

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PERLİT KATKILI HAFİF BETONLARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİ VE ISI YALITIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Kimya Müh. Senem AZİZİ**

Anabilim Dalı : KİMYA MÜHENDİSLİĞİ

Programı : KİMYA MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2007

**PERLİT KATKILI HAFİF BETONLARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİ VE ISI YALITIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Kimya Müh. Senem AZİZİ
506041011

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Aralık 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Ocak 2007

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Gülhayat NASÜN - SAYGILI

Doç. Dr. Filiz KARAOSMANOĞLU

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR (İ.T.Ü)

Prof. Dr. Sema TÜLBENTÇİ (İ.T.Ü)

Prof. Dr. Onuralp YÜCEL (İ.T.Ü)

OCAK 2007

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim boyunca bana gösterdiği yol ve hayata bakış açısı ile örnek aldığım, çok değerli hocam Doç. Dr. Filiz Karaosmanoğlu'na, tez çalışmam boyunca görüşlerime her konuda destek veren ve anlayış gösteren değerli danışman hocam Doç. Dr. Gülhayat Saygılı'ya, tezime büyük katkısı olan, bilgisi ve yönlendirmesi ile tezimin oluşmasını sağlayan çok değerli hocam Prof. Dr. Mehmet Ali Taşdemir'e, tez çalışmam boyunca hem bir hoca hem de bir arkadaş gibi her an yanımda olan çok değerli hocam Dr. Özkan Şengül'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda verdikleri yakın destek için, İTÜ Makina Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Erhan Böke' ye, Umut Demirel nezinde tüm Bergama Madencilik firması çalışanlarına ve İTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına teşekkürü borç bilirim.

Tezim süresince her türlü yardımı benden esirgemeyen ve beni motive eden, dostum ve meslektaşım Ahmet Burak İlğün'e minnettarım.

Son olarak, beni bugünlere getiren ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme, öğrenme aşkını bana aşılayan meslektaşım canım babama, bana verdiği destek ile hayatta herşeyi başarmamı sağlayan canım anneme ve sevgili kızkardeşlerime en derin duygularıyla teşekkür ederim.

İstanbul, Aralık 2006

Kim. Müh. Senem AZİZİ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK ÇALIŞMALAR	4
2.1. Perlit	4
2.1.1. Dünyada Mevcut Durum	6
2.1.1.1. Rezervler	6
2.1.1.2. Üretim ve Tüketim	7
2.1.1.3. İthalat ve İhracat	8
2.1.1.4. Kullanım Alanları	8
2.1.2. Türkiye'de Durum	9
2.1.2.1. Mevcut Durum	9
2.1.2.2. Gelecekte Durum	10
2.2. Beton	11
2.2.1. Çimento	12
2.2.2. Kimyasal Katkılar	15
2.2.2.1. Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesi	16
2.2.2.2. Hava Sürükleyici Katkı Maddesi	19
2.2.3. Betonun Mekanik Davranışı	20
2.3. Hafif Beton	24
2.3.1. Hafif Betonların Sınıflandırılması	26
2.3.2. Hafif Agregaların Sınıflandırılması	28
2.3.3. Hafif Betonların Mekanik Davranışı	28
2.3.4. Hafif Betonların Diğer Özellikleri ve Bu Özellikleri Etkileyen Faktörler	32
2.3.4.1. Depreme Dayanıklılık	32
2.3.4.2. Su Emme	32
2.3.4.3. Isıl Genleşme	33
2.3.4.4. Isı Yalıtımı	33
2.3.4.5. Yangına Dayanıklılık	35
2.3.4.6. Ses Emme	35
2.4. Literatür Araştırması	35
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	38
3.1. Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması	38

3.1.1. Agregalar	38
3.1.2. Çimento Özellikleri	40
3.1.3. Kimyasal Katkılar	41
3.2. Hafif Beton Karışımları Hazırlanması Ön Çalışmaları	41
3.2.1. Hafif Beton Üretimi İçin Kabul Edilen Esaslar	42
3.2.2. Hafif Beton Üretimi İçin Bileşim Hesaplamaları	43
3.2.3. Hafif Betonun Üretimi, Yerleştirilmesi ve Saklanması	44
3.3. Hafif Betonlara Uygulanan Deneyler	46
3.3.1. Taze Beton Birim Ağırlığı Belirleme Deneyi	46
3.3.2. Mekanik Deneyler	46
3.3.2.1. Küp Basınç Dayanımı Deneyi	47
3.3.2.2. Silindir Basınç Dayanımı Deneyi	47
3.3.3. Isıl İletkenlik Deneyi	48
3.3.4. Su Emme Deneyi	51
3.3.5. Kılcallık Deneyi	52
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	55
4.1. Birim Ağırlık ile Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki	55
4.2. Birim Ağırlık ile Elastisite Modülü Arasındaki İlişki	56
4.4. Birim Ağırlık ile Isıl İletkenlik Arasındaki İlişki	58
4.5. Birim Ağırlık ile Su Emme Oranı Arasındaki İlişki	60
4.6. Birim Ağırlık ile Kılcallık Katsayısı Arasındaki İlişki	61
5. VARGILAR ve ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	70

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1	Ham perlitin fiziksel özellikleri..... 5
Tablo 2.2	Genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri..... 5
Tablo 2.3	Perlitin kimyasal analizi..... 6
Tablo 2.4	Dünya ham perlit rezervleri (milyon ton)..... 6
Tablo 2.5	Dünya perlit üretimi (bin ton)..... 7
Tablo 2.6	2001-2005 yılları arasındaki Türkiye perlit üretim miktarı ve üretim değeri..... 9
Tablo 2.7	2001-2005 yılları arasındaki Türkiye perlit tüketim miktarı..... 10
Tablo 2.8	2001-2005 yılları arasındaki Türkiye perlit ihracat miktarı ve ihracat değeri..... 10
Tablo 2.9	2006-2013 yılları arasındaki Türkiye perlit talep, ihracat ve üretim tahmin değerleri..... 11
Tablo 2.10	Çimentonun bileşenleri 12
Tablo 2.11	Klinker bileşenleri 13
Tablo 2.12	Kimyasal katkıların etkileri ve sonuçları 15
Tablo 2.13	Hafif betonların işlevlerine göre sınıflandırılması..... 27
Tablo 2.14	Hafif agregaların birim ağırlıkları ile kullanım alanları arasındaki ilişki..... 28
Tablo 2.15	Farklı hafif betonların özellikleri..... 36
Tablo 2.16	Hafif betonların mekanik özelliklerinin karşılaştırılması..... 37
Tablo 3.1	Doğal kum ve genleştirilmiş perlit agregalarının granülometrisi..... 38
Tablo 3.2	Kum ve genleştirilmiş perlit agregalarının özgül ağırlık, gevşek birim ağırlık ve su emme oranları..... 39
Tablo 3.3	Kullanılan portland çimentosunun fiziksel özellikleri..... 40
Tablo 3.4	Kullanılan portland çimentosunun kimyasal özellikleri..... 40
Tablo 3.5	Agrega karışım oranları..... 43
Tablo 3.6	Beton karışımlarındaki gerçek malzeme miktarları ve taze beton özellikleri..... 45
Tablo 3.7	Sertleşmiş beton hava kuru birim ağırlıkları..... 46
Tablo 3.8	Sertleşmiş beton küp basınç dayanımı değerleri..... 47
Tablo 3.9	Sertleşmiş beton silindir basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri..... 48
Tablo 3.10	Isıl iletkenlik deneyinde kullanılan numunelerin fırın kuru birim ağırlıkları..... 49
Tablo 3.11	Sertleşmiş beton ısı iletkenlik değerleri..... 51
Tablo 3.12	Su emme oranlarının belirlenmesi deneyinde kullanılan numunelerin fırın kuru birim ağırlıkları..... 52
Tablo 3.13	Sertleşmiş beton su emme oranları..... 52
Tablo 3.14	Sertleşmiş beton kılcallık katsayısı değerleri..... 53

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Kayaç haldeki perlit (A), ham perlit (B) ve genleştirilmiş perlitin (C) görünümü.....	5
Şekil 2.2 : Dağıtıcı katkıların çimento topaklanmalarını parçalama etkisi...	17
Şekil 2.3 : Polikarboksilat eter süper akışkanlaştırıcısının temel yapısı.....	18
Şekil 2.4 : Süper akışkanlaştırıcı katkıli çimento partikülünün sterik kararlılığı.....	19
Şekil 2.5 : Hava kabarcıklarının birbirini itmesi mekanizması.....	20
Şekil 2.6 : Hava sürükleyici katkı maddesi etki mekanizması.....	20
Şekil 2.7 : Agregası, sertleşmiş çimento hamuru ve betonun basınç altında gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	21
Şekil 2.8 : Sertleşmiş betona yük uygulanmadan önceki ve sonraki çatlak gelişimi.....	22
Şekil 2.9 : Betonun basınç altında gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	23
Şekil 2.10 : Kullanılan agregası cinsine göre hafif betonların sınıflandırılması.....	27
Şekil 2.11 : Tek eksenli çekme ve basınç maruz betonda agreganın normal veya hafif olması durumuna göre oluşan kırılma çizgilerinin görünüşü.....	29
Şekil 2.12 : Sürekli faz mukavemetinin fonksiyonu olarak hafif beton basınç mukavemeti.....	30
Şekil 2.13 : Hafif ve normal agregalı betonlar için gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	31
Şekil 2.14 : Farklı tip hafif agregalar ile üretilen hafif betonların ısı iletkenliğinin birim ağırlıkları ile değişimi.....	34
Şekil 3.1 : Silindirik basınç dayanımı ve eksenel şekil değiştirme deney düzeneği.....	47
Şekil 3.2 : Isı iletkenlik deney düzeneği.....	50
Şekil 3.3 : Kılcallık katsayısı belirleme deney düzeneği.....	53
Şekil 4.1 : Perlit katkıli hafif betonların birim ağırlıkları ile küp basınç dayanımları arasındaki ilişki.....	55
Şekil 4.2 : Perlit katkıli hafif betonların birim ağırlıkları ile silindirik basınç dayanımları arasındaki ilişki.....	56
Şekil 4.3 : Perlit katkıli hafif betonların birim ağırlıkları ile elastisite modülleri arasındaki ilişki.....	57
Şekil 4.4 : Deneysel olarak ve teorik bağıntı ile bulunan perlit katkıli hafif betonların elastisite modülleri arasındaki ilişki.....	58
Şekil 4.5 : Perlit katkıli hafif betonların birim ağırlıkları ile ısı iletkenlikleri arasındaki ilişki.....	59
Şekil 4.6 : Perlit katkıli hafif beton ile gazbetonun birim ağırlıkları ile ısı iletkenlik katsayıları değişiminin karşılaştırılması.....	60

Şekil 4.7	: Perlit katkılı hafif betonların birim ağırlıkları ile su emme oranları arasındaki ilişki.....	61
Şekil 4.8	: Perlit katkılı hafif betonların birim ağırlıkları ile kılcallık katsayıları arasındaki ilişki.....	62

SEMBOL LİSTESİ

A	: Referans Cisim ve Numune Alanı (m^2)
B	: Sertleşmiş Beton Numunesinin Etüv Kuru Ağırlığı (kg)
C	: $1 m^3$ Yerleşmiş Betondaki Çimentonun Ağırlığı (kg)
D	: Sertleşmiş Beton Numunesinin Suyu Doygun Ağırlığı (kg)
d_{max}	: En Büyük Tane Boyutu
E / C	: Etkin su / çimento Oranı
E_c	: Elastisite Modülü (MPa)
f_c	: Silindir Basınç Dayanımı (MPa)
G	: Agreganın Ağırlığı (kg)
h	: $1 m^3$ Yerleşmiş Betondaki Hava Hacmi (m^3)
K	: Kılcallık Katsayısı
k	: $1 m^3$ Yerleşmiş Betondaki Katkı Maddesi Hacmi (m^3)
l	: Numune Kalınlığı (m)
M	: Ağırlıkça Su Emme Oranı (%)
m	: Numunenin Birim Alandan Emdiği Su Miktarı (kg/m^2)
P	: Agreganın Hacimce Karışım Yüzdesi
Q	: Isıtıcı Plakaya Beslenen Elektrik Gücü (Watt)
T	: Yüzey Sıcaklığı (K)
t	: Numunenin Su Emme Süresi (dakika)
V_a	: $1 m^3$ Yerleşmiş Betondaki Agreganın Hacmi (m^3)
W	: $1 m^3$ Yerleşmiş Betondaki Suyun Ağırlığı (kg)
δ	: Özgül Ağırlık (kg/m^3)
σ	: Normal Gerilme (MPa)
ϵ	: Eksenel Şekil Değiştirme
λ	: Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)
Δ	: Birim Ağırlık (kg/m^3)
i	: Agreganın Cinsi
n	: Numune
r	: Referans Cisim

ÖZET

Ülkemizde bulunan yeraltı kaynaklarının en önemlilerinden biri, dünya rezervinin büyük bir bölümüne sahip olduğumuz perlit cevheridir. Perlit, ısıyla genleşme özelliği olan, genleştirildiğinde camı tanelerden oluşan köpük agregasına dönüşen ve ilk hacminin 20 katına kadar genleşebilen bir kayadır. Genleşmiş perlit tarım sektörü, inşaat sektörü ve gıda, kimya, ilaç gibi sanayi sektörlerinde kullanılabilir. Genleştirilmiş perlit üstün ısı ve ses yalıtım özellikleri nedeniyle, az yoğun yapı malzemesi olarak en çok inşaat sektöründe kullanılmaktadır.

Inşaat sektöründe en sık kullanılan yapı malzemesi olan beton; çimento, agrega, su ve kimyasal katkılardan oluşmaktadır. Betonun oluşturan bu bileşenlerin, özellikleri ve miktarları betonun sahip olacağı son ürün özelliklerini belirlemektedir. Betonun hacimce büyük kısmını oluşturan ve betonun iskeleti görevini üstlenen agregalar, betonun özelliklerini en çok etkileyen bileşendir. Kullanılan agrega betonun mekanik özelliklerini etkileyeceği gibi ısı ve ses yalıtım özelliklerini de etkilemektedir. Beton üretiminde hafif ve gözenekli yapıya sahip agregaların kullanılmasıyla, hafif betonlar üretilmektedir. Genleştirilmiş perlitin hafif agrega olarak kullanılmasıyla, üretilen betonlarda ölü yükler azalmakta, üstün ısı ve ses yalıtımı sağlanabilmektedir.

Bu çalışmada; hacimce farklı oranlarda genleştirilmiş perlit ve doğal kum kullanılarak, hafif betonlar üretilmiştir. Çeşitli birim ağırlıklarda üretilen hafif agregalı betonların, basınç dayanımları, elastisite modülleri, ısı iletkenliği, su emme oranları ve kılcallık katsayıları ile birim ağırlıkları arasındaki ilişki belirlenmiştir.

Deneysel çalışmalarda taze beton birim ağırlıkları $700-2000 \text{ kg/m}^3$ arasında değişen toplam 6 seri hafif beton üretilmiştir. Üretilen tüm hafif betonların etkin su/çimento oranı 0,55 olarak belirlenmiştir. Hafif beton karışımları, toplam agrega hacminin sırasıyla %0, %20, %40, %60, %80, %100 oranında genleşmiş perlit ve toplam agrega hacminin sırasıyla %100, %80, %60, %40, %20, %0 oranında kum kullanılarak üretilmiştir. Tüm hafif beton karışımlarına çimento ağırlığının yaklaşık % 0,3'ü oranında hava sürükleyici katkı maddesi eklenmiştir. Ayrıca, istenilen kıvamın sağlanabilmesi amacıyla %0 ve %20 oranlarında genleştirilmiş perlit içeren karışımlarda çimento ağırlığının % 1,5 ve %40 perlit içeren karışımda ise çimento ağırlığının % 0,5 oranında akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

Hafif betonlara yapılan deneyler sonucunda, beton karışımlarındaki genleştirilmiş perlit miktarı arttıkça, işlenebilirliğin arttığı saptanmıştır. Betonların birim ağırlıkları düştükçe basınç dayanımlarının ve elastisite modüllerinin düştüğü belirlenmiştir. Perlit katkılı hafif betonların küp basınç dayanımları, artan hacimce perlit oranına bağlı olarak (%20, %40, %60, %80, %100) sırasıyla 17,3 MPa, 10,9 MPa, 4,6 MPa, 1 MPa, 0,07 MPa olarak tespit edilmiştir. Toplam agrega hacminin %20, %40, %60'ı oranında perlit içeren betonların silindirik basınç dayanımları sırasıyla 13,0 MPa, 9,6MPa, 3,8 MPa; elastisite modülleri ise sırasıyla 12,8 GPa, 9,4 GPa, 3,3 GPa

değerlerini almaktadır. Perlit katkılı hafif betonların ısı iletkenliği ile birim ağırlıkları arasında lineer bir ilişki bulunduğu gözlenmiştir. Perlit katkılı hafif beton karışımındaki genleştirilmiş perlit miktarı arttıkça (hacimce %20-%100) ısı iletkenliğin 0,57 W/mK ile 0,13 W/mK arasında değerler aldığı belirlenmiştir. Ayrıca betonların içindeki genleştirilmiş perlit miktarı arttıkça su emme oranları ve kılcallık katsayıları da artmaktadır.

Bu çalışmada denemesi yapılan hafif beton bileşimleri için, ulaşılan sonuçlar topluca değerlendirildiğinde;

- Tüm perlit katkılı hafif beton bileşimlerinin normal betonlara kıyasla yüksek ısı yalıtımı sağladığı,
- Hacimce toplam agreganın, % 40 ve % 60'ı oranında genleştirilmiş perlit içeren hafif betonların yapısal/yalıtım beton türüne girdiğı, % 80'i oranında genleştirilmiş perlit içeren hafif betonların ise yalıtım betonu türüne girdiğı ve bu amaçlı kullanım için uygun olduğı ortaya konulmuştur.

SUMMARY

Perlite ore, which we have the biggest part of world's reserve, is one of the most important underground source of our country. Perlite has expansion feature with heat. Perlite transforms a foam aggregate when heated to a suitable point and expands twenty times its original volume. Expanded perlite can be used in agriculture sector, construction sector and industrial sectors like food, chemistry and medicine. Expanded perlite mostly use in construction sector, as little concentrated construction materials because of its perfect heat and sound insulation features.

Concrete, most used construction material, is consisted of cement, aggregate, water and chemical admixtures. The specifications and amount of these constituents determine the properties of hardened concrete. Aggregates are constituents which effect properties of concretes mostly and formed big part of concrete by volume. Employed aggregates effect both the mechanical properties and the properties of heat and sound insulation properties. The usage of lightweight and porous aggregates as a constituent of concrete enables production of lightweight concrete. Superior heat and sound insulation can be obtained and dead loads of the buildings can be reduced by using perlite as a lightweight aggregate in the production of concrete.

The framework of this study is production of lightweight concretes by changing the ratio of expanded perlite and natural sand. The relations between the unit weights, compressive strengths, elasticity modulus, heat conductivity, water absorption and capillarity coefficient are investigated.

In the experimental study, 6 series of lightweight concretes with the fresh concrete unit weights between 700-2000 kg/m³ are produced. Water to cement ratio is set 0,55 in all of the compositions. In lightweight concretes, by volume ratio %0, %20, %40, %60, %80, %100 expanded perlite and %100, %80, %60, %40, %20, %0 sand are used respectively.

In all of the compositions, air entrainer admixture is used approximately 0,3 % of cement by weight. On the other hand, for obtaining the required fluidity; in the compositions with 0% and 20% perlite aggregate, 1,5% (by cement weight) superplasticizer admixture is used; for compositions with 40% perlite aggregate, 0,5% (by cement weight) superplasticizer admixture is used.

As a result of experiments, as the amount of expanded perlite increased in the concrete compositions, workability of lightweight concretes increases. Compressive strength and elasticity modulus of concretes reduce as the unit weights of concretes reduce. Cubic compressive strength of perlite added light weight concretes, with ascending ratio of perlite content 20%, 40%, 60%, 80%, 100% by vol. is found 17 MPa 10,9 MPa, 4,6 MPa, 1 MPa, 0,07 MPa respectively.

Concretes with 20%, 40%, 60% perlite content has cylindrical compressive strength of 13,0 MPa 9,6MPa 3,8 MPa, elasticity modulus of 12,8 GPa 9,4 GPa 3,3 GPa. There is a linear relation between the thermal conductivity and unit weights of perlite added lightweight concrete. With the ascending perlite ratio in the composition (20%-100%), thermal conductivity increases between the values of 0,57 W/mK and 0,13 W/mK. It is observed that water absorbtion and capillarity coefficent increases with increase of perlite content.

When the results of lightweight concrete compositions are evaluted as a whole;

- All of the perlite added lightweight concrete compositions provide ultimate heat insulation when compared with normal weight concretes,
- It is disclosed that lightweight concretes, containing expanded perlite 40% and 60% by volume of total aggregates, can be classified as structural/insulating concretes and containing expanded perlite 80% by volume of total aggregates, can be classified as insulating concretes and are suitable for mentioned purposes.

1. GİRİŞ

Perlit, geliştirildiğinde hacminin yaklaşık yirmi katına kadar ulaşan, genişmiş haliyle oldukça hafif olan, ısı ve ses izolasyonu sağlayan bir kayadır. Ülkemiz dünya üzerindeki olası perlit rezervinin %74'üne sahiptir. Dünya ve Türkiye'de, en yaygın perlit kullanımı inşaat sektöründe görülmektedir. Bu sebeple, dünya perlit tüketimi de inşaat sektöründeki dalgalanmalardan oldukça etkilenmektedir. Isı yalıtımı, ses yalıtımı ve depreme dayanıklılık avantajları açısından önemli üstünlükleri olan perlitin, inşaat sektöründe değerlendirilmesi ülke ekonomisine önemli katkılar sağlayacaktır.

Son yıllarda kredi faiz oranlarının düşmesi ve yeni konut finansman sistemlerinin kurulmasına dönük çalışmaların etkisiyle oluşan konuta dönük yüksek talep sayesinde, ülkemizde inşaat sektörü 2004 yılında % 4,6; 2005 yılında % 21,5 ve 2006 yılının ilk 9 ayında ise, % 20,1 büyüme oranına ulaşmıştır. 2006 yılının en hızlı büyüyen sektörü olan inşaat sektörünün; yüksek oranda istikrarlı büyüme ve istihdam yaratma ihtiyacı her zamankinden daha fazla olan Türkiye ekonomisi için, önemi giderek artmaya devam edecektir [1, 2].

