T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

F–35B MÜŞTEREK SALDIRI UÇAĞI PİST BETONU İÇİN ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT GELİŞTİRİLMESİ ve TERMOMEKANİK DAVRANIŞI

Mazem BALABAN

DANIŞMAN
Doç. Dr. Savaş ERDEM

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2021

Bu çalışma, 24.06.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Doç. Dr. Savaş ERDEM(Danışman)
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Özlem ÇELİK SOLA
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Mehmet Fatih ALTAN
İstanbul Aydın Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Unvan Ad SOYADI
Üniversite
Fakülte

Unvan Adı SOYADI
Üniversite
Fakülte

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Bu tezin araştırma ve yazım sürecinde bilgi ve tecrübeleri ile bana her zaman yardımcı olan değerli danışmanım Doç. Dr. Savaş Erdem'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. Cem AYDEMİR, İnş. Yük. Müh. Pınar YILDIRIM, Hasan ERBİLGİN ve İsmail YÜKSEL başta olmak üzere İstanbul Aydın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvar ekibine ve laboratuvar olanaklarından faydalandığım İstanbul Aydın Üniversitesi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak sonsuz sabır, sevgi ve destekleri ile hep yanımda olan sevgili ailem ve Mustafa Kemal YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2021 Mazem BALABAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vii**
TABLO LİSTESİ ..... **x**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xiii**
SUMMARY ..... **xiv**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **3**
2.1 YÜKSEK SICAKLIK KAYNAKLARI 3
2.1.1 Yangın 3
2.1.2 Havaalanı Pistleri 4
2.1.3 Nükleer Reaktörler 8
2.2 YÜKSEK SICAKLIĞIN BETONARME ELEMANLARA ETKİSİ 9
2.2.1 Yüksek Sıcaklığın Betona Etkileri 9
2.2.1.1 Yüksek Sıcaklığın Betonun Fiziksel Özelliklerine Etkisi 9
2.2.1.2 Yüksek Sıcaklığın Betonun Isıl Özelliklerine Etkisi 11
2.2.1.3 Yüksek Sıcaklığın Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi 13
2.2.2 Yüksek Sıcaklığın Betonarme Çeliğine Etkileri 15
2.2.3 Yüksek Sıcaklığın Çimento Hamuruna Etkileri 16
2.3 BETONUN TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİ 17
2.3.1 Termal İletkenlik 17
2.3.2 Kavlanma - Spalling 17
2.3.3 Termal Genleşme Katsayısı 19
2.3.4 Parça Atımı – Scabbing 19
2.4 YÜKSEK SICAKLIK DAYANIKLILIĞI ETKİLEYEN PARAMETRELER 20
2.4.1 Mineral Katkı Malzemelerinin Etkisi 20
2.4.2 Agrega Karakteristiklerinin Etkisi 21
2.4.3 Liflerin Etkisi 22
2.4.4 Çimento Türünün Etkisi 24

İÇİNDEKİLER

3. MALZEME VE YÖNTEM 25
3.1 MALZEME 25
3.1.1 Çimento 25
3.1.2 Uçucu Kül 26
3.1.3 Genleştirilmiş Cam Agrega 27
3.1.4 Bazalt 28
3.1.5 Polipropilen Lif 28
3.1.6 Karışım Suyu 29
3.1.7. Süper Akışkanlaştırıcı Katkı 29
3.1.8 Hava Sürükleyici Katkı 30
3.1.9 Stabilizer Katkı 30
3.2 BETON KARIŞIM HESAPLARI VE NUMUNELERİN HAZIRLANMASI 31
3.3 NUMUNELERE SICAKLIK ETKİSİ UYGULAMASI 34
3.4 NUMUNELERE UYGULANAN DENEYLER 36
3.4.1 Basınç Dayanımı Deneyi 36
3.4.2 Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi 37
3.4.3 Ultrases Hızı ve Dinamik Elastisite Modülü 37
3.3.4 Elastisite Modülü Tayini 39
3.4.5 Ağırlık Kaybı 40
3.4.6 Termal İletkenlik Katsayısı Tayini 40
3.4.7 Mikro-Yapısal İnceleme (SEM-EDS Analizleri) 41
3.4.8 Fraktal Analizi ile Çatlak Karakterizasyonu 42
4. BULGULAR 46
4.1 ULTRASES HIZI VE DİNAMİK ELASTİSİTE MODÜLÜ SONUÇLARI 46
4.2 BASINÇ DAYANIMI SONUÇLARI 46
4.3 EĞİLMEDE ÇEKME DAYANIMI SONUÇLARI 49
4.4 AĞIRLIK KAYBI SONUÇLARI 53
4.5 ELASTİSİTE MODÜLÜ SONUÇLARI 53
4.6 TERMAL İLETKENLİK KATSAYISI SONUÇLARI 57
4.7 MİKRO-YAPISAL İNCELEME (SEM-EDS ANALİZİ) SONUÇLARI 59
4.8 FRAKTAL ANALİZİ SONUÇLARI 61
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 64
KAYNAKLAR 65
ÖZGEÇMİŞ 71

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Standart Sıcaklık-Zaman Eğrisi (Purkiss, 2007).....3

Şekil 2.2: Standart sıcaklık-zaman eğrileri (Yoshitake ve diğ., 2005).....4

Şekil 2.3: Dikey iniş sırasında F-35B (Autelitano ve diğ., 2017). 5

Şekil 2.4: F-35B jet uçağı (Autelitano ve diğ., 2017). 6

Şekil 2.5: F-35B'nin iki boyutlu modellenmesi (Autelitano ve diğ., 2017).....7

Şekil 2.6: A yüzeyinde ısınma (10 < t < 40 s) ve soğuma (40 <t < 300 s) fazlarında pist derinliğine bağlı sıcaklık değişimi (Autelitano ve diğ., 2017) 8

Şekil 2.7: Radyal koordinatlara göre B ve C noktalarında zamana bağlı sıcaklık değişimi (Autelitano ve diğ., 2017).....8

Şekil 2.8: Yüksek sıcaklık etkisindeki betonun renk değişimi (Hager, 2013). 10

Şekil 2.9: Çeşitli betonlar için ısıl yayınım katsayısı (Aköz ve Yüzer, 1994). 12

Şekil 2.10: Betonun bağıl basınç dayanımının sıcaklıkla değişimi (Gülce, 2009).....13

Şekil 2.11: Soğuma şekline göre kalan basınç dayanımı - sıcaklık grafiği (Neville, 2011).....14

Şekil 2.12: Normal betonda çekme dayanımı- sıcaklık ilişkisi (Gülce, 2009).....14

Şekil 2.13: Betonun elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi (Neville, 2011). 15

Şekil 2.14: Beton ve çelik için gerilme sıcaklık ilişkisi (Uçarkoşar, 2013). 16

Şekil 2.15: Betonun kavlanması (Khoury, 2000).....18

Şekil 2.16: Betonda scabbing olayı. 19

Şekil 3.1: Uçucu kül.....26

Şekil 3.2: Farklı çap uzunluklarına sahip genleştirilmiş cam agregaları (https://stikloporas.com/expanded-glass). 27

Şekil 3.3: Sırasıyla 4-8 mm ve 2-4 mm boyutlu genleştirilmiş cam agrega. 27

Şekil 3.4: Sırasıyla 4-8 mm, 2-4 mm ve 0-2 mm boyutlu bazalt agrega.....28

Şekil 3.5: Polipropilen lif 29

Şekil 3.6: Süper akışkanlaştırıcı katkı. 30

Şekil 3.7: Hava sürükleyici katkı 30

Şekil 3.8: Stabilizer katkı. 31

Şekil 3.9: Numunelerin hazırlanması 33

Şekil 3.10: Numunelere sıcaklık etkisi uygulaması 35

Şekil 3.11: Termal kamera ile sıcaklık ölçümü. 36

Şekil 3.12: Basınç dayanımı test presi. 37

Şekil 3.13: Eğilmede çekme dayanımı deneyi. 37

Şekil 3.14: Ultrases hızı testi. 38

Şekil 3.15: Elastisite modülü deneyi. 39

Şekil 3.16: Elastisite modülü deneyi uygulanan numuneler. 40

Şekil 3.17: Termal iletkenlik ölçüm cihazı. 41

Şekil 3.18: Kutu yöntemi ile fraktal boyutun hesaplanması (Mihashi ve diğ., 2006) 43

Şekil 3.19: Genleştirilmiş cam agregalı karışım için fraktal analizi adımları. 44

Şekil 3.20: Bazalt agregalı karışım için fraktal analizi adımları. 45

Şekil 4.1: Bazalt agregalı karışımın basınç dayanımı deneyi sonuçları. 47

Şekil 4.2: Genleştirilmiş cam agregalı karışımın basınç dayanımı deneyi sonuçları. 48

Şekil 4.3: Isı uygulama sonucunda numune kesitinde meydana gelen renk değişiklikleri. 48

Şekil 4.4: Bazalt agregalı numunelerin eğilmede çekme deneyi sonucunda kırılma yüzeyi 50

Şekil 4.5: Bazalt agregalı karışımın eğilmede çekme dayanımı deneyi sonuçları. 50

Şekil 4.6: Genleştirilmiş cam agregalı numunelerin eğilmede çekme deneyi sonucunda kırılma yüzeyi 51

Şekil 4.7: Genleştirilmiş cam agregalı karışımın eğilmede çekme dayanımı deneyi sonuçları. 52

Şekil 4.8: Normal ve hafif agregalı betonların kırılma sırasında çatlak ilerleme yönü. 52

Şekil 4.9: Bazalt agregalı numunelerin gerilme-birim deformasyon grafikleri 54

Şekil 4.10: Genleştirilmiş cam agregalı numunelerin gerilme-birim deformasyon grafikleri 55

Şekil 4.11: Bazalt agregalı karışımın elastisite modülü sonuçları. 56

Şekil 4.12: Genleştirilmiş cam agregalı karışımın elastisite modülü sonuçları. 56

Şekil 4.13: Termal iletkenlik katsayısı sonuçları. 58

Şekil 4.14: Liflerin beton içerisinde dağılımı ve yönelimi.....58

Şekil 4.15: Bazalt agregalı karışımın SEM görüntüsü ve EDS analizi. 59

Şekil 4.16: Genleştirilmiş cam agregalı karışımın SEM görüntüsü ve EDS analizi. 60

Şekil 4.17: Bazalt agregalı karışımın fraktal boyut değeri. 61

Şekil 4.18: Genleştirilmiş cam agregalı karışımın fraktal boyut değeri. 61

Şekil 4.19: Ws/Gf ile eğilmede çekme dayanımı ilişkisi. 62

Şekil 4.20: Genleştirilmiş cam agregalı karışımın üç boyutlu yüzey grafiği. 63

Şekil 4.21: Bazalt agregalı karışımın üç boyutlu yüzey grafiği. 63

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: Çimento özellikleri. 25

Tablo 3.2: Kullanılan uçucu külün özellikleri 26

Tablo 3.3: Genleştirilmiş cam agregaya ait teknik özellikler. 28

Tablo 3.4: Polipropilen lif teknik özellikleri 29

Tablo 3.5: Beton karışım oranları. 31

Tablo 3.6: Betonun ultrases geçiş hızına göre sınıflandırılması (International Atomic Energy Agency, 2002) 38

Tablo 4.1: Ultrases hızı ölçüm sonuçları. 46

Tablo 4.2: Dinamik Elastisite Modülü sonuçları 46

Tablo 4.3: Eğilmede çekme dayanımı deneyi sonuçları. 49

Tablo 4.4: Ağırlık kaybı sonuçları. 53

Tablo 4.5: Elastisite modülünün deneysel ve teorik karşılaştırılması 57

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
α	: Betonun Isıl Genleşme Katsayısı
a	: Isı Yayınım Katsayısı
C	: Özgül Isı
D	: Fraktal Boyut
E	: Elastisite Modülü
E_d	: Dinamik Elastisite Modülü
f_c	: Beton Dayanımı
G_f	: Kırılma Enerjisi
h	: Numunenin Enine Yüksekliği
k	: Termal İletkenlik Katsayısı
P	: Isı Şoku Parametresi
t	: Zaman
T	: Sıcaklık
V	: Ultrases Hızı
w_i	: Isıl İşlem Öncesi Numune Ağırlığı
w_k	: Ağırlık Kaybı
W_s	: Çatlak Oluşurken Yayılan Enerji
w_s	: Isıl İşlem Sonrası Numune Ağırlığı
δ	: Betonda Kullanılan Maksimum Kum Boyutu
δ	: Malzemenin Su Buharı Özgeçirgenliği
δ_{hava}	: Havanın Su Buharı Özgeçirgenliği
μ	: Buhar Difüzyonu Direnç Faktörü
$\sigma_ç$	: Malzemenin Çekme Mukavemeti
□	: Yoğunluk
□	: Poisson Oranı

Kısaltmalar	Açıklama
AFCEC	: Air Force Civil Engineering Centre
$Ca(OH)_2$	: Kalsiyum Hidroksit

CaO : Kalsiyum Oksit

C-S-H : Kalsiyum Silikat Hidrat

EDS : Enerji Dağılım Spektrometresi

EDX : Enerji Dağıtıcı X-Ray Analizi

ELT : Engineering Technical Letter

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

F – 35B MÜŞTEREK SALDIRI UÇAĞI PİST BETONU İÇİN ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT GELİŞTİRİLMESİ VE TERMOMEKANİK DAVRANIŞI

Mazem BALABAN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Savaş ERDEM

Bu çalışmada yeni nesil savaş uçağı olan F-35B'nin kalkış ve iniş esnasında oluşturduğu basınca ve özellikle yüksek sıcaklık etkilerine maruz kalan pistte kullanılan betonun karışımında yapılacak olan bir iyileştirme ile yüksek dayanım ve sıcaklık direnci gibi özelliklerin betona kazandırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda hafif (genleştirilmiş cam agrega) ve volkanik kökenli (bazalt) agregalı iki karışım tasarlanmıştır. Karışımların mekanik özellikleri, termal iletkenlikleri ve fraktal analizi ile eğilmede çekme deneyi sonucunda oluşan çatlak hasarları üç boyutlu olarak incelenmiş ve numunelerin kırılma enerjisi elde edilmiştir. İstatistiksel olarak fraktal boyutuyla eğilmede çekme dayanımı arasında son derece yüksek bir korelasyonun olduğu görülmektedir. Numunelerin ısı etkisiyle basınç dayanımlarında ciddi bir kayıp gözlenmemiştir. Bazalt agregalı karışımın mekanik özelliklerinin genleştirilmiş cam agregalı karışımdan üstün olduğu, buna karşın termal iletkenliğinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tarih girmek için burayı tıklatın., 85 sayfa.

Anahtar kelimeler: Havaalanı Kaplamaları, Yüksek Sıcaklık, Termal Şok, Polipropilen Lif, Fraktal Analizi.

SUMMARY

M.Sc. THESIS

DEVELOPMENT AND THERMO-MECHANICAL BEHAVIOUR OF CEMENT BASED COMPOSITE FOR THE RUNWAY CONCRETE OF F-35B JOINT STRIKE FIGHTER

Mazem BALABAN

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Savaş ERDEM

This study aims to provide the concrete with properties such as high strength and temperature resistance with an improved mix design for concrete pads supporting joint strike fighters F35-B. For this purpose, two mixtures with lightweight (expanded glass aggregate) and traprock sources (basalt) aggregate have been designed. The mechanical properties and thermal conductivities of the mixtures have been determined and, the flexural tensile stress induced surface cracks were characterized and mapped using by the 3D digital image analysis and Fractal Theory. The results have showed that the flexural tensile strength has a very strong dependence upon the variation in the fractal dimension, showing a linear relationship. The analysis also indicates the residual compressive strength of the mixtures was still high. Finally, it was observed that the mechanical properties of the mixture with basalt aggregate were superior to the mixture with expanded glass aggregate, but its thermal conductivity was higher than the mixture with expanded glass aggregate.

Tarih girmek için burayı tıklatın., 85 pages.

Keywords: Airbase concrete pavement, High temperature, Thermal Shock, Polypropylene Fiber, Fractal Analysis.

1. GİRİŞ

Gelişen hava teknolojisi ile özellikle savunma sanayi alanında yeni nesil uçaklar üretilmeye ve kullanımları dünya üzerinde yaygınlaşmaya başlamıştır. Türkiye'nin de üretim projesinde yer aldığı 5. nesil savaş uçağı olarak tanımlanan F-35 uçakları üstün gizlilik, entegre havacılık elektroniği, sensör birleşimi ve üstün lojistik desteği gibi belirgin karakteristiklere sahiptirler ve güncel olarak global ölçüde savaş uçakları arasında önemli bir yer edineceklerdir. Mühendislik açısından, bu uçakların kalkış ve inişlerinde kullanacakları pistlerin uygun ve/veya belirli sayıda kalkış ve inişten sonra kolayca uygun hale getirilmesi önem arz etmektedir. F-35B uçakları düşey yönde iniş ve kalkış yapabilmeleri dolayısıyla kalkış pisti kaplamalarını oldukça yüksek derecede termal etkiye maruz bırakmaktadır. Bahsedilen pist üzerindeki etki 85 °C s^{-1} ısı artışı hızı ile 930 °C sıcaklık seviyelerine ulaşmaktadır. Jet uçağındaki nozul kalkış anında piste ayrıca 180 kN düşey itme gücü uygulamaktadır. Ayrıca iniş ve kalkış anlarında çıkan egzoz gazı standart bir Portland çimento ile üretilen beton pist üzerinde ciddi hasarlara yol açabilmektedir. Pist betonundan kopan parçacıkların jet motoruna kadar girmesi de motor ve jet pilotu için büyük risk oluşturmaktadır. Bunlar arasında özellikle 85 °C s^{-1} ısı artış hızı, konumuz olan jet pisti kaplamasında kullanılacak olan betonun dayanımı açısından büyük önem taşımaktadır. Literatürde bu alanda yapılmış olan çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Bu tez dünyanın da gündeminde olan 5.nesil bir savaş uçağı pisti için literatürün en güncel ihtiyacını karşılamaya ve yerli tasarım standartlarının geliştirilmesine yardımcı olacaktır.

Bu çalışmada kalkış anında oluşan basınca ve özellikle yüksek sıcaklık etkilerine maruz kalan pistte kullanılan betonun karışımında yapılacak olan bir iyileştirme ile yüksek dayanım ve sıcaklık direnci gibi özelliklerin betona kazandırılması amaçlamıştır.

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın öncülüğünde Türkiye Uzay Ajansı tarafından yapılan planlama çerçevesinde ülkemizin savunma ve haberleşme alanında teknolojik kapasitesini geliştirmek adına uydu ve roket fırlatma sistemleri üzerine yoğun çalışmalar devam etmektedir. Bu kapsamda bu sistemlerin ateşlenmesi sırasında ihtiyaç duyulacak ve anlık çok yüksek ısıya dayanıklı beton fırlatma rampalarına ve pistlerine de ihtiyaç duyulacaktır. Bu çalışma ile ülkemizde özellikle savunma sanayi için son yıllarda yoğun araştırmaların yapıldığı ve yerli

üretimin başlamak üzere olduğu alanlarda da kullanılmak üzere faydalı yeni nesil bir kompozitin geliştirilmesine katkı vermesi de hedeflenmektedir.

2. GENEL KISIMLAR

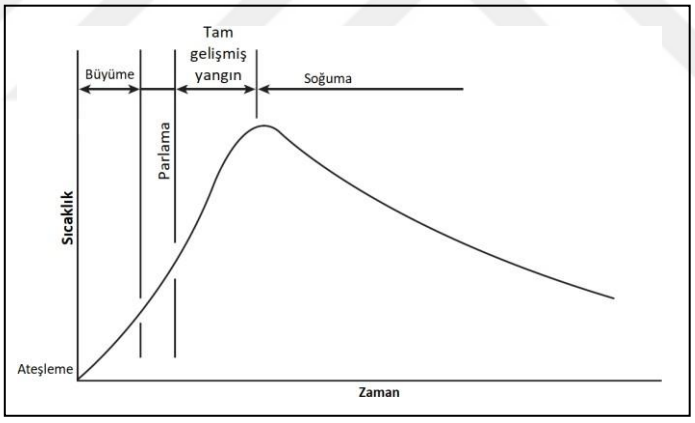
2.1 YÜKSEK SICAKLIK KAYNAKLARI

Yüksek sıcaklığın ısı kaynakları; yangın, havaalanı pistleri ile uçak tekerleri arasında sürtünmenin neden olduğu ısınma ve nükleer reaktörler olarak gösterilebilir (Aköz ve Yüzer, 1994; Sakr ve El Hakim, 2005). Yapıda hasara neden olan bu etkiler aşağıda sırası ile açıklanmıştır.

2.1.1 Yangın

Yangın, yakıt, oksijen ve ısının bir arada bulunması ile yanabilen maddelerin kontrolsüz yanması olarak tanımlanmaktadır.

Yangın büyüme (pre-flashover), tam gelişmiş yangın (post-flashover) ve soğuma olmak üzere üç fazdan oluşmaktadır (Şekil 2.1) (Purkiss, 2007).



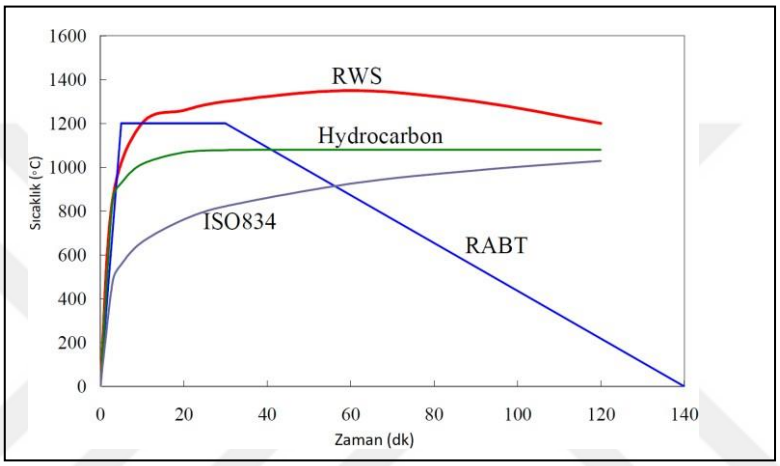
Şekil 2.1: Standart Sıcaklık-Zaman Eğrisi (Purkiss, 2007).

Yapısal yangın mühendisliğinde dünyaca kabul gören standart yangın eğrileri yapı elemanlarının yangın karşısındaki davranışlarını analiz etmemizi sağlayan eğrilerdir. ISO 834, RWS, Hidrocarbon ve RABT (Şekil 2.2) gibi standart yangın eğrileri örnek verilebilir. Bu yönetmelikler bir binada bütün eleman ve bileşenlerin fonksiyonlarına, konum ve taşıyıcı olup olmadıklarına bakılmaksızın belirli bir süre yangına ve onun etkilerine direnç göstermelerini zorunlu kılmaktadır (Baradan ve diğ., 2010).

Şekil 2.2'de ISO 834 standart sıcaklık-zaman eğrisi olarak tanımlanan bu eğri (2.1) bağıntısı ile ifade edilmektedir (ISO 834-1, 1999).

$$T - T_0 = 345\log(8t+1) \quad (2.1)$$

Denklemde, T yangın esnasında erişilen ortalama yangın gazı sıcaklığını (°C), T_0 başlangıç sıcaklığını (20 °C), t yangın süresini (dakika), göstermektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılacak fırının ısınma hızının bu bağlantıya uygunluğu şartı aranmaktadır.



Şekil 2.2: Standart sıcaklık-zaman eğrileri (Yoshitake ve diğ., 2005).

