



**KÖPÜK BETON ÜRETİMİNDE FARKLI MİNERAL
KATKILARIN FİZİKSEL VE MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatma KOCAKERİMOĞLU

Danışman

Prof. Dr. İsmail DEMİR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Aralık, 2020

Bu tez çalışması 19.FEN.BİL.25 numaralı “Köpük Beton Üretiminde Rötreden Kaynaklanan Hasarların Önlenmesi” başlıklı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi BAP Komisyonu tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KÖPÜK BETON ÜRETİMİNDE FARKLI MİNERAL KATKILARIN
FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Fatma KOCAKERİMOĞLU

Danışman

Prof. Dr. İsmail DEMİR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Aralık, 2020

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.



18/12/2020

Fatma KOCAKERİMOĞLU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KÖPÜK BETON ÜRETİMİNDE FARKLI MİNERAL KATKILARIN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Fatma KOCAKERİMOĞLU

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İsmail DEMİR

Fiziksel, mekanik ve termal özellikleri nedeniyle köpük beton günümüzde inşaat sektöründe giderek artan bir ilgiye sahip olmuştur. Bu alandaki teknolojik gelişmeler köpük beton üretimine ve yaygınlaşmasına önemli katkı sağlamıştır. Normal beton 2300 kg/m³ birim hacim ağırlığı ile yapılar üzerinde önemli ölü yükler meydana getirir. Köpük beton 300- 1800 kg/m³ aralığında üretilabilmektedir. Köpük beton gazbeton ürünlerin benzeri olup köpük katkısı ile gözenek oluşturulur. Köpük beton diğer yapı malzemelerine göre daha ekonomik olup kolay ve hızlı üretim gibi avantajlara sahiptir. Köpük beton düşük basınç dayanımına karşı ısı ve ses yalıtımı performansı yüksektir. Günümüzde çevreye duyarlı ve sürdürülebilir yapılar inşa etmek ana hedeflerden biridir. Köpük beton üretiminde atık mineral katkıları kullanılarak çevreci ve sürdürülebilir malzeme üretimine imkan sağlamaktadır.

Bu çalışmada köpük beton üretiminde CEM I 42,5 Portland Çimentosu kullanılmıştır. Çalışmada sentetik esaslı köpük ajanı kullanılmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlar elde etmek amacı ile mineral katkıları olarak doğal kum, uçucu kül ve genleştirilmiş perlit kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan hammaddelerin karakterizasyonu yapılarak belirlenmiştir. Karışım suyunu azaltmak ve akışkanlığı artırmak amacı ile polikarboksilik esaslı akışkanlaştırıcı/priz hızlandırıcı katkı kullanılmıştır. Alkali

aktivatör olarak NaOH ve priz süresini kısaltarak hidrasyonu hızlandırmak amacı ile CaCl_2 belli oranlarda karışıma ilave edilmiştir. Oluşabilecek rötre çatlaklarını engellemek amacı ile polipropilen lif kullanılmıştır. Köpük beton örneklerin üretiminde ön köpük yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde önce istenen yoğunlukta köpük üretilerek, akıcı kıvamda hazırlanan harca ilave dilmektedir.

Köpük beton örnekler $460\text{-}630 \text{ kg/m}^3$ arasında üretilmiştir. Örnekler 60°C sıcaklıkta atmosferik buhar kürü uygulanarak mukavemet kazanmaları sağlanmıştır. Köpük beton örnekler üzerinde fiziksel, mekanik testler ve mikro yapı analizleri yürütülerek incelenmiştir. Genleşmiş perlit katkılı köpük beton örneklerde diğer karışımlara göre daha düşük ısı iletim değerleri elde edilmiştir. Doğal kum kullanılan örneklerle göre uçucu kül katkılı örneklerin mekanik özellikleri daha yüksek performans göstermiştir.

2020, xiii + 87 sayfa

Anahtar Kelimeler: Köpük beton, uçucu kül, genleşmiş perlit, kum, elyaf, beton katkıları.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT MINERAL ADMIXTURES ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES IN FOAM CONCRETE PRODUCTION

Fatma KOCAKERİMOĞLU

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. İsmail DEMİR

Due to its physical, mechanical and thermal properties, foam concrete has become increasingly interested in the construction industry today. Technological developments in this field have contributed significantly to the production and spread of foam concrete. Normal concrete has a unit volume weight of 2300 kg/m^3 and creates significant dead loads on structures. Foam concrete can be produced in the range of $300\text{-}1800 \text{ kg/m}^3$. Foam concrete is similar to aerated concrete products and pore is formed with the foam additive. Foam concrete is more economical than other building materials and has advantages such as easy and fast production. Foam concrete has high thermal and sound insulation performance against low pressure resistance. Today, building environmentally friendly and sustainable buildings is one of the main goals. It enables the production of environmentally friendly and sustainable materials by using waste mineral additives in foam concrete production.

In this study, CEM I 42,5 Portland cement was used in the production of foam concrete. Synthetic based foaming agent was used in the study. Natural sand, fly ash and expanded perlite were used as mineral additives to obtain comparative results. The raw materials used in the study were characterised of determined by performing. Polycarboxylic based super plasticizer/set accelerator additive has been used to reduce

the mixing water and increase fluidity. NaOH was used as an alkaline activator, CaCl_2 was added to the mixture in certain proportions in order to accelerate hydration by shortening the setting time. Polypropylene fibre was used to prevent shrinkage cracks that may occur. The pre-foam method was used in the production of foam concrete samples. In this method, foam of the desired density is produced first and added to the mortar prepared in a fluid consistency.

Foam concrete samples were produced between 460-630 kg/m^3 . The samples gained strength by applying atmospheric steam cure at 60 $^{\circ}\text{C}$. Physical and mechanical tests and microstructure analyses were carried out on foam concrete samples and examined. Lower heat conduction values were obtained in foam concrete samples with expanded perlite compared to other mixtures. Mechanical properties of fly ash added samples showed higher performance than natural sand samples.

2020, xiii + 87 pages

Keywords: Foam concrete, fly ash, expanded perlite, sand, fiber, concrete additives, concrete admixtures

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İsmail DEMİR, Projeyi destekleyen Üniversitemiz BAP Komisyonuna (Proje Numarası: 19. FEN. BİL. 25), araştırma ve deneysel çalışma süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Mustafa Serhat BAŞPINAR' a, Sayın Arş. Grv. Erhan KAHRAMAN' a, Bülent YEŞİLAY' a, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme ve nişanlım Tayfun OKUMUŞ' a teşekkür ederim.

Fatma KOCAKERİMOĞLU

Afyonkarahisar 2020

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
RESİMLER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Beton.....	3
2.1.1 Betonun Temel Mikro Yapısı.....	4
2.2.1.1 Hidrate Olmuş Çimento Hamuru	4
2.2.1.2 Agregalar	7
2.2.1.3 Çimento Hamuru-Agrega Ara Yüzeyi	8
2.2 Hafif Beton	9
2.2.1 Hafif Betonun Tarihçesi	10
2.2.2 Hafif Betonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	10
2.2.2.1 Hafif Betonun Dayanım Özellikleri	10
2.2.2.2 Hafif Betonların Elastisite Modülleri	12
2.2.2.3 Hafif Betonun Yoğunluk Özelliği	12
2.2.2.4 Hafif Betonun Termik Özellikleri	13
2.2.2.5 Hafif Betonların Su Emme Özellikleri	14
2.2.2.6 Hafif Betonların Yüksek Sıcaklık Dayanımı.....	15
2.2.2.7 Hafif Betonlarda Aşınma Direnci.....	15
2.2.2.8 Hafif Betonlarda İşlenebilirlik.....	16
2.2.3 Hafif Betonun Sınıflandırılması.....	16
2.2.3.1 Üretim Yöntemine Göre Hafif Betonun Sınıflandırılması	16
2.2.3.2 Basınç Dayanımına Göre Hafif Betonun Sınıflandırılması.....	16
2.2.3.3 Birim Hacim Ağırlığına Göre Hafif Betonun Sınıflandırılması.....	17

2.2.4 Hafif Betonun Kullanım Alanları	18
2.2.5 Hafif Betonun Avantajları ve Dezavantajları.....	19
2.3 Köpük Beton	20
2.3.1 Köpük Betonun Tarihçesi	21
2.3.2 Köpük Betonun Özellikleri	21
2.3.2.1 Fiziksel Özellikleri	21
2.3.2.2 Mekanik Özellikleri.....	23
2.3.2.3 Fonksiyonel Özellikleri	24
2.3.3 Köpük Betonun Üretimi.....	25
2.3.3.1 Ön köpüklendirme Yöntemi ile Köpük Beton Üretimi	25
2.3.3.2 Karışık Köpüklendirme ile Köpük Beton Üretimi	26
2.3.4 Köpük Betonun Avantajları ve Dezavantajları	26
2.3.5 Köpük Betonun Kullanım Alanları	27
2.4 Rötire.....	28
2.4.1 Rötire Çeşitleri	28
2.4.1.1 Plastik Rötire	28
2.4.1.2 Kuruma Rötresi	30
2.4.1.3 Termik Rötire	31
2.4.1.4 Karbonatlaşma Rötresi	31
2.4.1.5 Hidratasyon Rötresi	32
2.4.1.6 Negatif Rötire	32
2.4.2 Betonda Rötire Oluşumunu Etkileyen Faktörler.....	32
2.4.2.1 Su/Çimento Oranı	32
2.4.2.2 Çimento Özellikleri ve Miktarı	33
2.4.2.3 Agrega Özellikleri ve Miktarı	33
2.4.2.4 Mineral ve Kimyasal Katkı Özellikleri	33
2.4.2.5 Kür.....	33
2.4.2.6 Çevre Şartları.....	34
2.4.2.7 Harç Döküm Boyutları ve Yüzey Alanı Büyüklüğü	34
2.5 Önceki Çalışmalar	34
3. MATERYAL ve METOT	40
3.1. Malzeme Bileşenleri	40

3.1.1 Çimento	40
3.1.2. Kum.....	41
3.1.3. Uçucu Kül	42
3.1.4 Kimyasal Katkılar	43
3.1.4.1 Süper Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı	44
3.1.5 Su	44
3.1.6 Polipropilen Lif	45
3.1.7 NaOH	45
3.1.8 Kalsiyum Klorür (CaCl ₂).....	46
3.1.9 Genleştirilmiş Perlit	47
3.1.10 Köpük Ajanı	47
3.2 Metot.....	48
3.2.1 Ön Deneme Döküm Serilerin Karışım Oranları.....	50
3.2.2 Uçucu Kül Katkılı Serilerin Karışım Oranları	52
3.2.3 İnce Kum Katkılı Serilerin Karışım Oranları	52
3.2.4 Genleştirilmiş Perlit Katkılı Serilerin Karışım Oranları.....	53
3.3 Beton Üzerinde Yürütülen Testler ve Analizler	53
3.3.1 Marsh Konisi – Akışkanlık Deneyi.....	53
3.3.2 Birim Ağırlık Deneyi	54
3.3.3 Köpük Beton Isı İletkenlik Değerlerinin Belirlenmesi	55
3.3.4 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi	56
3.3.5 Basınç Mukavemeti Deneyleri.....	58
3.3.6 Mikroyapı İncelemeleri	59
4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....	60
4.1 Süper Akışkanlaştırıcı Etkisi ve Marsh Konisi Sonuçları	60
4.2 Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları	61
4.3 Köpük Beton Isı İletkenlik Değerlerinin Belirlenmesi Sonuçları.....	63
4.4 Uçucu Kül Katkılı Serilerin Birim Hacim Ağırlık ile Basınç Dayanımı Sonuçları.....	64
4.5 İnce Kum Katkılı Serilerin Birim Hacim Ağırlık ile Basınç Dayanımı Sonuçları.	65

4.6 Genleştirilmiş Perlit Katkılı Serilerin Birim Hacim Ağırlık ile Basınç Dayanımı	
Sonuçları.....	67
4.7 Mikro Yapı İnceleme Sonuçları.....	68
4.7.1 XRD Analizi Sonuçları	68
4.7.2 Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) İncelemeleri	71
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	75
6. KAYNAKLAR.....	78
ÖZGEÇMİŞ.....	87



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al_2O_3	Alüminyum oksit
B	Boraks
Fe_2O_3	Demir oksit
C_2S	Dikalsiyum silikat
H_2O_2	Hidrojen peroksit
λ	Isı iletim katsayısı
CaOH_2	Kalsiyum hidroksit
CaCO_3	Kalsiyum karbonat
CaCL_2	Kalsiyum klorür
CaO	Kalsiyum oksit
CS	Kalsiyum stearat
MgO	Magnezyum oksit
MnO_2	Manganez dioksit
MPa	Megapaskal
μm	Mikrometre
©	Özgöl ısı
Pa	Paskal
K_2O	Potasyum oksit
SiO_2	Silisyum dioksit
NaOH	Sodyum hidroksit
Na_2O	Sodyum oksit
α	Termik genleşme katsayısı
C_4AF	Tetrakalsiyum aluminoferrit
C_3A	Trikalsiyum aluminat
C_3S	Trikalsiyum silikat

Kısaltmalar

ASTM	American Society Testing for Materials
CSH	Kalsiyum silika hidrat
HMF	Heat flow meter
PPL	Polipropilen lif
SA	Süper akışkanlaştırıcı
SB	Süper akışkanlaştırıcı
SEM	Taramalı elektron mikroskop
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
UK	Uçucu kül
XRD	X ışını difraktogramı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Hidrate çimento hamuru, Su/Ç:0,55, A:CH, B:C-S-H ve C: etrenjit çubukları	6
Şekil 2.2 Hidratasyonu tamamlanmamış çimento tanesi (C) hidratasyon kenarını gösterir	6
Şekil 2.3 Düzeltilmiş Portland çimentosu hidratasyon şeması	7
Şekil 2.4 Hafif ve normal agregalı betonda çatlak oluşumu	11
Şekil 2.5 Hafif ve normal agregalı betonda gerilme dayanımları gösterimi	11
Şekil 2.6 Agregat, çimento hamuru, beton şekil değiştirme deformasyon grafiği	12
Şekil 2.7 Önceden oluşturulmuş köpük beton yönteminde köpük üretimi	26
Şekil 2.8 Kuruma ve ıslanma durumunda betonun davranışı.....	30
Şekil 3.1 İnce kuma ait tane boyutu analiz grafiği	41
Şekil 3.2 Köpük beton üretimi şeması	49
Şekil 3.3 Ön deneme serilerinin taze harç ağırlığı- akma süresi grafiği	51
Şekil 3.4 Ön deneme serilerinin birim hacim ağırlığı- basınç dayanımı grafiği	52
Şekil 3.5 Şematik Mars Konisi.....	54
Şekil 3.6 Ultrases cihazı çalışma mekanizması.....	57
Şekil 3.7 Beton numuneye basınç yükü uygulaması.....	58
Şekil 4.1 Köpük beton serilerinin taze harç ağırlığı- akma süresi grafiği	61
Şekil 4.2 Ön döküm serilerin birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı grafiği.....	61
Şekil 4.3 Uçucu kül ilaveli serilerin birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı grafiği	62
Şekil 4.4 Kum ilaveli serilerde birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı grafiği	62
Şekil 4.5 Genleştirilmiş perlit ilaveli serilerin birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı grafiği	63
Şekil 4.6 Uçucu kül katkılı serilerin birim hacim ağırlık basınç dayanımı grafiği	65
Şekil 4.7 İnce kum katkılı serilerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı grafiği	66
Şekil 4.8 Genleştirilmiş perlit katkılı serilerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı grafiği	67
Şekil 4.9 XRD analizi uygulanan seriler	71
Şekil 4.10 U2 numaralı serinin XRD analizleri	73
Şekil 4.11 D3 numaralı serinin XRD analizler	74

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Hafif betonda ısı iletim katsayı değerleri	13
Çizelge 2.2 Hafif betonların basınç dayanımlarına göre gruplandırılması	17
Çizelge 2.3 Hafif betonların yoğunluklarına göre gruplandırılması	17
Çizelge 2.4 Hafif betonun sınıflandırılması	18
Çizelge 2.5 Köpük beton üretim metotlarının yoğunluk ve basınç dayanımına etkisi...	39
Çizelge 3.1 CEM I 42,5 R çimentosunun fiziksel özellikleri.....	40
Çizelge 3.2 CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal özellikleri	40
Çizelge 3.3 Uçucu kül kimyasal özellikleri	43
Çizelge 3.4 Süper akışkanlaştırıcı beton katkısının teknik özellikleri	44
Çizelge 3.5 Ön deneme döküm serilerin karışım oranları.....	50
Çizelge 3.6 Ön deneme örneklerinin akma süresi, köpük yoğunluğu, harç ağırlığı değerleri	51
Çizelge 3.7 Ön deneme örneklerinin birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı değerleri	51
Çizelge 3.8 Uçucu kül katkılı serilerin karışım oranları	52
Çizelge 3.9 İnce kum katkılı serilerin karışım oranları	53
Çizelge 3.10 Genleştirilmiş Perlit katkılı serilerin karışım oranları.....	53
Çizelge 3.11 Köpük beton harcının akma süresine göre yapılan sınıflandırılma.....	54
Çizelge 4.1 Köpük beton numunelerinin akma süresi, köpük yoğunluğu, harç ağırlığı değerleri	60
Çizelge 4.2 Köpük beton ısı iletkenlik değerlerinin belirlenmesi deneyi sonuçları.....	64
Çizelge 4.3 Uçucu kül katkılı serilerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı deneyi sonuçları.....	65
Çizelge 4.4 İnce kum katkılı serilerde birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı deneyi sonuçları.....	66
Çizelge 4.5 Genleştirilmiş perlit katkılı serilerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı deneyi sonuçları	67
Çizelge 4.6 XRD ve SEM yöntemi uygulanan numunelerin hammadde bileşenleri, birim hacim ağırlık, mukavemet değerleri.....	69

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Çalışmada kullanılan çimento.....	41
Resim 3.2 Çalışmada kullanılan kum	42
Resim 3.3 Çalışmada kullanılan uçucu kül	43
Resim 3.4 Çalışmada kullanılan süper akışkanlaştırıcı.....	44
Resim 3.5 Çalışmada kullanılan polipropilen lif	45
Resim 3.6 Çalışmada kullanılan NaOH	46
Resim 3.7 Çalışmada kullanılan CaCl_2	46
Resim 3.8 Çalışmada kullanılan genleştirilmiş perlit	47
Resim 3.9 Çalışmada kullanılan köpük ajanı.....	47
Resim 3.10 Çalışmada kullanılan köpük makinesi (solda) ve üretilen köpük (sağda) verilmiştir.....	48
Resim 3.11 Çalışmada kullanılan mikser (solda) ve kalıplanmış köpük beton numuneleri (sağda) verilmiştir.....	48
Resim 3.12 Marsh Konisi deneyi.....	54
Resim 3.13 Etüv kurusu birim ağırlığı deneyi	55
Resim 3.14 Köpük beton ısı iletkenlik değerlerinin belirlenmesi deneyi	56
Resim 3.15 Çalışmada üretilen ısı yalıtım plaka örnekleri	56
Resim 3.16 Küp numune ultrases deneyi.....	57
Resim 3.17 Küp numunelere uygulanan basınç mukavemeti deneyi	59
Resim 3.18 Mikro yapı inceleme için numuneden parça alım işlemi	59
Resim 4.1 Köpük beton numunelerinin hücre yapıları	72
Resim 4.2 U2 numaralı serinin hücre yapıları	73
Resim 4.3 D3 numaralı serinin hücre yapısı	74

1. GİRİŞ

Günümüzde insan nüfusunun artması ve teknolojinin gelişmesi, yapı sektöründe yeni ihtiyaçların doğmasına sebep olmuştur. Eski yapıların yıkılıp yenisinin yapılması, boş arsaların binalar ile dolması, yeni yollar barajlar inşa edilmesi insanların barınma, ulaşım ve hayat standartlarının yükselmesi için zorunlu ihtiyaç halindedir. Bu sebeplerden dolayı beton en çok kullanılan yapı malzemesi olmuştur.

Teknolojinin gelişmesi ile enerjiye olan ihtiyaç artmış olup bunun sonucunda nükleer enerji santrallerinin inşa edilmesinde ağır betonlara gereksinim duyulmuştur. Yüksek katlı binaların deprem göz önüne alınarak tasarlanması, beton teknolojisinde sık donatı sorunu teşkil etmiştir. Buna çözüm olarak kendiliğinden yerleşen beton ortaya çıkmıştır. Ayrıca bu yüksek katlı binalarda yüksek dayanımlı betona ihtiyaç duyulmuştur. Betonun çekme dayanımının düşük olması betonda çeşitli lifler kullanılarak iyileştirilmiştir. Betonun kullanılacağı alana göre üretilmesi özel beton kavramını oluşturur. Hafif beton da özel betonlardan bir tanesidir (Ören ve Gençel 2017). Hafif beton birleşiminde özgül ağırlığı düşük agregalar kullanılan, normal betona göre yoğunluğu düşük betondur. Yoğunluk kullanılan hafif agregaların türüne, miktarına, kullanılan diğer bileşenlerin özelliklerine göre değişmektedir.

Köpük beton hafif betonun bir çeşididir. Çimento, su ve agreganın karıştırılıp oluşan harca köpüğün ilavesiyle elde edilir. Toplam hacminin %75-%80'i oranında bağımsız kapalı gözenekler içerir. Köpük beton, çevreci bir yapı ve yalıtım malzemesidir (Ekinci 2014).

Dünyada fosil yakıt kullanımı çok fazladır ve sürekli artmaktadır. Bu durumla paralel olarak hava kirliliği de artmaktadır. Hava kirliliğini önlemek için farklı enerji politikaları denenmektedir. Sadece enerji kaynağı değil enerji tasarrufu da göz önünde bulundurulmalıdır. Sürdürülebilir kalkınma programı kapsamında enerji verimli binalar ön plana çıkmaktadır. Böylece fosil yakıt tüketimi azaltılarak hava kirliliğinin azaltılması hedeflenmektedir. Bunun için yapının konfor seviyesi düşürülmeden, yapının ısı kaybının azaltılması gerekmektedir (Liu vd. 2014).

Yapı stoklarının arttığı büyümekte olan ülkelerde ihtiyaç duyulan enerji miktarı ve çevre sorunlarına çözüm bulmak için ısı izolasyonu odaklı çalışmalar yapılmaktadır. Araştırmacılar çeşitli özelliklerde yalıtım malzemesi geliştirmişlerdir. Geliştirilen yapı malzemelerinden bir tanesi de köpük ajanıyla elde edilen köpüğün, çimento harcıyla karıştırılmasıyla oluşmaktadır. Bu tür betonlara köpük beton denilmektedir. Köpük beton, yapının yalıtım gereksinimlerini karşılayarak enerji tasarrufu sağlar. İçeriğinde bulunan çapı 0,1-1 mm aralığında olan hava kabarcıkları, ısı ve sesi normal betonlara kıyasla yalıtkan malzeme özelliği göstermesini sağlar. Gözenekli yapısı sayesinde hafiftir ve yapılarda ölü yükü azaltır (Wei vd. 2013).

Petrol türevli dış cephe yalıtım malzemelerinin yangına karşı dayanıksızlığı can ve mal güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Köpük betonun yangına karşı dayanıklılığı önemini artırmaktadır. Aynı zamanda köpük betonun ısı iletim katsayısının düşük olması, kolay üretimi ve ucuz imal edilmesi kullanımını arttırmaktadır (Huang vd. 2015).

Köpük beton üretiminde baz harcın karışımına bağlayıcı olarak katılan çimento dışında farklı özellikte ve oranlarda mineral malzemeler kullanılmaktadır. Karışıma ilave edilen mineral katkıları Köpük betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu çalışmada köpük beton baz karışımına uçucu kül, ince kum ve genleştirilmiş perlit farklı oranlarda katılarak köpük beton örnekler üretilmiştir. Örnekler üzerinde fiziksel ve mekanik testler ile mikro yapı analizleri yürütülerek değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Beton

Beton, yapı malzemeleri arasında en çok kullanılan, üretiminde kullanılacak çimentonun, agreganın, suyun ve gerekli kimyasalların türlerine ve miktarlarına göre özellikleri farklılık gösteren malzemedir (Erdoğan 2004). Beton başlangıçta plastik kıvamda olup zamanla hidratasyonun gerçekleşmesi ile sertleşen, kompozit (en az iki malzemenin birlikte yeni bir malzeme oluşturması) bir yapı malzemesidir.

Beton son yıllarda inşaat mühendisliği endüstrisindeki temel yapı malzemesi olmuştur. Taze beton istenilen şekilde dökülebilmek özelliğine sahipken zamanla hidratasyonun tamamlanması ile sertleşir ve iyi mekanik özellikler gösterir. Modern yapı sektöründe neredeyse sınırsız uygulamalara sahiptir (Marcon vd. 2018).

Betonun toplam hacminin %70'ni agrega, %10'nu çimento, %20'sini su oluşturur. İhtiyaç halinde çimento ağırlığının %5'ini geçmeyecek miktarda katkı malzemesi eklenebilir (Salgın 2007).

Betonun geçmişi medeniyet kadar eskidir. Betonun icadında en önemli keşif hidrolik bağlayıcıların bulunması olmuştur. Su ile karıştırıldığında temas ettiği maddelerle kaynaşır ve sertleşen yani hidrolik olarak nitelendirilen bağlayıcı maddelerin kullanılmaya başlanması, günümüzden 2000 yıl kadar eskilere dayanır. Dünyada beton üzerinde detaylı çalışmalar yapıldığı ve karışım oranlarının geliştirildiği yıllar 1950-1960'lı yıllardır. Sonrasında, betonun zaman dilimleri içindeki davranışı, döküm yöntemleri, tercih edilen malzeme kalitesi, üzerinde yapılan kalite kontrol deneyleri, üretim maliyetlerini azaltmaya yönelik çalışmalar, zor çevresel koşullarda beton kullanılarak binaların inşası konularında gelişmeler olmuştur. Takip eden senelerde hazır beton, yapıların önemli inşaat malzemesi olarak kabullenilip yaygınlaşmaya başlamıştır (Salgın 2007).

Beton endüstrisi alanında çimento türlerini çoğaltmak, endüstriyel atık malzemelerin, çimento veya beton üretiminde kullanarak geri kazanımını sağlamak, kimyasal katkı malzemeleri ile istenilen özellikte beton elde etmek amacıyla çalışmalar yapılmaktadır. Beton endüstrisi alanındaki yapılan bu çalışmalarla istenilen dayanım ve dayanıklılıkta ayrıca ekonomik betonlar üretilmesi amaçlanmaktadır (Akman 2003).

2.1.1 Betonun Temel Mikro Yapısı

Betonda temel mikro yapı terimi, çimento ve agrega karışımına su eklendiğinde beton bünyesinde mikro düzeyde gelişen yapıyı gösterir. Beton bünyesinde oluşan bozulmaların mekanizmasını, nedenini, kapsamını veya betonun bazı istenmeyen özelliklerinin nasıl iyileştirileceğini anlamak için, sertleşmiş betonun temel mikro yapısı ile ilgili detaylı bir farkındalık gereklidir. Betonun mekanik özellikleri genellikle iç mikro yapısına bağlıdır. SEM, XRD, EDX gibi teknikler beton teknolojisi alanında önemli mikro analiz imkanları sağlamaktadır.

Betonun mikro yapısı entegre bir sistem olarak ortaya çıkmaktadır. Bu sistem hidrate olmuş çimento hamuru, kaba ve ince agregalar, ara yüzey geçiş bölgesi yani agrega ve hidratlı çimento macunu arasındaki ara yüzden oluşmaktadır.