Türkiye'nin AB ile müzakere sürecine başlaması sonrasında, orta ve uzun dönemde ekonomide istikrarlı bir büyüme sürecinin ivme kazanması beklenmektedir. Yıllık ortalama % 7 büyüme hızı yakalanması durumunda, 2023 yılında kişi başına gelir düzeyinin 15.000 ABD Doları seviyesine ulaşması öngörülmektedir [1]. Gelir seviyesi yükseldikçe daha kaliteli konut ve altyapı talebinde artış beklenmektedir. Türkiye güçlü ekonomiye geçiş sürecini tamamladığında inşaat sektörü açısından kalıcı ve hızlı bir iç talep artışının ortaya çıkacağı değerlendirilmektedir. Bu sektördeki itici güçlerin en önemlilerinden biri beton üretimidir.

Beton, inşaat sektöründe en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Beton; çimento, agrega, su ve betonun sahip olması istenilen özelliklerine bağlı olarak katılacak kimyasal katkılardan oluşmaktadır. Kullanılan kimyasal katkılarla, betondan istenen

bazı özelliklerin kazandırılması sağlansa da, beton içinde hacimsel olarak %60-85 civarında bulunan agregalar, betonun sahip olacağı karakteristik özellikleri en çok etkileyen bileşenlerdir. Kullanılan agreganın özelliklerine bağlı olarak, betonun birim ağırlığı düşürülebilmekte ve bu şekilde hafif betonlar üretilebilmektedir. Hafif betonların normal betonlara göre sahip olduğu üstünlükler; yapıdaki ölü yüklerin azaltılması, depreme dayanıklılık, yüksek ısı ve ses yalıtımı sağlanması şeklinde sıralanabilmektedir.

Topraklarının neredeyse tamamının güçlü bir deprem kuşağı üzerinde olan ülkemizde, kısa zaman aralıklarında büyük can ve mal kayıplarına neden olan depremler olmaktadır. Ancak gerekli önlemler alınırsa, depremin zararlarını azaltmamız mümkün olabilmektedir. Japonya, ABD gibi gelişmiş ülkelerde şiddetli depremlerde büyük can ve mal kayıplarının olmamasının sebebi inşaat teknolojilerindeki gelişmelerin uygulanışı ve yapılan binalarda pomza, perlit, gazbeton vb. hafif malzemelerin, yaygın olarak kullanılmasıdır. Hafif malzemeler, bina yükünü önemli oranda azalmaktadır. Böylece binalar kendi ağırlıklarıyla ezilmemekte ve depremin yıkıcı zararları azalmaktadır. Diğer yandan, depremin oluşturduğu yatay ve düşey yöndeki şiddetli sarsıntılar, boşluklu malzemeler tarafından emilmekte dolayısıyla bina sallanmakta ancak yıkılmamaktadır [3].

Hafif agregalar kullanılarak üretilen hafif betonlar içerisinde, en yüksek ısı yalıtımı perlit katkılı hafif betonlar ile sağlanabilmektedir [4]. Perlit katkılı betonlar, normal betona göre yaklaşık on kat daha iyi ısı yalıtımı sağlamaktadır [3]. Perlit katkılı hafif yapı malzemeleri enerji verimliliğinin artırılması suretiyle sera etkisi yaratan gaz atıklarının azaltılmasını sağlamakta ve bu sebeple çevre dostu malzemeler olarak adlandırılmaktadır. Perlit katkılı beton kullanılan yapılarda, yapı içerisinden dış çevreye ısı kaybı büyük oranda azalacağı için, enerji tasarrufu sağlanacak, enerji daha verimli kullanılacak ve enerjisinin büyük bölümünü ithal eden ülkemiz ekonomisi olumlu yönde etkilenecektir.

Bu çalışmada, yukarıdaki bilgiler ışığında yüksek ısı yalıtımı sağlayan düşük birim ağırlıklı perlit katkılı hafif beton üretimi amaçlanmıştır. Genleştirilmiş perlit agregası ile doğal kumun hacimce farklı oranlarda ayarlanmasıyla hafif betonlar üretilmiştir.

Çalışmanın amacı:

- ♦ Çeşitli birim ağırlıklarda üretilen hafif agregalı betonların birim ağırlıkları ile basınç dayanımları ve elastisite modülleri arasındaki ilişkiyi belirlemek ve
- ♦ Çeşitli birim ağırlıklarda üretilen hafif agregalı betonların birim ağırlıkları ile ısı iletkenlikleri, su emme oranları ve kılcallık katsayıları arasındaki ilişkiyi saptamaktır.

2. TEORİK ÇALIŞMA

Bu bölümde; perlit, beton ve hafif beton başlıkları altında yapılan teorik çalışma ile hafif betonlar üzerine yapılmış çalışmalarla ilgili literatür araştırması sonuçları sunulmaktadır.

2.1. Perlit

Perlit asidik karakterli volkanik bir camdır. Perlit, ısıyla genleşme özelliği olan, genleştirildiğinde çok hafif ve gözenekli hale geçen bir kayadır. Perlit kelimesi hem ham perlit ve hem de bunun genleştirilmesiyle elde edilen ürün için kullanılmaktadır. Çeşitli perlit kayaları renk ve yapı itibarıyla birbirinden farklılık gösterebilmektedir. Ham perlitin rengi saydam açık griden parlak siyaha kadar değişebilmektedir. Genleştiğinde ham perlitin rengi tamamen beyazlaşmaktadır. Perlitte en önemli özellik, hidrasyona uğramış camsı silika yapısındaki %2-5 arasında bileşik halinde içerdiği sudur ve bu su perlitin kararlılığını sağlamaktadır [5].

Ham perlite öğütme ve boyutlandırma işlemlerinin uygulanmasının ardından, ham perlit 400 C°'ye kadar ön ısıtmaya tabi tutulmaktadır. Ön ısıtmanın ardından ham perlit 750-1200 C° arasında ani olarak ısıtıldığında bünyesinden çıkan buharın etkisiyle genleşerek camsı tanelerden oluşan bir köpük agregasına dönüşmektedir. Ham perlit, ilk hacminin 20 katına kadar genleşebilmektedir. Bu ürüne genleşmiş perlit denilmektedir [5]. Kayaç haldeki perlit, ham perlit ve genleştirilmiş perlit Şekil 2.1'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, ham halinde grinin tonlarında renklere sahip olan perlit, genleştirildiğinde beyaz renk almaktadır.



Şekil 2.1: Kayaç haldeki perlit (A), ham perlit (B) ve genişletilmiş perlitin (C) görünümü [6].

Ham perlit ile genişletilmiş perlit farklı fiziksel özellikler göstermektedir. Ham perlit ve genişletilmiş perlitin fiziksel özellikleri Tablo 2.1 ve Tablo 2.2’de verilmektedir [5, 7]. Perlitin kimyasal analizi Tablo 2.3’te verilmektedir.

Tablo 2.1: Ham perlitin fiziksel özellikleri [5, 7].

Renk	Siyah ve grinin tonları
Özgöl ağırlık (kg/m^3)	2200-2400
Birim ağırlık (kg/m^3)	950-2700
Yumuşama noktası ($^{\circ}\text{C}$)	871-1093
Erime noktası ($^{\circ}\text{C}$)	1260-1343
Özgöl ısı ($\text{kcal/kg } ^{\circ}\text{C}$)	0,20-0,23
Sertlik (Mohs)	5-6

Tablo 2.2: Genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri [5, 7, 8].

Renk	Beyaz
Özgöl ağırlık (kg/m^3)	55-300
Birim ağırlık (kg/m^3)	30-250
Erime noktası ($^{\circ}\text{C}$)	1300
Isıl iletkenliği (W/mK)	0,04
Isıl genişleme (m/m K)	$4 \cdot 10^{-6}$ - $11 \cdot 10^{-6}$
Ateşe karşı dayanım	Yanmaz
Ses yutma	0,60

Tablo 2.3: Perlitin kimyasal analizi [5].

Bileşenler	Ağır. %'si	Bileşenler	Ağır. %'si
SiO ₂	71,0-75,0	SO ₃	0,0-0,2
Al ₂ O ₃	12,5-18,0	FeO	0,0-0,1
Na ₂ O	2,9-4,0	Cr	0,0-0,1
K ₂ O	0,5-5,0	Ba	0,0-0,05
CaO	0,5-2,0	PbO	0,0-0,03
Fe ₂ O ₃	0,1-1,5	NiO	Eser
MgO	0,02-0,5	Cu	Eser
TiO ₂	0,03-0,2	B	Eser
H ₂ O	2,0-5,0	Be	Eser
MnO ₂	0,0-0,1	Serbest Silis	0,0-0,2

Perlitin dünyadaki ve Türkiye'deki mevcut durumu, üretim ve tüketim miktarları, ithalat ve ihracat miktarları ile geliştirilmiş perlitin kullanım alanları ile ilgili bilgiler alt bölümlerde verilmektedir.

2.1.1. Dünyada Mevcut Durum

2.1.1.1. Rezervler

MTA Genel Müdürlüğünün yaptığı bir çalışmaya göre ülkemiz perlit rezervi bakımından çok zengin bir ülke durumundadır [9]. Dünyadaki muhtemel perlit rezervlerinin yarısından çoğu Türkiye'de bulunmaktadır [10]. Dünya perlit rezervleri Tablo 2.4'te görülmektedir.

Tablo 2.4: Dünya ham perlit rezervleri (milyon ton) [5, 11].

Ülkeler	Görünür Rezervler	Olası Rezervler
Amerika	50	200
Yunanistan	50	300
Japonya	10	(a)
Türkiye	30	5700
Diğer ülkeler	560	1500
Dünya Toplam	700	7700

^(a) Diğer ülkelerin içinde verilmiştir.

Tablo 2.4'te görülen görünür rezervler günümüz koşullarında çıkarılması ve üretilmesi ekonomik olan rezervleri, olası rezervler ise günümüzde ekonomik olan rezervler ile günümüz teknolojisinde ekonomik olma sınırında kalan veya ekonomik olmayan rezervlerin toplamını belirtmektedir. Yeni teknolojilerin geliştirilmesi ile ekonomik olmayan rezervlerin, ekonomik rezervler olabilme potansiyelleri bulunmaktadır [11].

2.1.1.2. Üretim ve Tüketim

Tablo 2.5'te 2004 ve 2005 yıllarında dünya perlit üretim miktarları verilmektedir. Tablo 2.5'te görülen 2005 yılı üretim miktarları, tahmini değerleri belirtmektedir.

Tablo 2.5: Dünya perlit üretimi (bin ton) [9, 11].

Ülkeler	2004	2005
Amerika	508	506
Yunanistan	525	525
Macaristan	145	60
Japonya	240	200
Türkiye	366	400
Diğer Ülkeler	392	500
Dünya Toplam	1950	1920

Dünyada üretilen ham perlitin büyük bölümü geliştirilmiş şekilde tüketilmektedir. Genleştirilmiş perlit mükemmel ısı ve ses yalıtım özelliği nedeniyle kullanımı hayli yaygın, az yoğun yapı malzemesidir. Bu itibarla perlit tüketimi geniş ölçüde inşaat sektöründeki aktiviteye bağlı olarak değişmektedir [5].

Dünyanın en büyük üretici ve tüketici konumundaki ülkelerden biri olan ABD'de 2004'de tüketilen 709 bin ton perlitin %62'si inşaat üretim ürünlerinde, %14'ü tarım agregası, %7'si filtre yardımcı malzemesi, %11'i dolgu malzemesi, %6'sı diğer alanlarda kullanılmıştır [11]. 2005 yılında ABD'de tüketilen 672 bin ton perlitin ise 417 bin tonu inşaat sektöründe kullanılmıştır [12]. Dünyada inşaat üretim ürünlerinde kullanılan perlitin yaklaşık %70'inin izolasyon plakaları ile tavan döşemelerinde kullanıldığı belirtilmektedir [5].

2.1.1.3. İthalat ve İhracat

Dünyanın en büyük perlit tüketicisi konumundaki ABD, 2004 yılındaki perlit ihtiyacının %23'ünü ithalat ile karşılamıştır. 2004 yılında 238 bin ton olan ABD perlit ithalat miktarının tamamı Yunanistan'dan gelen perlit ile karşılanmıştır. 2004 yılından 508 bin ton olan ABD perlit üretiminin 37 bin tonu ihraç edilmiştir. Komşumuz Yunanistan 525 bin ton/yıl seviyelerindeki üretim miktarı ile dünyanın en büyük üreticisi konumundadır. Avrupa üretiminin %50'sini yapan Yunanistan'ın, AB'ne yıllık ortalama 110-120 bin ton ihracatı bulunmaktadır [5].

2.1.1.4. Kullanım Alanları

Genleştirilmiş perlitin tüketim alanları aşağıda sıralanmaktadır:

- a) İnşaat sektörü : Çatı ve zemin izolasyonlarında şekillendirilmiş izolasyon malzemeleri, perlitli sıvalar, çimento ve alçı bağlayıcılı perlit agregalı hafif yalıtım betonu, perlit agregalı hafif yapı elemanları, araları zemin ve duvar boşluklarında gevşek dolgu malzemesi olarak, yüzey döşemelerinde ısı ve ses yalıtıcı olarak, çimento ve alçı dışındaki bağlayıcılarla yapılan özel amaçla perlit betonlarında,
- b) Tarım sektörü: Tarla tarımında, bahçe tarımında, seracılık ve çimli spor alanlarında gerekli uygun toprak koşullarını sağlamak amacıyla toprağın fiziksel özelliklerini artırıcı “substrat” maddesi olarak,
- c) Sanayi sektörü: Gıda, ilaç ve kimya sanayiinde süzme yardımcı malzemesi olarak, ilaç ve kimya sanayiinde dolgu maddesi olarak, sanayide ısı yalıtımında,seramik ve cam sanayiinde katkı maddesi olarak ve metalurjide,
- d) Diğer alanlardaki uygulamalar: Gemi diplerini kaplama ve yalıtımında, ambalajlamada dolgu malzemesi olarak, plastik köpük ve plakalara dolgu ve katkı malzemesi olarak, bahçe sandalye ve masası gibi ucuz ve hafif plastik mobilya yapımında dolgu maddesi olarak, yangına karşı özellikle çelik kontrüksiyonlarda yalıtım katı olarak kullanılmaktadır [5].

Dünya ve Türkiye’de perlitin kullanım alanları incelendiğinde, en yaygın perlit kullanımının inşaat sektörüne ait olduğu görülmektedir. Toplam tüketimin yaklaşık %70’i bu sektörde gerçekleştirilmektedir [7]. İnşaat sektöründe perlit;

- Şekillendirilmiş izolasyon malzemeleri (çatı ve zemin izolasyonlarında)
- Perlitli sıvalar
- Perlit agregalı hafif yalıtım betonu (çimento veya alçı bağlayıcı)
- Perlit agregalı hafif yapı elemanları tavan kiremitleri, boru izolasyonları vs.
- Gevşek dolgu malzemesi olarak (tavan araları zemin ve duvar boşluklarında yalıtım malzemesi olarak; silikonla özel bir işleme tabi tutularak köpük halinde)
- Yüzey döşemelerinde (ısı ve ses yalıtıcı olarak)
- Çimento ve alçı dışındaki bağlayıcılarla yapılan özel amaçla perlit betonları şeklinde kullanılmaktadır [5].

2.1.2. Türkiye’de Durum

Türkiye’de perlit madeninin mevcut ve gelecekteki durumu alt bölümlerde incelenmektedir.

2.1.2.1. Mevcut Durum

Ülkemizde en önemli perlit yatakları; Cumaovası, Manisa, Biga, Soma, İzmir-Dikili, Konya ve Erzincan- Mollaköy’de bulunmaktadır [10]. Ülkemizde üretilen perlit miktarında 2003 yılı hariç devamlı artış göstermektedir. 2001-2005 yılları arası perlit üretimimiz Tablo 2.6’da görülmektedir.

Tablo 2.6: 2001-2005 yılları arasındaki Türkiye perlit üretim miktarı ve üretim değeri [9].

Yıllar	2001	2002	2003	2004	2005 (T)
Üretim Miktarı (Bin ton)	315	343	330	366	400
Üretim Değeri (Bin YTL)	3.891	5.863	6.536	7.922	9.554

(T): Tahmin edilen değer

Genleşmiş perlite ticari değer kazandıran önemli bazı fiziksel özellikleri az hacimdeki düşük yoğunluğu, kimyasal sabitliği, düşük ısı ve ses geçirgenliği, ateşe karşı dayanıklılığı, yağ ve su tutma kapasitesidir. Ülkemiz perlit bakımından zengin

kaynak ve kapasiteye sahip olmasına rağmen yurtiçi talep çok sınırlı kalmaktadır. Ülkemizde 2001-2005 yılları arası perlit tüketim miktarları Tablo 2.7’de görülmektedir.

Tablo 2.7: 2001-2005 yılları arasındaki Türkiye perlit tüketim miktarı [9].

Yıllar	2001	2002	2003	2004	2005 (T)
Tüketim Miktarı (Bin ton)	216	131	125	150	151

(T): Tahmin edilen değer

Ülkemizde yurtiçi perlit talebinin sınırlı miktarda olmasına rağmen her geçen yıl perlit ihracatımızda artış gözlenmektedir. 2001-2005 yılları arası Türkiye’nin perlit ihracatı Tablo 2.8’de görülmektedir.

Tablo 2.8: 2001-2005 yılları arasındaki Türkiye perlit ihracat miktarı ve ihracat değeri [9].

Yıllar	2001	2002	2003	2004	2005 (T)
İhracat Miktarı (Bin ton)	100	212	205	216	249
İhracat Değeri (Milyon dolar)	2,8	5,6	6	7,1	8

(T): Tahmin edilen değer

2003 yılında 6 milyon dolar olarak gerçekleşen perlit ihracatımız, 2004 yılında 7 milyon dolara ulaşmıştır. 2004 yılı ihracatımızda İtalya (%25), İspanya (%15), Belçika (%17) ve Hindistan (%8) ilk sıralarda yer alan önemli pazarlar olmuştur [10]. Çok iyi bir izolasyon maddesi olan perlit iç tüketimdeki gerekli ivmeyi bir türlü kazanamamıştır. Türkiye’deki perlit tüketiminin %60’ı inşaat, %20’si sanayi, %17’si tarım ve %3’ü diğer kullanım alanlarına ait olduğu görülmektedir [5].

2.1.2.2. Gelecekte Durum

Devlet Planlama Teşkilatı tarafından hazırlanan 9. Kalkınma Planı çerçevesinde; dünyanın en zengin perlit rezervlerine sahip ülkelerinden birisi olan ülkemizin perlit varlığının değerlendirilmesi açısından tüketim alanlarının geliştirilmesine yönelik AR-GE çalışmalarının teşvik ve desteklenmesinin büyük önem taşıdığı belirtilmektedir. Ancak, bugüne kadar söz konusu perlit varlığının değerlendirilmesi konusunda çok fazla gelişme sağlanamamıştır. Özellikle ABD pazarının perlit ithalatını elinde tutan Yunanistan’da üretilen perlite benzer özellikteki perlitimizin yeni yatırımlar ile dünyaya açılmasını ve perlit pazarındaki öneminin artırılmasını

sağlamamız gerekmektedir. Yapılacak olan yeni yatırımlar ile gelecekte ülkemizin tahmini perlit üretim, tüketim ve ihracat değerleri Tablo 2.9’da verilmektedir. Tablo 2.9’da belirtilmekte olan değerler 2005 yılı fiyatları baz alınarak hesaplanmıştır.

Tablo 2.9: 2006-2013 yılları arasındaki Türkiye perlit talep, ihracat ve üretim tahmin değerleri [9].

Tahminler	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Talep Miktarı (Bin ton)	158	165	174	182	191	201	211	222
Talep Değeri (Bin YTL)	340	357	374	393	413	433	455	478
Üretim Miktarı (Bin ton)	450	500	550	600	650	700	750	800
Üretim Değeri (Bin YTL)	10.748	11.942	13.137	14.331	15.525	16.719	17.914	19.108
İhracat Miktarı (Bin ton)	250	260	265	275	285	300	325	350
İhracat Değeri (Milyon dolar)	8	8,4	8,5	8,8	9,2	9,6	10,4	11,2

Türkiye bir deprem ülkesi olduğu ve birçok bölgesinde yoğun kış ikliminin hüküm sürdüğü dikkate alındığında, hafiflik, dayanıklılık ve ısı yalıtımı açısından önemli üstünlükleri olan perlitin inşaat sektöründe değerlendirilmesi ülke ekonomisine önemli katkılar sağlayacaktır. Bu kapsamda, 9. Kalkınma Planı döneminde ülkede, perlit esaslı hafif yapı elemanları ile ilgili çalışmaların artırılması ve bu konuda üretim yapacak tesislerin kurulması önerilmektedir [9].

2.2. Beton

Beton, günümüzde dünya üzerinde en fazla kullanıma sahip yapı malzemesidir [13]. Beton, çimento, agrega, su ve istenilen özelliklerin kazandırılabilmesi amacıyla bazen de katkı malzemelerinin biraraya getirilmesiyle oluşturulan kompozit bir malzemedir. Çimentonun su ile birleşmesi sonucu oluşan çimento hamuru; agrega tanelerinin yüzeyini kaplayarak taneler arasındaki boşlukları doldurmakta ve bu şekilde bağlayıcılık görevini yapmaktadır. Agrega ise betonun iskeletini oluşturan kum, çakıl, kırmataş gibi taneli mineral malzemedir [14].

Agreganın maliyeti çimentoya göre oldukça düşük olduğundan betonda bir dolgu malzemesi olarak kabul edilebilmektedir. Agrega aynı zamanda betona önemli teknik avantajlar sağlar; beton, çimento hamuruna göre hacim sabitliğini daha iyi korur ve

evre etkilerine karşı daha dayanıklı olur. Ayrıca taze betonun işlenebilmesi, pompalanabilmesi, beton içerisindeki hava miktarı da agrega tarafından belirlenir.

Heterojen bir yapıya sahip olan betonun özellikleri kullanılan malzemelerle yakından ilgilidir. Beton hacminin yaklaşık %60-%85'ini oluşturan agreganın niteliği oldukça önemlidir. İyi beton elde edebilmek için uygun agrega kullanılması gerektiği bilinen bir gerçektir. Agreganın kimyasal ve mineralojik bileşimi, zgl ağırlığı, dayanımı, fiziksel ve kimyasal kararlılığı, boşluk yapısı, rengi gibi özellikleri elde edildiği kayacın özelliklerine bağlıdır. Ancak genellikle agreganın tane şekli ve boyutları, yüzey yapısı ve su emmesi gibi özellikleri göz önüne alınır [14].

Beton bileşenlerinden olan imento ve kimyasal katkıların bileşimleri ile etki mekanizmaları, betonun mekanik davranışları ve elastik özellikleri ilerleyen bölümlerde sunulmaktadır.

2.2.1. Çimento

Çimento hammaddelerinin dikkatle orantılanmış bir karışımı olan farinin, ana bileşenleri kireç (CaO) ve silis (SiO₂)'tir. Farinin içinde, bunların dışında alumin (Al₂O₃), demir oksit (Fe₂O₃), az miktarda magnezyum ve alkali oksitler bulunmaktadır. Çimentonun bileşenleri ve ağırlıkça yüzdeleri Tablo 2.10'da görülmektedir.

