

**HAFİF AGREGALI
KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇLARIN
MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ**

Bilal BALUN

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mehmet KARATAŞ**

HAZİRAN-2013

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAFİF AGREGALI KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN
HARÇLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bilal BALUN
(102115103)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 29 Mayıs 2013

Tezin Savunulduğu Tarih: 17 Haziran 2013

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Mehmet KARATAŞ (F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Zülfü Çınar ULUCAN (F.Ü)
Doç. Dr. Servet YILDIZ (F.Ü)

HAZİRAN – 2013

ÖNSÖZ

Bu tezin önerilmesi ve hazırlanmasında akademik ve kişisel katkılarını benden hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet KARATAŞ'a, bu çalışmayı finanse eden Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) Birimine (Proje No: MF.12.19), çalışmam esnasında büyük yardımlarını gördüğüm yapı laboratuvar teknisyeni Sayın Seyfettin ÇİÇEK'e, çalışmamda kullandığım uçucu külün Soma Termik Santrali'nden temini sırasında sağladığı çok değerli yardımlarından dolayı Sayın Derya YÖNDAR'a, kullanılan genleştirilmiş perliti herhangi bir bedel talep etmeden terdik eden Persa Perlit Türevleri San. Ve Tic. Ltd. Şti.'ne, kimyasal katkı temininde göstermiş olduğu kolaylık ve incelikten dolayı Sayın Yavuz ŞAHİN'e ve Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.'ye, tezim hakkındaki değerli tavsiye ve katkılarından dolayı Bingöl Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sayın Prof. Ali Sayıl Erdoğan'a, hayatımın en önemli basamaklarından birini oluşturan bu çalışmamda maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen babam Halil İbrahim BALUN ve annem Arife BALUN'a, en derin saygı ve sonsuz teşekkürlerimi arz ederim.

Bilal BALUN

Elazığ-2013

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLolar LİSTESİ.....	VIII
SEMBOLLER LİSTESİ	IX
KISALTMALAR LİSTESİ	X
1. GİRİŞ	1
2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON	3
2.1. KYB Tasarımı ve Karışım Bileşenleri	4
2.1.1. Çimento	5
2.1.2. Agrega	6
2.1.3. Toz Malzeme	6
2.1.3.1. Uçucu Kül.....	7
2.1.3.2. Silis Dumanı	9
2.1.4. Kimyasal Katkı	11
3. HAFİF BETON	13
3.1. Hafif Betonun Tarihçesi	14
3.2. Hafif Betonun Tanımı	15
3.3. Hafif Beton Üretiminde Kullanılan Agregalar	17
3.3.1. Pomza	19
3.3.2. Perlit	24
3.4. Hafif Betonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	26
4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	31
4.1. Kullanılan Malzemeler	31
4.1.1. Çimento ve Toz Malzemeler	32
4.1.2. Agrega	32

4.1.3.	Kimyasal Katkı	34
4.1.4.	Karma Suyu	35
4.2.	Deneyler ve Karışım Oranları.....	35
4.2.1.	Taze Harç Deneyleri	37
4.2.1.1.	Mini Çökme-Yayılma Deneyi	38
4.2.1.2.	Mini V-Hunisi Deneyi.....	39
4.2.3.	Sertleşmiş Harç Deneyleri.....	42
4.2.3.1.	Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı.....	42
4.2.3.2.	Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini, Porozite ve Su Emme Deneyleri .	43
4.2.3.3.	Kılcal Su Emme Deneyi	45
4.2.3.4.	Yüksek Sıcaklık Deneyi	46
5.	DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER	47
5.1.	Taze Harç Deney Sonuçları.....	47
5.2.	Sertleşmiş Harç Deney Sonuçları	51
5.2.1.	Kılcal Su Emme, Toplam Su Emme ve Porozite.....	54
5.2.2.	Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı.....	57
5.2.3.	Yüksek sıcaklık.....	63
6.	SONUÇLAR.....	67
	KAYNAKLAR	69
	ÖZGEÇMİŞ	76

ÖZET

Bu çalışmanın amacı kendiliğinden yerleşen harçta (KYH) hafif agreganın kullanımının dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisinin araştırılmasıdır. KYH üretiminde, normal agreganın 0-2 mm ve 2-4 mm boyutunda dere agregası, hafif agreganın 0-2 mm boyutunda genleştirilmiş perlit ve 2-4 mm boyutunda pomza kullanılmıştır. Mineral malzeme olarak silis dumanı ve uçucu kül kullanılmıştır. Seriler, ince malzeme miktarı 650 kg/m^3 ve süper akışkanlaştırıcı miktarı 8 kg/m^3 olacak şekilde toplam 13 farklı şekilde tasarlanmıştır. Taze haldeki KYH'lerin mini çökme yayılma, mini V-hunisi ve viskozimetre deneyleri gerçekleştirilmiştir. KYH'lerin sertleşmiş haldeki özelliklerinin belirlenebilmesi için de yoğunluk, porozite, toplam su emme, kılcal su emme, eğilmede çekme dayanımı, basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre hafif agreganın kullanılan harçların taze haldeki özellikleri kendiliğinden yerleşebilirlik kriterlerine uymaktadır. Hafif agreganın kullanımı su emme değerlerini arttırmıştır. Hafif agreganın oranlarının artması ile harçların mekanik özellikleri azalmış, ancak bütün seriler kendiliğinden yerleşen taşıyıcı hafif harç özellikleri taşımıştır.

Anahtar Kelimeler: Kendiliğinden Yerleşen Harç, Hafif Agreganın, Taze ve Sertleşmiş Özellikler

SUMMARY

MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF SELF COMPACTING MORTAR WITH LIGHTWEIGHT AGGREGATE

The aim of this study is to research the using of lightweight aggregate in self compacting mortars (SCM) to the effect of strenght and durability properties. In the production of SCM, river aggregate was used as normal aggregate in size of 0-2 mm and 2-4 mm, expanded perlite and pumice were used as lightweight aggregate in size of respectively 0-2 mm and 2-4 mm. Silica fume and fly ash were used as mineral additives. Totally 13 different series were designed in fine materials content of 650 kg/m³, and in super plasticizer content of 8 kg/m³. Mini slump flow, mini V-funnel and viscosimeter tests were carried out on the fresh mortar. On the other hand; bulk density, porosity, water absorption, capillary water absorption, tensile strenght in bending, compressive strenght and high temperature tests were made on the hardened SCM. According to the test results, the fresh properties of lightweight aggregate mortars comply with the criteria of self compacting mortars. By using the lightweight aggregate, water absorption have been increased. The mechanical properties of mortars have been decreased with increase in the rate of using lightweight aggregate but in all series, it has been obseved that self compacting structural lightweight mortar production is possible.

Keywords: Self Compacting Mortar, Lightweight Aggregate, Fresh and Hardened Properties

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1 Ayasofya ve Pantheon	14
Şekil 3.2 Colosseum ve Pont du Gard.....	14
Şekil 3.3 U.S.S Selma gemisi	15
Şekil 3.4 Kullanılan agrega cinsine göre hafif betonların sınıflandırılması.....	19
Şekil 3.5 Pomza	20
Şekil 3.6 Ham perlit ve genişletilmiş perlit.....	24
Şekil 4.1 Dere agregası granülometrisi	33
Şekil 4.2 Dere agregası (0-2 mm, 2-4 mm).....	33
Şekil 4.3 Pomza (2-4 mm) ve genişletilmiş perlit (0-2 mm)	34
Şekil 4.4 Mini çökme yayılma deneyi düzeneği.....	38
Şekil 4.5 Mini çökme yayılma ölçümü	39
Şekil 4.6 Mini V-hunisi deney aparatı	39
Şekil 4.7 Mini V-hunisi deney ölçümü	40
Şekil 4.8 Brookfield DV-E model viskozimetre	41
Şekil 4.9 40x40x160 mm prizmatik ve 50 mm küp numuneler	41
Şekil 4.10 Eğilmede çekme dayanımı deneyi.....	42
Şekil 4.11 Basınç dayanımı deneyi.....	43
Şekil 4.12 Arşimet terazisi	44
Şekil 4.13 Kılcal su emme deneyi	45
Şekil 4.14 Yüksek sıcaklık testlerinde kullanılan fırın	46
Şekil 4.15 300, 600 ve 900°C sıcaklıklara maruz kalmış harç numuneleri.....	46
Şekil 5.1 Bağlı çökme yayılma grafiği.....	49
Şekil 5.2 Bağlı V-hunisi hızı grafiği	49
Şekil 5.3 Viskozimetre değişimleri.....	51
Şekil 5.4 Numunelerin etüv kurusu yoğunlukları.....	53
Şekil 5.5 Kılcal su emme katsayıları.....	54
Şekil 5.6 Porozite değişimi.....	55
Şekil 5.7 Toplam su emme değişimi.....	56
Şekil 5.8 KYH'lerin eğilmede çekme dayanımları	59
Şekil 5.9 KYH'lerin basınç dayanımları	60
Şekil 5.10 Yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımları	64
Şekil 5.11 Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları	64

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1 UK'lerin fiziksel özellikleri	7
Tablo 2.2 Değişik termik santral uçucu küllerinin kimyasal kompozisyonları.....	8
Tablo 2.3 Silis dumanının fiziksel özellikleri.....	9
Tablo 2.4 Silis dumanın kimyasal özellikleri	10
Tablo 3.1 Hafif beton için dayanım sınıfları	16
Tablo 3.2 Hafif betonun yoğunluğa göre sınıflandırılması	16
Tablo 3.3 Hafif betonların işlevlerine göre sınıflandırılması	17
Tablo 3.4 Çeşitli standartlara göre taşıyıcı hafif beton kriterler.....	17
Tablo 3.5 Hafif agregalar ve hafif agregalar ile yapılan betonların özellikleri	18
Tablo 3.6 Asidik ve bazik pomza türlerinin kimyasal bileşimleri.....	21
Tablo 3.7 Türkiye'deki pomza rezervleri	22
Tablo 3.8 Dünyanın en önemli pomza üretici ülkeleri ve üretim miktarları.....	23
Tablo 3.9 Farklı illerde pomza oluşumlarının kimyasal analiz değerleri	23
Tablo 3.10 Ham perlitin fiziksel özellikleri	25
Tablo 3.11 Genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri	25
Tablo 3.12 Perlitin yaklaşık kimyasal analizi.....	25
Tablo 3.13 Hafif ve normal agregalı betonlarda çimento	27
Tablo 4.1 Çimento ve toz malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri	32
Tablo 4.2 Agregaların fiziksel özellikleri	34
Tablo 4.3 Kimyasal katkının özellikleri.....	35
Tablo 4.4 Karışımların bileşimleri.....	37
Tablo 5.1 Mini çökme yayılma deneyi sonuçları	48
Tablo 5.2 Farklı açılma hız değerleri için viskozite değerleri	50
Tablo 5.3 KYH numunelerin etüv kurusu, doymuş kuru yüzey ve görünür yoğunlukları ...	52
Tablo 5.4 Toplam su emme ve porozite değerleri	55
Tablo 5.5 Eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerleri.....	58
Tablo 5.6 Etüv kurusu yoğunlukları ve 28 günlük basınç dayanımları	62
Tablo 5.7 Yüksek sıcaklık sonrası eğilme ve basınç dayanımları	63

SEMBOLLER LİSTESİ

Γ_m	: Bağlı çökme yayılma değeri
R_m	: Bağlı V-hunisi değeri
k	: Kılcal su emme katsayısı ($\text{cm/s}^{1/2}$)
Q	: Emilen su miktarı (cm^3)
t	: Geçen zaman (s)
A	: Su ile temas eden alan (cm^2)

KISALTMALAR LİSTESİ

KYB	: Kendiliğinden Yerleşen Beton
KYH	: Kendiliğinden Yerleşen Harç
KYHH	: Kendiliğinden Yerleşen Hafif Harç
KYTHB	: Kendiliğinden Yerleşen Taşıyıcı Hafif Beton
PÇ	: Portland Çimentosu
UK	: Uçucu Kül
SD	: Silis Dumanı
SA	: Süper Akışkanlaştırıcı
EFNARC	: European Federation of National Trade Associations

1. GİRİŞ

Günümüzde beton, birçok farklı yapıda en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesidir. Bileşenleri itibari ile önceleri sadece su, çimento ve agregadan oluşan beton, teknolojinin ilerlemesine paralel olarak bünyesine kimyasal ve mineral katkıların girmesiyle pek çok olumlu özellik kazanmıştır.

Betonarme yapılarda kalıcılık sorunlarının en önemli sebeplerinden biri, taze betonun yeterli sıkıştırma işlemi uygulanmadan yerleştirilmesidir. Yüzyılımızda beton teknolojisini yepyeni boyutlara taşıyan farklı tipteki süper akışkanlaştırıcı katkıları sayesinde beton, performansı açısından yüksek dayanımı, dayanıklılığı ve taze haldeki işlenebilirliği ile “yüksek performanslı beton” olarak anılmaya başlanmıştır. Yüksek performanslı beton sınıfında yer alan bir beton türü de kendiliğinden yerleşen betondur. Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), kendi ağırlığı altında hiçbir dış etki uygulanmadan (vibrasyon, sarsma vb.) istenilen yere kolayca yerleşebilen ve homojen bir şekilde yayılan özel bir betondur.

KYB’lerde yüksek akışkanlığın sağlanabilmesi için yaygın olarak kullanılan yöntem, iri agrega miktarının sınırlandırılması ve uygun özellikte harç kullanılmasıdır. Ayrıca ince madde oranının da artırılması gereklidir. İnce madde olarak 0.125 mm’den daha küçük ince taneler düşünülmelidir. Bu amaçla uçucu kül, taş unu (kireçtaşı tozu), cüruf (öğütülmüş) ve silis dumanı kullanılabilir [1,2]. KYB’lerin birim ağırlıklarının fazla olmasından dolayı, temelle ilgili taşıma problemleri ve yapı elemanlarının kesitlerinde artışlar meydana gelmektedir [3].

1990’lı yıllarda, özellikle ısı izolasyonu ve öz ağırlığı bakımından normal betona nazaran oldukça büyük avantajlara sahip olan hafif beton, gittikçe artan bir eğilimle kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Özellikle betonarme yapıların dezavantajı olarak sayılan yapı ağırlığının azaltılabilmesi için günümüze kadar çeşitli malzemeler kullanılmıştır. Bu malzemelerde, hafifliğin temel aranılan özellik olmasının yanında, dayanım, yüksek sıcaklıklara karşı direnç, yüksek ısı yalıtımı gibi özelliklerin de elde edilmesi tercih edilmiştir. Bu özelliklere yanıt veren ve en yaygın olarak kullanılan tuğla yerine, teknolojinin gelişmesiyle birlikte çok daha hafif ve ısı yalıtımı özellikleri iyi olan malzemelerin kullanımı yaygınlaşmaktadır [4].

Taşıyıcı hafif betonun günümüzde düşük birim hacim ağırlığa ve yüksek ısı yalıtımına sahip olduğundan dolayı yaygınlaştığı görülmektedir. Yüksek katlı yapıların

inşasının yaygınlaşması, küçük kesit, hafif, yüksek enerji yutma kapasitesi ve durabiliteye sahip betonlara ihtiyacı zorunlu hale getirmiştir. Aynı zamanda hafif betonlar yapıların ölü yüklerinde önemli oranda düşme sağladığı için deprem etkilerinden önemli derecede azalma ve elastik modüllerindeki düşüklükten dolayı iyi bir deprem davranışı göstermelerine neden olmaktadır. Kendiliğinden yerleşen taşıyıcı hafif beton (KYTHB) son zamanlarda literatüre girmeye başlamıştır. KYTHB karışımları çok fazla parametre içerdiği için deney yöntemleri de zor olmaktadır. KYB, geleneksel betona göre daha az iri agrega içerdiğinden (hacimce %30) harç karakteristikleri baskındır ve harçta deney yapmak daha kolaydır [5]. Kendiliğinden yerleşen betonların reolojik özellikleri harç fazı ayrıştırılmadan da incelenebilmektedir [6]. Ancak, beton içerisindeki agrega taneleri reolojik özellikleri önemli ölçüde etkilemekte ve büyük değişimlere sebep olmaktadır. Bunların sonucunda harçlar KYB'nin işlenebilirlik özelliklerinin temelini oluşturmakta ve bu özellikler kendiliğinden yerleşen harçların (KYH) incelenmesiyle değerlendirilmektedir. KYH'lerin özelliklerinin değerlendirilmesinin KYB tasarımının bütünsel bir parçası olduğu belirtilmektedir [7].

Bu çalışmada geliştirilmiş perlit ve pomza gibi hafif agregalar kullanılarak üretilen mineral katkı KYH'lerin taze ve sertleşmiş özellikleri incelenerek, KYH'lerin dayanım ve dayanıklılıklarıyla ilgili literatüre bir katkı sağlanması amaçlanmıştır.

2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON

1980’li yıllarda betonun homojen olarak sıkıştırılamamasından kaynaklanan ve betonarme yapıların en önemli sorunlarından biri olan dayanıklılık problemini ortadan kaldırmak için Japonya’da geliştirilen KYB [8], kendi ağırlığı ile sık donatılı dar ve derin kesitlere yerleşebilen, iç veya dış vibrasyon gerektirmeksizin kendiliğinden sıkışabilen, bu özelliklerini sağlarken ayrışma ve terleme gibi problemler yaratmayarak kohezyonunu (stabilitesini) koruyabilen, çok akıcı kıvamlı özel bir beton türüdür [9].

Kendiliğinden yerleşen betonda normal beton karışımından farklı olarak; akışkanlaştırıcı kimyasal katkı, viskozite düzenleyici katkı ve çok miktarda inert veya puzolanik mineral katkı kullanılmaktadır.

Polimer teknolojisinin ilerlemesiyle betonun akışkanlık özelliği süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkılar ile sağlanmaktadır. Göz önünde bulundurulması gereken bir nokta akıcı kıvamdaki her betonun KYB olarak sınıflandırılmayacağıdır. Betonda akışkanlaştırıcı dozajının yüksek olması viskoziteyi düşür. KYB’de yüksek akıcılık sağlanırken betonda ayrışma ve terleme olayları gerçekleşmemeli ve betonun stabilitesinin korunması gerekmektedir. KYB, PCI’e [10] göre doldurma yeteneği, geçiş yeteneği ve stabilite ile ilgili işlenebilirlik şartlarını tam olarak sağlayabilmelidir. Kararlılığı korumak için ince malzeme miktarı arttırılmakta ve/veya viskozite düzenleyici katkılar kullanılmaktadır.

KYB’de kullanılan kimyasal katkılar su azaltıcı özelliğe sahip oldukları için beton düşük su/toz oranında yüksek dayanıma sahip olabilmektedirler. Taze haldeki üstün özellikleri yanı sıra sertleştğinde yoğun ve homojen yapıda olup dayanım açısından geleneksel betonla benzer özelliklere sahiptirler. KYB özelliğindeki betonların geleneksel betonlara oranla kompasiteleri daha yüksek ve dolayısıyla boşluksuz olan bu beton daha dayanıklı bir yapıya sahiptir.

Deprem bölgelerinde yapılacak betonarme yapılarda kolon kiriş birleşim bölgelerindeki sık donatılar sebebiyle, beton homojen olarak yerleşememekte ve bu bölgelerdeki boşluklu yapı plastik mafsal oluşumunu meydana getirmektedir. Deprem açısından risk taşıyan birleşim bölgeleri, KYB kullanılarak boşluksuz bir şekilde doldurulabilmektedir. KYB’lerin kullanım alanları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Güçlendirme projelerinde,
- Sık donatılı elemanlarda,
- Estetik kalıp tasarımlarında,
- Zor ve ulaşılmaz kalıplarda,
- Vibratör kullanımının imkânsız olduğu yerlerde

2.1. KYB Tasarımı ve Karışım Bileşenleri

KYB'nin bileşenlerinin belirlenmesi geleneksel betona göre daha fazla deneyim ve bilgi birikimi gerektirmektedir. Çünkü KYB'den sertleşinceye kadar beklenen performans, geleneksel betona göre daha farklıdır. Geleneksel betondan farklı olarak KYB düşük eşik kayma değerine sahip olmalı, fakat aynı zamanda sertleşme başlayıncaya kadar terleme ve ayrışmaya yeterince dirençli olmalıdır [11]. KYB'de akışkanlık ve viskozite;

- çimento ve mineral katkıları dikkatli seçerek ve oranlayarak,
- su/toz oranını sınırlandırarak,
- iri agrega oranını azaltarak,
- normal betondan farklı olarak süper akışkanlaştırıcı ve viskozite düzenleyici

katkı ilave ederek ayarlanır ve dengelenir.

KYB tasarımında amaca göre tasarım yöntemi belirlemek optimum çözüm getirebilir [12]. KYB tasarımında amaca yönelik malzeme seçilmeli ve uygun deney yöntemleriyle deneme karışımları yapılmalıdır. Kendiliğinden yerleşme yeteneği üç parametre ile karakterize edilebilir[7];

- Doldurma yeteneği (beton döküldüğü kalıbı boşluksuz bir şekilde doldurmalıdır)
- Ayrışmaya karşı direnç
- Geçiş yeteneği (Özellikle yoğun donatılı elemanlarda önemlidir)

KYB kendi ağırlığı ile şeklini değiştirme ve deforme olma özelliğine sahip olmalıdır. Kaba agrega, kum ve ince malzeme tanecikleri arasındaki iç sürtünme miktarı, akışa karşı iç direnci belirler. Betonun iyi deforme olabilmesi için kaba agrega, ince agrega ve her türlü bağlayıcı dahil katı tanecikler arasındaki sürtünmenin azaltılması gerekmektedir. Yüksek akışkanlıkla birlikte ayrışmaya karşı yüksek direnç de sağlanmalıdır. İri agrega hacmi sınır değer olan %60'ın üzerine çıkarsa agregalar arası iç

sürtünme hızla artar ve KYB donatılar arasından geçerken bloklaşma riski oluşabilir. Böylelikle KYB’de geleneksel betona göre iri agregâ miktarı daha az ve hamur miktarı daha fazladır. Hamur, agregânın taşınması için bir araçtır; bu yüzden bütün agregâ taneciklerinin bir hamur tabakası tarafından tamamen kaplanması için hamur hacmi agregadaki boşluk hacminden büyük olmalıdır. KYB’nin hamur fazının geleneksel betona göre fazla olması ve betonun karakteristik özelliklerinin oluşmasında önemli olması, KYB tasarım yöntemleri genellikle hamur ve harç üzerine yoğunlaşmayı gerektirmektedir. Bu nedenle KYB’de taze haldeki özellikler öncelikli hedeftir.

Betonda yüksek akışkanlık sağlamak için su/toz oranını arttırmak, yüksek şekil değiştirmeyi sağlayabilir ancak kohezyonu azaltarak betonun akışının tıkanması ile sonuçlanabilecek agregâ ayrışmasına neden olabilir. Bu nedenle KYB üretiminde yüksek işlenebilirlik elde etmek için akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları kullanılır. Viskozite artırıcı kimyasal katkıları kullanılarak veya karışımında kullanılan çimento ve mineral katkı miktarlarını arttırarak su/çimento oranı azaltılır ve KYB’de ayrışmaya karşı direnç sağlanabilir.

