

Köpük Betonda Yüksek Sıcaklık Etkisi

Mehmet Hafit Dakman

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos 2017

Effect of Elevated Temperature on Foam Concrete

Mehmet Hafit Dakman

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

August 2017

Köpük Betonda Yüksek Sıcaklık Etkisi

Mehmet Hafit Dakman

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mehmet Canbaz

Ağustos 2017

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Mehmet Hafit Dakman'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Köpük Betonda Yüksek Sıcaklık Etkisi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliğiyle kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Canbaz

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Canbaz

Üye : Prof. Dr. İlker Bekir Topçu

Üye : Prof. Dr. Eşref Ünlüoğlu

Üye : Doç. Dr. Cenk Karakurt

Üye : Yrd. Doç. Dr. Abdullah Demir

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Yrd.Doç.Dr. Mehmet Canbaz danışmanlığında hazırlamış olduğum “Köpük Betonda Yüksek Sıcaklık Etkisi” başlıklı yüksek lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.

01/08/2017

Mehmet Hafit DAKMAN

İmza

ÖZET

Bu tez kapsamındaki çalışmada köpük betonun yüksek sıcaklığa maruz bırakılarak yapısında oluşabilecek fiziksel, mekanik ve mikroskobik farklılıkları incelenmiştir. Öncelikle farklı hacimsel oranlarda köpük solüsyonu katılarak hazırlanan köpük beton numunelerin yüksek sıcaklığa maruz bırakılarak en iyi dayanım performansı oranı belirlenmeye çalışılmıştır.

TSE K 134 şartnamesine göre hazırlanan köpük solüsyonun çimento harcına hacimsel olarak % 0, % 20, % 40, % 60, oranında karıştırılarak toplam 80 adet 15x15x15cm'lik numuneler üretilmiştir. Numunelerin hepsi 28 gün kür havuzunda bekletildikten sonra her bir gruptan 3'er tane 15x15x15cm ve 3'er adette 5x5x5cm'lik numuneler hazırlanıp 20 °C, 100 °C, 400 °C ve 700 °C, sıcaklık etkisine 3 saat maruz bırakılmıştır. Deney sonunda 24 saat soğumaya bırakılan numuneler sırasıyla birim ağırlık, ultrases geçiş süresi ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Ardından her bir deney grubundaki 5cm'lik numuneleri dijital görüntü işleme ve analizi yapılmış ardından EDX analizi ve SEM çekimlerinde 250x, 1500x ve 15000x büyütme yapılarak irdelenmiştir.

Deney sonuçlarına göre köpük solüsyonu miktarı arttıkça betonda basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı, elastisite modülünde düşüş saptanmıştır. Betonlardaki boşluk yapısı; 100°C'de büzülmeden kaynaklı olarak boyutlarında küçülme saptanmış daha sonraki sıcaklıklarda boşluk yapısında artış, mikro çatlaklar oluşumu sebebiyle boşluk yapısında artış saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Köpük Beton, EDX, SEM, Görüntü işleme ve analizi, Yüksek Sıcaklık

SUMMARY

In this study, the physical, mechanical and microscopic differences of the foamed concrete are investigated by exposing them to high temperature. Initially, foam concrete specimens prepared by adding foam solution at different volume ratios were exposed to high temperature and tried to determine the best strength performance ratio.

Totally 80 pieces of 15x15x15 cm samples were produced by mixing the foam solution prepared according to TSE K 134 specifications with 0%, 20%, 40%, 60% by volume of cement mortar. After the samples were all kept in the curing pool for 28 days, 3 specimens of 15x15x15cm and 3 specimens of 5x5x5cm were prepared from each group and exposed to temperature effect at 20 ° C, 100 ° C, 400 ° C and 700 ° C for 3 hours. The specimens left to cool for 24 hours at the end of the experiment were subjected to unit weight, ultrasound speed and compressive strength tests. Subsequently, 5cm samples in each experimental group were subjected to digital image processing and analysis, followed by EDX analysis and SEM imaging at 250x, 1500x and 15000x magnification.

According to the results of the experiment, the amount of foam solution, decreases were found concrete compressive strength, ultrasound speed, elasticity modulus decrease. Pore structure in concrete; Dimensional shrinkage at 100 ° C without shrinkage was observed. At later temperatures, an increase in void formation, an increase in void formation due to microfractures.

Keywords: Foam Concrete, EDX, SEM, Elevated Temperature, Image processing and analysis

TEŐEKKÖR

Tez hazırlama sürecinde, derslerimde ve gerekse akademik çalışma süresince bana danışmanlık eden, yönlendiren ve her türlü desteğini esirgemeyen danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet Canbaz'a, laboratuvar deneylerinde bana yardımcı olan Sayın Sevgin Yılmaz'a, dijital görüntü analizlerinde bana yardımcı olan Sayın Barış Arslan'a ve desteğini her zaman hissettiğim aileme, sonsuz teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1 Hafif Beton	4
2.2 Gaz Beton	6
2.3 Köpük Beton	7
2.4 Yüksek Sıcaklık Etkisi	12
2.5 Dijital Görüntü İşleme ve Analizi	16
2.6 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Elektron Mikroskop Analizi (EDX)	18
2.7 Köpük Betonda Yüksek Sıcaklık Etkisine Yönelik Çalışmalar	20
3. MATERYAL YÖNTEM	22
3.1 Üretimde Kullanılan Malzemeler	22
3.1.1 Çimento	22
3.1.2 Su	22
3.1.3 Agrega	23
3.1.4 Köpük ajanı	24
3.2 Köpük Beton Numune Üretimi	26
3.2.1 Karışım oranları	26
3.2.2 Karışımın hazırlanması	27
3.3 Deneyler	28
3.3.1 Birim ağırlık ve ultrases geçiş süresi deneyleri	29
3.3.2 Basınç dayanımı deneyleri	29
3.3.3 Isıl iletkenlik deneyi	30

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.3.4 Köpük betonda yüksek sıcaklık etkisinin belirlenmesi.....	31
3.3.5 SEM çekimleri ve EDX analizi.....	32
3.3.6 Dijital görüntü işleme ve analizi	33
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	35
4.1 Karışım Oranlarına Göre Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi	35
4.1.1 Birim ağırlık sonuçlarının incelenmesi	35
4.1.2 Ultrases geçiş süresi deney sonuçlarının incelenmesi	37
4.1.3 Basınç dayanımı sonuçlarının incelenmesi	38
4.1.4 Dinamik elastisite modülü sonuçlarının incelenmesi	39
4.1.5 Isı iletkenlik deney sonuçlarının değerlendirilmesi	41
4.1.6 SEM çekimleri ve EDX analizi sonuçlarının incelenmesi.....	42
4.1.7 Dijital görüntü işleme ve analizi sonuçlarının incelenmesi	45
4.2 Köpük betonda yüksek sıcaklık etkisinin incelenmesi	47
4.2.1 Birim ağırlık sonuçlarının incelenmesi	48
4.2.2 Ultrases geçiş süresi sonuçlarının incelenmesi	50
4.2.3 Basınç dayanımı sonuçlarının incelenmesi	52
4.2.4 Dinamik elastisite modülü sonuçlarının incelenmesi	54
4.2.5 SEM çekimleri ve EDX analizi sonuçlarının incelenmesi.....	56
4.2.6 Dijital görüntü işleme ve analizi sonuçlarının incelenmesi	69
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	73
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	75
EK AÇIKLAMALAR	83

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Sulfak yapılarının sıvı içerisinde hava boşluklarının oluşturması.....	9
2.2. Normal beton ile köpük betonda suyun emilmesi durumu.....	12
2.3. Yüksek sıcaklık sonucu betonda oluşan hasarlar	15
2.4. Fiziksel görüntünün dijital görüntüye çevrilmesi.....	16
2.5. Köpük betonda yapılan 2D ve 3D dijital görüntü analizleri.....	18
2.6. Beton iç yapısının SEM ile görüntülenmesi ve EDX analizi yapılması	19
2.7. Farklı birim ağırlıktaki köpük betonlarda hava boşluk yapısının karşılaştırılması	20
2.8. Birim ağırlığa göre boşluk yapısı	20
3.1. İnce dere kumu elek analizi sonuçlarına göre granülometri eğrisi.....	24
3.2. Köpük solüsyonu üretiminde kullanılan köpük ajanı	25
3.3. Kalsiyum naftalin sülfonatın kimyasal açılımı	25
3.4. Çimento harcının betoniyerde hazırlanması	27
3.5. Köpük ajanının su ile karıştırılması	28
3.6. Köpük betonun numune kalıplarına dökülmesi	28
3.7. Birim ağırlık ve ultrases geçiş süresi deneyleri	29
3.8. Basınç dayanımı deneyi	30
3.9. Isıl iletkenlik deneyi	30
3.10. Yüksek sıcaklık fırınında 400 °C'deki gösterge	31
3.11. Yüksek sıcaklık fırınında deney sonrası numuneler	32
3.12. SEM çekimleri için hazırlanan numunelerin kaplamasının yapılması	33

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.13. Altın ile kaplanan numunelerin SEM cihazına yerleştirilmesi ve incelenmesi	33
3.14. Dijital görüntü analizi yapılan cihaz	34
4.1. Köpük solüsyonu katkı miktarına göre birim ağırlık sonuçları	36
4.2. Katkı miktarının ultrases geçiş hızlarıyla karşılaştırılması.....	37
4.3. Basınç dayanımı sonuçları.....	38
4.4. Katkı oranlarına göre dinamik elastisite modülünün sonuçları.....	40
4.5. Isı iletkenlik deney sonuçları.....	41
4.6. Beton numunelerin SEM görüntüleri	43
4.7. Beton numunelerin 250x büyütmede yapılan EDX analizi görüntüleri	43
4.8. Beton numunelerin 15000x büyütmede yapılan EDX analizi görüntüleri	44
4.9. Katkısız betonun dijital görüntü analizi	45
4.10. Hacimce % 20 köpük solüsyonu Katkılı betonun dijital görüntü analizi	45
4.11. Hacimce % 40 köpük solüsyonu Katkılı betonun dijital görüntü analizi	46
4.12. Numunelerdeki 1000 mm ³ içindeki boşluk miktarları grafiği.....	47
4.13. Yüksek sıcaklık sonrası birim ağırlık karşılaştırılması	48
4.14. Sıcaklık yükselmesine göre ultrases geçiş hızları	50
4.15. Sıcaklık yükselmesine göre basınç deneyi sonuçları	52
4.16. Sıcaklık yükselmesine göre dinamik elastisite modülü sonuçları	55
4.17. Sıcaklık yükselmesine göre katkısız numunelerdeki SEM görüntüleri	57

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.18. Sıcaklık yükselmesine göre 250x büyütmede EDX analizi görüntüleri.....	59
4.19. Sıcaklık yükselmesine göre 15000x büyütmede yapılan EDX analizi görüntüleri ...	60
4.20. Sıcaklık yükselmesine göre % 20 katkılı numunelerdeki SEM görüntüleri	61
4.21. Sıcaklık yükselmesine göre 250x büyütmede % 20 katkılı numunelerdeki EDX analizi görüntüleri.....	63
4.22. Sıcaklık yükselmesine göre 15000x büyütmede % 20 katkılı numunenin EDX analizi görüntüleri	64
4.23. Sıcaklık yükselmesine göre % 40 katkılı numunelerdeki SEM görüntüleri	65
4.24. Sıcaklık yükselmesine göre 250x büyütmede % 40 katkılı numunenin EDX analizi görüntüleri	67
4.25. Sıcaklık yükselmesine göre 15000x büyütmede % 40 köpük solüsyonu katkılı numunelerdeki EDX analizi görüntüleri.....	68
4.26. Sıcaklık yükselmesine göre katkısız numunenin dijital görüntü analizi	69
4.27. Sıcaklık yükselmesine göre % 20 katkılı numunenin dijital görüntü analizi	70
4.28. Sıcaklık yükselmesine göre % 40 katkılı numunenin dijital görüntü analizi	70
4.29. Sıcaklık yükselmesine göre boşluk miktarlarındaki değişim grafiği	71
Ek.1. Birim ağırlık hesaplamaları.....	83
Ek.2. Ultrases geçiş süresi deneyleri	83
Ek.3. Basınç deneyi sonrası numune	84
Ek.4. Numunelerin yüksek sıcaklık sonrası durumu	84
Ek.5. Köpük betonda yapılan SEM çekimleri	84

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. CEM I 42.5 R çimentonun özellikleri	22
3.2. Eskişehir şebeke suyu kimyasal analiz tablosu	23
3.3. Köpük ajanının kimyasal ve fiziksel özellikleri	24
3.4. Numunelerdeki malzeme miktarları	26
4.1. Basınç dayanımı çevirme tablosu	40
4.2. Silindir basınç dayanım sonuçları	40
4.3. Seçili alanda bulunan elementlerin kütlece EDX analiz sonuçları	44
4.4. Seçili alanda bulunan elementlerin kütlece EDX analiz sonuçları.....	44
4.5. Yüksek sıcaklık artışına göre silindir basınç dayanımı sonuçları	54
4.6. Sıcaklık yükselmesine göre kütlece EDX analizi sonuçları	59
4.7. Sıcaklık yükselmesine göre kütlece EDX analizi sonuçları	60
4.8. Sıcaklık yükselmesine göre kütlece EDX analizi sonuçları	63
4.9. Sıcaklık yükselmesine göre kütlece EDX analizi sonuçları	64
4.10. Sıcaklık yükselmesine göre kütlece EDX analizi sonuçları	67
4.11. Sıcaklık yükselmesine göre kütlece EDX analizi sonuçları	68

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**Simgeler****Açıklama**

W/mK

Watt/metre-Kelvin

Kısaltmalar**Açıklama**

EDX

Energy-dispersive X-ray Spectroscopy

2D

İki boyutlu

C-S-H

Kalsiyum silika hidrat

SEM

Scanning Elektron Microscope

3D

Üç boyutlu

1. GİRİŞ VE AMAÇ

İnce toz halindeki malzemelere su eklenmesi durumunda, akışkan hale gelip bir süre sonra akışkanlığını kaybedip katılaşmış suda çözünmeyen maddelere dönüşen malzemelere bağlayıcı malzemeler denir. Bu özellikleriyle bağlayıcı malzemelere istenilen şekil ve ebat verilebilmektedir. Günümüzde en çok bilinen ve kullanılan bağlayıcı malzeme çimento ve alçıdır. Belli oranlarda çimento agrega ve su karışımıyla beton elde edilir. Günümüzde en yaygın kullanım alanı bulan yapı malzemesi betondur (Baradan vd., 2012).

Normal beton yapı sektöründe en çok kullanılan yapı malzemesidir. Beton malzeme olarak iyi bir taşıyıcı olmasına karşın birim ağırlığı büyük ve ısı iletkenlik katsayısı yüksektir. Betonun ısı iletkenlik katsayısının yüksek olması onu yalıtım için çok kötü bir malzeme yapmaktadır. Betonun ısı yalıtımı gibi olumsuz yönlerini ortadan kaldırmak için hafif beton kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır (Serin vd., 2007).

Sürdürülebilir kalkınma programı kavramı artık geçici bir politika değil, uzun süreli ve önem kazanan bir politikadır. Gezegenimizde artan fosil yakıt kullanımı sonucu sürekli artan hava kirliliği durumu, hükümetlerin enerji politikalarında değişikliğe zorlamaktadır. Enerji çeşitliliğini artırma isteğinin yanında enerji tasarrufu da aynı derece önem kazanmaktadır. Çevreci kentsel tasarım alanında özellikle enerji verimli binalar ön plana çıkmaktadır. Bu sayede fosil yakıt tüketimi azaltılarak atmosfere zehirli gaz salınımı azaltılması hedeflenmektedir. Bunun için yapının ısı kaybını düşürülmeli aynı zamanda bina sakinlerinin konfor seviyesi düşürmeyecek yalıtım malzemesine ihtiyaç vardır (Liu, vd., 2014).

Tüm dünyada ve özellikle kentleşmenin yoğun olduğu gelişmekte olan ülkelerde artan enerji krizi ve çevre sorunlarını hafifletmek için ısı yalıtımı üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Birçok araştırmacı tarafından yalıtım problemlerini çözmek için birden fazla yalıtım malzemesi geliştirilmiştir. Bunlardan biride köpük ajanıyla elde edilen köpük solüsyonunun, çimento harcıyla karıştırılmasıyla oluşan köpük betondur. Köpük beton; enerji tasarrufu sağlamanın yanı sıra yapılarda hem ölü yükü azaltıp hem de yalıtım gereksinimlerini karşılar. Aynı zamanda şantiyede imal edilebilmesi de diğer yalıtım

malzemelerine göre avantaj sağlar. Yapısında bulunan küçük hava kabarcıkları (genellikle çapı 0,1-1 mm) sayesinde ısı ve sesi normal betonlara göre daha az ileterek yalıtkan malzeme özelliği gösterir (Wei vd., 2013).

Günümüzde yapıların hizmet ömrü giderek artmaktadır. Buda sürdürülebilirlik için yapıların ve kullanılan malzemelerin enerji verimliliği ve inşaat sırasında CO_2 emisyonunun azaltılması öncelikli konular arasına girmiştir. Yapılarda kullanılan dış cephe yalıtım malzemeleri istenilen yalıtımı sağlasa da yangına karşı dayanıksız olması ve kolay yanması can ve mal güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Bu gibi durumlar, yalıtım malzemelerinin yangına karşı dayanıklılığını ön plana çıkan köpük betonun önemini artırmaktadır. Köpük beton; ısı iletim katsayısı düşük olması, yangına karşı dayanıklılığı, şantiye ortamında kolay üretimi, ucuz olması gibi nedenlerle son on yılda kullanımı giderek artmaktadır (Huang, vd., 2015).

Köpük betonun ısı ve ses yalıtımı özellikleri göstermesi nedeniyle yapılarda güçlü kullanım potansiyeli vardır. Buna rağmen mekanik özellikleri normal betona göre düşüktür. Bugüne kadar hafif betonda yüksek sıcaklık etkisi ile ilgili birçok araştırma yapılmışsa da, hafif agregalı köpük betonda yüksek sıcaklık etkisi ile ilgili araştırmalar sınırlıdır. Mydin ve Wang (2011 b) yaptığı araştırmada köpük betonu yüksek sıcaklığa maruz bıraktıklarında; çimento harcının kimyasal bileşeni ve fiziksel yapısında önemli değişimler saptamışlar. Bu değişimler köpük beton yapısında bozulmalara yol açarak mekanik davranışlarını olumsuz etkilemiştir.

Köpük beton hakkında geçmişte yapılan deneysel çalışmalar incelendiğinde; yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan köpük betondaki ısı iletkenlik katsayısı değişimleri (Wing ve Wang, 2011), köpük betonun mekanik özellikleri (Jones ve McCarthy, 2005 a), uçucu külün köpük beton dayanımına etkisi (Kearsley ve Wainwright, 2001 a), su emme özellikleri (Nambiar ve Ramamurthy, 2007 a), dijital görüntü analizi ve SEM görüntüleme (Wei, vd., 2013), yüksek sıcaklıklarda köpük betonun mekanik özellikleri (Mydin ve Wang, 2011 b) gibi alanlarda çalışma yapıldığı görülmüştür.

Bu tez kapsamında iyice yaygınlaşan ve kullanım alanı gittikçe artan köpük betonun fiziksel ve kimyasal yapısı, mikroskobik yapısı ve dayanım gücü alanlarında deneysel

çalışmalar yapılmıştır. Ortam sıcaklığında normal beton ile belli oranlarda köpük solüsyonu katkıli betonların birbiriyle fiziksel ve dayanım sonuçlarının karşılaştırmaları yapılmıştır. Ardından tüm deney gruplarındaki numuneler yüksek sıcaklığa maruz bırakılarak her bir deney grubunun kendi içinde sıcaklık artışına bağlı olarak olası fiziksel farklılık ve dayanım sonuçlarının karşılaştırması yapılarak olası değişimler araştırılmıştır. Bu tezde diğer çalışmalarda yapılmayan yüksek sıcaklık sonrası dijital görüntü işleme ve taramalı elektron mikroskopu çekimleri (SEM) yapılarak bu sonuçların ortam sıcaklığına bağlı olası değişimleri saptanmış olup birbirleriyle ve normal beton ile karşılaştırması yapılmıştır.

Bu çalışmada hacimce % 0, % 20, % 40, % 60 köpük solüsyonu katkıli ve katkısiz olmak üzere 4 adet deney grubu hazırlanarak kendi aralarındaki dayanım ve fiziksel farklılıklar incelenip daha sonra yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık dereceleri 100 °C, 400 °C ve 700 °C, olup bu sıcaklıklara 3 saat boyunca maruz bırakılarak deney sonrasında olası fiziksel değişiklik ve dayanım değişimleri saptanmaya çalışılmış olup, dijital görüntü analizi, SEM çekimleri yapılarak birbirleriyle ve normal beton ile karşılaştırması yapıp olası farklılıklar yorumlanmaya çalışılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Hafif Beton

Günümüzde yüksek katlı yapı ihtiyacı giderek artmaktadır. Gerek artan nüfus, gerekse azalan inşaat alanı yüksek katlı yapı inşaatını artırmaktadır. Ancak betonarme yapılar yükseldikçe beraberinde başka sorunları da getirmektedir. Normal agregalı betonlarla yapılan yüksek binalarda, artan ölü yük hem temel için hem de deprem durumlarında bina için büyük risk oluşturmaktadır. Bu gibi durumlar yüksek binalarda bina ağırlığını azaltmak için betonun birim ağırlığını azaltmaya yönelik arayışlar başlatmıştır. Betonda kullanılan normal agregaya yerine hafif ya da ince agregaya kullanılarak beton birim ağırlığında düşüşler elde edilerek hafif beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Hafif beton; boşluklu doğal ve yapay agregaya kullanarak, beton içerisinde boşluklar oluşturarak (Gaz beton, köpük beton gibi), kumsuz beton üretme yöntemleriyle elde edilir. Hafif betonların birim ağırlığı 800-1800 kg/m³ arasında değişir. Yapılarda birim ağırlıklarına göre taşıyıcı duvar, yalıtım harcı gibi alanlarda kullanılırlar (Serin, vd., 2007).

Hafif beton; hafif agregaya, düşük maliyetli bileşenler (EPS, perlit, kil v.b) veya direk olarak gaz veya köpük solüsyonunun katkı olarak katılmasıyla üretilir. Vibratöre gerek duymadan kendi kendini sıkıştırabilmesi, hafifliği, ısı yalıtım özelliği, düşük maliyet, üretim kolaylığı gibi özellikleri normal betona göre hafif betonu daha avantajlı yapar. Çoğunlukla çatı yamaçlarında, döşeme uygulamalarında, her türlü boşluk doldurma projelerinde (madenler, tüneller, zemin stabilizasyonu v.b), zemin döşeme ve duvar uygulamaları gibi yerlerde kullanılır (Wei, vd., 2014).

Hafif beton dayanımını artırmak için silis dumanı kullanılan çalışmada farklı çaptaki agregaya ve kumun hafif betonun dayanım özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışmada farklı çaptaki ve miktardaki agregaya, kum ve silis dumanı karışımı 10cm'lik küp numuneler hazırlanmış olup, 1, 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinden sonra dayanım özellikleri araştırılmıştır. Deney sonuçlarında hafif betona katılan silis dumanı miktarı arttıkça betondaki akışkanlığın ve işlenebilirliğin arttığı, basınç dayanımının arttığı saptanmıştır. Tüm deney gruplarında betonun yaşı arttıkça basınç dayanımının arttığı, su emmenin azaldığı

görülmüştür. Normal agrega çapı büyüdükçe betonun basınç dayanımının arttığı, işlenebilirliğin azaldığı ve kumun betonun dayanımına herhangi bir etkisinin olmadığı saptanmıştır (Badu ve Badu, 2003).

Hafif betonlarda birim ağırlık ve basınç dayanımı arasındaki ilişki incelenmesinde; 2000 kg/m³ birim ağırlıktaki betonlarda silindir basınç dayanımı 17 MPa'dan, 800-1800 kg/m³ birim ağırlığında ise 0.7-7 MPa'dan az olmaması istenir (Çankıran, 1998).

Chi vd., (2003), farklı agrega tipi ve çapının hafif betona olan dayanım etkisini araştırmıştır. Yaptığı çalışmada farklı su-çimento oranları, farklı miktarda uçucu kül katkısı ve farklı çaptaki agregalar kullanarak 180 adet 100x200mm çapında silindir numuneler üretmiştir. Hazırladığı silindir numuneleri 27 gün kür havuzunda bekletip ardından 24 saat oda sıcaklığında kurumaya bırakarak deneylere geçmiştir. Deneyler sonunda tüm numunelerde agrega çapı ve uçucu kül miktarından bağımsız olarak su-çimento oranı arttıkça basınç dayanımı ve elastisite modülünde düşüşler meydana gelmiştir. Su-çimento oranı ve agrega çapından bağımsız olarak tüm numunelerde uçucu kül miktarı arttıkça basınç dayanımı ve elastisite modülünde artma meydana gelmiştir. Su-çimento oranı ve uçucu kül miktarından bağımsız olarak tüm numunelerde agrega çapı arttıkça basınç dayanımı ve elastisite modülünde artma meydana gelmiştir.

Uçucu külün agrega olarak kullanıldığı çalışmada, yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı beton üretimi için en uygun malzemelerdir. Bu agregalar kullanılarak üretilen betonlarda; normal agregalı betonlara göre % 22 daha hafif, basınç dayanımı % 20 daha yüksek, kuruma büzülmesi % 33 daha az ve daha fazla dayanıklılık özellikleri vardır. Bu tip agregalarla çimento miktarını artırmadan normal betona göre daha üstün özelliklerde betonlar üretilmesiyle; yapının ölü yükü azaltılmakta, prefabrik beton giderlerini azaltılmakta böylece daha ekonomik sonuçlar elde edilmektedir (Kayalı, 2008).

Demirboğa ve Gül (2003), hafif betonlarda perlit ve pomza agregalarının, silis dumanı ve uçucu kül katılmasıyla betonun ısı iletkenliğine yaptığı etkiyi araştırmışlardır. Üretim aşamasında silis dumanı ve uçucu kül çimento harcına % 10, % 20, % 30 oranlarında çimento miktarı azaltılarak ağırlıkça katılmış, 28 gün sonra ısı iletkenlik katsayıları ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlarda kontrol numunelerinde 0.3178 W/mK ısı iletkenliği

tespit etmişlerdir. Pomza agregası, silis dumanı ve uçucu kül katılması ve miktarının artması hafif betonda ısı iletkenlik katsayısının % 50 civarında düşüşüne sebep olmuştur.

Hossain (2004), volkanik külün hafif betona olan etkisini araştırmıştır. Yaptığı çalışmada hafif beton üretiminde çimento kütlesini % 0, % 5, % 10, % 15, % 20, % 25 oranlarında azaltarak yerine volkanik kül eklemiştir. Numuneleri 27 gün kür havuzunda bekletildikten sonra deneylere geçmiştir. Elde edilen sonuçlarda % 15 oranında volkanik kül kullanılması hafif betonda, kontrol grubuna göre daha hızlı kuruma, daha iyi işlenebilirlik, daha yüksek dayanım, düşük kuruma büzülmesi, daha fazla su geçirgenliği, daha düşük elastisite modülü sonuçlarını elde etmiştir.

2.2. Gaz Beton

Gaz beton; hava boşluklarının uygun bir havalandırma maddesiyle beton içerisine sıkıştırıldığı, hafif beton olarak adlandırılan çimento harcıdır. Birim ağırlığı 300 kg/m^3 ile 1800 kg/m^3 arasında değişir, böylece yapısal, bölme, yalıtım gibi özel uygulamalar için üretim esnekliği sağlar. Normal betondan belirgin avantajı yapının temel ve duvarları dahil olmak üzere tasarımını iyileştirmesi, hafif olması ve ısı yalıtımıdır (Narayanan ve Ramamurthy, 2000).

Gaz beton üretimi 2 farklı yöntemle yapılmaktadır. Hava sürüklenme yöntemi kullanılarak yapılan üretimde; çimento harcına plastik olduğu aşamada alüminyum tozu, hidrojen peroksit, kalsiyum karbür gibi kimyasallar katılarak gözenekli yapı oluşturarak üretilir. Bu kimyasallar çimento harcında reaksiyon vererek oksijen ve asetilen ürünlerini açığa çıkarırlar. Bu kimyasallar içerisinde en çok kullanılan alüminyum tozudur. Gaz beton üretiminde kullanılan diğer yöntem ise köpükleme yöntemidir. Bu yöntemde köpük ajanı su ile karıştırılarak köpük solüsyonu elde edilir. Üretilen köpük solüsyonu plastik haldeki çimento harcına katılıp karıştırılarak köpük beton üretilir. Köpükleme yönteminde herhangi bir reaksiyon oluşmaz (Narayanan ve Ramamurthy, 2000).

Gaz beton numunesinin boyutu, şekli, gözenek oluşum yöntemi, yaşı, su içeriği, kullanılan bileşenlerin özellikleri, kür yönteminin betonun basınç dayanımına etkileri vardır (Narayanan, 1999: Isu, vd., 1995: Odler ve Robler, 1985). Büyük gözeneklerin oluşumuyla

birim ağırlık düşünün mukavemet düşüşüne neden olduğu (Pospisil, vd., 1992), yüksek sıcaklık ve basıncın otoklav sıkıştırma direncini artırdığı böylece otoklav basıncına ve süresine bağlı olarak basınç dayanımının belirlenebileceği (Rudnai, 1963), yapılan çalışmalarda bulunmuştur.

Tanaçan, vd., (2009) yüksek sıcaklığa maruz bırakılan gaz betonun çeşitli soğutma yöntemleriyle soğutulmasının gaz betonun mukavemetine etkisini araştırmışlardır. Yüksek sıcaklık etkisi olarak 21°C, 100 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C ve 965 °C seçilmiş soğutma yöntemi olarak ta hava ortamında ve suda soğutma yöntemleri seçilmiştir. Deney sonuçlarında gaz betonun 200 °C'ye kadar mukavemet özelliklerinde ve hacminde değişim sınırlı olmuş, sıcaklık yükseldikçe mukavemet özelliklerinde ve hacminde düşüşler meydana geldiği tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklık sonrası su ile soğutulan numuneler hava ortamında soğutulan numunelere göre mukavemet özellikleri düşük çıkmış ama hacimleri daha fazla çıkmıştır.