2.1.2 Havaalanı Pistleri

Uçakların iniş ve kalkış esnasında, uçak tekerlekleri ile pist arasındaki sürtünmeler, jet uçaklarının yardımcı güç birimlerinden çıkan 260 km/saat ve yaklaşık 196 °C sıcaklığındaki egzoz gazları, havaalanı pistlerinde sıcaklığın artmasına ve aşınmaya sebep olmaktadır. Hasar gören pistler yük taşıma kapasitelerini korusalar bile pistten kopan parçacıklar uçak motorları için tehlike oluşturmaktadır. Piste etki eden sıcaklığın etki süresine ve tekrarına bağlı olarak, pistteki betonlar zamanla mekanik dayanımlarını kaybettiği görülmüştür. Ramakrishnan ve diğ. (1991) tarafından yapılan çalışmada beton numunelere tekrarlı ısıtma-soğutma deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda tekrarlı yüksek sıcaklığın, betonun basınç ve eğilme dayanımında belirgin bir azalmaya neden olduğu görülmüştür.

Havaalanı pistlerinde yüksek sıcaklığa neden olan diğer bir etken ise konumuz olan F-35 savaş uçaklarıdır. F-35 müşterek savaş uçağı, süpersonik hızlara ulaşabilen; taarruz, keşif, savunma gibi çok amaçlı görevleri düşük görünürlük özelliğiyle gerçekleştirebilen; sensör teknolojileri

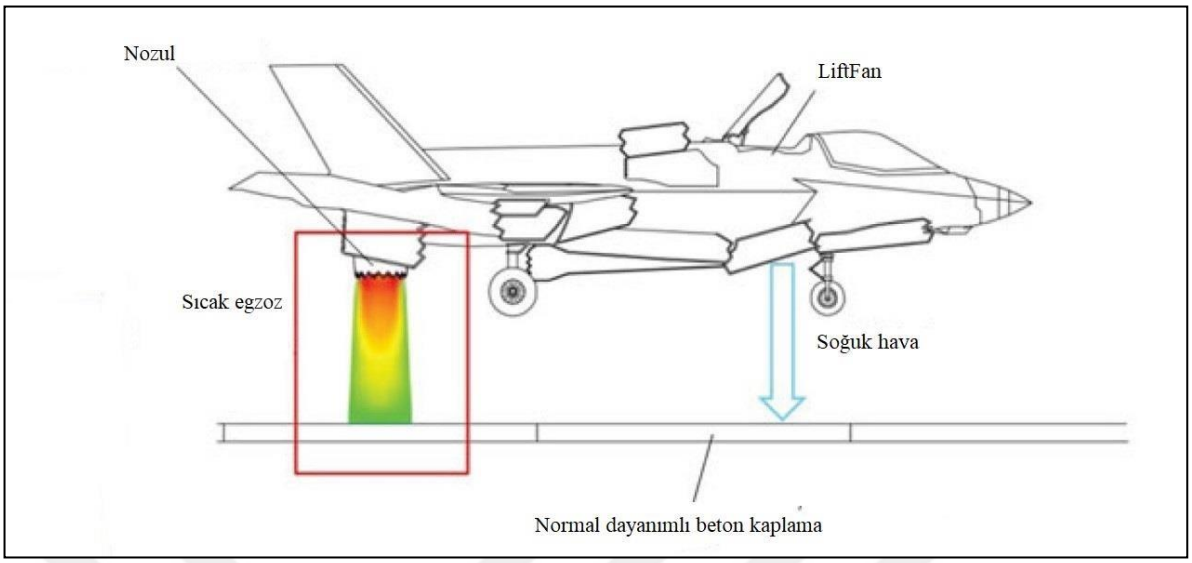
ve radar sistemi gibi üstün yeteneklere sahip; tek pilotlu ve tek motorlu 5. nesil bir savaş uçağıdır (Autelitano ve diğ., 2017).

F-35, Pentagon'un F-35 Joint Program Office tarafından yönetilmektedir. ABD Hava Kuvvetleri, ABD Deniz Piyadeleri ve ABD Donanması, F-35'leri tedarik etmekte ve işletmektedir. Ayrıca ABD, Birleşik Krallık, İtalya, Hollanda, Avustralya, Norveç, Danimarka ve Kanada olmak üzere sekiz uluslararası ortağı vardır. Türkiye ise eski ortaklarından biridir. F-35'in F-35A, F-35B ve F-35C olmak üzere üç ayrı konfigürasyonu bulunmaktadır. F-35A geleneksel kalkış ve iniş yeteneğine sahiptir. Kısa kalkış ve dikey iniş (STOVL) yapabilen F-35B, kısa kalkış yapabilmekte ve helikopter gibi iniş gerçekleştirebilmektedir (Şekil 2.3). F-35C ise helikopterler gibi olduğu yerden yükselerek kalkış yapıp aynı şekilde inebilmektedir (https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/f-35.html).



Şekil 2.3: Dikey iniş sırasında F-35B (Autelitano ve diğ., 2017).

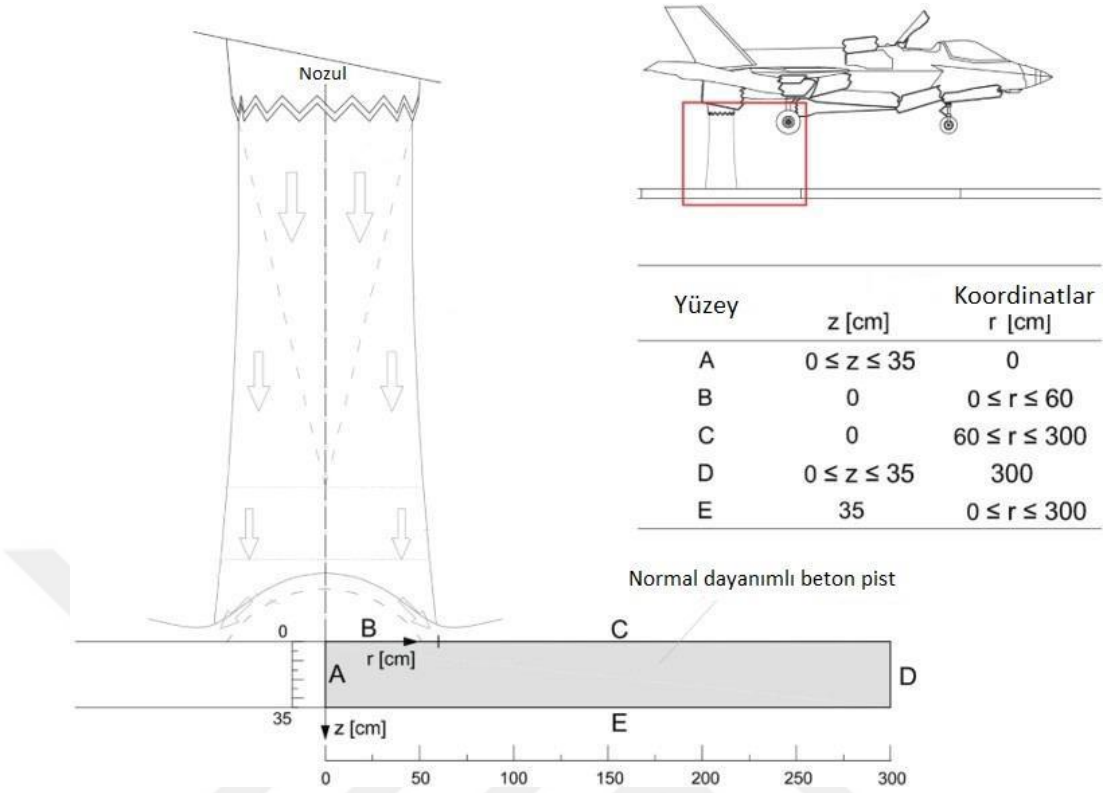
F35-B savaş uçağının düşey iniş ve kalkış hareketi, kalkış pisti kaplamalarını oldukça yüksek derecede termal etkiye maruz bırakmaktadır. Bahsedilen pist üzerindeki etki 85 °C s^{-1} ısı artışı hızı ile ulaşılan 930 °C sıcaklık seviyelerine ulaşmaktadır (Bevilaqua, 2005). Bu sıcaklık pist kaplamaları için oldukça kritiktir. Ayrıca jet uçağındaki nozul kalkış anında piste 180 kN düşey itme gücü uygulamaktadır (NAVFAC, 2014). Bunlar arasında özellikle 85 °C s^{-1} ısı artış hızı, araştırma konumuz olan jet pisti kaplamasında kullanılacak olan betonun dayanımı açısından büyük önem taşımaktadır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4: F-35B jet uçağı (Autelitano ve diğ., 2017).

F-35B'nin düşey iniş ve kalkış esnasında ortaya çıkan egzoz gazı normal bir Portland çimento betonunda hasarlara yol açabilmektedir. Nozul düşey yönde hareket edip ısı akışını başlattığı andan itibaren pist kaplamasını oluşturan malzeme üzerinde dayanımından çok daha fazla gerilme kuvvetleri oluşturmaya başlamaktadır. Bu sebeple kalkış pisti kaplaması, yüksek gerilme kuvvetleri altında servis ömrünü hızla tüketmekte ve görevini yapamaz hale gelmekte, ayrıca pist malzemesinden, yüksek ısı ve basınç sonucu kopan ve uçuşan parçalar jet uçağının motoruna ulaşarak jet uçağı için ciddi risklere neden olmaktadır. Yüksek derecede, çok hızlı artış ile malzemeye etki eden sıcaklığın ortaya çıkarttığı ana sorun termomekanik bozulma ve artıştır (Autelitano ve diğ., 2017).

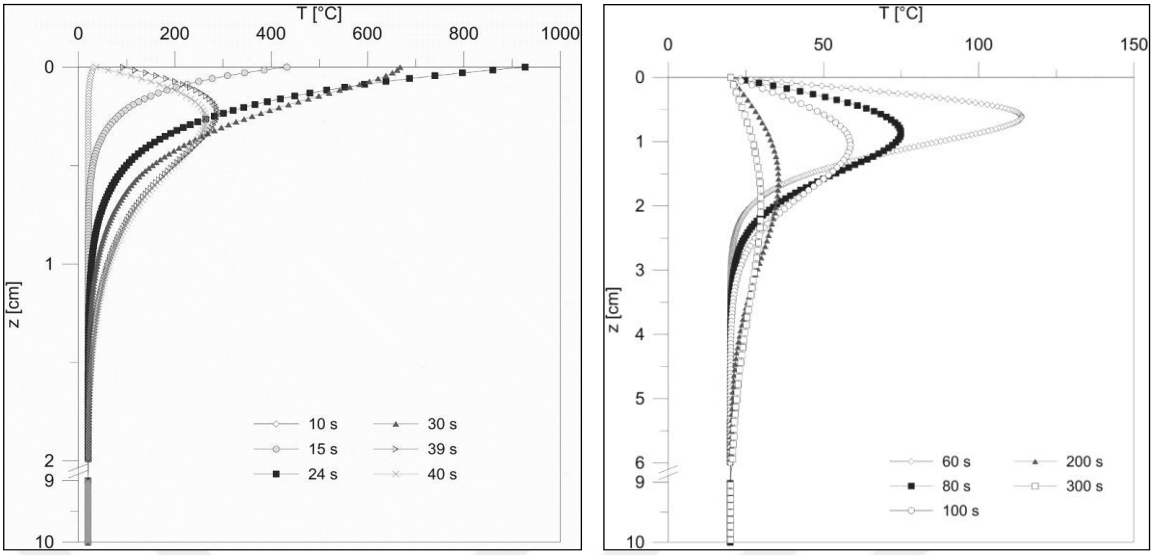
Autelitano ve diğ. (2017) çalışmasında F-35B egzoz gazlarına maruz kalan normal dayanımlı bir havaalanı kaplamasının modellenmesini ver termomekanik analizini yapmışlardır. Modelledikleri pist 35 cm yükseklik, 6x6 m'lik bir alandan oluşmaktadır. Modellemede eksenel ve radyal koordinatlar Şekil 2.5'te verilmiştir.



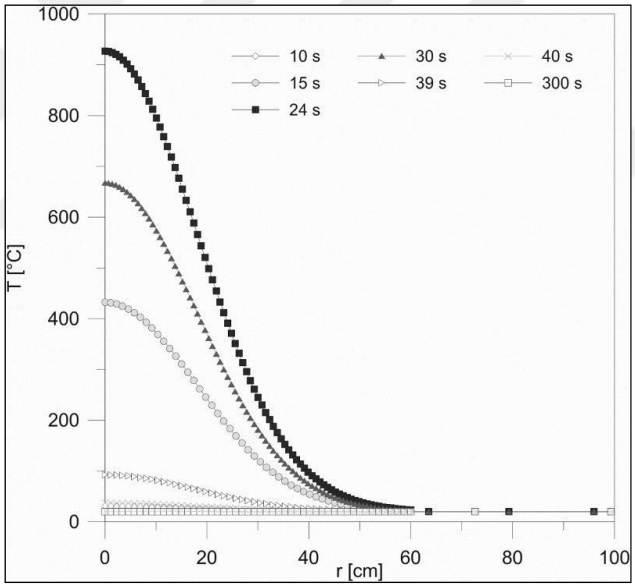
Şekil 2.5: F-35B'nin iki boyutlu modellenmesi (Autelitano ve diğ., 2017).

Şekil 2.6'da F-35 uçağının dikey inişi sırasında A yüzeyinin 10 cm kalınlığında ve $10 < t < 300$ s zaman aralığında sıcaklık değişimin verilmiştir. İlk 10 s içerinde pistte önemli bir sıcaklık değişimi görülmemesine karşın sonraki 11 s boyunca sıcaklık çok hızlı bir biçimde artarak 930 °C'ye vardığı ve 5 s boyunca da bu sıcaklıkta sabit kaldığı görülmektedir. Motor kapandıktan sonra sıcaklığın hızla düşmüş fakat kaplama kalınlığındaki ısı yayılımı devam etmiştir. 40. saniyede pistin yüzey sıcaklığı 20 °C'ye düşerken pistin yaklaşık 2 mm derinliğinde 260 °C'de olduğu görülmüştür. 40 s'den sonra soğuma fazında geçen pistte 60. s'de maksimum sıcaklık yaklaşık 8 mm derinlikte 117 °C civarındadır. Ardından 300 s.'ye kadar sıcaklık istikrarlı bir şekilde düşmeye devam etmektedir (Autelitano ve diğ., 2017).

Şekil 2.7'de ise pist modelinde radyal koordinatlarda sıcaklığın zamana bağlı değişimi verilmiştir.



Şekil 2.6: A yüzeyinde ısınma (10 < t < 40 s) ve soğuma (40 <t < 300 s) fazlarında pist derinliğine bağlı sıcaklık değişimi (Autelitano ve diğ., 2017).



Şekil 2.7: Radyal koordinatlara göre B ve C noktalarında zamana bağlı sıcaklık değişimi (Autelitano ve diğ., 2017).

2.1.3 Nükleer Reaktörler

Nükleer reaktörlerde, reaktörü koruyan betonlar 1100 °C'lere varan sıcaklıklara ve 900 °C'lere varan sıcaklık farklarına maruz kalmaktadır. Kullanılacak betonun bu sıcaklık ve sıcaklık farkına karşı dayanım göstermesi, ayrıca nötron ve gama ışınlarına karşı kalkan olması, izin verilen deformasyon ve sızdırma oranlarını sağlaması gerekmektedir (Parlayan, 2019).

2.2 YÜKSEK SICAKLIĞIN BETONARME ELEMANLARA ETKİSİ

Betonarme yapılar yangın, termal şok veya bazı endüstriyel uygulamalar gibi durumlarda yüksek sıcaklığa maruz kalmaktadır. Çoğu zaman, bu tür yüksek sıcaklıklar beton yapılarda ciddi hasarlara yol açmaktadır (Cülfik ve Özturan, 2002). Yüksek sıcaklığın betona, betonarme çeliğine ve çimento hamuruna etkileri sırasıyla incelenecektir.

2.2.1 Yüksek Sıcaklığın Betona Etkileri

Yüksek sıcaklık, betonun bozulmasına neden olan önemli fiziksel ve kimyasal değişikliklere neden olur. Beton, çeşitli inşaat malzemeleri arasında mükemmel bir ısıya dayanıklı malzeme olarak tanınmasına rağmen, yangın durumunda olduğu gibi yüksek sıcaklığa maruz kaldığında kritik bir bozulma gözlenir. Yüksek sıcaklığa maruz kaldığında betonda bir dizi fiziksel ve kimyasal geri dönüşümsüz değişiklik meydana gelir. Yüksek sıcaklıklardan kaynaklanan beton hasarı, ağırlık kaybı, mukavemet ve elastisite modülünde azalma, çatlak ve büyük gözenek oluşumunu içerir. Betonun yangına dayanıklılığı, bileşiminde kullanılan agrega ve çimento türü, yangının sıcaklığı ve süresi, yapısal elemanın boyutu ve betonun nem içeriği gibi faktörlerden etkilenir (Yüksel ve diğ, 2011).

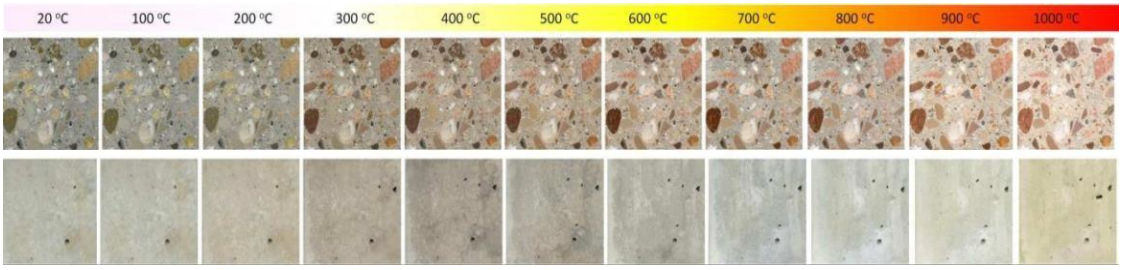
Yüksek sıcaklığın betonun fiziksel (renk, ağırlık kaybı, birim hacim ağırlığı, boşluk oranı), ısıl (ısı iletim katsayısı, buhar difüzyonu, özgül ısı, ısı yayınım katsayısı, ısı şoku parametresi) ve mekanik (basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü) özelliklerine etkisi sırasıyla incelenecektir.

2.2.1.1 Yüksek Sıcaklığın Betonun Fiziksel Özelliklerine Etkisi

Renk

Isıtılmış betonun renk değişimi esas olarak çimento hamurunun kademeli olarak sudan uzaklaştırılması ve dehidratasyonundan kaynaklanmaktadır, bunun yanında agrega içinde meydana gelen dönüşümlerden de kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Genellikle silisli agregalar içeren betonların, 300 °C ile 600 °C arasında ısıtıldığında kırmızıya; 600 °C ile 900 °C arasında, beyazımsı griye ve 900 °C ile 1000 °C arasında devetüyü rengine döneceği kabul edilmektedir. En yoğun renk değişikliği, kırmızı renklenmenin görüldüğü demir içeren silisli nehir yatağı agregalarında görülmektedir (Şekil 2.8). Kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) içeren

agregalar kalsinasyon işlemi nedeniyle kirece dönüşmektedir ve böylelikle renkleri soluk beyaz veya gri tonlarına dönüşmektedir (Hager, 2013).



Şekil 2.8: Yüksek sıcaklık etkisindeki betonun renk değişimi (Hager, 2013).

Ağırlık Kaybı

Arıoz (2007), yüksek sıcaklıkların; portland çimentosu, kireçtaşı kırığı ve nehir agregası kullanarak hazırladığı çeşitli beton karışımlarının fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. 200 °C'den 1200 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra tespit edilen ağırlık kayıpları sırasıyla yaklaşık %5 ile %45 bulunmuştur. Numunelerde ağırlık kaybı 800 °C'ye kadar kademeli bir şekilde, 800 °C'den sonra ise aşırı şekilde artma görülmüştür. Ağırlık kaybı üzerinde su/çimento oranının önemli bir etkisi olmadığı belirtilmiştir.

Birim Hacim Ağırlığı

Sıcaklığın artması ile beton boşluklarındaki su buharlaşmakta ve bunun sonucunda ağırlık azalmakta, genleşme nedeniyle is hacim artmaktadır. Isıtma sırasında betondaki ağırlık kaybı genellikle porozitenin artması ile sonuçlanmaktadır. Ama birim hacim ağırlıktaki bu azalma ihmal edilebilir düzeydedir (Aköz ve Yüzer, 1995).

Boşluk Oranı

Betonun gözenekliliği 120 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda önemli bir değişiklik göstermemektedir. Hem normal dayanımlı hem de yüksek dayanımlı betonlarım boşluk oranları artan sıcaklıkla beraber arttığı gözlemlenmiştir. Normal betonlarda betonun sertleşmiş çimento hamurundaki boşluk oranı 300 °C'den 600 °C'ye kadar yaklaşık %148, yüksek dayanımlı betonlarda %86 değerinde bir artış görülmektedir (Cülfik, 2001).

2.2.1.2 Yüksek Sıcaklığın Betonun Isıl Özelliklerine Etkisi

Termal İletkenlik Katsayısı

Termal iletkenlik katsayısı (k) malzemenin ısı iletim kapasitesinin bir ölçüsüdür ve sıcaklık arttıkça genellikle azalır. Bu katsayı oda sıcaklıklarında önemli bir değişiklik göstermez. Daha yüksek sıcaklıklarda ise iletkenliğin değişimi karmaşıktır. İletkenlik 50-60 °C civarına kadar yavaşça artar. Sıcaklık 120 °C'ye ulaştığında, betonda suyun uzaklaşmasıyla iletkenlik düşer ve 140 °C'ye kadar değişkenlik göstermez. 800 °C'deki termal iletkenlik ise 20 °C'deki termal iletkenliğinin yarısı civarındadır (Neville, 2011).

Buhar Difüzyonu

Su buharı, sıcaklığa ve neme bağlı olarak kısmı buhar basıncı yüksekten düşük tarafa doğru ilerler. Malzemenin bu ilerlemeye karşı koyduğu direnç ise buhar difüzyonu direnç faktörü olarak tanımlanır. TS EN 12086 (2002) standardına göre, her yapı malzemesi için karakteristik olan bu faktör, aşağıda verilen (2.1) bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

$$\mu = \frac{\delta hava}{\delta} \tag{2.1}$$

Bu bağıntıda, δ_{hava}, havanın su buharı özgeçirgenliğini, δ ise malzemenin su buharı özgeçirgenliğini temsil etmektedir.

Betona hava sürükleyici eklenmesi durumunda porozite artar ve su buharı direnç faktörü azalır (Kabay, 2009). Betonda yoğunluğun artması ile de betonun su buharı geçirimliliği azalır ve su buharı difüzyon direnci artar (Kearsley ve Wainwright, 2001).

Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonda oluşacak çatlaklar poroziteyi arttırır, dolayısıyla su buharı difüzyonu artar. Buna karşın su buharı direnç faktörü azalır (Vejmelkova ve diğ., 2008).

Özgül Isı

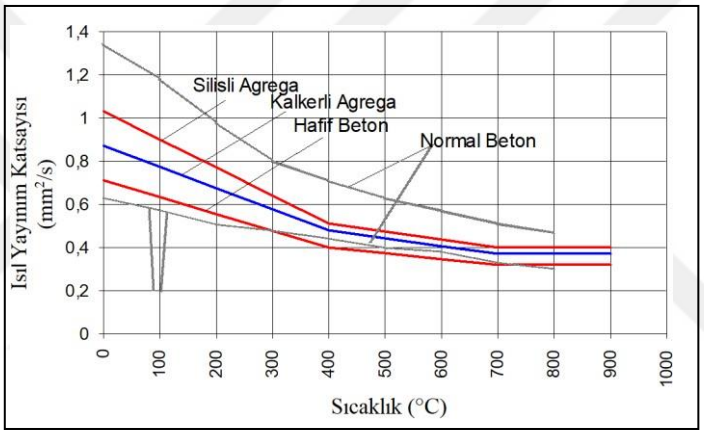
Betonun özgül ısısı, diğer bir deyişle bir gramının sıcaklığını 1 °C arttırmak için gereken ısı enerjisi, sıcaklıkla çok az değişmektedir. Bu büyüklüğe agreganın önemli bir etkisi olmamaktadır (Aköz ve Yüzer, 1994).

