

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TAŞIYICI HAFİF BETONLA ÜRETİLEN YEKPARE VE PREFABRİKE YAPI
ELEMANLARININ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

İnş. Yük. Müh. Yousef ZANDİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :16.01.2012

Tezin Savunma Tarihi :10.02.2012

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Metin HÜSEM

Trabzon 2012

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Yousef Zandi Tarafından Hazırlanan

TAŞIYICI HAFİF BETONLA ÜRETİLEN YEKPARE VE PREFABRİKE YAPI
ELEMENLARININ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 17/01/2012 gün ve 1438 sayılı kararıyla
oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda

DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Metin HÜSEM

Üye : Prof. Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ

Üye : Prof. Dr. Yusuf AYVAZ

Üye : Doç. Dr. Selim PUL

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hasan KOLAYLI

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora tezi olarak gerçekleştirilmiştir. "Taşıyıcı Hafif Betonla Üretilen Yekpare ve Prefabrikte Yapı Elemanlarının Davranışlarının İncelenmesi" başlıklı bu çalışmayı bana öneren, diğer önemli görevlerine rağmen, çalışmanın başlangıcından sonuna kadar sürekli takip eden, araştırma zevki ve bilimsel düşünce disiplini aşlamak için uğraş veren, tezimin bütün aşamalarında bilgi ve tecrübesinden faydalandığım danışman hocam Sayın Prof.Dr. Metin HÜSEM'e şükranlarımı sunmak isterim.

Çalışma esnasında görüş ve yorumlarından yararlandığım doktora tez izleme komitesi ve aynı zamanda jüri üyesi hocalarım Sayın Prof. Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Hasan KOLAYLI' ya değerlendirme ve önerilerinden ötürü müteşekkirim. Değerli zamanlarını ayırarak, jüri üyeliği görevini üstlenen Prof. Dr. Yusuf AYVAZ ve Doç. Dr. Selim PUL' sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2010.112.001.4. kod nolu araştırma projesi olarak desteklendiğinden dolayı KTÜ Rektörlüğü' ne ve Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi çalışanlarına teşekkür ederim.

Çalışmalarında ilgi ve yardımlarını gördüğüm, Yapı ve Malzeme laboratuvarı çalışanlarından başta hocam Sayın Doç. Dr. Selim PUL, çalışma arkadaşlarım Yrd. Doç. Dr. M. B. MAHDIZADEH, Arş. Gör. M. Emin ARSLAN ve Arş. Gör. Serhat DEMİR' e teşekkür ederim. Ayrıca Trabzon'da bulunduğum süre boyunca desteklerini gördüğüm kıymetli hocalarıma özellikle teşekkür etmeyi bir borç bilirim. Ayrıca geliştirilmiş perlitin temin edilmesinde bize büyük kolaylık sağlayan, Konya'da Persa Perlit Fabrikası Müdürü ve çalışanlarında da teşekkür ederim.

Son olarak hayatım boyunca beni sabır ve şefkatle destekleyen annem ve özellikle eşime müteşekkirc olduğumu belirtir, çalışmanın faydalı olmasını dilerim.

Yousef ZANDİ
Trabzon 2012

TEZ BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “ Taşıyıcı Hafif Betonol Üretilen Yekpare ve Prefabrike Yapı Elemanlarının Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Metin HÜSEM’ in sorumluluğumda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 12/01/2012.

Yousef ZANDİ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Hafif Betonun Tanım ve Tarihçesi	3
1.2.1. Hafif Betonun Tanımı	3
1.2.2. Hafif Betonun Tarihçesi	5
1.3. Hafif Beton Üretiminde Kullanılan Malzemeler	6
1.3.1. Doğal Hafif Agregalar	7
1.3.1.1. Tüfler	7
1.3.1.2. Pomza	7
1.3.1.3. Volkanik Cüruf	8
1.3.1.4. Diatomit	9
1.3.2. Yapay Hafif Agregalar	10
1.3.2.1. Genleştirilmiş Killer, Şistler	10
1.3.2.2. Uçucu Küller	10
1.3.2.3. Vermiküllit	11
1.3.2.4. Genleştirilmiş Perlit	11
1.3.2.5. Yüksek Fırın Cürufu	14
1.3.2.6. Kömür Cürufu	14
1.3.3. Organik Kökenli Hafif Agregalar	15
1.3.3.1. Hızar Talaşı gibi Ahşap Parçaları	15
1.3.3.2. Ahşap Yongası ve Lifleri	15

1.3.3.3.	Hububat Taneleri ve Meyve Çekirdekleri	16
1.4.	Hafif Beton Üretimi ve Kullanım Alanları	17
1.4.1.	Hafif Betonun Üretimi	17
1.4.1.1.	Taşıyıcı Olmayan Hafif Agregalar	17
1.4.1.2.	Taşıyıcı Hafif Betonlar	19
1.4.1.2.1.	Normal Dayanımlı Hafif Betonlar	19
1.4.1.2.2.	Yüksek Dayanımlı Hafif Betonlar	20
1.4.2.	Hafif Betonların Kullanım Alanları ve Özellikleri	21
1.4.2.1.	Hafif Betonun Kullanım Alanları	21
1.4.2.2.	Hafif Betonun Özellikleri	22
1.4.3.	Hafif Betonların Üstünlükleri ve Sakıncaları	24
1.5.	Hafif Betonlarda Kürün Önemi ve Uygulanabilecek Kür Yöntemleri ...	25
1.6.	Hafif Betonlarda Donatı-Beton Aderansı ve Deneyleri	33
1.7.	Konu İle İlgili Daha Önce Yapılan Bazı Çalışmalar	39
1.8.	Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	43
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMA.....	45
2.1.2.	Beton Üretiminde Kullanılan Çimentonun Özellikleri	46
2.1.3.	Karışım ve Bakım Suyu Özellikleri	47
2.1.4.	Mineral ve Kimyasal Katkı Maddelerinin Özellikleri	47
2.1.5.	Donatı Özellikleri	47
2.2.	Betonların Bileşimi	48
2.3.	Hafif Betonların Üretimi, Yerleştirilmesi ve Kürü	50
2.4.	Taşıyıcı Hafif Beton-Donatı Aderans Numunelerinin Üretimi, Deneyi ve Bulguları	61
2.5.	Taşıyıcı Hafif Betonarme Kirişlerin Üretimi, Deneyi ve Sonuçları	70
2.5.1.	Deney Kirişlerinin Üretimi ve Deneyleri	70
2.5.2.	Betonarme Kiriş Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	73
2.5.3.	Kirişlerin Teorik Kırılma Momentlerinin Hesabı	76
2.5.4.	Kirişlerde Kırılma Şekilleri	79
2.6.	Taşıyıcı Hafif Betonla Üretilen Kolonların Davranışı	80
3.	SONUÇ VE ÖNERİLER	87
4.	KAYNAKLAR	90
	ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

TAŞIYICI HAFİF BETONLA ÜRETİLEN YEKPARE VE PREFABRİKE YAPI
ELEMENLARININ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Yousef ZANDİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Metin HÜSEM
2012, 98 Sayfa

Bu çalışmada, taşıyıcı hafif betonla üretilen yekpare ve prefabrike yapı elemanlarının davranışları deneysel ve teorik olarak incelendi. Bu amaçla, geliştirilmiş perlit agregası kullanılarak, taşıyıcı hafif beton üretilebilirliği araştırıldı. Bunun için, çok sayıda farklı karışımlar hazırlanarak betonlar üretildi. Üretilen betonlardan, çalışmanın amacına, gerek üretilebilirliği gerekse dayanım bakımından, en uygun olan karışım seçildi ve bu karışım kullanılarak, betonarmenin varlığını borçlu olduğu, donatı-beton aderansı araştırıldı. Üretilen taşıyıcı hafif betonla üretilen donatı-beton aderans deneylerinden, geleneksel betonlar için, yönetmeliklerde verilen, kenetlenme boyunun emniyetli tarafta kalacak şekilde yeterli olduğu görüldü. Bu çalışmada C30 dayanım sınıfında üretilen, taşıyıcı hafif beton kullanılarak betonarme kiriş ve kolon deney numuneleri de üretildi. Bu deney numuneleri üzerinde eğilme ve merkezi basınç deneyi yapılarak, hafif betonla üretilen betonarme yapı elemanlarının eğilmede ve merkezi basınç etkisindeki davranışları incelendi. Bu incelemede, kolonlarda iki farklı enine donatı düzenlemesi yapılarak, sargı donatısının etkisi de araştırıldı. Bu çalışma kapsamında üretilen taşıyıcı hafif betonun, üretilebilirliği, donatı-beton aderansı, üretilen betonarme kiriş ve kolon elemanlarının, eğilme ve merkezi basınç etkisindeki davranışları dikkate alındığında, yekpare ve prefabrike yapılarda kullanılabilmesi ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler : Taşıyıcı hafif beton, Genleştirilmiş perlit, Donatı-beton aderansı, Betonarme kolon, Sargı donatısı ,

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF BEHAVIORS OF MONOLITHIC AND PREFABRICATED
STRUCTURES MEMBERS PRODUCED USING LIGHTWEIGHT CONCRETE

Yousef ZANDI

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Program
Supervisor: Prof. Dr. Metin HÜSEM
2012, 98 Pages

In this study, the behaviors of monolithic and prefabricated members produced using structural light concrete were investigated experimentally and theoretically. For this purpose, the possibility to produce structural lightweight concrete using expanded perlite aggregate was investigated. So, a number of different concrete mixtures were prepared and produced. Among the produced concretes, the most appropriate mixture was selected both in terms of possibility to produce and strength. Using the selected mix, steel-concrete adherence was investigated which is the reason of the presence of reinforced concrete. Steel-concrete adherence tests on lightweight concrete samples showed that for the traditional concrete as given in the regulations, the clamping length was found sufficient to be on the safe side. In this study, in the C30 concrete strength class reinforced concrete beam and column test samples were produced by using lightweight concrete. Bending test and uniaxial compression experimental tests were performed on the samples to determine the reinforced concrete structure elements behaviors produced with lightweight concrete. In this review, the effect of confinement reinforcement was investigated by arranging two different transverse reinforcement in the columns. This study claimed that structural lightweight concrete can be used and its possibility to produce, its reinforcement-concrete adherence and the behaviors of produced lightweight concrete column-beam members under the effects of bending and axial load.

Key words: Lightweight concrete, expanded perlite, reinforcement and concrete adherence, reinforced concrete columns, confinement.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Kullanılan agrega cinsine göre hafif betonların sınıflandırılması.....	5
Şekil 2. Tüfler.....	7
Şekil 3. Pomza	8
Şekil 4. Volkanik cüruf	9
Şekil 5. Diatomitlerden görünüşler	9
Şekil 6. Genleştirilmiş kil örnekleri	10
Şekil 7. Uçucu küller	10
Şekil 8. Vemikülit	11
Şekil 9. Genleştirilmiş perlit	12
Şekil 10. Yüksek fırın cürufu	14
Şekil 11. Kömür cürufu	14
Şekil 12. Hızır talaşı	15
Şekil 13. Ahşap yongası ve lifleri	16
Şekil 14. Hurma çekirdeği ve şeker kamışı.....	16
Şekil 15. Gaz beton elemanlar	18
Şekil 16. Köpük beton üretimi	18
Şekil 17. İri hafif agregalar kullanılarak üretilen bloklar	19
Şekil 18. Londra' da hafif betonla inşa edilen NLA binası ve Guy's Hospital	21
Şekil 19. Hafif beton bloklarla yapılan yapılar	22
Şekil 20. Hafif beton uygulamaları	23
Şekil 21. Su/çimento oranı 0.48 olan bir çimento hamurunun hacimsel oranları	26
Şekil 22. Sertleşmiş çimento hamurundaki çimento jeli, kapiler boşluklar ve hidratasyona girmemiş kısımların şematik gösterilimi	26
Şekil 23. Merkezi çekip çıkarma (pull out) deneyi	35
Şekil 24. Geliştirilmiş merkezi çekip-çıkarma deney düzenekleri	35
Şekil 25. Dış merkez çekip-çıkarma deney düzeneği	36
Şekil 26. Beton aderansının belirlenmesi için kullanılan Texas çıkmalı giriş deney düzeneği	37

Şekil 27.	Donatı-beton aderansının belirlenmesi için kullanılan İngiliz Standardı deney düzeneği	37
Şekil 28.	Donatı-beton aderansının belirlenmesi için kullanılan Standart Belçika Mafsallı giriş deney düzeneği	38
Şekil 29.	Donatı-beton aderansının belirlenmesi için kullanılan Hollanda deney düzeneği	38
Şekil 30.	600 kN kapasiteli universal deney aleti	48
Şekil 31.	Düşey eksenli betoniyer	51
Şekil 32.	Taze betonda çökme deneyi	57
Şekil 33.	Silindir numuneler üzerinde yapılan basınç deneyi	57
Şekil 34.	Üretilen betonların zamanla dayanım kazanması	58
Şekil 35.	SLC19 serisi betonlarda gerilme-şekildeğiştirme eğrisi	60
Şekil 36.	Silindir yarma deneyi	60
Şekil 37.	Aderans numunelerinin hazırlanması	62
Şekil 38.	Deneye hazırlanan taşıyıcı hafif beton aderans numuneleri	62
Şekil 39.	Aderaans deney düzeneğinin şematik görünümü	63
Şekil 40.	Taşıyıcı hafif beton-donatı aderans deneyleri	65
Şekil 41.	Farklı gömme boylarında aderans gerilmesi sıyrılma eğrileri (8 mm çaplı donatılar için)	66
Şekil 42.	Farklı gömme boylarında aderans gerilmesi sıyrılma eğrileri (12 mm çaplı donatılar için)	67
Şekil 43.	Farklı gömme boylarında aderans gerilmesi sıyrılma eğrileri (14 mm çaplı donatılar için)	68
Şekil 44.	Aderans deneyi sonunda betonun çatlamasıyla sıyrılan donatı	70
Şekil 45.	Deney girişinin şematik donatı planı	71
Şekil 46.	Betonarme giriş kalıp ve donatısı	71
Şekil 47.	Kiriş eğilme deneyi ve yükleme şekli	72
Şekil 48.	Kiriş numunesinin deney hazırlanması	72
Şekil 49.	Taşıyıcı hafif beton ile üretilen kirişlerde yük-yerdeğiştirme ilişkisi	74
Şekil 50.	Geleneksel betonarme kirişlerde yük-yerdeğiştirme ilişkisi	75
Şekil 51.	Süneklik oranı	75
Şekil 52.	Dikdörtgen kesitlerde şekildeğiştirme ve iç kuvvetlerin şematik gösterilimi	77

Şekil 53.	Taşıyıcı hafif betonla üretilen kirişte göçme	79
Şekil 54.	Geleneksel betonla üretilen betonarme kirişlerde çatlakların gelişimi	80
Şekil 55.	Deney kolonlarının şematik donatı planı ve enkesiti	81
Şekil 56.	Deney kolonlarının donatılarının kalıplarına yerleştirilmesi ve beton dökümü	82
Şekil 57.	Kolonların deneye hazırlanması	83
Şekil 58.	Taşıyıcı hafif betonarme kolonlara ait tipik kırılma şekilleri	84
Şekil 59.	Taşıyıcı hafif betonla üretilen kolonlarda merkezi yük-birim kısalma eğrileri	85

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Hafif betonların işlevlerine göre sınıflandırılması (Clarke, 1993)	4
Tablo 2. Ham perlitin fiziksel özellikleri	12
Tablo 3. Genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri	13
Tablo 4. Perlitin kimyasal özellikleri	13
Tablo 5. Ülke standartlarına göre tanımlanan taşıyıcı hafif betonların kuru birim kütleleri ve basınç dayanımları	19
Tablo 6. Deneylerde kullanılan geleneksel kumun bazı fiziksel özellikleri	45
Tablo 7. Deneylerde kullanılan perlit agregasının bazı fiziksel özellikleri	45
Tablo 8. Genleştirilmiş perlit agregasının bazı fiziksel özellikleri	46
Tablo 9. Beton üretiminde kullanılan çimentonun bazı fiziksel özellikleri	46
Tablo 10. Sili dumanının yaklaşık kimyasal bileşimi	47
Tablo 11. Uçucu külün yaklaşık kimyasal bileşimi	47
Tablo 12. Deney elemanlarının üretiminde kullanılan donatılara ait bazı mekanik özellikler	48
Tablo 13. Hafif beton üretimi için yapılan deneme üretimi bileşimleri (kg/m ³)	50
Tablo 14. Üretilen betonların basınç dayanımları ve birim ağırlıkları	55
Tablo 15. Yeniden düzenlenen beton bileşimleri (kg/m ³)	56
Tablo 16. Taşıyıcı hafif beton standart silindir basınç dayanımları ve birim ağırlıkları	58
Tablo 17. Yarmada çekme dayanımı sonuçları	61
Tablo 18. Taşıyıcı hafif beton-donatı aderansı deney sonuçları	64
Tablo 19. Geleneksel betonun bileşimi (m ³)	73
Tablo 20. Betonarme kiriş deneylerinden elde edilen sonuçlar	74
Tablo 21. Kirişlerin enerji yutma kapasiteleri	76
Tablo 22. Kirişlerde deneysel ve teorik kırılma momentleri	78
Tablo 23. Taşıyıcı hafif betonarme kolonların deneysel ve teorik kırılma yükleri .	84

SEMBOLLER DİZİNİ

A_s	Donatı alanı
A_{st}	Toplam boyuna donatı alanı
D	Numune çapı
DN	Agregalarda doğal nem
DS	Agregalarda doğal su
F, P	Uygulanan yük
F_c	Betonun bileşke kuvveti
F_s	Donatıda bileşke kuvvet
L	Numune boyu
LC	Hafif beton
M	Eğilme momenti
M_r	Direnme momenti
N_r	Kolon aksenal nihai yükü
SE	Agregaların su emmesi
SLC	Taşıyıcı hafif beton
a	Eşdeğer dikdörtgen gerilme bloğu derinliği
b	Kolon enkesitinin küçük kenarı
b_w	Kiriş enkesit genişliği
c	Tarafsız eksen derinliği
d	Faydalı yükseklik
f_c	Betonun basınç dayanımı
f_{cm}	Betonun ortalama basınç dayanımı
f_{ck}	Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_y	Donatının akma dayanımı
f_{yd}	Donatının hesap akma dayanımı
h	Kolon enkesitinin büyük kenarı
l_b	Kenetlenme boyu
Va	Agrega hacmi
Vc	Çimento hacmi

V_h	Hava hacmi
W_a	Agrega ağırlığı
W_c	Çimento ağırlığı
γ_{ai}	i. agregasının birim kütlesi
Δ	Yerdeğiştirme
\emptyset	Donatı çapı
μ	Süneklik oranı
σ_s	Donatıdaki gerilme
τ_{bd}	Aderans gerilmesi
ϵ_{cu}	Beton basınç bölgesinin nihai birim kısalması
ϵ_s	Donatının birim uzaması

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde beton ve betonarme yapılarda kullanılan taşıyıcı normal beton; çimento, su, uygun granülometride agrega ve gerektiğinde mineral ve kimyasal katkı maddeleri kullanılarak üretilen kompozit bir yapı malzemesidir. Teknolojinin ilerlemesi ile bu betonların dayanım ve dayanıklılıkları da zamanla artmakta, dolayısıyla da her geçen gün daha yüksek dayanım sınıfında betonların projelendirmede ve inşaatlarda kullanılması tercih edilmektedir. Ancak, geleneksel agregalarla üretilen, normal dayanımlı betonların, birim kütlelerinin fazlalığı, yüksek yapıların inşasında problem olmakta, özellikle temel maliyetini artırmakta hatta pratik hayatta geçilmesi gerekli, normale göre, büyük açıklıklarda, bazen de bu betonla yapılan eğilme elemanları kendi öz kütlesini bile taşıyamaz hale gelmektedir. Diğer taraftan ağır oluşları nedeniyle bu betonla inşa edilen yapılarda depremden dolayı oluşan atalet kuvvetlerinin büyük olduğu da bir gerçektir.

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte beton endüstrisinde de ilerlemeler olmuş ve beton üretimindeki bu yenilikler beton teknolojisine özel betonlar adı ile girmiştir. Kullanım yerlerine göre farklı beklentileri karşılamak amacıyla üretilen bu özel betonlar, ağır beton, taşıyıcı hafif beton, yüksek akıcılığa sahip beton, yalıtım özellikli beton gibi farklı şekillerde isimlendirilmiştir (Yazıcıoğlu vd., 2006). Özel beton çeşitlerinden birisi olan hafif betonlar, birim kütlelerinin az oluşu, yüksek ısı yalıtımına sahip olması, yangına karşı dayanıklı olması nedeniyle son yıllarda özellikle de çok katlı yapılarda tercih edilmektedir (Hüsem, 1995).

Yapı elemanlarının üretiminde kullanılan hafif malzemeler, yapının yükünü önemli oranda azaltmakta, dolayısıyla da depremin oluşturduğu etkiler azalmaktadır. Bu nedenle de, inşaat teknolojilerindeki gelişmelere bağlı olarak, özellikle çok katlı yapılarda, duvar, bölme, tavan, taban ve sıvalarda hafif yalıtımlı malzemeler tercih edilmektedir. Böylece yapılar kendi ağırlıklarıyla ezilmemekte ve depremin yıkıcı etkileri de azaltılmış olmaktadır.

Agregalar betonun yaklaşık %70-80'ini oluşturduğu için taşıyıcı hafif beton üretiminin bilinen en yaygın metodu boşluklu hafif agrega kullanmaktır. Beton bileşiminde agregaların bu denli yüksek oranda kullanılmasından dolayı betonun mekanik ve diğer özellikleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğu bir gerçektir (Mindess vd., 1987). Beton

niteliği üzerinde agrega özelliklerinin etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Giaccio vd., 1992; Nilsen vd., 1995). Beton basınç dayanımının esasen agrega hacmi ve özellikleri tarafından etkilendiğini ortaya koymuşlardır (Yang vd., 1996). Çalışmalarında hafif agregaların hava boşlukları sayesinde üretilen betonun daha yüksek dayanım/ağırlık oranına, daha iyi yarmada çekme dayanımı kapasitesine, düşük ısıl genleşme katsayısına, üstün nitelikli ısı ve ses yalıtımı özelliklerine sahip olduğunu rapor etmişlerdir (Al-Khaiat vd., 1998).

Hafif beton ve şap üretiminde en sık başvurulan yöntem, bileşimde normal ağırlıklı agregaların tamamen veya kısmen hafif agregayla yer değiştirilmesidir. Hafif agrega olarak ponza, genleştirilmiş perlit, genleştirilmiş kil veya şist ve genleştirilmiş polistren (stiropor) kullanılabilir.

Taşıyıcı hafif betonlar, sunduğu teknik, ekonomik ve çevresel avantajlardan dolayı çok yönlü bir malzemedir (Hague, 2004). Günümüzde taşıyıcı hafif betonlar özellikle bir yapının ölü yükünün azaltılmasında ve kullanılacak betonarme yapı elemanlarının kesit alanlarının daraltılmasında tercih edilmektedir. Buna bağlı olarak yüksek yapıların efektif kullanım alanlarının ve açıklıklarının artırılmasında etkin rol oynamaktadır (Kok, 2002). Bunun yanında taşıyıcı hafif betonlar duvar panel ve blokların inşasında, çatı katı döşemelerinde, köprü açıklıklarında, vb. elemanların üretiminde kullanılmaktadır. Bu amaçlarla taşıyıcı hafif beton üretmek özellikle deprem bölgelerinde yapılar inşa etmek için tercih edilmektedir (Sari, 2005).

Hafif beton üretiminde son yıllarda büyük gelişmeler olmuş, bu betonların, birim kütlelerinin azlığı, ısıl itekenlik katsayısının küçük olması yanında, dayanımlarının da artırılmaya çalışılmasıyla, taşıyıcı beton hatta yüksek dayanımlı hafif betonlar üretilmeye başlanmıştır. Taşıyıcı hafif betonların, özellikle de yüksek dayanımlı hafif betonların taşıyıcı eleman olarak kullanılması son derece önemlidir. Bunun için taşıyıcılık özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle üretilecek olan yüksek dayanımlı hafif beton ile kiriş, kolon, perde gibi taşıyıcı sistemlerin ve bunların tek tek taşıma kapasiteleri saptanması ve daha sonra bu elemanlardan oluşturulacak taşıyıcı çerçevelerin yanal yükler altındaki davranışlarının tespit edilmesi gerekmektedir (Nilsen, 1995).

Günümüzde çağın gereksinimlerine uygun olarak inşaat sektöründe artan talebi karşılamak amacıyla seri üretim ve sanayileşme gereksinimi artmaktadır. Bu da prefabrikasyonu oluşturmuştur(TSE, 1997). Bununla birlikte, günümüzde prefabrike yapı sektörünün en büyük sorunlarından birisi de üretilen elemanların ağırlığıdır. Prefabrike

yapı elemanlarının kütlelerinin fazla olması bu elemanların taşınmasında ve montajında karşılaşılan zorlukların yanında maliyetin de artmasına neden olmaktadır. Taşıyıcı hafif betonların prefabrike elemanlarda kullanılması durumunda bu olumsuzlukların da azalacağı ve/yada ortadan kalkacağı açıktır. Dolayısıyla da bu çalışma kapsamında, geliştirilmiş perlit agregası kullanılarak, C20, C25, C30 ve C35 dayanım sınıflarında üretilmesi planlanan taşıyıcı betonların, yekpare ve prefabrike yapılarda kullanılabilirliği, dayanım ve dayanıklılık yönünden, deneysel olarak araştırılmaktadır.

1.2. Hafif Betonun Tanım ve Tarihçesi

1.2.1 Hafif Betonun Tanımı

Hafif beton, TSE EN 206-1' de, fırın kurusu durumundaki birim kütlesi 800 kg/m^3 ile 2000 kg/m^3 arasında olan betonlar olarak tanımlanmaktadır(TSE EN 206-1, 2002).

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

Ülkemizde hafif beton birim kütlesi 2000 kg/m^3 'e kadar çıkmasına izin verilmektedir (TSE EN 206-1, 2002). Amerika'da ise hava-kuru birim kütlesi 1810 kg/m^3 'ten az olan betonlar hafif agregalı betonlar olarak adlandırılmaktadır (Clarke, 1993).

Amerikan Beton Enstitüsü'nün yayınladığı, yapısal hafif agregalı beton kılavuzunda (ACI 213R, 1987), betonların birim ağırlıkları kullanılarak uygulama alanlarına göre sınıflandırılmaları yapılmaktadır. ACI 213R-87'de yapılan sınıflandırma doğrultusunda, hafif betonlar 3 kategoriye ayrılmaktadır. Birinci kategori birim kütlesi $1350-1900 \text{ kg/m}^3$ arasında değerler alan taşıyıcı hafif betonlardır. Bu betonlar taşıyıcı amaçla kullanılmakta ve minimum 17 MPa basınç dayanımına sahip olması istenmektedir. İkinci kategorideki hafif betonlar ise birim kütlesi $300-800 \text{ kg/m}^3$ arasında değerler alan düşük birim kütleli 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 taşıyıcı hafif betonlar arasında değerler almaktadır (Neville, 1996).

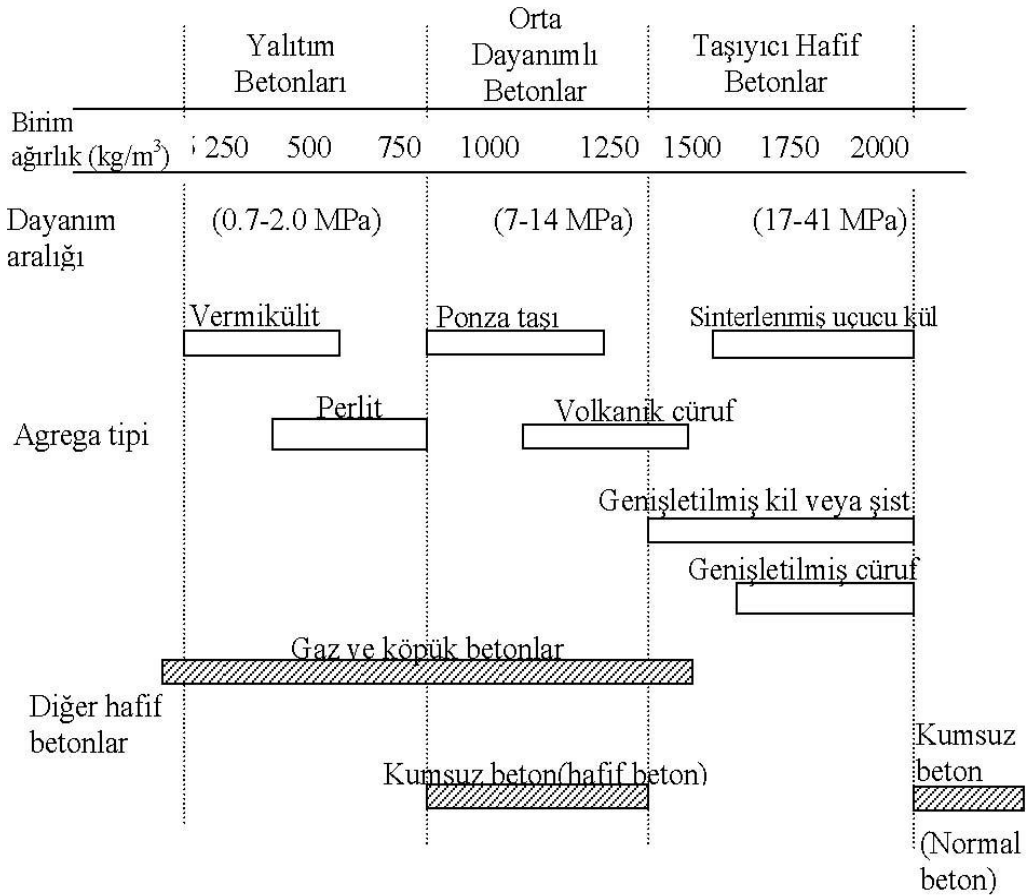
İnşaat Malzemeleri, Sistemleri ve Yapıları Laboratuvar ve Uzmanları Uluslararası Birliği (RILEM) ile Avrupa Beton Komitesi (CEB) tarafından yapılan, betonların kullanım amaçlarına göre sınıflandırması Tablo 1’de görölmektedir.

RILEM ve CEB tarafından yapılan sınıflandırmada, hafif betonların fırın kurusu birimkütleleri, basınç dayanımları ve ısı iletkenlikleri göz önüne alındığında, kullanım alanlarına göre yapısal, yapısal ve yalıtım, yalıtım betonları şeklinde sınıflandırıldığı görölmektedir.

Tablo 1. Hafif betonların işlevlerine göre sınıflandırılması (Clarke, 1993).

Sınıf	I	II	III
Hafif betonun türü	Taşıyıcı	Taşıyıcı ve Yalıtım	Yalıtım
Fırın kurusu birim kütle (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 1’de görölmektedir.



Şekil 1. Kullanılan agrega cinsine göre hafif betonların sınıflandırılması (Konuk vd., 2002).

Şekil 1 de görüldüğü gibi agrega olarak hacimce %100 perlit agregası kullanılarak üretilen hafif agregalı betonlar yalıtım betonları olarak kullanılmaktadır.

