmuştur. Elastisite modülü ile basınç dayanımı arasında kuvvetli bir ilişki rapor edilmektedir.

Hafif betonda mineral katkı kullanımına ilişkin olarak yapılan bir derleme çalışmasında (Mo vd, 2017), farklı türde ve oranlarda mineral katkı kullanılarak üretilen hafif betonların taze, sertleşmiş ve durabilite özellikleri özetlenmiştir. Çalışmada hafif betonun performansını iyileştirmede en etkili mineral katkının silis dumanı olduğu düşük maliyet ve daha yüksek çimento ikame seviyeleri istendiğinde uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanmanın uygun olacağı ifade edilmektedir.

Hafif agreganın betonun ısı özelliklerine etkisi üzerine yapılan bir çalışmada (Cavalline vd., 2017), karışımda hafif agrega miktarı arttıkça betonun ısı iletkenliğinin azaldığı belirlenmiştir. Hafif agregadaki boşluk miktarı ve taze betonun hava içeriğinin

karışımındaki çimento miktarı ve su/bağlayıcı oranına kıyasla betonun termal özelliklerinde daha etkin olduğu belirtilmektedir. Potansiyel hafif agreganın ısı kapasite ve ısı iletkenlik üzerindeki etkisini tahmin etmek için birim hacim ağırlık ve hava içeriği kullanılarak istatistiksel bir ilişki geliştirilmiştir.

Yüksek performanslı taşıyıcı hafif betonda pomza agregasının kullanılabilirliği, mekanik büyüklükleri ve uygulama kriterleri üzerine yapılan bir çalışmada (Yolcu, 2018), bağlayıcı malzemelerin ekonomik kullanımı açısından 24 saatlik su emmesi %25'den büyük pomza agregaların kullanım alanının, 20-35 MPa küp basınç dayanımı için daha ziyade hazır beton sektörüne yönelik olacağı öngörülmektedir. Su/bağlayıcı oranını 0.25 ile 0.35 arasında seçerek ve nitelikli doğal hafif agregası kullanarak yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı betonların üretilebileceği belirtilmektedir. Muhtelif karışimli hafif betonlar için ASTM C1202-12'ye göre ölçülen klorür geçirimsizliği düşük geçirimsizliğin alt sınırı olan 1000 Coulombs'un oldukça altında değer almış olduğundan bu değer klorür geçirimsizliği itibarıyla çok düşük betonların üretilebileceğini göstermektedir.

Betonun ısı iletkenliği üzerinde yapılan genel bir derleme çalışmasında (Asadi vd. 2018), nem, sıcaklık, agregası tipi, çimento tipi ve betonun birim hacim ağırlığı ısı iletkenlik katsayısına etkileyen önemli faktörler olduğu vurgulanmaktadır. Genel bir çıkarım olarak nem içeriğinin %1 artması ısı iletkenlik katsayısını yaklaşık %6 oranında arttırdığı, sıcaklık artışına bağlı olarak ısı iletkenlik katsayısı azalma eğilimi gösterdiği rapor edilmektedir. Çimento bazlı malzemenin 500°C'deki ısı iletkenlik katsayısının oda sıcaklığında belirlenene kıyasla yaklaşık %50 oranında daha düşük olduğu belirtilmektedir. Betonda hafif agregası kullanılması ile betonun boşluk miktarında meydana gelen artış ısı iletkenlik katsayısının azalmasına neden olduğu ve betondaki boşluğun yaklaşık %1 oranında artması ile betonun ısı iletkenliğinde yaklaşık %0.6 oranında azalmaya neden olduğu rapor edilmektedir. Bunun yanı sıra çimento ile mineral katkı ikame edilmesi halinde betonun ısı iletkenliği azalmaktadır.

Hafif agregalı taşıyıcı hafif beton üretimi ve performansına ilişkin gerçekleştirilen bir çalışmada (Yenidoğan, 2019), pomza ile taşıyıcı hafif beton üretilip üretilmeyeceği araştırılmış ve bu kapsamda farklı karışımlar tasarlanarak bir seri deney yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada su/bağlayıcı oranı 0.25 ile 0.35 arasında değiştirilmiş ve basınç dayanımı minimum 40 MPa olan yüksek dayanımlı hafif betonlar üretilmiştir. ASTM C1202-12'ye göre yapılan klorür geçirimsizlik deneyi ile üretilen hafif betonların çok düşük geçirimsizlik sınıfında yer aldığı belirtilmiştir. Üretilen hafif betonların su

emmesi %1.5-4 mertebesinde. Çalışmada kullanılan pomzanın içsel kür özelliği sayesinde betonun zamanla ilerleyen hidratasyonu sonucu daha geçirimsiz hale geleceği rapor edilmektedir.

Genleştirilmiş kil agregası ve silis dumanının hafif betonun özelliklerine etkisi üzerine yapılan bir çalışmada (Ahmad vd., 2019), hacimce farklı oranlarda genleştirilmiş kil agregası (%49.4, %43.7, %34.3 ve %20.1) ve silis dumanı (%0, %5 ve %10) içeren hafif betonlar üretilmiştir. Silis dumanı arttıkça hafif betonların basınç ve yarmada çekme dayanımlarının arttığı, ısı özelliklerininse birim hacim ağırlık ve silis dumanının artması ile doğrudan ilişkili olduğu belirtilmektedir. Hacimce %20 ila %35 arasında genleştirilmiş kil agregası ve %25 oranda köpük ajanı içeren hafif betonların taşıyıcı beton olarak kullanılabileceği vurgulanmaktadır.

Düşük katlı yapılarda taşıyıcı hafif beton ve yalıtımın basınç dayanımı ve ısı iletkenliği arasındaki dengenin geliştirilmesi üzerine yapılan bir çalışmada (Remesar vd., 2020), iri ve ince genleştirilmiş kil agregası ve uçucu kül kullanılmıştır. Üretilen betonların basınç dayanımları 9.3 MPa ila 28.8 MPa arasında değişirken ısı iletkenlik katsayıları 0.43 W/mK ila 1.04 W/mK arasında değiştiği ifade edilmektedir. Genleştirilmiş iri ve ince kil agregası ve uçucu külün birlikte kullanılması ile üretilen hafif betonun ısı iletkenlik katsayısı geleneksel betona kıyasla %73 oranında daha düşük olduğu rapor edilmektedir. Fırın kurusu betonun ısı iletkenliği laboratuvar ortamındaki betonunkine kıyasla daha düşüktür. Bunun sebebi suyun iletkenlik katsayısının havadan 15 kat daha yüksek olması nedeniyledir. Ayrıca betonda uçucu kül kullanımının betonun ısı iletkenliğini doğrudan etkilediği ve hacimce uçucu külün artması hamurun yoğunluğunun azalmasına sebep olduğu vurgulanmaktadır.

Düşük ısı iletkenliğe sahip hafif betonun binalarda kullanımına ilişkin yapılan bir çalışmada (Ustaoglu vd., 2020), farklı iklim bölgelerinde kullanılan hafif betonun enerji performansı değerlendirilmiştir. Üretilen hafif betonların binaların enerji tüketimini önemli miktarda azalttığı ifade edilmektedir. Gerçekleştirilen deneysel çalışma ve analitik simülasyon sonunda yıllık toplam ısı enerji ihtiyacında en fazla azalma 4. Bölgede meydana geldiği vurgulanmaktadır. Aynı zamanda geleneksel betonla kıyaslamalı olarak üretilen hafif betonların geri ödeme süreleri incelenmiştir. Yapılan değerlendirme ile 20 cm beton kalınlığı için en kısa geri ödeme süresi LPG yakıt türünde 1.29 yıl olarak belirlenirken 1.84 yıl ile elektrik ve 1.96 yıl ile fuel oil takip etmiştir. 20 cm beton kalınlığı için en uzun geri ödeme süresi ise 8.34 yıl ile doğal gaz olmuştur. Genel anlamda hafif

betonun binalarda uygulamasının gelecek vaat ettiği ve çevresel açıdan önem arz ettiği vurgulanmaktadır.

Ağırlıkça %10, %15 ve %20 oranlarında genleştirilmiş perlit agregası kullanılarak üretilen taşıyıcı hafif betonun durabilitesi üzerine yapılan bir çalışmada (İbrahim vd., 2020), birim ağırlıkları geleneksel betona kıyasla %20 ila %30 arasında değişen taşıyıcı hafif betonlar üretilmiştir. %10 ve %15 oranında genleştirilmiş perlit agregası içeren hafif betonlar basınç dayanımı itibariyle taşıyıcı beton olma özelliğinde olduğu ve klorür difüzyonu ve donatı korozyonu direnci itibariyle de geleneksel beton ile karşılaştırılabilir düzeyde olduğu belirtilmektedir. Genleştirilmiş perlit agregasının betondaki oranı arttıkça betonun ısı özelliklerinin iyileştiği rapor edilmektedir.

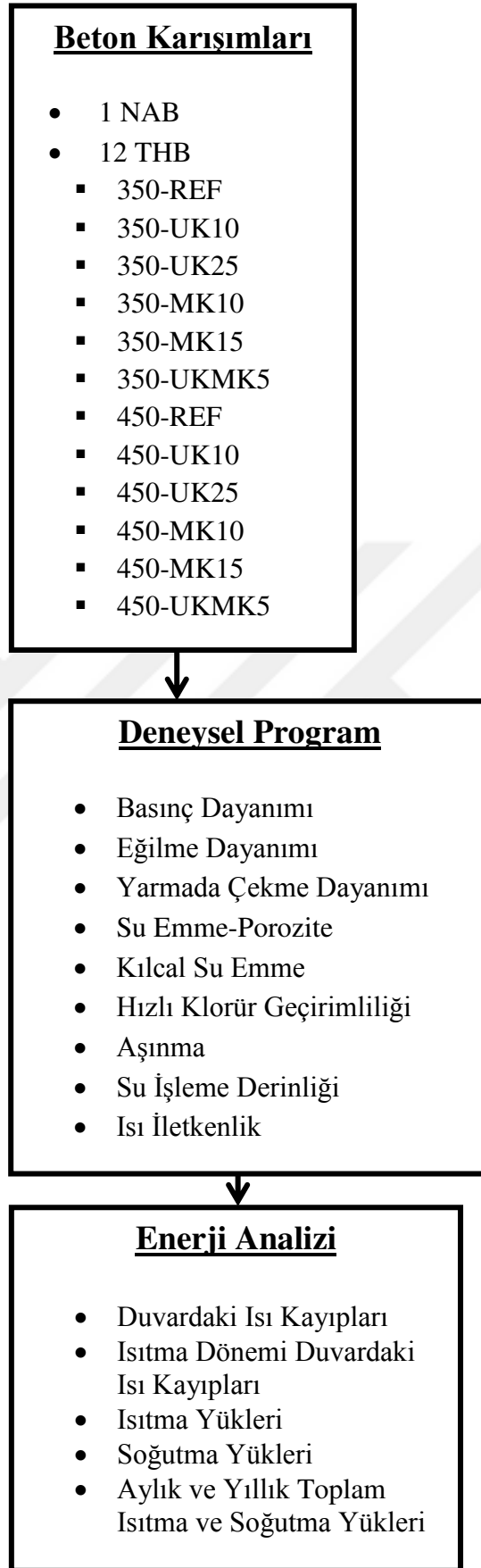


3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Gerçekleştirilen çalışmada, Van-Erçiş yöresinden temin edilen pomza agregası, özel bir firmadan temin edilen ham perlit agregası, normal ince agrega ve farklı tipte mineral katkıları kullanarak birim hacim ağırlıkları ve dayanımları farklı taşıyıcı hafif beton üretimleri amaçlanmıştır. Karşılaştırma amaçlı normal ağırlıklı beton üretimi de gerçekleştirilmiştir. Üretilen taşıyıcı hafif hafif betonların ve normal ağırlıklı betonun bazı özellikleri belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca elde edilen bazı deneysel veriler kullanılarak taşıyıcı hafif betonların ve normal ağırlıklı betonun enerji performansı açısından kıyaslamalı değerlendirmesi yapılmıştır.

Deneysel çalışmada, mineral katkı olarak uçucu kül ve metakaolin çimento ile ikame edilerek ikili ve üçlü karışımlar hazırlanmış ve taşıyıcı hafif betonlar üretilmiştir. Bu denemeler iki farklı çimento dozajı için gerçekleştirilmiştir. Uçucu kül çimento ile %10 ve %25 oranında ikame edilirken metakaolin için ikame oranları %10 ve %15 olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra yine iki farklı çimento dozajı için %5 uçucu kül+%5 metakaolin içeren karışımlar hazırlanmış ve hafif betonlar üretilmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapmak amacıyla mineral katkı içermeyen taşıyıcı hafif betonlar da üretilmiştir. Normal ağırlıklı beton (geleneksel beton) için çökme, birim ağırlık, basınç dayanımı ve ısı iletkenlik deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen beton tasarımları ve ilişkin deneyler ile gerçekleştirilen analizler Şekil 3.1’de verilmektedir.



Şekil 3.1. Gerçekleştirilen çalışmaya ilişkin deney programı

Üretilen taşıyıcı hafif betonlar üzerinde gerçekleştirilen deneyler taze beton deneyleri ve sertleşmiş beton deneyleri olmak üzere iki kategoriye ayrılmıştır. Taze beton üzerinde gerçekleştirilen deneyler ve ilgili standartlar Tablo 3.1’de verilmektedir.

Tablo 3.1. Gerçekleştirilen taze beton deneyleri ve ilgili standartlar

Taze Beton Deneyleri	İlgili Standart
Çökme (Slump) deneyi	TS EN 12350-2
Birim Ağırlık	TS EN 12350-6

Sertleşmiş beton üzerinde gerçekleştirilen deneyler ve ilgili standartlar Tablo 3.2’de verilmektedir.

Tablo 3.2. Gerçekleştirilen sertleşmiş beton deneyleri ve ilgili standartlar

Sertleşmiş Beton Deneyleri	İlgili Standart
Basınç dayanımı deneyi	TS EN 12390-3
Eğilme deneyi	TS EN 12390-5
Yarmada çekme deneyi	TS EN 12390-6
Su emme ve porozite	TS EN 12390-7
Kılcal su emme	ASTM C1585
Hızlı klorür geçirirliiliği	ASTM C1202
Aşınma deneyi	TS 699
Basınç altında su işleme derinliği	TS EN 1390-8
Isı iletkenlik katsayısı	ASTM C518

3.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Burada deneysel çalışma kapsamında kullanılan malzemelere ilişkin özellikler verilmektedir.

3.1.1. Agregas

Deneysel çalışmada pomza, perlit, normal iri agregas ve ince agregas olmak üzere dört farklı agregas kullanılmıştır. Pomza 4-16 mm boyutunda olup Van-Erciş yöresinden özel bir firma aracılığıyla temin edilmiştir. Kullanılan pomza agregasının özgül ağırlığı 0.91

mertebeindedir. Pomza agregasının kuru gevşek birim hacim ağırlığı 522 kg/m^3 mertebesindeir. Perlit agregası 0-5 mm boyutunda olup yine özel bir firma aracılığı ile temin edilmiştir. Perlit agregasının özgül ağırlığı 2.13 mertebesindeir. Normal iri ve ince agrega ise Trabzon ili Maçka ilçesi yöresinde mevcut bir taş ocağından temin edilmiştir. Normal iri ve ince agrega kalker kökenlidir. İnce ve iri agreganın özgül ağırlıkları sırasıyla yaklaşık 2.61 ve 2.67 mertebesindeir. Tüm agregalara ilişkin granülometrik bileşimler belirlenmiş ve tablolar halinde verilmiştir. Taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılan agregalara ilişkin granülometrik bileşimler TS 2511 (Taşıyıcı hafif betonlar için karışım hesap esasları) standardında belirtilen sınır eğrileri arasında kalacak şekilde belirlenmiştir. TS 2511 standardında TS 802 beton karışım hesap esasları standardında ilgili yerler atıf yapılarak açıklanmaya çalışılmıştır.

Taşıyıcı hafif beton üretimlerinde B ve C sınır eğrileri arasına düşecek şekilde %20 oranında pomza agregası, %30 oranında perlit agregası ve %50 oranında normal ince agregadan oluşan bir agrega karışımı hazırlanmıştır. Kullanılan pomza agregası Şekil 3.2’de verilmektedir.



Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan pomza agregası

Şekil 3.3’de çalışmada kullanılan pomza ve perlit agregası gösterilmektedir. Taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılan karışım agregasına ilişkin granülometrik bileşim Tablo 3.3’de verilmektedir.

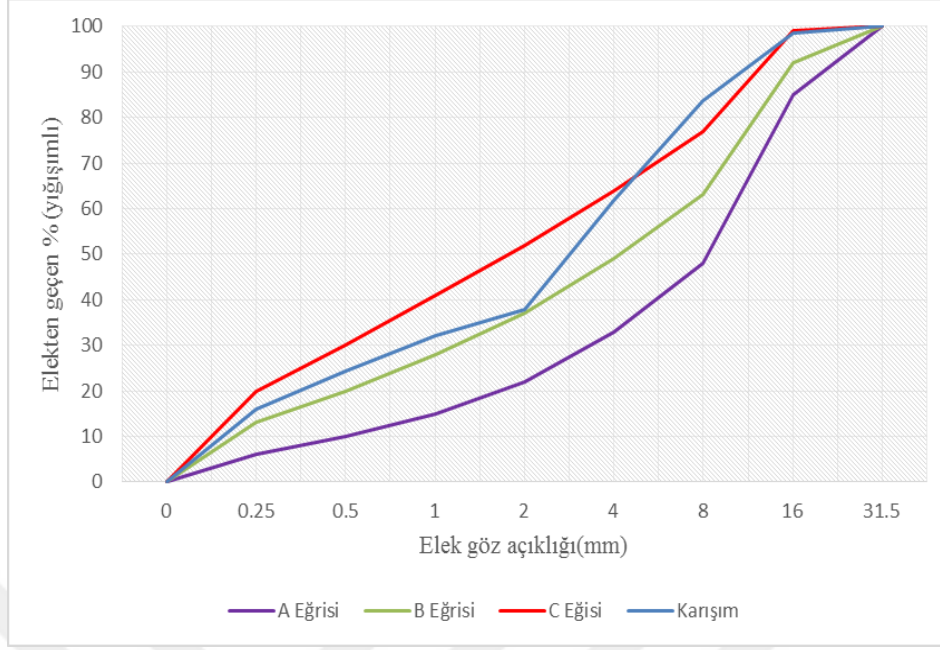


Şekil 3.3. Deneysel çalışmada kullanılan pomza ve perlit agregaları

Tablo 3.3. Taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılan karışım agregasına ilişkin granülometrik bileşim

Elek göz Açıklığı (mm)	Pomza	Perlit	İnce Agrega	Elekten geçen yığılımlı (%)
31.5	100	100	100	100.00
16	92.4	100	100	98.48
8	16.28	100	100	83.26
4	14.40	94.67	61.2	61.88
2	1.65	59.56	39.49	37.94
1	0.75	58	29.1	32.10
0.5	1.02	35.5	27	24.35
0.25	0.2	21.75	18.83	15.98

Şekil 3.4’de taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılan karışım agregasına ilişkin granulometrik bileşim ve ilgili sınır eğrileri verilmektedir.

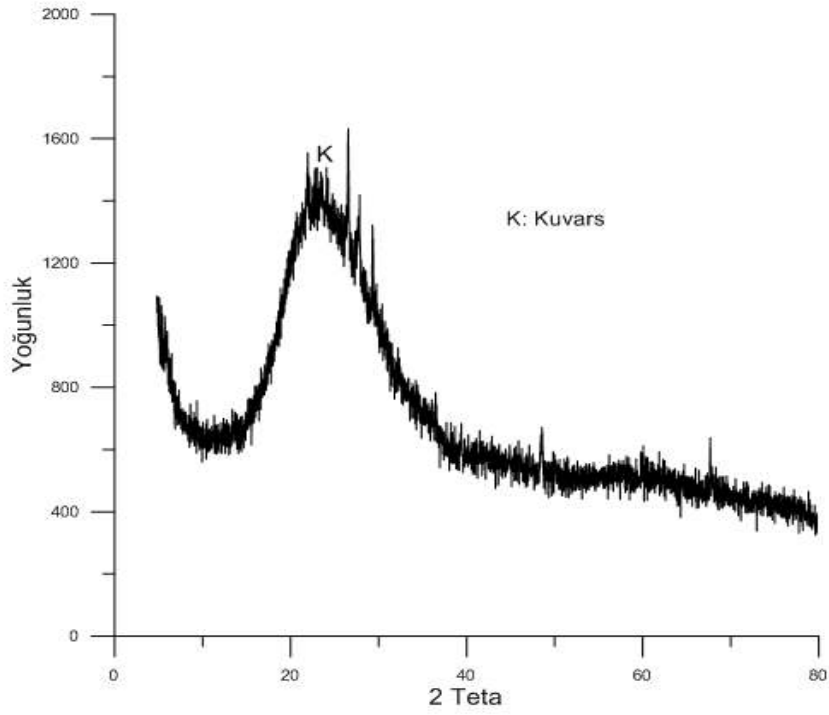


Şekil 3.4. Taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılan karışım agregasına ilişkin granulometrik bileşim ve ilgili sınır eğrileri

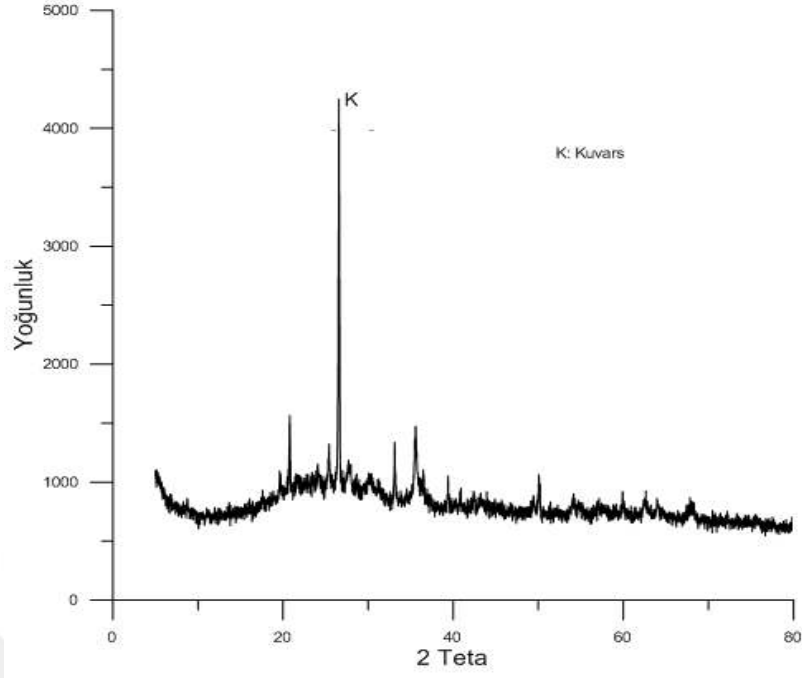
Pomza ve perlit agregalarına ilişkin kimyasal analizler Tablo 3.4’de verilmektedir. Söz konusu analizler Kanada’da bulunan ACME Lab. Bureau Veritas mineral laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Pomza ve perlit agregalarının XRD analizleri Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezinde yaptırılmıştır. Şekil 3.5’de pomza agregasına ilişkin XRD analizinden görüldüğü üzere pomzanın 17-38° arasında SiO₂’den oluşan amorf yapıya sahip olduğu görülmektedir. Şekil 3.6’da perlit agregasına ilişkin XRD analizi verilmektedir.

Tablo 3.4. Perlit ve pomza agregalarına ilişkin kimyasal analizler

Kimyasal Bileşim (%)	Perlit	Pomza
SiO ₂	72.05	71.21
Al ₂ O ₃	13.09	12.37
Fe ₂ O ₃	1.53	1.44
MgO	0.39	0.11
CaO	1.34	0.77
Na ₂ O	3.91	3.62
K ₂ O	4.18	4.86
Ba	0.02	0.01
Cr ₂ O ₃	0.01	0.01
MnO	0.07	0.07
SO ₃	0.015	0.067
P ₂ O ₅	0.01	<0.01
Sr	0.003	<0.002
TiO ₂	0.05	0.09
Kızdırma Kaybı	3.0	4.4



Şekil 3.5. Pomza agregasına ilişkin XRD analizi



Şekil 3.6. Perlit agregasına ilişkin XRD analizi

3.1.2. Çimento

Çalışmada Trabzon Aşkale Çimento Fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 R tip çimento kullanılmıştır. Çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler Tablo 3.5’de verilmektedir.

Tablo 3.5. Kullanılan çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler

Kimyasal Özellikler		Fiziksel ve Mekanik Özellikler		
Bileşenler	(%)	45 µm elek üstü kalan (%)		9.8
SiO ₂	19.46	90 µm elek üstü kalan (%)		1.0
Al ₂ O ₃	5.11	Özgül Yüzey (Blaine) (m ² /kg)		412.6
Fe ₂ O ₃	3.31	Özgül Ağırlık (g/cm ³)		3.12
CaO	60.23	Priz Süresi (Vicat) (dak.)	Başlangıç	140
MgO	2.08		Bitiş	200
SO ₃	3.05	Su İhtiyacı (%)		29.2
Na ₂ O	0.27	Hacim Genleşmesi (mm)		1.0
K ₂ O	0.69	Basınç Dayanımı (MPa)	2 gün	28.0
Cl ⁻	0.02		7 gün	40.4
Kızdırma Kaybı	3.00		28 gün	51.5

3.1.3. Su

Deneysel çalışmada karışım suyu olarak Trabzon ili şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.4. Mineral Katkılar

Çalışma kapsamında uçucu kül ve metakaolin olmak üzere iki tür mineral katkı kullanılmıştır. Uçucu kül Seyitömer termik santralinden temin edilmiştir. Metakaolin ise özel bir şirket aracılığıyla temin edilmiştir. Metakaolin ve uçucu küle ait XRF analizleri Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında yaptırılmış olup ilgili analizler Tablo 3.6’da verilmektedir.

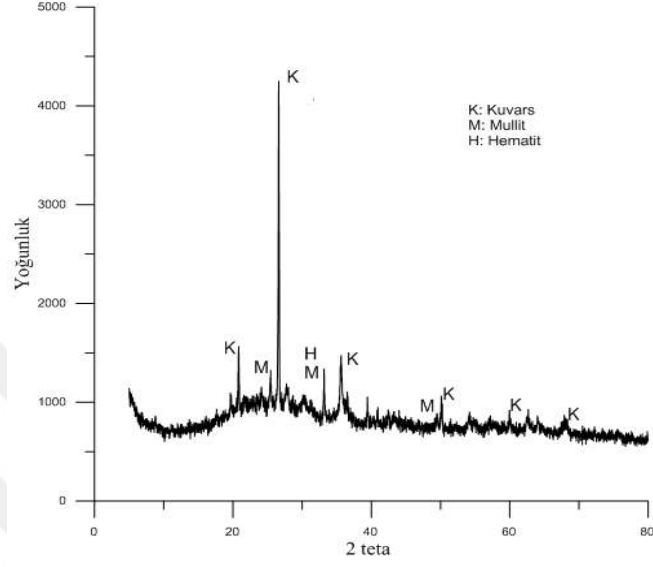
Tablo 3.6. Uçucu kül ve metakaoline ilişkin kimyasal özellikler

Kimyasal Bileşim (%)	Uçucu kül	Metakaolin
SiO ₂	49.4	51.4
Al ₂ O ₃	19.9	45.2
Fe ₂ O ₃	11.3	0.702
CaO	4.35	0.301
V ₂ O ₅	-	0.282
K ₂ O	2.50	0.122
SnO ₂	-	0.0504
P ₂ O ₅	0.120	0.0824
SrO	0.0315	0.0166
TiO ₂	0.811	1.88
SO ₃	1.73	-

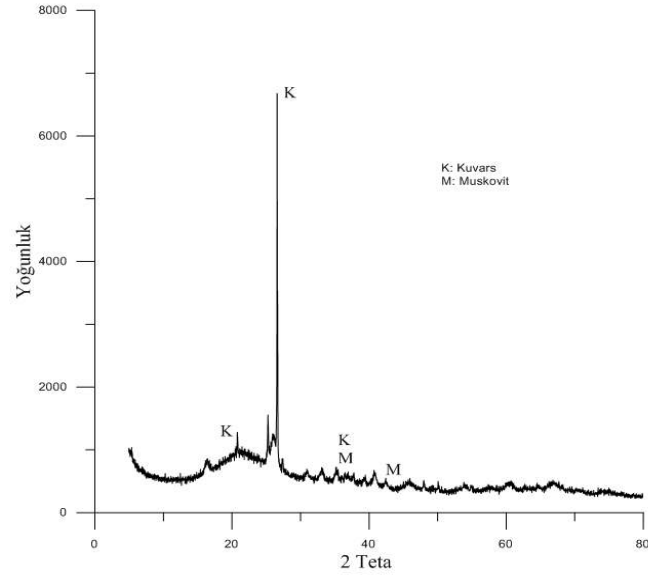
Uçucu külün CaO içeriği %10’nun altında olduğu için TS EN 197-1’e göre V sınıfı (silisli uçucu kül) uçucu küldür. Uçucu külden SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ miktarı yaklaşık %81 mertebesinde olup CaO içeriği %10’nun altında olduğu için ASTM C 618 standardı uyarınca F sınıfı uçucu kül sınıfında yer almaktadır. TS EN 450-1 standardı uçucu külden SO₃ miktarını %3 olarak sınırlandırmıştır.

Uçucu kül ve metakaoline ait XRD analizleri Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezinde yaptırılmıştır. Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de uçucu kül ve metakaoline ait XRD analizleri verilmektedir. Seyitömer uçucu külünde başlıca mineral kuvars olup XRF analizi sonucu yüksek çıkan SiO₂ içeriği

ile uyumludur. Bunun yanı sıra uçucu kül yapısında düşük miktarlarda mullit ve hematit kristalleri de bulunmaktadır. Bulgular daha önce yapılmış çalışmalarda elde edilen bulgularla uyumludur (Türker vd. 2009, Yılmaz, 2015).