KYB’nin taze ve sertleşmiş beton özellikleri, karışımında yer alan malzemelerin miktarına ve tipine göre önemli değişiklikler gösterir. Bu hassasiyet, KYB üretiminin, dökümünün ve bakımının daha dikkatli yapılmasını gerektirmektedir. Karışımında yer alacak her malzeme farklı bir özellik göstereceğinden, KYB üretiminde kullanılacak malzemelerin özelliklerinin bilinmesi gerekir. Bu özelliklerin bilinmesi ile ancak optimum karışım oranları belirlenebilir [13].

Aşağıda KYB üretiminde kullanılan malzemelerin özellikleri açıklanmaktadır.

2.1.1. Çimento

Geleneksel betonlarda kullandığımız uygun bütün çimento tipleri KYB için uygundur. KYB’de dayanım ve dayanıklılık kriterleri göz önüne alınarak çimento seçimi yapılmalıdır. %10’ un üzerindeki C_3A içeriği, KYB’nin işlenebilirlik özelliklerini olumsuz etkileyebilir. KYB’ da çimento içeriği $350-450 \text{ kg/m}^3$ arasında olması tavsiye edilmektedir. 500 kg/m^3 ‘ün üzerindeki çimento dozajı betonda rötreye sebep olabilmektedir. 350 kg/m^3 ‘ün altında kullanımı ise, ilave filler veya viskozite artırıcı kimyasal katkılarıyla birlikte kullanılması halinde uygundur [14].

2.1.2. Agregas

Geleneksel betonda kullanılan tüm agregalar KYB üretiminde de kullanılabilir. KYB’de kullanılacak agrega gradasyonu mümkün olduğunca ince seçilmelidir. EFNARC Komitesine göre [7], kesikli gradasyon iç sürtünmeyi azaltıp akışı kolaylaştırdığında sürekli gradasyona tercih edilmelidir. Maksimum agrega boyutu geleneksel betona göre daha küçüktür ve donatılar arası geçiş yeteneğine göre belirlenebilir. EFNARC Komitesine göre [7], KYB üretiminde kullanılan agreganın 125 mikronun (μm) altında kalan kısmının karışım hesabında toz malzemelere ilave edilmeleri gerekmektedir. Bu KYB reolojisi açısından önemlidir. Doğal agrega iç sürtünmeyi azalttığı için işlenebilirlik açısından kırma agregaya göre daha avantajlıdır. Aynı zamanda düşük iri agrega/kum oranında da içsel sürtünme azalmaktadır.

KYB’ de su fazlalığı karışımın reolojik özelliklerini kaybetmesine sebep olmaktadır. KYB bu açıdan bakıldığında agrega nemine çok hassastır. Özellikle su emmesi yüksek olan; uçucu kül agregası, pomza vb. malzemelerin kullanılması halinde tasarımda ek önlemler alınmalıdır. Agregas nemi laboratuvar ortamında tespit edilerek deneysel çalışmalarda kolaylıkla dikkate alınabilmektedir [11].

2.1.3. Toz Malzeme

KYB’nin özel reolojik gereksinimlerinden dolayı hem hidratasyon ısısından dolayı çimento miktarını düzenlemek hem de viskoziteyi düzenleyerek ve akışkanlığı sağlayarak işlenebilirliği düzenlemek için toz malzeme kullanılmaktadır. Bu malzemeler genellikle kırmataş tozu, uçucu kül, silis dumanı, öğütölmüş yüksek fırın cürufu, mermer tozu ve öğütölmüş cam tozu gibi filler malzemelerdir.

Kalsiyum karbonat (CaCO_3) içerkli mineral filler yaygın olarak kullanılmakta ve betonun reolojik özelliklerini iyileştirmektedir. 0,125 mm’nin altında kalan malzemeler toz malzeme olarak adlandırılabilir [7]. Parçacık boyutunun küçölmesi parçacıklar arası etkileşimin artmasına sebep olur ve bu etkileşim viskoziteyi arttırır. Geleneksel betonlara göre KYB’de daha fazla kullanılan toz malzeme, karışımın katı iskeletini zenginleştirir ve malzemeyi daha kompakt hale getirir. Harcın agregaları daha iyi sarmasını sağlar.

İnert ve puzolanik malzemelerin çok farklı karakteristikleri vardır. İnert malzemeler sadece iyi doldurucu malzemeler ve su emici malzemeler olarak çalışmaktadırlar. Ancak

puzolanik özellikteki mineral katkıların boşluk doldurma etkisinin yanı sıra bağlayıcılık özellikleri de bulunmaktadır.

2.1.3.1. Uçucu Kül

Uçucu kül, toz kömürünün enerji ihtiyacını karşılamak için termik santrallerde yakılması sırasında elde edilen inorganik katı atık malzemedir. Son yıllarda yapılan çok sayıda araştırma sayesinde çimento ve beton üretiminde yaygın olarak değerlendirilen, puzolanik özellikleri olan bir maddedir. Uygun oranlarda ve doğru kullanımı halinde betonun birçok özelliğini olumlu yönde etkilediği ve özellikle kimyasal etkilere dayanıklılığını arttırdığı bilinmektedir [15]. Küresel mikro yapısı nedeniyle KYB üretiminde kullanılması uygundur.

Uçucu külün partikül büyüklükleri 1-200 μm arasındadır. UK'nin yoğunluğu, 2.2-2.7 g/cm^3 dolayındadır [16]. UK'nin özgül yüzeyi, çimento inceliğine yakın olup öğütme yapılmadan kullanılabileceğini göstermektedir. UK'lerin fiziksel özellikleri Tablo 2.1'de özetlenmiştir.

Tablo 2.1 UK'lerin fiziksel özellikleri [16]

Çap (μm)	Şekil	Renk	Yoğunluk (g/cm^3)	İncelik
1-200	Yuvarlak	Gri	2.2-2.7	~ Çimento inceliğinde

Uçucu küllerde yüksek oranlarda SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bulunmaktadır. Silisli ve alüminli amorf yapıya sahip oldukları için puzolanik özellik göstermektedirler ve kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştiklerinde hidrolik bağlayıcılığa sahip olmaktadır [17]. Bu nedenle, hem portland-puzolan tipi çimento üretiminde, hem de beton katkı maddesi olarak doğrudan kullanılmaktadırlar. Genellikle, beton katkı maddesi olarak çok büyük miktarlarda kullanılabilmektedirler. Beton karışımının içerisinde yer alan uçucu kül miktarı, çimento ağırlığının % 10~50'si civarında değişebilmektedir.

Uçucu küller kimyasal kompozisyonlarına göre değişik şekillerde sınıflandırılmaktadır. ASTM C 618 [18] standardı uçucu külü F ve C sınıfı olarak iki grupta değerlendirmektedir.

a) F sınıfı uçucu küller bitümlü kömürlerden elde edilip

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%70$ şartını sağlayan küllerdir,

b) C sınıfı küller ise genelde linyitler ve yarı bitümlü kömürlerden elde edilip

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%50$ şartını sağlayan küllerdir.

Ayrıca CaO miktarı %10'un altında olan uçucu küller düşük kireçli ya da düşük kalsiyumlu, %10'un üstünde olanlar ise yüksek kireçli ya da yüksek kalsiyumlu uçucu küller olarak adlandırılırlar [18]. Tablo 2.2'de değişik termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin içerikleri gösterilmektedir [17].

Tablo 2.2 Değişik termik santral uçucu küllerinin kimyasal kompozisyonları [17]

Kimyasal İçerik	F Sınıfı Kül (CaO < %10)	C Sınıfı Kül (CaO > %10)
SiO ₂	43.6-64.4	23.1-50.5
Al ₂ O ₃	19.6-30.1	13.3-21.3
Fe ₂ O ₃	3.8-23.9	3.7-22.5
CaO	0.7-6.7	11.5-29.0
MgO	0.9-1.7	1.5-7.5
Na ₂ O	0-2.8	0.4-1.9
C(kızdırma kaybı)	0.4-7.2	0.3-1.9

Uçucu külün, taze ve sertleşmiş beton özelliklerine önemli etkileri vardır. Sabit su içeriğinde işlenebilirliği artırır. Uçucu kül düşük eşik kayma gerilmesi değeriyle daha yüksek viskozite elde edilmesini sağlar. Betonun porozitesini azalttığı için betonun dış etkilere karşı dayanıklılığını artırır. Terleme ve segregasyonu azaltır. Yüksek sıcaklık dayanıklılığını artırır. Bunların yanında betonun daha yavaş dayanım kazanmasına sebep olur ve özellikle soğuk havalarda priz süresi uzar. Uçucu küller, çimento ile yer değiştirilerek kullanıldığı için beton maliyetlerini düşürür.

2.1.3.2. Silis Dumanı

Silis dumanı, silisyum veya demir silisyum alaşımlarının ergime yöntemi ile üretimi sırasında elde edilen, ana bileşeni 1 μm 'den küçük, küresel, amorf, camsı silis (SiO_2) partiküllerinden oluşan, yüksek düzeyde pozolanik aktiviteye sahip bir yan üründür [19]. Bu malzeme, “mikro silis”, “silis tozu” veya “silika fume” gibi isimlerle de anılmaktadır.

Genellikle beton karışımında çimentoyla %10 kadar yer değiştirilerek kullanılan silis dumanı; amorf yapıya sahip olduğundan, çok ince taneli malzeme olduğundan ve yüksek miktarda (%85-%98) SiO_2 içerdiğinden dolayı mükemmel bir pozolanik malzemedir. Diğer pozolanik malzemeler gibi kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştirildiği takdirde hidrolik bağlayıcılık göstermektedir. Silis dumanı bu özelliklerinden dolayı ilk zamanlarda ve gerekse nihai olarak oldukça yüksek dayanımlı betonların elde edilmesinde kullanılmaktadır [17]. Silis dumanı kullanımı yüzey alanı artışıyla kimyasal katkı absorpsiyonunu arttırdığından katkının efektifliğini azaltır. Bu nedenle silis dumanı, diğer pozolanlar gibi yüksek dozajlarda kullanılmamalıdır. Silis dumanı için en yüksek dozaj, çimento ağırlığının % 15'i, optimum dozaj ise % 10'u kadardır. Bu değer geçilmesi halinde hızlı işlenebilirlik kaybı ve yükselen hidratasyon ısısı sebebiyle uygulamada zorluklar yaşanabilir [13].

Silis dumanlarının özgül ağırlıkları 2.2~2.3 gr/cm^3 , gevşek haldeki birim ağırlıkları 200-300 kg/m^3 arasındadır. Silis dumanı çok ince öğütülmüş parçalar içermektedir. Parçaların büyük çoğunluğunun boyu 0.1-0.2 μm arasındadır. Bu boyut, bir Portland çimentosunun taneciklerinin ortalama boyutundan 100 kat daha küçüktür. Betonda kullanılan silis dumanı özgül yüzeyi 200.000 cm^2/gr civarındadır. Silis dumanının genel fiziksel özellikleri Tablo 2.3'de özetlenmiştir.

Tablo 2.3 Silis dumanının fiziksel özellikleri [20]

Çap (μm)	Gevşek Birim Ağ. (kg/m^3)	Renk	Yoğunluk (g/cm^3)	İncelik (cm^2/g)
0.1-0.2	200-300	Gri	2.2-2.3	~ 200000

Silis dumanındaki silis miktarı (SiO_2) %85~98 arasında değişmektedir. İkinci esas bileşeni ise yanmamış karbon kalıntılarıdır. Fe_2O_3 içeriği ise %1 ile %2 civarındadır. Al_2O_3 , SO_3 , MgO , Na_2O ve K_2O gibi oksitler ise genelde %1'den az miktarda bulunur. Silis dumanının kimyasal özelliği, üretilen metalin ya da alaşımın tipine göre değişebilir. Tablo 2.4, ABD, Norveç ve Türkiye' de üretilen silis dumanlarının bileşenlerini vermektedir [17].

Tablo 2.4 Silis dumanının kimyasal özellikleri [17]

İçerik	ABD	Norveç	Türkiye
SiO_2	90.0-93.0	90.0-96.0	93.0-95.0
C	1.3-2.6	0.5-1.4	0.8-1.0
Fe_2O_3	0.4-0.7	0.2-0.8	0.4-1.0
Al_2O_3	0.5-1.6	0.5-3.0	0.4-1.4
MgO	0.3-0.5	0.5-1.5	1.0-1.5
CaO	0.5-0.8	0.1-0.5	0.6-1.0
Na_2O	0.1-0.3	0.2-0.7	0.1-0.4
K_2O	1.0-1.2	0.4-1.0	0.5-1.0
S	0.1-0.2	0.1-0.4	0.1-0.3
(kızdırma kaybı)	1.4-2.8	0.7-2.5	0.5-1.0

Silis dumanı katkılı betonlarda yüksek dayanım elde edilebilmektedir. Taze betondaki terlemeyi ve ayrışmayı azaltmaktadır. Yapılan çalışmalarda, %10 kadar sisli dumanı kullanımının beton priz süresinde çok fazla değişiklik yaratmadığı, %10'un üzerindeki kullanımlarda ise betonun priz süresini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Silis dumanı kullanımı betonda yüksek miktarda su ihtiyacı doğurmakta ve terlemeyi azalttığı için betonun yüzeyinin düzeltilmesi işlemi daha zor olabilmektedir.

2.1.4. Kimyasal Katkı

Beton katkı maddelerinden biri olan kimyasal katkılar, beton karışımının karılma işleminden önce veya karılma işlemi esnasında beton karışımının içerisine katılan ve TS EN 934 [21] standardına göre çimento kütlesinin %5'inden fazla kullanılmaması gereken malzemelerdir. KYB üretiminde, birbirinin tersi iki durum olan yüksek işlenebilirlik ve ayrılmaya karşı yüksek direnç sağlamak için süper akışkanlaştırıcı ve viskozite düzenleyici kimyasal katkılar kullanılmaktadır.

Viskozite düzenleyici katkılar, terleme ve çökelme gibi ayrışmaları azaltarak betonun homojenliğinin ve bütünlüğünün sağlanması için kullanılır. Ancak ayrışma ve terleme problemleri için genellikle toz malzeme miktarının arttırılması yoluna gidilmektedir.

Süper akışkanlaştırıcılar su içerisinde eriyen boşluklu kimyasal dizilişleri ile suyun yüzey gerilimini düşüren, çimento topaklaşmasını önleyerek daha etkili hidrasyon reaksiyonların gerçekleşmesini sağlayan organik maddelerdir. Süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkılar, aynı işlenebilirlikte daha az miktarda karışım suyu kullanılarak beton üretimine olanak sağlar. Böylece su/çimento oranı azaltılarak dayanım ve dayanıklılık açısından daha üstün özelliklere sahip beton elde edilir. Akışkanlaştırıcı katkılar kimyasal yapılarına göre farklı su kesme performansı gösterirler. Son 30 yılda akışkanlık sağlama ve su azaltma amaçlı en yaygın kullanılan kimyasal katkılar su kesme yeteneklerine göre;

- %10~15 su kesme özelliği olan lignosülfonat bazlı normal akışkanlaştırıcılar (I. nesil akışkanlaştırıcı)
- %15~30 su kesme özelliği olan melamin ve naftalin sülfona formaldehit bazlı süper akışkanlaştırıcılar (II. nesil akışkanlaştırıcı)
- %30'dan fazla su kesme özelliği olan polikarboksilat bazlı hiper akışkanlaştırıcılar (III. nesil akışkanlaştırıcı)

olarak sınıflandırılmaktadırlar.

Çimento ile kimyasal katkılar arasındaki etkileşim fizikseldir. Yeni nesil süper akışkanlaştırıcılar olarak da isimlendirilen polikarboksilik asit bazlı katkılar kullanıldığında, çimento taneciklerinin beton içerisindeki dispersiyonu (dağıtılması) yalnızca elektriksel itki ile değil, aynı zamanda uzun yan dallar içeren polimer zincirlerinin çimento tanecikleri çevresinde birbirini iten fiziksel bir itki oluşturması ile de sağlanır [22].

Akışkanlaştırıcı katkılar; su/çimento oranını azaltarak mukavemet artışı sağlar, çimento miktarını azaltarak kütle betonlarında hidrasyon ısını düşürür, beton karışım oranlarını değiştirmeden işlenebilirliği artırır, su/çimento oranını sabit tutarak su ve çimento miktarlarını azaltarak ekonomi sağlar. Bunların yanında, akışkanlaştırıcı katkılar eşik kayma gerilmesini ve plastik viskoziteyi azaltırlar. Plastik viskoziteyi azaltıcı etkileri yüksek su/çimento oranlarında daha belirgindir. Yüksek su/çimento oranında çok küçük miktarda katkı ilavesi dahi viskoziteyi hızla düşürerek ayrışmaya sebep olabilir. Düşük su/çimento oranlarında katkı ilavesinin akışkanlığı arttırıcı etkisi daha yavaştır.

3. HAFİF BETON

İnşaat mühendisliğinde yaygın kullanım alanı bulan normal beton; çimento, su, agrega ve ihtiyaç duyulduğunda mineral ve kimyasal katkı maddelerinin homojen olarak karıştırılmasından elde edilen kompozit bir yapı malzemesidir. Geleneksel agregalarla üretilen normal betonların taşıyıcı özelliklerinin yüksek olmasına karşılık birim kütlelerinin fazlalığı sebebiyle; yapılar deprem kuvvetlerinden daha fazla etkilenmekte, yüksek yapıların inşasında problem olmakta, düşey taşıyıcı elemanların boyutlarını büyültmekte ve mimari tasarım sorunları ortaya çıkmaktadır. Özellikle temel boyutları ve maliyetini artırmakta hatta pratik hayatta geçilmesi gerekli normale göre büyük açıklıklardaki eğilme etkisindeki elemanlar kendi öz kütlesini bile taşıyamaz hale gelmektedir.

Yapıların normal betonlar yerine hafif betonlar ile inşa edilmesi, yapıların zati yükünü azaltmakta ve deprem sırasında yapıların daha az salınımına maruz kalmasını sağlamaktadır. Bu yapılarda deprem sırasında oluşan eylemsizlik kuvvetleri de azalacağından sarsıntıların bina üzerindeki yıkıcı etkileri zayıflamaktadır [23]. Diğer yandan betonda birim ağırlığın azaltılmasıyla ısı iletkenlik ve ısıl genleşme katsayıları küçülür, yangına dayanıklılık artar.

Hafif beton; hazır döşeme, çatı plağı ve duvar paneli gibi prefabrike yapı elemanlarının üretiminde ve yapı zati ağırlığını azalttığından, çok katlı ve büyük açıklıklı yapılarda kullanılmaktadır.

Hafif beton üretmek için betonun birim ağırlığının azaltılması üç yolla yapılır.

- Normal agregaların yerine boşluklu doğal veya yapay hafif agregaların kullanılmasıyla üretilen hafif agregalı betonlar,
- Fiziksel ve kimyasal yollarla beton içerisinde hava boşlukları üretilerek üretilen gaz ve köpük betonlar,
- Beton içerisindeki ince agreganın çıkarılması suretiyle üretilen boşluklu kumsuz betonlar.

Son yıllarda, süper akışkanlaştırıcı katkıların kullanımı ile hafif ve yüksek dayanımlı betonların avantajlarını birleştirmek için yüksek dayanımlı hafif agregalı beton üretimi üzerinde araştırmalar yapılmaktadır. Yüksek dayanımlar, yapay agrega kullanımı ile veya doğal hafif agrega yanı sıra normal agrega kullanılmasıyla elde edilmektedir [24].

Hem yüksek dayanımlı hem de hafif betonlar sunduğu teknik, ekonomik ve çevresel avantajlardan dolayı çok yönlü bir malzemedir.

3.1. Hafif Betonun Tarihçesi

Beton teknolojisinde yeni bir buluş olmayan hafif betonunun kullanımı milattan önce 3000 yıllarında Hint medeniyeti döneminde Mohenjo-Daro ve Harrapa şehirlerinin inşasına kadar dayanmaktadır. Eski çağlardan beri bilinen hafif betonla ilgili günümüzde birçok örnek görmek mümkündür. Bu yapılar pomza ve cüruf gibi volkanik kökenli agregalar ile inşa edilmiştir. Sümerler, milattan önce 3. yüzyılda Babil'i inşa ederken volkanik kökenli hafif agregalar kullanmıştır. 4. yüzyılda Bizans imparatoru I. Jüstinyen tarafından yaptırılan Ayasofya, Roma tapınağı Pantheon, Roma amfi tiyatrosu Colosseum (Kolezyum), prestijli sukemeri Pont du Gard, hafif agregalarla inşa edilen tarihi yapılara örnek olarak gösterilebilir (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2). Almanya, İtalya, İzlanda ve Japonya gibi ülkelerde yapısal taşıyıcı betonda hala agrega olarak pomzanın kullanıldığını belirtmek gerekir. Bunun yanı sıra Malezya'nın da içinde bulunduğu bazı bölgelerde hafif beton üretmek için kaba agrega olarak palmye meyvesi kabukları kullanılmaktadır [25].



Şekil 3.1 Ayasofya ve Pantheon



Şekil 3.2 Colosseum ve Pont du Gard

Hafif betonlar, I. Dünya Savaşı sırasında gemi yapımında kullanılmıştır. Gemi inşaatında çelikten farklı olarak hafif bir yapı malzemesi kullanılması gerektiği fikri ortaya konmuş ve gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda hafif betonarme elemanlar kullanılarak 1919 yılında U.S.S Selma adlı gemi üretilmiştir. Selma, uzun yıllar zorlu iklim şartlarına maruz kalmasına rağmen alınan donatı ve beton örnekleri üzerinde gerçekleştirilen araştırmaların sonucunda beton ve donatının iyi durumda olduğu, betonda ufalanma olmadığı, donatılarda ise aderansı olumsuz yönde etkileyecek kadar korozyon oluşmadığı rapor edilmiştir [26].



Şekil 3.3 U.S.S Selma gemisi

Hafif beton kullanılarak inşa edilmiş ilk betonarme yapı 1958 yılında İngiltere'deki Bentford binasıdır. Bundan sonra birçok yapı hafif beton kullanılarak prefabrike, öngerilmeli veya betonarme olarak inşa edilmiştir [25].

İleri sanayi ülkeleri, II. Dünya savaşıdan sonra yapılarda ısı yalıtımı ve ölü yük azaltma amacı ile hafif betonu yaygın olarak kullanmaya başlamıştır. Hafif agregalı betonların düşük yoğunluğu, ısı yalıtımı, yangına karşı dayanımı, ısı şoku dayanımı ve deformasyonla ilgili özellikleri geleneksel normal betonlara göre önemli avantajlarıdır.