Isıl Yayınım Katsayısı

Yüksek sıcaklık etkisindeki bir malzemede, alınan ısının bir kısmı malzeme tarafından emilerek sıcaklığının yükselmesine neden olmaktadır. Alınan ısının bir kısmı ise malzeme tarafından yansıtılmaktadır. Bu olayda ısıl yayınım katsayısı (a) etkili olmaktadır. Isıl yayınım katsayısı

$$a = \frac{k}{(\rho \times C)} \quad (2.2)$$

ile hesaplanmaktadır. Bu bağıntıda, k malzemenin ısıl iletkenlik katsayısını, ρ yoğunluğu ve C özgül ısısını temsil eder. Isıl yayınım katsayısı-sıcaklık ilişkisi Şekil 2.9'da verilmiştir (Aköz ve Yüzer, 1994).



Şekil 2.9: Çeşitli betonlar için ısıl yayınım katsayısı (Aköz ve Yüzer, 1994).

Isı Şoku Parametresi

Bir malzemede, yüksek ve hızlı sıcaklık değişimleri sonucunda ısıl gerilmeler oluşur. Bu gerilmeler ise malzemede çatlaklara yol açabilir. Isıl şoku olarak adlandırılan bu olay ısıl iletkenliğe ve ısıl genleşmeye bağlıdır. Malzemelerin ısı şokuna dayanıklılığını belirtmek ve değişik malzemeleri karşılaştırmak için ısı şoku parametresi kullanılır. Isıl şoka dayanıklılık ısıl iletkenliği yüksek ve yüksek çekme mukavemetli malzemelerde büyük, ısıl genleşmesi ve elastisite modülü büyük olanlarda küçük olur. Isı şoku parametresi (2.3) bağıntısıyla tanımlanır (Onaran, 2014).

$$P = \frac{(k \times \sigma_{ç})}{(E \times \alpha)} \quad (2.3)$$

Bu bağıntıda k ısıl iletkenlik katsayısı; α ısıl genleşme katsayısı; $\sigma_{ç}$ malzemenin çekme mukavemeti ve E elastisite modülüdür.

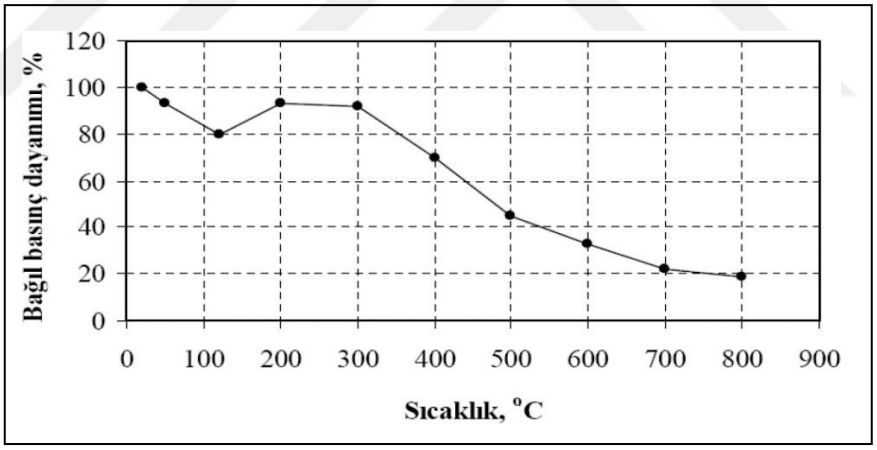
2.2.1.3 Yüksek Sıcaklığın Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi

Yüksek sıcaklığın betonun mekanik özelliklerine etkileri sırasıyla incelenecektir.

Basınç Dayanımı

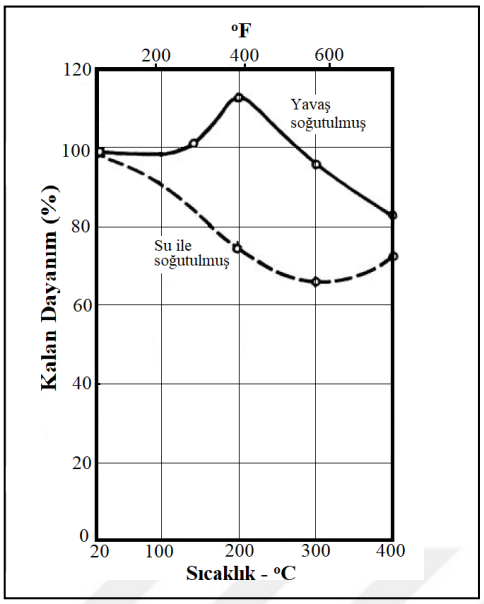
Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun basınç dayanımına, agrega ipi, çimento türü, su/çimento oranı, sıcaklığa maruz kalınan süre, mevcut nem durumu, ısınma ve soğuma hızı, yükleme durumu gibi faktörler etken olmakla beraber ayrıca soğuma türünün de etkisi vardır.

Yüksek sıcaklıklarda betonun basınç dayanımı Şekil 2.10'da gösterilmiştir. 120 °C sıcaklığa ulaşan betonun basınç dayanımı ilk başlarda düşer, 120-200 °C aralığında ise artar. 200 °C den sonra ise sıcaklık arttıkça basınç dayanımı azalır. Sıcaklık 700 °C ye vardığında bağıl basınç dayanımı %20'sine ulaşır. Betonun basınç dayanımındaki düşüşün nedeni olarak aderans bozulması ve çimento hamurunda kalsiyum silika hidrat jellerinin yapısının bozulması ve agregadaki ısıl genleşme farklılıkları olarak gösterilebilir (Yamazaki ve diğ., 1995).



Şekil 2.10: Betonun bağıl basınç dayanımının sıcaklıkla değişimi (Gülce, 2009).

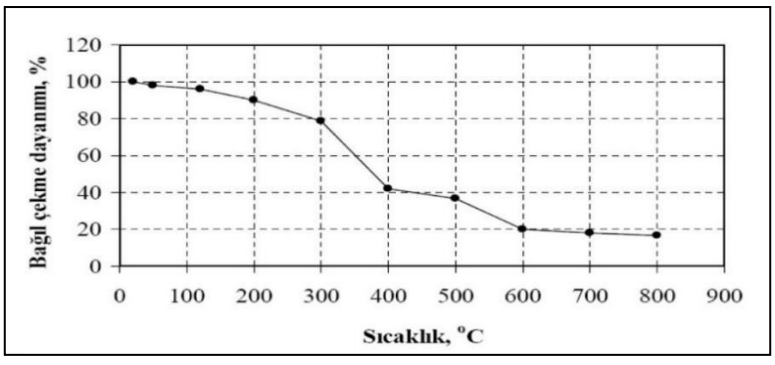
Bir çalışmada yüksek ısıya maruz kalan numunelerin kalan basınç dayanımları soğuma şekline göre karşılaştırılmıştır. Sonuçları Şekil 2.11'de verilmiş olup su ile soğutulan numunelerin basınç dayanımındaki kayıp havada soğumaya göre daha yüksektir (Neville, 2011).



Şekil 2.11: Soğuma şekline göre kalan basınç dayanımı - sıcaklık grafiği (Neville, 2011).

Çekme Dayanımı

Betonun çekme dayanımı, eğilmede çekme ve yarma deneyi sonuçları ile belirlenmektedir. Sıcaklığın artmasıyla normal dayanımlı betonun çekme dayanımının değişimi Şekil 2.12'de gösterilmektedir. Sıcaklık arttıkça normal betonun çekme dayanımı hızla düştüğü görülmektedir. Sıcaklık 600 °C'ye ulaştığında, beton ilk çekme dayanımının %20'sine düşmektedir. Yüksek sıcaklık etkisinde beton numunelerinde çekme dayanımının azalmasının sebepleri aderans bozulması, çimento hamurundaki C-S-H jellerinin yapısının bozulması ve agregadaki ısıl genleşme farklılıkları olarak sıralanabilir (Yamazaki ve diğ, 1995).



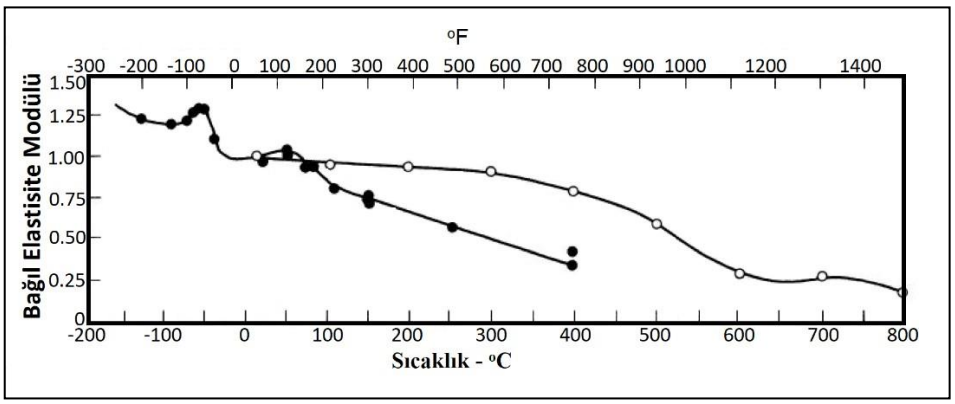
Şekil 2.12: Normal betonda çekme dayanımı- sıcaklık ilişkisi (Gülce, 2009).

Husem (2006) tarafından yapılan bir çalışmada normal ve yüksek performanslı betonun basınç ve eğilmede çekme dayanımı incelenmiştir. Yüksek sıcaklıklara (200, 400, 600, 800 ve 1000

°C) maruz bırakılan ve farklı şekillerde (hava ve suda) soğutulan normal ve yüksek performanslı betonun basınç ve eğilme dayanımları elde edilmiştir. Bu beton numunelerinin basınç ve eğilme dayanımları birbirleriyle daha sonra da yüksek sıcaklığa maruz kalmış numunelerle karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, beton mukavemetinin artan sıcaklıkla azaldığını ve normal beton mukavemetindeki azalmanın yüksek performanslı betondakinden fazla olduğu göstermektedir. Numunelerin soğutulma şekli, kalan basınç ve eğilme dayanımını etkilediği görülmektedir. Suda soğutulan numunelerin mukavemet kaybının daha yüksek olduğu görülmektedir.

Elastisite Modülü

Betonarme yapıların davranışı, betonun elastisite modülüne bağlıdır ve bu modül sıcaklıktan oldukça etkilenmektedir. Sıcaklığın, betonun elastisite modülüne etkisi üzerine yapılan iki ayrı çalışmaya ait sonuçlar Şekil 2.13'te Neville (2011) tarafından derlenmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlar incelendiğinde, kütle halinde kür edilmiş betonlarda 21 °C ile 96 °C'ler arasında elastisite modülünün değerinde herhangi bir değişiklik olmadığı ancak sıcaklık 121 °C'ye ulaştığında elastisite modülünün değerinin önemli derecede azaldığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak, 50 °C ile 800 °C'ler arası sıcaklıklarda elastisite modülündeki azalışının devam ettiği rapor edilmiştir. Genel olarak dayanımdaki azalma ile elastisite modülündeki azalma benzer eğilim göstermektedir.



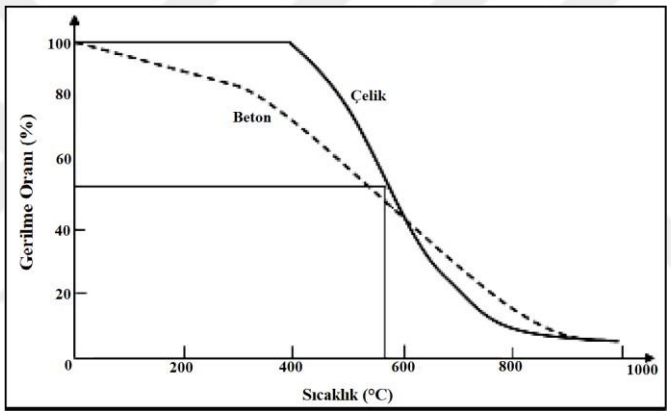
Şekil 2.13: Betonun elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi (Neville, 2011).

2.2.2 Yüksek Sıcaklığın Betonarme Çeliğine Etkileri

Çelik ve beton yanıcılık açısından A1 sınıfı 'hiç yanmaz' malzemeler grubundadırlar. Bu malzemelerin yüksek sıcaklıktaki hasarları, mukavemet, akma sınırı, elastisite modülündeki

azalmalar ve içyapı değişikleriyle ortaya çıkmaktadır. Beton ve çelik için gerilme-sıcaklık grafiği Şekil 2.14'te verilmiştir. Sıcaklık arttıkça betonarme çeliğinde akma sınırında ve çekme dayanımlarında büyük düşüşler gözlenmektedir. Sıcaklık 300 °C'yi aştığında mukavemet ve akma sınırında düşme başlar. Sıcaklık 600 °C'ye yükseldiğinde çekme mukavemeti güvenlik bölgesinin altına iner. Bu sıcaklıktan sonra çeliğin geri dönmeyen (plastik) deformasyon yapacağı da bilinir (Akman, 2000).

Yüksek sıcaklık etkisinde çeliğin elastisite modülünde düşüşler meydana gelmektedir. Elastisite modülündeki bu azalma, 400 °C'de %15, 600 °C'de ise %40 oranlarındadır ve bu azalmayla birlikte termik genleşme ve plastik deformasyonların başlaması sonucunda çelik aşırı uzamalara maruz kalacaktır (Akman, 2000).



Şekil 2.14: Beton ve çelik için gerilme sıcaklık ilişkisi (Uçarkoşar, 2013).

2.2.3 Yüksek Sıcaklığın Çimento Hamuruna Etkileri

Yüksek sıcaklıkla karşılaşan çimento hamurunu, önemli kimyasal ve fiziksel dönüşümler geçirdiği için çok istikrarsız bir bileşen olduğu söylenebilir. (Khoury, 1992).

Sıcaklık arttıkça Portland çimentosu hamuru ilk önce normal termal genleşmesi nedeniyle genleşir. Bu genleşmeyle birlikte, sıcaklık etkisiyle malzemeden su uzaklaşırken malzemenin büzülmesi nedeniyle bir daralmaya maruz kalmaktadır. Kuruma nedeniyle oluşan büzülme sonunda normal termal genleşmesinden çok daha büyük hale gelir ve daha sonra malzeme büzülmeye başlar. Maksimum büzülmeye ulaşılan sıcaklık, numunenin boyutuna ve ısıtma koşullarına göre değişir. Oldukça hızlı ısıtma koşulları altında hava ile kurutulmuş numuneler için 300 °C kadar yüksek olabilir. Daha yüksek sıcaklıklarda, saf çimento sürekli olarak küçülür, orijinal boyutlardan gelen büzülme sonuçta yaklaşık %0,5 veya daha fazladır. Bu işlem

sırasında ciddi çatlaklar meydana gelir (Shoaib ve diğ., 2001). Mikro çatlaklar ilk olarak yaklaşık 300 °C sıcaklığında $Ca(OH)_2$ konsantrasyonunda ve 400 °C sıcaklığında hidrate olmamış alanlarda görülmektedir (Piasta, 1984).

Beton bünyesinde su üç farkı şekilde bulunur. Bunlar jel yapılı çimento hamurundaki kalsiyum silikat hidratın (C-S-H) katı öğelerini birbirine bağlayan adsorpsiyon suyu, hidratlardaki kimyasal bağlı su ve kılcal boşluklardaki serbest sudur (Akman, 2000). Serbest su 100 °C sıcaklıktan sonra buharlaşmaya başlamaktadır. Sıcaklık 300 °C'ye vardığında ise kalsiyum silikat hidratenin katı öğelerini birbirine bağlayan adsorpsiyon suyu ve C-S-H ve sülfoalüminat hidratları bağlayan suyun bir kısmı buharlaşacaktır. Kalsiyum hidroksitin ($Ca(OH)_2$) dehidrate olarak kalsiyum oksit (CaO)'ya dönüşmesi 500 °C'de başlar. C-S-H jelinin tamamen ayrışması için 900 °C sıcaklıklar gereklidir (Mehta ve Monteiro, 2006).

Genel olarak, sıcaklık 300 °C'ye kadar arttığında kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli önemli ölçüde etkilenmez; 300 °C'ye kadar ısıtılan beton mukavemeti önemli ölçüde kaybetmez ve yeniden hidrasyon yoluyla herhangi bir mukavemet kaybı geri kazanılabilir. Bununla birlikte, 350 °C ile 550 °C arasındaki sıcaklık aralığında, kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) kireç ve suya ayrışır ve C-S-H jeli dehidrate olur ve 700-900 °C aralığında ayrışır (Horszczaruk ve diğ., 2017).

2.3 BETONUN TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

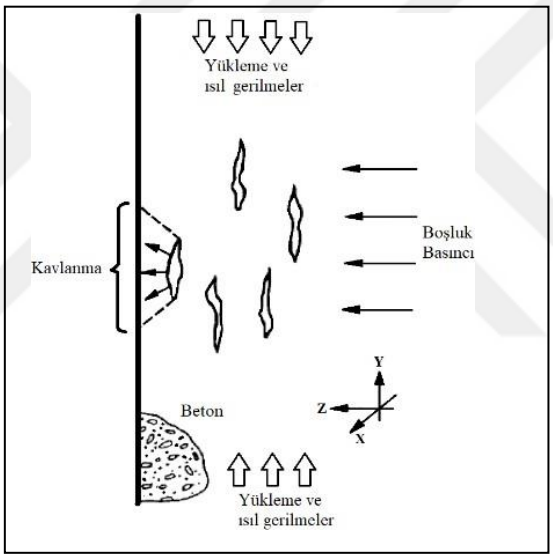
2.3.1 Termal İletkenlik

Termal iletkenlik (k), malzemenin ısı iletim kabiliyetini gösteren bir özelliktir ve birim kalınlıktaki bir malzemenin, birim sıcaklık (1 °C) değişimiyle birim alanından geçen ısı akışını ifade etmektedir. Betonun termal iletkenliği, agrega tipi, nem içeriği ve poroziteye bağlıdır. Hafif agregalar poroziteleri sebebiyle termal iletkenlikleri çok düşüktür ve iyi yalıtım özelliğine sahiptirler. Bazalt ve trakit düşük termal iletkenliğe, dolomit ve kalker orta termal iletkenliğe ve kuvars yüksek termal iletkenliğe sahiptir (Neville, 2011, Baradan ve diğ., 2015).

2.3.2 Kavlanma - Spalling

Betonarme yapılarda, yüksek sıcaklıkların etkisiyle betonun kabarıp dökülmesi kavlanma olarak adlandırılır (Şekil 2.15). Spalling olarak da adlandırılan bu olayda betonun geçirimliliği,

agrega boyutu ve tipi, çatlak ve güçlendirici varlığı, en kesitin boyutu ve şekli, ısıtma hızı, yükleme durumu gibi birçok faktör rol oynamaktadır. Yüksek sıcaklıkların etkisiyle betonda kavlanma, gözenek basıncı ve termal gradyan olarak iki mekanizma şeklinde açıklanmaktadır. İlk mekanizmada betonun gözeneklerindeki serbest su ısı etkisiyle buharlaşır. Yüzeye yakın olan su buharının bir kısmı betondan uzaklaşırken geri kalanı da iç kısımlara doğru hareket ederek gözenek basıncını yükseltir. Sıcaklık arttıkça gözenek basıncı artar ve oluşan gerilmelerin karşısında beton patlayıcı bir şekilde kırılarak beton kabuğunun çatlamasına neden olur. İkinci mekanizma ise betonun ısıtılmış yüzeyi ile daha düşük sıcaklıktaki iç kısımları arasında termal gradyan ve termal gerilmelerin neden olabileceğidir (Talaei and Mostofinejad, 2021).



Şekil 2.15: Betonun kavlanması (Khoury, 2000).

Kavlanmalar; agrega kavlanması, patlayıcı kavlanma, yüzey kavlanması ve köşe kavlanması olmak üzere olarak dört kategoride incelenmektedir. Agrega kavlanması, patlayıcı kavlanma ve yüzey kavlanması yangının ilk yarım saatlik süresi içerisinde meydana gelirken köşe kavlanması yangın başladıktan sonra 30 ile 60 dakika arasında meydana gelmektedir. Beton dayanımı arttıkça betonun kavlanma riski de artar. Normal beton, yüksek performanslı betonlara göre daha geçirimli olduğu için, yüksek sıcaklık etkisinde mevcut boşluk suyunun buharlaşmasıyla meydana gelen boşluk basıncı düşük düzeyde kalmaktadır. Bu sebeple patlayıcı kavlanmanın oluşma ihtimali normal dayanımlı betonlarda daha düşüktür. Betonun nem muhtevası, kütlece %2-3'den daha az ise kavlanmanın meydana gelmesi olası değildir. (Khoury, 2000).

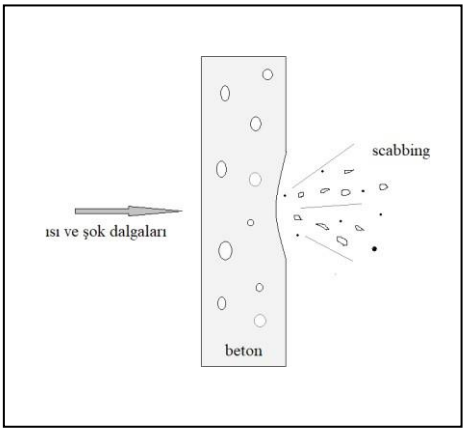
2.3.3 Termal Genleşme Katsayısı

Malzemelerin şekil değiştirmesini de etkileyen ısıya ilişkin bir diğer özelliği de ısıl genleşmesidir. Betonun genleşme katsayısı (α), üretimde kullanılan agregaların genleşmesine bağlıdır. Çimento hamurunun genleşme katsayısı agregalarınkinden büyüktür. Genleşme katsayısı en düşük olan doğal taş kalkerdir. Sıcaklık arttıkça α artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda termal genleşmelerdeki farklılıklardan dolayı oluşan gerilmeler çimento hamuru ile agrega ara yüzünde çatlamalara neden olur (Aköz ve Yüzer, 1994).

Malzemenin birim uzunlukta ve birim derece sıcaklıkta meydana gelen şekil değişimine termal genleşme katsayısı (α) denir. Bu katsayının pozitif olması malzemenin uzadığı, negatif ise kısaldığı anlamına gelmektedir. Betonun termal genleşme katsayısı karışım oranına ve agrega tipine bağlıdır. Agregalar betonun hacimce %70-80'ini oluşturduğu için agrega miktarının daha etkili olmaktadır (Baradan ve diğ., 2015).

2.3.4 Parça Atımı – Scabbing

Yüksek sıcaklık altında ısı ve şok dalgaları üretilmektedir. Temas ettiği yüzeyde basınç şeklinde ortaya çıkan bu dalgalar beton kütle içerisinde ilerleyerek karşı yüzeyden çekme, ısıl ve şok dalgaları olarak yansıyacaktır. Beton çekme açısından zayıf bir malzeme olduğu için parça atımı (scabbing) adı verilen olay meydana gelecektir (Şekil 2.16). Beton kütlenin bütünlüğünü sağlayabilmek adına çatlak yüzeyleri arasında köprüleme görevi görecek fiberlerin kullanılması bu tarz yapılar için büyük önem arz etmektedir.



Şekil 2.16: Betonda scabbing olayı.

2.4 YÜKSEK SICAKLIK DAYANIKLILIĞI ETKİLEYEN PARAMETRELER

2.4.1 Mineral Katkı Malzemelerinin Etkisi

Betonun istenilen özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılan, çimento gibi öğütülmüş toz halde silolarda depolanan yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı gibi çeşitli malzemelere mineral katkı adı verilir. Bu katkıların tek başına bağlayıcılık özelliği yoktur, fakat birlikte kullanıldıklarında çimentoya benzer görev yaparlar. Mineral katkılar betona ek dayanım kazandırma özelliğine sahiptir ve betonun durabilite anlamında performansını arttırmaktadır.