Şekil 3.7. Seyitömer uçucu külüne ait XRD analizi



Şekil 3.8. Metakaoline ait XRD analizi

3.1.5. Kimyasal Katkı

Çalışmada polikarboksilik eter esaslı ikinci nesil süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Prospektüsünde 100 kg çimento için 0.8-1.5 kg arasında kullanımı önerilmektedir. Kimyasal katkıya ilişkin özellikler Tablo 3.7’de verilmektedir.

Tablo 3.7. Kimyasal katkı maddesine ait özellikler

Görüntü	Kahverengi-sıvı
Özgül ağırlık (20°C’de)	1.069- 1.109 kg/lt
pH değeri (%)	5-7
Alkali içeriği (%)	≤ 3.00 (kütlece)
Klorür iyonu içeriği	≤ 0.10 (kütlece)

3.2. Gerçekleştirilen Ön Çalışmalar

Gerçekleştirilen ön çalışma ile ilk aşamada ilgili standardın hafif beton tanımına uygun düşecek şekilde birim ağırlığa sahip betonlar üretilmiş ve hedef dayanıma ulaşmak amaçlanmıştır. Bu amaçla çok sayıda ön deney çalışması gerçekleştirilmiş ve farklı birim ağırlıkta taşıyıcı hafif betonlar üretilmiştir. Deneylerde başlangıç olarak pomza agregası %20 oranında, perlit agregası %30 oranında ve normal ince agrega %50 oranında kullanılarak taşıyıcı hafif betonlar üretilmiştir. Üretilen taşıyıcı hafif betonların birim ağırlıkları 1900 kg/m^3 değerini aşmazken, dayanımlar taşıyıcı hafif beton basınç dayanımı için sınır değer olarak verilen 17 MPa’nın altında kalmıştır. Üretilen betonlarda 7 günlük basınç dayanımı ortalama 12.45 MPa seviyesinde iken, 28 günlük basınç dayanımları 16.14 MPa mertebesinde kalmıştır. İkinci aşamada hedef dayanıma ulaşacak şekilde birim ağırlık artırılarak üretimler gerçekleştirilmiştir. Bunun için pomza agregasının karışımdaki oranı azaltılırken, perlit agregası oranı artırılmıştır. Kıvamda meydana gelen değişim taşıyıcı hafif beton üretiminde karşılaşılan en önemli sorun olmuştur. Üretimlerde öncelikle pomza agregası suya doygun hale getirilmiş ve bu şekilde agreganın karışım suyundan emmesi önlenmiştir. Üçüncü ve son aşamada %20 pomza agregası, %30 perlit agregası ve %50 normal ince agrega kullanılarak iki farklı dozajda karışımlar hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0.4 olarak sabit tutulmuştur. Üretimlerde çökme 10-12 cm olacak şekilde bir süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı

maddesi kullanılmıştır. 350 kg/m³ dozajlı betonun 7 günlük basınç dayanımı ortalama 21.54 MPa iken 450 kg/m³ dozajlı beton için bu değer ortalama 22.71 MPa çıkmıştır. 350 kg/m³ dozajlı betonun birim ağırlığı 1875.56 kg/m³ olarak belirlenirken 450 kg/m³ dozajlı betonun birim ağırlığı ise 1862 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu değerler ilgili standardın taşıyıcı hafif beton için öngördüğü kriterlere uygun olduğundan bundan böyle bu değerler dikkate alınarak beton üretimlerine karar verilmiştir. Bu aşamadan sonra uçucu kül ve metakaolin kullanarak daha düşük birim ağırlıkta ve daha yüksek dayanımda beton üretimleri hedeflenmiştir.

3.3. Taşıyıcı Hafif Beton Tasarımı, Hazırlanması ve Üretimi

Çalışma kapsamında basınç dayanımı minimum 21 MPa olacak şekilde ve birim ağırlığı 2000 kg/m³'ü aşmayan taşıyıcı hafif beton üretimi hedeflenmiştir. Bunun için gerçekleştirilen ön çalışma ile 1 m³ hafif beton üretimi için gerekli malzeme miktarları mutlak hacim metodu ile belirlenmiştir.

Beton üretiminde 60 lt kapasiteli düşey eksenli bir beton karıştırıcısı kullanılmıştır. Her bir seri üretim için üç kez olmak üzere 35 lt'lik karışımlar hazırlanmıştır. Dökümler öncesi karıştırıcı kazanı ıslatılarak süzdürülmüştür.

Karıştırma sürecinden önce pomza agregasına 30 dk boyunca ön emdirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ön emdirme işleminin nedeni pomza agregasının karışım suyundan emmesini engellemektir. Karıştırma sürecinde karıştırıcıya ilk önce ön emdirme işlemi gerçekleştirilmiş pomza agregası (4-16 mm) konulmuştur. Pomza agregası ilavesi ardından ham perlit agregası ve ince agrega karıştırıcıya konularak karıştırma işlemine devam edilmiştir. Agregaların karıştırıcıya doldurulması işlemini takiben karışıma sırasıyla çimento, uçucu kül, metakaolin ve karışım suyu ilave edilerek karıştırma süreci tamamlanmıştır.

Hedef çökme için yapılan ön çalışmada belirlenen miktarda kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır. Tüm üretimlerde su/bağlayıcı (s/b) oranı 0.40 olacak şekilde ve karıştırma süresi sabit tutulmaya çalışılmıştır. Şekil 3.9'da karışımlardan bir tanesinin kalıplara dökümü öncesi karıştırıcıda betonun durumu ve beton üretimi sırasındaki hazırlıklar görülmektedir. Taze beton kalıplara iki aşamada doldurulmuş ve ilgili standartta belirtildiği gibi yerleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Son olarak kalıpların üst yüzeyi mala ile düzeltilerek üretim tamamlanmıştır. Numuneler kalıplarında 24 saat bekledikten sonra

deney gününe kadar standart kür koşulunda tutulmuştur. Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de üretim sonrası numuneler kalıp içinde ve kalıplarından çıkarılmış halleri görülmektedir.



Şekil 3.9. Üretimlerde kullanılan mikser, üretilen taze beton ve betonun kalıplara alınması



Şekil 3.10. Üretim sonrası kalıplarında numuneler



Şekil 3.11. Kalıplarından çıkarılmış numuneler

Şekil 3.12’de ısı iletkenlik katsayısı ve basınç dayanımı için hazırlanan numuneler gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Isı iletkenlik katsayısı ve basınç dayanımı için hazırlanan numuneler

Tablo 3.8’de çalışmada gerçekleştirilen üretimler verilmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada 350 ve 450 kg/m³ olmak üzere iki dozaj denenmiştir. Kodlamada REF mineral katkı içermeyen referans betonu, UK ve MK sırasıyla uçucu kül ve metakaolini ifade etmektedir. 350-UKMK ve 450-UKMK kodlaması çimento ile ikame edilen iki mineral katkının karışımda birlikte kullanıldığını göstermektedir. Kodun sonunda yer alan rakam ilgili mineral katkının kullanım oranını ifade etmektedir. NB normal ağırlıklı betonu ifade etmektedir.

Tablo 3.8. Deneysel çalışma kapsamında gerçekleştirilen üretimler (kg/m³)

Üretim Kodu	Çimento	Su	UK	MK	Pomza	Perlit	İri-İnce Agrega	Katkı
350-REF	350	140	-	-	280	419	-/700	4.66
350-UK10	315	140	35	-	277	417	-/697	4.33
350-UK25	262.5	140	87.5	-	210.7	389	-/648	4.17
350-MK10	315	140	-	35	279	420	-/699	4.57
350-MK15	297.5	140	-	52.5	225.37	408	-/683	5.43
350-UKMK5	315	140	17.5	17.5	278	419	-/697	5.07
450-REF	450	180	-	-	251	376	-/630	3.67
450-UK10	415	180	45	-	249	370	-/620	3.43
450-UK25	337.5	180	112.5	-	193.05	350	-/585	2.91
450-MK10	415	180	-	45	245	379	-/630	3.83
450-MK15	382.5	180	-	67.5	190	358	-/700	3.14
450-UKMK5	415	180	22.5	22.5	245	377	-/628	3.76
NAB	350	210	-	-	-	-	1030/689	4.90

3.4. Taze Beton Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler

3.4.1. Çökme (Slump) Deneyi

Taze betonun işlenebilirliğini belirlemek amacıyla TS EN 12390-2 uyarınca çökme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyde alt taban çapı 200 mm, üst taban çapı 100 mm ve yüksekliği 300 mm olan metal standart koni kullanılmıştır. Taze beton çökme konisine üç eşit hacimde doldurulmuş ve her bir tabaka şişleme çubuğu ile 25'er kez şişlenerek sıkıştırılmıştır. Nihayetinde çökme konisinin üstü mala ile düzeltildikten sonra çökme konisi tutamaklarından yavaşça yukarı çekilerek koni ile betonun üst yüzeyi arasındaki mesafe çökme miktarı olarak kayıt altına alınmıştır. Şekil 3.13'de çökme konisi ve deneyin gerçekleştirilmesi görülmektedir.



Şekil 3.13. Çökme konisi ve çökme deneyi

3.4.2. Birim Ağırlık Deneyi

Taze haldeki betonun birim ağırlığını ölçmek amacıyla 15 cm küp kalıplar kullanılmıştır. Küpler iki aşamada taze beton ile doldurulmuş ve her bir tabaka 25'er kez şişlenerek sıkılanmıştır. Küpün darası düşürülerek belirlenen beton ağırlığı küpün hacmine bölünerek taze betonun birim ağırlığı belirlenmiştir.

3.5. Sertleşmiş Beton Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler

Çalışma kapsamında basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, su emme, porozite, kılcal su emme, hızlı klorür geçirimliliği, aşınma ve ısı iletkenlik katsayısı tayini deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.5.1. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyi TS EN 12390-3 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyde laboratuvarda mevcut 250 ton kapasiteli pres kullanılmıştır. Ortalama basınç dayanımını belirlemek amacıyla her bir üretim için 5'er adet 15 cm küp numune kullanılmıştır. Basınç dayanımı değerlendirmesi 7, 28 ve 90 günlük beton için

yapılmıştır. Yükleme hızı 0.6 MPa/s olacak şekilde sabit tutulmuştur. Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’de basınç dayanımı deneyi için kullanılan pres makinesi ve beton numune örneği görülmektedir.



Şekil 3.14. Basınç dayanımı deneyinde kullanılan pres ve deney düzeneği



Şekil 3.15. Basınç dayanımı deneyinin gerçekleştirilmesi

3.5.2.Eğilme Dayanımı Deneyi

Çalışmada gerçekleştirilen eğilme dayanımı deneyi TS EN 12390-5 standardına uyarınca gerçekleştirilmiştir. Deney kapsamında 40x40x160 mm boyutunda prizma numuneler kullanılmıştır. Her bir üretim için iki adet prizma orta noktadan tekil yük uygulamak suretiyle gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımı değerlendirmesi 7 ve 28 günlük prizmalar için yapılmıştır. Eğilme dayanımı hesabında kullanılan bağıntı aşağıda verilmektedir.

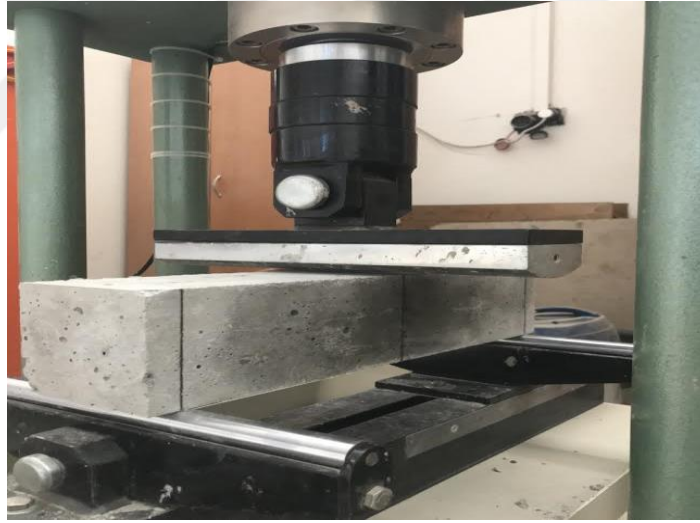
$$f = \frac{3 \times F \times L}{2 \times b \times d^2} \quad (3.1)$$

Burada, f eğilme dayanımını (MPa), F maksimum kırılma yükünü (N), L mesnetler arası mesafeyi (mm), b ve d numunenin en kesit boyutlarını (mm) göstermektedir.

Şekil 3.16' ve Şekil 3.17'de eğilme deneyi düzeneği ve deney numunesinin düzenekte konumlandırılması görülmektedir.



Şekil 3.16. Eğilme deneyi düzeneği



Şekil 3.17. Eğilme deney düzeneğinde numunenin konumlandırılması

3.5.3. Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi

Çalışmada gerçekleştirilen yarmada çekme dayanımı deneyi TS EN 12390-6 standardına uyarınca gerçekleştirilmiştir. Deneyde 100 mm çapında ve 200 mm yüksekliğinde silindir numuneler kullanılmıştır. Her bir karışım için iki adet silindir numune üretilmiştir. Silindir numuneyi ortadan yarmak için 3 mm kalınlığında ve 25 mm

eninde kontrplak çıtalar kullanılmıştır. 28 gün sonunda numuneler üzerinde gerçekleştirilen yarmada çekme dayanımını hesaplamada kullanılan bağıntı aşağıda verilmektedir.

$$\text{Çekme gerilmesi} = \frac{2 \times P}{\pi \times L \times D} \quad (3.2)$$

Burada, P kırılma anındaki yükü (N), L numunenin boyunu (mm), D numunenin çapını (mm) göstermektedir.

Şekil 3.18’de gerçekleştirilen yarmada çekme deneyinde kullanılan düzenek ve deney sonunda numunenin son durumu görülmektedir.



Şekil 3.18. Yarmada çekme deneyi düzeneği ve deney sonunda numunenin durumu

3.5.4. Su Emme Oranı ve Porozitenin Belirlenmesi

Sertleşmiş betonda su emme oranı TS EN 12390-7 standardınca belirlenmiştir. Numuneler etüvde $105 \pm 5^\circ\text{C}$ ’de değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuş ve kuru ağırlıkları kayıt altına alınmıştır. Daha sonra numuneler 48 saat süresince suda bekletilerek doymun hale gelmesi sağlanmıştır. Doymun hale gelen beton numunelerin yüzeyi kurutularak doymun yüzey kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Devamında beton numunelerin su içinde asılı ağırlıkları belirlenmiştir. Beton numunelerin fırın kurusu, doymun yüzey kuru

ve su içinde ağırlıkları belirlenerek su emmeleri ve poroziteleri belirlenmiştir. Bu amaçla 10 cm küp numuneler kullanılmıştır. Su emme oranı ve porozitenin belirlenmesinde aşağıdaki bağıntılar kullanılmıştır.

$$w = ((W_{DYK} - W_{FK}) / W_{FK}) \times 100 \quad (3.3)$$

Burada, w su emme oranını (%), W_{DYK} numunenin doymuş yüzey kuru ağırlığını (g), W_{FK} numunenin fırın kurusu ağırlığını (g) göstermektedir.

$$p = (W_{DYK} - W_{FK}) / (W_{DYK} - W_{sudaasılı}) \times 100 \quad (3.4)$$

Burada, p porozite (%), W_{DYK} numunenin doymuş yüzey kuru yüzey ağırlığı (g), W_{FK} numunenin fırın kurusu ağırlığı (g) ve $W_{sudaasılı}$ numunenin su içinde asılı ağırlığı (g)'dir.

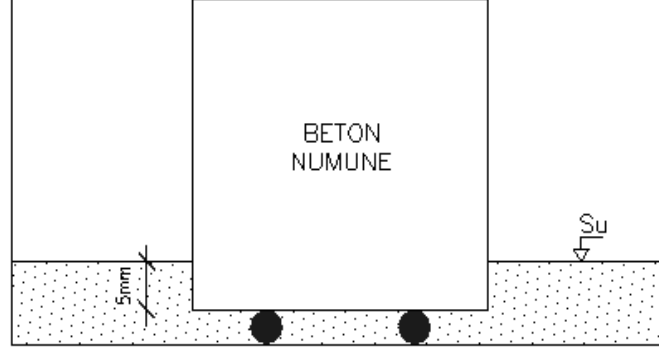
3.5.5. Kılcal Su Emme Deneyi

Sahip olduğu kılcal boşluklar sayesinde, beton suyu kapiler olarak boşluklarına çeker. Betonun emdiği su miktarı betonun durabilite özelliklerini etkilediği için bu özellik durabilite açısından önemlidir. Kılcal su emme deneyi beton numune yalnızca alt yüzeyinden su emecek şekilde (Yan yüzeylerden su girişi engellenir) bir düzeneğe sayesinde gerçekleştirilir. Çalışmada kılcal su emme deneyi ASTM C1585 standardı uyarınca gerçekleştirilmiştir. Deney için 10 cm küp numuneler kullanılmıştır. Beton numuneler deney öncesi 48 saat 50-60°C'de kurutulmuş ve ardından 20°C'de deney anına kadar bekletilmiştir. Numunelerin kuru ağırlıkları tartılarak belirlendikten sonra yan yüzlerinden su girişini önlemek amacıyla bandajla yalıtılmıştır. Daha sonra numunelerin alt yüzleri yaklaşık 5 mm kadar suya batacak şekilde bir deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Deneyin gerçekleştirilmesinde 5, 10, 20, 30, 45, 60, 120, 1440 dakikalık süreler sonunda emilen su miktarı numuneler tartılarak belirlenmiştir. Kılcallık katsayısı hesabı için aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır. Kılcallık katsayısı Q/A ile $\sqrt{t}$ arasında çizilen ilişkinin lineer kısmın eğimi olarak belirlenmektedir.

$$\frac{Q}{A} = k \times \sqrt{t} \quad (3.5)$$

Burada, Q emilen su miktarı (g), A numunenin suya değen kesit alanı (mm^2), k kılcallık katsayısı ve t deney başlangıcından son okuma arasında geçen süre (s)'dir.

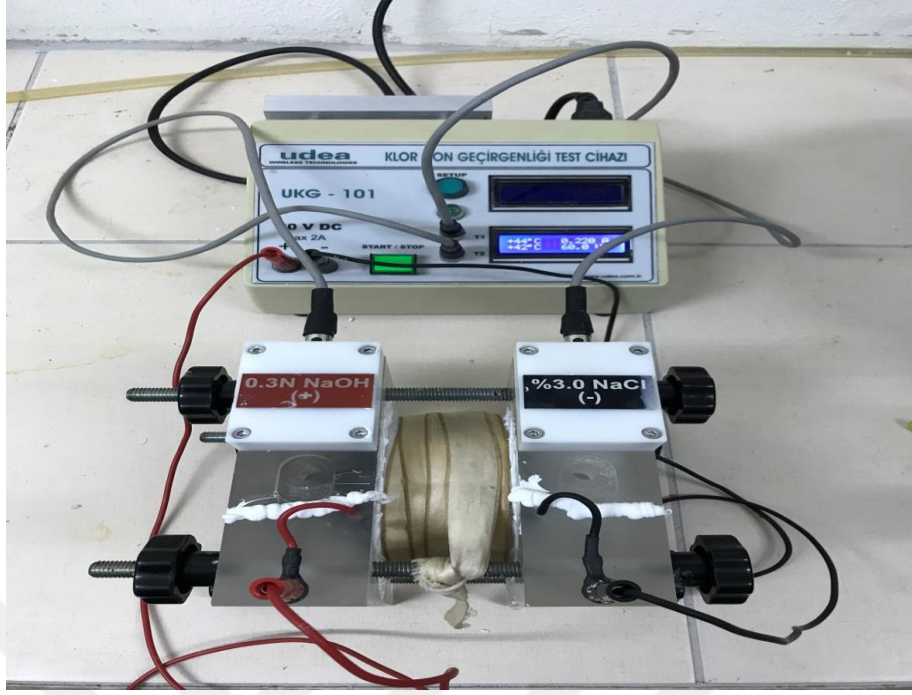
Şekil 3.19'da gerçekleştirilen kılcal su emme deneyi düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 3.19. Kılcal su emme deneyi düzeneği

3.5.6. Hızlı Klorür Geçirirnililiği Deneyi

Hızlı klorür geçirirnililiği deneyi ASTM C1202 standardı uyarınca gerçekleştirilmiştir. Deneyde çözeltilerin beton numuneye nüfuz etmesine göre elektriksel iletkenlikteki değişim belirlenmektedir. Deney için 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde silindirik numunelerden kesilerek elde edilen 5 cm kalınlığında 10 cm çapında numuneler kullanılmaktadır. Buna göre, standart kür ortamında 28 gün tutulan numunelerin orta kısmından 5 ± 0.3 cm kalınlığında kesilerek çıkarılan numunelerin yüzeylerinin kuruması için 30 dakika laboratuvar ortamında bekletilir. Yüzeyleri kurutulan numuneler test hücresinde mevcut O-ring halkalarına yerleştirilmektedir. Hücrelerin birinde 0.3 N NaOH diğesinde %3 NaCl çözeltisi doldurulmaktadır. 60 V potansiyel fark oluşturulan kablolardan biri içinde NaOH çözeltisi bulunan (+) kutuplu hücreye diğeri ise içinde NaCl çözeltisi bulunan (-) kutuplu hücreye bağlandıktan sonra hücrelerdeki çözeltilere temas etmeyen numune yüzeyi silikon sürülerek kaplanmaktadır. Hızlı klorür geçirirnililiği deney düzeneği Şekil 3.20'de gösterilmektedir.



Şekil 3.20. Hızlı klorür geçirimsizliği deney düzeneği

3.5.7. Aşınma (Böhme) Deneyi

Aşınma (Böhme) deneyi TS 699 standardı uyarınca gerçekleştirilmiş olup deneyde 71 mm küp numuneler kullanılmaktadır. Birim ağırlıkları belirlendikten sonra numuneler 70°C'de 48 saat boyunca etüvde bekletilmektedir. Etüvden çıkarılan numuneler klimatize odada soğutulması akabinde Böhme cihazının aşındırıcı diski üzerine yerleştirilmektedir. Diskin üzerine zımpara tozu serilerek 22 çevrim uygulamak suretiyle numune aşınmaya maruz bırakılmaktadır. Her bir çevrim sonunda numune 90° döndürüldükten sonra tekrar 20±1 g zımpara tozu serilerek deney sürdürülmektedir. Her bir numune için 22 çevrim 16 kez tekrarlanmaktadır. Deney sonunda oluşan kütle kaybını hesaplamada aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır. Aşınma (Böhme) cihazı Şekil 3.21'de verilmektedir.

$$D_v = D_m / \gamma_R \quad (3.6)$$

Burada, D_v hacimsel kaybı, D_m 16 çevrim sonundaki ağırlık kaybı ve γ_R numunenin birim ağırlığıdır.



Şekil 3.21. Aşınma (Böhme) cihazı

Deney sonunda numunenin aşınan yüzeyine ilişkin görüntüler Şekil 3.22’de verilmektedir.



Şekil 3.22. Deney sonunda numune yüzeylerinin görünümü

3.5.8 Basınç Altında Su İşleme Derinliği Tayini

Basınç altında su işleme derinliği tayini deneyi TS EN 12390-8 standardı uyarınca gerçekleştirilmektedir. İlgili standart suda kür görmüş sertleşmiş betonun basınç altında su işleme (nüfuz etme) derinliği tayini için uygulanan deney yöntemini kapsamaktadır. Deney 28 gün standart kür gören iki adet 15 cm küp numune üzerinde gerçekleştirilmektedir. 28 gün sonunda standart kür havuzundan çıkartılan numuneler iki gün laboratuvar ortamında

kurutulduktan sonra deneye tabi tutulmaktadır. Şekil 3.23’de ilgili deney düzeneği görülmektedir. Deneyde basınçlı suya maruz kalan numune yüzeyleri tel fırça ile temizlenmektedir. 72 saat 5 bar su basıncına maruz bırakılan numune preste iki parçaya bölünmektedir. Daha sonra yarılmış numune yüzeyinde maksimum su işleme derinliği işaretlenerek belirlenmektedir. Ortadan yarılan numune Şekil 3.24’de görülmektedir.



Şekil 3.23. Basınç altında su işleme derinliği tayini deney düzeneği

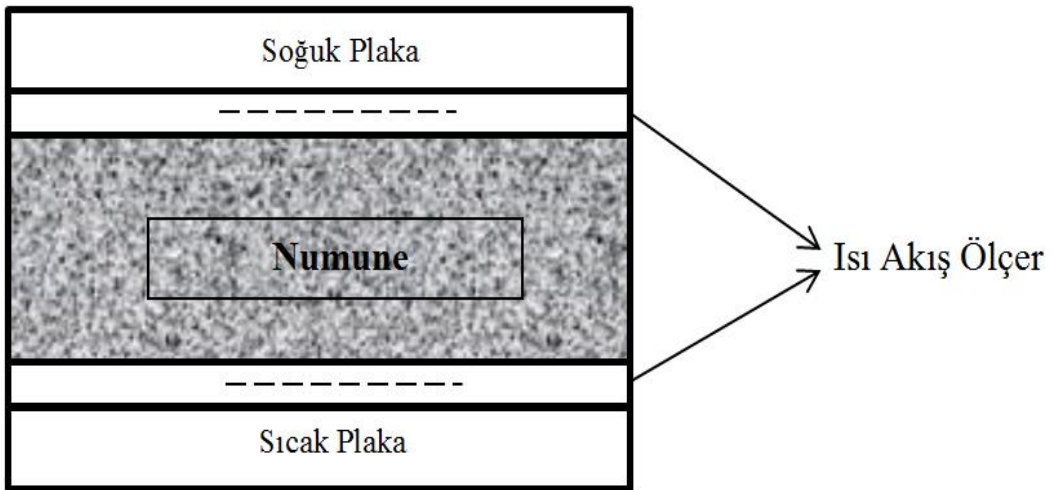


Şekil 3.24. Su işleme derinliği tayini deneyi sonrası beton örnek kesitleri

3.5.9. Isı iletkenlik Deneyi

Isı iletkenlik deneyi Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada ASTM C518, JIS A1412 ve ISO 8301 standartlarına uygun ölçüm yapan LINSEIS HFM300/3 marka cihaz kullanılmıştır. Çalışma kapsamında ısı iletkenlik katsayısını belirlemek için 5×30×30 cm ebatında üretilen plak numuneler kullanılmıştır. Numunelerin yüzey pürüzlülüğü ısı iletkenlik katsayısını belirlemede önemli olduğundan deney öncesi numunelerin yüzeyleri düzgün ve pürüzsüz hale getirilmiştir. Numuneler ısı iletkenlik deneyi öncesi 100-105°C sıcaklıkta değişmez ağırlığa gelinceye kadar etüvde kurutulmuştur.

Isı iletkenlik deneyi ASTM C518 (Isı Akış Ölçer Prensibi) standardı uyarınca gerçekleştirilmiştir. Deneysel gerçeklemede kullanılan cihaz sıcak ve soğuk olmak üzere iki plakaya sahiptir. Plakalar istenilen sıcaklıkta ayarlanabilmektedir. Deney numuneleri sıcak ve soğuk plakalar arasına yerleştirilmekte ve numuneler üzerinden ısı akışı geçişi sağlanmaktadır. Isı iletkenlik katsayısı, ısı akışı ve numune yüzeyleri arasındaki ortalama sıcaklık farkı dikkate alınarak hesaplanmaktadır (Klarsfeld, 1984). Gerçekleştirilen deneysel çalışmada sıcak plaka 30°C ve soğuk plaka 10°C olacak şekilde ayarlanmıştır. Isı akışının gerçekleşebilmesi için cihazın diğer tüm kenarları yalıtılmıştır. ASTM C 518 standardında ısı akış ölçer prensibinin çeşitli kalibrasyonları mevcut olup deneysel çalışmada gerçekleştirilen ısı akış ölçer çalışma prensibi şematik olarak Şekil 3.25’de verilmektedir.



Şekil 3.25. Isı akış ölçer çalışma prensibinin şematik gösterimi

Deneysel gerçekleme öncesi ısı iletkenlik katsayısı bilinen bir referans numune kullanılarak cihazın kılbrasyonu yapılmıştır. Isı iletkenlik katsayısını belirlemede Fourier ısı denklemi kullanılmaktadır.

$$q = -k \times A \times \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.7)$$

Burada, q ısı akışı (W/m^2), k ısı iletkenlik katsayısı, A alan (m^2), ΔT sıcaklık farkı ve Δx numune kalınlığıdır.

Çalışmada farklı karışım lar için ısı iletkenlik katsayısını belirlemede kullanılan cihaz ve kullanılan numuneler şekil 3.26’da ve şekil 3.27’de verilmektedir.



şekil 3.26. Isı iletkenlik katsayısı ölçümünde kullanılan cihaz



Şekil 3.27. Isı iletkenlik katsayısı ölçümünde kullanılan numuneler

3.6. DesignBuilder Enerji Simülasyon Yazılımı

DesignBuilder v.6.1.3 Dinamik bina enerji simülasyon yazılımıdır. Dairelerde aylık, yıllık ısıtma ve soğutma yüklerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu yazılım birden çok bölge, farklı iklim ve kullanım programları ile ısıtma performansı hesabı için literatürde yaygın olarak kabul gören açık kaynaklı dinamik bina enerji simülasyon yazılımı olan EnergyPlus'ı kullanmaktadır. Kullanıcılar bu yazılım ile doluluk programları, ısıtma ve soğutma çalışma süreleri, iklimlendirme sistemi, aydınlatma gibi binanın ısıtma performansına etkiyen parametrelere karar verebilmektedir (URL-12, 2021).

4. DENEY SONUÇLARI

Deneysel çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylere ilişkin elde edilen sonuçlar tablolar halinde çalışmanın bu bölümde sunulmaktadır.

4.1. Taze Beton Deney Sonuçları

4.1.1. Çökme (Slump)

Üretilen taşıyıcı hafif betonların çökmesi 10-12 cm mertebesinde olacak şekilde bir süperakışkanlaştırıcı ile sabit tutulmaya çalışılmıştır. Buna göre beton karışımları için ölçülen çökme değerleri Tablo 4.1’de verilmektedir.