3.2. Hafif Betonun Tanımı

Yapısal hafif beton, Türk Standartlarında TS 2511 [27] ve TS EN 206-1 [28]'de yer almaktadır. TS 2511 [27] "Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları"na göre taşıyıcı hafif beton, birim ağırlığı 1900kg/m^3 'ün altında ve 28 günlük basınç dayanımı ise 16 MPa'nın üzerinde olan betondur. TS EN 206-1'de [28] hafif betonlar etüv kurusu durumdaki yoğunluğu, 800 kg/m^3 veya daha büyük olup, 2000 kg/m^3 ü geçmeyen beton

olarak tanımlanmaktadır. TS 2511 [27] yapısal hafif betonu tanımlarken TS EN 206-1 [28] ise genel olarak hafif betonu tanımlamaktadır. TS EN 206-1'e [28] göre hafif betonların basınç dayanım sınıfları ve hafif betonların yoğunluğa göre sınıflandırması Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'de belirtilmiştir.

Tablo 3.1 Hafif beton için dayanım sınıfları [28]

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

Tablo 3.2 Hafif betonun yoğunluğa göre sınıflandırılması [28]

Yoğunluk sınıfı	D 1,0	D 1,2	D 1,4	D 1,6	D 1,8	D 2,0
Yoğunluk aralığı (kg/m ³)	800-1000	1000-1200	1200-1400	1400-1600	1600-1800	1800-2000

Hafif betonlar; işlevine göre de taşıyıcı hafif betonlar, taşıyıcı/yalıtım hafif betonları ve yalıtım hafif betonları olarak gruplandırılırlar [29].

Betonların kullanım alanlarına göre sınıflandırılması Tablo 3.3'te görülmektedir.

Tablo 3.3 Hafif betonların işlevlerine göre sınıflandırılması [29]

Sınıf	I	II	II
Hafif betonun türü	Taşıyıcı	Taşıyıcı ve Yalıtım	Yalıtım
Etüv kuru birim kütle (kg/m^3)	1600-2000	< 1600	<< 1450
Basınç dayanımı (MPa)	> 15,0	> 3,5	> 0,5
Isıl İletkenliği (W/mK)	-	< 0,75	0,3

Çeşitli standartlara göre taşıyıcı hafif betonların basınç dayanımları ve birim kütleleri Tablo 3.4'te verilmektedir.

Tablo 3.4 Çeşitli standartlara göre taşıyıcı hafif beton kriterler [13]

Standartlar	Özgül kütle (kg/m^3)	Basınç dayanımı (MPa)
DIN 1045	≤ 2000	≥ 16
ASTM C 330	≤ 1840	≥ 17
TS 2511	< 1900	≥ 16
ACI 213R-03	< 1840	≥ 17

3.3. Hafif Beton Üretiminde Kullanılan Agregalar

Hafif betonları üretmek için en sık başvurulan yöntem hafif agregalarla beton üretmektir. Hafif agregalar, doğal kaynaklardan veya suni yollardan elde edilebilirler. Doğal kaynaklardan elde edilen hafif agregalar başlıca volkanik kökenli olup, suni agregalar ise bazı ısıl işlemlerin sonucunda elde edilmektedir [25].

TS 1114 [30]'te hafif agregalar, tane yoğunluğu 2000 kg/m^3 veya gevşek yığın yoğunluğu 1200 kg/m^3 'ü aşmayan mineral kökenli agregalar olarak tanımlanmaktadır. Agregalar betonun hacimsel olarak %60~75'ni, ağırlık olarak %70~85'ni oluşturmalarından dolayı agregaların beton içerisinde rolünün çok büyüktür ve betonda kullanılacak agregaların yapısı, granülometrisi, sertliği betonu doğrudan etkileyebilmektedir. Bu nedenle agregaların betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerinde önemli etkileri vardır.

Hafif agregalar, hücreli gözenekli yapısından dolayı düşük tane yoğunluğuna sahiptirler. Agregaların hücreli boşluklu yapısı, genellikle ısıl işlem sırasında

piroklastik kütleden genleşmeye sebep olan gaz salınımı ile oluşur. Dayanımı ve dayanıklılığı yüksek hafif agregalar; 5-300 µm boyut aralığına sahip homojen olarak dağılmış boşluklar içerirler, nispeten çatlaksız ve yüksek mukavemetli camsı faza sahiptirler [31].

Hafif yapı malzemeleri ile yapılarda hafif beton kullanımı, ısı ve ses yalıtımının yanı sıra birim ağırlıklarının normal betona nazaran daha az olmasından dolayı birçok avantajlar sağlamaktadır. Ancak, hafif yapı elemanı üretmek için gerekli olan genleştirilmiş kil ve genleştirilmiş şist gibi bazı yapay hafif agregaların kullanımı ülkemizde henüz yeterli düzeye ulaşmamıştır. Bu nedenle ülkemizde bol miktarda bulunan doğal hafif agregaların değerlendirilmesi gündeme gelmiş ve pomza, perlit, volkanik tüf ve volkanik cüruf gibi malzemeler yaygın kullanım alanı bulmuştur. Su emme bakımından yeterli tedbirler alındığında, bu hafif agregalarla yalıtım betonlarının üretilmesi ve bunların taşıyıcı hafif beton olarak kullanılabilmesi mümkün olabilmektedir [32].

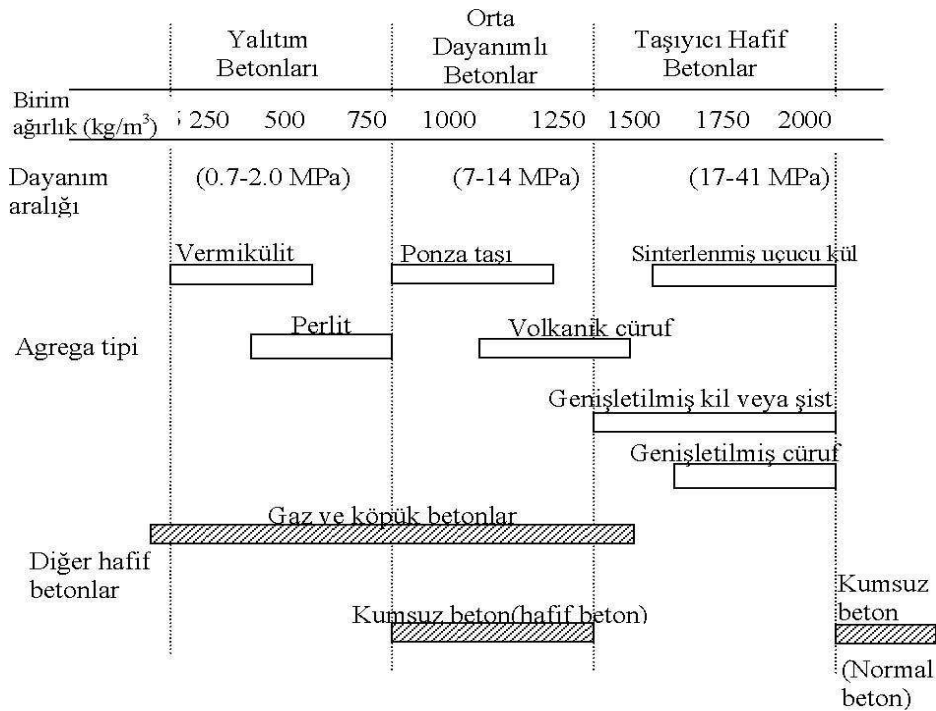
Hafif agregalar ve hafif agregalar ile yapılan betonların özellikleri Tablo 3.5'te verilmiştir [33].

Tablo 3.5 Hafif agregalar ve hafif agregalar ile yapılan betonların özellikleri [33]

Agrega Türü	Agreganın Kuru Birim Ağırlığı (kg/m ³)	Betonun Kuru Birim Ağırlığı (kg/m ³)	28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Isı İletkenliği (W/mK)	Su Emme (%)
Genleştirilmiş kil	550-1050	110-1850	14-42	0,26-0,43	5-15
Köpük cürufu	500-1000	110-1850	14-42	0,17-0,34	5-25
Sinterlenmiş uçucu kül	600-1000	1350-1900	14-42	0,17-0,51	14-24
Mikalı vermikülit	65-250	400-950	0,67-3	0,07-0,10	20-35
Genleştirilmiş perlit	65-250	550-800	0,6-3,5	0,07-0,10	10-50
Pomza	-	800-1300	4-5	0,15-0,30	-
Genleştirilmiş cam	250-500	1200	9	0,28	5-10
Genleştirilmiş polyester boncuk	30-150	300-900	0,7-12,5	0,07	-
Briket molozu	750	1750-1900	7,7-21	0,40-0,51	19-36
Kırmataş	1450-1750	2250-2400	21-50	1,0-3,0	0,5-2,0

Hafif betonların üretiminde kullanılan hafif agregalara bağlı olarak hafif betonların işlevleri değişebilmektedir. Sadece hafif agregalar kullanılarak üretilen farklı tür hafif betonların sınıflandırılması Şekil 3.4’de görülmektedir [34].

Tablo 3.5 ve Şekil 3.4’te görüldüğü gibi yapay yollarla elde edilen agregalarla üretilen betonların basınç dayanımları daha yüksektir ve taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılabilir. Genleştirilmiş perlit, en yüksek su emme kapasitesine ve en düşük ısı iletkenlik katsayısı ve basınç dayanımına sahip olmakla birlikte daha çok yalıtım özellikli taşıyıcı olmayan betonlarda kullanılabilir.



Şekil 3.4 Kullanılan agrega cinsine göre hafif betonların sınıflandırılması [34]

3.3.1. Pomza

Kullanılan en eski yapı malzemelerinden biri olan pomza (Şekil 3.5), lavların katılaşması sırasında gaz salınımı ile oluşan volkanik kökenli, oldukça gözenekli ve camsı bir yapıya sahip doğal bir malzemedir. Pomza, TS 3234 [35]’te, birbirine bağlantısız boşluklu, sünger görümlü, silikat esaslı, birim hacim kütlesi 1 gr/ cm³ ‘ten küçük, sertliği Mohs sertlik çizelgesine göre yaklaşık 6 olan ve camsı volkanik bir madde olarak

tanımlanmıştır. Pomza (ponza) terimi İtalyanca bir sözcüktür. Almanca Bimsstein, İngilizce Pumice adı da verilmektedir. Dilimizde süngertaşı, köpük taşı, topuk taşı, hışır taşı olarak da adlandırıldığı gibi bilimsel terminolojide dünyaca kabul görmüş pümis (pumice), pümisit (pumicite) olarak da adlandırılabilir.



Şekil 3.5 Pomza

Pomza taşı ilk olarak antik Yunanlılar tarafından kullanıldığı bilinmekte, bu ve bu dönemden sonra pomza taşı kullanılarak yapılan yapıların birçoğu uzun yıllar geçmesine rağmen hala ayakta kalmayı başarabilmektedir. Osmanlılar zamanında yaygın olarak kullanılan horasan harcı, pomza ve kireç karışımından imal edilmiş bir nevi hafif betondur. Mevcut kaynaklardan elde edilen bilgilere göre Türkiye’de 1972 yılından itibaren pomza üretimi yapıldığı tespit edilmiştir.

Gözenekli ve camsı yapıya sahip olan pomza, fiziksel ve kimyasal etkenlere karşı dayanıklıdır [36]. Gözenekler arası genelde(özellikle mikro gözenekler) bağlantısız boşluklu olduğundan permeabilitesi düşük, ısı ve ses yalıtımı oldukça yüksektir.

Pomzanın oluşumu genel olarak şöyle açıklanmaktadır. Asidik magma bazik magmaya nazaran daha viskozdur ve yüksek silis içerir. Bazik magmanın sıvı olduğu sıcaklıklarda asidik magma katı halde bulunur. Volkanik aktivitenin durduğu zamanlarda magma akışı da durarak asidik kayaç ve kütleler oluşur. Volkanik bacanın tıkanmasıyla doğal basınç birikimleri oluşur. Basıncın artmasıyla asidik malzemeye birlikte magmadaki erimiş gazlar büyük patlamalarla bacadan püskürmeye başlar. Ani basınç sertleşmesi ani genleşmeleri oluşturur. Bu sırada bünyedeki uçucu bileşenlerin ani olarak kaçmasına neden olur. Uçucuları takiben, arkada kalan erimiş küresel parçalar, atmosferle temas eder etmez

hızla soğurlar. Böylelikle pomza oluşur [36]. Pomza oluşumunu kontrol eden faktörler; püskürme süresi, ara süreler, magmanın ısı, magmadaki erimiş gaz miktarı, püsküren malzemenin soğuma zamanıdır

Asidik ve bazik volkanik faaliyetler neticesinde iki tür pomza oluşmuştur. Bunlar; asidik pomza ve bazik pomza olmakla beraber en yaygın olanı asidik pomzadır. Asidik pomza; beyaz ve kirli beyaz renkli, Mohs skalasına göre sertliği 5~6 olup, yoğunluğu 0,5~1gr/cm³'tür. Bazik pomza ise kahverengi veya siyah olup daha ağırdır. Sertliği 5~6, yoğunluğu ise 1~2 gr/cm³'tür. Genel olarak sertliği 5~6 arasında değişen pomzanın iyi bir aşındırıcı malzeme yapısı sergilediği şeklinde değerlendirilebilmektedir. Her iki pomza da oluşum esnasında gazların bünyeyi ani olarak terk etmesi ve ani soğuması sonucunda oluşmuş oldukça gözenekli bir malzemedir. Pomzanın su emme özelliği %50'den fazladır ve pomzanın porozitesi %75~80 civarındadır. Pomzanın boşluklu yapıya sahip oluşu, ısı iletkenliğinin düşük olmasını sağlar. Isı iletkenliği 0,10~0,60 kcal/m²h°C'dir [37]. Yüksek gözeneklilik derecesiyle pomza tanelerinin büyük dayanıklılıkları yoktur. Ancak bu dayanıklılık, taşıyıcı duvar yapımında kullanılan taş dayanıklılıklarına uygundur [38].

Pomza gibi düşük yoğunluklu agregalarla yapılan hafif betonlar yapının zati ağırlığını azaltmakta, temel boyutlarını küçültmekte ve yapıya ısı yalıtım özelliği kazandırmaktadır [25].

Asidik ve bazik pomzanın kimyasal bileşimlerinde fark olduğu görülmektedir. Pomzalar bünyelerinde silisyum, alüminyum, potasyum, sodyum, demir ve magnezyum gibi kimyasal bileşimler ihtiva ederler. Asidik ve bazik özellikler taşıyan pomzaların tipik kimyasal bileşimleri Tablo 3.6'da verilmiştir [36].

Tablo 3.6 Asidik ve bazik pomza türlerinin kimyasal bileşimleri [36]

Bileşim(%)	Asidik Pomza	Bazik Pomza
SiO ₂	70	45
Al ₂ O ₃	14	21
Fe ₂ O ₃	2,5	7
CaO	0,9	11
MgO	0,6	7
Na ₂ O+K ₂ O	9	8

Pomza taşı dünya ekonomisinde yeni olmamakla beraber, Türkiye endüstrisine son yıllarda girmeye başlamıştır. Kullanım alanı çok geniş olan pomza taşının dünyadaki rezervlerinin yaklaşık 1/7'si Türkiye'de olmasına karşın bu potansiyel yeterince değerlendirilememektedir. Doğu Anadolu Bölgesi Türkiye'deki pomza taşı rezervlerinin yaklaşık % 56'ine sahiptir (Tablo 3.7), fakat ihracattaki payı neredeyse hiç yoktur. Gerekli tedbirler alınarak Doğu Anadolu Bölgesi için yeni gelir kaynakları sağlanabilir [39]. Dünya pomza rezervleri konusunda sağlıklı veriler bulunmamaktadır. Ama dünyanın en önemli pomza üreticileri (ortalama üretim miktarları) Tablo 3.8'de sırası ile verilmiştir [40].

Tablo 3.7 Türkiye'deki pomza rezervleri [39]

YERİ	REZERV MİKTARI	İLİ	İŞLETME SAYISI	İLİ	İŞLETME SAYISI
Isparta-Gölcük	30.983.250	Adana	7	Manisa	9
Ankara-Güdül-Tekköy	8.070.000	Isparta	9	Muğla	2
Nevşehir-Avanos-Ürgüp	404.412.834	Burdur	1	Ağrı	3
Nevşehir-Derin kuyu	48.660.500	Hatay	2	Bitlis	6
Kayseri-Gömeç	13.250.000	Kayseri	17	Erzurum	1
Kayseri-Develi	58.500.000	Konya	4	Erzincan	1
Kayseri-Talas-Tomarza	241.000.000	Nevşehir	23	Kars	2
Kayseri-Talas-Tomarza	284.000.000	Niğde	4	Van	2
Bitlis-Tatvan	1.100.000.000	Aksaray	2	Urfa	1
Van-Erciş-Kocapınar	154.625.000	İzmir	2	Mardin	2
Van-Mollakasım	5.950.000	BÖLGELER	REZERV MİK. %		İŞLETME SAYISI
Ağrı-Patnos	27.812.000				
Ağrı-Doğubeyazıt	26.875.000				
Kars-Iğdır-Kavaktepe	40.156.250	Doğu Anadolu	1.369.012.000	56	18
Kars-Digor	11.718.750	İç Anadolu	1.057.893.334	43	50
Kars-Sarıkamış	1.875.000	Diğer	30.983.250	1	32

Tablo 3.8 Dünyanın en önemli pomza üretici ülkeleri ve üretim miktarları [40]

Ülkeler	Üretim miktarları (ton/yıl)
A.B.D	12.250.000,00
İtalya	4.600.000,00
Yunanistan	1.600.000,00
Türkiye	800.000,00
İspanya	600.000,00
Almanya	550.000,00
Guadalup	210.000,00
İran	150.000,00
Martinik	130.000,00

Türkiye’de farklı yörelerde bulunan pomza oluşumlarına ait kimyasal analiz değerleri Tablo 3.9’da verilmiştir [36].

Tablo 3.9 Farklı illerde pomza oluşumlarının kimyasal analiz değerleri [36]

Bileşim	Nevşehir	Van	Hatay	Kayseri	Adana	İstanbul	İzmir
SiO ₂	71	58,5	61,5	68	59,9	55	71
Al ₂ O ₃	13,2	14,3	11,2	15,1	12,1	3,6	1,3
Fe ₂ O ₃	1,1	4	2,3	3	2,5	0,9	0,5
CaO	1,2	1,5	8,5	3	8,9	29	8
MgO	0,6	0,3	1,2	1	1,5	0,5	3
Na ₂ O	2	4,7	4,6	4	4,7	0,7	12
K ₂ O	4,3	5,3	1,3	2,6	3,3	0,9	0,2
Diğer Min.	6,6	11,4	7,6	3,3	7,1	9,4	4

Birçok kullanım alanı olan pomzanın dünyada ve ülkemizde en büyük tüketim alanı inşaat sektörüdür. İnşaat sektörünün dışında; tarımda, tekstilde, kimya endüstrisinde, elektronik devre çiplerinin üretiminde, kuyumculuk, metal, cam ve plastik sanayisinde kullanılmaktadır. Pomza agregası, inşaat sektöründe,

- Hafif yapı elemanlarının üretiminde,
- Prefabrik yapı elemanlarının üretiminde
- İzolasyon amaçlı çatı ve döşeme dolgu malzemesi olarak,
- Hafif beton üretiminde,
- Hafif hazır sıva ve harç üretiminde,
- Çatı ve dekoratif kaplama elemanı üretiminde kullanılmaktadır.

3.3.2. Perlit

Perlit; magmanın asit fazında oluşan, lavların soğuyup gözle ve mikroskopla görülebilecek bir yapıda kırılmasının meydana getirdiği, kütle bünyesinde %2~5 oranında su bulunduran volkanik bir camdır. Bazı perlit türleri kırıldığı zaman inci parlaklığında küçük küreler elde edildiğinden, perlit ismi inci anlamına gelen "perle" kelimesinden gelmektedir. Doğal durumdaki perlit ısıtıldığı zaman genişleyen çatırdayarak gözenekli, hafif bir malzeme olmakta ve bu malzeme “genleştirilmiş perlit” adı ile anılmaktadır. Ham ve genleştirilmiş perlit Şekil 3.6’te gösterilmektedir.



Şekil 3.6 Ham perlit ve genleştirilmiş perlit

Genleştirilmiş perlit ile ham perlit farklı fiziksel özellikler göstermektedir. Ham perlitin fiziksel özellikleri Tablo 3.7’de, genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri ise Tablo 3.8’de verilmektedir. Perlitin genel olarak kimyasal bileşimi Tablo 3.10’da verilmiştir. Bu tablolardan da görüldüğü gibi, ham perlit, genleştirildikten sonra özgül kütlesi ortalama olarak 40 kat kadar azalmaktadır.

Tablo 3.10 Ham perlitin fiziksel özellikleri [41]

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

Tablo 3.11 Genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri [41]

Renk	Beyaz
Özgül kütle (kg/m ³)	55-300
Birim kütle (kg/m ³)	30-250
Erime noktası (°C)	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 3.12 Perlitin yaklaşık kimyasal analizi [41]

Bileşenler	%	Bileşenler	%
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

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde genleştirilmiş perlit oranının beton içerisindeki artışı ile termal özellikleri ve hafiflik özelliklerinin iyileştiği anlaşılmaktadır. Ancak aynı betonların dayanım ve su emme gibi mekanik ve fiziksel özellikleri de kötüleşmektedir. Çalışmalarda bu durumu tersine çevirmek için su/çimento oranının düşürülmesi, farklı ham perlit karışımları oluşturulması, mineral ve kimyasal katkı kullanması önerilmiş ve araştırılmıştır. Gökçe ve diğ. [42], ham perlit agregalı hafif beton özelliklerine alternatif genleştirilmiş perlit kullanımının etkisini incelemiş ve perlit agregalı beton karışımlarında uygun genleştirilmiş perlit agregasının seçiminin, birim hacim ağırlık, su emme ve basınç dayanımı gibi özelliklerini olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir.

3.4. Hafif Betonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Hafif betonun özellikleri ve performansı, hafif betonu oluşturan bileşenlerin bütün özellikleriyle ilişkilidir. Hafif betonların deprem haricindeki başlıca faydaları, düşük birim hacim ağırlık, ısı yalıtkanlığı ile donma dayanımı olarak bilinmektedir. Hafif betonların olumsuz özelliklerinin başında basınç dayanımının düşük olması gelmektedir. Ayrıca elastisite özellikleri ve donatı-beton aderansı zayıftır. Hafif betonlarda ani ve zamana bağlı deformasyonlar ile geçirimliliğinin yüksek olması da olumsuz özellikleri arasında göze çarpmaktadır. Araştırmacılar normal beton özelliklerini iyileştirmek için katkı maddeleri kullanımını hafif betona uygulayarak, bu betonların özelliklerini incelemektedir.