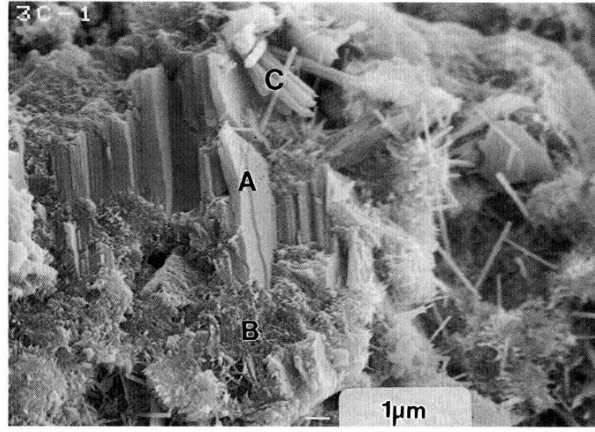
2.1.1.1 Hidrate Olmuş Çimento Hamuru

Su/çimento oranı 0,50-0,55 arasında olan normal bir betonda, hidratlı çimento hamuru, çimento hidratasyon ürünlerinden oluşur. Bunlardan birincisi hidrate çimento hamurunda katı hacminin %50-60'ını oluşturan kalsiyum silikat hidrattır (C-S-H). İkincisi hidrate çimento hamurunda katı hacminin %20-25'ni oluşturan kalsiyum hidroksit (CH) kristalleridir. Sonuncusu ise kalsiyum sülfat hidratlarından Aft (ettrinit) ve AFm (monosülfat), tam hidrate olmamış çimento taneciklerinden, hamurdaki gözeneklerden (küçük 5-20 µm jel gözenekleri, katı C-S-H' deki gözenekliliği ve hamur matrisindeki büyük kılcal gözenekleri) oluşur. Bir betondaki hidrate olmamış çimento miktarı: çimentonun inceliğine, su/çimento oranına ve çimento hidratasyon derecesine bağlıdır (Jana vd. 2001).

C-S-H fazı: Çimento ve betonda nihai ürüne gerekli bağlayıcılık özelliği sağlayarak betonun dayanımına en büyük katkıyı sağlayan bileşendir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), morfoloji ve kimyasal bileşimi sınırlar içinde bir miktar başkalaşabilen C-S-H fazını karakterize etmede son derece yararlı olmaktadır. Normal sıcaklıkta üretilen betondaki C-S-H fazı jel yapısı gösterirken, yüksek sıcaklıklarda zayıf kristalli ile kristalli yapı arasında değişkenlik göstermektedir. SEM altında, normal sıcaklıkta C-S-H'nin genel morfolojisi aslında yaygın lifli tipten düzensiz tanelerin oluşturduğu bir ağ yapısına kadar değişebilmektedir. C-S-H fazının mikro analizi Ca/Si mol oranının su/çimento oranı ya da betonda mineral katkı maddelerinin varlığına bağlı olarak değişebileceğini göstermiştir (Jana vd. 2001).

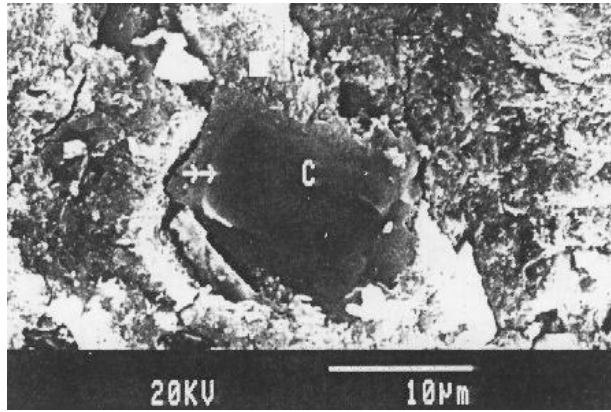
Kalsiyum hidroksit (CH) kristalleri: Kalsiyum hidroksit kristalleri birçok farklı şekil ve boyutta ortaya çıkar. Masif, yassı kristallerden başlayarak ayırt edici altıgen prizma morfolojisi ile birlikte onlarca mikron genişliğinde, büyük ince uzun kristaller, bloklu kütlelerden, ince dağılmış kristallere kadar değişiklik gösterebilmektedir. Kalsiyum hidroksit kristalleri betonda bulunan çimento ile agrega ara yüzeyinin birbirine olan bağlayıcılık özelliğini geliştirmektedir (Kırgız 2011).

Kalsiyum sülfat hidratlar (AFt ve AFm Fazları): SEM cihazı, kalsiyum sülfat hidratların iki farklı morfolojisini tanımlamaktadır. Bunlar; betondaki etrenjit fazı (AFt) ve monosülfat (AFm) fazıdır. Genellikle etrenjit, erken hidratasyon sırasında boş alanlarda iğne biçiminde kristaller oluşturur. Sınırlı bir alanda oluşan bu kristal toplulukları suyu emer ve genişler betonda bozulmaya neden olur. Monosülfat altıgen düz kristalleri olarak görünür. Erken oluşan monosülfat, kümelerde, düzensiz saçılmış plakalarda kristalleşme eğilimindedir, bunlar daha sonra oluşan iyi gelişmiş, ama çok ince altıgen plakalar haline gelir. Şekil 2.1'de hidrate çimento hamurunun SEM görüntüsü verilmiştir (Jana vd. 2001).



Şekil 2.1 Hidrate çimento hamuru, A:CH, B:C-S-H ve C:Etrenjit çubukları (Jana vd. 2001).

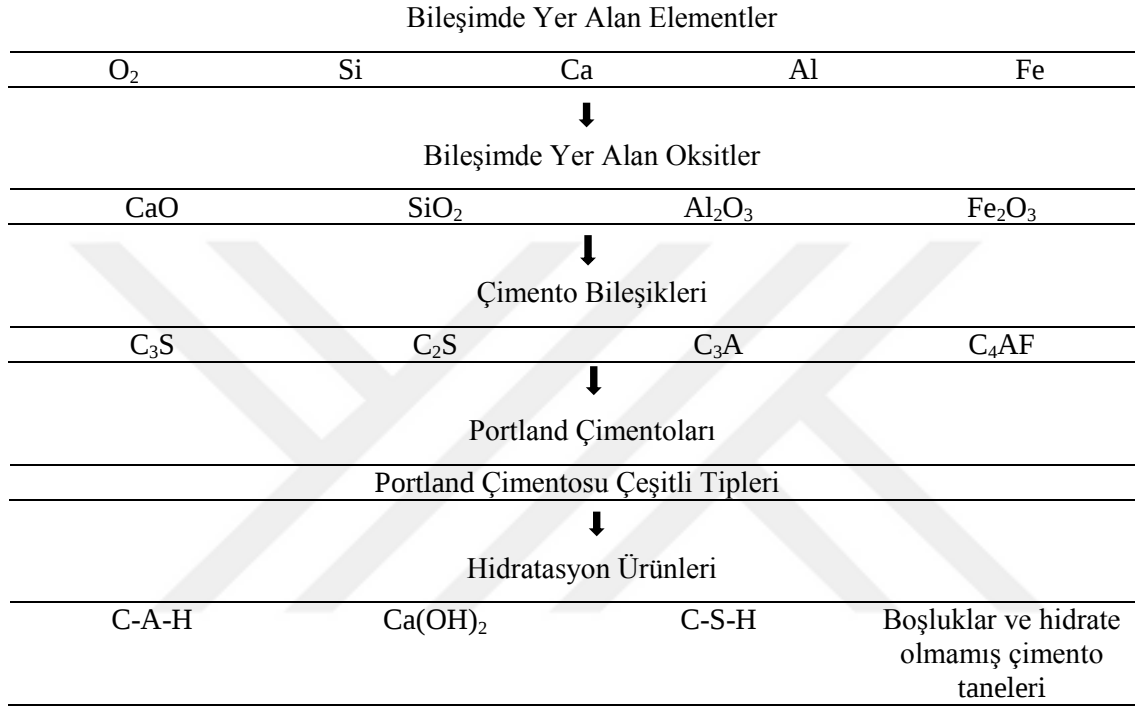
Hidratasyonu tamamlanmamış çimento tanecikleri: Bu tanecikler SEM görüntüsünde karakteristik parlaklıkları, ikincil elektron görüntüsü ve geri sıçrayan morfolojileri ile kolayca tanımlanabilir. Hidratasyonu gerçekleşmemiş çimento taneciklerinin SEM cihazı aracılığıyla çekilen görüntüsü Şekil 2.2’de görülmektedir. Bu tanecikler birbirini çekmektedir ve karma suyunun büyük bir bölümünü yutma eğilimindedir. Böylece bölgesel olarak istenmeyen bir durum olan su/çimento oranı heterojen bir gözenek yapısına yol açar. Taramalı elektron mikroskobu, hidrate olmayan çimento hamurundaki gözeneklerin nihai dağılımının incelenmesinde ve boşluklardaki hidrate olmayan çimento taneciklerinin tespitinde son derece yardımcı olabilir (Jana vd. 2001).



Şekil 2.2 Hidratasyonu tamamlanmamış çimento tanesi (C), (→→) hidratasyon kenarını gösterir(Jana vd. 2001).

Hidrate olmuş çimento hamurunun gözenekliliği: Hidrate olmuş çimento hamurunda iki tip gözenek bulunur. Bunlardan birincisi başlangıçta hidrate olmamış çimento taneleri arasında su ile dolu olan ancak sonra hidrate olmuş C-S-H jeli arasındaki boş alanları

temsil eden büyük kılcal gözeneklerdir. İkincisi ise C-S-H jelinin içindeki daha küçük jel gözenekleridir. Kılcal gözeneler, SEM'in sekonder ve geri saçılmış elektron görüntüleme modunda belirgin bir şekilde görülebilir. Bununla birlikte, jel gözenekleri SEM tarafından çözölemeyecek kadar küçüktür (Jana vd. 2001). Şekil 2.3'de portland çimentosu hidrasyon şeması verilmiştir.



Şekil 2.3 Düzeltilmiş Portland çimentosu hidrasyon şeması (Kırgız 2011).

2.1.1.2 Agregalar

Agrega bileşenlerinin mineralojik olarak tanımlanması, şekli, boyutu, yüzey dokusu ve potansiyel alkali reaktivitesi için SEM cihazından genellikle yararlanılır. SEM cihazı; agregalardaki zararlı bileşenlerin doğasını ve kimyasal bileşimini belirlemek (ince parçacıklar, kil topakları, organik madde, demir sülfürler, sülfat kirleticiler, vb.) için kullanılır. Aynı zamanda agregaların çimento ile zararlı reaksiyonunun ürünlerini (agregaların etrafındaki çatlaklar veya jantlar boyunca çökelen alkali-agrega reaksiyon jeli gibi) tanımlamak, agregaların gözenekliliği ve gözenek bağlantısı geçirgenliğini belirlemek için kullanılabilir (Jana vd. 2001).

2.1.1.3 Çimento Hamuru-Agrega Ara Yüzeyi

Hamur-agrega ara yüzeyinin betondaki en zayıf mikro yapısal bölüm olduğu iddia edilmektedir (Monteiro ve Mehta 1986). Beton mikro yapısında SEM cihazı ile ara yüzey geçiş bölgesinin özellikleri üzerine çok sayıda çalışma olmuştur (RILEM 1982, Monteiro vd. 1985). Mikro yapı araştırmaları, agrega yüzeyinde kalsiyum hidroksitten oluşan ince bir tabakanın varlığını göstermektedir. Barnes ve ark., bu tabakayı, C eksenine agrega yüzeyine dik olarak yönelmiş, bir C-S-H tabakası ile çevrili kalsiyum hidroksit kristallerinden oluşan bir “dubleks film” olarak tanımlamışlardır (Barnes vd. 1979). Bu ince hidratasyon filmi yaklaşık 50 µm kalınlığında ve belirgin yüksek gözenekliliğe sahiptir. İnce hidratasyon filminden çimento hamuruna doğru gözeneklilik azalmıştır. Bu nedenle betondaki en zayıf bölgeyi oluşturur. Çimento ve agreganın iki farklı tür malzeme olması sebebiyle birbirine temas yüzeylerince bağlanmaları betonun içyapısında farklılıklar oluşturur. Betonda çimento hamuru ile agrega ara yüzeyi arasındaki bölüm zayıftır. Bu zayıflığın nedeni ise işlenebilir beton karışımı oluşturmak amacıyla, çimento hidratasyonu için lazım olan su miktarından daha çok su eklenmesidir. Beton döküldükten sonra iri taneli agregalar kalıbın dibine çöker ve hidratasyona dahil olmayan su ise kalıbın yüzeyine doğru hareket eder. Bu bölgede su/çimento oranı yüksek, dayanımı düşük bir hat oluşur (Uğurlu 1999). Bu bölgede gözlemlenen önemli mikro-yapısal özellikler aşağıda verilmiştir;

- Tercih edilen yönelimi büyük plakalı CH kristalleri (c eksenine agrega yüzeyine paralel olacak şekilde)
- Hidrate olmamış çimento taneciklerinin olmaması (Bu bölgedeki çimentonun tamamen hidratasyonu, ara yüzdeki su/çimento oranının başka yerlerden daha yüksek olduğunu gösterir)
- Hamur hacminden daha yüksek gözeneklilik
- Artan etrenjit konsantrasyonu

Hafif agregalı betonundaki hamur-agrega ara yüzü, normal betona göre SEM altında kolayca ayırt edilebilen farklı bir bağ yapısına sahiptir. Hafif agregalar genellikle hareketli iyonların çevreye göçünü teşvik eden ve daha yoğun bir ara yüzey bölgesinin

oluşmasına neden olan gözenekli bir dış katmana sahiptir. Ayrıca, pürüzlü yüzey dokusu agreganın hidrate çimento hamuru ile mekanik kenetlenmesini de geliştirir (Jane vd. 2001).

2.2 Hafif Beton

Hafif beton, çimento, su, ince agrega ve hafif kaba agreganın harmanlanmasıyla üretilir. Geleneksel betona oranla çeşitli avantajları ve kullanım kolaylığı bulunan hafif beton inşaat sektöründe tercih edilen önemli beton türlerinden birisi olmuştur.

Normal beton iyi bir taşıyıcıdır fakat birim ağırlığı fazladır. Birim ağırlığının fazla olmasıyla birlikte betonarme elemanın ısı iletkenlik kat sayısı ve öz ağırlığı yüksektir. Normal betonun birim ağırlığı düşürülerek betonarme elemanın ağırlığı azaltılır. Betonarme elemanın ağırlığı azalınca taşıyıcı sistem elemanlarının kesiti küçültülerek ekonomik kazanç sağlanabilir. Aynı zamanda betonda birim hacim ağırlığın azalması ile ısı geçirgenlik katsayısı düşer. Hafif betonun ısı iletkenliği hafif betonun birim ağırlığına ve üretiminde kullanılan agrega cinsine bağlıdır (Taşdemir 2003).

Hafif betonun birim ağırlığının düşük olması, yapılarda ölü yükü azaltır. Dolayısıyla yapının üzerine alacağı yatay deprem kuvvetlerini azaltır. Yapının taşıyıcı kesitlerinde küçülme meydana gelir. Böylece kesitte kullanılan donatı miktarı azalır ekonomik fayda görülür (Demirel ve Yazıcıoğlu 2010).

Hafif beton üretimi şu şekillerde yapılabilir. Kum, kırma taş, çakıl gibi agregalar yerine gözenekli doğal veya yapay agrega tercih edilerek üretilebilirler. Beton içerisine fiziksel veya kimyasal yöntemlerle boşluklar yapılarak üretilen yüksek oranda hava sürüklenmiş betonlar yapılabilir. (Neville 1995).

TS EN 206-1 (2002) standardına göre hafif beton, birim hacim ağırlığı etüv kurusu durumda 800 kg/m^3 'ten büyük, 2000 kg/m^3 'ten küçük olan betondur (TS EN 206-1 2002). Amerikan Beton Enstitüsü tarafından yayınlanan ACI 213R-03 standardına göre 28 günlük basınç dayanımı 17 MPa 'dan fazla aynı zamanda hava kurusu durumda birim

ağırlığı 1120-1960 kg/m³ arasında olan betonlara taşıyıcı hafif betonlar denilir (ACI 213R-03 2003).

2.2.1 Hafif Betonun Tarihçesi

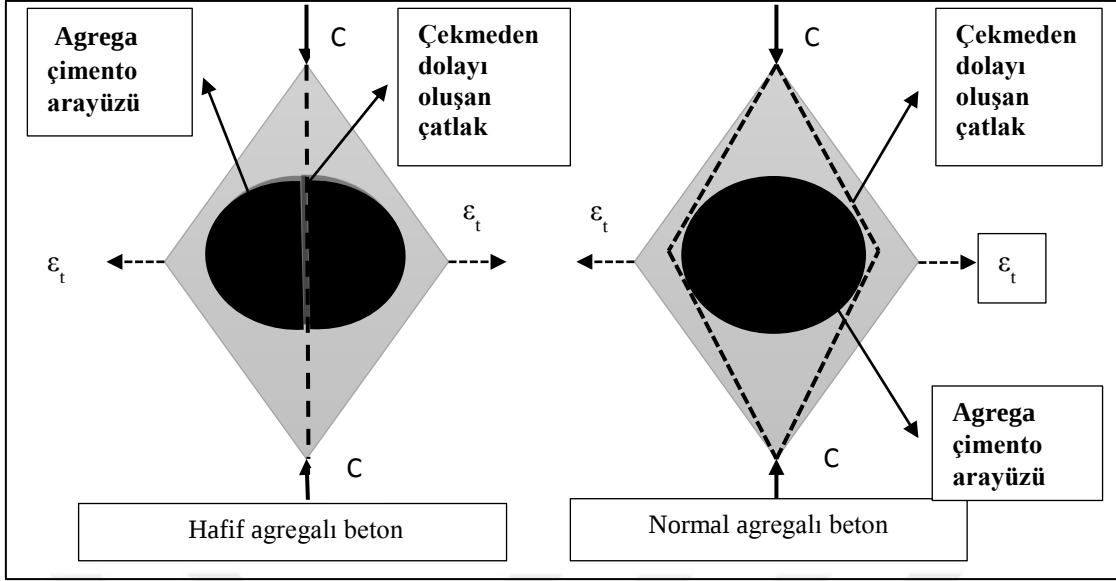
Hafif agregalı beton eski çağlardan beri bilinmektedir. Pomza gibi doğal agregalar kullanılarak yapılan çok sayıda yapı örneği vardır. Örneğin, Sümerler, Babil'in inşasında kullanmışlardır. Eski Roma imparatorluğu döneminde inşa edilenlerden ve birçoğu hala ayakta olan bu yapılara Cosa Limanı, Pantheon Kubbesi ve Kolezyum en önemli üç örnektir. Yunanlılar ve Romalılar da pek çok inşaatta pomza agregasını yaygın olarak kullanmışlardır (ACI 213R-03 2003).

2.2.2 Hafif Betonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Hafif betonun bileşenleri, betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini etkiler.

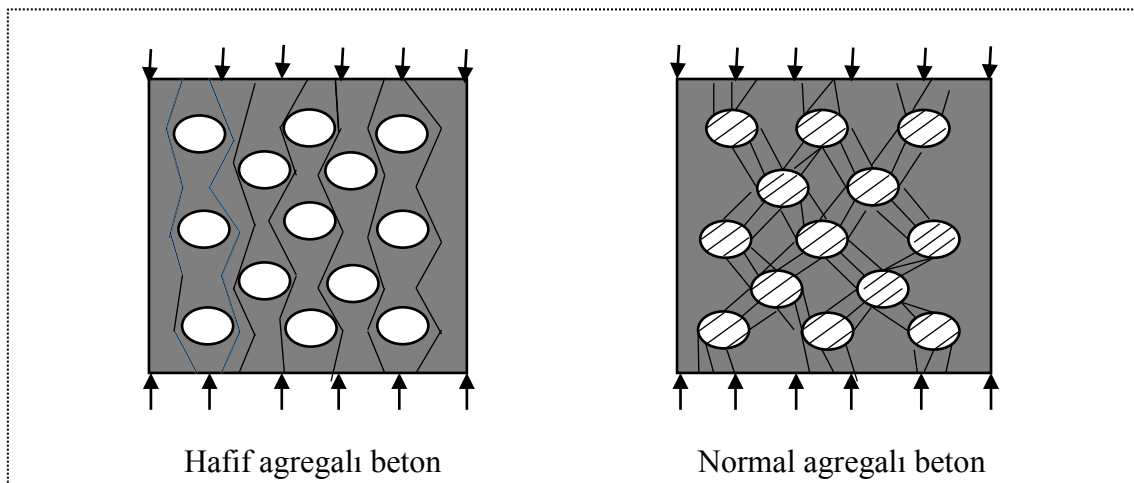
2.2.2.1 Hafif Betonun Dayanım Özellikleri

Hafif agregalı betonların basınç ve çekme dayanımı normal agregalı betonlara göre düşüktür. Çünkü hafif agregaların dayanımı normal agregalara oranla daha düşüktür. Hafif agregalı betonlar yük etkisi altında iken, çimento hamurunun yük dayanımı hafif agreganın dayanımından yüksek olur. Bu yüzden, kırılma noktası normal betondaki gibi agrega-çimento ara yüzünde değil agregada başlar (Şekil 2.4) (Uygunoğlu 2008).



Şekil 2.4 Hafif ve normal agregalı betonda çatlak oluşumu (EuroLightCon 1998).

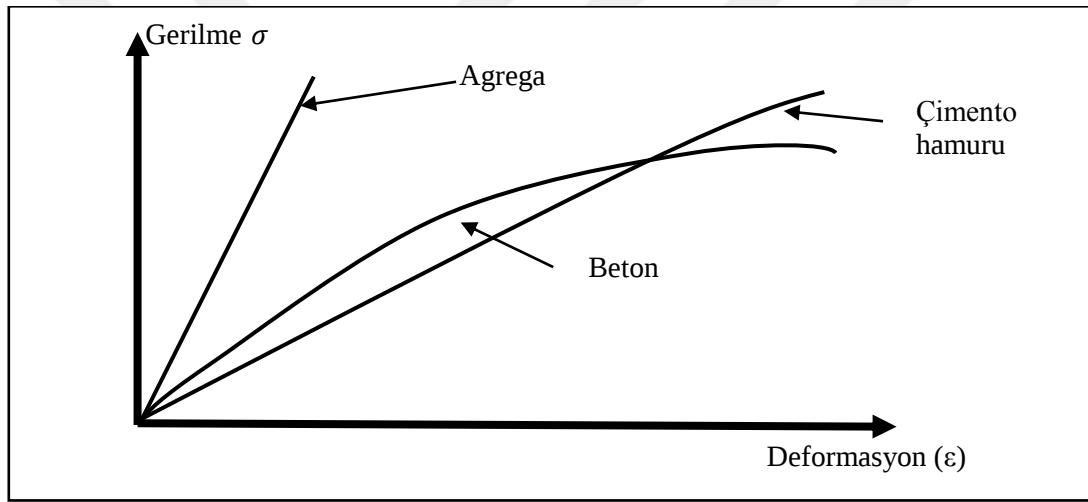
Hafif agregaların yük etkisi altındaki dayanımları çimento hamurunun dayanımına oranla daha düşüktür. Bu sebeple beton üzerine gelen yük hafif agregalar ile aktarılıp çimento hamuru ile taşınmaktadır. Çimento hamuru boyunca, yük ile aynı doğrultuda düz çizgiler halinde kırılma meydana gelmektedir. Şekil 2.5’de bu durum gösterilmiştir. Normal agregaların yük etkisindeki dayanımı çimento hamurunun dayanımından yüksektir. Bu nedenle betona gelen yük çimento hamuru ile aktarılıp, agregalar tarafından taşınmaktadır. Dolayısıyla normal agregalı betonlarda oluşan kırılmalar, numunenin yüzeyinden merkezine doğru olmaktadır. Şekil 2.5’de bu durum gösterilmiştir (Husem 2003).



Şekil 2.5 Hafif ve normal agregalı betonda gerilme dayanımları gösterimi (Husem 2003).

2.2.2.2 Hafif Betonların Elastisite Modülleri

Betonun ana malzemelerinden agrega ve çimento gerilme altında elastik davranış gösterir. Fakat karma yapıdan oluşan beton, yüksek gerilme altında elastik davranış sergilemez. Betonun içerdiği agrega ve çimento hamurunun elastisite modülleri farklıdır. Dolayısıyla betona etki eden gerilmeye agrega ve çimento hamuru çeşitli tepki verirler. Bu durum betonu yüksek gerilme düzeylerinde elastik olmayan bir davranış sergilemesine sebep olmaktadır. Beton, taşıyabileceği maksimum dayanımın %25-%40'ından sonra elastik özelliğini yitirir. Şekil 2.6'da agrega, çimento hamuru, beton şekil değiştirme deformasyon grafiği verilmiştir (Erdoğan 2003).



Şekil 2.6 Agreganın, çimento hamurunun, beton şekil değiştirme deformasyon grafiği (Erdoğan 2003).

Betonun elastisite modülü, matrisin elastisite modülünden, agrega çeşidinden, su/bağlayıcı oranından ve çimento yoğunluğundan etkilenir. Benzer gerilmeler etkisinde hafif betonların şekil değiştirme kabiliyetleri normal betonların şekil kabiliyetlerine kıyasla daha fazladır. Hafif betonların elastisite modülü verileri normal betonların elastisite modülüne kıyasla daha düşük değerler vermektedir. (Uygunoğlu 2008).

2.2.2.3 Hafif Betonun Yoğunluk Özelliği

Hafif betonun yoğunluğu, beton üretiminde kullanılan agregaların yoğunluğundan etkilenmektedir. Ayrıca agregaların tane dağılımı, nem içerikleri de hafif betonun

yoğunluğunu değiştirir. Betonun karışım oranları, çimento içeriği, su-bağlayıcı oranı, kimyasal ve mineral katkı maddeleri gibi faktörlerin yanı sıra betonu yerleştirme, sıkıştırma ve kür yöntemi de yoğunluğu etkilemektedir. Hafif betonların yoğunluğu 400-1800 kg/m³ aralığındadır.

2.2.2.4 Hafif Betonun Termik Özellikleri

Konutlarda istenen termik izolasyonun istenilen performansı göstermesi için betonun termik özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Bilinmesi gereken bu veriler ısı geçirgenlik katsayısı, betonun öz ısısı, ısı genleşme katsayısı ve yangına dayanıklılıktır.

Isı iletkenlik katsayısı (λ): Bir malzemenin fiziksel ve kimyasal yapısına bağlı olarak o malzemenin ısıyı ne kadar ilettiğinin ifadesidir. Birimi, W/mK'dir. Isı iletkenlik katsayısı değeri arttıkça ısı kaybı artar dolayısıyla kapalı bir alanda sıcaklığın sabit kalması için harcanacak yakıt miktarı artar. Isı iletkenlik katsayısını etkileyen faktörlerden birisi betonun boşluklu yapısı ve su içeriğidir. Hava ısıyı suya oranla iyi iletmez. Bu yüzden betonda boşlukların fazla olması (λ) değerini düşürür. Boşluk arttıkça birim hacim ağırlık azalır ve birim hacim ağırlığı düşük olan cismin de ısı iletkenlik katsayısı düşer. (Uysal 2004). Hafif betonda ısı iletim katsayı değerleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Hafif betonda ısı iletim katsayı değerleri (TS 825 2009).

Birim hacim kütlesi kg/m ³	Isıl iletkenlik hesap değeri W/mK	Su buharı difüzyon direnç faktörü μ
350	0,11	5 / 10
400	0,13	5 / 10
450	0,15	5 / 10
500	0,15	5 / 10
550	0,18	5 / 10
600	0,10	5 / 10
650	0,21	5 / 10
700	0,22	5 / 10
750	0,24	5 / 10
800	0,29	5 / 10
900	0,32	5 / 10

Özgöl Isı (©): Betonların özgöl ısısı, diğer bir değişle cismin sıcaklığını arttırmak için harcanması gereken ısı miktarı 0,20 – 0,28 kcal/kg °C değerleri arasında farklılık gösterir. Betonun birim ağırlığının azalması ile betonun özgöl ısısı artar.

