T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK MERMER TOZU VE CAM ELYAF KATKISININ BETONDAKİ KARBONATLAŞMAYA ETKİSİ

Leyla GÜLAN

Yüksek Lisans Tezi
Anabilim Dalı: Yapı Eğitimi
Danışman: Prof. Dr. Servet YILDIZ
HAZİRAN-2015

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK MERMER TOZU VE CAM ELYAF KATKISININ BETONDAKİ KARBONATLAŞMAYA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Leyla GÜLAN
101125108

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25/05/2015
Tezin Savunulduğu Tarih : 10/06/2015

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Servet YILDIZ (Fırat Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Oğuzhan KELEŞTEMUR (Fırat Ü.)
Yard. Doç. Dr. Tahir GÖNEN (Uşak Ü.)

HAZİRAN-2015

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi çalışmam süresince her konuda desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Servet YILDIZ'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım değerli hocalarım; Sayın Doç. Dr. Oğuzhan KELEŞTEMUR ve Yrd. Doç. Dr. Erdinç ARICI' ya teşekkürü borç bilirim.

Karbonatlaşma deneyi için tasarlamış oldukları gaz sızdırmaz tankın kullanımı için Sayın Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU ve Yrd. Doç. Dr. Tahir GÖNEN'e teşekkür ederim.

Hem bu çalışmam boyunca hem de tüm yaşamım boyunca desteği ile her an yanımda olup bana güç veren, benden sevgi ve şefkatini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili annem Seydiye TURHAN, babam Yusuf TURHAN, kardeşim Halide TURHAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tezin her aşamasında emeği ve desteğiyle her an yanımda olan bu zorlu süreçte güçlükleri aşmamda sevgi ve desteğini esirgemeyen ve beni her zaman gülümseyerek karşılayan sevgili eşim Yusuf GÜLAN ve ailesine maddi ve manevi desteklerini esirgemedikleri için sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca laboratuvar çalışmam boyunca benden desteğini esirgemeyen arkadaşlarım Turan YILDIZ, Samet GÜDELOĞLU, Mahmut ARMAĞAN ve destek veren tüm arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Deneysel çalışmamda kullandığım cam elyafın temin edilmesini sağlayan CAMELSAN AŞ.'ne de teşekkürü borç bilirim.

Leyla GÜLAN

ELAZIĞ-2015

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **II**

İÇİNDEKİLER ..... **III**

ÖZET ..... **V**

SUMMARY ..... **VI**

ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **VII**

TABLOLAR LİSTESİ ..... **IXI**

SEMBOLLER ve KISALTMALAR LİSTESİ ..... **XII**

1. GİRİŞ **1**

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI ve GENEL BİLGİLER **3**

2.1. Lifli Betonlar 3

2.2. Cam Elyaflar 5

2.2.1. Cam Elyaf Üretimi 6

2.2.2. Cam Elyaf Takviyeli Betonların Özelikleri 7

2.2.3. Cam Elyaflı Betonların Kullanıldığı Yerler 9

2.3. Mermer Tozu 11

2.3.1. Atık Mermer Tozlarının Çevresel Etkileri 11

2.3.2. Mermer Atıklarının Değerlendirildiği Yerler 13

2.3.3. Beton Üretiminde Mermer Tozunun Filler Malzeme Olarak Kullanımı 14

2.4. Betonda Dayanıklılık (Durabilite) 16

2.5. Betonda Karbonatlaşma 18

2.5.1. Karbonatlaşmanın Betona Olumsuz Etkileri 20

2.5.2. Karbonatlaşmanın Betona Olumlu Etkileri 20

2.5.3. Karbonatlaşmanın pH Değerine Etkisi 21

2.5.4. S/Ç Oranının Karbonatlaşmaya Etkisi 22

2.5.5. Karbonatlaşma Rötresi 22

2.5.6. Karbonatlaşmanın Donatı Korozyonuna Etkisi 23

2.5.7. Karbonatlaşmanın Mikro -Yapıya Etkisi 25

2.5.8. Kür İşleminin Karbonatlaşmaya Olan Etkisi 26

2.5.9. Karbonatlaşma Derinliğinin Belirlenmesi 27

2.5.10. Tez Çalışmasının Literatürdeki Yeri 33

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 34
3.1. Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması 34
3.1.1. Agrega 34
3.1.2. Çimento 36
3.1.3. Cam Elyaf 36
3.1.4. Mermer Tozu 37
3.1.5. Süperakışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı 38
3.1.6. Sodyum Dikromat 39
3.1.7. Karma Suyu 39
3.2. Karışım Oranları 40
3.3. Numunelerin Hazırlanması 41
3.4. Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler 44
3.4.1. Görünür Porozite Tayini Deneyi 45
3.4.2. Ultra Ses Geçiş Hızı Tayini Deneyi 45
3.4.3. Kılcal Su Emme Deneyi 46
3.4.4. Basınç Dayanımı Deneyi 47
3.4.5. Yarmada-Çekme Dayanımı Deneyi 48
3.4.6. Karbonatlaşma Deneyi 50
3.4.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi 54
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 56
4.1. Porozite Deney Sonuçları 56
4.2. Kapiler Su Emme Deney Sonuçları 61
4.3. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları 65
4.4. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları 70
4.5. Yarmada Çekme Dayanımı Deney Sonuçları 76
4.6. Karbonatlaşma Derinliği Tayini Sonuçları 80
5. SONUÇ 84
KAYNAKLAR 87
ÖZGEÇMİŞ 97