1.2.2. Hafif Betonun Tarihi

Hafif betonun kullanımı milattan 3000 yıl öncesine dayanmaktadır. Avrupada ise 2000 yıl öncesinde Romalılar tapınak ve heykellerini hafif beton kullanarak inşa etmişler (Aitcin, 1999). Üçüncü yüz yılda Iraktaki Babül sarayları, dördüncü yüz yılda Sümerler tarafından yapılan şu andaki Ayasofya camii ve 624 ile 987 yılları arasında Meksikada yapılan piramitlerin inşasında hafif beton kullanılmıştır (Ulus, 2007). Günümüze kadar ulaşan tarihi eserlerden de anlaşıldığına göre, dünyanın bir çok yerinde, bu yapıların inşasında volkanik kökenli hafif betonlar/kayaçlar kullanılmıştır. 19. yüzyılın sonlarına

doğru beton üretiminin ve buna bağlı olarak da betonarmenin gelişimiyle birlikte, doğal hafif agregaların azlığı nedeniyle, yapay hafif agregaların üretimi için ilk çalışmalar başlamış, 20. yüzyılın ilk dönemlerinde demir üretimi endüstrisi nedeniyle cüruf üzerinde yoğunlaşmıştır. Böylece yüksek fırın cürufunun misket şekline getirilmesi ve geliştirilmesiyle 1970' lerde daha düzgün yüzeyle agregalar üretilebilmiştir (Clarke, 2005). ACI 213' de belirtildiğine göre, 1917 yılında S.J. Hayde, killerin sert bir şekil alması için döner bir fırın geliştirmiş ve bu fırında nemlendirilmiş killerle, düşük yoğunluklu beton üretmiştir. Bu beton USS Selma adlı geminin inşasında da kullanılmıştır(Chandra ve Berntsson 2003; Short ve Kinniburg 1978). Tuthill, II. Dünya savaşı boyunca hafif beton kullanılarak 105 gemi yapıldığını belirtmektedir(Tuthill, 1945).

Avrupa' da ise, 1931 yılında ilk olarak geliştirilmiş kilden hafif agrega üretimi Danimarka' da gerçekleşmiştir. Bu aşamadan sonra gelişmeler hızla Almanya, Hollanda ve İngiltere' ye yayılmıştır. 1950' lardan itibaren killerin geliştirilmesi çalışmaları devam etmiştir. 1970'li yılların başlarında birim kütlesi 1850 kg/m^3 ten daha düşük olan yüksek dayanımlı beton üretim ihtiyacı ortaya çıkınca, Almanya' da birim kütlesi 800 kg/m^3 ila 1700 kg/m^3 arasında olan geliştirilmiş killi şist agregası üretimmiştir (Clarke, 2005).

Richart ve Jensen, Washa ve Wendt ' in çalışmalarından yararlanarak 1950' li yıllardan önce, yükün hafifletilmesi amacıyla hasar görmüş köprü tabliyeleri ve yapı çerçeveleri gibi elemanlar hafif beton kullanılarak onarılmıştır (Richart, 1930; Washa, 1942).

Son yıllarda hafif agregaların sağlamış olduğu avantajlar, dünya genelinde bu agregaların kullanımını yaygınlaştırmıştır (Chandra ve Berntsson, 2003). Teknolojinin gelişmesine bağlı olarak, hafif betonlarda da yüksek dayanım talebi doğmuş ve yapılan çalışmalar, yüksek dayanımlı hafif betonların üretilebileceğini göstermiş ve ilk yüksek dayanımlı hafif beton Norveç'te üretilmiştir (Aitcin, 1998).

1.3. Hafif Beton Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Hafif betonların üretiminde kullanılan agregalar doğal kaynaklardan elde edilebileceği gibi, yapay agregalar veya tahıl tohumları gibi bazı organik kökenli kaynaklardan da elde edilebilmektedir.

1.3.1. Doğal Hafif Agregalar

1.3.1.1. Tüfler

Tüfler esas itibariyle volkanik kayalardır (Şekil 2). Ancak bunlar ayrıştıklarından dolayı sedimanter kayalar sınıfına da girebilmektedir. Tamamen volkanik tüfler mevcut olduğu gibi, tamamen sedimanter tüfler de mevcuttur. Yaklaşık 4 mm den küçük prioklastik tanelerin meydana getirdiği tüflere tüfit, kum halinde olanlara ise volkanik kül adı verilmektedir. Tüflerin yapısını volkanik cam parçacıkları ile kristal ve volkanik olmayan maddeleri meydana getirmektedir. Temel maddesi cam olan tüflere vitrik tuf, tane büyüklüğü 4 mm ile 32 mm arasında olanlara lapitli tuf, daha büyük parçalardan ibaret olanlara ise volkanik aglomera veya volkanik breş adı verilmektedir. Diğer taraftan tüfler temel bileşenlerine göre, dasitli ve biyotitli gibi değişik adlar da almaktadır (Durmuş, 1996; Hüsem, 1993; Sükan, 1966). Tüfler günümüzde genellikle taşıyıcı, yarı taşıyıcı, taşıyıcı olmayan hafif beton üretiminde kullanıldığı gibi dış cephe kaplamalarında da kullanılabilir.



Şekil 2. Tüfler

1.3.1.2. Pomza

Pomza gözenekli yapıda, açık renkli sünger taşı sınıfına giren hafif bir kayadır. Bu kayacın esas itibariyle volkanik olaylar sırasında doğal olarak genişlemiş bir perlittir (Şekil 3). Pomza %70 kapalı ve çok küçük boşluklar içerdiğinden birim kütlesi geleneksel agregalara göre çok düşük olmaktadır.



Şekil 3. Pomza

Pomza, TS 3234’de , birbirine bağlantısız boşluklu, sünger görünümlü, silikat esaslı, birim hacim kütlesi genellikle 1 gr/cm^3 ’ten küçük, sertliği Mohs sertlik çizelgesine göre yaklaşık 6 olan ve camsı doku gösteren volkanik bir madde olarak, tanımlanmıştır.

Gözenekli ve camsı yapıya sahip olan pomza, fiziksel ve kimyasal etkenlere karşı dayanıklıdır. Pomzanın genel kimyasal bileşimi ; % 60–75 SiO_2 , % 13–17 Al_2O_3 , % 1–3 Fe_2O_3 , % 1–2 CaO , % 7–8 $\text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}$ ve eser miktarda TiO_2 ve SO_3 ’den oluşmaktadır. Kayacın içerdiği SiO_2 oranı kayaca aşındırıcılık özelliği kazandırmaktadır. Al_2O_3 bileşimi ise ateşe ve yüksek ısıya dayanım özelliğini kazandırmaktadır. Na_2O ve K_2O pomzanın tekstil sanayinde kullanılmasını sağlayan, reaksiyon özellikleri veren bileşimler olarak bilinmektedir (Gündüz vd., 1998).

1.3.1.3. Volkanik Cüruf

Volkanik cüruf (scoria), bazik karakterli ve boşluklu lav parçacıklarıdır. Bunlar yanardağdan çıkan lavların en önce soğuyan kısmıdır. Bazaltik karakterlere sahip lavların, patlamanın oluşturduğu basınç nedeniyle, çatlakların arasından sızması sonucu meydana gelen bazaltik-andezitik bileşime sahip gözenekli, camsı bir kayak türüdür (Şekil 4).



Şekil 4. Volkanik cüruf

1.3.1.4. Diatomit

Diatomitelerin iskeletlerini silikatlar oluşturmaktadır. Ölü diatomitlerin küçük kabukları, iç denizlerde kizelgur meydana getirmektedir. Fosil durumundaki diatomit kabuklarından meydana gelen kayalara diatomit adı verilmektedir. Genellikle gevşek yapılı ve hafif olup rengi beyazdan açık bej, gri ve koyu kahverengiye kadar değişebilir. Absorpsiyon kabiliyeti yüksek olup ağırlığının üç katı su emebilir. En önemli özelliklerinden birisi de % 85-90 lık bir porozite sağlayan yüksek gözenekli yapısıdır (Şekil 5).



Şekil 5. Diatomitlerden görünümler

1.3.2. Yapay Hafif Agregalar

1.3.2.1. Genleştirilmiş Killer, Şistler

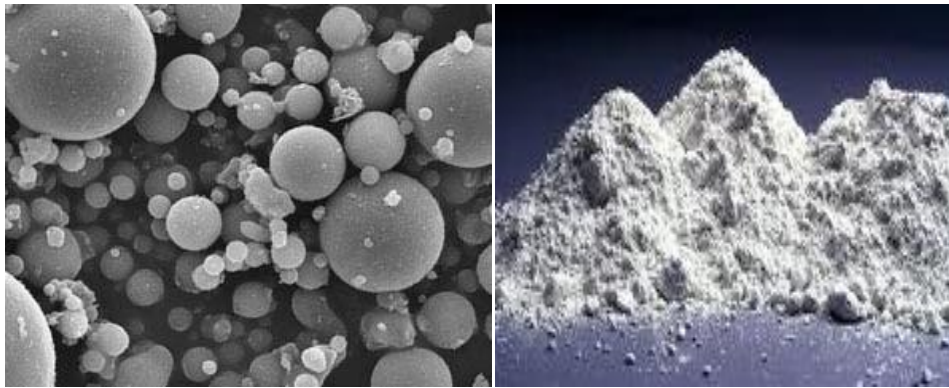
Bunlar, kimyasal maddeler kullanılarak yüksek sıcaklıklarda özel fırınlarda pişirilmek suretiyle elde edilmektedir. Döner fırında üretilen genleştirilmiş kil şist agregalarının birim kütleleri genellikle $600-800 \text{ kg/m}^3$ civarındadır. Üretilen betonun birim kütlesi ise $1400-1800 \text{ kg/m}^3$ arasındadır (Şekil 6).



Şekil 6. Genleştirilmiş kil örnekleri

1.3.2.2. Uçucu Küller

Termoelektrik santral ve fabrika bacalarından çıkan kömür, fuel-oil küllerinin taneli hale getirilmiş şeklidir. Bunlarla kuru birim kütlesi 1750 kg/m^3 olan taşıyıcı betonlar üretilmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. Uçucu küller

1.3.2.3. Vermikülit

Vermikülit bir mika türüdür. Bunlar, 650-1000°C'ye kadar ısıtıldığında genişerek hafif agrega üretimine elverişli duruma gelmektedir. Vermikülit'in birim kütlesi yalnızca 60-130 kg/m³ arasında olduğundan taşıyıcı beton üretimine elverişli değildir(Şekil 8).



Şekil 8. Vermikülit

1.3.2.4. Genleştirilmiş Perlit

Perlit erime derecesine yakın ısıtıldığında genişir ve çok hafif bir duruma gelir. 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 genişerek camsı tanelerden oluşan bir köpük agregasına dönüşmektedir. Bu ürüne genişmiş perlit denilmektedir Bunlarla, tek başına, taşıyıcı beton üretilememekle beraber, yalıtım betonu olarak kullanılmaktadır (Şekil 9). Genleştirilmiş perlit ile ham perlit farklı fiziksel özellikler göstermektedir. Ham perlitin fiziksel özellikleri Tablo 2' de, genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri ise Tablo 3' de verilmektedir (DPT, 2001; Çiçek, 2002). Bu tablolardan da görüldüğü gibi, ham perlit, genleştirildikten sonra özgül kütlesi ortalama olarak 40 kat kadar azalmaktadır. Perlitin genel olarak kimyasal bileşimi Tablo 4' de verilmiştir (DPT, 2001; Çiçek, 2002; TS 3681, 1982).

Perlitin başlıca kullanım alanları inşaat, tarım ve sanayi sektörleridir. Dünyada perlitin %35'i sıva agregası olarak, %25'i beton agregası olarak, %23'ü filtre malzemesi yapımında, %8'i yalıtım malzemesi yapımında, %4'ü tarımda ve %5'i diğer alanlarda kullanılmaktadır (MTA, 1985). Genleştirilmiş perlitin en büyük kullanım alanı yapı sektörüdür. Perlitin kullanım nedenleri, hafiflik, ısı ve ses yalıtımı, ateşe dayanıklılık, kimyasal etkenlerden etkilenmeme ve uygulama kolaylığı olarak sayılabilir.



Şekil 9. Genleştirilmiş perlit

Tablo 2. Ham perlitin fiziksel özellikleri

Renk	Siyah ve grinin tonları
Özgül kütle (kg/m^3)	2200-2400
Birim kütle (kg/m^3)	950-2700
Yumuşama noktası ($^{\circ}\text{C}$)	871-1093
Erime noktası ($^{\circ}\text{C}$)	1260-1343
Özgül ısı ($\text{kcal/kg } ^{\circ}\text{C}$)	0.20-0.23
Sertlik (Mohs)	5-6

Tablo 3. Genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri

Renk	Beyaz
Özgül ağırlık (kg/m ³)	55-300
Birim ağırlık (kg/m ³)	30-250
Erime noktası (C ^o)	1300
Isıl iletkenliği (W/mK)	0.04
Isıl genleşme (m/m K)	4x10 ⁻⁶ -11x10 ⁻⁶
Ateşe karşı dayanım	Yanmaz
Ses yutma	0.60

Tablo 4. Perlitin yaklaşık kimyasal analizi

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

1.3.2.5. Yüksek Fırın Cürufu

Bunlar, erimiş ve genişletilmiş yüksek fırın cürufunun ani soğumasıyla oluşan, sünger taşlarına benzer yapıda kayaçlardır. Beton üretiminde kullanılan yüksek fırın cüruflarının birim kütlesi, soğutma işlemine bağlı olarak $300-110 \text{ kg/m}^3$ arasında ve bunlarla üretilen betonun birim kütlesi ise $950-1750 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir (Şekil 10).



Şekil 10. Yüksek fırın cürufu

1.3.2.6. Kömür Cürufları

Bu cüruflar yüksek sıcaklıkta yanmış, yanıcı maddeleri az ve zararlı madde sınırları standartlarca belirlenmiş kömür artıklarıdır (Şekil 11).



Şekil 11. Kömür cürufları

1.3.3. Organik Kökenli Hafif Agregalar

1.3.3.1. Hızır Talaşı gibi Ahşap Parçacıklar

Hızır talaşları gibi ahşap parçacıkları hafif agrega olarak kullanılabilir (Şekil 12). Yan ürün olduklarından bunlarla üretilen betonlar oldukça ekonomik olmaktadır. Ancak, hafif beton üretiminde kullanılanlarda "tanen" esasında gibi, çimentoya zararlı etki eden maddelerin bulundurulmamasıdır.

Diğer hafif betonlarda olduğu gibi bunlarla üretilen betonların basınç dayanımlarını da artırmak için ahşap agregaların bir kısmı geleneksel agregayla değiştirmek gerekmektedir. Bu tür betonların birim kütleleri $600-1600 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir.



Şekil 12. Hızır talaşı

1.3.3.2. Ahşap Yongası ve Lifleri

Bu agregalarla üretilen betonların birim kütleleri $400-500 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir. Bu betonlar genellikle plak üretiminde kullanılmaktadır (Şekil 13).



Şekil 13. Ahşap yongası ve lifleri

1.3.3.3. Hububat Taneleri ve Meyva Çekirdekleri

Hububat taneleri hurma çekirdeği gibi meyva çekirdeklerinin agrega olarak kullanılmasıyla ya da bunlarla birlikte geleneksel agregalarla üretilen hafif betonların birim kütleleri $1600-1800 \text{ kg/m}^3$ arasında, basınç dayanımı ise $12-20 \text{ MPa}$ arasında değişmektedir (Şekil 14) (Arıoğlu vd., 2006). Burada hafif beton üretiminde keten, şeker kamışı, buğday, arpa ve pirinç sapları gibi başka organik kökenli agregaların da kullanıldığını belirtmek uygun olmaktadır.



Şekil 14. Hurma çekirdeği ve şeker kamışı sapı

1.4. Hafif Beton Üretimi ve Kullanım Alanları

1.4.1. Hafif Betonun Üretimi

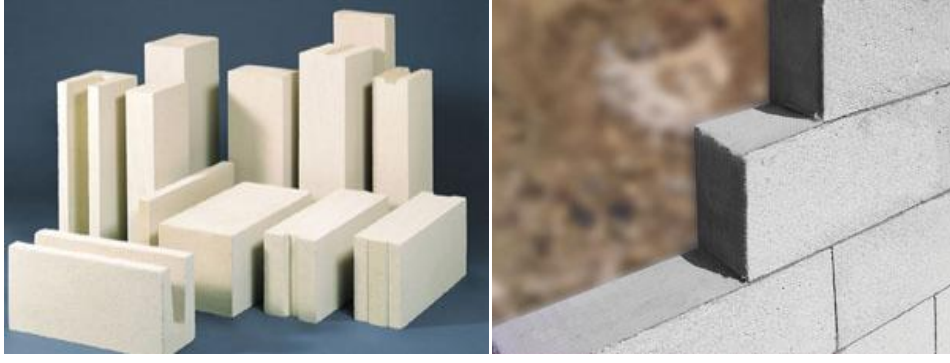
Hafif beton bağlayıcı çimento hamurunun geliştirilmesi suretiyle (havalı, hücreli köpük ve/ yada gaz beton) ya da sadece geleneksel iri agrega kullanılarak elde üretilen gibi, beton bileşiminde geleneksel agrega yerine tamamen hafif veya kısmen hafif agrega kullanılarak da üretilmektedir. Bağlayıcı çimento hamurunun geliştirme tekniği bu hamur içinde gaz kabarcıkları oluşturmaktan ibarettir. Bu amaçla karma suyu miktarını artırmadan taze betonun işlenebilirliğini artıran, plastikleştirici katkı maddeleri kullanılmaktadır. Taşıyıcı hafif beton için tek başına kullanılabilen yöntem ise, beton üretiminde genelde hafif agrega kullanılmaktan ibarettir (Durmuş, 1996).

1.4.1.1. Taşıyıcı Olmayan Hafif Betonlar

Günümüzde yaygın olarak üretilen hafif betonlar, taşıyıcı özelliği olmayan, bölme duvarı, kaplama ve yalıtım işleri için kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları gaz beton, köpük beton vb. dir.

Gaz beton, beton bileşiminde kimyasal katkıları kullanılmak suretiyle, meydana getirilen gaz kabarcıkları yardımıyla üretilen boşluk oranı yüksek betonlardır (Şekil 15). Bu tür betonların bileşiminde, katkı maddesi olarak genellikle ince öğütülmüş alüminyum tozları kullanılmaktadır. Bu toz beton bileşimine, çimento ağırlığının %0.2 ' si kadar atılmaktadır. Gaz betonun üretimi, çimento ile bu tozun karıştırılmasında hidrojen kabarcıkları oluşmakta ve bütün kütlelerin şişerek hücresel yapıda katılaşmasının tamamlanmasıyla oluşmaktadır. Bu tür betonların üretiminde alüminyum tozu yerine, çinko ve magnezyum tozu da kullanılabilir (Durmuş, 1996; Neville,1996; Sükan, 1966).

Gaz beton üretiminde agrega olarak silisli kum, bitümlü şist gib agregalar kullanılmaktadır. Bu betonlar, sertleşmesi otoglava hızlandırılarak oluşan gazın kaçması önlenmesi taktirde rötresini de tamamladıundan , daha sonra rötre yapmaamktadır. Birim kütleleri 800-1400 kg/m³ arasında olan bu betonların basınç dayanımları ise 2-6 MPa arasındadır.



Şekil 15. Gaz beton elemanlar

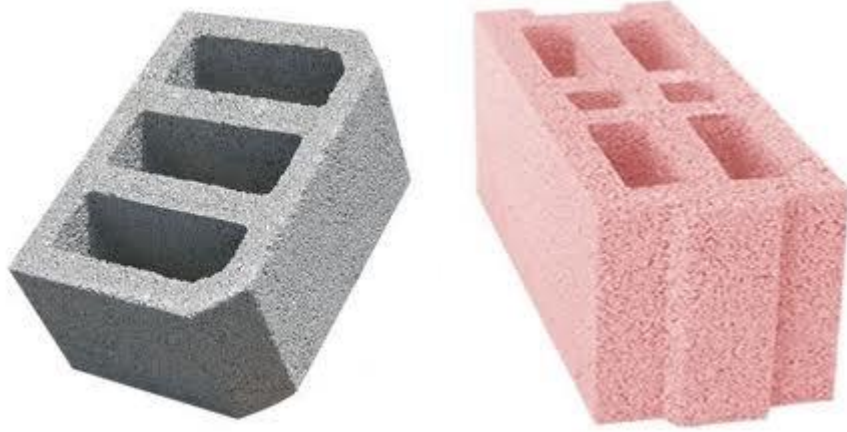
Taşıyıcı olmayan hafif betonlardan bir diğeri ise, köpük betonlardır. Bu betonda, karma suyuna köpük yapan, katkı maddeleri ilave edilerek, hava kabarcıkları beton içinde muafaza edilmek suretiyle üretilen betondur(Şekil 16). Bu yöntem, birim kütleleri 1250-1600 kg/m³ olan betonların üretiminde kullanılmaktadır. Daha düşük birim kütleleri beton yapılmak isteniyorsa köpüğü, kendisini oluşturan maddeyi iyice karıştırarak hava enjekte etmek suretiyle üretmek gerekmektedir (Durmuş, 1996; Durmuş, 1988).



Şekil 16. Köpük beton üretimi

Beton bileşiminde, yalnızca iri agrega kullanılarak da taşıyıcı olmayan hafif beton üretilabilmektedir. Bu betonların üretiminde, agrega olarak , geleneksel çakıl, karma taş, yüksek fırın cürufu ya da pomza, perlit gibi herhangi bir hafif agrega da kullanılabilir (Şekil 17).

Geleneksel agreganın iri kısmı kullanılarak üretilen betonda, agrega tane boyutunun 10 mm- 20 mm arasında olması ve bu sınıf agreganın 10 mm 'lik elekten geçen kısmının toplam kütleinin %5'i geçmemesi uygun olmaktadır (Durmuş, 1996). Bu betonlar kalıplara sıkıştırılmadan yerleştirilmektedir.



Şekil 17. İri hafif agregalar kullanılarak üretilen bloklar

1.4.1.2. Taşıyıcı Hafif Betonlar

1.4.1.2.1. Normal Dayanımlı Hafif Betonlar

Taşıyıcı hafif betonlar çeşitli ülke standartlarında farklı tanımlanmaktadır. Taşıyıcı hafif betonların standartlara göre tanımlanan kuru birim kütleleri ve 28 günlük merkezi basınç dayanımları Tablo 5’ de verilmiştir.

Tablo 5. Ülke standartlarına göre tanımlanan taşıyıcı hafif betonların kuru birim kütleleri ve basınç dayanımları

Standartlar	Kuru birim kütlesi (kg/m^3)	28 günlük standart silindir basınç dayanımı (MPa)
DIN 1045	≤ 2000	≥ 16
ASTM C 330	≤ 1840	≥ 17
CEB-FIB	≤ 1900	≥ 16
TS 2511	≤ 1900	≥ 16

Tablo 2’ den görüldüğü gibi, DIN 1045’ de kuru birim kütlesi 2000 kg/m^3 den az ve 28 günlük standart silindir basınç dayanımı en az 16 MPa, ASTM C 330’ da birim kütlesi 1840 kg/m^3 den az ve 28 günlük standart silindir basınç dayanımı en az 17 MPa, TS 2511 ve CEB-FIB de ise, kuru birim kütlesi 1900 kg/m^3 den az ve 28 günlük standart silindir

basınç dayanımı en az 16 MPa olan betonlar taşıyıcı hafif beton diye tanımlanmaktadır. Bununla birlikte TS 1114 EN 13055-1, taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılacak agregaların gevşek birim kütlelerinin 1200 kg/m^3 ü geçmemesi istenmektedir.

Taşıyıcı hafif betonlar için verilen dayanım alt sınırları, yukarıda verilen tablodan da görüldüğü gibi, 16 MPa dır. Ancak 1998 yılında yürürlüğe giren ve 2007' de revize edilerek halen yürürlükte bulunan Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelikte, deprem bölgelerinde yapılacak tüm betonarme binalarda C20 dayanım sınıfından daha düşük beton kullanılmasına izin verilmemektedir. Bu nedenle de, taşıyıcı olarak üretilecek hafif betonun da en az C20 sınıfında olması gerekmektedir.

1.4.1.2.2. Yüksek Dayanımlı Hafif Betonlar

Yüksek dayanımlı hafif betonlar bir çok standartta en düşük beton basınç dayanımı 50 MPa olan betonlar olarak tanımlanmaktadır. Bilindiği gibi yüksek dayanımlı betonda en önemli faktör iri agreganın dayanımıdır. Dolayısıyla da hafif agrega kullanarak yüksek dayanımlı hafif beton üretimi bir sürpriz olarak kabul edilmektedir. Zira, hafif agregalar boşluklu ve kolayca kırılabilir bir yapıya sahiptir (Aitcin, 1998). Ancak teknolojinin gelişmesiyle günümüzde birim hacim kütlesi 2000 kg/m^3 civarında olan ve basınç dayanımı 50 MPa' dan daha büyük olan hafif betonu üretmek mümkün olmaktadır (Hoff 1990). Malhotra (1990) ise yaptığı çalışmada, basınç dayanımı 50-60 MPa arasında değişen yüksek dayanımlı hafif beton üretiminin mümkün olduğunu ve bu betonlarda da basınç dayanımının 100 MPa' ya kadar ulaşabileceğini belirtmektedir. Bununla birlikte Berra and Ferrara (1990), Wasserman and Bentur (1996) gibi araştırmacılar da basınç dayanımı 60 MPa olan yüksek dayanımlı hafif betonun kolaylıkla üretilebileceğini, ancak bunun için beton üretiminde mutlaka uygun hafif agrega kullanımının zorunlu olduğunu belirtmişlerdir.

Dünya nüfusunun artması ve buna bağlı olarak da çok katlı yapıların inşası zorunlu hale gelmiştir. Bu nedenle de bu yapılarda deprem gibi yatay yüklerin etkisinin azaltılması amacıyla yüksek dayanımlı hafif beton kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyacın karşılanması için son yıllarda yüksek dayanımlı hafif beton üretimi konusunda çalışmalar hızlanmıştır (Chandra ve Berntsson, 2003; Weber ve Reinhardt, 1997; Wilson ve Malhotra, 1998; Zhang ve Gjorv, 1991).

1.4.2. Hafif Betonların Kullanım Alanları ve Özellikleri

1.4.2.1 Hafif Betonun Kullanım Alanları

Hafif betonlar daha önce de belirtildiği gibi, sanayileşmiş ülkelerin bir çoğunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle 1950 ' li yıllardan sonra köprü tabliyeleri ve yapı çerçevelerinin onarımında hafif beton kullanılmıştır (Follett, 1985; Weigler, 1988; Seyhan, 1977). Özellikle de taşıyıcı hafif betonla inşa edilen yapılardan Londra' da NLA, Guy's Hospital, National Westminster Bank ve New York John F. Kennedy International Airport' da TWA binasının kabuk çatısı taşıyıcı hafif beton kullanımına somut birer örnektir. Bunlardan NLA binası ve Guy's Hospital binası örnek olarak Şekil 18 ' de verilmektedir.



Şekil 18. Londra' da hafif betonla inşa edilen NLA binası ve Guy's Hospital

Hafif beton uygulamaları genellikle, bölme duvarlarda, tek katlı, iki ve üç katlı prefabrik konutların inşasında duvar ve döşeme panel elemanlar olarak kullanılabilir (Şekil 19). Bununla birlikte mimari amaçla da hafif beton bloklar kullanılmaktadır (Şekil 20). Bundan başka gelişmiş ülkelerde, gürültü kirliliğinin yoğun olduğu havaalanları ve otoyolların çevreden izole edilmesi amacıyla yapılan çevre duvarlarının inşasında, konser, tiyatro, disko, sinema, gibi akustiğin ve ses yalıtımının ön plana çıktığı sosyal ve kültürel mekânların inşasında da yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 19. Hafif beton bloklarla yapılan yapılar



Şekil 20. Hafif beton uygulamaları

1.4.2.2. Hafif Betonun Özellikleri

Hafif betonun, daha önce de belirtildiği gibi, kullanım yeri ve amacına bağlı olarak birim kütleleri büyük değişiklikler göstermektedir. Buna bağlı olarak da özellikleri de çok farklı olmaktadır. Bu nedenle burada özetlenen özellikler daha çok taşıyıcı pano, beton ve betonarme prefabrike yapı, yerinde döküm beton ve betonarme yapı gibi yapılarda kullanılan taşıyıcı hafif betonlara ilişkindir.

- Taşıyıcı panolarda kullanılan hafif betonların ortalama birim kütleleri 1100 kg/m^3 mertebesindedir. Bu tür hafif betonları dayanımları 16 MPa ' ya ulaşabilmektedir. Hafif betonların taşıyıcı panolarda kullanılmasında sağlanan asıl yarar ısı iletkenliğinin düşük olmasıdır (yaklaşık $0.30 \text{ kcal/h/}^\circ\text{C}$). Konut tipi betonarme yapılarda kullanılan hafif betonların birim kütleleri 1500 kg/m^3 mertebesinde olup, dayanımları ise 40 MPa ' ya kadar ulaşabilmektedir. Sanat yapılarında ise bu kütle ortalama 1800 kg/m^3 olup, dayanımı 50 MPa ' ya varabilmektedir (Durmuş, 1988; Neville, 1996).

- Dinamik etkiler altında davranışı: Dalga yayılma hızı geleneksel betonunkinden yaklaşık %25 daha düşüktür. Titreşimleri daha az iletir. Şok etkilerini daha iyi absorbe eder. Titreşim sönüm katsayısı daha iyidir (Hüsem, 1995; Taşdemir, 1982).

- Sıcaklık genleşme katsayısı ortalama olarak geleneksel betonunkinden %25 daha küçüktür (Neville, 1996). Dolayısıyla da hafif beton sıcaklık değişiminden daha az etkilenir. Bu da önemli derecede farklı sıcaklık etkisinde kalacak olan hiperstatik yapılarda hafif beton kullanımının yararlı olacağını göstermektedir.

- Isı iletkenliği, birim hacim kütle ve su içeriğine bağlı olarak değişmekle beraber, geleneksel betonunkinden çok düşüktür (Hüsem ve Durmuş, 1993).

- Isı iletkenlik ve genleşme katsayıları düşük olduğundan yangına karşı dayanımları geleneksel betonlara göre daha yüksektir. Örneğin 12 cm kalınlıklı bir döşeme plağının belirli bir yangına karşı dayanımı iki saat olduğu halde aynı kalınlıktaki hafif beton plağının aynı yangına karşı dayanım süresinin dört saat olduğu görülmüştür (Ergen, 1993). Aynı şekilde 650 °C de geleneksel betonun dayanımında %45 mertebesinde bir düşüş olmasına rağmen hafif betonun aynı sıcaklıkta dayanımındaki düşüş %10 mertebesinde dir.

- Clarke (1993) ' de, yangın felaketi yaşayan büyük bir projede metal kalıp üzerine dökülen sadece 130 mm kalınlığındaki (alt üst donatı aralığı 70 mm) hafif agregalı beton döşemenin bütünlüğünü koruduğu, taşıyıcı çelik kirişlerin ise 900 mm ' ye kadar sehim yaptığını belirtilmiştir. Bununla birlikte aynı kaynakta, hafif betonun yangını bir katta hapsettiğini dolayısıyla daha kötü sonuçların oluşmasına meydan vermediği de belirtilmektedir.