Uçucu kül ve öğütülmüş tanecikli yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların yüksek sıcaklık direncine göre faydalı etkisi, pozolanik reaksiyon yoluyla $Ca(OH)_2$'nin çimentodan stabilize edilmesinden kaynaklanır. $Ca(OH)_2$'nin zararlı etkileri, mikro çatlakların ilk önce yaklaşık 300 °C'de $Ca(OH)_2$ konsantrasyonu alanlarında ortaya çıkması ve kalsiyum hidroksitin 350 °C'nin üzerindeki kireç ve su buharına ayrışmasıdır. Kalsiyum hidroksitin ayrışması, ısıtma sırasındaki mukavemet kaybı açısından kritik değildir. Ancak, soğutma döneminde kireç genleşmesi nedeniyle ciddi hasara neden olabilir. Ayrıca, bu hasar yangın söndürme işlemi sırasında da CaO'nun su ile reaksiyona girerek önemli bir genişleme ile $Ca(OH)_2$'ye dönüşmesiyle gözlemlenebilir (Aydın, 2008).

Aydın ve Baradan (2007), uçucu kül oranları %0-20-40-60 olan ve pomza agregaları içeren beton numunelere yüksek sıcaklık etkisini araştırmışlardır. Dört farklı karışım 300, 600 ve 900 °C sıcaklıklara 3 saat maruz bırakılıp hava veya su ile soğutulmuştur. Deneyler sonucunda %60 uçucu kül içeren karışımın özellikle 900 °C'de basınç dayanımında en iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Tüm karışımlarda eğilme dayanımında ciddi kayıplar görüldüğü belirtilmiştir. Ayrıca suda soğutulan numuneler havada soğutulan numunelere kıyasla daha fazla mukavemet kaybına uğramıştır.

Poon ve diğ., (2001) tarafından yapılan bir çalışmada silika dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren normal ve yüksek mukavemetli puzolanik betonların mukavemet ve dayanıklılık performansı 800 °C'ye varan yüksek sıcaklıklarda karşılaştırılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda puzolanik betonların sıradan Portland çimentolu betonlardan daha iyi performans göstermiştir. Bunun nedeni, puzolanların serbest kireç ile reaksiyona girerek serbest kireç içeriğini azaltması olarak gösterilmiştir. Çalışma sonucunda uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren betonların, silika dumanı içeren betonlara göre özelliklerini daha iyi koruyabildiği gözlemlenmiştir.

Uçucu kül, termik elektrik santrallerinde öğütülmüş kömürün yanmasıyla elde edilen bir yan üründür ve beton için sıklıkla kullanılan katkı maddelerinden biridir. Betona uçucu kül takviyesi işlenebilirliği artırır, su talebini azaltır ve taze betonun hidratasyon ısısını düşürür. (Shill ve diğ., 2018). Ayrıca Tanyıldızı ve Coşkun (2008), yaptıkları bir çalışmada uçucu külün betonun yüksek sıcaklığa karşı direncini artırdığını bildirmiştir. Bu çalışmada ise uçucu kül takviyesinin yüksek sıcaklığa karşı avantajları dolayısıyla mineral katkı olarak uçucu kül seçilmiştir ve bağlayıcı miktarının ağırlıkça %15'i olarak belirlenmiştir.

2.4.2 Agrega Karakteristiklerinin Etkisi

Betonun mekanik performansı yüksek sıcaklıklarda kötüleşir, ancak bozulma oranı kullanılan agrega tipine göre değişir. Agreganın yüksek sıcaklıktaki performansı çimento hamuru fazından daha iyidir ve tipik agregalar 500 °C'ye kadar stabil kalır (Horszczaruk ve diğ., 2017).

Agreganın gözenekliliği ve mineralojisi, yangına maruz kalan betonun davranışı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Kuvars kumu, çakmaktaşı ve kumtaşı gibi kuvars içeren silisli agregalar yaklaşık 573 °C'de betonda sıkıntıya neden olabilir. Karbonat kayaçlarında, dekarbonasyon reaksiyonunun bir sonucu olarak benzer bir sıkıntı 700 °C'nin üzerinde başlayabilir. Olası faz dönüşümlerine ve agreganın termal ayrışmasına ek olarak, betonun yangına tepkisi agrega mineralojisinden başka şekillerde de etkilenir. Örneğin, agrega mineralojisi agrega ve çimento hamuru arasındaki diferansiyel termal genleşmeleri ve geçiş bölgesinin nihai mukavemetini belirler. Bu nedenle, yüksek sıcaklığa dayanıklı bir agrega seçerken dikkate alınması gereken ilk kriter, hem fiziksel hem de kimyasal olarak termal kararlılığıdır. Ayrıca agrega, çimento hamuru ile sıcaklığa dayanıklı güçlü bir bağ üretmeli ve mümkün olduğunda termik olarak uyumlu olmalıdır. Kireçtaşı, temel magmatik kayalar ve özellikle kırma tuğla ve yüksek fırın cürufu gibi silika içermeyen agregalarda güç kaybı oldukça düşüktür. Düşük ısı iletkenliğine sahip beton, daha iyi bir yangına dayanıklılığa sahiptir, örneğin, hafif beton, sıradan betona göre daha iyi yangına dayanır. Pomza, köpüklü cüruf ve genleştirilmiş kil ürünleri gibi hafif agregalar yangına karşı yüksek direnç gösterir ve bunlardan yapılan beton düşük ısı iletkenliğine sahiptir. Bu agregaların tümü, oluşumları ve üretim aşamaları sırasında yüksek sıcaklıklara maruz kalmıştır. Bu nedenle agregaların kendileri yüksek sıcaklıklarda hacim genleşmesine ve ayrışmaya karşı yüksek dirence sahiptir (Aydın, 2008).

Pomza patlayıcı bir volkanizma işlemiyle oluşturulan hücresel bir yapıya sahip magmatik kökenli bir alüminyum silikattır, hafif ve yalıtım özellikleri bir yapı inşaat malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Pomza, tuğla tozu ve nehir kumu agregalarının kullanıldığı harçların yüksek sıcaklık (600 °C) performansı Aydın ve Baradan (2007) tarafından araştırılmıştır. Pomza agregası harcı sadece %5 basınç dayanımı kaybı ile en iyi performansı gösterirken doğal nehir kumu agregası içeren harçtaki kayıp %40 civarındadır. Türker ve diğ. (2001) agrega tipinin harçların yüksek sıcaklık dayanımı üzerindeki rolünü araştırmışlar ve 500 °C'ye kadar basınç dayanımı kaybı göstermeyen pomza agregası harcının, kuvarsit ve kireçtaşından daha yüksek sıcaklığa dayanıklı olduğunu bulmuşlardır. Yazıcı ve diğ. (2000) ayrıca pomza harcının yüksek sıcaklık direncini araştırmışlar ve pomza agregası harcının 600 °C'de %41 basınç dayanımı değeri elde ederken, geleneksel doğal nehir kumu harcı mukavemetlerinin %39'unu kaybetmişlerdir.

Netinger ve diğ. (2011) tarafından yürütülen bir çalışmada yüksek sıcaklıklarda oluşan malzemelerin, yüksek sıcaklığa maruz kalan beton için agrega olarak kullanılması araştırılmıştır. Beton numunelerde diyabaz, çelik cürufu, ezilmiş tuğla ve ezilmiş fayans gibi yangına dayanıklı agregalar kullanılmıştır ve bu numuneler doğal agregalı beton numunelerle karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda doğal agregaların, tuğla ve çelik endüstrisi atık malzemeler ile değiştirilmesinin yangına karşı dayanıklılığını artırdığı gözlemlenmiştir.

Uygunoğlu ve diğ. (2009) ezilmiş kireçtaşı ve pomza kullanılarak üretilen betonun 1000 °C'ye kadar sıcaklığa maruz bırakmışlardır ve termal genleşme katsayısını değerlendirmiştir. Pomza kullanılarak üretilen betonların termal genleşme katsayılarının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, gözenekliliğe bağlı olarak numunelerdeki boşlukların artarak iç termal gerilmeyi azaltmasıyla termal genleşmede önemli bir azalmaya yol açmasıdır.

Sakr ve El-Hakim (2005) tarafından yapılan bir çalışmada çakıl, barit ve ilmenit agregalarıyla üretilen ağır betonlar belirli sürelerde (1, 2 ve 3 saat), çeşitli yüksek sıcaklıklara (250, 500, 750 ve 950 °C) maruz bırakılmıştır. Deneyler sonucunda ilmenit agregasıyla üretilen betonun mekanik ve fiziksel açıdan en yüksek dayanıklılığı göstermiştir.

2.4.3 Liflerin Etkisi

Liflerin ana rolünün betonda gelişen çatlakları köprülemek ve beton elemanların sünekliğini arttırmak olduğu bilinmektedir. Lifler betonarme elemanlara ek enerji emme kapasitesi

sağlamaktadır. Betona liflerin eklenmesi statik eğilme dayanımı, darbe dayanımı, çekme dayanımı, süneklik ve eğilme dayanımı gibi yapısal özelliklerini önemli ölçüde geliştirir. Geliştirme derecesi, liflerin boyutu, tipi, en boy oranı ve hacim oranı gibi birçok faktöre bağlıdır (Mohammadi ve diğ, 2008).

Serrano ve diğ, (2016) yüksek sıcaklığa maruz kalan lif takviye edilmiş beton için çelik veya polipropilen liflerden hangisinin daha iyi alternatif olduğunu araştırmışlardır. Araştırma sonucunda polipropilen lifleri dahil etmek, geleneksel betona iyi bir alternatif olduğu, çünkü yangın durumunda gücünü ve davranışını geliştirdiği anlaşılmıştır. Ayrıca, çelik fiberlerin eklenmesinin geleneksel betona kıyasla avantajlar sunduğu, ancak polipropilen liflerin eklenmesiyle elde edilen performansa ulaşamadığı sonucuna varmışlardır.

Bazalt lif, bazalt kayasından üretilen inorganik bir liftir. Çevre dostudur, sağlığa ve çevreye zarar verecek kimyasal reaksiyonları yoktur, yanıcı ve patlayıcı değildir. Asit ve alkalin çözeltilerine cam elyaftan daha iyi direnç gösterir (Borhan, 2012). Sim ve diğ. (2005) bazalt liflerin yüksek sıcaklığa karşı hacimsel stabilizesinin yüksek direnci olduğu sonucuna varmışlardır. Li (2011) bazalt liflerin termal direncini deneysel olarak araştırmıştır. Sonuçlar, direncin 350 °C'ye kadar sabit olduğu ve 500 °C'ye kadar küçük bir düşüş izlediğini göstermiştir. 700 °C'de bazalt liflerde kırıkların oluştuğunu, 800 °C'de ise neredeyse tüm bazalt liflerin kırıldığını gözlemlemiştir.

Yüksek sıcaklıklar karşısında yapılarda patlayıcı parçalanmalar meydana gelebilir. Patlayıcı parçalanma, bir yapının yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde azaltabilir ve beton yapılar tasarlarken dikkate alınmalıdır (Hertz ve Sorensen, 2005). Betonda polipropilen liflerin uygulanmasının parçalanma miktarını önemli ölçüde azaltabileceğini ortaya koyan birçok araştırma yapılmıştır (Atkinson, 2004, Aydın ve diğ, 2008). Polipropilen lifler, yaklaşık 170 °C'de erir ve betonda su buharının kaçmasını kolaylaştıran bir gözenek ağı oluşturur. Böylece gözenek basıncı azalır ve sonuç olarak betonda kavlanma, dökülme (spalling) olasılığı azalır (Talaei ve Mostofinejad, 2021).

Polipropilen liflerin eklenmesi, yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra bile betonun önemli miktarda artık eğilme dayanımını ve yarılma dayanımını artırabilir. Yüksek sıcaklıklarda betondan daha iyi performans elde etmek için karışım hacmine göre %0.1-0.5 polipropilen lifleri önerilmektedir. Ayrıca liflerin uzunluğu da betonun performansı üzerinde önemli bir rol

oynar. betonun dökülmesini önlemek için 10–20 mm uzunluğunda lifler kullanılabilir (Shill ve diğ., 2018). Bu çalışmada ise hacimce %0.2 oranında 19 mm uzunluklu polipropilen lif kullanılmıştır.

2.4.4 Çimento Türünün Etkisi

Yaygın olarak kullanılan iki çimento tipi olan Portland çimentosu veya düşük cüruf miktarına sahip Portland çimentosu ile yapılan betonlar üzerine yapılan erken çalışmalar, 400 °C'nin üzerinde neredeyse aynı artık basınç dayanımını göstermiştir. Çimento hamurunun özellikleri bileşenlerin karışım oranlarından etkilenir. Yüksek sıcaklıklardaki davranış, su/çimento oranı, CSH (kalsiyum-silikat-hidratlar), $Ca(OH)_2$ miktarı ve hidrasyon derecesi gibi parametrelere bağlıdır. Farklı çimento hamurları yangında farklı performans gösterebilir (Lublóy ve diğ., 2016).

Lublóy ve diğ. (2016) çimentoların öğütülmüş tanecikli yüksek fırın cürufu içeriğinin sertleştirilmiş çimento hamurunun ısıtma sonrası özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemeye çalışmışlarıdır. Çalışmada Portland çimentoları: CEM I 52,5 N, CEM I 42,5 N; Portland-cüruflu çimentolar: CEM II / A-S 42,5 N, CEM II / B-S 32,5 R; ve yüksek fırın çimentoları: CEM III / A 32,5 N, CEM III / B 32,5 N-S (çimento cüruf içeriği %0, 16, 25, 41 ve 66) karşılaştırılmıştır. Yüksek sıcaklık nedeniyle çimentoların cüruf içeriğinin artmasıyla yüzey çatlaklarının sayısının ve boyutunun yanı sıra basınç dayanımının azaldığını; en yoğun yüzey çatlaması cüruf eklenmeden Portland çimentosu kullanılarak gözlenmiştir. Çimentonun cüruf içeriği arttıkça ısıtma sonrası kalan basınç dayanımını artmıştır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 MALZEME

Air Force Civil Engineering Centre (AFCEC) of the Deparment of Air Force, USA tarafından bildirilen Engineering Technical Letter 14-4 (ELT) (2014), dikey iniş alanları ve havaalanı kaplamalarında 482 °C'yi aşan sıcaklıklara dayanıklı beton üretiminde bir kılavuz niteliğindedir. Bu kılavuzda yüksek sıcaklığa dayanıklı havaalanı kaplamaları için hafif agregalı ve volkanik kökenli agregalı iki farklı karışım önerilmiştir. Bu çalışmada ise ilgili kılavuz dikkate alınarak hafif agrega olarak genleştirilmiş cam küre agregası ve volkanik kökenli olarak bazalt agregası kullanılarak iki farklı karışım hazırlanmıştır. Ayrıca kılavuzda önerildiği üzere karışımlarda uçucu kül, lif katkısı olarak polipropilen lif, kimyasal katkı olarak ise süper akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı kullanılmıştır. Kılavuzda özel bir çimento türü önerilmemiştir ve bu çalışmada CEM I 42.5 R çimento seçilmiştir. Ek olarak genleştirilmiş cam agregalı betonda segregasyonu önlemek amacıyla stabilizer katkı kullanılmıştır.

3.1.1 Çimento

Bu çalışmada, Akçansa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.'nin TS EN 197-1:2012 standardına uygun ürettiği CEM I 42.5 R çimento kullanılmıştır. Çimento ile ilgili analizler fabrika tarafından yapılmış olup analiz sonuçları Tablo 3.1'de görülmektedir.

Tablo 3.1: Çimento özellikleri.

Kimyasal Analiz	**Analiz Sonuçları**
SiO_2 (%)	20,47
Fe_2O_3 (%)	3,46
Al_2O_3 (%)	5,18
CaO (%)	63,32
MgO (%)	2,16
Çözünmez Kalıntı (%)	0,26
SO_3 (%)	2,85
Kızdırma Kaybı (%)	2,24
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	3,11
Özgül Yüzey – Blaine (cm^2/g)	4010

3.1.2 Uçucu Kül

Çatalağzı Termik Santralinden (ÇATES) temin edilen uçucu külün özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir (Şekil 3.1). Uçucu kül, her iki karışım hesabında da bağlayıcı miktarının ağırlıkça %15'i kadar uçucu kül kullanılmıştır.



Şekil 3.1: Uçucu kül.

Tablo 3.2: Kullanılan uçucu külün özellikleri.

Özellik	**Uçucu Kül**
SiO_2 (%)	58.75
Al_2O_3 (%)	25.24
Fe_2O_3 (%)	5.76
S+A+F (%)	89.75
CaO (%)	1.46
MgO (%)	2.22
SO_3 (%)	0.08
K_2O (%)	4.05
Na_2O (%)	0.60
KK (%)	1.12
Cl^- (%)	0.015
Serbest CaO (%)	0.13
Yoğunluk (g/cm^3)	2.24
Özgül Yüzey (g/cm^2)	3175

3.1.3 Genleştirilmiş Cam Agrega

Genleştirilmiş cam agrega, geri dönüşümle kazanılan hurda camın yüksek ısı altında özel kimyasallarla birleştirilerek, düzgün dış çeperli küçük hücresel bir yapıya dönüştürülmesi sonucu elde edilen bir malzemedir (Şekil 3.2). Atık camın geri dönüştürülmesiyle üretildiği için çevre dostu bir üründür. Boşluklu yapısı ve düşük yoğunluğu sayesinde hafif beton üretimi için ideal bir malzemedir. Alev direncine, A1 sınıfı yanmazlık özelliğine ve 0,059-0,08 w/mk düşük ısı iletim katsayısı ile termal izolasyon özelliğine sahiptir (Kutluğ, T., 2014).



Şekil 3.2: Farklı çap uzunluklarına sahip genleştirilmiş cam agregaları (https://stikloporas.com/expanded-glass).

Omnis Kompozit Ltd. Şti. firmasından temin edilen genleştirilmiş cam agregasına ait teknik özellikler Tablo 3.3'te verilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3: Sırasıyla 4-8 mm ve 2-4 mm boyutlu genleştirilmiş cam agrega.

Tablo 3.3: Genleştirilmiş cam agregaya ait teknik özellikler.

Özellikler	**Genleştirilmiş cam agrega boyutu**	
	2-4 mm	4-8 mm
Yoğunluk (kg/m^3)	200	190
Basınç Dayanımı (MPa)	1,4	1,2
Isıl İletenlik (W/mK)	0,0639	0,0661
Su Emilimi (% kütle)	23	20
Donma Erime Direnci (% kütle)	3'den fazla değil	
pH Değeri	9-11	
Yumuşama Noktası	Yaklaşık 700 ^{o}C	
Renk	Beyaz-Krem	

3.1.4 Bazalt

Bu çalışmada kullanılan bazalt agrega Trakya Bölgesinden temin edilmiştir (Şekil 3.4). Agrega ağırlığının %40'ı 4-8 mm, %40'ı 2-4 mm ve kalan %20'si ise 0-2 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 3.4: Sırasıyla 4-8 mm, 2-4 mm ve 0-2 mm boyutlu bazalt agrega.

3.1.5 Polipropilen Lif

Atlas1 Yapı ve Müh. A.Ş. firmasından temin edilen polipropilen liflere ait teknik özellikler Tablo 3.4'te verilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5: Polipropilen lif.

Tablo 3.4: Polipropilen lif teknik özellikleri.

Yoğunluk (g/cm^3)	0,91
Uzunluk	19 mm
Kesit ve Çap	20 µm
Çekme Mukavemeti (N/mm^2)	450-700
Elastisite Modülü (N/mm^2)	3000-3500
Erime Noktası	162 ^oC
Yanma Noktası	593 ^oC
Aşınma Dayanımı	Yüksek

3.1.6 Karışım Suyu

Beton karışım suyu olarak içilebilir su niteliğindeki İstanbul'un şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.7. Süper Akışkanlaştırıcı Katkı

Numunelerde akışkanlaştırıcı olarak BASF firmasına ait MasterGlenium ACE 450 adlı yüksek oranda su azaltıcı, süper akışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır (Şekil 3.6). Toplam bağlayıcı miktarının %1'i akışkanlaştırıcı miktarı olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.6: Süper akışkanlaştırıcı katkı.

3.1.8 Hava Sürükleyici Katkı

Hava sürükleyici katkı, betonda küçük ve yakın aralıkta hava kabarcıkları oluşturarak betona donma-çözünmeden kaynaklanan hasarların azalması, ayrışma ve kusmanın azalması, işlenebilirliğin artması gibi ekstra katkılar sağlar. Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonlarda; uçucu kül içeren betonlarda; düşük çökme değerine sahip betonlarda hava sürükleme yeteneğini geliştirir. Bu tez kapsamında Master Builders Solutions-MasterAir 200 kullanılmıştır (Şekil 3.7). Ağırlıkça toplam bağlayıcı miktarının %0.06'sı kadar hava sürükleyici katkı kullanılmıştır.



Şekil 3.7: Hava sürükleyici katkı.

3.1.9 Stabilizer Katkı

Bu çalışmada Sika firmasına ait Stabilizer (viskozite düzenleyici beton ve harç katkısı) kullanılmıştır (Şekil 3.8). Stabilizer katkı taze betonda yerleştirme kusurlarını ve ayrışmayı

azaltarak, homojen karışım ve daha düzgün yüzey sağlamaktadır. Genleştirilmiş cam agregalı karışım betonunda ağırlıkça bağlayıcı miktarının %0.1'i kadar kullanılmıştır.



Şekil 3.8: Stabilizer katkı.

3.2 BETON KARIŞIM HESAPLARI VE NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

Bu tezde, volkanik kökenli agregalı ve hafif agregalı iki farklı beton tasarlanmıştır. Volkanik kökenli agrega olarak bazalt agregası, hafif agrega olarak ise genleştirilmiş cam agrega seçilmiştir. Her iki karışımda da su/bağlayıcı oranı 0,45 olarak belirlenmiştir. Karışım oranlarını belirlemek amacıyla çok sayıda ön deneme yapılmıştır ve Tablo 3.5'te verilen oranlar seçilmiştir.

Tablo 3.5: Beton karışım oranları.

	Genleştirilmiş Cam Agregalı Karışım	Bazalt Agregalı Karışım
Çimento (kg/m^3)	394,621	391,455
Uçucu Kül (kg/m^3)	69,639	69,080
İri Agrega (4-8 mm)	66,238	640,941
İnce Agrega (2-4 mm)	46,180	640,941
İnce Agrega (0-2 mm)	-	320,470
Su (kg/m^3)	208,917	207,241
Polipropilen Lif (Hacimce %)	0,2	0,2
Hava Sürükleyici Katkı (g)	0,279	0,276
Süper Akışkanlaştırıcı Katkı (g)	4,480	5,867
Stabilizer Katkı (g)	0,464	-

Beton üretim aşamaları aşağıdaki gibidir.

- Öncelikle çimento, uçucu kül ve agrega beton mikserinde yaklaşık 2 dakika karıştırılmıştır.
- Daha sonra su suyun %50-60'ı eklenip karıştırıldıktan sonra kalan suyla birlikte beton katkı maddeleri (süper akışkanlaştırıcı, hava sürükleyici katkı ve genleştirilmiş cam agregalı karışım için stabilizer katkı) eklenerek 3 dakika karıştırılmıştır.
- Ardından polipropilen lifler mikser karıştırmaya devam ederken yavaş yavaş eklenerek 3 dakika daha karıştırılmıştır.
- Taze beton önceden yağlanmış kalıplara yerleştirilmiştir. Küp kalıplara 2, silindir kalıplara 3 aşamada yerleştirilmiş olup her aşamada 25 kez şişlenmiştir. Prizma kalıplar ise sarsma cihazında sıkıştırılmıştır. Numune üretim aşamaları Şekil 3.9'daki gibidir.

Bu çalışmada her iki karışım için ayrı ayrı,

- 7. ve 28. günlük basınç dayanımı deneyleri için üçer adet normal, üçer adet ısıl işlem uygulanacak toplam 12 adet 100 mm'lik küp numune,
- 7. ve 28. günlük eğilmede çekme dayanımı deneyleri için üçer adet normal, üçer adet ısıl işlem görecek toplam 12 adet 40x40x160 mm'lik prizma numuneler,
- Elastisite modülü tayini için ϕ100/200 mm'lik 3 adet silindir numune üretilmiştir.