Termik genleşme katsayısı (á): Isıtılan cisimlerin atomları titreşim yapar. Titreşen atomlarla cismin hacminde artış meydana gelir. Sıcaklığın 1°C artması ile cismin birim hacminde meydana gelen artış o cismin termik genleşme katsayısıdır. Katı cisimlerde ısı değişikliğinin çok fazla olması halinde genleşmeler meydana gelir. Bu genleşmeler içyapıda gerilmeleri oluşturur. Gerilmelerin artması yapılarda bazı çatlaklar oluşturur. Agreganın genleşme katsayısı çimento hamurundan daha düşüktür. Böylece beton çimento dozajı azaldıkça betonun termik genleşme katsayısı düşmektedir. Çeliklerin termik genleşme katsayısı betonun termik genleşme katsayısına yakın değerde olması betonun ve çeliğin birlikte kullanılması sağlamaları (Uysal 2004).

Yangına dayanıklılık: Beton yangının ilk birkaç saatinde, sıcaklık derecesi 600 °C'yi aşmayan yangınlarda donatılara göre daha yüksek bir dayanım sergiler. 600 °C'de beton dayanımının büyük bir kısmını kaybedebilir. Sıcaklığın 800 °C'ye çıkması halinde, hidratelerin içinde bulunan suyu kaybetmesi sonunda beton dayanımında azalma %80'e varabilmektedir (Uysal 2004).

2.2.2.5 Hafif Betonların Su Emme Özellikleri

Betonun gözeneklerinde bulunan su, betonun mekanik ve termik özelliklerini kötü yönde etkiler. Bu yüzden betonların su emme değerinin düşük olması istenir. Hafif betonun su emme değeri, içerisinde bulunan hafif agregaların su emme değerine ve agrega/çimento oranına bağlıdır. Aynı agrega miktarında fakat farklı agregalarla üretilen betonların su emme miktarları, agregaların değişik gözenekli yapıda olma durumlarından farklı sonuç vermektedir (Topçu ve Uygunoğlu 2007).

2.2.2.6 Hafif Betonların Yüksek Sıcaklık Dayanımı

Beton genellikle tutuşmazlığı ve yüksek termal yalıtım özellikleri ile yanmaz olarak bilinir. Betonun ısı iletkenlik katsayısı değeri 1-4 W/mK aralığındadır ve çeliğin ısı iletkenlik katsayısı değerinden (46 W/mK) oldukça düşüktür (Khoury 2008). Beton ve çelik yanıcılık yönünden hiç yanmaz sınıfı olan A1 sınıfı girerler. Bu malzemelerin yangın hasarı malzeme kaybı olarak değildir. Akma sınırı, elastisite modülünde ki azalmalar ve içyapı değişiklikleri yangın hasarı olarak ortaya çıkar (Mahsanlar 2006).

Yüksek sıcaklık betonun bileşenlerine, betondaki nem miktarına, beton yaşına, çimento, mineral ve agrega tipine bağlı olarak betonu etkiler (Akman 2000). Betonda bulunan agrega çeşidi, betonun yüksek sıcaklık karşısında gösterdiği direncini büyük ölçüde etkileyen bir faktördür. Hafif agregalı betonların ısı iletkenlik katsayısı düşük olduğu için yüksek sıcaklık karşısında normal betonlara oranla yüksek dayanım gösterirler (Aydın ve Baradan 2003). Yüksek sıcaklıkta beton mukavemetini azaltan faktörler;

- Çimento dozajının düşük olduğu betonlar yangından daha az etkilenir.
- Silis içermeyen agregalarla üretilen betonların yangına karşı davranışı silis içeren agregalara oranla daha iyidir.
- Termik iletkenlik katsayısı düşük betonlar, yangından daha az zarar görür.
- Hafif betonlar normal betonlara göre yangından olumsuz yönde daha az etkilenir.
- Rutubet içeriği fazla olan betonların, suyun genleşme katsayısının havaya oranla daha yüksek olması sebebiyle yangına direnci önemli ölçüde azalır.
- Yapı elemanlarının kesit boyutu küçüldükçe yangının zararlı etkisi artar.

2.2.2.7 Hafif Betonlarda Aşınma Direnci

Hafif betonların yapımında kullanılan agregaların standart agregalara oranla düşük dayanıma sahip olması, standart betonlara kıyasla aşınmaya karşı dayanıklılığını azaltır. Ayrıca betonun aşınma dayanımını, agrega-çimentonun birbirine kenetlenme durumu da etkiler.

2.2.2.8 Hafif Betonlarda İşlenebilirlik

Benzer çökme değerinde hafif agregalı beton normal betona kıyasla daha iyi işlenebilirlik gösterir. Lakin yüksek çökme değeri ve aşırı vibrasyon ayrılmaya sebep olabilir. Hafif iri agregataneleri beton yüzeyine doğru çıkar. Hafif agregalı betonda yapılan aşırı vibrasyon sonucu oluşan segregasyon, normal agregalı betonda oluşan segregasyona kıyasla daha fazla olabilmektedir (Dikici 2010).

2.2.3 Hafif Betonun Sınıflandırılması

Hafif betonun sınıflandırılması bu bölümde verilmiştir.

2.2.3.1 Üretim Yöntemine Göre Hafif Betonun Sınıflandırılması

Hafif beton üretmek için betonun yoğunluğunun düşürülmesi gerekir. Betonun yoğunluğu, karışımında kullanılan malzemelerin bir kısmı yerine, hava boşlukları oluşturularak düşürülebilir. Beton karışımında hava üç yerde bulunur. İlk olarak İri agregataneleri arasında bulunur. Boşlukları iri agregataneleri arasında bulunan betonlar, “ince agregasız beton” olarak adlandırılır. İkinci olarak agregatanesinin kendisinde bulunur. Boşlukları agregatanelerinin içinde bulunan betonlar, “hafif agregalı beton” olarak adlandırılır. Son olarak çimento hamurunda bulunur. Boşlukları çimento hamurunda bulunan betonlar ise, “gözenekli beton” olarak isimlendirilir (İnt.Kyn.1).

2.2.3.2 Basınç Dayanımına Göre Hafif Betonun Sınıflandırılması

Hafif betonlar basınç dayanımlarına göre farklı şekillerde sınıflandırılmıştır. Çünkü üretiminde kullanılan hafif agregaların dayanımları birbirinden farklıdır (Uygunoğlu 2008). TS EN 206-1 (2002) standardına göre hafif betonlar basınç dayanımlarına göre Çizelge 2.2’de gösterildiği gibi 8 MPa’dan 80 MPa’a kadar gruplandırılmıştır.

Çizelge 2.2 Hafif betonların basınç dayanımlarına göre gruplandırılmıştır.

Basınç Dayanım Sınıfı	En Düşük Karakteristik Dayanımı	
	Silindir (f _{ck,sil}), MPa	Küp (f _{ck,küp}), MPa
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

2.2.3.3 Birim Hacim Ağırlığına Göre Hafif Betonun Sınıflandırılması

TS EN 206-1 (2002) standardına göre hafif betonlar birim hacim ağırlığına göre Çizelge 2.3’de verildiği gibi D 1,0 ile D 2,0 arasında gruplandırılmıştır.

Çizelge 2.3 Hafif betonların yoğunluklarına göre gruplandırılmıştır.

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

Birim hacim ağırlığı ve karşıladığı basınç dayanımına göre hafif betonlar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler (Dikici 2010).

Düşük yoğunluklu yalıtım betonu: Yapısal amaçlı kullanılmayıp, yalıtım için kullanılır. Hava kurusu birim hacim ağırlıkları 800 kg/m³’ün altındadır. Isı geçirgenlik katsayıları düşüktür. Basınç dayanımları 0,7-7 MPa arasında değişir. Bu betonun üretiminde

vermikülit ve genleştirilmiş perlit gibi düşük yoğunluklu ve düşük dayanımlı agregalar kullanılır.

Orta dayanımlı yarı taşıyıcı hafif beton: Birim hacim ağırlığı 1400 ve 1600 kg/m³ aralığında bulunan bu betonların basınç dayanımları yapısal olarak kabul edilebilecek düzeydedir. İzolasyon performansı ise iyi sayılabilecek seviyede bulunan bu tür betonların basınç mukavemetleri 7-17 MPa aralığında değişiklik gösterir.

Taşıyıcı veya yapısal hafif beton: Bu çeşit betonların üretiminde kullanılan agregalar genel olarak genleştirilmiş kil, şeyl, cüruf, pomza gibi dayanımları kısmen daha iyi olan agregalardır.

ACI 213R-03 (2003) Standardında yapısal hafif betonların 28 günlük en düşük basınç mukavemeti 17 MPa, yoğunluğu 1120-1960 kg/m³ aralığında bulunan tümü hafif agrega veya hafif agrega ve normal agreganın beraber kullanımıyla üretilen betonlar olarak tanımlanmaktadır. Çizelge 2.4’de hafif betonların basınç dayanımı, yoğunluk ve ısı iletim katsayıları verilmiştir.

Çizelge 2.4 Hafif betonun sınıflandırılması (Kabay 2009).

Hafif Beton Sınıfı	Basınç Dayanımı (MPa)		Beton Yoğunluğu * (kg/m ³)		Isı İletim Katsayısı (W/m ² K)	
	A	B	A	B	A	B
Taşıyıcı (ACI 213R)	>17,0	>15,0	1120-1920	1600-2000	-	-
Taşıyıcı/Yalıtım	3,4-17,0	>3,5	800-1440	<1600	0,22-0,43	<0,75
Yalıtım	0,7-3,4	>0,5	240-800	<1450	0,065-0,22	<0,30

A: Holm ve Ries’e göre B: RILEM/CEB’e göre *ACI 213R’de belirtilen dengeli yoğunluk(kg/m³).

2.2.4 Hafif Betonun Kullanım Alanları

- Duvar panel ve blokların inşasında izolasyon amaçlı kullanılabilir.
- Zemin, çatı katı döşemelerinde, şap betonu olarak kullanılabilir.
- Köprü açıklıklarında, kanalizasyon sistemleri, boru hatları ve menfezlerde boşlukların doldurulması için kullanılabilir.

- Ön yapımlı beton ünitelerinde kullanılabilir.
- Yapısal çeliğin, yangın ve aşınmaya karşı korunması için kullanılır.
- Isı ve ses yalıtımı için kullanılabilir.

2.2.5 Hafif Betonun Avantajları ve Dezavantajları

- Hafif olması: Hafif betonun ağırlığı düşüktür ve bu nedenle sahada uygulama konusunda olumlu bir etkisi vardır. Hem zamandan tasarruf hem işçilikten tasarruf sağlar. Öte yandan normal beton yoğundur bir forma girdiğinde üzerinde çalışmak zordur (Öztürk 2019).
- Yangına dayanıklı olması: Yapısındaki hava boşlukları, yangına karşı yüksek direnç sağlar.
- Isı ve ses yalıtımı: Isı geçirimsizlik katsayılarının daha düşük olması nedeniyle ısı ve ses yalıtımı daha iyidir.
- Çevre dostu: Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıklar hafif betonda kullanılarak çevresel fayda sağlanır (Demirel ve Yazıcıoğlu 2010).
- Maliyet açısından verimli olabilir: Bazı hafif betonlarda bir kısım çimento yerine endüstriyel atıkların ilavesi, çimento üretiminde yapılan yatırımdan tasarruf sağlar. Bu nedenle inşaat maliyetini önemli ölçüde azaltır.
- Kullanıldığı kalıba daha az basınç uygulaması.
- Donma-çözünme etkisine karşı dayanıklıdır.
- Hafif betonun kullanıldığı yapılar depremden daha az etkilenir (Durmuş ve Aytekin 1985).
- Gözenek miktarının fazla olması nedeniyle basınç mukavemetleri düşüktür. Bu yüzden yüksek dayanımlı beton uygulanacak bölümlerde kullanılmazlar (İnt. Kyn.1).
- Gözenekli yapılarından dolayı rutubete ve suya karşı dirençleri zayıftır. Binaların su alması bina güvenliğini kötü yönde etkiler aynı zamanda yaşam standartlarını, insan sağlığını da kötü yönde etkilemektedir. Bunun için hafif beton uygulamaları su ile temas edilen bölümlerde yalıtım yapılarak kullanılmalıdır (İnt. Kyn.1).

- Hafif agregalar normal agregalara göre zor bulunur. Hafif beton, normal betona göre nispeten daha fazla çimento içerir. Bu durum hafif betonda maliyetleri bir miktar yükseltir.
- Elastisite modülleri normal betonlara kıyasla daha düşüktür. Çünkü normal betonda kırma taş, çakıl gibi agregalarla üretilmiş betonlarda, agrega yoğunluğunun artışı, betonların elastisite modüllerini yükseltmektedir. Hafif betonda ise agrega yoğunluğunun düşük olduğu için elastisite modülü düşer. Elastisite modülünün düşük bulunmasından dolayı taşıyıcı hafif betonlu kirişlerde, şekil değiştirmeler daha yüksek olur (İnt. Kyn.1).
- Hafif betonlarda ayrışma normal betona kıyasla daha yüksektir. Yüksek çökme ve aşırı vibrasyonla, hafif beton geleneksel betona karşın, agregaların yüzeye çıkması şeklinde ayrışma gözlemlenir.
- Sünme ve rötre değerleri normal betondan daha fazladır.
- Aşınmaya karşı dirençleri zayıftır. Bu durum hafif agregaların basınç dayanımının normal agregalar kadar olmamasındandır. Ancak aşınma direnci yalnızca agregaların dayanımına değil, çimento hamurunun dayanımına ve aralarındaki aderansa da bağlıdır. Agreganın dayanımı küçük olsa da harç yapısının güçlü olmasından dolayı standart betona karşın aşınma direnci daha büyük olan hafif betonlar yapılabilir (İnt. Kyn.1).

2.3 Köpük Beton

Sahip olduğumuz hazır kaynakların verimli kullanılması için gelişen teknoloji ile az kaynakla üretilen kolay uygulanabilen yalıtım malzemeleri gerekmektedir. Bu konuda çalışılan konulardan biriside köpük beton olmuştur.

Köpük betonun, büyük çoğunluğunu hafif malzemeler oluşturur. İnce kum, çimento, su ve köpük bileşenleridir. Büyük agrega içermemesi ve hava boşluklarının harç içerisinde eşit dağılması sebebiyle homojen olarak değerlendirilebilir. Köpük beton, yüksek akışkanlık, düşük yoğunluk, minimum agrega kullanımı, kontrollü düşük basınç dayanımı ve çok iyi ısı yalıtım özelliklerine sahip olan bir hafif beton türüdür (Işıldar 2018).

Kuru birim ağırlığı 400-1600 kg/m³ değerleri aralığında ve basınç mukavemeti 1-15 MPa değerleri aralığında almaktadır. Hidratasyonunu tamamlayan köpük beton yeterli dayanım ve dayanıklılığa sahip olmaktadır. (Jones ve Mccarthy 2005).

Köpük beton, boşluklu veya hücreli beton olarak da bilinir. Çimento, su ve agrega karışımına köpük ajanı ile yapılan köpüğün katılmasıyla elde edilir. Hacmi %75-%80 oranında birbirinden bağımsız kapalı gözeneklerden oluşur. Köpük beton; bir binanın dış ve iç duvarları ile zemininde kullanılan yapı elemanlarının yerine kullanılabilir. İçerisindeki malzemeler insan sağlığına zararlı değildir. Hafif, çevreci, ekonomik, uygulaması kolay, ısı ve ses izolasyonu sağlayan, tercih edilen yapı ve yalıtım malzemesidir (Ekinci 2014).

2.3.1 Köpük Betonun Tarihçesi

Köpük beton patenti ilk kez 1923 yılında alınmasına rağmen, ancak son yıllarda yarı taşıyıcı ya da taşıyıcı olmayan inşaat uygulamalarında yaygınlaşmaya başlamıştır. İstikrarlı köpük beton harcı oluşturulması; kullanılan köpük ajanının özellikleri ve miktarı, köpük hazırlama yöntemi ve hava boşluğu dağılımının homojenliği, karışım yöntemi gibi birçok etkene bağlıdır. Bu yüzden standart bir karışım hazırlama uygulaması yoktur (Ramamurty vd. 2009).

2.3.2 Köpük Betonun Özellikleri

Köpük betonun özellikleri bu bölümde verilmiştir.

2.3.2.1 Fiziksel Özellikleri

Yoğunluk: Köpük betonda yoğunluk hacmindeki gözenek miktarına bağlı olarak, değişir. Düşük yoğunluklu köpük beton, yüksek yalıtım ve düşük basınç dayanımı değerleri elde edilirken, yüksek yoğunluklu köpük beton, düşük yalıtım ve yüksek basınç dayanımı elde edilir.

Köpük betonun kıvamı ağırlıklı olarak filler cinsine bağlıdır. Köpük ilavesiyle beraber karışımın yoğunluğu azalır. Köpük betonun yoğunluğunda ki bu azalma büyük ihtimalle kendi ağırlığının düşmesi ve yüksek hava içerdiğinden kaynaklanan güçlü kohezyon sebebiyledir (Demir vd. 2017). Köpük betonun yoğunluğunun azalması, sertlik ve dayanımının azalmasına neden olmaktadır (Mydin ve Wang 2012).

Karışımın su içeriğinin düşük olması, karışım kıvamının katılaşmasına neden olmaktadır. Katı kıvamdan dolayı karıştırma esnasında kabarcıklar sönmelenmektedir. Bu durumda köpük betonun yoğunluğu artmaktadır ve çökme meydana gelmektedir. Karışımın su içeriğinin fazla olması, harcı zayıflatır. Zayıflayan harç köpüğü koruyamaz ve köpük karışımdan ayrılmaktadır. Bu durumda da nihai yoğunluk artmaktadır ve çökme meydana gelmektedir (Nambiar ve Ramamurty 2006).

Köpük betonu yoğunluklarına göre sınıflandıracak olursak (Bekaroğlu 2012);

- 400 -600 kg/m³ yoğunluklu: Tavan ve yer döşeme ısı ve ses izolasyonu
- 600-900 kg/m³ yoğunluklu: Blok ve panel yapımı
- 900-1200 kg/m³ yoğunluklu: Ara duvar, dış duvar, panel ve blok yapımı
- 1200-1600 kg/m³ yoğunluklu: Taşıyıcı duvar, panel ve blok üretiminde kullanılır.

Kuruma büzülmesi: Köpük hacminin artmasıyla birlikte bireysel gözeneklerin büyüklüğü ve içindeki hava miktarına bağlı olarak kuruma büzülmesini azaltmaktadır. Köpük hacmi toplam hacmin %50'sine ulaştığında, kuruma büzülmesinde %36 seviyesinde azalma gözlemlenmiştir (Nambiar vd. 2009). Köpük betonun kuruma büzülmesi, kompozisyonuna bağlı olarak normal betona kıyasla 10 kata kadar yüksek olabileceği ön görülmektedir (Ramamurty vd. 2009).

Gözeneklilik ve kılcal su emme: Köpük betonun bireysel gözenek boyutu, gözeneklerin gösterdiği dağılım, gözeneklerin birbirleriyle olan bağlantıları, toplam gözenek miktarı, gibi özellikleri iç ve dış etkenler karşısındaki davranış şeklini etkilemektedir (Kaya 2017). Köpük betondaki gözenekler;

- Jel (büzülme) gözenekleri,
- Kılcal gözenekler
- Makro gözenekler (hava hapsolan)
- Mikro gözenekler (hava hapsolan) olarak sınıflandırılmaktadır.

Köpük betonun gözenek yapısı: Karışımda bulunan bileşenlerin çeşitleri, kimyasal ve fiziksel özellikleri, oranlarının etkisi kapsamında şekillenir. Köpük betonun gözenek yapısını asıl belirleyici olan köpük ajanının gözenek yapısı olmaktadır (Işıldar 2018).

Kılcal gözenekler betona sıvı emme potansiyeli sağladığından, kütleme uygulamasından alınacak sonucu da değiştirebilecektir (Nambiar ve Ramamurty 2007). Isı ve ses yalıtımı sağlayan hava boşluklu yapının kapalı hücreli olması sebebiyle köpük beton aynı anda su yalıtımı da sağlamaktadır. Su emme değerleri oldukça düşük olabilmektedir (Bekaroğlu 2012).

2.3.2.2 Mekanik Özellikleri

Basınç dayanımı: Köpük beton basınç dayanımı, köpük ajanının türü ve oranı, çimento-kum ve diğer bileşenlerin oranı, su-çimento oranı, köpük betonun yoğunluğu gibi faktörlerden etkilemektedir. Beton hacminde köpük miktarının azalması, betonun yoğunluğunun artmasına ve buna paralel olarak betonun dayanımının artmasına neden olmaktadır (Awana ve Kumar 2017).

Yarmada çekme ve eğilme dayanımları: Köpük betonun yoğunluğu azaldıkça yani hacimce köpük miktarı artışı ile birlikte yarmada çekme değeri azalmaktadır.

Elastisite modülü: Köpük betonun yoğunluğu, elastisite modülünü etkilemektedir. Yoğunluk azaldıkça elastisite modülü düşer (Mydin ve Wang 2012).

2.3.2.3 Fonksiyonel Özellikleri

İşlenebilirlik: Köpük beton, taze halde yüksek akış yeteneğine, düşük yoğunluğa sahiptir. Köpük beton kolayca pompalanabilir sıkışma ve vibrasyon gerektirmeden yerleştirilebilir. Köpük beton harcı beton tesislerinde kalıplanıp, bloklar haline uygulama sahasına getirilebileceği gibi gerektiğinde inşaat sahasında hazırlanarak kolayca kullanılabilir (Kaya 2017).

Köpük beton taze harcının akma dayanımı düşük olduğu için kendiliğinden yerleşme özelliği gösterebilir. Köpük betonun akış özellikleri su/ince malzeme oranı, çimento tipi, su/çimento oranı, köpük yoğunluğu, köpük ajanı çeşidi, filler malzeme miktarı ile çeşidi, harcın yoğunluğu gibi faktörlerden etkilenir (Demir vd. 2017).

Akustik yalıtım direnci: Köpük beton, içerisindeki hava boşlukları nedeniyle iyi bir ses yalıtımına sahiptir. Köpük beton, yapıları kış mevsiminde sıcak, yaz mevsiminde ise serin tutarak yıllık genel enerji sarfıyatını %40 oranda düşürür (Ekinci 2014). Köpük betonun gözenek yapısı ve büyüklüğü betonun ses emme ve sesi yansıtma özelliklerini geliştirmektedir.

Isıl iletkenlik: Köpük beton, üretildiği malzemenin yoğunluk ve bileşimine bağlı olarak normal yoğunluktaki betondan %10-50 değerleri arasında daha düşük ısıl geçirgenlik katsayısı sunabilmektedir (Ramamurty vd. 2009). Köpük betonda ısıl iletkenlik, köpük miktarı, karışım bileşenlerinin çeşidi ve oranlarından etkilenmektedir.

Köpük beton, içerisinde bulunan hava gözenekleri sebebiyle çok iyi yalıtım özelliği sunar. Isı iletim katsayısının (λ) düşük olması nedeniyle enerji tüketimini azaltmaktadır. Isı iletim katsayısı 0,060 ile 0,610 W/mK arasında köpük betonun yoğunluğuna göre değişir. Bu sebeple uygulamada köpük beton kullanılması ile ilave yalıtım malzemesine ihtiyaç duyulmaz (Ekinci 2014).

Yüksek sıcaklığa direnci: Köpük betonun yüksek sıcaklığa direnci, karışım bileşenlerinin çeşidi ve oranlarından etlenmektedir. Köpük betonun yoğunluğundaki

artışla yangın direnci artmaktadır. Yapılan bir çalışmada 400 kg/m^3 yoğunluktaki ultra hafif köpük betonun yangın direnci 150 kg/m^3 yoğunluklu köpük betona göre üç kat fazladır. Köpük betonun yeterli yangın direnci gösterebilmesi için 250 kg/m^3 'ten yüksek yoğunluğa sahip olması gerektiği bulunmuştur (Vilches vd. 2012).

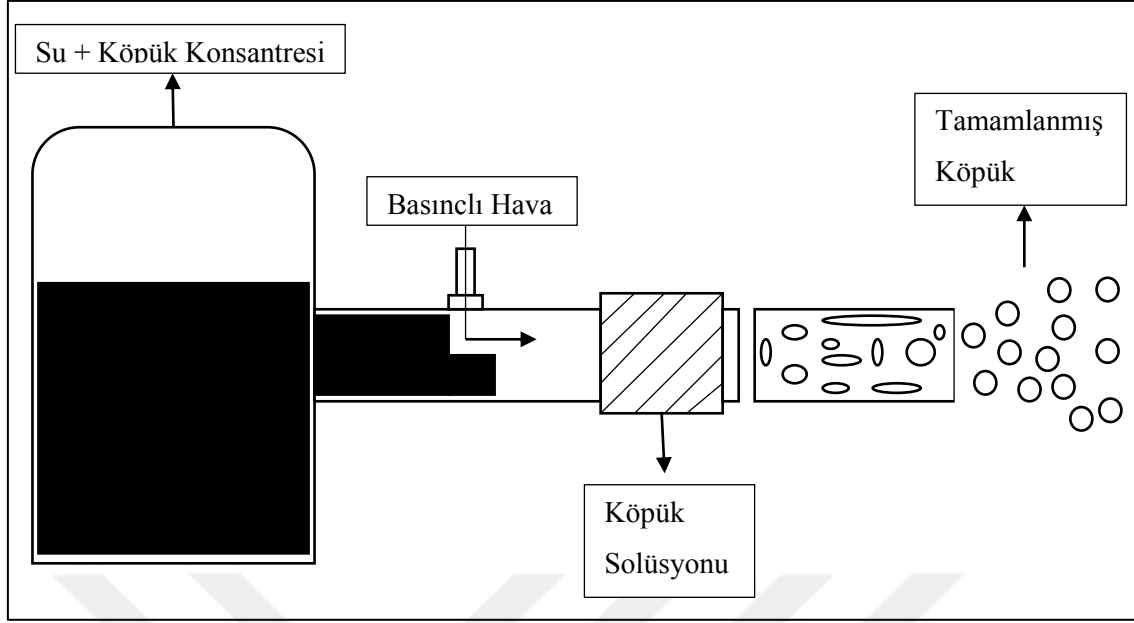
2.3.3 Köpük Betonun Üretimi

Köpük betonlar, karışık köpüklendirme veya ön köpüklendirme yöntemleriyle üretilirler. Ön köpüklendirme yöntemi, önceden hazırlanmış sulu köpüğün harç karışımına ilavesiyle elde edilir. Karışık köpüklendirme yöntemi ise yüzey aktif maddenin, harcın bileşenleriyle karıştırılması ve köpüğün bu işlem esnasında, harç içerisinde üretilmesiyle elde edilir (Ramamurty vd. 2009).

Köpük üretilirken çok büyük kabarcıkların oluşması istenmemektedir. Çünkü büyük kabarcıklar kararlı davranış göstermezler. Beton karıştırılırken, taşınırken, yerleştirilirken çökme durumu artar. Bu sırada betondaki havanın büyük bir kısmı kaybedilirse, köpük betondan istenilen performans sağlanamaz (Ören ve Gençel 2017).

2.3.3.1 Ön Köpüklendirme Yöntemi ile Köpük Beton Üretimi

Önceden oluşturulmuş köpük yönteminde köpük jeneratöründeki karışım suyuna köpük ajanı ilave edilir. Sonra köpük jeneratörü çalıştırılır ve karışım basınçlı hava ile püskürtülür (Ören ve Gençel 2017). Şekil 2.7'de köpüğün üretilme yöntemi gösterilmiştir (Bindiganavile ve Hoseini 2008). Elde edilen köpük daha önceden hazırlanan taze köpük beton harcına katılır. Homojen bir görüntü alıncaya kadar karıştırılır. Köpüğün harçta sönmemesi için hızlı bir şekilde kalıba dökülür. Üretilen köpük yeterince kararlı olmalıdır ki çimentonun priz başlangıcına kadar harcın köpük üzerinde oluşturduğu basınca karşı direnç gösterebilsin ve boşluklu bir iskelet yapısı ele edilebilsin (Ramamurty vd. 2009).