Tablo 4.1. Karışımlara ilişkin ölçülen çökme değerleri

Karışımlar	Çökme (cm)
350-REF	11
350-UK10	11
350-UK25	12
350-MK10	10
350-MK15	10
350-UKMK5	11
450-REF	11
450-UK10	12
450-UK25	12
450-MK10	10
450-MK15	10
450-UKMK5	10

Üretimlerde kullanılan F tipi uçucu külün işlenebilirliği iyileştirici etkisi sayesinde hedef çökme için daha az miktarda kimyasal katkı kullanılmıştır. Uçucu kül taneleri küresel olmaları nedeniyle agrega-çimento hamur arasındaki sürtünmeyi azaltmakta ve böylece taze betonun daha akışkan halde gelmesine katkı sağlamaktadır (Demirboğa vd. 2001, Lo vd. 2004, Akçazoğlu ve Atış, 2011).

Metakaolinin kullanıldığı karışımlarda ise uçucu külün aksine taze betonun işlenebilirliğinde belirgin bir kötüleşme gözlemlenmiştir. Eşit çökme elde etmek için daha

fazla miktarda süperakışkanlaştırıcıya gereksinim duyulmuştur. Bunun nedeni çimentoya kıyasla metakaolinin daha ince olmasındandır (Karahan vd. 2012).

4.1.2. Birim Ağırlık

Üretilen taşıyıcı hafif betonlara ilişkin ölçülen birim hacim ağırlıklar Tablo 4.2’de verilmektedir.

Tablo 4.2. Karışımlara ilişkin ölçülen birim ağırlıklar

Karışımlar	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Teorik Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)
350-REF	1870	1894
350-UK10	1860	1885
350-UK25	1728	1742
350-MK10	1865	1893
350-MK15	1808	1812
350-UKMK5	1867	1889
450-REF	1885	1891
450-UK10	1860	1882
450-UK25	1735	1761
450-MK10	1865	1889
450-MK15	1860	1881
450-UKMK5	1869	1885
NB	2275	2283

Uçucu kül ve metakaolinin özgül ağırlıkları çimentoya kıyasla daha küçük olduğundan bu mineral katkı maddeleri ile üretilen karışımların birim ağırlıkları daha düşüktür (Al-Sibahy ve Edwards, 2012). Birim ağırlıkta ölçülen en belirgin azalma %25 oranında uçucu kül içeren karışımda meydana gelmiş olduğu görülmektedir.

4.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

4.2.1. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Çalışmada üretilen beton karışımlarına ilişkin 7, 28 ve 90 gün sonunda ölçülen basınç dayanımları Tablo 4.3’de verilmektedir.

Tablo 4.3. Karışımlara ilişkin ölçülen basınç dayanımları

Karışımlar	7 Gün (MPa)	28 Gün (MPa)	90 Gün (MPa)
350-REF	19.68	21.69	23.50
350-UK10	21.38	21.04	24.44
350-UK25	15.64	23.05	25.25
350-MK10	19.57	25.80	27.44
350-MK15	21.27	26.47	27.73
350-UKMK5	18.42	24.35	27.80
450-REF	21.66	23.02	23.78
450-UK10	18.83	21.88	24.81
450-UK25	18.03	23.26	25.06
450-MK10	21.68	25.90	28.10
450-MK15	23.28	27.40	28.67
450-UKMK5	20.59	25.27	26.12

4.2.2.Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Çalışma kapsamında üretilen karışımlara ilişkin 7 ve 28 gün sonunda ölçülen eğilme dayanımları Tablo 4.4’de verilmektedir.

Tablo 4.4. Karışımlara ilişkin ölçülen eğilme dayanımları

Karışımlar	7 Gün (MPa)	28 Gün (MPa)
350-REF	3.30	3.49
350-UK10	3.14	3.72
350-UK25	1.84	3.79
350-MK10	3.44	3.79
350-MK15	3.16	4.04
350-UKMK5	3.68	4.38
450-REF	3.17	3.21
450-UK10	3.06	3.58
450-UK25	2.36	3.40
450-MK10	3.21	3.26
450-MK15	2.17	3.47
450-UKMK5	3.12	3.47

4.2.3. Yarmada Çekme Dayanımı Deney Sonuçları

Çalışmada 28 gün sonunda ölçülen yarmada çekme dayanımları Tablo 4.5’de verilmektedir.

Tablo 4.5. Karışımlara ilişkin ölçülen yarmada çekme dayanımları

Karışımlar	28 Gün (MPa)
350-REF	2.73
350-UK10	2.86
350-UK25	2.65
350-MK10	2.98
350-MK15	3.05
350-UKMK5	2.84
450-REF	2.77
450-UK10	2.64
450-UK25	1.91
450-MK10	2.78
450-MK15	2.86
450-UKMK5	2.70

4.2.4. Su Emme ve Porozite Ölçümleri

28 gün standart kür sonrası numuneler üzerinde ölçülen su emme ve porozite değerleri Tablo 4.6’da özetlenmektedir.

Tablo 4.6. Karışımlara ilişkin belirlenen su emme ve porozite değerleri

Karışımlar	Su Emme (%)	Porozite (%)
350-REF	6.45	10.96
350-UK10	5.55	9.52
350-UK25	6.32	10.90
350-MK10	5.24	9.13
350-MK15	5.22	8.72
350-UKMK5	5.47	9.41
450-REF	7.08	11.65
450-UK10	6.57	10.77
450-UK25	6.08	10.65
450-MK10	6.37	10.54
450-MK15	6.31	10.41
450-UKMK5	6.88	11.43

4.2.5. Kılcallık Katsayısı Ölçümleri

28 gün standart kür gören numuneler üzerinde ölçülen kılcallık katsayıları Tablo 4.7’de verilmektedir.

Tablo 4.7. Karışımlara ilişkin ölçülen kılcallık katsayıları

Karışımlar	Kılcallık katsayısı ($\text{mm/s}^{0.5} \times 10^{-3}$)
350-REF	3.70
350-UK10	3.13
350-UK25	2.90
350-MK10	3.30
350-MK15	3.20
350-UKMK5	3.65
450-REF	2.55
450-UK10	2.65
450-UK25	2.50
450-MK10	3.10
450-MK15	2.70
450-UKMK5	3.30

4.2.6. Hızlı Klorür Geçirirliğı Ölçümleri

Çalışma kapsamında üretilen numuneler üzerinde Coulomb cinsinden ölçülen hızlı klorür geçirirliğı değeri Tablo 4.8’de verilmektedir.

Tablo 4.8. Karışımlara ilişkin ölçülen hızlı klorür geçirirlilik değeri

Karışımlar	Geçen Yük (Coulomb)
350-REF.	3670
350-UK10	2494
350-UK25	1792
350-MK10	2772
350-MK15	2895
350-UKMK5	2595
450-REF.	3339
450-UK10	2016
450-UK25	1551
450-MK10	2581
450-MK15	2633
450-UKMK5	2521

4.2.7. Aşınma Deneyi Sonuçları

28 gün standart kür sonrası numuneler üzerinde ölçülen aşınma değeri Tablo 4.9’da verilmektedir. Üç adet numune üzerinde gerçekleştirilen aşınma deneyi öncesi

numune boyutları 71×71×71 mm iken deney sonrası ölçülen boyutlar ortalama 67×71×71 mm, 68×71×71 mm, 68.5×71×71 mm, 69×71×71 mm mertebesindedir.

Tablo 4.9. Ölçülen aşınma değerleri

Karışımlar	Hacimsel Kayıp (cm ³)
350-REF	18.23
350-UK10	21.88
350-UK25	16.98
350-MK10	14.90
350-MK15	15.13
350-UKMK5	13.74
450-REF	15.48
450-UK10	17.80
450-UK25	14.18
450-MK10	13.31
450-MK15	12.73
450-UKMK5	15.38

4.2.8. Basınç Altında Su İşleme Derinliği Ölçümleri

Her bir karışım için ölçülen basınç altında su işleme derinliği değerleri Tablo 4.10'da verilmektedir.

Tablo 4.10. Karışımlara ilişkin ölçülen su işleme derinliği değerleri

Karışımlar	Su İşleme Derinliği (cm)
350-REF	3.70
350-UK10	3.13
350-UK25	2.90
350-MK10	4.05
350-MK15	3.20
350-UKMK5	3.65
450-REF	2.55
450-UK10	2.65
450-UK25	2.50
450-MK10	3.10
450-MK15	2.70
450-UKMK5	3.30

4.2.9. Isı İletkenlik Katsayısı Ölçümleri

Çalışmada üretilen normal ağırlık beton ve taşıyıcı hafif betonlara ilişkin W/mK cinsinden ölçülen ısı iletkenlik katsayıları Tablo 4.11’de verilmektedir.

Tablo 4.11. Normal ve taşıyıcı hafif betonlara ilişkin ısı iletkenlik katsayıları

Karışımlar	Isı iletkenlik katsayısı (W/mK)
350-REF	0.63
350-UK10	0.57
350-UK25	0.504
350-MK10	0.615
350-MK15	0.551
350-UKMK5	0.59
450-REF	0.588
450-UK10	0.548
450-UK25	0.514
450-MK10	0.573
450-MK15	0.565
450-UKMK5	0.55
NAB	1.30

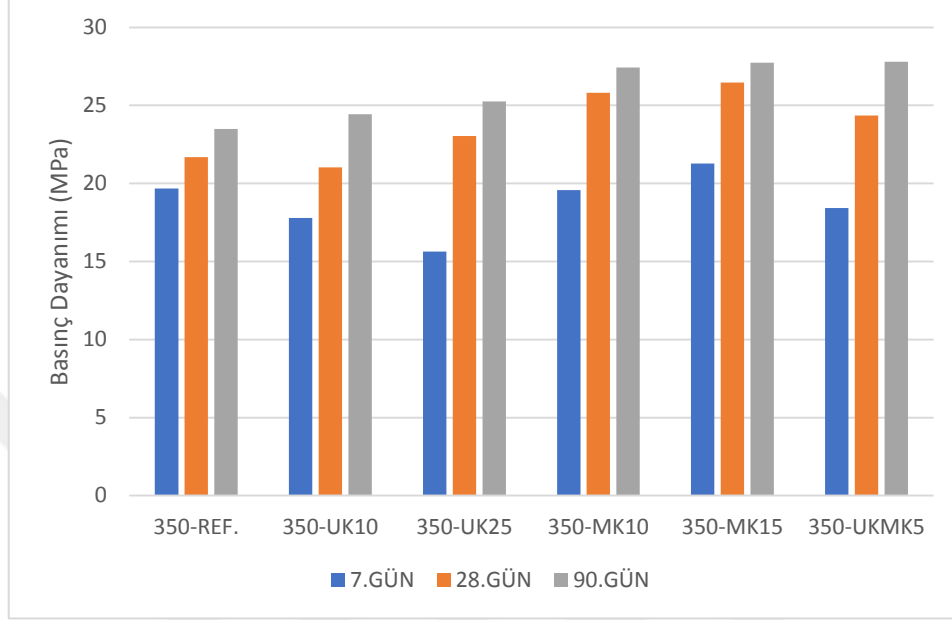
5. İRDELEME VE YORUM

5.1. Basınç Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Basınç dayanımını belirlemek için 15 cm küp numuneler kullanılmıştır. 350 ve 450 dozajlı hafif taşıyıcı betonları için 7, 28 ve 90 gün sonunda ölçülen basınç dayanımı değerleri Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de verilmektedir. Şekillerde işaretlenen her bir değer beş numune üzerinde ölçülen ortalama değerdir.

Şekil 5.1’de görüldüğü üzere 350 dozajlı betonların tümü taşıyıcı hafif beton için öngörülen 28 günlük minimum basınç dayanımı sınır koşulunu sağladıkları görülmektedir. 7 gün sonunda ölçülen basınç dayanımları dikkate alındığında, %10 ve %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların basınç dayanımları referans betona kıyasla yaklaşık %10 ve %21 oranlarında düşük olduğu görülür. Bu sonuç uçucu külün erken yaşlarda basınç dayanımı üzerindeki etkisinin zayıf olması ve pozzolanik etkinliğinin ileri yaşlarda ancak ortaya çıkması nedeniyle kaynaklanmaktadır. Bir çalışmada kür süresinin uçucu kül gibi çeşitli mineral katkıların performansı üzerine etkileyen önemli bir faktör olduğu vurgulanmaktadır (Carette vd, 1993). Mineral katkılı scoria agregası içeren yüksek dayanımlı hafif beton üzerine yapılan bir çalışmada %20 uçucu kül içeren hafif betonların 3 ve 7 günlük basınç dayanımlarının referans betona kıyasla daha düşük kaldığı ifade edilmektedir (Kılıç vd., 2003). Gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise %15 ve %25 oranlarında uçucu kül içeren hafif betonların 7 günlük basınç dayanımlarının referans betona kıyasla yaklaşık %10 mertebesinde daha düşük kaldığı belirtilmektedir. 28 günlük sonuçlar değerlendirildiğinde ise uçucu kül ikameli hafif betonların basınç dayanımlarının referans betonunun basınç dayanımına kıyasla daha yüksek olduğu belirtilmektedir (Lo vd., 2004). Gerçekleştirilen çalışmada %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun 7 gün sonundaki basınç dayanımı referans betonunun 7 gün sonundaki basınç dayanımına kıyasla %8 oranında daha yüksek çıkmıştır. %10 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun 7 gün sonundaki basınç dayanımı ise referans betonunki ile aynı mertebede kalmıştır. Hafif betonların mekanik ve termal özellikleri üzerine yapılan bir çalışmada %10 oranında metakaolin içeren hafif betonların 7 günlük basınç dayanımlarının referans betonunun 7 günlük basınç dayanımına kıyasla daha yüksek çıkmıştır (Al-Sibahy,

2012). Çalışmada %5 metakaolin ve %5 uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların 7 günlük basınç dayanımları 350 dozajlı referans betona kıyasla daha düşüktür.



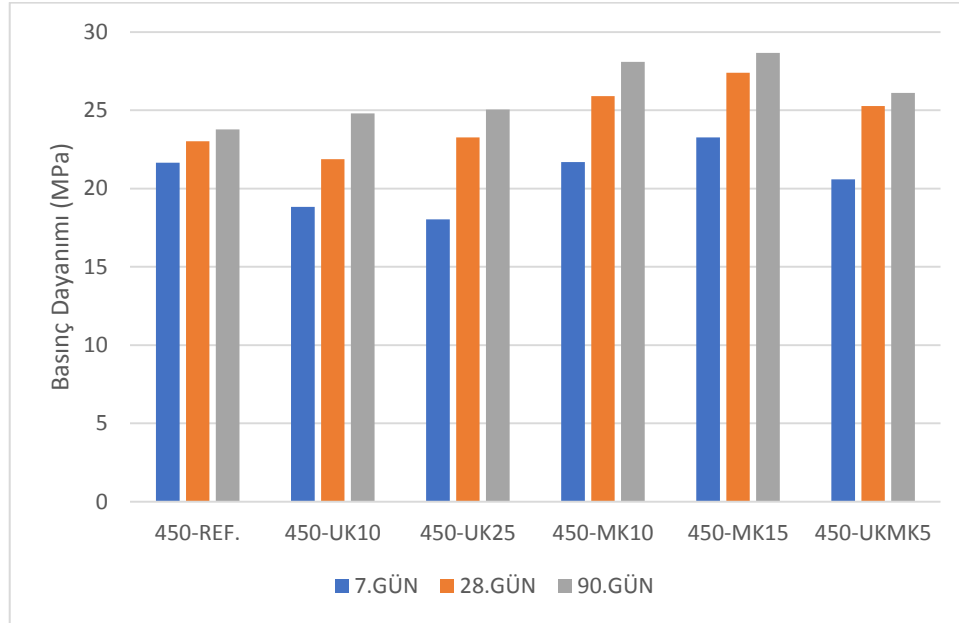
Şekil 5.1. 350 dozajlı betonlara ilişkin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları

28 günlük basınç dayanımları değerlendirildiğinde, %10 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların basınç dayanımlarının referans betonun basınç dayanımı ile aynı mertebede olduğu görülmektedir. Buna karşın %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların basınç dayanımları referans betonun basınç dayanımına kıyasla %7 oranında bir artış göstermektedir. Basınç dayanımındaki bu artış uçucu külün ileri yaşlarda artan pozolanik etkisi ile açıklanabilir. Hafif betonun dayanımı ve işlenebilirliği üzerine mineral katkının etkisini belirlemeye ilişkin gerçekleştirilen bir çalışmada %10 ve %20 oranlarında uçucu kül kullanılmıştır. Bu iki oranda uçucu külün 7 günlük basınç dayanımlarında azalmaya neden olduğu ancak 28 günlük basınç dayanımı itibarıyla referans betona kıyasla basınç dayanımında sırasıyla %5 ve %12 oranlarında bir artış sağladığı rapor edilmektedir (Chen and Liu, 2008).

Gerçekleştirilen çalışmada %10 ve %15 oranlarında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların basınç dayanımları referans betona kıyasla sırasıyla %18 ve %23 oranlarında yüksek çıkmıştır. Basınç dayanımında görülen bu artışın nedeni metakaolinin pozolanik ve filler etkisi ile açıklanabilir. Farklı oranlarda metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların 28

günlük basınç dayanımlarına ilişkin yapılan bir çalışmada %10 ve %15 oranında metakaolin içerenlerin basınç dayanımlarının kontrol betonuna kıyasla sırasıyla %10 ve %23 oranında daha yüksek çıktığı rapor edilmektedir (Keleştemur ve Demirel, 2015). Çalışmada %5 oranında metakaolin ve uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların 28 günlük basınç dayanımları ise 350 dozajlı referans betona göre yaklaşık %13 oranında artmıştır.

Şekil 5.2’de görüldüğü üzere 450 dozajlı betonların tümü taşıyıcı hafif beton için öngörülen 28 günlük minimum basınç dayanımı koşulunu sağlamaktadır. 7 günlük basınç dayanımları dikkate alındığında, %10 ve %25 oranlarında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların basınç dayanımları referans betona kıyasla sırasıyla %13 ve %17 oranında düşük çıkmış olduğu görülmektedir. Farklı bir çalışmada da uçucu külün erken yaşlarda basınç dayanımını azalttığı belirtilmektedir (Erdoğan, 1997). Erken yaşlarda basınç dayanımında meydana gelen bu azalışın uçucu külün çimentonun hidrasyon ısını azaltmasına bağlı olarak daha uzun süre küre gereksinim duyulmasından kaynaklandığı ileri sürülmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada %10 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun 7 günlük basınç dayanımı ise referans betonu ile aynı mertebede kalmıştır. %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun basınç dayanımı referans betona kıyasla yaklaşık %7 oranında daha yüksek çıkmıştır. %5 uçucu kül ve %5 metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun 7 günlük basınç dayanımı referans betonunun basınç dayanımına kıyasla %5 oranında daha düşük çıkmıştır.



Şekil 5.2. 450 dozajlı betonlara ilişkin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları

28 günlük basınç dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde, %10 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun basınç dayanımı 450 dozajlı referans betonunun basınç dayanıma kıyasla %5 oranda düşük çıkmıştır. %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun basınç dayanımı ise referans betonunun basınç dayanımı ile aynı mertebede iken %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların basınç dayanımları referans betonuna kıyasla sırasıyla %13 ve %19 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. %10 ve %15 oranlarında metakaolin içeren hafif betonlara ilişkin gerçekleştirilen bir çalışmada 28 günlük basınç dayanımlarının kontrol betonuna kıyasla yaklaşık %20 oranında yüksek çıktığı ifade edilmektedir (Mo vd., 2016). Gerçekleştirilen çalışmada %5 oranında uçucu kül ve %5 metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların 28 günlük basınç dayanımları referans betonunun basınç dayanımına kıyasla yaklaşık %10 mertebesinde yüksek çıkmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmadan çıkarılabilecek genel sonuç, 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların basınç dayanımlarının 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlarınkine kıyasla kısmen de olsa daha yüksek çıkmış olduğu ancak bu farkın çok belirgin olmadığıdır.

5.2. Yapısal Verimlilik

Taşıyıcı hafif betonun 28 günlük basınç dayanımının kuru birim ağırlığına bölünmesiyle elde edilen değer “yapısal verimlilik” olarak bilinmektedir (Ulus, 2007 ve Bogas vd. 2019). Çalışma kapsamında üretilen taşıyıcı hafif betonların ve üretimde tercih edilen malzemelerin performansını ölçmek için taşıyıcı hafif betonlara ilişkin yapısal verimlilikler karşılaştırılmış ve elde edilen bulgular Tablo 5.1’de özetlenmiştir.

Tablo 5.1. Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin hesaplanan yapısal verimlilik

Karışımlar	Kuru Birim Ağırlık (kg/m ³)	Dayanım (28 Gün) (MPa)	Yapısal Verimlilik (MPa×dm ³ /kg)
350-REF	1785	21.69	12.15
350-UK10	1716	21.04	12.26
350-UK25	1589	23.05	14.51
350-MK10	1774	25.80	14.54
350-MK15	1653	26.47	16.01
350-UKMK5	1715	24.35	14.20
450-REF	1747	23.02	13.18
450-UK10	1725	21.88	12.68
450-UK25	1609	23.26	14.46
450-MK10	1724	25.90	15.02
450-MK15	1654	27.40	16.57
450-UKMK5	1694	25.27	14.92

Tablo 5.1’den görüldüğü üzere üretilen taşıyıcı hafif betonların yapısal verimlilikleri 12 ile 17 MPa×dm³/kg arasında değişmektedir. En yüksek yapısal verimlilik 450 dozajlı %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonda elde edilirken en düşük yapısal verimlilik ise 350 dozajlı referans betonda elde edilmiştir. Ham perlit agregası kullanılarak üretilen yüksek dayanımlı hafif betonların üretilebilirliği üzerine yapılan bir çalışmada hafif betonların yapısal verimlilikleri 32 ile 51 MPa×dm³/kg arasında değiştiği rapor edilmektedir (Ulus, 2007). Bu yapısal verimlilik değerleri gerçekleştirilen çalışmada elde edilenlere kıyasla oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu farkın kullanılan pomza agregasının düşük dayanımı ve üretimde daha az miktarda çimento kullanımından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Bir çalışmada farklı su/çimento oranlarında ve farklı hafif agregalar (Stalite ve Leca) kullanılarak üretilen taşıyıcı hafif betonların yapısal verimliliklerinin 16.52 ila 32.75 arasında değişim gösterdiği rapor edilmektedir (Bogas vd., 2019).

Gerçekleştirilen çalışmada 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonların yapısal verimlilikleri değerlendirildiğinde, %10 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun yapısal verimliliği referans betonla aynı mertebededir. Yapısal verimliliklerin aynı mertebede olmasının nedeni belli oranda uçucu külün basınç dayanımında ve birim ağırlıkta neden olduğu azalma ile açıklanabilir. %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun yapısal verimliliği referans betona kıyasla %20 oranında yüksek çıkmıştır. Benzer şekilde %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların yapısal verimlilikleri de referans betona kıyasla sırasıyla %20 ve %32 oranında yüksektir. %5 oranında uçucu kül

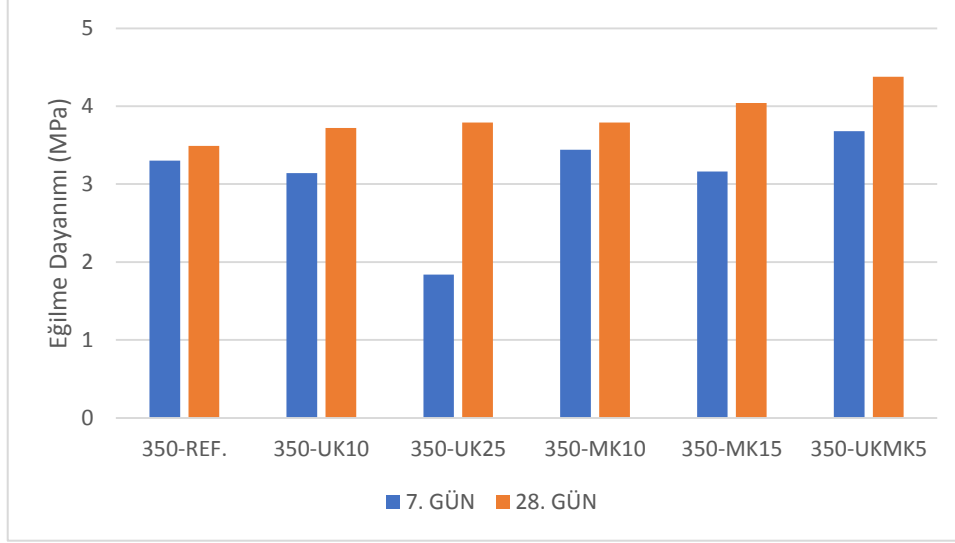
ve %5 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların yapısal verimlilikleri referans betonuna kıyasla %17 oranında yüksek çıkmıştır.

450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların yapısal verimlilikleri değerlendirildiğinde, %10 uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun yapısal verimliliği referans betonuna kıyasla %4 oranında düşük çıkmıştır. Buna karşın %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun yapısal verimliliği referans betonuna kıyasla %10 oranında yüksektir. Benzer şekilde %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların yapısal verimlilikleri referans betonuna kıyasla sırasıyla %14 ve %26 oranında yüksek çıkmıştır. %5 oranında uçucu kül ve %5 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun yapısal verimliliği referans betonuna kıyasla %13 oranında yüksektir.

Genel olarak uçucu kül ve metakaolin kullanımı ile artan yapısal verimlilik mineral katkıların puzolanik etkisi sonucu basınç dayanımında meydana gelen artış ve diğer taraftan mineral katkıların çimentoya göre düşük özgül ağırlıklarından dolayı birim ağırlıkta meydana gelen azalış ile açıklanabilir (Mo vd., 2017).

5.3. Eğilme Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Eğilme dayanımı deneyi 10×10×40 cm prizma numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Grafiksel değerler iki prizma numunenin ortalaması şeklinde verilmiştir. Şekil 5.3’de 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 7 ve 28 gün sonunda elde edilen eğilme dayanımları verilmektedir.

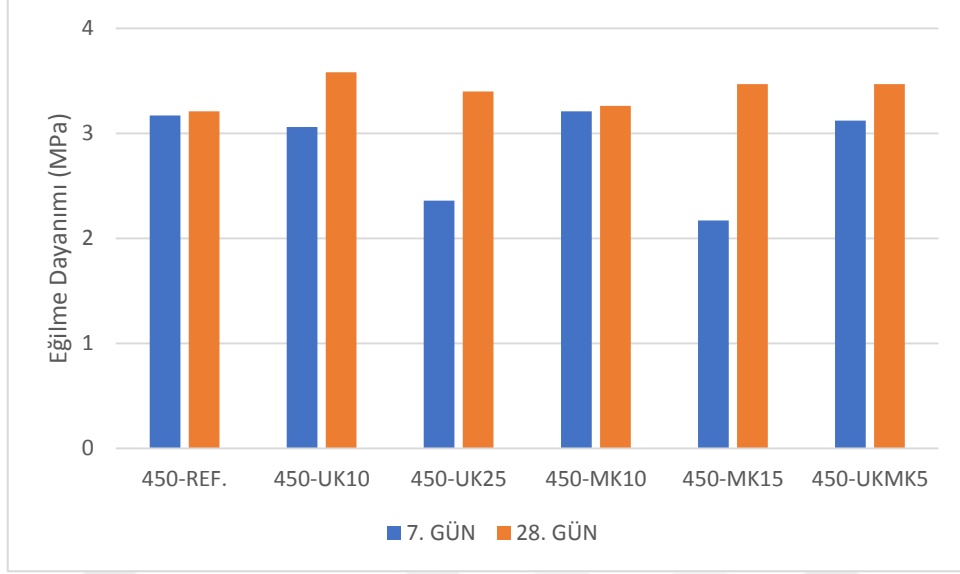


Şekil 5.3. 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin eğilme dayanımları

7 günlük eğilme dayanımları değerlendirildiğinde, %10 ve %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların eğilme dayanımları 350 dozajlı referans betona kıyasla sırasıyla yaklaşık %5 ve %44 oranlarında düşük çıkmıştır. Yapılan bazı çalışmalarda %20 oranında uçucu kül içeren hafif betonun 7 günlük eğilme ve yarmada çekme dayanımları referans betona kıyasla azalmıştır (Kılıç vd., 2003 ve Yaşar vd., 2003). Gerçekleştirilen çalışmada %10 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun 7 günlük eğilme dayanımı 350 dozajlı referans betona kıyasla yaklaşık %5 oranında yüksek çıkarken %15 oranında metakolin içeren taşıyıcı hafif betonun eğilme dayanımı %4 oranında düşük çıkmıştır. %5 oranında uçucu kül ve %5 metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun 350 dozajlı referans betonuna kıyasla yaklaşık %30 oranında yüksek çıkmıştır.

28 günlük eğilme dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde, %10 ve %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların eğilme dayanımları 350 dozajlı referans betona kıyasla sırasıyla yaklaşık %7 ve %9 oranlarında yüksek çıkmıştır. Benzer şekilde %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların 28 günlük eğilme dayanımları 350 dozajlı referans betonun eğilme dayanımına kıyasla sırasıyla yaklaşık %9 ve %16 oranında yüksek çıkmıştır.

Şekil 5.4'de 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları verilmektedir.



Şekil 5.4. 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin eğilme dayanımları

7 günlük eğilme dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde, %10 ve %25 oranlarında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların eğilme dayanımları 450 dozajlı referans betona kıyasla sırasıyla yaklaşık %3 ve %25 oranlarında düşük çıkarken %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların 7 günlük eğilme dayanımları yaklaşık %30 oranında düşük çıkmıştır.

28 günlük eğilme dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde, %10 ve %25 oranlarında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların eğilme dayanımları 450 dozajlı referans betona kıyasla sırasıyla yaklaşık %11 ve %6 oranlarında yüksek çıkarken %5 oranında uçucu kül ve metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun 28 günlük eğilme dayanımı yaklaşık %8 oranında artmıştır.