2.3. Köpük Beton

1900'lü yılların başlarında inşaat mühendisleri betonda iki ana işlev olarak işlenebilirlik ve dayanım arıyorlardı. Fakat işlenebilirlik için çimentoya katılan suyu artırmak gerekiyordu bu da betonun dayanım özelliklerini yani dayanımı olumsuz etkiliyordu. Bu yüzden dayanımdan ödün vermeden işlenebilirliği artırmanın yolları aranmaktaydı. Bu arayışların sonunda betona katıldığında istenilen özelliği vermesini sağlayan kimyasal katkılar bulundu. Bu katkılardan günümüzde en çok kullanılan akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkılardır. Bu tür katkıların ana bileşeni sentetik olarak üretilen sodyum, alkil, kalsiyum naftalin sülfonatlardır. Yüzey aşındırıcı maddeler olarak da bilinen sülfonatlar, beton içerisine homojen dağılan küçük hava kabarcıkları oluşturarak işlenebilirliğini artırmaktadır. İnşaat mühendislerini çıkmaza sürükleyen işlenebilme ve dayanım sorunu bu maddeler ile çözüldü (Akman ve Akçay, 2004).

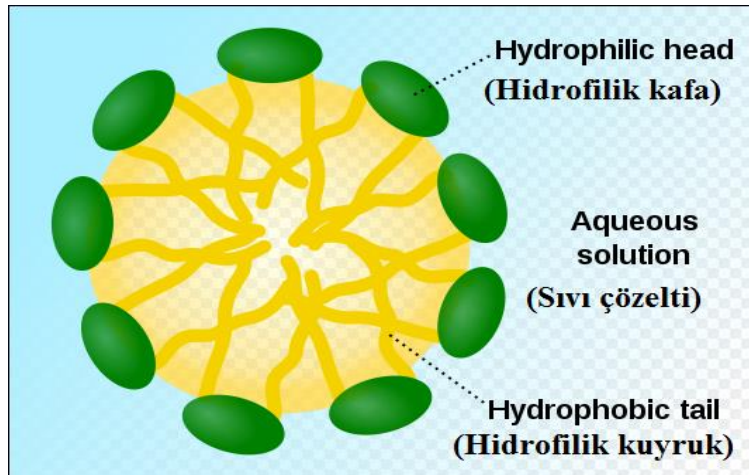
Beton; basınç dayanımı yüksek fakat çekme dayanımı çok düşük olan bir malzeme olduğundan çekme dayanımına maruz kalması istenmez. Sert iklim koşullarında betonun yapısında hidratasyona katılmayan serbest halde bulunan su donma çözülme yapar. Betondaki bu suyun donma çözülme yapması betonda çekme gerilmelerine yol açar. Bu da

betonda iç gerilmemelere ve çatlaklara yol açarak betonu kullanılamaz hale getirir. Bu yüzden betonun donma çözülme etkisinden korunması istenir. Yapılan çalışmalar betonun yapısında bulunan hava kabarcıklarının betonda donma çözülme etkisini azalttığı saptanmıştır. Suyun donmasıyla oluşan hacim genişmesinin hava kabarcıkları tarafından karşılanarak gerilmeleri önlediği anlaşılmıştır. Bu da sert ilkim koşullarında hava sürükleyici katkıların kullanılmasını zorunlu kılmıştır (Bryant, 1990).

Köpük beton, hava boşluklarının harç içine, uygun köpürme ajanıyla oluşturulan köpük solüsyonun katılmasıyla elde edilen, hafif beton olarak da adlandırılan çimento harcıdır. Yüksek akışkanlık, düşük birim ağırlık, çok az agrega kullanımı, düşük dayanım ve çok iyi ısı ve ses yalıtımı özelliklerine sahiptir. Köpük ajanı dozajı ayarlanarak 400-1600 kg/m³ birim ağırlığında köpük beton üretilir. Köpük beton; oda bölmesi, yalıtım harcı, dolgu ve taşıyıcı duvar gibi amaçlarla kullanılır (Valore, 1954; Ramamurthy, vd., 2009).

Köpük ajanı; düşük yoğunluklu hafif beton üretmek amacıyla, vinillik reçeli ve surfaktan oluşan koyu renkli katkı maddesidir. (Akman ve Akçay, 2004). Düşük yoğunluklu hafif beton üretmek amacıyla kullanılan köpük ajanı, sodyum, kalsiyum ve alkali sülfonatlardan oluşur. Köpük ajanını karma suyuna ilave ettikten sonra kuvvetli bir karıştırma ile köpük solüsyonu imal edilir. Elde edilen köpük solüsyonu, ince agrega, çimento ve su ile karıştırılarak birim ağırlığı 400 kg/m³ ile 1800 kg/m³ arasında olan hafifletilmiş gözenekli beton üretilir. Bu betona köpük beton denir (TS EN K 134, 2014).

Sülfonatlar; surfaktan maddelerden oluşup bir sıvının yüzey gerilimini azaltan maddelerdir. Hidrofilik baş ve hidrofobik kuyruktan oluşan surfaktan molekülleri hava ile suyun birleştiği yerde yoğunlaşırlar. Suyun içindeyken bu moleküllerin hidrofobik kısımları hava kabarcığı tarafından çekilir ve hava kabarcığının etrafını sarar ve hava kabarcığını suyun içinde muhafaza eder. Suyun dışında ise bunun tersi olur. Surfaktan maddeler yüzey gerilimini azalttığı için suyun yüzeyine çıkan kabarcıklar uzun süre patlamadan kalırlar (Can, 2017).



Şekil 2.1. Surfak yapılarının sıvı içerisinde hava boşluklarının oluşturması (Helmenstine, 2017)

Şekil 2.1'den de görüldüğü gibi surfaktan iyonlarının hidrofilik kuyrukları, polar olmadığı için sudan uzaklaşmaya çalışırken, hidrofilik kafaları ise polar olduğu için suyun yüzeyine tutunurlar. Yüzey aktif madde moleküllerinin polar kafaları, su ile daha güçlü etkileşime girdiğinden su içerisinde hidrofilik dış kapak şeklinde bariyer oluştururlar. Bu şekilde sıvı içerisinde hava kabarcıkları oluşturarak sıvının köpürmesini sağlarlar (Helmenstine, 2017).

Köpük beton yapısındaki hava kabarcıklarının çapı 0.1 mm ile 1.5 mm arasındadır. Birim ağırlığı 400 kg/m^3 ile 1800 kg/m^3 arasında değişmektedir. Köpük betonun 28 günlük basınç dayanımları normal betonun yarısı kadardır. İlk patenli ve kayıtlı kullanım tarihleri 1920'lerin başlarıdır. Hollanda'da 1970'lerin sonlarına kadar zemin mühendisliği uygulamalarında boşluk doldurucu olarak kullanılmıştır. Köpük ajanının kalitesi son yıllarda artmış, bu da üretim ve kullanım kolaylığı getirmiştir. Günümüzde ısı ve ses iletim katsayıları düşük olduğu için yalıtım malzemesi ve dolgu malzemesi olarak tercih edilmektedir (Brady, vd., 2001).

Son yıllarda inşaat sektöründe hava sürükleyici katkı olarak köpük ajanının suyla karıştırılması ile elde edilen köpük solüsyonu kullanılmaktadır. Köpük solüsyonun beton ile belli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen gözenekli veya boşluklu betona köpük beton denir. Köpük betonun yapısında homojen olarak dağılmış küçük hava boşlukları vardır, bu yüzden bu betona olan ilgi son yıllarda artmıştır. Köpük beton; hafifliği, üretim kolaylığı,

dayanıklılık, maliyetin normal betona göre az olması, ses ve ısı yalıtımı gibi özelliklerinden dolayı yapı malzemesi olarak tercih edilmektedir. Normal betona göre basınç dayanımının düşük olması, köpük betonu ancak düşük katlı yapılarda oda bölmesi, hafif yük taşıyıcı duvar, ısı ve ses yalıtımı, duvar harcı olarak kullanım alanı vardır (Mydin ve Wang, 2011 a).

Köpük beton herhangi bir sıkıştırma veya titreşime maruz bırakılmadan girdiği kalıbın şeklini alabilecek kadar akışkan olmalıdır. Bu özelliği, yapısına katılan köpük ajanı dozajı ve su-çimento oranıyla ayarlanabilir (Nambiar ve Ramamurthy, 2008). Köpük betonun kuruma büzülmesi, yapısında hafif agrega olmasından dolayı normal betona göre 10 kat daha fazladır ve büzülmesi birim ağırlık arttıkça azalır (Jones, vd., 2003). Köpük betonun gözenekli yapısı, dayanım ve dayanıklılığı etkiler. Bu gözenekli yapılar jel gözenekleri, kılcal gözenekler, hava boşlukları ve köpük solüsyonundan kaynaklı boşluklardır (Visagie ve Kearsely, 2002). Boşluk dağılımı köpük betonun dayanımını etkileyen faktörlerden birisidir. Dar hava boşluk yapılarına sahip köpük betonlarda daha yüksek dayanım özelliklerine rastlanılır. Uçucu külün kullanılması kabarcıklar üzerinde kaplama yaparak boşlukların eşit dağılmasını sağlar ve birleşmelerini önler. Yüksek oranlarda köpük solüsyonu kullanımı boşlukların birleşmesine ve düşük dayanıma yol açar (Nambiar ve Ramamurthy, 2007 b; Visagie ve Kearsely, 2002). Köpük betonun basınç dayanımı boşluk çimento harcı oranı, boşluklar arası mesafe, boşluk sayısından etkilenir (Wee, vd., 2006; Kearsley ve Visagie, 1999; Nambiar ve Ramamurthy, 2007 b). Köpük beton yapısındaki hava boşlukları küresel yapılı ve 50 mikrometre çapındadır, bu sayede normal betona göre daha az su geçirgenliğine sahiptir (Neville, 1995). Köpük betonun üretimde kullanılan malzeme tipleri, su-çimento oranı, kür süresi köpük ajanı dozajı beton özelliklerine önemli etkisi vardır (Ramamurthy, vd., 2008).

McCormik (1967) yaptığı çalışmada ince agrega çapı, kum, çimento ve uçucu kül çimento karışımının köpük beton özelliklerine etkisini incelemiştir. Elde edilen sonuçlarda agrega çapının artması birim ağırlıkta ve dayanımda artışa neden olduğu, uçucu kül çimento karışımının kum çimento karışımına göre daha iyi dayanım özelliği gösterdiği ve yüksek birim ağırlığa yol açtığı tespit etmiştir.

Köpük betonun basınç dayanımı ile ilgili yapılmış birçok araştırma vardır. Kearsley (1996)'a göre köpük betonun birim ağırlığı azaldıkça basınç dayanımı da katlanarak azalır.

Valore (1954)' a göre numune boyutu ve şekli, boşluk oluşturma yöntemi, yükleme yönü, betonun yaşı, su içeriği, kullanılan malzeme özellikleri, kürlenme yönteminin basınç dayanımına önemli etkileri vardır. Visagie ve Kearsel (2002) göre kuru birim ağırlığı 500-1000 kg/m³ arasında olan köpük betonlarda basınç dayanımı, boşluk çapındaki artışla beraber azalır. 1000 kg/m³ üzerindeki birim ağırlıklarda ise basınç dayanımı boşluk çapından bağımsız, çimento harcı özelliklerine bağlıdır.

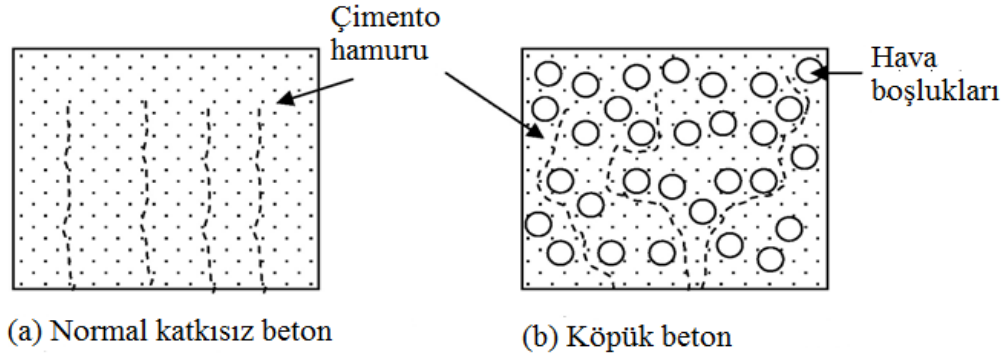
Köpük betonun basınç dayanımının birim ağırlıkla doğru orantılı olduğu ve çimento harcına uçucu kül karıştırılması betonun çatlama süresini uzattığı için daha yüksek basınç dayanımı elde edildiği yapılan araştırmalarla tespit edilmiştir. Köpük betona silis dumana katıldığında daha yüksek basınç dayanımı elde edilir. İnce kumun kaba kuma göre köpük betonda daha iyi dayanım özelliği gösterdiği tespit edilmiştir. Kaba kum kullanılarak hazırlanan köpük betonlarda boşluklar düzensiz ve büyük yapıdadır. İnce kum kullanılarak hazırlanan köpük betonlarda boşluklar daha küçük ve düzenli yapıdadırlar (Nambiar ve Ramamurthy, 2006; McCornik, 1967).

Köpük betonun eğilme dayanımının basınç dayanımına oranı 0.25-0.35 arasındadır. Çekme gerilmesi ve eğilme dayanımı normal ve hafif betona göre çok düşüktür. Kum ile hazırlanan köpük betonlarda uçucu kül ile hazırlanan köpük betonlara kıyasla daha yüksek eğilme dayanımına sahiptir. Bu özelliğin kumun çimento harcı ile daha iyi aderans göstermesi olarak düşünülmektedir (Jones ve McCarthy, 2005 a). Polipropilen liflerin köpük betonda kullanılması çekme gerilmesi ve eğilme dayanımına olumlu etki yaptığı saptanmıştır (Kearsely ve Mostert, 1997). Köpük betonun statik elastisite modülünün, normal ve hafif betona göre düşük olup, 500-1500 kg/m³ birim ağırlıktaki köpük betonlar için 1-8 MPa arasında değişmektedir (Jones ve McCarthy, 2005 b).

Köpük beton; gözenekli mikro yapısından dolayı mükemmel ısı yalıtımına sahiptir. 1000 kg/m³ birim ağırlığındaki köpük betonun aynı birim ağırlıktaki normal betona göre ısı iletkenlik katsayısı % 5-30 arasında daha düşüktür. Birim ağırlığı 600-1600 kg/m³ olan köpük betonlarda ısı iletkenlik katsayısı 01-07 W/mK arasında değişir ve birim ağırlık azaldıkça ısı iletkenlik katsayısı da azalır (Jones ve McCarthy, 2005 a). Birim ağırlığın 100 kg/m³ azalması ısı iletkenlik katsayısını 0.04 W/mK oranında azaltır (Weigler ve Karl, 1980).

Kearsley ve Wainwright (2001 b) köpük betonun porozitesi ve geçirgenliği üzerine araştırma yapmışlardır. Su-çimento oranları 0.3, 0.4, 0.5 olacak şekilde her birine ağırlıkça % 50, % 66.7, % 75 oranında uçucu kül katmıştır. Ardından köpük solüsyonu katılarak hazırlanan numunelerin birim ağırlıkları 1000 kg/m^3 , 1250 kg/m^3 , 1500 kg/m^3 olarak tespit etmişlerdir. Her bir deney grubundaki numuneleri 27 gün kür havuzunda beklettikten sonra deneylere geçmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre uçucu külün poroziteye etkisinin olmadığı, su emmenin arttığı saptanmıştır. Tüm deney gruplarında birim ağırlık arttıkça porozitenin azaldığı, su emmenin azaldığı ve porozite arttıkça su emmenin arttığı sonucuna varmışlardır.

Deniz yapılarında kullanılan betonlarda, betonun su emme yüzdesi bu tür yapılar için hayati önemdedir. Betonun kılcal boşluklarına dolan su, oluşturduğu basınç nedeniyle betonda çatlaklara yol açmakta bu da betonun dayanımına olumsuz etki yapmaktadır. Köpük betonla yapılan çalışmalarda; Şekil 2.2’de görüldüğü gibi köpük betonun normal betona göre su emme oranı ve gücü daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Belli oranlarda köpük solüsyonu katılan betona uçucu kül katıldığı zaman su emmenin arttığı saptanmıştır (Nambiar ve Ramamurthy, 2006).



Şekil 2.2. Normal beton ile köpük betonda suyun emilmesi durumu (Nambiar ve Ramamurthy, 2006)

2.4. Yüksek Sıcaklık Etkisi

Yüksek sıcaklığın beton ve betonarme yapılara etkisi 1922’den beri araştırma konusu olmaktadır. Yüksek sıcaklık etkisinde ve sonrasında betonun ve betonarmenin kompozit

yapısı, karmaşık davranışlara yol açmakta ve bunun sonucunda yapının bütünlüğünü koruyup koruyamayacağı anlaşılmaya çalışılmıştır (Khoury, 2000).

Yapılarda çıkan yangınlarda yapının, yangını en az hasarla atlması önemli olduğundan kullanılan yapı malzemesinin yangına dayanıklılığı da önemlidir. Uzun süreli yangınlarda sıcaklığın 1200 °C'ye kadar çıktığı ölçülmüştür. Bu sıcaklığa kadar yapı malzemesi olarak kullanılan ahşabın yandığı, çeliğin sertliğini kaybedip dayanım kaybettiği, betonarmenin ise parçalanıp döküldüğü gözlenmiştir. Ancak yapılan araştırmalar da betonun diğer yapı malzemelerine göre yangına fiziksel ve kimyasal olarak daha dayanıklı olduğu saptanmıştır (Kocataşkın, 2000).

Kaza veya herhangi bir nedenle çıkan yangınlarda, beton yapılar bazen yüksek sıcaklığa maruz kalabilmektedir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun yüzeylerinde ısı akışı, suyun buharlaşması, büzülme gibi durumlarda çatlaklar oluşabilmekte, elastisite modülü düşebilmekte, ısının betonarmenin içindeki donatıya ulaşip yapının yük taşıma kapasitesini düşürebilmektedir. Bu durum özellikle nükleer santrallerde ve büyük tünellerde büyük sorunlara yol açabilmektedir (Sakr ve El-Hakim, 2005).

Yüksek sıcaklığın betona etkisi 20. yüzyıldan beri araştırılmaktadır. Betonun kompozit bir malzeme olması yangın direncini karmaşıklaştırmaktadır. Bunun nedeniyse beton yapısında bulunan malzemelerin birbirinden farklı termal özelliklere sahip olmasıdır. Bazı araştırmalar, silis dumanı ilavesinin, betonda gözeneklerin artışına yol açarak olası buhar basıncında betonun çatlamasına yol açtığını saptamışlardır. Artan hafif beton isteği ve uygulaması bu konu hakkında daha fazla araştırma yapılması gerektiğini ortaya çıkarmaktadır (Tanyıldız ve Coşkun, 2008).

Sertleşmiş beton; yüksek sıcaklığa maruz bırakılınca yapısında önemli fiziksel ve kimyasal değişimler olur. Çimento hamurunda 100 °C ile 200 °C arasında su buharlaşır bunun sonucunda büzölmeler olur. Bu sıcaklıklarda basınç dayanımında kısmı yükselişler olur. Sıcaklık 400 °C ve üzerinde ise çimento hamurunda kimyasal ayrışma, kimyasal bağ suyunun buharlaşması, mikro çatlak oluşumu ve artışı, Van der Waals kuvvetleri azalışı, basınç dayanımı düşmesi, porozite ve gözenek boyutu değişimleri meydana gelir. Bu da betonun dayanım özelliklerine olumsuz etki yapar (Demirel ve Keleştemur, 2011).

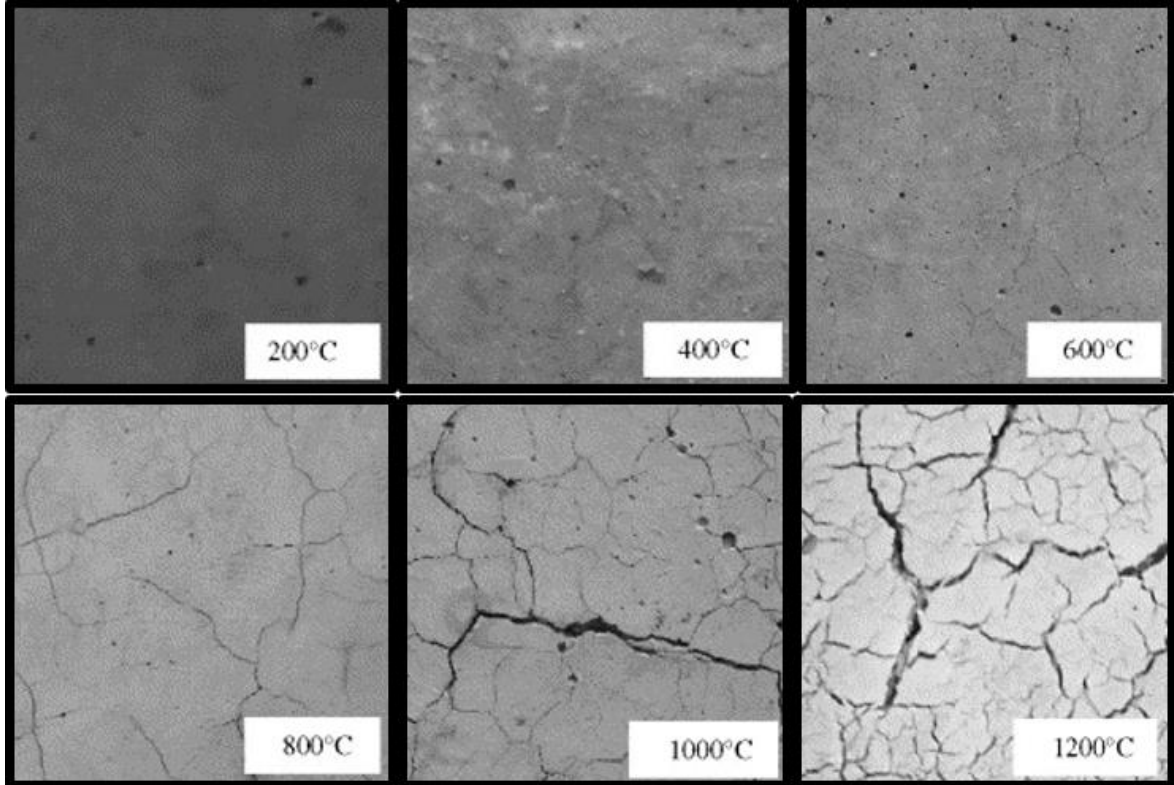
Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan betonlarda; 110 °C ve üzerinde beton yapısındaki su tamamen buharlaşır. Sıcaklık 300 °C'ye yükseldiğinde kalsiyum silika hidrat yapısının (C-S-H) dehidratasyonu başlar. Artan ısı, agregalarda ısıl genleşmeler ve iç gerilmelere yol açarak mikro çatlaklar oluşturur. Çimento hamurundaki $Ca(OH)_2$ bileşikleri 400 °C'de CaO 'e reaksiyon vererek büzölmelere ve önemli basınç dayanımı kayıplarına neden olur ayrıca bu sıcaklıktan sonra mikro çatlakların oluşumu hızlanır. Sıcaklık 600 °C'ye yükseldiğinde çimento hamurundaki C-S-H yapıları tamamen bozulur, 800 °C'de beton ufalanmaya başlar ve 1150 °C ve üzerinde çimento hamurundaki diğer mineraller cam faza dönüşür. Tüm bu olaylar betonda önemli dayanım kayıplarına neden olur. Farklı agregalar yüksek sıcaklıklarda farklı mekanik ve kimyasal özellik gösterdiklerinden bu sıcaklıklarda agrega davranışları önemlidir. Kuvars silisli agregalarda yüksek sıcaklıklarda hacim genleşmesine bağlı olarak betonda hasar oluşur. Kalkerli agregalarda 800-900 °C'den sonra $CaCO_3$ reaksiyon vererek CO_2 'de ayrışır ve bunun sonucunda oluşan hacim genleşmeleri betona hasar vererek basınç dayanımı kayıplarına ve mikro çatlak oluşumlarına neden olur (Arioz, 2007).

Yüksek sıcaklık etkisindeki betona, sıcaklığın düşürülmesi amacıyla su kullanılması betonun zarar görmesine neden olmaktadır. Bunun nedeni 400 °C civarında betondaki $Ca(OH)_2$ bileşikleri CaO 'e reaksiyon verir. Bu sırada hacimde % 30'a varan büzölmeler olmaktadır. Su kullanıldığında, CaO su ile reaksiyon vererek $Ca(OH)_2$ oluşturur ve hacimde genleşmeye yol açar. Kısa sürede büzölüp genleşen betonda iç gerilmelerden dolayı hasar artar (Akman, 2001).

Betona silis dumanı katılmasının yüksek sıcaklıklarda betonun basınç dayanıma ve porozitesine olumlu etkisi olduğu tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda kütlece % 10 silis dumanı katkılı numuneler, normal betona göre % 64 daha yüksek basınç dayanımı ve daha düşük porozite değerlerine sahip olmuştur. Normal betona kütlece % 10'dan fazla silis dumanı katılması ise beton özelliklerine olumsuz etki yapmıştır (Saad, vd., 1996).

Arioz (2007) yüksek sıcaklığın betona olan dayanım etkisini araştırmıştır. Portland çimentosu, maksimum tane boyutu 15 mm olan nehir çakılı, kalker agregası ve 4 farklı su çimento oranı kullanarak 4 farklı deney gurubu oluşturmuştur. Hazırladığı numuneleri 105°C'de 1 saat beklettikten sonra 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C, 100 °C ve 1200 °C'de

2 saat yüksek sıcaklığa maruz bırakmıştır. Deney sonunda numuneler 24 saat oda sıcaklığında soğumaya bırakıldıktan sonra sertleşmiş beton deneylerini yapmıştır. Elde ettiği gözlem ve sonuçlarda, Şekil 2.3'de görüldüğü gibi 600 °C'de beton yüzeyindeki çatlaklar belirmeye başlamış, 1000 °C'de çatlaklar iyice belirgin hale gelmiştir, 1200 °C'de ise beton numuneleri tamamen ayrılmıştır. 600 °C'ye kadar birim ağırlıktaki kayıp % 10 civarındayken, 600 °C'den sonra kayıplar % 50'ye ulaşmıştır. Tüm deney gruplarında basınç dayanımı 200 °C'ye kadar biraz artmış ardından ani düşüş saptamıştır.



Şekil 2.3. Yüksek sıcaklık sonucu betonda oluşan hasarlar (Arioz, 2007)

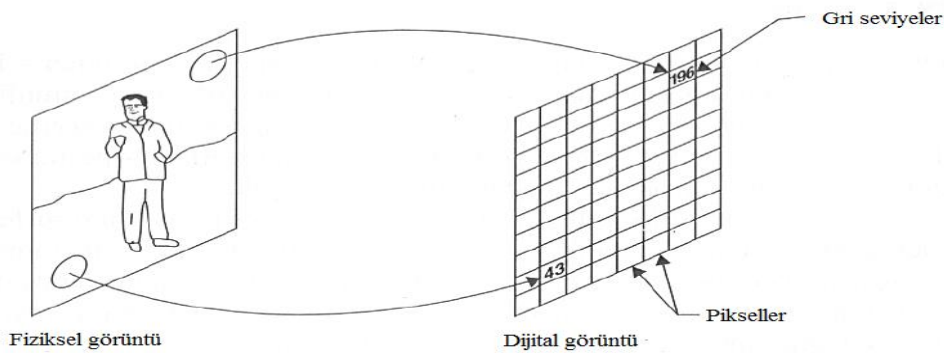
Tanyıldızı ve Çoskun (2008) uçucu kül katkılı betonun yüksek sıcaklıktaki dayanım davranışını incelemiştir. CEM 1 42,5N portland çimentosu, maksimum tane boyutu 16 mm olan agrega ve su ile su-çimento oranı 0.77 olan çimento harçları üretilip kütlece % 0, % 10, % 20, % 30 oranlarında uçucu kül ilave ederek deney grupları hazırlamıştır. Bütün deney gruplarındaki numuneleri 27 gün kür havuzunda beklettikten sonra 200 °C, 400 °C ve 800 °C yüksek sıcaklıklarına 2 saat boyunca maruz bırakıp 24 saat oda sıcaklığında soğumaya bırakmıştır. Soğuma işleminden sonra sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre; tüm deney gruplarında sıcaklık arttıkça 400 °C'ye kadar birim

ağırlıktaki kayıp % 15-20 civarında, basınç dayanımındaki kayıp ise % 20'ye yakın olmuştur. 400 °C'den sonra birim ağırlık ve basınç dayanımında ani düşüşler tespit etmişlerdir. Hafif beton yapısına katılan uçucu kül miktarı arttıkça birim ağırlık ve basınç dayanımındaki kayıplar azalmıştır.

2.5. Dijital Görüntü İşleme ve Analizi

İnsanda görme olayıyla meydana gelen görüntünün beyinde oluşturulması sürecinin bilgisayar ortamında gerçekleştirilmesine görüntü işleme ve analizi denir. Bu işlem görüntünün elde edilmesi, sayısallaştırılıp bütünleştirilmesi, iyileştirilmesi yeniden görüntü oluşturulması olayları gibi birçok işlemi kapsar. Dijital görüntü işleme tıp, biyoloji, fizik, mühendislik, uzay, havacılık, savunma sanayisi ve güvenlik sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanım alanları; medikal görüntüleme, elektron mikroskobu görüntüleri, spektrometre görüntüleri, uzay ve havacılıkta fotoğraf görüntülerini işlemede ayrıca parmak izi taraması ve göz taraması gibi alanlardır (Akkoyun, 2010).

Dijital görüntü işlemede görüntüler $f(x, y)$ olacak şekilde 2 boyutlu fonksiyon olarak tanımlanır. Buradaki x ve y görüntüdeki koordinat noktaları olarak tanımlanır. F fonksiyonu ise x ve y koordinat çiftinde görüntünün yoğunluğu veya gri seviyesi olarak tanımlanır. Bir görüntünün fotoğraftan bilgisayara aktarıldıktan sonra görüntü dijitalleşir. Görüntünün dijitalleştirilmesi için önce bilgisayar tarafından görüntü, bilgisayarın tanımlayabileceği şekilde sayısallaştırılmalıdır. Bu sayısallaştırma işlemi için bilgisayar $f(x, y)$ koordinat sistemine ihtiyaç duyar (Efford, 2000; Özen'den (2007)).