- Önemli miktarda su emmesine rağmen donma olayına karşı dayanımı yüksektir. Bu durum suya doygun olmayan çok sayıda gözenegin buzun genleşmesine imkân vermesinden ileri gelmektedir. Bu tür betonlar, ısı iletkenlikleri düşük olduğundan, kışın beton dökümü içinde uygundur. Çünkü bu betonlar hidrasyondan doğan ısıyı geleneksel betona nazaran daha uzun süre muhafaza edebilmektedir (Clarke, 1993).

- İngiltere'de gerçekleştirilen deneylere göre ses yalıtkanlıkları, bu özelik genelde doğrudan malzemenin birim hacim kütle sine bağlı olmakla beraber yaklaşık olarak aynı kalınlıktaki geleneksel betondaki kadardır (Brachet vd., 1976).

- Korozyona karşı dayanımı en az geleneksel betonunki kadardır. Özellikle deniz suyuna karşı dayanımları daha yüksektir (Durmuş vd, 1996; Brachet vd., 1976).

- Çekme dayanımı geleneksel betonunki kadardır. Bununla beraber geleneksel betonunkinde olduğu gibi, bu dayanım da önemli derecede değişim göstermekte ve kuru atmosferde çok küçük değerler almaktadır (Shideler, 1957).

- Başlangıç elastisite modülü geleneksel betonunkinin %50-%70' i kadardır (Klink, 1985). Bu da hafif betonarme elemanların, aynı yük altında, yerdeğiştirmelerinin geleneksel betonarme elemanlarından çok daha büyük olmasını gerektirmektedir. Örneğın, kiriş sehimlerinde durum böyledir.

- Rötreleri geleneksel betonlarından yaklaşık %30 daha fazladır. Özellikle öngerilme kayıplarının hesabında bu durumu dikkate almak gerekmektedir. Ancak agregaların daha fazla şekildeğıştirebilmeleri (elastisite modülleri düşük, agregaların sıkışabilirlikleri yüksek) sayesinde rötrenin etkisiyle çatlama ihtimali geleneksel betona göre daha azdır (Durmuş, 1988).

- Sünme şekildeğıştirmesi, konut tipi yapılarda, geleneksel betona göre %30-%50, sanat yapılarında ise %10- %30 daha büyüktür. Bu durumda da öngerilme kaybı artmış olmaktadır (Hüsem ve Durmuş, 1993).

- Aşınmaya karşı dayanıklılıkları geleneksel betonunkinden daha düşüktür.

- Donatı-beton aderansı: Aderans konusunda CEB düşey konumdaki donatılar için geleneksel betondaki kenetlenme boyunu, yatay konumdaki donatılar için ise; dişli donatılarda kullanılan kenetlenme boyunun 1,2 katının, düz yüzeyli donatı çubuklarında ise 1,5 katının kullanılmasını önermektedir. Aderansta meydana gelebileceğı öngörülen bu azalma miktarı beton dökümünde boşluk oluşma ihtimalinin, geleneksel betona göre, daha yüksek olabileceğı endişesinden kaynaklanmaktadır. Oysa bu, önerinin tüm hafif betonlara genellenmesi doğru olmamaktadır (Hüsem, 1995).

1.4.3. Hafif Betonların Üstünlük ve Sakıncaları

Hafif betonların üstünlükleri yanında doğal olarak bazı sakıncaları da bulunmaktadır. Başlıca üstünlükleri;

- a) Eğilme etkisindeki elemanlarda donatı ekonomisi sağlamaları,
- b) Kalıp payandası gibi geçici taşıyıcılar ile mesnet ve temeller gibi daimi taşıyıcı elemanlarda da ekonomik olmaları,
- c) Isı izolasyonu ve ses yalıtkanlıklarının daha iyi olması (Örneğın, 2 cm kalınlığındaki bir perlit sıvanın ısı izolasyonu, 15 cm kalınlığındaki bir tuğla duvarınkine eşdeğer olabilmektedir).
- d) Prefabrike yapı elemanlarının imalat koşullarının geleneksel betonla üretilenlere göre daha uygun olması şeklinde,

bazı sakıncaları ise;

- a) Mekanik dayanımlarının genellikle geleneksel betonunkinden daha düşük olması,
- b) Ani ve geciken şekildeğiştirebilirliklerinin daha büyük olması,
- c) Üretim ve yerleştirilmesinde daha fazla özen istemesi,
- d) Rutubete karşı yalıtıma ihtiyaç göstermesi, şeklinde sıralanabilmektedir.

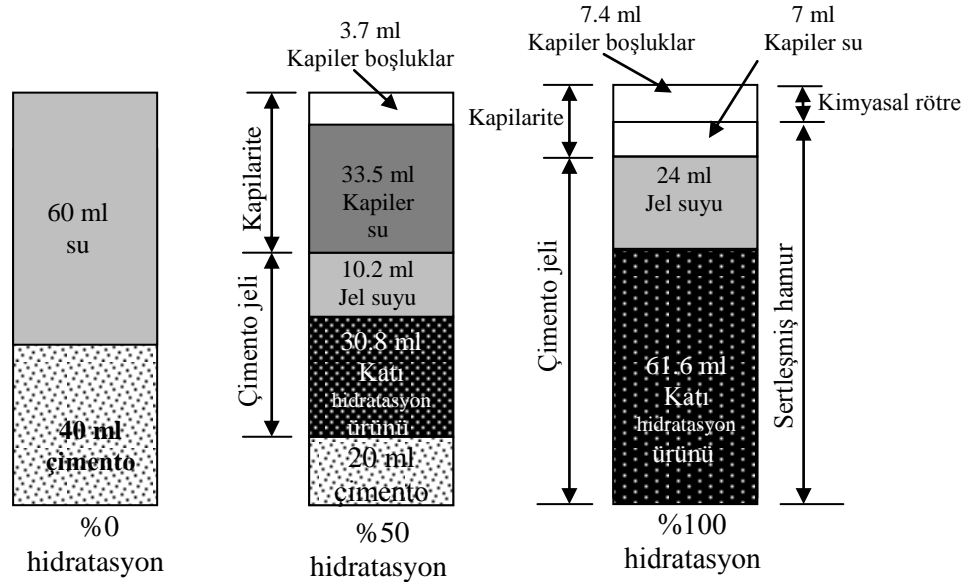
1.5. Hafif Betonlarda Kürün Önemi ve Uygulanabilecek Kür Yöntemleri

Herhangi bir amaç için üretilen taze beton, kalıplarına yerleştirilip sıkılandıktan sonra sertleşene kadar ancak uygun bir kür yönteminin yeteri kadar uygulanmasıyla projesinde öngörülen dayanıma ulaşabilmektedir. Bu da üretilen betonun sertleşerek dayanım kazanmasında kürün önemini ortaya koymaktadır. Betonda kür uygulamasının eksikliği, dayanımı olumsuz yönde etkilediği gibi, dayanıklılığı da etkilemektedir.

Günümüzde, çimentoların daha çabuk dayanım kazanması nedeniyle kalıp alma sürelerini kısaltmaları, betonların daha düşük su/çimento oranı kullanılarak üretilmeleri nedeniyle kendisini hidrasyon ile kurutmaları ve özellikle hafif beton üretiminde agrega olarak genişletilmiş perlit kullanılması ve uçucu kül gibi mineral katkıların da reaksiyon hızını düşürmesi nedenleriyle kür uygulanması daha fazla önem kazanmaktadır. Kür, betonlarda geçirgenlik özeliği üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Yetersiz kür uygulamalarında beton yüzeyinin önemli ölçüde zayıflaması nedeniyle geçirgenlik artmaktadır. Betonda kür uygulanmasının önemine rağmen hala birçok ülkede kür gereğinden daha kısa sürede yada hiç uygulanmamaktadır (Meeks ve Cario, 1999). Bu da sertleşmiş betonların istenilen kalitede olmadığını dolayısıyla da kendisinden beklenen görevi yeterince yerine getiremeyeceğini göstermektedir. Bu nedenle betonların kürünün de en az diğer aşamaların olduğu kadar, denetim altında olması gerekmektedir. Zira, bir yapının inşasında uygun kürün seçilmesi oldukça zordur. Bunun nedeni, standartlarda kür uygulanmasının gerektiği yazılmasına rağmen kür metotlarına yeteri kadar değinilmemesi, özellikle hafif betonlar için nasıl bir kür uygulanmasının belli olmamasından kaynaklanmaktadır.

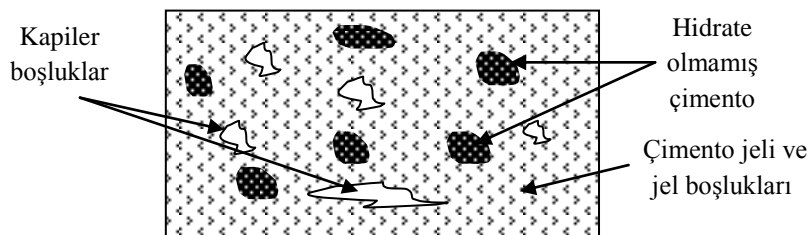
Hafif, geleneksel ve yüksek performanslı betonlarda yetersiz kür uygulanmasının bu betonlarla inşa edilen yapının ömrü boyunca ondan beklenen performansı gösteremeyeceği bu nedenle de bu betonun kalitesinden söz etmenin uygun olmayacağı

açıktır. Betonlara kür uygulamasının öneminin daha iyi anlaşılabilmesi için bağlayıcı olarak kullanılan çimento hamurunun yapısının bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle su/çimento oranı 0.48 olan bir çimento hamurunun hacimsel oranlarının şematik gösterilimi Şekil 21' de verilmektedir (Neville, 1996).



Şekil 21. Su/çimento oranı 0.48 olan bir çimento hamurunun hacimsel oranları

Bu şekilden de görüldüğü gibi, hidratasyon tamamlandığında sertleşmiş çimento hamuru, katı parçacıklar, jel suyu, kapiler su ve kapiler boşluklardan oluşmaktadır. Kapiler su katı hidratasyon ürünlerinin oluşmasında ve jel boşluklarının dolmasında tüketilmekte ve sertleşmiş çimento hamuru, taze çimento hamuruna nazaran, hacminde kapiler boşluklarda oluşan ve kimyasal rötre olarak adlandırılan bir azalma oluşmaktadır. Sertleşmiş çimento hamurundaki çimento jeli, kapiler boşluklar hidratasyona girmemiş çimento kısımları Şekil 22' de şematik olarak gösterilmektedir(Neville, 1996).



Şekil 22. Sertleşmiş çimento hamurundaki çimento jeli, kapiler boşluklar ve hidratasyona girmemiş kısımların şematik gösterilimi

Şekilden de görüldüğü gibi jel boşlukları çimento jelinin katı parçacıkları arasında karışmış küçük boşluklar olarak tanımlanan kapiler boşluklardan oldukça farklıdır. Çimento, çimento hamuru içinde bulunan kapiler boşluklardaki suyu hidrasyon yapabilmeye için kullanmaktadır. Bu boşluklarda yeterince su olması halinde hidrasyon devam edebilmekte, dolayısıyla da betonun dayanımını sağlıklı bir şekilde kazanabilmesi için bu boşlukların hidrasyon süresince doymuş olması gerekmektedir. Bu da başlangıçtaki su/çimento oranının yeterli olduğu durumlarda suyun buharlaşmasının engellenmesiyle, başlangıçtaki su/çimento oranının yetersiz olduğu durumlarda da bu suyun dışardan herhangi bir yöntemle verilmesiyle gerçekleşebilmektedir. Zira, hidrasyon süresince kimyasal reaksiyonlarla çimento jeli içindeki su azalacak, bir süre sonra da gerekli su yüzeylerden alınmaya çalışılacaktır. Eğer bu yüzeylerin doymuşluğu sağlanamazsa çimento hamurunun nemliliği azalacaktır. Bu azalma %80' in altına düştüğünde hidrasyon oranı yavaşlamakta, %30' un altına indiğinde de en düşük düzeye düşmektedir.

Özetle, arzulanan özelliklerde bir beton üretmek çimentonun hidrasyonuna bağlıdır. Hidrasyon betonun temel özellikleri olan dayanım ve dayanıklılığı kazandıran en önemli etkidir. Hidrasyon hızı beton kanşımı tamamlandığı anda en yüksek değerine ulaşmakta ve bu hız betonun yaşı ilerledikçe düşmekte, bazı durumlarda da hidrasyon yıllarca sürebilmektedir. Hidrasyonun devam edebilmesi için beton içindeki kapiler boşlukların su ile dolmuş olması gerekmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi kapiler boşluklardaki su azaldıkça betonun mekanik özelliklerinin gelişimi de durmaktadır. Bu nedenle betonların dayanımlarını kazanana kadar kürünün yapılması dayanım ve dayanıklılık yönünden son derece önemli olmaktadır.

Betonda aranan dayanım, dayanıklılık ve ekonominin sağlanabilmesi, daha önce de belirtildiği gibi, betonu oluşturan agrega, çimento, su ve kimyasal katkı maddelerinin, ayrı ayrı standartlarına uygun özellikte olmaları, standardına uygun hesaplanarak birleştirilmeleri ve standardına uygun olarak kalıplarına yerleştirilip sıkılması ile kürünün uygun bir yöntemle yapılmasıyla mümkündür.

Kalıplarına yerleştirilip sıkılan taze betonda su içeriği, çimentonun hidrasyonunu tamamlayabilmesi için gerekli olan sudan (çimento ağırlığının yaklaşık %25-30'u) işlenebilirliği iyileştirmek amacıyla, daha fazladır. Çimentonun hidrasyonu sonucu açığa çıkan ısı ve ortam koşulları nedeniyle bu su buharlaşabilmekte, hatta gerekli su kaybolarak hidrasyon durmaktadır. Bu nedenle betonun kürü su kaybını zararsız düzeyde tutarak

hidratasyonun hatasız bir şekilde tamamlanabilmesini sağlamaktadır.

Betonda uygulanacak kür yönteminin seçimi ve süresi, taze betonun özelliklerine bağlı olduğu gibi betonun döküldüğü ortam koşullarına da bağlıdır. Standartlar normal ve anormal hava koşullarında dökülen betonların kürü ile ilgili alınması gereken bazı önlemleri belirtmektedir. Normal hava koşullarında (+5°C ile +30°C) dökülen betonlar için; ıslak çuvallarla kapatmak, polietilen örtü uygulamak beton kür malzemesi veya püskürterek koruyucu tabaka oluşturmak veya sulamak gibi yöntemlerden biri veya birkaçı uygulanabilmektedir (TS 1247, 1984).

Betonun ıslak çuvallarla veya polietilen örtüyle kapatarak kürünün yapılması, betonun yüzeylerinin güneş veya rüzgar etkisiyle ani kurummasını engellediğinden etkili ve güvenli bir kür yöntemidir. Bu yöntemin uygulanmasında yüzeyler çuval veya benzeri su emici ve su tutucu bir malzeme ile örtülmektedir. Beton yüzeyine serilen çuvallar sürekli ıslak tutulmalıdır. Kür uygulamasına 18°C sıcaklıkta ve %100 bağıl nemde 7 günlük yaşa eşdeğer beton dayanımına ulaşıncaya kadar sürdürülmelidir. Bu süre beton üretiminde kullanılan çimento türüne de bağlıdır. Örneğin bu süre, portland çimentosu kullanılmış olan betonda 14 gün, puzolanlı çimento kullanılmış olan betonlarda ise yaklaşık 21 gün olmaktadır (Neville, 1996; Meeks ve Cario; TS 1247,1984). Ancak bu süre hafif betonlar için bu betonların, nihai dayanıma daha uzun sürede ulaştıklarından, daha fazla olmaktadır.

Taze beton yerine yerleştirildikten sonraki ilk 3 ila 6 saat arasında çevreye açık yüzeylerindeki gözeneklerden su kaybını önlemek amacıyla, yüzeylere uygun çözelti veya emülsiyon püskürterek koruyucu bir tabaka oluşturmak suretiyle de kür uygulanabilmektedir.

Kiriş, kolon ve düşey yüzeyleri, kurumaya engel olacak şekilde, aralıklarla sulamakla da kür uygulanabilmektedir. Bu tür kür uygulamalarında yüzeyden buharlaşmayla soğuma olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Çünkü nemliliğin hızlı bir şekilde kaybı kürde ters bir etki yaparak betondan su buharlaşma hızını arttırmaktadır. Kolon, kiriş ve perdeler gibi düşey elemanların polietilen örtü kapatarak yada yüksek etkili bir kür malzemesi püskürtülmesiyle kürlerinin yapılması daha uygun olmaktadır.

Yerine yerleştirilmiş taze betonun kürü, anormal hava şartları olarak tanımlanan, sağanak halinde yağış, şiddetli rüzgar, aşırı soğuk ve don (+5°C'nin altı), aşırı sıcaklık yükselmesi (+30°C'nin üstü) durumlarında da uygun yöntemler kullanılarak yapılmalıdır(TS 1284, 1989). Hava sıcaklığının +10°C'nin altında bulunduğu sürelerde, hidratasyon için tehlikeli olabilecek bir kuruma genellikle söz konusu olmamaktadır.

Ancak taze betonda fazla su bulunduğundan donması kolaylaşmaktadır. Betonun 4 MPa'lık bir basınç dayanımına ulaşması halinde su içeriği de don sebebi ile bir zarar meydana getirebilecek seviyenin altına inmiş olmaktadır. Bu nedenle beton söz konusu dayanıma ulaşıncaya kadar uygun bir yöntemle korunmalıdır.

Soğuk havalarda koruma ve kür yöntemlerini seçerken korunma ve kürün maliyeti, seçilen yöntemle sağlanabilecek beton kalitesi ve yapı emniyetine oranla ikinci planda düşünülmelidir.

Aşağıda kür yöntemlerinin bazılarıyla, bunların avantaj ve dezavantajları birlikte verilmektedir.

➤ Betonda kür:

- Su ile çimentonun kimyasal reaksiyonu için gerekli zaman kadar olmalı
- Sertleşme sağlanmalı
- Taze beton 14 günlük kürden sonra potansiyel dayanımının %40'ını tamamlar.

➤ Kür uygulanması:

- Bol su
- Betonu kurutmamak
- Kuru beton tüm reaksiyonları duran ölü beton olduğu bilinmelidir.
- Beton kuruduktan sonra tekrar reaksiyona başlamaz.
- Sıcaklık makul düzeyde tutulmalıdır.
- Uçucu kül gibi mineral katkılı betonlar daha uzun kür süresine ihtiyaç duyarlar

➤ Betonların küründe sıcaklık etkisi:

- Yüksek sıcaklık daha hızlı kür yapılmasına imkan verir.
- Kür için en iyi sıcaklık oda sıcaklığıdır.
- Eğer beton ilk 24 saat içinde donarsa, bir daha asla orijinal özelliklerine dönemez.
- 50 °C'yi geçen sıcaklıklar, çimentonun çok hızlı dayanım kazanmasından dolayı ciddi zararlar verirler.
- Hızlandırılmış kür betonun erken dayanım kazanmasına neden olabilir. Ancak dayanıklılığı daha kötü olabilmektedir.

➤ Buhar kür:

- Betonların erken dayanım kazanmasının gerekli olduğu yerlerde avantajlıdır.
- Soğuk havalarda başarılı bir hidratasyon için ilave ısı verir.

- Püskürtme ve da Dumanlamayla kür:
 - Nemin az ve donma derecesinin üstünde bir sıcaklıkta mükemmel bir yöntemdir.
 - Yüksek maliyete sahiptir ve taze betonun su kusmasına neden olabilir.
- Kür Havuzuna Koyma:
 - Nem kaybını engellemek için idealdir.
 - Üniform sıcaklık sağlar.
 - Büyük işler için pratik değildir.
- Plastik Örtülerle kapatarak kür uygulanması:
 - Polietilen film tabakası ile kapatılır
 - Hafiftir, etkili bir nem koruyucusudur. Sade şekillerde olduğu gibi karışık şekilli yapılara da kolay uygulanabilir.
- Fiber Donatılı Bitümlü Kağıtlarla kür uygulaması:
 - Fiber donatı ile yapıştırılmış bir bitüm tabakasıyla birlikte çimentolanmış örtü ile kapatılır.
 - Yatay yüzeylerin kürü için oldukça etkilidir.
 - Zamanla su ilavesine gerek kalmaz.
 - Nem kaybım önleyerek uygun bir hidrasyon sağlar.
 - Örtüde yırtık ve delikler kolaylıkla tamir edilebilir.
 - Oldukça pahalıdır.
- Islak Örtü ile kapatarak kür uygulaması:
 - Su ile doymuş hale getirilmiş bir örtü ile kapatmak
 - Bozulma olmaz, yangına karşı dayanıklıdır.
 - Peryodik olarak su eklenmelidir.
 - Islak örtülerin dışına polietilen örtü kullanılması sürekli sulama ihtiyacın ortadan kaldıracaktır. Bu da maliyeti artırmaktadır.
- Zar Oluşturan Kimyasal Kür Bileşikleri (Curing Compounds):
 - Sıvı zar oluşturan bileşikler, mum, reçine gibi, suyun buharlaşmasını geçiktirmek ya da azaltmak için kullanılmaktadır.
 - Elle ya da güçlü bir sprey aletiyle uygulanabilmektedir.

Betonların kürü ile ilgili 1907' de, bugün ACI (American Concrete Institute) olarak bilinen ve o zamanki adı National Association of Cement Users (NACU) olan

organizasyonun raporundan bir ifade aşağıda verilmektedir.

Taze beton sıcak ya da kuru atmosfer etkilerine maruz kaldığında, prizini almaya başladığı andan itibaren ilk 24 saat neminin korunmasıyla betonun kuruması önlenmelidir. Bu ıslak kum, kil ya da sürekli ıslatılmasıyla sağlanabilecektir. Eğer betonun sertleşmesi boyunca sıcaklık sürekli 20 °C' nin üzerinde ise beton kirişlerin ve açıklığı 2 metrenin üstünde olan kalıplar 4 günden önce sökülmemelidir. Kalıp ve iskeleler taze beton yerine yerleştirildikten 10 günden önce sökülmemelidir. Eğer sertleşme boyunca sıcaklık 20 °C' nin altına düşerse, beton kirişlerin ve söz konusu döşemelerin kalıpları 7 günden önce sökülmemelidir. Kalıp ve iskeleler taze beton yerine yerleştirildikten 14 gün önce de sökülmemelidir (Meeks ve Cario, 1999).

Aynı organizasyon (NACU) 1908 ' de "Requirements for Reinforced Concrete or Concrete-Steel Constructed Building" de ; "Soğuk *havada*, 0 °C ya da daha düşük sıcaklıkta, beton dökülmemelidir. Taze beton yerine yerleştirildikten sonra donmasına izin verilmemelidir". NACU 1909 ' da ise "Beton yüzeyi en az 7 gün boyunca kurumaya karşı ıslak tutulmalıdır" denmektedir (Meeks, Cario, 1999). Teknolojinin gelişimine paralel olarak, standartlar da değişmekte ve yapılarda betonarmenin kullanımı üzerinde ilk standart 1910 yılında yayınlanmıştır. 1913 yılında organizasyonun adı ACI olarak değiştirilmiş I. Dünya Savaşından II. Dünya Savaşıma kadar birçok değişiklikler yapılmıştır. Bu değişikliklerden bazıları;

ACI-1916, 1917, 1919 ve 1920' de "Beton yerine yerleştirildikten sonra en az beş gün yüzeylerinin hızlı kurummasının önlenmesi gerekmektedir" hükmü varken, ACI-1925 bu korumayı 7 güne çıkarmaktadır (ACI, 1916; ACI, 1917; ACI ,1919; ACI 1920; ACI, 1925). ACI-1928' de beton yüzeylerin en az 7 gün boyunca kurummasının önlenmesi yanında, günde iki kez de sulanması belirtilmektedir (ACI, 1928).

ACI-1936 ' da erken dayanımlı betonlar için, betonların yerine yerleştirilmesinden sonra en az yedi gün boyunca betonun nemli kalmasının sağlanması gerektiği ve bu 7 günün ilk üç gününde özel kür yöntemi uygulanması gerektiği belirtilmektedir (ACI, 1936).

II. Dünya Savaşından 1960' lara kadar standartta kür konusunda büyük bir değişiklik olmamış, ACI-1963'de taze betonun nemli tutulması yanında 10 °C' nin üzerinde tutulması gerektiği ve özel bir dayanım elde edilmek isteniyorsa başka kür süresinin kullanılabilceğini belirtmektedir (ACI, 1963).

ACP de 1970' lerden 1990' lara kadar kür yöntemleri konusunda bazı değişiklikler

yapılmıştır. Örneğin ACI-1977' de; "Erken dayanımlı betonlar hariç diğerleri yerleştirildikten sonra 10 °C 'nin üstünde en az yedi gün nemli tutulmalıdır. Erken dayanım kazanan betonlarda ise ilk üç gün nem koşulu sağlanmalıdır. Bunun için hızlı kür uygulanabilir. Hızlı kür, yüksek basınçlı buhar, atmosfer basıncında buhar, ısıtma ve nemlendirme yada diğer kabul edilmiş yöntemler kullanılabilir" olarak belirtilmektedir (ACI, 1977).

NORVEÇ (Norwegian Standard 3420) de taze betonun kürü, taze beton yerleştirildikten en az üç gün sulayarak yada yüzeyinden buharlaşmayı önleyerek, su/çimento oranı 0.4' den küçükse sulama ile kür uygulanmalıdır. Bu standarta göre, betonda permeabiliteyi düşürmek ya da çatlamayı önlemek ya da kimyasal etkilere karşı dayanım isteniyorsa taze beton en az iki hafta nemli tutulması gerekmektedir (Meeks ve Cario; 1999).

CEB-FIB-1990 (Euro International Committee for Concrete- International Federation for Prestressing), betonun potansiyel özelliklerini elde edebilmek için her tarafına yeterli süre kür ve koruma uygulanması gerektiğini, bu işleme ise taze betonun sıkıştırılmasından hemen sonra başlamak gerektiğini belirtmektedir. Ayrıca, söz konusu standart kürü, erken kurmayı engelleyen ve betonun içindeki çimento hamuruna yeterli suyun yeterli süre sağlanması ve güneş yada rüzgar etkisiyle oluşabilecek kuruma çatlaklarına karşı alınabilecek bir önlem olarak tanımlamaktadır (CEB-FIB, 1990).

BS 8110-1995 (İngiltere) de kür, yeterli sıcaklık düzeyinde betondan nem kaybını önleme işlemi olarak tanımlanmaktadır. Betondan nem kaybını önlemek su/çimento oranının düşük olduğu durumlarda, çimentonun erken dayanım kazandığı durumlarda, beton bileşiminde uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi mineral katkıların bulunduğu durumlarda daha da önem kazanmaktadır. Kür süreci beton içinde hidratasyon ısısının yükselmesine neden olan bileşenlerin gelişmesini de önlemelidir. Söz konusu standarda göre taze beton yerleştirilip sıkılandıktan sonra, güneş etkisi ve rüzgar sebebiyle erken kuruma, yağmur ve akan su etkilerinden koruma, yerleştirmeden sonraki birkaç gün içinde hızlı soğuma, düşük sıcaklık yada donma gibi etkilere karşı kür ve koruma işlemlerine başlanmalıdır (BS,1985).

ENV-206 (European Committee for Standardization), kür ve korumayı betondan beklenen potansiyel özelliklerine ulaşabilmesi için tüm yüzey bölgesinin beton sıkıştırılmasından hemen sonra yeterli bir süre için yapılması gerektiğini belirtmektedir. Söz konusu standart kürü güneş ışınlarından ve rüzgardan dolayı erken kurumaya karşı

önlem olarak, korumayı ise yağmur ve akan su, betonların yerleştirilmesinden itibaren ilk birkaç gün içinde erken soğuma, yüksek iç sıcaklık farkları, düşük sıcaklık yada donma gibi etkilere karşı önlem olarak tanımlamaktadır (ENV 206, 1990).

Sonuç olarak kür taze betonun yerine yerleştirilip sıkılanmasıyla başlayan, ortam koşullarına, betonu oluşturan malzemelerin özellikleri ve miktarlarına bağlı ve betonun potansiyel özelliklerini göstermesi için vazgeçilmez olan karmaşık bir işlemdir. Betonun 19. yüzyıldan itibaren betonarme yapılarda yaygın olarak kullanılmaya başlanılmasından bugüne kadar dayanım ve dayanıklılığı sürekli olarak artmıştır. Dayanım ve dayanıklılıktaki artışı sağlama bileşimindeki malzemelere bağlı olmakla beraber belli bir değerden sonra bu artış yalnızca malzeme özellikleriyle sağlanamamış ve daha ilk günlerde kürün önemi ortaya çıkmıştır. Bu nedenle çeşitli ülke standartlarında kür, kür yöntemleri ve süreleri ayrıntılı olarak verilmektedir.

1.6. Hafif Betonlarda Donatı-Beton Aderansı ve Deneyleri

Taşıyıcı hafif betonla üretilen yapı elemanlarının, diğer betonlarda olduğu gibi, betonarme olarak davranabilmesi için, bu elemanların içinde bulunan donatıların betona kenetlenmesi gerekmektedir. Bu kenetlenmeyi sağlayan, donatı ile beton arasındaki kayma gerilmelerine aderans adı verilmektedir. Aderansın tam olarak sağlanabilmesi için beton içine gömülü olan kenetlenme boyunun yeterli olması şarttır. Bu tür aderansa da kenetlenme aderansı adı verilmektedir. Kenetlenmenin yeterli olabilmesi için ise donatı akma dayanımına ulaşmalı veya akma ötesi deformasyon yapması durumunda betondan sıyrılmamalı ve betonu yarmamalıdır (Ersoy ve Özcebe, 1998).

Betonarme yapı elemanlarında donatıdaki gerilmeler değişebilmekte, elemana etkiyen iç kuvvetler bir kesitten diğerine aderans sayesinde aktarılabilmektedir. Bu olay da betonarmede uyum (adaptasyon) olarak adlandırılmaktadır. Beton ve donatı arasındaki bağ olarak adlandırılan aderansın, donatıların düz yüzeyli veya dişli olmaları durumuna göre aşağıdaki üç temel nedene dayandığı kabul edilmektedir (Ersoy ve Özcebe, 1998).

Bunlar;

- a) Beton ve donatı arasındaki 'kimyasal yapışma' olarak adlandırılan moleküler ve kapiler bağ kuvvetleri,
- b) Beton ve donatı arasındaki sürtünme kuvvetleri,
- c) Beton ve donatı arasındaki mekanik etkileşim,

şeklinde. Düz yüzeyle donatılarda (günümüzde betonarme inşaatlarda kullanılmamaktadır) aderans, yukarıda sıralanan ilk iki nedene yani kimyasal yapışmaya ve sürtünme kuvvetine bağlıdır. Nervürlü (dişli) donatılarda ise aderans, mekanik diş kuvvetleri sayesinde sağlanmakta, kimyasal yapışmanın etkisi ise ihmal edilecek kadar düşük olmaktadır.