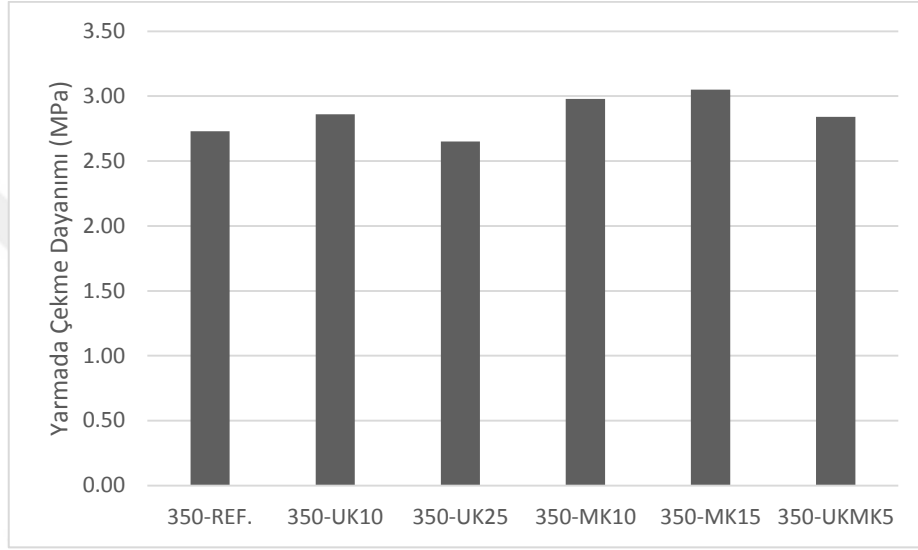
Yapılan bir çalışmada yüksek dayanımlı hafif betonların eğilme dayanımı/basınç dayanımı oranının %9 ila %11 arasında değiştiği belirtilmektedir (Holm ve Bremner, 2000). Gerçekleştirilen çalışmada üretilen taşıyıcı hafif betonların eğilme dayanımı/basınç dayanımı oranı yaklaşık %6 ila %8 arasında değişim göstermiştir. Bu oransal değişimler yukarıda belirtilen çalışmalarla uyumlu oldukları görülmektedir.

5.4. Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yarmada çekme dayanımı sonuçları 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş olup grafiksel değerler iki silindir numunenin

ortalaması olarak belirlenmiştir. İlgili standart ASTM C 330'da taşıyıcı hafif betonun taşıyıcı kesit elemanlarında kullanılabilmesi için yarmada çekme dayanımının minimum 2 MPa olması gerektiği belirtilmektedir. Çalışma kapsamında üretilen 350 ve 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların tümü bu kriteri sağlamaktadır.

Şekil 5.5'de 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 28 gün sonunda elde edilen yarmada çekme dayanımları verilmektedir.



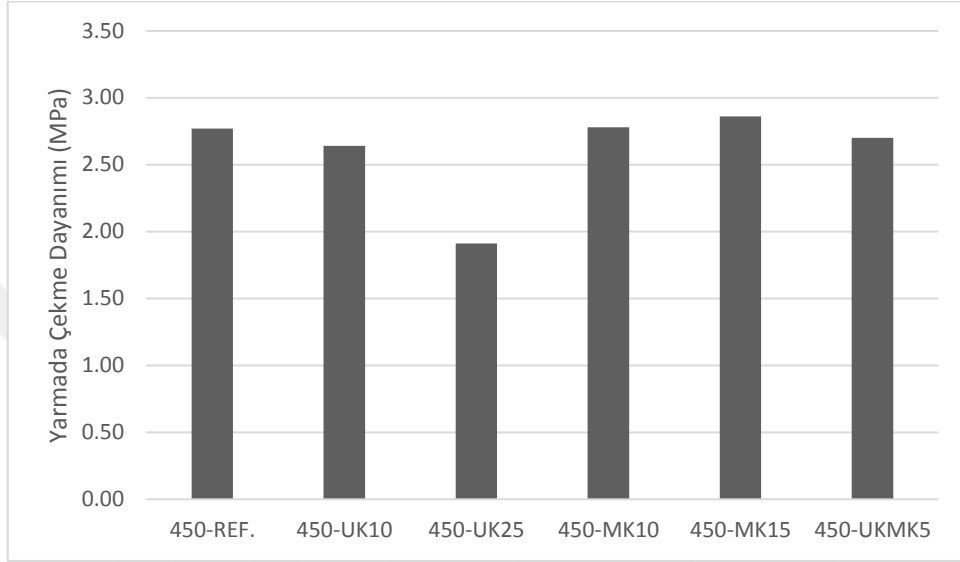
Şekil 5.5. 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin yarmada çekme dayanımları

28 gün sonunda elde edilen yarmada çekme dayanımları değerlendirildiğinde, %10 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun yarmada çekme dayanımı 350 dozajlı referans betonunkine kıyasla yaklaşık %5 oranında bir artış gösterirken %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun yarmada çekme dayanımı yaklaşık %3 oranında bir azalma göstermektedir. Genleştirilmiş kil agregası içeren yüksek dayanımlı hafif betona uçucu külün etkisi üzerine yapılan bir çalışmada, %10 oranında uçucu kül kullanımı hafif betonun yarmada çekme dayanımını yaklaşık %6 ila %10 arasında değişen oranda arttırmış olduğu rapor edilmektedir. Buna karşılık aynı çalışmada %20 ve %30 oranlarında uçucu kül kullanımı hafif betonların yarmada çekme dayanımlarını referans betona kıyasla yaklaşık %20 oranında azalttığı belirtilmektedir (Subaşı, 2009).

%10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların yarmada çekme dayanımlarında 350 dozajlı referans betona kıyasla sırasıyla yaklaşık %10 ve %11 oranlarında artış sözkonusudur. Benzer şekilde %5 oranında uçucu kül ve metakaolin

içeren taşıyıcı hafif betonun yarmada çekme dayanımı 350 dozajlı referans betonunun yarmada çekme dayanımına kıyasla %4 oranında artış göstermektedir.

Şekil 5.6'da 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 28 gün sonunda elde edilen yarmada çekme dayanımları verilmektedir.



Şekil 5.6. 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin yarmada çekme dayanımları

28 gün sonunda elde edilen yarmada çekme dayanımları değerlendirildiğinde, %10 ve %25 oranlarında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların yarmada çekme dayanımları 450 dozajlı referans betona kıyasla azalma eğilimi gösterirken %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların yarmada çekme dayanımlarında artma eğilimi gözlemlenmiştir. Yapılan benzeri bir çalışmada %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 28 gün sonunda elde edilen yarmada çekme dayanımları referans betona kıyasla sırasıyla yaklaşık olarak %12 ve %13 oranlarında artışlar gösterdiği rapor edilmektedir (Keleştemur ve Demirel, 2015).

Normal betonların yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranının %8 ila %14 arasında değişim gösterdiği belirtilmektedir (Shafigh vd. 2014). Gerçekleştirilen çalışmada üretilen taşıyıcı hafif betonların yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranının %7 ila %12 arasında değişim göstermiştir. Bu oran normal betonlar için belirtilen değere oldukça yakın olduğu görülmektedir. Palmiye yağı kabuğu kullanılarak gerçekleştirilen bir

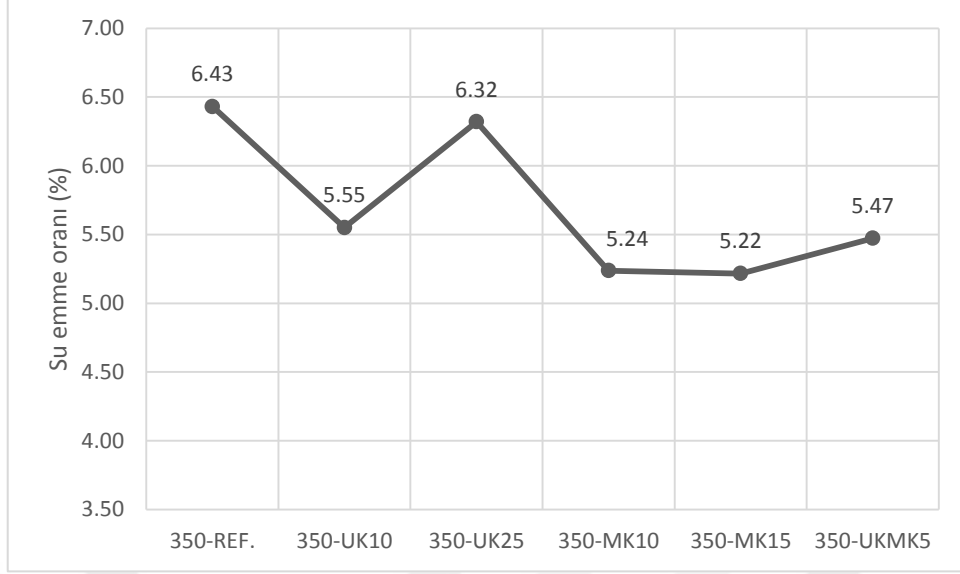
çalışmada benzer şekilde taşıyıcı hafif betonun yarmada çekme dayanımı/basınç dayanımı oranının %8 ila %10 arasında değişim gösterdiği rapor edilmektedir (Aslam vd., 2016).

5.5. Su Emme ve Porozite Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Su emme ve porozite deneyleri için 10 cm küp numuneler kullanılmış olup grafiksel değerler iki numunenin ortalaması olarak belirlenmiştir.

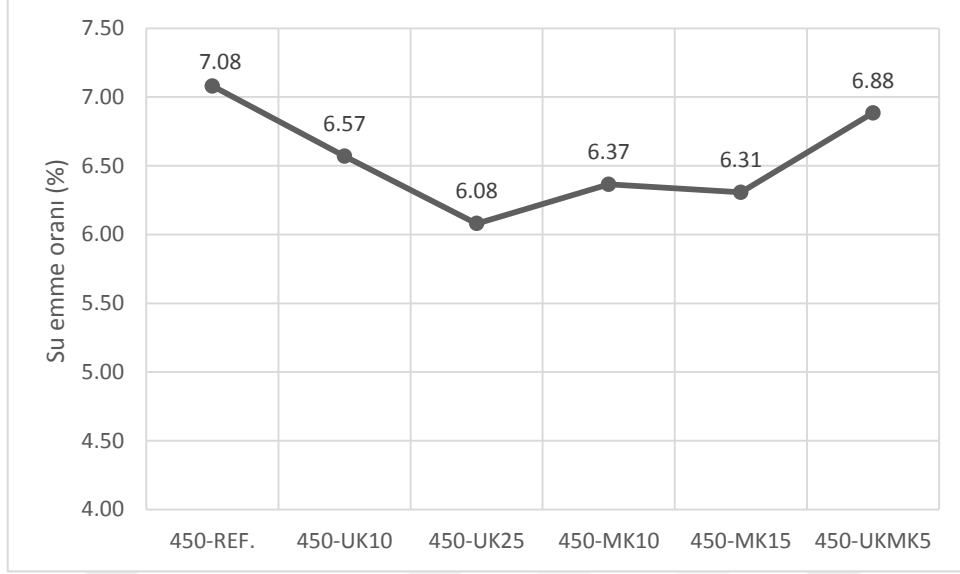
Hafif betonun durabilitesi açısından su emme ve porozite önemli faktörlerdir. Çalışmada üretilen hafif betonların su emmesinin yüksek olması bu bakımdan dikkate değer bir husustur. Genel olarak hafif betonun su emmesi %6 ila %12 arasında değerler aldığı ifade edilmektedir (Bajare vd., 2013 ve Ali vd., 2018). Başka bir çalışmada durabilitesi yüksek hafif betonlar için maksimum su emme %10 ile sınırlanmaktadır (Neville, 1994 ve Aitcin, 1998).

Şekil 5.7’de 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlar için su emme oranları verilmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada %10 uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun su emmesi referans betonunkine kıyasla düşük çıkarken %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun su emmesi referans betonunki ile yaklaşık aynı mertebede kalmıştır. %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların su emmeleri referans betonunkine kıyasla belirgin bir azalma göstermektedir. Bunun nedeni, metakaolinin ince olması ve puzolanik etkisi dolayısıyla çimento matrisinin boşluklarını doldurması ve daha yoğun bir yapı oluşturması ve daha yüksek bir dayanım sağlamasıyla açıklanabilir (Khatip ve Clay, 2004). %5 oranında uçucu kül ve %5 metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun su emmesi referans betonunkine kıyasla düşük çıkmıştır.



Şekil 5.7. 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin su emme değerleri

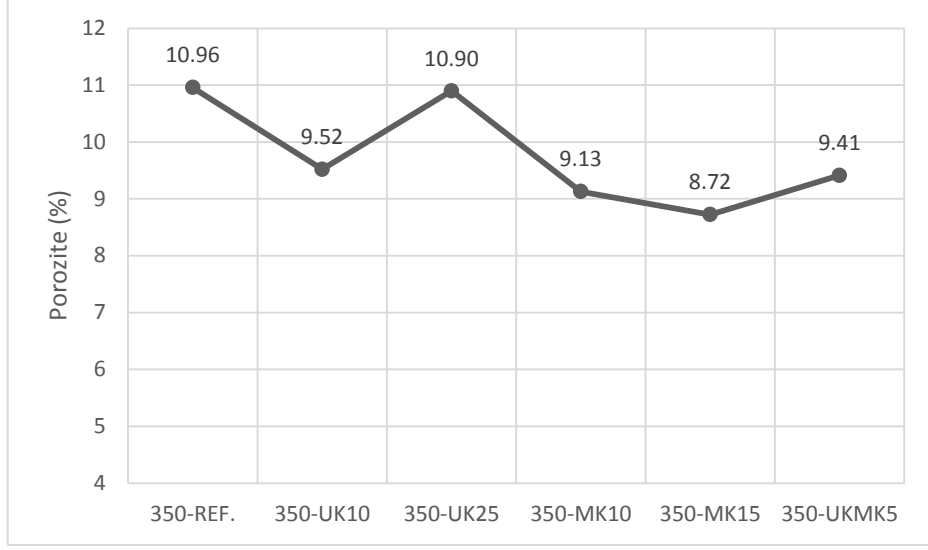
Şekil 5.8’de 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin su emme değerleri verilmektedir. %10 ve %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların su emme değerleri referans betonunkine kıyasla belirgin bir azalma göstermektedir. Benzer şekilde %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların su emme değerleri referans betonunkine kıyasla daha düşüktür. Hafif betonda genleştirilmiş kil agregası ve silis dumanı kullanımının etkinliğini araştırmaya yönelik yapılan bir çalışmada silis dumanı ikame oranının artmasıyla birlikte hafif betonların su emme oranlarının azaldığı ifade edilmektedir (Ahmad vd., 2019). Gerçekleştirilen çalışmada %5 oranında uçucu kül ve %5 metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun su emme değeri referans betonunkine kıyasla bir miktar düşük çıkmıştır.



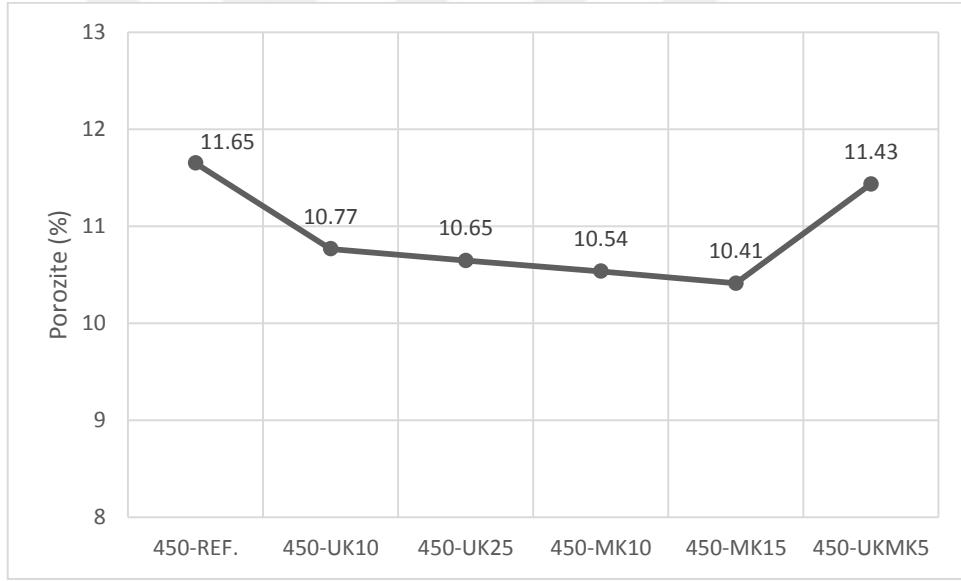
Şekil 5.8. 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin su emme değerleri

Şekil 5.9’da 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ait porozite değerleri verilmektedir. %10 ve %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların porozite değerleri referans betonunkine kıyasla düşük olduğu görülmektedir. Benzer şekilde %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların porozite değerleri de referans betonunkine kıyasla oldukça düşük olduğu görülmektedir. Metakaolinin taşıyıcı hafif betonun yüksek sıcaklık etkisinde davranışına ilişkin yapılan bir çalışmada, sıcaklıktan bağımsız olarak metakaolin miktarı arttıkça taşıyıcı hafif betonun porozitesinin azaldığı belirtilmektedir. Bunun nedeni metakaolinin puzolanik aktivitesi ve hidrasyon ürünlerini artırıcı etkisi ve ince yapısı dolayısıyla çimento matrisindeki boşlukları doldurarak poroziteyi azaltmasına bağlanabileceği rapor edilmektedir (Gültekin, 2014).

Şekil 5.10’da 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ait porozite değerleri verilmektedir. %10 ve %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların porozite değerleri referans betonunkinden daha düşüktür. Benzer şekilde %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların porozite değerleri de referans betonunkine kıyasla düşüktür. %5 oranında uçucu kül ve %5 metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun porozite değeri ise referans betonunkinden düşük olmasına karşın diğer katkılı betonlarla kıyaslandığında en yüksek poroziteye sahip olduğu görülmektedir.



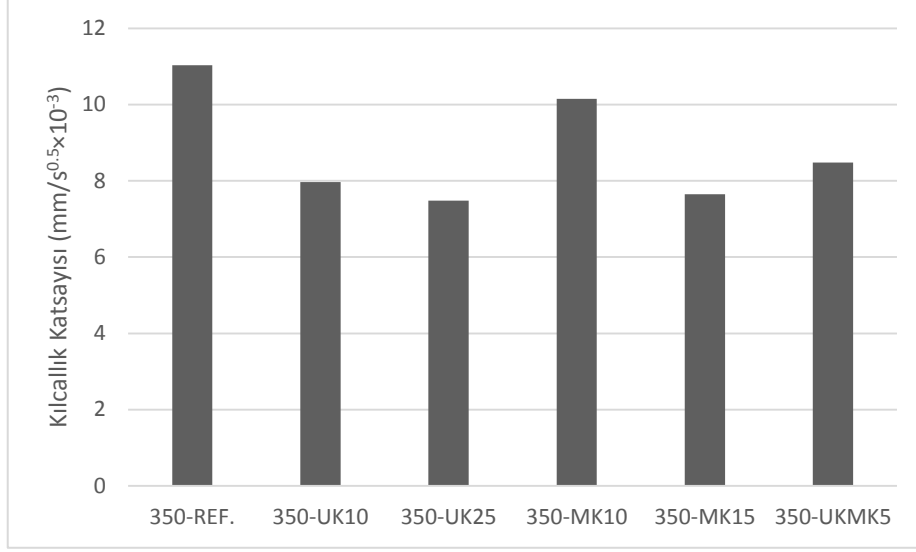
Şekil 5.9. 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin porozite değerleri



Şekil 5.10. 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin porozite değerleri

5.6. Kılcallık Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

Her iki dozajda üretilen taşıyıcı hafif betonlara ilişkin ölçülen kılcallık katsayısı değerleri Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de verilmektedir. Şekil 5.11’de 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin kılcallık deneyi sonuçları verilmektedir. Kılcallık katsayıları ASTM C1585 standardı uyarınca $\text{mm/s}^{0.5} \times 10^{-3}$ cinsinden belirlenmiştir.



Şekil 5.11. 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin kılcallık katsayıları

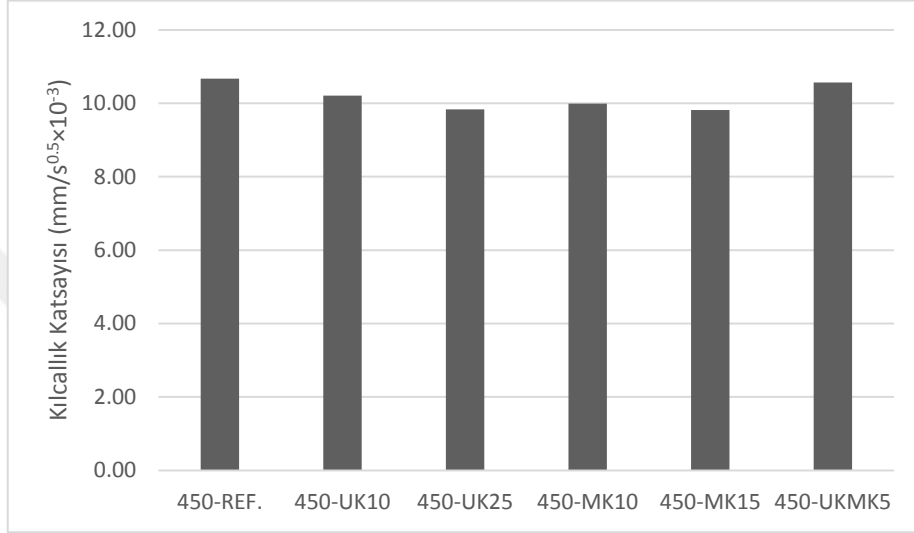
Şekil 5.11'den görüleceği üzere 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlar için ölçülen kılcallık katsayısı değerleri 7.49 ila 11.03 $\text{mm/s}^{0.5} \times 10^{-3}$ arasında değişmektedir. İlgili şekilden görüleceği üzere uçucu kül ikame oranı arttıkça taşıyıcı hafif betonların kılcallık katsayısı azalmaktadır. En yüksek kılcallık katsayısı referans betonda gerçekleşirken en düşük kılcallık katsayısı ise %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonda gerçekleşmiştir. Kılcallık katsayısında meydana gelen azalma uçucu külün çimento matrisinde mevcut birbirleriyle bağlantılı boşlukları azaltması ve daha yoğun bir yapının oluşmasıyla açıklanabilir. Benzer şekilde metakaolin ikame oranı arttıkça kılcallık katsayısındaki azalma daha da belirginleşmektedir.

Metakaolinin taşıyıcı hafif betonun korozyon direncine ilişkin yapılan bir çalışmada (Keleştemur ve Demirel, 2015), metakaolin ikame oranı arttıkça taşıyıcı hafif betonların kılcallık katsayıları ve porozitelerinin azaldığı belirtilmektedir. Kılcallık katsayısı ve porozitede meydana gelen azalmanın metakaolinin çimento matrisinin boşluk yapısını iyileştirici etkisi ile açıklanabileceği ifade edilmektedir. Bununla birlikte meydana gelen azalmayı 28 gün sonunda oluşan daha fazla miktarda hidrasyon ürüne de bağlayan araştırmacılar bulunmaktadır. Benzer şekilde kılcallık katsayısındaki azalmayı metakaolinin filler etkisiyle gözenekliliğin sürekliliğini engellenmesine bağlayan araştırmacılar da mevcuttur (Keleştemur ve Demirel, 2015).

Gerçekleştirilen çalışmada %5 oranında uçucu kül ve %5 metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun kılcallık katsayısı referans betona kıyasla hafif düşük çıkmıştır. Buradan

görülebileceği üzere uçucu kül ve metakaolin birlikte %5 oranında dahi kullanıldığında kılcallık katsayısı üzerinde az da olsa azaltıcı bir etki sağlamaktadır.

Şekil 5.12’de 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin elde edilen kılcallık ölçümleri verilmektedir. İlgili şekilden görüldüğü üzere ölçülen kılcallık katsayısı değerleri 9.82 ile 10.67 $\text{mm/s}^{0.5} \times 10^{-3}$ arasında değişmektedir.



Şekil 5.12. 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin kılcallık katsayıları

Ölçülen en yüksek kılcallık katsayısı 450 dozajlı referans betonda elde edilirken en düşük kılcallık katsayısı ise %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonda elde edilmiştir. Uçucu kül ikame oranı arttıkça taşıyıcı hafif betonların kılcallık katsayısında hafif azalma meydana gelmektedir. Buna karşın metakaolin ikame oranı arttıkça taşıyıcı hafif betonların kılcallık katsayısında önemli bir değişim gözlemlenmemektedir. Taşıyıcı hafif betonun kılcallık katsayısına ilişkin gerçekleştirilen bir çalışmada ise silis dumanı taşıyıcı hafif betonun kılcallık katsayısını hafif de olsa azalttığı ifade edilmektedir. Kılcallık katsayısındaki bu azalma silis dumanının çimento matrisinin boşluklu yapısını daha yoğun bir yapıya dönüştürmesiyle açıklanmaktadır (Real vd., 2015).

Taşıyıcı hafif betonun kılcallık katsayısına ilişkin gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise çimento ile ikame edecek şekilde iki farklı mineral katkı (uçucu kül ve silis dumanı) kullanılmıştır. Çalışmada uçucu kül ikame oranı arttıkça kılcallık katsayısının arttığı vurgulanmaktadır. Kılcallık katsayısındaki bu artış uçucu kül ikameli betonun yalnızca 7 gün su kürü görmesine bağlanmaktadır. Taşıyıcı hafif betonda çimento ile

ikame edilecek şekilde %8 oranında silis dumanı kullanımının kılcallık katsayısını hafif de olsa azalttığı belirtilmektedir (Bogas vd., 2015).

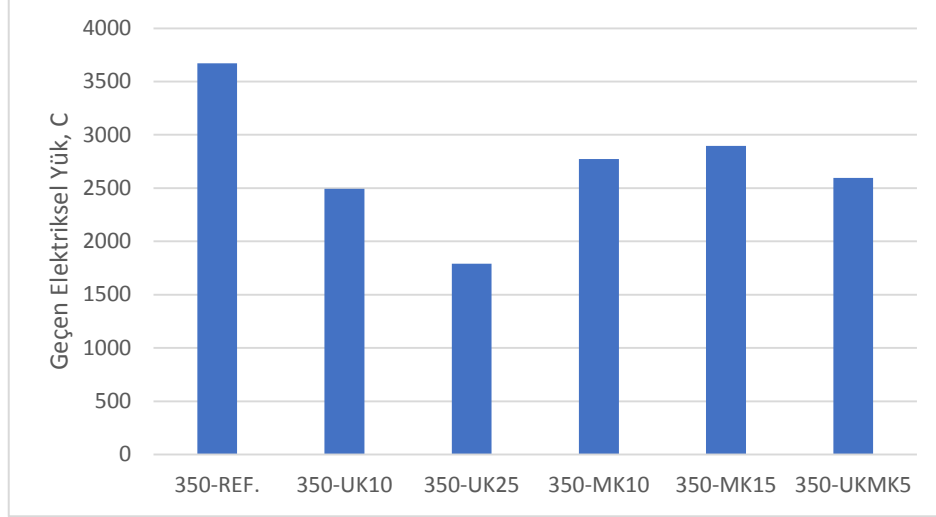
Silis dumanı ve genleştirilmiş kil agregasının hafif beton üzerindeki etkisine ilişkin yapılan bir çalışmada %5 ve %10 oranında silis dumanı kullanılmıştır. Silis dumanı oranı arttıkça hafif betonların kılcallık katsayılarının azaldığı gözlenmektedir. Silis dumanı miktarı arttıkça betondaki boşluk miktarının azalması ve daha yoğun bir yapı kazanması sonucu silis dumanının betonun kılcallık katsayısının azalmasına katkı sağlandığı belirtilmektedir (Ahmad vd., 2019).

5.7. Hızlı Klorür Geçirirliği Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

Hızlı klorür geçirirliği deneyini gerçekleştirmede 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde üretilen silindir numunelerden kesilerek elde edilen 5 cm yüksekliğinde numuneler kullanılmıştır. ASTM C 1202 standardınca betonlar için öngörülen geçirirlilik sınıflandırması Tablo 5.2’de verilmektedir.