Aynı beton dayanımı için hafif agregalı karışımda çimento dozajı normal betona göre daha yüksektir. Yüksek dayanım seviyelerinde ilave çimento dozajı % 50'yi aşabilir. Daha yüksek çimento içeriği, daha düşük su/çimento oranı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla matrisin dayanımı daha yüksektir. Tablo 3.13'te ACI 213R-87 [43]' e göre hafif agregalı betonun basınç dayanımı ve çimento içeriği arasındaki yaklaşık ilişki verilmiştir. Daha yüksek basınç dayanımları için çok daha yüksek çimento dozajları gerekir. Örneğin 70 MPa dayanım için 630 kg/m³ bağlayıcı gerekir. Normal ağırlıklı betonda olduğu gibi silis dumanı hafif agregalı betonun dayanımını geliştirir. Diğer bağlayıcı malzemeler de hafif agregalı betonda kullanılabilir.

Tablo 3.13 Hafif ve normal agregalı betonlarda dozajının basınç dayanımına etkisi [43]

Standart silindir basınç dayanımı (MPa)	Çimento dozajı (kg/m ³)	
	Hafif ince agregalı	Normal ince agregalı
17	240-300	240-300
21	260-330	250-330
28	310-390	290-390
34	370-450	360-450
41	440-500	420-500

Hafif agregalı betonlar, normal agregalı betonlarla kıyaslandığı zaman daha düşük çekme ve basınç dayanımına sahiptirler. Hafif agregaların dayanımları harç dayanımından daha düşük olduğundan beton üzerine gelen yük çimento harcı tarafından taşınıp, hafif agregalar tarafından aktarılmaktadır[44]. Normal agregaların dayanımı harç dayanımından çok daha yüksektir. Dolayısıyla beton üzerine gelen yük çimento harcı tarafından aktarılmakta ve yük agregalar tarafından taşınmaktadır [3].

Betonun basınç dayanımını ve gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) ilişkisini etkileyen bütün değişkenler, elastisite modülünü de etkiler. Bu nedenle beton gibi elastik, doğrusal olmayan ve zamana bağlı deformasyon gösteren bir malzemenin elastisite modülünü doğru ve kesin olarak tanımlamak olanaksızdır. Hesap için önerilecek elastisite modülünü, bütün değişkenleri dikkate alarak tanımlamak elbette pratik olmayacaktır. Bugün çeşitli ülkelerde yürürlükte olan yönetmeliklerde elastisite modülü, beton basınç dayanımının bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Bazı yönetmeliklerde verilen bağıntıda hafif beton da işin içine katıldığından, beton ağırlığı da dikkate alınmaktadır. Geliştirilen bu bağıntılar ani yükleme durumlarında geçerlidir ve zaman etkisinden bağımsızdır [45]. Hafif betonun elastisite modülü normal betona göre daha düşüktür. Başlangıç elastisite modülü geleneksel betonunkinin %50~70'i kadardır. Bu özellik de hafif beton kullanılarak üretilmiş kirişlerin, aynı yük altında, sehimlerinin geleneksel beton ile üretilenlerden çok daha büyük olmasını gerektirmektedir.

Sünme şekil değiştirmesi, konut tipi yapılarda, geleneksel betona göre %30~50, sanat yapılarında ise %10~30 daha büyüktür. Bu durumda da öngerilme kaybı artmış olmaktadır [46].

Hafif betonun dinamik etkiler altında davranışı aşağıda belirtilmiştir[44]:

- Dalga yayılma hızı geleneksel betonunkinden yaklaşık %25 daha düşüktür.
- Titreşimleri daha az iletir.
- Şok etkilerini daha iyi absorbe eder.

Betonların yoğunluğundaki değişiklikler betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini etkiler. Yoğunluğun yükselmesiyle betonun basınç dayanımı artarken ısı yalıtıkanlık gücü zayıflar [47]. Hafif betonun yoğunluğu, çimentonun dozajına, agregaların tane dağılımına, agregaların nem içeriğine, karışım oranına, su-bağlayıcı oranına, kimyasal ve mineral katkı maddelerine bağlıdır. Bunun dışında betonun yerleştirme ve sıkıştırma yöntemine ve kür koşullarına da bağlıdır.

Betonun gözeneklerini işgal eden su, betonun mekanik ve termik özelliklerini olumsuz yönde etkilediğinden betonların az su emmesi istenir. Betonun su emmesi, hafif beton üretiminde kullanılan hafif agregaların su emme kapasitesine ve agrega/çimento oranına bağlı olarak değişmektedir. Hafif agregalı betonların üretimlerinde kullanılan agregaların gözenekli yapılarından dolayı hafif betonların da su emmeleri oldukça yüksektir. Agregaların gözenek yapısı da hafif betonun su emme oranı üzerinde büyük rol oynamaktadır. Aynı agrega oranında fakat farklı agregalarla üretilen betonların su emme oranları da agregaların gözenek yapılarından dolayı farklı olmaktadır. Örneğin diatomit gibi çok yüksek gözenek oranına sahip agregayla üretilen betonların su emmeleri, pomza gibi yarı açık gözenekleri bulunan agregalarla üretilen hafif betonlarınkinden fazladır [48].

Hafif betonlarda sıcaklık-genleşme katsayısı ortalama olarak geleneksel betonunkinden %25 daha küçüktür [49]. Dolayısıyla da taşıyıcı hafif beton sıcaklık değişiminden daha az etkilemektedir. Bu da önemli derece farklı sıcaklık etkisinde kalacak olan hiperstatik yapılarda hafif beton kullanımının yararlı olacağını göstermektedir.

Yapının ağırlığı arttıkça ısı iletim katsayısı da büyür. Bir cismin içinden ısı geçişi moleküllerin ısı aktarım yolu ile olur. Cisimlerin ısı iletkenlik katsayısı molekül ve gözenek yapısı ile gözeneklilik oranının bir fonksiyonudur. Belli bir gözeneklilik oranına sahip cisimlerde gözenek duvar kalınlığı etken bir faktör olup, gözenek yarıçapı ne kadar küçük ise ısı iletkenlik katsayısı da o kadar düşüktür. Camsı molekül yapısında ısınmın kat edeceği yol kristalin molekül yapısına göre daha uzundur ve sonuç olarak da ısı iletkenlik katsayısı da aynı kimyasal bileşimde kristal yapıdaki cisimlerinkine göre daha düşüktür. Hafif betonlarda kullanılan hafif agregalar genel olarak camsı fazdadır. Isı iletimi beton bloklardaki boşlukların bir fonksiyonu olduğundan dolayı içerisinde hava boşluğu olan

hafif betonlar ile imal edilen yapılarda ısı iletim katsayıları düşük olur ve yapının ısı yalıtımı sağlanmış olur. Hafif betonların ısı iletkenlik katsayısı 0,2~1,0 kcal/m/h/°C arasındayken geleneksel betonlarınki 1,6~1,9 kcal/m/h/°C arasındadır [46].

Mineral kökenli agregalardan yapılmış betonlar yanmaz ve duman çıkarmazlar. Isı iletkenlik ve genleşme katsayıları düşük olduğundan yangına karşı dayanımları geleneksel betonlara göre daha yüksektir. 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 [29]. Bununla birlikte aynı kaynaktan, hafif betonun yangını bir katta hapsedtiğini dolayısıyla daha kötü sonuçların oluşmasına meydan vermediği de belirtilmektedir. Yüksek sıcaklık deneylerinde agregası açısından bakıldığında pomza agregasının yüksek sıcaklık direnci dere agregasına göre daha fazladır.

Betonun içinde donan suyun yarattığı iç basınç betonda çatlaklar oluşmasına veya betonun tamamen dağılmasına sebep olabilir. Betonların donma olayı karşısında parçalanmamasında en önemli rol, agregası taneleri tarafından oynanmaktadır. Bu nedenle beton üretiminde kullanılan agregaların donma etkisine karşı dayanıklı olması gerekir. Fazla miktarda su emmesine rağmen donma olayına karşı dayanımı yüksektir. Bu durum suya doymun olmayan çok sayıda gözenekli 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 [28]. Donma dayanımının yüksek olması soğuk iklim bölgelerinde hafif betona yönelik talebi artırmaktadır.

Hafif betonların normal betonlara göre üstünlükleri;

- Hafif betonlar normal betonlara göre oldukça hafiftirler.
- Genellikle yük azaldığından boyutlar küçültülerek ekonomi sağlanabilmektedir.
- Yapıya etki eden sismik kuvvetler azalır.
- Isı iletkenlik katsayıları daha düşüktür. Böylelikle yapılarda ısıtma ve soğutma enerji tasarrufu sağlanır.
- Isıl genleşme katsayıları daha düşüktür.
- Hafif agregalar ve bu agregaların betonları gözenekli malzemeler olduklarından ses yutma özellikleri yüksektir.
- Yangına dayanıklılık yönünden geleneksel betonlara göre daha güvenlidirler.

Hafif betonların normal betonlara göre başlıca sakıncaları;

- Boşluklu bir yapıya sahip olduklarından istenilen dayanımı sağlayamazlar.
- Aşınmaya karşı geleneksel betonlara göre daha dayanıksızdırlar.
- Üretim ve yerleştirilmesinde daha fazla özen gerektirir.
- Neme karşı yalıtılmaları gerekir.
- Donatı-beton aderansı düşüktür.
- Elastisite modülleri düşüktür ve deprem sırasında deplasmanları büyüktür.
- Geleneksel betona kıyasla daha çok çimento dozajı gerektirir.
- Hafif agregalı betonlar daha kırılgandırlar.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

KYB yüksek akışkanlık özelliğine sahip olmasından dolayı viskozitesi düşük olmakta, taşıma ve yerleştirme esnasında ayrışma ve terleme problemleri ortaya çıkabilmektedir. Genel olarak viskoziteyi düzenlemek için agrega maksimum tane çapı küçültülmekte ve ince agrega miktarı arttırılmaktadır. Bu da çimento miktarının artmasına dolayısıyla betonun sıcaklığının ve maliyetin yükselmesine yol açmaktadır. Viskoziteyi düzenlemek için kimyasal katkıları kullanılabilir. Maliyeti arttıran viskozite düzenleyici kimyasal katkıları yerine uçucu kül ve silis dumanı da kullanılabilir. Bu ince mineral malzemeler hem viskoziteyi arttırır hem de çimentoyla yer değiştirilerek kullanıldığı için beton maliyetlerini düşürür.

Beton karışım oranlarının belirlenmesinde genellikle basınç dayanımı ve işlenebilirlik özellikleri göz önünde bulundurulur. Çünkü hafif agrega ile yapılan hafif taşıyıcı betonlar daima dayanım düşüklüğü ve segregasyon eğilimindedirler. Bu nedenle tasarımdan yerleştirmeye kadar bütün aşamalarda çalışmaların titizlikle gerçekleştirilmesi gerekir [50].

KYB karışım tasarımı için standart bir metot yoktur ve pek çok akademik enstitü, katkı firmaları, hazır beton ve prefabrik firmaları kendi karışım oranlama metotlarını geliştirmiştir. Ancak KYB tasarımı için genellikle EFNARC [14] komitesinin hazırlamış olduğu standart kullanılmaktadır.

Bu çalışmada geliştirilmiş perlit ve pomza gibi hafif agregalar kullanılarak üretilen mineral katkılı KYH'lerin taze ve sertleşmiş beton özellikleri incelenmiştir. Çalışmada akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ve iki farklı mineral katkı kullanılmıştır. Tüm karışımlardaki mineral katkı ve kimyasal katkı miktarları eşit tutulmuştur. EFNARC [14]'ın önerdiği çökme yayılma değerlerine göre agrega tipi ve miktarlarında değişiklikler yapılarak karışımlar hazırlanmıştır. Harcın taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerinin ölçülmesi için deneyler yapılmıştır.

4.1. Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada kullanılan malzemeler ve özellikleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

4.1.1. Çimento ve Toz Malzemeler

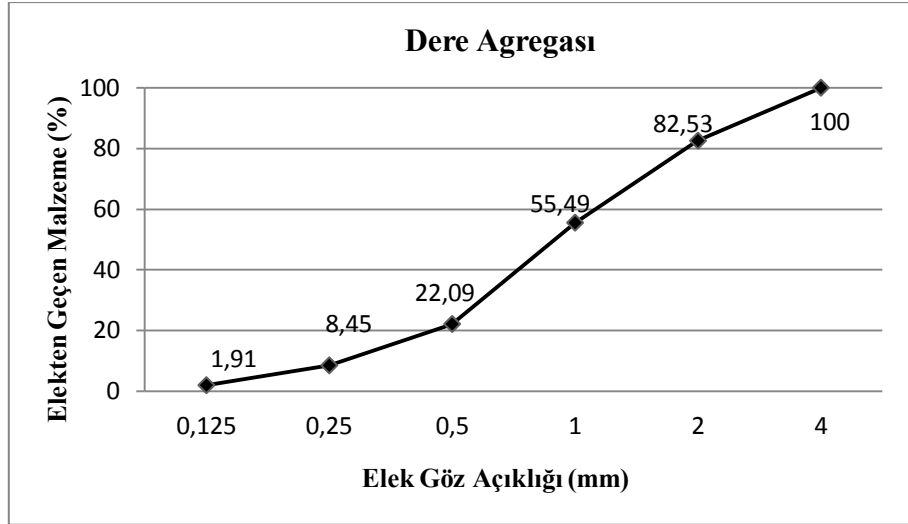
Deneysel çalışmada Elazığ Altınova Çimento Sanayii Tic. A.Ş.'den temin edilen CEM I 42,5 N tipi portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Çalışmada ince toz malzeme (<0,125 mm) miktarına da katkı sağlamak amacıyla Soma Termik Santrali'ne ait C sınıfı uçucu kül (UK) ve Eti Elektro Metalurji A.Ş.'den temin edilen silis dumanı (SD) karışıma mineral katkı olarak katılmıştır. Kullanılan çimento ve toz malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Çimento ve toz malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Bileşim (%)	PÇ	UK	SD
SiO ₂	21,12	42,14	81,4
Al ₂ O ₃	5,62	19,38	4,47
Fe ₂ O ₃	3,24	4,64	1,4
CaO	62,94	26,96	0,82
MgO	2,73	1,78	1,48
SO ₃	2,3	2,43	1,35
Na ₂ O	-	-	-
K ₂ O	-	1,13	-
Cl	-	0,001	-
Kızdırma Kaybı	1,78	-	1,84
Fiziksel Özellikler			
Özgül Ağırlık(g/cm ³)	3,1	2,2	2,2
Özgül Yüzey(cm ² /g)	3370	2900	144000

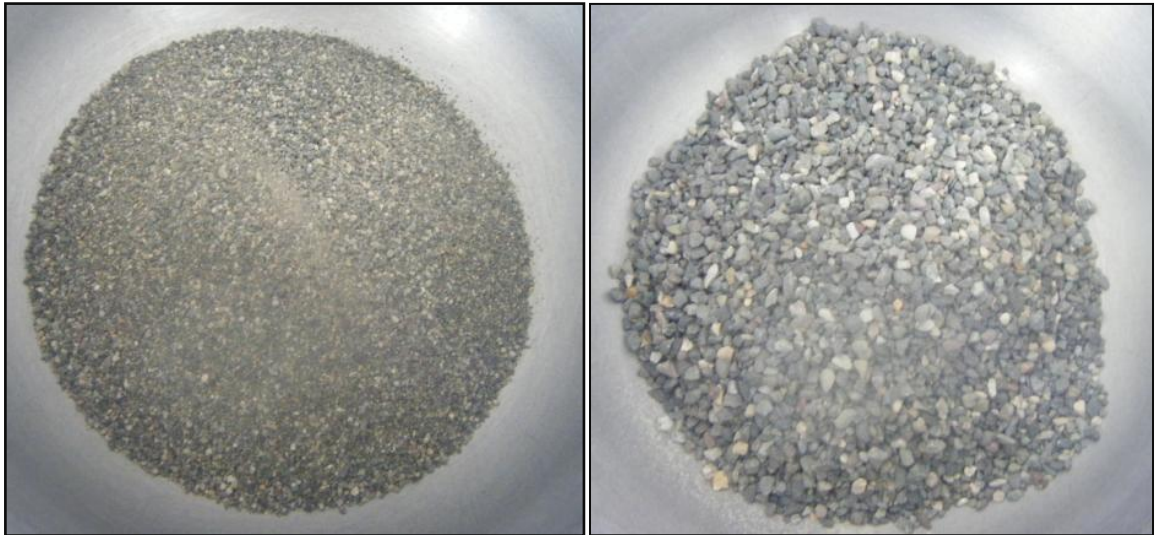
4.1.2. Agregalar

Deneysel çalışmada 0-2 mm ve 2-4 mm aralıklarında farklı kökenli agregalar kullanılmıştır. Bunlar dere agregası, pomza ve genişletilmiş perlittir. 0-2 mm elek aralığında dere agregası ve genişletilmiş perlit, 2-4 mm elek aralığında dere agregası ve pomza kullanılmıştır. Dere agregası Elazığ Murat nehrinden temin edilmiştir ve agreganın doymuş kuru yüzey özgül ağırlığı 2,63 gr/cm³, su emmesi %1,96'dır. Elek analizi ile belirlenen dere agregasının granülometrisi Şekil 4.1'de verilmiştir.

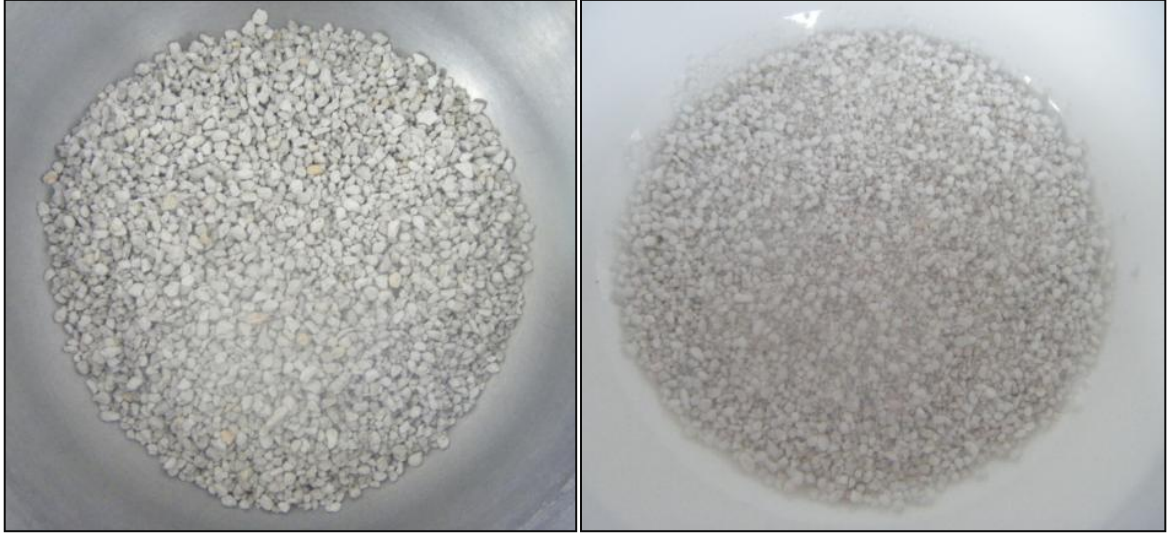


Şekil 4.1 Dere agregası granülometrisi

Asidik pomza agregası (Şekil 4.3), Bitlis Tatvan yöresinden elde edilmiş olup, özgül ağırlığı $0,8 \text{ gr/cm}^3$ ve su emmesi %29'dur. Genleştirilmiş perlit (Şekil 4.3) Konya Persa Perlit'ten temin edilmiştir ve özgül ağırlığı $0,055 \text{ gr/cm}^3$, su emmesi %26,7'dir. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri Tablo 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 Dere agregası (0-2 mm, 2-4 mm)



Şekil 4.3 Pomza (2-4 mm) ve genleştirilmiş perlit (0-2 mm)

Tablo 4.2 Agregaların fiziksel özellikleri

	Pomza	Dere agregası	Genleştirilmiş perlit
Özgül ağırlık (g/cm^3)	0,8	2,63	0,055
Su emme (%)	29	1,96	26,7

4.1.3. Kimyasal Katkı

Deneysel çalışmalarda kimyasal katkı olarak, $1,06 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluğa sahip Sika Hi-Tech 36 modifiye polikarboksilat esaslı polimer yapılı süper akışkanlaştırıcı (SA) tüm karışımlarda 8 kg/m^3 oranında kullanılmıştır.

Betondan istenilen performansa bağlı olarak; plastik beton için çimento ağırlığının %0.4-1.0'i (100 kg çimento için 400-1000 g) oranında, KYB için çimento ağırlığının %1,0-2,0'si oranında (100 kg çimento için 1000-2000 g) süper akışkanlaştırıcı kullanılır. Kullanılan kimyasal katkının özellikleri Tablo 4.3'te verilmiştir.[51].

Tablo 4.3 Kimyasal katkının özellikleri

Kimyasal Yapı	Modifiye polikarboksilat esaslı polimer	
Yoğunluk	1,06 gr/cm ³	
pH Değeri	3 - 7	
Donma Noktası	-4°C	
Suda Çözünebilir Klorür (%)	En fazla %0,1	(TS EN 934-2)
Alkali Miktarı (%Na ₂ O Eşdeğeri Olarak)	En fazla %0,3	(TS EN 934-2)

4.1.4. Karma Suyu

Deneyisel çalışmaların tamamında TS EN 1008 [52]'e uygun Elazığ ili şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

4.2. Deneyler ve Karışım Oranları

Tüm karışımlar ve deneyler Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemesi Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

KYH karışımlarında çimento ile birlikte literatürün önerdiği oranda uçucu kül (%20) ve silis dumanı (%10) kullanılmıştır. Toplam toz içeriği yapılan ön işlenebilirlik deneyleri sonucunda 650 kg/m³ olarak sabitlenmiştir. Çalışmada, çimento+mineral katkı miktarı, maksimum tane çapı, süper akışkanlaştırıcı miktarı sabit tutulurken, kullanılacak ince agrega oranları değişken parametre olarak alınmıştır. Tüm karışımlarda su/toz oranı 0,31~0,34 civarında tutulmuştur. Harç serilerinde 0-2 mm tane aralığında genleştirilmiş perlit ve kum, 2-4 mm tane aralığında pomza ve kum kullanılmıştır. Karışımlarda ince agrega olarak kullanılan genleştirilmiş perlit, 0-2 tane aralığında maksimum %30 kullanılmıştır. Mutlak hacme göre hesaplanan harç karışım değerlerinin KYH kriterlerine uygunluğu deneme yanılma yöntemiyle belirlenmeye çalışılmıştır. 1 m³ harçtaki agrega miktarları Denklem 4.1'e göre hesaplanmıştır.

$$V_a = 1000 - \left(\frac{\zeta}{\rho_\zeta} + \frac{UK}{\rho_{UK}} + \frac{SD}{\rho_{SD}} + \frac{k}{\rho_k} + s + A \right) \quad (4.1)$$

V_a : 1m³ betonda bulunacak agreganın hacmi (dm³)

ζ : Karışıma girecek çimentonun ağırlığı (kg)

ρ_ζ : Çimentonun özgül ağırlığı (kg/dm³)

UK: Karışıma girecek uçucu külün ağırlığı (kg)

ρ_{UK} : Uçucu külün özgül ağırlığı (kg/dm³)

SD: Karışıma girecek silis dumanı ağırlığı (kg)

ρ_{SD} : Silis dumanı özgül ağırlığı (kg/dm³)

k: Kimyasal katkı miktarı (kg)

ρ_k : Kimyasal katkı özgül ağırlığı (kg/dm³)

s: Karışıma girecek suyun hacmi (dm³)

A: Betondaki havanın hacmi (dm³)

Çalışmada hafif agrega içeren ve içermeyen olmak üzere toplam 13 adet KYH karışımı üretilmiştir. Bütün karışımlarda toz malzemenin %20 oranında uçucu kül, %10 oranında silis dumanı kullanılmış, süper akışkanlaştırıcı miktarı 8 kg/m³'te sabit tutulmuştur. Karışımların içerikleri isimlerinden anlaşılabilir şekilde tanımlanmıştır. Örnek olarak GP1-P6 karışımı; sırasıyla 0-2 tane aralığında %10 genleştirilmiş perlit, 2-4 tane aralığında %60 pomza kullanıldığını göstermektedir. Tablo 4.4'te karışım oranları verilmektedir.