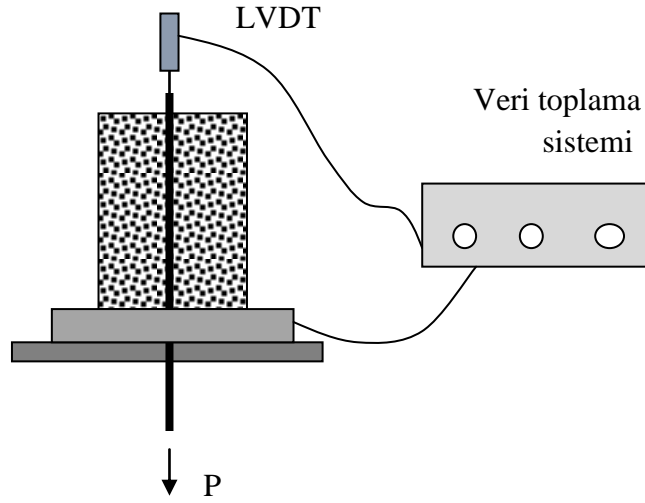
Donatı- beton arasında aderansın belirlenmesi için çok sayıda deney yöntemi ve bunlara bağlı olarak da çok sayıda deney yapılmıştır. Ancak bu deney türlerinin hemen hiçbiri donatı – beton aderansını tam anlamıyla yansıtmamaktadır. Bunun başlıca nedenlerinden bazıları;

- Aderans – kesme kuvveti ilişkisinin tam olarak aydınlatılmamış olması,
- Deney numunelerinin boyutlarının, ekonomik ve pratik nedenlerle gerçeği tam yansıtmaması,
- Bazı deney türlerinde uygulamadakinden farklı olarak ihmal edilemeyecek büyüklükte yerel gerilmelerin meydana gelmesi,
- Donatı çubukları arasındaki uzaklık ve beton örtü kalınlığının uygulamadakinden çok farklı oluşu

şeklinde sıralanabilir(Ersoy ve Özcebe, 1998).

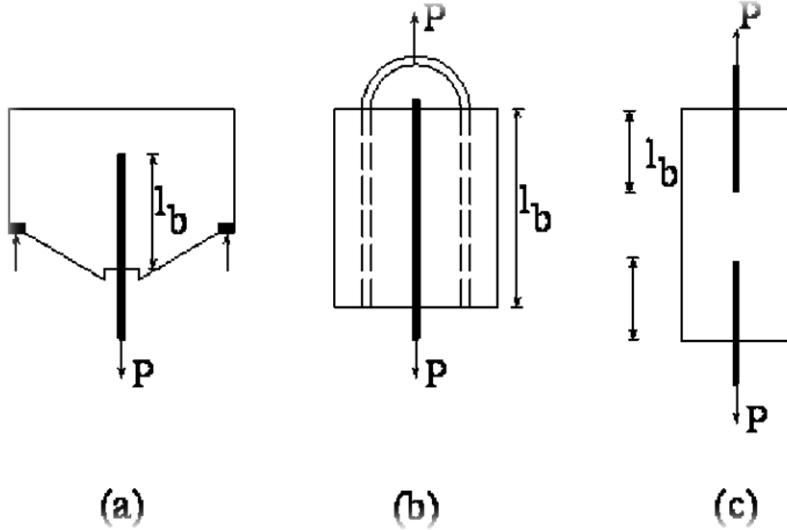
Donatı – beton aderansının ve kenetlenme boyunun belirlenmesinde, kullanılan yöntemlerden birisi, merkezi çekip çıkarma (pull out test) deneyidir. Bu deney diğerlerine göre daha basit olduğundan yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çekip çıkarma deneyinde, silindirik yada prizmatik beton numuneler içerisine yerleştirilen donatıya merkezi yük uygulanarak, bu donatının beton içinden sıyrılması ölçülmektedir (Şekil 23). Bu yöntemde sıyrılmanın 0.25 mm olduğu yüke karşılık gelen aderans gerilmesi, emniyetli aderans gerilmesi olarak adlandırılmaktadır. Merkezi çekip – çıkarma deneyi basit bir deney olmasına rağmen, deney elemanında donatıya dik kesme kuvvetlerinin bulunmaması mesnedin betona uyguladığı yerel basınç gerilmelerinin fazla olması, beton örtü kalınlığının çok büyük oluşu ve betonda çekme çatlaklarının oluşmaması, gerçek davranışı tam olarak yansıtmamaktadır.



Şekil 23. Merkezi çekip çıkarma (pull out) deneyi

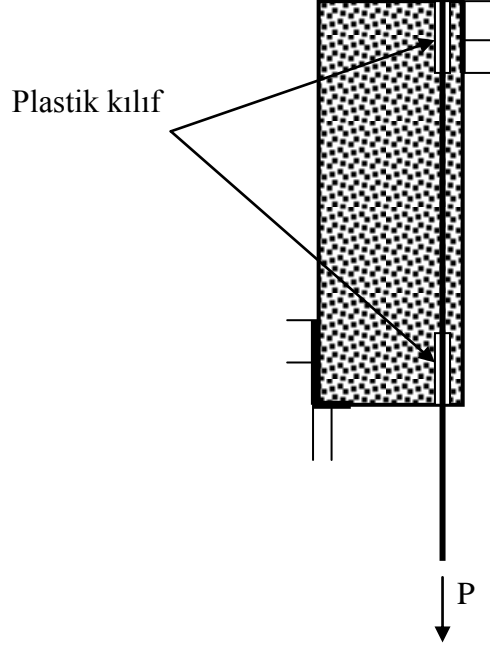
Merkezi çekip – çıkarma deneyinin yukarıda belirtilen sakıncalarını ortadan kaldırmak amacıyla daha farklı birçok deney düzeneği geliştirilmiştir (Şekil 24). Bu düzeneklerde, mesnette oluşan aşırı yerel basınç gerilmeleri giderilmiş ancak diğer sakıncalar ise ortadan kaldırılamamıştır (Ersoy ve Özcebe, 1998).



Şekil 24. Geliştirilmiş merkezi çekip – çıkarma deney düzenekleri(Ersoy, Özcebe, 1998).

Donatı-beton aderansının belirlenmesi için geliştirilen diğer bir çekip – çıkarma deneyi de dış merkez çekip – çıkarma deneyidir (Şekil 25). Bu düzenek, düşey konumda olması nedeniyle, kirişlerdeki sehimleri temsil etmemesi dışında, donatıya dik kesme kuvvetlerinin bulunması, eğilmeden dolayı çatlama meydana gelmesi, donatı civarında

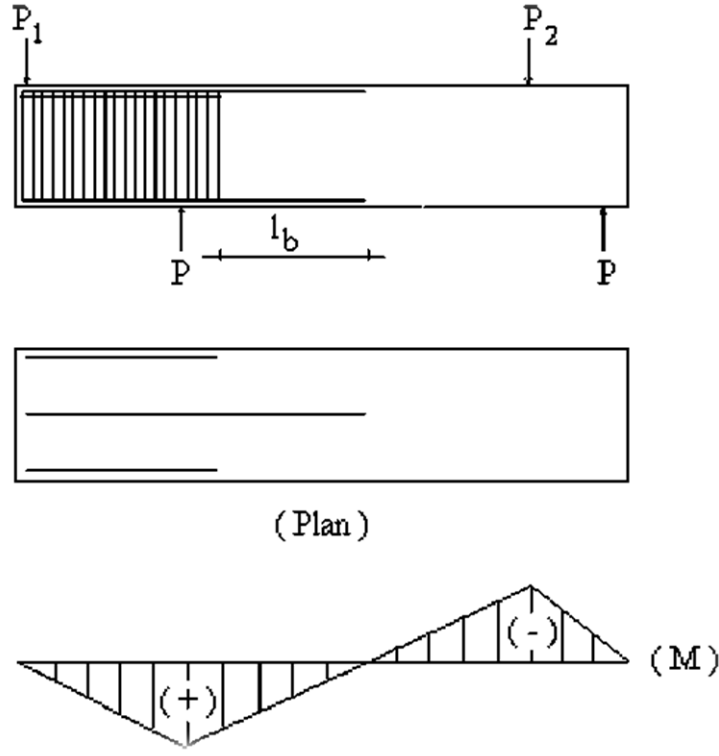
yerel basınç gerilmelerinin oluşmaması ve pas payının daha gerçekçi olması nedeniyle, diğer çekip – çıkarma deneylerine göre daha gerçekçi olduğu belirtilmiştir (Ersoy ve Özcebe, 1998).



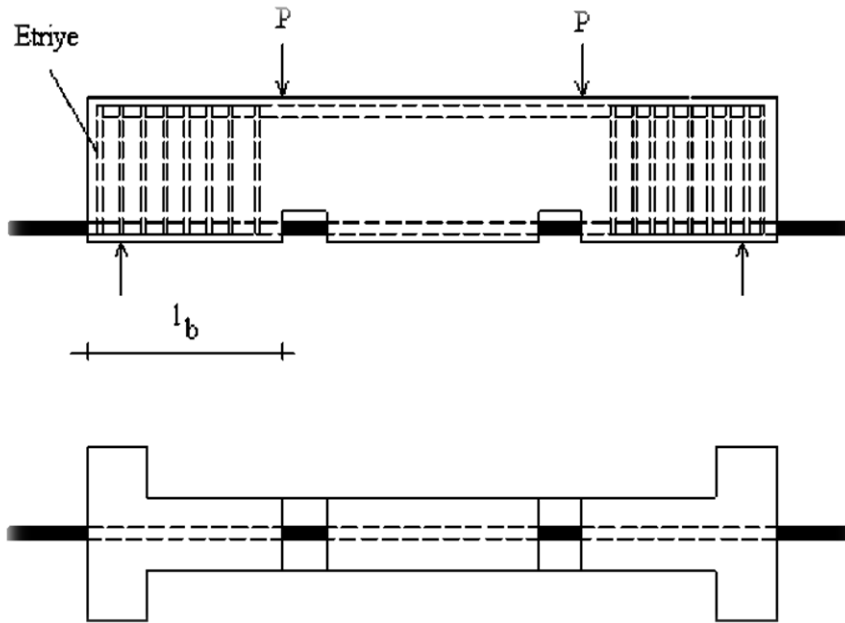
Şekil 25. Dış merkez çekip-çıkarma deney düzeneği

Gerek merkezi gerekse dış merkez çekip – çıkarma deneylerinin, eğilmeye çalışan bir elemanda donatı – beton aderansını tam temsil etmediğinden bu deneyler yerine kiriş deneyleri geliştirilmiştir. Bu deneylerin en yaygın olarak kullanılanları; Texas Çıkmalı Kiriş Deneyi, İngiliz Standardı Deneyi, Hollanda Deneyi ve Standart Belçika Mafsallı Kiriş Deneyidir.

Texas Deneyinde kenetlenme boyu araştırılan donatının geniş bir beton kütlesi içine gömülmüş olması, bu deneyin en büyük sakıncasını oluşturmaktadır (Şekil 26). Eğilme durumunda aderans davranışını belirlemede kullanılan İngiliz Standardı Deneyi'nde ise , kesme kırılmalarının önlenmesi amacıyla Şekil 27' de verildiği gibi, çok sayıda etriyenin kullanılması aderans dayanımını etkileyeceğinden, bu durum, kenetlenme boyunun bu deneyle doğru olarak belirlenmesini güçleştirmektedir (Ersoy ve Özcebe, 1998).

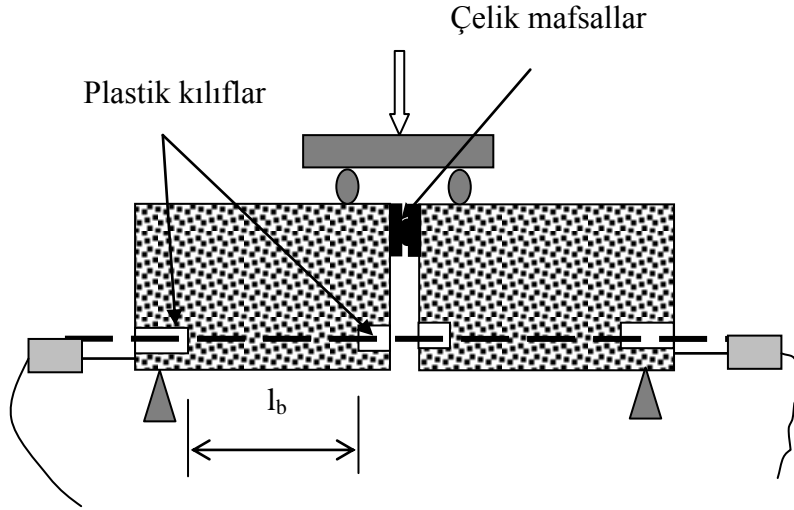


Şekil 26. Beton aderansının belirlenmesi için kullanılan Texas çıkmalı kiriş deney düzeneği.



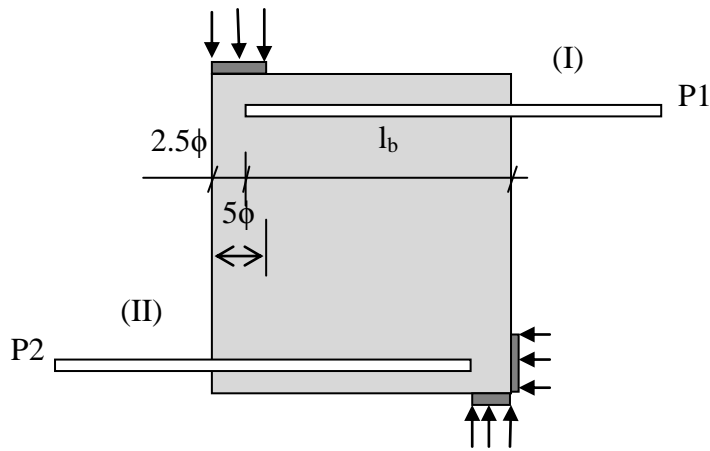
Şekil 27. Donatı – beton aderansının belirlenmesi için kullanılan İngiliz Standardı deney düzeneği

Kiriş deneylerinden bir diğeri de Standart Mafsallı Belçika Kiriş Deneyi'dir. Bu deneyin İngiliz Standardı Deneyi'nden farkı, kirişin ortasında bir mafsal bulunmuş olmasıdır. Buradaki mafsalın amacı, donatıda oluşan P kuvvetinin doğru olarak hesaplanmasına imkan tanımaktadır (Şekil 28).



Şekil 28. Donatı – beton aderansının belirlenmesi için kullanılan Standart Belçika Mafsallı kiriş deney düzeneği

Hollanda Deneyi ise yükleme ve çalışma bakımından Standart Belçika mafsallı kiriş deneyi ile benzerlik göstermektedir. Bu deneyde, (I) ve (II) ile gösterilen donatılara farklı yükleme yapılarak iki farklı değer ölçülebilmektedir (Şekil 29).



Şekil 29. Donatı – beton aderansının belirlenmesi için kullanılan Hollanda deney düzeneği

Bu çalışma kapsamında üretilen taşıyıcı hafif betonla donatı arasındaki aderansın belirlenmesinde, yukarıda sayılan olumsuzluklarına rağmen, aderans düzeyinin belirlenmesi için, merkezi çekip çıkartma (pull out) deneyi yapılması planlanmıştır.

1.7. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılan Bazı Çalışmalar

Günümüzde beton ve betonarme, yekpare (yerinde döküm/monolitik) ve prefabrike yapılarda yaygın olarak kullanılan geleneksel betonların davranışları üzerinde çok sayıda çalışmalar olmasına rağmen, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan hafif betonlar üzerinde geleneksel betonlardaki kadar çalışma mevcut değildir. Gerek izolasyon gerekse depremle karşı yapı kütlelerinin azaltılması gerektiği ortaya çıktığından beri, hafif betonlar üzerinde de, çalışmalar başlamış ve oldukça önemli bir yol katetmiştir. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmektedir.

Kluge vd (1949), "Housing and Home Finance Agency" nin desteklemesiyle, National Bureau laboratuvarlarında hafif agrega tiplerinin büyük bir kısmıyla beton yapmışlar ve bu betonların özelliklerini belirleyerek, hangi tip hafif agreganın beton üretiminde kullanılabileceğini araştırmışlardır.

Niederhoff (1949), hafif beton üretiminde pomza agregasını ilk kullanan araştırmacılardandır. Araştırmacı, pomza agregasıyla yaptığı hafif betonun özelliklerini ve yapısal davranışlarını incelemiştir.

Shideler (1957), pomza betonu hariç sekiz farklı hafif agrega kullanarak hafif beton üretmiştir. Shidler, bu betonların karışım oranları, basınç ve eğilme dayanımı, Poisson oranı ve elastisite modülü, rötre gibi özellikleri incelemiş ve agregaların her biriyle taşıyıcı hafif beton yapımının mümkün olduğunu, hafif betonların Poisson oranlarının geleneksel betonunkinin yaklaşık %50-%80' i civarında olduğunu belirtmektedir.

Herman vd. (1974), çok sayıda geleneksel ve hafif beton numunesi üzerinde araştırmalar yapmış ve dinamik elastisite modülünün başlangıçtaki teğet modülünden 56 daha büyük olduğunu göstermiştir. Araştırmacılar, dinamik elastisite modülünün agrega özelliklerine bağlı olduğunu, gerilme-şekildeğiştirme eğrisine başlangıçta teğet çizilerek bulunan elastisite modülünün ise, matrisin özelliklerine bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Erciyes (1963), yaptığı çalışmada pomza agregası ile ürettiği beton duvarların özelliklerini incelemiştir.

Akman ve Taşdemir (1977), yaptıkları çalışmada, taşıyıcı beton olarak perlit agregası kullanarak ürettikleri betonun özelliklerini incelemişler ve perlit agregasıyla taşıyıcı beton üretilmesinin zor olduğunu, perlit agregasının iri kısmının geleneksel agregalarla değiştirilmesi halinde bile beton dayanımını belli bir sınırdan öteye geçemeyeceğini belirtmişlerdir.

Smadi ve Migdady (1990), Doğal tuf agregası kullanarak, 90 günlük basınç dayanımı 60 MPa olan yüksek dayanımlı hafif beton üreterek bu betonların betonarme ve öngerilmeli betonarme elamanların üretiminde kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Faust ve Konik (1997), yüksek dayanımlı hafif beton üretiminde, farklı hafif agrega, granülometri ve çimento miktarları kullanmışlar ve birim hacim kütlesi $1000-2000 \text{ kg/m}^3$ ve basınç dayanımı 15-100 MPa arasında değişen hafif beton üretiminin mümkün olduğunu göstermişlerdir.

Durmuş ve Hüsem (1995), Doğu Karadeniz bölgesi hafif agregalarından birini kullanarak üretilen hafif betonun normal betonla kıyaslaması üzerinde bir çalışma yapmışlardır. Sonuç olarak bu agrega ile elde edilen hafif betonun öngerilmeli ve betonarme elamanların üretiminde kullanılabilirliğini ve bunların normal betonlara göre bazı avantajlarının olduğu belirtilmektedirler.

Gao vd (1997), liflerin yüksek dayanımlı hafif betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, yüksek dayanımlı hafif betonlar içerisinde en zayıf bileşenin, iri agregaların olduğunu gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte bileşimde kullanılan lifin , betonun basınç dayanımında önemli bir artışa sebep olmadığı, fakat çekme dayanımında %90 varan bir artışa neden olduğunu belirlemişlerdir.

Wilson ve Malhotra (1998), hafif agrega kullanılarak 7 seride 25 farklı karışım hazırlamışlardır. Beton bileşiminde, bağlayıcı olarak $300-635 \text{ kg/m}^3$ arasında değişen miktarda çimento, çimento+ silis dumanı ve çimento+ uçucu kül karışımı kullanmışlardır. Bu şekilde ürettikleri betonun basınç dayanımı ve donma çözölmeye karşı dayankıllığını belirlemek için küp ve silindir numuneler kullanmışlardır. Çalışmalarında, birim hacim kütlesi 2000 kg/m^3 civarında olan yüksek dayanımlı hafif betonun üretimi için, süper akışkanlaştırıcı kullanımının zorunlu olduğu belirtmektedirler.

Topçu (1997) yapmış olduğu çalışmada ürettikleri yarı hafif betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. Araştırmacı, beton bileşiminde su/çimento oranını 0.4 olarak sabit alıp, çimento/ volkanik cüruf oranını ise 0.15-0.30-0.45 ve 0.60 olacak şekilde ve agreganın %50'sini iri agrega olarak volkanik cüruf, diğer %50'sini ise ince agrega

olarak kum, kullanmıştır. Üretilen betonun en önemli özelliklerinden biri olan işlenebilirliğin, cüruf oranı ve tane boyutunun artmasıyla azaldığını ve özellikle 0.45 çimento/cüruf oranından sonra çökme değerinde ani bir düşmenin olduğunu ve bu değerden sonra işlenebilirliğin oldukça zorlaştığını belirtmiştir. Volkanik cürufun katılmasıyla betonun birim kütlesi 2400 kg/m^3 'den 1800 kg/m^3 'e kadar düşerken basınç dayanımının da 54.5 MPa'dan 6.2MPa' a kadar düştüğünü belirtmektedir.

Zhang ve Gjorv (1991) yaptıkları çalışmada, yüksek mukavemetli hafif beton üretiminde mukavemete etki eden en önemli özelliğin hafif agreganın mukavemeti olduğu belirtilmektedir.

Friedemann vd (1999), yaptıkları çalışmada, farklı kürün ve mineral katkıların yüksek dayanımlı hafif betonların durabilitesi üzerinde etkisini araştırmışlardır. Diğer taraftan, betonlarda yüksek dayanım ve donma-çözülme dayanıklılığının silis katkılı yüksek betonlarda oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmada ayrıca, yüksek dayanımlı betonlarda dozajın yüksekliği, beton içerisindeki sıcaklığın 70°C kadar yükselmesine neden olduğunu belirtmişlerdir.

Yanai vd (1999), yaptıkları çalışmada, yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip, kendiliğinden yerleşebilen yüksek dayanımlı hafif beton üretmişlerdir. Çalışmalarında, Su/çimento oranı, matrisin birim hacim kütlesi ve iri agreganın birim hacim kütlesi gibi değişkenlerin ayarlanması ile kendiliğinden yerleşebilen, yüksek donma çözülme ve ayrışma dayanımına sahip, basınç dayanımı 60 MPa olan beton üretmenin mümkün olduğunu belirtmişlerdir.

Demirboğa vd (2001), pomza ve genleştirilmiş perlit agregasını farklı oranlarda kullanarak, çimentonun bir kısmı yerine, yine farklı miktarlarda silis dumanı ve uçucu kül kullanımının etkilerini araştırmışlardır

Chia ve Zhang (2002), yüksek dayanımlı hafif betonların klor ve su geçirgenliği üzerinde yaptıkları araştırmada, çimento matrisi ile hafif agreganın elastisite modüllerinin bir birine çok yakın olmasının, çimento matrisi içerisinde mikro çatlakların oluşma ihtimalini azatlığı için bu betonların geçirgenliklerinin normal betonlardan daha düşük olduğunu belirtmektedirler. Silis dumanının ise su ve klor iyonlarının geçişini azalttığını belirtmişlerdir.

Scheer ve Curbach (2002) yaptıkları çalışmada, çok eksenli ve tek eksenli yük altında normal ve hafif betonların davranışlarını incelemişlerdir. Yüksek dayanımlı hafif betonlarda maksimum birim şekildeğiştirme ve basınç dayanımında önemli bir artışın

oluşturduğunu gözlemlemişleridir.

Kılıç vd (2003), scoria agregası ve mineral katkı kullanarak yüksek dayanımlı hafif beton üretilebilirliği üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada, hava kurusu birim hacimkütleleri 1800 ile 1850 kg/m³ arasında değişen ve uçucu kül katkılı betonlarda 28 günlük basınç dayanımı 30 MPa, silis dumanı katkılı betonlarda ise 40 MPa' a ulaşmışlardır.

Türkmen ve Kantarcı (2006), yaptıkları çalışmada, hafif agregası katkılı betonlarda dayanımın, betona eklenen hafif agregası miktarının artmasıyla azaldığını belirlemişlerdir.

Balendran vd (2002) , yaptıkları çalışmada, liflerin normal ve hafif betonların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu araştırma için basınç dayanımı 90 ile 115 MPa arasında değişen karışımlar hazırlamışlar ve bazı karışımlara beton hacminin %1'i kadar lif katmışlardır. Liflerin basınç dayanımı üzerinde pek fazla etki yapmadığını, yarmada çekme, eğilmede çekme ve enerji tokluğunda önemli bir artışa neden olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, lif etkisinin betonun hafif ya da normal oluşuna, dayanımına, beton içerisindeki lif oranına ve agregası çeşidi ve granülometrisine bağlı olarak değiştiğini belirtmişleridir.

Kayali (2005), yaptığı çalışmada, uçucu külün sinterleştirilmesiyle elde edilen agregayı kullanarak yüksek dayanımlı hafif beton üretmiştir. Üretilen betonun; hafif, düşük poroziteli, yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip olduğunu Çalışmasında söz konusu agregası kullanılarak, 370 kg çimento ile 67 MPa basınç dayanımına sahip hafif beton üretiminin mümkün olduğunu belirtmektedir.

Mladenovic vd (2004) yaptıkları çalışmada, hafif beton üretiminde yaygın olarak kullanılan genleştirilmiş kil, vermiculite, genleştirilmiş cam ve perlit agregası üzerinde alkali-silis reaktivitesini araştırmışlardır. Araştırmacılar, kil ve vermeculit agregasında herhangi bir reaktiviteye rastlanmadığını belirtmektedirler.

Hwang ve Hung (2005), kendiliğinden yerleşen hafif betonların performansları ve durabiliteleri üzerine bir araştırma yapmışlardır.

Gündüz ve Uğur (2005), yaptığı çalışmada pomza agregası ile herhangi bir mineral ve akışkanlaştırıcı katkı kullanmadan taşıyıcı hafif beton üretilebilirliğini araştırmışlardır. Bunun için farklı agregası ve çimento oranlarında karışımlar hazırlayarak ve kuru birim kütlesi 1270 kg/m³ , 28 günlük basınç dayanımı 28 MPa, statik elastisite modülünü 11.129

MPa ve çekme dayanımını 6.38 MPa olan betonlar üretmişlerdir.

Uysal vd (2004) yaptıkları çalışmada; çimento miktarı, çökme değeri ve karışımdaki pomza/ agrega oranının, betonun birim ağırlığı ve ısı iletkenliği üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada; bağlayıcı olarak 200, 250, 300, 400 ve 500 kg/m³ çimento, agrega olarak normal agrega ile normal agreganın %25, %50, %75 ve %100'nün yerine pomza agregası kullanılmışlardır.

Shannag (2011), yaptığı çalışmada, mineral katkı içerikli hafif betonun özelliklerini araştırmıştır. Araştırmacı, çimento ile silis dumanını %5 ile %15 oranında yerdeğiştirerek basınç dayanımını %57 ile %14 oranında arttırdığını belirtmiştir. Beton bileşiminde uçucu kül kullanılması durumunda ise beton performansında artış olduğunu belirtmektedir.

Barcelos vd (2012), yaptıkları çalışmada düşük dozda portland çimentosu kullanarak hafif beton üretmişlerdir. Betonun üretiminde çimento ile birlikte kaolin (kil) kullanmış ve böylece izolasyon amaçlı panellerin üretilebildiğini göstermiştir.

Kockal ve Oztorun (2011), çalışmalarında uçucu küllü hafif agrega ile ürettikleri hafif betonun dayanıklılığını araştırmışlardır. Beton üretiminde, çimento yanında bentonit, cam tozu ve silis dumanı kullanmışlardır.

1.8. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Geleneksel agregalarla üretilen, normal dayanımlı betonların, birim kütlelerinin fazlalığı, yüksek yapıların inşasında problem olmakta, özellikle temel maliyetini artırmakta hatta pratik hayatta geçilmesi gerekli, normale göre, büyük açıklıklarda, bazen de bu betonla yapılan eğilme elemanları kendi öz kütlelerini bile taşıyamaz hale gelmektedir. Diğer taraftan ağır oluşları nedeniyle bu betonla inşa edilen yapılarda depremden dolayı oluşan atalet kuvvetlerinin büyük olduğu da bir gerçektir. Günümüzde prefabrike yapı sektörünün en büyük sorunlarından birisi de üretilen elemanların ağırlığıdır. Prefabrike yapı elemanlarının kütlelerinin fazla olması bu elemanların taşınmasında ve montajında karşılaşılan zorlukların yanında maliyetin de artmasına neden olmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, geliştirilmiş perlit agregası kullanılarak, en az C25 dayanım sınıfında üretilen taşıyıcı betonların, yekpare ve prefabrike yapılarda kullanılabilirliği, deneysel olarak araştırılacaktır. Bu betonların yekpare ve prefabrike yapılarda kullanımının, özellikle topraklarının büyük bir kısmı etkin deprem kuşağında bulunan ülkemizde, yapıların kütlelerinin azalması nedeniyle depremlerden daha az

etkilenmesine, temel maliyetinin azalmasına, prefabrike yapılarda ise daha büyük açıklıkların geçilebilmesine, taşıma ve montaj maliyetinin düşmesine neden olacağı açıktır. Ancak üretilecek hafif betonun yukarıda verilen avantajlarından yararlanılabilmesi için, üretiminin geleneksel betonlar gibi şantiyelerde de kolaylıkla yapılabilmesi ve birim maliyetinin de diğer betonlara göre fazla olmaması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında hedeflenen dayanımlarda üretilecek hafif betonların bu koşulları da sağlamasına çalışılacaktır.

Bu çalışmanın kapsamında, geliştirilmiş perlit agregası kullanılarak üretilecek olan taşıyıcı betonla donatı arasındaki aderans incelenecektir. Ayrıca, bu betonla kiriş ve kolon gibi elemanlar da üretilerek davranışları teorik ve deneysel olarak incelenecektir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMA

Taşıyıcı hafif betonla üretilen yekpare ve prefabrike yapı elemanlarının davranışlarının incelenmesi için gerçekleştirilen çalışmanın bu bölümünde deneylerde kullanılan malzemenin özellikleri ve yapılan deneylerle ilgili bilgiler, deneylerden elde edilen bulgular ve tartışma verilmektedir.

2.1. Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

2.1.1. Agregası Özellikleri

Taşıyıcı hafif beton üretimi için yapılan deneme üretimlerinde, agregası olarak geleneksel agregası (kum), doğal ve genişletilmiş perlit, pomza agregaları kullanılmıştır. Beton bileşiminde, geleneksel agregası olarak kum, 2 mm gözenek açıklığına sahip elekten elenerek, kullanılmıştır. Geleneksel kumun bazı fiziksel özellikleri Tablo 6 ' da verilmiştir. Hafif beton üretiminde bazı karışımlar, 0-2 mm tane çapına sahip doğal perlit agregası da deneme amacıyla yapılmıştır. Bu agregaların bazı fiziksel özellikleri Tablo 7 de, verilmiştir.

Tablo 6. Deneylerde kullanılan geleneksel kumun bazı fiziksel özellikleri

Sıkı Birim Kütle (kg/m ³)	Gevşek Birim Kütle (kg/m ³)	Özgül Kütle (kg/m ³)		Kütlece Su Emme %
		Kuru	Doygun	
1630	1465	2575	2607	1.12

Tablo 7. Deneylerde kullanılan perlit agregasının bazı fiziksel özellikleri

Sıkı Birim Kütle (kg/m ³)	Gevşek Birim Kütle (kg/m ³)	Özgül Kütle (kg/m ³)		Kütlece Su Emme %
		Kuru	Doygun	
1445	1271	1200	1282	5.85

Taşıyıcı hafif beton üretiminde genişletilmiş perlit agregası, 0.05 mm-0.3 mm, 0.3 mm-3 mm ve 2 mm-5 mm olmak üzere, üç farklı tane dağılımında kullanılmıştır. Bu agregaların bazı fiziksel özellikleri Tablo 8’ de verilmiştir.