Şekil 2.7 Önceden oluşturulmuş köpük beton yönteminde köpük üretimi (Bindiganavile ve Hoseini 2008).

2.3.3.2 Karışık Köpüklendirme ile Köpük Beton Üretimi

Karşım köpüğü yönteminde, köpük ajanı; su, çimento ve ince agrega, gerekli katkılarıyla birlikte malzemeye eklenmektedir. Karışıma eklenen edilen köpürtme ajanları, karışımında birbirinden bağımsız mikro hava gözeneklerinin elde edilmesini sağlar. Elde edilen bu hava gözeneklerinin beton sertleşmeye başlayıncaya kadar harç basıncına dayanabilmesi için köpüğün sabit ve kararlı olması gerekmektedir (Amran vd. 2015). Hidrojen peroksit (H_2O_2) ve Alüminyum tozu, gözenekli betonda kullanılan yaygın kimyasal köpük ajanlarıdır.

2.3.4 Köpük Betonun Avantajları ve Dezavantajları

- Hafif beton harcı gerektiğinde bir mikser yardımıyla basit bir şekilde uygulama sahasına nakliyesi gerçekleştirilebilir ve sıkıştırma, vibrasyon ya da master işlemi gerektirmez (İnt.Kyn.2).
- İçeriğinde bulundurduğu malzemeler sağlığa zararlı değildir. Çevre dostudur.
- Donma çözünme direnci yüksektir.

- Çeşitli kullanımlara sahip olmasıyla yüksek performansı düşük üretim maliyetiyle üretimini sağlar (İnt.Kyn.2).
- Hafiftir, büyük oranda yük bindirmez, yanal yük baskısı yapmaz (Awana ve Kumar 2017).
- Mükemmel ses ve ısı yalıtım özellikleri vardır
- Yanıcı değildir bu yüzden mükemmel yangın dayanım özelliği vardır.
- Köpük beton, kapalı alanları kış mevsiminde sıcak, yaz mevsiminde ise serin tutarak yıllık genel enerji sarfiyatını önemli ölçüde düşürür. (Ekinci 2014).
- Boşluk miktarının fazla olması betonun basınç dayanımlarını düşürür.
- Gözenekli olması sebebiyle rutubete ve suya karşı dirençleri zayıftır.
- Elastisite modülleri normal betonlara kıyasla daha düşüktür.
- Köpük betonlarda segregasyon normal betona kıyasla daha yüksektir. Yüksek çökme değerinde, köpüğün yüzeye çıkması şeklinde ayrışma kendini gösterir.
- Rötire değerleri normal betonun rötire değerinden yüksektir.
- Aşınmaya karşı dirençleri zayıftır.

2.3.5 Köpük Betonun Kullanım Alanları

- Yangına dayanıklı hafif beton üretiminde kullanılabilir.
- Dekoratif amaçlı panel imalatında kullanılabilir.
- Isı ve ses yalıtımlı hafif beton, hafif tuğla üretiminde kullanılabilir.
- Düz olmayan zeminlerde düz bir yüzey oluşturarak aynı zamanda ısı ve ses yalıtımı sağlayan şap betonları için kullanılabilir (Bekaroğlu 2012).
- Çimento ve alçı içeren hafif plaka yapımında kullanılabilir.
- Toprak altı su drenaj amaçlı hücreli dolgu betonu,
- Köprü ve köprü yolunda buzlanmayı engellemek amacıyla yol altı dolgu betonu olarak kullanılabilir. Hafif olduğu için köprüye yüklenen yük azaltılmış olunur (Awana ve Kumar 2017).
- Perlitli sıva ve perlitli hafif beton yapımında kullanılabilir.
- Prefabrik bina üretiminde, hemen hemen her boyutta bölme ve taşıyıcı duvarlar için blok ve panel üretiminde kullanılabilir.

- Çatı yalıtımı ve düz çatılarda eğim yapmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. İyi ısı yalıtım özelliklerine sahiptir ve hafif olduğundan binaya büyük bir yük yüklenmez.

2.4 Rötire

Büzölme, beton içeriğinde bulunan suyun fiziksel ve/veya kimyasal sebeplerle azalması sonucunda beton boyutunda bulunan küçülmedir. Bu olaya rötire denilmektedir. Büzölme olayı beton taze halde veya sertleşmiş durumda iken meydana gelebilir. Taze betondaki büzölme fiziksel nedenlere dayanmaktadır. Plastik rötire taze betondaki büzölmeye örnektir (Erdoğan 2003).

Sertleşmiş betondaki büzölme hem fiziksel hem de kimyasal nedenlerden kaynaklanabilir. Prizini elde etmiş betondaki büzölme çimento hamurunda gerçekleşen hacim küçülmedir. Agregataneleri büzölme göstermediği gibi büzölmeyi önleme davranışı sergilerler (Erdoğan 2003).

Hidratasyon büzölmesi, karbonatlaşma büzölmesi, kuruma büzölmesi sertleşmiş betondaki büzölme türleridir. Sertleşmiş beton su içerisinde devamlı olarak bekletilirse bir miktar hacim artışı meydana gelir. Şişme olarak adlandırılan hacim artışı negatif rötire olarak değerlendirilir (Erdoğan 2003).

2.4.1 Rötire çeşitleri

Betonda gelişen rötire çeşitleri bu bölümde sunulmuştur.

2.4.1.1 Plastik Rötire

Plastik büzölme çatlakları beton yüzeyinde meydana gelir. Yüzeyden betonun iç kısımlarına uzanan derin çatlaklar değildir. Betonun yüzey görünümünü bozan, beton dayanımını etkilemeyen örümcek ağı görünümlü geliş güzel uzanan çatlaklardır. Fakat bu çatlaklar zamanla dışarıdan gelen yıpratıcı etkilerle derinleşip betonun dayanıklılığı

azaltabilmektedir. Bu rötreye “plastik” tanımlanması, bu olayın beton henüz prizini tamamlamamış ve yapısal olarak basınç dayanım kazanmamış olmasındandır (Erdoğan 2003).

Plastik rötre, taze beton döküldükten sonraki birkaç saat içinde beton henüz prizini almadan meydana gelmektedir. Beton yüzeyindeki suyun çok hızlı buharlaşması plastik rötrenin başlıca nedenidir. Taze beton yerleştirildikten sonra katı malzemeler dibe çöker ve su y zeeye çıkar. Beton yüzeyine çıkan su, r zg r veya sıcaklıktan buharlaşır. Betonun i  yüzeyleri plastik durumda iken yüzeyi kuruyarak büzülür. Betonun plastik kıvamdaki i  yüzeyleri ile kuru haldeki dış yüzeyinin b z lme oranları aynı olmadığı için beton  atlara (Türkmenoğlu 2015). Yüzeysel sayılabilecek 2-3 mm değerleri arasında genişlik ve 10 mm değerinden daha az derinlikte çatlaklardır (Davraz vd. 2015).

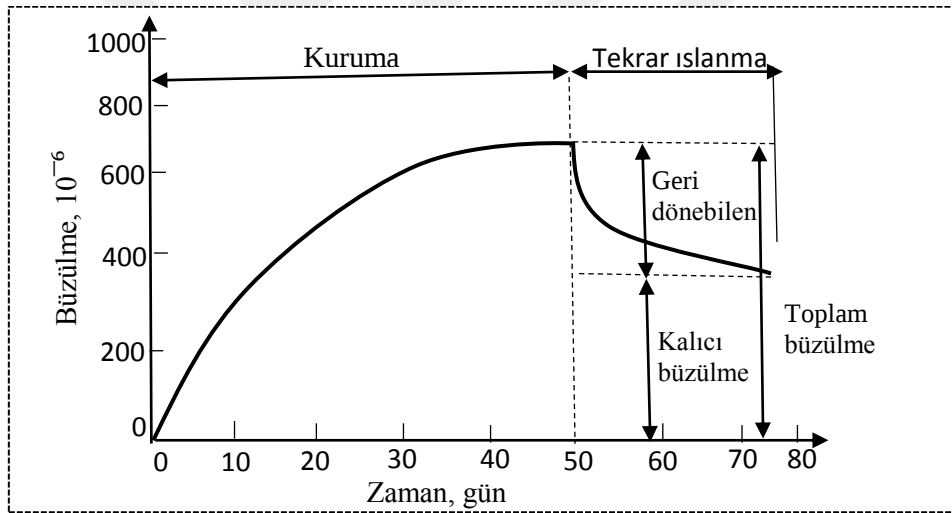
Plastik rötreye neden olabilecek diğer bir neden ise beton karışımında ki suyun bir kısmının, betonun altındaki taban malzemesi veya kalıplar tarafından emilmesidir. Betonda çatlaklara yol açtığı gibi yüzeydeki buharlaşmanın etkilerini de arttırmaktadır (Erdoğan 2003).

Plastik rötre çatlakları genellikle geniş yüzey alanlı tabliyelerde görülmektedir ve önlemek için alınması gereken tedbirler aşağıdaki gibidir (Erdoğan 2003).

- Sıcak havalarda beton dökülürken beton sıcaklığı düşürülmelidir. Karışım suyu ve agregalar soğutulularak kullanılabilir.
- Sıcak havalarda kalıplar ve zemin nemli tutulmalıdır.
- Karışımda su miktarını düşük tutulmalıdır. Gerekirse su azaltıcı kimyasal maddeler kullanılmalıdır.
- Rüzgarın hızlı olduğu havalarda beton dökülmesi gerekiyorsa rüzgar hızını kesecek bariyerler kullanılmalıdır.
- Beton döküldükten sonra en az 7 gün kür işlemi uygulanmalıdır.

2.4.1.2 Kuruma Rötresi

Hava sıcaklığının yüksek olması, bağıl nemin düşük olması, hızlı esen rüzgar sebebiyle sertleşmiş betonun içerisindeki suyun bir miktarı buharlaşır. Betonun kurması ile oluşan bu rötreye kuruma rötresi denilmektedir. Su kaybederek büzülen beton tekrardan sulu ortama getirildiğinde su kaybetmiş olan kapiler boşluklara bir miktar su girebilmektedir. Böylece büzülme miktarında düşüş gözlemlenecektir. Fakat betondan kaybedilen suyun tamamı geri alınamadığından bir miktar büzülme kalıcı olarak betonda yer almaktadır. Kuru betonun yeniden nemli duruma getirilmesiyle betondaki toplam büzülme oranının %40-%70 kadarı geri kazanılmaktadır. Bu telafinin miktarı betonun sertleşmeden önce ne ölçüde kür gördüğüne ve yaşına bağlıdır (Erdoğan 2003). Şekil 2.8’de kuruma ve ıslanma durumunda betonun davranışı verilmiştir.



Şekil 2.8 Kuruma ve ıslanma durumunda betonun davranışı (Erdoğan 2003).

Kuruma büzülmesini etkileyen faktörler (Erdoğan 2003);

- Su/çimento oranı
- Çimento hamurunun yaşı
- Çimento çeşidi ve miktarı
- Katkı maddesinin çeşidi ve miktarı
- Agrega tipi, minerolojik özellikleri ve miktarı
- Betonda kullanılan donatı miktarı
- Relatif nem miktarı ve ortam sıcaklığı

- Kuruma süresi
- Betonun geometrisi

Köpük beton, agregaların bulunmaması nedeniyle yüksek kuruma büzülmesine sahiptir, yani, normal ağırlıktaki betonda gözlemlenenden 10 kat daha fazladır (Awana ve Kumar 2017).

2.4.1.3 Termik Rötire

Prizi gerçekleşen betonda hidratasyon ısısının betonun tamamını ısıtmaya yetecek oranda yükselmemesi sonucunda kütlelerin bir kısmı soğuk kalır ve betonda sıcaklık farkları oluşur. Sıcaklık farkları sonucu termik büzüşme meydana gelir, buna termik rötire tanımlaması yapılır. Erken yaşlarda meydana gelen bu rötire özellikle kütle betonlarında büyük sorunlar oluşturur. Termik rötireden oluşan çatlaklar derin ve geniş olur. Hidratasyon ısısı yüksek çimento kullanımı, kalınlığı yüksek olan kütle betonu dökümü hızlı beton dökümü, termik rötireyi artırıcı sebeplerdendir. (Akman 1985).

2.4.1.4 Karbonatlaşma Rötresi

Karbonatlaşma olayıyla betonda yer alan rötireye “karbonatlaşma rötresi” denilmektedir. Betonun hidratasyon ürünü olan Ca(OH)_2 'in bir kısmı betonun içerisine sızan sular ile çözünür. Ca(OH)_2 bulunan sular, kapiler hareketle, beton yüzeyine veya yüzeye yakın bölgelere hareket etmektedir. Burada havadan gelen CO_2 ile Ca(OH)_2 arasında gerçekleşen reaksiyon sonucu CaCO_3 ve bir miktar su açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan bu su buharlaşma veya benzeri sebeplerle yok olmaktadır. İçeriğinde ki suyun bir kısmını kaybetmiş olan çimento hamuru bir kısım rötire göstermektedir (Erdoğan 2003).

Karbonatlaşma rötresi betonun yüzeyinde ve yüzeye yakın bölgelerinde gerçekleşir. Betonun yüzeyinde veya yüzeye yakın bölgelerinde oluşan çatlaklar rastgele yönlerde uzanan çatlaklardır. Yüzeydeki çatlaklar, derin olmamakla birlikte örümcek ağı gibi gelişigüzel yönlerde bulunurlar. Karbonatlaşmanın hızında, betonun geçirimsizliğine, havadaki CO_2 ve bağıl nem miktarı etkilidir (Erdoğan 2003).

2.4.1.5 Hidratasyon Rötresi

Betonun kendi yapısından kaynaklanan rötredir. Betonun kapiler boşluklarındaki suyun buharlaşma ile uzaklaşması dışında, kendi kendine kuruması da söz konusudur. Su/çimento oranı 0,5 değerinden daha düşük olan betonlarda meydana gelen bu duruma öz kuruma denir. Buharlaşma yoluyla su kaybı olmasa da kapiler boşluklardaki suyun bir kısmı hidratasyon için kullanılarak azalır ve bir süre sonra tekrar hidratasyon için yeterli su bulunamaz. Betonda oluşan öz kuruma olayı hidratasyon rötresi olarak isimlendirilir (Erdoğan 2003).

2.4.1.6 Negatif Rötire

Devamlı olarak su içerisinde bırakılan betonun hacminde ve ağırlığında bir miktar artış olmaktadır. Ağırlığında yaklaşık %1 kadar artma oluşmaktadır. Çimento hamurunda ve betonun hacmindeki bu artışa şişme veya negatif büzülmeyle tanımlanmaktadır. Hacim artışının sebebi ise çimento jelleri tarafından emilen sudur (Erdoğan 2003).

2.4.2 Betonda Rötire Oluşumunu Etkileyen Faktörler

Betonda gelişen rötreyi etkileyen faktörler bu bölümde sunulmuştur.

2.4.2.1 Su/Çimento Oranı

Su/çimento oranı arttıkça betonda büzülme miktarı da artmaktadır. Çünkü çimento hamurundaki kapiler boşluk miktarı artmaktadır. Kapiler boşlukta bulunan su çeşitli sebeplerle buharlaşırsa betonda büzülme meydana gelir. Bu sebeple betonda çatlaklar oluşur.

2.4.2.2 Çimento Özellikleri ve Miktarı

Betonda çimento özellikleri rötre üzerindeki oldukça etkilidir. Çimento inceliği ve betona ikame miktarı arttıkça beton karışım suyu miktarı da artmamaktadır. Karışım su miktarı arttıkça rötre miktarı da artmaktadır.

2.4.2.3 Agregalar Özellikleri ve Miktarı

Betonda agreganın türü, büyüklüğü rötre üzerinde etkilidir. Agregalar betonun serbestçe büzülmesini engellerler. Betonun rötresini etkileyen en önemli faktör karışımındaki toplam agrega hacmidir. Agreganın boyutu doğrudan rötre etkilemez ancak 6-150 mm arasındaki bir agrega tane boyutu değişimi agrega hacminin 0,6'dan 0,8'e yükselmesi ile sonuçlanır. Bu hacim artışı da kuruma rötresinde %50'ye varan oranlarda azalma demektir (Bilir 2010). Hafif agregalar genellikle kuruma rötresini artırırlar. Ancak, uygun malzeme seçimi ile orta büyüklüklerde kuruma rötresi elde edilebilir (ACI 209.1R-05 2005).

2.4.2.4 Mineral ve Kimyasal Katkı Özellikleri

Betonun su ihtiyacını arttıran mineral malzemeler büzülmeyi bir miktar arttırmaktadır. Uçucu kül yüzeyinin düzgün olması ve küresel şekilli olması nedeniyle işlenebilmeyi kolaylaştırdığı için su miktarını azaltabilmektedir.

2.4.2.5 Kür

Betonun maruz kaldığı nem ve sıcaklık etkileri kür koşulları olarak adlandırılmaktadır. Kürleme şartları ve süresi rötre üzerinde etkilidir. Çimentonun hidratasyonunun tamamlanabilmesi için ortamda su bulunması gerekmektedir. Yeterli suyun olmaması durumunda hidratasyon azalarak durur ve beton basınç mukavemeti kazanamaz. Bu yüzden, elde edilmek istenen özelliklerde beton oluşturulabilmesi için optimum kür koşullarının sağlanması gereklidir. Sahada dökülen betonların en az yedi gün, puzolanlı

çimento ile yapılan betonlarda ise daha uzun süreyle rutubetli tutulması önerilir (Neville 1995).

2.4.2.6 Çevre Şartları

Rutubet, sıcaklık ve yüksek hızlı esen rüzgar rötre çatlaklarını etkilemektedir. Rüzgar hızı ve sıcaklığın artması normal şartlar altına oranla buharlamayı daha fazla artırmaktadır buna bağlı rötre miktarı artmaktadır. Düşük nem rötre miktarını artırırken yüksek miktarını azalmaktadır. (Işıldar 2018).

2.4.2.7 Harç Döküm Boyutları ve Yüzey Alanı Büyüklüğü

Yüzey alanı/hacim oranı arttıkça betonda kuruma ve böylece rötre artmaktadır. Daha geniş boyutlarda numuneler daha düşük hızda ve daha az rötreye sahiptir. Rötrenin oluşma hızı genellikle numunenin hacminin kuruma yüzeyine oranı ile ters oranlıdır (ACI 209.1R-05 2005).

2.5 Önceki Çalışmalar

Demir ve ark., dolgu olarak çeşitli mineral malzemeler kullanılarak üretilen köpük beton örneklerinin reolojik özelliklerini Marsh Konisi ve Barookfield Viskozimetresi yöntemleri ile deneysel olarak incelemiştir. Karışımındaki su miktarının kararlaştırılmasında Marsh Konisi kullanılması uygulamada pratiklik sağlamıştır. Akış süresinin 1 dakikayı aşması durumunda harcın yüksek viskozite ve nihai mekanik özelliklere olumsuz etki ettiği bulunmuştur. Aynı zamanda 25 saniyeden az olan akış sürelerinde harcın fazla akışkan olması harcın kalıpta çökmesine sebep olmuştur (Demir vd. 2017).

Çetin ve ark., köpük beton imalatında Kalsiyum Alüminat Çimentosu kullanarak köpük betonun hızlı ve yüksek erken mukavemet dayanımı üzerinde çalışmışlardır. Yapılan testlerde farklı Portland Çimentosu ve Kalsiyum Alüminat Çimentosu kullanımının dayanım yüzzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlara göre Kalsiyum Alüminat çimentolu

karışımların dayanımında Portland Çimentolu karışımlardan önemli bir fark gözlenmemiştir. Sabit su/çimento oranı ile sabit köpük yoğunluğu sağlandığında köpük miktarındaki artış köpük betonun basınç dayanımını, yoğunluğunu ve ısıl iletkenlik katsayısını düşürmüştür (Çetin vd. 2015).

Demir ve ark., köpük beton karışımlarına katılan akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı kimyasal katkıların etkilerini gözlemlemişler ve Polikarboksilik eter özlü süper akışkanlaştırıcı (SAp) kimyasal katkının, aynı oranlarda Melamin sülfonat polimeri özlü süper akışkanlaştırıcı (SAm) kimyasal katkıya kıyasla akışkanlık sürelerinde düşüş (daha akışkan) ve bunun etkisiyle daha yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir (Demir vd. 2019).

Davraz vd. (2015), çeşitli yoğunluktaki köpük betonların basınç dayanım ve ısıl iletkenlik özellikleri üzerinde yaptıkları çalışmada CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu, kalker tozu, polipropilen elyaf ve süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanmışlardır. 300 kg/m³ çimento dozajı ve 0,30 su/katı oranında hazırlanan harçlara 80g/L yoğunlukta köpük ilavesiyle hafif beton numuneleri üretmişlerdir. 300-1400 kg/m³ aralığın da 12 farklı kuru yoğunlukta üretilen numunelerin (28. gün) basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve ısıl iletkenlik özellikleri test edilmiştir. Çalışma sonucunda köpük betonun kuru yoğunluğunun azalması ile orantılı olarak basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı da azalmıştır. Numunelerin kuru yoğunluk değerleri arttıkça ısıl iletkenlik katsayıları da düzgün doğrusal olarak artmıştır.

Papayianni ve Milud (2005), çimentonun %60 oranında, yüksek kalsiyumlu uçucu kül ile yer değiştirmiş olan köpük betonun kuruma rötresini gözlemlenmişlerdir. Bu tip uçucu külün %60 oranında çimento ile değiştirilmesiyle elde edilen köpük betonun kuruma rötresi 1800 µm'den 1200 µm'e düşmüştür. Basınç dayanımının artmasıyla rötrenin azaldığını gözlemlemişlerdir.

Kılıçarslan vd. (2019), yaptıkları araştırmada, köpük beton üretiminde genleştirilmiş polistren (EPS) atıklarının kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Su/bağlayıcı oranının 0,45 olarak sabit tutulduğu şartlarda; azaltılan köpüğe eşdeğer hacimlerde EPS

kullanmışlardır. Bu bağlamda Portland çimentosu, su ve uçucu külün sabit tutulduğu ve köpük miktarı azaltılırken, EPS'nin artırıldığı şartlarda büzülme değişimi ve basınç mukavemetleri gözlemlenmiştir. EPS kullanım oranındaki artışın genleşme oranları üzerinde büyük oranlarda değişimlere neden olduğu gözlenmiştir. EPS kullanım oranlarına kıyasla, büzülme oranı farklılıklarının genleşme oranlarıyla uyumlu olduğu belirlenmiştir. Köpük betonların basınç mukavemeti, EPS kullanım miktarlarındaki artışla yükselmiştir.

Kılıçarslan ve Tuzlak (2018), uçucu kül katkılı köpük betonların dayanım ve ısı iletkenlik özellikleri incelemiştir. Basınç dayanımı tayini için her bir karışımdan 10×10×10 cm'lik küp numuneler üretmişlerdir. Her karışım için numunelerden 3 tanesi deneye tabi tutulmuştur. Isı iletkenlik deneyi için ısı akısı ölçme yöntemi ile çalışan Lasercomp Fox 50 ısı geçirgenlik cihazı kullanılmıştır. Uçucu kül kullanılmasıyla köpük betonların basınç dayanımları üzerine olumlu bir etki yaptığı tespit edilmiştir.

Awana ve Kumar (2017), yaptıkları çalışmada uçucu kül kullanarak hücreli hafif beton üretmişlerdir. Hücreli hafif betonun yoğunluk ve basınç dayanımı açısından performansını araştırmışlardır. Karışımdaki köpüğün neden olduğu numunedeki boşluk artışları yoğunluğu azaltır. Bu çalışmada %1 ve %1,2 köpük içeren karışımların basınç mukavemeti, %1,4 köpük içeren karışıma kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Sonuç olarak, hücreli hafif betonda boşluk arttıkça basınç dayanımının düştüğü görülmüştür.

Kudiyakov ve Steshenko (2014), Köpük betonun serleşmesi sırasında meydana gelen kuruma büzülmesine, krizotil asbest liflerinin etkisini incelemiştir. Yaptıkları araştırmada krizotil asbest liflerini çimento miktarının ağırlıkça %2'si kadar eklemişler, sonucunda hacim üzerinde homojen bir şekilde dağılmış olan, düzgün boyutlu kapalı gözeneklere sahip, köpük beton yapısı sağladığını göstermiştir. Bu köpük betonun büzülme deformasyonunu %50 azaltmıştır.

Yu (2015), yaptığı çalışmada, su-çimento oranı, polipropilen lif ve yüksek performanslı genleştirici maddenin köpük betonun mekanik özelliği üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada hidrasyonun orta-geç aşamalarında, köpük betonun büzülme özelliği

göstermiştir. Su-çimento oranı 0,3 ile 0,5 arasında olduğunda ve oran büyüdükçe, köpük betonun büzülmesi o kadar küçülmüştür fakat su miktarı arttıkça dayanımı azalıştır. Rasgele dağılımdaki lifler köpük betonun büzülmesini azaltmıştır ve %8 genleştirici madde içeriği köpük betonun deformasyon büzülmesini etkili bir şekilde telafi edebilir, sonuçlarına varılmıştır.

Yapılan çalışmada gözenekli agreganın köpük betonun mekanik ve termal özellikleri üzerindeki etkisine bakılmıştır. Kılcal su emme ve büzülme testi sonuçlarına göre; Köpük betonda hafif ve gözenekli agrega kullanmak; kılcal taşımayı düşürür bunun sebebi kullanılan agreganın su emme kapasitesinin düşük olmasıdır. Köpük betonda hafif agrega kullanımı kuruma büzülmesinin hızını azaltmaya yardımcı olur ve ayrıca betonu istenmeyen çatlamalardan korur (Namsone vd. 2016).

Bu çalışmada, köpük betonun taze ve sertleştirilmiş durumlarındaki mekanik özellikleri araştırılmıştır. Köpüklü beton genellikle sıradan Portland çimentosu, ince agregalar, köpürtücü ajan, katkılar ve sudan yapılır. Bu çalışmada metakaolin ve su azaltıcı katkı maddesi karışıma ikame edilmiştir. Metakaolin kullanımı normal ve köpüklü beton için basınç dayanımının yanı sıra eğilme dayanımını da geliştirmiştir (Mohammad ve Shawnim 2017).

Yapılan çalışmada, köpük beton karışımının agrega stabilitesini arttırarak otoklavlanmayan betonun ısı yalıtım özelliklerinin iyileştirilmesi konusundaki araştırmalara ayrılmıştır. Çalışma, mineral katkıların harç karışımındaki köpük stabilite indeksi ve köpük beton yoğunluğu ve termal iletkenlik azalması üzerindeki etkisini göstermektedir. Mineral modifiye edici katkılar eklenerek köpük beton üretilmiştir. Bir malzemenin yoğunluğunu ve termal iletkenliğini azaltmak ve çimento tasarrufu nedeniyle teknik ve ekonomik etkiye ulaşmak için mineral katkı bir adımdır. Bu araştırmanın sonuçları, düşük yoğunluklu köpüklü beton üretimi için üretim atığının kullanılmasına izin vererek çevresel sorunların çözülmesine katkıda bulunmaktadır (Mashkin vd. 2018).

Bu çalışmada protein bazlı bir köpük oluşturunu madde kullanılmıştır. Önceden oluşturulmuş köpük, toz cam ve plastik atıklar kullanılmış değışen yoğunluklarda yapılan farklı karışımların işlenebilirliği ve mukavemeti araştırılmıştır. Köpük boşluk karışımlarının gözenek dağılımını ve mukavemetle ilişkisini belirlemek için analiz yapılmıştır. Toz cam dolgu kullanılan köpük beton, plastik dolgu kullanılan köpük betona göre daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir. Geri dönüştürölmüş cam dolgu köpük betonda, taşıyıcı duvar uygulamaları için kullanılmasına izin verecek yeterli basınç dayanımı göstermiştir. Plastik dolgulu köpük beton yalıtım amaçlı kullanılabilir (Chandni ve Anand 2018).