Tablo 2.10: Çimentonun bileşenleri [15].

Bileşenler	Ağır. %'si
CaO	60-67
SiO ₂	17-25
Al ₂ O ₃	3-8
Fe ₂ O ₃	0,5-6,0
SO ₃	1-3
MgO	0,1-4,0
Alkaliler	0,2-1,3

Portland çimentosunun oluşumu ve su ile hidratasyonu karmaşık kimyasal reaksiyonlar içerdiğinden ifadeleri kısaltmak için çimento kimyasına özgün $\text{CaO}=\text{C}$, $\text{SiO}_2=\text{S}$, $\text{Al}_2\text{O}_3=\text{A}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3=\text{F}$, $\text{H}_2\text{O}=\text{H}$ şeklinde semboller kullanılmaktadır.

Farin, döner fırında pişerken oksitler önce serbest hale geçmekte ve daha sonra sıcaklık yükseldikçe aralarında yeni bileşikler oluşturmaktadır. Yeni bileşiklerin oluşmasında kireç miktarının yeterli olması ve ham maddelerinin gereken oranlarda birleştirilmesi önem kazanmaktadır. Döner fırında oluşan bu oluşumlar klinker adını almaktadır. Döner fırından çıkan klinkerlerin boyutu 2 cm çapındadır. Fırından çıkan klinkerin boyutunu 30 mikron ve altına düşürmek için öğütme işlemi uygulanmaktadır. Öğütme işlemi sırasında, çimentonun su ile karıştırıldığı andaki kimyasal reaksiyonlarını ve katılaşma sürecini kontrol edebilmek amacıyla ağırlıkça %3-5 civarında kalsiyum sülfat (jips) katılmaktadır.

Klinkerin sadece kalsiyum sülfat ve en fazla %0-5 arası mineral katkı ile öğütülmesinden oluşan çimentolara portland çimentosu adı verilmektedir. Tipik bir portland çimentosu klinkerinde bileşimin %90'dan fazlasını karma oksit formundaki dört ana bileşenden oluşturmaktadır. Klinker bileşenleri Tablo 2.11'de verilmektedir.

Tablo 2.11: Klinker bileşenleri [15].

Bileşenler	Açık Formüller
C_2S	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$
C_3S	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$
C_3A	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$
C_4AF	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$

Portland çimentosunun hidratasyonu; anhidrit haldeki kalsiyum silikat ve kalsiyum alimünat fazlarının suyla olan reaksiyonu sonucu hidrat fazlarının oluşması şeklinde gerçekleşmektedir.

C_4AF 'nin su ile çok fazla bir reaksiyonu yoktur ve bağlayıcılık değeri azdır. C_3A , su ile çok hızlı reaksiyona girmekte, çok fazla ısı açığa çıkarmakta ve çimento hamurunun çok çabuk katılaşmasına neden olmaktadır. C_3A 'nın etkisini yavaşlatmak için klinker, alçıtaşı ile öğütülmektedir. C_3A 'nın bağlayıcılık değeri azdır ve sülfatların yıpratıcı etkilerine karşı çimentonun direncini zayıflatmaktadır.

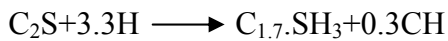
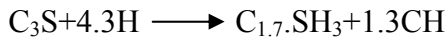
C₂S'in su ile reaksiyonu yavaştır ve reaksiyon sırasında az miktarda ısı açığa çıkarmaktadır. C₂S'in sahip olduğu yüksek bağlayıcılık özelliği kendini ancak betonun ileriki yaşlarında gösterebilmektedir. C₃S'in su ile reaksiyonu sırasında açığa çıkan ısı orta değerdedir. C₃S'in yüksek bağlayıcılık özelliği ilk yaşlardan itibaren etkili olmaktadır [15].

Katı hidratlar, anhidrat parçacıklarından daha fazla yer işgal etmekte, bunun sonucu olarak da birbirine kenetlenmiş sabit bir kütle oluşmaktadır. Bu kütlenin porozitesi, kullanılan su/çimento oranının bir fonksiyonudur.

Çimentonun hidratasyon reaksiyonunun karışıklığı sebebiyle, silikat (C₃S ve C₂S) ile alüminat (C₃A ve C₄AF) fazları reaksiyonlarının ayrı ayrı incelenmesi uygun olmaktadır.

- Silikatların Hidratasyonu

C₃S ve C₂S'in su ile reaksiyonu sonucunda kum ve agrega taneciklerini birleştirecek olan esas yapıştırıcı özelliğine sahip C-S-H jeli oluşmaktadır. C₃S, C₂S'e göre daha reaktif olup 3. günde %50'si, 28 gün sonra ise %80'i hidrasyona uğramaktadır. Buna karşın C₂S'te 14 güne kadar belirgin bir hidratasyon gözlenmemektedir.

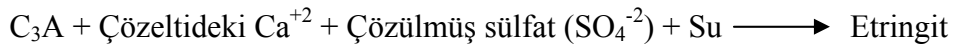


C₃S hidratasyonunun en önemli özelliği suyla karıştıktan sonra gerçekleşecek olan ani reaksiyon olayının belirli bir süre askıya alınmış gibi görünmesidir. Bu süre pratikte betonun katılaşmadan ve sertleşmeden önce yerleşmesine olanak vermektedir.

Reaksiyonların başlangıcından önce etkisiz geçen bu süreç ile ilgili en çok kabul gören teori, başlangıç reaksiyonları sırasında C₃S fazının üzerinde yoğun bir C-S-H katmanının oluşması ve zamanla koruyucu katmanın geçirgenliğinin artmasıyla ya da katmanın yok olmasıyla bu bekleme zamanı son bulmasıdır [16].

- Alüminatların Hidratasyonu

C_3A , çözülebilen kalsiyum sülfat yokluğunda C_2AH_6 fazını meydana getirmek üzere C_2AH_8 ve C_4AH_{19} fazlarına dönüşmektedir. Bu hızlı dönüşüm ekzotermiktir. Karışımda jips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) veya yarı hidratlı jips ($CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$), C_3A ile karıştırılmış ise, karışım su ile temas ettiği anda C_3A kristalleri üzerinde koruyucu etringit tabakası oluşmaktadır. C_3A 'nın etkinliği bu reaksiyon ile kontrol edilmektedir.



Pek çok çalışmada C_4AF 'nin hidratasyon mekanizmasının C_3A ile aynı olduğu ama çok daha yavaş gerçekleştiği bildirilmiştir [16].

2.2.2. Kimyasal Katkılar

Kimyasal katkılar, betona karışım anında katılan ve betonun karıştırmadan hemen sonra taze haldeki veya sertleştiğinde sahip olacağı özellikleri etkileyen kimyasallardır. Kimyasal katkılar tek bir kimyasal olabileceği gibi birçok kimyasalın karışımı şeklinde de olabilirler. Kimyasal katkılar, betona daha rahat karışabilmelerini sağlamak amacıyla çoğunlukla sıvı çözeltiler şeklinde kullanılmaktadır.

Kimyasal katkıların etki mekanizmaları Tablo 2.12'de belirtilen etkilerin biri veya birkaçı ile gerçekleşmektedir. Tablo 2.12'de kimyasal katkıların etkileri ve beton karışımına yarattığı sonuçlar ayrıntılı bir şekilde sunulmaktadır.

Tablo 2.12: Kimyasal katkıların etkileri ve sonuçları [16].

Etkiler	Sonuçlar
Su ihtiyacını etkileme	Akışkanlaştırma veya su azaltma
Sertlik oranını değiştirme	Hızlı/Yavaş katılaşma
Hava miktarı değiştirme	Sürüklenen hava miktarını arttırarak /azaltarak
Plastik viskoziteyi değiştirme	Karışımın akmasına ve dağılmasına direci arttırarak

2.2.2.1. Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesi

Tipik bir beton bileşiminde karışıma hacimce % 20 oranında eklenen suyun % 9'u çimentonun hidrasyonu için gerekli su, % 11'i ise işlenebilirliği sağlamak için ilave olunması gereken su miktarını oluşturmaktadır. İşlenebilirliğin sağlanması için eklenen ilave su sadece işlenebilirlik için kullanılmakta ve katılaşmadan sonra bağ yapmadan serbest bir şekilde betonun içinde kalmaktadır. Bu şekilde dayanımı düşüren, difüzyon yolları açan birbirine bağlı suyla dolu kapiler boşluklar oluşmaktadır. Kapilerlerden su yavaşca buharlaştıkça betonda kuruma, büzülme ve çatlamlar oluşmaktadır [16].

Beton karıştırıcısında çimentonun üzerine su döküldüğünde, çimento tanecikleri düzgün olarak dağılmaz bunun yerine küçük yumrular halinde bulunurlar. Suyun, bu küçük yumrular arasında kaldığı durumda betonun akışkanlığı azalmaktadır. Yüksek kırıcılı harç karıştırıcıları bu yumruları parçalasa da yine de tanecikler bir araya gelip topaklanma eğilimi göstermektedir. Bu durumu önlemek ve taneciklerin dağılmış halde kalmasını sağlamak için dağıtıcı kimyasal katkıları kullanılmaktadır.

Kimyasal katkıların önemli bölümünü oluşturan dağıtıcı katkı maddelerinin akışkanlaştırıcı, süper akışkanlaştırıcı, su azaltıcı, yüksek su azaltıcı gibi çeşitleri bulunmaktadır. Dağıtıcı katkıları çimento partiküllerinin yüzeyine tutunarak sulu ortamdaki partikül dağılımının daha düzgün olmasını ve karışımın akışkanlığının artırılmasını sağlamaktadır.

Dağıtıcı katkıları su düşürme kapasitelerine göre normal akışkanlaştırıcılar/su azaltıcılar ve süper akışkanlaştırıcılar/yüksek oranda su azaltıcılar şeklinde iki grupta incelenmektedir [16].

Normal akışkanlaştırıcılar: %5-%12 arasında su azaltma etkisi olan katkılarıdır.

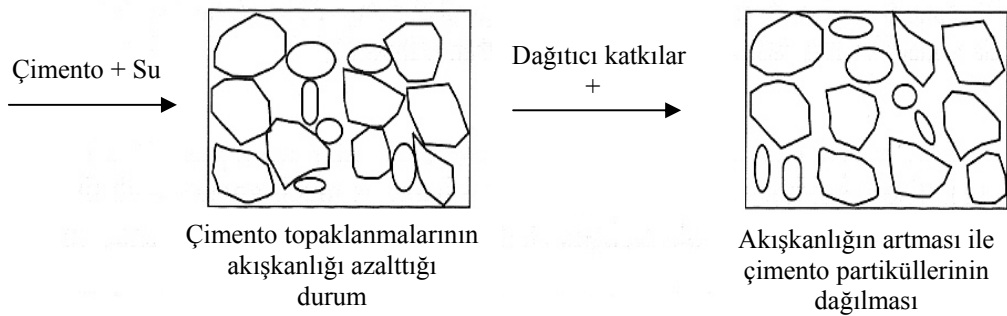
- Çimentonun %0.2-0.6 oranı gibi düşük dozajlarda katılırlar,
- Dozaj oranı aralığının yüksek değerlerinde düşük sıcaklıklarda bazı bağlayıcılarla geciktirme gibi ikincil etkilere sahiptirler,
- Normal dozajlara oranla daha yüksek dozajlarda kullanılması durumunda taneciklerin dağılmasında normal uygulamaya oranla az bir ek etki oluşmasına rağmen, belirgin ikincil etkiler oluşturmaktadır.

Normal akışkanlaştırıcıların etken maddesi genellikle, kâğıt hamuru endüstrisinde ağaçların işlenmesi sonucu elde edilen lignosülfonat isimli doğal polimerdir. Ağaç hamurundaki kahverengi lignin sülfite reaksiyonu ile giderilmekte, ardından beton katkı olarak kullanılmadan önce istenmeyen kimyasallardan ve şekerden arındırma işlemine tabii tutulmaktadır. Bu işlemler artıkça katkı maddesi olarak kullanıldığında ikincil etkiler azalmaktadır.

Süper akışkanlaştırıcılar: Su azaltma etkisi %12'ye kadar olan katkılardır fakat dozaja ve tipine göre % 30 oranına kadar su azaltma etkisi gösterebilirler.

- Çimentonun %0.5-2.0 arasındaki oranlarında katılırlar,
- Kullanım dozajının üst seviyeleri haricinde çok az geciktirme etkisi bulunmaktadır,
- Kimya endüstrisi tarafından bu tip uygulamalar için istenilen özelliklerle türetilen sentetik kimyasallardır. Bu kimyasallar naftalin sülfonat polimerleri, melamin formaldehit kondensatları ve polikarboksilat eterler olmak üzere üç tiptir.

Çimento su eklendiği zaman, çimento tanecikleri düzgün bir dağılım göstermemekte ve küçük topaklanmalar oluşturma eğilimi göstermektedir. Topaklar suyu içine hapsetmekte ve bu şekilde karışımın sadece çimento taneciklerinin olduğu halinden daha az akışkan bir hal almasına sebep olmaktadır. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi, akışkanlaştırıcılar çimento partiküllerinin yüzeyine tutunarak çimento topaklarını parçalamakta ve her bir çimento partikülünü ayırmaktadır. Bu şekilde çimento partikülleri birbirinin arasından rahatça geçmekte, karışım daha akışkan bir hal almaktadır.



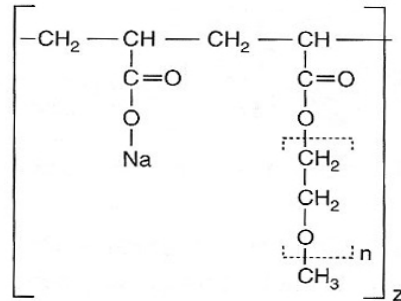
Şekil 2.2: Dağıtıcı katkıların çimento topaklanmalarını parçalama etkisi [16].

Karışım hacminde herhangi bir değişim olmamasına rağmen topaklanmaların ayrılması sonucu topakların içinde hapsolan su açığa çıkmakta ve partiküller ayrıldığından bağımsız olarak diğer bir partikül ile temas etmeden mevcut hacimde dolaşarak daha etkili şekilde kullanılmaktadır. Bu şekilde sadece akışkanlık değil, aynı zamanda partiküller tamamen suyla çevrili olacağından hidrasyon da artmaktadır.

Yukarıda anlatıldığı gibi, çimento taneciklerinin dağıldığı ve hidrasyonun arttığı bir ortamda devam eden hidrasyonla birlikte partiküller arasındaki boşluklar daha çok hidrasyon ürünleriyle dolmakta ve neticede uzun dönem dayanım da artmış olmaktadır. Sonuçta daha az boşluk yapıya sahip, daha az kapiler ve daha dayanıklı beton oluşmaktadır.

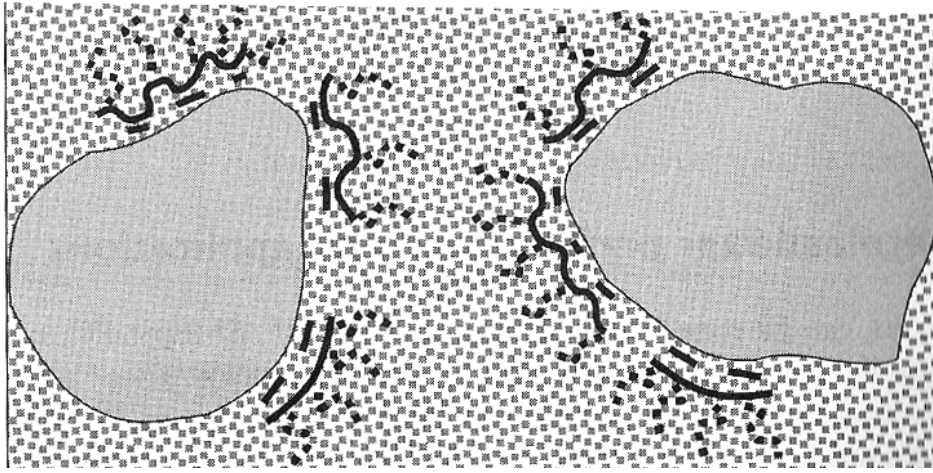
Karışımın içine katılan katkı maddelerinin çimento partiküllerine adsorpsiyonu, katkıların içindeki aktif maddelerdeki negatif yüklerin çimento üzerindeki pozitif yüklü kalsiyum iyonlarına tutunmasıyla gerçekleşmektedir. Partiküllerin dağılımı, elektrostatik itme ya da sterik kararlılık mekanizmalarından biriyle gerçekleşmektedir.

Süper akışkanlaştırıcıların kullanılması ile yüklenmenin büyüklüğündeki değişimin normal akışkanlaştırıcılara göre daha büyük olması, performanslarındaki farkı açıklamaktadır. Süper akışkanlaştırıcılar arasında %20-35 civarında su azaltma etkisi ile en iyi performansı polikarboksilat eter süper akışkanlaştırıcıları göstermektedir. Şekil 2.3'te polikarboksilat eter süper akışkanlaştırıcısının temel yapısı görülmektedir.



Şekil 2.3: Polikarboksilat eter süper akışkanlaştırıcısının temel yapısı [16].

Polikarboksilat eter (PCE) süper akışkanlaştırıcılarında ana mekanizma sterik kararlılığın sağlanmasıdır. Şekil 2.3'te gösterilen kopolimer, polietilen glikol halindeki $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-)_n$ 'dir. Polietilen glikoldeki "n", 20 ile 80 arasında değişmekte ve molekül ağırlığı değişkenlik gösterebilmektedir. Suda bu moleküllerin taşıdığı $-\text{CO}_2\text{Na}$ grupları $-\text{CO}_2^-$ ve Na^+ şeklinde iyonize olmaktadır. $-\text{CO}_2^-$ grubu katkı molekülünün üzerinde tutunmuş olarak kalmakta ve katkırı çimentoya bağlayacak orta kuvvetli negatif yükü taşımaktadır. Şekil 2.4'te görülen uzun polieter grupları çimento partikülünün yüzeyinden uzak duracak şekilde yönlenecek ancak komşu partikülün polieter zincirine karışmaya da direnç göstermektedir. Bu şekilde çimento partiküllerinin birbirinden ayrılmalrı sağlanmaktadır [16].



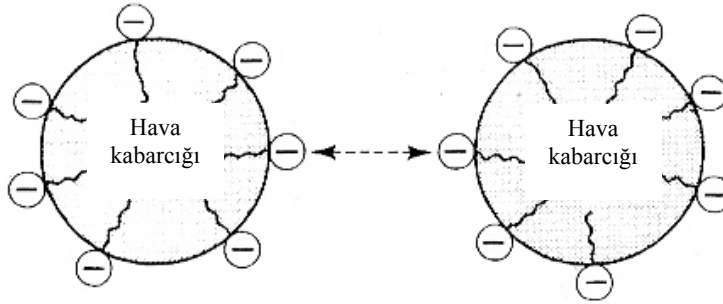
Şekil 2.4: Süper akışkanlaştırıcı katkı çimento partikülünün sterik kararlılığı [16].

2.2.2.2. Hava Sürükleyici Katkı Maddesi

Hava sürükleyici katkılar, karışımda ve sertleşen betonun içinde kalan hava kabarcıklarının düzgün dağılmasını kontrol etmektedir [17]. Hava sürükleme, karışım içindeki havanın yüzde miktarı olarak tanımlanmaktadır [16].

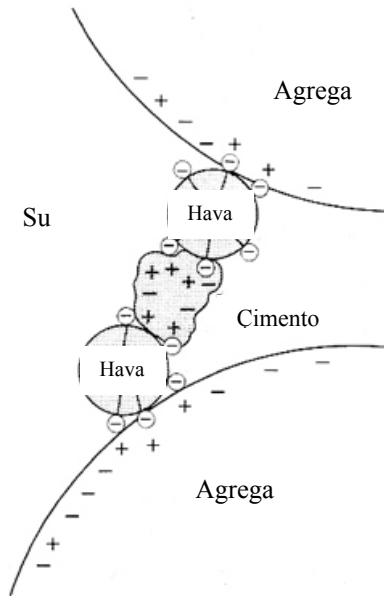
Hava sürükleyiciler suyun yüzey gerilimini değiştiren yüzey aktif maddelerdir. Çimento pastasının içindeki hava-su arayüzeyinde etki eden yüzey aktif maddeler, karıştırma süresince hava kabarcıklarını çok küçük ve ayrık kabarcıklar şeklinde hapsederler. Sahip oldukları yüklü hidrofilik baş kısım suya tutunurken, hidrofobik kuyruk kısmı hava kabarcıklarını yakalamaktadır. Bu durumda, hava kabarcığının içine kuyrukları ile nüfuz eden yüzey aktif maddelerin yüklü olan kısmı kabarcığın dışında kalmaktadır. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi, her bir kabarcığın dışyüzeyinde

kalan aynı yüklü yapılardan dolayı, aynı yüklerin birbirini itmesi prensibi komşu kabarcıkların birleşerek daha büyük hale gelmesi engellenmektedir [17].



Şekil 2.5: Hava kabarcıklarının birbirini itmesi mekanizması [17].

Kullanılan bu katkılar çimento ve agregaya negatif yüklü kısımlarla adsorbe olup, agrega-hava-çimento-hava-agrega tipinde bir köprü meydana getirmektedir. Şekil 2.6’ da görülen bu köprü, karışımın kohezyonunu artırırken hava boşluk sistemini kararlı hale getirmektedir. Kurulan bu köprü sayesinde, hava kabarcıkları sıkıştırılabilir yatak gibi davranacak ve sistemin sahip olacağı serbest hareket olanağı artacaktır [17].



Şekil 2.6: Hava sürükleyici katkı maddesi etki mekanizması [17].

Betonun hava miktarındaki %1 oranında artış sonucunda dayanımda %5-6’lık azalma görülmektedir [16].

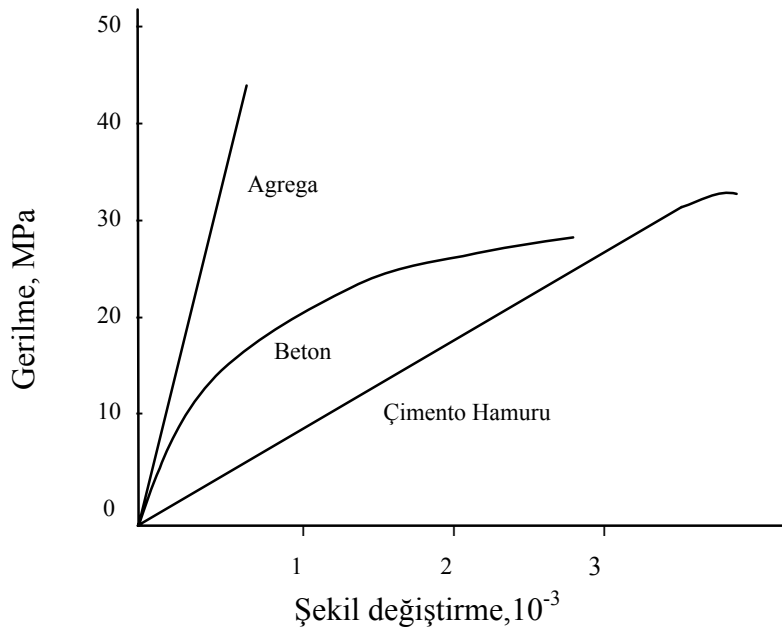
2.2.3. Betonun Mekanik Davranışı

Beton basınç dayanımı, genel olarak betonun en önemli özelliği olarak tanımlanmaktadır. Betonun kalitesi ile ilgili bilgi edinilmesini sağlayan beton dayanımı, betonun kullanım alanlarının belirlenmesi ile ilgili genel bir fikir vermektedir [18]. Beton; agrega, çimento ve agrega ile çimento hamuru arayüzeyinden oluşan üç fazlı bir kompozit malzeme olarak gözönüne alındığında malzeme özellikleri sadece bileşenlerin özelliklerine bağlı değildir.