Tablo 4.4 Karışımların bileşimleri

Karışım	Muhteva									
	(kg/m ³)								%	
	PÇ	UK	SD	Su	Kum	GP	P	SA	Su/Toz (ağırlıkça)	Su/Toz (hacimce)
GP0-P0	455	130	65	255,40	1229,64	0	0	8	0,34	1,11
GP0-P10	455	130	65	228,06	597,72	0	181,82	8	0,31	0,99
GP1-P0	455	130	65	249,44	1184,40	1,30	0	8	0,34	1,09
GP1-P2	455	130	65	240,89	1059,72	1,30	37,92	8	0,33	1,05
GP1-P6	455	130	65	230,95	799,27	1,29	112,21	8	0,31	1,01
GP1-P8	455	130	65	229,81	666,89	1,27	147,53	8	0,31	1,00
GP2-P0	455	130	65	236,69	1152,83	2,68	0	8	0,33	1,03
GP2-P3	455	130	65	244,47	922,22	2,57	56,11	8	0,34	1,07
GP2-P4	455	130	65	240,25	860,74	2,57	74,81	8	0,33	1,05
GP2-P10	455	130	65	229,73	478,18	2,50	181,82	8	0,32	1,00
GP3-P0	455	130	65	237,59	1088,78	4,02	0	8	0,33	1,04
GP3-P6	455	130	65	239,82	666,90	3,80	110,65	8	0,34	1,05
GP3-P10	455	130	65	230,57	418,41	3,75	181,82	8	0,33	1,01

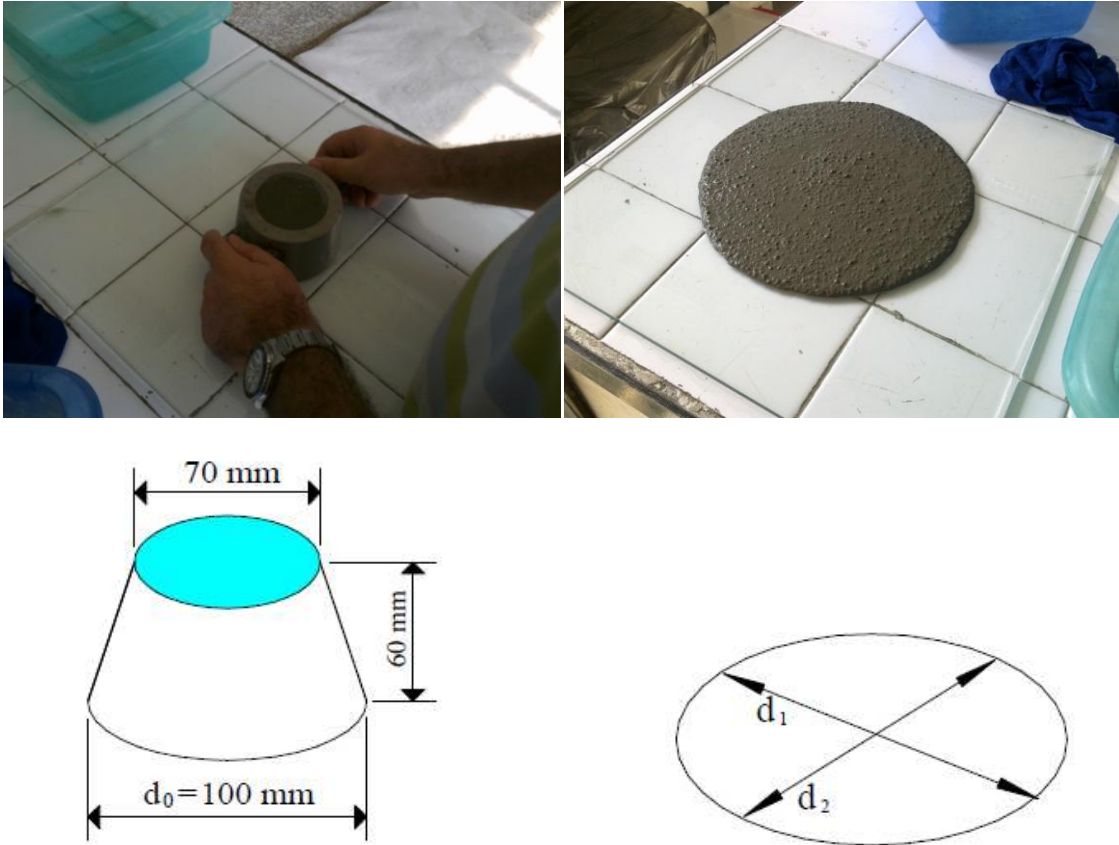
Karışım oranları belirlendikten sonra KYH'nin taze haldeki ve serleştikten sonraki birim hacim ağırlığı, porozite, toplam su emme, mekanik (basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı) ve durabilite (yüksek sıcaklık, kılcal su emme) özelliklerini ölçmek için numuneler hazırlanmıştır. Her bir seriden 18'er adet 40×40×160 mm boyutlarında 234 adet prizmatik numune ve 3'er adet 50 mm boyutlarında 39 adet küp numune dökülmüştür.

4.2.1. Taze Harç Deneyleri

KYH'lerde işlenebilirlik deneyleri EFNARC [14] tarafından verilmiştir. Bunlar mini çökme-yayıma ve mini V-hunisi deneyleridir.

4.2.1.1. Mini Çökme-Yayılma Deneyi

Bu deney metodu harcın akışkanlık ve doldurma yeteneğini ölçmektedir. Şekil 4.4'te belirtilen mini çökme-yayılma deney düzeneğinde kesik koni (çap: 70-100 mm, yükseklik: 60 mm), düz ve absorbe özelliği olmayan bir yüzey üzerine yerleştirilir, kendi ağırlığına harç ile doldurulur ve koni yukarı doğru çekilir.



Şekil 4.4 Mini çökme yayılma deneyi düzeneği

Koni çekildikten sonra harcın yüzey üzerine yayılması beklenir ve Şekil 4.5'teki gibi harcın yayılma çapı birbirine dik iki yönde ölçülüp bunların ortalaması son çap olarak adlandırılır. Elde edilen sonuçlardan yararlanılarak EFNARC [14]'da verilen denklem (4.2) yardımı ile bağıl çökme-yayılma değeri hesaplanır.

$$\Gamma_m = \left[\frac{d}{d_o} \right]^2 - 1 \quad (4.2)$$

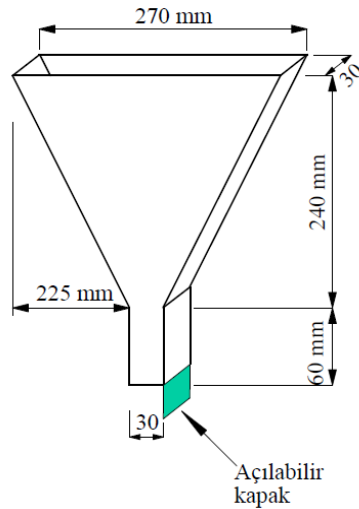
Burada, d test sonucu elde edilen ortalama son çap, d_0 mini çökme-yayılma konisinin alt çapıdır (100 mm). EFNARC [14]’a göre, harçların kendiliğinden yerleşebilme kriterlerinden çökme yayılma değeri 240-260 mm arasında olmalıdır.



Şekil 4.5 Mini ökme yayılma ölçümü

4.2.1.2. Mini V-Hunisi Deneyi

KYH için mini V-hunisi deneyi EFNARC [14] tarafından tarif edilmiştir. Bu deney, taze KYH’nin kendi ağırlığı ile Şekil 4.7’deki özel tasarlanmış huninin dar ağızından boşalma süresinin ölçülmesini içerir. Huni tamamen harçla doldurulur, Şekil 4.7’deki gibi alttaki kapak açılarak harcın akmasına izin verilir ve huni içindeki harcın boşalma süresi ölçülür.



Şekil 4.6 Mini V-hunisi deney aparatı

Deney KYH'nin viskozite, akıcılık ve segregasyon direnci hakkında fikir vermektedir. Her bir seri için elde edilen akış süreleri kullanılarak EFNARC [14]'ta verilen aşağıdaki denklem (4.3) ile bağıl huni hızları hesaplanır.

$$R_m = \frac{10}{t} \quad (4.3)$$



Şekil 4.7 Mini V-hunisi deney ölçümü

Burada, t deney sonucunda tespit edilen akma zamanıdır. EFNARC [14]' ye göre, harçların kendiliğinden yerleşebilme kriterlerinden mini V-hunisi akış süresi 7-11 sn arasında olmalıdır.

4.2.1.3. Viskozimetre deneyi

Harçların viskozite ölçümleri Brookfield DV-E model bir cihaz (Şekil 4.8) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Harçların viskozitesi 1, 2.5, 5, 10, 20, 50 ve 100 devir/dk açısal hızlarda ve karıştırma işleminden hemen sonra ölçülmüştür. Her bir dönme hızına karşılık gelen değerler kaydedilmiş, 100 devir/dk dönme hızından sonra geriye doğru ölçümler yapılmaya devam edilmiş ve bu değerlerin ortalamaları alınmıştır. Böylece, her bir KYH karışımı için farklı açısal hızlardaki viskozite değerleri (cP) elde edilmiş ve viskozite-açısal hız grafiği çizilmiştir.



Şekil 4.8 Brookfield DV-E model viskozimetre

4.2.2. Taze Betonun Kalıplara Yerleştirilmesi

Taze beton deneyleri tamamlandıktan sonra KYH, herhangi bir sıkıştırma veya sarsma işlemi yapılmaksızın 40×40×160 mm prizmatik ve 50 mm küp kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 4.9). Kalıba sıkıştırma işlemi yapılmaksızın yerleştirilen harçlar 48 saat boyunca üzeri koruma altına alınmış olan kalıplarda bekletilmişlerdir. 48 saat sonra kalıptan çıkartılarak $20 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki kirece doymun su içerisinde deney gününe kadar kür işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.9 40x40x160 mm prizmatik ve 50 mm küp numuneler

4.2.3. Sertleşmiş Harç Deneyleri

Kür süreleri sonunda tüm numuneler aşağıda maddeler halinde verilen sertleşmiş harç deneyleri uygulanmıştır.

4.2.3.1. Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı

40×40×160 mm prizmatik KYH numuneleri 3, 28 ve 90 günlük kür sürelerinin sonunda TS EN 196-1'de [53] öngörüldüğü şekilde üç noktalı eğilme ve basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Her seriden 3'er adet numune üzerinde Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'deki gibi önce eğilmede çekme dayanımı sonra da basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.10 Eğilmede çekme dayanımı deneyi

Üç noktalı eğilme deneyinden sonra iki parçaya ayrılan numunelere yükleme hızı 2,4 kN/s olan basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımlarında hidrolik yük kontrollü dijital göstergeli pres kullanılmıştır. Her iki deneyde de numune dayanım değerlerinin ortalamaları alınmıştır.



Şekil 4.11 Basınç dayanımı deneyi

4.2.3.2. Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini, Porozite ve Su Emme Deneyleri

TS EN 206-1 [28]' e göre beton; etüv kurusu yoğunluğa göre normal beton, hafif beton veya ağır beton olarak tarif edilmektedir ve betonun etüv kurusu yoğunluğu, TS EN 12390-7 [54]' ye uygun olarak tayin edilmelidir.

Etüv kurusu yoğunluk, doymun kuru yüzey yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam su emme ve porozite deneyleri için her seriden 50 mm'lik küp numuneler kullanılmıştır. Numuneler TS EN 12390-7 [54]' ye göre 24 saat su içerisinde bekletildikten sonra doymun halde Arşimet terazisinde (Şekil 4.12) havada ve su içerisinde asılı ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra $105^{\circ}\text{C}\pm 5$ sıcaklıktaki etüvde değişmez ağırlığa kadar kurutulan numunelerin etüv kurusu ağırlıkları ölçülmüş; 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8 denklemleri yardımı ile tüm serilerin etüv kurusu yoğunluk, doymun kuru yüzey yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam su emme ve porozite değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 4.12 Arşimet terazisi

$$\text{Etüv Kuru Yoğunluk} = \frac{W_1}{W_3 - W_2} \text{ (gr/cm}^3\text{)} \quad (4.4)$$

$$\text{Doygun Kuru Yüzey Yoğunluk} = \frac{W_3}{W_3 - W_2} \text{ (gr/cm}^3\text{)} \quad (4.5)$$

$$\text{Görünür Yoğunluk} = \frac{W_1}{W_1 - W_2} \text{ (gr/cm}^3\text{)} \quad (4.6)$$

$$\text{Toplam Su Emme (\%)} = \frac{W_3 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (4.7)$$

$$\text{Porozite (\%)} = \frac{W_3 - W_1}{W_3 - W_2} \times 100 \quad (4.8)$$

W_1 : Numunenin etüv kuru ağırlığı (gr)

W_2 : Numunenin sudaki ağırlığı (gr)

W_3 : Numunenin doymun kuru yüzey ağırlığı (gr)

4.2.3.3. Kılcal Su Emme Deneyi

28 gün suda kür edilen 50 mm'lik harç numuneler, sabit ağırlığa gelinceye kadar $105^{\circ}\text{C}\pm 5'$ de etüvde bekletilmişlerdir. Yan yüzeyleri izole edilen numuneler yüksekliği numune tabanından 5 mm olacak şekilde suya yerleştirilmiş (Şekil 4.13) ve 0, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360 ve 1440 dakikalık sürelerde, numunelerin üzerindeki serbest su alınarak 0,01 gr hassasiyetle tartılmıştır. Kılcal su emme katsayıları en küçük kareler yöntemi ile Denklem 4.9 kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.13 Kılcal su emme deneyi

$$\frac{Q}{A} = k\sqrt{t} \quad (4.9)$$

k: Kılcal su emme katsayısı ($\text{cm/s}^{1/2}$)

Q: Emilen su miktarı (cm^3)

t: Geçen zaman (s)

A: Su ile temas eden alan (cm^2)

4.2.3.4. Yüksek Sıcaklık Deneyi

Yüksek sıcaklık deneyi TS EN 1363-1 [55] ve TS EN 1363-2'ye [56] uygun olarak yapılmıştır. 28 günlük her seriden 3'er adet 40×40×160 mm prizmatik numune, önce etüvde $105\pm5^{\circ}\text{C}$ 'de 24 saat bekletilmiş sonra ısınma hızı $6^{\circ}\text{C} / \text{dakika}$ olan 1200°C kapasiteli Protherm HLF 150 laboratuvar tipi fırında (Şekil 4.14) 300, 600 ve 900°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Hedef sıcaklıkta 1 saat çalışan fırın daha sonra otomatik olarak kapanmış ve numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Tüm numunelere eğilmede çekme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır.



Şekil 4.14 Yüksek sıcaklık testlerinde kullanılan fırın



Şekil 4.15 300, 600 ve 900°C sıcaklıklara maruz kalmış harç numuneleri

5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER

Bu bölümde hazırlanan 13 farklı karışımın taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri incelenmiş ve elde edilen deney sonuçları değerlendirilmiştir.

5.1. Taze Harç Deney Sonuçları

KYB, normal betondan farklı olarak tasarım ve uygulama aşamalarında dikkat ve titizlik gerektiren özel bir beton türüdür. Bir betonun KYB özelliği gösterebilmesi için belirli özellikleri taşıması gerekmektedir.

KYB kendi ağırlığı altında ve vibrasyon gerektirmeden kalıpları boşluksuz bir şekilde doldurabilmeli ve yüksek akıcılığa sahip olmalıdır. KYB, yüksek akıcılığı sağlarken ayrışmaya karşı dirençli olmalı ve stabilitesini korumalıdır. KYB'nin sadece doldurma özelliğine sahip olması yetmemekte aynı zamanda yoğun donatılar arasından geçiş yeteneğine sahip olması gerekmektedir. KYB'nin yüksek akıcılık, ayrışmaya karşı direnç ve geçiş yeteneği özelliklerini taşıması için düşük eşik kayma gerilmesine ve optimum viskoziteye sahip olması gerekmektedir. Taze betonun işlenebilirliği ile ilgili bir parametre olan eşik kayma gerilmesi, bir malzemenin akışa geçebilmesi için gerekli minimum gerilmedir ve mümkün olduğunca sığa yakın bir değerde olmalıdır. Viskozite ise taze betonun akmaya karşı gösterdiği direncin ölçüsüdür. Bu direnç betonun içsel sürtünmesi nedeniyle oluşmaktadır. Beton içerisindeki malzemelerin parametreleri, karıştırıcı tipi, malzemelerin karışıma ilave edilme sırası, karıştırma süresi ve sıcaklık faktörleri betonun kendiliğinden yerleşebilirliği üzerinde etkilidir. Geleneksel betonda akışkanlık, taze karışıma su ilave edilerek sağlanmaya çalışıldığında hem betonun mukavemeti düşmekte hem de viskoziteyi azaltarak kararlılığın bozulmasına sebep olabilmektedir. Kararlılığı bozulan beton ayrışma eğilimi göstermektedir. Viskozite ile kayma eşiği arasında bir denge bulunmalıdır. Bu yüzden akıcılık süper akışkanlaştırıcılar yardımı ile sağlanırken betonun kararlılığı ince malzeme miktarı yüksek tutularak ve/veya viskozite düzenleyici katkıları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Optimum viskozitenin altına inilirse malzemenin stabilitesi bozulacak ve homojenlik yitirilecek, optimum viskozitenin üzerine çıkılırsa kıvam aşırı artacağından yerleştirmede sıkıntılar yaşanacaktır. Bu nedenlerle KYB'de taze özellikler önem taşımaktadır.

Her ne kadar KYB’de kullanılan agregalar çok çeşitli olsa da, agrega karakteristiği akış özelliklerini değiştirebildiği gibi çimento, su ve katkı miktarı ihtiyacını da değiştirebilmektedir. Agreganın şekli, yüzey yapısı ve köşeli olup olmama durumu KYB için agrega seçiminde önemli bir rol oynamaktadır [57].

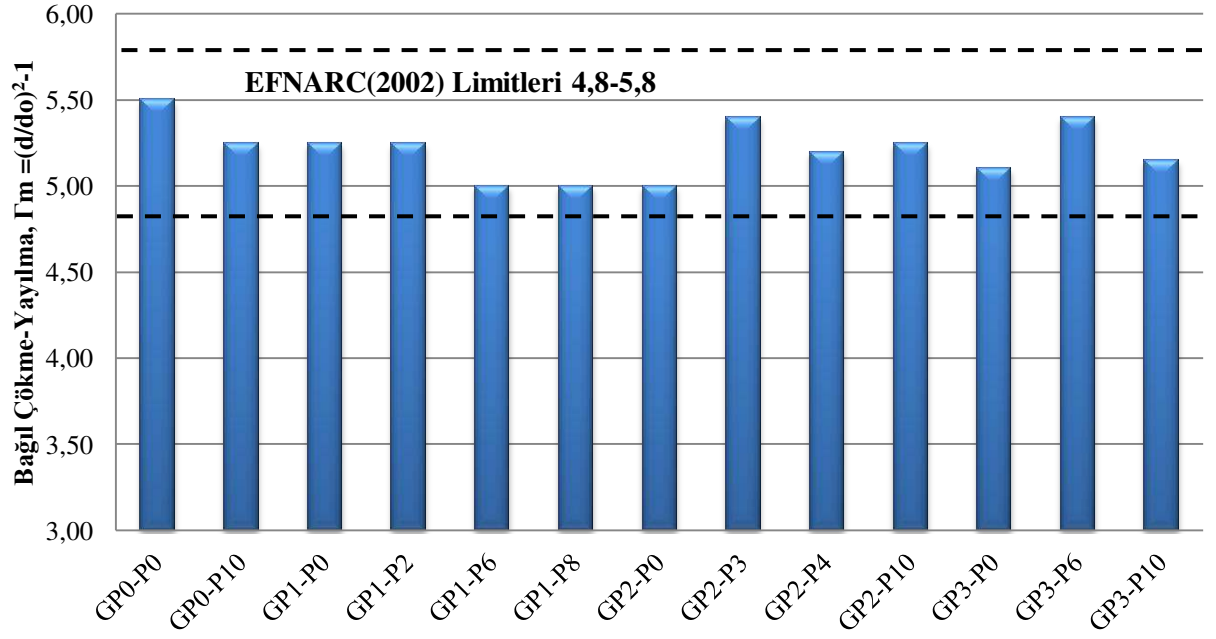
KYH serilerinde toplam bağlayıcı içeriği ve süper akışkanlaştırıcı miktarı sabit olduğundan, KYH’nin taze haldeki özelliklerini kullanılan agregaların değiştireceği düşünülerek taze harç deneyleri yapılmış ve sonuçlar agrega parametrelerine göre değerlendirilmiştir.

Hazırlanan taze harç karışımları üzerinde yapılan mini çökme-yayılma ve mini V-hunisi deney sonuçları ile Denklem 4.2 ve Denklem 4.3 kullanılarak hesaplanan bağıl çökme-yayılma ve bağıl huni hızı değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Tüm KYH karışımlarında hedeflenen yayılma çapı süper akışkanlaştırıcı sabit tutularak ve su miktarı değiştirilerek sağlanabilmektedir.