Ramamurthy vd. (2009), köpük betonun bileşenleri, karışım tasarımı, üretimi, taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerine yapılan bilimsel çalışmaları sınıflandırmıştır. Bu çalışmaya dayanarak, köpük betonun karışım tasarımı, yoğunluğu ve basınç dayanımı konularını kapsayan araştırmaların sonuçları Çizelge 2.5'te sunulmuştur.

Çizelge 2.5 Köpük beton üretim metotlarının yoğunluk ve basınç dayanımına etkisi (Ramamurthy vd. 2009).

Yazar ve Yıl	Çimento Dozajı Bileşenler	k/c	s/c	UK/c	Yoğunluk Aralığı (kg/m ³)	Basınç Dayanımı (MPa, 28g)
McCormick (1967)	335-446	0,79-2,8	0,35-0,57		800-1800	1,8-17,6
Tam vd. (1987)	390	1,58-1,73	0,6-0,8		1300-1900	1,81-16,72
Regan ve Arasteh (1990)	Hafif agregalı Çimento, kum, UK	0,6	0,45-0,6		800-1200	4-16 0,6-10 (91gün)
Van Deijk (1991)					280-1200	
ACI 523.1R-1992	Çimento hamuru				240-640 (KY)	0,48-3,1
	Çimento-kum				400-560 (KY)	0,9-1,72
Hunaiti (1997)		3			1667	12,11
Kearsly ve Booyens (1998)	Çimento-UK (yer değiştirme)				1000-1500	2,8-19,9
	270-398	1,23-2,5	0,61-0,82		982-1185 (KY)	1-6 3-15 (77gün)
Durack ve Weiqing (1998)	137-380		0,48-0,7	1,48-2,5	541-1003 (KY)	
Aldridge (2000)	Çimento-kum				400-1600	0,5-10
Kearsly ve Wainwright (2001)	Çimento ve UK				1000-1500	2-18
Tikalsky vd. (2004)	Çimento, 149-420		0,4-0,45		490-660	0,71-2,07
	Çimento, kum/UK 57-149		0,5-0,57		1320-1500	0,23-1,1
	300	1,83-3,17	0,5		1000-1400	1-2
Jones ve McCarty (2005)			1,11-1,56	1,22-2,11	1000-1400	3,9-7,3
Jones ve McCarty (2005)	500	1,5-2,3	0,3		1400-1800	10-26
			0,65-0,83	1,15-1,77	1400-1800	20-43
Nambiar ve Ramamurthy (2006)	Çimento-kum (kaba)	1 'den 3 'e değişen filler /c oranlı ve %0 %100 UK yer değişimli			800-1350 (KY)	1-7
	Çimento-kum (ince)				800-1350 (KY)	2-11
	Çimento-kum - UK				650-1200 (KY)	4-19

k/c: Kum/çimento s/c: su/çimento UK/c: Uçucu kül/çimento KY: Kuru yoğunluk (kg/m³).

3. MATERYAL METOT

Bu çalışmada kullanılan malzemeler ve özellikleri ayrıca bunların köpük beton üretiminde uygulanma yöntemleri bu kısımda sunulmuştur.

3.1. Malzeme Bileşenleri

Köpük betonun harç bileşenleri; bağlayıcı malzeme, agrega, su, mineral ve/veya puzolanik katkılar, genleştirici katkılar, kimyasal katkılardır. Deneysel araştırmalarda kullanılan çimento, uçucu kül, ince kum, polipropilen lif, sodyum hidroksit, kimyasal katkı, kalsiyum hidroksit malzemelerinin özellikleri bu bölümde sunulmuştur.

3.1.1 Çimento

Yapılan çalışmada bağlayıcı malzeme olarak Afyon Çimento Sanayi üretimi CEM I 42,5 R Portland Çimentosu kullanılmıştır. TS EN 197-1 (2012) standardına uygun CEM I 42,5 R çimentosunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 CEM I 42,5 R çimentosunun fiziksel özellikleri.

Deney			Sonuç
Analiz Grubu Fiziksel Özellikler	Kıvamlılık suyu (%)		30
	Özgül yüzey (cm ² /gr)		3315
	Priz süresi	Başlama (saat-dakika)	2sa.57dak
		Sonu (saat-dakika)	4sa.4dak
	Özgül ağırlık (g/cm ³)		3,12
	Basınç Mukavemeti (MPa)	2 gün	26,5
		7 gün	38,7

Çizelge 3.2 CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal özellikleri.

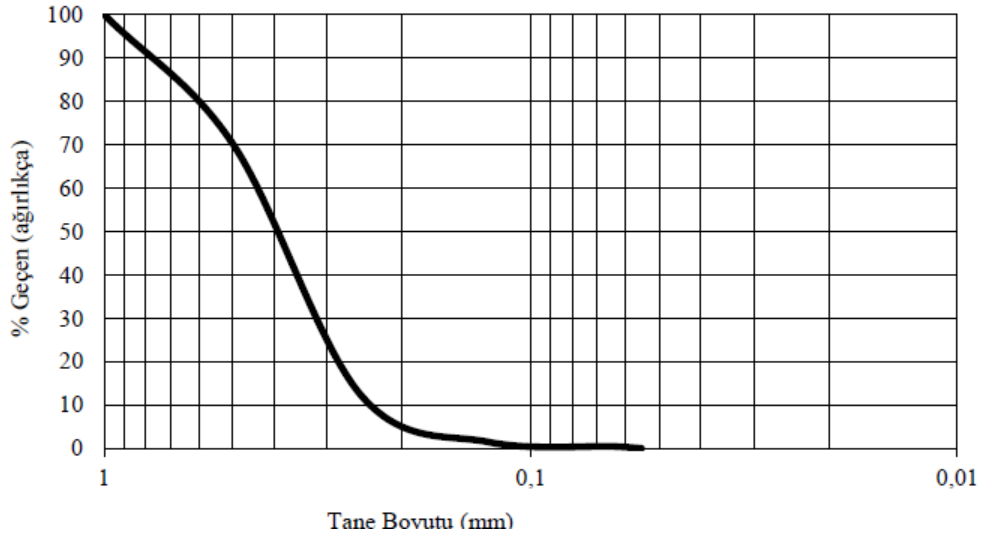
Oksit	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	K.K	Cl-	Serbest CaO
(%)	63,90	16,80	4,81	3,55	1,94	0,74	1,24	3,02	1,24	0,06	1,90



Resim 3.1 Çalışmada kullanılan çimento.

3.1.2. Kum ($d_{max}=1mm$)

Yıkanmış ve elenmiş ince kuma ait tane boyutu analiz grafiği Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Tane boyutu analizine göre göre 1mm’lik elekten %100 geçmiştir. Resim 3.2’de çalışmada kullanılan ince kumun resmi verilmiştir.





Resim 3.2 Çalışmada kullanılan kum.

3.1.3. Uçucu Kül

Ekonomik açıdan gelişen ülkeler daha çok enerji tüketmek zorunda kalmış bunun sonucunda enerji ihtiyacı doğmuştur. Türkiye'nin enerji üretim stratejisinin başında katı fosil yakıt ile çalışan termik santraller gelmektedir. Bu termik santrallerde yakılan katı fosil yakıtlar sonucu cüruf ve uçucu kül denilen yan ürünler açığa çıkmaktadır (Kaplan ve Gültekin 2010). Uçucu kül, termik santrallerde kömür yakma işleminden sonra oluşan atık kalıntısıdır.

Ana kimyasal bileşimi, puzolanik özellik olarak kabul edilen SiO_2 ve Al_2O_3 'ü içerir. ASTM C 618 (1991) standardına göre uçucu küller iki sınıfa ayrılmaktadır. Bunlardan ilki F sınıfı uçucu küller olup bitümlü kömürün yakılması ile elde edilir. F sınıfı uçucu küller %10'dan daha az CaO içerdiği için düşük kireçli küller olarak adlandırılmaktadır. F sınıfı uçucu küller de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den fazladır. Diğer uçucu kül sınıfı ise C sınıfı uçucu küldür. C sınıfı uçucu küller, linyit veya yarı-bitümlü kömürün yakılması ile üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50'den fazla olan küllerdir. C sınıfı uçucu küller %10'dan fazla CaO içerdiği için yüksek kireçli küller olarak adlandırılmaktadır. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğini de bulundur (Alkaya 2009).

Yapılan bir çalışmada çimento ve kumun uçucu küle kısmen değiştirilmesi köpük betonun kuruma büzülmesini bir miktar azaltmıştır. Küresel yapısı sayesinde uçucu kül,

taze harç ve betonun işlenebilirliğini arttırmıştır. Portland çimentosunun uçucu külle kısmi olarak değiştirilmesinin tek dezavantajı, harç ve betonun düşük erken dayanımı olmuştur fakat nihai dayanımı arttırmıştır (Chindaprasirt ve Rattanasak 2011).

Bu çalışmada kullanılan uçucu kül yerel bir beton işletmesinden alınmıştır. Numunelerde kullanılan uçucu külün kimyasal özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir. Resim 3.3’de çalışmada kullanılan uçucu külün resmi verilmiştir. Uçucu külün ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) toplamı %88,2 olup F sınıfına girmektedir (ASTM C 618).

Çizelge 3.3 Uçucu kül kimyasal özellikleri.

Oksit	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	K.K
(%)	2,12	56,01	22,35	9,84	3,76	0,19	2,07	0,60	1,01



Resim 3.3 Çalışmada kullanılan uçucu kül.

3.1.4 Kimyasal Katkılar

Süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları, belirli bir beton karışımında beton kıvamını değiştirmeden su miktarının yüksek oranda azaltmaktadır ya da su miktarını değiştirmeden çökmeyi/yayılmayı yüksek oranda artıran veya her iki etkiyi birlikte oluşturan katkılarıdır (TS EN 934-2 2002).

3.1.4.1 Süper Akışkanlaştırıcı

Hazırlanan harç numunelerinde polikarboksilik esaslı iki farklı firmadan temin edilen süper akışkanlaştırıcı beton kimyasal katkısı kullanılmıştır. TS EN- 934 – 2 (1999) standardına uygun olan süper akışkanlaştırıcı beton kimyasal katkısının teknik özellikleri Çizelge 3.4’te gösterilmiştir. Resim 3.4’de çalışmada kullanılan süper akışkanlaştırıcı verilmiştir.

Çizelge 3.4 Süper akışkanlaştırıcı beton katkısının teknik özellikleri.

Malzeme özelliği	SA	SB
Görünüm	Koyu kahverengi – sıvı	Açık kahverengi – sıvı
Özgül ağırlık (20°C’de)	1,082 – 1,142 kg/l	1,18-1,22 kg/l
pH değeri	6- 7	8-10
Alkali içeriği (%)	≤ 3 (ağırlıkça)	≤ 6 (ağırlıkça)
Klor iyon içeriği (%)	≤ 0,10 (ağırlıkça)	≤ 0,12 (ağırlıkça)

SA: A Firmasına ait Polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı, SB: B Firmasına ait Polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı.



Resim 3.4 Çalışmada kullanılan süper akışkanlaştırıcı.

3.1.5 Su

Betonda karışım suyunun temel olarak iki görevi vardır. Birincisi çimento hidrasyonunu başlatıp bağlayıcılık kazandırmak diğeri ise betonda işlenebilirliği sağlamaktır. Birçok kaynakta, içilebilir nitelikteki suların beton karışım suyu olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmada Afyonkarahisar şebeke içme suyu kullanılmıştır.

3.1.6 Polipropilen Lif

Betonlarda çatlamayı, kırılmayı önleyebilmek ve sünek bir beton üretebilmek için beton içeriğinde çeşitli mekanik ve fiziksel özeliğe sahip lifler kullanılmaktadır. Bu liflerden birisi polipropilen liftir. Betona ikame edilen polipropilen lifler, belli oranda ikame edilmelidir. Tercih edilen lif özelliklerine göre polipropilen lif katkılı betonlar, özel uygulamalarda kullanılmaktadır. Polipropilen lifin en önemli özeliğinden birisi betonda oluşacak plastik rötre çatlak oluşumunu sınırlamasıdır (Topçu vd. 2016). Bu çalışmada üretilen köpük beton numunelerinde zamana ve hidrasyon sürecine bağlı olarak oluşabilecek rötre çatlaklarına karşı önlem amacı ile polipropilen lif kullanılmıştır. Resim 3.5’de kullanılan polipropilen lif verilmiştir.



Resim 3.5 Çalışmada kullanılan polipropilen lif.

3.1.7 NaOH

Köpük betonun üretimi için kullanılan köpüğün istenen yoğunlukta kararlı olması gerekir. Köpük oluşturuıcı maddeler yüzey aktif maddelerdir genellikle suyun yüzey gerilimini azaltarak köpük üretir. ASTM C 796 (2004) standardı köpük betonda kullanımı için köpük yoğunluğunu $32-64 \text{ kg/m}^3$ aralıkta önerir. Köpük betonun istenen yoğunluğuna ulaşmak için, köpük yoğunluğu düşük ise köpük hacmi arttırılır. Fakat yüksek dozajlar da köpük betonun mukavemetini etkiler. Dolayısıyla üretilen köpüğün yoğunluğunun artırılmasına ihtiyaç vardır. Sodyum hidroksit, sodyum karbonat ve sodyum klorür, ASTM tarafından önerilen köpük yoğunluğu aralığını elde etmek

amacıyla köpük çözeltisinin viskozitesini arttırmak için ortak iyon etkisine dayanılarak kullanılmaktadır (Siva vd. 2015). Köpük betonun basınç dayanımı, kütle yoğunluğu ve su emilimi, ısı iletkenliği gibi özellikler üzerinde NaOH etki etmektedir. Bu çalışmada, köpük yoğunluğunu ve stabilitesini arttırmak amacıyla sentetik köpük ajanının etkinliğini düzenlemek için sodyum hidroksit katkı malzemesi kullanılmıştır. Resim 3.6’da çalışmada kullanılan NaOH verilmiştir.



Resim 3.6 Çalışmada kullanılan NaOH.

3.1.8 Kalsiyum Klorür (CaCl_2)

Özellikle soğuk havalarda beton prizini hızlandırarak, betona dayanıklılık ve güç sağlar. Kür ve koruma işlemlerinin süresini azaltmak için ve betonun erken dayanım gelişimini arttırmak amacıyla kullanılır. Böylece kalıp alma süresini azalmış ve yapının servise alınma süresini kısaltılmış olunur (İnt. Kyn. 1). Bu çalışmada priz süresini hızlandırmak amacıyla Resim 3.7’de verilen CaCl_2 kullanılmıştır.



Resim 3.7 Çalışmada kullanılan kalsiyum klorür.

3.1.9 Genleştirilmiş Perlit

Perlit, silis esaslı doğal volkanik kayadıtan oluşmaktadır. Bu kayadıların belli boyutlarda kırılmasıyla ham perlit agregası elde edilir. Genleştirilmiş perlit agregası, ham perlitin farklı boyutlarda eleklerden geçirildikten sonra 900–1100 °C'de alev şokunda bünyesindeki suyu kaybetmesi sonucu tane hacminin yaklaşık 7 ile 20 misli artıran beyaz veya gri bir malzemedir. Perlitin hafifliği, kullanılabilme ve işlenebilme kolaylığı, ısıya dayanımı, asit ve bazlara dayanıklılığı normal betonlara göre termal açıdan daha iyi performans gösteren beton elde etmemizi sağlar (Gökçe vd. 2010). Bu alışmada Resim 3.8’de verilen genleştirilmiş perlit agrega olarak kullanılmıştır.



Resim 3.8 çalışmada kullanılan genleştirilmiş perlit.

3.1.10 Köpük Ajanı

Çalışmada Resim 3.9’da verilen yüksek düzeyde yüzey aktif sentetik köpük ajanı suda seyreltilerek kullanılmıştır.



Resim 3.9 çalışmada kullanılan köpük ajanı.

3.2 Metot

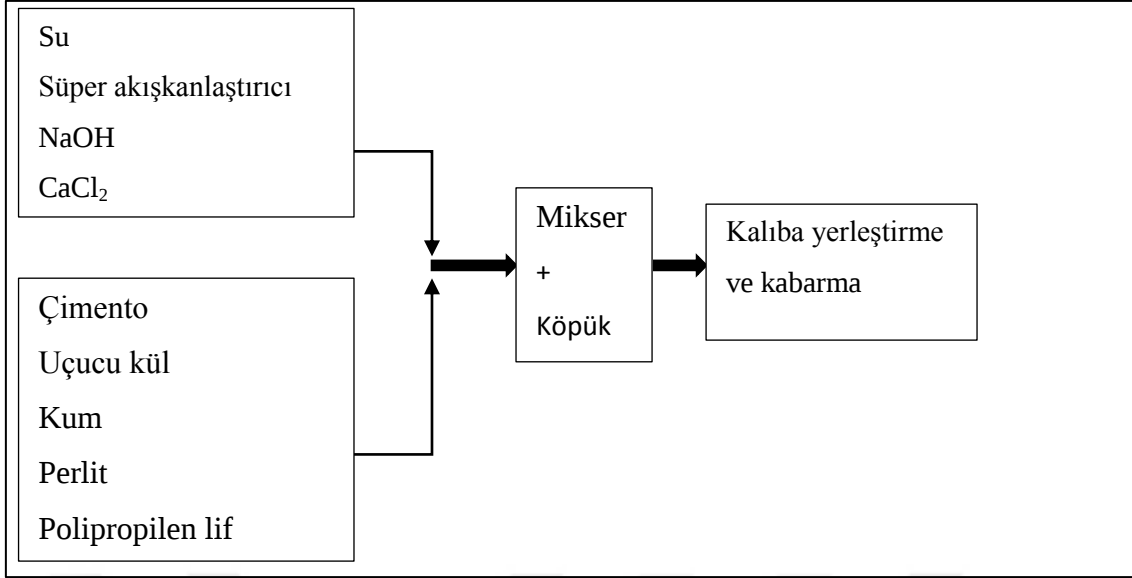
Çalışmanın başlangıcında bir birim sentetik köpük ajanına 25 birim su ilave edilerek seyreltilmiş karışım köpük jeneratörü vasıtasıyla kararlı yapıda köpük elde edilmiştir. Bu çalışmada numuneler üretilirken serilerde karışım oranlarına ve kullanılan malzemelere göre, önce suya süper akışkanlaştırıcı katkı sonra NaOH ve CaCl_2 ilave edilmiştir ve çözünme gerçekleşip homojen akıcı kıvamda karışım elde edilinceye kadar karıştırılmıştır. Sonra sırasıyla çimento, sonra mineral malzemeler (uçucu kül, kum, genleştirilmiş perlit), polipropilen lif eklenerek harç karışımı homojen hale gelinceye kadar karıştırılmıştır. Homojen haldeki ve akıcı kıvamdaki harcın içerisine en son önceden hazırlanan köpük ilave edilerek karıştırılmaya devam edilmiştir. Çalışmada kullanılan köpük makinesi ve üretilen köpük Resim 3.10'da verilmiştir. Köpüğün homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlendikten-sonra beklemeden harç 15x15x15 cm kalıplara dökülmüştür (Resim 3.11). Köpük beton üretim şeması Şekil 3.2'de verilmiştir.



Resim 3.10 Çalışmada kullanılan köpük makinesi (solda) ve üretilen köpük (sağda) verilmiştir.



Resim 3.11 Çalışmada kullanılan mikser (solda) ve kalıplanmış köpük beton numuneleri (sağda) verilmiştir.



Şekil 3.2 Köpük beton üretimi şeması.

Bu çalışmada, köpük betonun üretiminde üç farklı mineral malzeme katkı olarak katılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Karışım suyuna olan etkisini gözlemlemek için süper akışkanlaştırıcı (SA) katkı her bir seri için sırasıyla karışımdaki çimento miktarının %0,3-%0,4-%0,5 oranları arasında karışım suyuna ilave edilmiştir. Taze beton üzerinde akışkanlık değerlerini belirlemek amacıyla Marsh Konisi deneyi yapılmıştır. Bu numuneler üzerinde akışkanlık değerleri ve birim hacim ağırlık, basınç dayanım değerleri incelenmiştir (Çizelge 3.6; 3.7; 4.1; 4.2; 4.3; 4.4; 4.5). Karışım oranları Çizelge 3.5; 3.8; 3.9 ve 3.10'da verilmiştir. Karışımlarda bağlayıcı olarak CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Uçucu kül dolgu malzemesi olarak karışıma ilave edilmiştir. Karışım da su miktarının düşürerek, akışkanlığı sağlamak amacı ile polikarboksilik süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı (SA) kullanılmıştır. Her bir karışım serisinden en az 6 adet deney örneği üretilmiştir. Örnekler kalıptan çıkarıldıktan sonra mukavemet kazanmaları amacıyla 8 saat süre ile 60 °C sıcaklıkta serbest buhar kürü uygulanmıştır. Yüzeyi düzgün olmayan yani çökme veya genleşme göstermiş numunelerin yüzeyleri kesilerek düzeltilmiştir. Kür işlemi biten numuneler birim hacim ağırlıklarının belirlenmesi amacıyla sabit kütleye gelinceye kadar 60 °C sıcaklıktaki etüv içinde bekletilmişlerdir. Kuruma işlemi biten numuneler 0,1g hassasiyetli terazide tartılarak ağırlıkları belirlenmiştir. Birim hacim ağırlıkları belirlenen numuneler üstünde önce ultrases geçiş hızı deneyi daha sonra ise, 20 ton kapasiteli press ile basınç dayanımı hesaplanmıştır.

3.2.1 Ön Deneme Döküm Serilerin Karışım Oranları

Akışkanlaştırıcı malzemenin uygunluğu ve harç karışımını oluşturan malzemelerin uyumu hakkında ön bilgiler elde etmek amacı ile uçucu kül katkılı ön deneme çalışması gerçekleştirilmiştir. Köpük beton örnekleri için seçilen karışım oranları Çizelge 3.5’de sunulmuştur.

Pan tipi mikser içerisine sırasıyla; karışım suyu (süper akışkanlaştırıcı katkılarla beraber), polipropilen lif, çimento, mineral katkılar (kum, uçucu kül, genleşmiş perlit) miksera ilave edilmiştir. Malzemeler kütle ağırlıklarına göre oransal olarak katılmıştır. Sonuçları karşılaştırmak amacı ile taze harç yoğunlukları 500- 800 g/L arasında yoğunluklarda üretilmiştir. Karışımlara biri katkısız (kontrol serisi), ve iki farklı firmaya ait polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Bunlar Polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı (SA ve SB) katkı çimento kütlesinin %0,3, %0,4 ve %0,5 oranında katılmıştır (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5 Ön deneme döküm serilerin karışım oranları.

Karışım No	Çim.	UK	SA (%)	SB (%)	KY (g/L)	S/Ç	S/T	AS (s)	THY (g/L)
D1	4	1	0,3	-	60	0,63	0,50	65	500
D2	4	1	0,4	-	60	0,63	0,50	58	600
D3	4	1	0,5	-	60	0,63	0,50	45	700
D4	4	1	-	0,3	60	0,63	0,50	73	500
D5	4	1	-	0,4	60	0,63	0,50	65	600
D6	4	1	-	0,5	60	0,63	0,50	54	700

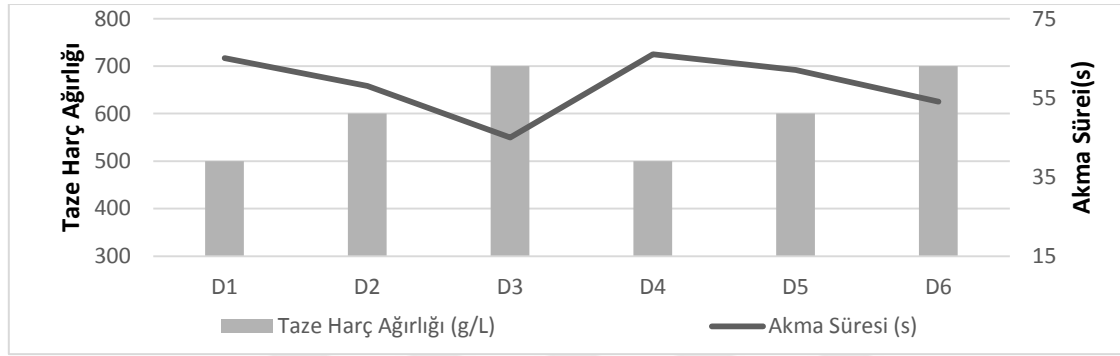
Kısaltmalar: UK: Uçucu kül, SA: A Firmasına ait Polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı, SB: B Firmasına ait Polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı, KY: Köpük yoğunluğu, S/Ç: Su/Çimento oranı, S/T: Su/Toz oranı, AS: Akma süresi (s), THY: Taze Harç Yoğunluğu. Polipropilen lif her karışıma çimentonun %0,1 oranında ilave edilmiştir.

Örneklere 8 saat süre ile 60 °C sıcaklıkta atmosferik buhar kürü uygulanmıştır. Daha sonra etüvde 60 °C sıcaklıkta değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Örneklerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanımını değerleri Çizelge 3.6’da sunulmuştur. Ön deneme serilerinin taze harç ağırlığı-akma süresi grafiği Şekil 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.6 Ön deneme örneklerinin akma süresi, köpük yoğunluğu, harç ağırlığı değerleri.

Karışım No	Akma Süresi (s)	Köpük Yoğunluğu (g/L)	Harç Ağırlığı (g/L)
D1	65	60	500
D2	58	60	600
D3	45	60	700
D4	66	60	500
D5	62	60	600
D6	54	60	700

D: Ön döküm serisi.



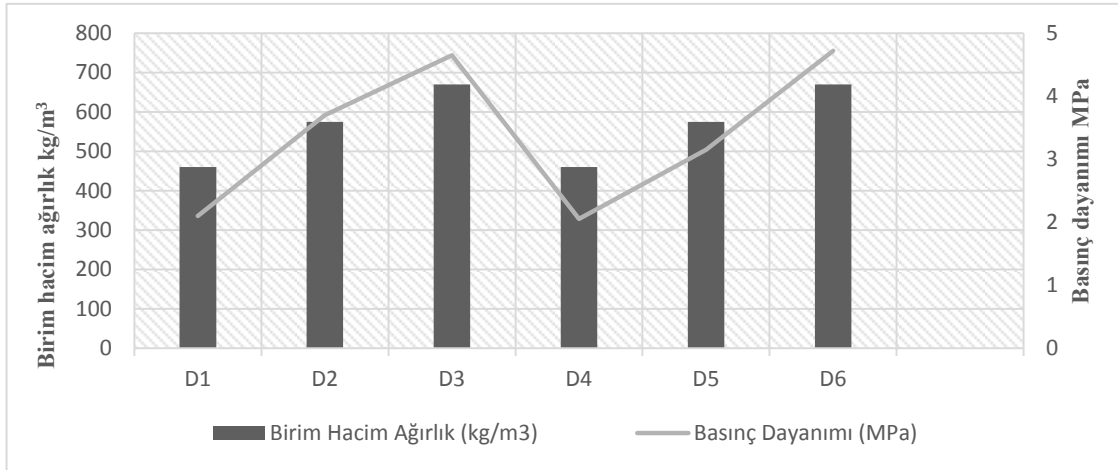
Şekil 3.3 Ön deneme serilerinin taze harç ağırlığı- akma süresi grafiği.

Buna göre polikarboksilik esaslı SA katkısının akışkanlık sürelerinin daha az (daha akışkan), buna karşılık SB katkısının SA katkısına göre akış sürelerinin daha fazla olduğu belirlenmiştir. Basınç mukavemeti değerleri (Çizelge 3.7- Şekil 3.4) SA katkılı örneklerde SB'ye göre daha yüksek çıkmıştır. Buna göre SA katkısının daha uygun olduğu değerlendirilerek diğer serilerde kullanılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 3.7 Ön deneme örneklerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı değerleri.