Bu çalışma kapsamında toplam 54 adet numune üretilmiştir.

Üretilen numuneler 24 saat sonunda kalıplardan çıkarılmış ve 7. ve 28. gün yaşlarına kadar 21 °C'lik kür havuzunda bekletilmiştir.



Şekil 3.9: Numunelerin hazırlanması.

3.3 NUMUNELERE SICAKLIK ETKİSİ UYGULAMASI

F35-B savaş uçağının düşey iniş ve kalkış hareketi, kalkış pisti kaplamalarına yüksek derecede sıcaklık uyguladığı 2. bölümde bahsedilmişti. 930 °C'lere varan bu sıcaklık beton kaplamasında 85 °C s^{-1} ısı artış hızı ile tek yönde ve piste dik olacak şekilde etki etmektedir. Numunelerin, etüv veya fırınlarda bu sıcaklığa erişmesi uzun süreceği ve numunelerin tüm yüzeylerinde aynı sıcaklık etkisine maruz bırakacağı için bu yöntem tercih edilmemiştir. Oksijen kaynak seti ile benzer sıcaklık etkisinin verilebileceği varsayılmıştır. Oksijen kaynak seti, oksijen tüpü, mutfak tüpü ve kaynak şalomasından oluşmaktadır. Bu ısı kaynağı ile yaklaşık 1000 °C sıcaklık 80 saniye süre boyunca numunelerin üst yüzeyine yaklaşık 20 cm mesafede dik uygulanmıştır. Sıcaklık ölçümü ise UNI-T UT321 termometre ve ISISO WRNM-102A K tipi sıcaklık ölçer prob ile yapılmıştır. Kullanılan cihazlar ve numunelere sıcaklık uygulanışı Şekil 3.10'da görülmektedir. Ayrıca Bosch GTC 400 profesyonel termal kamera ile de ölçüm yapılmıştır. Mevcut termal kameranın ölçebildiği maksimum sıcaklık 400 °C'dir. Şekil 3.11'de görüldüğü gibi sıcaklık 400 °C'nin üstündedir.



Şekil 3.10: Numunelere sıcaklık etkisi uygulaması.



Şekil 3.11: Termal kamera ile sıcaklık ölçümü.

3.4 NUMUNELERE UYGULANAN DENEYLER

3.4.1 Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç Dayanımı Deneyi TS EN 12390-3 standardına uygun olarak İstanbul Aydın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarları'nda gerçekleştirilmiştir. 100x100x100 mm boyutlu numunelere 3000 kN kapasiteli pres makinası ile ve 0.5 MPa/s yükleme hızı ile basınç uygulanmıştır. Numune tipi, numune yaşı, ağırlığı, numune boyutları ve yükleme hızı gibi bilgiler girilen cihazdan basınç dayanımı sonuçları otomatik olarak elde edilmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12: Basınç dayanımı test presi.

3.4.2 Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi

Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi TS EN 196-1 standardına uygun 40x40x160 mm boyutlu numunelere 20 kN kapasiteli Utest marka cihaz ile 0.469 MPa/s yükleme hızıyla uygulanmıştır (Şekil 3.13). Numune boyutları daha önceden girilmiş olan cihazdan eğilme dayanımı sonuçları otomatik elde edilmiştir.



Şekil 3.13: Eğilmede çekme dayanımı deneyi.

3.4.3 Ultrases Hızı ve Dinamik Elastisite Modülü

Küp numuneler basınç deneyine tabii tutulmadan önce tahribatsız test yöntemi olan ultrasonik ses ölçümü yapılmıştır. Bu test sonucunda hem betonun kalitesi ve betondaki çatlak ve boşluk

durumu hakkında yorum yapılabilir hem de dinamik elastisite modülü elde edilebilir. Test, Proceq marka Pundit Lab+ cihazı ile yapılmıştır. Cihazın alıcı ve verici sensör yüzeylerine boşluksuz temas etmesi amacıyla Şekil 3.14'te görülen jel sürülmüştür. Numune boyutu (m) önceden girilen cihazdan ultrases hızı V (m/s) otomatik elde edilmiştir. Bu hız değerine göre beton kalitesinin değerlendirilmesi Tablo 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.14: Ultrases hızı testi.

Tablo 3.6: Betonun ultrases geçiş hızına göre sınıflandırılması (International Atomic Energy Agency, 2002).

Ultrases Hızı (km/s)	Beton Kalitesi
4,5>	Mükemmel
3,5-4,5	İyi
3-3,5	Orta
<3.0	Şüpheli

Dinamik elastisite modülü ise aşağıdaki Denklem 3.1 bağıntısıyla hesaplanabilir (Baradan ve diğ., 2015). Ed dinamik elastisite modülü (Pa); V ultrases hızı (m/s); □ yoğunluk (kg/m^3); □ poisson oranıdır. Bağıntıda □=0,2 olarak alınmıştır.

$$Ed = \frac{V^2 * \rho * (1+\upsilon) * (1-2\upsilon)}{(1-\upsilon)} \quad (3.1)$$

3.3.4 Elastisite Modülü Tayini

Şekil 3.15'te görüldüğü üzere kompressometreye konulan 28 günlük 100/200 mm boyutlu silindir numunelere ASTM C/469 standardı kapsamında basınç uygulanmıştır. Yük uygulandığı esnada oluşan şekil değiştirmeler kompressometre üzerinde bulunan deplasman sensörü ile eksenel ve yanal deplasman olarak ölçülmüştür ve gerilme-birim deformasyon grafikleri elde edilmiştir. Elastisite modülü (E), sekant modülü ile elde edilmiştir. Sekant modülü gerilme-birim deformasyon grafiğinde, dayanımın (f_c) %40'ına gelen noktasını, koordinat merkezi ile birleştiren doğrunun eğimidir.



Şekil 3.15: Elastisite modülü deneyi.

Her iki karışım için de deneyler ısı verilmeden (normal), ısının yandan uygulandığı ve ısının üstten uygulandığı üç numune ile yapılmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16: Elastisite modülü deneyi uygulanan numuneler.

TS500'e göre normal ağırlıktaki betonlar için betonun elastisite modülü Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanabilir. Bu denklemde E betonun elastisite modülü, f_{ck} betonun karakteristik silindir basınç dayanımıdır.

$$E = 3250\sqrt{f_{ck}} + 14000\ (MPa) \tag{3.2}$$

Hafif agregalı betonun elastisite modülü dayanımı ACI-318'de verilen yoğunluğa bağlı Denklem 3.3 ile hesaplanabilir. Burada ρ yoğunluk (kg/m^3), E elastisite modülü (MPa) ve f_c basınç dayanımı (MPa)'dır.

$$E = 43 \times 10^{-3} \times \rho^{1,5}\sqrt{\square\square} \tag{3.3}$$

3.4.5 Ağırlık Kaybı

Yüksek sıcaklık sonucunda numunelerde oluşan ağrılık kaybı, numunelere ısı uygulamadan önce ve sonra tartılarak Denklem 3.4 yardımıyla belirlenmiştir.

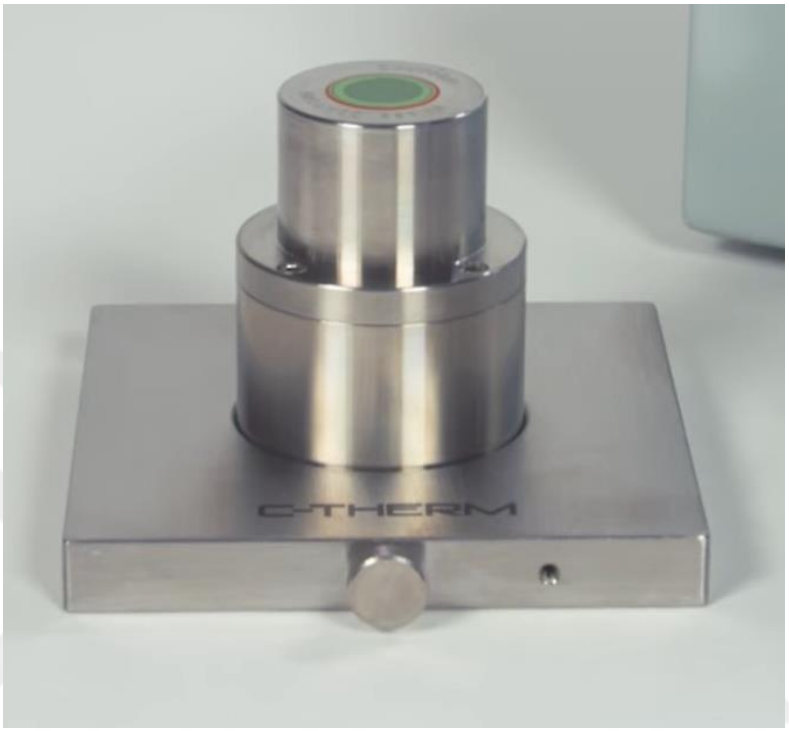
$$w_k = \frac{w_i - w_s}{w_i} x100 \tag{3.4}$$

Bu denklemde, w_k: ağırlık kaybı (%), w_i: ısıl işlem öncesi numune ağırlığı (g), w_s: ısıl işlem sonrası numune ağırlığını (g) ifade etmektedir.

3.4.6 Termal İletkenlik Katsayısı Tayini

Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezinde C-Therm marka cihaz ile termal iletkenlik katsayısı (k) belirlenmiştir (Şekil 3.7). Numunenin

yüzeyi zımpara ile pürüzsüz hale getirilmesi gerekmektedir. Cihazın 18 mm çaplı hassas sensörünün üzerine konulan numuneden ilgili değer W/mK cinsinden elde edilmektedir. Eğilme deneyine tabi tutulan numuneler üzerinde bu deney gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.17: Termal iletkenlik ölçüm cihazı.

3.4.7 Mikro-Yapısal İnceleme (SEM-EDS Analizleri)

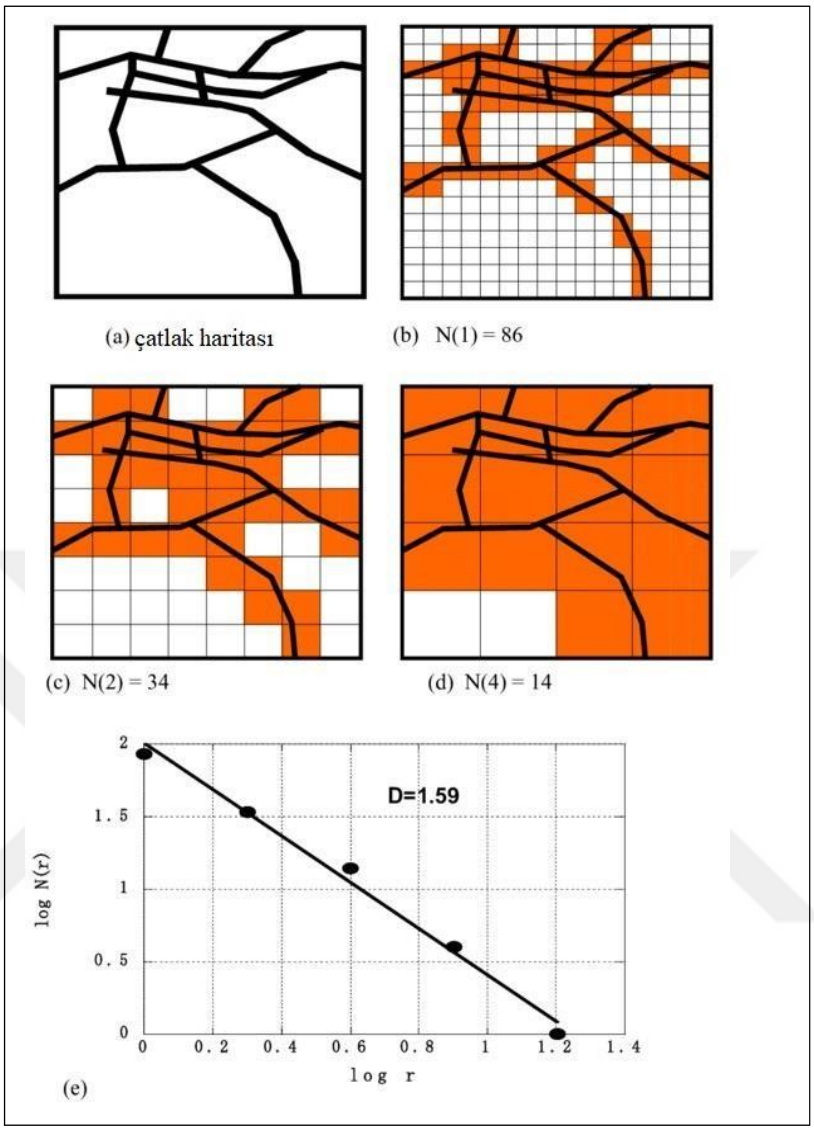
Mekanik deneyler sonrası seçilen numuneler üzerinde matris ve lif-matris arayüz özellikleri elektron mikroskobu (SEM-EDX) kullanılarak Kastamonu Üniversitesi Merkezi Uygulama Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aracılığı ile mikro-yapı ile makro düzeyde elde edilen deneysel veriler için sebep-sonuç ilişkileri kurulacaktır. Son yıllarda SEM-EDS tekniği bu konuda tercih edilen en iyi yöntemlerden birisidir. SEM'de görüntü yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerden geçirildikten sonra bir katot ışını tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir.

3.4.8 Fraktal Analizi ile Çatlak Karakterizasyonu

İlk olarak Benoit Mandelbrot (1982) tarafından "The Fractal of Nature" kitabında bahsedilen fraktal geometri kavramı Öklid geometrisiyle tanımlanamayan düzensiz nesneleri nicel olarak tanımlamak için kullanılmaktadır. Fraktal boyut ise fraktal geometrinin önemli bir parametresidir ve 1 ile 2 değerleri arasındadır. (Issa ve diğ., 2003)

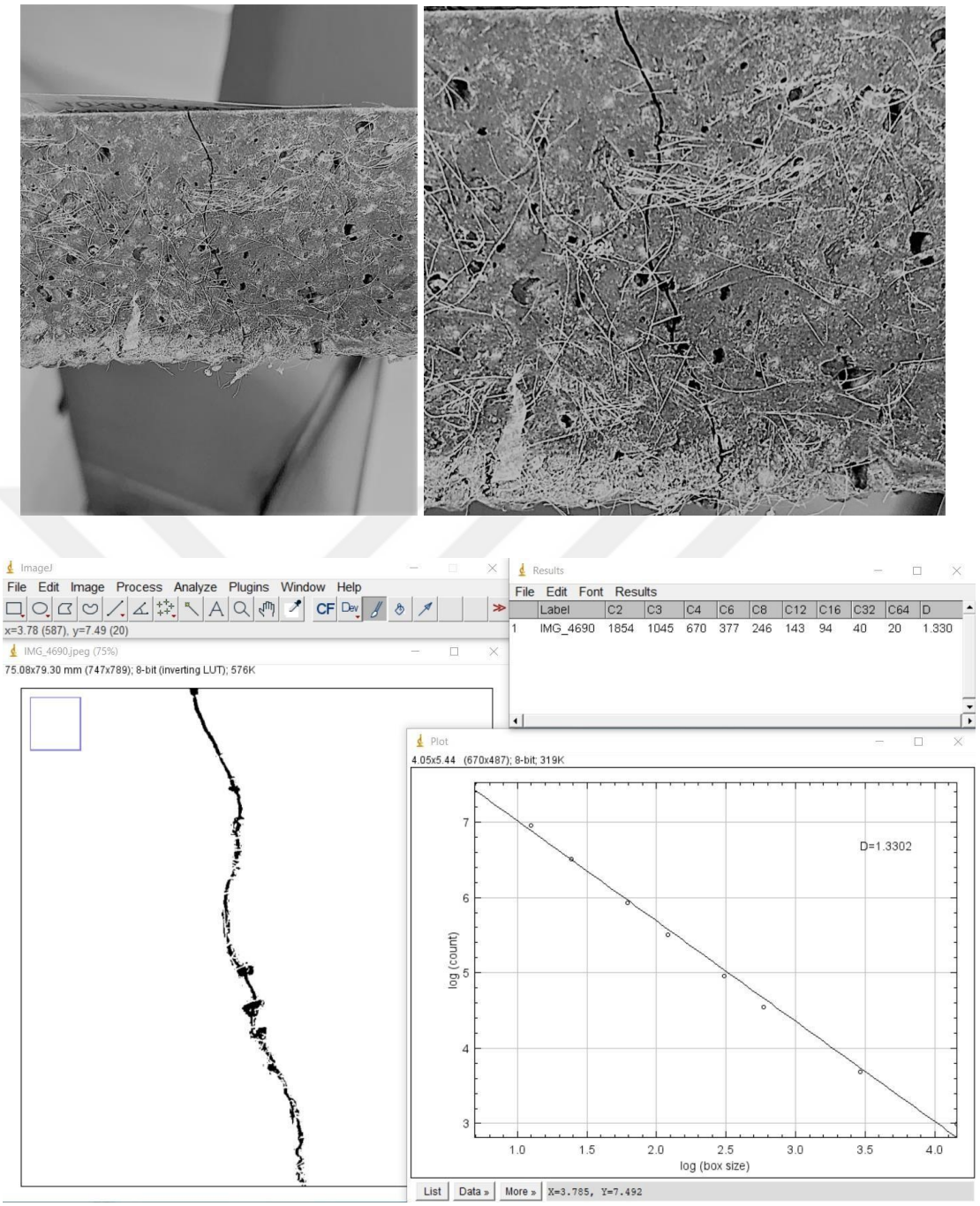
Fraktal boyut hesaplanırken en sık kullanılan yöntemlerden biri de Box Counting (kutu sayma) yöntemidir. Bu yöntemde ilk olarak çatlak haritası oluşturulur. Ardından görüntü belirli bir boyuttaki kutulara (r) bölünür ve çatlakları kapsayan kutuların sayısı (N(r)) sayılır. Aynı işlem birkaç farklı kutu boyutu ile tekrarlanır. Sonrasında log (N(r)) ve log (r)'nin grafiği oluşturulur. Fraktal boyut D, bu grafiğin eğimi ile bulunur (Şekil 3.18) (Mihashi ve diğ., 2006).

Beton malzemelerin aldıkları hasara bağlı olarak oluşan ana çatlaklar dolambaçlı bir yol izleme eğilimindedir. Bu eğilim mikro çatlamalar, çatlak köprüleme ve agrega kenetlenmesi gibi kırılma işlemi sırasında enerjiyi emen birçok özel mekanizmadan kaynaklanır. Fraktal analizi, betondaki ana çatlakların fraktal boyutunun elde edilmesi ile betonun kırılma enerjisi gibi birçok konu hakkında fikir verebilir (Issa ve diğ., 2003, Erdem ve Blankson, 2013).

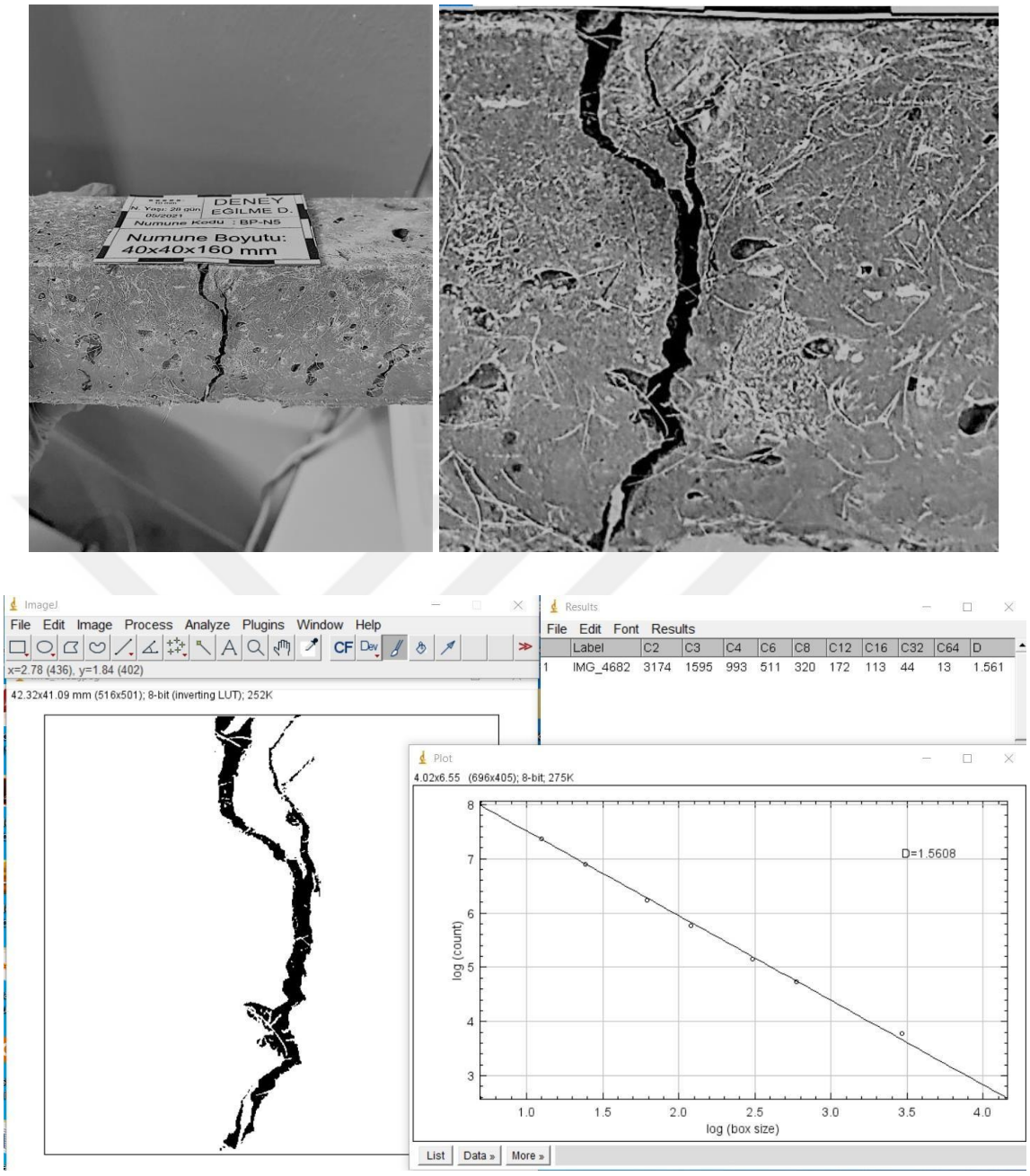


Şekil 3.18: Kutu yöntemi ile fraktal boyutun hesaplanması (Mihashi ve diğ., 2006).

Eğilmede çekme deneyi uygulanan prizma numunelerin fraktal boyutunu bulmak için Box Counting yöntemiyle analiz yapan Image J görüntü işleme programı kullanılmıştır. Öncelikle program yardımıyla çatlak haritaları çıkarılmıştır. Sonrasında çatlakların fraktal boyutu otomatik hesaplanmış ve üç boyutlu yüzey grafikleri elde edilmiştir. Bu analiz ile ilgili daha fazla detay Gürbüz (2018) tarafından yapılan bir tez çalışmasında detaylı olarak anlatılmıştır. Genleştirilmiş cam agregalı ve bazalt agregalı karışım için fraktal analizi adımları Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 3.19: Genleştirilmiş cam agregalı karışım için fraktal analizi adımları.



Şekil 3.20: Bazalt agregalı karışım için fraktal analizi adımları.