ÖZET

Bu çalışmada, atık mermer tozu ve cam elyaf katkısının betondaki karbonatlaşmaya etkisi araştırılmıştır. Ağırlıkça 0,25, 0,50, 0,75 ve 1 kg/m^3 oranlarında cam elyaf ile filler malzeme yerine hacimce %25, %50, %75 ve %100 oranlarında atık mermer tozu ilave edilerek 25 farklı beton serisi hazırlanmıştır. Karbonatlaşma süreci çok uzun yıllar aldığından laboratuvar ortamında hızlandırılmış karbonatlaşma test tekniği kullanılmıştır. Karbonatlaşma derinlikleri, %1 etil alkolde hazırlanan fenolfitalein indikatörü ile elektronik kumpas yardımıyla ölçülmüştür. Karbonatlaşma derinlikleri arasındaki ilişkiyi desteklemek ve aralarında kıyaslama yapabilmek için her seri farklı zaman periyodunda (7, 14 ve 28 gün) gaz sızdırmaz tankta %40 karbondioksitli ortamda bekletilmiştir. 28 günlük kür sürelerini tamamlayan numuneler üzerinde karbonatlaşma öncesi ve sonrası olmak üzere porozite, kılcal su emme, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deneylere tabi tutulan numunelerin mikro yapıları SEM görüntüleri ile incelenmiş EDX ile desteklenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre; karbonatlaşma deneyi sonrası numunelerin, porozite, kapilarite, basınç ve yarmada çekme dayanımı değerlerinde azalma, ultrases geçiş hızı değerlerinde ise artış olduğu tespit edilmiştir. Karbonatlaşma derinliği zaman faktörünün artmasıyla artış göstermiştir. Ayrıca tüm seriler kendi aralarında kıyaslandığında mermer tozunun artışı ile cam elyaf takviyeli beton numunelerinin ultrases geçiş hızı, basınç ve yarmada çekme dayanımı değerlerinde artış, porozite, kılcal su emme ve karbonatlaşma derinliği değerlerinde ise azalmalar olduğu saptanmıştır. Cam elyafın artışı ise numunelerde porozite, kılcal su emme, yarmada çekme dayanımı ve karbonatlaşma derinliği değerlerinde artmaya, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı değerlerinde ise azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton, Cam elyaf, Mermer tozu, Karbonatlaşma derinliği, SEM, EDX.

SUMMARY

EFFECT OF WASTE MARBLE POWDER AND GLASS FIBER ON THE CARBONATION OF CONCRETE

In this study, the effect of waste marble powder and glass fiber additive on carbonation of concrete has been investigated. 25 different concrete series has been prepared by substituting glass fiber and filler material by weight of 0,25 , 0,50, 0,75 and 1 kg/m^3 with 25%, 50%, 75% and 100% waste marble powder by volume. Since the process of carbonation takes long years, accelerated carbonation test technique has been used in laboratory environment. Carbonation depths have been measured by electronic caliper with phenolphthalein indicator prepared in 1% ethyl alcohol. Each series have been kept in gas proof tank in media with 40% carbon dioxide for different time periods (7, 14 and 28 days) to support the relationship between carbonation depths and to make comparisons. Porosity, capillary absorption, ultrasonic pulse velocity, compressive strengths and splitting tensile strength tests have been performed on the specimens that completed 28-day curing period, before and after carbonation. Microstructures of the specimens that has been subjected to tests has been analyzed by SEM images and supported by EDX.

According to the results we obtained, porosity, capillarity, compressive and splitting tensile strength values of the specimens have decreased after carbonation test, while ultrasonic pulse velocity values have increased. Carbonation depth has increased in parallel to the increase of time factor. In addition, comparison of each series have revealed that ultrasonic pulse velocity, compressive and splitting tensile strength values of glass fiber reinforced concrete specimens have increased with the increase of marble powder, while porosity, capillary absorption and carbonation depth values have decreased. On the other hand, increase of glass fiber have increased porosity, capillary absorption, splitting tensile strength and carbonation depth values and have decreased ultrasonic pulse velocity and compressive strength values.

Key words: Concrete, Glass Fiber, Marble powder, Carbonation depth, SEM, EDX.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Geçirimlilik-hasar girişimi diyagramı 17

Şekil 2.2. Beton veya betonarme yapıların iç ve dış etmenlerle bozulması.....18

Şekil 2.3. Beton örtü tabakasında pH-zaman ilişkisi 21

Şekil 2.4. Karbonatlaşmış beton örnekleri 21

Şekil 2.5. Fazla buharlaşma ve fazla kılcal delikler 22

Şekil 2.6. Karbonatlaşma veya klorür iyonları nedeniyle betonun donatıyı korozyondan koruma etkinliğinin kaybolması 24

Şekil 2.7. Karbonatlaşma ve korozyon hızının bağıl nem ile ilişkisi 25

Şekil 2.8. Karbonatlaşmış ve karbonatlaşmamış çimento hamurlarında boşluk büyüklüklerinin dağılımı 25