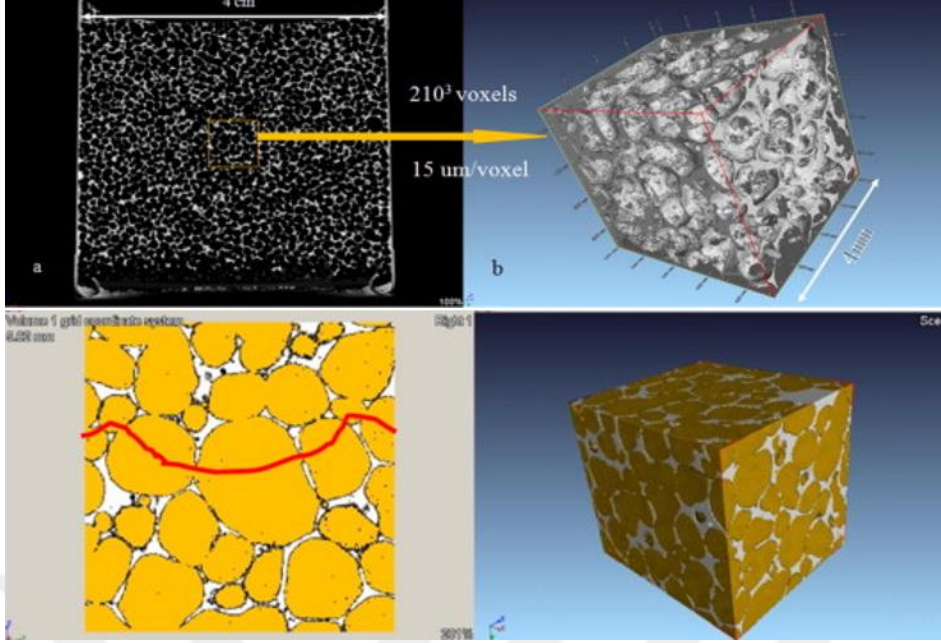


Şekil 3.4. fiziksel görüntünün dijital görüntüye çevrilmesi (Castleman, 1996; Özen'den 2007)

Şekil 2.4’de gösterildiği gibi bir fiziksel görüntünün veya fotoğrafın dijital görüntüye çevrilmesi için bilgisayar görüntüyü önce piksel adı verilen görüntü parçacıklarına dönüştürür. Daha sonra bilgisayar bu piksellere ayrı ayrı numara vererek koordinat sistemi oluşturur. Bu koordinat sistemindeki her sayı (piksel) gerçek görüntüde bir renk karşılığı olur. Bu şekilde gerçek görüntünün her bir bölgesinin dijital görüntüdeki $f(x, y)$ koordinat düzlemindeki karşılığı olur. Bu işleme sayısallaştırma denir. Sayısallaştırılan pikseller sayesinde gerçek görüntünün dijital görüntüsü çıkartılır (Castleman, 1996; Özen’den 2007).

Görüntü işleme ve analiz yöntemiyle beton içerisindeki agregaların dış bükeyliği, şekil faktörü gibi özellikleri tespit edilebilmektedir (Mora ve Kwan, 2000). Soroushian, vd., (2003) yaptıkları çalışmalarda betondaki mikro çatlaklara ve boşluklara odaklanmak için otomatik olarak niceleyici mikro yapısal analizlerinde dijital görüntü işleme ve analiz yöntemini kullanmıştır. Köpük beton yapısındaki hava boşluğu analizi ve miktarı, beton yoğunluğu ve dayanıma etki eden parametrelerini dijital görüntü işleme ve analizi yöntemiyle yapılabilmektedir. Bu yöntem için optik mikroskoba bağlı kamera ile görüntü analizi yapabilen programlar kullanılmaktadır. Bu yöntemle hava boşlukları hacmi, büyüklüğü ve aralarındaki mesafenin betonda dayanım ve yoğunluğa etkisi araştırabilmektedir (Nambiar ve Ramamurthy, 2007 b).

Wei, vd., (2013) yaptığı çalışmada farklı birim ağırlıktaki ($300-1700 \text{ kg/m}^3$) köpük betonların dayanım özelliklerinin karşılaştırmasını yapıp ayrıca X-ışını bilgisayarlı tomografide 2D ve 3D görüntü analizi yapmıştır. 2D görüntülerine dayanarak malzemenin etkin termal ısı iletkenlik katsayısını hesaplayacak yöntem geliştirmiştir. Elde edilen tahminlerin deneysel verilerle ve mevcut modellerle karşılaştırması yapıp tutarlı sonuçlar elde etmiştir. 3D modellemede köpük betondaki boşlukların çapını, dağılımını ve birbirleriyle olan mesafelerini analiz etmiştir. Şekil 2.5’de görüldüğü yapılan dijital görüntü analizinde köpük beton içindeki boşlukların birbiriyle birleşerek daha büyük boşluklar oluşturduğu saptamıştır.



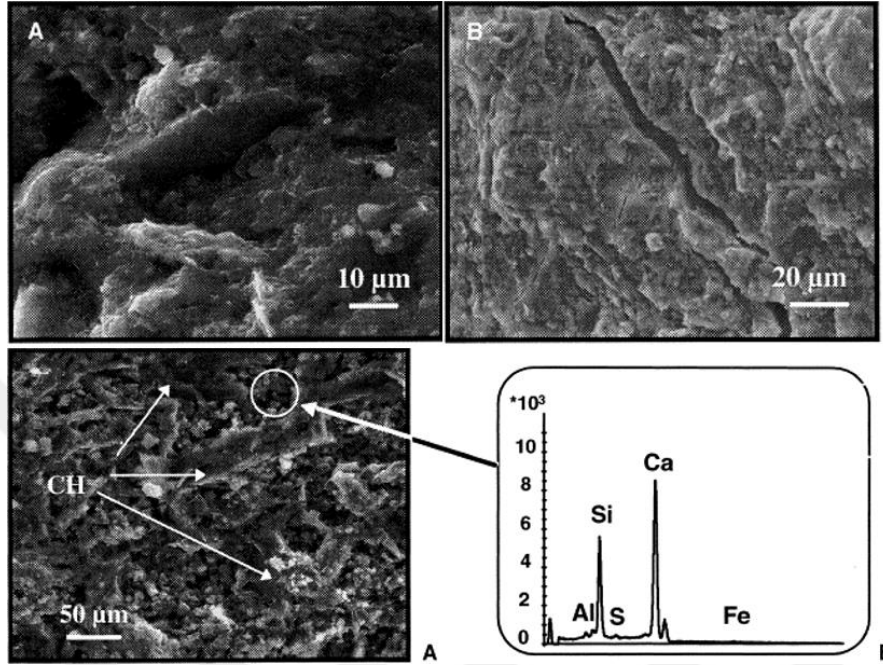
Şekil 2.5. Köpük betonda yapılan 2D ve 3D dijital görüntü analizleri (Wei, vd., 2013)

2.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Elektron Mikroskop Analizi (EDX)

İnsan gözünün çok küçük ayrıntıları görebilme yeteneği yoktur. Bu nedenle daha küçük ayrıntıları görebilmek için çeşitli cihazlar geliştirmişlerdir. Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Elektron Microscope – SEM), elektro optik prensipler çerçevesinde mikro ölçekte ayrıntıları görüntüleyerek bu amaca hizmet eder. Ernst Ruska ve Dr. Max Knoll 1931 yılında ilk SEM prototipini üretip, 1937 yılında yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskobunu geliştirmeyi başarmışlardır. Ticari olarak ilk kez 1965 yılında kullanılmıştır. SEM’de; elektronların yüksek voltaj ile hızlandırılarak numune üzerine odaklanması sonucunda numune ve elektronlar arasında meydana gelen etkilerin algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerden geçirildikten sonra katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla görüntü elde edilir. Modern sistemlerde bu sinyaller dijital sinyallere çevrilerek bilgisayar monitörüne aktarılmaktadır (Erdin N., 1987).

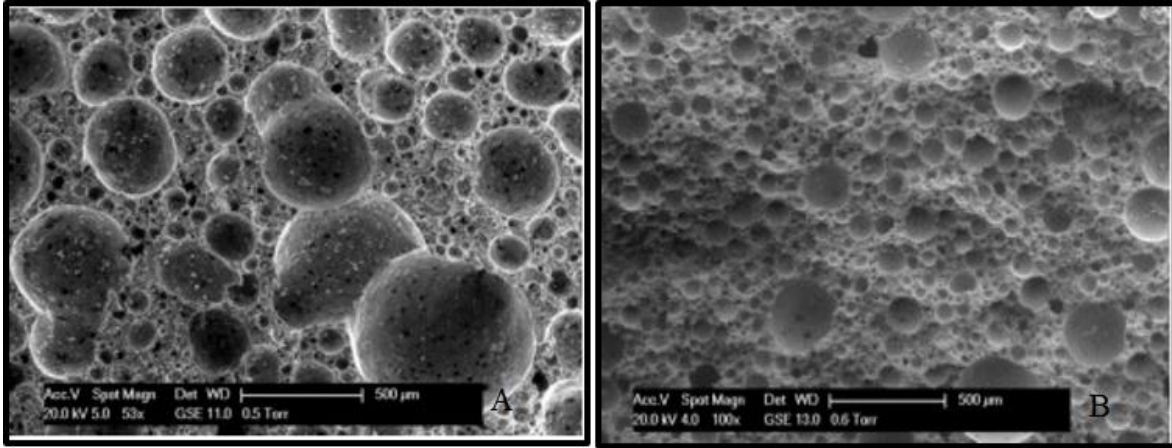
SEM görüntüleme ve EDX kimyasal analiz yöntemleri beton yapısını incelemek için geçmişteki birçok araştırmada kullanılmıştır. Beton yapısındaki agregaların çapı, çimento hamuruyla aderans oluşturma biçimi, agrega çevresindeki boşluklar ve çapları (Diamond ve Huang, 2001), farklı amaçlarla üretilen betonlardaki alkali silika jel yapıları, etrenjit yapıları ve kimyasal analizleri (Thoulow, vd., 1996), beton içerisindeki C-S-H yapıları, etrenjit ve

alçıtaşı oluşumları, agrega ve boşluk yapılarının görüntülenmesi ve kimyasal analizleri ve farklı koşullar altındaki değişimleri görüntülenebilmektedir. Şekil 2.6’da SEM ile çekilmiş C-S-H yapıları, etrenjit ve mikro çatlaklar görülebilmektedir (Moureta, vd., 1999).



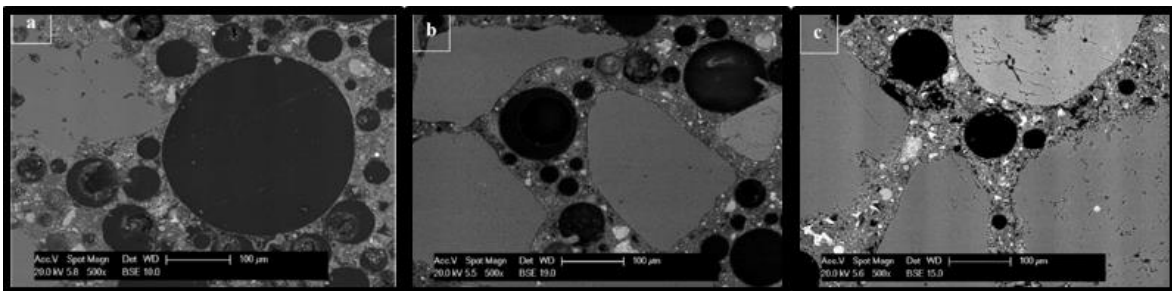
Şekil 2.6. Beton iç yapısının SEM ile görüntülenmesi ve EDX analizi yapılması (Moureta, vd., 1999)

Wei, vd., (2013) köpük betondaki hava boşluklarını SEM görüntüleme yöntemiyle yaptığı incelemede; birim ağırlığı $500-1000 \text{ kg/m}^3$ olan köpük betonlar kullanmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre hava içeriği yüksek olan köpük betonlarda hava boşluklarının yakınlığı nedeniyle boşluk birleşmeleri daha fazla olmaktadır. Bu verilere göre birim ağırlığı düşük olan köpük betonlarda daha büyük hava boşluklarına rastlanılmıştır. Bu özellik birim ağırlığı 900 kg/m^3 olan betonlarda daha belirginleşmektedir. Boşluk birleşmelerinin yeterli çimento hamuru olmayışından kaynaklandığını tespit etmiştir. Şekil 2.7’de köpük betondaki boşluk yapısının SEM ile çekilmiş görüntülerinde birbirine yakın boşlukların birleşimi görülebilmektedir.



Şekil 2.7. Farklı birim ağırlıktaki köpük betonlarda hava boşluk yapısının karşılaştırılması (Wei, vd., 2013)

Hilal, vd., (2015), yaptığı çalışmada birim ağırlığa göre köpük betondaki boşluk yapısının değişimi incelemiştir. Yaptığı çalışmada CEM I 52,5 N çimentosu, doğal ince agrega, içilebilir su ve birim ağırlığı 45 kg/m^3 olan köpük ajanı kullanmıştır. Birim ağırlıkları 1300 kg/m^3 , 1600 kg/m^3 , 1900 kg/m^3 olan küp numuneler üretilip boşluk yapısı ve miktarını SEM görüntüleme kullanarak hesaplamıştır. Elde edilen görüntülerde boşluk miktarı, köpük betonun birim ağırlığı azaldıkça arttığı gözlemlenmiştir. Birim ağırlık azaldıkça boşlukların arasındaki mesafe azaldığı için daha büyük boşluklara rastlanmıştır. Şekil 2.8’de birim ağırlığa göre boşluk yapısı daha rahat görülmektedir, birim ağırlık düştükçe boşluk yapısının büyüdüğü görülmektedir.



Şekil 2.8. Birim ağırlığa göre boşluk yapısı a) 1300 kg/m^3 , b) 1600 kg/m^3 , c) 1900 kg/m^3 (Hilal, vd., 2015)

2.7. Köpük Betonda Yüksek Sıcaklık Etkisine Yönelik Çalışmalar

Köpük beton; yüksek sıcaklığa maruz bırakıldığında fiziksel yapısında ve kimyasal bileşiminde değişimler meydana gelmektedir. Yüksek sıcaklıklarda köpük betondaki fiziksel

değişimler, çoğunlukla çimento hamurunun azlığından dolayı betondaki suyun hemen buharlaşarak betonun gevrekleşip daha kolay parçalanmasıdır. Yaklaşık 110 °C üzerindeki sıcaklıklarda beton yapısında bulunan suyun buharlaşması, çimento hamurunda bulunan kimyasal bağ suyunun ayrılarak buharlaşmasına neden olmaktadır. Köpük betonda belirli bir sıcaklıktan sonra kimyasal bozulmalar başlamaktadır. 300 °C’de kalsiyum silika hidrat (C-S-H) yapılarının dehidratasyonu sonucu ortaya çıkan su buharlaşıp iç basınç dayanımı artışına, çimento hamurunda geçirgenlik artışına, iç gerilme artışına ve mikro çatlakların oluşumuna yol açarak beton basınç dayanımının düşüşüne neden olmaktadır. 400 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) ayrılarak CaO ve H_2O ya dönüşür. Ayrılan su anında buharlaşarak beton yapısında çatlaklara ve betondaki suyun kaybına yol açar. Sıcak köpük beton tekrar suya maruz bırakıldığında CaO tekrar $Ca(OH)_2$ reaksiyonu vererek betonun kırılarak tahribine yol açar. Ancak bu mekanizmaları doğru şekilde anlamak için deneysel çalışmalar devam etmektedir (Mydin ve Wang, 2012).

Yapılan araştırmalarda yüksek sıcaklıklarda köpük betonda % 35’e kadar büzülme görülmüştür. Uçucu kül katılması hidratasyon ısının normal betona göre azaldığı görülmüştür. Ayrıca uçucu külün birim ağırlığı 1400 kg/m³ olan köpük betonlarda basınç dayanımını 25 MPa’a kadar çıkardığı tespit edilmiştir. Uçucu külün köpük betonda ayrıca çekme dayanımı ve elastisite modülün de olumlu etkileri saptanmıştır (Jones ve McCartyh, 2005).

Mydin ve Wang (2011 b) yüksek sıcaklığın köpük betona etkisini araştırmışlardır. Söz konusu çalışmada köpük solüsyonu 80 gr/lt, su-çimento oranı 0.5 alınarak ve ince kum kullanılarak birim ağırlıkları 650 kg/m³, 1000 kg/m³ ve normal beton numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 27 gün kür havuzunda bekletildikten sonra, 20 °C, 100°C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C ve 600 °C yüksek sıcaklıklara maruz bırakılarak sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda her 3 beton grubunda sıcaklık yükseldikçe; porozitede artış, basınç dayanımında % 60’a varan düşüşler, statik elastisite modülünde % 80’e varan düşüş, eğilme dayanımında % 60’a varan düşüş, ısı iletkenlik katsayısında düşüş saptanmıştır.

3. MATERYAL YÖNTEM

3.1 Üretimde Kullanılan Malzemeler

Köpük beton üretiminde çimento, ince kum, su ve köpük solüsyonu üretmek için köpük ajanı kullanılmıştır.

3.1.1 Çimento

Yapılan çalışmalarda, Eskişehir Çimsa Çimento Fabrikasında üretilen TS EN 197-1:2002 standartlarında uygun Çizelge 3.1’de kimyasal analizi ve mekanik özellikleri verilen CEM I 42.5 R çimentosu kullanılmıştır. Aşağıdaki tabloda söz konusu çimentonun mekanik ve kimyasal özellikleri tablo şeklinde verilmiştir.

Çizelge 3.1. CEM I 42.5 R çimentonun özellikleri

KİMYASAL ANALİZ	
SiO_2 (%)	18.59
AlO_3 (%)	4.75
Fe_2O_3 (%)	3.41
CaO (%)	63.59
MgO (%)	1.11
Na_2O (%)	0.49
K_2O (%)	0.77
SO_3 (%)	3.39
Cl (%)	0.016
Kızdırma kaybı	3.03
Serbest CaO (%)	1.56
MEKANİK ÖZELLİKLERİ	
Priz başlangıç (dakika)	160
Priz sonu (dakika)	203
Yoğunluk (gr / cm^3)	3.15
Hacim genleşmesi (cm)	1.1
Özgül yüzey (blaine cm^2 / gr)	3740

3.1.2 Su

Çimentoya ve köpük solüsyonuna katılacak suyu Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında Çizelge 3.2’de kimyasal analizi verilen şebeke suyundan

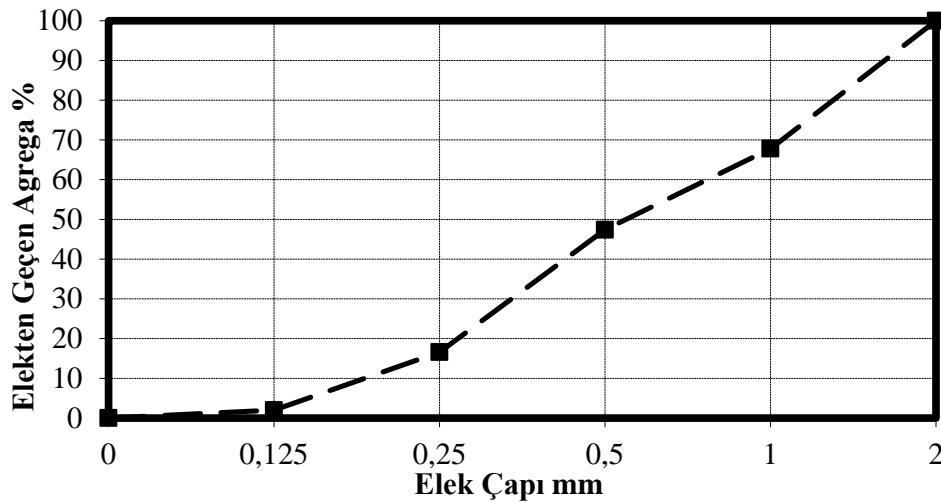
temin edilmiştir. Şebeke suyunun kimyasal analizi Eskişehir Büyükşehir Belediyesi Eski Genel Müdürlüğünün sitesinden alınmıştır. Suyun kimyasal analizi aşağıda tablo halinde gösterilmiştir (ESKİ, 2017).

Çizelge 3.2. Eskişehir şebeke suyu kimyasal analiz tablosu

KİMYASAL ANALİZ		
Kimyasal madde	Sonuç	İzin verilen en yüksek değer
Alüminyum mg/l	0.05	0.2
Nitrat mg/l	4.7	50
Nitrit mg/l	0.007	0.5
Amonyum mg/l	0.07	0.5
Sülfat mg/l	64.1	250
Demir mg/l	0.003	0.2
Mangan mg/l	Yok	0.05
Fosfor mg/l	0.09	
Florür mg/l	0.09	1.5
Fenol mg/l	0.04	
Çinko mg/l	Yok	
Bakır mg/l	Yok	2
Siyanür mg/l	0.003	0.05
Krom mg/l	0.002	0.05
Kadmiyum mg/l	Yok	5
Nikel mg/l	4	20
Kurşun mg/l	Yok	10
İletkenlik ms/cm	523	2500
Sertlik fro	22.57	
(TDS/Toplam çözünmüş madde) mg/l	314	
Ph	7.65	6.5-9.5
Bulanıklık (NTU)	0.23	
Arsenik mg/l	3.08	10

3.1.3 Agrega

Köçük beton üretiminde agrega olarak Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında bulunan ince kum kullanılmıştır. Kum için yapılan granülometri eğrisi Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. İnce dere kumu elek analizi sonuçlarına göre granülometri eğrisi

3.1.4 Köpük ajanı

Köpük solüsyonu hazırlamak için; 85 gr/lit (Artrainşaat, 2015) köpük solüsyonu elde etmek için hazırlanan deneme karışımlarında köpük ajanı ile suyun kütlece % 2.5 oranında karıştırılması gerektiği tespit edilmiştir. Karışım sonunda hazırlanan köpük solüsyonun birim ağırlığı 82 gr/lit çıkmıştır. Aydos kimyasaldan alınan Şekil 3.2’de gösterilen köpük ajanın kimyasal analizi Çizelge 3.3 de gösterilmiştir

Çizelge 3.3. Köpük ajanının kimyasal ve fiziksel özellikleri (Aydos, 2015)

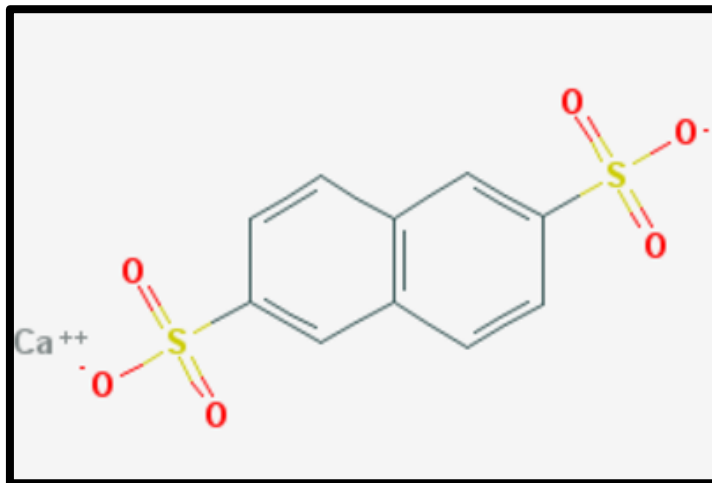
KİMYASAL VE FİZİKSEL ANALİZ		
Kimyasal içeriği	Sentetik sıvı hava sürükleyici	
Görünüm - Renk	Şeffaf – Soluk kahverengi sıvı	
Yoğunluk kg/lit	1.08 ± 0.02	ISO 758
Ph	4.5 ± 1	TS 6365 EN 1262
Klor (%)	< % 0.1	TS EN 480-10
Alkali (%)	< % 0.5	TS EN 480-12
Donma noktası	-6 °C	
Korozyon davranışı	TS EN 934-1 Ek A.1 deki bileşenleri içerir.	
Tehlikeli maddeler	yok	



Şekil 3.2. Köpük solüsyonu üretiminde kullanılan köpük ajanı

Köpük ajanı; sentetik hava sürükleyici olarak, vinilik reçine ve kalsiyum, alkali, sodyum naftalin sülfonattan oluşur. Bu bileşenler genellikle deterjan yapımında kullanılan köpürtme yapılarıdır. Sentetik üretimlidirler. Bu katkıları beton karma suyuna veya ayrı olarak su ile karıştırıldıklarında köpük oluşturur (Akman ve Akçay, 2003). Betona katılarak işlenebilirliği ve yapısındaki hava kabarcıklarını artırır. Ayrıca betonun donma çözülmeye karşı dayanıklılığını artırıp, ısı yalıtımını da sağlarlar.

Kalsiyum naftalin sülfonat 100 °C'den sonra bileşenlerinde ayrılarak sülfür ortaya çıkarır. Bu da betonda sülfat etkisi yaparak etrenjit oluşumuna neden olur. Kalsiyum naftalin sülfonatin kimyasal formülü $C_{20}H_{13}N_2NO_5S$ dür (Merckmillipore, 2017). Kimyasal açılımı Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Kalsiyum naftalin sülfonatin kimyasal açılımı (Merckmillipore, 2017)

3.2 Köpük Beton Numune Üretimi

Numunelerin hazırlanması Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarında betoniye kullanılarak hazırlanmıştır. Bunun için % 0, % 20, % 40, % 60 katkı olmak üzere 4 farklı deney grubu hazırlanmış olup hepsinden 5'er adet numune hazırlanmıştır. Bunlardan 3'er adet numune basınç dayanımı ve ultrases geçiş süresi deneyleri için, 2'er adet numune de 5x5x5cm kesilip bunlardan her bir deney ve sıcaklık grubu için; 1'er adet dijital görüntü işleme ve analizi için, 1'er adette EDX analizi ve SEM çekimleri için hazırlanmıştır. Deney olarak 20 °C, 100 °C, 400 °C ve 700 °C olmak üzere 4 adet sıcaklık etkisi göz önüne alınarak her grupta 20 tane numune olmak üzere toplam 80 adet 15x15x15cm'lik küp numuneler dökülmüştür.

3.2.1 Karışım oranları

Yapılan çalışmada 3 farklı hacimsel oranlarda köpük solüsyonu katkılı numuneler ve 1 deney grubu da katkısız numune olarak hazırlanmıştır. Köpük solüsyonu; içinde bulunan köpük ajanı su karışımı kütleli olup hepsinde aynı olmakla beraber % 2.5 tir. Hazırlanan numunelerden % 0 katkısız olan, % 20, % 40, % 60, köpük solüsyonu katkılılarda oluşabilecek değişimleri gözlemlemek için kontrol grubu olarak dökülmüştür. Tüm deney gruplarında su-çimento oranı 0.4 alınmış olup kum-çimento oranı 1 olarak alınmıştır. Deney grupları hacimsel katkı olarak % 20 % 40 % 60 alındığı için her bir grupta hazırlanan çimento harcında su-çimento ve kum-çimento oranları aynı olmakla beraber içerisine katılan köpük solüsyonu miktarına göre kütleleri değişmektedir. Hazırlanan numunelerdeki malzeme miktarları Çizelge 3.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Numunelerdeki malzeme miktarları 1m³ için kg cinsinden verilmiştir

Katkı oranı	Çimento (kg)	Kum (kg)	Su (lt)	Köpük solüsyonu (kg)
% 0	893	893	357	0
% 20	714	714	256	16
% 40	537	537	215	33
% 60	357	357	143	50

3.2.2 Karışımın hazırlanması

Karışımlardan ilk önce % 0 katkılı olan deney grubu hazırlanmıştır. Önce numune kalıpları yağlanıp döküme hazır hale getirildi. Çizelge 3.4 teki malzemeler, 20 adet numune için yeniden hesaplanarak elektronik tartıda tartılıp kütlelerine göre çimento harcı hazırlandı. Şekil 3.4’de gösterilen betoniye de yaklaşık 10-12 dakika karışım yapıldıktan sonra çimento harcı, hazırlanan numune kalıplarına döküldü. Hazırlanan numuneler 24 saat prize bırakıldıktan sonra numune kalıplarından sökülüp kür havuzuna 27 gün sonra çıkarılmak üzere konulmuştur.



Şekil 3.4. Çimento harcının betoniye de hazırlanması (çimento ve kum karışımı)

Hacimce % 0 katkılı beton dökümü bitince köpük solüsyonu katkılı beton üretimine geçilmiştir. Köpük solüsyonu hazırlanırken köpük ajanı ve su kütlece % 2.5 oranında karıştırılmıştır. Hazırlanan çözelti Şekil 3.5’te gösterildiği gibi bir matkabın ucuna yerleştirilen kafes telli perde ile 10-12 dakika karıştırılarak köpük solüsyonu elde edilmiştir. Elde edilen köpük solüsyonu tartılarak istenen karışım için gereken miktarda kullanılmak üzere Çizelge 3.4 de göre % 20, % 40, % 60 deney grubu için hazırlanan çimento harçlarına dökülmüştür. Betoniye de karışımı yapılan köpük beton çimento harcı, Şekil 3.6’da gösterilen yağlanmış numune kalıplarına dökülerek 24 saat prize bırakılmıştır. Priz sonun da kalıplardan çıkartılan numuneler kür havuzuna 27 gün sonra çıkartılmak üzere bırakılmıştır.



Şekil 3.5. Köpük ajanının su ile karıştırılması



Şekil 3.6. Köpük betonun numune kalıplarına dökülmesi

3.3 Deneyler

Deneyler için hazırlanan numuneler, 27 gün kür havuzunda bekletilip çıkartıldıktan sonra her bir deney grubundan 1'er adet numune dijital görüntü işleme ve analizi, EDX analizi ve SEM çekimleri için 5x5x5cm'lik numuneler halinde kesilmiştir. Her deney grubundan 3'er adet 15x15x15cm numuneler ile 3'er adet 5x5x5cm'lik numuneler; 20 °C, 100 °C, 400 °C ve 700 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakıldıktan sonra; 15x15x15cm'lik numuneler birim ağırlık, ultrases geçiş süresi ve basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur. Aralarında sıcaklık farkıyla oluşabilecek değişiklikler karşılaştırılmıştır. Ayrıca 5x5x5cm'lik numunelerde dijital görüntü işleme ve analizi

yöntemiyle boşluk yapısı, dağılımları ve miktarı araştırılmış, EDX analizi ve SEM görüntüleme yöntemiyle yüksek sıcaklık ile oluşabilecek mikroskobik farklılıklar ve kimyasal değişimler araştırılmaya çalışılmıştır.

3.3.1 Birim ağırlık ve ultrases geçiş süresi deneyleri

Her deney grubundaki numunelerden 3'er adet alınarak yüksek sıcaklık etkilerine maruz bırakılmış işlem sonunda her deney grubu ve sıcaklıkta 16 adet deney grubu oluşturulmuştur. Tüm numuneler Şekil 3.7 (A) ve Şekil ek.1.'de gösterildiği gibi elektronik terazide ağırlıkları ölçülmüş ve kumpas yardımıyla boyutları ölçülüp birim ağırlıkları hesaplanmıştır. Ardından tüm numunelerin ultrases geçiş süresi Şekil 3.7 (B) ve Şekil ek.2.'de gösterildiği gibi ölçülmüştür. Direk iletim yöntemiyle bulunan ultrases geçiş süresi 10^{-6} saniye hassaslıkla μs cinsinden okunmuştur. Numune boyutunun süreye oranlanması ve 10 ile çarpılmasıyla km/s cinsinden ultrases geçiş hızları hesaplanmıştır.