4. BULGULAR

4.1 ULTRASES HIZI VE DİNAMİK ELASTİSİTE MODÜLÜ SONUÇLARI

Ultrases hızı (V) ölçüm sonuçları Tablo 4.1'de verilmiştir. Ultrases hızı ile hesaplanan Dinamik Elastisite Modülü (E_d) sonuçları da Tablo 4.2'de görülmektedir. Genleştirilmiş cam agrega karışım, agreganın boşluklu olması nedeniyle ultrases hızı ve elastisite modülü değerleri bazalt agregalı karışıma kıyasla daha düşüktür. Her iki karışımda da ısı sonrası numunelerde ultrases hızı ve dinamik elastisite modülü azalmıştır. Sonuçlar incelediğinde ısı görmüş 7 günlük numunelerde dinamik elastik modülünde düşüş bazalt agregalı karışım için %14 iken bu düşüş hafif agregalı karışım için %11,4'tür. Buna karşın zamanla hidratasyon hızındaki artışa bağlı olarak mikro-yapının daha yoğun hale gelmesiyle (Tablo 4.1'de ultrases hızından da görülebileceği üzere) her iki karışım için dinamik elastisite modülündeki düşüş daha azalmış ve yaklaşık olarak %8,5 oranında olduğu görülmüştür. Bunun nedeni yüksek ısıyla birlikte numunelerde çatlak ve boşluk gibi kusurların artması ve buna bağlı ultrasonik ses dalgalarının cihazın alıcı ve verici sensörleri arasında daha yavaş iletilmesidir. Zaman uzadıkça ultrases hızı düşer, buna bağlı olarak E_d değeri de azalır.

Tablo 4.1: Ultrases hızı ölçüm sonuçları.

Numuneler	**7. Gün**		**28. Gün**	
	Isı Öncesi V (km/s)	Isı Sonrası V (km/s)	Isı Öncesi V (km/s)	Isı Sonrası V (km/s)
Bazalt Agregalı Karışım	4.680	4.348	4.786	4.592
Cam Agregalı Karışım	3.196	3.009	3.230	3.122

Tablo 4.2: Dinamik Elastisite Modülü sonuçları.

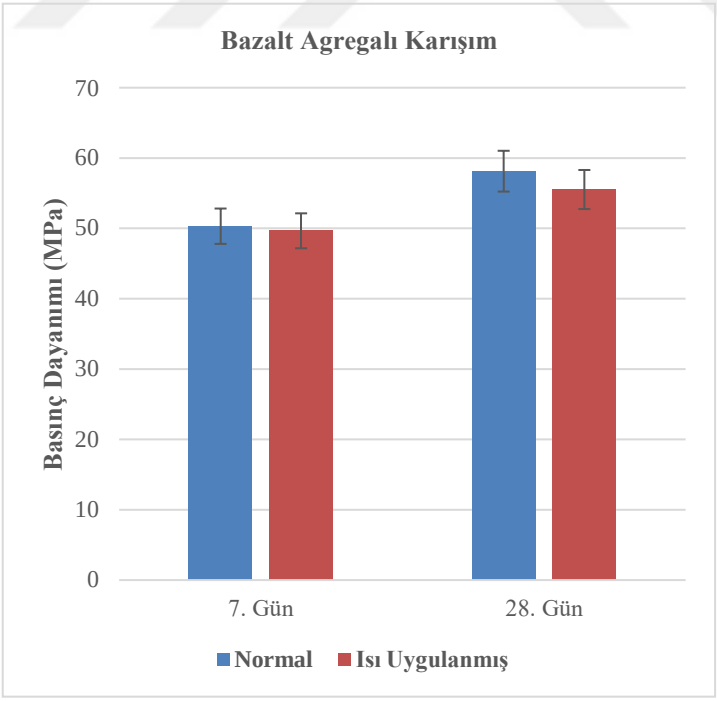
Numuneler	**7. Gün**		**28. Gün**	
	Isı Öncesi Ed (GPa)	Isı Sonrası Ed (GPa)	Isı Öncesi Ed (GPa)	Isı Sonrası Ed (GPa)
Bazalt Agregalı Karışım	48.320	41.603	50.618	46.347
Cam Agregalı Karışım	11.026	9.770	11.349	10.408

4.2 BASINÇ DAYANIMI SONUÇLARI

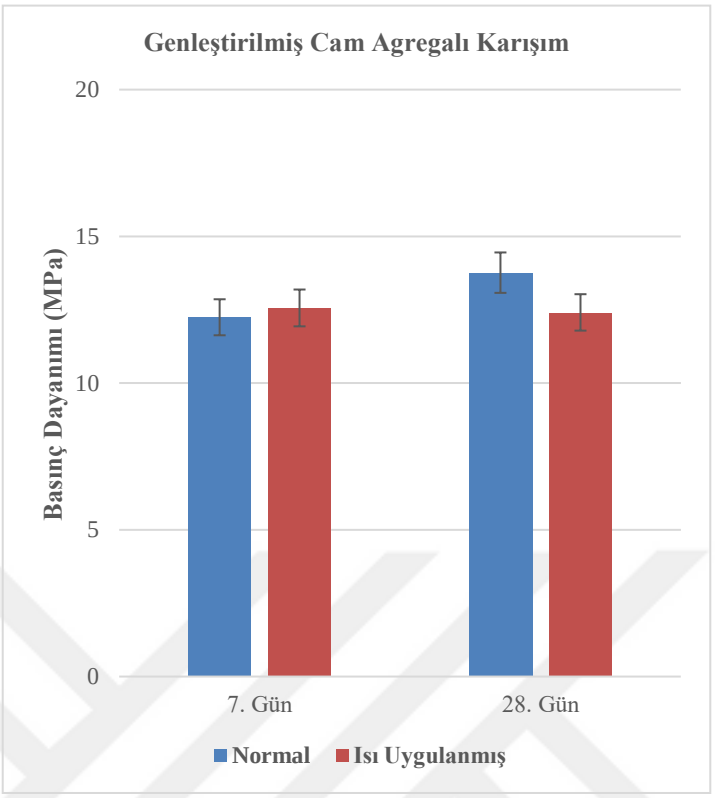
Bazalt agregalı karışımın ve genleştirilmiş cam agregalı karışımların basınç dayanımı deneyi sonuçları sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir. 28 günlük sonuçlar incelendiğinde bazalt agregalı karışımda %4, genleştirilmiş cam agregalı karışımda %9 dayanım kaybı

görülmüştür. Basınç dayanımında ciddi kayıplar gözlenmemiştir. Sıcaklık uygulaması tek yüzeye dik, kısa süreli yüksek ısıya maruz bırakma şekilde olduğu ve Şekil 4.3'te verilen numune kesitindeki renk değişikliği dikkate alındığında numunelerin yüzeyinden birkaç cm derinliğinde önemli sıcaklık etkileri meydana gelmiştir. Bu durum sebebiyle malzemenin basınç dayanımı ciddi şekilde etkilenmemiş olabilir. Buna ek olarak, bu karışımda kullanılan bazalt agregaların petrografik açıdan volkanik kökenli ve yüksek mukavemetli bazalt kayacından elde edilmesinin de kısa süreli çok yüksek ısı şoku altında stabilitesini korumasını ve beton dayanımındaki olası düşüşleri de minimize ettiği söylenebilir. Genleştirilmiş cam agregalı karışımda 7. gün basınç dayanımı değerlerinde ısı uygulanmış numunelerin normal numunelere göre %2 oranında yüksek olduğu görülmektedir. Bu değer normal numunelerin, üretim aşamasından kaynaklanan kusurlardan kaynaklandığı düşünülebilir ve göz ardı edilebilir.

ASTM C330/C330M-09'a göre hafif agregalı bir betonun taşıyıcı niteliğinde olması için 28 günlük basınç dayanımı minimum 17 MPa olmalıdır. Genleştirilmiş cam agregalı karışım bu şartı sağlayamamıştır.



Şekil 4.1: Bazalt agregalı karışımın basınç dayanımı deneyi sonuçları.



Şekil 4.2: Genleştirilmiş cam agregalı karışımın basınç dayanımı deneyi sonuçları.



Şekil 4.3: Isı uygulama sonucunda numune kesitinde meydana gelen renk değişiklikleri.

4.3 EĞİLMEDE ÇEKME DAYANIMI SONUÇLARI

7. ve 28. günlük prizma numunelerin eğilmede çekme dayanımı sonuçları Tablo 4.3'de görülmektedir. Genleştirilmiş cam agregalı numunelerde yüksek sıcaklık etkisi ile 7. günde %36,7 ve 28. günde %38,7 dayanım kaybı görülmektedir. Bazalt agregalı numunelerde ise 7. ve 28. günlerde sırasıyla %46,1 ve %38,7 kayıp görülmektedir.

Tablo 4.3: Eğilmede çekme dayanımı deneyi sonuçları.

Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi				
	Genleştirilmiş Cam Agregalı Karışım		Bazalt Agregalı Karışım	
	Normal (MPa)	Isı Uygulanmış (MPa)	Normal (MPa)	Isı Uygulanmış (MPa)
7. Gün	3.299	2.112	8.338	4.495
28. Gün	3.591	2.201	9.379	5.747

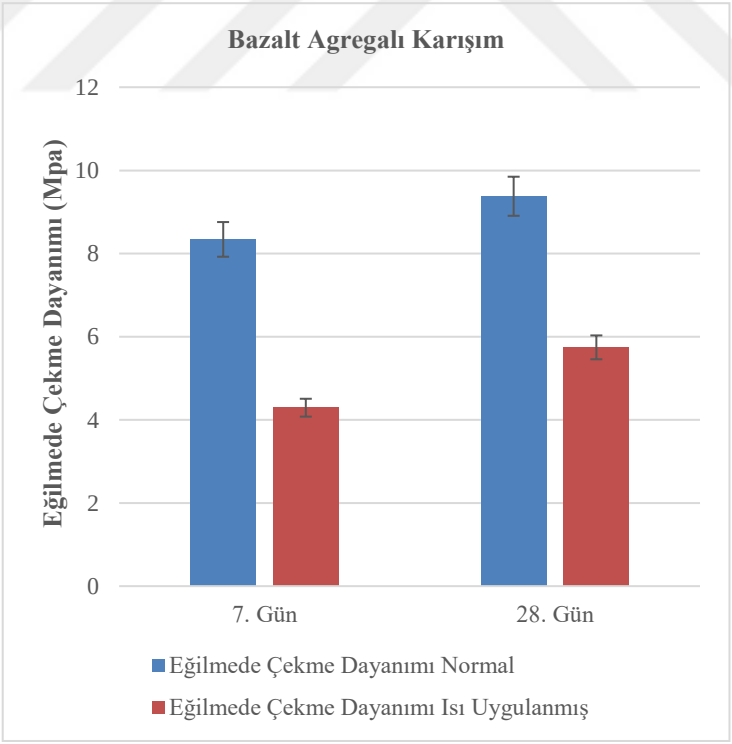
Yapılan birçok çalışmada yüksek sıcaklıkların eğilme dayanımına etkisi basınç dayanımına göre çok daha şiddetli olduğu görülmüştür. Bunun nedeni numunelerde yüksek sıcaklıklarda oluşan mikro çatlakların çekme gerilmeleriyle ile birlikte genişlemesine neden olarak eğilme dayanımını azalttığı düşünülmektedir. (Cülfik ve Özturan, 2002, Li ve diğ., 2004, Aydın ve Baradan, 2007). Ek olarak polipropilen liflerin eğilme dayanımı üzerinde iyileştirici etkisi büyüktür. 170 °C sıcaklıkta eriyen polipropilen lifler beton içerisinde gözenek ağı oluşturup boşluk basıncını ve betonda dökülme (spalling) riskini azaltır. (Talaei ve Mostofinejad, 2021). Buna karşılık liflerin erimesiyle eğilme dayanımının azalmasına neden olabileceği düşünülmektedir.

Bazalt agregalı numunelerin kırılma yüzeyleri Şekil 4.4'te ve eğilmede çekme deneyi sonuçlarının grafiksel gösterimi Şekil 4.5'te verilmiştir. Yapılan görsel incelemede kırılmanın ağırlıklı olarak agrega-matris yüzeyi ve matris içerisinden devam eden çatlaklar neticesinde gerçekleştiği görülmektedir. Bazalt agregasının çevresindeki ara yüzeye göre daha yüksek dayanıma sahip olması çatlakların agrega yerine bu ara yüzeyler etrafından devam etmesini sağlamıştır. Böylece eğilme yüklemesi altında göçme öncesinde büyük şekil değiştirmelerin

yapılması mümkün olmuştur. Kırılma yüzeyinin pürüzlü yapısı da bu öngörüyü destekler niteliktedir.



Şekil 4.4: Bazalt agregalı numunelerin eğilmede çekme deneyi sonucunda kırılma yüzeyi.

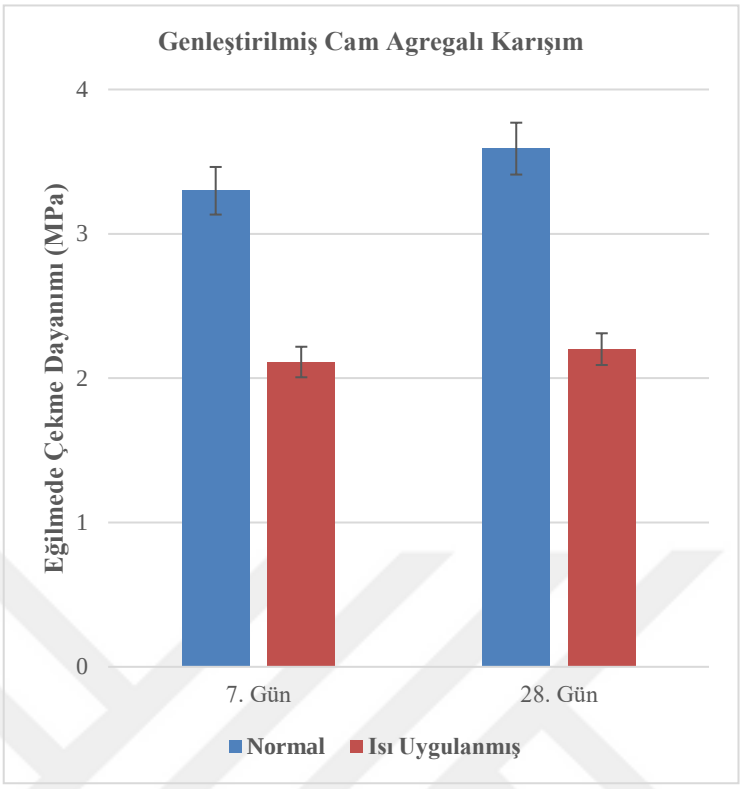


Şekil 4.5: Bazalt agregalı karışımın eğilmede çekme dayanımı deneyi sonuçları.

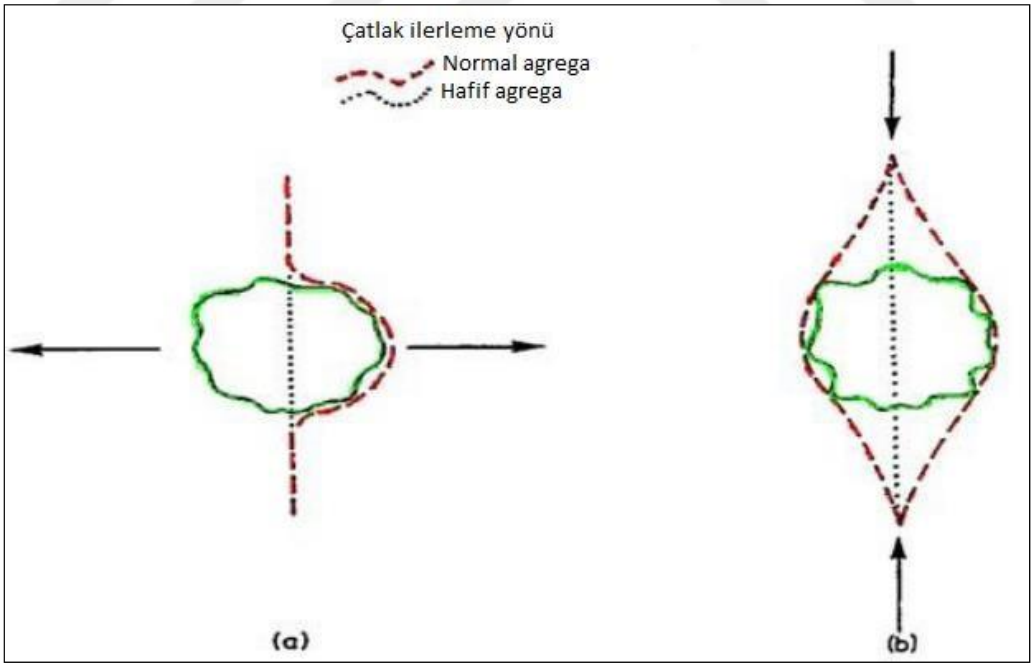
Genleştirilmiş cam agregalı numunelerin kırılma yüzeyleri Şekil 4.6'da ve eğilmede çekme deneyi sonuçlarının grafiksel gösterimi Şekil 4.7'de verilmiştir. Kırılmanın agregada gerçekleştiği görülmektedir. Bunun sebebi kullanılan genleştirilmiş cam agreganın Tablo 3.3'de de verildiği üzere basınç dayanımının 1-2 MPa arasında olmasıdır. Bu sebeple çatlaklar göçme öncesi çok daha kısa bir yol izleyerek hızla diğer çekme çatlaklarıyla birleşerek karışımın çekme kapasitesinin hızla aşılmasına neden olmuştur. Normal ve hafif agregalara kırılma süreci şekil 4.8'de sistematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Genleştirilmiş cam agregalı numunelerin eğilmede çekme deneyi sonucunda kırılma yüzeyi.



Şekil 4.7: Genleştirilmiş cam agregalı karışımın eğilmede çekme dayanımı deneyi sonuçları.



Şekil 4.8: Normal ve hafif agregalı betonların kırılma sırasında çatlak ilerleme yönü.

4.4 AĞIRLIK KAYBI SONUÇLARI

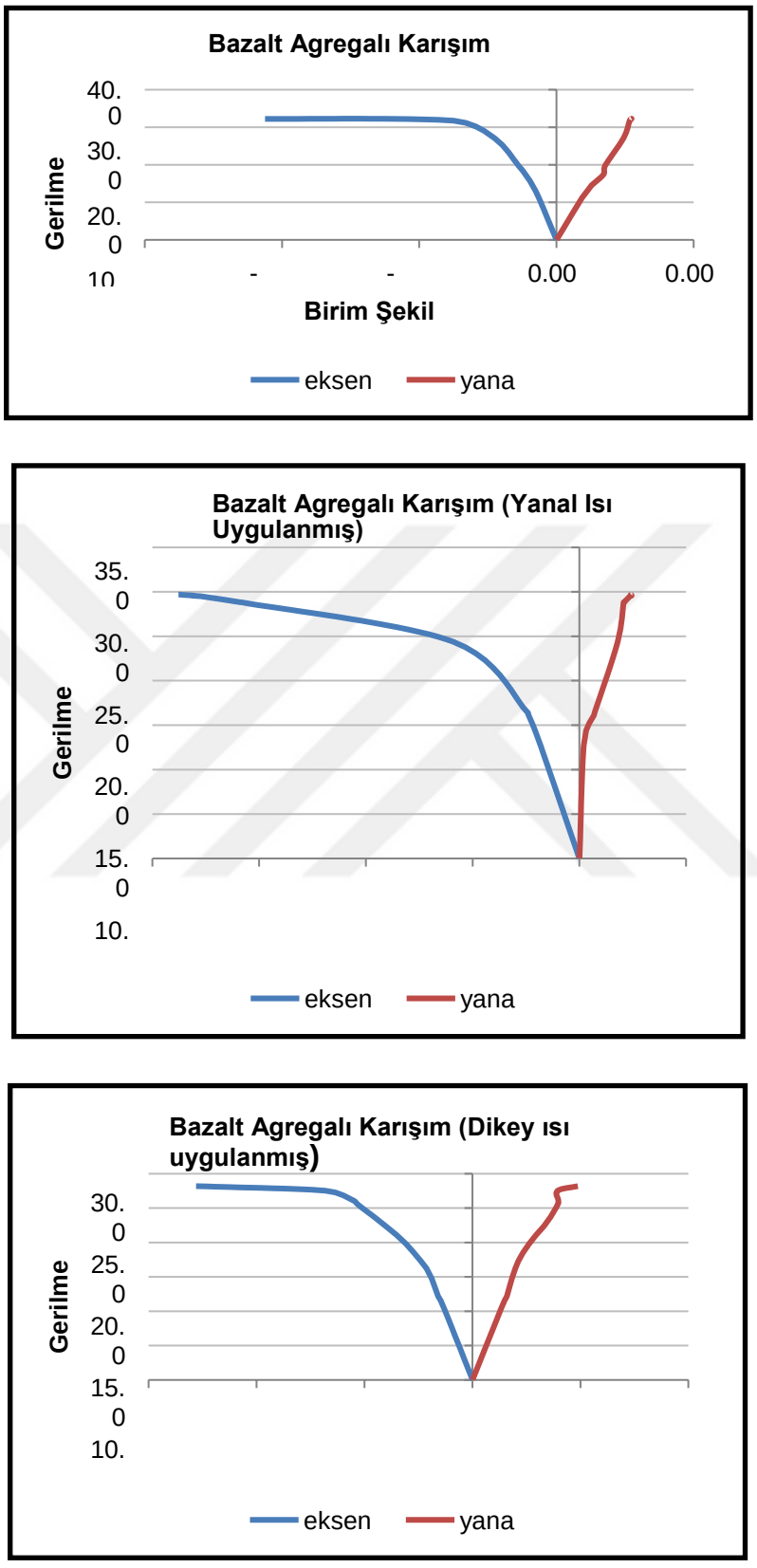
Her iki karışım için de küp numuneler ısı uygulanmadan önce ve sonra tartılmışlardır. Ağırlık kaybı sonuçları Tablo 4.4'te verilmiştir. Bazalt agregalı karışım için 7. ve 28. günde bu değerler sırasıyla %0,52 ve 0,40'tır. Genleştirilmiş cam agregalı karışım için ise 7. ve 28. günde sırasıyla %1,24 ve 1,02'dir. Bu kayıp, beton bünyesindeki su ve liften kaynaklandığı düşünülmektedir. Betonda serbest su 105 °C civarında tamamen buharlaşır ve sıcaklık yükseldikçe kimyasal bağlı suyu kaybetmeye başlar. Polipropilen 170 °C civarında erimeye başlayıp 340 °C civarında buharlaşır (Talaei ve Mostofinejad, 2021).

Tablo 4.4: Ağırlık kaybı sonuçları.