İç yapısal olarak gözönüne alındığında heterojen bir malzeme olan betonun dayanımı üç faktörden etkilenmektedir [19]. Bunlar:

- i) Matrisin dayanımı (çimento hamurunun dayanımı),
- ii) Agreganın dayanımı,
- iii) Agrega-çimento arayüzeyin dayanımı.

Bu faktörlerden herbirinin çeşitli sınıflardaki betonların dayanımlarında etkileri farklıdır. Ancak genel olarak, agrega-çimento arayüzeyi betondaki en zayıf halka olarak kabul edilmektedir. Çimento hamuru ile agrega arasındaki temas yüzeyi, çimento hamurundan farklılıklar göstermektedir. Bu arayüzeyler betonun mekanik davranışında oldukça etkilidir [20]. Şekil 2.7’de agrega, çimento hamuru ve betona ayrı ayrı yük uygulandığı durumdaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri görülmektedir.

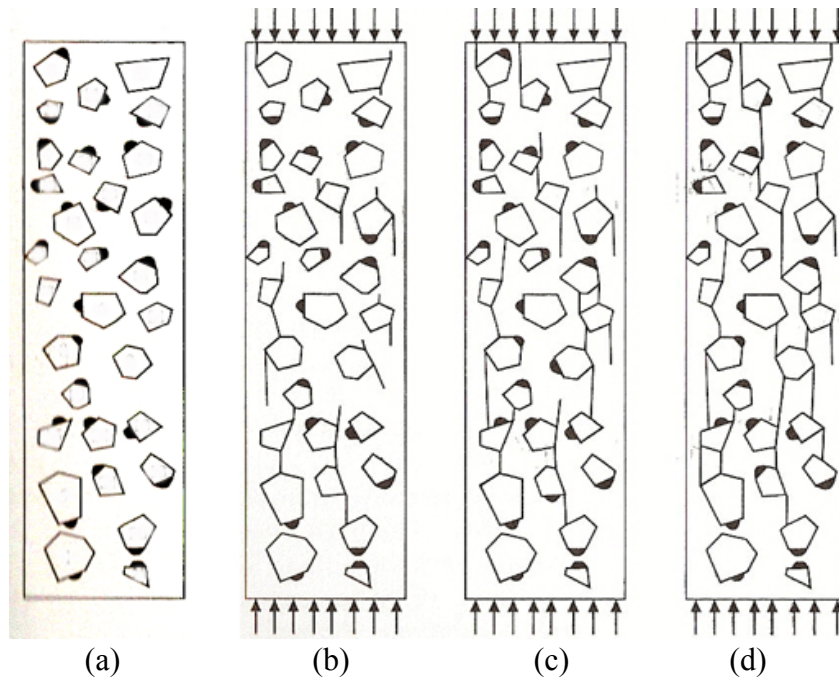


Şekil 2.7: Agrega, sertleşmiş çimento hamuru ve betonun basınç altında gerilme-şekil değiştirme eğrileri [21].

Şekil 2.7’de görüldüğü gibi agrega ve çimento hamuruna ayrı ayrı yük uygulandığında gerilme-şekil değiştirme eğrileri hemen hemen lineer iken, betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi lineer değildir [21].

Betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisindeki bu eğrilik agrega ile çimento hamuru arayüzeyinde oluşan mikroçatlamalardan kaynaklanmaktadır. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinin biçimi; agrega içeriği, yükleme hızı ve mikroçatlama süreci gibi faktörlerden önemli derecede etkilenmektedir.

Sertleşmiş betona yük uygulamadan önce betonda bulunan mikroçatlaklar ve betona yük uygulanmasının ardından çatlakların gelişimi Şekil 2.8’de görülmektedir. Betonun genel bir özelliği olan mikroçatlaklar; iri agrega ile hidrate olmuş çimento hamurunun, kuruma rötresi gibi özelliklerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu mikroçatlaklar, Şekil 2.8 (a)’da görüldüğü gibi betona herhangi bir yük uygulamadan önce betonun içyapısında bulunmaktadır [18].

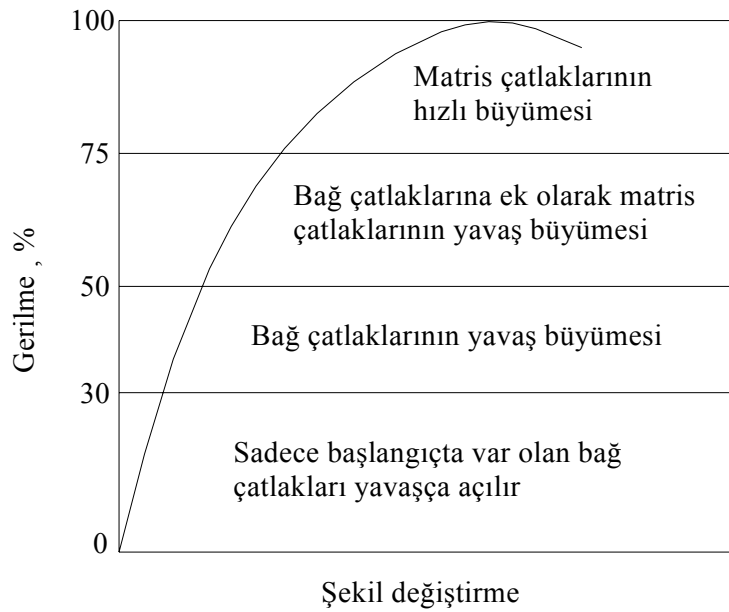


Şekil 2.8: Sertleşmiş betona yük uygulanmadan önceki ve sonraki çatlak gelişimi [21].

Betona yük uygulandığında basınç dayanımının %30’una kadar mikroçatlaklar yavaşça açılmakta (Şekil 2.8 b), %30’un üzerinde bu bağ çatlaklarının uzunlukları, genişlikleri ve sayıları artmaya başlamaktadır. Bu aşamada çatlakların ilerlemesi yavaştır. %50 basınç dayanım düzeyinde çatlaklar birleşerek (Şekil 2.8 c) hamur

içinde büyümektedir. Gerilmenin basınç dayanımına oranı %70-%90 olduğu zaman (Şekil 2.8 d) çatlaklar çimento hamuru ile ince agregadan oluşan harç fazı içinde açılmaya başlamakta ve sayıları önemli ölçüde artmaktadır. Bu çatlakların birleşerek sürekli çatlakları oluşturması sonucunda bir çatlak ağı ortaya çıkmaktadır. Bu aşamada hızlı çatlak yayılması görülmektedir. Basınç dayanımının, %90'ına ulaşıldıktan sonra ise bu bileşik çatlaklarda kararsız yayılış olmaktadır. Bu aşamada yük kaldırılrsa bile çatlaklar kendiliğinden hareket etmekte ve numunenin taşıma kapasitesini sona erdirmektedir [18, 21].

Bir çatlak ağı büyük ölçüde oluşuktan sonra betonun yük taşıma kapasitesi azalmaktadır. Şekil 2.9'da mikroçatlamanın şematik olarak açıklaması verilmektedir.



Şekil 2.9: Betonun basınç altında gerilme-şekil değiştirme eğrisi [14].

Tek eksenli basınç altında betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi başlangıçta lineer bir kısım ile bunu izleyen ve lineer olmayan ikinci kısımdan oluşmaktadır. Lineer kısım küçük olup kırılma yükünün yaklaşık %30'u kadarını içermektedir. Betonun lineer olmayan şekil değiştirmeleri ise daha fazladır ve bu kısım, projelendirme bakımından önem taşımaktadır.

Normal betonlarda genellikle agrega, matrisden daha dayanıklıdır. Betona çekme gerilmesi uygulandığında çatlaklar ya matris içinden ya da matris-agrega arayüzeyinden yayılacaklardır. Çatlaklar ilerlerken agrega tarafından

tutulabilmektedir. Ayrıca çatlakların agrega etrafından dolaşması ve çatallaşması bir miktar enerjinin sönümlenmesine yol açmaktadır. Hafif betonlarda ise çatlak yayılması agrega içinden başlayacak ve bu olay ani göçmeye sebep olacaktır. Bu yüzden hafif betonlar, normal betonlara göre biraz daha gevrek kırılmaktadır [14, 22].

Zhang ve Gjorv [22]'in yaptıkları çalışmada, yüksek mukavemetli hafif beton üretiminde mukavemete etki eden en önemli özelliğin hafif agreganın mukavemeti olduğu belirtilmektedir. Arda [23] yaptığı çalışmada, yüksek mukavemetli betonlarda agrega konsantrasyonunun artmasıyla betonun basınç mukavemetinin ve elastisite modülünün arttığını göstermiştir. Şehitoğlu [24] yaptığı çalışmada, normal ve hafif betonlarda agrega konsantrasyonunu değiştirmiş ve normal betonlarda agrega konsantrasyonunun artmasıyla basınç mukavemetinin arttığını, hafif betonlarda ise azaldığını belirtmiştir.

2.3. Hafif Beton

Beton iyi bir taşıyıcı olmasına karşın birim ağırlığı büyük, ısı iletkenliği yüksektir. Normal betonun birim ağırlığının düşürülmesiyle betonarme elemanın öz ağırlıkları azaltılıp yapı hafifletilebilmekte, böylece taşıyıcı sistem elemanlarının kesitleri küçültülerek ekonomi sağlanabilmektedir. Birim ağırlığının azaltılmasıyla betonun ısı iletkenliği küçülmekte, ses yutuculuğu artmaktadır [25]. Diğer yandan yurdumuzun büyük çoğunluğunun 1. derece deprem riski taşıyan bölgelerde bulunması gözönüne alındığında, yapıların öz ağırlıklarının hafifletilebilmesi yapıya etkiyen deprem yükünü azaltacak ve dolayısı ile olası depremlerdeki yapı hasarları da azaltılmış olacaktır [14].

Hafif beton üretiminde birçok farklı yöntem bulunmaktadır [26]:

- Beton içindeki ince agregaların tamamen çıkarıldığı ince agregasız beton üretimi
- Kimyasal katkıları ve fiziksel yollar ile beton içinde hava kabarcıklarının oluşturulmasıyla üretilen gaz ve köpük betonlar
- Normal agregaların yerine boşluklu olan hafif agregaların kullanılması ile üretilen hafif agregalı betonlar

Betonun birim ağırlığı, karışım içindeki katı malzemenin hava boşlukları ile yer değişmesi sonucunda azalmaktadır. Beton karışımında hava; hafif agregatanelerinin içinde, betonu oluşturan çimento pastasında ve agregatanelerinin arasında bulunabilmektedir [18].

Hafif betonların normal betonlara göre üstünlükleri şöyle özetlenebilmektedir;

- Birim hacimdeki toplam malzeme ağırlığının azalması nedeniyle beton kalıbında daha düşük basınç oluşur, üretim ve yerleştirme kolaylaşır
- Hafif betonla üretilen elamanların düşük birim ağırlıkları nedeniyle yatay ve düşey yapı yükleri azalır, bu azalma ile temeller ve diğer yapı elemanları daha küçük boyutlarda yapılarak ekonomi sağlanır
- Isıl iletkenlikleri düşük, ısı ve ses yalıtımları yüksektir
- Yangın bakımından normal betona göre daha elverişlidir [25].

Hafif betonların normal betonlara göre sakıncaları ise şöyle özetlenebilmektedir;

- Boşluklu olmaları nedeniyle mukavemetleri düşüktür. Bu nedenle birçok yüksek mukavemetli beton uygulamalarında tercih edilen bir malzeme değildir
- Aşınmaya karşı dayanıksızdırlar
- Rutubete karşı yalıtım gereklidir
- Elastisite modülü düşük değerler alır
- Sünme ve rötre normal betona göre daha yüksektir [25].

Hafif beton üretiminde en popüler yöntem normal agregataya yerine hafif agregaların kullanılması ile hafif beton üretimidir. Hafif agregalar kullanılarak üretilen betonlar, hafif agregalı betonlar olarak adlandırılmaktadır. Betonların birim ağırlık ve dayanımı arasında büyük oranda orantılı artış olduğu için birim ağırlıklara bağlı olarak betonların sınıflandırılması yapılabilmektedir [18].

Hafif agregalı betonlar, pratikte 300 ile 1850 kg/m³ değerleri arasında birim ağırlıklara sahip betonlardır [18]. Birim ağırlıkları 300 – 2000 kg/m³, küp basınç dayanımı 1 – 60 MPa, ısıl iletkenlik değerleri ise 0,2 – 1 W/mK arasında değişen hafif betonlar üretilmektedir [13]. Hafif betonların birim ağırlıklarına, işlevlerine ve kullanılan agreganın cinsine göre sınıflandırılma bilgileri alt bölümlerde sunulmaktadır.

2.3.1. Hafif Betonların Sınıflandırılması

Hafif betonların sınıflandırılması, genellikle hem birim ağırlık hem de dayanıma göre yapılmaktadır. Yalıtım betonlarından taşıyıcı olanlara kadar bütün hafif betonların özellikle birim ağırlık bakımından sınıflandırılmasında değişik kabuller bulunmaktadır.

Ülkemizde hafif beton birim ağırlığının 2000 kg/m^3 'e kadar çıkmasına izin verilmektedir [27]. Amerika'da ise hava-kuru birim ağırlığı 1810 kg/m^3 'ten az olan betonlar hafif agregalı betonlar olarak adlandırılmaktadır [13].

Amerikan Beton Enstitüsü'nün yayınladığı, yapısal hafif agregalı beton kılavuzunda (ACI 213R-87), betonların birim ağırlıkları kullanılarak uygulama alanlarına göre sınıflandırılmaları yapılmaktadır. ACI 213R-87'de yapılan sınıflandırma doğrultusunda, hafif betonlar 3 kategoriye ayrılmaktadır. Birinci kategori birim ağırlığı $1350\text{-}1900 \text{ kg/m}^3$ arasında değerler alan yapısal hafif betonlardır. Bu betonlar yapısal amaçla kullanılmakta ve minimum 17 MPa basınç dayanımına dayanmaktadır. İkinci kategorideki hafif betonlar ise birim ağırlığı $300\text{-}800 \text{ kg/m}^3$ arasında değerler alan düşük birim ağırlıklı betonlardır. Bu betonlar ise ısı yalıtımı gibi yapısal olmayan amaçlar için kullanılmaktadır. Üçüncü kategorideki betonlar ise iki tip hafif betonun arasında bulunan orta dayanımlı betonlardır. Bu kategorideki betonların silindirik basınç dayanımları 7 ila 17 MPa arasında değerler almakta, ısı yalıtım karakteristikleri ise düşük birim ağırlıklı betonlar ile yapısal hafif betonlar arasında değerler almaktadır [18].

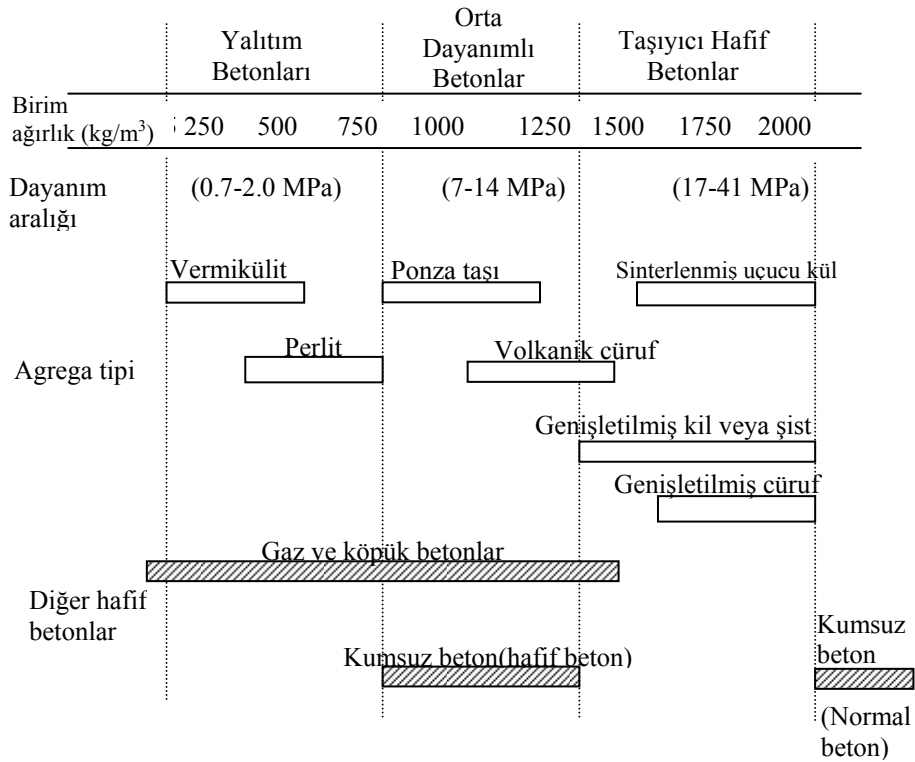
İnşaat Malzemeleri, Sistemleri ve Yapıları Laboratuvar ve Uzmanları Uluslararası Birliği (RILEM) ile Avrupa Beton Komitesi (CEB) tarafından yapılan, betonların kullanım amaçlarına göre sınıflandırması Tablo 2.13'te görülmektedir.

RILEM ve CEB tarafından yapılan sınıflandırmada, hafif betonların fırın kurusu birim ağırlıkları, basınç dayanımları ve ısıl iletkenlikleri göz önüne alındığında, kullanım alanlarına göre yapısal, yapısal ve yalıtım, yalıtım betonları şeklinde sınıflandırıldığı görülmektedir.

Tablo 2.13: Hafif betonların işlevlerine göre sınıflandırılması [13].

Sınıf	I	II	III
Hafif betonun türü	Yapısal	Yapısal ve Yalıtım	Yalıtım
Fırın kuru birim ağırlık (kg/m^3)	1600-2000	< 1600	<< 1450
Basınç dayanımı (MPa)	> 15,0	> 3,5	> 0,5
Isıl iletkenliği (W/mK)	-	< 0,75	< 0,30

Hafif betonların üretiminde kullanılan hafif agregalara bağlı olarak hafif betonların işlevleri değişebilmektedir. Sadece hafif agregalar kullanılarak üretilen farklı tür hafif betonların sınıflandırılması Şekil 2.10'da görülmektedir.



Şekil 2.10: Kullanılan agrega cinsine göre hafif betonların sınıflandırılması [28].

Şekil 2.10'da görüldüğü gibi agrega olarak hacimce %100 perlit agregası kullanılarak üretilen hafif agregalı betonlar yalıtım betonları olarak kullanılmaktadır.

2.3.2. Hafif Agregaların Sınıflandırılması

Hafif beton üretiminde en çok başvurulan yöntem, hafif agregalar ile birim ağırlığı istenen düzeyde tutmaktır. Hafif beton üretiminde kullanılan hafif agregalar, üretildikleri malzemenin kaynağına ve kendi birim ağırlıklarına göre sınıflandırılırlar. Elde edilmiş biçimlerine göre hafif agregalar dört ana grupta sıralanabilmektedir [25]:

- (a) Doğal hafif agregalar: Ponza taşı, volkanik tüf, volkanik cüruf ve ağaç parçacıkları gibi organik malzemeler.
- (b) Doğal malzemelerden üretilen yapay hafif agregalar: Genleştirilmiş kil, genleştirilmiş şist, genleştirilmiş arduvaz, perlit, vermikulit, ve strofor gibi polimer bazlı malzemeler.
- (c) Endüstriyel atıklardan üretilen hafif agregalar: Yüksek fırın cürufu, uçucu kül.
- (d) Endüstriyel atıkların işlenmesiyle üretilen hafif agregalar: Genleştirilmiş yüksek fırın cürufu ve kızdırılmış uçucu kül.

Hafif agregaların birim ağırlıkları ile kullanım alanları arasındaki ilişkiye göre sınıflandırılmaları Tablo 2.14’te görülmektedir.

Tablo 2.14: Hafif agregaların birim ağırlıkları ile kullanım alanları arasındaki ilişki [23].