Tablo 8. Genleştirilmiş perlit agregasının bazı fiziksel özellikleri

Sıkı Birim Kütle (kg/m ³)	Gevşek Birim Kütle (kg/m ³)	Özgül Kütle (kg/m ³)		Kütlece Su Emme %
		Kuru	Doygun	
89	82	465	575	26.72

2.1.2. Beton Üretiminde Kullanılan Çimentonun Özellikleri

Taşıyıcı hafif beton üretiminde, Trabzon Çimento Fabrikasında üretilen CEM –I 42.5 R tipi portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentonun fabrikasından alınan bazı fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 9’ da verilmektedir.

Tablo 9. Beton üretiminde kullanılan çimentonun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel Özellikler		
Özgül kütle (g/cm ³)		3.15
Blaine özgül yüzey (cm ² /g)		3675
200 µ elek üstünde kalan (%)		0.00
90 µ elek üstünde kalan (%)		1.05
Priz süresi (saat) (Vicat indisi)	Başlangıç	2:25
	Bitiş	4:15
Toplam hacim genişlemesi (mm)		0.9
Mekanik Özellikler		
7 gün	Eğilme dayanımı (MPa)	6.9
	Basınç dayanımı (MPa)	45.8
28 gün	Eğilme dayanımı (MPa)	8.7
	Basınç dayanımı (MPa)	52.5

2.1.3. Karışım ve Bakım Suyu Özellikleri

Taşıyıcı hafif beton üretiminde Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yapı ve Malzeme Laboratuvarında, içme suyu olarak da kullanılan şebeke suyu kullanılmıştır.

2.1.4. Mineral ve Kimyasal Katkı Maddelerinin Özellikleri

Hafif beton üretiminde mineral katkı maddesi olarak silis dumanı (mikro silis) ve uçucu kül (fly ash) kullanılmıştır. Silis dumanının yaklaşık kimyasal bileşimi Tablo 10' da, uçucu külün yaklaşık kimyasal bileşimi ise Tablo 11' de verilmiştir.

Tablo 10. Silis dumanının yaklaşık kimyasal bileşimi

SO ₃ (%)	MgO (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)
1.06	0.33	0.71	0.24	0.58	91

Tablo 11. Uçucu külün yaklaşık kimyasal bileşimi

K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	MgO (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)
2.54	0.24	1.33	4.53	12.44	6.17	21.13	50.77

Betonların üretiminde kimyasal katkı maddesi olarak ASTM C-494 F tipi süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

2.1.5. Donatı Özellikleri

Üretilen taşıyıcı hafif betonların, yekpare ve prefabrike yapı elemanlarında kullanılabilirliğinin araştırılması için, üretilen donatı-hafif beton aderans deneylerinde ve bu beton ile üretilen taşıyıcı hafif beton kiriş ve kolonların yapımında kullanılan 8 mm, 12 mm ve 14 mm çapında nervürlü inşaat çeliği üzerinde, 600 kN kapasiteli universal deney aleti ile (Şekil 30), merkezi çekme deneyi yapılmış ve bu donatılara ait bazı mekanik özellikler, Tablo 12' de verilmiştir.



Şekil 30. 600 kN kapasiteli üniversal deney aleti

Tablo 12. Deney elemanlarının üretiminde kullanılan donatılara ait bazı mekanik özellikler

Anma çapı (mm)	Ortalama akma dayanımı (MPa)	Ortalama çekme dayanımı (MPa)	Ortalama kopma birim uzaması (%)
8	512	620	22
12	495	598	24
14	473	530	21

2.2. Betonların Bileşimi

Taşıyıcı hafif betonların karışım hesaplarında mutlak hacim yöntemi kullanılmıştır (TS 802). Bu yöntemde göre, W_c , W_a , V_w ve V_h sırasıyla 1m^3 betondaki çimento kütlelerini (kg), agrega kütlelerini (kg), su ve hapsedilmiş hava hacmini (dm^3) γ_c ve γ_a sırasıyla çimento ve agreganın doymuş kuru yüzeyli (DKY) birim kütlelerini (kg/dm^3) göstermek üzere agrega mutlak hacmi;

$$V_a = 1000 - \left[\frac{W_c}{\gamma_c} + V_w + V_h \right] \quad (1)$$

bağıntısıyla ile hesaplanmaktadır. Agregaya yığınının i adet farklı agregaya sınıfından meydana geldiği göz önüne alındığında, her bir agregaya sınıfının kütlesi farklı olacağından β_i ve γ_{ai} sırasıyla agregaya sınıflarının kütlece oranını ve DKY birim kütlesini göstermek üzere toplam agregaya kütlesi;

$$\sum \left(\beta_i \frac{W_a}{\gamma_{ai}} \right) = 1000 - \left[\frac{W_c}{\gamma_c} + V_w + V_h \right] \quad (2)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir.

Agregaya sınıflarının ayrı ayrı kütleleri, bağıntı 2'den elde edilen toplam agregaya kütlesi ile istenilen agregaya sınıfının kütlece oranı ile çarpılarak tespit edilebilir.

$$W_{ai} = \beta_i \cdot W_a \quad (3)$$

elde edilen agregaya kütleleri DKY agregaya kütleleridir. Agregalar genellikle doymuş kuru yüzeyli halde bulunmamaktadır. Hesapla elde edilen değerden agregaların doymuş suyunu belirlemek için doğal nem (DN_i) durumunun ve su emme miktarının (SE_i) belirlenmesi gerekir. Belirlenen bu değerlerden sonra doymuş su miktarı (DS_i);

$$DS_i = (SE_i - DN_i) \cdot W_{ai} \quad (4)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Toplam doymuş su ise her bir agregaya sınıfının doymuş su miktarlarının toplanmasıyla elde edilir.

$$DS = \sum DS_i \quad (5)$$

Buna göre, farklı karışım oranları belirlenerek, söz konusu hafif agregalarla taşıyıcı hafif beton üretilebilirliği araştırılmıştır. Bunun için hazırlanan deneme üretimi karışımları Tablo 13’ de 1 m³ için verilmiştir.

2.3. Hafif Betonların Üretimi, Yerleştirilmesi ve Kürü

Bu çalışma kapsamında verilen malzemelerle, taşıyıcı hafif betonun üretilebilirliğinin araştırılması için Tablo 13’ de verilen karışım oranlarında 24 ‘ er adet, 150 mm x 150 mm boyutlarında deneme numuneleri üretilmiştir.

Betonların üretiminde, 120 litre kapasiteli düşey eksenli betoniyer kullanılmıştır (Şekil 31).

Tablo 13. Hafif beton üretimi için yapılan deneme üretimi bileşimleri (kg/m³)

Beton Türü	Çimento	Perlit	Ham perlit	Flay ash	Su	Kum	Microsilis	Calsiyom Silikat	Kimyasal katkı	Pomza
LC1	350	116	0	0	550	65	70	35	4.9	47
LC2	300	116	0	0	600	65	70	35	3.9	47
LC3	350	120	0	0	390	70	70	40	4.9	50
LC4	400	116	0	0	370	65	110	35	4.8	47
LC5	350	116	0	0	370	230	70	35	4.2	47
LC6	550	116	0	0	380	65	130	35	6.6	47
LC7	350	116	0	0	370	65	70	70	4.2	47
LC8	350	93	0	230	370	0	70	35	4.2	134
LC9	400	93	0	230	350	0	70	35	4.8	134
LC10	350	70	0	230	370	0	70	35	4.2	134
LC11	400	93	0	460	370	0	70	35	4.8	134
LC12	400	70	0	460	370	0	70	35	4.8	134
LC13	400	47	0	460	370	87	70	35	4.8	70
LC14	400	47	0	460	370	0	70	35	4.8	134
LC15	500	35	157	300	370	300	50	35	6.0	116
LC16	420	60	0	460	370	230	70	35	5.0	153
LC17	420	0	0	230	370	230	70	35	5.0	400
LC18	450	28	0	230	380	230	0	35	5.4	400
LC19	450	70	0	400	380	230	70	35	5.4	200
LC20	450	23	273	230	360	100	0	35	5.4	100
LC21	450	46	545	230	360	100	0	35	5.4	100

Her bir seri betonların üretiminde karışıma giren agrega, su ve çimento önceden tartılıp hazırlanmıştır. Ancak genleştirilmiş perlitin olduğu karışımlarda, hafifliği nedeniyle bu agrega bir gün önceden suya doygun hale getirilmiştir. Betonun karıştırmada kullanılacak düşey eksenli betoniyer namlendirilmiştir. Önce tartılan agregalar betoniyer katılarak beş dakika karıştırılmış, daha sonra çimento katılarak üç dakika daha bileşimdeki kuru maddeler karıştırılmıştır. Daha sonra betoniyerdeki karışıma gerekli su, kalsiyum silikat ve süper akışkanlaştırıcı ile birlikte katılarak üç dakika daha sürdürülmüştür. Bu şekilde hazırlanan beton, sarsma tablası üzerinde hazırlanan, her bir seri için 24 adet 150 mm x 150 mm lik küp numunelere üç aşamada yerleştirilmiştir. Üretimlerinden 4 saat sonra üzerileri ıslak keten çuvallarla örtülerek bir gün kalıplarında saklanmıştır. Bir gün sonra kalıplarından çıkartılan beton numuneler, deneylerin yapılacağı güne kadar sıcaklığı 23 ± 2 °C suda saklanmıştır.



Şekil 31. Düşey eksenli betoniyer

Hafif beton üretimlerinde, agreganın boşluklu yapısı ve ince agrega oranının fazla olmasından dolayı özgül yüzeyin artacağı düşünülerek yüksek oranda çimento kullanılması gerekmektedir. Ancak çimento maliyeti arttıracığı için karışımın içine genel olarak çimento miktarının $1/3$ ' ü oranında uçucu kül ilave edilmiştir (bkz. Tablo 13).

Betonların üretiminde her bir seri için aşağıda verilen işlemler uygulanmıştır:

- Karışım içindeki karma suyu, agregalar tarafından emilmekte, dolayısıyla da karışımda yeterli su kalmamaktadır. Bu nedenle, agregaların su emme miktarları kadar karışıma su vererek bu durum dengelenmiştir. Agregaların düzeltilmiş miktarları ise, her agreganın başlangıç değerinden o agreganın emeceği su miktarı çıkartılarak hesaplanmıştır. Bu işlem LC1 ve LC2 numunelerden başka tüm karışımlarda uygulanmıştır. Bu karışımlarda (LC3, LC4.....,LC21) karma suyunun miktarı $350-380 \text{ kg/m}^3$ arasında tutulmuştur. Ayrıca geliştirilmiş perlitin güçlendirilmesi için beton üretiminde kalsiyum silikat kullanılmıştır.

- LC3 serisinde LC2 serisi dikkate alınarak çimento oranı artırılmıştır (350 kg/m^3).

- LC4 serisinde, çimento ve mikrosilis oranları artırılmıştır. Bu seride 400 kg/m^3 çimento ve 110 kg/m^3 kül kullanılmıştır. Bu seri sonucunda betonun görünümü homojen bir yapı sergilemiştir. Bununla birlikte kullanılan su miktarının fazla olmasından dolayı çimentoyu az da olsa filtre ederek suyu kusmuştur (karışımdaki suyun taze beton yüzeyine çıkması).

- LC5 serisinde geleneksel kum miktarı artırılmıştır. Bu seride, 350 kg/m^3 çimento ve 230 kg/m^3 kum kullanılmıştır. Seride de beton görünümü homojen bir yapı sergilemiş ve bu seri beton da LC4 serisi gibi az da olsa su kusmuştur.

- LC6 serisinde çimento ve silis dumanı oranları arttırılarak kullanılmıştır. Bu seride, 550 kg/m^3 çimento ve 130 kg/m^3 kül kullanılmıştır. Üretim sonunda, beton görünümü homojen bir yapı sergilemiş ve diğer daha önceki serilerde olduğu gibi az da su kusmuştur.

- LC7 serisinde, geliştirilmiş perlitin güçlendirmek amacıyla karışıma ilave edilen kalsiyum silikat arttırılarak kullanılmıştır. Bu üretimde de 350 kg/m^3 çimento ve 200 kg/m^3 kül kullanılmıştır. Bu seride de beton görünümü homojen bir yapı sergilemiştir. Bununla birlikte kullanılan su miktarının fazla olmasından dolayı bu serideki betonlarda da kuma gözlenmiştir.

- LC8 serisinde geleneksel kum yerine pomza kullanılmıştır. Karışımdaki boşlukları minimuma indirmek için ve homojen bir karışım elde edebilmek için, perlitten de %20 azaltılarak uçucu kül ilave edilmiştir. Bu seride çimento ve silis dumanı miktarı ekonomik olması amacıyla sabit tutulmuştur (çimento 350 kg/m^3 , silis dumanı ise 70 kg/m^3) kullanılmıştır. Kusmayı engellemek için suyun miktarı $350-380 \text{ kg/m}^3$ sabit

tutulmuştur. Bu seride, betonun kendiliğinden yerleşmesi sağlansa da homojen bir görünüm elde edilememiştir.

- LC9 serisinde boşlukları minimuma indirmek için ve homojen bir karışım elde edebilmek için, perlitten %20 azaltılarak uçucu kül ilave edilmiştir. Ayrıca basınç dayanımı iyileştirmek için çimento ve silis dumanı ilave edilmiştir (Çimento 400 kg/m^3 , silis dumanı ise 70 kg/m^3). Ayrıca bileşimde geleneksel kum kaldırılarak yerine pomza kullanılmıştır. Bu seride de betonun kendiliğinden yerleşmesi sağlansa da homojen bir görünüm elde edilememiştir.

- LC10 serisinde de geleneksel kumun yerine pomza kullanılmıştır. Ayrıca boşlukları minimuma indirmek için ve homojen bir karışım elde edebilmek için, perlitten %40 azaltılarak uçucu kül ilave edilmiştir. Kusmayı engellemek için suyun miktarını $350\text{-}380 \text{ kg/m}^3$ sabit tutularak kullanılmıştır. Betonun kendinden yerleşmesi sağlansa da homojen bir görünüm elde edilememiştir.

- LC11 serisinde LC10 serisinde olduğu gibi, kumu yerine pomza kullanılmıştır. Ayrıca boşlukları minimuma indirmek için ve homojen bir karışım elde edebilmek için, perlitten %20 azaltılarak uçucu kül miktarı iki katına çıkartılmıştır. Bu seride de betonun kendiliğinden yerleşmesi sağlansa da homojen bir görünüm elde edilememiştir.

- LC12 serisinde de diğer seride olduğu gibi kumu yerine pomza kullanılmıştır. Bununla birlikte boşlukları minimuma indirmek ve homojen bir karışım elde edebilmek için, perlitten %40 azaltılarak uçucu kül iki katına çıkartılmıştır. Bu seri betonda da homojen bir görünüm elde edilememiştir.

- LC13 serisinde, pomza %58 azaltılarak, aynı oranda geleneksel kum kullanılmıştır. Ayrıca boşlukları minimuma indirmek ve homojen bir karışım elde edebilmek için, perlitten %60 azaltılarak uçucu kül iki katına çıkartılmıştır. Bu seri betonlarda da homojen bir görünüm elde edilememiştir.

- LC14 serisinde tekrar geleneksel kum kaldırılarak yerine pomza ilave edilmiştir. Ayrıca boşlukları minimuma indirmek ve homojen bir karışım elde edebilmek için, perlitten %60 azaltılmış, bunun yerine iki kat uçucu kül ilave edilmiştir. Bu üretimde de homojen bir görünüm elde edilememiştir.

- LC15 serisi, önceki 14 seri karışım dikkate alınarak tekrar düzenlenmiştir. Buna göre, karışıma ince genişletilmiş perlit ve ince pomza ile ince kum ilave edilmiştir. Ayrıca basınç dayanımı iyileştirmek için çimento ve silis dumanı ilave edilmiştir. LC15

serisinde de betonun kendiliğinden yerleşmesi sağlansa da homojen bir görünüm elde edilememiştir. Bu karışımda, ayrışma söz konusu olsa da LC15'e göre daha iyi sonuç elde edilmiştir. Ancak ideal beton görünümü gözlenememiştir.

- LC16 serisinde ise LC15 serisinde boşlukları minimuma indirmek ve homojen bir karışım elde edebilmek için, perlitten %40 azaltılarak iki kat uçucu kül ilave edilmiştir. Ayrıca karışıma ince pomza ve ince kum ilave edilmiştir. Bu seri betonda da betonun kendinden yerleşmesi sağlansa da homojen bir görünüm elde edilememiştir.

- LC17 serisinde, LC16 serisinde agrega bileşiminde iri malzemenin fazla kullanılmasından dolayı boşlukların tam anlamıyla ince malzeme tarafından kapatılmadığı görülmüştür. Bu nedenle boşlukları minimuma indirmek ve homojen bir karışım elde edebilmek için, perlitten yerine ince pomza kullanılmıştır. Ancak ideal beton görünümü gözlenememiştir.

- LC18 serisinde boşlukları minimuma indirmek ve homojen bir karışım elde edebilmek için, perlitten %76 azaltılarak uçucu kül, ince pomza ve ince kum ilave edilmiştir. Ayrıca basınç dayanımı iyileştirmek için çimento ve silis dumanı ilave edilmiştir. Bu seri betonda da homojen bir görünüm elde edilememiştir.

- LC19 serisinde de boşlukları minimuma indirmek ve homojen bir karışım elde edebilmek için, perlitten %40 azaltılarak uçucu kül, ince kum ilave edilmiştir. Ayrıca pomza yerine de ince kum kullanılmıştır. Burada da betonun kendinden yerleşmesi sağlansa da homojen bir görünüm elde edilememiştir.

- LC20 serisi üretimlerde geliştirilmiş perlitten %80 azaltılarak yerine doğal perlit, uçucu kül ve ince kum ilave edilmiştir. Ayrıca bu karışımda pomza agregası kaldırılarak yerine ince kum kullanılmıştır. Bu üretimde silis dumanı kullanılmamıştır.

- LC21 serisinde de boşlukları minimuma indirmek ve homojen bir karışım elde edebilmek için, geliştirilmiş perlitten %80 azaltılarak yerine doğal perlit, uçucu kül ve ince kum ile ince geliştirilmiş perlit ilave edilmiştir. Ayrıca pomza yerine de ince kum kullanılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, Tablo 13' de verilen bileşimlerde betonlar üretilmiş ve bu betonlar, her bir seri için 6 adet numune 7. günde, 6 adet numune 28. günde, 6 adet numune 42. günde ve kalan diğer 6 adet numune ise 90. günde basınç deneyine tabi tutulmuştur. Her bir seri için, basınç deneylerinden önce, numunelerin fırın kurusu birim ağırlıkları da belirlenmiştir. Buna göre her bir seri betonun ortalama basınç dayanımı ve fırın kurusu birim ağırlığı Tablo 14' de verilmiştir.

Tablo 14. Üretilen betonların basınç dayanımları ve birim ağırlıkları

Beton Türü	f_{Cm7} (MPa)	f_{Cm28} (MPa)	f_{Cm42} (MPa)	f_{Cm90} (MPa)	Doğal birim kütle (kg/m^3)	Fırın kurusu birim kütle (kg/m^3)
LC1	2.2	5.1	5.4	5.9	1060	901
LC2	1.8	4.89	5.45	5.87	1045	888
LC3	6.12	12.8	13.7	15.8	985	837
LC4	13.16	22.73	24.97	25.61	990	842
LC5	6.69	13.98	15.03	16.78	1015	863
LC6	13.8	24.12	26.04	27.13	1098	933
LC7	6.18	12.91	13.42	14.75	1020	867
LC8	13.2	23.7	25.81	27.17	1115	948
LC9	11.85	24.4	27.66	29.31	1205	1024
LC10	9.76	18.16	20.98	22.34	1200	1020
LC11	13.56	25.10	28.65	30.23	1435	1205
LC12	14.44	24.96	26.61	27.68	1440	1267
LC13	14.1	25.75	27.86	29.99	1450	1233
LC14	13.79	25.07	27.34	28.95	1435	1234
LC15	19.89	26.89	29.53	31.47	1575	1370
LC16	13.8	24.39	26.12	28.54	1589	1351
LC17	12.69	22.11	24.79	26.75	1578	1325
LC18	12.56	21.53	23.38	25.82	1605	1348
LC19	18.9	29.31	32.79	35.43	1456	1252
LC20	24	30.32	33.09	37.42	1645	1382
LC21	17.8	25.75	28.55	31.47	1595	1348

Tablodan da görüldüğü gibi, taşıyıcı hafif beton üretmek için yapılan deneme üretimlerinden, LC6, LC8, LC9, LC11, LC12, LC13, LC14, LC15, LC16, LC17, LC19, LC20 ve LC21 serileri hem birim ağırlık, hem de dayanım yönünden betonlar taşıyıcı hafif beton sınıfına girmektedir. Bu nedenle bu betonlar üzerinde daha detaylı çalışma

yapılmıştır. Yapılan detaylı çalışmada, bu çalışmanın amacına uygun olarak C25 dayanım sınıfının üzerinde beton üretmek için, özellikle LC19, LC20 ve LC 21 serisi bileşimler yeniden düzenlenmiştir. Hazırlanan beton bileşimi Tablo 15’de verilmiştir.

Tablo 15. Yeniden düzenlenen beton bileşimleri (kg/m^3)

Beton Türü	Çimento	G.perlit	Ham Perlit	Flay ash	Su	Kum	Microsilis	Kalsiyom Silikat	Pomza	Akışkanlaştırıcı
SLC19	500	70	0	450	380	200	70	35	200	6.5
SLC20	500	30	630	350	360	100	0	35	100	6.5
SLC21	500	50	520	250	360	100	0	35	100	6.5

Tablo 13’ de verilen bileşim oranlarına göre yapılan deneme üretimlerinden elde edilen bulgular doğrultusunda, çalışma amacına uygun olarak, yeniden düzenlenen SLC19, SLC20 ve SLC21 serisi beton bileşimleri ile, her bir seriden, 6’şar adet 7,28,42 ve 90 günlük basınç dayanımının belirlenmesinde, 6 adet ise 42 günlük betonun yarmada çekme dayanımının belirlenmesinde olmak üzere toplam 30’ ar adet standart silindir (150 mm çapında, 300 mm yüksekliğinde) numune üretilmiştir. Üretilen taze beton üzerinde çökme deneyi yapılmış ve 120 mm çökme değeri ölçülmüştür (Şekil 32). Bu da üretilen betonların işlenebilirliğinin yeter düzeyde olduğunu göstermektedir. Üretilen numuneler sıcaklığı $23^{\circ}\text{C}\pm^{\circ}\text{C}$ standart kür ortamında bekletilmiştir. Küpler kür havuzunda 7, 28, 42 ve 90 gün sonlarında her bir seriden numuneleri çıkartılarak merkezi basınç deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 33). Elde edilen basınç dayanımları Tablo 16’ da verilmiştir.



Şekil 32. Taze betonda çökme deneyi

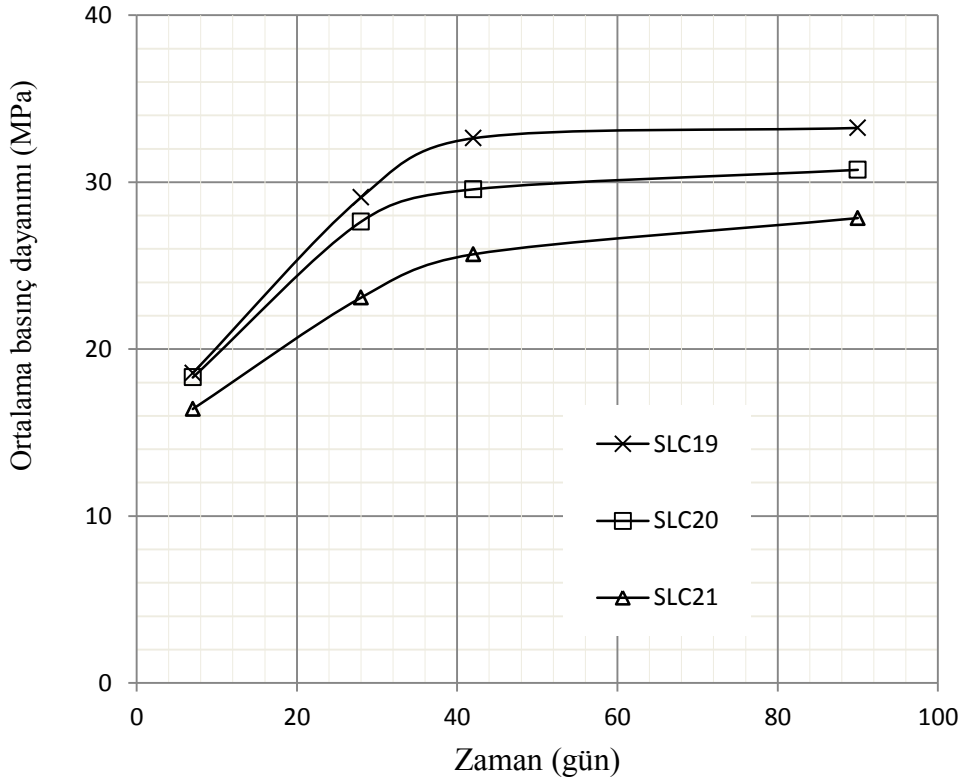


Şekil 33. Silindir numuneler üzerinde yapılan basınç deneyi

Tablo 16. Taşıyıcı hafif beton standart silindir basınç dayanımları ve birim kütleleri

Beton türü	f_{cm7} (MPa)	f_{cm28} (MPa)	f_{cm42} (MPa)	f_{cm90} (MPa)	Standart sapma (42 günlük beton için) (MPa)	Doğal birim kütle (kg/m^3)	Fırın kurusu birim kütle (kg/m^3)
SLC19	18.56	29.08	32.63	33.25	1.25	1485	1270
SLC20	18.30	27.63	29.57	30.74	1.19	1693	1510
SLC21	16.41	23.08	25.68	27.85	1.32	1667	1490

Tablo 16' dan da görüldüğü gibi, SLC19, SLC20 ve SLC21 serisi betonlar taşıyıcı beton sınıfına girmektedir. Bu betonlardan en büyük basınç dayanımını SLC19 serisi betonlardan elde edilmiştir. Tablo 16' da verilen basınç dayanımlarının zamanla değişimi, her bir seri için Şekil 34' de verilmiştir.



Şekil 34. Üretilen betonların zamanla dayanım kazanması

Bu şekilden de görüldüğü gibi, hafif betonların dayanım kazanması 7.günden sonra hızla artmakta, 28. Günde dayanım kazanma hızında bir miktar düşüş olmakla birlikte 42 güne kadar dayanım kazanmaya devam etmektedir. Bu günden sonra, hafif betonun dayanım kazanması devam etmekle birlikte, dayanım kazanma hızı oldukça düşmektedir. Bu nedenle de hafif betonun dayanım sınıfı 42 günlük basınç dayanımına göre belirlenmiştir. Buna göre SLC19 betonun karakteristik basınç dayanımı, (TS 500-2000) ‘ göre;

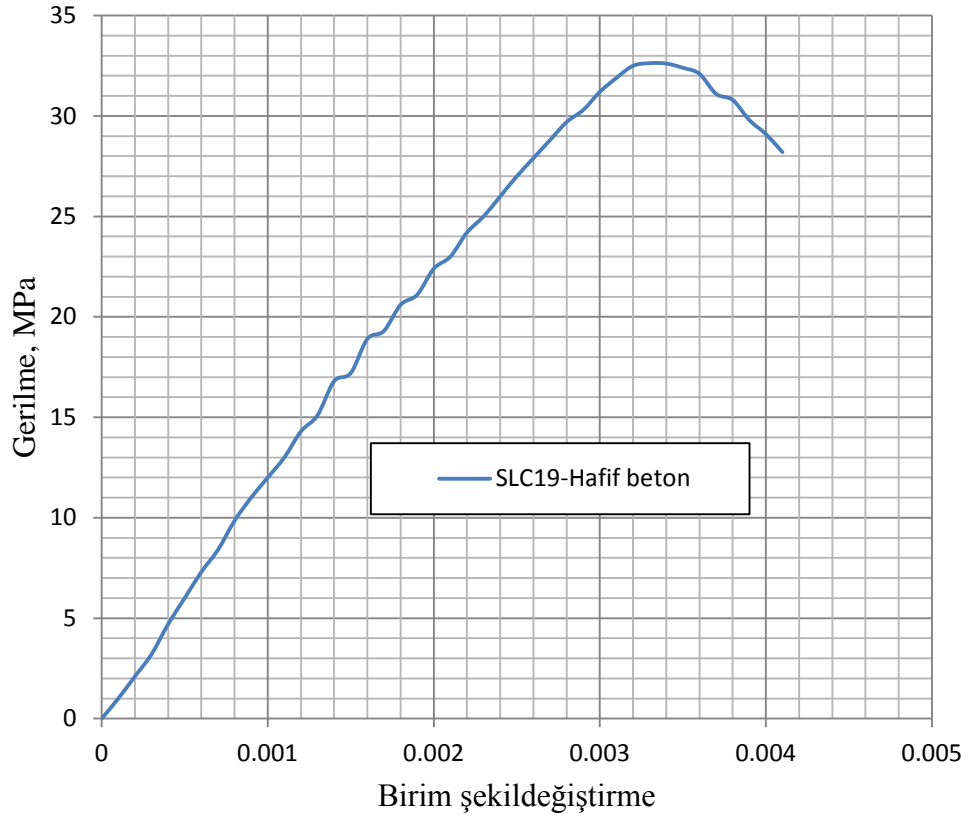
$$f_{ck} = f_{cm} - 1.28 \sigma \quad (6)$$

olduğundan

$$f_{ck} = 32.63 - 1.28 \times 1.25 = 31.03 \text{ MPa}$$

olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla da SLC19 serisi beton TS 500’ de tanımlanan C30 dayanım sınıfına girdiğini söylemek mümkündür. SLC19 betonun gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin elde edilebilmesi için, standart silindir beton numune üzerine aktif boyları 120 mm olan 3 adet birim şekildeğiştirme ölçeri yapıştırılmıştır. Bu şekildeğiştirme ölçerlerinden birisinden, yapışmada sorun oluşması nedeniyle okuma alınamamış, diğer ikisinden okuma alınmıştır. Şekil 35’ de verilen gerilme şekildeğiştirme eğrisinde şekildeğiştirmeler iki birim şekildeğiştirmenin ortalamasıdır.

Bu şekilden de görüldüğü gibi, taşıyıcı hafif betonda maksimum gerilmeye karşılık elde edilen birim kısalma değeri 0.0033, nihai birim kısalma değeri ise 0.0045 elde edilmiştir. Geleneksel betonlarda ise bu değer sırasıyla yaklaşık olarak 0.002 ve 0.003-0.0035 arasında bulunmaktadır (Ersoy, Özcebe, 1998).



Şekil 35. SLC19 serisi betonlarda gerilme-şekildeğiştirme eğrisi

SLC19 serisi taşıyıcı hafif betonla üretilen 6 adet silindir numune üzerinde bu betonların yarmada çekme dayanımlarının belirlenmesi için 42.günde silindir yarma deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 36). Buna göre elde edilen sonuçlar Tablo 17' de verilmiştir.