Şekil 3.7. Birim ağırlık ve ultrases geçiş süresi deneyleri

3.3.2 Basınç dayanımı deneyleri

Yüksek sıcaklık deneyleri sonrası, tüm deney gruplarından 3'er adet numuneler Şekil 3.8'de gösterilen TS EN 12390-3 standardına uygun cihazda basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarında cihazın kN cinsinden verdiği değer MPa çevrilmiştir. Deney sonunda Şekil ek.3.'te numunelerden biri gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Basınç dayanımı deneyi

3.3.3 Isıl iletkenlik deneyi

Isıl iletkenlik deneyi için katkısız, % 20 ve % 40 katkılı numuneler 2x2x4cm boyutlarında kesilip ısı yalıtımı sağlaması amacıyla çevresi straforla kaplanarak Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kimya Laboratuvarında Şekil 3.9 da gösterilen cihazla deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 3.9 Isıl iletkenlik deneyi

3.3.4 Köpük betonda yüksek sıcaklık etkisinin belirlenmesi

Kür havuzunda 27 gün bekletilip süreç sonunda çıkartılan 80 adet numuneler 24 saat oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Kuruma işlemi bittikten sonra 20 °C'deki toplam 12 adet numunenin sertleşmiş beton deneyleri yapıldı. 100 °C'deki deneyler için % 0, % 20, % 40, % 60, deney gruplarından toplam 12 adet 15x15x15cm'lik ve 12 adet 5x5x5cm'lik numuneler hazırlanıp yüksek sıcaklık fırınına 3 saat boyunca 100 °C'ye maruz bırakılmıştır. Deney sonunda numuneler 24 saat soğumaya bırakılmış olup ardından sertleşmiş beton deneyleri, dijital görüntü işleme ve analizi, SEM çekimleri ve EDX analizi yapılmıştır.



Şekil 3.10. Yüksek sıcaklık fırınında 400 °C'deki gösterge



Şekil 3.11. Yüksek sıcaklık fırınında deney sonrası numuneler

Sıcaklıkları 400 °C ve 700 °C olan her bir deney grubu için, Şekil 3.11’de gösterildiği gibi 12 adet 15x15x15cm ve 12 adet 5x5x5cm’lik numuneler hazırlanmıştır. Bu sıcaklıktaki deneylere başlamadan önce tüm numuneler etüvde 100 °C’de 1 saat ısıtılıp beton içindeki suyun buharlaşması sağlamıştır, nedeni ise yüksek sıcaklıklarda beton yapısında bulunan su ve su buharının basınç ile betonun çatlatmasını önlemektir. Etüvden sonra tüm numuneler Şekil 3.10’da gösterilen TS EN 1363-1’e standardına uygun olan ısınma ısı 6 °C/dak olan yüksek sıcaklık fırınında 400 °C ve 700 °C’de 3 saat boyunca deney yapılmıştır. Şekil ek.4.’te gösterildiği gibi işlem sonunda numuneler 24 saat soğumaya bırakıldıktan sonra sertleşmiş beton deneylerine geçilmiştir. 5x5x5cm’lik numuneler ise dijital görüntü işleme ve analizi ve EDX analizi ve SEM çekimleri için 1x1x1 cm’lik numuneler halinde kesilip söz konusu incelemelere tabi tutulmuştur.

3.3.5 SEM çekimleri ve EDX analizi

SEM çekimleri için 1 cm den kısa 0.5 cm yüksekliğini aşmayacak şekilde hazırlanan numuneler Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi Laboratuvarında SEM çekimleri ve EDX analizi için incelenmesi yapılmıştır. % 60 katkılı numuneler % 40 katkılı numunelere yakın deney sonuçları verdiği için % 60 katkılı numuneler dijital görüntü analizi ve SEM çekimleri incelemelerine tutulmadı. Geriye kalan 12 adet numuneler, Şekil 3.12’de gösterildiği gibi 6’lı gruplar halinde önce 20 dakika kadar altın ile kaplanıp sonra Şekil 3.13’deki gibi elektron mikroskobuna yerleştirilmiştir. Elektron mikroskobuna yerleştirilen numuneler 250x, 1500x ve 15000x büyütme ile çekimleri yapılmıştır. SEM analizi yapılırken diğer 6’li numunelerin altın ile kaplaması yapılmıştır. SEM analizinde 250x büyütmede numunenin kimyasal yapısını analiz etmek için genel EDX analizi yapılmıştır. 1500x büyütmede birbirinden farklı noktalara EDX analizi yapılmıştır. Deney sonrasında elde edilen görüntülerden 2 tanesi Şekil ek.5.’te gösterilmiştir



Şekil 3.12. SEM çekimleri için hazırlanan numunelerin kaplamasının yapılması



Şekil 3.13. Altın ile kaplanan numunelerin SEM cihazına yerleştirilmesi ve incelenmesi

3.3.6 Dijital görüntü işleme ve analizi

Dijital Görüntü işleme ve analizi için numuneler yapılacak işleme göre kesilip Ortadoğu Teknik Üniversitesi Biyoloji Bölümündeki Bimaten Laboratuvarında analize tabi tutulmuştur. 12 adet numune sırayla Şekil 3.14'de gösterilen dijital görüntü işleme cihazına yerleştirilip taraması Hamamatsu C9300 13 MP kamera kullanılarak yapıldı. Taramada

numunenin her bir katmanı 1 görüntü olarak piksel cinsinden taraması yapıldı. Tüm numunelerin görüntü analizleri yapıldıktan sonra görüntü işleme için ScanIP32-bit programı kullanıldı. Programda her bir numuneye ait görüntü verileri işlenerek numunelerdeki boşluk oranları hesaplanıp, boşluk dağılımları dijital görüntü yapılarak gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Dijital görüntü analizi yapılan cihaz

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

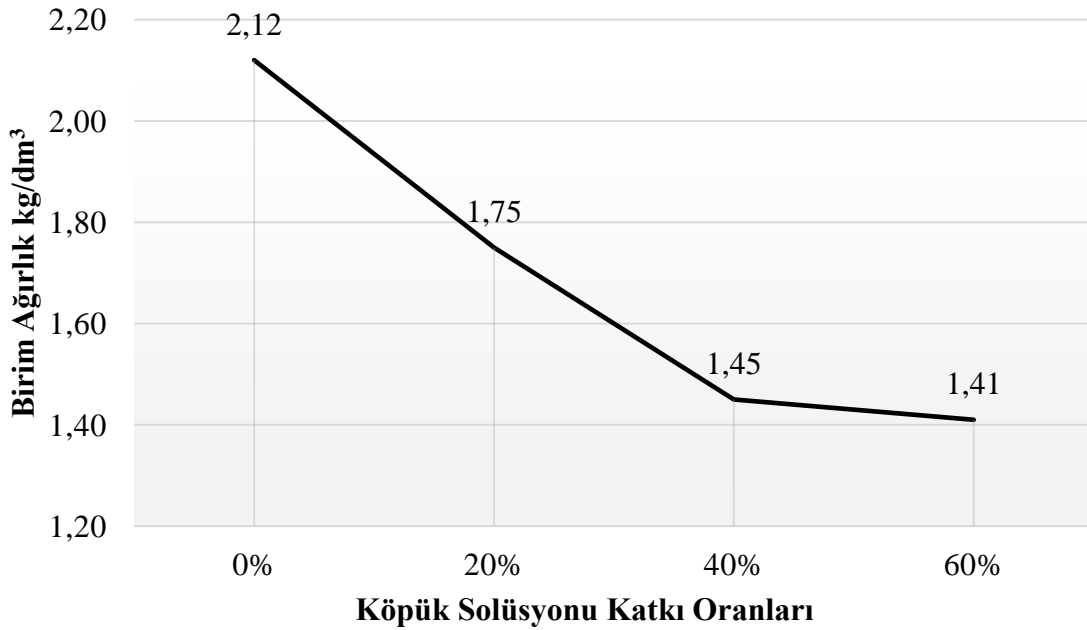
Hafif beton sınıfına giren köpük betonun; köpük solüsyonu miktarına ve yüksek sıcaklığın köpük betona etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, deneylerden elde edilen verilerin birbiri ile karşılaştırması yapılmıştır. Sayısal sonuçların aynı zamanda görüntü işleme yöntemleri ve EDX analizi ve SEM çekimleri ile elde edilen görüntülerle karşılaştırılması yapıp irdelenerek bilimsel çıkarımlar yapılmaya çalışılmıştır.

4.1 Karışım Oranlarına Göre Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Bu kısımda kontrol grubunda olan katkılı ve katkısız betonların içerisindeki köpük solüsyonu miktarlarına bağlı olarak birim ağırlık, ultrases geçiş süresi, dinamik elastisite modülü ve basınç dayanımı sonuçları birbiriyle karşılaştırılıp incelenmiştir.

4.1.1 Birim ağırlık deney sonuçlarının incelenmesi

Bu kısımda 20 °C'deki köpük beton numunelerin, yüksek sıcaklık etkisini karşılaştırmak amacıyla kontrol deneyleri yapılmıştır. Standart kür ortamında 27 gün bekletilip daha sonra 24 saat oda sıcaklığında kurumaya bırakılmış köpük beton numunelerin sertleşmiş beton deneyleri yapıldı. Sertleşmiş beton deney sonuçlarından elde edilen birim ağırlık sonuçları Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

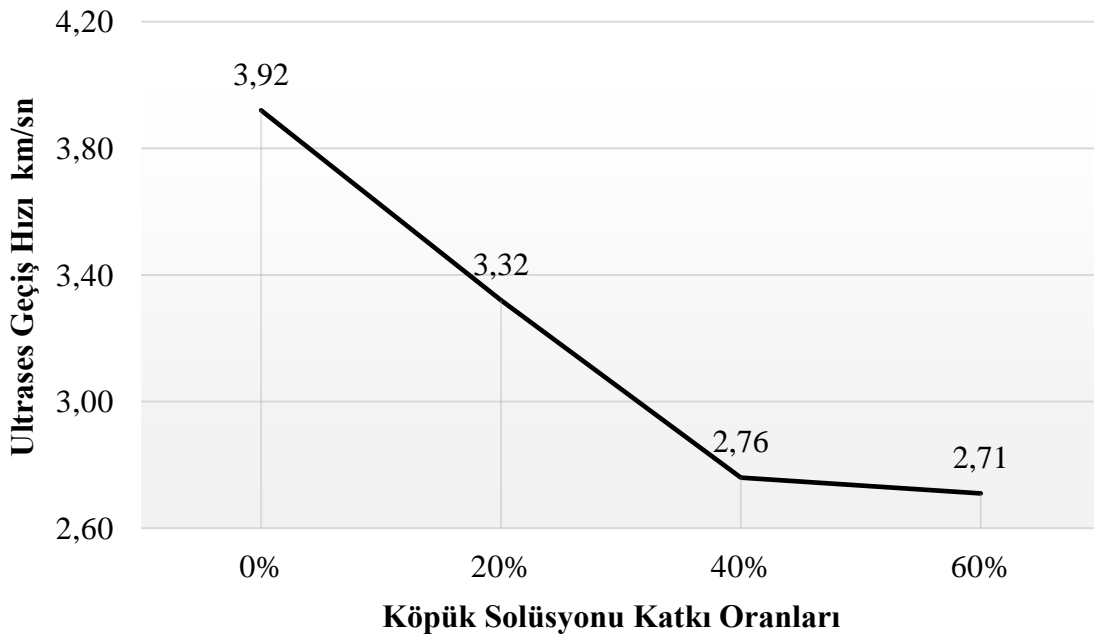


Şekil 4.1. Köpük solüsyonu katkı miktarına göre birim ağırlık sonuçları

Çizelge 3.4'deki hesaplamalarda % 0 katkısız beton numunelerin birim ağırlığı 2.1 kg/dm³ alınmıştır. Deney sonuçlarında % 0 için 2.12 kg/dm³ bulunmuştur, bu da karışımın teorik hesaplarla örtüştüğünü göstermektedir. Hacimce % 20 köpük solüsyonu katıldığında birim ağırlığı % 0'a göre % 17.5 oranında azalma görülmüştür. Hacimce % 40 köpük solüsyonu katılı numunelerin ise % 0'a göre % 31.6 oranında azalma, % 20'ye göre ise % 17.2 oranında azalma görülmüştür. Hacimce % 60 köpük solüsyonu katılı numunenin ise % 0'a göre % 33.5'lik azalma % 20'ye göre % 19.5 azalma % 40'a göre % 2.76'lik azalma görülmüştür. Hacimce % 60 köpük solüsyonu katılı numuneler dışındaki gruplarda azalma oranları birbirine göre aynı çıkmıştır. Grafik eğimi nerdeyse sabit olarak azalmaktadır. Bunun nedeni 1 m³ için köpük solüsyonu katkı oranı artıkça; su ve köpük solüsyonuna göre birim ağırlığı fazla olan çimento ve kumun miktarındaki kütlece azalmadır. Ayrıca köpük solüsyonu; beton yapısında hava boşlukları miktarını artırdığı için birim hacme düşen kütle miktarı azalmıştır. % 60 katılı beton numunelerin birim ağırlığı, % 40 katılılara yakın çıkmıştır, nedeni ise çimento harcı için hacimce % 40 karışım oranı optimum oran olarak düşünülmektedir daha fazla köpük solüsyonu katkısı çimento harcı için fazla gelmekte veya % 60 katılıda köpük solüsyonuyla karışım yapabilecek yeterli çimento harcı olmadığından karışıma uğramadığı görülmüştür.

4.1.2 Ultrases geçiş süresi deney sonuçlarının incelenmesi

Ultrases geçiş süresi deney sonuçları ölçüm yapılan mesafeye bölünüp 10^3 ile çarpılarak km/sn çevrilip ultrases geçiş hızları hesaplanıp Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

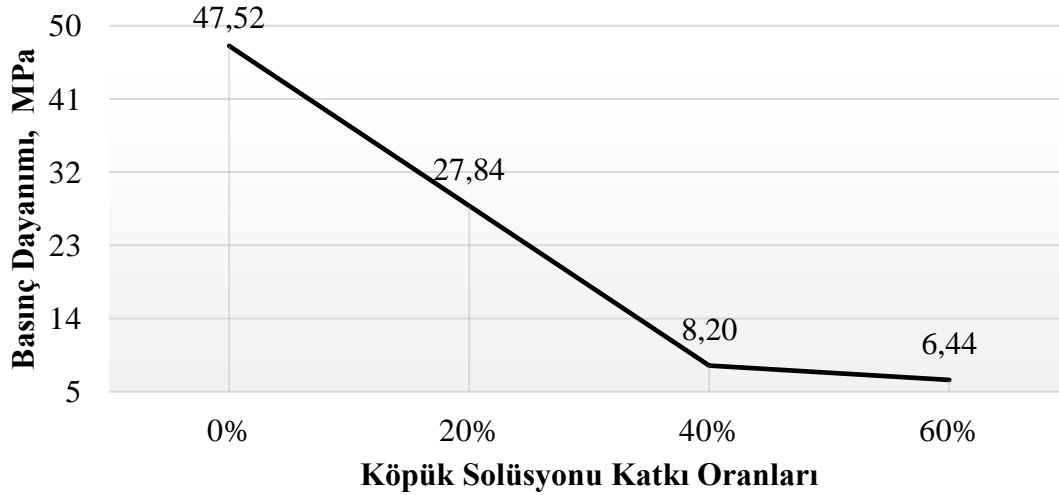


Şekil 4.2. Katkı miktarının ultrases geçiş hızlarıyla karşılaştırılması

Deney sonuçlarında % 0 katkısız numuneler için ultrases geçiş hızı 3.92 km/sn olarak bulunmuştur. Hacimce % 20 köpük solüsyonu katıldığıında ultrases geçiş hızının % 0 katkısızsa göre % 15.3 azalma görülmüştür. Hacimce % 40 köpük solüsyonu katkılı numunelerde ise % 0 katkısızsa göre % 29.6 azalma, % 20 katkılıya göre ise % 16.9’lük azalma görülmüştür. Hacimce % 60 köpük solüsyonu katkılı numunelerde ise % 0 katkısızsa göre % 30.9, % 20 katkılıya göre % 18.4 azalma, % 40 katkılıya göre % 1.8’lik azalma görülmüştür. Hacimce % 40 köpük solüsyonu katkılıya kadar ultrases geçiş hızlarında sabit eğimli azalma görülmektedir. Bu durumun nedeni ise boşluk miktarının artması ve ultrases dalgalarının çimento içinde havaya göre daha hızlı hareket etmesidir. Ultrases geçiş hızının yüksek olması betonda boşlukların az olması ve dayanım açısından daha iyi olduğu anlamına gelir.

4.1.3 Basınç dayanımı sonuçlarının incelenmesi

Kontrol grubundaki numunelerin basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Basınç dayanımı sonuçları

Basınç deneylerine tabi tutulan % 0 katkısız betonda basınç dayanımı 47.52 MPa olmuştur. Hacimce % 20 katkılı numunelerde % 0 katkısız betona göre basınç dayanımı %41.4 azalmıştır. Hacimce % 40 köpük solüsyonu katkılı numunelerde ise % 0 katkısız betona göre % 82.7 azalma, % 20 katkılıya göre % 70.5 azalma olmuştur. Hacimce % 60 köpük solüsyonu katkılı numunelerde ise % 0 katkısız betona göre % 86.45 azalma, % 20 katkılıya göre % 76.87 azalma, % 40 katkılı numunelere göre % 2.1 azalma görülmektedir. Hacimce % 0 ile % 20 katkılı arasındaki basınç dayanımı farkı 19.7 MPa, % 20 ile % 40 arasında basınç dayanımı farkı 19.7 olmaktadır. % 40 katkılı betona kadar basınç dayanımı farkı sabit eğimle azalmaktadır.

Basınç farkının bu kadar ani düşmesinin nedeni köpük solüsyonu katkı oranı arttıkça çimento harcına katılan ve betona dayanım veren çimento miktarı ve agreganın azalması ayrıca köpük solüsyonu miktarı arttıkça beton yapısındaki hava boşlukları sayısı artmakta bu da basınç dayanımına olumsuz etki yapmaktadır.

Basınç dayanımı malzemenin birim alanına en fazla ne kadar kuvvete dayanabileceğini ifade eder. Bu da malzemenin basınç dayanımı ne kadar yüksek ise yapının taşıma gücüne olumlu etki yapması demektir. Beton içine köpük solüsyonu katılması durumunda basınç dayanımının % 83'lere varan azalma görülmüştür, bu da köpük betonun taşıyıcı malzeme olarak kullanılamayacağını göstermektedir.

4.1.4 Dinamik elastisite modülü sonuçlarının incelenmesi

Basınç deneyleri sonrası elde edilen sonuçlar dinamik elastisite modülünü belirlemede kullanılmıştır. Bu hesap için aşağıdaki formüller kullanılmıştır.

60 °C'den düşük sıcaklıklar için agrega tipi ince kum olan tüm köpük katkıli numunelerde denklem 4.1(Jones and McCarthy 2005 a;57:21-31) kullanılır;

$$E_{cT} = E_c = 0.42 * f_c^{1,18} \quad (4.1)$$

Katkısız numunelerde statik elastisite modülünü hesaplamak için denklem 4.2 (ACI Building Code 318-92) kullanılır.

$$E_c = 43 * \Delta^{1,5} * \sqrt{f_c} * 10^{-6} \quad (4.2)$$

Çıkan sonuçlar GPa çevrilmiştir. Katkısız numune için verilen formül statik elastisite modülü içindir, dinamik elastisite modülüne çevirmek için denklem 4.3 (Lydon, F.D, Balendran 1986) kullanılır.

$$E_c = 0.83E_d \quad (4.3)$$

Sonuçlar Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Burada

Δ = birim ağırlık (kg/m^3) f_c =betonun 27 günlük silindir dayanımı(MPa)

E_c = Statik elastisite modülü (GPa) E_d = Dinamik elastisite modülü (GPa)

Formüllerini kullanabilmek için küp basınç dayanımları silindirik basınç dayanımlarına çevrilmelidir. Çizelge 4.1’de normal ve hafif beton için küp ve silindir basınç dayanımı çevirme oranları verilmiştir. (TS 500)

Çizelge 4.1. Basınç dayanımı çevirme tablosu

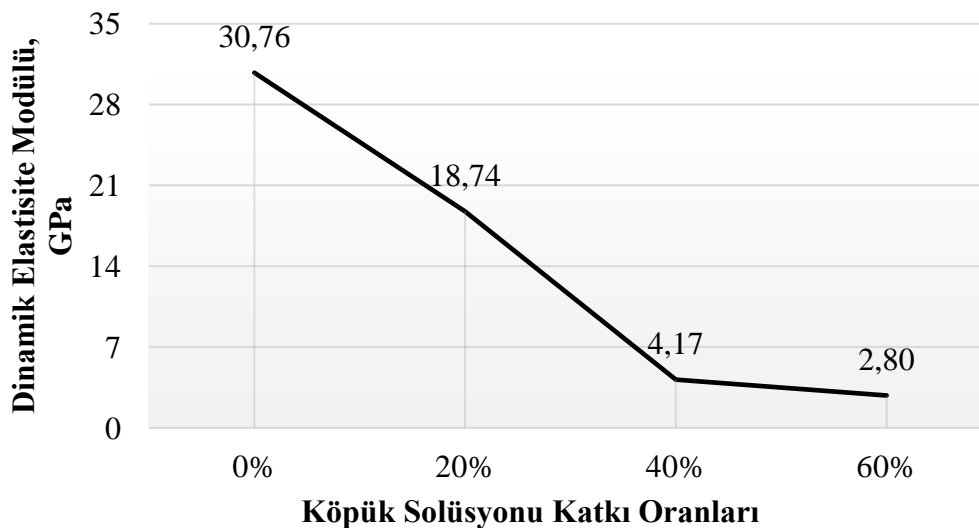
Normal beton için eşdeğer dayanımlar			Hafif beton için eşdeğer dayanımlar		
Beton sınıfı	Silindir basınç dayanımı MPa (15x30cm)	Küp basınç dayanımı MPa (15x15 cm)	Beton sınıfı	Silindir basınç dayanımı MPa (15x30 cm)	Küp basınç dayanımı MPa (15x15cm)
C16/20	16	20	LC8/9	8	9
C18/22	18	22	LC12/13	12	13
C20/25	20	25	LC16/18	16	18
C25/30	25	30	LC20/22	20	22
C30/37	30	37	LC25/28	25	28
C35/45	35	45	LC30/33	30	33
C40/50	40	50	LC35/38	35	38

TS 500 teki tablodaki basınç değerlerine göre yapılan basınç deneyleri sonuçları silindir basınç dayanımına çevrilmiştir.

Çizelge 4.2. Silindir basınç dayanım sonuçları

Sıcaklık	% 0	% 20	% 40	% 60
20 °C	37	25	7	5

Silindir basınç dayanımlarına göre (Bkz. Çizelge 4.2) yukarıda verilen formüllerden hesaplanan dinamik elastisite modülü sonuçları Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



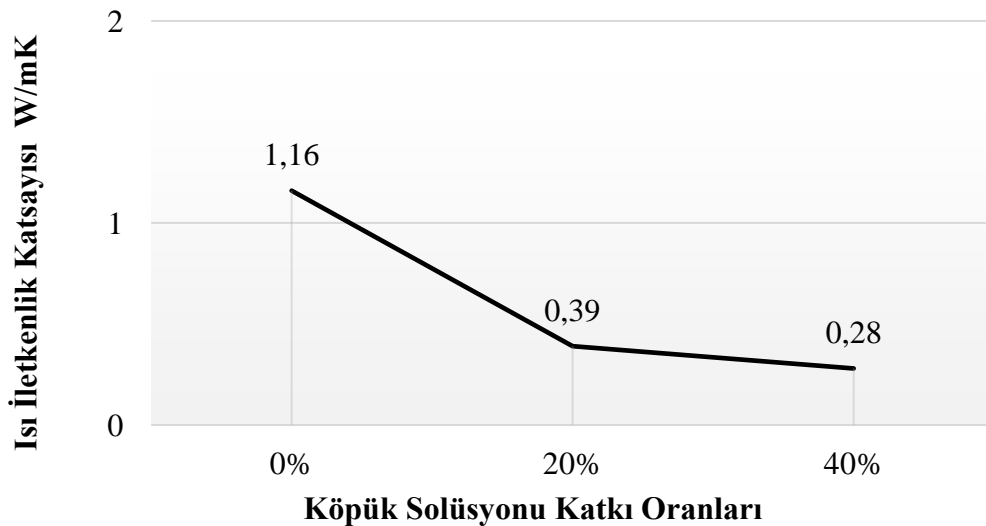
Şekil 4.4. Katkı oranlarına göre dinamik elastisite modülünün sonuçları

Basınç deneyleri sonrası hesaplanan dinamik elastisite modülü % 0 katkısız beton için 30,76 GPa bulunmuştur. Hacimce % 20 köpük solüsyonu katkılı numunelerde % 0 katkıya göre % 39 azalmıştır. Hacimce % 40 köpük solüsyonu katkılı numunelerde ise % 0 katkıya göre % 86 azalma, % 20 katkılı numunelere göre % 77.8 azalma meydana gelmiştir. Hacimce % 60 köpük solüsyonu katkılı numunelerde ise % 0 katkısız betona göre % 91 azalma, % 20 katkılı betona göre % 85 azalma, % 40 katkılı betona göre % 32.8 elastisite modülünde azalma meydana gelmiştir.

Elastisite modülü malzemenin birim şekil değiştirme için gerekli olan kuvveti ifade eder. Bu da malzemenin elastisite modülü ne kadar yüksek ise yapı için elastik şekil değiştirmenin zor olması demektir. Beton içine köpük solüsyonu katılması durumunda elastisite modülünün % 87'lere varan azalma görülmüştür. Bunun nedeni elastisite modülünü artırıcı etki yapan çimento miktarının köpük solüsyonu miktarı arttıkça azalması, çimento harcındaki su miktarının artması ve boşluk miktarının artmasıdır. Bu da köpük betonun yük altında elastik şekil değişimine daha yakın olduğunu gösterir.

4.1.5 Isı iletkenlik deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Yapılan ısı iletkenlik deney sonuçları Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



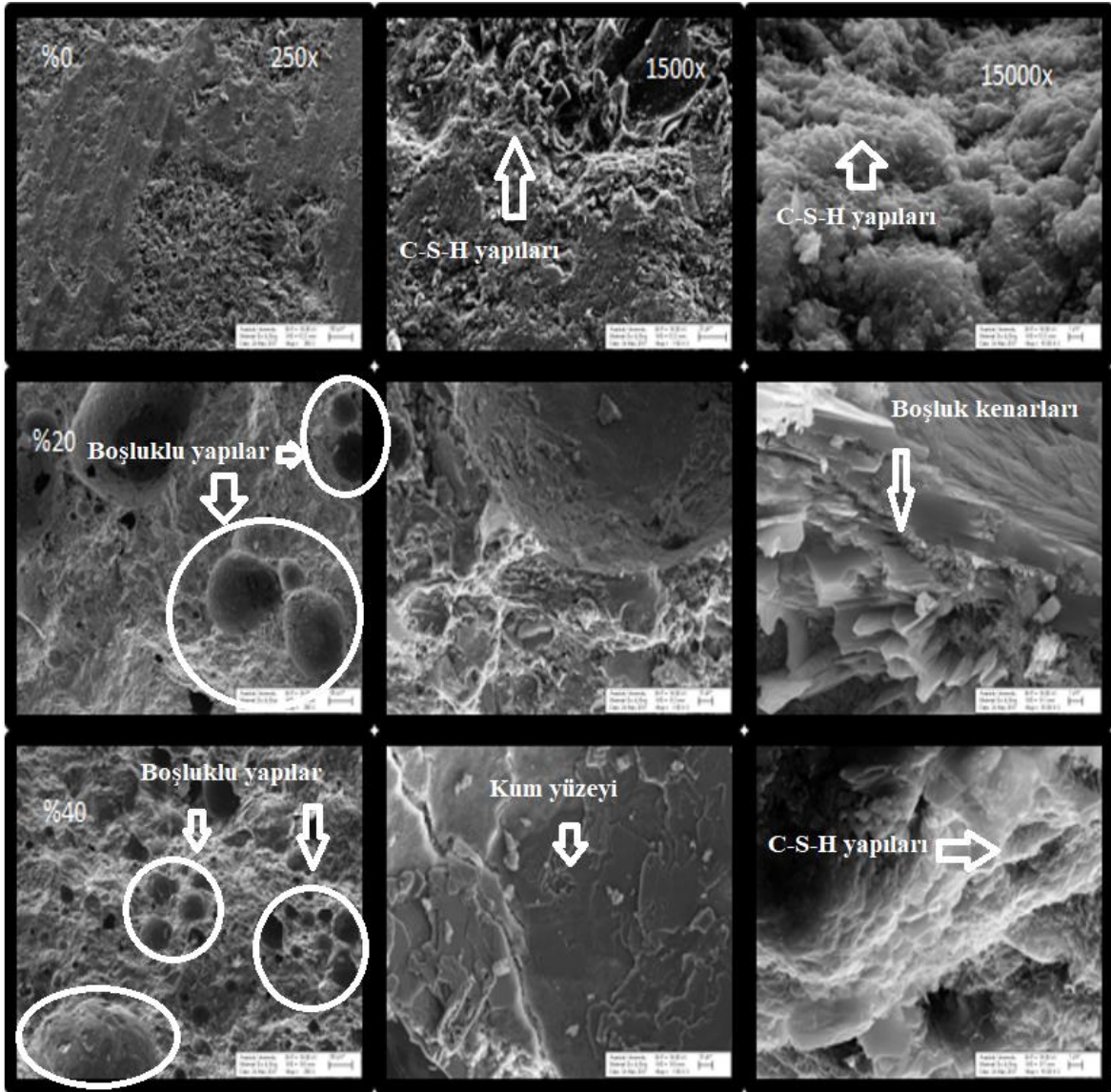
Şekil 4.5. Isı iletkenlik deney sonuçları

Isı iletkenlik deneyi sonrası hesaplanan ısı iletkenlik katsayısı % 0 katkısız beton için 1.16 W/m K bulunmuştur. Hacimce % 20 köpük solüsyonu katkılı numunelerde % 0 katkısızza göre % 66 azalmıştır. Hacimce % 40 köpük solüsyonu katkılı numunelerde ise %0 katkısızza göre % 76 azalma, % 20 katkılı numunelere göre % 28 azalma meydana gelmiştir.