Tablo 5.1 Mini çökme yayılma deneyi sonuçları

Karışım Kodu	Mini Çökme-Yayılma (mm)	Bağıl Çökme-Yayılma	Mini V-Hunisi (s)	Bağıl Huni Hızı
GP0-P0	255	5,5	7,68	1,3
GP0-P10	250	5,3	10,02	1,0
GP1-P0	250	5,3	7,77	1,3
GP1-P2	250	5,3	8,54	1,2
GP1-P6	245	5,0	9,88	1,0
GP1-P8	245	5,0	9,56	1,0
GP2-P0	245	5,0	7,85	1,3
GP2-P3	253	5,4	8,89	1,1
GP2-P4	249	5,2	9,23	1,1
GP2-P10	250	5,3	10,33	1,0
GP3-P0	247	5,1	8,11	1,2
GP3-P6	253	5,4	9,75	1,0
GP3-P10	248	5,2	10,57	0,9
EFNARC	240-260	4,8-5,8	7-11	0,9-1,4

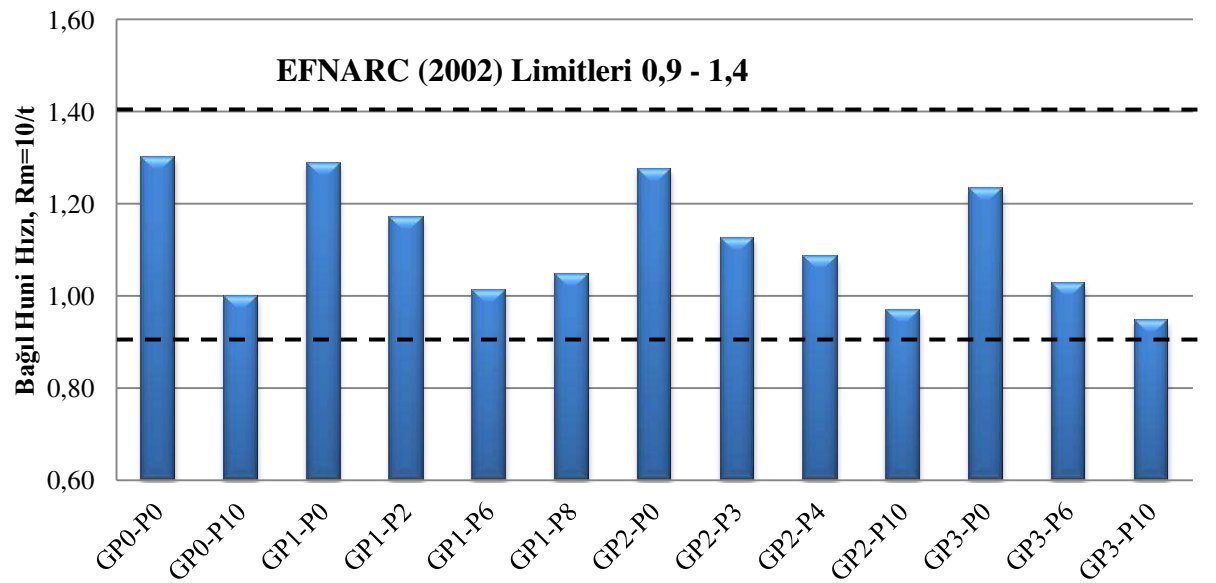
Şekil 5.1’de verilen bağıl çökme-yayılma grafiği incelendiğinde, bütün serilerin EFNARC [14] tarafından verilen referans değerler arasında kaldığı görülmektedir.



Şekil 5.1 Bağıl çökme yayılma grafiği

Akarsu [58] kendiliğinden yerleşen betonun taze haldeki özelliklerini inceleyen çalışmasında KYB'nin yayılması üzerinde agregaların hem yüzey topografyasının hem de özgül ağırlıklarının etkisi olduğu sonucunu çıkarmıştır.

Şekil 5.2'deki bağıl huni hızı grafiği incelendiğinde, bütün KYH karışımları için bulunan sonuçların EFNARC [14] tarafından verilen referans değerler arasında kaldığı görülmektedir.



Şekil 5.2 Bağıl V-hunisi hızı grafiği

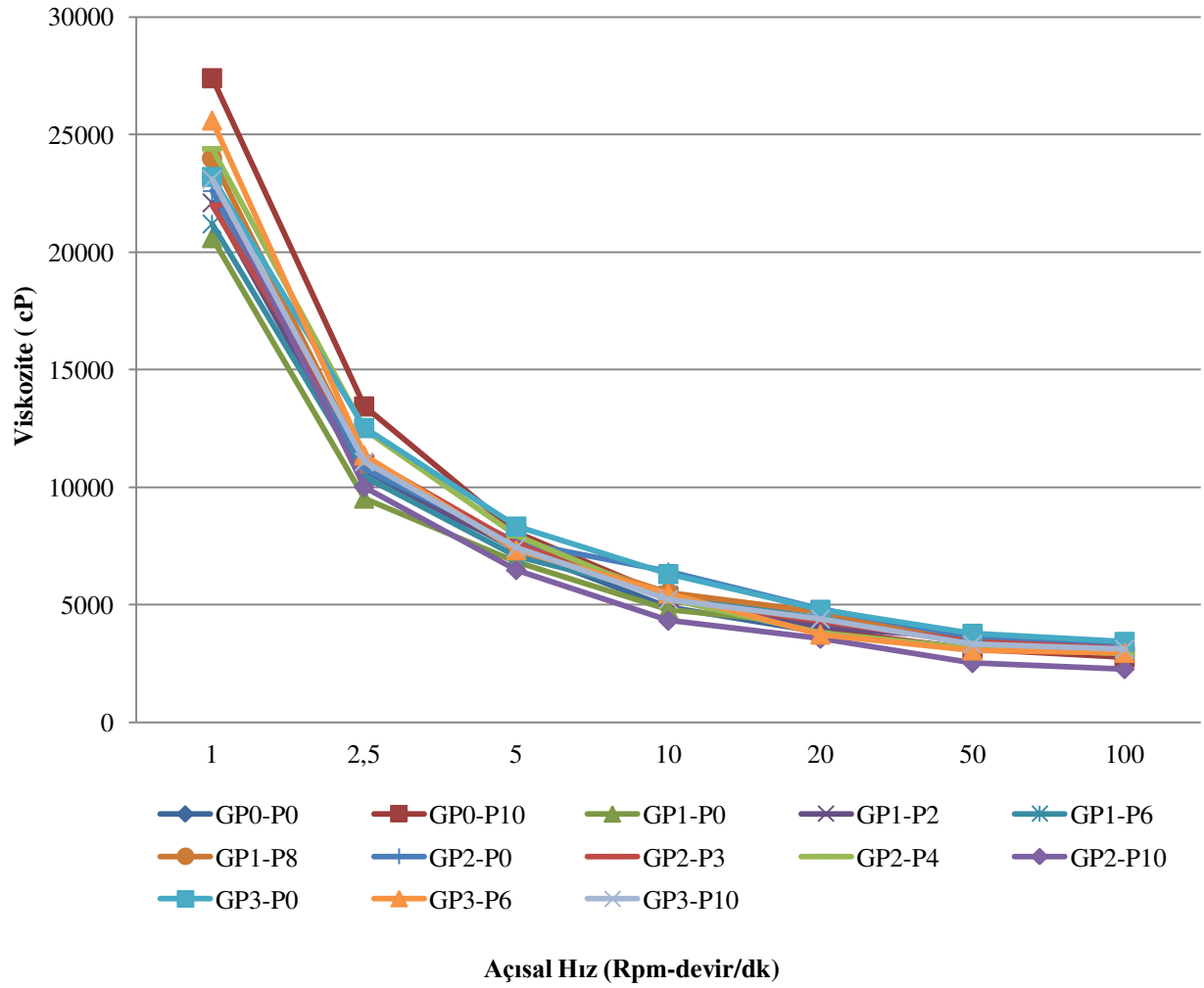
Beton, kendi ağırlığının eşik kayma gerilmesinden büyük olduğu durumda akıcılık özelliği kazandığından, V-hunisi deneyi viskoziteyle ilişkilendirilebilir. Ayrıca bu deney betonun ayrışma problemlerini gözlemlemek için değerlendirilebilir.

Uygunoğlu [3] hafif agregalı kendiliğinden yerleşen betonların özelliklerini incelediği çalışmada, özellikle düşük su/toz oranlarında kırmataşla üretilen serilerin viskozitesi çok yüksek iken, agrega tipinin değiştirilerek gözenekli ve hafif agregaların kullanılmasıyla üretilen serilerin viskozitesi kırmataşla üretilen betonların viskozitelerine göre oldukça düşük olduğunu belirtmiştir.

Taze harçların işlenebilirlik ve kıvam açısından değerlendirilmesi için ayrıca viskozimetre deneyi yapılmış, bulunan değerler Tablo 5.2’de ve Şekil 5.3’te verilmiştir.

Tablo 5.2 Farklı açısız hız değerleri için viskozite değerleri

Karışım Kodu	Açısız Hız (Rpm)						
	1	2,5	5	10	20	50	100
GP0-P0	23200	10720	7360	4900	3830	3140	2875
GP0-P10	27400	13440	8060	5340	3925	3122	2770
GP1-P0	20600	9520	6820	4800	4155	3514	3115
GP1-P2	22100	10400	7480	5300	4040	3559	3215
GP1-P6	21200	10440	7060	5420	4425	3558	3235
GP1-P8	24000	11000	7600	5510	4690	3393	3150
GP2-P0	22600	10760	7660	6410	4805	3630	3225
GP2-P3	22000	11280	7600	5240	4280	3426	3135
GP2-P4	24400	12440	7940	5250	3795	3150	2920
GP2-P10	23200	10000	6480	4325	3560	2525	2269
GP3-P0	23200	12520	8330	6310	4790	3770	3425
GP3-P6	25600	11360	7320	5480	3735	3065	2960
GP3-P10	23100	11080	7440	5230	4395	3317	3115



Şekil 5.3 Viskozimetre değişimleri

Bütün harçlarda dönel ucun açısal hızının artmasıyla viskozite azalmış ve viskozite eğrileri X eksenine doğru asimptotik bir yaklaşım göstermiştir. Şekil 5.3 incelendiğinde kullanılan serilerin viskozite değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

5.2.Sertleşmiş Harç Deney Sonuçları

Deneyisel çalışmada pomza ve geliştirilmiş perlit gibi hafif agregalar kullanılarak bütün KYH serilerinin birim ağırlıkları önemli derecede düşük çıkmıştır.

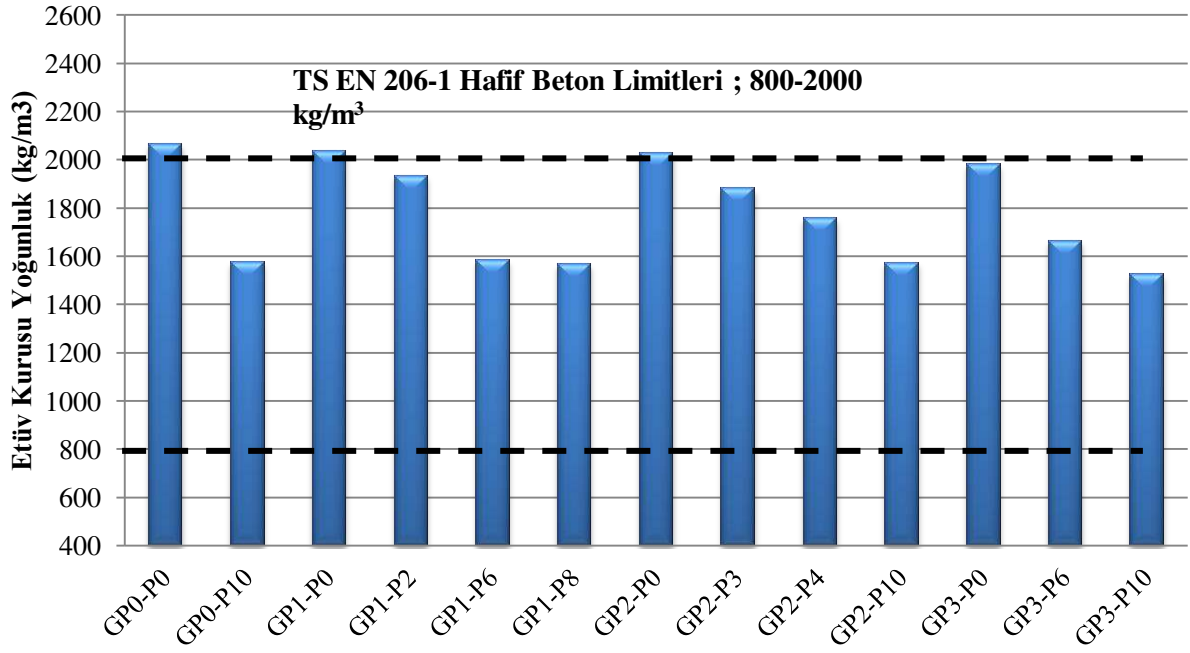
TS EN 206-1 [28] hafif betonu, etüv kurusu yoğunluklarına göre 800-2000 kg/m³ arasında tanımlamaktadır. KYH'lerin taze ve sertleşmiş özelliklerinin incelendiği bu

çalışmada; KYH serilerinin etüv kuru yoğunluğu, doymun kuru yüzey yoğunluğu ve görünür yoğunlukları Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3 KYH numunelerin etüv kuru, doymun kuru yüzey ve görünür yoğunlukları

Karışım	Etüv Kuru Yoğunluk (kg/m ³)	Doymun Kuru Yüzey Yoğunluk (kg/m ³)	Görünür Yoğunluk (kg/m ³)
GP0-P0	2066	2286	2650
GP0-P10	1575	1842	2147
GP1-P0	2035	2263	2636
GP1-P2	1935	2174	2542
GP1-P6	1583	1857	2181
GP1-P8	1567	1847	2175
GP2-P0	2026	2256	2631
GP2-P3	1881	2134	2517
GP2-P4	1758	2019	2379
GP2-P10	1573	1868	2230
GP3-P0	1983	2223	2609
GP3-P6	1663	1942	2306
GP3-P10	1523	1820	2166

Şekil 5.4 incelendiğinde GP0-P0, GP1-P0 ve GP2-P0 serileri dışında bütün seriler hafif beton sınıfına girmektedir. Etüv kuru yoğunlukları sırasıyla 2066, 2035 ve 2026 kg/m³ olan GP0-P0, GP1-P0 ve GP2-P0 serilerinin de hafif beton sınıfına dahil edilebileceği görülmektedir. Şekil 5.4'te görüldüğü gibi serilerde genişletilmiş perlit ve pomza oranının artması etüv kuru yoğunluğu önemli ölçüde azaltmaktadır. Tüm serilerde SD ve UK kullanımı da etüv kuru yoğunluğu önemli ölçüde azaltmıştır.



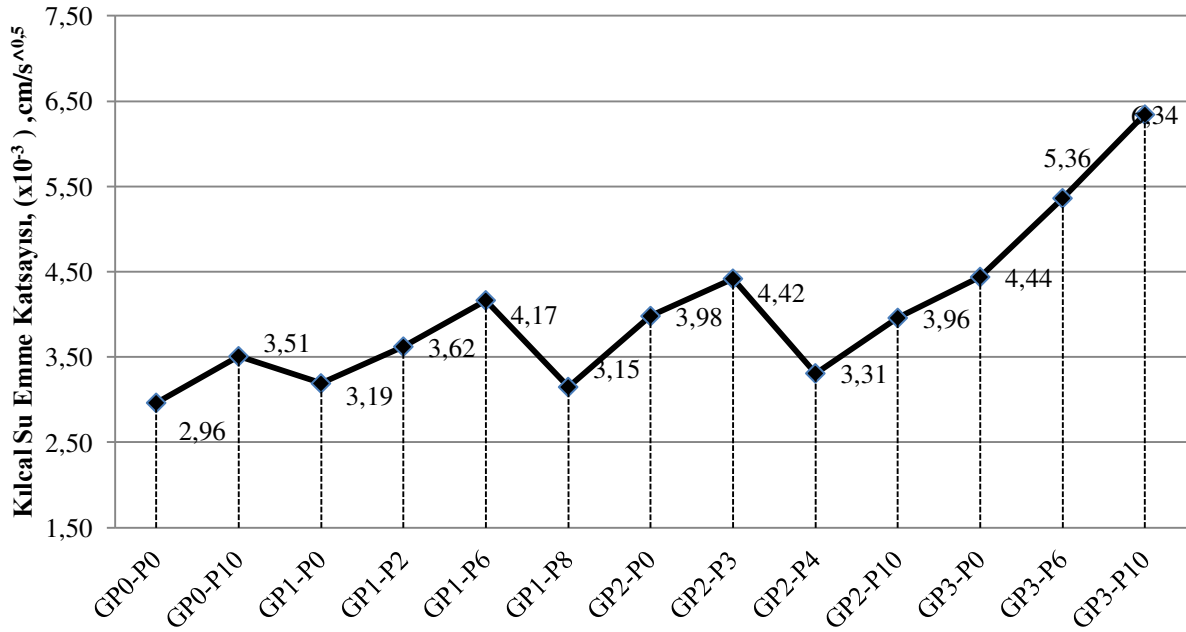
Şekil 5.4 Numunelerin etüv kuru yoğunlukları

En yüksek etüv kuru yoğunluk 2066 kg/m^3 değeriyle hafif agregasız üretilen GP0-P0 serisine ve en düşük etüv kuru yoğunluk ise 1523 kg/m^3 değeriyle GP3-P10 serisine aittir.

Etüv kuru yoğunlukta olduğu gibi serilerin hafif agrega miktarları arttıkça doymun kuru yüzey yoğunlukları da düşmektedir. En yüksek doymun kuru yüzey yoğunluğu 2286 kg/m^3 değeriyle GP0-P0 serisine, en düşük doymun kuru yüzey yoğunluğu da 1820 kg/m^3 değeriyle GP3-P10 serisine aittir. Serilerde doymun kuru yüzey yoğunluk ile etüv kuru yoğunlukları arasındaki farklar serilerin hafif agrega içerikleri arttıkça artmaktadır. GP0-P0 serisinde etüv kuru ile doymun kuru yüzey yoğunluğu arasında %10,68'lik bir fark varken, GP3-P10 serisinde %19,48'lik bir fark vardır. Bunun sebebi hafif agregalarla üretilen harçların daha boşluklu bir yapıya sahip olmaları ve daha yüksek su tutma kapasitelerinden kaynaklanmaktadır.

5.2.1. Kılcal Su Emme, Toplam Su Emme ve Porozite

Yapılan kılcal su emme deneyinden elde edilen tüm serilere ait kılcal su emme katsayıları Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5 Kılcal su emme katsayıları

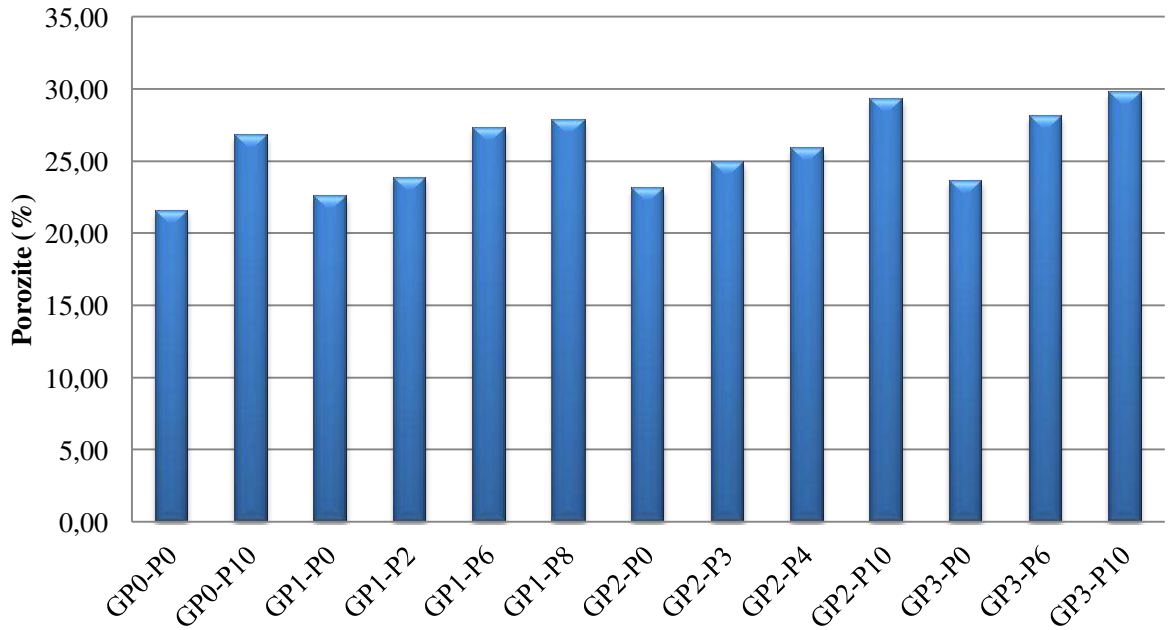
KYH serilerinde kılcal su emme katsayıları, agreganın gözenek yapısına ve harcın içerisindeki kılcal boşluklara göre değişim göstermiştir. Hafif agregalar kullanılan serilerde kılcal su emme katsayısı dere agregalı karışıma göre yüksek çıkmıştır. En fazla kılcal su emme katsayısı genişletilmiş perlit ve pomzanın maksimum oranda kullanıldığı GP3-P10 serisinde, en düşük kılcal su emme katsayısı ise içerisinde hafif agregalar bulunmayan dere agregalı GP0-P0 serisinde elde edilmiştir. Uyan'a [59] göre kılcal su emme miktarı; harç, agregalar-hamur ara yüzü ve agregadaki kılcal boşluklar tarafından emilen su olarak belirtilmiş ve betonun porozitesinden bağımsız tutulmuştur.

Hafif agregalarla beton üretilmesinde karşılaşılan en büyük sorun, yüksek poroziteli yapı ve büyük su emme oranlarından kaynaklanmaktadır. KYH serilerinin porozite ve toplam su emme deney sonuçları Tablo 5.4'te verilmiştir.