Şekil 3.1. Kullanılan agreganın granülometri eğrisi 35

Şekil 3.2. Mermer tozu ve ince agreganın granülometri eğrisi 38

Şekil 3.3. Sodyum dikromat 39

Şekil 3.4. Beton karışım mikseri 42

Şekil 3.5. Beton numunelerinin hazırlanmasında yapılan çökme deneyi 43

Şekil 3.6. Beton numunelere kür uygulanması.....44

Şekil 3.7. Kürden çıkarılan numuneler 44

Şekil 3.8. Ultrases geçiş hızı deney düzeneği ve ölçüm cihazı 46

Şekil 3.9. Kılcal su emme deney düzeneği 47

Şekil 3.10. Basınç dayanımı deney düzeneği 48

Şekil 3.11. Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği 48

Şekil 3.12. Yarmada çekme dayanımı tayini uygulaması 49

Şekil 3.13. Değişik tuzların nem sağlama miktarları.....51

Şekil 3.14. Karbonatlaşma derinliğinin belirlenmesi 52

Şekil 3.15. Farklı serilerde fenolftalein çözeltisi sıkılmış beton numuneleri.....52

Şekil 3.16. Elektronik kumpas 53

Şekil 3.17. Gaz sızdırmaz tank düzeneği 53

Şekil 3.18. Gaz sızdırmaz tanka yerleştirilen beton numuneleri 55

Şekil 3.19. Karbonatlaşma reaksiyonu gösteren ve göstermeyen beton kesitinin elektron mikroskobunda görünümü 55

Şekil 3.20. JEOL JSM 7001F taramalı mikroskobu 55

Şekil 4.1. Kontrol ve 7, 14, 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin porozite değerleri 57

Şekil 4.2. Kontrol ve 7 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin porozite değerleri 57

Şekil 4.3. Kontrol ve 14 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin porozite değerleri 58

Şekil 4.4. Kontrol ve 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin porozite değerleri 58

Şekil 4.5. Cam elyaf ve mermer tozu katkılı beton numunelerinin SEM görüntüsü.....59

Şekil 4.6. Cam elyaf ve mermer tozu katkılı beton numunelerinin SEM görüntüsü.....60

Şekil 4.7. Kontrol ve 7, 14, 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin kılcal su emme değerleri.....62

Şekil 4.8. Kontrol ve 7 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin kılcal su emme değerleri 62

Şekil 4.9. Kontrol ve 14 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin kılcal su emme değerleri 63

Şekil 4.10. Kontrol ve 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin kılcal su emme değerleri 63

Şekil 4.11. Kontrol ve 7, 14, 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri 66

Şekil 4.12. Kontrol ve 7 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin ulrases geçiş hızı değerleri.....66

Şekil 4.13. Kontrol ve 14 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin ulrases geçiş hızı değerleri.....67

Şekil 4.14. Kontrol ve 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin ulrases geçiş hızı değerleri.....67

Şekil 4.15. Cam elyafın olmadığı mermer tozunun %100 olduğu 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunenin SEM görüntüsü.....68

Şekil 4.16. Kontrol ve 7, 14, 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin basınç dayanımı değerleri 71

Şekil 4.17. Kontrol ve 7 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin basınç dayanımı değerleri 71

Şekil 4.18. Kontrol ve 14 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin basınç dayanımı değerleri 72

Şekil 4.19. Kontrol ve 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin basınç dayanımı değerleri 72

Şekil 4.20. 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış CE0-MT25 kodlu numunenin karbonatlaşma görülen bölgesindeki $CaCO_3$ oluşumu.....74

Şekil 4.21. Kontrol ve 7, 14, 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin yarmada çekme dayanımı değerleri 77

Şekil 4.22. Kontrol ve 7 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin yarmada çekme dayanımı değerleri 77

Şekil 4.23. Kontrol ve 14 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin yarmada çekme dayanımı değerleri 78

Şekil 4.24. Kontrol ve 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin yarmada çekme dayanımı değerleri 78

Şekil 4.25. 7, 14 ve 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin karbonatlaşma derinliği değerleri 81

Şekil 4.26. Mermer tozunun bulunmadığı 1 kg/m^3 cam elyaf içeren beton numunesinde karbonatlaşma reaksiyonu gerçekleşen bölgenin SEM görüntüsü 82

Şekil 4.27. Mermer tozunun bulunmadığı 1 kg/m^3 cam elyaf içeren beton numunesinde karbonatlaşma reaksiyonu gerçekleşen bölgenin SEM görüntüsü ve EDX sonucu 83