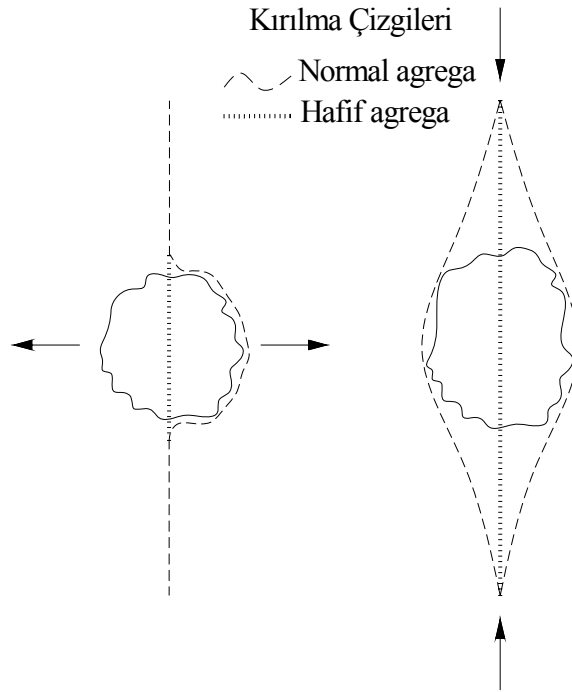
Agrega Birim Ağırlığı, kg/m^3	Üretilen Betonun Türü
Agrega birim ağırlığı < 400	Yalıtım betonu
$400 \leq$ Agrega birim ağırlığı < 650	Yalıtım ve orta muavemetli beton
Agrega birim ağırlığı ≥ 650	Taşıyıcı beton

2.3.3. Hafif Betonların Mekanik Davranışı

Kompozit bir malzeme olan betonun; agregalar, harç ve arayüzeyden oluştuğu varsayılabilmektedir. Normal betonda, agreganın mukavemet ve elastisite modülü değerleri harcınkilerden daha büyük olduğu için kırılma, zayıf olan çimento hamuru-agrega arayüzeyinden oluşmaktadır. Hafif betonda ise tersi bir durum söz konusudur. Çimento hamurunun mukavemeti ve elastiklik modülü hafif agreganınkilerden daha

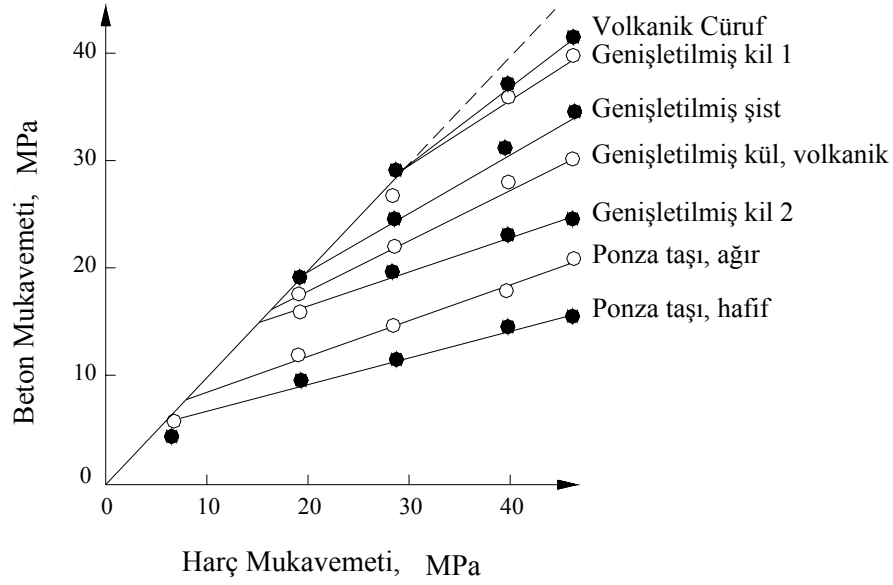
büyük olduğu için, hafif betonun kırılması da daha zayıf olan agregaların göçmesiyle oluşmaktadır. K. Newman ve J.B. Newman [29]'a göre tek eksenli basınç ve çekme durumlarında, beton içindeki normal ve hafif agregalarda oluşan kırılma çizgileri Şekil 2.11'de görülmektedir. Şekil 2.11'den anlaşılabacağı üzere, tek eksenli basınç ve çekmeye maruz kalındığında, kırılma çizgileri normal agregaların çevresinden dolaşırken, hafif agregaların içinden geçmektedir.

Basınç durumu için benzer bir değerlendirme Schulz [30] tarafından yapılmıştır. Şekil 2.12'de görülen Schulz'un çalışmasında, çok sayıda hafif agregası kullanarak bu tür betonların kritik mukavemetleri saptanmıştır.



Şekil 2.11: Tek eksenli çekme ve basınca maruz betonda agreganın normal veya hafif olması durumuna göre oluşan kırılma çizgilerinin görünüşü [29].

Şekil 2.12'de kritik mukavemetlerin üstünde hafif agregalı betonun mukavemeti için regresyon doğruları görülmektedir. Sınır mukavemetler 30 MPa'ın altındadır ve bu sürekli faz mukavemetine eşit beton mukavemetini göstermektedir. Bu şeklin incelenmesinden görüldüğü üzere, hafif beton mukavemetinin daima harç mukavemetinden düşük bulunacağı, harç mukavemetini daha da arttırmanın bir yararı olmayacağı, harç mukavemetini arttırmanın dayanıklı agregalarda faydalı olacağı açıktır.



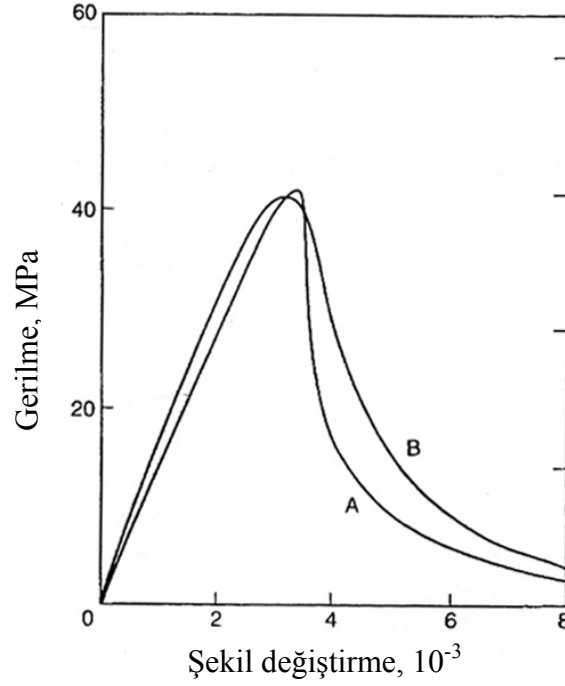
Şekil 2.12: Sürekli faz mukavemetinin fonksiyonu olarak hafif beton basınç mukavemeti [30].

Demirboğa ve çalışma arkadaşları [26], farklı karışımlarda hafif agregalar ile ürettikleri hafif agregalı betonların dayanımlarını incelemiş ve karışımdaki hafif agreganın oranı arttıkça hafif agregalı betonların dayanımlarının düştüğünü belirtmişlerdir.

Türkmen ve Kantarcı [31] hafif agreganın katkılı betonların dayanımlarını inceledikleri çalışmalarında, betona eklenen hafif agreganın miktarı arttıkça hafif agreganın katkılı betonların dayanımlarının azaldığını belirlemişlerdir.

Hafif agregalı betonların; gerilme altındaki şekil değiştirme davranışları normal betonlara oranla farklılıklar göstermektedir. Hafif agregalı betonların ve normal betonların gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 2.13'te görülmektedir.

Şekil 2.13'te görülen A eğrisi hafif betonların, B eğrisi ise normal betonların gerilme-şekil değiştirme eğrisini göstermektedir. Hafif agregalar ile çimento hamuru arasında iyi bir bağ oluşmasının bir etkisi olarak, betona herhangi bir yük uygulanması durumunda bağ mikroçatlakları geç oluşmaktadır. Bu sebeple betonun dayanabileceği son dayanım değerinin %90'ına kadar olan gerilmelerde, gerilme-şekil değiştirme eğrisi lineer bir şekil almaktadır [18].



Şekil 2.13: Hafif ve normal agregalı betonlar için gerilme-şekil değiştirme eğrisi [18].

Hafif agregaların yerlerinin normal agregalar ile değiştirildiği durumlarda ise gerilme-şekil değiştirme eğrisinin artan kısmının eğimi artmaktadır. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde gözlemlenen bu değişim, normal agregaların hafif agregalara oranla daha yüksek elastisite modülüne sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinin azalan kısmı incelendiğinde, tüm agregaların hafif olduğu durumlarda gerilme-şekil değiştirme eğrisinin azalan kısmında daha hızlı ve ani bir azalma olduğu görülmektedir. Hafif agregaların yerlerinin normal agregalar ile değiştirildiği durumlarda ise gerilme-şekil değiştirme eğrisinin azalan kısmında daha az dik azalma görülmektedir.

Normal betonlarda, çimento hamurunun elastisite modülü genel olarak agregatanelerinin elastisite modülünden daha düşük değerler almaktadır. Hafif agregalı betonlarda ise hafif agreganın elastisite modülü normal agregalardan daha düşük olduğu için, hafif agregat ve çimento hamurunun elastisite modülleri arasındaki fark daha düşük bir değer almaktadır. Hafif agregalı betonlarda agregat ile çimento hamurunun elastisite modülleri arasındaki düşük fark, iki malzeme arasında iyi bir bağ oluşmasını ve betonun iyi kompozit davranış göstermesini sağlamaktadır [18].

Zhang ve Gjorv [22]'ın yaptığı çalışmada, yüksek dayanıma sahip hafif betonların gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin artan kısmının orta dayanımlı betonlara oranla daha düz olduğu belirtilmektedir.

2.3.4. Hafif Betonların Diğer Özellikleri ve Bu Özellikleri Etkileyen Faktörler

Depreme dayanıklılık, su emme miktarı, ısı genleşme, ısı yalıtımı, yangına dayanıklılık, ses emme gibi özellikler hafif betonları normal betonlardan farklı kılan özelliklerdir. Hafif betonların sahip olduğu bu özellikler alt bölümlerde incelenmektedir.

2.3.4.1. Depreme Dayanıklılık

Aynı amaç için kullanılan birçok malzemeye göre hafif betonların düşük birim ağırlığa sahip olması yapının toplam ağırlığının azalmasına katkı sağlamakta ve deprem sırasında yapıya etki eden kuvvetleri azaltmaktadır. Deprem tasarım kuvvetinin azalması donatıda da azalma oluşmasını sağlamakta, böylece hafif betonlarla daha ekonomik çözümlere ulaşılmış olmaktadır [14].

Taşdemir [32], hafif betonun bir türü olan gazbetonlar üzerine yaptığı bir çalışmada genel olarak bölme duvarları gazbeton ile yapılmış yapıların depreme karşı iyi direnç gösterdiklerini belirtmektedir. Bu malzeme ile yapılan bölme duvarı yatay veya düşey yük taşıyıcı eleman olarak tasarlanmamasına rağmen, yapının taşıyıcı sisteminin deprem davranışına katkısı bulunmaktadır. Deprem hareketinin başlangıç aşamasında gazbeton duvar elemanları yatay yüklerin alınmasına, oluşturdukları yapısal rijitlikle katkı sağlamaktadır ve geçici bir süre için deprem sırasında düşey yükleri de taşıyabilmektedir. Bu hafif betonun kullanıldığı yapılarda daha üniform gerilme yayılışları elde edilmekte ve daha iyi bir deformasyon uyumu sağlanmaktadır.

2.3.4.2. Su Emme Miktarı

Hafif agregalar kullanılarak üretilen hafif betonların dikkat edilmesi gereken en önemli özelliklerinden biri artan su emme miktarıdır. Hafif agregalı betonlarda görülen artan su emme miktarı betonda kullanılan agreganın su emme özelliklerinden

etkilenmektedir. Yüksek gözenek hacmine sahip agregaların su absorblama özellikleri daha yüksektir.

Bu özellik doymamış veya kısmi olarak doymuş olan agregalarla üretilen taze betonların işlenebilirlik, birim ağırlık ve sertleşmiş betonların ise birim ağırlık, ısı yalıtımı ve donma direnci özelliklerini etkilemektedir [13].

Türkmen ve Kantarcı [31] hafif agregalı betonların kapilerite katsayısı ve porozitelerini inceledikleri çalışmalarında, betona eklenen hafif agregalı miktarı arttıkça hafif agregalı betonların kapilerite katsayısı ve porozitelerinin arttığını belirlemişlerdir.

2.3.4.3. Isıl Genleşme

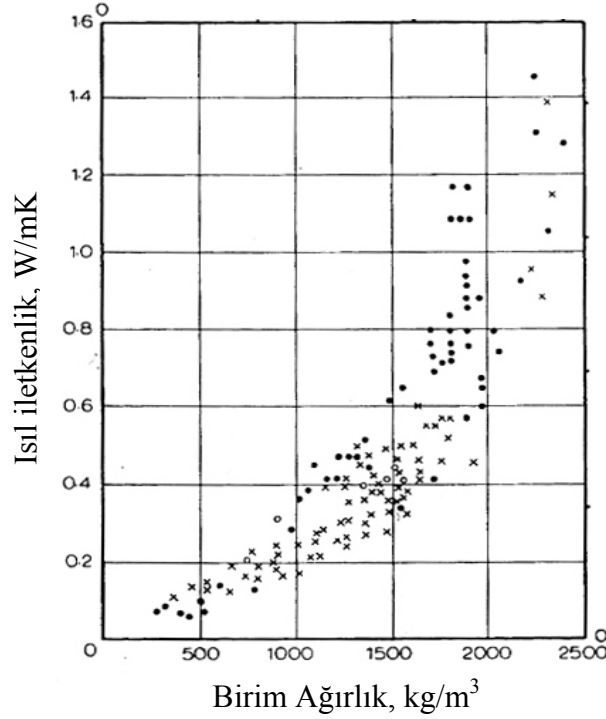
Hafif agregalı betonlar, normal betonlara oranla daha düşük ısı genleşme katsayısına sahiptirler [13]. Hafif betonda ısı genleşme katsayısı agregalı çeşidine ve katılan doğal kum miktarına bağlı olarak normal betonun yaklaşık 80%'i kadar olup 7×10^{-6} ~ 11×10^{-6} (m/mK) arasında değiştiği kaydedilmektedir [33]. Hafif ve normal agregaların farklı ısı genleşme özelliklerinden dolayı her iki agregalı tipinin beraber kullanılması durumunda bazı sorunlarla karşılaşılabilir [18].

2.3.4.4. Isı Yalıtımı

Yapısal hafif agregaların hücreli yapılarında bulunan hava, bu agregaların doğal agregalara oranla daha düşük ısı iletkenliğine sahip olmalarını sağlamaktadır [13]. Sıradan betonun ısı iletkenliği betonun doygun olduğu durumda, beton karışımına bağlı olarak 1,4 ila 3,6 W/mK arasında değişmektedir. Betonun birim ağırlığı ısı iletkenliğini tam olarak etkilememesine rağmen, havanın düşük ısı iletimine bağlı olarak, hafif betonun ısı iletkenliği birim ağırlığı ile değişmektedir.

Hafif betonun ısı yalıtım özellikleri hafif betonun birim ağırlığının yanısıra hafif beton yapımında kullanılan hafif agregalı cinslerine bağlı olarak değişmektedir.

Şekil 2.14'te farklı tip hafif agregalar ile üretilen hafif betonların ısı iletkenliklerinin birim ağırlıkları ile değişimi görülmektedir [18].



Şekil 2.14: Farklı tip hafif agregalar ile üretilen hafif betonların ısı iletkenliğinin birim ağırlıkları ile değişimi [18].

Beton tarafından absorblanan nem, betonun ısı iletkenliğini arttırmaktadır. Havanın iletkenliği suyun iletkenliğinden daha düşük olduğu için betonun suya doygunluğunun derecesi, betonun ısı iletkenliğini etkilemektedir.

Steiger ve Hurd [34] çalışmalarında, hafif betonların nem içeriğindeki %1’lik artışın ısı iletkenliklerini %5 oranında artırdığını belirtmişlerdir. Diğer yandan suyun iletkenliği hidratasyona uğramış çimento pastasının iletkenliğinin yarısından daha az olduğu için karışımın içindeki su oranı azaldıkça sertleşmiş betonun iletkenliği artmaktadır.

Yapılarda ısı iletkenliği düşük hafif betonların kullanılmasıyla dış ortama kaybedilen ısı miktarı azalmaktadır [18]. Hafif betonların ısı iletim özelliklerinin incelendiği çalışmalarda, betonun birim ağırlığı azaldıkça ısı iletkenliklerinin de azaldığı yapılan deney sonuçlarından görülmektedir.

Demirboğa ve Gül [35]’ün çalışmalarında hafif agregalı betonların içindeki hafif agrega oranı arttıkça birim ağırlıkları ve ısı iletkenliklerinin azaldığı belirtilmektedir.

2.3.4.5. Yangına Dayanıklılık

Hafif beton yapılarının yangına dayanıklılığı, ısı yalıtımının daha fazla ve ısı genleşmelerin daha az olması nedeniyle normal betonunkinden daha iyidir. Hafif betonların belirli bir yangın yüküne dayanma süresi normal betona göre %20 ~ %30 daha uzun olmaktadır [14].

2.3.4.6. Ses Emme

Hafif betonun ses emme özelliğinin havadaki ses enerjisinin betonun çok küçük kanallarında ısıya dönüştürülmesi nedeniyle iyi olduğu belirlenmiş, dolayısıyla ses emme katsayısının normal betona oranla yaklaşık iki kat fazla olduğu belirtilmiştir. Betonun birim ağırlığı azaldıkça ses yutuculuğu iyileşmektedir [14].

2.4. Literatür Araştırması

Bu bölümde; hafif agregalı betonlar ve perlit katkılı hafif betonlar başlıkları altında yapılan kaynak taraması sonuçlarından seçilen araştırmalar özetlenmektedir.

Jamal ve çalışma arkadaşları [4]'nin yaptıkları çalışmada farklı hafif agregalı betonların ağırlıkları azaltma, yanal yüklere direnç, işlenebilirlik, dikey yüklere direnç, yangın direnci, ısı yalıtımı, su emme oranı ve ses izolasyonu özellikleri incelenmekte ve birbirleri ile kıyaslanmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda perlit katkılı betonların; yanal ve dikey yüklere direnç konusunda düşük performans göstermelerine rağmen yapıdaki ölü yüklerin azaltılması, yangın direnci, ısı yalıtımı ve ses izolasyonu konusunda diğer hafif agregalı betonlara göre daha iyi performans gösterdikleri belirlenmiştir.

Taşdemir [25], normal betonun agrega granülometrisinin çeşitli bölümlerini hafif agregalarla değiştirerek karışımların elastisite modüllerinin modeller yardımı ile hesaplanabileceğini, aynı birim ağırlık için ortalama hafif agrega boyutu arttıkça, basınç mukavemetinin azaldığını göstermiştir. Aynı şekilde normal agrega ile değiştirilen hafif agreganın boyutu arttıkça hafif beton gevrek kırılmakta, tokluğu azalmakta, nihai basınç birim kısılması yine azalma göstermektedir. Böylece aynı sürekli granülometriye ve birim ağırlığa sahip betonlar içinde ince bölümü hafif agrega olan betonlar mekanik özellikler bakımından daha iyi sonuç vermektedir.

Demirboğa ve çalışma arkadaşları [26]'nın yaptıkları çalışmada genleşmiş perlit ve ponza agregaları ile hazırlanmış farklı karışımlardaki betonların basınç dayanımları incelenmektedir. Yapılan çalışma sonucunda agrega karışımındaki perlit miktarı arttıkça basınç dayanımının azaldığı gözlenmiştir.

Demirboğa ve Gül [36]'ün çalışmasında farklı oranlarda bağlayıcı karışımları içeren perlitli hafif betonların ısı iletkenliği incelenmektedir. Yapılan deneyler sonucunda 522 kg/m^3 birim ağırlığa sahip perlitli hafif betonun ısı iletkenliği, 0.1797 W/mK bulunmuştur.

Demirboğa ve Gül'ün [35]'in bir başka çalışmasında farklı oranlarda genleştirilmiş perlit ve ponza agregası içeren hafif betonların ısı iletkenlikleri incelenmektedir. Hafif betonların üretiminde kullanılan toplam agrega içindeki genleştirilmiş perlit oranı artıp, ponza oranı azaldıkça hafif betonların ısı iletkenliğinin azaldığı belirlenmiştir.

Tablo 2.15'te ise çeşitli hafif agregalarla yapılmış hafif betonların basınç dayanım ve birim ağırlık aralıkları verilmektedir.

Tablo 2.15: Farklı hafif betonların özellikleri [37].

Hafif Betonun Türü	Agreganın Türü	Agreganın birim hacim ağırlığı, kg/m^3	28.günde beton basınç dayanımı, MPa	Betonun birim ağırlığı, kg/m^3
Gaz ve köpük beton	---	---	1,4-4,8	400-600
Kısmen Sıkıştırılmış Beton	Genişletilmiş vermikülit ve perlit	64-240	0,5-3,4	400-1120
	Ponza taşı	480-880	1,4-3,8	720-1120
	Genişletilmiş cüruf	480-960	1,4-5,5	960-1520
	Sinterlenmiş uçucu kül	640-960	2,8-6,9	1120-1280
	Genişletilmiş kil veya şist	560-1040	5,5-8,3	960-1200
	Klinker	720-1040	2,1-6,9	720-1520
Kumsuz beton	Doğal agrega	1360-1600	4,1-13,8	1600-1920

	Hafif agrega	480-1040	2,6-6,9	880-1200
Taşıyıcı hafif Agregalı beton	Genişletilmiş cüruf	480-960	10,3-41,4	1680-2080
	Sinterlenmiş uçucu kül	640-960	13,8-41,4	1360-1740
	Genişletilmiş kil ve şist	560-1040	13,8-41,4	1360-1840

Tablo 2.16’da perlit, strofor, ponza taşı ve gaz betonun mekanik özellikleri karşılaştırılmaktadır. Gaz beton dışındakilerin mekanik özellikleri üretimi izleyen 56. günde belirlenmiştir.

Tablo 2.16: Hafif betonların mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [38].

Hafif Beton Türü	Elastisite Modülü, MPa	Basınç Dayanımı, MPa	Hava Kuru Birim Ağırlık, kg/m ³	Fırın Kuru Birim Ağırlık, kg/m ³	Ortalama Rutubet İçeriği, Ağırlık %’si
Perlit	2180	2,45	780	660	18,2
Strofor	2060	2,25	850	810	4,9
Ponza taşı	3530	4,60	820	755	8,6
Gazbeton	2400	4,00	740	705	4,0

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışma bölümünde ilk olarak perlit katkılı hafif beton üretiminde kullanılan malzemelerin tanımlanması yapılmakta, ardından beton karışımları için kabul edilen esaslar, bileşim hesaplamaları ve hafif betonların üretimi anlatılmaktadır. Deneysel çalışma bölümünde son olarak, üretilen hafif betonlara uygulanan deneyler ve deney sonuçları verilmektedir.

3.1. Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması

Perlit katkılı hafif beton üretiminde; agrega olarak doğal kum ve İzmir-Bergama yöresinden sağlanan genleştirilmiş perlit agregası, bağlayıcı olarak portland çimentosu, taze betonda istenilen işlenebilirliğin sağlanması ve su/çimento oranının azaltılması için akışkanlaştırıcı katkı maddesi ve hafif betondaki hava miktarının artırılması için hava sürükleyici katkı maddesi kullanılmıştır.

3.1.1. Agregalar

Beton üretiminde kullanılan kum ve genleştirilmiş perlit agregalarının granülometri deney sonuçları Tablo 3.1’de verilmektedir. Granülometrik bileşim TS 706 [39]’daki elek takımına göre belirlenmektedir.

Tablo 3.1: Doğal kum ve genleştirilmiş perlit agregalarının granülometrisi

Malzeme türü	Elekten Geçen %						
Elek Boyutu (mm)	16,0	8,0	4,0	2,0	1,0	0,5	0,25
Doğal Kum	100	100	100	96	82	54	18
Genleştirilmiş Perlit	100	100	100	54	31	20	16

Beton üretiminde en büyük tane boyutu (d_{max}) 4 mm olan doğal kum kullanılmıştır. Kum üzerinde TS EN 1744 [40]'e uygun olarak yapılan deney sonucunda kumda organik madde bulunmadığı, TS 3527 [41]'e uygun olarak yapılan deney sonucunda ise ağırlıkça %0.5 oranında çamurlu madde bulunduğu saptanmıştır.