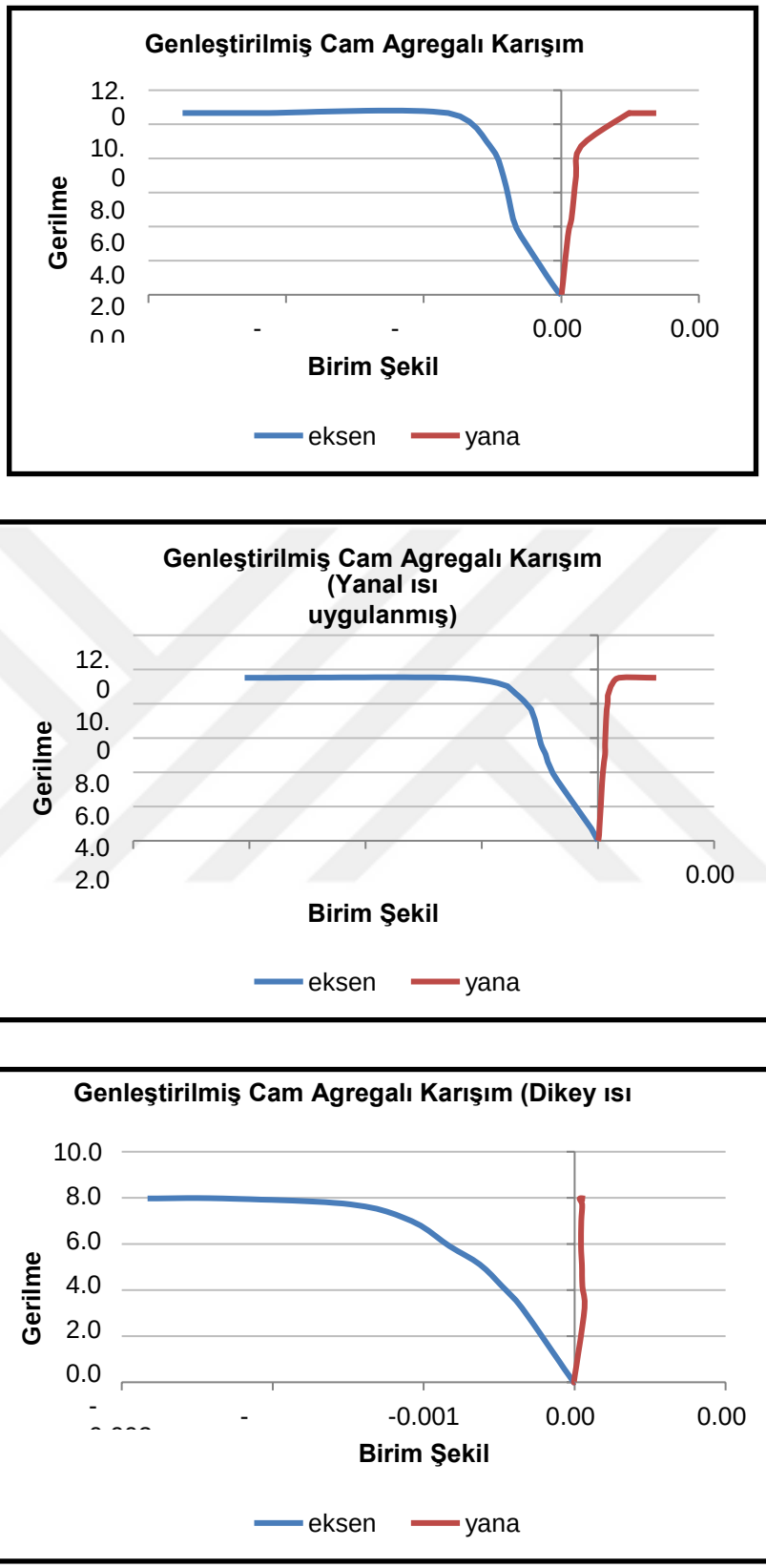
	7. Gün			**28. Gün**		
	Ağırlık (g)	Isı Sonrası Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (%)	Ağırlık (g)	Isı Sonrası Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (%)
Bazalt Agregalı Karışım	2457,8	2445,1	0,52	2452,0	2442,2	0,40
Genleştirilmiş cam Agregalı Karışım	1214,0	1198,9	1,24	1198.71	1186,5	1,02

4.5 ELASTİSİTE MODÜLÜ SONUÇLARI

Numunelerin basınç altında gerilme-birim deformasyon grafikleri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir.

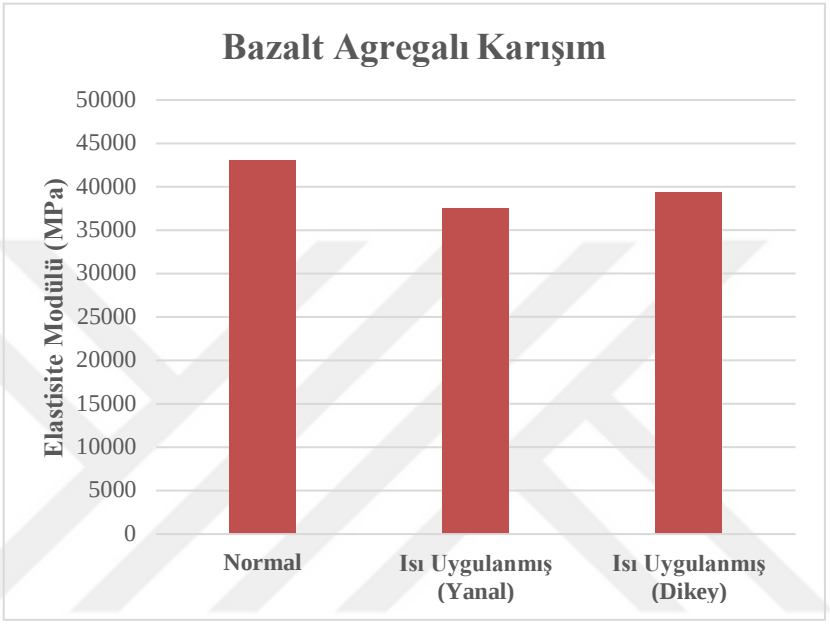


Şekil 4.9: Bazalt agregalı numunelerin gerilme-birim deformasyon grafikleri.

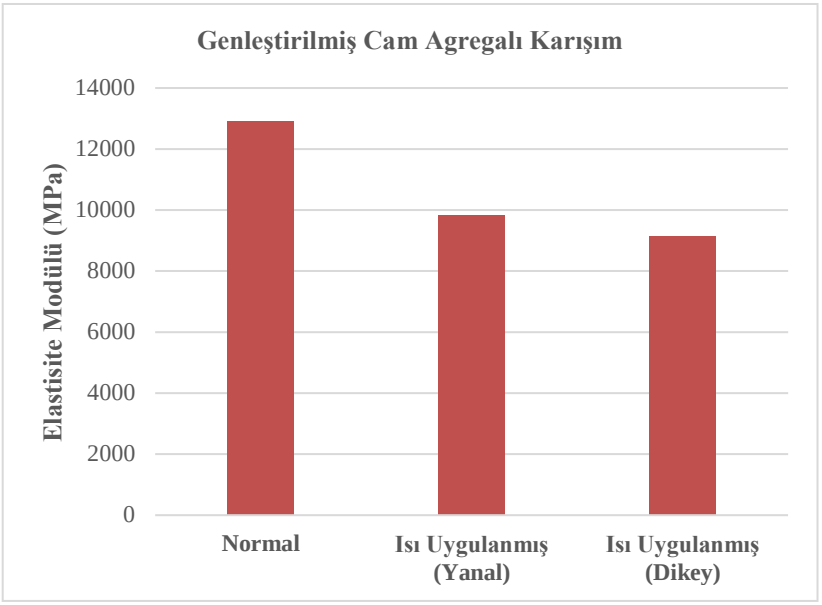


Şekil 4.10: Genleştirilmiş cam agregalı numunelerin gerilme-birim deformasyon grafikleri.

Elastisite modülü değerleri Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmiştir. Numunelere ısı uygulandıktan sonra E değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bazalt agregalı karışımda bu azalma yanal sıcaklık uygulanan numunede %12, dikey sıcaklık uygulanan numunede %9 değerindedir. Genleştirilmiş cam agregalı karışımda ise yanal sıcaklık uygulanan numunede %24, dikey sıcaklık uygulanan numunede %29 oranında azalma görülmüştür.



Şekil 4.11: Bazalt agregalı karışımın elastisite modülü sonuçları.



Şekil 4.12: Genleştirilmiş cam agregalı karışımın elastisite modülü sonuçları.

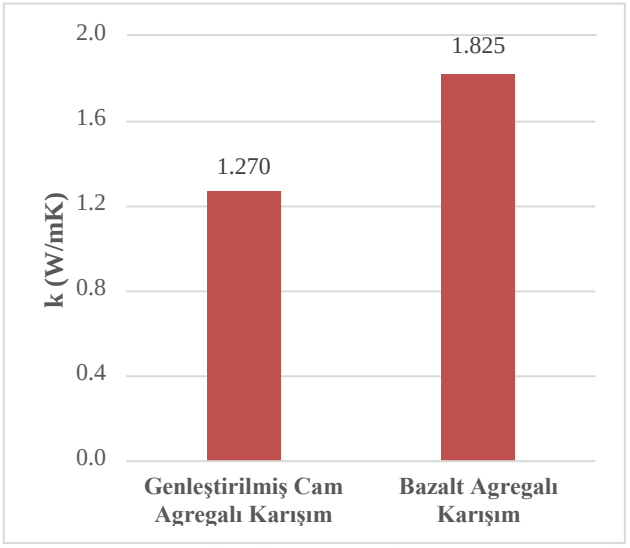
Numunelerin elastisite modülü değerleri ayrıca TS-500:2000 ve ACI-318 de verilmiş olan teorik formülasyonlara göre de hesaplanmış ve sonuçlar aşağıdaki Tablo 4.5'te sunulmuştur. Bazalt agregalı karışım için deneysel verilerden elde edilen sonucun, TS-500:2000'e göre teorik formülasyondan elde edilen sonuca yakın bir değer olduğu fakat ACI-318'e göre teorik elastisite modülü ile deneysel elastisite modülü arasında farkın daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 4.5: Elastisite modülünün deneysel ve teorik karşılaştırılması.

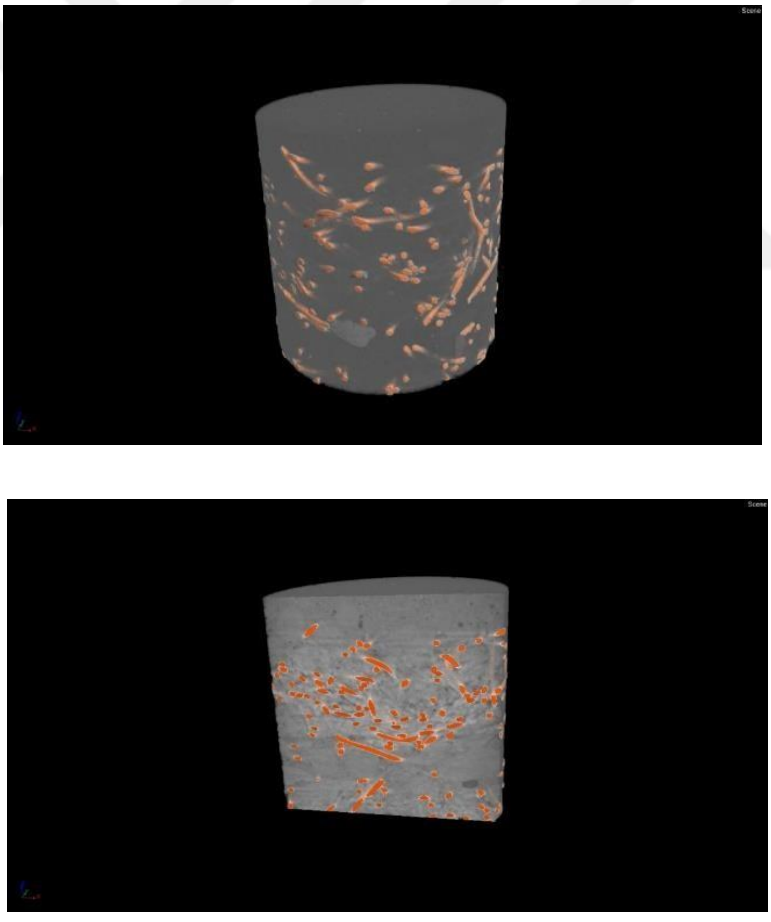
	TS-500	**Deneysel**
Bazalt Agregalı Karışım (Normal)	32450,7	42973,3
Bazalt Agregalı Karışım (Yanal Isı Uygulanmış)	31197,4	37458,2
Bazalt Agregalı Karışım (Dikey Isı Uygulanmış)	31197,4	39298,2
	ACI-318	**Deneysel**
Genleştirilmiş Cam Agregalı Karışım (Normal)	5896,9	12909,1
Genleştirilmiş Cam Agregalı Karışım (Yanal Isı Uygulanmış)	5569,4	9838,8
Genleştirilmiş Cam Agregalı Karışım (Yanal Isı Uygulanmış)	5110,8	9142,9

4.6 TERMAL İLETKENLİK KATSAYISI SONUÇLARI

Termal iletkenlik katsayısı sonuçları Şekil 4.13'te verilmiştir. Genleştirilmiş cam agregalı karışım, bazalt agregalı karışıma göre daha düşük iletim katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Betonun termal iletkenliği agrega, porozite ve nem içeriği gibi faktörlere bağlıdır. Düşük termal iletkenliğe sahip agrega ile üretilen betonların da termal iletkenliği düşüktür. Hafif betonların boşluklu yapısı ve düşük yoğunluğu nedeniyle normal betonlara göre ısı iletimi çok daha yavaştır (Baradan ve diğ., 2015). Ek olarak karışımlarda bulunan polipropilen liflerin beton içerisinde dağılımı ve yönelimi de iletim katsayısını etkilediği düşünülmektedir (Şekil 4.14). Liflerin yönelimi, ısı uygulanan yüzey ile dikleştikçe ısıyı beton içerisine iletmektedir. Yüzeye paralel konumlanan lifler ise ısıyı yüzeye dağıtacaklardır.



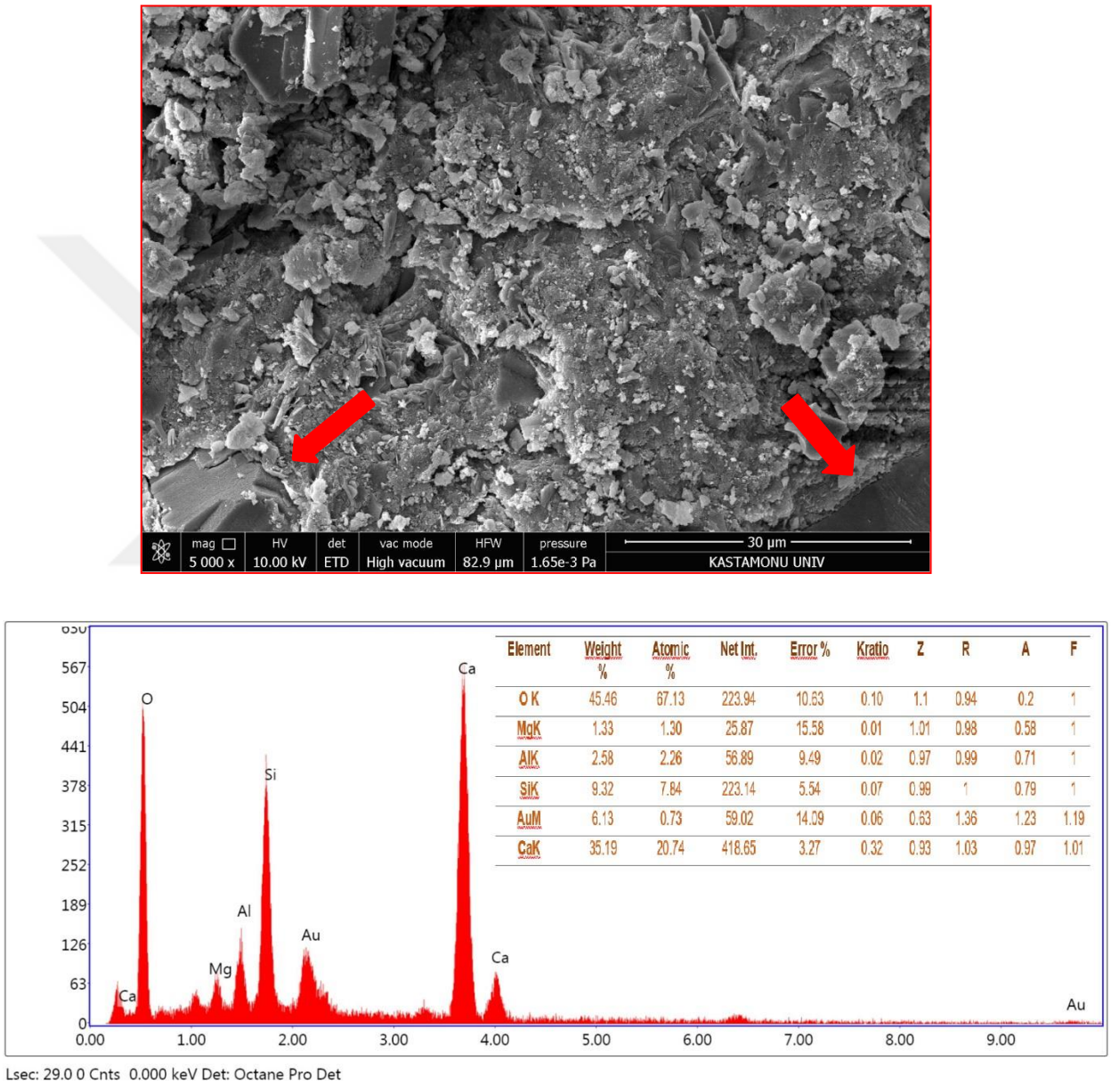
Şekil 4.13: Termal iletkenlik katsayısı sonuçları.



Şekil 4.14: Liflerin beton içerisinde dağılımı ve yönelimi.

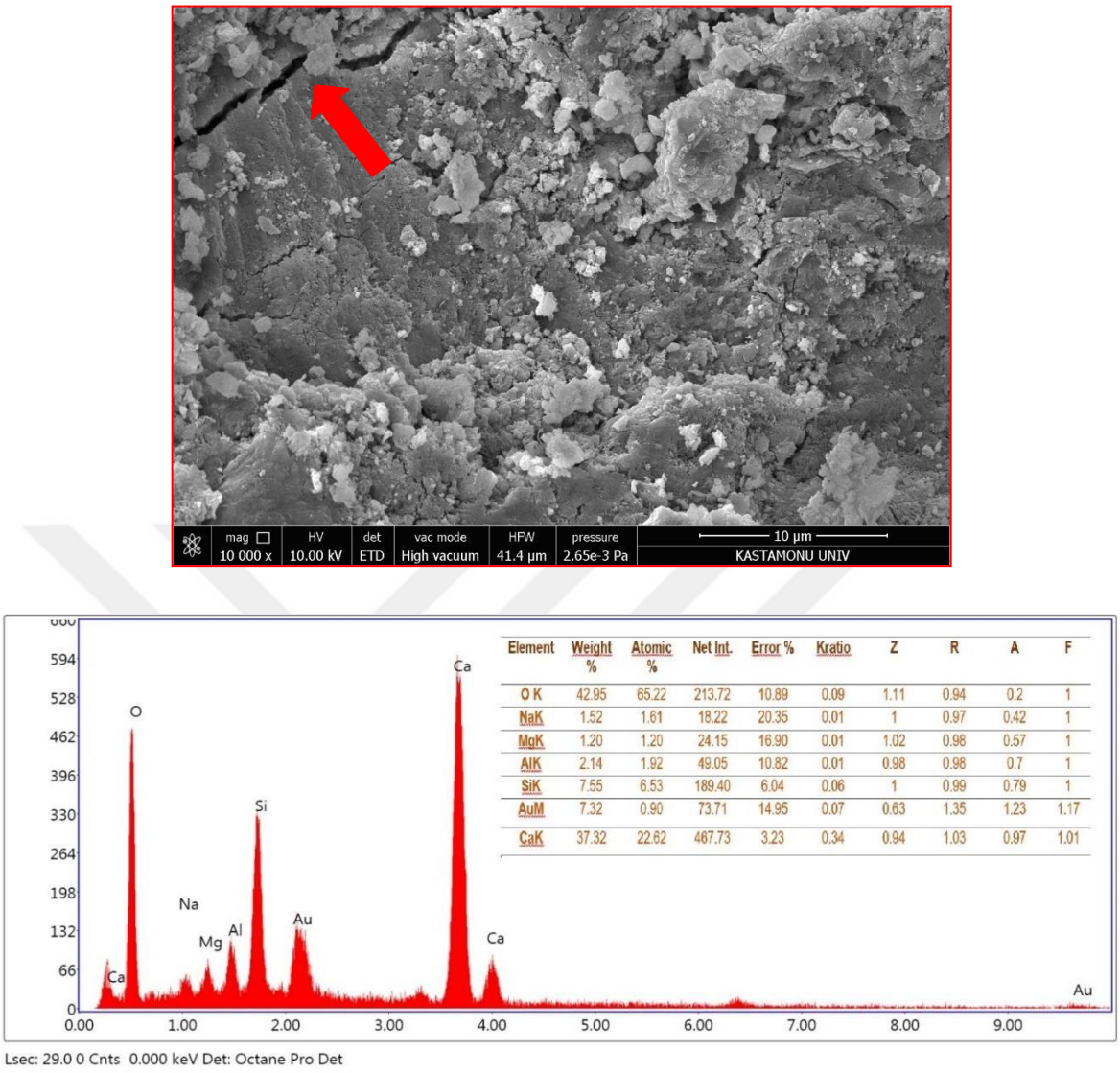
4.7 MİKRO-YAPISAL İNCELEME (SEM-EDS ANALİZİ) SONUÇLARI

Numuneler üzerinde basınç deneyleri sonrasında kırılma yüzeyleri üzerinde elektron taramalı mikroskopla detaylı incelemeler yapılmıştır. Bu kapsamda elde edilen görüntülerin bazıları aşağıdaki Şekil 4.15 ve 4.16'da gösterilmiştir.



Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
O K	45.46	67.13	223.94	10.63	0.10	1.1	0.94	0.2	1
MgK	1.33	1.30	25.87	15.58	0.01	1.01	0.98	0.58	1
AlK	2.58	2.26	56.89	9.49	0.02	0.97	0.99	0.71	1
SiK	9.32	7.84	223.14	5.54	0.07	0.99	1	0.79	1
AuM	6.13	0.73	59.02	14.09	0.06	0.63	1.36	1.23	1.19
CaK	35.19	20.74	418.65	3.27	0.32	0.93	1.03	0.97	1.01

Şekil 4.15: Bazalt agregalı karışımın SEM görüntüsü ve EDS analizi.

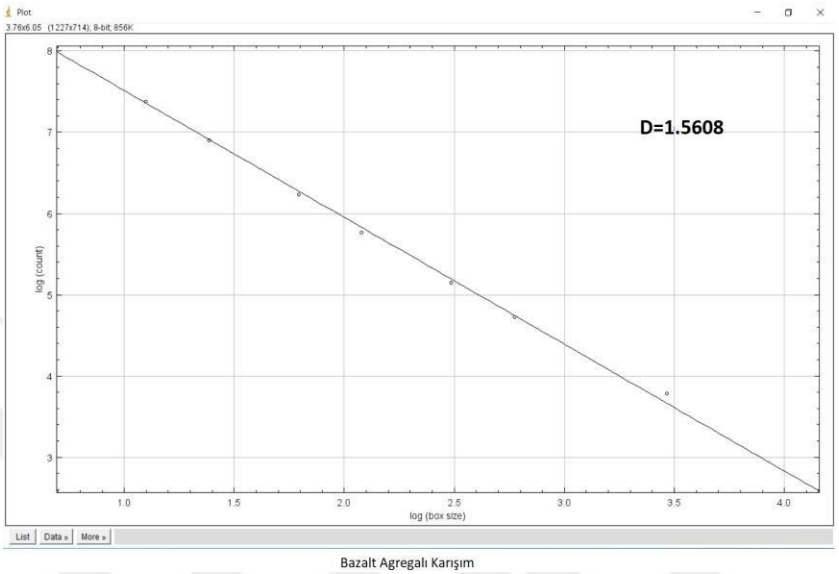


Şekil 4.16: Genleştirilmiş cam agregalı karışımın SEM görüntüsü ve EDS analizi.