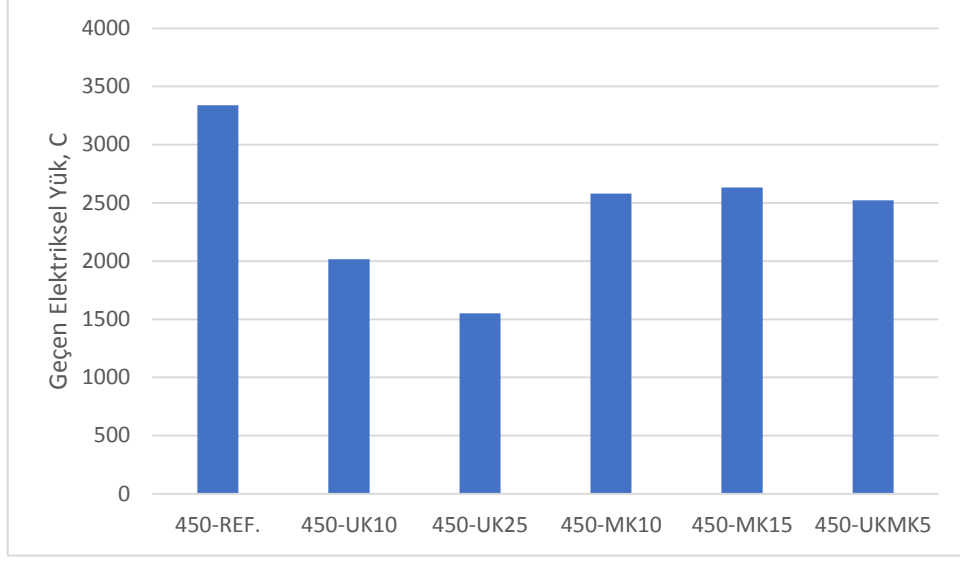
Tablo 5.2. Betonların geçirirliliklerine ilişkin sınıflandırma

Geçen Yük (Coulomb)	Klorür Geçirirlilik Sınıfı
>4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir



Şekil 5.13. 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin hızlı klorür geçirimlilikleri

Şekil 5.13’de 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 28 gün sonunda ölçülen hızlı klorür geçirimlilikleri verilmektedir. Görüleceği üzere %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif beton düşük geçirimlilik sınıfında yer alırken diğer taşıyıcı hafif betonlar ise orta geçirimlilik sınıfında yer almaktadır. Mineral katkı ikamesi taşıyıcı hafif betonlar hızlı klorür geçirimliliklerini önemli oranda azaltmış olduğu görülmektedir. Ölçülen hızlı klorür geçirimliliği sonuçları değerlendirildiğinde, %10 ve %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların hızlı klorür geçirimlilikleri referans betona kıyasla sırasıyla yaklaşık %32 ve %51 oranlarında azalma göstermektedir. Yapılan bir çalışmada %30 ve %40 oranlarında uçucu kül kullanımının betonun klorür geçirimliliğini önemli oranda azalttığı belirtilmektedir. 28 gün sonunda %30 oranında uçucu kül içeren betonun referans betona kıyasla klorür geçirimliliğinde %24 oranında bir azalma meydana geldiği belirtilmektedir (Nath ve Sarker, 2011). Gerçekleştirilen çalışmada, %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların hızlı klorür geçirimlilikleri referans betona kıyasla sırasıyla yaklaşık %25 ve %22 oranlarında düşük çıkmıştır. Buna karşın %5 oranında uçucu kül ve %5 metakaolinin kullanıldığı betonda ölçülen hızlı klorür geçirimliliği yalnızca %10 uçucu kül veya %10 metakaolinin kullanıldığı betonlarla oldukça yakındır.

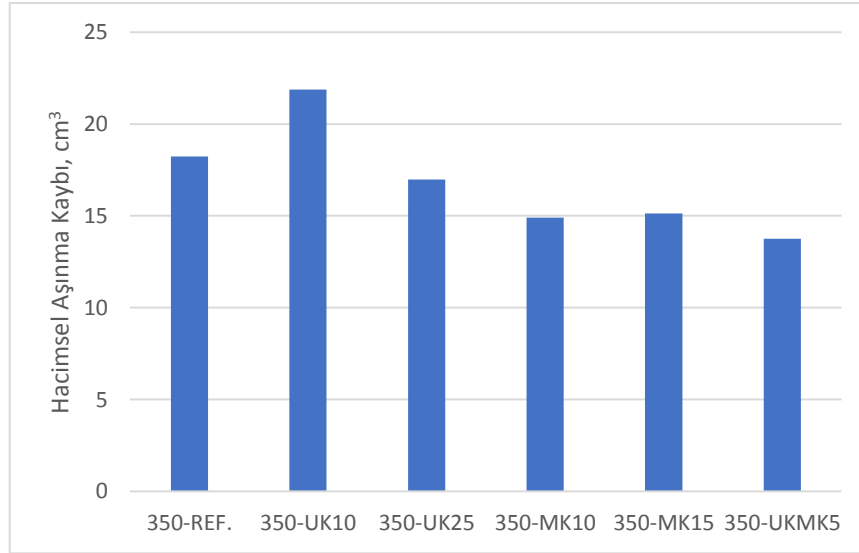


Şekil 5.14. 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin hızlı klorür geçirimsizlikleri

Şekil 5.14’de 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin ölçülen hızlı klorür geçirimsizlikleri verilmektedir. ASTM C 1202 standardı değerlendirmesine göre %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonlar düşük geçirimsizlik sınıfında yer almaktadır. Diğer taşıyıcı hafif betonlar ise orta geçirimsizlik sınıfında yer aldığı görülmektedir. %10 ve %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların hızlı klorür geçirimsizlikleri referans betona kıyasla sırasıyla yaklaşık %39 ve %53 oranlarında düşük çıkmıştır. Uçucu külün betonun durabilitesine etkisi üzerine yapılan bir çalışmada, uçucu kül içeren betonların 28 gün sonundaki hızlı klorür geçirimsizliklerinin kontrol betonuna kıyasla belirgin olarak düşük olduğu ve klorür geçirimsizliklerinde ortaya çıkan bu azalmanın birbirleriyle bağlantılı boşlukların azalması ile açıklanabileceği rapor edilmektedir (Saha, 2018). Gerçekleştirilen çalışmada %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların hızlı klorür geçirimsizlikleri referans betonuna kıyasla sırasıyla yaklaşık %23 ve %21 oranlarında düşük çıkmıştır. Benzer şekilde %5 oranında uçucu kül ve %5 metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların hızlı klorür geçirimsizlikleri de referans betona kıyasla yaklaşık %25 oranında azalmıştır.

5.8. Aşınma Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

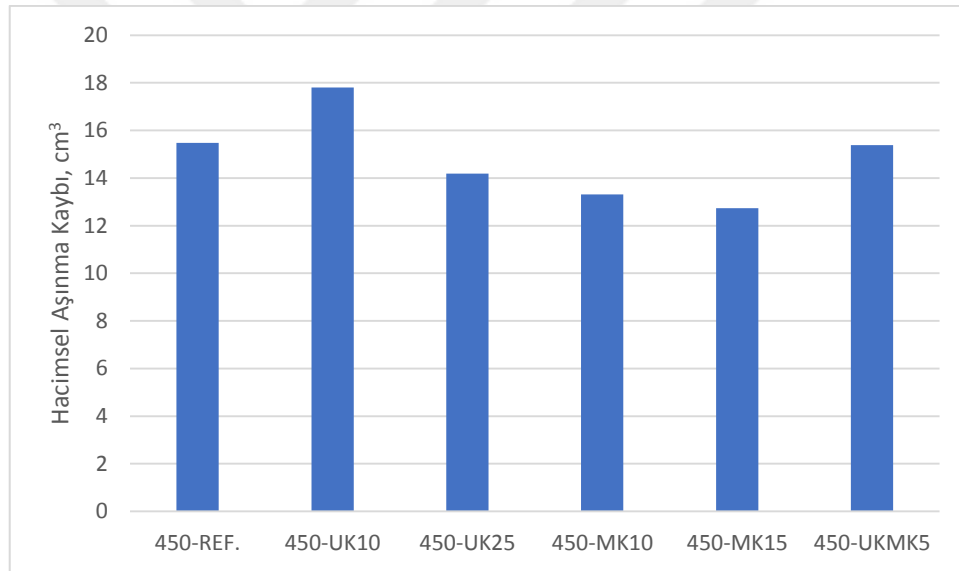
Aşınma deneyinde 7.1 cm küp numuneler kullanılmıştır. Şekil 5.15’de 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonların 28 gün sonunda ölçülen hacimsel aşınma kayıpları verilmektedir. En fazla kayıp %10 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonda meydana gelmiştir. En yüksek hacimsel kaybın %10 uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonda meydana gelmesinin sebebi en düşük basınç dayanımına sahip olmasındandır. Zira gerçekleştirilen bazı çalışmalarda basınç dayanımının aşınma direncine etkiyen önemli bir parametre olduğu belirtilmektedir. Aşınma deneyi ile elde edilen aşınma değerlerinin basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı sonuçlarıyla benzer eğilimde olduğu ifade edilmektedir (Rashan vd., 2014). Gerçekleştirilen çalışmada %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun referans betonuna kıyasla hacimsel aşınma kaybındaki azalış yaklaşık %7 mertebesindedir. %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların referans betonuna kıyasla aşınma kaybındaki azalışları yaklaşık %17 mertebesinde kalırken %5 oranında uçucu kül ve %5 metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun referans betonuna kıyasla aşınma kaybındaki azalış ise yaklaşık %25 mertebesindedir.



Şekil 5.15. 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin aşınma kaybı

Şekil 5.16’da 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların 28 gün sonunda ölçülen hacimsel aşınma kayıpları verilmektedir. En fazla kayıp %10 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonda meydana gelmiştir. %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun referans

betonuna kıyasla aşınma kaybındaki azalış yaklaşık %9 mertebesindedir. %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların referans betonuna kıyasla aşınma kaybındaki azalışları sırasıyla yaklaşık %14 ve %18 mertebesindedir. Farklı oranda uçucu kül ve silis dumanı içeren kendiliğinde yerleşen betonların aşınma dirençlerine ilişkin yapılan bir çalışmada, %25, %30 ve %35 oranlarında uçucu kül içeren betonların aşınma dirençleri kontrol betonuna kıyasla daha yüksek olduğu rapor edilmektedir. Uçucu kül ikame oranı %25’den %35’e çıktıkça aşınma direncinde de azalma gözlemlendiği buna karşın %5, %10 ve %15 oranında silis dumanı içeren betonların aşınma dirençleri kontrol betonuna kıyasla daha yüksek çıkmış olduğu rapor edilmektedir. Silis dumanı ikame oranı %5’den %15’e çıktıkça aşınma direncinde de artış meydana geldiği ifade edilmektedir (Turk ve Karataş, 2011).



Şekil 5.16. 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin aşınma kaybı

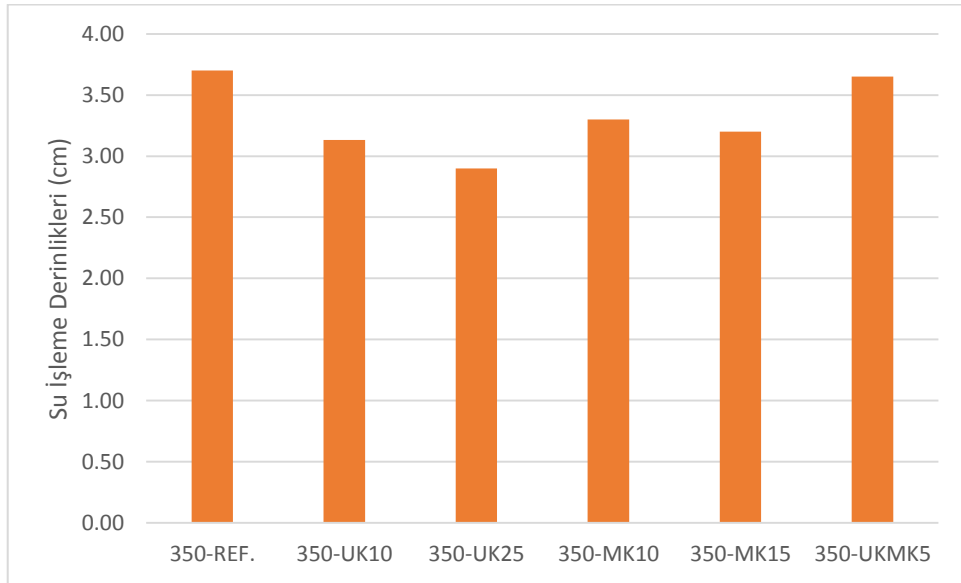
5.9. Basınç Altında Su İşleme Derinliği Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

Basınç altında su işleme derinliğinin tayininde 15 cm küp numuneler kullanılmıştır. Deneyde su işleme derinliği cm olarak ölçülmüştür. TS EN 13515 standardınca su işleme derinliği ile beton geçirimsliliği arasındaki ilişki Tablo 5.3’de verilmektedir.

Tablo 5.3. Su işleme derinliği ile beton geçirimsizliğinin ilişkilendirilmesi

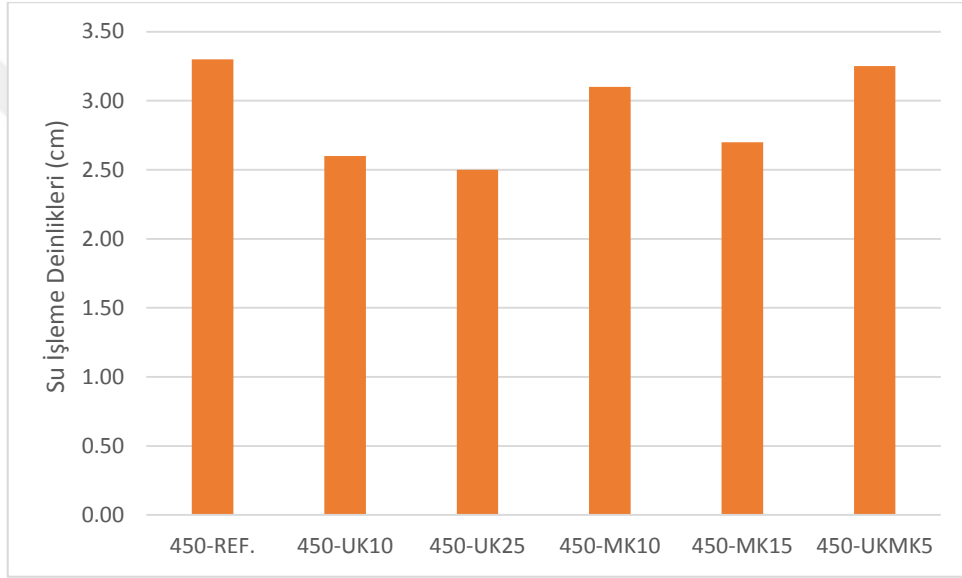
Maksimum su işleme derinliği (cm)	Geçirimsizlik Sınıfı
>5	Geçirimsiz beton
<5	Geçirimsiz beton
<3	Zararlı ortamlara karşı geçirimsiz beton

Şekil 5.17’de 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin su işleme derinliği ölçümleri verilmektedir. İlgili standart uyarınca yapılan değerlendirme ile 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonların tümünün geçirimsiz beton sınıfında olduğu görülmektedir. Zararlı ortamlara karşı geçirimsiz beton sınıfı için sınır değer dikkate alındığında ise taşıyıcı hafif betonların bir kısmının bu sınır değerinin biraz üstünde kaldığı görülmektedir. İlgili şekilden görüleceği üzere en yüksek su işleme derinliği referans betonda gözlemlenirken en düşük su işleme derinliği %25 oranında uçucu kül içeren hafif betonda gözlemlenmektedir. Uçucu kül ve metakaolin ikame oranı artışıyla ilgili olarak hafif betonların su işleme derinlikleri hafif bir biçimde azalmaktadır. Bu durumun kullanılan mineral katkıların pozzolanik etkileri sayesinde daha yoğun bir beton elde edilmesi ile alakalı olduğu düşünülmektedir. Yapılan bir çalışmada betonun su geçirimsizliği arttıkça karbondioksit, sülfat ve klorür iyonlarının betona girişinin kolaylaşacağı belirtilmektedir. Bu sebeple, betonun geçirimsizliğinin durabilite açısından önemli bir faktör olduğu ifade edilmektedir (Zhang ve Gjorv, 1990).



Şekil 5.17. 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin su işleme derinliği ölçümleri

Şekil 5.18’de 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin ait su işleme derinliği değerleri verilmektedir. İlgili standart uyarınca yapılan değerlendirme ile 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların tümünün geçirimsiz beton sınıfında olduğu görülmektedir. Zararlı ortamlara karşı geçirimsiz beton sınıfı için sınır değer dikkate alındığında ise 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlardan üç tanesinin belirtilen sınır değerinin hafif üstünde kaldığı görülmektedir. 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlardan referans betonu en yüksek geçirimsizliğe sahip iken en düşük su işleme derinliğine sahip olan hafif beton %25 oranında uçucu kül içeren olduğu görülmektedir.

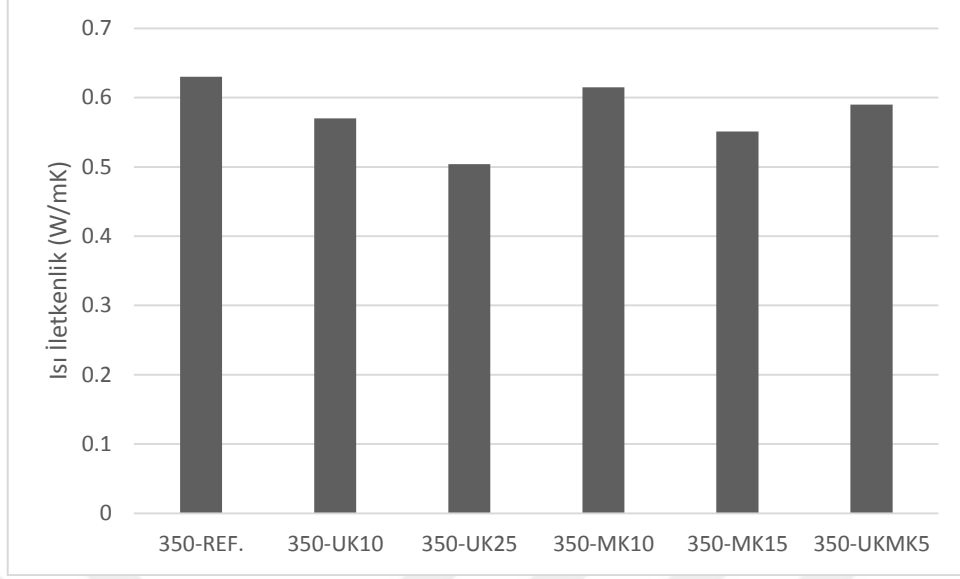


Şekil 5.18. 450 dozajlı hafif betonlara ilişkin su işleme derinliği ölçümleri

Genel olarak, 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların su işleme derinliklerinin 350 dozajlı hafif betonlarınkine göre daha düşük kaldığı görülmektedir. Bunun nedeni 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara kıyasla daha az geçirimli olmasına ve 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlarda pomza miktarının 350 dozajlı hafif betonlarınkine kıyasla daha fazla olmasına bağlanabilir. Pomza agregası yüksek su emmeye sahip olduğu için betonun içine emilen suyu absorbe ederek suyun betonun iç bölgelerine doğru ilerlemesini engellemesine bağlanabilir (Kaldı, 2011).

5.10. Isı İletkenlik Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

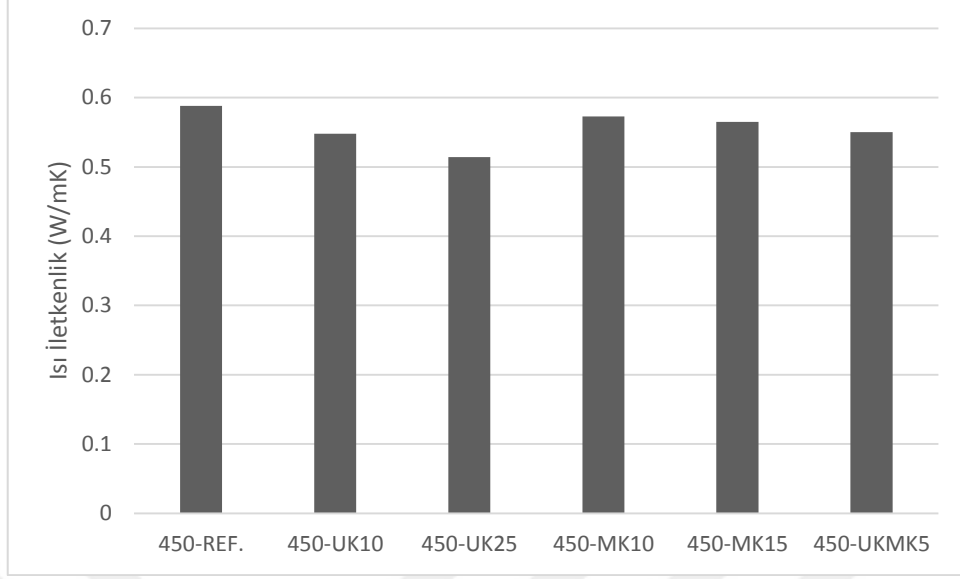
Isı iletkenlik katsayısını belirlemek amacıyla $5 \times 30 \times 30$ cm ebatında plak numuneler hazırlanmıştır. Şekil 5.19’da 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlar için ölçülen ısı iletkenlik katsayıları gösterilmektedir. Ölçümler değerlendirildiğinde, en yüksek ısı iletkenlik katsayısının referans beton için elde edildiği buna karşın %10 ve %25 oranlarında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların ısı iletkenlik katsayılarının referans betona kıyasla sırasıyla %10 ve %20 oranında daha düşük çıkmış olduğu görülmektedir. Uçucu kül ikamesi artışına bağlı olarak ısı iletkenlik katsayısındaki azalma uçucu külün çimentoya kıyasla daha düşük özgül ağırlığa sahip olmasına ve birim ağırlıkta meydana gelen azalma ile açıklanmaktadır (Demirboğa vd., 2007). Mineral katkı içeren genleştirilmiş perlit agregalı betonun basınç dayanımı ve ısı iletkenliğine ilişkin yapılan bir çalışmada, uçucu kül ve silis dumanı ikame oranı artışına bağlı olarak ısı iletkenlik katsayısının azaldığı rapor edilmektedir. Bunun mineral katkılı betonların birim ağırlıklarının düşük olmasına ve uçucu kül ve silis dumanının amorf yapıda olmasından kaynaklandığı belirtilmektedir (Demirboğa ve Gül, 2003). Gerçekleştirilen çalışmada %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların ısı iletkenlik katsayıları 350 dozajlı referans betonuna kıyasla sırasıyla %3 ve %7 oranında azalma göstermektedir. Benzer şekilde %5 oranında uçucu kül ve %5 metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun ısı iletkenlik katsayısı 350 dozajlı referans betonuna kıyasla %7 oranında azalmıştır. Metakaolinin özgül ağırlığı çimentoya kıyasla daha düşüktür. Metakaolin ikamesi ile ısı iletkenlik katsayısında meydana gelen azalmanın metakaolinin birim ağırlıkta neden olduğu azalma ile açıklanabilir. Birçok araştırmacı tarafından ısı iletkenlik ile birim ağırlık arasında önemli bir ilişkinin varlığını rapor etmektedir (Uysal vd., 2004, Real vd., 2016).



Şekil 5.19. 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ait ısı iletkenlik katsayıları

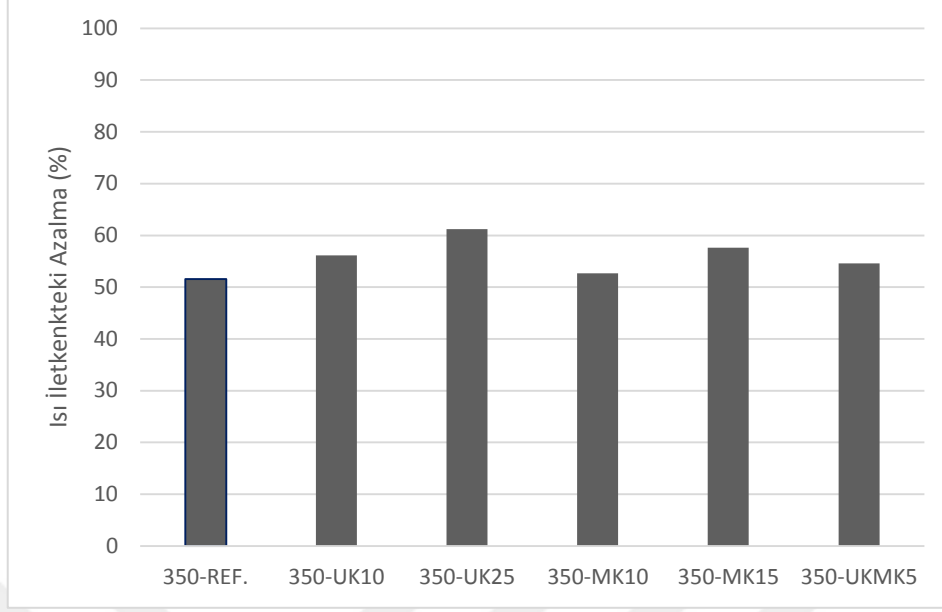
Şekil 5.20’de 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin ısı iletkenlik katsayısı ölçümleri verilmektedir. Ölçümler değerlendirildiğinde, en yüksek ısı iletkenlik katsayısının referans betonunda meydana geldiği %10 ve %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların ısı iletkenlik katsayılarının referans betona kıyasla sırasıyla %7 ve %13 oranında azalma gösterdiği görülmektedir. Benzer şekilde %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların ısı iletkenlik katsayıları referans betona kıyasla sırasıyla %3 ve %4 oranında azalırken %5 oranında uçucu kül ve %5 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun ısı iletkenlik katsayısı referans betonuna kıyasla %7 oranında azalma göstermektedir. Yapılan bir çalışmada %10, %20 ve %30 oranında uçucu kül içeren genişletilmiş perlit agregalı betonların ısı iletkenlik katsayılarının kontrol betonuna kıyasla sırasıyla %7, %9 ve %18 oranında azaldığı ifade edilmektedir (Demirboğa ve Gül, 2003). Başka bir çalışmada ise çimento ile ikame edilen mineral katkıların betonun ve harcın ısı iletkenliğinde önemli azalma sağladığı rapor edilmektedir (Asadi vd., 2018).

Genel olarak, ısı iletkenlik katsayısının birim ağırlıkla doğrudan ilişkili olduğu, üretilen taşıyıcı hafif betonların birim ağırlıkları düştükçe ısı iletkenlik katsayılarının da belirgin bir biçimde düştüğü görülmektedir.



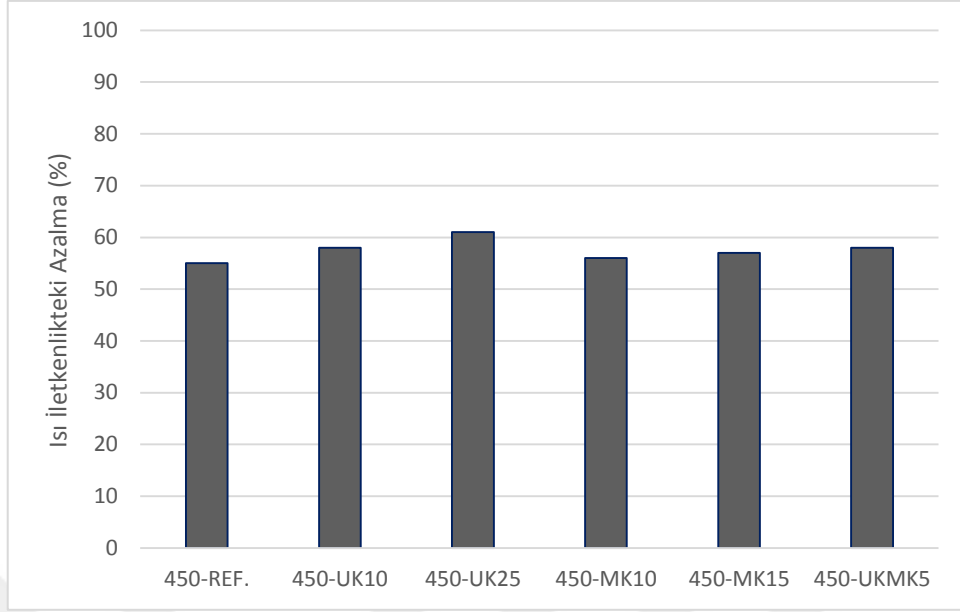
Şekil 5.20. 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ait ısı iletkenlik katsayıları

Birim ağırlığı yaklaşık olarak 2250 kg/m^3 olacak şekilde üretilen normal ağırlıklı betonun ısı iletkenlik katsayısı 1.30 W/mK olarak belirlenmiştir. Şekil 5.21’de 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla ısı iletkenliklerindeki değişim yüzde olarak verilmektedir. Normal ağırlıklı betona kıyasla, ısı iletkenlik katsayısında en fazla azalma %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonda ölçülürken en az azalma ise referans betonunda elde edilmiştir. Taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla ısı iletkenlikteki azalma %52 ile %61 mertebesinde olmuştur. Yapılan bir çalışmada, ortalama birim ağırlığı 1850 kg/m^3 mertebesinde olan taşıyıcı hafif betonların ısı iletkenlik katsayıları 0.58 ile 0.86 W/mK arasında değiştiği rapor edilmektedir. Ortalama birim ağırlığı 2400 kg/m^3 mertebesinde olan normal ağırlıklı betonların ısı iletkenlik katsayıları ise 1.4 ile 2.9 W/mK mertebesinde değiştiği ifade edilmektedir (Holm ve Bremner, 2000). Başka bir çalışmada ise birim ağırlığı 1400 ile 1800 kg/m^3 arasında değişen hafif betonların ısı iletkenlik katsayılarının 0.85 ile 1.05 W/mK arasında değiştiği belirtilmektedir. Bunun yanı sıra birim ağırlığı 2000 ile 2600 kg/m^3 arasında değişen normal ağırlıklı betonların ısı iletkenlik katsayılarının 1.65 ile 2.0 W/mK arasında değiştiği belirtilmektedir (Santos ve Matias, 2006). Genel olarak taşıyıcı hafif betonların ısı iletkenlikleri normal betona kıyasla %50 ile %70 arasında azalma gösterdiği ve bunun gerçekleştirilen çalışmada elde edilen sonuçla uyumlu olduğu belirlenmiştir (Real vd., 2016).