Genleştirilmiş perlit ise, elek boyutu 2 mm olan elek ile elenmiştir ve hafif beton üretiminde 2-4 mm arasında tane boyutuna sahip genleştirilmiş perlit kullanılmıştır. Bu sebeple, genleştirilmiş perlit agregasının özgül ağırlık, gevşek birim ağırlık ve su emme oranı değerlerinin belirlenmesinde boyutları 2-4 mm arasında değişen genleşmiş perlit agregaları kullanılmıştır.

TS 3529 [42] ve TS EN 1097-6 [43] standartları kullanılarak hesaplanan kum ve genleştirilmiş perlit özgül ağırlık, gevşek birim ağırlık ve su emme oranları Tablo 3.2' de verilmektedir.

Tablo 3.2: Kum ve genleştirilmiş perlit agregalarının özgül ağırlık, gevşek birim ağırlık ve su emme oranları

Malzemeler	Özellikler	Yöntemler	Sonuçlar
Kum	Özgül Ağırlık (kg/m^3)	TS EN 1097-6	2620
	Gevşek Birim Ağırlık (kg/m^3)	TS 3529	1400
	Su Emme (%)	TS EN 1097-6	0,96
Genleştirilmiş Perlit	Özgül Ağırlık (kg/m^3)	TS EN 1097-6	140
	Gevşek Birim Ağırlık (kg/m^3)	TS 3529	54,4
	Su Emme (%)	TS EN 1097-6	313

Genleştirilmiş perlit agregaları kullanılarak hazırlanan beton karışımlarında agreganın yüksek su emme kapasitesi yüzünden etkin su/çimento oranının belirlenmesinde karşılaşılan problemlerin giderilmesi için karışıma eklenen su miktarı agreganın yarım saat zarfında emdiği su miktarı kadar arttırılmalıdır [44]. Genleşmiş perlit hafif agregalarının 30 dakika süresindeki su emme yüzdeleri TS EN 1097-6' ya göre % 214 olarak hesaplanmıştır.

3.1.2. Çimento Özellikleri

Tüm deneylerde PÇ 42.5 cinsi Portland çimentosu kullanılmıştır. Piknometre ile yapılan üç ölçümün sonucu çimentonun özgül ağırlığı 3125 kg/m^3 olarak bulunmuştur. Kullanılan portland çimentosunun, üretici firma tarafından belirlenen fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.3'te ve Tablo 3.4'de verilmektedir.

Tablo 3.3: Kullanılan portland çimentosunun fiziksel özellikleri

Blaine özgül yüzeyi (cm^2/g)	3270
90 μ 'luk elekte kalan %	6,3
200 μ 'luk elekte kalan %	0,21
Özgül ağırlık (kg/m^3)	3125
Priz başlangıcı	1 saat 45 dakika
Priz sonu	3 saat 45 dakika

Tablo 3.4: Kullanılan portland çimentosunun kimyasal özellikleri

SiO_2 (çözünen)	% 20,37
SiO_2 (çözünmeyen)	% 0,31
Al_2O_3	% 5,94
Fe_2O_3	% 3,49
CaO	% 63,92
MgO	% 1,29
SO_3	% 2,48
Kızdırma kaybı	% 1,39
Ölçülemeyen	% 0,81
Karmaşık Bileşikler:	
C_3S (trikalsiyum silikat)	% 47,33
C_2S (dikalsiyum silikat)	% 22,81
C_3A (trikalsiyum alüminat)	% 9,94
C_4AF (tetrakalsiyum alüminoferrit)	% 10,72

3.1.3. Kimyasal Katkılar

Perlit katkılı hafif beton üretiminde süper akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı maddeleri kullanılmıştır.

İşlenebilirliği sağlamak ve aynı zamanda ayrışmayı engellemek amacıyla iki seride çimento ağırlığının % 1,5'u kadar, bir seride ise çimento ağırlığının % 0,5'i oranında, yoğunluğu 1000 kg/m^3 olan YKS Glenium 51 marka polikarboksilik eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı/yeni nesil süper akışkanlaştırıcı beton katkı maddesi kullanılmıştır.

Birim ağırlığı düşürebilmek için beton üretiminde çimento ağırlığının yaklaşık %0,3'ü oranında yoğunluğu 1000 kg/m^3 olan Sika-Aer marka hava sürükleyici katkı maddesi kullanılmıştır.

3.2. Hafif Beton Karışımları Hazırlanması Ön Çalışmaları

Beton karışım hesabı ve üretimin yapılması çeşitli aşamalardan oluşmaktadır. İlk aşamada betonun ne amaçla kullanılacağı, betondan beklenen özellikler, betonun kullanılacağı yapının özellikleri, beton üretim, yerleştirme, taşınma ve yerleştirilme koşulları belirlenmektedir. Ardından, belirlenmiş bu özelliklere göre teorik beton bileşim hesabı yapılmaktadır. Yapılan bu teorik hesabın sonrasında, deneme üretimleri yapılarak önceki adımda yapılan kabullerin doğruluğu, örneğin istenen işlenebilmenin sağlanıp sağlanamadığı kontrol edilmektedir. Eğer gerekli ise bileşim hesabında gerekli düzeltmeler yapılarak yeni deneme üretimleri yapılmaktadır. Deneme üretimlerinde istenilen özellikler sağlandıktan sonra asıl üretimlere başlanmaktadır.

Hafif beton karışımlarına karar verilmesi aşamasında öncelikle kum ve genleştirilmiş perlit agregasının hacimce karışım oranlarına karar verilmiştir. Agregat karışım oranlarına karar verildikten sonra taze betondan istenilen düşük birim ağırlık ve işlenebilirlik özelliklerinin kazandırılması amacıyla karışım için en uygun su/çimento oranı, akışkanlaştırıcı katkı maddesi ve hava sürükleyici katkı maddesi miktarlarına karar verilmesi için deneme üretimler yapılmıştır. Yapılan deneme üretimlerinde akışkanlaştırıcı katkı maddesi ve hava sürükleyici katkı maddesinin kullanım

dozajları aralığında denemeler yapılarak su/çimento oranına karar verilmiştir. Su/çimento oranı belirlendikten sonra en uygun akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı maddesine karar verilmesi için denemelere devam edilmiştir. Deneme üretimler sonucunda istenilen birim ağırlık ve işlenebilirlik özelliklerine ulaştığımız en uygun su/çimento, akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı maddelerine karar verilmiştir.

3.2.1. Hafif Beton Üretimi İçin Kabul Edilen Esaslar

Bölüm 3.2’de anlatılan denemeler sonucunda üretilen tüm hafif betonların etkin su/çimento oranı 0,55 olarak belirlenmiştir. Üretilen hafif beton karışımlarında toplam agrega hacminin sırasıyla %0, %20, %40, %60, %80, %100 oranında genişmiş perlit ve toplam agrega hacminin sırasıyla %100, %80, %60, %40, %20, %0 oranında kum kullanılmıştır.

Bütün hafif beton karışımlarına çimento ağırlığının yaklaşık % 0,3’ü oranında hava sürükleyici katkı maddesi eklenmiştir. Ayrıca, istenilen kıvamın sağlanabilmesi amacıyla %0 ve %20 oranlarında geliştirilmiş perlit içeren karışımlarda çimento ağırlığının % 1,5 ve %40 perlit içeren karışımda ise çimento ağırlığının % 0,5 oranında akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. %60, %80 ve %100 perlit içeren karışımlarda ise geliştirilmiş perlitin yuvarlak ve düzgün yapısı sayesinde akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmadan istenilen taze beton kıvamına ulaşılabilmiştir.

Üretilen betonlar; NB normal beton, PB hafif beton, izleyen sayı ise toplam agrega hacmindeki yüzde perlit oranını gösterecek şekilde adlandırılmıştır.

NB	: %100 kum içeren normal beton
PB 20	: %20 genişmiş perlit, %80 kum içeren hafif beton
PB 40	: %40 genişmiş perlit, %60 kum içeren hafif beton
PB 60	: %60 genişmiş perlit, %40 kum içeren hafif beton
PB 80	: %80 genişmiş perlit, %20 kum içeren hafif beton
PB 100	: %100 genişmiş perlit içeren kumsuz hafif beton

3.2.2. Hafif Beton Üretimi İçin Bileşim Hesaplamaları

Beton bileşim hesapları mutlak hacim yöntemine göre yapılmıştır. NB, PB 20, PB 40, PB 60, PB 80, PB 100 serilerinde toplam agregâ hacminin sırasıyla %0, %20, %40, %60, %80, %100'ü oranında genişletilmiş perlit kullanılmıştır. Agregâ karışım oranları Tablo 3.5'te verilmektedir.

Tablo 3.5: Agregâ karışım oranları

Agregâ Tipi ve Özelliği	Karışım Oranı, Hac. %'si					
	NB	PB 20	PB 40	PB 60	PB 80	PB 100
Kum (0-4 mm)	100	80	60	40	20	-
Genleşmiş Perlit (2-4 mm)	-	20	40	60	80	100
Toplam	100	100	100	100	100	100

Karışımında kullanılacak genişleşmiş perlit ağırlığının hesaplanmasında hava kuru tane birim hacim ağırlığı kullanılmıştır.

Beton bileşimi, (3.1), (3.2) ve (3.3) bağıntıları kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V_a = 1 - \left(\frac{C}{\delta_c} + \frac{W}{\delta_s} + h + k \right) \quad (3.1)$$

$$W = (E / C) \times C \quad (3.2)$$

$$G_i = V_a \times P_i \times \delta_i \quad (3.3)$$

V_a : 1m³ yerleşmiş betondaki toplam agregâ hacmi, m³

C : 1m³ yerleşmiş betondaki çimentonun ağırlığı, kg

W : 1m³ yerleşmiş betondaki suyun ağırlığı, kg

h : 1m³ yerleşmiş betondaki hava hacmi, m³

k : 1m³ yerleşmiş betondaki katkı maddesi hacmi, m³

δ_c : Çimentonun özgül ağırlığı, kg/m³

δ_s : Suyun özgül ağırlığı, kg/m³

E / C : Etkin su/çimento oranı

δ_i : (i) agregâsının özgül ağırlığı, kg/m³

P_i : (i) agregasının hacimce karışım yüzdesi

G_i : (i) agregasının ağırlığı, kg

3.2.3. Hafif Betonun Üretimi, Yerleştirilmesi ve Saklanması

Betonlar düşey eksenli zorlamalı karıştırılmalı 50 lt kapasiteli küçük bir betonyer ile üretilmiştir. Beton karışımlarına eklenmeden önce hafif agregalara, yarım saatlik ön su emdirme uygulanmıştır. Böylelikle etkin su/çimento oranının istenilen değeri alması sağlanmıştır.

Belirlenen karışımlarla her seride elastisite modüllerinin bulunması için 10x20 cm boyutlarında 3'er adet silindir numune, basınç dayanımlarının bulunması 7x7x7 cm boyutlarında 3'er adet küp numune, kılcallık deneylerinin yapılabilmesi için 7x7x28 cm boyutlarında 2'şer adet prizma numune üretilmiştir. Kalıpların düzgün bir şekilde dolmasını sağlamak için karışımlar ikişer tabaka halinde dökülüp, sarsma tablasında vibrasyona tabi tutulmuştur. Ayrıca bu karışımlarla her seride ısı iletkenliklerinin bulunması için 4'er adet 11,28 cm çapında ve 1 cm kalınlığında numuneler üretilmiştir.

Üretilen numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkarılarak 28 gün boyunca $22\pm3^{\circ}\text{C}$ 'deki kirece doymuş su içinde saklanmıştır.

Üretilen betonların gerçek bileşimleri ve taze beton özellikleri Tablo 3.6'da verilmektedir.

Tablo 3.6'nın oluşturulması aşamasında, öncelikle Bölüm 3.2.2'de belirtilen bağıntılar kullanılarak teorik malzeme miktarları ve teorik taze beton birim ağırlıkları hesaplanmıştır. Farklı oranlarda genleştirilmiş perlit içeriğine sahip karışımlar, Bölüm 3.2.2'de belirtildiği şekilde hesaplanan teorik malzeme miktarlarına göre üretilmiş ve her üretim sonunda taze betonların gerçek birim ağırlıkları belirlenmiştir. Belirlenen gerçek taze beton birim ağırlıkları ile daha önceden hesaplanmış olan teorik taze beton birim ağırlıklarının birbirlerine oranlanması ile elde edilen katsayının, teorik malzeme miktarları ile çarpılması sonucu Tablo 3.6'da verilmekte olan gerçek malzeme miktarlarına ulaşılmıştır. Beton içindeki gerçek malzeme miktarları ve malzemelerin özgül ağırlıkları kullanılarak, malzemelerin

hacimlerine ulaşılmıştır. Beton içindeki hava miktarı; 1 m³'lük beton hacminden, toplam malzeme hacminin çıkartılması ile hesaplanmıştır.

Tablo 3.6: Beton karışımlarındaki gerçek malzeme miktarları

Beton Kodu	1m ³ betondaki gerçek malzeme miktarları ve taze beton özellikleri									
	Çimento (kg)	Su (kg)	Su/Çimento oranı	Kum 0-4 mm (kg)	Hafif Agrega 2-4 mm (kg)	Ön Emdirme Suyu (kg)	Süper Akışkanlaştırıcı Katkı (kg)	Hava Sürükleyici Katkı (kg)	Hava %	Taze Beton Birim Ağırlığı (kg/m ³)
NB	317	175	0,55	1517	-	-	5	1	13,8	2014
PB 20	337	185	0,55	1288	17	37	5	1	8,6	1870
PB 40	326	179	0,55	937	33	71	1,5	1	11,8	1548
PB 60	301	166	0,55	581	47	100	-	1	18,3	1194
PB 80	297	163	0,55	286	61	131	-	1	19,5	938
PB 100	295	162	0,55	-	76	162	-	1	20	696

3.3. Hafif Betonlara Uygulanan Deneyler

Hafif betonlara, üretildikleri anda taze beton birim ağırlığı belirleme deneyi yapılmıştır. 28 gün kirece doymun suda bekletilen sertleşmiş betonlara ise mekanik deneyler, ısı iletkenliği belirleme deneyi, su emme oranı deneyi ve kılcallık katsayısı belirleme deneyi uygulanmıştır.

3.3.1. Taze Beton Birim Ağırlığı Belirleme Deneyi

Taze betonlar üzerinde taze birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Taze birim ağırlığın bulunmasında darası 5,5 kg olan 8 litre hacime sahip silindirik şekilli standart ölçü kabı kullanılmıştır. Taze beton ölçü kabına kıvama göre üç defada şişlemeye ya da sarsma tablasında vibrasyona tabi tutularak doldurulmuş ve üst yüzü çelik masterla düzeltilmiştir. Kabın etrafı silindikten ve yapışan harç parçaları temizlendikten sonra terazide tartılmış ve TS 2941 [45]'e göre taze beton birim ağırlıkları hesaplanmıştır. Üretilen perlit katkı hafif betonların taze beton birim ağırlıkları Tablo 3.6'da görölmektedir.

3.3.2. Mekanik Deneyler

Farklı birim ağırlıklarda üretilen ve 28 gün boyunca kirece doymun suda bekletilen hafif betonlara, hava kuru birim ağırlıklığına ulaşmalarının ardından, mekanik deneyler yapılmıştır. Mekanik deneyler uygulanan numunelerin, hava kuru birim ağırlıkları Tablo 3.7'de belirtilemektedir.

Tablo 3.7: Sertleşmiş beton hava kuru birim ağırlıkları

Beton Kodları	NB	PB 20	PB 40	PB 60	PB 80	PB 100
Hava kuru birim ağırlıkları, kg/m ³	1937	1775	1402	980	673	392

Küp ve silindir basınç deneylerinden oluşan mekanik deneyler, TS EN 206-1 [27]'e uygun şekilde yapılmıştır.

3.3.2.1. Küp Basınç Dayanımı Deneyi

Bu çalışmada, her seriye ait 70 x 70 x 70 mm boyutlarındaki 3 adet küp numune kullanılarak basınç deneyleri yapılmıştır. Küp basınç dayanımı deneylerinde 1000 kN kapasiteli basınç presine yerleştirilen küp numuneler üzerine sabit hızla tek eksenli basınç yükleri uygulanmıştır. Numunelerin kırıldığı anda ulaşılan en büyük yük, göstergeden okunmuştur. Okunan yükün, numunenin basınç uygulandığı kesit alanına bölünmesiyle küp basınç dayanımları hesaplanmıştır. Yapılan deney sonucunda elde edilen küp basınç dayanımı değerleri Tablo 3.8’de verilmektedir.

Tablo 3.8: Sertleşmiş beton küp basınç dayanımı değerleri

Beton Kodları	NB	PB 20	PB 40	PB 60	PB 80	PB 100
Küp Basınç Dayanımı, MPa	28,8	17,3	10,9	4,6	1	0,07

3.3.2.2. Silindir Basınç Dayanımı Deneyi

Bu çalışmada, her seriye ait 100 mm çapında, 200 mm yüksekliğinde 3 adet silindir numuneye sabit hızlı kısa süreli tek eksenli basınç yükleri uygulanmıştır. Basınç deneyi için 1000 kN kapasiteli Amsler marka pres kullanılmıştır. Basınç deney düzeneği Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1: Silindir basınç dayanımı ve eksenel şekil değiştirme deney düzeneği

Numunelerin elastisite modüllerinin hesaplanmasında küp basınç dayanımı deneyinin sonuçlarından yararlanılmıştır. Küp basınç dayanımı değerleri ve silindir numunelerin kesit alanı kullanılarak, silindir numunelerin sahip olabileceği muhtemel silindir basınç dayanımı hesaplanmaktadır. Muhtemel basınç dayanımının, üçte birine kadar sabit hızla artan yükün, numunelere uygulanmasıyla eksenel şekil değişimleri gözlenmektedir. Eksenel şekil değiştirmeler, şekil değiştirme ölçüm çerçevesi yardımıyla okunmuştur. Boyuna doğrultudaki şekil değiştirmeler ile yükün okunması aynı anda yapılmıştır. Numunelere uygulanan yük ve okunan şekil değiştirme değerleri, gerilme-şekil değiştirme eğrisinin çiziminde kullanılmıştır. Numunelerin şekil değiştirmelerinin belirlenmesinin ardından şekil değiştirme ölçüm çerçevesi çıkartılmış ve gerçek silindir basınç dayanımları, küp basınç dayanımı deneyinde izlenilen yöntem uygulanarak hesaplanmıştır. Hesaplanan gerçek silindir basınç dayanımının 1/3'lük değerine kadar uygulanan yüklere denk gelen, gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) verileri kullanılarak çizilen eğrinin eğimden numunelerin elastisite modülleri hesaplanmıştır. Elde edilen silindir basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri Tablo 3.9'da görülmektedir.

Tablo 3.9: Sertleşmiş beton silindir basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri

Beton Kodları	NB	PB 20	PB 40	PB 60	PB 80	PB 100
Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	22,1	13,0	9,6	3,8	-	-
Elastisite Modülü (GPa)	19,5	12,8	9,4	3,3	-	-

3.3.3. Isıl İletkenlik Deneyi

Isıl iletkenliklerin belirlenmesi deneyleri yapılmadan önce yaklaşık 113 mm çapında ve 10 mm kalınlığındaki numuneler TS 3649 [46]'da belirtildiği şekilde 105°C ± 5°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat ara ile yapılan ardışık tartımlarda elde edilen ağırlık farkı %1 veya daha az oluncaya kadar kurutulmuştur. Isıl iletkenlik deneyinde kullanılan numunelerin 105 °C'de fırın kuru birim ağırlıkları Tablo 3.10'da görülmektedir.

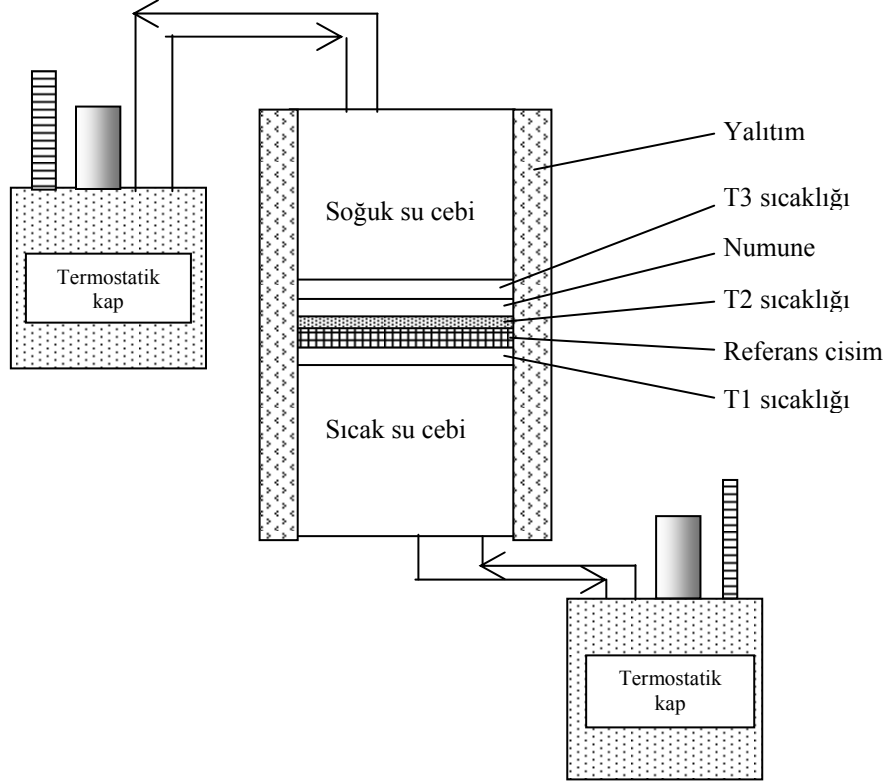
Tablo 3.10: Isıl iletkenlik deneyinde kullanılan numunelerin fırın kuru birim ağırlıkları

Beton Kodları	NB	PB 20	PB 40	PB 60	PB 80	PB 100
Fırın kuru birim ağırlıkları, kg/m ³	1833	1677	1316	909	613	354

Numunelerin ısı iletkenlikleri mukayese yöntemi ile ölçülmüştür. Bu yöntemde ısı iletkenliği bilinen bir referans cisim kullanılmaktadır. Deney sırasında bir yönlü ısı iletimi sağlanarak üst üste yerleştirilmiş referans cisim ve numuneden aynı miktar ısı enerjisinin iletimi sağlanmıştır. Numuneden geçen ısı enerjisinin miktarı, ısı iletkenliği ve kalınlığı bilinen referans cisim yardımı ile hesaplanmaktadır. Referans cisim ve numunelerin ısı geçiş alanları 100 cm² (çap 11,3 cm)'dir. Referans cismin kalınlığı 1 cm, ısı iletkenliği 1,102 W/mK değerindedir. Isı iletkenliği belirlenecek olan numunelerin kalınlıkları deneyden önce ölçülerek tespit edilmiştir.