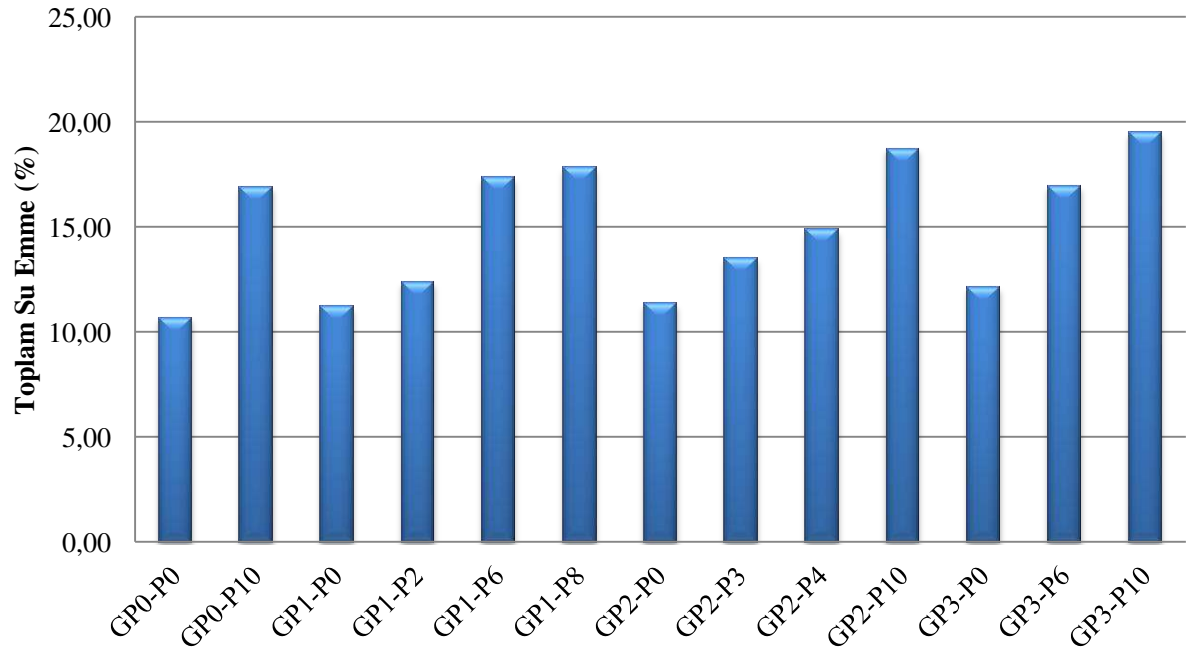
Tablo 5.4 Toplam su emme ve porozite değerleri

Karışım	Toplam Su Emme Kapasitesi (%)	Porozite(%)
GP0-P0	10,69	21,54
GP0-P10	16,92	26,76
GP1-P0	11,21	22,59
GP1-P2	12,39	23,88
GP1-P6	17,35	27,28
GP1-P8	17,84	27,82
GP2-P0	11,35	23,11
GP2-P3	13,49	24,90
GP2-P4	14,87	25,93
GP2-P10	18,74	29,30
GP3-P0	12,12	23,59
GP3-P6	16,95	28,12
GP3-P10	19,49	29,77

Sertleşmiş KYH örnekleri üzerinde belirlenen porozite ve toplam su emme grafikleri sırasıyla Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.6 Porozite değişimi



Şekil 5.7 Toplam su emme değişimi

KYH numunelerin porozite ve toplam su emme değerleri, birim hacim ağırlık değerleriyle ters orantılı olarak değişmektedir. En az porozite ve su emme değeri seriler içerisinde en fazla birim hacim ağırlık değerine sahip olan GP0-P0 numunelerinde elde edilirken, en yüksek porozite değeri de seriler içerisinde en az birim hacim ağırlık değerine sahip olan GP3-P10 numunelerinde elde edilmiştir. Genleştirilmiş perlit ve pomza kullanılan bütün numunelerin porozite ve su emme oranları, hafif agrega kullanılmayan numuneye göre daha fazladır. Dolayısıyla genleştirilmiş perlit ve pomza kullanımı harçların su emme oranını arttırmaktadır.

Gönen [13] yaptığı çalışmada pomza ile üretilen betonlarda, porozite ve kılcal su emme katsayısı arasında yaklaşık doğrusal bir ilişki olduğunu ve porozitedeki artışla birlikte kılcal su emme katsayısının da arttığını belirtmiştir.

Gözenekli agregaların su emme kapasiteleri, su emme hızları ve içinde bulundurduğu nem yüzdesi, birçok endüstri alanında malzemelerin kullanılabilirlik kriterlerini oluşturmaktadır. Ayrıca, agrega tanelerinin kompasitesi, doluluk oranı, açık ve/veya kapalı gözenek dağılım oranı ve doyma derecesi, malzemenin su emme kapasitesine etki eden başlıca faktörlerdir. Bu faktörler, agreganın birim hacim ağırlık ve özgül ağırlık değerlerine bağımlı olarak tanımlanabilmektedir [60].

Harçların su emme miktarı, agregalardaki boşluk miktarının yanında bu boşlukların yapısıyla da ilgilidir. Yüksek poroziteye sahip numuneler her zaman yüksek permeabiliteye sahip olmayabilirler. Permeabilite değeri boşluk genişliğine ve boşlukların birbirleriyle bağlantılı olmasına göre değişmektedir.

Hızal [4] yaptığı çalışmada, kendiliğinden yerleşen taşıyıcı hafif betonun su emme değerinin oldukça yüksek olmasına rağmen, zamana bağlı ya da uzun süreli su emme değerlerinin nispeten düşük olduğunu belirtmektedir. Boşluklu bir yapıya sahip olan pomzanın, agrega-çimento ara yüzündeki suyu emdiğini ve normal ağırlıklı agrega kullanılarak üretilen betonlardan farklı olarak bu tür betonlarda ara yüzün su/çimento oranının düşük olduğuna işaret etmektedir. Dolayısıyla çok daha yoğun ve güçlü bir ara yüz elde edilmektedir. Betonun yaşı ilerledikçe agrega ile çimento ara yüzü güçlenmekte ve agreganın boşlukları yoğunlaşan ara yüz tarafından tıkanmaktadır. Böylelikle yüksek su emme özelliğine sahip hafif agreganın bu dezavantajının ortadan kalktığını belirtmektedir.

Topçu ve Uygunoğlu [61] yaptıkları çalışmada uzun süreli su emme deneylerinde normal agregalı KYB'ler ile hafif agregalı KYB'ler arasında belirgin bir fark olmadığını belirtmişlerdir.

5.2.2. Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı

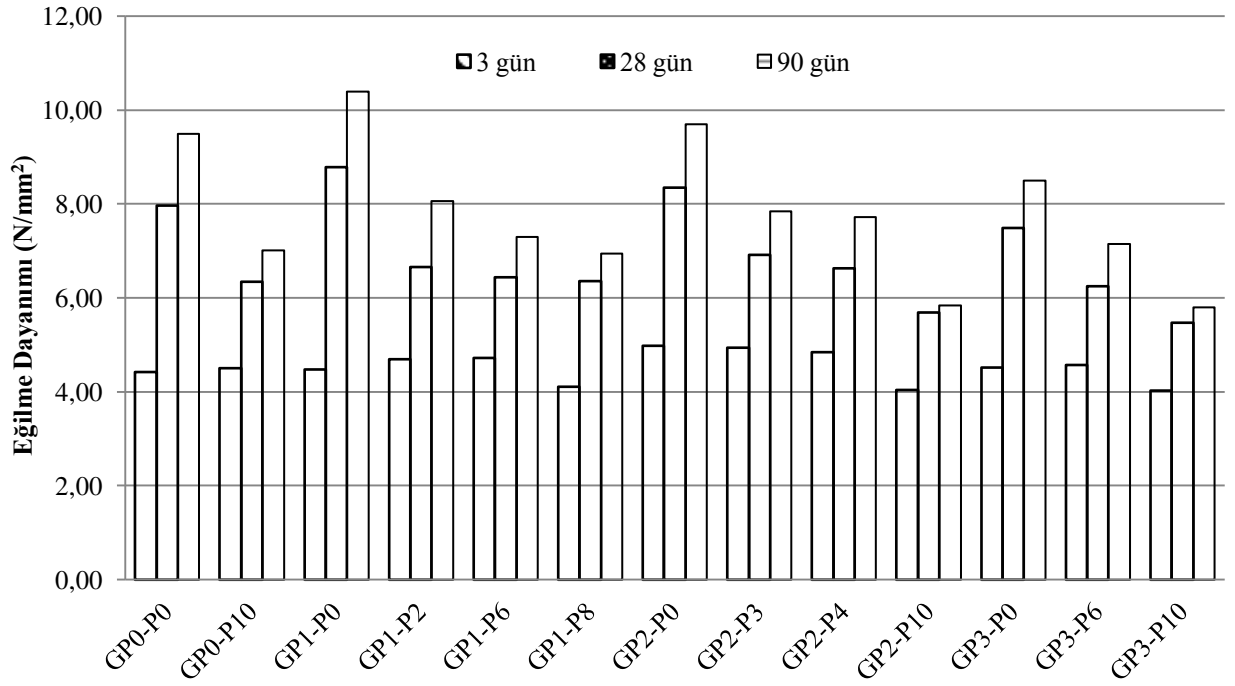
40×40×160 mm prizmatik KYH numunelerinin 3, 28 ve 90 günlük üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri Tablo 5.5'te verilmiştir.

Tablo 5.5 Eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerleri

Karışım	Eğilme (MPa)			Basınç (MPa)		
	3 gün	28 gün	90 gün	3 gün	28 gün	90 gün
GP0-P0	4,42	7,98	9,50	35,02	60,80	69,64
GP0-P10	4,50	6,34	7,02	20,04	38,72	48,72
GP1-P0	4,48	8,79	10,40	35,96	62,83	71,88
GP1-P2	4,70	6,67	8,07	35,00	55,37	61,50
GP1-P6	4,72	6,44	7,30	28,12	45,54	56,92
GP1-P8	4,11	6,36	6,95	25,09	39,24	43,00
GP2-P0	4,98	8,36	9,70	26,86	65,09	74,63
GP2-P3	4,95	6,92	7,86	24,97	52,06	59,75
GP2-P4	4,85	6,64	7,72	22,49	39,08	52,60
GP2-P10	4,05	5,69	5,85	20,00	32,60	37,15
GP3-P0	4,52	7,49	8,50	32,25	61,35	72,57
GP3-P6	4,57	6,25	7,15	20,81	40,18	51,06
GP3-P10	4,03	5,48	5,80	18,54	34,19	37,50

Yapılan deneysel çalışmalar, KYH numunelerinin basınç ve eğilmede çekme dayanımlarının agrega özelliklerine göre değiştiğini göstermektedir. Genel olarak birim ağırlık düştükçe ve porozite arttıkça eğilmede çekme dayanımı düşmektedir. Ancak tüm kür sürelerinde %10 genleştirilmiş perlit ikameli GP1-P0 ve %20 genleştirilmiş perlit ikameli GP2-P0 serileri, hafif agrega kullanılmayan GP0-P0 serisine göre daha fazla eğilmede çekme dayanımına ulaşmışlardır(Şekil 5.8).

3 günlük kür periyodunda en yüksek eğilmede çekme dayanımı 4.98 MPa değeriyle GP2-P0 serisine, en düşük eğilmede çekme dayanımı ise 4,03 MPa değeriyle GP3-P10 serisine aittir. 28 ve 90 günlük kür periyotlarında en yüksek eğilmede çekme dayanımı sırasıyla 8.79 ve 10.4 MPa değerleriyle GP1-P0 serisinde, en düşük eğilme dayanımı ise yine sırasıyla 5.48 ve 5.80 MPa değerleriyle GP3-P10 serisinde elde edilmiştir



Şekil 5.8 KYH'lerin eğilmede çekme dayanımları

GP1-P0 ve GP2-P0 serileri 3, 28 ve 90 günlük periyotların tümünde hafif agregası içermeyen (GP0-P0) serisine göre daha yüksek eğilme dayanımı göstermiştir. GP3-P0 serisi ise sadece 3 günlük kür süresinde yani erken yaşta kontrol harcına göre daha yüksek eğilme dayanımı göstermiştir.

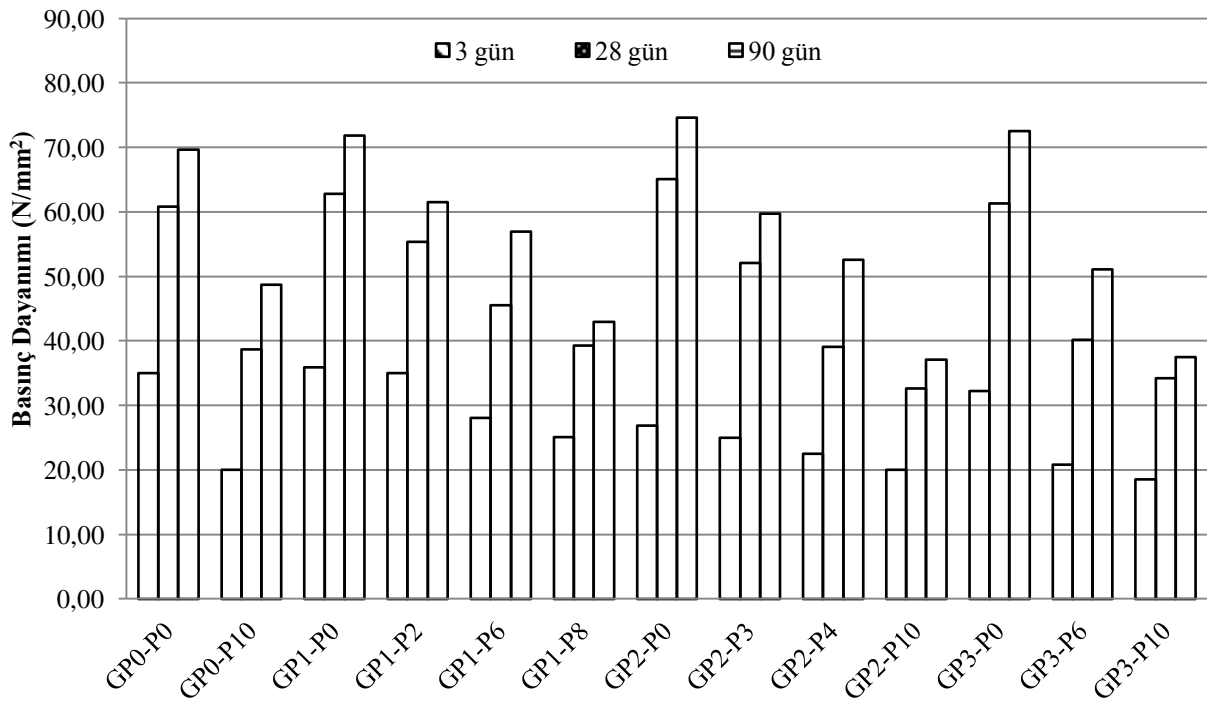
Nihai (90. gün) eğilmede çekme dayanımı esas alındığında, 3. gündeki dayanım gelişimi %43-70, 28. gündeki dayanım gelişimi ise %82-97 mertebelerindedir.

Topçu ve Işıkdag [62] geliştirilmiş perlitin hafif beton üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmalarında, geliştirilmiş perlit agregası dozağı %15 ile %30 mertebelerine çıktığında basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve dinamik elastisite modülü değerlerinin yükseldiğini tespit etmişlerdir.

Türkel ve Kadiroğlu [63] pomza agregalı taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında, pomza katkılı hafif agregalı betonların normal betonlara göre daha düşük eğilme dayanımlarına sahip oldukları ve daha tok bir sesle ve daha gevrek bir şekilde kırıldıkları gözlenmiştir. Ayrıca kırılma yüzeyleri incelendiğinde de, pomza agregaların kırılması sonucu hafif betonların normal betonlardan daha pürüzsüz bir yüzeye sahip olduğu görülmüştür. Hafif betonlarda, mekanik özellikleri normal agregalardan daha düşük olan pomza agregalarının etkilendiği yük ile kırılması, kireçtaşı

agregalı normal betonlarda ise kırılmanın bağlayıcı matrisinin içinden geçerek ve agregadan dolaşarak gerçekleşmesinden kaynaklanan bu durum nedeniyle, hafif betonların taşıyıcı amaçlarla kullanımında enerji yutabilme kapasitelerinin (tokluklarının) önemli bir unsur olduğu göz önünde bulundurulması gerektiği belirtilmiştir.

Şekil 5.9'daki KYH'lerin basınç dayanımı grafiği incelendiğinde, 3 günlük kür süresi sonunda en yüksek basınç dayanımı 35.96 MPa değeriyle GP1-P0 serisine, en düşük basınç dayanımı ise 18.54 MPa değeriyle GP3-P10 serisine aittir. 28. ve 90. günlerde, pomzanın kullanılmadığı ve %30'a kadar genleştirilmiş perlit katkı serilerinin basınç dayanımlarının hafif agreganın kullanılmayan seriye göre fazla olduğu görülmektedir. 28 ve 90 günlük kür periyotlarında en yüksek basınç dayanımları sırasıyla 65.09 ve 74.63 MPa değerleriyle GP2-P0 serisinde ve en düşük basınç dayanımları sırasıyla 32.60 ve 37.15 MPa değerleriyle GP2-P10 serisinde elde edilmiştir.



Şekil 5.9 KYH'lerin basınç dayanımları

Genleştirilmiş perlit ve pomzanın birlikte kullanıldığı bütün serilerin basınç dayanımları, hafif agreganın kullanılmayan seriye göre düşük çıkmıştır. Nihai (90. gün) basınç

dayanımı esas alındığında, 3. gündeki dayanım gelişimi %35~59, 28. gündeki dayanım gelişimi ise %74~92 mertebelerindedir.

Serilerin basınç dayanım değerleri arttıkça eğilme dayanımı/basınç dayanımı değerlerinin düştüğü görülmektedir. Basınç dayanımları arttıkça eğilme dayanımları da oransal olarak azalmıştır. Bu durum eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı arasındaki ilişkinin lineer olmadığını gösterir.

Normal agregalı betonlarda agreganın dayanımı harcın dayanımından daha yüksek olduğundan, beton üzerine gelen yükü harçlar agregalara iletmektedir. Ancak hafif agregalı betonlarda agregaların dayanımlarının harç dayanımından daha düşük olmasından dolayı bu durum tam tersinedir. Yani beton üzerine gelen yükü ileten agregalar, taşıyan ise harçtır. Dolayısıyla hafif agregalarla üretilen betonların dayanımları normal agregayla üretilen betonlardan daha düşük olmaktadır. Bir diğer faktör de agregaların yüzey yapılarıdır. Hafif agregaların gözenekli yapılarından dolayı agrega-çimento hamuru ara yüzünde iyi bir kenetlenmenin olması beklenir. Bu durum hafif agreganın gözenek yapısına göre değişerek dayanımı etkilemektedir[3].

Ün [64], harç numunelerinin eğilme sonrası basınç dayanımı ile doğrudan basınç dayanımlarını karşılaştırdığı çalışmada, 50 mm ayrıtlı örneklerin doğrudan basınç dayanımlarının 40×40×160 mm ayrıtlı prizmaların eğilme sonrası basınç dayanımlarından yaklaşık olarak 1.22 kat daha büyük olduğunu belirtmiştir. Bu durum küçük boyutlu örneklerin büyük boyutlu örneklere göre daha yüksek dayanımlara sahip olması durumuna ters düşmektedir. Karşılaştırılan örneklerde bu kaniya ters sonuçların çıkmasının nedeni eğilme deneyi sırasında örneklerde oluşabilecek mikro çatlakların eğilme sonrası basınç dayanımı sonuçlarının düşmesine sebep olmasındandır.

KYH numunelerinin etüv kurusu yoğunlukları ve 28 günlük basınç dayanımları Tablo 5.6’da verilmiştir.

Tablo 5.6 Etüv kurusu yoğunlukları ve 28 günlük basınç dayanımları

Karışım	Etüv Kuru Yoğunluk kg/m^3	Basınç Dayanımı 28 gün (MPa)
GP0-P0	2066	60,80
GP0-P10	1575	38,72
GP1-P0	2035	62,83
GP1-P2	1935	55,37
GP1-P6	1583	45,54
GP1-P8	1567	39,24
GP2-P0	2026	65,09
GP2-P3	1881	52,06
GP2-P4	1758	39,08
GP2-P10	1573	32,60
GP3-P0	1983	61,35
GP3-P6	1663	40,18
GP3-P10	1523	34,19

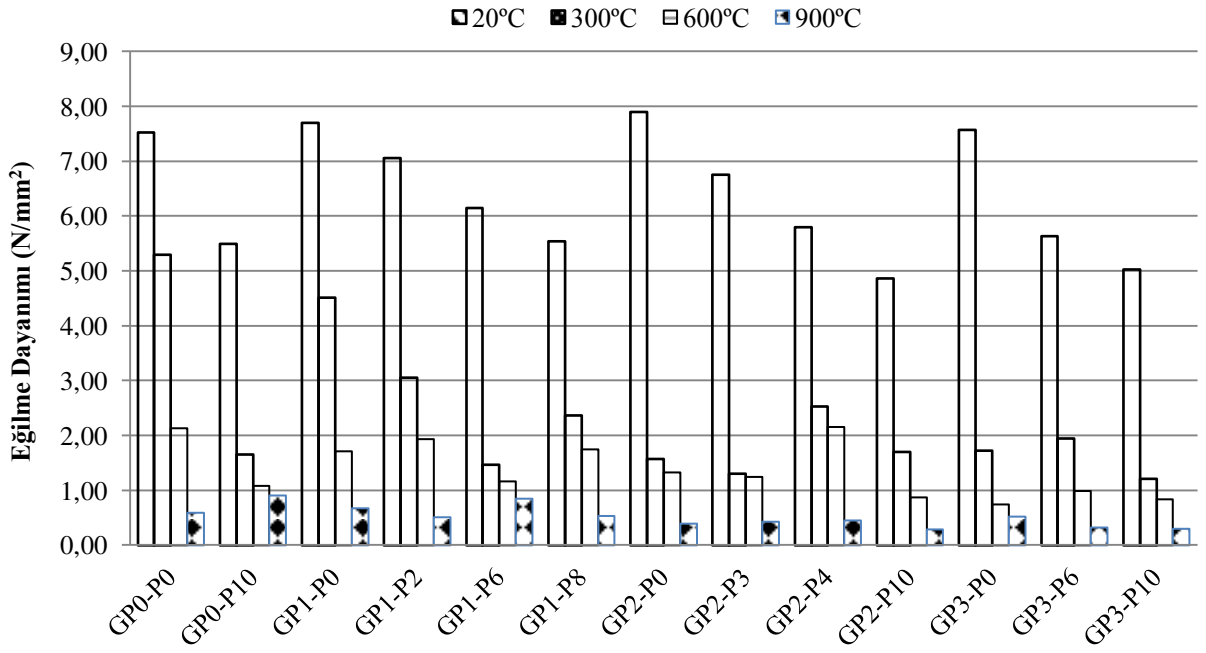
TS EN 206-1’e [28] göre yaklaşık olarak bütün numuneler hafif beton standardına uymaktadır. TS 2511 [27], taşıyıcı hafif betonu birim kütlesi 1900 kg/m^3 ‘den küçük ve 28 günlük basınç dayanımı da 16 MPa’dan büyük beton olarak tanımlamaktadır. Elde edilen bütün serilere ait etüv kurusu yoğunluk değerleri yaklaşık olarak 2000 kg/m^3 ve altı, 28 günlük en düşük dayanımın da 34.19 MPa olduğu göz önünde bulundurulursa üretilen bütün serilerin kendiliğinden yerleşen hafif harç (KYHH) olarak kabul edilebileceği ve taşıyıcı hafif harç sınıfına dahil edilebileceği söylenebilir.