Şekil 5.21. 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla ısı iletkenliklerindeki değişim

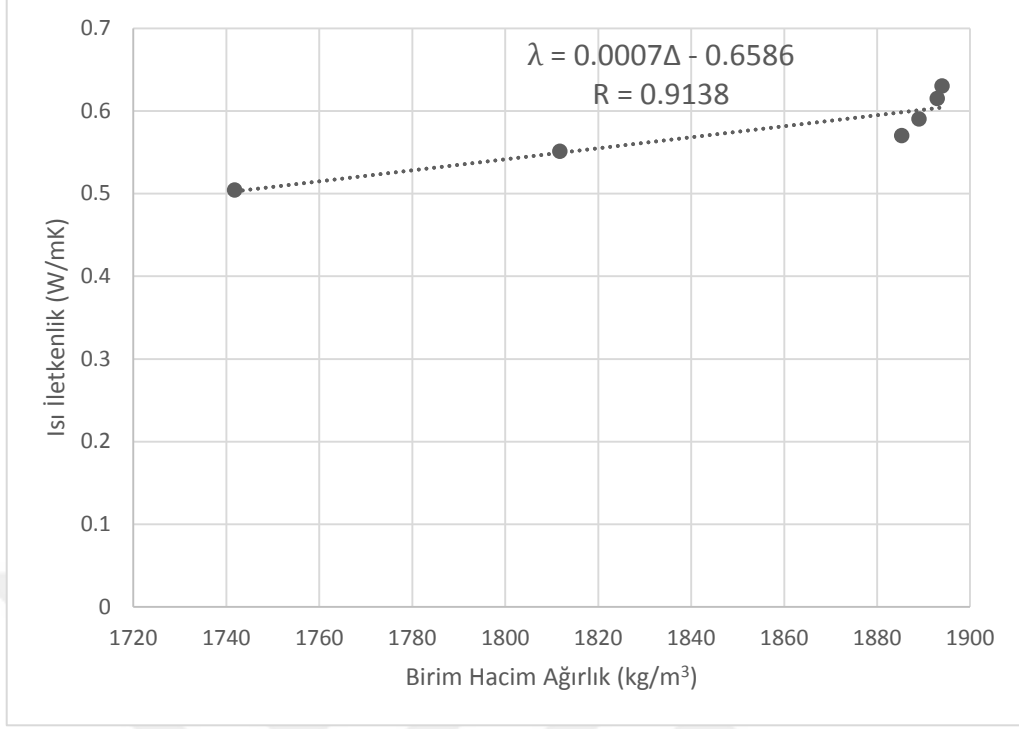
Şekil 5.22’de 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla ısı iletkenliklerindeki değişim yüzde olarak verilmektedir. Normal ağırlıklı betona kıyasla, ısı iletkenlik katsayısında en fazla azalma %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonda ölçülürken en az azalma ise 450 dozajlı referans betonunda ölçülmüştür. Taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla ısı iletkenliklerindeki azalma %55 ila %61 mertebesinde-dir. Yapılan bir çalışmada ise kullanılan agrega tipine bağlı olarak taşıyıcı hafif betonların ısı iletkenlik katsayılarının normal ağırlıklı betona kıyasla %40 ila %53 oranında daha düşük olduğu belirtilmektedir (Real vd., 2016). Literatürde ilgili raporda, birim ağırlığı 2080-2400 kg/m³ arasında değişen normal ağırlıklı betonların ısı iletkenlik katsayılarının 1.0-2.9 W/mK arasında değiştiği belirtilmektedir. Yine aynı raporda, birim ağırlığı 640-1920 kg/m³ arasında değişen hafif betonların ısı iletkenlik katsayılarının 0.18-1.30 W/mK arasında değiştiği rapor edilmektedir (ASHRAE, 2013). Gerçekleştirilen çalışmada elde edilen sonuçlar bu raporla uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 5.22. 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla ısı iletkenliklerindeki değişim

5.11. Isı İletkenlik-Birim Ağırlık İlişkisinin Değerlendirilmesi

Isıl iletkenlik ile birim ağırlık arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlara ilişkin ısı iletkenlik katsayısı ile birim ağırlık arasındaki ilişki Şekil 5.23’de verilmektedir.



Şekil 5.23. 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlar için belirlenen ısı iletkenlik-birim ağırlık ilişkisi

Çalışmada üretilen taşıyıcı hafif betonların birim ağırlıklarının artışına bağlı olarak ısı iletkenlik katsayıları artmıştır. Isı iletkenlik katsayısındaki azalma pomza agregasının boşluklu yapısı ve kullanılan mineral katkıların çimentoya kıyasla düşük özgül ağırlığa sahip olması ile ilişkilendirilmektedir (Shafigh vd., 2013). Aynı zamanda betondaki hava boşluğu miktarı arttıkça betonun birim ağırlığı da azalmaktadır (Taşdemir vd., 2017). 350 dozajlı 6 farklı bileşime sahip taşıyıcı hafif beton birlikte değerlendirildiğinde aşağıda verilen regresyon bağıntısı ile ifade edilen ısı iletkenlik katsayısı-birim ağırlık arasında güçlü bir ilişki ($R=0.91$) elde edilmektedir.

$$\lambda = 0.0007\Delta - 0.6586 \quad (5.1)$$

Bu ifadede, λ ısı iletkenlik katsayısını ve Δ betonun birim ağırlığı göstermektedir.

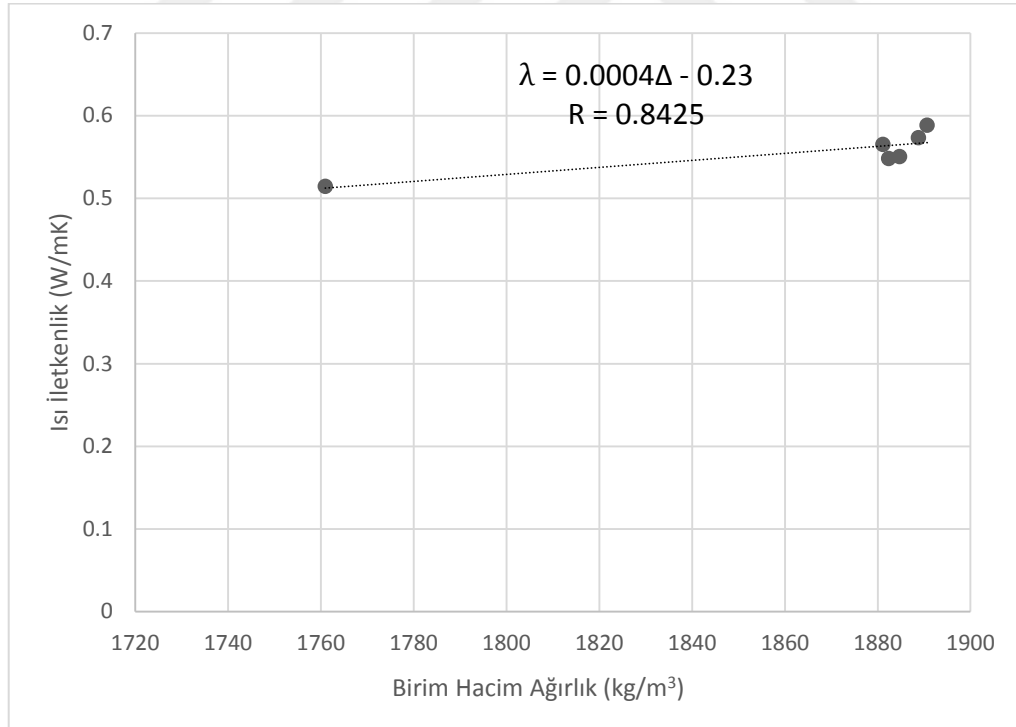
450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlar için belirlenen ısı iletkenlik katsayısı-birim ağırlık ilişkisi Şekil 5.24'de verilmektedir. Çalışmada üretilen taşıyıcı hafif betonların birim ağırlıklarındaki artışa bağlı olarak ısı iletkenlik katsayıları da artmaktadır. 450 dozajlı 6

farklı bileşime sahip taşıyıcı hafif betonlar birlikte değerlendirildiğinde aşağıda verilen regresyon bağıntısı ile ifade edilen ısı iletkenlik katsayısı-birim ağırlık arasında güçlü bir ilişki ($R=0.84$) elde edilmektedir.

$$\lambda = 0.0004\Delta - 0.23 \quad (5.2)$$

Bu ifadede, λ ısı iletkenlik katsayısını ve Δ betonun birim ağırlığı göstermektedir.

En yüksek ısı iletkenlik katsayısı birim ağırlığı 2250 kg/m^3 olan normal ağırlıklı betonda elde edilmiştir. Burada belirlenen ısı iletkenlik-birim ağırlık ilişkilerinde yalnızca taşıyıcı hafif betonlar için geçerlidir. Normal ağırlıklı beton için ölçülen değerler ilişkiye dâhil edilmemiştir. Zira literatürde ısı iletkenlik katsayısı-birim ağırlık arasındaki ilişkilerde genellikle aynı türdeki betonlar dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir (Asadi vd., 2018).



Şekil 5.24. 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlar için ısı iletkenlik-birim ağırlık ilişkisi

Farklı hafif agregalarla üretilen hafif betonların mekanik ve ısı iletkenlikleri üzerine yapılan bir çalışmada ısı iletkenlik ile birim ağırlık arasındaki ilişkiler araştırılmıştır

(Taşdemir vd., 2017). Yapılan çalışmada pomza, genleştirilmiş polystren ve genleştirilmiş perlit agregası içeren hafif betonlarda ısı iletkenlik katsayısını tahmin etmede kullanılabilecek bir bağıntı önerilmiştir. Çalışmada ısı iletkenlik katsayısı-birim ağırlık arasında güçlü bir ilişkiden ($R=0.94$) bahsedilmektedir.

$$\lambda = 0.0003\Delta - 0.014 \quad (5.3)$$

Bu ifadede, λ ısı iletkenlik katsayısı ve Δ betonun birim ağırlığıdır.

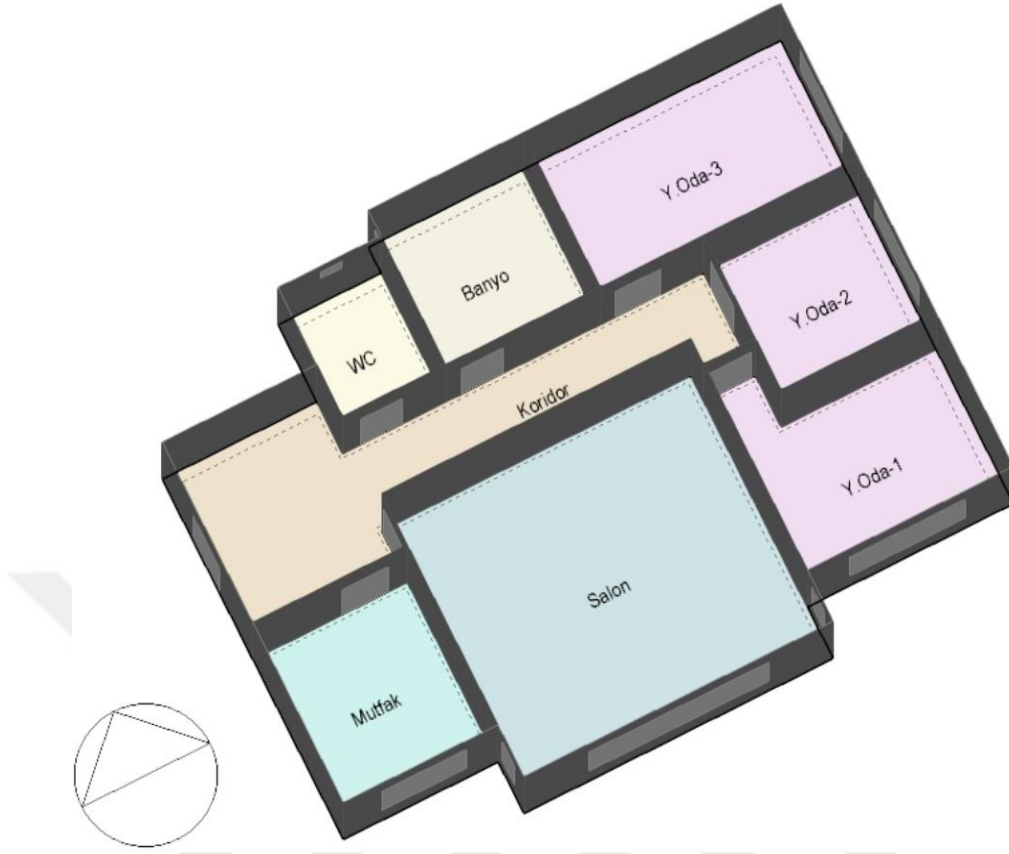
İki farklı dozaj için elde edilen bağıntıların literatürdeki bazı çalışmadaki sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir. Örneğin 350 dozajlı %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun ısı iletkenlik katsayısı 0.551 W/mK olarak belirlenmiştir. Taşdemir vd., 2017 önerdikleri bağıntıya göre ise ısı iletkenliğinin 0.530 W/mK mertebesinde olduğu belirtilmektedir. Benzer şekilde 450 dozajlı referans taşıyıcı hafif betonun ısı iletkenlik katsayısı 0.588 W/mK olarak belirlenmiştir. Taşdemir vd., 2017 önerdikleri bağıntıya göre belirlenen ısı iletkenlik 0.553 W/mK mertebesinde.

Literatürde mevcut çoğu çalışmada betonun ısı iletkenliği ile birim ağırlığı arasında güçlü bir ilişkinin varlığı vurgulamaktadır. Kaynaklanabilecek değişimlerin karışım dizaynı, deney koşulları ve nem içeriği ile ilgili olabileceği belirtilmektedir.

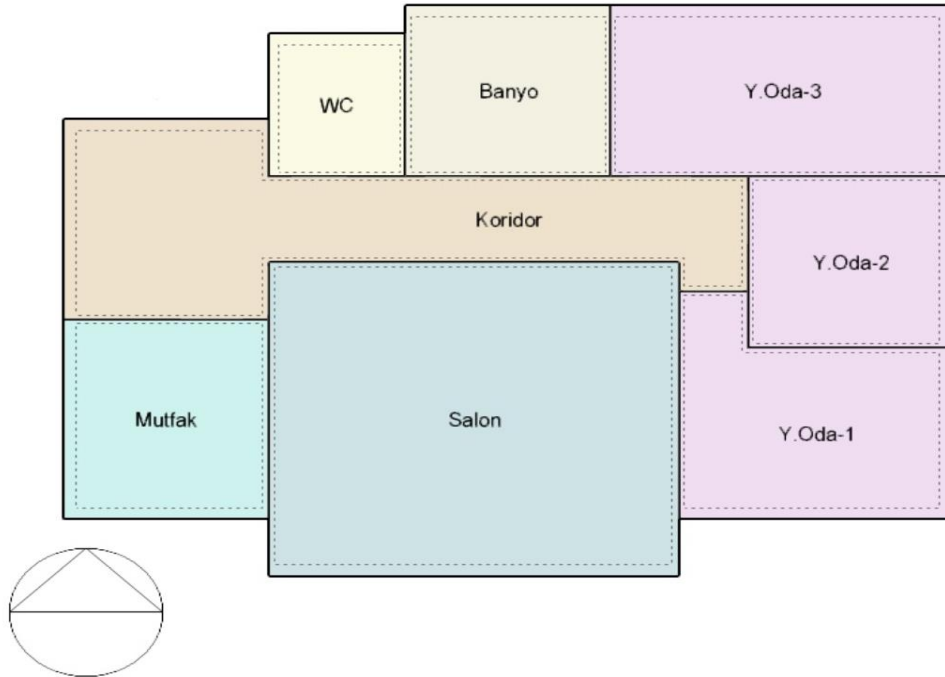
5.12. Taşıyıcı Hafif Betonların Enerji Performansı

5.12.1. Bina Bilgisi

Bu başlık altında normal ağırlıklı beton ile kıyaslamalı olarak farklı bileşime sahip taşıyıcı hafif betonların binanın enerji performansını iyileştirmedeki etkinliği numerik olarak değerlendirilmiştir. Bunu gerçekleştirmede 4 kişilik bir ailenin yaşadığı 3+1 şeklinde tasarlanan bir daire bileşim bakımından farklı beton türleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Daire Türkiye'nin soğuk iklim bölgesinde yeralan Ankara ilinde bulunduğu kabul edilmiştir. Dairenin 3 boyutlu görünümü ve kat planı Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'da verilmektedir. Toplam 116 m² zemin alanına sahip dairede salon, 3 yatak odası, mutfak, banyo, tuvalet ve koridor bulunmaktadır. Kat yüksekliği 3 m olarak seçilmiştir. Bina Güney-Batıya bakmaktadır. Daire ara kat olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 5.25. Tasarlanan dairenin üç boyutlu görünümü



Şekil 5.26. Tasarlanan dairenin kat planı

Dairede hem dış hem de bölme duvarlar bulunmaktadır. Dış duvarların kalınlığı 20 cm beton olup, üretilen her bir beton karışımına göre ayrı bir dış duvar elde edilmiştir. İç duvarlar 9 cm tuğla olup her iki yüzeyinde 2 cm alçı sıva katmanından oluşmaktadır ve her dairede aynıdır. Zemin ve çatı dış duvarlarla aynı bileşimdedir ve kalınlıkları 20 cm'dir. Her dairede bulunan pencereler (3+13+3 mm) tüm cephelerde aynı olup çift camdır ve pencere/duvar oranı %30'dur.

Yapı elemanlarının U değerleri (ısı geçirgenlik katsayısı) düştükçe ısı koruma performansları artmaktadır. Beton karışımları arasında karşılaştırma yapabilmek amacıyla Tablo 5.4'de bölme duvarın ve her bir beton karışımından elde edilen dış duvarların, döşemelerin (zemin) ve çatıların ısı geçirgenlik katsayıları (U-değeri) gösterilmektedir.

Tablo 5.4. Yapı elemanları için U (W/m^2K) değerleri

Karışımlar	Dış duvar	Bölme duvar	Zemin	Çatı
NB	3.088	2.141	2.748	3.403
350-REF	2.051		1.896	2.186
350-UK10	1.920		1.783	2.037
350-UK25	1.764		1.648	1.863
350-MK10	2.019		1.868	2.150
350-MK15	1.876		1.745	1.988
350-UK/MK5	1.965		1.822	2.088
450-REF	1.960		1.818	2.083
450-UK10	1.869		1.739	1.980
450-UK25	1.789		1.669	1.890
450-MK10	1.927		1.789	2.045
450-MK15	1.908		1.773	2.024
450-UK/MK5	1.874		1.743	1.986

5.12.2. Meteorolojik Veri

Tasarlanan daire modeli Türkiye'nin soğuk iklim bölgesini temsil eden İklim Bölgesi III olarak tanımlanan bölgede yeralan Ankara (40.12°K, 33.00°D, rakım 949 m) şehrinde bulunmaktadır. İklim Bölgesi III için meteorolojik veriler Tablo 5.5'de verilmektedir (URL-12, 2021).

Tablo 5.5. Ankara ili için aylık meteorolojik veriler

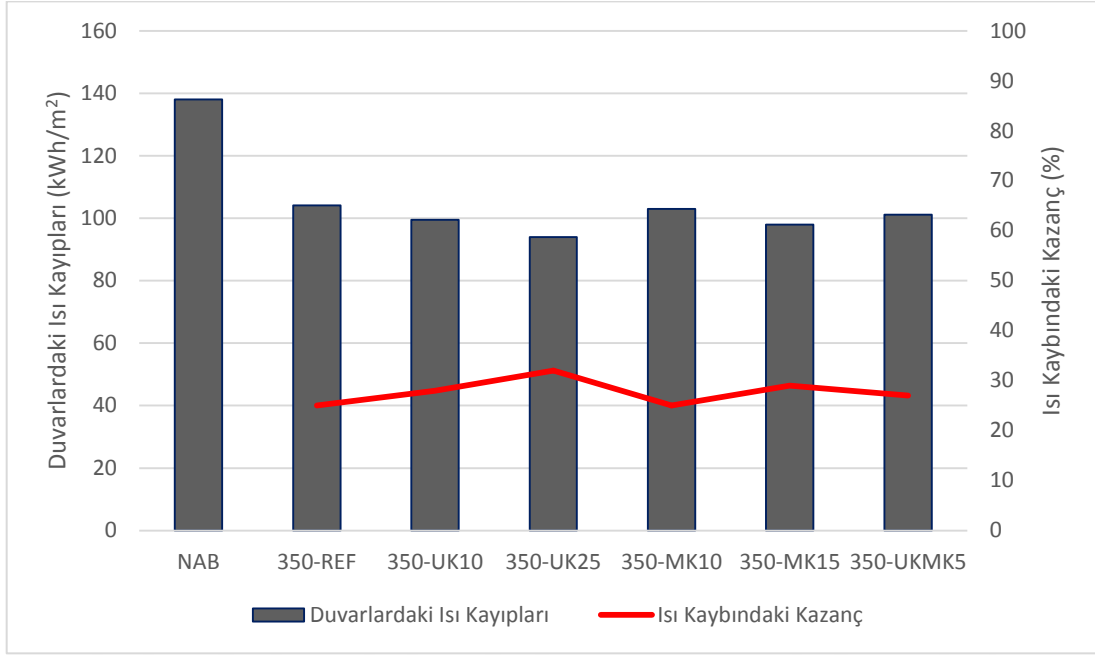
	Dış Sıcaklık (°C)	Çiğleşme Noktası Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Atmosferik Basınç (hPa)	Bağıl Nem (%)	Yatay yüzeye gelen toplam güneş ışıınımı (W/m ²)	Yatay yüzeye gelen direkt güneş ışıınımı (W/m ²)	Yatay yüzeye gelen yaygın güneş ışıınımı (W/m ²)
Ocak	-1.1	-4.4	1.9	909	78	69	32	38
Şubat	0.9	-3.9	2.3	909	70	98	47	51
Mart	5.8	-1.3	2.7	911	60	131	50	81
Nisan	10.5	2.2	2.6	913	56	194	105	89
Mayıs	15.5	5.7	2.4	914	52	220	105	115
Haziran	19.9	8.6	2.8	916	48	267	156	111
Temmuz	23.6	9.0	3.1	917	39	271	162	108
Ağustos	23.6	9.0	3.0	917	39	237	145	92
Eylül	18.0	6.7	2.3	915	48	176	90	86
Ekim	12.5	4.1	2.1	913	56	120	55	64
Kasım	5.8	1.0	1.7	911	71	91	48	43
Aralık	0.8	-2.4	1.8	909	79	74	43	31

5.12.3. Dış Duvardaki Isı Kaybı Değerlendirmesi

Taşıyıcı hafif betonların enerji performansı normal ağırlıklı betonla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Tasarlanan C Tipi dairenin DesignBuilder enerji simülasyon programı yardımıyla enerji performansı dairenin dış duvarlarındaki yıllık ısı kayıp kazançları, ısıtma dönemindeki dış duvarındaki yıllık ısı kayıp kazançları, toplam ısıtma-soğutma yükleri ve aylık-yıllık toplam ısıtma-soğutma yükleri dikkate alınarak dört kategoride değerlendirilmiştir.

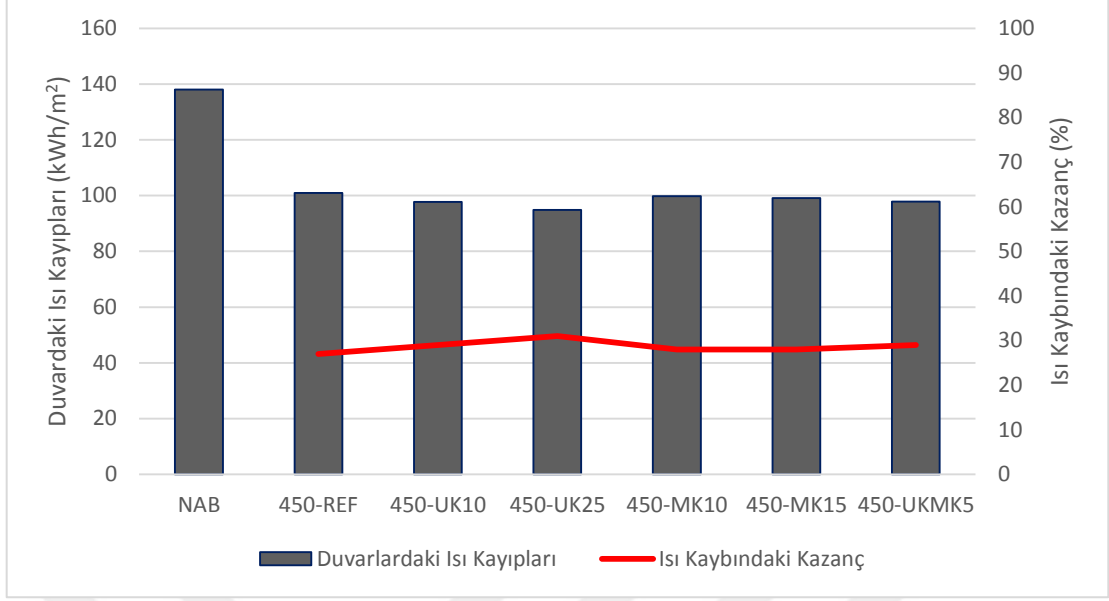
Tasarlanan dairenin pencere ve kapıları çıkarıldığında net dış duvar alanı 118.68 m² olarak hesaplanmıştır. Duvarların yıllık ısı-kayıp kazançları dikkate alındığında normal ağırlıklı betonun metrekarede ısı kaybı 138.05 kWh olarak belirlenmiştir. Şekil 5.27’de 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlarla ve normal ağırlıklı betonla tasarlanan dairenin dış duvarlarındaki yıllık ısı kaybı verilmektedir. 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlarla tasarlanan dairenin duvarlarındaki yıllık ısı kaybı metrekarede 93.94 ile 104.13 kWh arasında değişmektedir. 350 dozajlı referans taşıyıcı hafif betonlarla tasarlanan dairede en az miktarda ısı kaybı %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonda olmuştur. En fazla miktarda ısı kaybı ise 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonda meydana gelmiştir. 350 dozajlı

taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla dairenin dış duvarındaki yıllık ısı kaybındaki kazanç %25 ila %32 arasında değişim göstermektedir. Genel olarak üretilen tüm 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlardaki ısı kaybı normal ağırlıklı betonunkine kıyasla daha düşüktür.



Şekil 5.27. Normal ağırlıklı beton ve 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonların yıllık ısı kaybı ve normal ağırlıklı betonunkine kıyasla yüzde olarak değişim

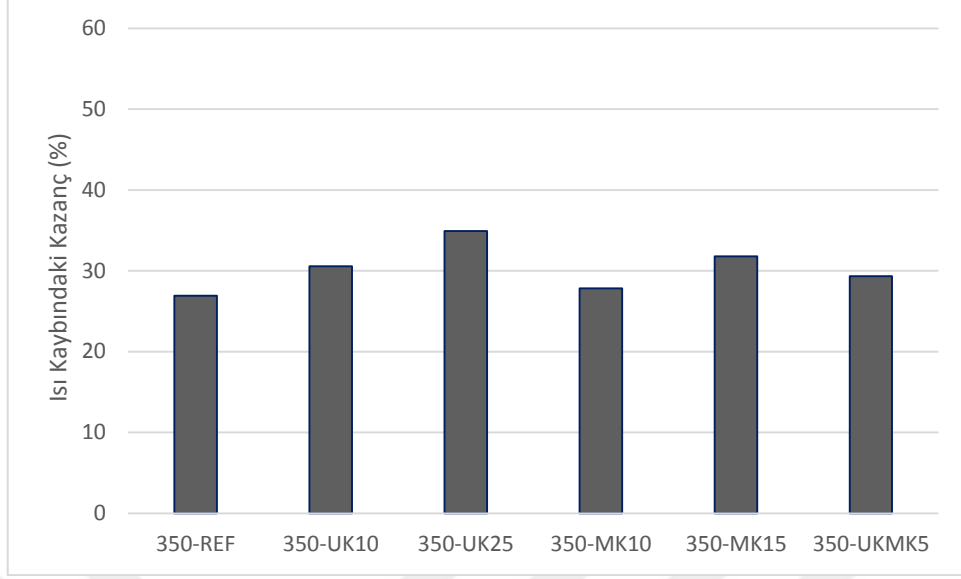
Şekil 5.28’de 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlarla ve normal ağırlıklı betonla tasarlanan dairenin dış duvarlarındaki yıllık ısı kaybı verilmektedir. 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlarla tasarlanan dairenin dış duvarlarında oluşan yıllık ısı kaybı metrekarede 94.82 ila 100.94 kWh arasında değişim göstermektedir. 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlarla tasarlanan dairede en az miktarda ısı kaybı %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonda olmuştur. En fazla ısı kaybı 450 dozajlı referans taşıyıcı hafif betonda meydana gelmiştir. 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla dairenin dış duvarlarındaki yıllık ısı kaybındaki kazanç %27 ila %31 arasında değişmektedir. Genel olarak 350 dozajlı hafif betonlarda olduğu gibi üretilen tüm 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlar için hesaplanan ısı kaybı normal ağırlıklı betonunkine kıyasla daha düşüktür.



Şekil 5.28. Normal ağırlıklı beton ve 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların yıllık ısı kaybı ve normal ağırlıklı betonunkine kıyasla yüzde olarak değişim

5.12.4. Isıtma Döneminde Dış Duvarlarda Oluşan Isı Kaybı Değerlendirmesi

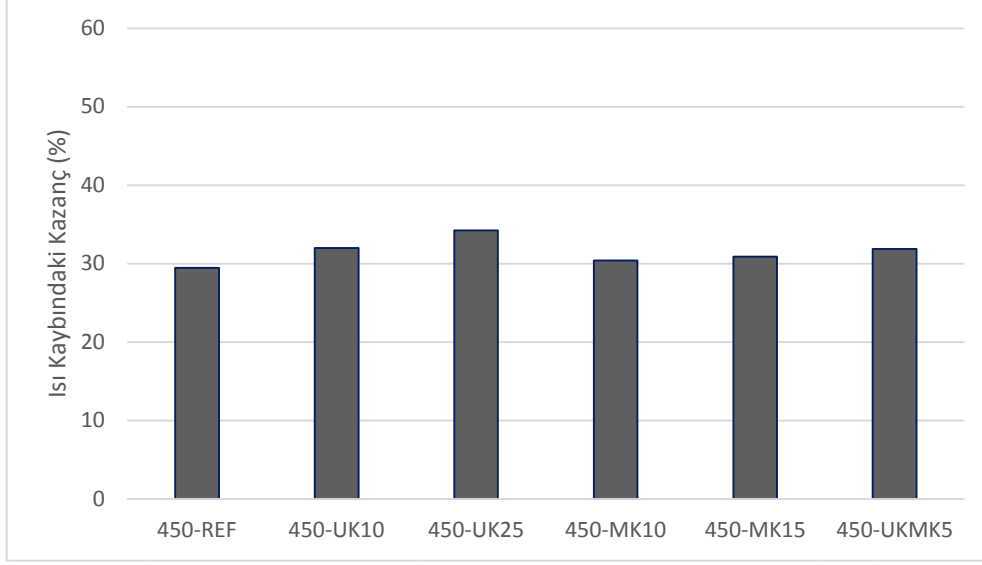
Şekil 5.29'da tasarımında 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonların kullanıldığı dairenin ısıtma döneminde dış duvarlarında normal ağırlıklı betona kıyasla yıllık ısı kaybındaki kazanç verilmektedir. Isıtma dönemi olarak Ekim, Kasım, Aralık, Ocak, Şubat ve Mart ayları dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır. Buna göre dış duvarlardaki ısı kaybındaki kazanç normal ağırlıklı betona kıyasla %26 ila %34 mertebesinde-dir. Isıtma döneminde normal ağırlıklı betona kıyasla dış duvarlardaki yıllık ısı kaybındaki kazanç en yüksek %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonda gerçekleşmiştir. Isıtma döneminde normal ağırlıklı betona kıyasla dış duvarlardaki yıllık ısı kaybındaki kazanç 350 dozajlı referans taşıyıcı hafif betonda en düşük miktarda gerçekleşmiştir.