Referans cismin ve numune yüzey sıcaklıklarını ölçmek için alt ve üstlerine yerleştirilen 100 cm² ısı geçiş alanına sahip disklerden yararlanılmıştır. Bakır disklerin merkezlerine termoeleman yerleştirilerek sıcaklıklar ölçülmüştür. Isı kaynağı olarak sıcak su cebi, ısı kuyusu olarak soğuk su cebi oluşturulmuştur. Her iki su cebinde termostatik kaplarla elde edilen sabit sıcaklıktaki su sürekli olarak dolaştırılmıştır. Numunelerin ısı iletkenliğinin tayin edilmesini sağlayan deney düzeneği Şekil 3.2'de görülmektedir.

Şekil 3.2'de görüldüğü gibi, deney sistemi alttan üste doğru; sıcak su cebi, referans cisim alt yüzey sıcaklığı ölçme bakır disk, referans cisim, referans cisim ve numune ara yüzey sıcaklığı ölçme bakır disk, numune, numune üst yüzey sıcaklığı ölçme bakır disk, soğuk su cebinden oluşmaktadır. Sadece düşey yönde sıcak su cebinden soğuk su cebine ısı geçişi sağlanması amacıyla deney düzeneğinin dış yüzeyi yalıtılmıştır.



Şekil 3.2: Isıl iletkenlik deney düzeneği

Su ceplerine gönderilen su sıcaklıkları termostatik kaplar üzerindeki kontrol sistemiyle ayarlanmış ve deney sırasında su sıcaklıklarının sabit kalması sağlanmıştır. Deney, su ceplerinden suyun dolaştırılması ile başlatılmıştır. Zamana göre referans cisim ve numunelerin; alt ve üst yüzey sıcaklıkları kaydedilmiş, sıcaklıklar sabitlendiğinde deney sona erdirilmiştir. Referans cisim ve numunelerden ısı geçiş miktarı, Fourier kanunu [47] kullanılarak hesaplanmıştır. Numunenin ısı iletkenliğinin belirlenmesinde, referans cisim ile numunenin üzerinden geçen ısı miktarları birbirine eşitlenmektedir.

Referans cisimden ısı geçiş miktarı:

$$Q_r = \frac{\lambda_r}{l_r} A(T_1 - T_2) \quad (3.4)$$

Numuneden ısı geçiş miktarı:

$$Q_n = \frac{\lambda_n}{l_n} A(T_2 - T_3) \quad (3.5)$$

$Q_r = Q_n$ olduğuna göre,

$$\frac{\lambda_r}{l_r} A(T_1 - T_2) = \frac{\lambda_n}{l_n} A(T_2 - T_3) \quad (3.6)$$

yazılır.

Burada,

Q : Isıtıcıya beslenen elektrik gücü, Watt

T : Yüzey sıcaklığı, K

λ_r : Referans cismin ısı iletkenliği, W/mK

λ_n : Numunenin ısı iletkenliği, W/mK

l_r : Referans cismin kalınlığı, m

l_n : Numunenin kalınlığı, m

A : Referans cisim ve numunenin alanı, m²

(3.6) bağıntısı kullanılarak hesaplanan ısı iletkenlik değerleri Tablo 3.11’de görölmektedir.

Tablo 3.11: Sertleşmiş beton ısı iletkenlik değerleri

Beton Kodları	NB	PB 20	PB 40	PB 60	PB 80	PB 100
Isı iletkenlik (λ), W/mK	0,60	0,57	0,53	0,35	0,21	0,13

3.3.4. Su Emme Deneyi

Sertleşmiş betonun su emme oranı tayini TS 3624 [48]’e göre yapılmıştır. TS 3624’e göre belirlenen etüv kurusu ağırlıkları ve suya doygun ağırlıkları kullanılarak (3.7) bağıntısı ile sertleşmiş betonların su emme oranları hesaplanmıştır.

$$M = \frac{(D - B)}{B} * 100 \% \quad (3.7)$$

B : Sertleşmiş beton numunesinin etüv kurusu ağırlığı, kg

D : Sertleşmiş beton numunesinin suya doygun ağırlığı, kg

M : Sertleşmiş beton numunesinin ağırlıkça su emme oranı, %

Su emme oranları belirlenmesi deneyinde kullanılan numunelerin fırın kuru birim ağırlıkları Tablo 3.12’de verilmektedir.

Tablo 3.12: Su emme oranlarının belirlenmesi deneyinde kullanılan numunelerin fırın kuru birim ağırlıkları

Beton Kodları	NB	PB 20	PB 40	PB 60	PB 80	PB 100
Fırın kuru birim ağırlıkları, kg/m ³	1853	1693	1330	923	625	363

(3.7) bağıntısı kullanılarak hesaplanan su emme oranları Tablo 3.13’te görülmektedir.

Tablo 3.13: Sertleşmiş beton su emme oranları

Beton Kodları	NB	PB 20	PB 40	PB 60	PB 80	PB 100
Su Emme Oranı, %	6,4	9,8	13,3	19,8	33,9	79,3

3.3.5. Kılcallık Deneyi

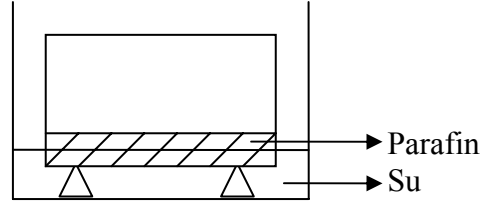
Beton yüzeyinin alt yüzünün bir sıvı veya pratikte en çok su ile temas etmesi halinde suyun cismin içinde yükselmesi kılcallık olayı şeklinde tanımlanmaktadır [44]. Bir yüzü su ile temas eden bir cismin (t) süresinde kılcallık yolu ile birim alandan emdiği su miktarı (m) ile su emme süresi (t) arasındaki bağlantı;

$$m = K\sqrt{t} \quad (3.8)$$

formülü ile kurulabilmektedir.

Bu bağlantıda yer alan K kılcallık katsayısını etkileyen faktörlerin belirtilmesi güç ve hatta buna pek olanak bulunmadığından bu katsayı, deneylere genellikle iyi bir uyum gösteren (3.8) ifadesi uygulanarak, doğrudan doğruya deney sonuçlarından itibaren bulunmaktadır [44].

Farklı birim ağırlıklardaki sabit ağırlığa gelinceye kadar fırında kurutulmasının ardından numunelerin tek tarafına su değecek şekilde parafin sürülmüş ve Şekil 3.3’de görüldüğü gibi numunelerin su emme miktarı belirlenmiştir.



Şekil 3.3: Kılcallık katsayısı belirleme deney düzeneği

Kılcallık katsayısının belirlenmesi deneyinde kullanılan numunelerin fırın kuru birim ağırlıkları Tablo 3.12’de verilmektedir.

Tek taraftan su emmesi sağlanan beton numunelerin ağırlıklarının belirli aralıklarla ölçülmesi sonucu betonların su emme miktarı belirlenmiş ve (3.8) ile belirtilen bağıntı kullanılarak kılcallık katsayısı hesaplanmıştır [44]. Betonların kılcallık katsayısı deney sonuçları Tablo 3.14’te görülmektedir.

Tablo 3.14: Sertleşmiş beton kılcallık katsayısı değerleri

Beton Kodları	NB	PB 20	PB 40	PB 60	PB 80	PB 100
Kılcallık Katsayıları	0,120	0,178	0,188	0,216	0,251	0,413

Su emme ve kılcallık deney sonuçlarından görüldüğü gibi, perlit miktarı arttıkça hafif betonun su emmesi ve kılcallığı artmaktadır. Perlit agregası ve buna bağlı olarak perlit katkılı hafif betonların yüksek su tutma kapasiteleri bu malzemelerin dış ortama açık uygulamalarını engellemektedir. Bu engelin aşılabilmesi için hafif betonun bir yönden suya maruz kalacağı düşünülerek ticari iki farklı su izolasyon malzemesi kullanılarak hafif betonların kılcallık deneyleri tekrar edilmiştir. Deneylerde; Henkel Ceresit CR 68 ve YKS Masterseal 501 marka su izolasyon malzemeleri kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, su izolasyon malzemelerinin her ikisinin de uygulandığı hafif betonların su emme miktarının ihmal edilecek düzeyde olduğu saptanmıştır. Uygulanan su izolasyon malzemeleri

etkin olarak görev yaptığından, numunelerin zaman içinde su emme oranlarında değişim gözlenememiş ve dolayısıyla kılcallık katsayıları hesaplanamamıştır.

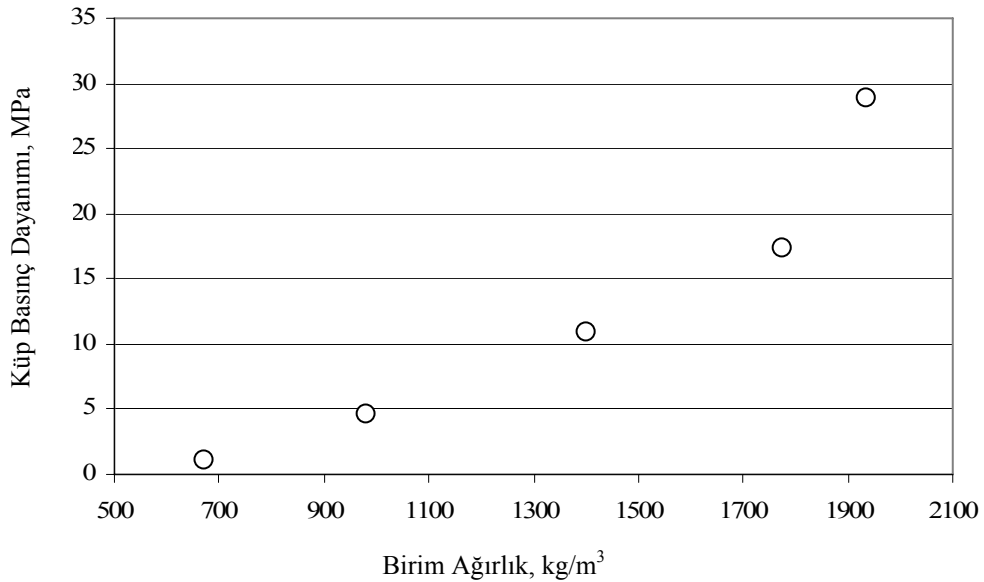
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, deney sonuçlarının irdelenmesi amacıyla;

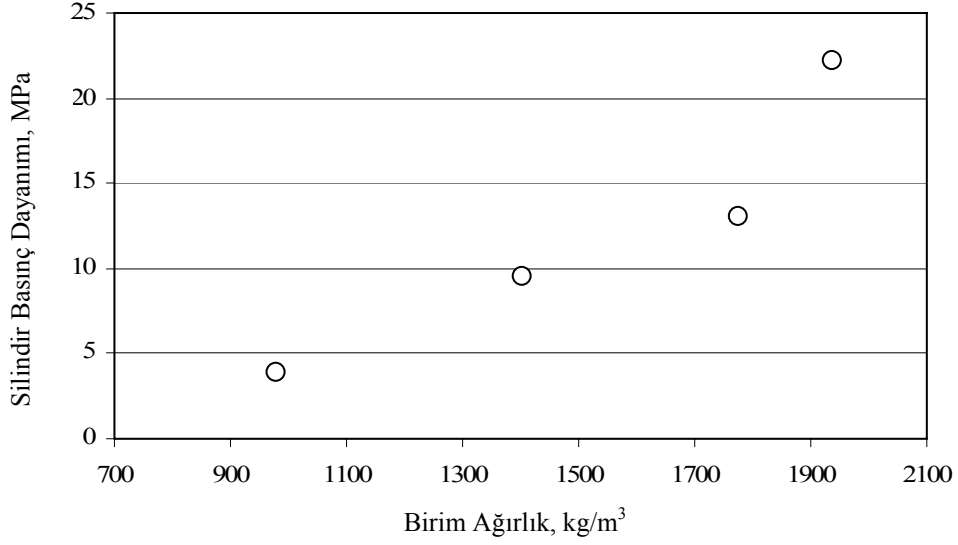
- Sertleşmiş betonlara uygulanan küp basınç, silindir basınç dayanımları ve elastisite modülü değerleriyle *hava kuru birim ağırlıkları* arasındaki ilişkiler,
- Isıl iletkenlikleri, su emme oranları ve kılcallık katsayıları ile deneyde kullanılan numunelerin *fırın kuru birim ağırlıkları* aralarındaki ilişkiler incelenmiştir.

4.1. Birim Ağırlık ile Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

Farklı birim ağırlıkta üretilen hafif betonlara uygulanan küp ve silindir basınç dayanımı değerleri ile birim ağırlıkları arasındaki ilişkiler Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.1: Perlit katkılı hafif betonların birim ağırlıkları ile küp basınç dayanımları arasındaki ilişki



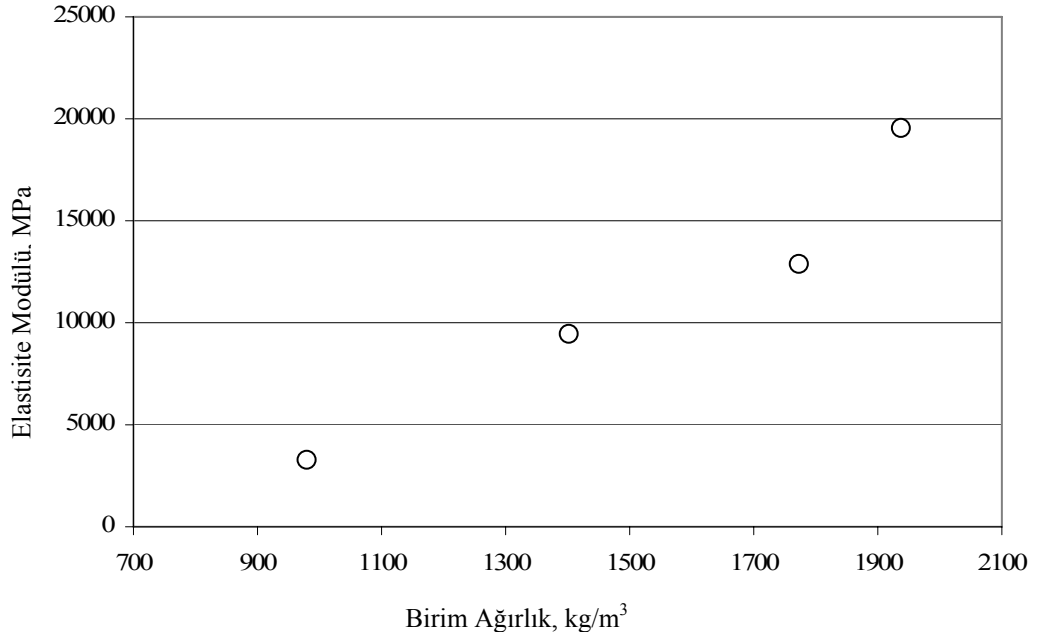
Şekil 4.2: Perlit katkılı hafif betonların birim ağırlıkları ile silindir basınç dayanımları arasındaki ilişki

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 incelendiğinde perlit katkılı hafif betonlarda perlit oranı ve buna bağlı olarak birim ağırlık düştükçe, küp ve silindir basınç dayanım değerlerinin düştüğü görülmektedir. Ayrıca, Şekil 4.1’de görüldüğü gibi PB 80 kodlu betonun küp basınç dayanım değeri çok küçüktür. Bu sebeple küp basınç dayanımı çok küçük olan PB 80 ve PB 100 kodlu betonların silindir basınç dayanım deneyleri yapılmamıştır. Farklı oranlarda genleşmiş perlit katılarak üretilen hafif betonların basınç dayanım özellikleri ve Tablo 2.13 incelendiğinde, PB 20, PB 40, PB 60, PB 80 kodlu hafif betonların, yalıtım ve yapısal/yalıtım betonları sınıfına girebilecek şekilde geniş dayanım aralığına sahip olduğu görülmektedir.

4.2. Birim Ağırlık ile Elastisite Modülü Arasındaki İlişki

Farklı birim ağırlıkta üretilen hafif betonların elastisite modülü değerleri ile birim ağırlıkları arasındaki ilişki Şekil 4.3’te görülmektedir.

Şekil 4.3’ten görüldüğü gibi, hafif betonların birim ağırlıkları azaldıkça elastisite modülleri azalmaktadır.



Şekil 4.3: Perlit katkılı hafif betonların birim ağırlıkları ile elastisite modülleri arasındaki ilişki

Bölüm 3.3.2.2’de belirtildiği gibi elastisite modülü değerleri, gerilme-şekil değiştirme eğrisinin eğiminden elde edilmektedir. Üretilen hafif betonların içindeki perlit miktarı arttıkça aynı gerilme altında gösterdikleri şekil değiştirme artmakta ve böylece gerilme-şekil değiştirme eğrisinin eğimi (elastisite modülü) azalmaktadır.

41 MPa’a kadar basınç dayanımına sahip hafif betonların elastisite modülünün teorik olarak hesaplanmasında;

$$E_c = 0,043 \times \Delta^{1,5} \times \sqrt{f_c} \quad (4.1)$$

bağıntısı kullanılabilmektedir [33].

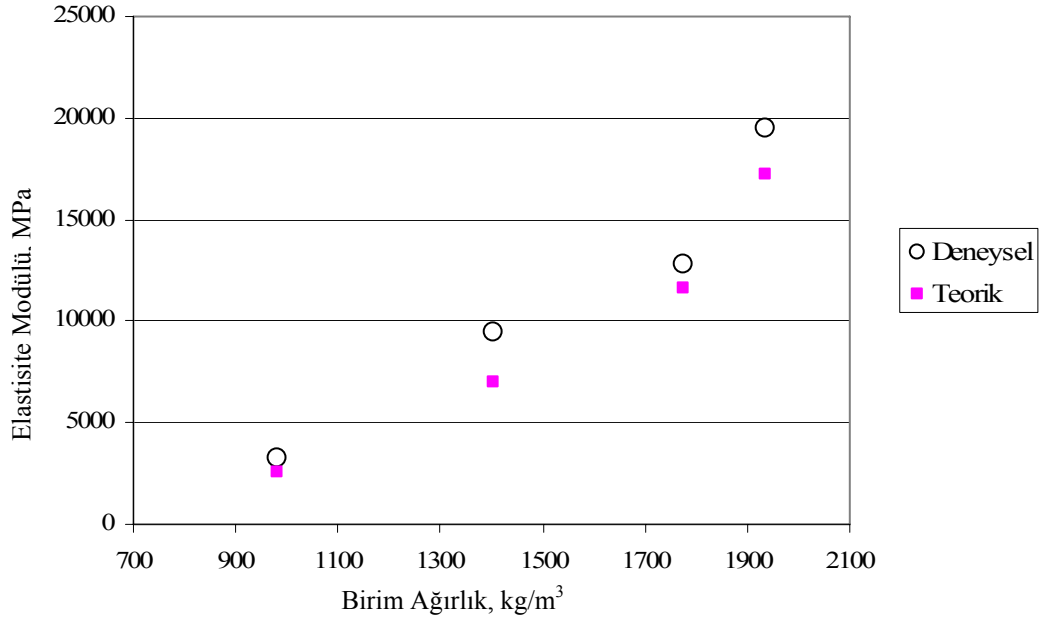
E_c : Elastisite modülü, MPa

Δ : Birim ağırlık, kg/m³

F_c : Silindir basınç dayanımı, MPa

Bu bağıntı kullanılarak elde edilen elastisite modülü değerlerinin deneysel olarak elde edilen elastisite modülü değerleriyle karşılaştırılması Şekil 4.4’te görülmektedir.

Şekil 4.4 incelendiğinde deneysel olarak elde edilen elastisite modülü değerleri ile (4.1) bağıntısıyla hesaplanan elastisite modülü değerlerinin birbirleriyle örtüştüğü görülmektedir.

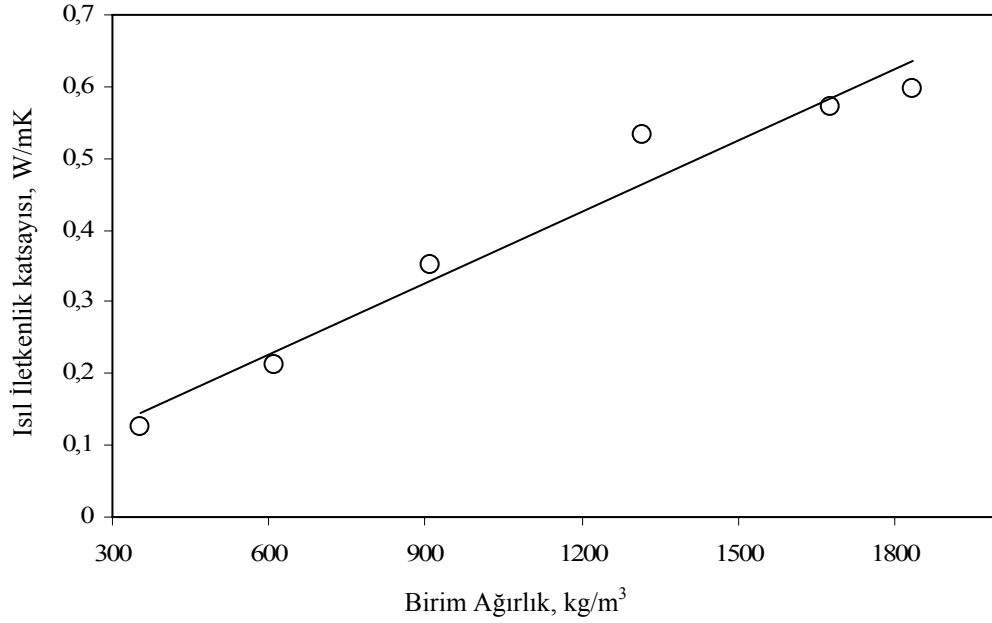


Şekil 4.4: Deneysel olarak ve teorik bağıntı ile bulunan perlit katkılı hafif betonların elastisite modülleri arasındaki ilişki

4.3. Birim Ağırlık ile Isıl İletkenlik Arasındaki İlişki

Farklı birim ağırlıkta üretilen perlit katkılı hafif beton numunelerinin ısı iletkenlik değerleri ile fırın kuru birim ağırlıkları arasındaki ilişki Şekil 4.5’te görülmektedir.

Şekil 4.5 incelendiğinde, genleşmiş perlit ile üretilen hafif betonların ısı iletkenlikleri ile birim ağırlıkları arasında doğrusal bir ilişki bulunduğu görülmektedir. Hafif betonların birim ağırlıkları azaldıkça ısı iletkenlikleri de azalmaktadır. Perlit katkılı hafif betonların fırın kuru birim ağırlıkları ile ısı iletkenlikleri arasındaki ilişki Bölüm 2.3.4.4, Şekil 2.13’de görülen literatür verileri ile uyum göstermektedir.