Karışım No	Birim Hacim Ağırlık (kg/m^3)	Basınç Dayanımı (MPa)
D1	460	2,10
D2	575	3,70
D3	670	4,65
D4	460	2,05
D5	575	3,15
D6	670	4,72

D: Ön döküm serisi. Not: Birim ağırlıklar ($\pm 5 \text{ kg/m}^3$)'e tamamlanarak sunulmuştur.



Şekil 3.4 Ön deneme serilerinin birim hacim ağırlığı- basınç dayanımı grafiği.

3.2.2 Uçucu Kül Katkılı Serilerin Karışım Oranları

Uçucu kül ile üretilen örnekler üzerinde CaCl_2 ve NaOH ilave edilerek üretilen köpük beton örneklerin karışım oranları ve taze harç özellikleri Çizelge 3.8’de verilmiştir. Karışımlarda çimento ve uçucu kül kütlece oransal olarak verilmiştir.

Çizelge 3.8 Uçucu kül katkı serilerin karışım oranları.

KN	Çim.	UK	SA (%)	KY (g/L)	S/T	AS (s)	THA (g/L)
U1	5	1	-	60	0,50	82	600
U2	5	1	0,3	60	0,48	45	610
U3	5	1	0,4	60	0,45	38	605
U4	5	1	0,5	60	0,50	30	600
U5	5	1	0,3	60	0,46	52	500
U6	5	1	0,4	60	0,48	43	505
U7	5	1	0,5	60	0,45	39	500

KN: Karışım no, UK: Uçucu kül, SA: Süper akışkanlaştırıcı katkı, KY: Köpük yoğunluğu, AS: Akış süresi, THA: Taze Harç ağırlığı, S/T: Su/Toz, Polipropilen lif her karışıma çimentonun %0,1 oranında ilave edilmiştir. CaCl_2 ve NaOH her karışıma çimentonun %0,5 oranında kullanılmıştır.

3.2.3 İnce Kum Katkılı Serilerin Karışım Oranları

Çalışmada üretilen serilerde ince kum kullanılmasının köpük beton üzerinde etkilerini incelemek amacıyla Çizelge 3.9’da verilen karışım oranlarını içeren seriler üretilmiştir.

Çizelge 3.9 İnce kum ve uçucu kül katkıları serilerin karışım oranları.

Karışım No	Çimento	UK	Kum	SA (%)	KY (g/L)	S/T	AS (s)	THA (g/L)
K1	5	-	1	0,5	60	0,50	32	600
K2	5	-	1,5	0,5	60	0,50	28	605
K3	5	0,5	1	0,5	60	0,50	37	600
K4	5	1	1	0,5	60	0,50	40	600
K5	5	1	1,5	0,5	60	0,50	38	615

KN: Karışım no, UK: Uçucu kül, SA: Süper akışkanlaştırıcı katkı, KY: Köpük yoğunluğu, AS: Akış süresi, THA: Taze Harç ağırlığı, S/T: Su/Toz, Polipropilen lif her karışıma çimentonun %0,1 oranında ilave edilmiştir. CaCl₂ ve NaOH her karışıma çimentonun %0,5 oranında kullanılmıştır.

3.2.4 Genleştirilmiş Perlit Katkılı Serilerin Karışım Oranları

Çalışmada üretilen serilerde perlit kullanılması köpük beton üzerinde etkilerini incelemek amacıyla Çizelge 3.10’da verilen karışım oranlarını içeren seriler üretilmiştir.

Çizelge 3.10 Perlit katkıları serilerin karışım oranları.

Karışım No	Çimento	UK	Perlit	SA (%)	KY (g/L)	S/T	AS (s)	THA (g/L)
P1	5	1	0,5	0,5	60	0,55	41	500
P2	5	1	1	0,5	60	0,58	52	480
P3	5	1	2	0,5	60	0,62	58	470

UK: Uçucu kül, SA: Polikarboksilik esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı, KY: Köpük yoğunluğu, AS: Akış süresi, THA: Taze Harç ağırlığı, S/T: Su/Toz, Polipropilen lif her karışıma çimentonun %0,1 oranında ilave edilmiştir. CaCl₂ ve NaOH her karışıma çimentonun %0,5 oranında kullanılmıştır.

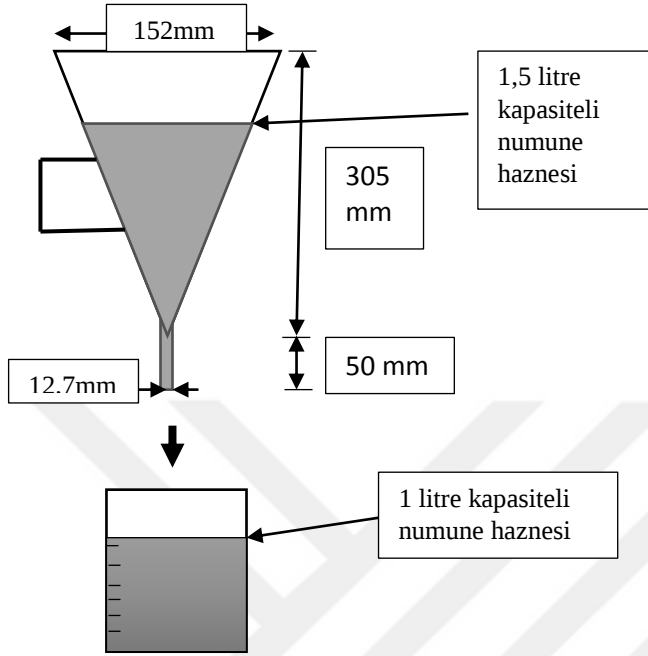
3.3 Beton Üzerinde Yürütülen Testler ve Analizler

Köpük beton örnekleri üzerinde yürütülen testler ve analizler bu bölümde sunulmuştur.

3.3.1 Marsh Konisi – Akışkanlık Deneyi

Bu deney 1,5 litre taze karışımın basit bir huniden 1 litrelik harç kısmının akma süresinin ölçülmesine dayanır. Akma süresi ölçülen 1 litrelik taze karışımın 1 dakikanın altında akması durumu sabit ve düzenli akış olarak ifade edilir (Çizelge 3.11). Akış

süreleri 1 dakikayı geçen karışımlar engelli veya zor akış olarak not alınır. Harç akmıyorsa “akmadı” olarak not alınır (Mohammad 2011). Yapılan çalışmada kullanılan Marsh Konisi Resim 3.12’de ve şematik Marsh Konisi Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Şematik Mars Konisi (Mohammad 2011).



Resim 3.12 Marsh Konisi deneyi.

Çizelge 3.11 Köpük beton harcı akma süresine göre yapılan sınıflandırma (Jones vd. 2003).

Temel sınıf	Tanımı	Alt sınıfı	Açıklama
1	1 litre <1 dk	A	Sabit-düzenli akma
2	1d<akma <2 dk	B	Kesikli olarak akma
3	0,5 litre<akış<1 litre	C	Hafifçe sıkıştırılarak akışın tamamlanması
4	Akma<0,5 Litre	-	Sadece 1. ve 2. akış sınıfları uygundur.
5	Akma yoktur	-	

3.3.2 Birim Ağırlık Deneyi

Köpük beton küp numunelerin 15x15x15 cm boyutlarında ki hacimleri hesaplanabilmesi için deney numuneleri sabit kütleye gelinceye kadar 60 °C sabit sıcaklıkta etüvde 24 saat süre ile kurutulmuştur. Kurutulan numuneler oda sıcaklığına kadar soğuması için bir süre bekletilmiştir. Sonra terazi kullanılarak 15x15x15 cm

boyutlarında küp numunelerin ağırlıkları alınmıştır (Resim 3.13). Elde edilen değerler numune hacimlerine bölünerek TS EN 772-13 (2002) standardına göre kuru birim ağırlıkları hesaplanmıştır. Kuru birim ağırlık verilen formül (3.1) ile hesaplanmıştır.

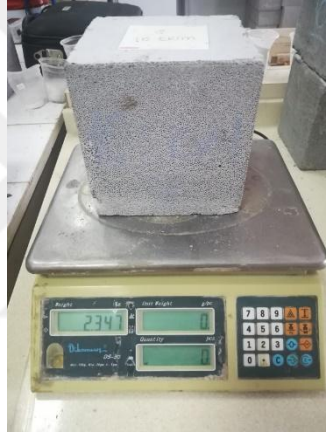
$$Dh = \frac{Mk}{Vh} \times 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3.1)$$

Burada:

Dh: Birim Hacim Ağırlığı (kg/m³)

Mk: Etüv Kuru Ağırlık (kg)

Vh: Numunenin hacmi (Boşluklar Dahil) (dm³)



Resim 3.13 Etüv kuru birim ağırlığı deneyi.

3.3.3 Köpük Beton Isı İletkenlik Değerlerinin Belirlenmesi

Isıl iletkenlik katsayısının (λ) belirlenmesi için Süleyman Demirel Üniversitesi'nde bulunan “Heat Flow Meter, (HFM-Fox 314) cihazı kullanılmıştır (Resim 3.14). Isı iletkenlik katsayısı TS EN 12664 (2009), TS EN 12667 (2003) ve ASTM C518 (2003)’e göre belirlenmiştir. Köpük beton örneklerin ısı iletkenlik katsayısı değerlerini belirlemek amacı ile üç farklı karışım serisinde plaka (30x30x5 cm) köpük beton örnekler üretilmiştir (Resim 3.15). Örnekler 70 °C’de değişmez ağırlığa gelinceye kadar etüvde kurutulduktan sonra birim ağırlıkları hesaplanmış ve bu şartlarda ısı iletim testi uygulanmıştır.



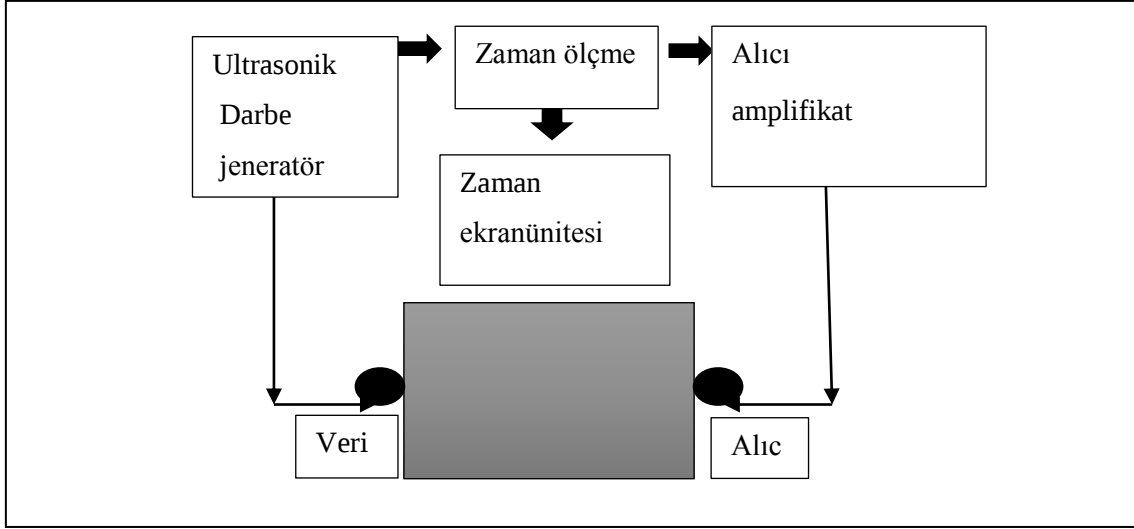
Resim 3.14 Köpük beton ısı iletkenlik değerlerinin belirlenmesi deneyi.



Resim 3.15 Çalışmada üretilen ısı yalıtım plaka örnekleri.

3.3.4 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Ultrases geçiş hızı deneyinde, numuneye iletilen ses dalgalarının bir tarafından diğer bir tarafına geçiş süresi ölçülerek, dalga hızı hesaplanmaktadır (Şekil 3.6) Ultrases cihazı, ses üstü dalgaların, probalar arasında kalan mesafeden ne kadar sürede geçtiğini mikro saniye biriminde belirtir. Hesaplanan ses dalgası hızı ile beton numunenin basınç dayanım değeri ve başka özellikleri arasında ilişki kurulabilmektedir (Erdoğan 2003). Sesin geçiş hızı köpük betonun yoğunluğuna, gözenekliliğine ve çatlak yapısına bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada küp numunelere yapılan ultrases deneyi Resim 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.6 Ultrases cihazı çalışma mekanizması (Abdullah vd. 2016).

Ses üstü dalga'nın geçiş süresi cihaz üzerinde okunduktan sonra formül (3.2) yardımıyla dalga hızı hesaplanmaktadır. Burada;

V = Ultrases geçiş hızı (m/s)

L = Yüzeyler arası mesafe (cm)

T = Dalga'nın numuneden geçiş süresi (s)

$$V = \frac{L}{t} \quad (3.2)$$



Resim 3.16 Küp numune ultrases deneyi.

3.3.5 Basınç Mukavemeti Deneyleri

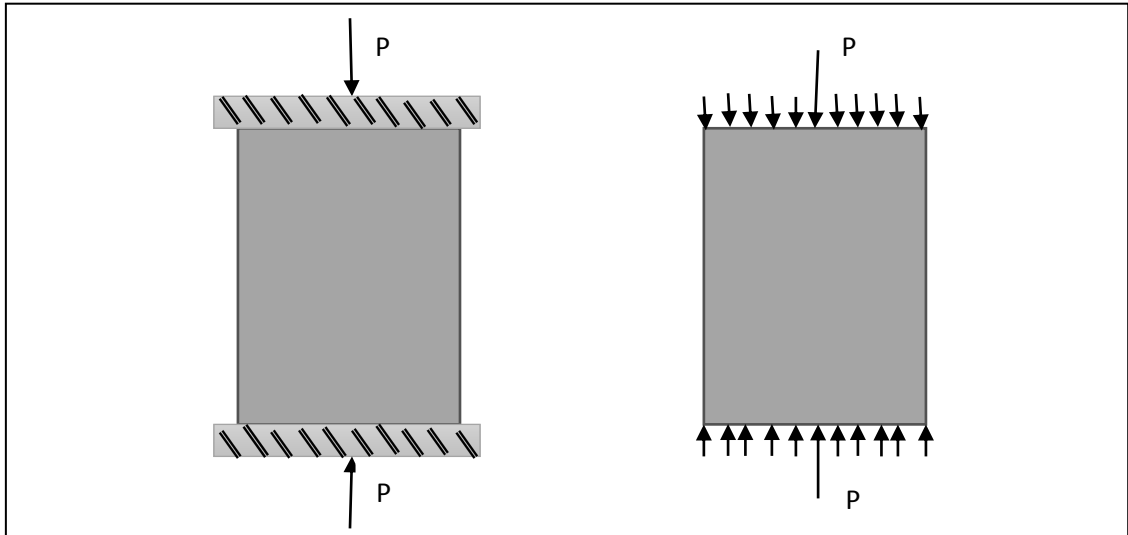
Köpük beton küp numuneler sabit kütle elde edilinceye kadar 60 °C sabit sıcaklıkta etüvde 24 saat süreyle kurutulmuştur. Etüvden çıkan numuneler ortam sıcaklığına kadar soğuması için bir süre bekletilmiştir. Beton standartlarının belirtildiği kür şartlarından sonra numuneler 20 ton kapasiteli beton basınç presinde üniform basınç yükü altında kırılmaya bırakılmıştır (Şekil 3.7). Basınç dayanımını belirlemek için 20 ton basınç kapasiteli beton basınç presi kullanılmıştır (Resim 3.17). Basınç dayanımı deneyinde (150 x 150 x 150) mm ebatlarında köpük beton küp numuneleri kullanılmıştır. Gerilme artışı 0,5 MPa/sn olacak şekilde sabit bir hızda, sürekli ve darbesiz olarak numune kırılncaya kadar basınç uygulanmıştır. Yük değerleri kaydedilmiş buradan formül (3.3) ile basınç dayanımı hesaplanmıştır.

$$f_b = P_k / A_0 \quad (3.3)$$

f_b = Basınç dayanımı (MPa)

A_0 = Yüzey alanı (mm²)

P_k = Kırılma anındaki yük (N)



Şekil 3.7 Beton numuneye basınç yükü uygulaması (Erdoğan 2003).



Resim 3.17 K p numunelere uygulanan basınç mukavemeti deneyi.

3.3.6 Mikroyapı İncelemeleri

Bu çalışmada üretilen köpük beton numunelerinden elde edilen parçalar, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezine götürülerek Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri yapılmıştır. Numunelerin SEM analizleri için LEO marka 1430 VP model SEM cihazı W (Tungsten) kullanılmıştır.

Harç numunelerinin X ışını kırınımı (XRD) yöntemi ile faz analizleri ve kristal yapı tanımlaması bakır x ışını tüplü Shimadzu XRD – 6000 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Basınç mukavemeti deneyi sonrası köpük beton numunelerinden alınan parçalar çok ince    t l p, cihazın numune tutucusuna konarak kristal faz analizi yapılmıştır. Resim 3.18’de mikroyapı inceleme için numune alım işlemi verilmiştir.



Resim 3.18 Mikroyapı inceleme için numuneden parça alım işlemi.

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Yapılan çalışma farklı serilerde üretilen köpük beton numunelerinin Marsh Konisi (akışkanlık), ultrases geçiş hızı, basınç mukavemeti, birim hacim ağırlık deneyi, ısı iletkenlik değerlerinin belirlenmesi ve mikro yapı incelemeleri bu bölümde verilmiştir.

4.1 Süper Akışkanlaştırıcı Etkisi ve Marsh Konisi Sonuçları

Bu bölümde süper akışkanlaştırıcı etkisi ve Marsh Konisi akış süreleri sonuçları sunulmuştur. Bütün serilerde köpük yoğunluğu 60 g/L'dir. Süper akışkanlaştırıcı etkisi ve Marsh Konisi deneyleri döküm serisi sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.1'de taze ağırlığı ve akma süresinin karşılaştırıldığı grafik verilmiştir.

Uçucu kül katkılı serilerde akışkanlaştırıcı miktarları eşit olan U2-U5, U3-U6 ve U4-U7 serileri kendi arasında karşılaştırılırsa taze harç ağırlığı azaldıkça akış süresi uzamıştır. SA katkısı bulunmayan U1 serisinde en yüksek akış süresi elde edilmiştir. Kum katkılı serilerin kum miktarı arttıkça taze harç ağırlığında artış görülmüştür. Taze harç ağırlığı artması ile bu numunelerin akış süresinde azalma görülmüştür. Perlit katkılı serilerin perlit miktarı arttıkça taze harç ağırlığında düşüş görülmüştür ve akış süresinde artma meydana gelmiştir. Aynı birim ağırlık ve aynı S/T oranlarında SA katkısı arttıkça akış süreleri kısalmıştır. Diğer bir deyimle SA katkısı taze harç karışımlarda akışkanlığı artırmıştır.

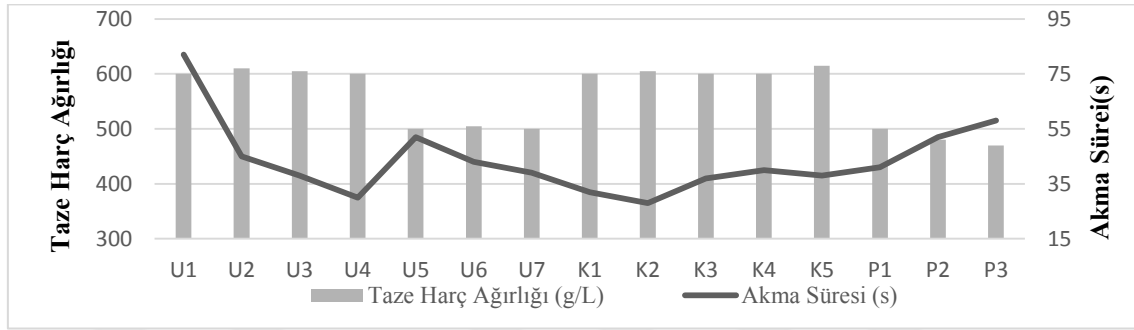
Çizelge 4.1 Köpük beton numunelerinin akma süresi, köpük yoğunluğu, harç ağırlığı değerleri.

Karışım No	Akma Süresi (s)	Köpük Yoğunluğu (g/L)	Taze Harç Ağırlığı (g/L)
U1	82	60	600
U2	45	60	610
U3	38	60	605
U4	30	60	600
U5	52	60	500
U6	43	60	505
U7	39	60	500
K1	32	60	600
K2	28	60	605
K3	37	60	600
K4	40	60	600
K5	38	60	615

Çizelge 4.1 (Devam) Köpük beton numunelerinin akma süresi, köpük yoğunluğu, harç ağırlığı değerleri.

P1	41	60	500
P2	52	60	480
P3	58	60	470

U: Uçucu kül katkılı örnekler, K: Kum katkılı örnekler, P: Perlit katkılı örnekler.

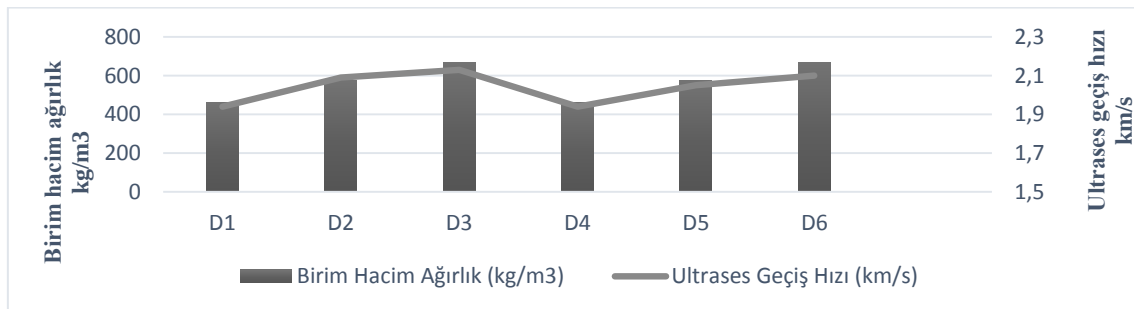


Şekil 4.1 Köpük beton serilerinin taze harç ağırlığı- akma süresi grafiği.

4.2 Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları

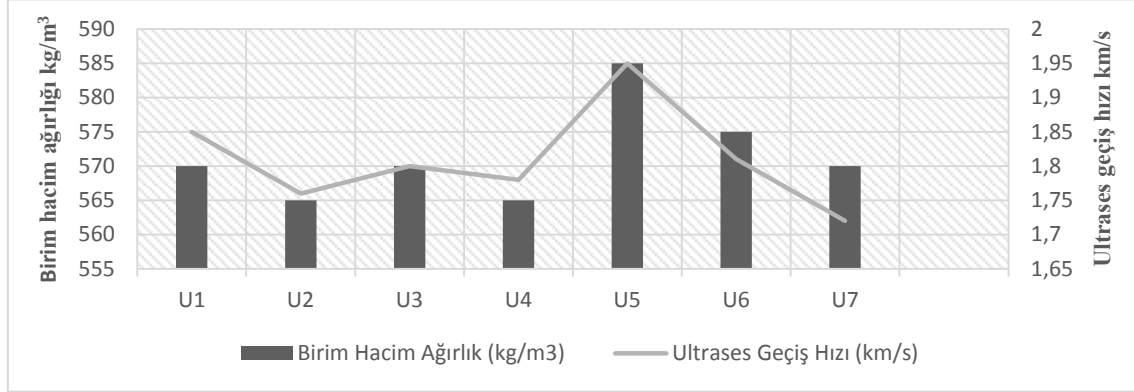
Betonda boşluk yapısının artmasıyla birlikte sesin geçiş hızını azalmaktadır. Bu durumun sebebi sesin hava içinde, katı ve sıvı maddelere kıyasla daha yavaş yol kat etmesidir. Birim hacim ağırlığının artması üretilen numunelerin daha yoğun yapıda olmasına yol açar böylece yoğun olan numunelerin ultrases geçiş hızının artması beklenmektedir.

Şekil 4.2’de Çalışmada üretilen ön deneme serilerinde uygulanan ultrases geçiş hızı deney sonuçları verilmiş ve bu numunelerde birim hacim ağırlığının artması ile ultrases geçiş hızı da artmıştır.



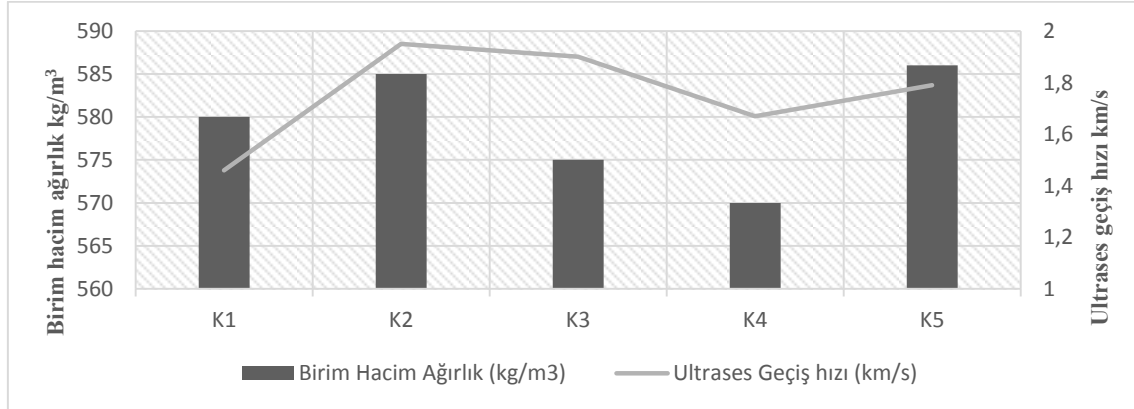
Şekil 4.2 Ön döküm serilerin birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı grafiği.

Şekil 4.3’de Çalışmada üretilen uçucu kül katkılı numunelerde uygulanan ultrases geçiş hızı deney sonuçları verilmiştir. Uçucu kül ilave edilen tüm numuneler karşılaştırıldığında genel olarak birim hacim ağırlığının azalması ile ultrases geçiş hızı da azalmıştır.



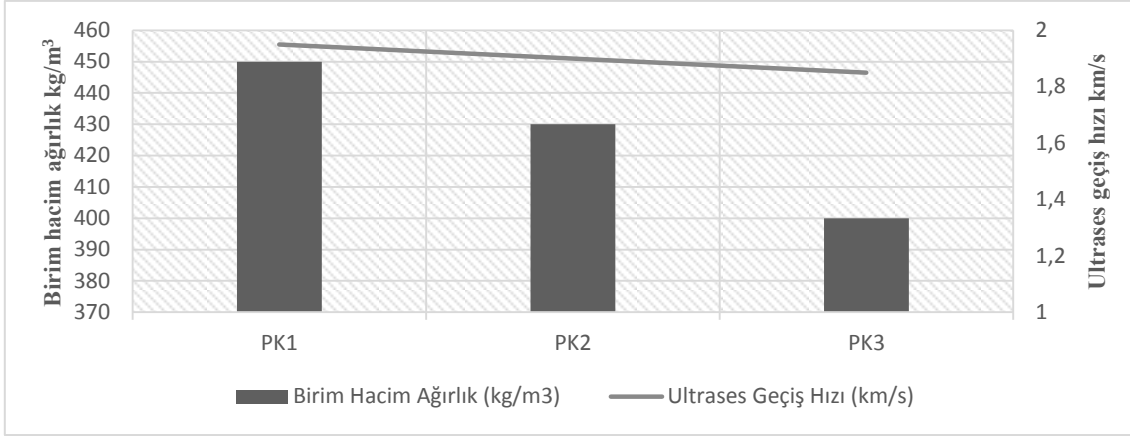
Şekil 4.3 Uçucu kül ilaveli serilerin birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı grafiği.

Şekil 4.4’de Çalışmada ince kum katkılı üretilen numunelerde uygulanan ultrases geçiş hızı deney sonuçları verilmiştir. Kum ilaveli seriler incelendiğinde genel olarak birim hacim ağırlığının artması ile ultrases geçiş hızı da artmıştır.