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Değişik türdeki liflere ait fiziksel özellikler 4
Tablo 2.2. Bazı cam elyafların mekanik özellikleri ve bileşimleri 6
Tablo 2.3. Cam elyaf takviyeli betonların fiziksel özellikleri 8
Tablo 2.4. Karbonatlaşmayı etkileyen faktörler 20
Tablo 3.1. Kullanılan agreganın kimyasal ve fiziksel özellikleri 34
Tablo 3.2. TS elek numarasına göre yüzdelik oranları.....35
Tablo 3.3. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler.....36
Tablo 3.4. Kullanılan cam elyafa ait özellikler.....36
Tablo 3.5. Kullanılan atık mermer tozunun kimyasal ve fiziksel özellikleri 37
Tablo 3.6. Süperakışkanlaştırıcı katkının teknik özellikleri 38
Tablo 3.7. Karbonatlaşma deneyinde kullanılan sodyum dikromatın kimyasal ve fiziksel özellikleri.....39
Tablo 3.8. Deney için hazırlanan numunelere ait karışım oranları (kg/m^3**)** 40
Tablo 3.9. 100 gr suda değişik sıcaklıklardaki doymuş tuz çözeltileri 50
Tablo 4.1. Numunelerin ortalama porozite değerleri 56
Tablo 4.2. Numunelerin ortalama kapiler su emme katsayıları.....61
Tablo 4.3. Numunelere ait ortalama ultrases geçiş hızı değerleri.....65
Tablo 4.4. Beton numunelerine ait ortalama basınç dayanımı değerleri.....70
Tablo 4.5. Numunelere ait ortalama yarmada çekme dayanımı değerleri.....76
Tablo 4.6. Numunelere ait ortalama karbonatlaşma derinliği değerleri.....80

SEMBOLLER ve KISALTMALAR LİSTESİ

CSH : Kalsiyum Silikat Hidrat

K : Kılcal su emme katsayısı

P : Porozite

Q : Absorbe olan su miktarı

SEM : Scanning Electron Microscope

EDX : Enerji Dağılımlı X-Işınları Analizi

TS : Türk Standartları

V : Ses üstü dalga hızı

$\mathbf{W_{dyk}}$: Doygun yüzey kuru ağırlık

S/Ç : Su/Çimento

µm : Mikro metre

PÇ : Portland Çimento

RH : Bağıl nem

$\mathbf{CO_2}$: Karbondioksit

$\mathbf{CaCO_3}$: Kalsiyum karbonat

CE : Cam elyaf

MT : Mermer tozu

1. GİRİŞ

Beton; agrega, çimento, su ve katkı maddesinin belirli oranlarda karıştırılarak, plastik kıvamda döküldüğü kalıbın şeklini alan kompozit malzeme olarak tanımlanır. Betondan beklenen üç önemli özellik; işlenebilirlik, dayanıklılık (durabilite) ve dayanımdır. Beton, taze halde iken, kullanılacağı yerdeki şartlar ve donanım da dikkate alınarak kalıpları kolayca doldurabilecek ve sıkıştırılabilecek kıvamda olmalı, taşıma, yerine yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri sırasında kararlılığını korumalı, herhangi bir ayrışma ve su kusma problemine yol açmayacak şekilde tasarlanmış olmalıdır. Sertleşmiş haldeki betondan beklenen ise proje dayanımının belirli bir güvenlikle sağlanabilmesi ve servis ömrü boyunca maruz kalacağı iç ve dış yıpratıcı etkilere karşı kalıcı olmasıdır. Aynı zamanda, kaynak israfına yol açmayacak şekilde ekonomik olması gerektiği de dikkate alındığında, beton dizaynın aslında bir optimizasyon problemi olduğu görülebilir. Tüm bu şartları sağlayan betonun elde edilebilmesi, ancak çevre ve kullanım koşullarını da dikkate alan bir tasarım yaklaşımıyla, eksiksiz, doğru bir uygulama ile ve üretimin her aşamasının denetlenmesi ve kalite kontrolunun yapılması ile mümkündür [1].

Günümüzde beton üretiminde, hem maliyeti azaltmak hem de yüksek performans elde etmek amacıyla birçok araştırma yapılmaktadır. Çağımızda hızlı bir endüstrileşme ile birlikte malzeme ve enerji tasarrufuna verilen değer de artmaktadır. Bununla birlikte atık olarak doğaya terk edilen ve doğanın daha çok kirlenmesine neden olan birçok yan ürün oluşmaktadır. Bu ürünlerin birçoğunun malzeme özellikleri açısından inşaat sektöründe değerlendirilebileceği yapılan araştırmalar sonucunda belirlenmiştir. Mevcut malzemelerin geliştirilmesi ve atıl malzemelerin değerlendirilmesi, bir yandan ekonomi sağlamakta diğer yandan da çevreye verilen zararı azaltmaktadır [2].

Bu anlamda; betonun işlenebilirliği ve geçirimlilik üzerinde ince malzemenin belirli bir kısmı farklı malzemelerle değiştirilmesi yönündeki çalışmalar yaygınlaşmıştır. Mermer işletmelerinde açığa çıkan ve değerlendirilemeyen mermer havuz çökelti malzemesi yapısal olarak filler malzemesine benzemektedir. Bu açıdan, havuz çökeltileri ve diğer kırıntı mermerlerin çeşitli sektörlerde değerlendirilmesi ekonomi ve çevresel kirliliği önlemesi açısından önemli yarar sağlayabilir [3].

Betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini mineral, kimyasal katkılar ve atık malzemeler ile iyileştirilmesinin yanı sıra birçok lif de kullanılmaktadır. Lifler, betonun özelliklerini değiştirerek iyileştirmek amacıyla, taze beton içerisine çeşitli yöntemlerle

değişik oranlarda katılan polipropilen, cam, plastik ve çelik gibi değişik malzemelerden farklı tip, özellik ve boyutlarda üretilmektedirler. Lifleri tanımlayan en önemli öğe lifin sahip olduğu mekanik özellikler ile onun sayısal bir parametre gibi ifade edilmesini sağlayan biçimsel özelikleridir. Lifin tipi, uzunluğu, çapı, geometrik yapısı ve lifin çekme gerilme dayanımı önemli özelliklerindendir. Katılan liflerin karışımda homojen olarak dağılması ve karışımdan sonra bu dağılımın korunmasının sağlanması da liflerin betonun özellikleri üzerinde yapacağı iyileştirmeyi doğrudan etkilemektedir [4].

Betonun yerleştirilip döküldükten sonra bile zamanla dış etkilere maruz kalması sonucunda ortam şartlarına göre kendi içyapısında önemli değişimler meydana gelebilir. Bu değişimlerden biri karbonatlaşmadır.

Karbonatlaşma atmosferdeki karbondioksit ile betonun boşluk suyunda bulunan kalsiyum hidroksitin reaksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Betonarme betonun içine gömülü olan çelik betona büyük ölçüde alkalin özelliği veren boşluk suyundaki kalsiyum hidroksit tarafından korozyondan korunur. Karbonatlaşma sonucu betonun alkalin özelliği kaybolur ve çelik paslanır. Bu olay betonarme elemanlarının servis ömrünü belirleyen ana faktörlerden biri olarak kabul edilir [5].

Bu tez çalışmasında, karbonatlaşma hızına, mermer tozu ikamesi ve cam elyaf katkılı betonun etkisi araştırılmıştır. Betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla, farklı mermer tozu ve cam elyaf oranları belirlenmiştir. Belirlenen numunelerin karışım oranları hazırlanmıştır. Mermer tozu ve agreganın 0.25 lik elek altında kalan malzemeleri ikame edilerek kullanılmıştır. Üretilen beton numuneleri üzerinde porozite, ultrases geçiş hızı, kapiler su emme tayini, basınç ve yarmada çekme dayanım deneyleri, karbonatlaşma deneyi öncesi ve sonrası olmak üzere uygulanmıştır. Deneyleri yapılmış numunelerin SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri alınmış ve EDX (Enerji Dağılımlı X-Işınları Analizi) ile desteklenmiştir. Deney sonucu numunelerde oluşan fiziksel ve mekanik değişimler gerek mantıksal, gerekse sayısal olarak değerlendirilmiş ve irdelenmiştir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI ve GENEL BİLGİLER

Tezin bu bölümünde, lifli betonlar, lif çeşitlerinden cam elyaflar ve atık mermer tozu ile üretilen betonlar hakkında yapılan çalışmaların kaynak araştırması yapılmıştır.

2.1. Lifli Betonlar

Lifli beton, ince agrega ve kaba agrega adı verilen mineral dolgu malzemelerinin çimento, su karışımından oluşan bağlayıcı harç ile gerektiğinde çeşitli kimyasal ve mineral katkılarında eklenmesinden sonra katılan liflerin harç içerisinde homojen olarak dağılmasıyla elde edilen ve zamanla sertleşip dayanım kazanan bir malzeme olarak tanımlanabilir [6].

Lifler; betonda mekanik özelikleri iyileştirmek amacı ile kullanılmaktadır. Çekme dayanımı, yorulma dayanımı, aşınma dayanımı ve çatlak sonrası yük taşıma kapasiteleri bakımından zayıf özelliklere sahip gevrek bir malzeme olan betonda, lif katkısı betonların bu özelliklerinde belirgin iyileştirmeler sağlamaktadır. Beton içerisinde süreksiz bir şekilde dağılan liflerin betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azaltmakta, betonun şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, çarpma ve çekme dayanımı arttırmakta ve süneklik düzeyi yüksek betonlar elde etmeyi mümkün kılmaktadır. Lifler kendi çekme dayanımlarına ulaşıncaya kadar beton matrisinde basınç ve çekme yüklerinden dolayı meydana gelecek olan çok sayıdaki kılcal çatlak oluşumunu önlemekte ve azaltmaktadır. Böylece kırılma birim uzaması liflere oranla düşük olan çimento hamurunda meydana gelebilecek kılcal çatlaklar önlenmektedir. Lifler betonun büzülme çatlak genişliklerini azaltmakta ve büzülme hareketini sınırlamaktadır. Lifler çok yönlü çatlak oluşumunu sağlar, çatlak üzerinden gerilme transferi yaparlar ve bu gerilme transferi çatlakların kapanmasına müsaade edecek kadar uzun sürebilir. Yüksek çekme dayanımları ile birlikte düşük elastisite modülüne sahip çelik lif donatılı betonların rötre çatlakları normal betonlara oranla daha az olmaktadır. Liflerin büzülme özellikleri üzerinde iyileştirme yapması için matris içerisinde etkili olacak şekilde yeterli miktarda bulunması gerekmektedir. Ayrıca uzun lifler kuruma rötresinin sınırlandırılmasında daha etkili olmaktadır [2].

Bentur ve Mindess (1990); çalışmalarında rastgele dağılmış kısa liflerin (mikrolifler) çimento matrisinin tokluğunu arttırarak çatlakların başlamasını, ilerlemesini ve yayılmasını engelleyebildiği kanısına varmışlardır [7].