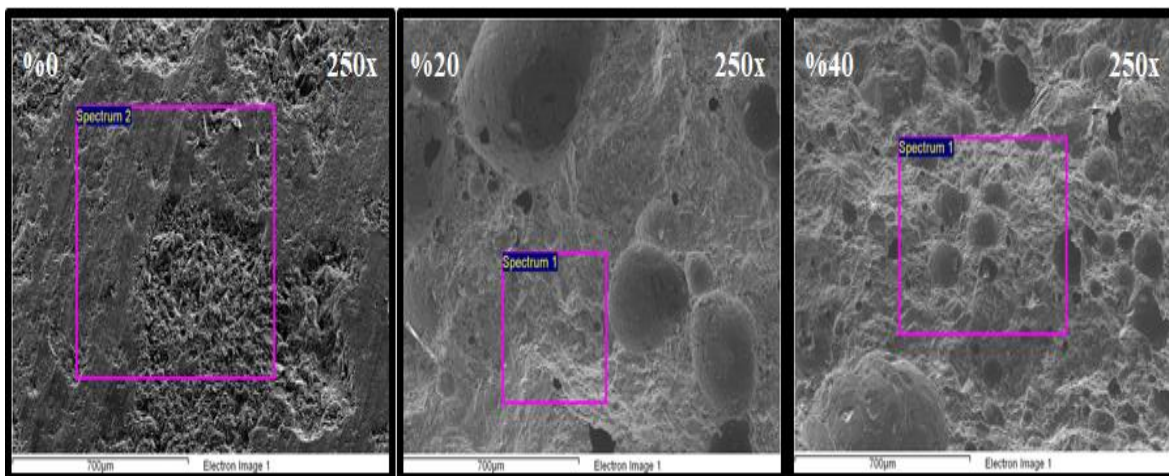
Isı iletkenlik katsayısı malzemenin ısıyı bir uçtan diğer uca iletmesi durumunu ifade eder. Isı iletkenlik katsayısı ne kadar düşük ise malzeme ısıyı o kadar az iletir. Beton içine köpük solüsyonu katılması durumunda ısı iletkenlik katsayısının % 76'lara varan azalma görülmüştür. Bununla birlikte nedeni ısı molekülleri arası titreşim yoluyla iletildiği için katı içerisinde havaya göre daha hızlı ilerler. Beton içerisine köpük solüsyonu katıldıkça betondaki hava boşlukları sayısı artacağından ısı iletimi azalır ve ısı iletkenlik katsayısı düşer. Deney sonuçlarından da görülebileceği gibi köpük betonun ısı iletkenlik katsayısı normal betona göre çok düşüktür. Bu da köpük betonu iyi bir yalıtım malzemesi yapar.

4.1.6 SEM çekimleri ve EDX analizleri sonuçlarının incelenmesi

Numunelerde 20 °C'de yapılan SEM görüntüleri sonuçları Şekil 4.6'te gösterilmiştir. Şekil 4.6'teki SEM görüntülerinden de görülebileceği gibi köpük solüsyonu miktarında bağlı olarak numunelerdeki hava boşluklarında artışlar görülmektedir. Katkısız numunelerde 250x büyütmede hava boşluğu görülmezken 1500x büyütmede çimento ve agregaya genel bakış yapılmaktadır boşluklu yapılar göz ile seçilebilmektedir. Yapılan 15000x büyütmede ise C-S-H yapıları görülmektedir. Hacimce % 20 katkılı numunelerde yapılan 250x büyütmede büyük boşluklara, 1500x büyütmede boşluk yapısına ve çimento hamuruna yakın çekim yapılmıştır. Yapılan 15000x büyütmede ise boşluğun başladığı yerdeki yapılar görülmektedir. Hacimce % 40 katkılı numunelerde 250x yakın çekimlerinde boşluklu yapıların küçüklüğü ve çokluğu dikkat çekmektedir. Yapılan 1500x yakın çekimlerinde agrega yapısı ve 15000x yakın çekimlerinde ise C-S-H yapıları görülmektedir. SEM çekimlerinden sonra yapılan EDX analizi Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir



Şekil 4.6. Beton numunelerin SEM görüntüleri

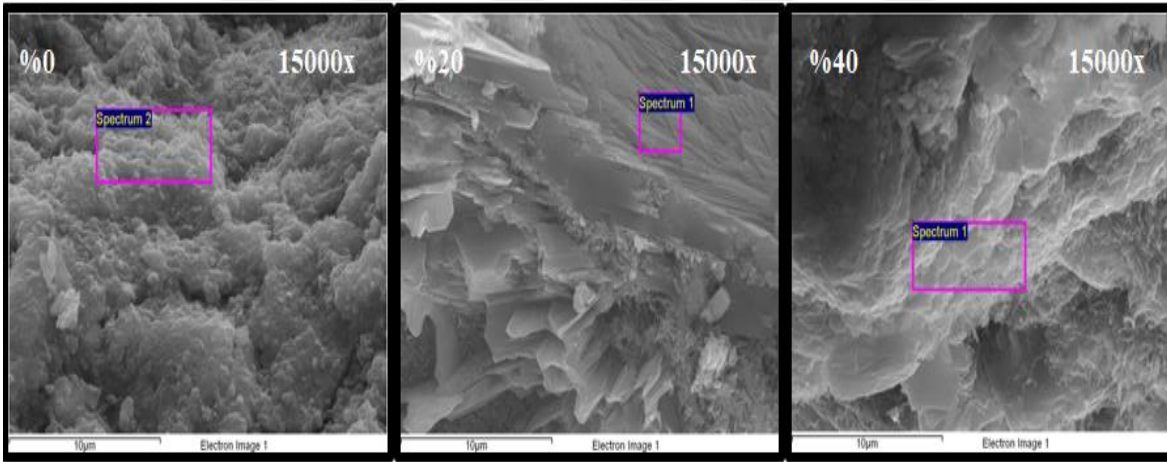


Şekil 4.7. Beton numunelerin 250x büyütmede yapılan EDX analizi görüntüleri

Çizelge 4.3. Seçili alanda bulunan elementlerin kütlece EDX analiz sonuçları

	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	S
% 0	13.81	52.58	0.38	1.02	13.74	0.37	17.40	0.70	
% 20		46.35	0.80	2.02	11.36		37.40	2.08	
% 40	4.03	47.53		1.43	8.42		37.71		0.88

Katkısız numunede yapılan genel EDX analizi sonucu elde edilen elementler Çizelge 4.3’de gösterildiği gibi C-S-H yapısına ve agrega bileşenlerine aittir. Hacimce % 40 köpük solüsyonu katkılı numunelerde boşluklu yapılarda cihazın gönderdiği elektronlar boşluklu yapının düzensiz yapısından dolayı cihaza geri dönmediğinden EDX analizi yapılamadı. Düzgün yüzeyde yapılan EDX analizi sonuçları C-S-H yapısının bir kısmını, agrega bileşenleri ve kalsiyum naftalin sülfonat yapısındaki Ca elementinin % 0 katkısızca göre 2 katından fazla artışı görülmektedir. % 40 katkılı numunelerde küçük boşluklu kısımlarda yapılan EDX sonuçlarında köpük ajanının köpürmesini sağlayan sülfonat yapısına ait Ca ve S elementine görülmektedir. Diğer bölgeler C-S-H yapılarına aittir.



Şekil 4.8. Beton numunelerin 15000x büyütmede yapılan EDX analizi görüntüleri

Çizelge 4.4. Seçili alanda bulunan elementlerin kütlece EDX analiz sonuçları

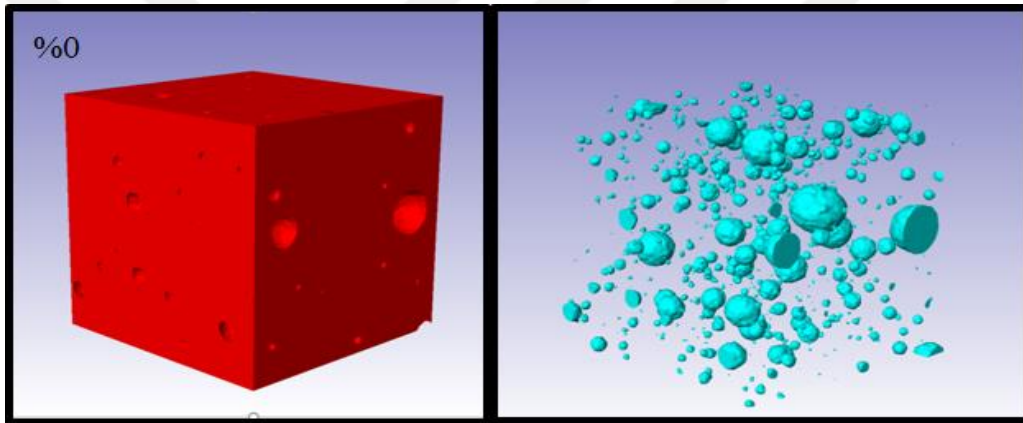
	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	S
% 0	14.18	54.85	0.43	1.02	6.06	0.37	22.01	1.08	
% 20		31.17			1.38		67.45		
% 40		34.21		0.90	2.52		58.60	3.76	

Katkısız numunede 15000x büyütmede yapılan EDX sonuçları Çizelge 4.4’te görülmektedir. Hacimce % 20 köpük solüsyonu katkılı numunede yapılan EDX analizi

küçük bir alanda yapılmıştır burada da C-S-H yapılarının bir kısmı görülmektedir. Hacimce % 40 köpük solüsyonu katkılı numunede yapılan EDX analiz sonuçlarında C-S-H yapısının bir kısmı görülmektedir.

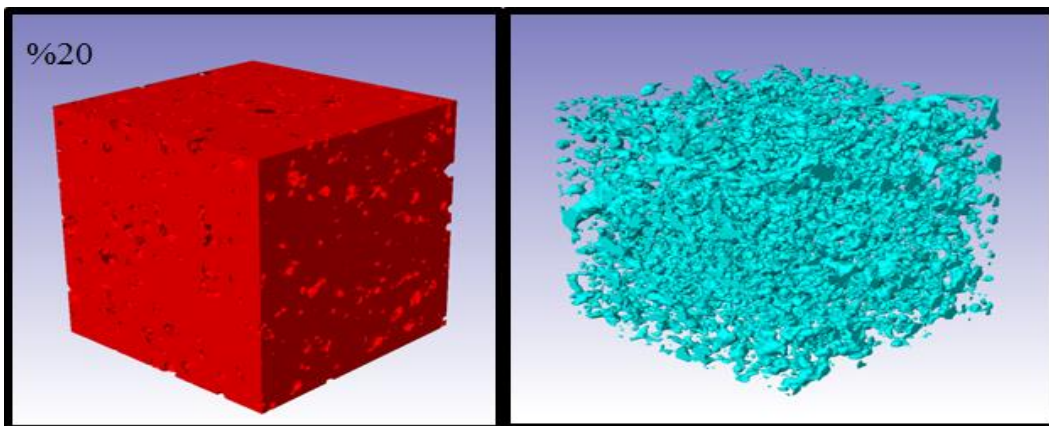
4.1.7 Dijital görüntü işleme ve analizi sonuçlarının incelenmesi

Numunelerde 20 °C’de yapılan görüntü işleme ve analizinde elde edilen görüntülerde de görüldüğü gibi malzeme yapısında köpük solüsyonu miktarı artıka beklenildiği gibi beton yapısındaki boşluk oranında çok büyük artışlar meydana gelmektedir. Yapılan görüntü analizi görselleri Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’da gösterilmiştir.



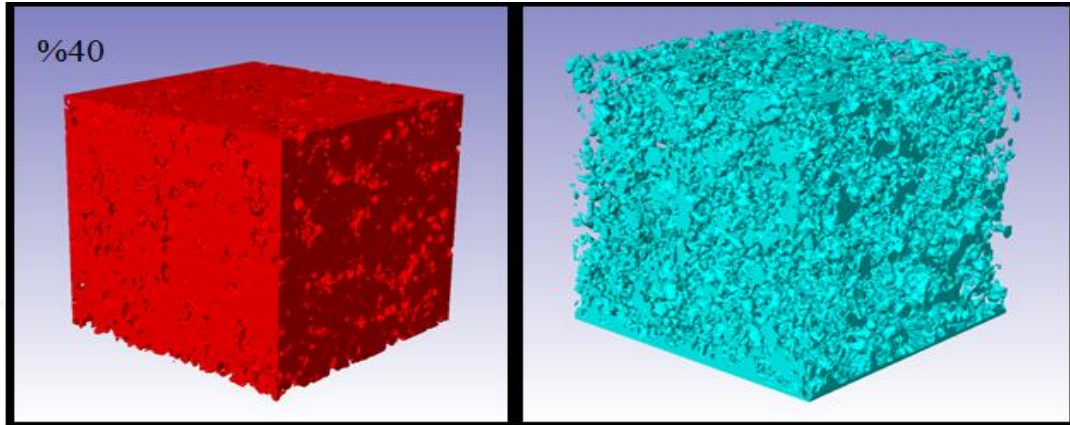
Şekil 4.9. Katkısız betonun dijital görüntü analizi

Şekil 5.9’deki katkısız beton numunenin dijital görüntü analizi incelendiğinde yapısındaki çok büyük ve küçük boşluklar seçilebilmektedir. Boşlukların homojen dağılmadığı görülmekte ve birbiriyle temas etmediği görülmektedir.



Şekil 4.10. Hacimce % 20 köpük solüsyonu katkılı betonun dijital görüntü analizi

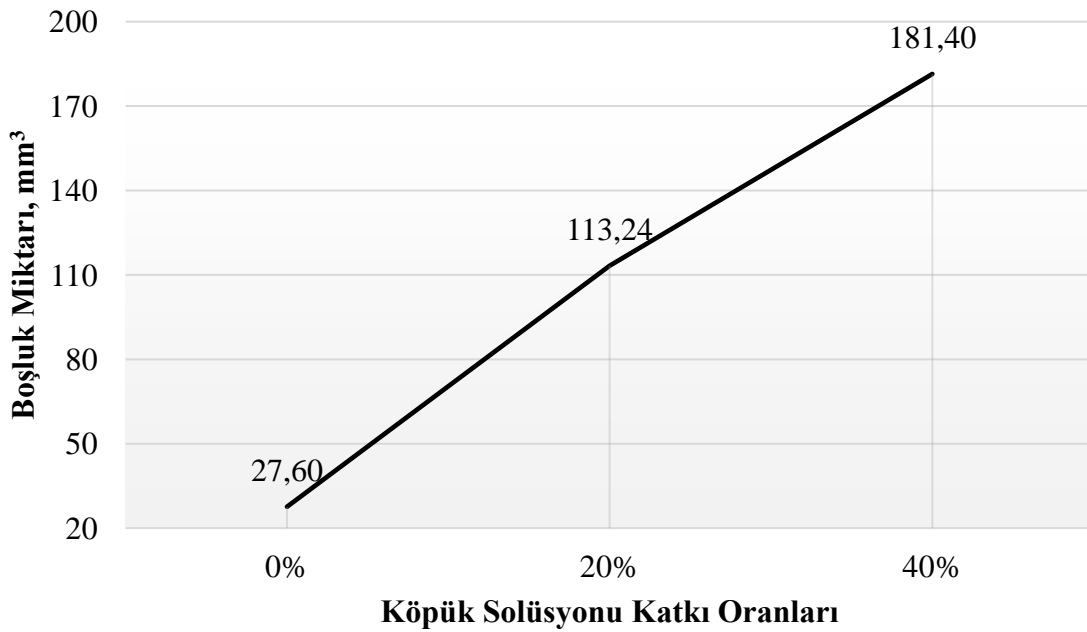
Şekil 4.10'da gösterilen hacimce % 20 köpük solüsyonu katkılı beton numunesinin dijital görüntü analizi incelendiğinde boşlukların küçük ama beton iç hacminin çoğunu kapladığı ve homojen olarak dağıldığı görülmektedir.



Şekil 4.11. Hacimce % 40 köpük solüsyonu katkılı betonun dijital görüntü analizi

Şekil 4.11'da gösterilen hacimce % 40 köpük solüsyonu katkılı beton numunesinin dijital görüntü analizi incelendiğinde; boşluk miktarının beton iç hacminin her tarafında olduğu ve homojen dağıldığı görülmektedir.

Görüntü analizleri incelendiğinde % 0 katkısız numunelerde boşluk yapısının katkılı numunelere göre daha az olduğu görülmekle beraber boşluk yapısının da farklı olduğu görülmektedir. Katkısız beton numunesinde oldukça büyük boşluklar görülmektedir. Bu boşluklar arasında küçük boşluklarda bulunmakla beraber aralarındaki mesafe katkılı numunelere göre çok fazladır. Katkılı beton numunelerinde ise boşluk yapısı çok küçük ama fazladır. Katkılı numunelerdeki boşlukların birbiriyle birleştiği bölgeler seçilebilmektedir. Hacimce % 40 katkılı beton numunesinin yapısındaki boşluk miktarının % 20 katkılı numuneye göre fazla olduğu söylenebilir. Tüm numunelerde görüntü analizi yapıldıktan sonra numunelerdeki boşluk miktarı hesaplanıp Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Numunelerdeki 1000 mm³ içindeki boşluk miktarları grafiği

Şekil 4.12'deki numunelerin yapısındaki boşluk oranları incelendiğinde katkısız numunelerde % 2.76 ile ortalama boşluk oranı görülmektedir. Hacimce % 20 köpük solüsyonu katkılı numunelerde ise % 11.32 boşluk oranı ile katkısız numunelere göre % 8.56'lık artış meydana gelmektedir. Hacimce % 40 köpük solüsyonu katkılı numunelerde ise % 19.54 boşluk oranı ile katkısız numunelere göre % 16.78 artış, % 20 köpük solüsyonu katkılı numunelere göre % 40.22'lik artış meydana gelmiştir.

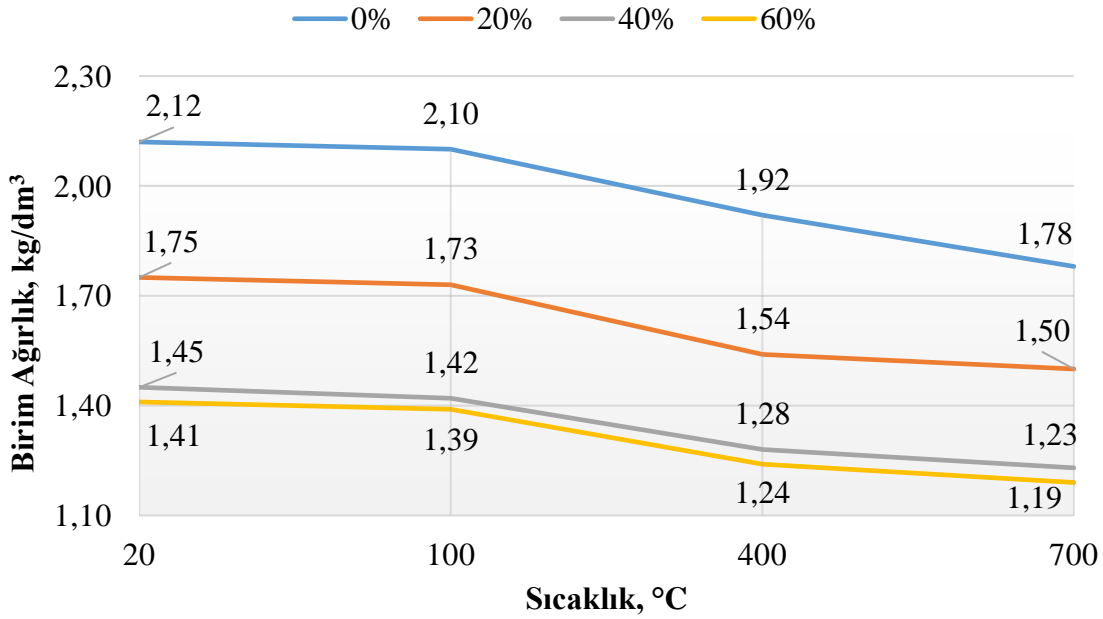
Katkısız numunelerde boşluk miktarı ortalaması 27.6 mm³ olurken yapısına hacimce % 20 köpük solüsyonu katıldığında boşluk miktarı ortalaması yaklaşık olarak 4 kat artmaktadır. Hacimce % 40 köpük solüsyonu katkılı numunelerde ise boşluk miktarı katkısız numunelere göre 7 kat artmaktadır.

4.2 Köpük Betonda Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi

Kontrol gruplarının deneylerinin yapılması ve birbiriyle karşılaştırılmasından sonra 100 °C, 400 °C ve 700 °C sıcaklıklara maruz bırakılan deney gruplarının sertleşmiş beton deneyleri, dijital görüntü analizleri, EDX analizi ve SEM çekimlerinin kontrol gruplarıyla karşılaştırması yapılmıştır. Olası farklılıklar analiz edilmiştir.

4.2.1 Birim ağırlık sonuçlarının incelenmesi

Yüksek sıcaklık deneyleri sonrası bütün numuneler tartılarak elde edilen birim ağırlıkları kontrol gruplarıyla karşılaştırılması yapılmıştır. Deney sonuçları Şekil 4.13'de gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Yüksek sıcaklık sonrası birim ağırlık karşılaştırılması

Yüksek sıcaklık sonrası % 0 katkısız numunelerde sıcaklık yükseldikçe birim ağırlıkta azalma görülmüştür, 100 °C'deki numunelerin 20 °C göre birim ağırlıktaki azalma % 0.94 olmuştur. Birim ağırlıkta 400 °C ile 20 °C arasında % 9.4, 100 °C ile arasında % 8.6 azalma olmuştur. Birim ağırlıkta 700°C ile 20 °C arasında % 16 azalma, 100 °C ile arasında % 15.2 azalma, 400 °C ile arasında %7.3 azalma meydana gelmiştir. Sıcaklık 100°C birim ağırlıkta azalma sınırlı olmuşken, 100 °C sonraki sıcaklıklarda birim ağırlıkta azalma artmış ve lineer azalma görülmüştür.

Hacimce % 20 köpük solüsyonu katkılı numunelerde 100 °C ile 20 °C arasındaki sıcaklıkta birim ağırlık azalması % 1.14 olmuştur. Birim ağırlıkta 400 °C ile 20 °C arasında % 12 azalma, 400 °C ile 100 °C arasında % 11 azalma görülmüştür. Birim ağırlıkta 700 °C

ile 20 °C arasında % 14,3 azalma, 700 °C ile 100 °C arasında % 13,3 azalma, 700 °C ile 400°C arasında % 2.6 birim ağırlık azalması meydana gelmiştir.

Hacimce % 40 köpük solüsyonu katkılı numunelerde 100 °C ile 20 °C arasındaki azalma % 2.1'dir. Birim ağırlıkta 400 °C ile 20 °C arasındaki azalma % 14,7, 400 °C ile 100°C arasında % 10, 700 °C ile 20 °C arasında % 15, 700 °C ile 100 °C arasında %13.4 azalma, 700°C ile 400 °C arasında % 4 birim ağırlık azalması meydana gelmiştir.

Hacimce % 60 köpük solüsyonu katkılı numunelerde 100 °C ile 20 °C arasındaki birim ağırlık azalması % 1.4 olmuştur. Birim ağırlıkta 400 °C ile 20 °C arasında % 12 azalma, 400 °C ile 100 °C arasında % 11 birim ağırlık azalması meydana gelmiştir, 700 °C ile 20 °C arasında birim ağırlık azalması % 15.6, 700 °C ile 100 °C arasında % 14.4 azalma, 700 °C ile 400°C arasında % 4 birim ağırlık azalması meydana gelmiştir.

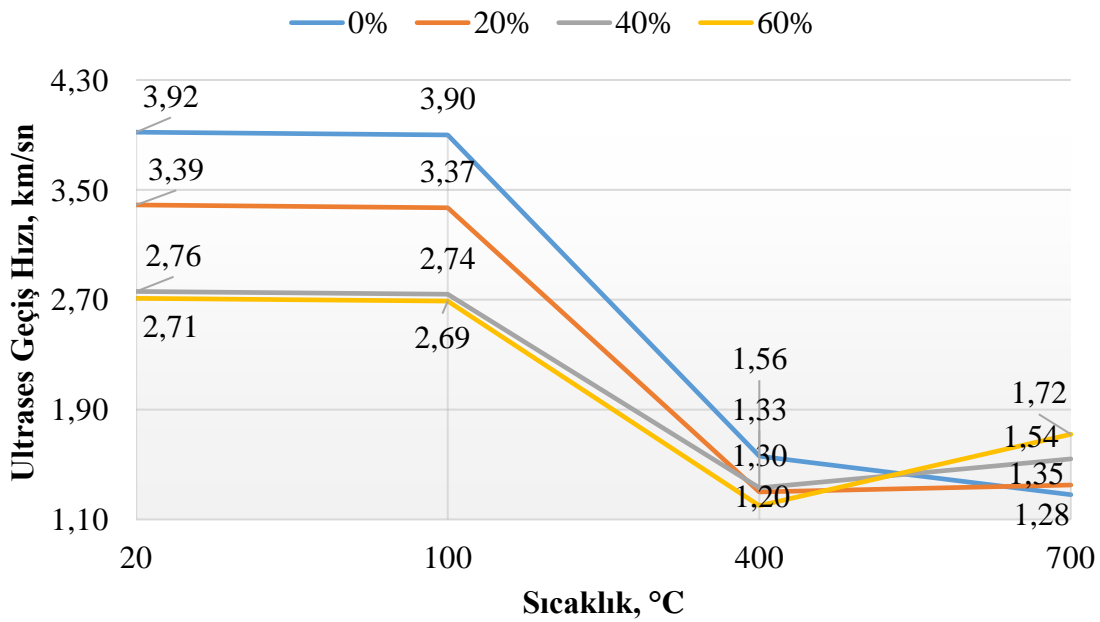
Sonuçlar değerlendirildiğinde her 4 deney grubunda 20 °C ile 100 °C arasında birim hacim kaybı % 1-2 civarında olmuştur, sebebi ise bu sıcaklık artışında su buharlaşması sınırlı olmuştur. Numunelerde 100 °C ile 400 °C arasında birim hacim ağırlıktaki kayıp % 8.5-11 arasında birim hacim kaybı yaşanmıştır. Bu sıcaklıklar arasında boşluklardaki su tamamen buharlaşma ve beton da büzölmeler meydana gelmektedir. Sıcaklık 300 °C ve üzerinde C-S-H ara yüzeylerindeki su ve sülföalüminattan gelen kimyasal bağ suyunun bir bölümün kaybedilmesi mikro çatlaklara yol açmakta ve birim hacim ağırlık kaybına neden olmaktadır (Baradan, vd., Beton).

Numunelerde 400 °C ve 700 °C için her 4 deney grubu incelendiğinde katkılı betonların (% 2,6-4) katkısız betona (% 7,3) göre daha az birim ağırlık kaybı yaptığı görölmektedir. Her 4 deney grubunda 400 °C ile 700 °C arasında beton yapısındaki boşluk sistemindeki suyun tamamen buharlaşması, hidratasyon ürünlerin bozulması, $Ca(OH)_2$ reaksiyon vererek CaO dönüşmesi, C-S-H yapılarının parçalanması olayları ve mikro çatlaklar oluşum olayları meydana gelir. Köpük solüsyonu katkılı numunelerde birim hacim kaybının katkısız numunelere göre daha az olmasının nedeni hava kabarcıkları arasına sıkışmış su buharının sıcaklık artışına bağlı olarak basıncı arttırır. Bu basınç artışı sonucunda betondaki büzölmeler katkısız numunelere göre daha az olmaktadır. Ayrıca $Ca(OH)_2$ CaO dönüşüm reaksiyonu sonucunda oluşacak hacim azalması katkılı numunelerde, çimento

oranı katkısız numuneye göre daha az olduğundan büzülmelerde sınırlı olmaktadır. Ayrıca oluşan mikro çatlakların katkılı numunelerde boşluk yapısının fazla olmasından dolayı boşluğa gelince durması sonucu da hacim genişmesi sınırlı olmaktadır. Köpük solüsyonu katkılı numunelerde köpük ajanı yapısında bulunan kalsiyum naftalin sülfonattın sıcaklık artışına bağlı olarak ayrışmalar meydana gelmekte bunun sonucunda serbest kalan sülfür elementi çok az miktarda etrenjit oluşumuna neden olmaktadır. Bu az miktardaki etrenjit oluşumu betondaki mikro çatlakların çok az bir kısmını doldurduğu düşünülmektedir. Böylece hacim genişmesi katkılı numuneye göre daha az olmakta ve birim hacim kayıpları da katkısız numuneye göre daha az olmaktadır.

4.2.2 Ultrases geçiş süresi sonuçlarının incelenmesi

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan tüm deney gruplarından elde edilen ultrases geçiş hızları sonuçları Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Sıcaklık yükselmesine göre ultrases geçiş hızları

Katkısız grup olan % 0 beton numunelerine sıcaklık yükselmesine bağlı olarak ultrases geçiş hızları incelendiğinde; sıcaklık 20 °C’den 100 °C’ye yükseldiğinde ultrases geçiş hızında herhangi bir değişiklik olmamıştır, 100 °C’den 400 °C’ye sıcaklık

yükselmesinde %60'lık azalma, 400 °C'den 700 °C'ye sıcaklık yükselmesinde ise %15.23'lük azalma meydana gelmektedir.

Hacimce % 20 köpük solüsyonu katkılı numunelerdeki sıcaklık artışına bağlı olarak ultrases geçiş hızlarındaki değişimler incelendiğinde; 20 °C'den 100 °C sıcaklık yükselmesinde ultrases geçiş hızında herhangi bir değişiklik olmamıştır. Sıcaklık durumu 100 °C'den 400 °C'ye yükseldiğinde ultrases geçiş hızında % 60.73'lük azalma, 400 °C den 700 °C sıcaklık yükselmesinde ise ultrases geçiş hızında % 3.85'lik artış meydana gelmektedir.

Hacimce % 40 köpük solüsyonu katkılı numuneler incelendiğinde ultrases geçiş hızında; 20 °C'den 100 °C'ye sıcaklık yükselmesinde herhangi bir değişiklik olmamıştır. Sıcaklık 100°C'den 400 °C'ye yükseldiğinde ise % 51'lik azalma, 400 °C'den 700 °C'ye sıcaklık yükselmesinde ise ultrases geçiş hızında % 16'lık artış meydana gelmektedir.

Hacimce % 60 köpük solüsyonu katkılı numuneler incelendiğinde ultrases geçiş hızlarında; 20 °C'den 100 °C'ye sıcaklık artışında herhangi bir değişiklik olmamıştır. Sıcaklık 100°C'den 400 °C'ye yükseldiğinde ise % 54 lük azalma, 400 °C'den 700 °C'ye sıcaklık yükselmesinde ise % 44.7'lik artış meydana gelmektedir.