Şekil 5.29. 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla ısıtma döneminde ısı kaybındaki kazanç

Şekil 5.30’da 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlarla ve normal ağırlıklı betonla tasarlanan dairenin ısıtma döneminde dış duvarlarında yıllık ısı kaybı verilmektedir. 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlarla tasarlanan dairenin ısıtma döneminde dış duvarlarındaki ısı kaybı normal ağırlıklı betona kıyasla %29 ila %34 mertebesinde azalmıştır. Isıtma döneminde normal ağırlıklı betona kıyasla dış duvarlardaki yıllık ısı kaybındaki kazanç en yüksek %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonda gerçekleşmiştir. Isıtma döneminde normal ağırlıklı betona kıyasla dış duvarlardaki yıllık ısı kaybındaki kazanç en düşük 450 dozajlı referans taşıyıcı hafif betonda gerçekleşmiştir.

Genel olarak, taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla dairenin ısıtma döneminde ısı kaybında sağlamış oldukları kazanç ısıtma ve soğutma dönemleri birlikte değerlendirildiği yıllık ısı kaybındaki kazançtan daha yüksektir.



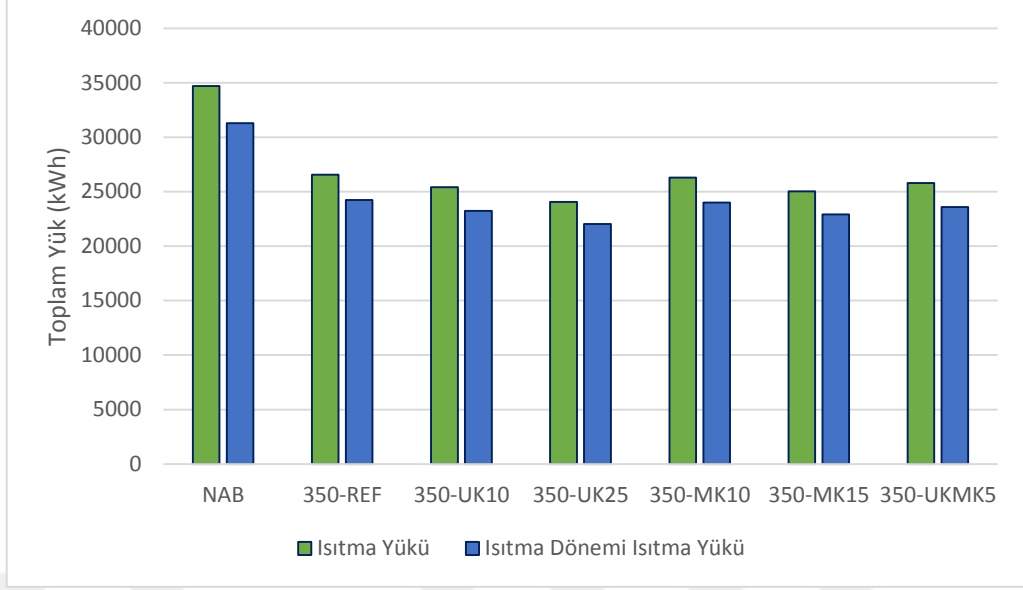
Şekil 5.30. 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla ısıtma döneminde ısı kaybındaki kazanç

5.12.5. Isıtma Yükleri

Tasarlanan daire için ısıtma yükleri toplam ısıtma yükü ve ısıtma dönemindeki ısıtma yükleri olarak iki kategoride değerlendirilmiştir. Isıtma dönemi Ekim, Kasım, Aralık, Ocak, Şubat, Mart aylarını kapsamaktadır.

Şekil 5.31’de 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlarla ve normal ağırlıklı betonla tasarlanan dairenin toplam ısıtma yükleri ve ısıtma dönemindeki ısıtma yükleri verilmektedir. Tüm betonlar için toplam ısıtma yükleri ısıtma dönemindeki toplam ısıtma yüklerinden yüksek olduğu görülmektedir.

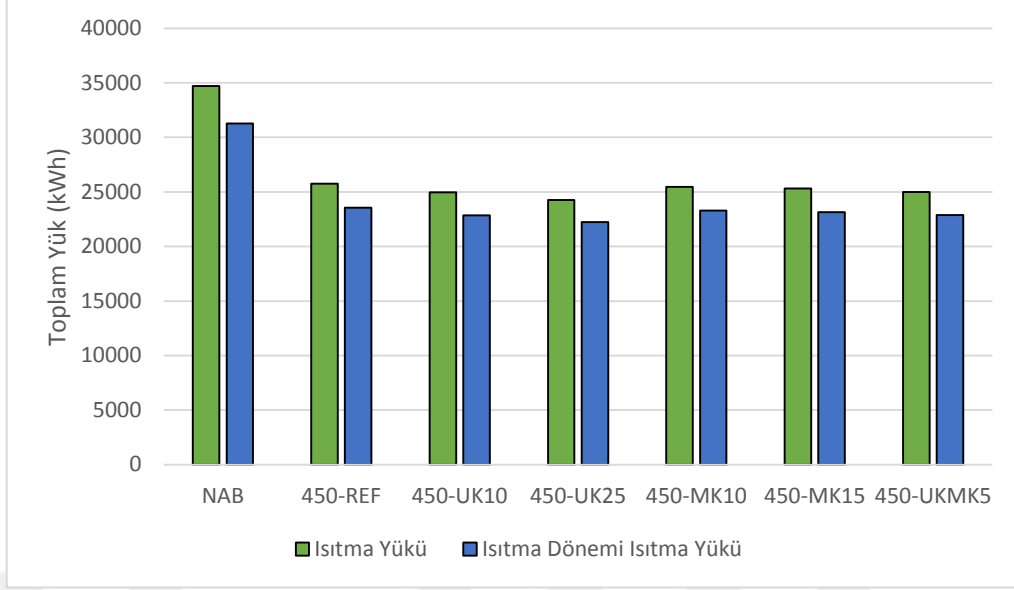
Toplam ısıtma yükleri değerlendirildiğinde, normal ağırlıklı betona kıyasla 350 dozajlı referans betonunun tasarlanan daire için yıllık ısıtma yükünde yaklaşık %23 oranında bir azalma sağlamış olduğu görülmektedir. 350 dozajlı %10 ve %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla ısıtma yükündeki azalmaya sağladığı katkı sırasıyla %26 ve %30 mertebesindedir. Benzer şekilde 350 dozajlı %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla ısıtma yükündeki azalmaya sağladığı katkı ise sırasıyla %24 ve %27 mertebesindedir. Normal ağırlıklı betona kıyasla 350 dozajlı %5 oranında uçucu kül ve %5 metakaolin içeren taşıyıcı hafif beton yıllık ısıtma yükünde yaklaşık %25 oranında bir azalma sağlamaktadır.



Şekil 5.31. Normal ağırlıklı beton ve 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonların yıllık ısıtma ve ısıtma dönemindeki toplam ısıtma yükleri

Isıtma dönemindeki toplam ısıtma yükleri dikkate alındığında, normal ağırlıklı betona kıyasla 350 dozajlı referans betonunun tasarlanan daire için yıllık ısıtma yükünde yaklaşık %22 oranında bir azalma sağlamaktadır. 350 dozajlı %10 ve %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla ısıtma yükündeki azalmaya sağladığı katkı sırasıyla %25 ve %29 mertebesinde. 350 dozajlı %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla ısıtma yükündeki azalmaya sağladığı katkı ise sırasıyla %23 ve %26 mertebesinde. Normal ağırlıklı betona kıyasla 350 dozajlı %5 oranında uçucu kül ve %5 metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun yıllık ısıtma yükünde yaklaşık %24 oranında bir azalma sağlamış olduğu görülmektedir.

Şekil 5.32’de 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlarla ve normal ağırlıklı betonla tasarlanan dairenin toplam ısıtma yükleri ve ısıtma dönemindeki toplam ısıtma yükleri verilmektedir. Tüm betonlar için toplam ısıtma yükleri ısıtma dönemindeki toplam ısıtma yüklerinden yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 5.32. Normal ağırlıklı beton ve 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların yıllık ısıtma ve ısıtma dönemindeki toplam ısıtma yükleri

Toplam ısıtma yükleri değerlendirildiğinde, normal ağırlıklı betona kıyasla 450 dozajlı referans betonun tasarlanan daire için yıllık ısıtma yükünde yaklaşık %25 oranında bir azalma sağlamıştır. 450 dozajlı %10 ve %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla ısıtma yükündeki azalmaya sağladığı katkı sırasıyla %28 ve %30 mertebesindedir. 450 dozajlı %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla ısıtma yükündeki azalmaya sağladığı katkı ise sırasıyla %26 ve %27 mertebesindedir. Normal ağırlıklı betona kıyasla 450 dozajlı %5 oranında uçucu kül ve %5 metakaolin içeren taşıyıcı hafif beton yıllık ısıtma yükünde yaklaşık %28 mertebesinde bir azalma sağlamıştır.

Isıtma dönemindeki toplam ısıtma yükleri değerlendirildiğinde, normal ağırlıklı betona kıyasla 450 dozajlı referans betonunun tasarlanan daire için ısıtma yükünde yaklaşık %24 oranında bir azalma sağlamaktadır. 450 dozajlı %10 ve %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla ısıtma yükündeki azalmaya sağladığı katkı sırasıyla %27 ve %29 mertebesindedir. 450 dozajlı %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla ısıtma yükünün azalmasına sağladığı katkı ise sırasıyla %25 ve %26 mertebesindedir. Normal ağırlıklı betona kıyasla 450 dozajlı %5 oranında uçucu kül ve %5 metakaolin içeren taşıyıcı hafif beton yıllık ısıtma yükünde yaklaşık %27 oranında bir azalma sağlamaktadır.

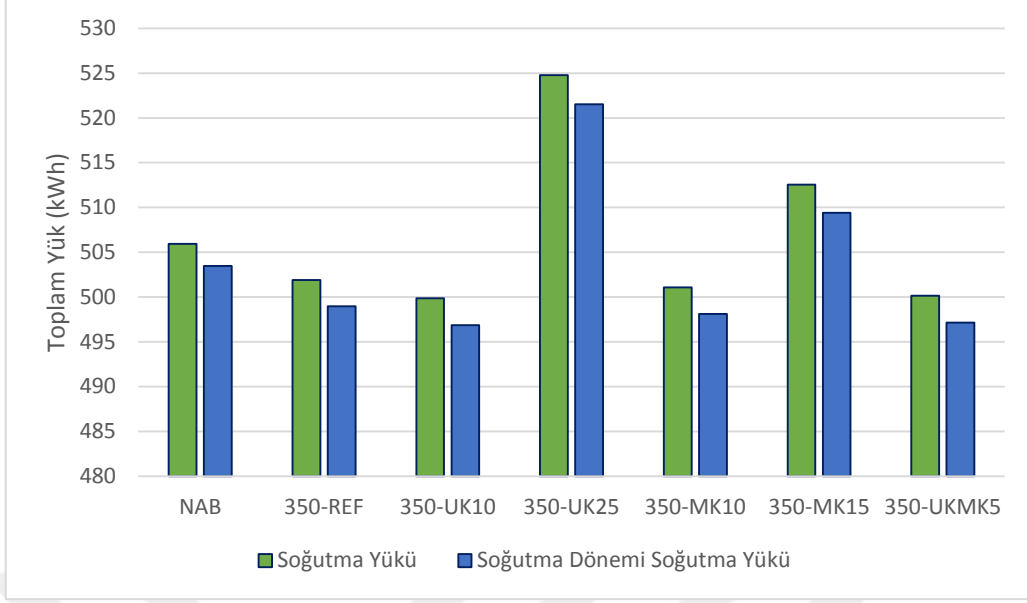
Taşıyıcı hafif betonlar normal ağırlıklı betona kıyasla dairenin toplam ısıtma yükü ve ısıtma dönemindeki toplam ısıtma yüklerinin azalmasına belirgin bir katkı sağladığı ve bu manada daire için gerekli olan ısıtma enerjisini belirgin bir oranda azalttığı görülmektedir.

5.12.6. Soğutma Yükleri

Tasarlanan daire için soğutma yükleri toplam soğutma yükü ve soğutma dönemindeki toplam soğutma yükleri olarak iki kategoride değerlendirilmiştir. Soğutma dönemi Nisan, Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarını kapsamaktadır.

Şekil 5.33’de 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlarla ve normal ağırlıklı betonla tasarlanan dairenin toplam soğutma yükleri ile soğutma dönemindeki toplam soğutma yükleri verilmektedir. Tüm betonlar için toplam soğutma yükleri soğutma dönemindeki toplam soğutma yüklerinden az da olsa yüksektir. Tüm betonlar için toplam soğutma yükleri birbirine çok yakın olup yaklaşık 500 ila 525 kWh arasında değişmektedir. Bunun yanı sıra soğutma dönemindeki toplam soğutma yükleri tüm betonlar için birbirine oldukça yakın değerlerde olup yaklaşık 495 ila 520 kWh arasında değişmektedir.

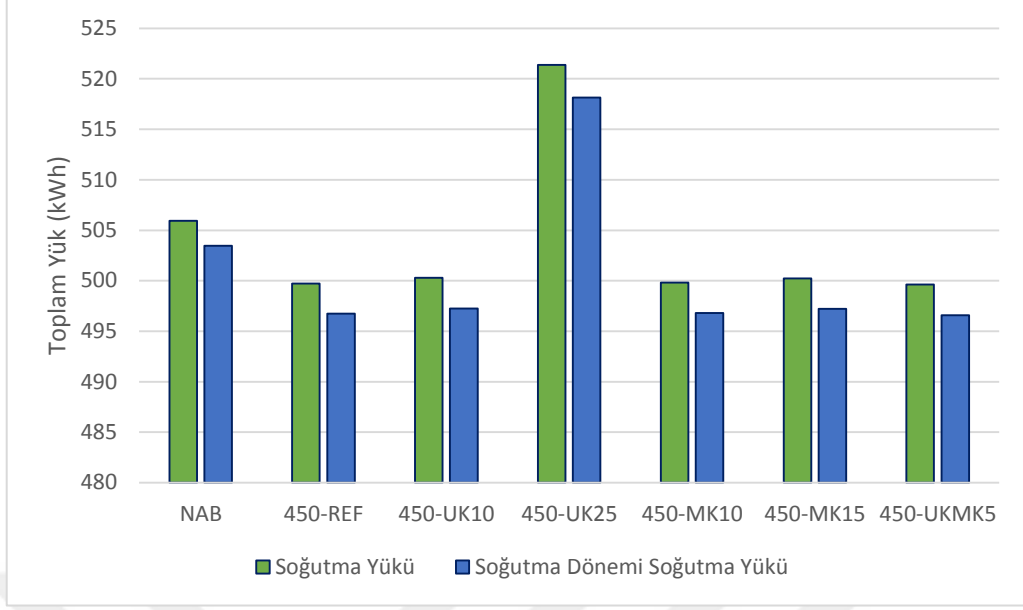
Toplam soğutma yükleri 350 dozajlı %25 oranında uçucu kül ve 350 dozajlı %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonlar dışındaki taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı beton ile aynı mertebede toplam soğutma yüküne ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. 350 dozajlı %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun normal ağırlıklı betona kıyasla toplam soğutma yükü yıllık 18.83 kWh kadar fazla olup oldukça düşüktür. Yüzde olarak hesaplandığında, normal ağırlıklı betona kıyasla 350 dozajlı %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun soğutma yükü %3.7 oranında daha fazla olduğu görülmektedir. 350 dozajlı %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun normal ağırlıklı betona kıyasla soğutma dönemindeki toplam soğutma yükü yıllık 18.05 kWh daha fazladır. Benzer şekilde, normal ağırlıklı betona kıyasla 350 dozajlı %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun soğutma dönemindeki soğutma yükü %3.5 daha fazladır.



Şekil 5.33. Normal ağırlıklı beton ve 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonların yıllık soğutma ve soğutma dönemindeki toplam soğutma yükleri

350 dozajlı %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun normal ağırlıklı betona kıyasla soğutma yükü yıllık 6.59 kWh daha fazla olup oldukça düşük mertebededir. Yüzde olarak hesaplandığında, normal ağırlıklı betona kıyasla 350 dozajlı %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun soğutma yükü %1 oranında daha fazla olduğu görülmektedir. 350 dozajlı %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun normal ağırlıklı betona kıyasla soğutma dönemindeki soğutma yükü yıllık 5.95 kWh kadar fazladır. Yüzde olarak hesaplandığında, normal ağırlıklı betona kıyasla 350 dozajlı %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonun soğutma dönemindeki soğutma yükü %1.2 oranında daha fazla olmaktadır.

Şekil 5.34’de 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlarla ve normal ağırlıklı betonla tasarlanan dairenin toplam soğutma yükleri ve soğutma dönemindeki toplam soğutma yükleri verilmektedir. Tüm betonlar için toplam soğutma yüklerinin soğutma dönemindeki toplam soğutma yüklerinden az da olsa fazla olduğu görülmektedir. Tüm betonlar için toplam soğutma yükleri birbirine çok yakın olup yaklaşık 500 ila 520 kWh arasında değişmektedir. Bunun yanı sıra tüm betonlar için soğutma dönemindeki toplam soğutma yükleri birbirine çok yakın olup yaklaşık 495 ila 520 kWh arasında değişmektedir.



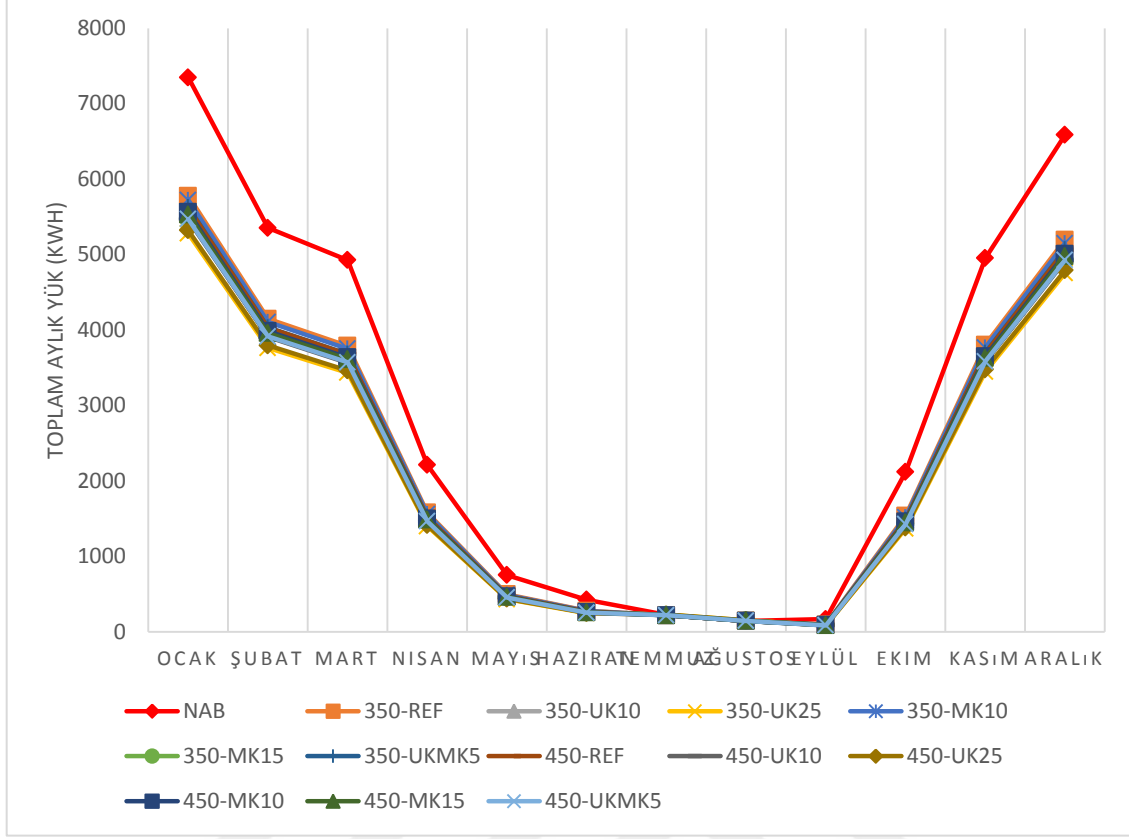
Şekil 5.34. Normal ağırlıklı beton ve 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların yıllık soğutma ve soğutma dönemindeki toplam soğutma yükleri

Soğutma yükleri 450 dozajlı %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif beton dışındaki taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı beton ile aynı mertebede soğutma yüküne ihtiyacı olduğu görülmektedir. 450 dozajlı %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun normal ağırlıklı betona kıyasla soğutma yükü yıllık 15.43 kWh daha fazla olup oldukça düşük mertebedir. Yapılan değerlendirme ile normal ağırlıklı betona kıyasla 450 dozajlı %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun soğutma yüküne ihtiyacı %3 oranında daha fazla olduğu görülmektedir. 450 dozajlı %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun normal ağırlıklı betona kıyasla soğutma dönemindeki toplam soğutma yükü yıllık 14.69 kWh daha fazladır. Yapılan değerlendirme ile normal ağırlıklı betona kıyasla 450 dozajlı %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun soğutma dönemindeki toplam soğutma yüküne ihtiyacı yaklaşık %3 oranında daha fazla belirlenmiştir.

Genel bir değerlendirme yapıldığında, soğutma yükü ihtiyacının beton bileşiminden önemli derecede etkilenmediği görülmektedir. Bazı taşıyıcı hafif beton bileşimlerinin normal ağırlıklı betona kıyasla soğutma yükü ve soğutma dönemindeki toplam soğutma yükleri fazla olmasına rağmen yüzde olarak değerlendirildiğinde oldukça düşük mertebede kaldığı görülmektedir.

5.12.7. Aylık ve Yıllık Enerji Tüketiminin Karşılaştırılması

Enerji programı simülasyonu vasıtasıyla tasarlanan daire için farklı beton karışımlarına göre belirlenen aylık ısıtma ve soğutma yükleri toplam yük olarak Şekil 5.35’de verilmektedir. İlgili şekilden görüleceği üzere, tüm taşıyıcı hafif betonlar normal ağırlıklı betona kıyasla daha az enerji tüketmektedir. Yalnızca Temmuz ve Ağustos ayları dikkate alındığında, 350 dozajlı %25 oranında uçucu kül içeren, 350 dozajlı %15 oranında metakaolin içeren ve 450 dozajlı %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların toplam ısıtma ve soğutma yüklerinin normal ağırlıklı betonun toplam ısıtma ve soğutma yükünden daha fazla olduğu görülmektedir. Genel sonuç itibarıyla, taşıyıcı hafif betonların soğutma yüklerinin önemli derecede etkilenmediği görülmektedir. 350 dozajlı %25 oranında uçucu kül içeren, 350 dozajlı %15 oranında metakaolin içeren ve 450 dozajlı %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların Temmuz ve Ağustos ayları dışında toplam ısıtma ve soğutma yüklerinin normal ağırlıklı betonun toplam ısıtma ve soğutma yükünden daha düşüktür. 350 ve 450 dozajlı %25 oranında uçucu kül içeren ve 350 dozajlı %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların dışındaki tüm taşıyıcı hafif betonların tüm aylardaki toplam ısıtma ve soğutma yükleri normal ağırlıklı betonun toplam ısıtma ve soğutma yükünden daha düşüktür.

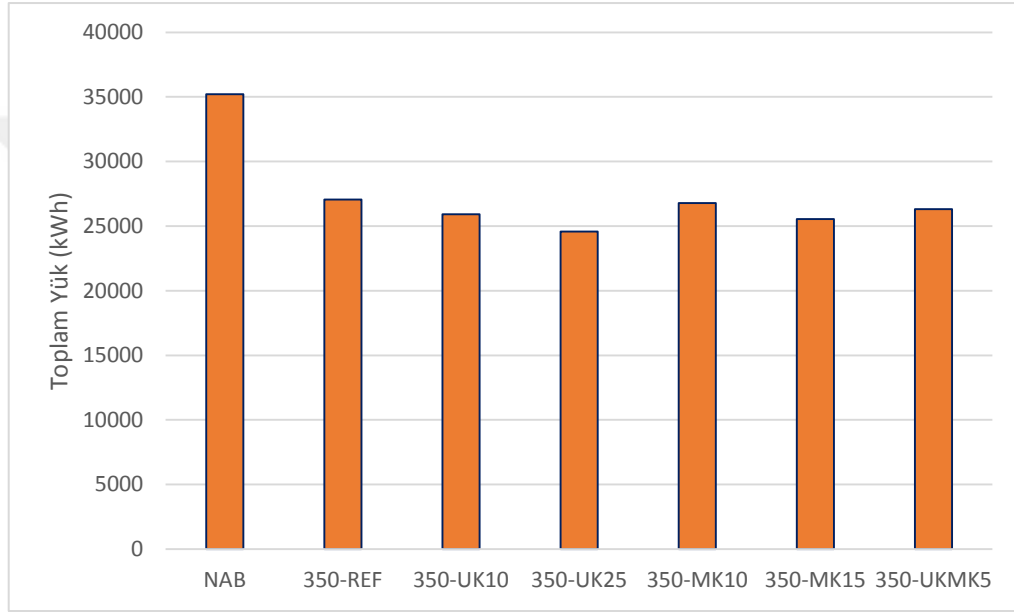


Şekil 5.35. Toplam Aylık Enerji Yükleri

Enerji programı simülasyonu vasıtasıyla, 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonların ve normal ağırlıklı betonun yıllık ısıtma ve soğutma yükleri toplam olarak Şekil 5.36'da verilmektedir. Yıllık toplam ısıtma ve soğutma yükleri itibariyle bir değerlendirme yapıldığında, tasarlanan dairede normal ağırlıklı beton kullanıldığında enerji tüketiminin yaklaşık 35201 kWh mertebesinde olduğu görülmektedir. 350 dozajlı referans taşıyıcı hafif betonunun normal ağırlıklı betona kıyasla yıllık enerji tüketiminde %23 oranında bir azalma sağlamaktadır. 350 dozajlı %10 ve %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla sırasıyla yıllık %26 ve %30 oranında enerji tasarrufu sağlamaktadır. Benzer şekilde, 350 dozajlı %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla yıllık enerji tüketiminde sırasıyla yaklaşık %23 ve %27 oranında enerji tasarrufu sağlamaktadır. 350 dozajlı %5 uçucu kül ve %5 metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla yaklaşık %25 oranında bir enerji tasarrufu sağlamaktadır.

Taşıyıcı hafif betonun binalarda enerji performansını iyileştirme potansiyeline ilişkin bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada karşılaştırma yapmak amacıyla normal

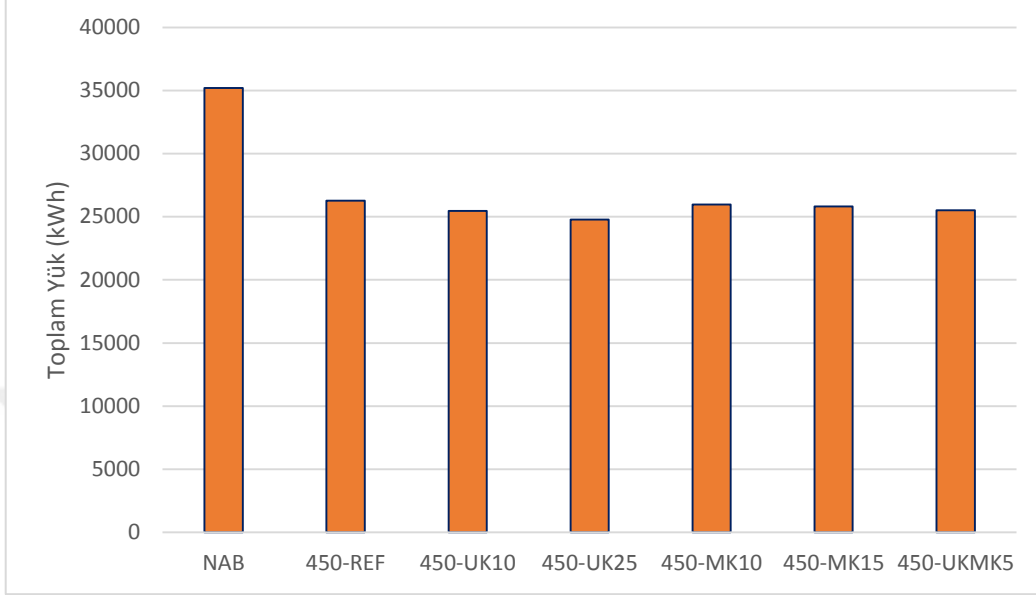
ağırlıklı beton üretimi de gerçekleştirilmiştir. Çalışmada dış ortam koşullarından bağımsız olarak Avrupa'nın herhangi bir bölgesinde taşıyıcı hafif betonun binanın ısıtma enerjisi gereksiniminin azalmasına önemli katkı sağladığı rapor edilmektedir. Tasarlanan aynı apartman dairesi için normal ağırlıklı beton yerine taşıyıcı hafif beton kullanıldığında ısıtma enerjisi gereksiniminde %15 mertebesinde bir tasarruf sağlandığı belirtilmektedir. Çalışmada aynı zamanda soğutma enerjisi ihtiyacının beton bileşiminden etkilenmediği belirtilmektedir (Real vd., 2016).