Şekil 4.5: Perlit katkılı hafif betonların birim ağırlıkları ile ısıl iletkenlikleri arasındaki ilişki

Perlit katkılı hafif betonların ısıl iletkenlik katsayıları ile birim ağırlıkları arasındaki lineer ilişkiye benzer bir ilişki gazbetonların ısıl iletkenlik katsayıları ile birim ağırlıkları arasında da görülmektedir. Gazbetonun ısıl iletkenlik katsayısı ile birim ağırlıkları arasındaki ilişkinin belirlenmesinde;

$$\lambda = 0,0003 \times \Delta - 0,011 \quad (4.2)$$

λ : Isıl iletkenlik katsayısı, W/mK

Δ : Birim ağırlık, kg/m³

bağıntısı kullanılabilmektedir [32].

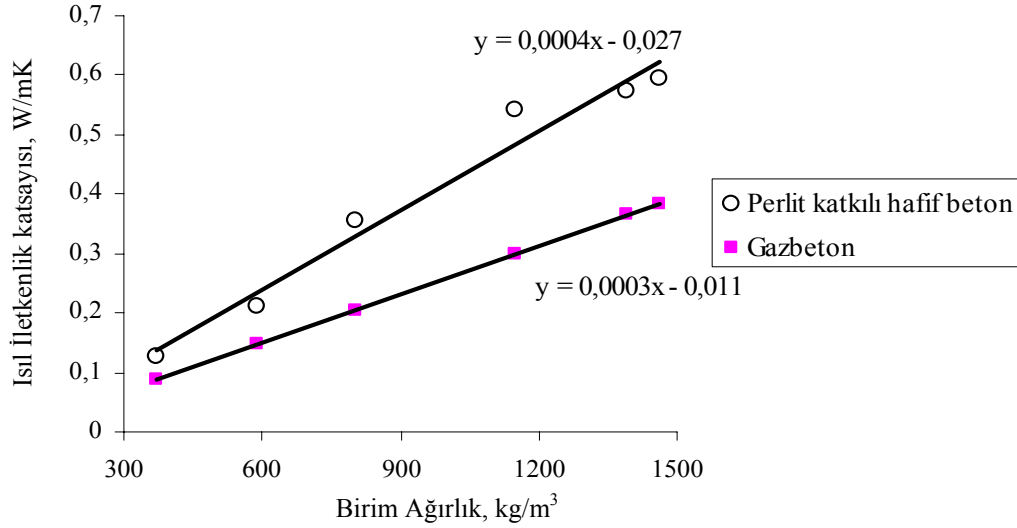
Bu bağıntı kullanılarak elde edilen gazbetonun ısıl iletkenlik katsayısı ile birim ağırlıkları arasındaki ilişki ve perlit katkılı hafif betonun ısıl iletkenlik katsayısı ile birim ağırlıkları arasındaki ilişkinin karşılaştırılması Şekil 4.6’da görülmektedir.

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi perlit katkılı hafif betonlara yapılan deneyler sonucunda elde ısıl iletkenlik katsayısı değerleri ile birim ağırlıkları arasındaki ilişki, aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilir:

$$\lambda = 0,0004 \times \Delta - 0,027 \quad (4.3)$$

λ : Isıl iletkenlik katsayısı, W/mK

Δ : Birim ağırlık, kg/m³



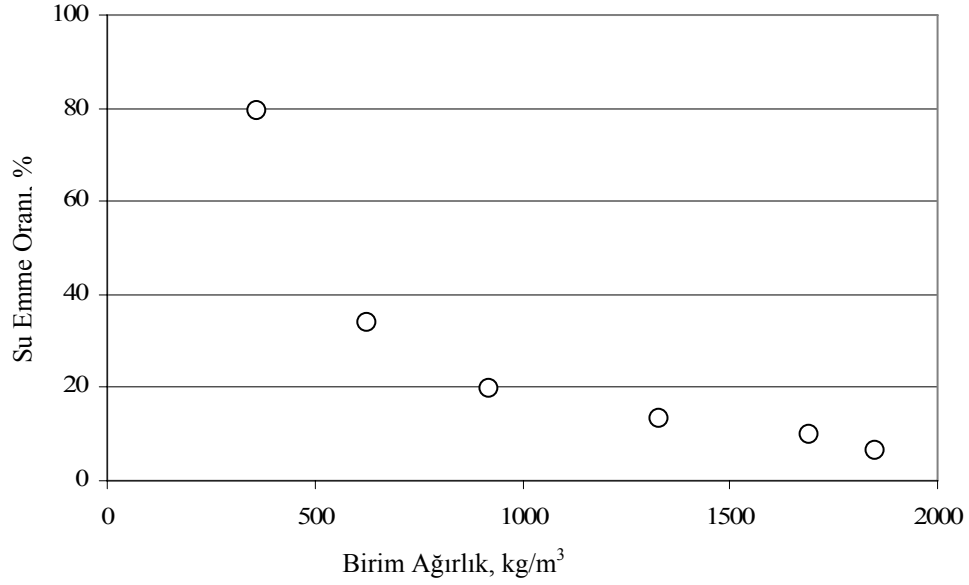
Şekil 4.6: Perlit katkılı hafif beton ile gazbetonun birim ağırlıkları ile ısı iletkenlik katsayıları değişiminin karşılaştırılması

Tablo 2.13'deki değerler incelendiğinde, PB 40 ve PB 60 kodlu betonun yapısal/yalıtım özelliklerine sahip, PB 80 kodlu betonun ise yalıtım özelliğine sahip olduğu görülmektedir. Demirboğa ve Gül [37]'ün çalışmalarında üretilen %100 perlit katkılı hafif betonun ısı iletkenliği 0,18 W/mK iken, bu çalışmada üretilen %100 perlit katkılı hafif betonun ısı iletkenliği 0,13 W/mK'dir.

4.4. Birim Ağırlık ile Su Emme Oranı Arasındaki İlişki

Farklı birim ağırlıkta üretilen perlit katkılı hafif beton numunelerinin su emme oranları ile fırın kuru birim ağırlıkları arasındaki ilişki Şekil 4.7'de görülmektedir.

Şekil 4.7'de görüldüğü gibi, perlit katkılı hafif betonlarda birim ağırlık azaldıkça betonun su emme oranı artmaktadır.



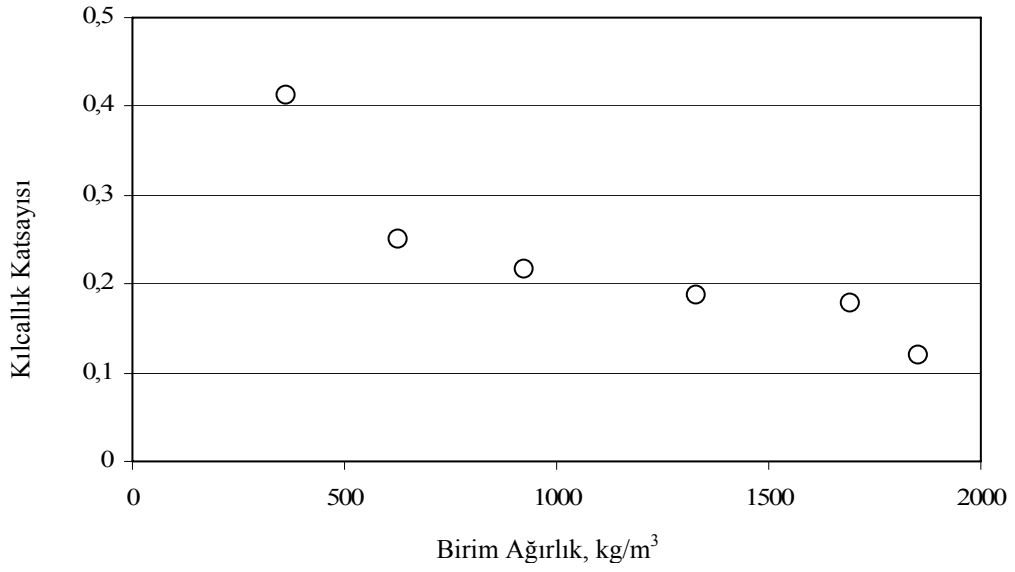
Şekil 4.7: Perlit katkılı hafif betonların birim ağırlıkları ile su emme oranları arasındaki ilişki

Bu durum, karışımdaki perlit miktarının artması ile ilişkilendirilmektedir. Karışımdaki genleştirilmiş perlit oranı arttıkça, sertleşmiş betonun gözenekleri artmakta ve buna bağlı olarak betonun su emme oranı da artmaktadır.

4.5. Birim Ağırlık ile Kılcallık Katsayısı Arasındaki İlişki

Farklı birim ağırlıkta üretilen perlit katkılı hafif betonların kılcallık katsayıları; numunelerin su emme miktarı ile su emme zamanının karekökü ($m-\sqrt{t}$) eğrisinin eğiminden belirlenmektedir. Numunelerin birim ağırlık ile kılcallık katsayıları değişimi Şekil 4.8’de görülmektedir.

Şekil 4.8 incelendiğinde, beton birim ağırlığı azaldıkça kılcallık katsayısının arttığı görülmektedir. Beton numunelerin içindeki perlit oranları arttıkça, betonda daha büyük ortalama gözenek boyutları görülmekte ve bu şekilde beton numunelerin kılcallık katsayıları da artmaktadır. Türkmen ve Kantarcı [31]’nin çalışmalarında, beton karışımında genleştirilmiş perlit miktarı arttıkça betonun kılcallık katsayısının arttığı belirtilmektedir.



Şekil 4.8: Perlit katkılı hafif betonların birim ağırlıkları ile kılcallık katsayıları arasındaki ilişki

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi karışımdaki genişmiş perlit miktarının hacimce %100 olduğu (PB 100 kodlu beton) durumda, hafif beton karışımında iri perlit agregalarının arasındaki boşlukları dolduran ince agregalar bulunmadığı için hafif betondaki boşluklar artmakta ve bu sebeple kılcallık katsayısında beklenenden yüksek bir artış gözlemlenmektedir. Karışımda sadece ince agregalar (kum) bulunduğu durumda ise (NB kodlu beton), agregalar arasındaki boşluklar azalmakta ve bu sebeple kılcallık katsayısında beklenenden yüksek bir azalış gözlemlenmektedir. NB ve PB 100 kodlu betonlar dışındaki; PB 20, PB 40, PB 60 ve PB 80 kodlu betonların kılcallık katsayıları incelendiğinde, birim ağırlıkları ile kılcallık katsayısı değerleri arasında doğrusal bir ilişki olduğu kabul edilebilmektedir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, denenen koşullarda özellikleri incelenen hafif betonların birim ağırlıklarının, betonların mekanik özellikleri, fiziksel özellikleri ve ısı iletim özelliklerine etkileri şunlardır:

1. Genleştirilmiş perlit hafif agregasıyla üretilen hafif betonların taze beton birim ağırlıklarını 700 kg/m^3 'den 2000 kg/m^3 'e kadar değiştirmek mümkündür. Böylece bu hafif betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini genişçe bir aralıkta değerlendirebilmek söz konusudur.
2. Genleştirilmiş perlit agregasının yuvarlak ve düzgün yapısı sayesinde taze betonun işlenebilirliği, karışımındaki genleştirilmiş perlit miktarı arttıkça artmaktadır. Bu sebeple, hacimce %60, %80 ve %100 genleştirilmiş perlit kullanılan hafif betonlarda akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanımına gerek kalmamıştır.
3. Genleştirilmiş perlit hafif agregasıyla üretilen hafif betonların birim ağırlıkları arttıkça basınç dayanımları ve elastisite modülleri artmaktadır. Hafif betonların elastisite modüllerindeki artış $E_c = 0,043 \times \Delta^{1,5} \times \sqrt{f_c}$ bağıntısı ile elde edilen elastisite modülü değerleri ile örtüşmektedir.
4. Hafif beton karışımlarında genleştirilmiş perlit miktarı arttıkça, birim ağırlık azalmakta, beton içindeki hava miktarı artmakta, ve bunun sonucu olarak ısı yalıtımı da artmaktadır. Perlit katkılı hafif betonların, fırın kuru birim ağırlıkları ile ısıl iletkenlikleri arasındaki ilişki Bölüm 2.3.4.4 Şekil 2.13'de verilen literatür verileriyle örtüşmekte ve perlit katkılı hafif betonların deneyler sonucunda elde edilen ısıl iletkenlik katsayısı değerleri ile $\lambda = 0,0004 \times \Delta - 0,027$ bağıntısı kullanılarak hesaplanan ısıl iletkenlik katsayıları arasında iyi bir lineer korelasyon bulunmaktadır.

5. Genleştirilmiş perlit agregası ile üretilen betonların birim ağırlıkları ile kılcallık katsayıları arasındaki ilişki incelendiğinde hacimce toplam agrega miktarının %20, %40, %60 ve %80'i oranında perlit içeren hafif betonların birim ağırlıklarındaki artış ile kılcallık katsayılarındaki azalış arasında doğrusal bir ilişki olduğu gözlenmektedir.
6. Genleştirilmiş perlitin yüksek su tutma kapasitesi sayesinde, karşıdaki perlit miktarı arttıkça hafif betonların su emme oranları artmaktadır. Üretilen hafif betonların su emme oranları ile birim ağırlıkları arasındaki ilişki, kılcallık katsayıları ile birim ağırlıkları arasındaki ilişkiye benzer özellikler göstermektedir.
7. Genleştirilmiş perlit katkılı hafif betonların su emme oranları ve kılcallık katsayısı değerleri incelendiğinde, hafif beton karışımlarındaki perlit miktarı arttıkça ortalama gözenek boyutlarının büyüdüğü sonucuna varılabilmektedir. Çimento hamuru ve arayüzeylerde bulunan gözeneklerin tam olarak dolmaması sebebiyle, sertleşmiş betondaki gözenek boyutları büyüdükçe betonların basınç dayanımları azalmaktadır.
8. Perlit katkılı hafif betonların yüksek su emme kapasitesinden dolayı, bu betonların dış ortamlarda kullanılamaması bir dezavantaj gibi görünse de, betonların dış yüzeylerine uygulanacak olan ticari su izolasyon malzemeleriyle betonların su yalıtımı yapıp, dış ortamlarda kullanımı sağlanmış olacaktır.
9. Yapılan deneysel çalışmalar ile denenen koşul ve seçilen bileşimlerde üretilen perlit katkılı hafif betonların, Tablo 2.13'te belirtilen veriler doğrultusunda incelenmesi sonucunda hacimce toplam agreganın %40 ve %60'ı oranında genleştirilmiş perlit içeren hafif betonların yapısal/yalıtım beton türüne giren, %80 oranında genleştirilmiş perlit içeren hafif betonların ise yalıtım beton koşulunu sağlayan hafif beton adayları olduğu ortaya konulmuştur.
10. Ulusal servetimiz olan perlitin, ülke ekonomimizin en güçlü sektörü olan inşaat sektöründe kullanım alanı bulması ülke çıkarları açısından büyük yararlar sağlayabilecektir. Bu sebeple, perlitin inşaat sektöründe değerlendirilmesini sağlayacak şekilde ticari olarak istenilen özellikte perlit katkılı hafif betonların üretilmesi için çalışmalar yapılması gerekmektedir.

11. Bu çalışmada sabit su/imento oranına sahip kısıtlı sayıda numunelerle çalışılmıştır. Bu çalışmanın devamı olarak farklı su/imento oranları ile üretilmiş betonların dayanım ve ısı iletkenlikleri incelenebilir. Yapılacak olan çalışmalarda daha dūřuk su/imento oranı seçilmesi ile daha yüksek dayanıma sahip, üstün ısı yalıtımı sağlayan betonlar retilerebilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] **Devlet Planlama Teşkilatı**, 2006. 9. *Kalkınma Planı (2007-2013) İnşaat, Mühendislik-Mimarlık, Teknik Müşavirlik ve Müteahhitlik Hizmetleri ÖİK Nihai Raporu*, Ankara.
- [2] **Türkiye İstatistik Kurumu Resmi Sitesi**, 18.12.2006.
<http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=397>
- [3] **Doğan, H., Şener, F.**, 2004. Hafif Yapı Malzemeleri (Pomza - Perlit - Ytong - Gazbeton) Kullanımının Yaygınlaştırılmasına Yönelik Sonuç ve Öneriler, *Haber Bülteni*, **1**, 51-53.
- [4] **Duaij, J. A. A., El-Laithy K. and Payappilly R. J.**, 1997. A value engineering approach to determine quality lightweight concrete aggregate, *Cost Engineering*, **39**, 21-26
- [5] **Devlet Planlama Teşkilatı**, 2001. 8. *Kalkınma Planı (2001-2005) Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu*, Ankara.
- [6] <http://www.pertas.net/PERLITMADENI.html>, 10.12.2006.
- [7] **Çiçek, Y. E.**, 2002. Pişmiş toprak tuğla, bimsbeton, gazbeton ve perlitli yapı malzemelerinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] **TS 3681**, 1982. Genleştirilmiş perlit agregası, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [9] **Devlet Planlama Teşkilatı**, 2006. 9. *Kalkınma Planı (2007-2013) Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Yayınlanmamış Raporu*, Ankara.
- [10] **Uyanık, T.** 2005. Maden ve mineraller, *T.C. Başbakanlık Dış Ticaret Müsteşarlığı İhracatı Geliştirme Etüd Merkezi Raporu*, Ankara.
- [11] **U.S. Department of Interior**, 2006. Mineral Commodity Summaries 2006 Report, Washington, U.S.A.
- [12] **U.S. Department of Interior**, 2005. Mineral Commodity Summaries 2005 Report, Washington, U.S.A.
- [13] **Clarke, J. L.**, 1993. Structural Lightweight Aggregate Concrete, Blackie Academic & Professional, London, England.

- [14] **Konuk, H.**, 2003. Hafif agregalı betonların mekanik özellikleri ve ısı yalıtımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [15] **Yeğınobalı, A.**, 2004. Çimento Bülteni, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- [16] **Newman, J. and Choo, B. S.**, 2003. Advanced Concrete Technology Constituent Materials, Elsevier Butterworth Heinemann, Oxford, England.
- [17] **Hewlett, P. C.**, 2004. LEA's Chemistry of Cement and Concrete, Butterworth Heinemann, Oxford, England.
- [18] **Neville, A. M.**, 1996. Properties of Concrete, John Wiley&Sons Inc, New York.
- [19] **Popovics, S.**, 1998. Strength and Related Properties of Concrete: A Quantitative Approach, John Wiley & Sons Inc., New York.
- [20] **Şengül, Ö.**, 2000. Agregat türünün normal ve yüksek dayanımlı betonların mekanik davranışına etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [21] **Arioğlu, E., Arioğlu, N., Yılmaz, A. O.**, 2006. Beton Agregaları, Evrim Yayınevi, İstanbul.
- [22] **Zhang, M. H. and Gjorv, O. E.**, 1991. Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete, *ACI Materials Journal*, **88 (3)**, 240-247.
- [23] **Arda, A.**, 1992. Yüksek dayanımlı betonların tek eksenli kısa süreli basınç yüklemesi altında mekanik davranışında agregat konsantrasyonunun etkisi, *Bitirme Ödevi*, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [24] **Şehitoğlu, B.**, 1987. Normal ve hafif betonların elastik olmayan davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [25] **Taşdemir, M. A.**, 1982. Taşıyıcı hafif agregalı betonların elastik ve elastik olmayan davranışları, *Doktora Tezi*, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [26] **Demirboğa, R., Gül, R. and Örüng, İ.**, 2001. Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes, *Cement and Concrete Research*, **31**, 1627-1632.
- [27] **TS EN 206-1**, 2002. Beton-Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [28] **Konuk, H., Özyurt, N., Taşdemir, C., Yüceer, Z., Sönmez, R.**, 2002. Hafif betonların taşıyıcılık özellikleri, *1. Ulusal Yapı Malzemesi Kongre ve Sergisi*, TMMOB Mimarlar Odası İstanbul Büyükkent Şubesi, İstanbul, 9-13 Ekim.

- [29] **Newman, K. and Newman, J. B.**, 1969. Failure Theories and Design Criteria for Plain Concrete, *The Proceedings of the Southampton 1969 Civil Engineering Materials Conference*, Part 2, 963-995.
- [30] **Schulz, B.**, 1997. Zum Entwurf von Leichtbeton bestimmter Festigkeit, *Beton*, **2**, 61-65.
- [31] **Türkmen İ., and Kantarcı A.**, 2006. Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete, *Building and Environment*, Article in Press.
- [32] **Taşdemir, C., Ertokat, N.**, 2002. Gazbetonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine bir değerlendirme, *Mimarlar Odası 1. Sempozyumu*, İstanbul, Vol. 2, 425-437.
- [33] **ACI Committee 213**, 1987. Guide for structural lightweight aggregate concrete, ACI 213R-87, USA.
- [34] **Steiger, R. W. and Hurd, M. K.** 1978. Lightweight insulating concrete for floors and roof decks, *Concr. Constr.*, **23**, 411-422.
- [35] **Demirboğa, R. and Gül, R.**, 2003. The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete, *Cement and Concrete Research*, **33**, 723-727.
- [36] **Demirboğa, R. And Gül, R.**, 2003. Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures, *Energy and Building*, **35**, 1155-1159.
- [37] **Erciyes, Y.**, 1963. Bims ve bims betonu üzerine araştırmalar, İmar ve İskan Bakanlığı Yayınları, No. 5-17, Ankara.
- [38] **Gürol, M., Taşdemir, M. A., and Kocataskın, F.**, 1988. A comparative experimental study of reinforced lightweight concrete roof slabs, *Civil Engineering Practice*, Vol.3, 59-66.
- [39] **TS 706 EN 12620**, 2003. Beton Agregaları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [40] **TS EN 1744**, 2000. Agregaların Kimyasal Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 1: Kimyasal Analiz, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [41] **TS 3527**, 1980. Beton Agregalarında İnce Madde Oranı Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [42] **TS 3529**, 1980. Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [43] **TS EN 1097-6**, 2002. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

- [44] **Postacıoğlu, B.**, 1987. Beton, c.2, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- [45] **TS 2941**, 1978. Taze Betonda Birim Ağırlık, Verim ve Hava Miktarının Ağırlık Yöntemi ile Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [46] **TS 3649**, 1982. Perlitli Isı Yalıtımı Betonu-Yapım-Uygulama Kuralları ve Deney Metodları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [47] **Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N.**, 2002. Transport Phenomena, John Wiley, New York.
- [48] **TS 3624**, 1981. Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık,Su Emme ve Boşluk Oranı Tayin Metodu, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Senem Azizi 1981 yılında İstanbul’da doğdu. 1999 yılında Büyükşehir Hüseyin Yıldız Anadolu Lisesinden mezun oldu. 1999 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümüne girdi ve 2004 yılında onur listesinde mezun oldu. 2004 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Yüksek Lisans programı ve Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme (Tezsiz) Yüksek Lisans programına girdi. 2006 yılında İşletme (Tezsiz) Yüksek Lisans programından birincilikle mezun oldu. Senem Azizi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Yüksek Lisans programında halen öğrenimini sürdürmektedir.