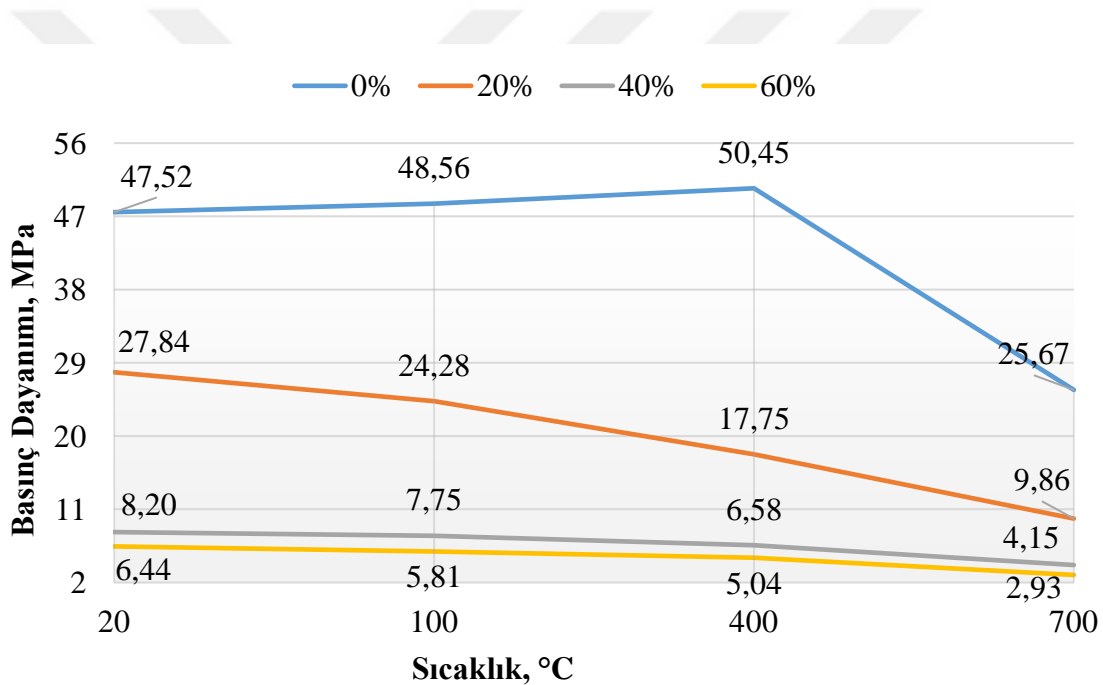
Tüm deney gruplarında 100 °C ile 400 °C arasında ultrases geçiş hızlarında %50.92-60.73 arasında azalma olmaktadır. Bu sıcaklık artışında beton yapısındaki hidratasyona katılmayan su tamamen buharlaşmakta ayrıca C-S-H ara yüzeylerinde ki su ve kimyasal bağ suyunun tamamen buharlaşması sonucu mikro çatlaklar ve boşluklar oluşmaktadır. Su buharlaşması, boşluk ve mikro çatlakların oluşmasına bağlı olarak beton yapısında hava boşluklarının miktarı artmaktadır. Bu da ultrases geçiş hızlarında azalmaya neden olmaktadır.

Sıcaklık 400 °C'den 700 °C'ye arttığında köpük solüsyonu katkılı gruplar katkısız gruplara göre farklı davranış göstermektedir. Katkısız numunelerde ultrases geçiş hızlarında azalma olurken, katkılı numunelerde; köpük solüsyonu miktarı arttıkça ultrases geçiş hızlarında da artış fazla olmaktadır. Katkısız numunelerde düşüşün nedeni bu sıcaklık aralığında boşluk sisteminin tamamen kuruması ve mikro çatlakların artışı olarak

açıklanabilir. Katkılı numunelerdeki ultras es artışı ise; boşluk yapısının fazla olmasından dolayı mikro çatlaklar boşluğa gelince duruyor ve katkısız numunelere göre kılcal boşluklar daha küçük olmaktadır. Katkılı numunelerde çok az miktarda etrenjit oluşumları bu kılcal boşlukları çok az hacim artışıyla doldurması nedeniyle ultras es geçiş hızının daha yüksek olduğu düşünülmektedir.

4.2.3 Basınç dayanımları sonuçlarının incelenmesi

Yapılan basınç dayanımı deneyleri sonrası elde edilen tüm sonuçlar Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Sıcaklık yükselmesine göre basınç deneyi sonuçları

Şekil 4.15 incelendiğinde köpük solüsyonu oranı ve sıcaklığın köpük betonlarda yaptığı etki görülüyor. Katkısız betonlar incelendiğinde 20 °C ile 400 °C arasında %8.05’lik basınç dayanımı artışı meydana gelmekte, 400 °C ile 700 °C arasında %50.16’lik basınç dayanımında azalma olmaktadır.

Hacimce % 20 köpük solüsyonu katkılı numuneler incelendiğinde sıcaklık yükseldikçe basınç dayanımında sürekli azalma görülmektedir, 20 °C ile 100 °C arasında

%10.31'lük basınç dayanımı azalması, 400 °C ile 100 °C arasında % 24.82'lük basınç dayanımı azalması olmuştur. Numunelerde 700 °C ile 400 °C arasında ise % 52.24'lik basınç dayanımı azalması olmuştur.

Hacimce % 40 köpük solüsyonu katkılı numuneler incelendiğinde sıcaklık yükseldikçe basınç dayanımında sürekli azalma görülmektedir, 20 °C ile 100 °C arasında % 6.25 lük basınç dayanımı azalması, 400 °C ile 100 °C arasında % 17.33 lük basınç dayanımı azalması olmuştur. Numunelerde 700 °C ile 400 °C arasında ise % 25.6'lik basınç dayanımı azalması olmuştur.

Hacimce % 60 köpük solüsyonu katkılı numuneler incelendiğinde sıcaklık yükseldikçe basınç dayanımında sürekli azalma görülmektedir. Numunelerde 20 °C ile 100°C arasında % 11.6'lük basınç dayanımı azalması, 400 °C ile 100 °C arasında % 16'lik basınç dayanımında azalması, 700 °C ile 400 °C arasına ise % 27.5'lik azalma olmuştur.

Katkısız numuneler incelendiğinde 400 °C kadar basınç dayanımı artışı görülmektedir. Bu sıcaklığa kadar betonda su kaybından dolayı oluşan büzülme ve C-S-H yapıları arasındaki ayrılma basıncı azaldığı için Van der Waals çekme kuvvetinin artmasına neden olmakta bu da matris dayanıma yol açmaktadır (Demirel ve Keleştemur, 2011). Basınç dayanımının 400°C ile 700 °C arasındaki düşüşün ise beton dayanımına önemli etkisi olan $Ca(OH)_2$ 'ın CaO 'e dönüşüm reaksiyonu, C-S-H yapılarının bozulması ve mikro çatlakların artmasıdır (Mydin ve Wang, 2012).

Katkılı numunelerdeki sürekli düşüşün ise; yapısındaki boşluk miktarının fazla olmasından dolayı Van der Waals çekme kuvvetine olumsuz etki yapmakta (Demirel ve Keleştemur, 2011), bu boşlukta bulunan havanın ve su buharının sıcaklık artışına bağlı olarak artan basıncının betondaki büzülme azalttığı, mikro çatlakların arttığı düşünülmektedir. Numunelerdeki 400 °C ile 700 °C arasındaki düşüşün ise $Ca(OH)_2$ 'dan CaO 'e dönüşüm reaksiyonu ve C-S-H yapılarının bozulmasından kaynaklanmaktadır (Mydin ve Wang, 2012).

4.2.4 Dinamik elastisite modülü sonuçlarının incelenmesi

Yüksek sıcaklık deneyleri sonrası yapılan basınç deneyleri sonuçları dinamik elastisite modülünü belirlemede kullanılmıştır. Agregası tipi kum olan tüm köpük katkılı numunelerde 60 °C'den düşük sıcaklıklar için Denklem 5.1 kullanılmıştır. 60 °C ile 800 °C arasında yüksek sıcaklığa maruz bırakılan köpük betonlar için Denklem 5.1 de bulunan sonuç, Denklem 4.4'de (Li and Purkiss 2005) kullanılarak yüksek sıcaklık için statik elastisite modülü sonuçları bulunur.

$$E_{cT} = \frac{800-T}{740} E_c \quad (4.4)$$

Katkısız numunelerde kullanılan formül 40 MPa'dan küçük silindir basınç dayanımları için denklem 4.2 kullanılmıştır. 40 MPa ile 80 MPa arasındaki silindirik basınç dayanımları için denklem 4.5 (ACI 363 R92) kullanılmıştır.

$$E_c = 3.32\sqrt{f_c} + 6,9 \quad (4.5)$$

Çıkan sonuçlar GPa çevrilmiştir. Katkısız numune için verilen formül statik elastisite modülü içindir, dinamik elastisite modülüne çevirmek için denklem 4.3 kullanılmıştır. Elde edilen dinamik elastisite modülleri sonuçları Şekil 4.16 te gösterilmiştir. Burada

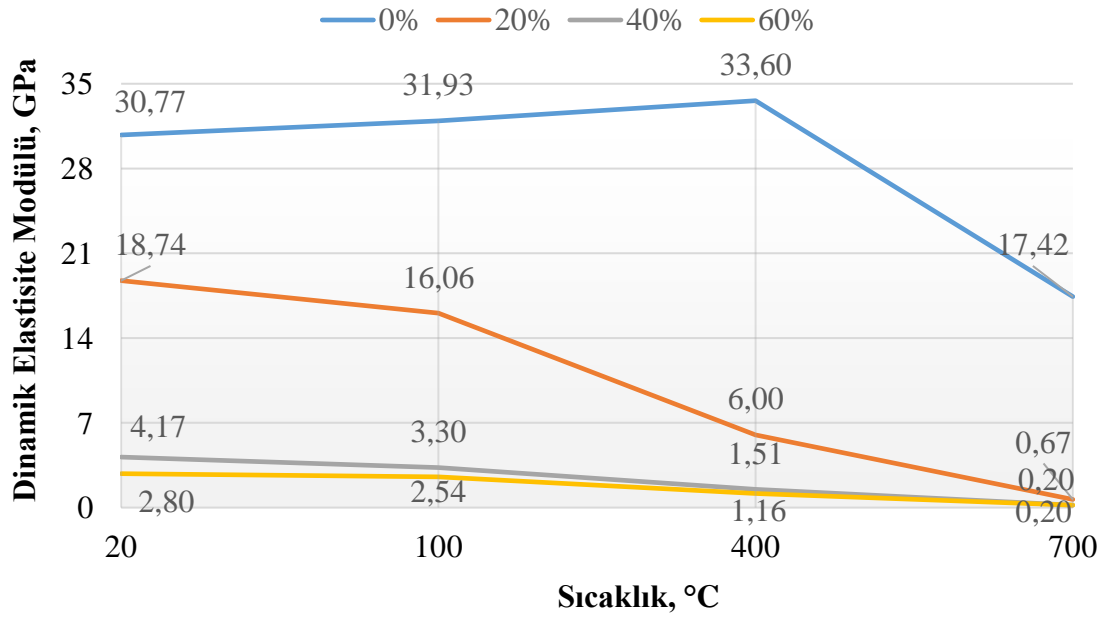
$$\Delta = \text{birim ağırlık (kg/m}^3\text{)} \quad f_c = \text{betonun 27 günlük silindir dayanımı (MPa)}$$

$$E_c = \text{Statik elastisite modülü (GPa)} \quad T = \text{Deney yapılan sıcaklık (}^\circ\text{C)}$$

Formülleri kullanabilmek için küp basınç dayanımları Çizelge 4.1'deki çevirme oranları kullanılarak silindirik basınç dayanımlarına çevrilmelidir. Çizelge 4.1'e göre silindir basınç dayanımları sonuçları Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Yüksek sıcaklık etkisine göre silindir basınç dayanımı sonuçları

Sıcaklık	% 0	% 20	% 40	% 60
20 °C	37	25	7	5
100 °C	38	23	6	4.81
400 °C	40	16	5	4
700 °C	20	8	3	3



Şekil 4.16. Sıcaklık yükselmesine göre dinamik elastisite modülü sonuçları

Dinamik elastisite modülleri basınç dayanımlarına göre belirlendiğinden, Şekil 4.16 basınç dayanımı grafiği olan Şekil 4.15 ile benzerlik göstermektedir. Katkısız betonlar incelendiğinde 20 °C ile 100 °C arasında % 3.77'lik dinamik elastisite modülü artışı, 100°C ile 400 °C arasında % 4.3'lük artma, 400 °C ile 700 °C arasında % 48'lik azalma olmaktadır.

Hacimce % 20 köpük solüsyonu katkılı numuneler incelendiğinde sıcaklık yükseldikçe dinamik elastisite modülünde sürekli azalma görülmektedir. Numunelerde 20°C ile 100 °C arasında %14.3'lük azalma, 100 °C ile 400 °C arasında % 62.6'luk azalma, 400 °C ile 700 °C arasında ise % 88.8'lik azalma olmuştur.

Hacimce % 40 köpük solüsyonu katkılı numuneler incelendiğinde sıcaklık yükseldikçe dinamik elastisite modülünde sürekli azalma görülmektedir. Numunelerde 20°C ile 100°C arasında %20.8'lik azalma, 100 °C ile 400 °C arasında % 54.5'lik elastisite modülü azalması olmuştur, 400 °C ile 700 °C arasında ise % 86.6'luk azalma olmuştur.

Hacimce % 60 köpük solüsyonu katkılı numuneler incelendiğinde sıcaklık yükseldikçe dinamik elastisite modülünde sürekli azalma görülmektedir. Numunelerde 20°C

ile 100 °C arasında %9.2'lik azalma, 100 °C ile 400 °C arasında % 54.3'lük, 400° C ile 700 °C arasına ise % 82.7'lik elastisite modülü azalması olmuştur.

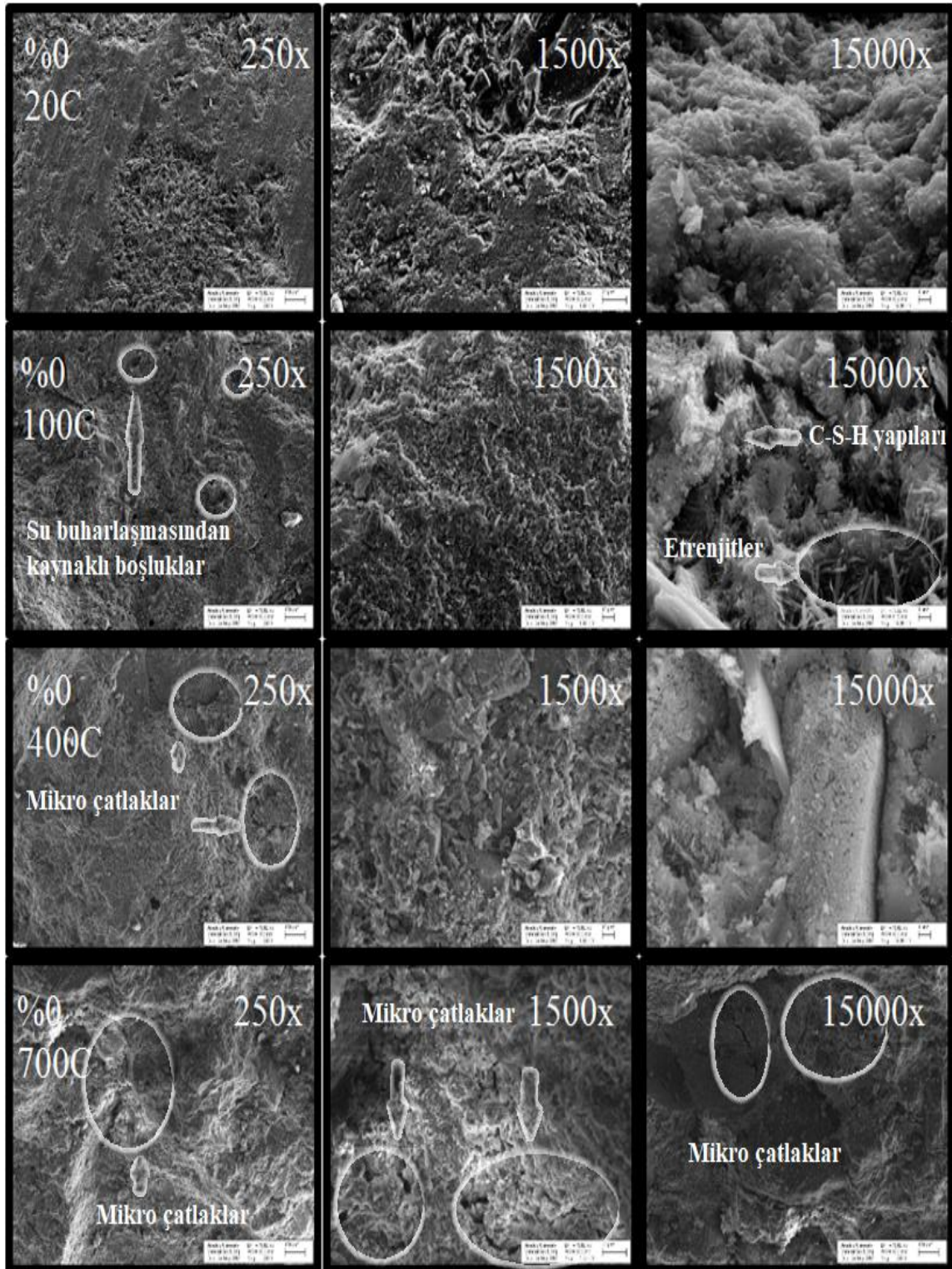
Katkısız numunelerde 400 °C kadar olan sıcaklık değişiminde beton içerisinde yer alan kılcal boşluklardaki suyun buharlaşması nedeniyle betonda oluşan büzölmeler sonrası artan Van Der Waals çekim kuvveti nedeniyle elastisite modülünün artığı düşünülmektedir. Numunelerde 400 °C'den sonraki ani düşüşün nedeni beton yapısındaki bütün kılcal boşluklardaki suyun buharlaşması, C-S-H yapısında hidrasyona katılmayan suyun buharlaşması, beton yapısındaki boşluk ve çatlaklardaki su buharının artan sıcaklık etkisiyle yaptığı basınç, artan mikro çatlaklar, C-S-H yapılarının bozulmasına bağlı olarak betondaki elastisite modülünün düşmesine neden olduğu düşünülmektedir.

Katkılı numunelerde ise dinamik elastisite modülü sürekli azalışlar göstermiştir. Betondaki boşlukların fazla olması, beton iç yapısındaki suyun buharlaşması sonucunda artan kılcal boşluklar, dışarı çıkamayan su buharının yaptığı basınç, C-S-H yapısının bozulması, mikro çatlakların artması sonucunda elastisite modülünün düşmesine neden olduğu düşünülebilir.

4.2.5 SEM çekimleri ve EDX analizi sonuçlarının incelenmesi

Katkılı ve katkısız numunelerin yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra iç yapılarındaki değişiklikleri gözlemek, olası çatlakları saptamak ve her bir katkı grubunun yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra iç yapısındaki değişimleri gözlemek amacıyla SEM çekimleri ve EDX analizleri yapılmıştır. Sonuçlar her bir katkı grubunun yüksek sıcaklığa göre karşılaştırması yapılarak yüksek sıcaklığın etkisi incelenmiştir.

Şekil 4.17'da katkısız numunelerde sıcaklık etkisine göre yapılan SEM çekimleri görölmektedir. Katkısız numunelerdeki yüksek sıcaklık etkisi incelendiğinde; 20 °C'de 250x büyütmede betonun bazı bölgelerinin çok yoğun bazı bölgelerinin ise boşluklu olduğu, çimento hamurunun homojen dağılmadığı görölmektedir. Yapılan 1500x büyütmede betondaki boşluklu yapılar daha iyi seçilmekte, 15000x büyütmede ise C-S-H yapıları görölmektedir.



Şekil 4.17. Sıcaklık yükselmesine göre katkısız numunelerdeki SEM görüntüleri

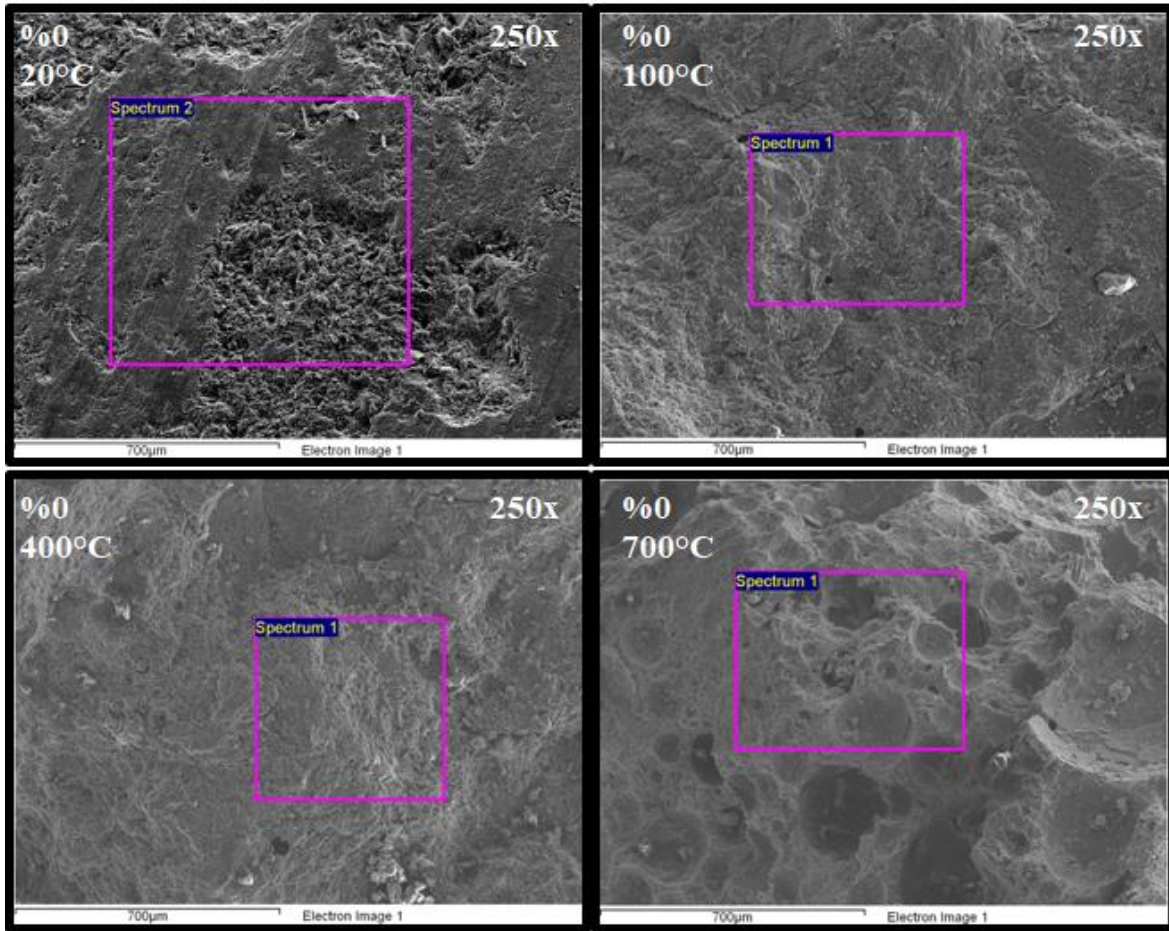
Numunelerde 100 °C’de; 250x büyütmede çimento hamurundaki hidratasyona katılmayan suların buharlaşmaya başlaması sonucunda betondaki kuruma görülmektedir.

Yapılan 1500x büyütmede betondaki buharlaşma sonucu artan boşluklu yapı görülmekte, 15000x büyütmede ise C-S-H yapısındaki kuruma ve etrenjit yapıları görülmektedir.

Numunelerde 400 °C'de; 250x büyütmede betonda C-S-H ara yüzeylerindeki suyun buharlaşmasıyla tamamen kuruma olduğu ve boşluklu yapının arttığı görülmektedir. Yapılan 1500x büyütmede mikro çatlaklar görülmekte, 15000x büyütmede ise ayrışıp bozulmaya başlayan C-S-H yapıları ve mikro boşluklar görülmektedir.

Numunelerde 700 °C'de; betondaki boşluk sisteminde tamamen kuruma olduğu, artan mikro çatlaklar görülmektedir. Yapılan 1500x büyütmede ayrışan C-S-H yapıları ve aralarındaki mikro boşluklar seçilebilmekte, 15000x büyütmede etrenjit iğneleri ve oluşan boşluklu yapı görülmektedir.

Şekil 4.17 incelendiğinde; sıcaklık artışına bağlı olarak katkısız betonda 100 °C'de betondaki reaksiyonlara katılmayan suyun buharlaşması sonucu boşluklu yapıda artış meydana gelmektedir. Numunelerde 400 °C'de boşluklardaki, C-S-H ara yüzeylerindeki, kimyasal bağ suyunun tamamen buharlaşması sonucu oluşan kuruma görülmekte, mikro çatlaklardaki artış önceki görsellere göre artış göstermektedir. Sıcaklığın 700 °C'ye yükselmesi sonrası ise betondaki suyun tamamen kuruduğu, çatlakların arttığı, C-S-H yapılarının bozulduğu ve etrenjit yapısı görülmektedir. SEM çekimlerinden sonra katkısız betonda yapılan yüksek sıcaklığa göre EDX analizi görüntüleri Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'de gösterilmiştir.

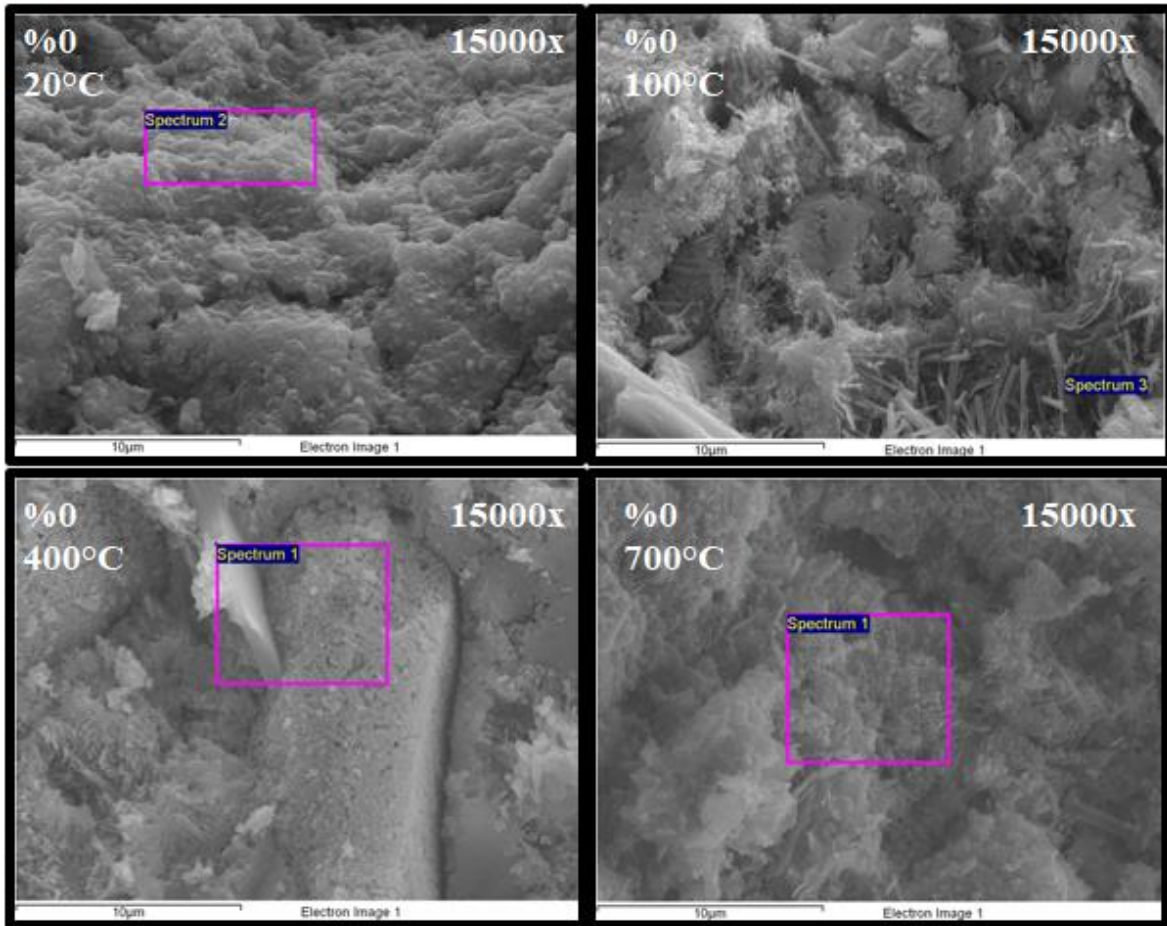


Şekil 4.18. Sıcaklık yükselmesine göre 250x büyütmede EDX analizi görüntüleri

Çizelge 4.6. Sıcaklık yükselmesine göre kütlece EDX analizi sonuçları

% 0 (250x)	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
20 °C	13.81	52.58	0.38	1.02	13.74	0.37	17.4	0.7
100 °C		54.97		2.71	9.80		31.60	
400 °C		49.03	0.88	1.83	8.58		39.68	
700 °C		57.82	0.62	1.29	6.16		33.32	

Şekil 4.18'de gösterilen seçili alanlarda yapılan EDX analizi sonuçları Çizelge 4.6'da gösterilmiştir. Yüksek sıcaklığa bağlı olarak betondaki boşluklu yapının artmasından dolayı genel EDX yapılamamaktadır, SEM cihazı elektron analizi yaparken; elektronlar boşluklu yapının düzensizliğinden dolayı SEM cihazına geri dönmekte ve bunun sonucunda EDX yapılamamaktadır. Bu yüzden sıcaklık yükseldikçe EDX analizi yapılan alan küçültülmüştür.