5.2.3. Yüksek sıcaklık

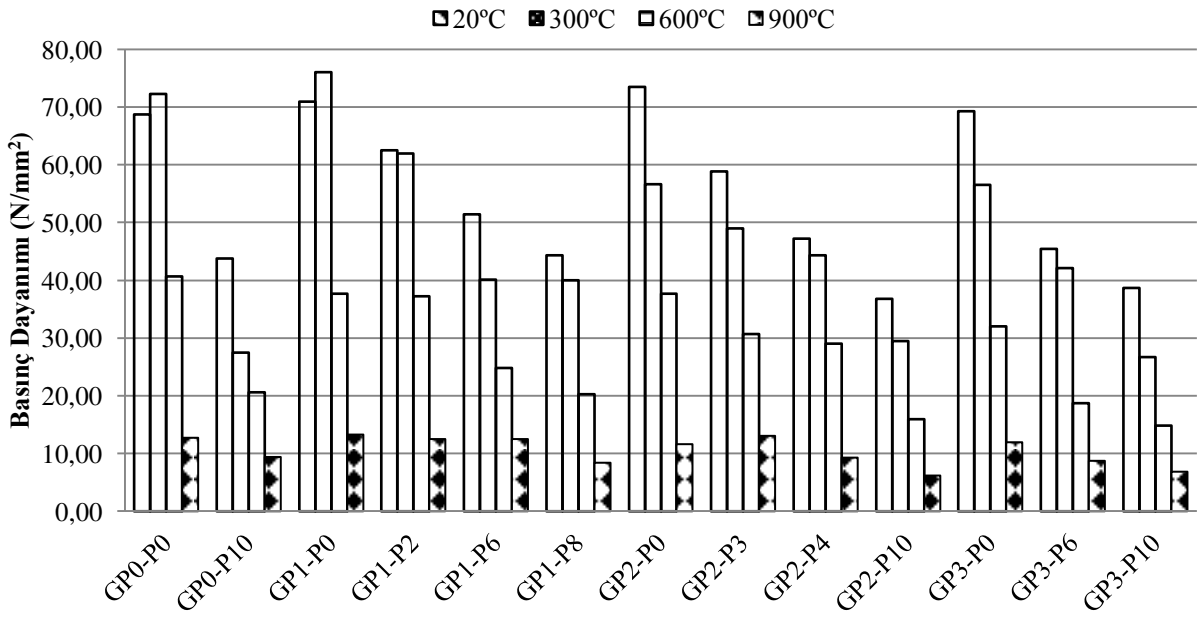
40×40×160 mm prizmatik 28 günlük KYHH numunelerinin 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra uygulanan üç noktalı eğilme ve basınç deneylerinden elde edilen eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri Tablo 5.7’de grafikleri ise Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de verilmiştir.

Tablo 5.7 Yüksek sıcaklık sonrası eğilme ve basınç dayanımları

Karışım	Eğilme(MPa)				Basınç(MPa)			
	20°C	300°C	600°C	900°C	20°C	300°C	600°C	900°C
GP0-P0	7,53	5,30	2,13	0,59	68,70	72,23	40,68	12,73
GP0-P10	5,49	1,66	1,09	0,91	43,76	27,49	20,63	9,41
GP1-P0	7,71	4,51	1,72	0,68	71,00	76,10	37,72	13,31
GP1-P2	7,06	3,05	1,93	0,51	62,57	61,98	37,21	12,51
GP1-P6	6,15	1,47	1,17	0,85	51,46	40,07	24,80	12,47
GP1-P8	5,54	2,37	1,75	0,54	44,34	39,99	20,24	8,36
GP2-P0	7,90	1,57	1,33	0,40	73,55	56,63	37,65	11,64
GP2-P3	6,76	1,30	1,25	0,43	58,83	48,95	30,68	13,06
GP2-P4	5,80	2,53	2,15	0,46	47,26	44,32	29,03	9,30
GP2-P10	4,87	1,71	0,88	0,29	36,83	29,53	15,91	6,14
GP3-P0	7,58	1,72	0,75	0,53	69,32	56,57	32,02	11,91
GP3-P6	5,64	1,95	0,99	0,33	45,40	42,13	18,70	8,79
GP3-P10	5,03	1,21	0,83	0,30	38,64	26,69	14,81	6,87



Şekil 5.10 Yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımları



Şekil 5.11 Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları

28 günlük, etüv kurusu ve oda sıcaklığındaki (20°C) KYHH numuneleri referans alınarak yapılan yüksek sıcaklık deneylerinden sonra bütün serilerde sıcaklığın artmasıyla beraber eğilme dayanımlarının düştüğü görülmektedir. 300°C sıcaklığa maruz kalmış hafif

agregalı numuneler, %100 dere agregası kullanılan numunelere göre eğilme dayanımında daha fazla kayba uğramıştır.

300°C sıcaklığa maruz kalmış numunelere uygulanan basınç deneyi sonucunda %10'a kadar genişletilmiş perlit kullanımı basınç dayanımını arttırdığı %10'dan sonra ise düşürdüğü gözlenmiştir. 300°C'de GP1-P0 serisi dışında bütün serilerde basınç dayanımları düşmüştür. 600°C ve 900°C'de ise bütün serilerde basınç dayanımları düşmüştür. 900°C'de hiçbir numune yeterli dayanımlara sahip değildir. Genel olarak bakıldığında sıcaklığın artmasıyla KYHH numunelerin dayanımları düşmektedir.

Çimento pastası yüksek sıcaklığa maruz kaldığında ilk olarak 100°C'de serbest su buharlaşır. Daha sonra 180°C'de kalsiyum silikat hidratlar(C-S-H) dehidratasyona başlar, 500°C'de kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ve 700°C'de kalsiyum silikat hidratler bozulmaya başlar ve ayrışma sürecine girerler. Neville [65] 430 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda silisli agregalarla üretilen betonların hafif agregalarla üretilen betonlara göre daha fazla basınç dayanımı kaybına uğradığını, 600 °C'de dayanımının yaklaşık %50'sini, 800 °C'de ise yaklaşık %80'nini kaybettiğini belirtmiştir.

Khoury [66] elastik gerilme analizi sonucu betonun 100°C civarında bozulacağını fakat bununla beraber 300°C'ye kadar dayanımda artış olabileceğini belirtmiştir. 300°C'de betonun dayanımında meydana gelen artış, bu sıcaklıkta betonun sıcak kür etkisi görmesi ve hidrate yapının bozulmamasından kaynaklanmaktadır. Genelde 450°C ve daha yüksek sıcaklıklar beton dayanımının önemli bir kısmının kaybedildiği değerler olarak göz önüne alınmaktadır. Bu dayanım kaybına 300~500°C arasında harç-agrega bağlarının zayıflayıp ara yüzey çatlaklarının oluşmasının, 300°C'den sonra kristal suyunun kaybedilmesinin ve 400°C civarında $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin CaO 'e dönüşerek hacimce %30 büzülmesinin sebep olduğu düşünülebilir.

Gül ve Bingöl [67] hafif agregalı betonların yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanımlarını inceledikleri çalışmalarında, 3 ve 5 saat süreyle yüksek sıcaklığa maruz bırakılan beton numunelerin basınç dayanımlarının, 1 saat yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımından farklı olmadıklarını belirtmişlerdir. Yüksek sıcaklık deneylerinde, dayanım değişikliğinde deney sürelerinden çok ulaşılan sıcaklık derecesi daha etkilidir.

Yüksek sıcaklık uygulamalarında betonun en zayıf noktasının kalsiyum hidroksit problemi olduğu anlaşılmıştır. Bu olay sıradan uygulamalarda portland çimentosunun, ateşe dayanıklılık gerektiren uygulamalarda da alüminli çimentonun kullanılmasına öncü

olmuştur. Çünkü beton için problem teşkil eden kalsiyum hidroksit alüminli çimentolarda hidratasyonun bir ürünü değildir [67].

Beton bileşenlerinin ısı genleşme katsayıları birbirinden farklıdır. Böylelikle sıcaklık değişimleri beton içerisindeki bileşenlerde farklı hacim değişikliklerine (termal uyuşmazlık) sebep olmaktadır.

Betonun yangın dayanımı yalnızca beton bileşenlerinin ısı genleşme farklılıklarından değil aynı zamanda içerdiği nem miktarı ve porozitesine bağlı olduğu belirtilmektedir [68].

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada hafif agrega olarak geliştirilmiş perlit ve Bitlis yöresi pomzası kullanılarak üretilen KYHH numunelerinin işlenebilirlik ve kıvamını tayin etmek için mini çökme yayılma deneyi, mini v hunisi deneyi ve viskozimetre deneyi; mekanik özellikleri belirlemek için eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca tüm serilere ait numunelerin porozite ve toplam su emme değerleri hesaplanmıştır. Tüm numuneler üzerinde dayanıklılık deneylerinden kılcal su emme deneyi gerçekleştirilerek kılcal su emme katsayısı hesaplanmış ve yüksek sıcaklık deneyi gerçekleştirilmiştir. Yapılan bütün bu deney sonuçlarına göre aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Tüm serilerin bağıl çökme yayılma ve bağıl V hunisi değerleri EFNARC'ın önerdiği aralıkta kalmıştır, viskozite değerleri de birbirlerine yakın çıkmıştır.
- Elde edilen bütün serilere ait etüv kurusu yoğunluk değerleri yaklaşık olarak 2000 kg/m³ ve altı, 28 günlük en düşük dayanımın da 34.19 MPa olduğu göz önünde bulundurulursa üretilen bütün serilerin kendiliğinden yerleşen hafif harç (KYHH) olarak kabul edilebileceği ve taşıyıcı hafif harç sınıfına dahil edilebileceği söylenebilir.
- KYHH serilerinde kılcal su emme katsayıları, agreganın gözenek yapısına ve harcın içerisindeki kılcal boşluklara göre değişim göstermiştir. Hafif agrega kullanılan serilerde kılcal su emme katsayısı dere agregalı karışıma göre yüksek çıkmıştır. En fazla kılcal su emme katsayısı geliştirilmiş perlit ve pomzanın maksimum oranda kullanıldığı GP3-P10 serisinde, en düşük kılcal su emme katsayısı ise içerisinde hafif agrega bulunmayan dere agregalı GP0-P0 serisinde elde edilmiştir.
- Geliştirilmiş perlit ve pomza kullanılan bütün numunelerin porozite ve toplam su emme oranları, hafif agrega kullanılmayan numuneye göre daha fazladır. Dolayısıyla geliştirilmiş perlit ve pomza kullanımı harçların su emme oranını arttırmaktadır.
- KYHH numunelerinin basınç ve eğilmede çekme dayanımları agrega özelliklerine göre değişmiştir. Genel olarak birim ağırlık düştükçe ve porozite arttıkça eğilmede çekme dayanımı düşmektedir. Ancak tüm kür sürelerinde, %10 geliştirilmiş perlit ikameli GP1-P0 ve %20 geliştirilmiş perlit ikameli GP2-P0 serileri, hafif agrega

kullanılmayan GP0-P0 serisine göre daha fazla eğilmede çekme dayanımına ulaşmışlardır.

- KYHH'lerin basınç dayanımları incelendiğinde, pomzanın kullanılmadığı ve %30'a kadar genleştirilmiş perlit katkılı serilerin basınç dayanımlarının hafif agrega kullanılmayan seriye göre fazla olduğu görülmektedir. 28. ve 90. günlerde en yüksek basınç dayanımı sırasıyla 65.09 ve 74.63 MPa değerleriyle GP2-P0 serisinde ve en düşük basınç dayanımı sırasıyla 32.60 ve GP2-P10 serisinde elde edilmiştir.
- Etüv kurusu ve oda sıcaklığındaki (20°C) KYHH numuneleri referans alınarak yapılan yüksek sıcaklık deneylerinden sonra bütün serilerde sıcaklığın artmasıyla beraber eğilme dayanımlarının düştüğü görülmektedir. 300°C sıcaklığa maruz kalmış hafif agregalı numuneler, %100 dere agregası kullanılan numunelere göre eğilme dayanımında daha fazla kayba uğramıştır.
- 300°C sıcaklığa maruz kalmış numunelere uygulanan basınç deneyi sonucunda %10'a kadar genleştirilmiş perlit kullanımı basınç dayanımını arttırdığı %10'dan sonra ise düşürdüğü gözlenmiştir. 300°C'de GP0-P0 ve GP1-P0 serileri dışında bütün serilerde basınç dayanımları düşmüştür. 600°C ve 900°C'de ise bütün serilerde basınç dayanımları düşmüştür. 900°C'de hiçbir numune yeterli dayanıma sahip değildir. Hafif agregalar ile üretilen seriler 600°C'de basınç dayanımlarının ortalama yaklaşık %50'sini, 900°C'de ise ortalama yaklaşık %80'ini kaybetmiştir. Genel olarak bakıldığında sıcaklığın artmasıyla KYHH numunelerin dayanımları düşmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Bonavetti V., Donza H., Menendez G., Cabrera O., Irassar E.F.**, 2003. Limestone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energ, Cement and Concrete Research, **33**, 865-871.
- [2] **Bosiljkov V. B.**, 2003. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler, Cement and Concrete Research, **33**, 1279-1286.
- [3] **Uygunoğlu, T.**, 2008. Hafif agregalı kendiliğinden yerleşen betonların özellikleri, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [4] **Hızal, S.**, 2010. Kendiliğinden yerleşen taşıyıcı hafif betonun tasarımı ve durabilite özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [5] **Jin, J., Domone, P.L.**, 2002. Relationships between the fresh properties of SCC and its mortar component, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete.
- [6] **Sağlam, A.F. ve Özkul, M.H.**, 2006. Kendiliğinden yerleşen betonların reolojik özelliklerine bileşim parametrelerinin etkisi, İTÜ Dergisi, **5**, 239-25.
- [7] <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf> EFNARC 2005, European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification and Production and Use. 20 Mart 2013.
- [8] **Okamura, H. and Ouchi, M.**, 1999. Self Compacting Concrete Development, Present Use and Future, Proceedings of the First International RILEM Symposium, Stockholm, Sweden, 3-14.
- [9] **Okamura, H., Ouchi, M.**, 2003. Self-compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, **1**, 5-15.

- [10] **PCI, TR-6-03**, 2003. Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete in Precast/Prestressed Concrete Institute Member Plants, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, Illinois.
- [11] **Karataş, M.**, 2007. Mineral katkı dozajının ve türünün kendiliğinden sıkışan betondaki donatı aderansına etkisi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [12] **Khayat, K.H.**, Daczko, J.A., 2002. The Holistic Approach to Self-Consolidating Concrete, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, 3-8.
- [13] **Gönen, T.**, 2009. Kendiliğinden Yerleşen Taşıyıcı Hafif Betonun Mekaniksel ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [14] <http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.PDF> EFNARC 2002, European Guidelines for Self-Compacting Concrete. 20 Mart 2013.
- [15] **Yazıcı, H.**, 2004. Termik Santral Atığı Yapay Alçı-Uçucu Kül-Taban Külü Esaslı Yapı Malzemesi Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [16] **Erdoğan, T.Y.**, 1993. Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı-Uçucu kül ve Yüksek Fırın curufu, Endüstri Atıkların İnşaat Sektöründe Kul. Semp., Ankara, **1-8**, 18-19.
- [17] **Erdoğan, T.Y.**, 2010. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara.
- [18] **ASTM C 618**, 2004. Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a mineral admixture in Portland Cement Concrete, ASTM.

- [19] **Koca, C.**, 1996. Yüksek Performanslı Beton Üretiminde Mikrosilis, Cüruf, Klinker Karışımı Çimento Kullanımı. 4. Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, s.381- 94.
- [20] **Beycioğlu, A.**, Doğan, D., Çakır, C., Subaşı S., Başyigit, C., 2010, Silis Dumanının Beton Teknolojisinde Kullanımı, Ulusal Meslek Yüksekokulları Öğrenci Sempozyumu, Düzce.
- [21] **TS EN 934**, 2002, Kimyasal Katkılar - Beton Harç ve Şerbet İçin - Bölüm 2: Beton Katkıları - Tarifler Özellikler Uygunluk İşaretleme ve Etiketleme, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [22] **Uyan, M. Pekmezci, B.Y. ve Yıldırım, H.**, 2003. Akışkanlaştırıcı Katkı Kür ve Koşullarının Betonun Geçirimsizlik Özellikleri Üzerine Etkileri, Sika Teknik Bülten, **1**, 10–14.
- [23] **Topçu, İ.B.**, 2006. Beton Teknolojisi. Uğur Ofset, Eskişehir.
- [24] **Yeğinoğlu, A.**, 2002. Structural lightweight Concretes Produced with Natural Lightweight Aggregates in Turkey, International Congress of the Precast Concrete Industry, BIBM, İstanbul, Turkey, 1-4 May.
- [25] **Chandra, S., & Berntsson L.**, 2002. Lightweight Aggregate Concrete, Noyes Publications, New York, USA.
- [26] **ESCSI**, 1971. Lightweight Concrete (History, Application, Economics), Washington D.C..
- [27] **TS 2511**, 1977. Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [28] **TS EN 206-1**, 2002. Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- [29] **Clarke, J. L.**, 1993. Structural Lightweight Aggregate Concrete, Blackie Academic & Professional, London, England.
- [30] **TS 1114 EN 13055-1**, 2004. Hafif agregalar - Bölüm 1: Beton, Harç ve Şerbette Kullanım İçin, TSE, Ankara.
- [31] **ACI Committee 213R-03**, 2003. Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete, American Concrete Institute, ACI.
- [32] **Davraz, M., Gündüz, L.**, 1997. Isparta Yöresi Pomza Taşının Hafif Yapı Elemanı Olarak Değerlendirilmesi Üzerine Bir Analiz. I. Isparta Pomza Sempozyumu. 61-70, Isparta.
- [33] **Mindess, S., Young, J. F.**, 1987. Concrete, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- [34] **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.
- [35] **TS 3234**, 1978. Bimsbeton Yapım Kuralları Karışım Hesabı ve Deney Metotları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [36] **Gündüz, L., Saruşık, A., Tozaçan, B., Davraz, M., Uğur, İ., Çankıran, O.**, 1998. Pomza Teknolojisi Cilt II, Isparta.
- [37] **Massozza, F.**, 1989. Puzolanlar, Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları Semineri, TÇMB, Ankara.
- [38] **Davraz, M., Gündüz, L.**, 1997. Isparta Yöresi Pomza Taşının Hafif Yapı Elemanı Olarak Değerlendirilmesi Üzerine Bir Analiz. I. Isparta Pomza Sempozyumu. 61-70, Isparta.

- [39] **Yazıcıoğlu, S., Arıcı, E., Gönen, T.,** 2003. Pomza Taşının Kullanım Alanları ve Ekonomiye Etkisi, F.Ü. DAUM Dergisi , 118-123.
- [40] **Founie, A.,** 2005. Pumice and Pumicite, U.S. Geology Survey, Mineral Commodity Summaries, USA.
- [41] **Azizi, S.,** 2007, Perlit Katkılı Hafif Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı Yalıtımı, Yüksek İlsans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [42] **Gökçe, H., S., Şimşek O., Durmuş, G., Demir, İ.,** 2010. Ham Perlit Agregalı Hafif Beton Özelliklerine Alternatif Genleştirilmiş Perlit Kullanımının Etkisi, Politeknik Dergisi, **13/ 2**, 159-163.
- [43] **ACI Committee 213R-87,** 1987. Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete, American Concrete Institute, ACI.
- [44] **Taşdemir, M. A.,** 1982. Taşıyıcı Hafif Agregalı Betonların Elastik ve Elastik Olmayan Davranışları, Doktora Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [45] **Uzbaşı, B.,** 2008. Çimento Esaslı Malzemelerin Tek Eksenli Yük Altındaki Davranışının Mezo Düzey Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [46] **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.
- [47] **Urhan, S.,** 1994. Hafif ve Çok Hafif Betonların Karakteristik Özellikleri ve Teknik Kapasiteleri, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi, 370, Ankara.
- [48] **Topçu, İ.B., & Uygunoğlu, T.,** 2007. Properties Of Autoclaved Lightweight Aggregate Concrete. Building and Environment, **42**, 4108-4116.

- [49] **Neville, A. M.**, 1996. Properties of Concrete, John Wiley&Sons Inc, New York.
- [50] **Kadiroğlu, İ.**, 2004. Kendiliğinden Yerleşen Normal Dayanımlı Hafif Beton Üzerine Deneysel Bir Çalışma, Beton 2004 Kongresi Bildirileri, İstanbul.
- [51] <http://tur.sika.com/tr> Sika®ViscoCrete®Hi-Tech 36, Yüksek Performanslı Hiper Akışkanlaştırıcı Beton Katkısı, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. Teknik Bilgi Föyü.
- [52] **TS EN 1008**, 2003. Beton Karma Suyu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [53] **TS EN 196-1**, 2002, Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [54] **TS EN 12390-7**, 2010. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [55] **TS EN 1363-1**, 2001. Yangına Dayanıklılık Deneyleri - Bölüm 1:Genel Kurallar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [56] **TS EN 1363-2**, 2002. Yangına Dayanıklılık Deneyleri - Bölüm 2: Alternatif ve İlave İşler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [57] **Koehler, E., P., & Fowler D.,W.**, 2007. Aggregates In Self-Consolidating Concrete, 353s.
- [58] **Akarsu, M.**, 2009. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Taze Haldeki Özellikleri ve Sülfat Direnci Üzerine İri Agrega Çeşidi ve Çimento Tipinin Etkisi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [59] **Uyan, M.**, 1975. Beton ve harclarda kılcallık olayı, İ.T.U. İnşaat Fakültesi Doktora Tezi, İstanbul.

- [60] **Gündüz, L.**, 2001. Hafif Agrega Olarak Genleşmiş Kil Ve Pomza Taşının Teknik Özelliklerinin Karşılaştırılması, 10. Ulusal Kil Sempozyumu, Konya.
- [61] **Uygunoğlu T., Topçu İ.B.**, 2010. Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC), Construction and Building Materials.
- [62] **Topçu, İ., B., Işıkdag, B.**, 2007. Effect of Expanded Perlite Aggregate on the Properties of Lightweight Concrete, Journal of Materials Processing Technology.
- [63] **Türkel, S., Kadiroğlu, B.**, 2007. Pomza Agregalı Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, **13/3**, 353-359.
- [64] **Ün, H.**, 2005. Değişik Tip Çimentolarla Hazırlanan Harçların Eğilme Sonrası Basınç Dayanımı İle Doğrudan Basınç Dayanımlarının Karşılaştırılması, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, **7/1**, 97-109.
- [65] **Neville A. M.**, 1995,.Properties of concrete, 4th ed. Longman.
- [66] **Khoury, G.A.**, 1992. Compressive Strength of Concrete at High Temperatures, Magazine of Concrete Research.
- [67] **Gül, R., Bingöl, A.F.**, 2002. Betonun Yangın Dayanımına Genel Bir Bakış, DSİ Teknik Bülteni, **99**, 3-8.
- [68] **Bingöl, A.F., Gül, R.**, 2004. Compressive Strength of Lightweight Aggregate Concrete Exposed to High Temperatures, Indian Journal of Engineering & Materials Science, **11**, 68-72.

ÖZGEÇMİŞ

Bilal BALUN, 1984 yılında Bingöl’de doğdu. İlköğretimini Bingöl Sabancı İlkokulu’nda, ortaöğretimini Bingöl Anadolu Lisesinde okul birincisi olarak tamamladı. 2002 yılında başladığı Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümünü 2004 yılında bıraktı. Aynı yıl güz döneminde Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne başladı ve 2008 yılında 75,73/100 not ortalamasıyla lisans eğitimini tamamladı. 2008 yılında Libya’da, 2009 yılında Birleşik Arap Emirlikleri’nde ve 2010 yılında İran’da inşaat mühendisliği alanında görev yaptı. 2010 güz döneminde Bingöl Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalına araştırma görevlisi olarak atandı. 2011 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.