Ekincioğlu (2002), kısa ve uzun liflerin birlikte kullanıldığı uygulamalarda kısa liflerin önce mikro çatlakları engelleyerek çekme dayanımını artıracağını, çatlaklar makro düzeye geldiğinde de uzun liflerin kompozite süneklik sağlayacağını, bunun sonucu olarak da, betonun çekme dayanımının ve tokluğunun geliştirileceğini ifade etmektedir [8].

Lif kullanımın en belirgin avantajları;

• Yüksek taşıma kapasitesine sahip sünek betonlar elde edilmesi,

• Donatı korozyonunun oluşmadığı düzgün beton yüzeyinin elde edilmesi,

• Etkin çatlak kontrolü,

• Dayanıklılığı arttırması,

• Donatı işçiliğinde büyük ölçüde azalma, olarak sıralanabilir [2].

Durmaz (2007), tarafından yapılan bölgesel basınca maruz lifli betonlarda yatak mukavemetini incelendiği çalışmada, liflerin bölgesel yüklü betonlarda yatak mukavemetine etkisi yok denecek kadar az olduğu, ancak betonun üst yüzeyindeki çatlakların, lifsiz betonunkinden daha az olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda lifsiz betona göre çatlak ilerleme hızının da yavaşladığı belirtilmiştir [9].

Değişik türdeki liflere ait fiziksel özelikler Tablo 2.1'de görülmektedir.

Tablo 2.1. Değişik türdeki liflere ait fiziksel özellikler

Lif Cinsi	**Çekme Dayanımı (MPa)**	**Elastisite Modülü (10^3, MPa)**	**Max. Uzama (%)**	**Özgül Ağırlık (gr/cm^3)**
Akrilik	207-414	2,1	25-45	1,1
Asbestler	552-966	83-138	0,6	3,2
Pamuk	414-690	4,8	3-10	1,5
Cam	1035-3795	69	1,5-3,5	2,5
Naylon	759-828	4,1	16-20	1,1
Polyester	724-863	8,3	11-13	1,4
Polietilen	690	0,14-0,4	10	0,95
Polipropilen	552-759	3,5	25	0,90
Pamuk-Yün	414-621	6,9	10-25	1,5
Mineral Yünü	483-759	69-117	0,6	2,7
Çelik	276-2760	200	0,5-35	7,8

Tablo 2.1'e göre çelik lif ve cam elyaf, çekme dayanımı yönünden en iyi performansı gösteren lif cinsleridir. Çelik lifler özgül ağırlığı en fazla olan lif cinsi olarak ayrı bir özellik taşırlar [10].

Çalışmadaki deney numunelerin hazırlanmasında, cam elyaflı beton üzerinde araştırma yapıldığından cam elyaf dışındaki lifler üzerinde durulmamıştır.

2.2. Cam Elyaflar

Cam elyaflı kompozitlerle ilgili gelişmeler, 1960'lardan sonra Yapı Araştırma Kurumu (Building Research Establishment) İngiltere'de Dr. Majumdar'ın zirconyum oksit içeren, alkali dayanımlı cam elyaf üretiminde başarılı olup, bunu normal hidrate portland çimentosu ile karıştırarak patent almasıyla başlamıştır. 1971'de cam elyaf üretimi, gereken kaliteye ulaşmış ve teknolojik olarak gelişmiştir [11].

Cam elyafların çimento kompozitlerinin donatılmasında kullanımıyla ilgili ilk önemli çalışmaları, Sovyetler Birliği'nde Biryukovich ve arkadaşlarının 1960'lı yılların başlarında yaptıkları araştırma ve uygulamalar ile 1964 yılında yayımlandıkları bir kitap oluşturmaktadır. Ayrıca Çin Halk Cumhuriyeti'nde de 1958 yılından başlayarak, cam elayafların beton üretiminde, malzemenin donatılmasında kullanılmasıyla ilgili çalışmaların yapıldığı bilinmektedir.

İngiltere'de Yapı Araştırma Kurumu 1966 yılından itibaren özelikle cam elyafı ile donatı, buna uygun malzemenin seçimi ve donatıda kullanılacak cam elyafın özeliklerinin iyileştirilmesi üzerinde çalışmalarını yoğunlaştırmıştır. İnce tabaka şeklindeki ve kabuk yapımı şeklindeki uygulamalar burada ağırlık kazanmıştır. Özelikle, betona alkali ortamda tahrip olan E-camı elyaf yerine, 1971 yılında Pilkington Firması'nın, Yapı Araştırma Kurumu ve Britanya Grubu'yla birlikte, '' CEM FIL '' diye tanımlanan, alkali ortama dirençli cam elyaf üretmesi, bu alanda bir dönüm noktasını oluşturmuştur. Camın yapı bakımından alkali ortamda dayanıklı olmaması, özelikle mikron mertebesinde çapa sahip cam elyafların beton gibi çimento bağlayıcı içerisinde kısa sürede tahrip olmasına neden olmaktadır. Burada sözü edilen ''CEM FIL'' patentli cam elyafı, beton ve harçlardaki alkali ortama dayanıklı bir türdür. Alkaliye dayanıklı cam elyafları genelde 'Alkali Dirençli Cam Elyaf (AD Cam Elyafı)' diye adlandırılmaktadır. Yapılan bu çalışmaları, yine Pilkington'daki ve Japonya'daki ''daha üstün nitelikli'' cam elyaflar üzerinde yapılan çalışmalar izlemiştir. Polipropilen, naylon gibi sentetik lifler ve karbon liflerinin

uygulanabilirliği konusunda çalışmalar yürütülmüştür. Ancak, bu liflerin 1970'li yılların teknolojisiyle cam elyaflar kadar kolay üretilir olmaması, buna bağlı olarak maliyetlerinin daha yüksek oluşu nedeniyle, çelik teller ve polipropilen lifi yine de önemini korumuştur [12].