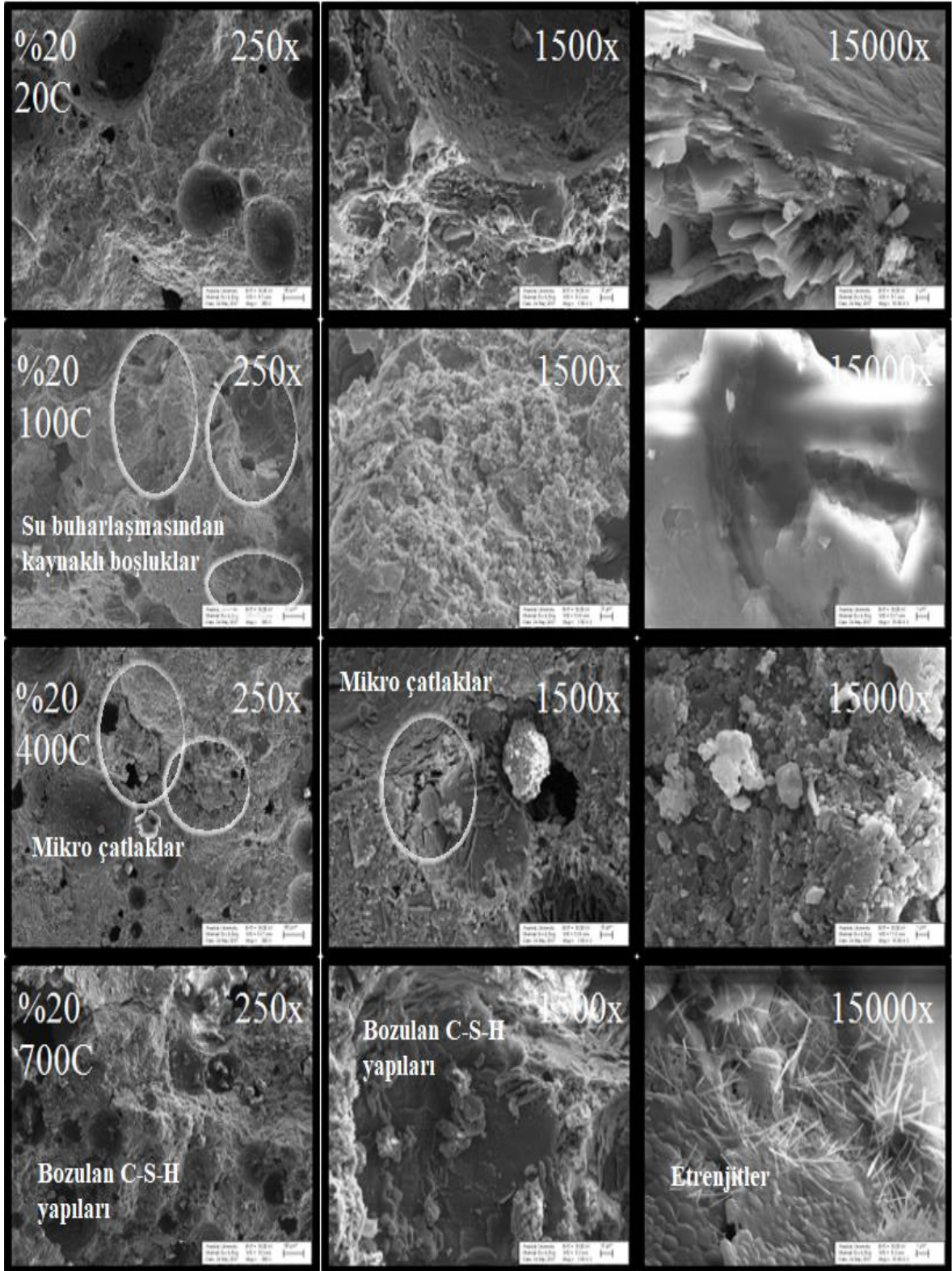
Şekil 4.19. Sıcaklık yükselmesine göre 15000x büyütmede yapılan EDX analizi görüntüleri

Çizelge 4.7. Sıcaklık yükselmesine göre kütlece EDX analizi sonuçları

% 0 (15000x)	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	S
20 °C	14.18	54.85	0.43	1.02	6.06	0.37	22.01	1.08	
100 °C	2.2	42.3	1.33	2.04	10.43		39.23		2.46
400 °C	3.67	51.16	0.88	1.10	10.99		33.2		
700 °C							100		

Numunelerde 1500x büyütmede betondaki farklı bölgelerde yapılan EDX sonuçları Çizelge 4.7'de de görüldüğü gibi farklılık göstermektedir. Sıcaklığın 20 °C sonrası C-S-H yapılarının analizi, 100 °C'de nokta analiz yapılmıştır. Sıcaklığın 400 °C ve 700 °C yükselmesi sonrası bozulmaya başlayan C-S-H yapılarında analiz yapılmıştır.

Hacimce % 20 köpük solüsyonu katkılı betonda sıcaklık yükselmesine göre yapılan SEM çekimleri Şekil 4.20'da gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Sıcaklık yükselmesine göre % 20 katkıli numunelerdeki SEM görüntüleri

Şekil 4.20’de sıcaklık yükselmesine göre % 20 katkıli betonların görüntü karşılaştırılması yapılmıştır. Numunelerde 20 °C’de; hacimce % 20 köpük solüsyonu katkıli

betonda yapılan SEM çekimlerinde 250x büyütmede köpük solüsyonundan dolayı görülen büyük boşluklar dikkat çekmektedir. Yapılan 1500x büyütmede boşluklu yapıya ve çimento harcına bakılmaktadır, 15000x büyütmede boşluk yapısı ve çimento harcının birleştiği noktalarda oluşan etrenjit görülmektedir.

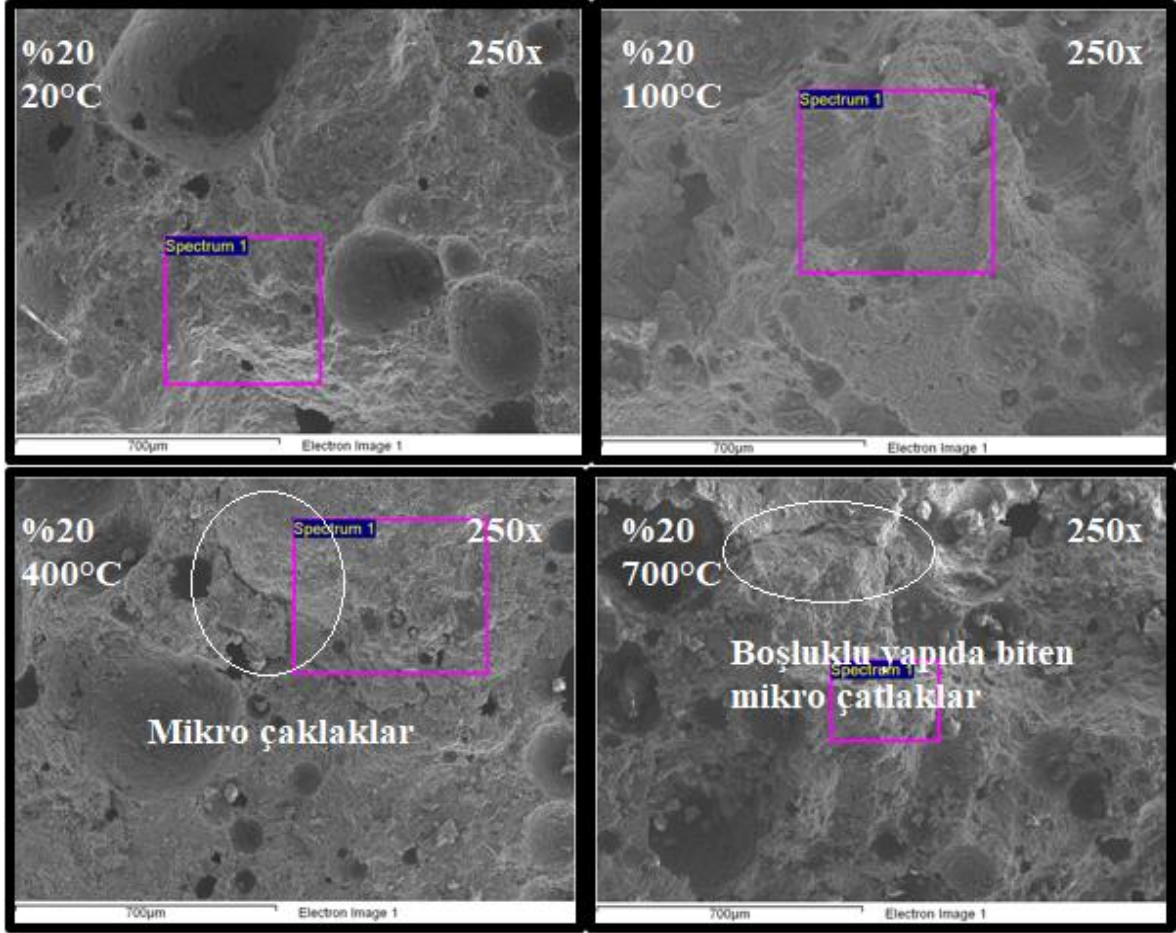
Numunelerde 100 °C'de; 250x büyütmede betondaki suyun buharlaşması nedeniyle artan mikro ölçekteki boşluklu yapılar görülmektedir. Yapılan 1500x büyütmede betondaki C-S-H yapısı ve kenarlarındaki mikro boşluklar görülmektedir, 15000x büyütmede C-S-H yapılarına yakın çekim yapılmaktadır.

Numunelerde 400 °C'de; 250x büyümede betonun yapısındaki suyun tamamen buharlaşması nedeniyle kuruduğu, oluşan çatlakların gözlenmeye başlanması, bu çatlakların boşluklu yapıya gelene kadar ilerlediği, suyun tamamen buharlaşması sonucu artan mikro boşluklar görülmektedir. Yapılan 15000x büyütmede köpük solüsyonu sonucu oluşmuş boşluklu yapılardaki sülfat saldırısı sonrası etrenjitlere rastlanmaktadır.

Numunelerde 700 °C'de; 250x büyütmede betonun yapısındaki tüm suyun buharlaşması nedeniyle tamamen kuruduğu, irili ufaklı birçok boşluğun oluştuğu, oluşan mikro çatlakların boşluğa gelene kadar devam ettiği görülmektedir. Yapılan 1500x büyütmede boşluk içindeki etrenjitler ve bozulan C-S-H yapısı görülmektedir, 15000x büyütmede iğne uçlu etrenjitler görülmektedir.

Şekil 4.20'deki tüm görüntüyle değerlendirildiğinde; sıcaklık artışına bağlı olarak hacimce % 20 katkılı betonda 100 °C'de betondaki reaksiyonlara katılmayan suyun buharlaşması sonucu mikro boşluklarda artış meydana gelmekte ve boşluklar ile çimento harcının birleştiği bölgelerde etrenjit görülmektedir. Numunelerde 400 °C'de betondaki boşluklardaki, C-S-H ara yüzeylerindeki, kimyasal bağ suyunun tamamen buharlaşması sonucu oluşan kuruma görülmekte, boşluktan boşluğa uzanan mikro çatlaklar görülmekte ve boşluklu yapılar görülmektedir. Sıcaklığın 700 °C'ye yükselmesinden sonra ise betonun su ve su buharından tamamen arındığı, boşlukların çevresindeki çatlakların arttığı, C-S-H yapısının bozulduğu, ve iğne uçlu etrenjit yapısı görülmektedir.

Hacimce % 20 köpük solüsyonu katkılı numuneler için yapılan EDX analizi görüntüleri Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



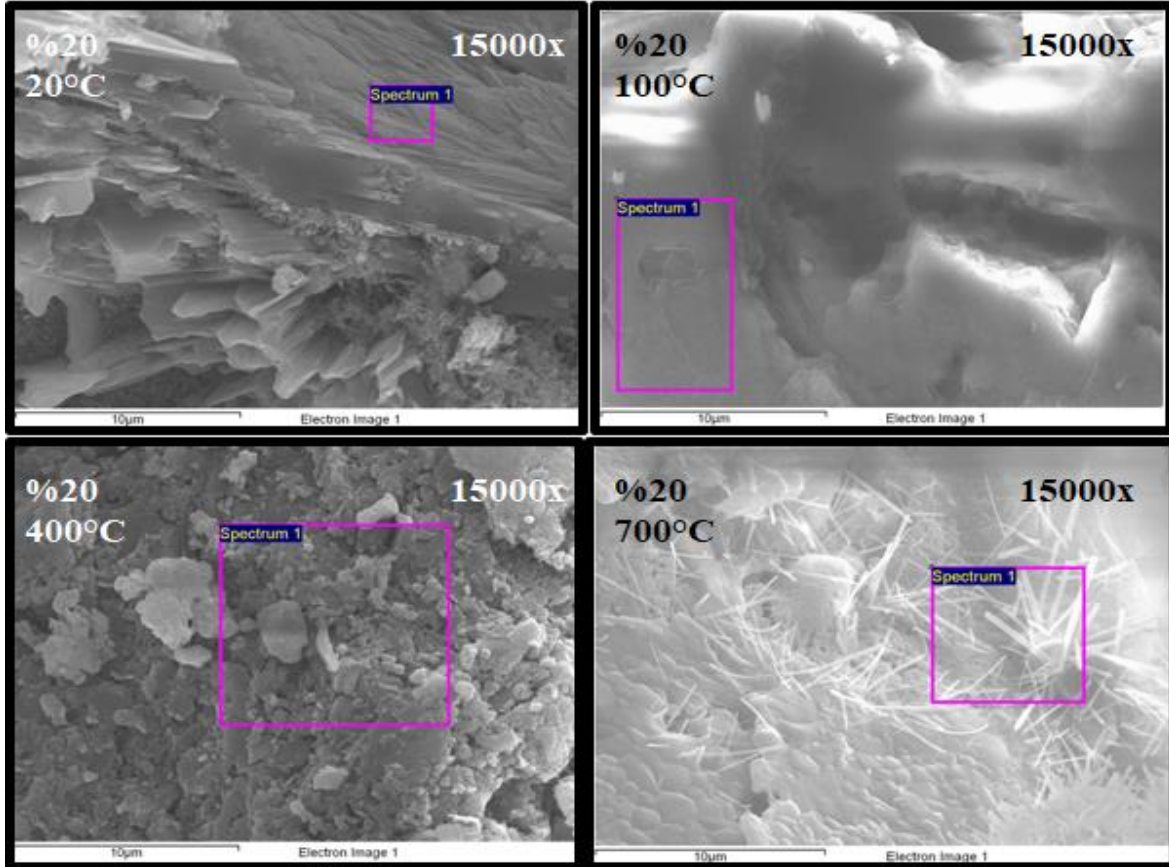
Şekil 4.21. Sıcaklık yükselmesine göre 250x büyütmede % 20 katkılı numunelerdeki EDX analizi görüntüleri

Çizelge 4.8. Sıcaklık yükselmesine göre kütlece EDX sonuçları tablosu

% 20 (250x)	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe
20 °C		46.35	0.80	2.02	11.36		37.40	2.08
100 °C	10.38	53.58	0.39	1.19	5.09	0.36	29.01	
400 °C		48.07		1.84	14.41		35.68	
700 °C	9.67	47.36		1.41	5.10		36.46	

Şekil 4.21’de görüldüğü gibi hacimce % 20 köpük solüsyonu katkılı numunelerde, 250x büyütmede genel EDX analizi yapılmıştır. Boşluklu kısımlarda EDX yapılmamıştır, 20 °C’de çimento harcına EDX analizi yapılmıştır. Numunelerde 100 °C’de çimento harcı ve boşluklu yapılarda, 400 °C’de bozulmaya başlayan C-S-H yapılarına EDX analizi

yapılmıştır. Numunelerde 700 °C’de daha küçük bölgede bozulan C-S-H yapılarına EDX analiz yapılmıştır. Çizelge 4.8’de ise yapılan EDX analizi sonuçlarına göre elementlerin kütlece yüzdeleri verilmiştir.



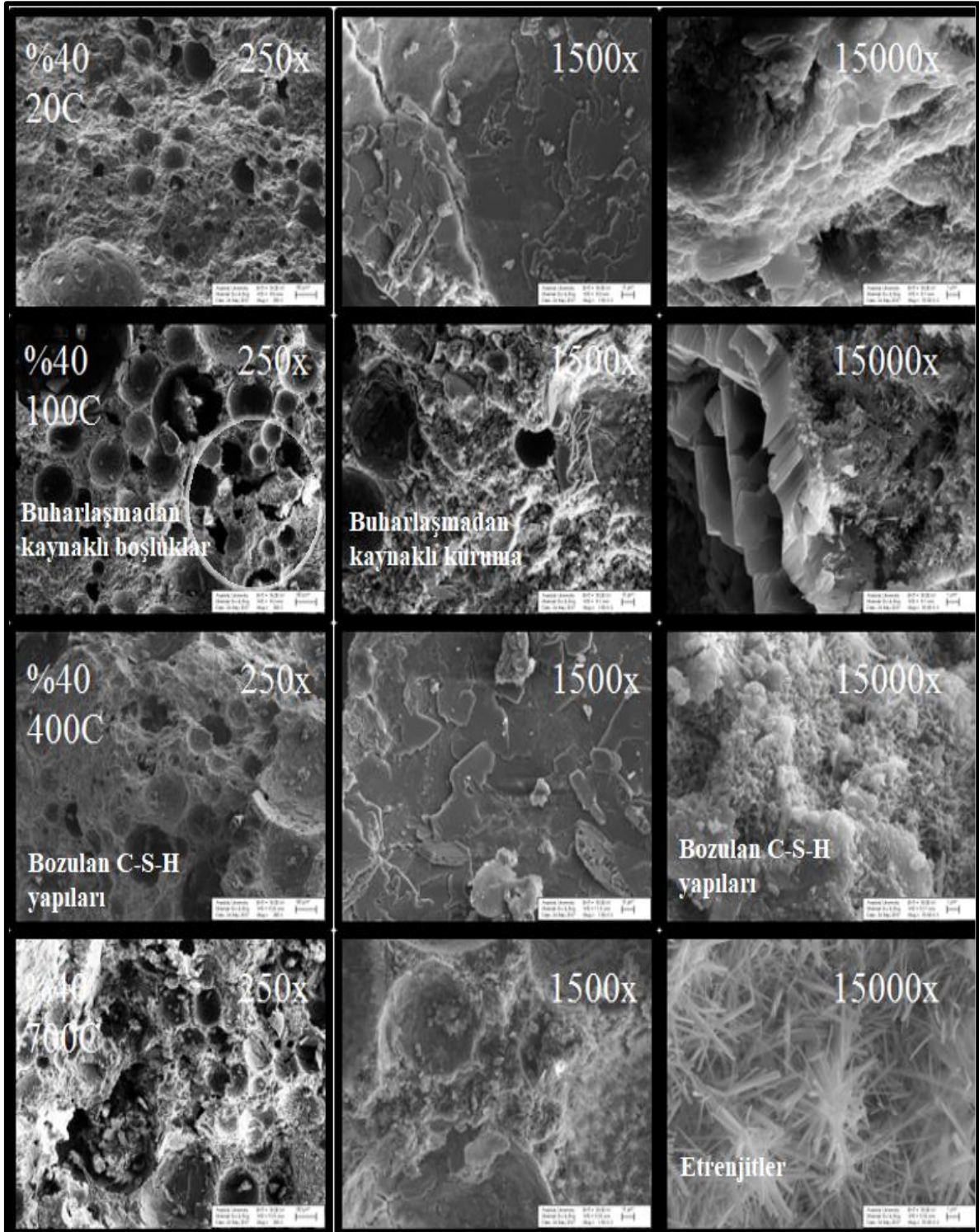
Şekil 4.22. Sıcaklık yükselmesine göre 15000x büyütmede % 20 katkı numunenin EDX analizi görüntüleri

Çizelge 4.9. Sıcaklık yükselmesine göre kütlece EDX analizi sonuçları

% 20 (15000x)	C	O	Al	Si	Ca
20 °C		31.17		1.38	67.45
100 °C	3.70	60.03			36.27
400 °C		58.83	5.31	6.36	29.50
700 °C					100

Şekil 4.22’de gösterilen hacimce % 20 köpük solüsyonu katkı betonlarda yapılan 15000x büyütmede EDX analizlerinde; Numunelerde 20 °C’de C-S-H yapısı analizi yapılmıştır ardından 100°C’de C-S-H yapısı analizi yapılmıştır ve 400 °C’de bozulmaya başlayan C-S-H yapısının analizi yapılmıştır. Sıcaklığın 700 °C’ye yükselmesi sonrasında etrenjit analizi yapılmıştır. Yapılan EDX analizlerinin sonuçları Çizelge 5.9’da gösterilmiştir.

Hacimce % 40 köpük solüsyonu katkılı betonda sıcaklık artışına göre yapılan SEM çekimleri Şekil 4.23'de gösterilmiştir.



Şekil 4.23. Sıcaklık yükselmesine göre % 40 katkılı numunelerdeki SEM görüntüleri

Şekil 4.23'deki görüntülerde 20 °C'de; 250x büyütmede numunedeki boşluk miktarının hacimce % 20 köpük solüsyonu katkılıya göre daha fazla olduğu görülmektedir. Numunelerde yapılan 1500x büyütmede agregadan görüntü alınmıştır, 15000x büyütmede C-S-H yapıları görülmektedir.

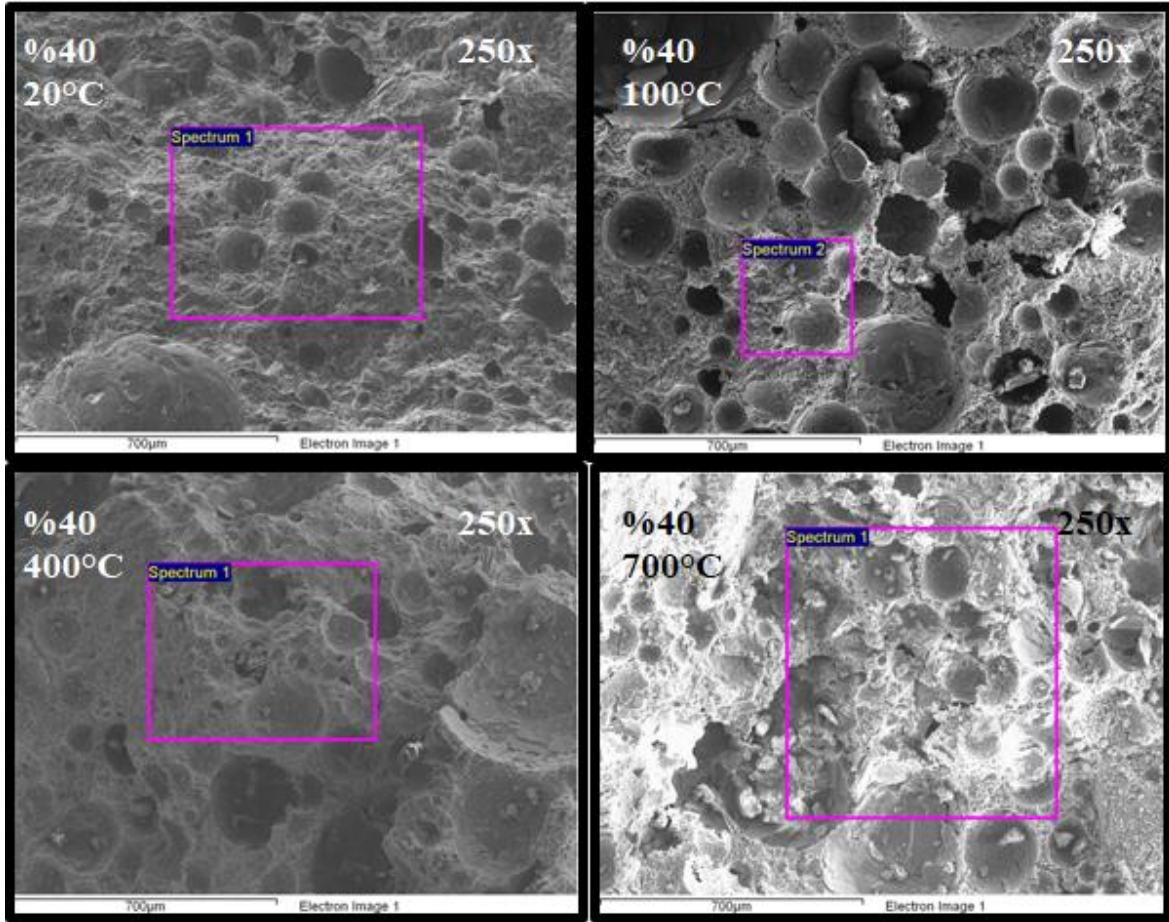
Numunelerde 100 °C'de yapılan 250x büyütmede betondaki suyun buharlaşması sonucu betondaki kuruma ve irili ufaklı boşluklar görülmektedir. Numunelerde yapılan 1500x büyütmede betondaki mikro çatlaklar daha iyi seçilmekte ve çatlakların boşluklu bölgelere gelince durduğu görülmektedir, 15000x büyütmede betondaki yapısındaki suyun buharlaştığı C-S-H yapıları ve boşluk çevresindeki etrenjit görülmektedir.

Numunelerde 400 °C'de yapılan 250x büyütmede numunedeki suyun buharlaşması sonucu kuruma artmış ve bozulan C-S-H yapıları görülmektedir. Numunelerde yapılan 1500x büyütmede agrega yapısı görülmektedir, 15000x büyütmede C-S-H yapılarındaki bozulmalar etrenjitler görülmektedir.

Numunelerde 700 °C'de yapılan 250x büyütmede numune yüzeyinde ve boşluklardaki mikro çatlardaki artışlar görülmekte, C-S-H yapısının komple bozulması, mikro çatlakların boşluklara gelmesiyle durması görülmektedir. Numunede yapılan 1500x büyütmede boşluk içinde ve çevresinde iğne uçlu etrenjitler görülmekte, C-S-H yapısının komple bozulduğu ve boşluk çevresindeki çatlaklar görülmektedir, 15000x büyütmede büyük boşluklar içerisindeki etrenjitler görülmektedir.

Genel olarak betonda sıcaklık yükseldikçe etrenjit oluşumunda çok azda olsa artma, suyun buharlaşması sonucu betonda kuruma olması ve boşluk yapısında artma, mikro çatlakların daha fazla olması ama boşluklara gelince durması nedeniyle daha az olması, C-S-H yapısının komple bozulması görülmektedir. Çok az miktarda oluşan etrenjitlerin mikro çatlakları azda olsa doldurması görülmektedir.

SEM görüntü çekimlerinden sonra hacimce % 40 köpük solüsyonu katkılı numunelere kimyasal element yapılarını belirlemek için EDX analizi yapıp sonuçları Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11'de gösterilmiştir.

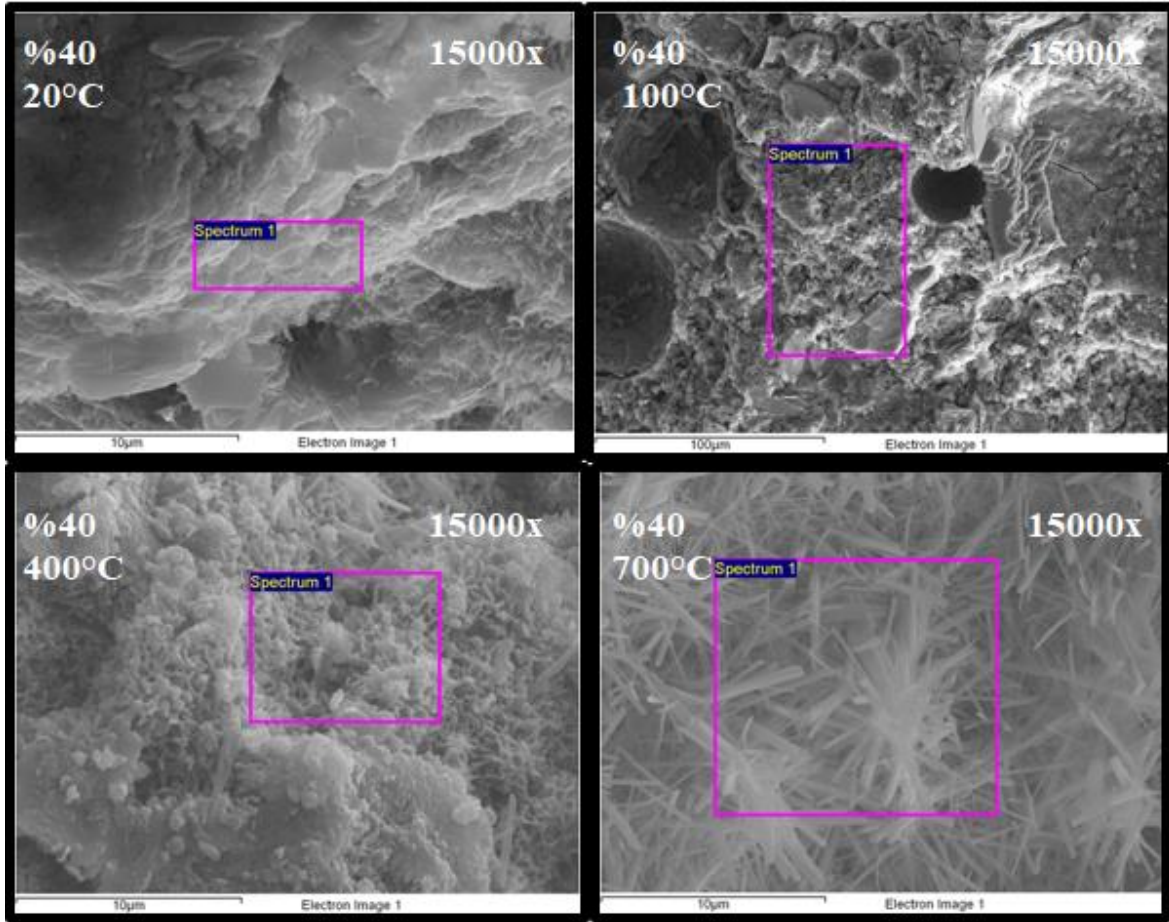


Şekil 4.24. Sıcaklık yükselmesine göre 250x büyütmede % 40 katkılı numunenin EDX analizi görüntüleri

Çizelge 4.10. Sıcaklık yükselmesine göre kütlece EDX analizi sonuçları

% 40 (250x)	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe
20 °C	4.03	47.53		1.43	8.42	0.88	37.71	
100 °C	5.35	44.96	0.63	1.52	7.90	1.12	36.27	2.24
400 °C		57.82	0.62	1.29	6.16	0.79	33.32	
700 °C	5.25	48.22		2.18	5.87	1.47	37.02	

Şekil 4.24’de EDX analizi yapılan bölgelerdeki kimyasal yapısı sonuçları Çizelge 4.10’da gösterilmiştir. Numunelerde 20 °C’de yapılan SEM çekimlerinde C-S-H yapıları ve sülfonattaki sülfür değerleri görülmektedir. Sıcaklığın 100 °C sonrası yapılan SEM çekimlerinde suyu buharlaşan C-S-H yapıları ve boşluklar görülmektedir. Sıcaklığın 400°C sonrası yapılan SEM çekimlerinde bozulmaya başlayan C-S-H yapılarında kimyasal analiz yapılmıştır, 700 °C’de komple bozulan C-S-H yapıları ve boşluklarda SEM çekimleri yapılmıştır.