Şekil 36. Silindir yarma deneyi

Tablo 17. Yarmada çekme dayanımı sonuçları

Beton	Ortalama Yük (kN)	Ortalama yarmada çekme dayanımı ($2P/\pi LD$), (MPa)
SLC19	200.36	2.83

Bu tablodan da görüldüğü gibi, üretilen taşıyıcı hafif betonun ortalama yarmada çekme dayanımı 2.83 N/mm^2 olarak elde edilmiştir. SLC19 serisi hafif betonun 42 günlük ortalama basınç dayanımı 32.63 N/mm^2 olduğu dikkate alındığında, yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranı 0.09 olarak elde edilmektedir. Ancak yarmada çekme dayanımı, eksenel çekme dayanımına göre %10-%15 arasında daha büyük sonuçlar verdiği de unutulmamalıdır(Celep, 2009).

2.4. Taşıyıcı Hafif Beton-Donatı Aderans Numunelerinin Üretimi, Deneyi ve Sonuçları

Taşıyıcı hafif betonla üretilen yekpare ve prefabrike yapı elemanlarının davranışlarının belirlenmesi için gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında üretilen deneme betonlarından SLC19 serisinin, gerek basınç dayanımı gerekse birim kütle yönünden diğerlerine göre daha uygun olduğuna karar verilmiş ve bundan sonraki deneylerde söz konusu beton kullanılmıştır.

Yekpare ve prefabrike betonarme elemanların, betonarme olarak davranabilmesi için donatı ile beton arasında aderansın tam olması gerekmektedir. Diğer bir deyişle, donatı ile onu saran beton arasında herhangi bir yerdeğiştirme ve kaymanın olmaması istenir. Bu nedenle üretilen taşıyıcı hafif beton ise donatı arasındaki aderansın araştırılması gerekli görülmüş ve bu amaçla da çekip çıkartma (Pull-out) deney elemanları 8mm, 12 mm ve 14 mm donatılar için üretilmiştir. Üretimde beton olarak SLC19 serisi beton kullanılmıştır. Donatıların beton içindeki boyları her bir numune için donatı çapının 6, 10 ve 14 katı olacak şekilde kalıplar yapılmış ($250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 6\phi$, 10ϕ ve 14ϕ) ve aderans deney numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelerden bazıları Şekil 37 ve Şekil 38' de görülmektedir.

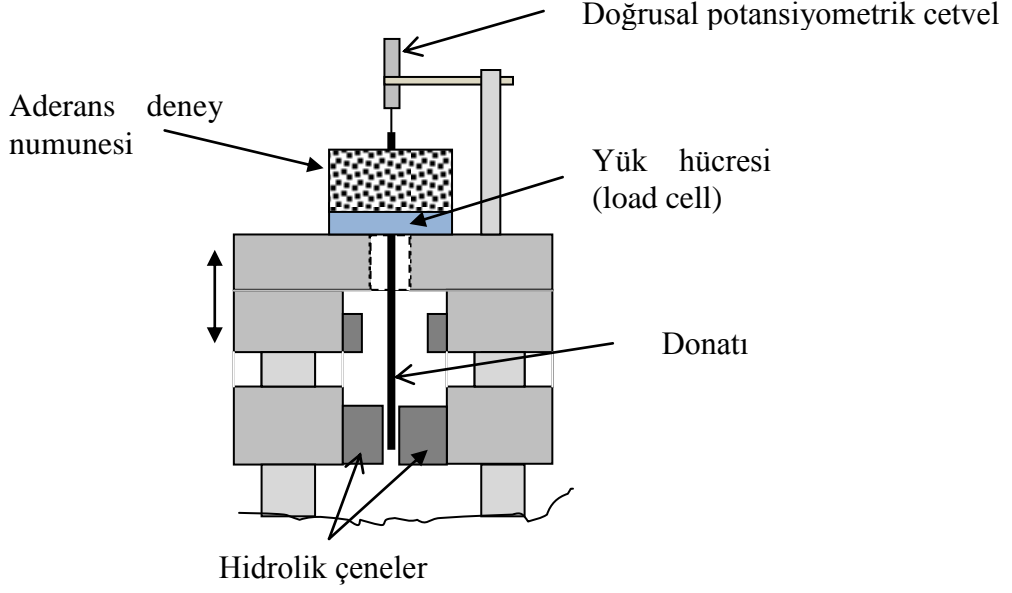


Şekil 37. Aderans numunelerinin hazırlanması



Şekil 38. Deneye hazırlanan taşıyıcı hafif beton aderans numuneleri

SLC19 karışımı kullanılarak hazırlanan aderans deney numuneleri üzerinde, üretimlerinden 42 gün sonra çekip çıkartma deneyi yapılmıştır. Deneylerde aderans numuneleri universal deney aletinin üstüne yerleştirilerek, numune içinden çelik çubuk çıkartılmaya çalışılmıştır. Deney düzeneğinin şematik görünüşü Şekil 39' da, deneyden bir görünüm ise Şekil 40' da verilmiştir.



Şekil 39. Aderans deney düzeneğinin şematik görünümü

Aderans numuneleri deney aletinin üzerine yerleştirilen yük hücresinin üstüne yerleştirildikten sonra, çelik çubuk hidrolik çenelerle sıkılarak çekme deneyine tabi tutulmuştur. Donatının serbest ucuna ise doğrusal potansiyometrik cetvel (LPDT) yerleştirilerek donatının beton içinden sıyrılmaları kayıt altına alınmıştır. Bu kayıtlara göre, l_b , ϕ ve σ_s sırasıyla donatı çubuğunun beton içine gömülü boyunu, donatı çapını (mm) ve donatıdaki gerilmeyi (MPa) göstermek üzere, beton-donatı arasındaki aderans gerilmesi τ_{bd} (MPa);

$$\tau_{bd} = \frac{\phi \sigma_s}{4l_b} \quad (7)$$

bağıntısı ile belirlenmektedir. Bu bağıntıda;

$$\sigma_s = \frac{F}{A_s} \quad (8)$$

yerine yazılırsa (7) bağıntısı,

$$\tau_{bd} = \frac{F}{\phi \pi l_b} \quad (9)$$

şekline gelmektedir. Buna göre donatıdaki 0.25 mm lik sıyrılmaya karşılık gelen donatı ve aderans gerilmesiyle, donatıdaki maksimum gerilmelerine karşılık gelen aderans gerilmeleri Tablo 18’ de, aderans gerilmesi- sıyrıma eğrileri de 8 mm çaplı donatı için Şekil 41, 12 mm çaplı donatı için Şekil 42 ve 14 mm çaplı donatı için ise Şekil 43’de verilmiştir.

Tablo 18. Taşıyıcı hafif beton-donatı aderansı deney sonuçları

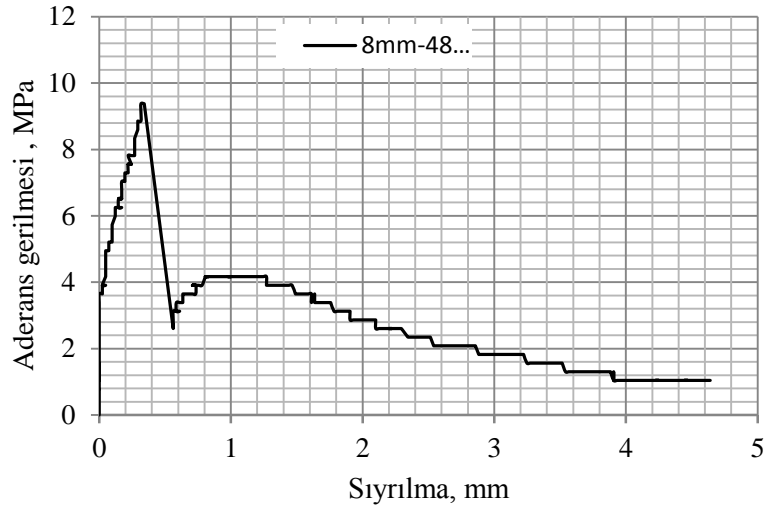
Donatı çapı	φ8			φ12			φ14		
Gömme boyu (mm)	6φ	10φ	14φ	6φ	10φ	14φ	6φ	10φ	14φ
0.25 mm sıyrılmada σ_s (MPa)	187.5	293.8	312.6	63.9	158.4	405.6	28.6	102.1	310.3
Mak. σ_s (MPa)	225.0	300.0	537.6	147.3	169.5	450.1	73.5	249.03	612.4
0.25 mm sıyrılmada , τ_{bd} , (MPa)	7.81	7.34	5.58	2.66	3.96	7.24	1.19	2.55	5.50
Mak. σ_s ye karşılık gelen τ_{bd} , (MPa)	9.37	7.50	9.6	6.13	4.23	8.04	3.06	6.22	10.9

Bu tablodan da görüldüğü gibi, gömme boyu kullanılan donatının 6 katı olması durumunda 0.25 mm’ ye karşılık gelen en büyük aderans gerilmesi, 8 mm çaplı donatıda olurken, donatı çapının artmasıyla bu değer oldukça düşmektedir . Bu da gömme boyunun, donatı çapının 6 katı alınması durumunda, donatı çapının artmasıyla kenetlenme boyunun yetersiz kaldığını göstermektedir. Gömme boyunun, donatı çapının 14’ e çıkması durumunda ise, donatı akmadan ve betonu parçalamadan, yeterli düzeyde aderansa sahip olduğu görülmektedir.

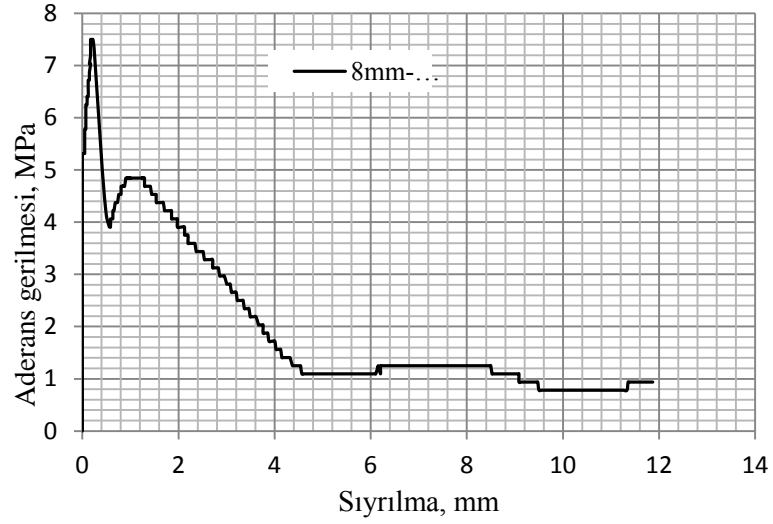
Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen aderans deneylerinde, özellikle gömme derinliğinin az olan numunelerde, nervürlü donatılar nedeniyle yarıma gözlenmiştir. Ancak bu yarılmalar, gömme boyu, donatı çapının 10 katı olan numunelerde, 0.25 mm sıyrılmadan sonra, nihai durumda gerçekleşmiştir.



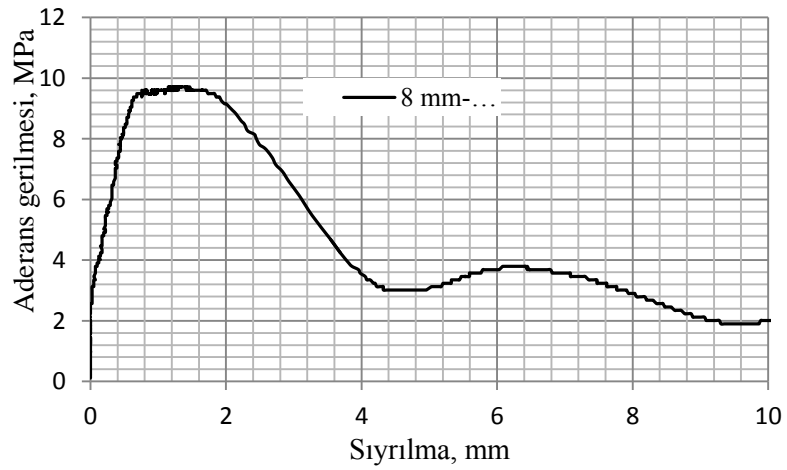
Şekil 40. Taşıyıcı hafif beton-donatı aderans deneyleri



(a)

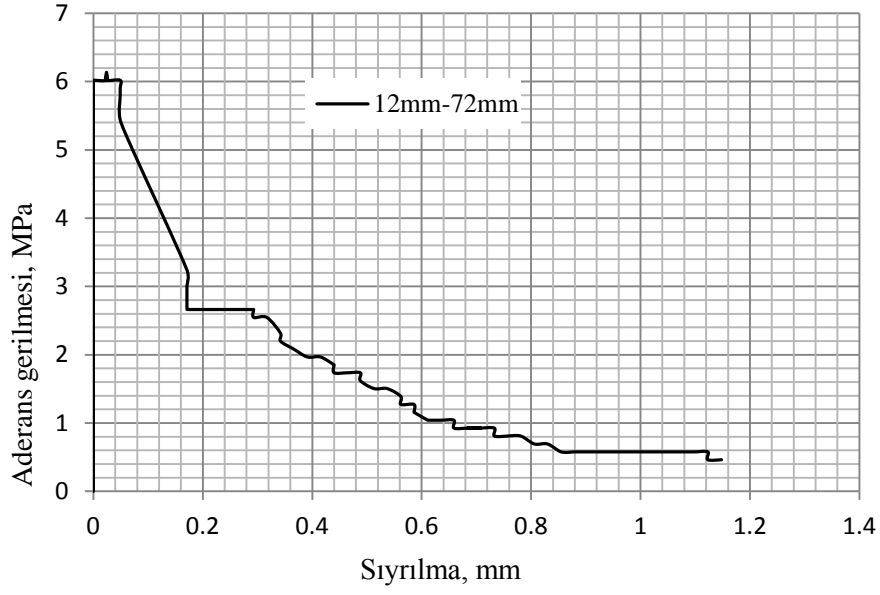


(b)

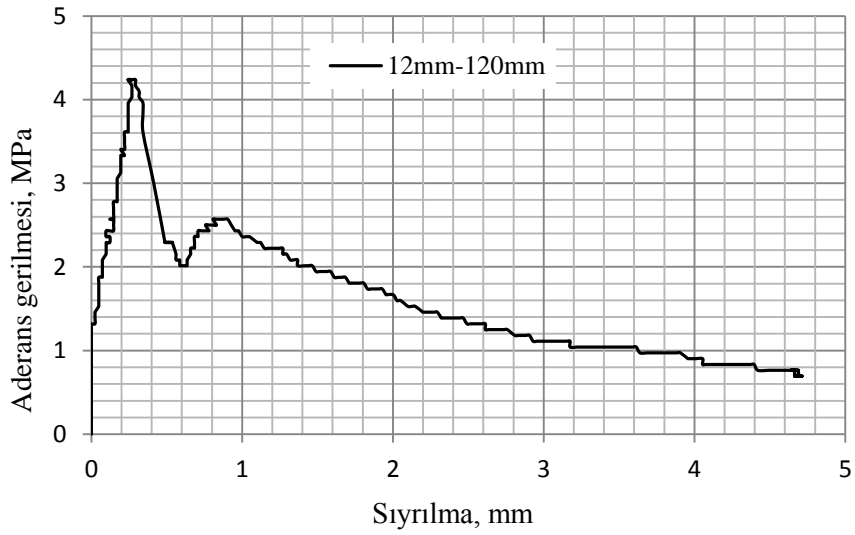


(c)

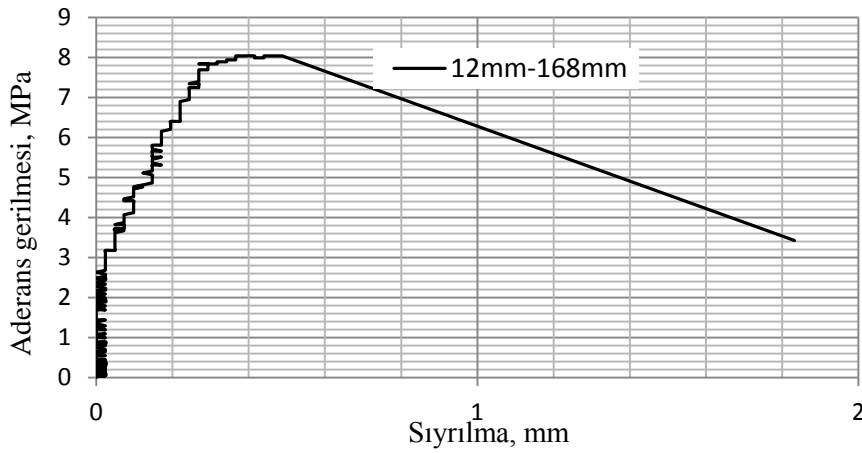
Şekil 41. Farklı gömme boylarında adersans gerilmesi sıyrılma eğrileri (8 mm çaplı donatılar için)



(a)

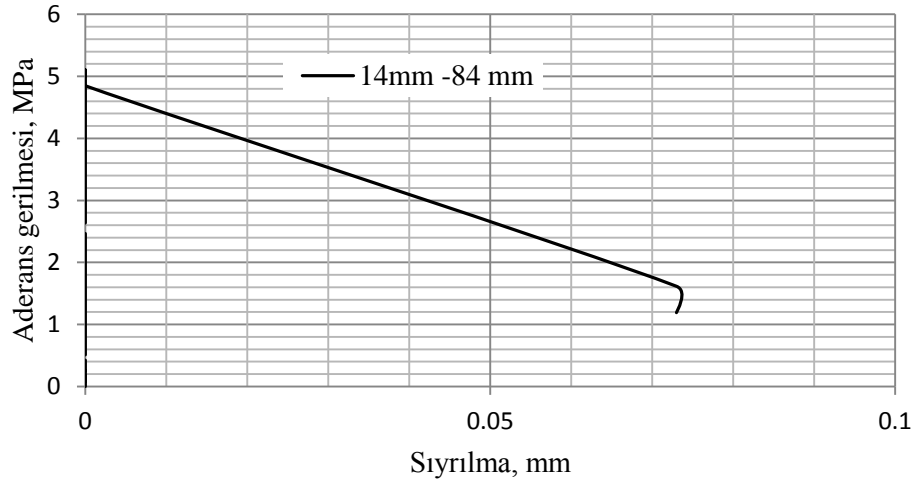


(b)

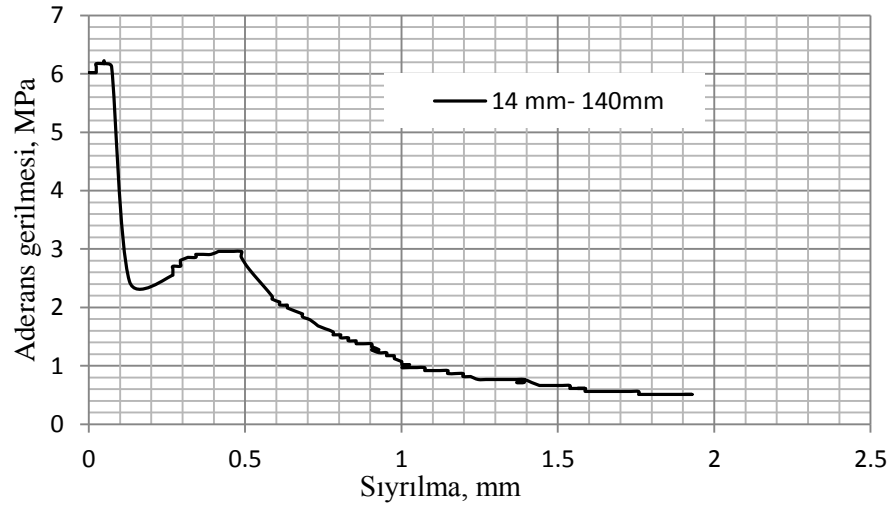


(c)

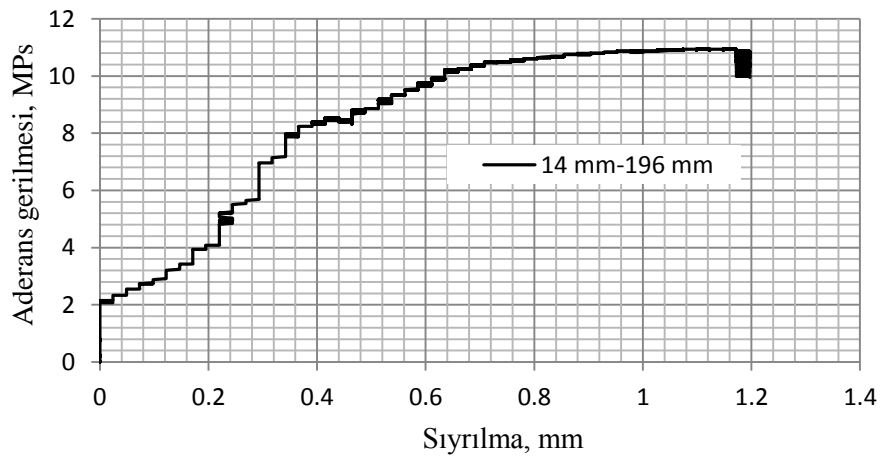
Şekil 42. Farklı gömme boylarında adersans gerilmesi sıyrılma eğrileri (12 mm çaplı donatılar için)



(a)



(b)



(c)

Şekil 43. Farklı gömme boylarında aderans gerilmesi sıyırılma eğrileri (14 mm çaplı donatılar için)

Bu şekillerden de görüldüğü gibi, 8 mm çaplı donatı çubuğu, taşıyıcı hafif beton içine çapının 6 katı kadar (48 mm) gömüldüğünde, 0.25 mm sıyrılmaya karşılık gelen donatıdaki gerilme 187.54 MPa, aderans gerilmesi ise 7.81 MPa, olarak elde edilmiştir. Bu numunede donatı, akma dayanımına ulaşmadan, beton içinden sıyrılarak çıkmıştır. Gömme boyu donatı çapının 10 katına (80 mm) çıkartıldığında, 0.25 mm sıyrılmaya karşılık gelen donatıdaki gerilme 293.8 MPa, aderans gerilmesi ise 7.34 MPa olarak elde edilmiştir. Bu deneyde de donatıda sıyrılmaya gözlenmiştir. Gömme boyu donatı çapının 14 katına çıkartılmasıyla (112 mm) donatıda 0.25 mm sıyrılmaya karşılık gelen gerilme 312.56 MPa, aderans gerilmesi ise 5.58 MPa olmuştur. Bu numunede donatıda maksimum gerilme (537.60 MPa) donatının akma dayanımından (512 MPa, bkz Tablo 12) daha büyük olmuştur. Dolayısıyla da, bu donatı için, yeterli aderans boyu olarak, çapın 14 katının kullanılması daha uygun olmaktadır.

Üretilen taşıyıcı hafif beton-donatı aderansı deneylerinde, 12 mm lik donatı çubuklarında, gömme boyunun çapın 6 katı alınması (72 mm) durumunda, 0.25 mm sıyrılmaya karşılık gelen donatı gerilmesi 63.9 MPa, aderans gerilmesi ise 2.66 MPa olarak elde edilmiştir. 12 mm donatı çapı için, gömme boyu olan çapın 6 katının yetersiz olduğu, donatının beton içinden sıyrılarak çıktığı deneylerden görülmüştür. Aynı şekilde gömme boyunun donatı, çapın 10 katı kadar (120 mm) alınması durumunda 0.25 mm sıyrılmaya karşılık gelen donatıdaki gerilme biraz daha artmış ve 158.37 MPa, aderans gerilmesi ise 3.96 MPa olarak elde edilmiştir. Ancak bu gömme boyu da donatının beton içinden, donatının akma dayanımına ulaşmadan sıyrılmaya engel olamamış, gömme boyu yetersiz kalmıştır. Gömme boyunun, donatı çapının 14 katı alınması (168 mm) durumunda, 0.25 mm sıyrılmaya karşılık gelen donatıdaki gerilme değeri 405.6 MPa, aderans gerilmesi ise 7.24 MPa olarak elde edilmiştir. Gömme boyunun çapın 14 katı (168 mm) olmasıyla donatıdaki maksimum gerilme 450.10 MPa' ya çıkmıştır. Bu deneyde beton numunede herhangi bir çatlama gözlenmemiştir.

Taşıyıcı hafif beton-donatı aderansı için 14 mm' lik donatı çubukları üzerinde yapılan deneylerde, gömme boyunun donatı çapının 6 katı olması (84 mm) durumunda 0.25 mm' lik sıyrılmaya karşılık gelen donatıdaki gerilme 28.58 MPa, maksimum gerilme ise 73.48 MPa olarak elde edilmiştir. 0.25 mm' lik sıyrılmaya karşılık gelen aderans gerilmesi 1.19 MPa olmuştur. Deney numunesinde donatı, bu gömme boyunda, betonu parçalayarak sıyrılmıştır (Şekil 44). Gömme boyu donatı çapının 10 katı (140 mm) olması

durumunda ise 0.25 mm sıyrılmaya karşılık gelen donatıdaki gerilme değeri ile aderans gerilmesi sırasıyla 102.06 MPa ve 2.55MPa olarak elde edilmiştir. Bu numunede de beton yarılarak, donatı sıyrıldığı görüldü. Donatı çapının 14 katı (196 mm) olacak şekilde seçilen gömme boyunda, 0.25 mm sıyrılmaya karşılık gelen donatıdaki gerilme ve aderans gerilmesi sırasıyla 310.3 MPa ve 5.50 MPa , maksimum gerilme ve bu maksimum gerilmeye karşılık gelen aderans gerilmesi ise sırasıyla 612.4 MPa ve 10.89 MPa olarak elde edilmiştir. Bu numunede beton parçalanmadı ancak donatı maksimum çekme dayanımına ulaşarak, beton ile deney aletinin hidrolik çeneleri arasından bir yerde koparak deney sonlandı. Dolayısıyla bu da, söz konusu çap için de donatı çapının 14 katı kadar bir gömme boyunun, üretilen hafif beton için yeterli olduğunu göstermiştir.



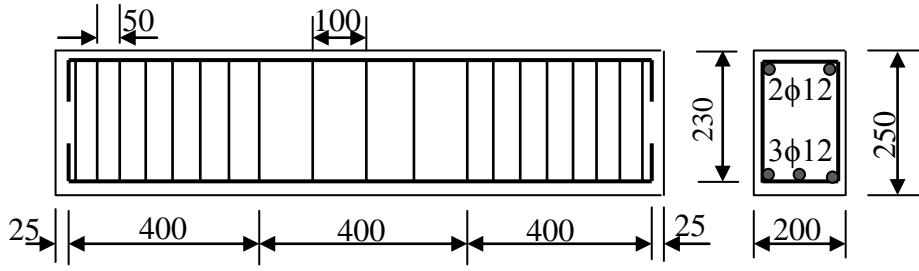
Şekil 44. Aderans deneyi sonunda betonun çatlamasıyla sıyrılan donatı

2.5. Taşıyıcı Hafif Betonarme Kirişlerin Üretimi, Deneyi ve Sonuçları

2.5.1. Deney Kirişlerinin Üretimi ve Deneyleri

Bu çalışma kapsamında SLC19 bileşimi kullanılarak üretilen betonun taşıyıcı hafif beton sınıfına girdiği, bu betonunla hazırlanan donatı- beton aderans deneylerinde, donatı çapının 14 katı kadar gömme boyunun yeterli olduğu, geleneksel betonlarda olduğu gibi, kenetlenme boyunun 20ϕ alınmasının emniyetli tarafta kalınacağı, görülmüştür. Dolayısıyla da üretilen bu betonun yekpare ve prefabrike yapı elemanlarında kullanılabileceği ortaya konmuş bulunmaktadır. Ancak bu betonla betonarme eğilme

elemanları üretilerek, eğilme etkisindeki davranışı da araştırılmıştır. Bunun için enkesit boyutları 200 mm x 250 mm, uzunluğu ise 1250 mm olan betonarme kiriş üretilmiştir. Bu kirişin şematik donatı planı Şekil 45’ de, kalıp ve donatısından bir görünüm ise Şekil 46’ da verilmiştir.

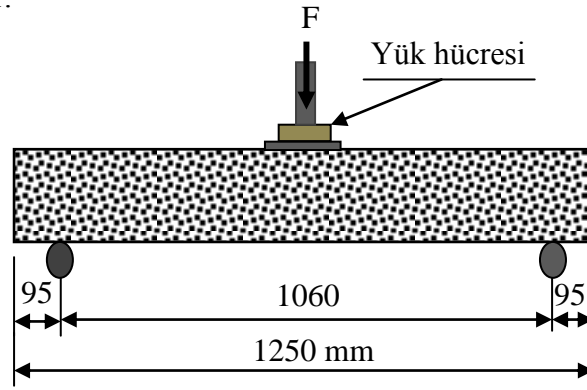


Şekil 45. Deney kirişinin şematik donatı planı

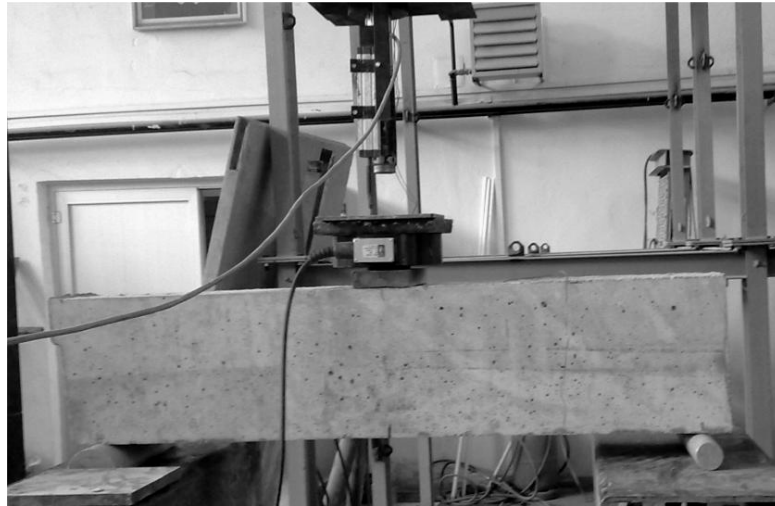


Şekil 46. Betonarme kiriş kalıp ve donatısı

SLC19 bileşimi kullanılarak üretilen hafif beton, donatısı hazırlanan kalıplara, üç aşamada her aşamada 15 sn titreşim uygulanmak suretiyle döküldü. Kirişlerin üretimi sırasında 3 adet çapı 150 mm yüksekliği 300 mm olan standart silindir şahit numuneler alındı. Üretimlerinden bir gün sonra yan kalıpları sökülen kiriş numunelerinin üzerine sürekli ıslak kalacak şekilde su tutucu örtü serildi. Deney kirişleri üzerinde eğilme deneyleri ile şahit numuneler üzerinde basınç deneyleri 42. günde yapıldı. Şahit numunelerin ortalama basınç dayanımı 31.25 MPa olarak elde edilmiştir. Taşıyıcı hafif betonla üretilen deney numuneleri üzerinde eğilme deneyi Şekil 47' de verilen yükleme şemasına göre yapılmıştır. Deneye hazırlanan kiriş numunesinden bir görünüm de Şekil 48' de verilmiştir.