Şekil 4.4 Kum ilaveli serilerde birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı grafiği.

Şekil 4.5’de Çalışmada üretilen genişletilmiş perlit ikameli numunelerde uygulanan ultrases geçiş hızı deney sonuçları verilmiş ve bu numunelerde birim hacim ağırlığının azalması ile ultrases geçiş hızı da azalmıştır.



Şekil 4.5 Genleştirilmiş perlit ilaveli serilerin birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı grafiği.

Karışım suyuna ilave edilen SA katkılı serilerde aynı S/T oranlarında karışıma ilave edilen SA katkısı karışımların akışkanlığını arttırmış kalıba daha düzenli yerleşerek homojen bir gözenek yapısı sağlamıştır. Örneklerin birim ağırlıklarındaki artışla ultrases geçiş hızları da artmıştır.

Genel olarak ultrases geçiş hızları örneklerin birim ağırlığı ile ilişkili olup, birim ağırlık değerleri azaldıkça ultrases geçiş hızları da uzamakta, birim ağırlık arttıkça geçiş süresi kısalmaktadır. Buna birim ağırlık azaldıkça bünyenin toplam gözenekliliğinin artması ve buna bağlı olarak ultrases geçiş hızının da azalmasına neden olduğu değerlendirilmektedir.

4.3 Köpük Beton Isı İletkenlik Değerlerinin Belirlenmesi

Isı iletkenlik değerleri ölçülen plaka numuneler ticari gazbetonun TS 825 (2009) standart değerleri ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.2). Buna göre; Aynı birim ağırlık değerleri için köpük beton örneklerde benzeri ürünlere göre daha düşük ısı iletkenliği iletkenlik değerleri elde edilmiştir. Aynı birim hacim değerlerinde üretilen uçucu kül katkılı köpük beton örneklerin kum katkılı örneklere göre daha düşük iletkenlik değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir. Bunu başlıca nedeni olarak uçucu külün kendi morfolojik yapısındaki gözeneklilikten kaynaklandığı düşünülmektedir. Perlit katkılı seride ticari gazbeton örneklere göre daha düşük değerler elde edilmiştir. Buna

genleşmiş perlitin hafifliği ve kısmen kapalı gözenekli yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.2 Köpük beton numuneleri üzerinde yapılan ısı iletkenlik deneyi sonuçları.

Seri	Köpük Ağ. (g/L)	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Deney örnekleri (W/m.K)	Ticari Gazbeton (W/m.K)
U2	60	565	0,134	0,19
K4	60	570	0,152	0,19
P3	60	400	0,105	0,13

Ticari Gazbeton*: TSE 82.

4.4 Uçucu Kül Katkılı Serilerin Birim Hacim Ağırlık ile Basınç Dayanımı Sonuçları

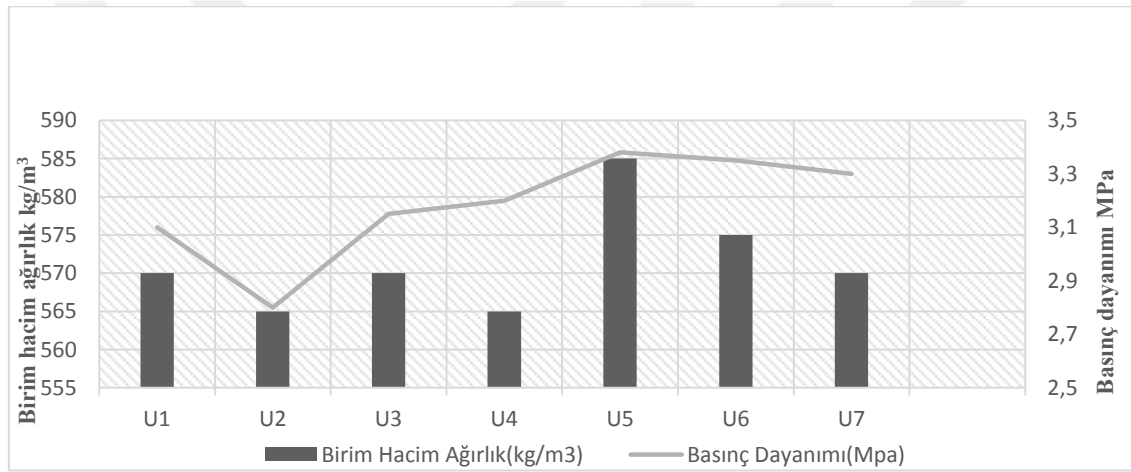
Burada, uçucu kül katkılı örneklerin kuru birim ağırlık değerleri 565 ile 585 kg/m³ arasında gerçekleşmiştir. Köpük beton örneklerin basınç dayanımı değerleri birim ağırlıklarına bağlı olarak 2,80 3,38 MPa arasında elde edilmiştir. Bu değerler TS 13655 (2015) standardında verilen köpük betonlarda istenen minimum (1,5 MPa) basınç mukavemeti değerlerini karşılamaktadır. Köpük beton örneklerde rötire çatlak gelişimi gözlemlenmemiştir. Diğer bir anlatımla uçucu kül katkını köpük beton numunelerin basınç mukavemeti değerlerini arttırdığı gözlenmiştir. Buna uçucu külün puzolanik etkisinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

U3 serisinde akışkanlaştırıcı kullanılması karışımda kullanılan su miktarını azalttığı için basınç dayanımı U1'e nazaran artış göstermiştir. Birim hacim ağırlıkları aynı olan U2 ve U4 serilerinde ise çimento kütlesinin U2'de %0,3, U4'de %0,5 oranında akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcı miktarındaki bu artış karışımdaki su miktarını düşürdüğü için U4 serisinin basınç dayanımı U2 serisine oranla artmıştır. Uçucu kül katkılı serilerin birim hacim ağırlık ile basınç dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.3'de verilmiştir. Birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.3 Uçucu kül katkılı serilerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı deneyi sonuçları.

Karışım No	BHA (kg/m ³)	BD (MPa)
U1	570	3,10
U2	565	2,80
U3	570	3,15
U4	565	3,20
U5	585	3,38
U6	575	3,35
U7	570	3,30

U: Uçucu kül BHA: Birim Hacim Ağırlık BD: Basınç Dayanımı.



Şekil 4.6 Uçucu kül katkılı serilerin birim hacim ağırlık basınç dayanımı grafiği.

4.4 İnce Kum Katkılı Serilerin Birim Hacim Ağırlık ile Basınç Dayanımı Sonuçları

İnce kum katkılı serilerin karışım oranlarının tamamında çimento miktarı, akışkanlaştırıcı miktarı, köpük yoğunluğu, S/T oranı sabit tutulmuştur. Genel olarak ince kum katkılı serilerde birim hacim ağırlığının artması ile basınç dayanımında artış gözlemlenmiştir. Çizelge 4.4’de ince kum katkılı serilerde birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı deneyi sonuçları verilmiştir. Şekil 4.7’de ince kum katkılı serilerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı grafiği verilmiştir.

İnce kum katkılı K1-K2 serilerde uçucu kül kullanılmamış fakat K1 serisinde 1 birim, K2 serisinde 1,5 birim kum kullanılmıştır. Bunun sonucunda K2 serisinin birim hacim

ağırlığı K1 serisine göre artmış ve buna bağlı olarak basınç dayanımında artış gözlemlenmiştir.

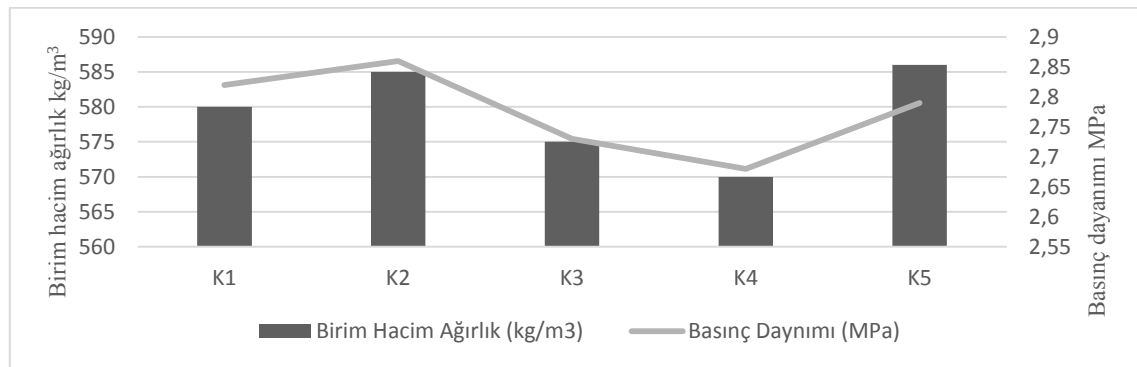
K3-K4 serilerinde kullanılan ince kum miktarları 1 birim olarak sabit tutulmuş ve her iki seride de uçucu kül kullanılmıştır. K3 serisinde 0,5 birim, K4 serisine 1 birim uçucu kül kullanılmıştır. Bunun sonucunda K4 serisinin birim hacim ağırlığı K3 serisine göre düşmüş ve buna bağlı olarak basınç dayanımında düşüş gözlemlenmiştir.

K4-K5 serilerinde 1 birim uçucu kül sabit tutulmuş ve her iki seride de ince kum kullanılmıştır. K4 serisinde 1 birim, K5 serisinde 1,5 birim ince kum kullanılmıştır. Bunun sonucunda K5 serisinin birim hacim ağırlığı K4 serisine göre artmış ve buna bağlı olarak basınç dayanımında artış gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.4 İnce kum katkılı serilerde birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı deneyi sonuçları.

Karışım No	BHA (kg/m ³)	BD (MPa)
K1	580	2,82
K2	585	2,86
K3	575	2,73
K4	570	2,68
K5	586	2,79

K: İnce kum BHA: Birim Hacim Ağırlık BD: Basınç Dayanımı.



Şekil 4.7 İnce kum katkılı serilerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı grafiği.

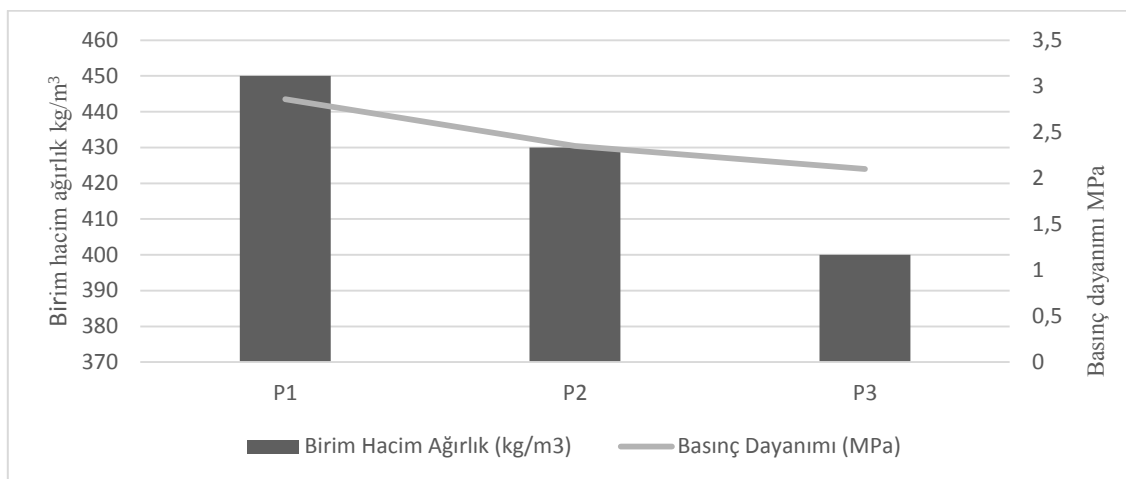
4.5 Genleştirilmiş Perlit Katkılı Serilerin Birim Hacim Ağırlık ile Basınç Dayanımı Sonuçları

Genleştirilmiş perlit ilaveli serilerin karışım oranlarında çimento miktarı, uçucu kül miktarı, akışkanlaştırıcı miktarı sabit tutulmuştur. Genleştirilmiş perlit ilaveli serilerde, genleştirilmiş perlit miktarı P1’de 0,5 birim, P2’de 1 birim ve P3’de 2 birimdir. Bu serilerde genleştirilmiş perlit miktarı artıkça birim hacim ağırlık değerleri düşmüştür. Buna bağlı olarak basınç dayanımlarında düşüş meydana gelmiştir. Bunun nedeni genleştirilmiş perlitin düşük yoğunluğa sahip hafif yapı agregası olmasından dolayı olabileceği ön görülmektedir. Çizelge 4.5’de genleştirilmiş perlit katkı serilerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı deneyi sonuçları verilmiştir. Şekil 4.8’de genleştirilmiş perlit katkı serilerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı grafiği verilmiştir.

Çizelge 4.5 Genleştirilmiş perlit katkı serilerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı deneyi sonuçları.

Karışım No	BHA (kg/m ³)	Basınç Dayanımı (MPa)
P1	450	2,86
P2	430	2,35
P3	400	2,10

P: Genleştirilmiş Perlit BHA: Birim Hacim Ağırlık BD: Basınç Dayanımı.



Şekil 4.8 Genleştirilmiş perlit katkı serilerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı grafiği.

4.6 Mikroyapı İnceleme Sonuçları

Mikroyapı inceleme sonuçları bu bölümde verilmiştir.

4.6.1 XRD Analizi Sonuçları

Yapılan çalışmada köpük beton numunelerinden özellikle U2 numaralı numune de XRD analizinde etrenjit fazının varlığı dikkat çekicidir. Seriler arasında en düşük mukavemet gelişimi de U2 numaralı numunededir. Bu nedenle etrenjit oluşumunun mukavemeti düşürdüğü sonucuna varılmaktadır. Diğer numune bileşimlerinde ise faz içeriklerinin mukavemet gelişiminde dikkate değer bir etkisinin olmadığı değerlendirilmiştir. Normal betonlarda CSH kristal pikinin yüksekliği ile artan mukavemet değerleri beklenir. Buna karşı köpük beton numunelerin CSH pik yükseklikleri ile mukavemet arasında düzenli bir ilişki gözlenmemiştir. Şekil 4.9’da XRD analizi uygulanan serilerin sonuçları verilmiştir. Şekil 4.9’ da XRD analizi uygulanan seriler verilmiştir.

Köpük beton örneklerinin birim ağırlık değerleri ile mukavemet gelişimleri arasında daha açıklanabilir bir ilişki vardır. Örneğin çizelge 4.6’da verilen en yüksek birim hacim ağırlığına sahip D3 numaralı numune en yüksek mukavemete sahiptir. En düşük birim hacim ağırlığına sahip U2 numaralı numune ise en düşük mukavemet değerine sahiptir.

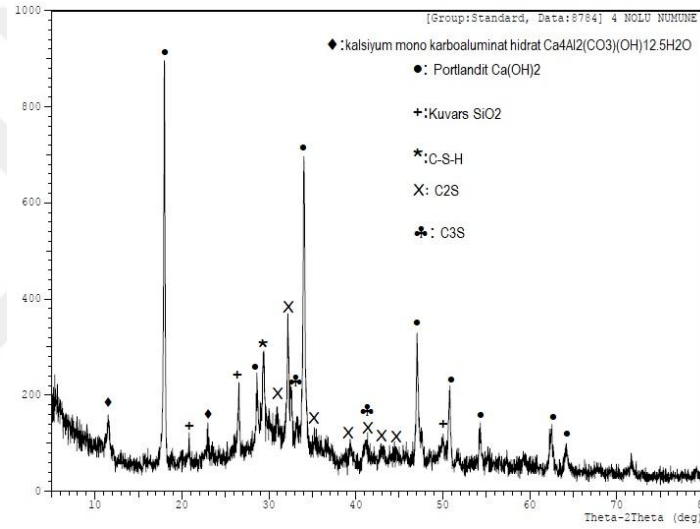
Çimento miktarının artışı ile Ca(OH)_2 fazındaki artış dikkat çekicidir (U3, U2 ve U5 numaralı numuneler). Çimento miktarı arttıkça CSH kristal pik yükseklikleri de arttırmıştır. Ancak bu artışa paralel bir mukavemet artışı gözlenmemektedir.

Sonuç olarak köpük beton numunelerinin fiziksel özelliklerinin (yoğunluk gibi) mukavemet gelişiminde mineralojik özelliklerinden daha baskın olduğu sonucuna varılmıştır.

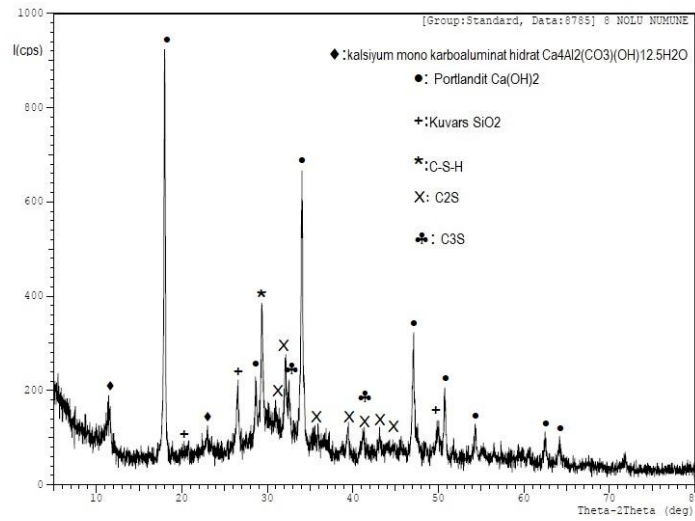
Çizelge 4.6 XRD ve SEM yöntemi uygulanan numunelerin hammadde bileşenleri, birim hacim ağırlık, mukavemet değerleri.

Seri	Çimento	UK	Akış. Katkı (%)	BHA (kg/m ³)	BD (Mpa)
D2	4	1	0,4	575	3,70
D3	4	1	0,5	600	4,65
D5	4	1	0,4	575	3,15
U2	5	1	0,3	565	2,80
U3	5	1	0,4	570	3,15
U5	5	1	0,3	585	3,30

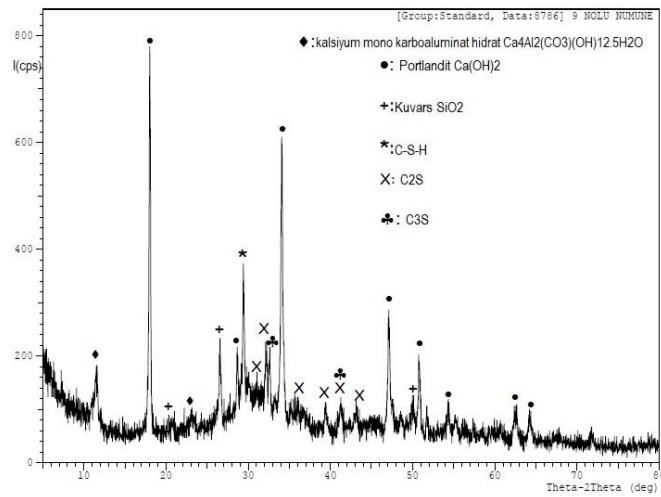
D: SA1 katkılı ön döküm serisi U: Uçucu kül UK: Uçucu kül BHA: Birim Hacim Ağırlık BD: Basınç Dayanımı Polipropilen lif her karışıma çimentonun %0,1 oranında ilave edilmiştir. NaOH U3, U2, U5 karışımları için çimentonun %0,5 oranında kullanılmıştır.



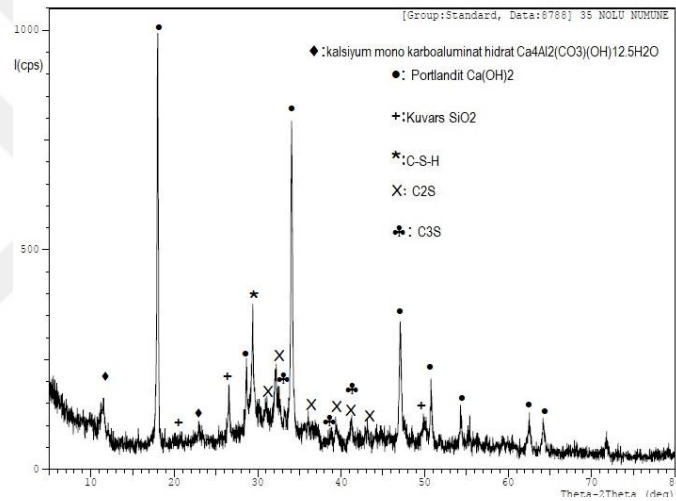
D2



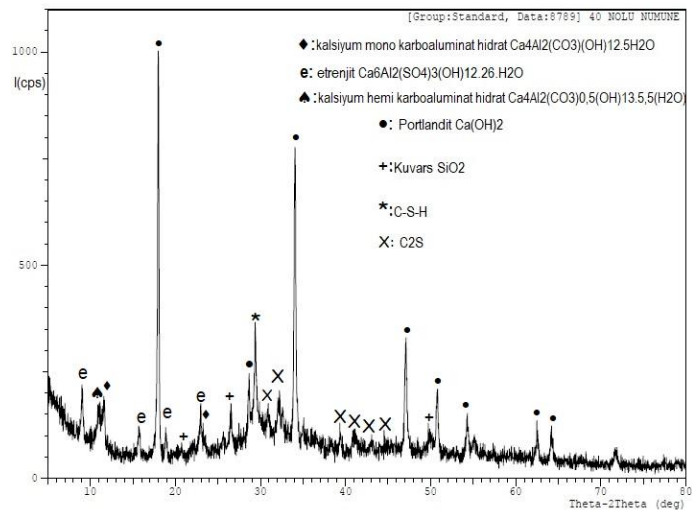
D3



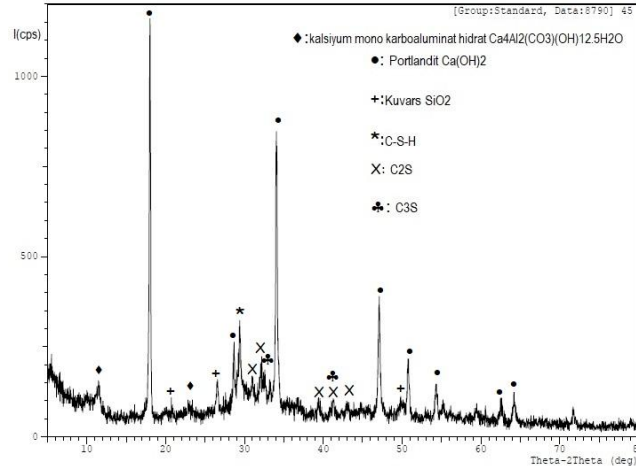
D5



U3



U2

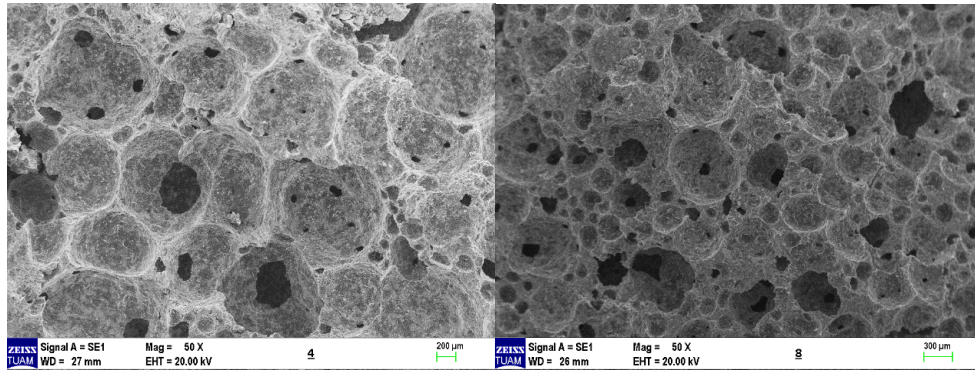


U5

Şekil 4.9 XRD analizi uygulanan deney örnekleri.

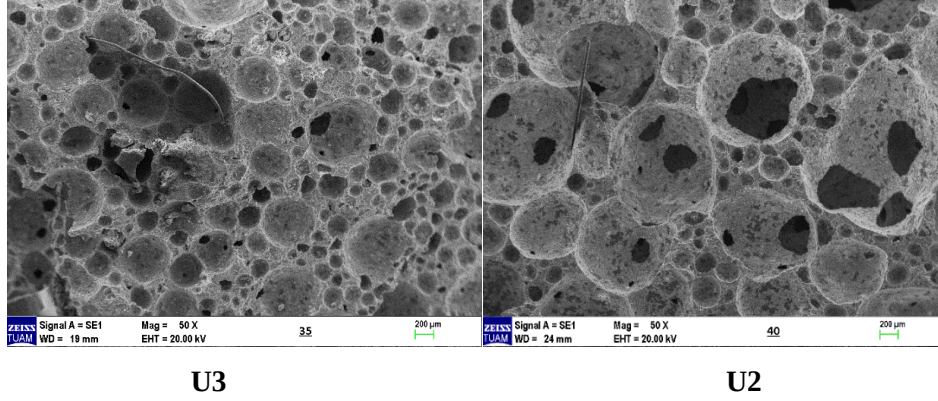
4.6.2 Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) İncelemeleri

Yürütülen çalışmada köpük beton örneklerinin içyapı incelemeleri için seçilen numuneler üstünde Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) yöntemi ile gözlemler yapılmıştır. Numuneler arasında hammadde karışımları, birim hacim ağırlığı, basınç dayanımı, seçilen 6 numune üstünde içyapı gözlemleri yapılmıştır. SEM çalışmalarında seçilen örneklerden dikkat çekici iki seri vardır bunlar en düşük mukavemete sahip U2 serisi ve en yüksek mukavemete sahip D3 serisidir. Resim 4.1’de üretilen köpük beton numunelerinin 20X büyütmelemlerle yapılan gözlem sonuçlarında bulunan hücre yapısı fotoğrafları verilmiştir. Köpük beton numunelerinin birim hacim ağırlık değişkenine bağlı olarak hücre boyutlarının önemli ölçüde değiştiği gözlenmiştir.



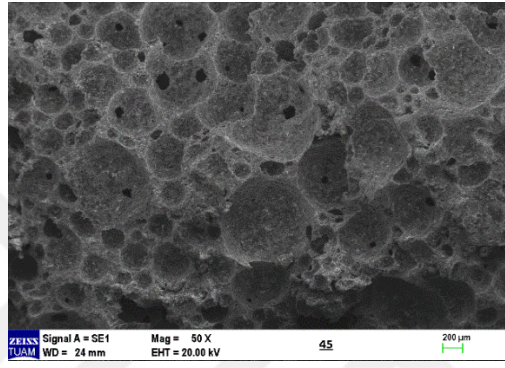
D2

D3



U3

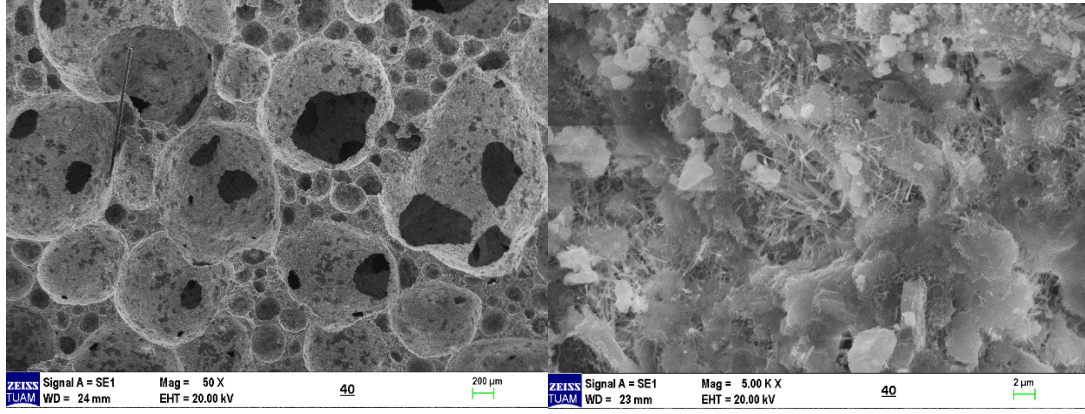
U2



U5

Resim 4.1 Köpük beton numunelerinin hücre yapıları.