Şekil 4.25. Sıcaklık yükselmesine göre 15000x büyütmede % 40 köpük solüsyonu katkı numunelerdeki EDX analizi görüntüleri

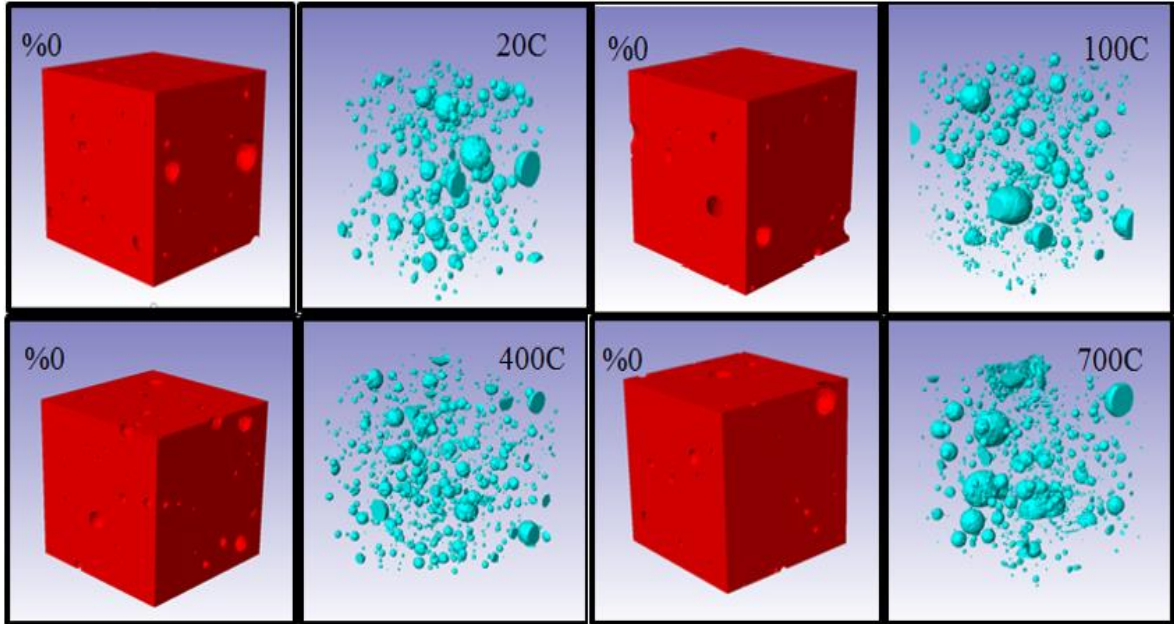
Çizelge 4.11. Sıcaklık yükselmesine göre kütlece EDX analizi sonuçları

% 40 (15000x)	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe
20 °C		34.21		0.90	2.52		58.60	3.76
100 °C	5.37	46.09	0.69	1.81	10.24	1.31	32.43	2.01
400 °C		54.46		1.40	8.09		36.05	
700 °C		51.76			5.99		42.25	

Şekil 4.25’de EDX analizi yapılan bölgelerdeki kimyasal yapısı sonuçları Çizelge 4.11’de gösterilmiştir. Numunelerde 20 °C’de C-S-H yapılarına EDX analizi yapılmıştır. Sıcaklığın 100°C sonrası kurumuş C-S-H yapılarındaki mikro boşluklara EDX analizi yapılmıştır. Sıcaklığın 400 °C sonrası bozulmaya başlayan C-S-H yapılarına EDX analiz yapılmıştır. Sıcaklığın 700 °C sonrası boşluk içindeki etrenjitlere EDX analizi yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.11’de gösterilmiştir.

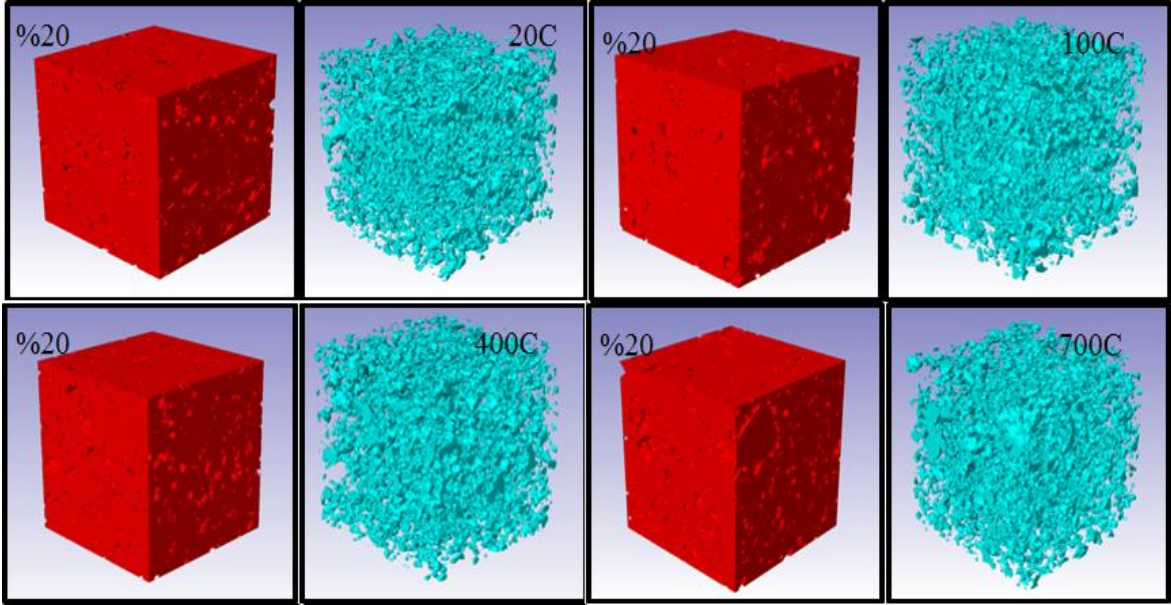
4.2.6 Dijital görüntü işleme ve analizi sonuçlarının incelenmesi

Katkılı ve katkısız beton numunelerde yapılan dijital görüntü analizleri sonuçları Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de gösterilmiştir. Yapılarındaki boşluk miktarı Şekil 4.29’de gösterilmiştir.



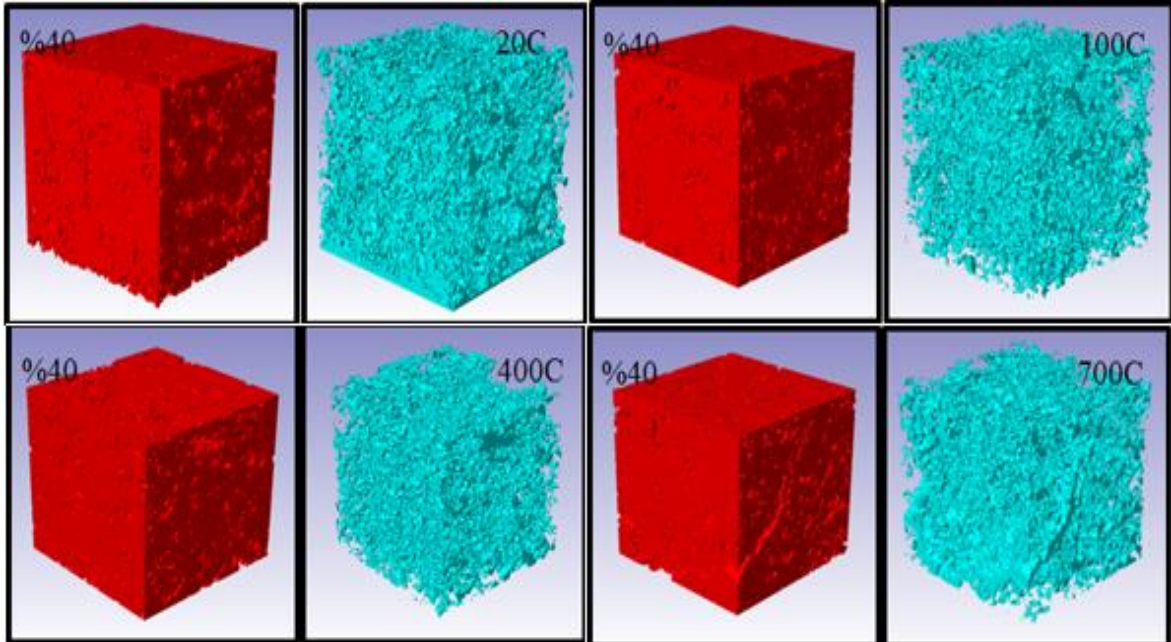
Şekil 4.26. Sıcaklık yükselmesine göre katkısız numunenin dijital görüntü analizi

Şekil 4.26’deki sıcaklık etkisine göre yapılan görüntü analizleri incelendiğinde 20°C’den 100 °C’ye sıcaklık yükselmesinde beton yapısındaki boşluklarda gözle görülür değişiklik gözlenmemektedir. Sıcaklık 400 °C’ye ulaştığında beton iç yapısındaki büyük boşlukların büzülmeden kaynaklı olarak iyice küçüldüğü görülmektedir. Sıcaklık 700 °C’ye yükseldiğinde betonda tekrardan büyük boşlukların görüldüğü ve büyük boşluk sayısındaki artış görülebilmektedir. Sıcaklık 400 °C’ye kadar yükseldiğinde betonda görülen büzülmenin, sıcaklık yükselmesi nedeniyle oluşan betondaki su kayıpları gösterilebilir, 700°C’de betondaki boşluk yapısının büyüdüğü ve arttığı görülmektedir.



Şekil 4.27. Sıcaklık yükselmesine göre % 20 katkılı numunenin dijital görüntü analizi

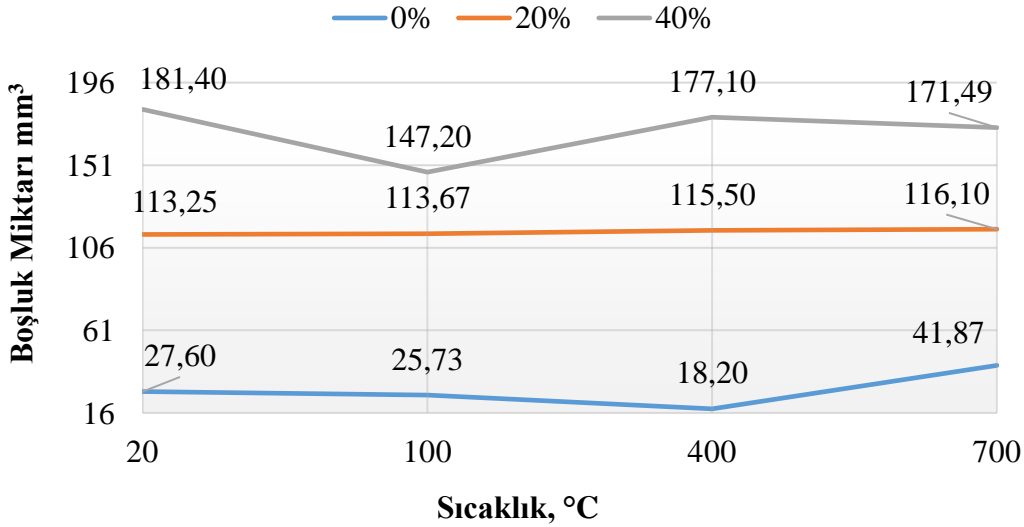
Şekil 4.27'deki görüntü analizleri incelendiğinde hacimce % 20 köpük solüsyonu katkılı numunelerde boşluk yapısındaki değişimler gözle ayırt edilememektedir.



Şekil 4.28. Sıcaklık yükselmesine göre % 40 katkılı numunenin dijital görüntü analizi

Şekil 4.28'deki görüntü analizleri incelendiğinde hacimce % 0 köpük solüsyonu katkılı numunelerde boşluk yapısındaki değişimler gözle ayırt edilememekte ancak 700°C'deki büyük çatlak görülebilmektedir.

Dijital görüntü analizleri yapılan numunelerin sıcaklık yükselmesine bağlı olarak yapısındaki boşluk miktarları hesaplanarak Şekil 4.29'de gösterilmiştir.



Şekil 4.29. Sıcaklık yükselmesine göre boşluk miktarlarındaki değişim grafiği

Şekil 4.29 incelendiğinde katkısız numunelerde 20 °C ile 100 °C arasında boşluk yapısındaki düşüş; çimento hamurundaki suyun buharlaşarak hacimde büzülme neden olup boşlukları kapatmaya başlamıştır. Sıcaklık 400 °C'ye yükseldiğinde bütün suyun buharlaşıp büzülme % 34 kadar çıkararak yapısındaki boşluk miktarı en az seviyeye getirmiştir. Kimyasal dönüşümün başladığı noktada yani 400 °C'den sonra C-S-H yapısındaki suyun kaybedilmesi ve C-S-H yapılarının bozulması mikro çatlaklara yol açmaktadır, bunun sonucunda 400 °C sıcaklıktan sonra boşluk miktarında % 130 ani artış olmaktadır.

Hacimce % 20 köpük solüsyonu katkılı numunelerde 100 °C'de suyun buharlaşması sonucu oluşan basınç ve betonun büzülmesi birbirini dengelediği düşünülmektedir. Aynı şekilde 400 °C ve 700 °C'de oluşan büzülmede, kimyasal reaksiyonlar ve suyun buharlaşması sonucu oluşan mikro çatlakları karşıladığı düşünülmektedir. Köpük

solüsyonunda bulunan sülfonatın 100 °C'den sonraki sıcaklıklarda bozularak çok azda olsa etrenjit oluşumuna yol açtığı ve boşluk yapısını azda olsa doldurarak dengelediği düşünülmektedir.

Hacimce % 40 köpük solüsyonu katkılı numunelerde ise sıcaklık değişimlerine karşı en az dayanıklı olan gruptur. Yapısındaki boşluk miktarı % 20 katkılı betonun boşluk miktarının 2 katı kadardır. Boşluk miktarının fazla olması, 100 °C'ye kadar yapısındaki suyun buharlaşmasıyla oluşan ani büzülme nedeniyle boşluk miktarında % 18.85'lik ani düşüş görülmektedir. Fakat 100 °C'den sonra betonun yapısındaki hidrasyona katılmayan suyun, köpük solüsyonundan gelen su ve boşluktaki tüm suların buharlaşmasıyla boşluk miktarında % 20'lik artış görülmektedir. Sıcaklık 700 °C'ye yükseldiğinde boşluk miktarının % 3 azaldığı görülmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar ve deneylerle aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Numunelerde 20 °C’de beton içerisindeki köpük solüsyonu miktarı artıkça; yapısındaki boşluk miktarı arttığı için birim ağırlıkta, ultrases geçiş hızında, basınç dayanımında, dinamik elastisite modülünde düşüşler meydana gelmiştir.

Numunelerde 20 °C’de beton numunelerinde yapılan SEM çekimlerinde betondaki boşluklar ve boşluk kenarlarındaki etrenjitler görülebilmektedir. Daha sonra yapılan EDX analizlerinde; köpük solüsyonu olan betonlarda normal betonlara göre Ca ve S elementlerinin miktarının 2 katından fazla olduğu görülmüştür. Bu durumun nedeni köpük ajanı yapısında bulunan Kalsiyum Naftalin Sülfonat’tır.

Numunelerde 20 °C’de beton numunelerinde yapılan dijital analiz görüntülemelerinde; katkısız betonda boşluk miktarı ve yapısı, köpük solüsyonu katkılı numunelere göre daha büyük fakat miktar bakımından daha az boşluk bulunduğu görülmektedir. Daha sonra 1000 mm³ hacimsel alan baz alınarak yapılan hesaplamalarda, köpük solüsyonu miktarı artıkça beton yapısındaki boşluk miktarı artmaktadır.

Yüksek sıcaklık etkisinde numunelerde; basınç dayanımları sonuçlarında katkısız betonlarda 400 °C’ye kadar basınç dayanımında ve dinamik elastisite modülünde artma olmakta, 400 °C’den sonra ise ani düşüş olmaktadır. Katkılı betonlarda ise sıcaklık yükseldikçe basınç dayanımında ve dinamik elastisite modülünde sürekli düşüş görülmektedir. Tüm deney gruplarında sıcaklık yükseldikçe birim ağırlıkta azalmalar olmaktadır. Yüksek sıcaklık etkisinde numunelerde; ultrases geçiş hızları incelendiğinde; 400 °C’ye kadar tüm numunelerde ultrases geçiş hızlarında azalmalar meydana gelmektedir. Sıcaklık 400 °C ile 700 °C arasında iken katkısız numunelerde ultrases geçiş hızlarında azalma meydana gelirken, köpük solüsyonu katkılı numunelerde ise beton yapısındaki köpük solüsyonu miktarı artıkça ultrases geçiş hızlarındaki artışta fazla olmaktadır. Yüksek sıcaklık etkisinde numunelerdeki SEM çekimleri sonucunda; sıcaklık yükseldikçe tüm

numunelerdeki suyun buharlaşması sonucunda artan kuruma ve boşluklar, C-S-H yapılarındaki bozulmalar ve artan mikro çatlaklar görülmektedir.

Yüksek sıcaklık etkisinde numunelerdeki dijital görüntülerdeki değişimler incelendiğinde; sadece katkısız numunelerde sıcaklık yükseldikçe boşluk yapılarındaki değişimler ve mikro çatlaklar görülebilmektedir. Boşluk miktarındaki sayısal sonuçlar incelendiğinde 400 °C'ye kadar büzülmeden kaynaklı % 34 kadar boşluk miktarında azalma, 400 °C'den sonra boşluk miktarında % 130'lük artış olmaktadır. Katkılı numunelerdeki görüntü analizlerinde boşluk miktarındaki fazlalıktan dolayı sıcaklık artışında oluşan değişimler gözlenememektedir. Katkılı numunelerdeki boşluk miktarı incelendiğinde % 20 katkıli betonlarda değişim sınırlı olmakta beraber, % 40 katkıli betonlarda 100 °C'de ani düşüş olmakta ama sonraki sıcaklıklarda boşluk miktarı artmaktadır.

Tüm sonuçlara göre beton yapısındaki köpük solüsyonu miktarı artıkça ve sıcaklık yükseldikçe; betondaki boşluk miktarı genel olarak artmakta, birim ağırlıkta azalma olmakta, ultrases geçiş hızlarında 400 °C'ye kadar azalma olmakta 700 °C'de ise ultrases geçiş hızları artmakta, basınç dayanımları sürekli azalmakta, dinamik elastisite modülü azalmaktadır. Kullanım alanı olarak düşünüldüğünde taşıyıcı duvar ve yalıtım malzemesi olarak hacimce % 20 köpük solüsyonu katkıli betonlar yararlı olabileceği düşünülmektedir. Ses ve ısı yalıtımı, çatı kaplaması, temel yalıtımı, duvarlarda sıva, yapılarda dış cephe kaplaması hacimce % 40 köpük solüsyonu katkıli betonların yararlı olabileceği düşünülmektedir.

Köpük betonda donma çözülme, su emme, ısı yalıtımı ve ses yalıtımı gibi özelliklerin yüksek sıcaklık etkisi sonrası, olası değişimleri ile ilgili çalışmalar sonrası için önerilebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akman, M.S., 2001, Betonarme yapılarda yangın hasarı ve yangın sonunda taşıyıcılığın belirlenmesi, Sika Teknik Bülten, İstanbul, Yıl 4, Sayı 2001/3
- Akman, M.S., Akçay, B., 2005, Kimyasal katkıların gelişimi ve çimentolarla uyumu, Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu,
- Akkoyun, Ö., 2010, Görüntü işleme yöntemlerinin mermer kalite seçiminde uygulanabilirliği üzerine bir değerlendirme, Mersem7, Uluslararası Mermer ve Doğaltaş Kongresi, Afyon.
- Aldridge, D., Ansell, T., 2001, Foamed concrete: production and equipment desing, properties, application and potential, proceeding of one seminar on foamed concrete: properties, application and latest technological development, Loughborough University
- Arioz, O., 2007, Effect of elevated temperatures on properties of concrete, Cement and Concrete, p.516-522
- Artrainsaat, 2015, [www.artrainsaat.com/genfil% 20tr.html](http://www.artrainsaat.com/genfil%20tr.html), erişim tarihi: 17.9.2015
- Aydos, 2015, Aydos-Lightcon 25, <http://www.aydos.com.tr/sayfa/urun-detay/326/aydos-lightcon-25>, erişim tarihi: 17.9.2015
- Badu, K.G., Badu, D.S., 2003, Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fuma, Cement and Concrete Research 33, p.755-762
- Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S., 2012, Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 334, s.7

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Brady, K.C., Watts, G., Jones., 2001, Specification for foamed concrete, Project Report PR/ISI/40/01,
- Bryant, M., 1990, How to Make Concrete That Will Be Immune to the Effects of Freezing and Thawing, Paul Klieger Symposium on Performance of Concrete, ACI SP-122, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- Can, S., 2017, Surfaktan maddeler, <http://w3.balikesir.edu.tr/~sedacan/eski/surfaktan.html>, erişim tarihi: 2.7.2017
- Çankıran, O., 1988, Pomza agregalı hafif betonun mekanik özellikleri ve kimyasal katkılarla dayanımın artırılması, SDÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, Isparta
- Chi, J.M., Huang, R., Yang, C.C., Chang, J.J., 2003, Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete, Cement and Concrete Composites, 25, p. 197-205
- Demirboğa, R., Gül, R., 2003, The effects of expanded perlite aggregate, silica fame and fly ash on the termal conductivity of lightweight concrete, Cement and Concrete Research 33, p. 723-727
- Demirel, B., Keleştemur, O., 2011, Yüksek sıcaklığa maruz pomza ve silis dumanı katkılı betonların mekanik ve fiziksel özelliklerinin kür yaşına etkisi, Yapı Teknoloji Elektronik Dergisi, Cilt7, Sayı 1 2001, s.1-13
- Diamand, S., Huang, Y., 2001 The ITZ in concrete- a different view based on image analysis and SEM observations, Cement and Concrete Composites, volume 23, 2001, p.179-188

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Erdin, N., 1987 Taramalı elektron mikroskobunun temel prensipleri ve numune hazırlama, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, B-36-2
- ESKİ, 2015, Arıtılmış su kalite kontrol Laboratuvarı, (<http://www.eskisehir-eski.gov.tr/laboratuar.php?sayfa=aritilmis-su-kalite-kontrol-formu>), erişim tarihi: 17.9.2015
- Helmesnstine, A.M., 2017, How does soap work, <https://www.thoughtco.com/how-does-soap-clean-606146>, erişim tarihi: 30.06.2017
- Hilal, A.A., Thom, N.H., Dawson, A.R., 2015, On entrained pore size distribution of foamed concrete, *Construction and Building Materials* 75, p. 227-233
- Huang, Z., Zhang, T., Wen, Z., 2015, Proportioning and characterization of portlan cement-based ultra-lightweight foam concretes, *Construction and Building Materials* 79, p.390-396
- Hossain, K.M.A., 2004, Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete, *Cement and Concrete Research* 24, p. 283-291
- Isu, N., İshida, H., Mitsuda, T., 1995, Influence of quartz particle size on the chemical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete-tobermarite formation, *Cement and Concrete Research* 25, p. 243-248
- Jones, MR., McCarthy, A., 2005 a, Behavior and assessment of foamed concrete for construction application, *In Proceeding of the International Conference on the use of Foamed Concrete in Construction*, p. 61-88

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Jones, M.R., McCarty, A., 2005 b, Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material, Magazine of Concrete Research 57, p. 21-31
- Jones, MR., McCarthy, M.J., McCarthy, A., 2003, A moving fly ash utilization in concrete forward, A UK Perspective in: Proceeding of the 2003 International Ash Utilisation Symposium, Centre for Applied Energy Research, University of Kentucky, p. 2-20
- Liu, M.Y.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, p.238-245
- Kayalı, O., 2008, Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete, Construction and Building Materials 22, p.2393-2399
- Kearsely, E.P., Mostert, H.F., 1997, use of foam concrete in southern africa, Proceeding from the ACI International Conference on High Performance Concrete, SP. 172-248, P. 919-934
- Khoury, G.A., 2000, Effect of fibre on concrete and concrete structures, Progress In Structural Engineering and Materials 2, p.429-447
- Kearsley, E.P., 1996, The use of foamed concrete for affordable development in third World countries, Appropriate Concrete Technology, p. 223-243
- Kearsley, E.P., Visagie, M., 1999, Micro-properties of foamed concrete, Specialist Techniques and Materials for Construction, p. 173-184
- Kearsley, E.P., 2001, Wainwright, P.J., 2001 a, The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete, Cement and Concrete Research 31, p. 105-112

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Kearsley, E.P., Wainwright, P.J., 2001 b, Porosity and permeability of doam concrete, Cement and Concrete Research 31, p. 805-812

Kocataşkın, F., 2000, Yapı malzemesi bilimi, Birsen Yayınevi, İstanbul

Merckmillipore,2017,http://www.merckmillipore.com/TR/tr/product/Eriochrome-blue-black-B-%28C.I.-14640%29,MDA_CHEM103168?ReferrerURL, erişim tarihi: 14.5.2017

McCornick, F.C., 1964, Rational proportioning of preformed foam cellular concrete, ACI Material Journal, 64, p. 104-109

Moureta, M., Bascoula, A., Escadeilosa, G., 1999, Microstructural features of concrete in relation to initial temperature- SEM and ESEM characterization, Cement and Concrete Research 29, 1999, p.369-375

Mydin, M.A.O., Wang, Y.C., 2011 a, Elevated temperature thermal properties of light weight foamed concrete, Construction and Building Materials 25, p.705-716

Mydin, MD.A.O., Wang, Y.C., 2011 b, Thermal and mechanical properties of lightweight foamed concrete at elevated temperatures, Magazine of Concrete Research, p. 1-11

Mydin, MD.A.O., Wang., Y.C., 2012, Mechanical properties of foamed concrete exposed to high temperatures, Construction and Building Materials 26, p. 638-654,

Nambiar, E.K.K, Ramamurthy, K., 2006, Influence of filler type on the properties of foam concrete, Cement and Concrete Research, 28, p. 475-480

Nambiar, E.K.K, Ramamurthy, K., 2007 a, Sorption characteristics of foam concrete, Cement and Concrete Research 37, p. 1341-1347

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Nambiar, E.K.K, Ramamurthy, K., 2007 b, Air-void characterization of foam concrete, Cement and Concrete Research, 37, p. 221-230
- Nambiar, E.K.K, Ramamurthy, 2007 c, E.K., Model for strength prediction of foam concrete, Materials and Structures, p.1-2
- Nambiar, E.K.K., Ramamurthy, K., 2008, Fresh state characteristic of foam concrete, ASCE Material and Civil Engineer 20, p. 111-117
- Narayanan, N., 1999, Influence of composition on the structure and properties of aerated concrete, M.S. Thesis IIT Madras
- Narayanan, N., Ramamurthy, K., 2000, Structure and properties of aerated concrete: a review, Cement and Concrete Composites 22, p. 321-329
- Neville, A.M., 1995, Properties of concrete, Fourth ed, Longman Group Limited, Essex, England
- Odler, I., Robler, M., 1985, Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated portlan cement pastes: Effect of pore structure and degree of hydration, Cement and Concrete Research 15, p. 401-410
- Pospisil, F., Jambar, J., Belko, J., 1992, Unit weight reduction of fly ash aerated concrete, In Wittman FH, Advances in Autoclaved Aerated Concrete, A.A. Balkima, p. 43-52
- Rudnai, G., 1963, Light weight concretes, Budapest: Akademi kiado
- Saad, M., Abo-El-Enein, S.A., Hanna, G.B., Katkara, M.F., 1996, Effect of temperature on physical and mechanical properties of concrete containing silica fume, Cement and Concrete Research 26, p.669-675

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sakr, K., El-Hakim, E., 2005, Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties, *Cement and Concrete Research* 35, 590-596
- Serin, G., Çankıran, O., Başığit, Ç., Taş, H.H., Fenkli, M., 2007, Normal, hafif ve yarı hafif beton blokların fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 15-22,
- Stutzman, P.E., 2001, Scanning electron microscopy in concrete petrography, *Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, USA*, p. 59-72
- Tanaçan, L., Ersoy, H.Y., Arpacioğlu, Ü., 2009, Effect of high temperature and cooling conditions on aerated concrete properties, *Construction and Building Materials* 23, p. 1240-1248
- Tanyıldızı, H., Coskun, A., 2008, The effect of high temperature on compressive strength and splitting tensile strength of structural lightweight concrete containing fly ash, *Construction and Building Materials* 22, p. 2269-2275
- Thoulow, N., Jakobsen, U.H., Clark, B., 1996, Composition of alkali silica gel and ettringite in concrete railroad ties: SEM-EDX and X-ray diffraction analyses, *Cement and Concrete Research* 26, p.309-318
- TS EN K 134, 2014, Köpük beton yapı malzeme ve elemanları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, s.1
- Valore, R.C., 1954, Cellular concrete part 1 composition and methods of production, *ACI J*, 50 (1954), p. 773-796
- Valore, R.C., Cellular concrete part 2 physical properties, *ACI J*, 50, p. 817-836

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Visagie, M., Kearsely, E.P., 2002, Properties of foamed concrete as influenced by air-void parameters, *Concrete*, 101, p. 8-14
- Wee, T.H., Babu, D.S., Tamilselvan, T., Lin, H.S., 2006, Air-void system of foamed concrete and its effect on mechanical properties, *ACI J*, 103, p. 45-52
- 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, p.1278-1291
- Wei, S., Yunshen, Z., Jones, M.R., 2014, Three- dimensional numerical modeling and simulation of thermal properties of foam concrete, *Construction and Building Materials* 50, p. 421-431
- Wei, K., Nambiar, E.K.K., Ranjani, G.I.S., 2009, A classification of studies on properties of foam concrete, *Cement and Concrete Composites* 31, p.338-396
- Weigler, H., Karl, S., 1980, Structural lightweight aggregate concrete with reduced density- lightweight aggregate foamed concrete, *International Lightweight Concrete*, 2 , p. 101-104

EK AÇIKLAMALAR



Şekil ek.1. Birim ağırlık hesaplamaları



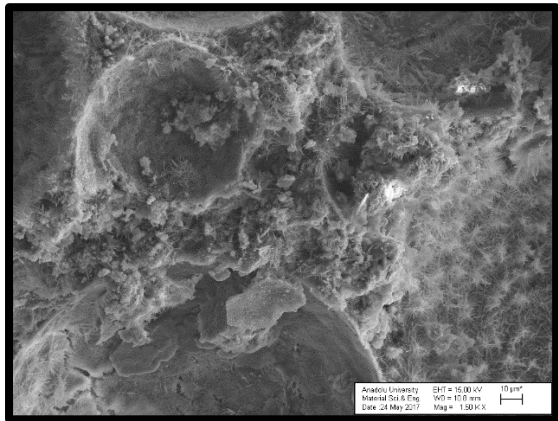
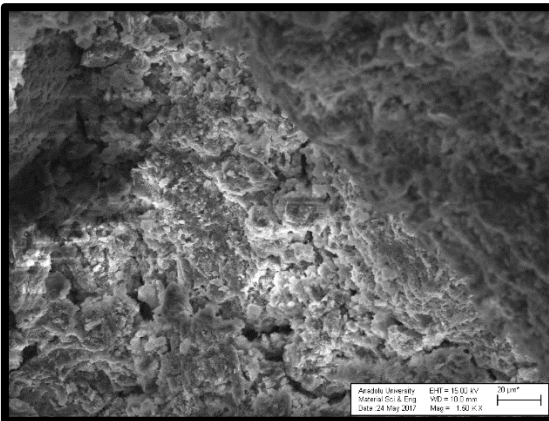
Şekil ek.2. Ultrases geçiş süresi deneyleri



Şekil ek.3. Basınç deneyi sonrası numune



Şekil ek.4. Numunelerin yüksek sıcaklık sonrası durumu



Şekil ek.5. Köpük betonda yapılan SEM çekimleri