Bahadır (2007), beton içerisinde kullanılan liflerin kırılma tokluğu üzerindeki etkilerini incelediği çalışmasında, çelik lifli beton numunelerin, polipropilen ve cam elyaflı numunelere göre daha fazla enerji yutma kapasitesine sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca polipropilen lifli numunelerin, cam elyaflı numunelere göre daha fazla tokluk değerine sahip olduğu yapılan çalışmanın diğer bir sonucudur [13].

2.2.1. Cam Elyaf Üretimi

Cam elyaf; sertlik, korozyona dayanıklılık ve diğer malzemelerle fazla tepkimeye girmeme gibi tipik cam özeliklerini sergiler. Ayrıca esnek, hafif ve düşük maliyetli olmasından dolayı endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen lif tipidir. Cam elyaf yüksek dayanıma sahip olduğundan, elyaf yüzeyinde oluşan kusurlar hem sayıca az, hem de boyutça küçüktür [14]. Bazı önemli cam elyafların mekanik özelikleri ve bileşimleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Bazı cam elyafların mekanik özellikleri ve bileşimleri [15].

Özellikler	**Cam Tipi**			
	A	**B**	**E**	**S**
Özgül ağırlık (gr/cm^3)	2.50	2.49	2.54	2.48
Elastik modül (GPa)	-	69.0	72.4	85.5
Çekme mukavemeti(MPa)	3033.0	3033.0	3448.0	4585.0
Isıl genleşme katsayısı	8.6	7.2	5.0	5.6
Yumuşama sıcaklığı (°C)	727.0	749.0	841.0	970.0
SiO_2	72.0	64.4	52.4	64.4
Al_2O_3, Fe_2O_3	0.6	4.1	14.4	25.0
CaO	10.0	13.4	17.2	-
MgO	2.5	3.3	4.6	10.3
Na_2O, K_2O	14.2	9.6	0.8	0.3
B_2O_3	-	4.7	10.6	-
BaO	-	0.9	-	-

Bütün cam elyaflar elastisite modüllerinin benzer olmalarına karşın, farklı dayanım değerlerine sahiptirler ve çevresel etkilere karşı dirençleri de farklıdır. E tipi cam elyaflar, yüksek çekme dayanımı ve kimyasal direncin gerekli olmadığı uygulamalarda kullanılırlar. Bu tip camlar, düşük fiyat yüksek korozyon dayanımı ve iyi mekanik özeliklere sahip olduğundan yapısal takviyelerde de tercih edilirler. S tipi ve S-2 tipi camlar en yüksek dayanıma sahiplerdir fakat E tipine göre 3-4 kat daha pahalı olduklarından, kullanım alanları kısıtlıdır. Diğer cam elyaf tipleri ve uygulama alanları ise; C tipi; korozyon dayanımı gerektiren uygulamalarda, D tipi; elektrik akımına karşı direncin yüksek olması nedeniyle seramik sigorta gibi elektriğe dirençli malzemelerin üretilmesinde, A tipi ve AR tipi; yüksek alkalin dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılabilirler [14].

2.2.2. Cam Elyaf Takviyeli Betonların Özelikleri

Cam eyaflar, liflerle donatılı kompozitlerin üretiminde en çok kullanılan donatı malzemelerindendir. Cam elyaflı betonlar, portland çimentosu, ince agrega, alkali dayanımlı cam elyaf ve belirli katkıların belli oranlarda karıştırılmasıyla üretilen kompozit malzemelerdir. Ayrıca esnek, gerilebilir ve iyi çarpma dayanımına sahip bir malzemedir. Fiziksel özelikleri ve bilhassa ağırlığının önemi göze alınarak sayısız giydirme uygulamalarında ve farklı dizaynlarda kullanılırlar. Üstün özeliklerinin yanı sıra, ekonomik bir donatı türü olması bu sonucu ortaya çıkarmaktadır. Çeşitli matris malzemeleriyle kullanılmış olmasına karşılık, temel kullanım alanı cam takviyeli plastik (CTP) endüstrisidir.