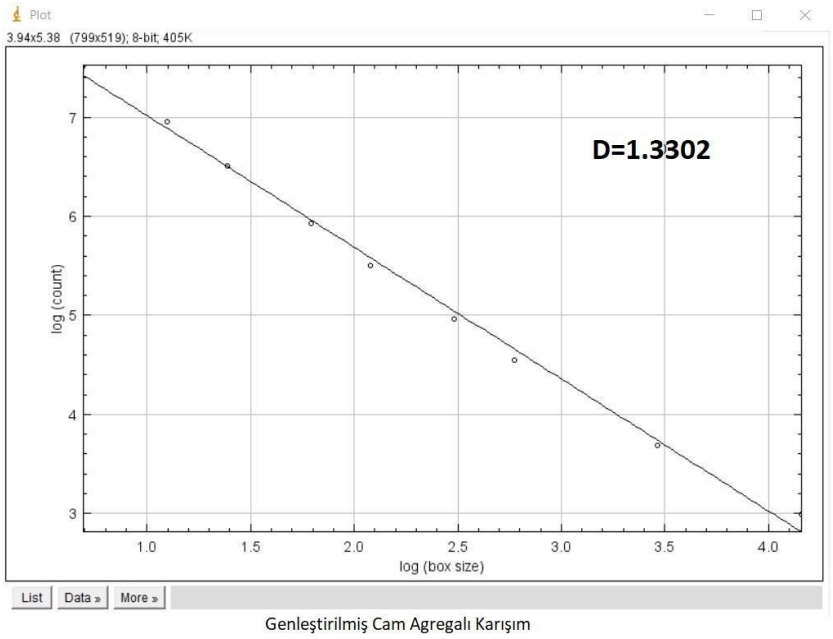
Şekiller incelediğinde bazalt agregası ile üretilen numunelerde özellikle agrega-çimento matrisi ara yüzeylerin boşluk, çatlak vb. kusurları minumum derecede içerdiği ve dolayısıyla oldukça yoğun ve homojen olduğu görülmektedir. Buna karşın, genleştirilmiş cam agregalı karışımda cam agregası ile etrafı çevreleyen çimento matrisinin elastisite modülleri arasındaki ciddi farklılığın lokal gerilme yoğunlaşmalarına yol açtığı ve matris içerisinde ciddi çatlaklara sebep olduğu görülmektedir. Basınç testi altında artan yükle beraber bu çatlaklar hızla birleşerek numunenin taşıma gücünde önemli kayıplara yol açtığı düşünülmektedir. Yapılan EDS incelemeleri sonucunda gözlenen Ca, Si ve O gibi elementlerin yoğunluğu da gerçekleşen hidratasyon olayı sonucunda ortaya çıkan Portlandite ve C-S-H jellerinin varlığını ortaya koymaktadır.

4.8 FRAKTAL ANALİZİ SONUÇLARI

Eğilmede çekme deneyi sonrasında numunelerde oluşan çatlakların Fraktal Analizi Image J programı ile yapılmıştır ve elde edilen Fraktal Boyut değerleri Şekil 4.17 ve 4.18'te verilmiştir.



Şekil 4.17: Bazalt agregalı karışımın fraktal boyut değeri.



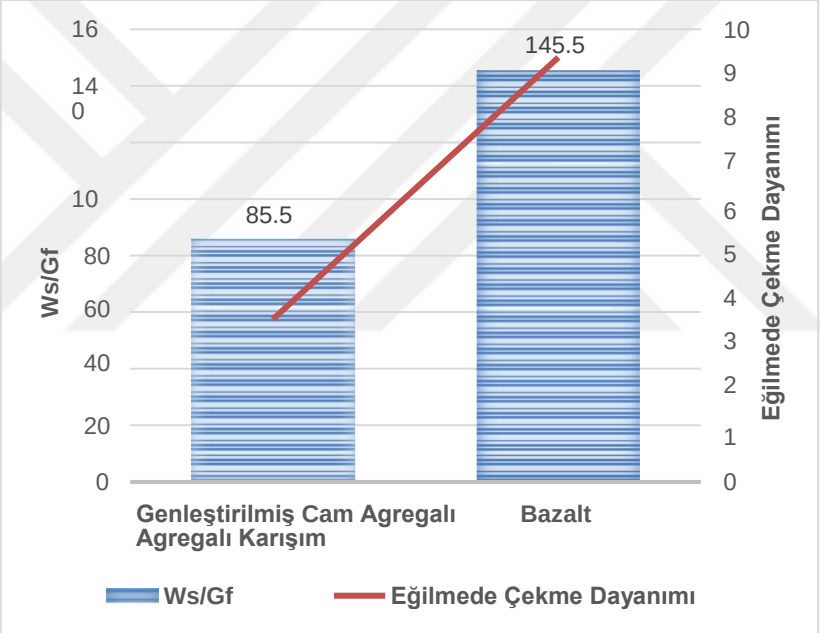
Şekil 4.18: Genleştirilmiş cam agregalı karışımın fraktal boyut değeri.

Guo ve diğ. (2007) tarafından yapılan bir çalışmaya göre fraktal boyut kullanılarak makro düzeyde numunenin yük altında kırılma enerjisi (W_s/ G_f) mm cinsinden Denklem (4.1) ile

hesaplanabilir. Bu denklemde W_s bir çatlak oluşurken yayılan enerji, G_f kırılma enerjisi, δ betondaki maksimum kum boyutu, D fraktal boyut, h numunenin enine yüksekliği (mm)'dir.

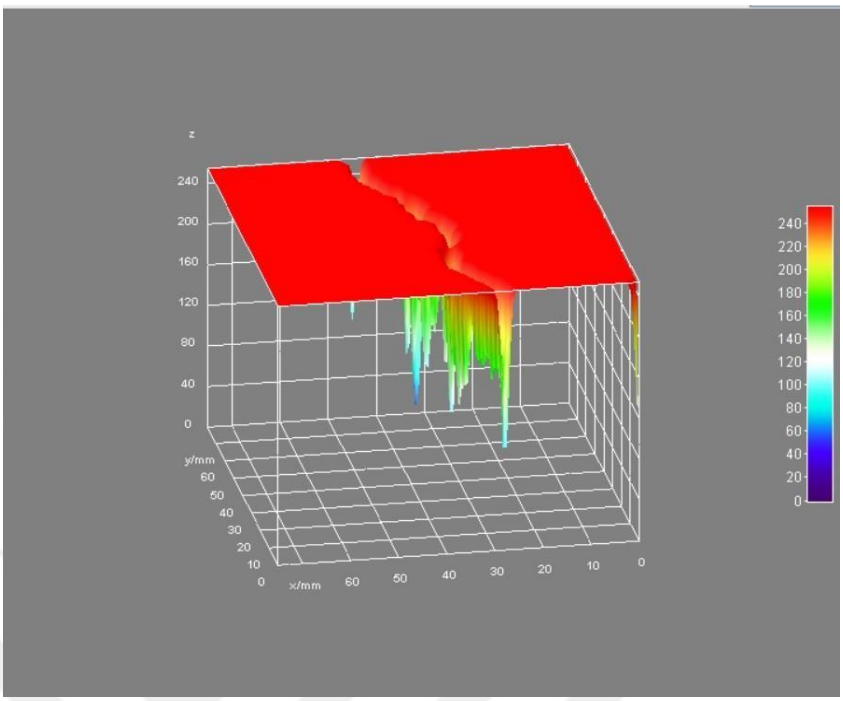
$$\frac{W_s}{G_f} = h \left(\frac{\delta}{h}\right)^{1-D} \tag{4.1}$$

Karışımlara ait (W_s/G_f) değerleri hesaplanmış ve eğilmede çekme dayanımı sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Eğilmede çekme dayanımı yüksek olan numunenin yük altında kırılma enerjisi (W_s/G_f) değeri de yüksek olduğu Şekil 4.19'da görülmektedir. Ayrıca istatistiksel olarak fraktal boyutuyla eğilmede çekme dayanımı arasında son derece yüksek bir korelasyonun olduğu görülmektedir.

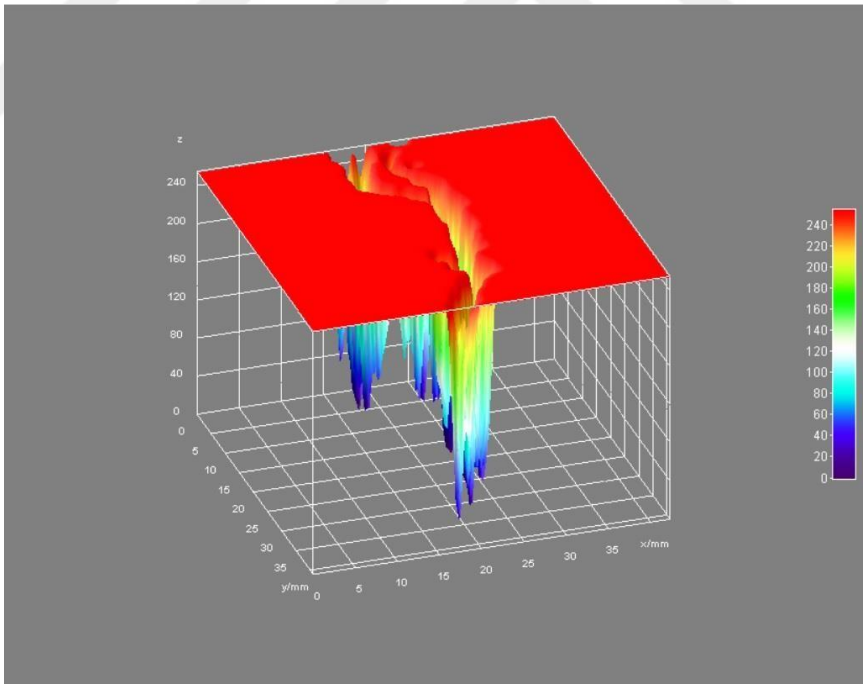


Şekil 4.19: Ws/Gf ile eğilmede çekme dayanımı ilişkisi.

Image J programı ile numunelerin çatlaklarının üç boyutlu çatlak pürüzlülük görselleri çizilebilir. İki karışıma ait çatlakların üç boyutlu yüzey grafiği Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de verilmiştir. Grafikler incelediğinde yük altında bazalt agregalı karışımda çatlak genişliği ve derinliğinin cam agregalı karışıma göre çok daha fazla olduğu ve ayrıca çatlakların üst liflere kadar yayılma gösterdiği saptanmıştır. Bu tarz bir çatlak pürüzlülük haritası bazalt agregalı karışımın neden daha yüksek bir kırılma enerjisine sahip olduğunun daha net anlaşılmasını sağlamıştır.



Şekil 4.20: Genleştirilmiş cam agregalı karışımın üç boyutlu yüzey grafiği.



Şekil 4.21: Bazalt agregalı karışımın üç boyutlu yüzey grafiği.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada yeni nesil savaş uçağı olan F-35B'nin kalkış ve iniş esnasında oluşturduğu basınca ve özellikle yüksek sıcaklık etkilerine maruz kalan pistte kullanılan betonun karışımında yapılacak olan bir iyileştirme ile yüksek dayanım ve sıcaklık direnci gibi özelliklerin betona kazandırılması amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda hafif (genleştirilmiş cam agrega) ve volkanik kökenli (bazalt) agregalı iki karışım tasarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde;

- Bazalt agregalı karışımın basınç, eğilme, elastisite modülü gibi mekanik özelliklerinin genleştirilmiş cam agregalı karışımdan üstün olduğu görülmüştür. Tasarlanan genleştirilmiş cam agregalı karışımın basınç dayanımının düşük kalmıştır ve taşıyıcı niteliği kazanamamıştır. Gelecek çalışmalarda genleştirilmiş cam agregalı karışımın bu yönünün iyileştirilmesi önerilmektedir.
- Genleştirilmiş cam agregalı karışım, kullanılan agreganın boşluklu yapısı ve düşük iletkenliği sebebiyle, bu tarz pistlerde tekrarlı ısı yüklemeleri altında bazalt agregalı karışım ile kıyaslandığında termal şokları absorbe etme açısından daha avantajlı olduğu görülmüştür.
- Yüksek ısı sonrası her iki karışımda da basınç dayanımında ciddi kayıplar görülmemiştir.
- Fakat karışımların eğilmede çekme dayanımlarında önemli düşüşler meydana gelmiştir. Bu değerler 28. günde her iki karışım için %38.7'dir. Bunun nedeni numunelerde yüksek sıcaklıklarda oluşan mikro çatlakların çekme gerilmeleriyle ile birlikte genişlemesine neden olarak eğilme dayanımını azalttığı düşünülmektedir. Ayrıca polipropilen liflerin eğilme dayanımı üzerinde iyileştirici etkisi büyüktür. Polipropilen 170 °C civarında erimeye başlayıp 340 °C civarında buharlaşır, liflerin erimesinin de eğilme dayanımının azalmasına neden olabileceği düşünülmektedir.
- Fraktal Analizi ile eğilmede çekme deneyi sonrası meydana gelen yüzey çatlaklarının fraktal boyutu hesaplanmıştır. Fraktal boyutu yüksek olan numunenin yük altında kırılma enerjisinin de yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca yük altında kırılma enerjisi yüksek olan numunenin ile eğilmede çekme dayanımının da yüksek olduğu anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

AFCEC/DD, 2014, *Engineering Technical Letter (ELT) 14-4: Vertical landing zone (VLZ) and other airfield pavement design construction using high temperature concrete*, Department of the Air Force, Air Force Civil Engineer Center, Tyndall Air Force Base Florida, USA.

Akman M.S., 2000, *Yapı hasarları ve onarım ilkeleri*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul.

Aköz, F. ve Yüzer, N., 1994, Yüksek sıcaklığın nedenleri ve betonarme elemanlara etkileri, *YTÜ dergisi*, 3, 89-98.

Aköz, F., Yüzer, N. ve Koral, S., 1995, Portland çimentolu ve silis dumanı katkılı harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkileri, *Teknik dergi*, 6 (26), 919-931.

Arıoz, O., 2007, Effects of elevated temperatures on properties of concrete, *Fire safety journal*, 42 (8), 516-522.

ASTM C330 / C330M-09, 2009, Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM C469/C469M-14e1, 2014, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson Ratio of Concrete in Compression, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

Atkinson, T., 2004, Polypropylene fibers control explosive spalling in high-performance concrete, *Concrete*, 38(10), 69-70.

Autelitano, F., Iacci, C. ve Giuliani, F., 2017, Thermomechanical behaviour of airfield concrete pads supporting joint strike fighter F-35B, *Road materials and pavement design*, 18 (5), 1027-1048.

Aydın, S. ve Baradan, B., 2007, Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars, *Cement and concrete research*, 37 (6), 988-995.

Aydın, S., 2008, Development of a high-temperature-resistant mortar by using slag and pumice, *Fire safety journal*, 43 (8), 610-617.

Aydın, S., Yazıcı, H. ve Baradan, B., 2008, High temperature resistance of normal strength and autoclaved high strength mortars incorporated polypropylene and steel fibers, *Construction and building materials*, 22, 504-521.

Baradan B., Yazıcı H. ve Ün, H., 2010, *Beton ve betonarme yapılarda kalıcılık (durabilite),* Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları, İstanbul.

Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Tosun Felekoğlu, K., Aydın, S., Yardımcı, M. Y., Topal, A. ve Öztürk, A. U., 2015, *Beton*, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, ISBN:978-975-441-361-8.

Bevilaqua, P. M., 2005, Joint strike fighter dual-cycle propulsion system, *Journal of propulsion and power*, 21(5), 778-783.

Borhan, T.M., 2012, Properties of glass concrete reinforced with short basalt fibre, *Materials & design*, 42, 265-271.

Chu, H. Y., Jiang, J. Y., Sun, W. ve Zhang, M., 2017, Mechanical and thermal properties of graphene sulfonate nanosheet reinforced sacrificial concrete at elevated temperatures, *Construction and building materials*, 153, 682-694.

Cülfik, M.S. ve Özturan, T., 2002, Effect of elevated temperatures on the residual mechanical properties of high-performance mortar, *Cement and concrete research*, 32 (5), 809-816.

Cülfik, M.S., 2001, *Deterioration of bond between cement paste and aggregate at high temperatures*, Doktora, Boğaziçi Universitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Erdem, S. ve Blankson, M. A., 2013, Fractal-fracture analysis and characterization of impact-fractured surfaces in different types of concrete using digital image analysis and 3D nanomap laser profilomtery, *Construction and building materials*, 40, 70-76.

Guo, L. P., Sun, W., Zheng, K. R., Chen, H. J. ve Liu, B., 2007, Study on the flexural fatigue performance and fractal mechanism of concrete with high proportions of ground granulated blast-furnace slag, *Cement and concrete research*, 37(2), 242-250.

Gülce, C., 2009, *Farklı çimentolarla üretilen harçların yüksek sıcaklık ve değişik soğutma koşulları altındaki özellikleri*, Yüksek Lisans, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Gürbüz, E., 2018, *MikroPCM içeren tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin mekaniksel ve darbe davranışlarının araştırılması*, Yüksek Lisans, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Hager, I., 2013, Behaviour of cement concrete at high temperature, *Bulletin of the polish academy of sciences, technical sciences*, 61 (1), 145-154.

Heikal, M., Ali, A.I., Ismail, M.N, Awad, S. ve Ibrahim, N.S., 2014, Behavior of composite cement pastes containing silica nano-particles at elevated temperature, *Construction and building materials*, 70, 339-350.

Hertz, K.D. ve Sorensen, L.S., 2005, Test method for spalling of fire exposed concrete, *Fire safety journal*, 40 (5), 466-476.

Horszczaruk, E., Sikora, P., Cendrowski K. ve Mijowska E., 2017, The effect of elevated temperature on the properties of cement mortars containing nanosilica and heavyweight aggregates, *Construction and building materials*, 137, 420-431.

Husem, M., 2006, The effect of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete, *Fire safety journal*, 41 (2), 155-163.

Ibrahim, R.K., Hamid, R. ve Taha, M.R., 2012, Fire resistance of high-volume fly ash mortars with nanosilica addition, *Construction and building materials*, 36, 779-786.

International Atomic Energy Agency TCS-17, 2002, *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*, Vienna.

ISO 834-1, 1991, Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction Part 1: General Requirements, *International Organization for Standardization*, Geneva, Switzerland.

Issa, M. A., Issa, M. A., Islam, M. S. ve Chudnovsky, A., 2003, Fractal dimension a measure of fracture roughness and thoughness of concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, 70(1), 125-137.

Kabay, N., 2009, *Hafif agregalı betonun boşluk yapısının mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi*, Doktora, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kearsley, E.P. ve Wainwright, P.J., 2001, Porosity and permeability of foamed concrete, *Cement and concrete research*, 31 (5), 805-812.

Khoury, G. A., 1992, Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment, *Magazine of concrete research*, 44(161), 291-309.

Khoury, G. A., 2000, Effect of fire on concrete and concrete structures, *Progress in structural engineering and materials*, 2 (4), 429-447.

Kutluğ, T., 2014, *Isı, Ses, Nem İzolasyonu ve Hafiflik Sağlayan Ekolojik Termal İzolasyon Agregası Genleştirilmiş Cam Küre*, http://www.putech-composites.com, [Ziyaret tarihi: 3 Mart 2021].

Li, M., Qian, C. Ve Sun, W., 2004, Mechanical properties of high-strength concrete after fire, *Cement and concrete research*, 34(6), 1001-1005.

Li, X., 2011, Study on thermal resistance of basalt filament yarn, *Advanced materials research*, 146-147, 666-669.

Lockheed Martin, 2015, *F-35 Lightning II*, https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/f-35.html, [Ziyaret tarihi: 5 Mayıs 2021].

Lublóy, É., Kopecskó, K., Balázs, G.L. Szilágyi, I.M. ve Madarász, J., 2016, Improved fire resistance by using slag cements. *Journal of thermal analysis calorimetry*, 125, 271-279.

Mandelbrot, B. B., 1982, *The fractal geometry of nature*, Freeman, San Francisco, Marchand.

Mehta, P. K. ve Monteiro, P. J. M., 2006, *Concrete: microstructure, properties and materials (3rd Edi.)*, McGraw Hill, New York.

Mihashi, H., Ahmed, S. F. U., Mizukami, T. Ve Nishiwaki, T., 2006, Quantification of crack formation using image analysis and its relationship with permeability, *Restoration of buildings and monuments*, 12(4), 335-348.

Mohammadi, Y., Singh, S.P. ve Kaushik, S.K., 2008, Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state, *Construction and building materials*, 22 (5), 956-965.

NAVFAC EXWC, 2014, *High performance airfield pavements (Annual report TDS-NAVFAC EXWCCI-1402)*, Naval Facilities Engineering and Expeditionary Warfare, Port Hueneme, CA.

Netinger, I., Kesegic, I. ve Guljas, I., 2011, The effect of high temperatures on the mechanical properties of concrete made with different types of aggregates, *Fire safety journal*, 46 (7), 425-430.

Neville A.M., 2011, *Properties of concrete (fifth Edition)*, Pearson Education Limited, Essex, England.

Onaran, K., 2014, *Malzeme Bilimi*, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, ISBN: 978-975-540-017-4.

Parlayan, Y., 2019, *Yüksek sıcaklık etkisinde kromit katkılı betonların basınç dayanımlarının incelenmesi*, Yüksek Lisans, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Piasta, J., 1984, Heat deformations of cement paste phases and the microstructure of cement paste, *Metarials and structures*, 17 (102), 415-420.

Poon, C.S., Azhar, S., Anson, M. ve Wong, Y.L., 2001, Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures, *Cement and concrete research*, 31 (9), 1291-1300.

Purkiss, J.A., (2007), *Fire safety engineering design of structures*, Second Edition, Butterworth-Heineman, Oxford, England.

Ramakrishnan, V., Shafai, H. F. ve Wu, G., 1991, Cyclic heating and cooling effects on concrete durability, *ACI special publication*, 126, 1285-1304.

Sakr, K. ve El-Hakim, E., 2005, Effect of temperature or fire on heavy weight concrete properties, *Cement and concrete research*, 35 (3), 590-596.

Serrano, R., Cobo, A., Prieto, M.I. ve Gonzalez, M.D.N., 2016, Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers, *Construction and building materials*, 122, 302-309.

Shill, S. K., Al-Deen, S. ve Ashraf, M., 2018, Concrete durability issues due to temperature effects and aviation oil spillage at military airbase – A comprehensive review, *Construction and building materials*, 160, 240-251.

Shoaib, M.M., Ahmed, S.A. ve Balaha, M.M., 2001, Effect of fire and cooling mode on the properties of slag mortars, *Cement and concrete research*, 31 (11), 1533-1538.

Sim, J., Park, C. ve Moon, D.Y., 2005, Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures, *Composites part b: engineering*, 36 (6-7), 504-512.

Talaei, M. ve Mostofinejad, D., 2021, Mechanical properties of fiber-reinforced concrete containing waste porcelain aggregates under elevated temperatures, *Construction and building materials*, 289, Article 122854.

Tanyıldızı, H. ve 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 (11), 2269-2275.

The Stikloporas Website, *Expanded glass*, https://stikloporas.com/expanded-glass, [Ziyaret tarihi: 5 Şubat 2021].

TS 500:2000, 2000, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.

TS EN 12086, 2002, Isı Yalıtım Malzemeleri-Binalar İçin-Su Buharı Geçirgenlik Özelliklerinin Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.

TS EN 12390-3, 2010, Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri – Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.

TS EN 196-1, 2009, Çimento deney metotları – Bölüm 1: Dayanım Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.

TS EN 197-1, 2012, Çimento – Bölüm 1: Genel Çimentolar – Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.

Türker, P., Erdoğdu, K. ve Erdoğan, B., 2001, Investigation of fire-exposed mortars with different types of aggregates. *Cement concrete world*, 6 (31), 52-67.

Uçarkoşar, B., 2013, *Pirinç kabuğu katkılı yüksek dayanımlı betonun yüksek sıcaklık performansı*, Yüksek Lisans, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Uygunoğlu, T. ve Topçu, İ.B., 2009, Thermal expansion of self-consolidating normal and lightweight aggregate concrete at elevated temperature, *Construction and building materials*, 23 (9), 3063-3069.

Vejmelkova, E., Padevet, P. ve Cerny, R., 2008, Effect of cracks on hygric and thermal characteristics of concrete, *Bauphysik*, 30 (6), 438-444.

Yamazaki, N., Yamazaki, M., Mochida, T., Mutoh, A., Miyashita, T., Ueda, M., Hasegawa, T., Sugiyama, K., Hirakawa, K., Kikuchi, R., Hiramoto, M. ve Saito, K., 1995, Structural behavior of reinforced concrete structures at high temperatures, *Nuclear engineering and design*, 156 (1-2), 121-138.

Yazıcı, H., Türkel, S. ve Baradan, B., 2000, High temperature resistance of pumice mortar, *II. international symposium cement and concrete technology in the 2000s*, Istanbul,Turkey.

Yoshitake, I., Baba, K., Ito, T. ve Nakagawa, K., 2005, Behavior of fiber reinforced concrete under fire temperature, *International RILEM Workshop on High Performance Fiber*

Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications, 23-26 May 2005, Honolulu, Hawaii.

Yüksel, İ., Siddique, R. ve Özkan, Ö., 2011, Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement, *Construction and building materials*, 25 (2), 967-972.