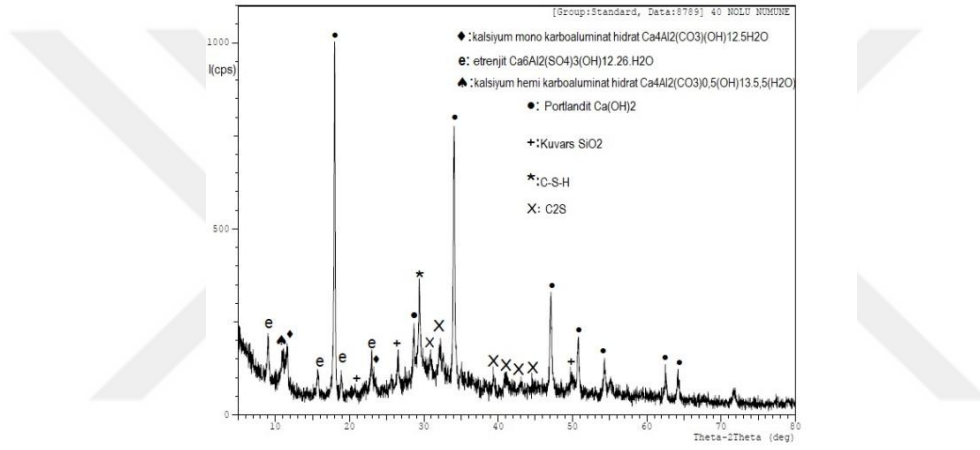
U2 ve D3 numaralı seriler mukavemet değerleri göz önüne alınarak karşılaştırma yapılırsa, en düşük mukavemete sahip U2 numaralı numunenin gözenek boyutlarının, en yüksek mukavemete sahip D3 numaralı numunenin gözenek boyutlarından daha büyük olduğu gözlenmektedir. Gözenek boyutlarındaki bu artış kendini hacim ağırlığındaki düşüklükte de göstermektedir. U2 numaralı numune en düşük hacim ağırlığına sahip numunedir. Bununla birlikte, SEM görüntülerinde iğnesel etrenjit yapısının yoğun varlığı dikkat çekicidir. Etrenjit gelişimi beraberinde genleşme kuvvetleri yarattığından, yapı içerisinde mukavemetin azalmasına neden olmuştur. U2 numaralı numunede etrenjit gelişimi XRD analizlerinde de tespit edilmiştir. Resim 4.2’de U2 numaralı serinin hücre yapıları verilmiştir. Şekil 4.10’da U2 numaralı serinin XRD analizleri verilmiştir.



a.

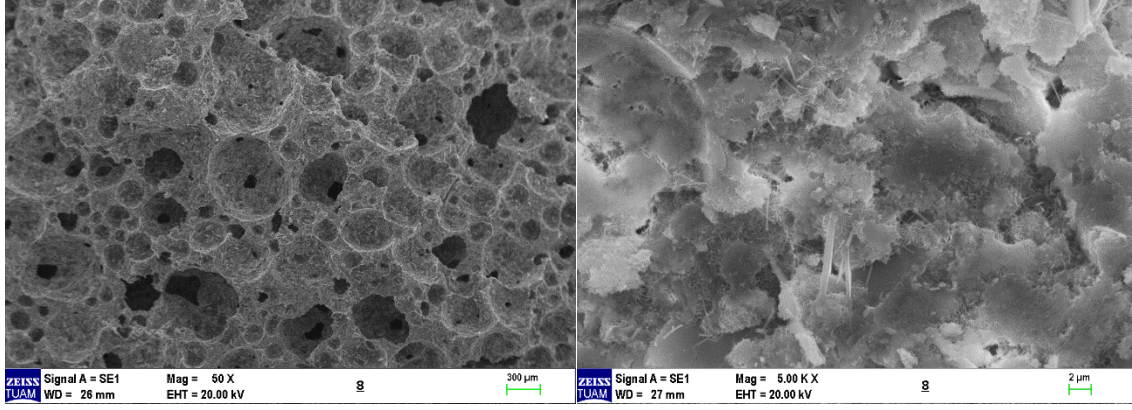
b.

Resim 4.2 U2 numaralı serinin hücre yapıları.

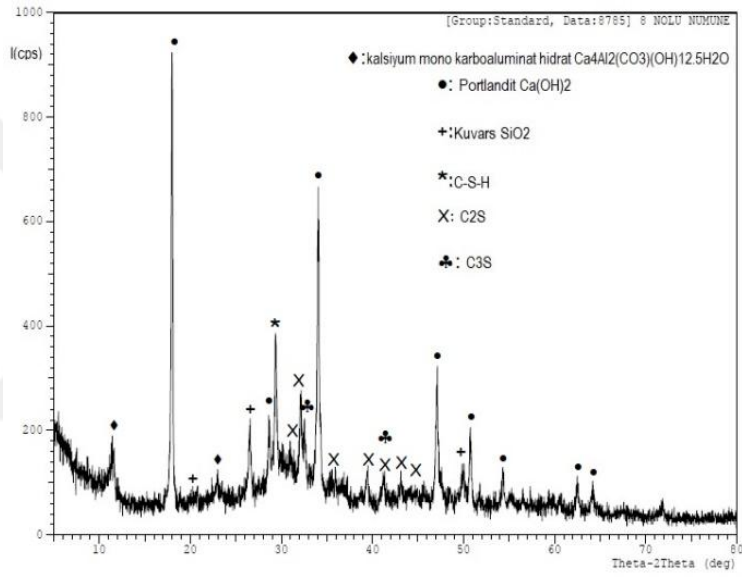


Şekil 4.10 U2 numaralı serinin XRD analizleri

En yüksek mukavemet değerine sahip D3 numaralı numunenin gözenek yapısı diğer numuneler ile karşılaştırıldığında daha küçük gözenek boyutuna sahip olduğu gözlenmiştir. Bu etki hacim ağırlığı değerlerinde de gözlenmektedir. D3 numaralı numune en yüksek hacim ağırlığa sahiptir. Bununla birlikte SEM görüntülerinde iyi gelişmiş CSH jel yapısının varlığı dikkat çekicidir. U2 ve D3 numaralı numunelerin XRD analizlerindeki CSH pik yükseklikleri karşılaştırıldığında, daha yüksek mukavemete sahip D3 numaralı numunede CSH pik yüksekliğinin U2 numaralı numuneye göre daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Daha iyi gelişmiş CSH yapısı daha yüksek mukavemetin diğer önemli nedenidir. Resim 4.3’de D3 numaralı serinin hücre yapısı verilmiştir. Şekil 4.11’de D3 numaralı serinin XRD analizleri verilmiştir.



Resim 4.3 D3 numaralı serinin hücre yapısı.



Şekil 4.11 D3 numaralı serinin XRD analizleri.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 400-670 kg/m³ görünür birim hacim ağırlıkta köpük betonları, Portland çimentosu, genleştirilmiş perlit, uçucu kül, ince kum ve kimyasal katkıları kullanılarak hazırlanmıştır. Köpük beton tasarımında malzeme karışım oranını kesin olarak belirlemek için standart bir yöntem yoktur. Çalışmada kullanılan malzemelerin karışım oranları, karışıma eklenme sırası, karıştırma hızı istenilen özelliklerde köpük beton üretmek için dikkatli takip gerektirmektedir.

Ön döküm serilerinde polikarboksilik esaslı SA katkısının akış sürelerinin daha az (daha akışkan), buna karşılık SB katkısının SA katkısına göre akış sürelerinin daha fazla olduğu belirlenmiştir. Basınç mukavemeti değerleri SA katkılı örneklerde SB'ye göre daha yüksek çıkmıştır. Ön deney sonuçları dikkate alınarak diğer karışımlarda SA katkısı kullanılmıştır.

Yapılan çalışmada Marsh Konisi deneylerinin sonuçlarına göre tüm serilerde taze harç ağırlığının artması ile numunelerin akış süresinde azalma görülmüştür. Karışıma giren köpük miktarının artması ile yoğunluğu azalan taze harcın akış süresi uzamaktadır. Ultra ses geçiş hızı tüm numunelerde birim hacim ağırlığının artması ile artış göstermiştir. Buna daha yoğun ve azalan gözenek oranı nedeniyle katı kısımlardan sesin daha hızlı geçmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

TS 13655 (2015)'te köpük beton minimum basınç mukavemeti 1,5 MPa olarak verilmiştir. Bu çalışmada tüm köpük beton numune serilerinde basınç dayanımları 1,5 MPa'dan yüksek çıkmış ve standart değerleri sağlamıştır.

SA etkisi ve Marsh Konisi deneyleri döküm serilerinde numunelerin akış değerleri gözlemlendiğinde SA kimyasal katkısı olan numunelerde “düzenli akış” (1 dakikanın altında) gerçekleşmiştir. SA kullanılmayan U1 serisinde akma süresi 82 s'dir ve 60 s'nin üzerinde olduğu için zorlu akış olarak kabul edilmiştir. K2 serisinde ise akma süresi 28 s kaydedilmiş 30 s'nin altında olduğu için aşırı akışkan olduğu kabul

edilmiştir. Seçilen SA katkısının taze harcın akışkanlığını artırarak daha homojen bünye yapısı sağladığı, S/T oranının azaltarak mukavemet gelişimine katkı yaptığı belirlenmiştir.

Üretilen köpük beton numunelerinden U2 numaralı numune de XRD analizinde etrenjit fazının varlığı dikkat çekicidir. Seriler arasındaki en düşük mukavemet gelişimine sahip olan seri de U2 numaralı numunedir. Bu nedenle etrenjit oluşumunun mukavemeti azaltıcı yönde etkilendiği sonucuna varılmıştır. Diğer numune bileşimlerinde ise faz içeriklerinin mukavemet gelişiminde dikkate değer bir etkisinin olmadığı değerlendirilmiştir.

Normal betonlarda CSH kristal pikinin yükselmesi ile artan mukavemet değerleri beklenir. Buna karşı köpük beton numunelerin CSH pik yükseklikleri ile mukavemet arasında düzenli bir ilişki gözlenmemiştir. Ancak, numunelerin yoğunluk değerleri ile mukavemet gelişimleri arasında doğrusal ve üssel bir ilişki vardır. Buna göre birim ağırlık değerlerindeki bir artış basınç mukavemeti değerlerini üssel olarak artırmaktadır.

Çimento miktarının artışı ile Ca(OH)_2 fazındaki artış U2, U2, U5 numaralı numuneler de dikkat çekicidir. Çimento miktarı arttıkça CSH kristal pik yüksekliklerinin de artmasına rağmen bu artışa paralel bir mukavemet artışı gözlenmemektedir. Sonuç olarak köpük beton numunelerinin yoğunluğunun mukavemet gelişiminde mineralojik özelliklerinden daha baskın olduğu sonucuna varılmıştır.

U2 ve D3 numaralı seriler mukavemet değerleri ve birim hacim ağırlık değerleri göz önüne alınarak karşılaştırma yapılırsa, en düşük mukavemete ve birim hacim ağırlığına sahip U2 numaralı numunenin gözenek boyutlarının, en yüksek mukavemete ve birim hacim ağırlığına sahip D3 numaralı numunenin gözenek boyutlarından daha büyük olduğu gözlenmektedir. D3 numaralı numunenin gözenek yapısı diğer numuneler ile karşılaştırıldığında daha küçük gözenek boyutuna sahip olduğu gözlenmiştir. U2 numaralı serinin SEM görüntülerinde iğnesel etrenjit yapısının yoğun varlığı dikkat çekicidir. Etrenjit gelişimi beraberinde genleşme kuvvetleri yarattığından, yapı içerisinde mukavemetin azalmasına neden olmuştur. D3 numaralı serinin SEM görüntülerinde iyi gelişmiş CSH jel yapısının varlığı dikkat çekicidir. U2 ve D3

numaralı numunelerin XRD analizlerindeki CSH pik yükseklikleri karşılaştırıldığında, daha yüksek mukavemete sahip D3 numaralı numunede CSH pik yüksekliğinin U2 numaralı numuneye göre daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Daha iyi gelişmiş CSH yapısı daha yüksek mukavemetin diğer önemli nedenidir.

Aynı birim hacim değerlerinde üretilen uçucu kül katkılı köpük beton örneklerin kum katkılı örneklerle göre daha düşük iletkenlik değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir. Bunu başlıca nedeni olarak uçucu külün kendi morfolojik yapısındaki gözenekli yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca uçucu külün puzolanik özellik göstererek mukavemet gelişiminde etkili olduğu belirlenmiştir



6. KAYNAKLAR

- Abdullah V, Aydın E, Bedirhanoglu İ, 2016, Beton Elastisite Modülünün Ultrasonik Ses Dalgası Yayılma Hızı ile Tahmin Edilmesi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 3, 475-484.
- ACI 209.1R-05, 2005, Report On Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete, ACI Committee 209, USA.
- ACI 213R-03, 2003, Guide For Structural Lightweight Aggregate Concrete, American Concrete Institute, ACI Committee 209, USA.
- ASTM C 157, 1998, Standard Test Method For Length Change Of Hardened Hydraulic-Cement Mortar And Concrete, ASTM, Philadelphia.
- ASTM C 518, 2003, Standard Test Method for SteadyState Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus, American Society for Testing and Materials, ASTM, Philadelphia.
- ASTM C 618, 1991, Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan For Use As a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, ASTM, Philadelphia.
- ASTM C 796, 2004, Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam, ASTM, Philadelphia.
- Akman M S, 1985, Yapı Malzemeleri İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Ders Notları, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, 162s, İstanbul.
- Akman M S, 2000, Yapı Hasarları Ve Onarım İlkeleri, TMMOB Yayınevi, 177s, İstanbul.
- Akman M S, 2003, Yapı malzemelerinin tarihsel gelişimi, Türkiye Mühendislik Haberleri, 426, 30-36.
- Alkaya D, 2009, Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanılmasının İncelenmesi Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 5, 61-72.
- Amran Y H M, Farzadnia N, Ali A A A, 2015, Properties and applications of foamed concrete; a review, Construction & Building Materials, 101, 990–1005.

- Awana M, Kumar C, 2017, Cellular Lightweight Concrete, International Conference On Emerging Trends On Engineering Technology Science And Management, 12 April, Noida India, 241-246.
- Aydın S, Baradan B, 2003, Yüksek Sıcaklığa Dayanıklı Harç Geliştirilmesi, İmo 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-3 Ekim, İstanbul, 451-460.
- Barnes B D, Diamond S, Dolch W L, 1979, Micromorphology of the interfacial zone around aggregates in portland cement mortar, J. Am. Ceram. Soc., 62, 21-24.
- Bekaroğlu M, 2012, Kompozit Yapıda Pomza Agregası İçeren Köpük Betonun Özellikleri Ve Teknik Parametrelerinin İrdelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 124s, Isparta.
- Bilir T, 2010, Harçlarda Endüstriyel Yan Ürün Veya Atıkların Önce Agregası Olarak Kuruma Rötresi Çatlaklarına Etkisi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 170s, Eskişehir.
- Bindiganavile V, Hoseini M, 2008, Developments In The Formulation and Reinforcement of Concrete Foamed Concrete, University of Alberta, Canada, 223-251.
- Chandnia T J, Ananda K B, 2018, Utilization of Recycled Waste As filler In Foam Concrete, Journal of Building Engineering, 19, 154-160.
- Chindapasirt P, Rattanasak U, 2011, Shrinkage Behavior of Structural Foam Lightweight Concrete Containing Glycol Compounds and Fly Ash, Materials and Design, 32, 723-727.
- Çetin C, Delibaş T, Kırca Ö, Yaman İ Ö, 2015, Köpük Beton İmalatlarında Kalsiyum Alüminat Çimentosu Kullanımı, İmo 9. Ulusal Beton Kongresi, 16-18 Nisan, Antalya, 163-170.
- Davraz M, Kılınçarslan Ş, Kuru M, 2015, Farklı Yoğunluktaki Köpük Betonların Dayanım ve Isıl İletkenlik Özellikleri, İmo 9. Ulusal Beton Kongresi, 16-18 Nisan, Antalya, 93-102.

- Demir İ, Başpınar M S, Kahraman E, 2017, Köpük Betonun Reolojik Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 38, 1300-1949.
- Demir İ, Başpınar M S, Kahraman E, 2019, Köpük Beton Üretiminde Uygun Akışkanlaştırıcı/Priz Hızlandırıcı Katkı Türünün Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19, 390-400.
- Demirel B, Yazıcıoğlu S, 2010, Uçucu Külün Karbon Fiber Takviyeli Hafif Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi, Selçuk-Teknik Dergisi, 9, 24-40.
- Dikici T, 2010, Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 125, İzmir.
- Ekinci D, 2014, Türkiye'de Köpük Beton, Dünya İnşaat Dergisi, 376, 35-55.
- Erdoğan T Y, 2003, Beton, Metu Press, 760s, Ankara Türkiye.
- Erdoğan T Y, 2004, Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri Çimentolar Agregalar Su, Türkiye Hazır Beton Birliği, 277s, İstanbul Türkiye.
- EuroLightCon, 1998, LWAC Material Properties State Of The Art, Document BE96-3942/R2, December, 12-13.
- Gökçe H S, Şimşek O, Durmuş G, Demir İ, 2010, Ham Perlit Agregalı Hafif Beton Özelliklerine Alternatif Genleştirilmiş Perlit Kullanımının Etkisi, Politeknik Dergisi, 13, 159-163.
- Huang Z, Zhang T, Wen Z, 2015, Proportioning and Characterization of Portland Cementbased Ultra-Lightweight Foam Concretes, Construction & Building Materials, 79, 390-396.
- Husem M, 2003, The Effects of Bond Strengths Between Lightweight and Ordinary Aggregate-Mortar Aggregate-Cement Paste on The Mechanical Properties of Concrete, Materials Science and Engineering, 363, 152-158.
- İşıldar N, 2018, Köpük Betonda Kuruma Büzülmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 67s, Isparta

- Jana D, Sarkar S L, Aimin X U, 2001, Scanning Electron Microscopy - X-Ray Microanalysis Of Concretes, Chapter In Concrete Technology Today, Noyes Publication, 231-274.
- Jones M R, Mccarthy M J, 2003, Moving Fly Ash Utilization In Concrete Forward: a UK Perspective, In: Proceedings of The International Ash Utilisation Symposium, Centre For Applied Energy Research University of Kentucky, 20-22.
- Jones M R, Mccarthy A, 2005, Preliminary Views on The Potential of Foamed Concrete as a Structural Material, Magazine of Concrete Research, 57, 21-31.
- Kabay N, 2009, Hafif Agregalı Betonun Boşluk Yapısının Mekanik Ve Fiziksel Özelliklere Etkisi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 145s, İstanbul.
- Kaplan G, Gültekin A B, 2010, Yapı Sektöründe Uçucu Kül Kullanımının Çevresel ve Toplumsal Etkiler Açısından İncelenmesi, 1.Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu, 26-28 Mayıs, Gazi Üniversitesi Ankara, 59-64.
- Kaya Z R, 2017, Krom Atıklarının Köpük Beton Yapımında Agregası Olarak Kullanılmasının Araştırılması, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 71s, Isparta.
- Khoury G A, 2008, Passive Fire Protection Of Concrete Structures, Structures and Buildings, 583, 135-145.
- Kılınçarslan Ş, Tuzlak F, 2018, Uçucu Kül Katkılı Köpük Betonların Dayanım Ve Isı İletkenlik Özelliklerinin İncelenmesi, Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi, 2, 1-5.
- Kılınçarslan Ş, Davraz M, Işıldar N, 2019, Genleştirilmiş Polistrenin Uçucu Kül İçeren Köpük Beton Özellikleri Üzerine Etkileri, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7, 224-231.
- Kırgız M S, 2011, İkameli Ve Katkılı Çimento Pastalarının Hidratasyon Bileşiklerinin Taramalı Elektron Mikroskobu Kullanılarak Belirlenmesine İlişkin Literatür Araştırmaları, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 14, 73-90.

- Kudiyakov A I, Steshenko A B, 2019, Shrinkage Deformation of Cement Foam Concrete, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Russia, January 2015, 1-5.
- Liu M J, Alengaram, U J, Jumaat M Z, Mo K H, 2014, Evaluation of Thermal Conductivity, Mechanical and Transport Properties of Lightweight Aggregate Foamed Geopolymer Concrete, *Energy and Building*, 72, 238-245.
- Ma C, Chen B, 2016, Properties of Foamed Concrete Containing Water Repellents, *Construction and Building Materials*, 123, 106-114.
- Mahsanlar N, 2006, Yüksek Sıcaklık Etkisinde Beton Davranışı, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 76s, İstanbul.
- Marcon M, Nincevic K, Boumakis I, Czernuschka L M, 2018, Aggregate Effect on The Concrete Cone Capacity of an Undercut Anchor Under Quasi-Static Tensile Load, Published Online, Doi 10.3390/ma11050711.
- Mashkin N, Bartenjeva E, Mansurov R, 2018, Naturally Cured Foamed Concrete With Improved Thermal Insulation Properties, *MATEC Web of Conferences*, Doi 10.1051/mateconf/201814302005.
- Mohammad F, Shawnım P, 2017, Mechanical Properties of a Developed Foamed Concrete, *Journal of University of Duhok*, 20, 510-519.
- Mohammad M, 2011, Development of Foamed Concrete: Enabling and Supporting Design, University Of Dundee, Philosophy Division Of Civil Engineering, A Thesis Presented In Application For The Degree Of Doctor, 261p, Nethergate.
- Monteiro P J M, Maso J C, Ollivier J P, 1985, The Aggregate-Mortar Interface, *Cem. Conc. Res.*, 15, 953–958.
- Monteiro P J M, Mehta P K, 1986, Improvement of The Aggregate-Cement Paste Transition Zone By Grain Refinement of Hydration Products, *Proc. 8th Int. Cong. Chem. of Cem.*, 2, 433–437.
- Mydın M A O, Wang Y C, 2012, Mechanical Properties of Foamed Concrete Exposed to High Temperatures, *Construction and Building Materials*, 26, 638-654.

- Nambiar E K, Ramamurty K, 2006, Influence of Filler Type on The Properties of Foam Concrete, *Cem. Concr. Compos.*, 28, 475-480.
- Nambiar E K, Ramamurty K, 2007, Air-Void Characterisation of Foam Concrete. *Cement and Concrete Research*, 37, 221-230.
- Nambiar E K, Ramamurty K, Asce M, 2009, Shrinkage Behavior of Foam Concrete, *J. Mater. Civ. Eng.*, 21, 631-636.
- Namsone E, Šahmenko G, Korjamins A, Namsone E, 2016, Influence of Porous Aggregate on The Properties of Foamed Concrete, *Riga Technical University Construction Science*, 19, 13-19.
- Neville A M, 1995, *Properties of Concrete*, John Wiley, 4. Edition, 2866p, New York.
- Ören O H, Gençel O, 2017, Köpük Beton, *Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5, 129-136.
- Öztürk E, 2019, Yapılarda Hafif Beton Kullanımında Son Gelişmeler, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 100s, Samsun.
- Papayianni I, Milud I A, 2005, Production of Foamed Concrete With High Calcium Fly Ash, *International Conference on The Use of Foamed Concrete in Construction*, University of Dundee, July 07 2015, Scotland, 23-28.
- RILEM, 1982, *Proceedings of the Colloque International sur Liaisons Pates de Ciment Materiaux Associes*, Toulouse.
- Ramamurty K, Nambiar E K, Ranjani G I S, 2009, A Classification of Studies on Properties of Foam Concrete, *Cement and Concrete Composites*, 31, 38-396.
- Salgın B, 2007, Brüt Beton Brütalizm ve Türkiye Örnekleri, *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 102s, Kayseri.
- Singh H, Gupta R, 2020, Influence of Cellulose Fiber Addition on Self-Healing and Water Permeability of Concrete, *Case Studies in Construction Materials*, 12, 1-15.
- Siva M, Ramamurthy K, Dhamodharan R, 2015, Sodium Salt Admixtures For Enhancing The Foaming Characteristics of Sodium Lauryl Sulphate, *Cement and Concrete Composites*, 57, 133-141.

- Taşdemir C, 2003, Hafif Betonların Isı Yalıtım ve Taşıyıcılık Özellikleri. Türkiye Mühendislik Haberleri, 427, 57-61.
- Tokyay M, Erdoğan K, 2009, Cürufklar ve Cürufllu Çimentolar, TÇMB/AR-GE/Y97.2, 47s, Ankara.
- Topçu İ B, Uygunoğlu T, 2007, Properties of Autoclaved Lightweight Aggregate Concrete, Building and Environment, 42, 4108-4116.
- Topçu İ B, Demirel O E, Uygunoğlu T, 2016, Polipropilen Lif Katkılı Harçların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri, Politeknik Dergisi, 20, 91-96.
- TS EN 206-1, 2002, Beton-Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1, 2012, Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 825, 2009, Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 934-2, 2002, Kimyasal Katkılar-Beton, Harç ve Şerbet İçin, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 13655, 2014, Kâgir Birimler-Özellikler-Köpük Beton Kâgir Birimler Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12664, 2009, Yapı Malzemeleri ve Mamulleri-Isıl Direncin, Korumalı Tablalı Isıtıcı ve Isı Akı Ölçerin Kullanıldığı Metotlarla Tayini-Isıl Direnci Orta ve Düşük Seviyede Olan Kuru ve Rutubetli Mamuller, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12667, 2003. Yapı Malzemeleri ve Mamullerinin Isıl Performansı-Mahfazalı Sıcak Plaka ve Isı Akış Sayacı Metotlarıyla Isıl Direncin Tayini, Yüksek ve Orta Isıl Dirençli Mamuller, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Türkmenoğlu H N, 2015, Beton Bileşenlerinin Plastik Rötire Oluşumu Üzerine Etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 80s, İstanbul.
- Uğurlu A, 1999, Agrega ve Çimento Hamuru Bağlı Üzerine, 2.Ulusal Kırmataş Sempozyumu, İstanbul, 213-228

- Uygunoğlu T, 2008, Hafif Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Özellikleri, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 170s, Isparta.
- Uysal A, 2004, Yüksek Sıcaklığın Beton Üzerindeki Etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 84s, İstanbul.
- Vilches J, Ramezani M, Neitzert, T, 2012, Experimental Investigation of The Fire Resistance of Ultra Lightweight Foam Concrete, International Journal of Advanced Engineering Applications, 1, 15-22.
- Wei S, Yiqiang C, Yunshang Z, Jones M R, 2013, Characterization and Simulation of Microstructure and Thermal Properties of Foam Concrete, Construction and Building Materials, 47, 1278-1291.
- Yu C, 2015, Foam Concrete Performance Study Based on Experimental Analysis, MATEC Web. of Conferences 25, Jinan, Shandong, China, 25 April, 1-6.

İnternet kaynakları

1-<http://kisi.deu.edu.tr/halit.yazici/OZEL%20BETON/ozelbeton-ders1-HAFIFBET.pdf>,20.11.2019.

2-https://www.cimsa.com.tr/ca/docs/4FE58AA58E3A4B7B85FA9E4EE011A8/9621E3A3C5C_A4B46B2E9DB8C86F482D2.pdf, 25.11.2019

3-<http://www.kalsiyumstearat.com/urun/27-akiskanlastirici.html>, 16.02.2020



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fatma KOCAKERİMOĞLU
Doğum Yeri ve Tarihi : Senirkent / 17.09.1994
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 0543 811 6943 / fkocakerimoglu@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Burdur Anadolu Öğretmen Lisesi, (2009-2013)
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği
Bölümü, (2013-2017)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri
Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı,
(2018-2020)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Isparta Yeşil Ay Yapı Denetim, (2017- 2018)
Isparta Yeşil Ay Yapı Denetim, (2020- Devam
Ediyor)