Şekil 47. Kiriş eğilme deneyi ve yükleme şekli



Şekil 48. Kiriş numunesinin deneye hazırlanması

Taşıyıcı hafif beton ile üretilen kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışlarının karşılaştırılması için aynı boyut ve donatı oranında geleneksel beton kullanılarak da kiriş

numuneler üretilmiştir. Geleneksel betonarme kirişlerin üretiminde kullanılan betonun bileşimi Tablo 19’ da verilmektedir. Bu birleşim bu çalışma kapsamında üretilen taşıyıcı hafif betonun dayanımını verecek şekilde deneme üretimleri ile belirlenmiştir. Bu betonun üretiminde de CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır.

Tablo 19. Geleneksel betonun bileşimi (m³)

Çimento miktarı kg/m ³	Su/çimento	Su kg/m ³	Agrega kg/m ³
350	0.60	210	1740

Geleneksel betonarme kirişlerin üretilmesi aşamasında, alınan üçer adet 150 mm çapında 300 mm yüksekliğinde standart silindir şahit numunelerin basınç dayanımları, bu deneylerin yapıldığı 28. günde belirlenmiş ve ortalama dayanımı 33.15 MPa olarak elde edilmiştir. Taşıyıcı hafif beton ile geleneksel betonun ortalama basınç dayanımları arasındaki fark %6 olarak elde edilmiştir. Buradan da, bu iki beton dayanımlarının birbirlerinden çok da farklı olmadığı, eğilme etkisindeki elemanlarda, çekme bölgesindeki betonun çatlamasından sonra kiriş davranışına, donatının davranışının etkin olduğu da dikkate alındığında, her iki betonarme kiriş arasında karşılaştırmanın yapılabileceği görülmektedir.

Taşıyıcı hafif betonla üretilen betonarme kirişlerin davranışlarının, geleneksel beton ile üretilen betonarme kirişlerin davranışlarıyla karşılaştırmak için hazırlanan geleneksel betonarme kirişlerde de deneyler, taşıyıcı hafif betonarme kirişlerde olduğu gibi yapılmıştır. Deneylerde yük hücresi ile uygulanan yük ve buna karşılık gelen orta nokta yerdeğiştirme LPTD yardımı ile kayıt altına alınmıştır.

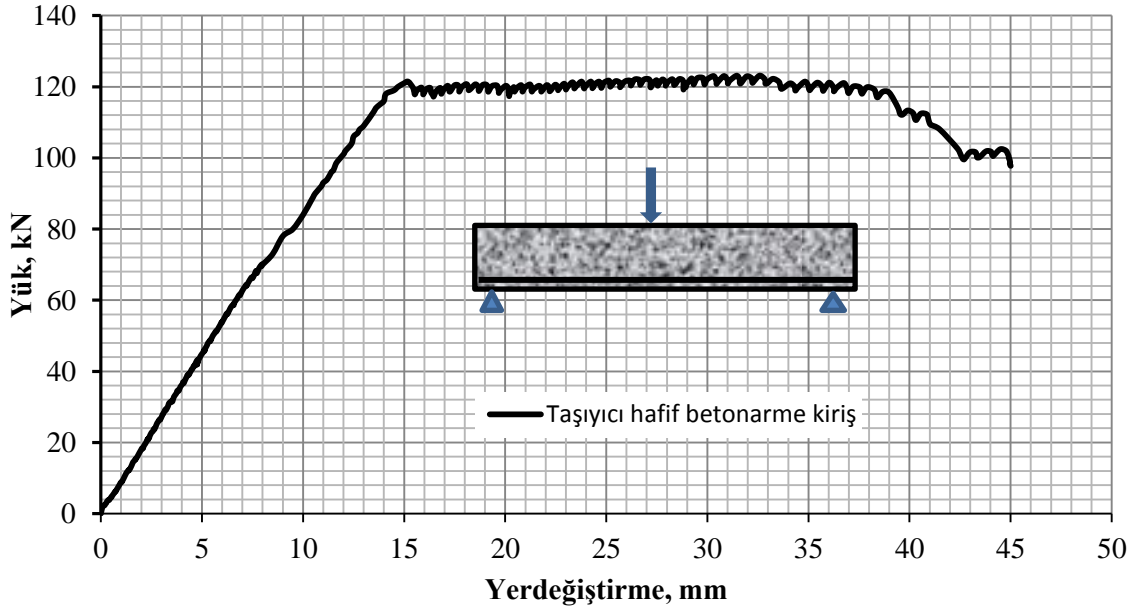
2.5.2. Betonarme Kiriş Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Taşıyıcı hafif betonla üretilen betonarme kirişler ile bu kirişlerin karşılaştırılması amacıyla üretilen geleneksel betonarme kirişler üzerinde eğilme deneyi gerçekleştirilmiş ve deneylerden elde edilen maksimum yük ve bu yüke karşılık gelen kiriş orta noktasındaki yerdeğiştirme (sehim) değerleri ölçülmüş ve Tablo 20’ de verilmiştir. Deneylerden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri ise taşıyıcı hafif betonarme kiriş için Şekil 49’ da, geleneksel betonarme kiriş için Şekil 50’ de verilmiştir.

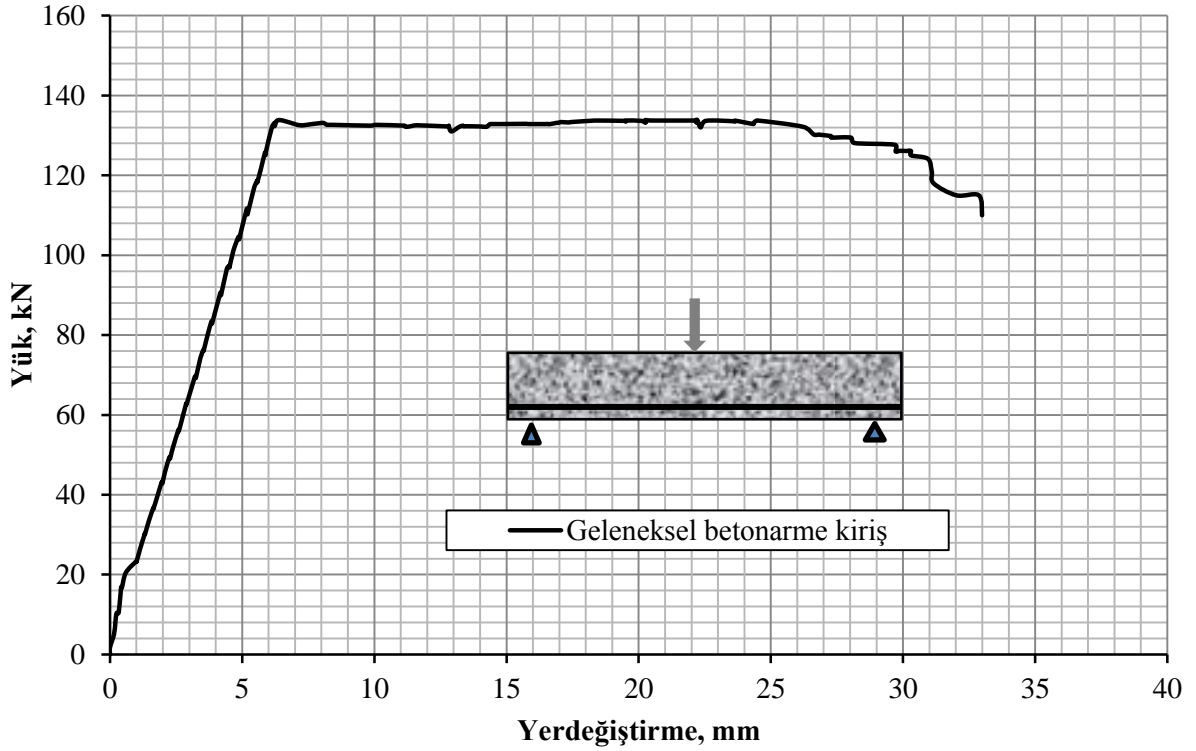
Tablo 20. Betonarme kiriş deneylerinden elde edilen sonuçlar

Kirişler	Plastik mafsalsal davranışını sağlayan		Nihai durumda	
	Yük, kN	Sehim, mm	Yük, kN	Sehim, mm
Hafif betonarme kiriş	121.05	15.00	123.12	31.45
Geleneksel betonarme kiriş	133.73	6.35	133.90	22.17

Bu tablodan görüldüğü gibi, taşıyıcı hafif beton ile üretilen betonarme kiriş, yük altında 15 mm lik sehim değerine kadar yaklaşık doğrusal bir davranış sergilemiştir. Bu sehim değerinden sonra kiriş artık üzerine etkiyen yükten daha fazlasını taşıyamaz hale gelerek, yük altından kaçmaya başlamıştır. Yük altından kaçan kirişin taşıyabildiği en büyük yük değeri 123.12 kN iken, bu yüke karşılık gelen sehim değeri de 31.45 mm olarak gerçekleşmiştir. Geleneksel betonarme kirişte ise, 6.35 mm lik sehim değerine kadar doğrusal davranış söz konusu iken bu değerden sonra kiriş yük altından kaçmaya başlamıştır. Sehim yaparak yük altından kaçmaya çalışan kirişin taşıyabildiği en büyük yük değeri 133.90 kN, bu değere karşılık gelen sehim ise 22.17 mm olmuştur.

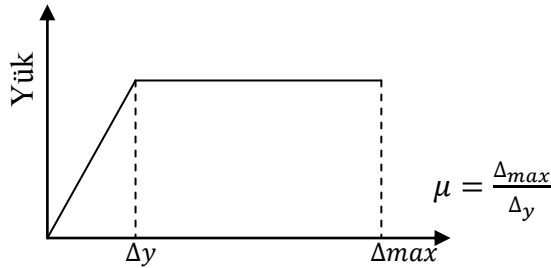


Şekil 49. Taşıyıcı hafif beton ile üretilen kirişlerde yük-yerdeğiştirme ilişkisi



Şekil 50. Geleneksel betonarme kirişlerde yük-yerdeğiştirme ilişkisi

Bu şekillerden de görüldüğü gibi, hafif beton ile üretilen betonarme kirişte, kesitin mafsallaşmasına kadar eğim hemen hemen değişmeden, geleneksel betonla üretilen betonarme kirişte ise yaklaşık 22 kN' luk yüklemeye kadar kesitin mafsallaşmasına kadar eğim değişmeden devam etmiştir. Ayrıca, bu eğrilerden hafif betonarme kiriş davranışının, en azından, kesitin mafsallaşmasına kadar, daha sünek olduğu da görülmektedir. Ancak kirişte güç tükenmesine karşılık gelen yerdeğiştirmenin, plastik mafsal oluşturan yerdeğiştirmeye oranı süneklik oranı olarak hesaplandığında (Şekil 51);



Şekil 51. Süneklik oranı

hafif betonla üretilen betonarme kirişlerde $\mu = \frac{45}{15} = 3.0$

geleneksel betonla üretilen betonarme kirişte $\mu = \frac{33}{6} = 5.5$

olarak elde edilmektedir. Bu da geleneksel betonla üretilen kirişin plastik mafsallardan oluşumundan sonra daha sünek davrandığını göstermektedir.

Yukarıda verilen şekiller yardımıyla, eğri altında kalan alanlardan kirişlerin enerji yutma kapasiteleri de hesaplanmış ve Tablo 21’ de verilmiştir.

Tablo 21. Kirişlerin enerji yutma kapasiteleri

Kirişler	Enerji yutma kapasiteleri (kNmm)		
	A bölgesi (elastik)	B bölgesi (plastik)	Toplam
Hafif betonarme kiriş	1032	3560	4592
Geleneksel betonarme kiriş	429	3462	3891

Bu tablodan da görüldüğü gibi, taşıyıcı hafif betonla üretilen betonarme kirişlerin enerji yutma kapasiteleri özellikle elastik bölgede geleneksel beton kullanılarak üretilen betonarme kirişin enerji yutma kapasitesinin yaklaşık 2.4 katı kadar olurken kesitin plastikleşmesinden sonra taşıyıcı hafif betonarme kirişin enerji yutma kapasitesi geleneksel betonarme kirişinkinden yaklaşık %3 oranında daha büyük olmuştur. Taşıyıcı hafif betonarme kirişin toplam enerji yutma kapasitesi ise geleneksel betonunkinden %18 daha fazla olmuştur.

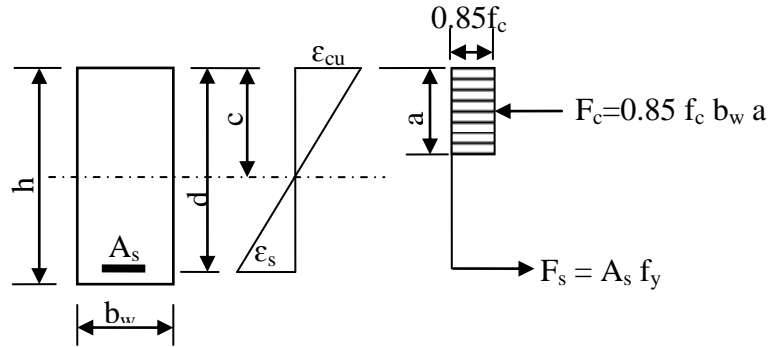
2.5.3. Kirişlerin Teorik Kırılma Momentlerinin Hesabı

Taşıyıcı hafif ve geleneksel beton kullanılarak üretilen betonarme kirişlerin deneysel kırılma momentleri ile teorik kırılma momentlerinin karşılaştırılması amacıyla, söz konusu kirişlerin teorik kırılma momentleri hesaplanmıştır. Bu hesaplarda kiriş üretiminde kullanılan donatının akma dayanımı ve betonun basınç dayanımları kullanılmıştır. Bilindiği gibi, kırılma bir çatlak doğrultusunda meydana geldiğinden eğilme etkisindeki betonarme bir kesitin kırılma momentinin hesabı için aşağıdaki basitleştirici varsayımlar yapılmaktadır.

- Çatlaklara komşu kesitler, kırılma anına kadar düzlem kalırlar dolayısıyla da şekildeğişimler tarafsız eksene olan uzaklıkla orantılıdır ve donatı kendini saran betonla aynı şekilde değişim yapmaktadır.
- Kırılma, en üst beton liflerinde kısılmanın nihai birim kısılma değerine ulaştığında meydana gelmektedir.

- Çekme bölgesindeki betonun kesit dayanımına etkisi yoktur. Dolayısıyla da kesit çekme bölgesinde tarafsız eksene kadar çatlamıştır.
- Kırılma anında betondaki basınç gerilmeleri diyagramı, merkezi basınç altında standart silindir beton numunelerden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme diyagramıdır.

Taşıma gücü yöntemine göre kırılma momentinin hesabında kullanılan uygunluk ve denge denklemleri aşağıda verilmektedir (Şekil 52).



Şekil 52. Dikdörtgen kesitlerde, şekildeğiştirme ve iç kuvvetlerin şematik gösterilimi

- Uygunluk denklemleri

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_s} = \frac{c}{d-c} \quad (10)$$

- Kuvvet denge denklemleri

$$F_c = 0.85 f_c b_w a \quad \text{ve} \quad F_s = A_s f_y \quad \text{olmak üzere;}$$

$$F_c = F_s \quad (11)$$

- Moment denge denklemleri ise;

$$M = F_s (d - 0.5 a) = F_c (d - 0.5 a) \quad (12)$$

şeklindedir. Buna göre, deneylerde kullanılan kirişlerin üretiminde $3\phi 12$ ($A_s = 339.29 \text{ mm}^2$) 'lik asal çekme donatısı kullanılmıştır. Kirişlerin üretiminde kullanılan betonların ortalama basınç dayanımları taşıyıcı hafif beton için 31.25 MPa, geleneksel beton için ise 33.15 MPa'dır. Bu dayanımlar kirişlerin üretimleri sırasında alınan üçer adet şahit numunelerden

elde edilmiştir. Buna göre taşıyıcı hafif ve geleneksel betonla üretilen betonarme kirişler için taşıma gücü momentleri aşağıda hesaplanmıştır.

- Taşıyıcı hafif betonla üretilen kiriş için:

$$A_s = 339.29 \text{ mm}^2$$

$$f_y = 495 \text{ MPa}$$

$$f_c = 31.25 \text{ MPa}$$

Denge gereği $F_c = F_s$ olacağından, eşdeğer dikdörtgen gerilme bloğu derinliği "a" ;

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c b_w} = \frac{339.29 * 495}{0.85 * 31.25 * 200} = 31.61 \text{ mm}$$

olarak elde edilmiştir. Buradan moment denge denklemi yazılırsa, teorik kırılma momenti (M_r);

$$M_r = A_s f_y (d - 0.5 a) \longrightarrow M_r = 339.29 * 495 * (230 - 0.5 * 31.61)$$

$$M_r = 35973739.67 \text{ Nmm} \quad (M_r = 35.97 \text{ kNm})$$

olarak elde edilmiştir.

- Geleneksel betonla üretilen kirişleri için de beton dayanımı 32.45 alınarak, yukarıda verildiği gibi hesaplanmış ve deneyden elde edilen momentlerle birlikte Tablo 22' de verilmiştir.

Tablo 22. Kirişlerde deneysel ve teorik kırılma momentleri

Kirişler	Momentler (kN/m)		M_r/M_{re}
	Deneysel (M_{re})	Teorik (M_r)	
Taşıyıcı hafif betonarme kiriş	35.10	35.97	1.02
Geleneksel betonarme kiriş	38.78	36.13	0.93

Bu tablodan da görüldüğü gibi, taşıyıcı hafif betonarme kirişte deneysel kırılma momenti ile teorik kırılma momenti yaklaşık olarak aynı çıkmıştır. Geleneksel betonarme

kirişlerde ise deneysel olarak elde edilen moment değeri, teorik momentin değerinden daha fazladır. Bu farklılık, kiriş betonunun kür koşulu ile standart silindir numunelerin kür koşullarının aynı olmamasından kaynaklanan beton dayanım farklılığından olabileceği düşünülmektedir. Zira kirişlerin betonu dökülürken alınan şahit numuneler, standart kür koşullarında, kiriş numuneler ise üzerleri sürekli ıslak kalan su tutucu örtü altında bekletilmişlerdir.

2.5.4. Kirişlerde Kırılma Şekilleri

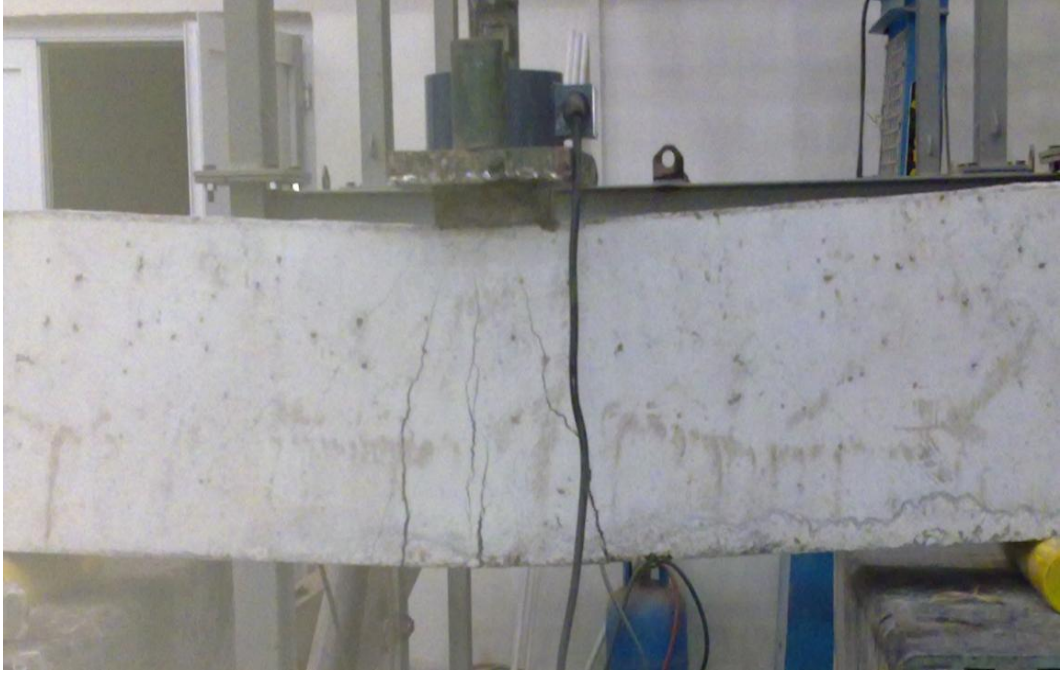
Taşıyıcı hafif betonla üretilen yekpare ve prefabrike yapı elemanlarının davranışlarının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında üretilen betonarme kirişler, basit eğilme etkisi altında deneye tabi tutulmuş ve kırılma momentleri elde edilmiştir. Burada ise bu elemanların kırılma şekilleri ve çatlak dağılımı üzerinde durulmaktadır.

Taşıyıcı hafif beton ile üretilen betonarme kirişte, yük uygulanması sırasında çatlaklar, kirişin maksimum moment bölgesinde kılcal düzeyde yayılarak gerçekleşmiştir. Bu çatlakların sayısı yük düzeyi arttıkça fazlaşmış ve açıklıkları da az da olsa büyümüştür. Çatlak sayılarının fazlalığı nedeniyle, oluşan çatlakların betonun üst lifine yaklaştığı aşamada (yaklaşık nihai yük düzeyinde) ölçülebilen en büyük çatlak açıklığı 1.5 mm olmuştur. Bu kirişe ait nihai durumda oluşan çatlak dağılımı Şekil 53' de verilmiştir.



Şekil 53. Taşıyıcı hafif betonla üretilen kirişte göçme

Taşıyıcı hafif betonla üretilen kirişlerle karşılaştırmak amacıyla üretilen geleneksel betonarme kirişlerde ise yaklaşık 20 kN' luk bir yük düzeyinde kirişin maksimum moment bölgesinde belirgin bir çatlağın olduğu (bkz. Şekil 49), bu yük düzeyinden sonra çatlak sayısının, dar bir bölgede, az da olsa arttığı gözlenmiştir. Ancak bu kirişlerde nihai kırılma yükü düzeyine yakın, okunabilen en büyük çatlak açıklığı 4.5 mm dir (Şekil 54).



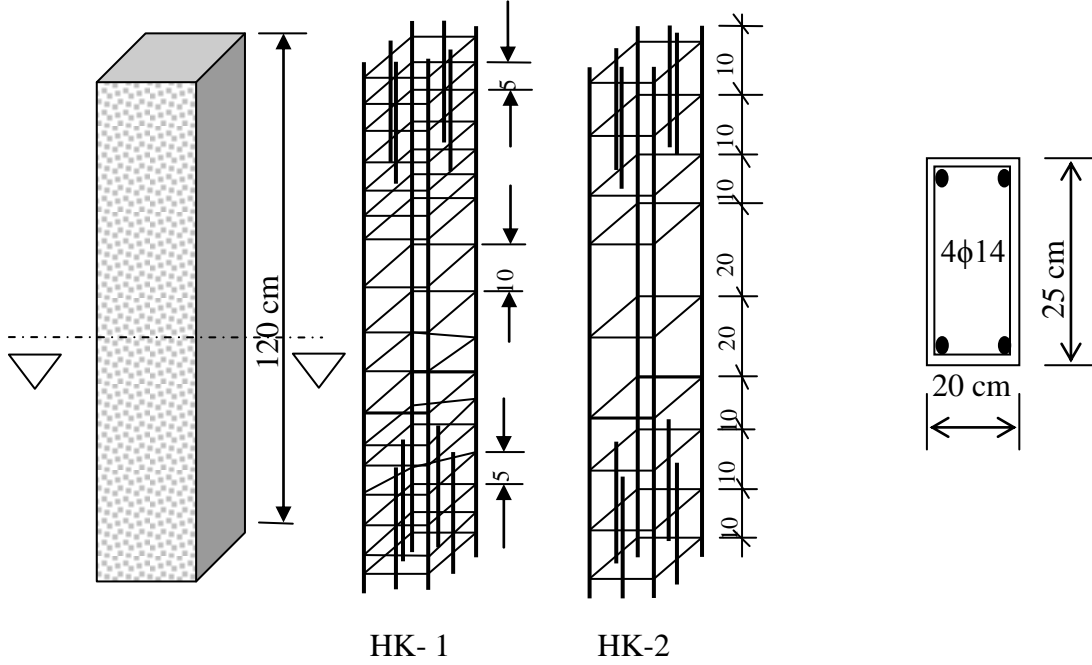
Şekil 54. Geleneksel betonla üretilen betonarme kirişlerde çatlakların gelişimi

Bu şekillerden de görüldüğü gibi, taşıyıcı hafif betonarme kirişlerde çatlak oluşumu ve sayısının, geleneksel betonarme kirişlere göre daha geniş bir bölgeye yayılmıştır. Bu da taşıyıcı hafif betonarme kirişlerde, yükün sabit moment bölgesinde tüm kesitlerce taşındığı, dolayısıyla da daha fazla şekildeğiştirme kabiliyetine sahip olduğunu göstermektedir.

2.6. Taşıyıcı Hafif Betonla Üretilen Kolonların Davranışı

Taşıyıcı hafif betonla üretilen yekpare ve prefabrike yapı elemanlarının davranışlarının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında üretilen taşıyıcı hafif beton karışımlarından en iyi sonucu veren SLC19 karışımı kullanılarak, en kesit boyutları 200 mm x 250 mm, yüksekliği 1200 mm olan, betonarme kolonlar

üretlmifltir. Bu kolonlarda, faklı iki enine donatı düzenlemesi yapılmıftır. Bu kolonlara ait Şematik donatı planı Şekil 55' de verilmiştir.



Şekil 55. Deney kolonlarının Şematik donatı planı ve enkesiti

Taşıyıcı hafif betonla üretilecek kolonların birisinde, sarılma bölgelerinde enine donatı (etriye) aralığı 50 mm, açıklıkta 100 mm (HK-1), diğerinde ise sıkılaştırma bölgesinde 100 mm, açıklıkta 200 mm olarak (HK-2) alınmıftır. Bununla birlikte kolonların her iki ucunda da yükleme altında, başlıkların ezilmesini önlemek için ilave donatı yerleştirilmiştir.

Taşıyıcı hafif betonarme kolonların üretiminde, taşıyıcı hafif beton, kirişlerin üretiminde olduğu gibi üretilmiş ve donatısı Şekil 56' da verildiği gibi hazırlanan kolon kalıplarına üç aşamada yerleştirilmiştir.



Şekil 56. Deney kolonlarının donatılarının kalıplarına yerleştirilmesi ve beton dökümü

Üretimlerinden bir gün sonra, yan kalıpları açılan kolonlar, sürekli ıslak kalacak şekilde su tutucu bir örtü ile üzerleri kapatılmıştır. Deney numunelerinin üretimi sırasında da çapı 150 mm, yüksekliği 300 mm olan standart silindirler yardımıyla üçer adet şahit beton numunesi alınmıştır. Üretimlerinden 42 gün sonra 6000 kN 'luk yükleme sistemine yerleştirilen kolonlar merkezi yük etkisi altında deneye tabi tutulmuştur. Deneylerde kolona uygulanan merkezi yük ve kolon orta bölgesine yapıştırılan aktif boyları 120 mm olan birim şekildeğiştirme ölçerleri (strain gauge) yardımıyla birim kısalma değerleri, 32 kanallı veri toplama sistemi kullanılarak kaydedilmiştir. Yükleme sistemi Şekil 57' de verilmiştir. Deneylerden önce, kolon üretimi sırasında alınan şahit hafif beton numunelerin basınç dayanımı belirlenmiş ve ortalama basınç dayanımları 32.04 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 57. Kolonların deneye hazırlanması

Yükleme çerçevesine yerleştirilen kolonlar sabit bir yüklemeye hızı ile taşıma gücünü kaybedene kadar yüklendi. Buna göre sarılma bölgesinde enine donatı aralığı 50 mm, açıklıkta 100 mm olan HK-1 kolonu 1953 kN' luk yük etkisinde, sarılma bölgesinde enine donatı aralığı 100 mm, orta bölgede 200 mm olan HK-2 kolonunda ise 1877 kN' luk yük etkisinde taşıma gücünü kaybetti. Şekil 58' de kolonlara ait tipik kırılma şekli verilmiştir.

Kolonların teorik kırılma yüklerinin belirlenmesi için merkezi yük etkisinde basınca çalışan bir elemanın taşıyabileceği en büyük yük N_r ;

$$N_r = 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot h + A_{st} \cdot f_{yd} \quad (13)$$

bağıntısıyla belirlenmektedir. Ancak burada kırılma yükü, f_{cd} betonun hesap dayanımı yerine deneylerden elde edilen ortalama dayanım, f_{yd} donatının hesap akma dayanımı yerine de deneyde kullanılan donatının ortalama akma dayanımı kullanılarak hesaplanmış ve deney sonuçları ile birlikte Tablo 23' te verilmiştir. Kolon orta bölgesine yerleştirilen birim şekildeğiştirme ölçerler yardımıyla kaydedilen birim kısalma değerleri kullanılarak yük-birim kısalma eğrileri Şekil 59' de verilmiştir.



Şekil 58. Taşıyıcı hafif betonarme kolonlara ait tipik kırılma şekilleri

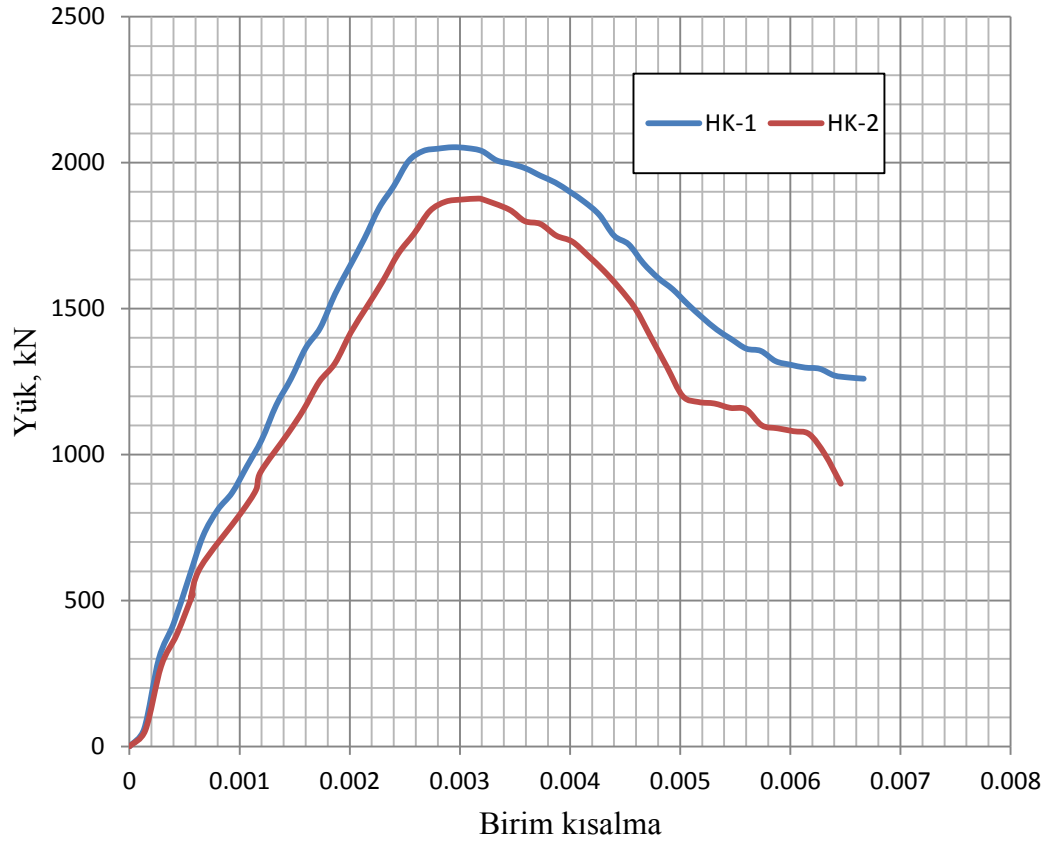
Tablo 23. Taşıyıcı hafif betonarme kolonların deneysel ve teorik kırılma yükleri

Taşıyıcı hafif betonarme kolonlar	Deneysel kırılma yükü, N_e (kN)	Teorik kırılma yükü, N_r (kN)	N_e/N_r
HK-1	2053	1653	1.24
HK-2	1877		1.14

Bu tablodan görüldüğü gibi, taşıyıcı hafif betonla üretilen kolonlardan sarılma bölgesinde enine donatı aralığı 50 mm, orta bölgede 100 mm olan HK-1 kolonu ile, sarılma bölgesinde enine donatı aralığı 100 mm, orta bölgede 200 mm olan HK-2 kolonunun kırılma yükü arasında %9 oranında bir fark elde edilmiştir. Deneysel kolonların üretiminde aynı harman betonun kullanıldığı dikkate alındığında bu farkın etriye sıklaştırmasından kaynaklandığı görülmektedir. Husem ve Pul (2007), yüksek performanslı betonlarda enine donatı aralıklarını değiştirerek yaptıkları çalışmada, enine donatı aralığının 50 mm den 100

mm' ye çıkması durumunda sonucun %6 oranında değiştiğini belirtmişlerdi. Bu çalışmada üretilen betonarme kolonlarda hafif betonun kullanılmasından ve boyut etkisinden dolayı bu farklılığın olabileceği düşünülmektedir.