Şekil 5.36. Normal ağırlıklı beton ve 350 dozajlı taşıyıcı hafif betonlar için belirlenen yıllık enerji tüketimleri

Enerji programı simülasyonu vasıtasıyla 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların ve normal ağırlıklı betonun yıllık ısıtma ve soğutma yükleri toplam yük olarak Şekil 5.37’de verilmektedir. 450 dozajlı referans taşıyıcı hafif betonlar normal ağırlıklı betona kıyasla yıllık enerji tüketiminde %25 oranında bir tasarruf sağlamıştır. 450 dozajlı %10 ve %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonların ise normal ağırlıklı betona kıyasla sağladıkları yıllık enerji tasarrufu sırasıyla %27 ve %29 mertebesinde. Benzer şekilde 450 dozajlı %10 ve %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla yıllık enerji tüketiminde sırasıyla yaklaşık %26 ve %27 oranında enerji tasarrufu sağlamıştır. 450 dozajlı %5 uçucu kül ve %5 metakaolin içeren taşıyıcı

hafif betonların normal ağırlıklı betona kıyasla sağladıkları enerji tasarrufu yaklaşık %27 mertebesinde.



Şekil 5.37. Normal ağırlıklı beton ve 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonlar için belirlenen yıllık enerji tüketimleri

Genleştirilmiş kil agregası içeren taşıyıcı hafif betonun karakteristiklerine ilişkin yapılan çalışmada normal ağırlıklı beton yerine taşıyıcı hafif beton kullanıldığında binanın yapısal elemanlarında ısı köprüleme etkisinin önemli derecede azaldığı rapor edilmektedir. Bu kapsamda taşıyıcı hafif beton kullanımı ile binadaki ısı kaybının azaltılabileceği ve ısı kaybını azaltmada gerekli ısı yalıtım sistemlerinin en aza indirilebileceği vurgulanmaktadır (Bogas, 2011). Sonuç itibariyle, normal ağırlıklı betonla karşılaştırıldığında taşıyıcı hafif betonların bileşimlerinden bağımsız olarak enerji tasarrufu açısından ciddi bir katkı sağladığı açıkça görülmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında pomza ve ham perlit agregası kullanarak üretilen farklı bileşimde taşıyıcı hafif betonların bazı fiziksel ve mekanik özellikleri ile enerji performansları normal ağırlıklı beton ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve enerji performansı değerlendirmesine ilişkin numerik analizler ve elde edilen veriler ışığında aşağıda bulgular özetlenmektedir.

- Üretilen taşıyıcı hafif betonların birim ağırlıkları 1728 ila 1885 kg/m^3 arasında değişirken 28 günlük basınç dayanımları 21.04 ila 27.40 MPa arasında değişmiştir. Bu sonuçlar itibariyle üretilen tüm betonlar ilgili standartta taşıyıcı hafif betonlar için belirtilen sınır şartları sağlamaktadır.
- Üretilen taşıyıcı hafif betonların eğilme dayanımları ve yarmada çekme dayanımları belli oranlarda uçucu kül ve metakaolin ikame oranlarında artış göstermiştir. Benzer şekilde bu betonların su emme ve poroziteleri de uçucu kül ve metakaolin ikame artış oranına bağlı olarak azalma eğilimi göstermektedir.
- Uçucu kül ve metakaolin ikame oranı artışına bağlı olarak taşıyıcı hafif betonların kılcallık katsayısında azalma görülmektedir. Mineral katkı içermeyen taşıyıcı hafif betona göre kılcallık katsayısında en belirgin düşüş 350 dozajlı %25 oranında uçucu kül ve 350 dozajlı %15 oranında metakaolin içeren taşıyıcı hafif betonlarda meydana geldiği görülmektedir.
- Üretilen taşıyıcı hafif betonların hızlı klorür geçirimsilikleri uçucu kül ve metakaolin ikame artış oranına bağlı olarak azalma eğilimi göstermektedir. En yüksek klorür geçirimsiliği 350 ve 450 dozajlı referans taşıyıcı hafif betonlarda meydana gelmiştir. Referans betona kıyasla hızlı klorür geçirimsiliğinde en yüksek azalma 450 dozajlı %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonlarda gerçekleşmiştir.
- 350 ve 450 dozajlı %10 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonlar dışındaki taşıyıcı hafif betonların aşınma dirençleri uçucu kül ve metakaolin ikame artış oranına bağlı olarak artış eğilimi göstermektedir.
- Uçucu kül ve metakaolin ikame oranı arttıkça taşıyıcı hafif betonların su işleme derinliklerinde azalma eğilimi görülmektedir. En düşük su işleme derinliği 450 dozajlı %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonda gerçekleşmiştir.

- Üretilen taşıyıcı hafif betonların ısı iletkenlik katsayıları uçucu kül ve metakaolin ikame artış oranına bağlı olarak azalma eğilimindedir. Normal agregası yerine kullanılan pomza ve perlit agregası betonun ısı iletkenliğini önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Taşıyıcı hafif betonların ısı iletkenlik katsayıları 0.524 W/mK ila 0.63 W/mK arasında değişmiştir. Taşıyıcı hafif betonların ısı iletkenlik katsayıları normal ağırlıklı betona kıyasla yaklaşık %52 ila %61 oranında daha düşüktür.
- 350 ve 450 dozajlı taşıyıcı hafif betonların birim ağırlığı azaldıkça ısı iletkenlik katsayıları da azalmaktadır. İki farklı dozajlı taşıyıcı hafif betonlar için ısı iletkenlik ile birim ağırlık arasında güçlü bir ilişki elde edilmiştir.
- Taşıyıcı hafif betonlar normal ağırlıklı betona kıyasla dairenin dış duvarlarında %25 ila %32 arasında değişen oranda ısı kaybı kazancı sağlamıştır. Sadece ısıtma dönemi itibarıyla taşıyıcı hafif betonlarla tasarlanan dairenin dış duvarlarındaki ısı kaybındaki kazanç yüzdesi daha yüksek gerçekleşmiştir.
- Normal ağırlıklı betona kıyasla taşıyıcı hafif betonlarla tasarlanan dairenin toplam ısıtma yükü ve ısıtma döneminde toplam ısıtma yüklerinin azalmasında belirgin bir oranda katkı sağlamaktadır. Bu itibarla üretilen tüm taşıyıcı hafif betonların tasarlanan dairenin ısıtma enerjisi ihtiyacını belirgin bir şekilde azaltmaktadır.
- Tasarlanan daire için gerekli olan toplam soğutma yükleri değerlendirildiğinde soğutma yükü ihtiyacının beton bileşiminden önemli derecede etkilenmediği görülmektedir. Bazı taşıyıcı hafif betonlar normal ağırlıklı betona kıyasla toplam soğutma yükleri ve özellikle soğutma dönemindeki toplam soğutma yüklerinin daha fazla olmasına rağmen yüzde olarak hesaplandığında oldukça düşük mertebede kalmış olduğu görülmektedir.
- Üretilen tüm taşıyıcı hafif betonların tasarlanan daire için normal ağırlıklı betona kıyasla daha az toplam yıllık enerji tüketilmesine katkı sağladığı görülmektedir. Taşıyıcı hafif betonlar normal ağırlıklı beton ile kıyaslandığında yıllık %23 ile %30 oranında enerji tasarrufu sağlamaktadır. Tasarlanan daire için normal ağırlıklı betona kıyasla en yüksek enerji tasarrufu 350 dozajlı %25 oranında uçucu kül içeren taşıyıcı hafif betonun sağladığı görülmektedir.
- Enerji performansı analizi Ankara bölgesi için gerçekleştirilmiştir. İleriki yıllarda gerçekleştirilecek çalışmalarda taşıyıcı hafif betonun binalardaki yıllık enerji tüketimine etkisine ilişkin enerji performans analizlerinin Türkiye’de farklı iklim

bölgeleri için yapılması önerilebilir. Böylece Türkiye’de farklı iklim bölgelerinde elde edilen verilerin istatistiksel karşılaştırması yapılabilir.

- Benzer şekilde ilerde gerçekleştirilecek çalışmalarda taşıyıcı hafif betonun enerji performansı üzerindeki etkinliği farklı tip bina ve/veya farklı işlev gören okul, hastane gibi kamu binaları için gerçekleştirilebilir.



7. KAYNAKLAR

- ACI 213R-14, 2014. Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete, American Concrete Institute.
- ACI 213R-87, 1999. Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete, American Concrete Institute.
- ACI 216.1-07, 2007. Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies, American Concrete Institute.
- Ahmad, M.R., Chen, B. ve Shah, S.F.A., 2019. Investigate the Influence of Expanded Clay Aggregate and Silica Fume on the Properties of Lightweight Concrete, Construction and Building Materials, 220, 253-266.
- Aitcin, P.C., 1998. High-Performance Concrete, E ve FN Spon, Londra ve New York, 650s.
- Akçaözoğlu, S. ve Atiş, C.D., 2011. Effect of Granulated Blast Furnace Slag and Fly Ash Addition on the Strength Properties of Lightweight Mortars Containing Waste PET Aggregates, Construction and Building Materials, 25, 4052-4058.
- Akkaş, A., 2011. Pomza Agregalı Taşıyıcı Hafif Betonun Taşıyıcılık Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Ali, M.R., Maslehuddin, M., Shameem, M. ve Barry, M.S., 2018. Thermal-resistant Lightweight Concrete with Polyethylene Beads as Coarse Aggregates, Construction and Building Materials, 164, 739-749.
- Al-Sibahy, A. ve Edwards, R., 2012. Mechanical and Thermal Properties of Novel Lightweight Concrete Mixtures Containing Recycled Glass and Metakaolin, Construction and Building Materials, 31, 157-167.
- Arslan, M.E., 2007. Eğilmede Taşıyıcı Hafif Beton-Donatı Aderansının Geleneksel Beton-Donatı Aderansı ile Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Asadi, I., Shafigh, P., Hassan, Z.F.B.A. ve Mahyuddin, N.B., 2018. Thermal Conductivity of Concrete- A Review, Journal of Building Engineering, 20, 81-93.
- ASHRAE, 2010. Fundamentals, Chapter 28-Energy Estimation Methods, Atlanta.
- Aslam, M., Shafigh, P., Jumaat, M.Z. ve Lachemi, M., 2016. Benefits of Using Blended Waste Coarse Lightweight Aggregates in Structural Lightweight Aggregate Concrete, Journal of Cleaner Production, 119, 108-117.

- ASTM C1585-20, 2020. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C330/C330M-17a, 2017. Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C618-19, 2019. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Aşık, M., 2006. Structural Lightweight Concrete with Natural Perlite Aggregate and Perlite Powder, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Bajere, D., Kazjonovs, J. ve Aleksandrs, K., 2013. Lightweight Concrete with Aggregates Made by Using Industrial Waste, Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering, 4(5), 67-73.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S., 2012. Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 825s.
- Bogas, J.A., 2011. Characterization of Structural Lightweight Expanded Clay Aggregate Concrete, Phd Thesis, Technical University of Lisbon, Lisbon.
- Bogas, J.A., Carriço, A. ve Pontes, J., 2019. Influence of Cracking on The Capillary Absorption and Carbonation of Structural Lightweight Aggregate Concrete. Cement and Concrete Composites, 104, 103382.
- Bogas, J.A., Gomes, M.G. ve Gomes, A., 2013. Compressive Strength Evaluation of Structural Lightweight Concrete by Non-Destructive Ultrasonic Pulse Velocity Method, Ultrasonics, 53, 962-972.
- Bogas, J.A., Gomes, M.G. ve Real, S., 2015. Capillary Absorption of Structural Lightweight Aggregate Concrete, Materials and Structures, 48, 2869-2883.
- Bogas, J.L. ve Gomes, T., 2015. Mechanical and Durability Behaviour of Structural Lightweight Concrete Produced with Volcanic Scoria, Arabian Journal for Science and Engineering, 40, 705-717.
- Braulio-Gonzalo, M. ve Bovea, M.D., 2017. Environmental and Cost Performance of Building's Envelope Insulation Materials to Reduce Energy Demand: Thickness Optimisation, Energy and Buildings, 150, 527-545.
- BSI Document 92/17688, 1992. European Draft Standard Specification for Lightweight Aggregates. CEN/TC154/SC5, Sub-Committee Lightweight Aggregates.

- Can, A. ve Engin, S., 2013. Enerji Verimli Bina Isıtılmasının Termodinamik ve Ekonomik Değerlendirilmesi, 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, Nisan, İzmir, Bildiriler Kitabı:1073-1090.
- Carette, G., Bilodeau, A., Chevrier, R.L. ve Wall, J., 1993. Mechanical Properties of Concrete Incorporating High Volumes of Fly Ash From Sources in the U.S., ACI Materials Journal, 90, 6, 535-544.
- Cavalline, T.L., Castrodale, R.W., Freeman, C. ve Wall, J., 2017. Impact of Lightweight Aggregate on Concrete Thermal Properties, ACI Materials Journal, 114, 6, 945-956.
- Chandra, S., Berntsson, L., 2002. Lightweight Aggregate Concrete Science, Technology and Applications, Novey Publications, Goteborg, 110s.
- Chen, B. ve Liu, J., 2008. Experimental Appliation of Mineral Admixtures in Lightweight Concrete with High Strength and Workability, Construction and Building Materials, 22, 1108-1113.
- Clarke, J.L., 2010. Structural Lightweight Concrete, British Cement Association, Crowthorne, Berkshire, 282 s.
- Cui, H.Z., Lo, T.Y., Memon, S.A ve Xu, W., 2012. Effect of Lightweight Aggregates on the Mechanical Properties and Brittleness of Lightweight Aggregate Concrete, Construction and Building Materials, 35, 149-158.
- Demirboğa, R. ve Gül, R., 2003. Thermal Conductivity and Compressive Strength of Expanded Perlite Aggregate Concrete with Mineral Admixtures, Energy and Buildings, 35, 1155-1159.
- Demirboğa, R., Örüng, İ. ve Gül, R., 2001. Effects of Expanded Perlite Aggregate and Mineral Admixtures on The Compressive Strength of Low-Density, Cement and Concrete Research, 31, 1627-1632.
- Dikici, T., 2010. Taşıyıcı Hafif Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Erdoğan, T.Y., 1997. Admixtures for concrete, The Middle East Technical University Press, Ankara.
- Eser, H., 2014. High Perfomance Structural Lighweight Concrete Utilizing Natural Perlite Aggregate and Perlite Powder, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Esmailzadeh, A., 2013. Mineral Katkılı Hafif Betonlarda Sülfat Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Evin, D. ve Ucar, A., 2019. Energy impact and Eco-efficiency of the Envelope Insulation in Residential Buildings in Turkey, Applied Thermal Engineering, 154, 573-584.

- Gerritse, A., 1981. Design Considerations for Reinforced Lightweight Concrete, International Journal of Cement Composites and Lighweight Concrete, 3,1, 57-69.
- Gönen, T., 2000. Doğu Anadolu Bölgesindeki Doğal Hafif ve Normal Agregalarla Üretilen Betonların Fiziksel, Mekanik ve Isıl İletkenlik Özelliklerinin Belirlenmesi ile Tarımsal Yapılarda Kullanılma Olanakları Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Gönen, T., 2009. Kendiliğinde Yerleşen Taşıyıcı Hafif Betonun Mekaniksel ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
- Gültekin, E., 2014. Metakaolin Katkılı Taşıyıcı Hafif Betonun Yüksek Sıcaklık Altındaki Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Haque, M.N., Al-Khaiat, H. ve Kayali, O., 2004. Strength and Durability of Lightweight Concrete, Cement and Concrete Composites, 26,4, 307-314.
- Holm, T.A. ve Bremner, T.W., 2000. State-of-the-Art Report on High-Strength, High-Durability Structural Low-Density Concrete for Applications in Severe Marine Environments. U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center.
- Holm, T.A., Bremner, T.W. ve Newman, J.B., 1984. Lightweight Aggregate Concrete Subject to Severe Weathering, Concrete International, Detroit American Concrete Institute.
- Hüsem, M., 2003. The Effects of Bond Strengths between Lightweight and Ordinary Aggregate-Mortar, Aggregate-Cement Paste on The Mechanical Properties of Concrete, Materials Science and Engineering: A, 363,1-2, 152-158.
- Hüsem, M., 1995. Doğu Karadeniz Bölgesi Hafif Agregalarından Biriyle Yapılan Hafif Betonun Geleneksel Bir betonla Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- İbrahim, M., Ahmad, A., Barry, M.S., Alhems, L.M. ve Suhoothi, A.C.M., 2020. Durability of Structural Lightweight Concrete Containing Expanded Perlite Aggregate, International Journal of Concrete Structures and Materials, 14, 1, 1-15.
- İlgün, K., 1992. Hafif Betondan İmal Edilmiş Betonarme Kirişlerin Dayanım ve Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Kaldı, C., 2011. Taşıyıcı Hafif Beton Tasarımı ve Çok Katlı Binalarda Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

- Kalfa, S.M., 2014. Türkiye İklim Bölgelerinde Konut Binaları İçin Isıtma ve Soğutma Yüklerinin Belirlenmesinde Kullanılabilecek Bir Yaklaşım, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Karahan, O., Hossain, K.M.A., Ozbay, E., Lachemi, M. ve Sancak, E., 2012. Effect of Metakaolin Content on The Properties Self-Consolidating Lightweight Concrete, Construction and Building Materials, 31, 320-325.
- Keleştemur, O. ve Demirel, B., 2015. Effect of Metakaolin on the Corrosion Resistance of Structural Lightweight Concrete, Construction and Building Materials, 81, 172-178.
- Khatip, J.M. ve Clay, M.R., 2004. Absorption characteristics of metakaolin concrete, Cement and Concrete Research, 34, 1, 19-29.
- Kılıç, A., Atış, C.D., Yaşar, E. ve Özcan, F., 2003. High-Strength Lightweight Concrete Made with Scoria Aggregate Containing Mineral Admixtures, Cement and Concrete Research, 33, 10, 1595-1599.
- Klarsfeld, S., 1984. Guarded Hot Plate Method for Thermal Conductivity Measurements. Plenum Press, New York and London, 169s.
- Koçkal, N. ve Özturan, T. 2011., Strength and Elastic Properties of Structural Lightweight Concretes, Materials and Design, 32, 2396-2403.
- Konuk, H., 2003. Hafif Agregalı Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı Yalıtımı, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Lo, T.Y., Cui, H.Z. ve Li, Z.G., 2004. Influence of Aggregate Pre-Wetting And Fly Ash on Mechanical Properties of Lightweight, Waste Management, 24, 4, 333-338.
- Mehta, P.K. ve Monterio, P.J., 2006. Concrete: Microstructure, Properties and Materials, McGraw-Hill, New York, 800s.
- Mercan, N., 2007. Uçucu Kül Katkısıyla Üretilen Harçların Dayanım ve Dayanıklılığının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Mo, K.H., Ling, T.C., Alengaram, U.J., Yap, S.P. ve Yuen, C.W., 2017. Overview of Supplementary Cementitious Materials Usage in Lightweight Aggregate Concrete, Construction and Building Materials, 139, 403-418.
- Mo, K.H., Mohd Anor, F.A., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z. ve Rao, K.J., 2016. Properties of metakaolin-blended oil palm shell lightweight concrete, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 22, 852-868.
- Nath, P. ve Sarker, P., 2011. Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete, Procedia Engineering, 14, 1149-1156.

- Neville, A.M. ve Brooks, J.J., 2010. Concrete Technology, Harlow, England: Prentice Hall.
- Neville, A.M., 1994. Properties of Concrete, John Wiley& Sons, New York, 800s.
- Nguyen, L. H., Beaucour, A. L., Ortola, S. ve Noumowé, A., 2014. Influence of The Volume Fraction and The Nature of Fine Lightweight Aggregates on The Thermal and Mechanical Properties of Structural Concrete, Construction and Building Materials, 51, 121-132.
- Official Journal of the European Union, 2010. Directive 2010/31 EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), 153,13-35.
- Oktay, H., Yumrutaş, R. ve Akpolat, A., 2015. Mechanical and Thermophysical Properties of Lightweight Aggregate Concretes, Construction and Building Materials, 96, 217-225.
- Orcay, E.A., 2010. Hafif Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı İletkenlik Katsayıları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Öztürk, M., 2012. Pomza ve Perlit İçerikli Hafif Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J. ve Pout, C., 2008. A review on Buildings Energy Consumption Information, Energy and Buildings, 40, 3, 394-398
- Real, S., Bogas, J.A. ve Pontes, J., 2015. Chloride Migration in Structural Lightweight Aggregate Concrete Produced with Different Binders, Construction and Building Materials, 98, 425-436.
- Real, S., Gomez, M.G., Bogas, J.A. ve Ferrer, B., 2016. Thermal Conductivity of Structural Lightweight Aggregate Concrete, Magazine of Concrete Research, 68, 15, 798-808.
- Real, S., Gomez, M.G., Rodrigues, A.M. ve Bogas, J.A., 2016. Contribution of Structural Lightweight Aggregate Concrete to the Reduciton of Thermal Bridging Effect in Buildings, Construction and Building Materials, 121, 460-470.
- Reichard, T.W., 1964. Creep and Drying Shrinkage of Lightweight and Normal-Weight Concretes, National Bureau of Standarts, Washington.
- Remesar, J.C., Francis, S., Sergio, V. ve Mauricio, L., 2020. Improved Balance Between Compressive Strength and Thermal Conductivity of Insulating and Structural Lightweight Concretes for Low Rise Construction, Construction and Building Materials, 247, 118448.

- Saha, A. K., 2018. Effect of Class F Fly Ash on the Durability Properties of Concrete, Sustainable Environment Research, 28, 25-31.
- Schwarz, V. ve Alers, M., 2009. Promoting Energy efficiency in buildings: Lessons Learned from International Experience, United Nations Development Programme, New York.
- Shafigh, P., Alengaram, U.J., Mahmud, H.B. ve Jumat, M.Z., 2013. Engineering Properties of Oil Palm Shell Lightweight Concrete Containing Fly Ash, Materials and Design, 49, 613-621.
- Shafigh, P., Mahmud, H.B., Jumaat, M.Z., Ahmmad, R. ve Syamsul, B., 2014. Structural Lightweight Aggregate Concrete Using Two Types of Waste From The Palm Oil Industry as Aggregate, Journal of Cleaner Production, 80, 187-196.
- Shannag, M.J., 2011. Characteristics of Lightweight Concrete Containing Mineral Admixtures, Construction and Building Materials, 25, 658-662.
- Sönmezoğlu, C., 2005. Hafif Betonun Mekanik Özellikleri Üzerine Kür Şartlarının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Subaşı, S., 2009. The Effects of Using Fly Ash on High Strength Lightweight Concrete Produced with Expanded Clay Aggregate, Scientific Research and Essays, 4, 4, 275-288.
- Şapçı, N., 2008. Aksaray Bölgesi Volkanik Hafif Agrega Oluşumlarının İncelenmesi ve Endüstriyel Kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Şengül, Ö., Azizi, S., Karaosmanoğlu, F. ve Taşdemir, M.A. 2011. Effect of Expanded Perlite on the Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Lightweight Concrete, Energy and Buildings, 43, 671-676.
- Tanyildizi, H. ve Çoşkun, A., 2008. The Effect of High Temperature on Compressive Strength and Splitting Tensile of Structural Lightweight Concrete Containing Fly Ash, Construction and Building Materials, 22, 2269-2275.
- Taşdemir, C., Şengül, Ö. ve Taşdemir, M.A., 2017. Comparative Study on The Thermal Conductivities And Mechanical Properties of Lightweight Concretes, Energy and Buildings, 151, 469-475.
- Topçu, İ.B. ve Işıldağ, B., 2008. Effect of Perlite Aggregate on The Properties of Lightweight Concrete, Journal of Materials Processing Technology, 204, 34-38.
- Topçu, İ.B. ve Uygunoğlu, T., 2007. Properties of Autoclaved Lightweight Aggregate Concrete, Building and Environment, 42, 12, 4108-4116.
- TS 2511, 2017. Taşıyıcı hafif betonların karışım hesap esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 36s.

- TS 699, 2009. Doğal yapı taşları-İnceleme ve laboratuvar deney yöntemleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 42s.
- TS 802, 2016. Beton karışım tasarımı hesap esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 17s.
- TS EN 12350-2, 2019. Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm 2: Çökme (Slump) Deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 13s.
- TS EN 12390-3, 2019. Beton-Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 23s.
- TS EN 12390-5, 2019. Beton-Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 8: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 15s.
- TS EN 12390-6, 2010. Beton- Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 13s.
- TS EN 12390-7, 2019. Beton- Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 7: Sertleşmiş betonun yoğunluğunun tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 14s.
- TS EN 12390-8, 2010. Beton- Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 6: Basınç Altında Su İşleme Derinliğinin Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 7s.
- TS EN 13055, 2016. Hafif Agregalar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 52s.
- TS EN 1971-1, 2012. Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 40s.
- TS EN 206:2013+A1, 2017. Beton-Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 110s.
- TS EN 450-1, 2013. Uçucu Kül- Betonda kullanılan- Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 33s.
- Türk, K. ve Karataş, M., 2011. Abrasion Resistance and Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete with Different Dosages of Fly Ash/Silica Fume, Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 18, 49-60.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğinoğlu, A., 2009. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- Ulus, İ., 2007. Ham Perlit Agregası Kullanılarak Yüksek Dayanımlı Hafif Beton Üretilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Urhan, S., 1993. Hafif ve Çok Hafif Betonların Karakteristik Özellikleri ve Teknik Kapasiteleri, Türkiye Mühendislik Haberleri, İstanbul, 34-40.

- URL-1, <https://designbuilder.co.uk/dowland/documents> Design Builder. 10 Mart 2020.
- URL-2, www.escsi.org/sustainability-without-compromise/durability.htm Expanded Shale, Clay and Slate Institute. 15 Aralık 2020.
- URL-3, www.escsi.org/e-newsletter/u-s-s-selma/.htm Expanded Shale, Clay and Slate Institute. 15 Aralık 2020.
- URL-4, https://en.wikipedia.org/wiki/San_Francisco%E2%80%93Oakland_Bay_Bridge/ San Francisco–Oakland Bay Bridge. 1 Aralık 2021.
- URL-5, www.escsi.org/wp-content/uploads/2017/10/Stolmen-Bridge.pdf Stolmen Bridge. 1 Aralık 2021.
- URL-6, www.escsi.org/wp-content/uploads/2017/10/Heidrun-Tension-Leg-Platform.pdf/.htm Expanded Shale, Clay and Slate Institute. 15 Aralık 2020.
- URL-7, www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/pomza.htm Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. 15 Aralık 2020.
- URL-8, www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/perlit.htm Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. 15 Aralık 2020.
- URL-9, www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/maden-yataklari#haberler.htm Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. 15 Aralık 2020.
- URL-10, <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/sektorlere-gore-nihai-enerji-tuketimi-i-85804> Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. 1 Nisan 2021.
- URL-11, https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/heating-and-cooling_en European Commission. 1 Nisan 2021.
- URL-12, <https://mgm.gov.tr/eng/forecast-cities.aspx>. Meteorological Service. 15 Aralık 2020.
- Ustaoglu, A., Kurtoğlu K., Gencel, O. ve Kocyiğit, F., 2020. Impact of a Low Thermal Conductive Lightweight Concrete in Building: Energy and Fuel Performance Evaluation for Different Climate Region, Journal of Environmental Management, 268, 110732.
- Uygunoğlu, T., 2008. Hafif Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Özellikleri, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Uysal, H., Demirboğa, R., Şahin, R. ve Gül, R., 2004. The Effects of Different Cement Dosages, Slumps, and Pumice Aggregate Ratios on The Thermal Conductivity and Density of Concrete, Cement and Concrete Research, 34, 845-848.

- Yaman, Ö., Şengül, Ö., Selçuk, H., Çalıkuş, O., Kara, İ., Erdem, Ş. ve Özgür, D., 2015. Binalarda Isı Yalıtımı ve Isı Yalıtım Malzemeleri, Türkiye Mühendislik Haberleri, 487, 4, 62-75.
- Yaşar, E., Atis, C.D., Kılıç, A. ve Gulsen, H., 2003. Strength Properties of Lightweight Concrete Made with Basaltic Pumice and Fly ash, Materials Letters, 57, 15, 2267-2270.
- Yazıcıoğlu, S. ve Bozkurt, H., 2006. Pomza ve Mineral Katkılı Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21,4, 675-680.
- Yenidoğan, C., 2019. Hafif Agregalı Taşıyıcı Hafif Betonun Üretimi ve Performans Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yılmaz, H., 2015. Characterization and Comparison of Leaching Behaviors of Fly Ash Samples from Three Different Power Plants in Turkey, Fuel Processing Technology, 137, 240-249.
- Yolcu, C., 2018. Yüksek Performanslı Taşıyıcı Hafif Beton Üretiminde Pomza Agregalarının Kullanılabilirliği, Mekanik Büyüklükleri ve Uygulama Kriterleri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yunsheng, X. ve Chung, D.D.L., 2000. Effect of Sand Addition on the Specific Heat and Thermal Conductivity of Cement, Cement and Concrete Research, 30, 1, 59-61.
- Yüksek, İ., 2015. The Evaluation of Building Materials in Terms of Energy Efficiency, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 59, 1, 45-58.
- Zhang, M.H. ve Gjorv, O.E., 1990. Microstructure of The Interfacial Zone between Lightweight Aggregate and Cement paste, Cement and Concrete Research, 20, 4, 610-618.

ÖZGEÇMİŞ

İlköğrenimini Yavuz Selim İlköğretim Okulu'nda, liseyi Trabzon Lisesi'nde tamamladı. 2008 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. Lisans eğitimini 2013 yılında tamamladı ve aynı yıl içerisinde Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans öğrenimine başladı. 2013 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesinde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2015 yılının Eylül ayında doktora başladı. İngilizce bilmektedir.