Taşıyıcı hafif betonla üretilen betonarme kolonların deneysel kırılma yükü, teorik kırılma yükünden HK-1 (sarılma bölgesinde etriye aralığı 50 mm, orta bölgede 100 mm) kolonunda %24, HK-2 (sarılma bölgesinde 100 mm, orta bölgede 200 mm) kolonunda ise %14 daha büyük olarak elde edilmiştir. Bağıntı (13) ile hesaplanan teorik kırılma yükünün deneysel kırılma yükünden daha az olması, taşıyıcı hafif betonla üretilen betonarme elemanlarının hesabının geleneksel betonlar için verilen bağıntılarla hesaplanması durumunda güvenli tarafta kalacağını göstermektedir.



Şekil 59. Taşıyıcı hafif betonla üretilen kolonlarda merkezi yük-birim kısalma Eğrileri

Şekil 59' dan da görüldüğü gibi, maksimum yüke karşılık gelen, betonarme kolonların orta bölgesinde ölçülen birim kısalma değerleri, HK-1 kolonunda 0.0029, HK-2

kolonlarında ise 0.0032 olarak elde edilmiştir. Bu değer geleneksel betonlarda yaklaşık olarak 0.002 civarındadır.

Bu çalışma kapsamında üretilen, taşıyıcı hafif betonlarla yapılan betonarme kiriş ve kolonlar üzerinde yapılan deneylerden de görüldüğü gibi, söz konusu taşıyıcı betonun gerek üretilebilirliği gerekse yapı elemanları üzerindeki davranışları bakımından, geleneksel betonarme elamanlara benzer davranışlar göstermiştir. Dolayısıyla da, bu beton kullanılarak üretilen betonarme elemanların hesaplarının da geleneksel betonlar için verilen hesap ve bağıntılarla yapılabileceğini göstermiş bulunmaktadır. Dolayısıyla da bu betonla inşa edilmiş bir yapıda, taşıyıcı hafif betonun doğal durumdaki (laboratuvar ortamında) birim kütlesi 1485 kg/m^3 , geleneksel betonun birim kütlesi ise 2400 kg/m^3 olarak dikkate alındığında, %38 oranında kütlede bir azalma olacağı dolayısıyla da söz konusu yapıya depremden daha az bir etki geleceği açıktır.

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın temel amacı, geliştirilmiş perlit agregası kullanılarak, en az C25 dayanım sınıfında üretilen taşıyıcı betonların, yekpare ve prefabrike yapılarda kullanılabilirliğini, deneysel olarak araştırmaktır. Bu betonların yekpare ve prefabrike yapılarda kullanımının, özellikle topraklarının büyük bir kısmı etkin deprem kuşağında bulunan ülkelerde, yapıların kütlelerinin azalması nedeniyle depremlerden daha az etkilenmesine, temel maliyetinin azalmasına, prefabrike yapılarda ise daha büyük açıklıkların geçilebilmesine, taşıma ve montaj maliyetinin düşmesine neden olacağı açıktır. Ancak üretilen hafif betonun yukarıda verilen avantajlarından yararlanılabilmesi için, üretiminin geleneksel betonlar gibi şantiyelerde de kolaylıkla yapılabilmesi ve birim maliyetinin de diğer betonlara göre fazla olmaması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında hedeflenen dayanımlarda üretilen hafif betonların bu koşulları da sağlamasına çalışılmıştır.

Taşıyıcı hafif betonla üretilen yekpare ve prefabrike yapı elemanlarının davranışlarının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada, geliştirilmiş perlit agregasının belli oranlarda beton bileşimine katılmasıyla, çok sayıda hafif beton üretimi yapılmıştır. Çalışma kapsamında hedeflenen basınç dayanımına sahip hafif betonun basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, donatı-beton aderansı, bu betonla üretilen eğilme etkisindeki elemanların davranışı ile kolonların merkezi yük altındaki davranışları incelenmiştir. Yapılan deneysel ve teorik çalışmalardan çıkartılabilecek başlıca sonuçlar ve öneriler aşağıda özetlenmektedir.

1) Bu çalışma kapsamında hedeflenen taşıyıcı hafif beton üretmek için 21 ayrı karışım hazırlanmış ve bu karışımlar kullanılarak üretilen betonların, geç dayanım kazanmaları dikkate alınarak, 7, 28, 42 ve 90 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Buna göre, 12 karışımın 42 günlük, 150 mmx 150 mm' lik küp, basınç dayanımı, hedeflenen 25 MPa' lık basınç dayanımından daha büyük olduğu görülmüştür. Bu karışımlardan üçünün basınç dayanımı ise 30 MPa' nın üzerinde elde edilmiştir.

2) Üretilen 21 ayrı karılımdaki hafif betonların fırın kurusu birim kütleleri en fazla 1382 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Bu da standartlarda hafif betonlar için tanımlanan 1800 kg/ m³ den %30 oranında daha azdır.

3) Deneme üretimlerinden elde edilen küp numune basınç dayanımlarına göre, üç karışım tekrar gözden geçirilerek, her biri için standart numuneler üretilmiştir. Bu betonların standart silindir numune dayanımları 42. gün için, 25.68 MPa, 29.57 MPa ve 32.63 MPa olarak elde edilmiştir. Fırın kurusu birim kütleleri ise sırasıyla 1490 kg/m^3 , 1510 kg/m^3 ve 1270 kg/m^3 olmuştur.

4) Beton karışımları düzenlenerek üretilen üç seri hafif betonun dayanım kazanma hızları da incelenmiş ve 42. güne kadar dayanım kazanma hızının arttığı, bu günden sonra dayanım kazanmaya devam ettiği, ancak dayanım kazanma hızında azalma olduğu görülmüştür.

5) En yüksek dayanım veren karışımdan elde edilen karakteristik basınç dayanımı 31.03 MPa' dır. Bu da bu çalışma kapsamında üretilen betonların C30 dayanım sınıfına girdiğini göstermektedir.

6) Üretilen taşıyıcı hafif betonun gerilme-şekildeğiştirme diyagramı belirlenmiştir. Buna göre maksimum dayanıma karşılık gelen birim kısalma 0.0033, ölçülebilen nihai birim kısalma ise 0.0045 olarak elde edilmiştir.

7) Taşıyıcı hafif betonun yarmada çekme dayanımı 2.83 MPa olarak belirlenmiştir. Bu betonun basınç dayanımının 32.63 MPa olduğu dikkate alındığında, yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranı %9 olmuştur.

8) Üretilen hafif betonda, donatı-beton aderansının araştırılması için, çapı 8mm, 12 mm ve 14 mm olan donatı çubukları, üç farklı gömme boyu (çapın 6, 10 ve 14 katı), taşıyıcı hafif beton içine gömülmüş ve bu numuneler üzerinde çekip çıkarma deneyi yapılmıştır. Deneylerden gömme boyu az olan numunelerde yarıma gözlenmiş, ancak bu yarılmalar gömme boyu donatı çapının 10 katı olan numunelerde, 0.25 mm lik sıyrılmanın gerçekleşmesinden sonra olmuştur. Deneyler, gömme boyunun donatı çapının en az 14 katı olması, üretilen hafif beton için yeterli aderansın sağlanacağını göstermiştir.

9) Bu çalışma kapsamında üretilen taşıyıcı hafif beton kullanılarak betonarme kiriş üretilmiştir. Kiriş üretiminde kullanılan betonun şahit numunelerden elde edilen ortalama basınç dayanımı 31.25 MPa dır. Taşıyıcı hafif kirişin davranışlarının geleneksel kirişin davranışları ile karşılaştırılabilmesi için, aynı dayanımı verecek şekilde geleneksel beton hazırlanmış ve aynı özelliklerde kirişler üretilmiştir. Hazırlana geleneksel betonun basınç dayanımı ise 33.15 MPa olarak ölçülmüştür.

10) Taşıyıcı hafif beton ile üretilen betonarme kirişte, plastik mafsallık davranışını sağlayan yük 121.05 kN, orta noktada ölçülen sehim ise 15 mm olarak elde edilmiştir. Bu

değerler geleneksel betonda sırasıyla 133.73 kN ve 6.35 mm ölçülmüştür. Nihai durumda ise, hafif betonla üretilen kiriş yük 123.12 kN, sehim 31.45 mm olurken, geleneksel betonda bu değerler sırasıyla 133.90 kN ve 22.17 mm olmuştur. Aynı özelliklere sahip kirişlerden hafif betonla üretilen daha fazla sehim yapmaktadır.

11) Taşıyıcı hafif betonla üretilen kirişte, nihai yüke karşılık gelen yerdeğiştirmenin plastik mafsal oluşturan yüke karşılık gelen yerdeğiştirmeye oranı olarak tanımlanan süneklik oranı, 3.0, geleneksel betonla üretilen kirişte ise 5.5 olarak hesaplanmıştır. Bu da plastik mafsal davranışından sonra geleneksel betonun daha sünek davrandığını göstermektedir.

12) Bu çalışma kapsamında üretilen kirişlerin enerji yutma kapasiteleri hesaplanmış ve hafif betonarme kirişler için, plastik mafsal oluşana kadar 1032 kNmm, geleneksel betonda ise bu bölgede 429 kNmm olarak belirlenmiştir. Bu değerler plastik bölgede hafif betonarme kirişler için 3560 kNmm, geleneksel betonarme kirişte ise 3462 kNmm olarak, mafsallaşmadan sonra davranışa donatının davranışı etkili olması nedeniyle, birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Enerji yutma kapasiteleri toplamda ise, hafif betonarme kirişlerde 4592 kNmm, geleneksel betonarme kirişlerde 3891 kNmm olarak hesaplanmıştır. Bu da hafif betonarme kirişlerin daha fazla enerji yutma kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir.

13) Taşıyıcı hafif betonarme kiriş ve geleneksel betonarme kirişlerin, standartlarda öngörülen hesap yöntemine göre, direnme momentleri hesaplanmış ve deney sonuçlarına oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. (M_r/M_e oranı hafif betonarme kiriş için 1.02, geleneksel betonarme kiriş için ise 0.93' dür). Bu da, hafif betonarme kiriş hesaplarının yürürlükte bulunan yönetmeliklerde verilen hesap yöntemi ve varsayımlarıyla yapılabileceğini göstermektedir.

14) Hafif betonarme kirişlerde, çatlak sayısı geleneksel kirişlere göre, daha fazla, çatlak açıklığı ise daha az olmuştur. Hafif betonarme kirişlerde ölçülebilen en büyük çatlak açıklığı 1.5 mm iken, geleneksel betonarme kirişlerde bu değer 4.5 mm dir.

15) Üretilen taşıyıcı hafif betonun merkezi yük etkisindeki kolonlardaki davranışlarının incelenmesi için iki farklı sargı donatısında betonarme kolanlar üretilmiştir. Sarılma bölgesinde enine donatı aralığı 50 mm, orta bölgede 100 mm olan kolonlarda nihai yük 1953 kN, enine donatının, sarılma bölgesinde 100mm, orta bölgede 200 mm olması durumunda ise, nihai yük 1877 kN olarak elde edilmiştir.

16) Betonarme kolonlar için yönetmeliklerde verilen teorik nihai yük değeri 1653 kN olarak hesaplanmıştır. Buna göre deneyden elde edilen nihai yükün teorik nihai yüke oranı sargı donatısı aralığı küçük olan kolonda (sarılma bölgesinde 50 mm, orta bölgede 100 mm) %24, sargı donatısı aralığı büyük olan kolonda ise %14 olarak elde edilmiştir. Teorik kırılma yükünün, deneysel kırılma yükünden daha az olması, taşıyıcı hafif betonla üretilen kolon hesaplarının da, geleneksel kolonlar için verilen bağıntıyla yapılması durumunda güvenli tarafta kalacağını göstermektedir.

17) Hafif betonarme kolonların merkezi yük altında belirlenen yük-birim kısalma eğrisinden, sargı donatısı aralığı az olan kolonlarda maksimum yüke karşılık gelen birim kısalma değeri 0.0029, sargı donatısı aralığı fazla olan kolonda ise 0.0032 olarak elde edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan başka önerilebilecek bazı çalışmalar aşağıda özetlenmektedir.

18) Üretilen taşıyıcı betonlarla, kirşlerin kesme kuvveti altındaki davranışları incelenebilir.

19) Taşıyıcı hafif betonlarda lif katkısının, davranışa etkileri incelenebilir.

20) Taşıyıcı hafif beton kullanılarak üretilen betonarme kolonların bileşik eğilme etkisindeki davranışları incelenebilir.

21) Taşıyıcı hafif betonarme çerçevelerin tekrarlı yük etkisindeki davranışları araştırılabilir.

22) Bu betonla üretilen prefabrike yapı elemanlarının bağlantıları incelenebilir.

23) Özellikle çelik yapılarda, kullanım alanı bulan kompozit kolonlarda, davranışları araştırılabilir.

24) Taşıyıcı hafif betonla üretilen yapı elemanlarının darbeye karşı dayanımları araştırılabilir.

Özetle, bu çalışma kapsamında üretilen, taşıyıcı hafif betonlarla yapılan betonarme kiriş ve kolonlar üzerinde yapılan deneylerden görüldüğü gibi, söz konusu taşıyıcı betonun gerek üretilebilirliği, gerekse yapı elemanları üzerindeki davranışları bakımından, geleneksel betonarme elamanlara benzer davranışlar göstermiştir. Dolayısıyla da, bu beton kullanılarak üretilen betonarme elemanların hesaplarının da geleneksel betonlar için verilen hesap ve bağıntılarla yapılabileceğini göstermiş bulunmaktadır. Dolayısıyla da bu betonla inşa edilmiş bir yapıda, taşıyıcı hafif betonun doğal durumdaki (laboratuvar

ortamında) birim kütlesi 1485 kg/m^3 , geleneksel betonun birim kütlesi ise 2400 kg/m^3 olarak dikkate alındığında, %38 oranında kütlesinde bir azalma olacağı dolayısıyla da söz konusu yapıya, depremden daha az yük gelmektedir.

4. KAYNAKLAR

- ACI, 1987. Guide for structural lightweight aggregate concrete, ACI 213R-87, USA.
- ACI, 1916. Report of the Committee on Reinforced Concrete and Building Laws, Proceedings of the Twelfth Annual Convention, ACI, XII.
- ACI, 1917. Proposed Standard Building Regulations for the Use of Reinforced Concrete, Proceedings of the Thirteenth Annual Convention, ACI, XIII.
- ACI, 1919. Proposed Standard Building Regulations for the Use of Reinforced Concrete, Proceedings of the Fifteenth Annual Convention, ACI, XV.
- ACI, 1920. Standard Building Regulations for the Use of Reinforced Concrete, standard Specification No:23, Proceedings of the Sixteenth Annual Convention, ACI, XVI.
- ACI, 1925. Preliminary Draft of Proposed Standard Building Regulations for the Use of Reinforced Concrete, Concrete Building Design and Specifications, Proceedings of the Twenty-First Annual Convention, ACI, XXI.
- ACI, 1928. Tentative Building Regulations for Reinforced Concrete, Proceeding of the Twenty-Fourth Annual Convention, ACI, XXIV.
- ACI, 1936. Building Regulations Reinforced Concrete, Journal of the ACI,7, No:4.
- ACI, 1963. Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI Standard 318-63, Farmington Hills.
- ACI, 1977. Building Code Requirements for Reinforced Concrete'', ACI Standard 318-77, Farmington Hills.
- Aitcin, P.C., 1998. High-Performance Concrete. E and FN SPON, 650p, London and Newyork.
- Akman, S. ve Taşdemir, M.A., 1977. Taşıyıcı malzeme olarak perlit betonu. 1. Ulusal Perlit Kongresi, Ankara, MTA, Bildiriler Kitabı 40-48,
- Al-Khaiat, H., ve Haque, M.N., 1998. Effect of Initial Curing on Early Strength and Physical Properties of Lightweight Concrete. Pergoman Cement and Concrete Research, 28, 859-866.
- Anonim, 1985. Türkiye Perlit envanteri. MTA Genel Müdürlüğü Yayınları, 38, Ankara.
- Arıoğlu, E., ve Yılmaz, A. O., 2006. Beton Agregaları, Evrim Yayınevi, İstanbul.

- ASTM C 330, 2002. Specification for lightweight Aggregates for Structural Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- Balendran, R.V., Zhou, F.P., Nadeem, A. ve Leung, A.Y.T., 2002. Influence of Steel Fibres on Strength and Ductility of Normal and Lightweight High Strength Concrete. Pergamon, Building and Environment. 37, 1361-1367.
- Berra, M. ve Ferrara, G., 1990. Normal Weight and Total Lightweight High Strength Concretes. ACI SP 121, 215-238.
- Brachet, M., Adam, M., Perchat, J., ve Virlogeux, M., 1976. Bilan et Perspective Emploi des Betons Legers de Structure, Annales IITBTP, No.345, pp47-127,
- British Standard, 1985. Structural Use of Concrete Part 1: Code of Practice For Design and Construction', BS-8110.
- CEB-FIB, 1990. Concrete Technology, Model Code, Comité Euro-International du Béton.
- Chandra, S. ve Berntsson, L., 2003. Lightweight Aggregate Concrete. 430, Noyes Publications, USA.
- Chia, K.S. ve Zhang, M.H., 2002. Water Permeability and Chloride Penetrability of High Strength Lightweight Aggregate Concrete. Pergoman-Cement and Concrete Research 32, 639-645.
- Clarke, J. L., 1993. Structural Lightweight Aggregate Concrete, Blackie Academic & Professional, London, England.
- 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.
- Demirboğa R., Örüng I. ve Gül R., 2001. Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes. Cem. and Conc. Res. 32, 1627-1632.
- DIN, 1999. Concrete, Reinforced and Prestressed Concrete Structures–Part 2: Concrete, Specification, Properties, Production and Conformity. DIN 1045–2, German Institute for Standardization.
- D.P.T., 2001. 8. Kalkınma Planı (2001-2005), Devlet Planlama Teşkilatı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Ankara.
- D.P.T., 2006. 9. Kalkınma Planı (2007-2013), Devlet Planlama Teşkilatı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Ankara.

- Durmuş, A., Arslaner M., Hüsem M. ve Kolaylı H., 1996. Karadeniz Bölgesi Hafif Agrega Yataklarının Belirlenmesi ve Bunların Yekpare ve Prefabrike Beton Yapılarda Kullanılabilirlik ve Yararlarının Araştırılması, Trabzon.
- Durmuş, A.,1988. Betonarme İnşaatta Hafif Betonlar ve Türkiyedeki Durumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Trabzon Şubesi Bülteni, Trabzon.
- ENV, 1990. Concrete Performance, Production, Placing and Compliance Criteria, European Committee for Standardization, ENV 260.
- Erciyes, Y., 1963. Bims ve Bims Betonu Üzerine Araştırmalar, İmar ve İskan Bakanlığı Yayınları, No. 5-17, Ankara.
- Faust. T. ve Gert König, E.H., 1997. Stres-Strain Curves of High Strength Lightweight Concrete. LACER, 2, 103-109.
- Pelisser, F. , Barcelos, A., Santos, D., Peterson, M., ve Bernardin, A.M., 2012. Lightweight Concrete Production with Low Portland Cement Consumption, Journal of Cleaner Production, 23, 1,68-74.
- Friedemann, K., Krumbach, R., ve Seyfarth, K., 1999. High-Strength Concrete Durability Investigation by Using The CDF test. LACER 4, 97-112.
- Gao, J., Sun, W. ve Morino, K., 1997. Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced High Strength Lightweight Concrete. Elsevier Cement and Concrete Composites 19, 307-313.
- Giaccio G., Rocco, C., Violini, D., Zappitelli J. ve Zerbino, R., 1992. “High-Strength Concrete Incorporating Different Coarse Aggregates”, ACI Matter, 89,3, 242-246.
- Gündüz, L. (Ed.), 1998. Pomza Teknolojisi, Pomza Karakterizasyonu, Cilt I., 218s, Isparta.
- Gündüz, L.(Ed.), 1998. Pomza Teknolojisi, İnşaat Sektöründe Pomza, Cilt II, 205s, Isparta.
- Gündüz, L., ve Uğur, I., 2005. The Effects of Different Fine and Coarse Pumice Aggregate/ Cement Ratios on the Structural Concrete Properties Without Using any Admixtures. Cement and Concrete Research, 35, 1859-1864.
- Hague, M.N., Al-Khaiat, H. ve Kayalı, O., 2004. Strength and Durability of Lightweight Concrete, Cement and Concrete Composites, 26, 307-314.
- Herman ,V., Weber, J.W. ve Wesche, K., 1974. The Dynamic Modulus of Elasticity Equivalent for The Initial Tangent Modulus of Static Testing “, Buildings Research Institute , T.U. Aachen.

- Hoff, G.C., 1990. High-Strength Lightweight Aggregate Concrete. ACI SP, 121, 619-644.
- Hüsem, M. ve Durmuş, A., 1993. Karadeniz Bölgesi Hafif Agregalarıyla Üretilen Taşıyıcı Betonlar. İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler, 1. Teknik Kongre, Ekim, Gazi Magusa-Kuzey Kıbrıs, Bildiriler Kitabı 1, 580-588.
- Hüsem, M., 1995. Doğu Karadeniz Bölgesi Doğal hafif Agregalarından Biriyle Yapılan Hafif Betonun Geleneksel Bir Betonla Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi. Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Husem, M. ve Pul, S., 2007. Investigation of Stress-Strain Models for Confined High Strength Concrete, Journal of Sadhana 32.
- Hwang, C.L. ve Hung, M.F., 2005. Durability Design and Performance of Self-consolidating Lightweight Concrete. Construction and Building Materials 19, 1200-1207.
- Kayali, O., 2005. Flashag New Lightweight Aggregate for High Strength and Durable Concrete. Submitted for Consideration in the 2005 World of Coal Ash, 1-19, Lexington.
- Kılıç, A., Atış, C.D., Yaşar, E. ve Özcan, F., 2003. High Strength Lightweight Concrete made With Scoria Aggregate Containing Mineral Admixture. Science and Direct Cement and Concrete Research, 33, 1595-1599.
- Klink, S.A., 1985. Actual Elastic Modulus of Concrete, Journal of ACI, 82, 630-633.
- Kluge, R. W., Sparks, M. M. ve Tuma, E. C., 1949. Lightweight-Aggregate Concrete, ACI Journal Proseedings, 27, 9, 625-664.
- Kok, S.C. ve Min-Hong, Z., 2002. Water Permeability and Chloride Penetrability of High-Strength Lightweight Aggregate Concrete, Cement and Concrete Research, 32, 639-645.
- Kocal, N.U. ve Ozturan, T., 2011. Durability of Lightweight Concretes with Lightweight Fly Ash Aggregates, Construction and Building Materials, 25, 3, 14530-1438.
- Konuk, H., Özyurt, N., Taşdemir, C., Yücel, Z. ve Sönmez, R., 2002. Hafif Betonların Taşıyıcılık Özellikleri, 1. Ulusal Yapı Malzemesi Kongre ve Sergisi, TMMOB Mimarlar Odası İstanbul Büyükkent Şubesi, İstanbul.
- Malhotra, V.M., 1990. Properties of High Strength Lightweight Concrete Incorporating Fly Ash and Silica Fume. ACI SP-121, 645-666p.

- Meeks, K. W. ve Cario, N.J., 1999. Curing of High-Performance Concrete,: Report of the State-of-the-Art, United States Department of Commerce Technology Administration, USA.
- Mindess, S. ve Young, J. F., 1987. Concrete, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Mladenovic, A., Suput, J.S., Ducman, V. and Skapin, A.S., 2004. Alkali-Silica Reactivity of Some Frequently used Lightweight Aggregates. Science and Direct-Cement and Concrete Research, 34, 1809-1816.
- Neville, A. M., 1996. Properties of Concrete, John Wiley&Sons Inc, New York.
- Niederhoff, A. E., 1949. Lightweight Pumice Concrete, ASCE Proceedings, 6, 743-758.
- Nilsen, A.U., Monteiro, J.M. ve Gjorv, O.E.,1995. Estimation of the Elastic Modulus of Lightweight Aggregate, Cement And Concrete Research, 25,2, 276- 280.
- Richart, F . E. ve Jensen, V. P,. 1930. Concrete and Design Features of Haydite Concrete, ACI Journal Proceedings, 27, 9, 151-182.
- Sari, D., Paşamehmetoğlu, A.G., 2005. The Effects of Gradation and Admixture on the Pumice Lightweight Aggregate Concrete, Cement And Concrete Research, 35,5, 936-942.
- Scheer, S. ve Curbach, M., 2002. Utilization of High Strength /High Performance Concrete. 6th Symposium Leipzig . 1355-1366.
- Shannag, M. J., 2011. Characteristics of Lightweight Concrete Containing Mineral Admixtures, Construction and Building Materials, 25, 658-662.
- Shideler, J. J., 1957. Lightweight Aggregate Concrete for Structural Use, ACI Journal Proceedings, 54, 19, 299-328.
- Short M. ve Kinniburgh W., 1978. Lightweight Concrete. Applied Science Publishers. London. 443-455.
- Smadi, M. ve Migdady, E., 1990. Properties of High Strength Tuff Lightweight Aggergate Concrete. Science and Direct-Cement and Concrete Composites, 13,2, 129-135.
- Sükan, T. ve Ermutlu, E., 1966. Doğal Hafif Agregalarla Hafif Beton Araştırması, TÜBİTAK, Proje No. : MAG-31, Ankara.
- Sükan, T., 1966. Doğal Hafif Agregalarla Hafif Beton Araştırması, DSİ Araştırma Dairesi Başkanlığı, Rapor No. : MLZ-370, Ankara.

- Taşdemir, M.A., 1982. Taşıyıcı Hafif Agregalı Betonların Elastik ve Elastik Olmayan Davranışları. Doktora Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Topçu, İ.B., 1997. Semi-Lightweight Concretes Produced by Volcanic Slags”, Cement And Concrete Research, 27, 15-21.
- T.S.E., 1997. Agregaların Genel Özellikleri İçin Deneyler, Kısım 1.Numune Alma Metotları. TS EN 932-1, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- T.S.E., 2002. Beton-Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, TS EN 206-1, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- T.S.E., 1982. Genleştirilmiş Perlit Agregası, TS 3681, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- T.S.E., 1977. Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları, TS 2511, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- T.S.E. 2004. Hafif Agregalar-Beton için. TS 1114 EN 13055-1, Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara.
- T.S.E., 1989. Beton Yapım, Döküm ve Bakım Kuralları-Anormal Hava Şartlarında, TS 1248, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- T.S.E., 2002. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. TS EN 197-1, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- T.S.E., 2003. Beton Agregaları, TS 706 EN 12620, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- T.S.E., 2009. Beton Karışımı Hesap Esasları, TS 802, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- T.S.E., 1984. Beton Yapım, Döküm ve Bakım Kuralları (Normal Hava Koşullarında), TS 1247, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tuthill, L. H., 1945. Concrete Operations in the Concrete Ship Program, ACI Journal Proceedings, 41, 1, 137-180.
- Türkmen İ. ve Kantarcı A., 2007. Effects of Expanded Perlite Aggregate and Different Curing Conditions on the Physical and Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete, Building and Enviromen, 42,6, 2378-2383.
- Ulus, İ., 2007. Ham Perlit Agregası Kullanılarak Yüksek Dayanımlı Hafif Beton Üretilebilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi , Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

- Washa, G.W., 1956. Properties of Lightweight Aggregates and Lightweight Concretes. ACI Journal, 53,4, 375-382.
- Wasserman, R. ve Bentur, A., 1996. Interfacial Interactions in Lightweight aggregate Concretes and Their Influence on the Concrete Strength. Science and Direct-Cement and Concrete Composites, 18,1, 67-76.
- Weber, S. ve Reinhard, H.W., 1997. A New Generation of High Performance Concrete With Autogenous Curing. Elsevier-Advn Cem Bas Mat, 6, 59-68.
- Wilson, H.S. ve Malhotra, V.M., 1998. Development of High Strength Lightweight Concrete for Structural Applications. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 10,2, 79-90.
- Uysal, H., Demirboğa, R., Şahin, R. ve Gül, R., 2004. The Effects of Different Cement Dosages, Slumps, and Pumice Aggregate Ratios on the Thermal Conductivity and Density of Concrete. Cement and Concrete Research, 34, 845- 848.
- Yanai, S., Sakata, N., Watanabe, K. ve Nobuta, Y., 1999. Development of Self Compacting Concrete Using High Performance Ligthweighth Aggregate. Kajima Corporation Annual Report, 47, 40-60.
- Yang, C.C.ve Huang, R., 1996. "A Two-Phase Model for Predicting the Compresive Strength of Concrete", Cement And Concrete Research, 26,10, 1567- 1577.
- Yazıcıoğlu, S. ve Bozkurt, N., 2006. Pomza Ve Mineral Katkılı Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Gazi Üniversitesi. Müh. Mim. Fak. Der., 21, 4, 675–680.
- Zhang, M.H. and Gjorj, O.E., 1991. Mechanical Properties of High Strenth Lightweight Concrete. ACI Materials Journal, 88,3, 700, 240-247.

ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında İran'nın Tabriz Şehrinde doğan Yousef ZANDI, ilköğrenimine Tabriz'de başladıktan sonra 1992 yılında Tarizde Gazi Tebatabayi Lisesinden mezun olmuştur. 1995 yılında Tariz Azad İslami Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girmeye hak kazanmıştır ve öğrenimini burada tamamlamıştır. 1999 yılında Tahran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans kazandı ve 2001 de bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl da (2001 yılında) Tabriz Azad İslami Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nin ders vermeye başladı. Zandi, 2008 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında doktora öğrenimine başlamıştır. İyi derecede Türkçe, İngilizce ve Farsca bilmektedir.