Cam elyaflı betonların mekanik özellikleri; lif içeriğine, su-çimento oranına, boşluk oranına, kum içeriğine, lif dağılımına, lif uzunluğuna ve kür şekline bağlıdır. Cam ve polipropilen lifler rötre çatlakların oluşumunu ve içsel gerilmeleri engellemek için tercih edilmektedir. Cam elyaflar, düşük katkı oranlarında (1 kg/m^3, ün altında) kullanıldığında; beton içerisine dağılan binlerce lif, erken dönemde oluşan iç gerilmelerden dolayı meydana gelebilecek çatlakları, geçirgenliği azaltırken, uzun dönemde betonun atmosfer etkilerine ve dış aşındırıcı kuvvetlere karşı da direnç sağlar. Cam elyaflar, taze betonda terlemeyi ve tane ayrışmasını azaltmasına olumlu yönde katkı sağlamaktadır. Cam elyafın 1-20 kg/m^3 gibi yüksek oranlarda kullanılması durumunda ise; karıştırma ve pompalama sırasındaki işlenebilirliği olumlu yönde etkilemekte, betona eğilme dayanımı ve darbelere karşı direnç kazandırmaktadır [16].

Beton üretiminde kullanılan lif içeriğinde, optimum bir değerin üzerine çıkılmamalıdır. Lif içeriğinin yüksek olması durumunda karıştırma ve yerleştirme problemleri ortaya çıkar ve lifler karışım içerisinde topaklanır. Bu topaklanmalar matris içerisinde zayıf bölgelerin oluşmasına neden olur. Karışımda iri taneli agrega kullanılmaması, lif narinlik oranının optimum bir değerde olması, liflerin karışıma kuru katılması ve süperakışkanlaştırıcı kullanılması ile liflerin matris içerisinde homojen dağılması sağlanabilir [17]. Cam elyaf takviyeli betonların fiziksel özellikleri Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3. Cam elyaf takviyeli betonların fiziksel özellikleri [14].

Cam elyaf takviyeli betonun fiziksel özelikleri				
Özelik	Simge	Birim	PREMIX	SPRAY
Basınç Mukavemeti	fc	N/mm^2	40-60	60-80
Çekme Mukavemeti	fct	N/mm^2		5-10
Orantılık Oranı	LOP	N/mm^2	5-7	6-10
Kırılma Modülü	MOR	N/mm^2	8-12	15-25
Genleşme Sınırı	eu	‰	0,5-4	
Darbe Mukavemeti	-	KJ/m^2	10-15	10-25
Elastisite Modülü	E	kN/mm^2	10-20	10-20
Yoğunluk	γ	kg/dm^3	1,9-2,0	1,9-2,1
Isıl Genleşme Katsayısı	αT	/C	(1,0-1,5) x 10^5	(1.0-.15) x 10^{-5}
Isıl İletkenlik	λ	W/mk	0,8-1,2	0,8-1,2
Yangına Dayanıklılık (DIN 4102)	-	-	A1-A2	A1-A2
Rötre Değeri	εc s	mm/m		1,0-2,0
Şişme Değeri	K	mm/m	0,5-1,0	
Su Absorbsiyonu	-	%	3-15	
Su Buharı Difüzyonu	μ	-	50-200	

Lifler teorik olarak betona ne kadar çok katılabilirse kompozitin özeliklerini de o kadar çok artırabilirler, çünkü daha fazla lif çatlakların büyümesine karşı daha fazla direnç demektir. Lifler sayesinde tek çatlağın yayılması yerine düzensiz çoklu çatlaklar oluşur. Bu da kompozitin basınç ve eğilme dayanımı ile tokluğunun artırılmasında etkili olur. Uygulamalarda ise yerleştirme problemlerinden dolayı kompozite hacimce %3' ten daha fazla oranda lif katılmasına pek rastlanmaz, genelde de bu oran %1-2 civarında tutulur. Zollo; lifli betonları lif miktarına göre şu şekilde değerlendirmiştir [18]:

%0,1-%1 : Düşük lif yüzdeli

%1 - %3 : Normal lif yüzdeli

%3-%12 : Yüksek lif yüzdeli

Fakat son yıllarda yeni yöntemlerle bu oranın yükseltilebilmesi mümkün olmuştur. Örneğin ekstrüzyon yöntemi adı verilen yöntemle %7-8 civarında lif katılması mümkünken SIFCON üretiminde bu oran %4 ile %20 arasında mümkün olabilmektedir.

2.2.3. Cam Elyaflı Betonların Kullanıldığı Yerler

Cam elyaflı betonlar duvar panelleri, kolon kaplama, mimari süslemeler, harpuşta, vazo, fiskiye, kanalet, büz, beton duba, istinat duvarı elemanları, çeşitli kent mobilyaları gibi genel kullanıma yönelik ürünler de bu alanda örnekleri oluştururlar. Cam elyaflı betonların iyi işlenebilme özelliğinden dolayı, özelikle önemli oranda tarihi restorasyon çalışmalarında kullanılırlar. Avrupa'da farklı kullanım alanları da yaygındır: sandwich paneller, otobüs durakları, ses bariyerleri, geçici ve kalıcı kalıplar, yangın kapıları, bölme duvarları, kanallar, su depoları, oluk, kapı ve pencere çerçevesi gibi farklı kullanım alanları vardır. Cam elyaf takviyeli betonların doğal hafifliği ve üretim kolaylığı, yaratıcı kullanımlara, tasarım özgürlüğüne, değişikliğine ve yeniliğine olanak sağlar [11].

Literatürde cam elyaf ile yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Bu tez çalışmasından farklı olarak yer alan çalışmalardan bazıları şunlardır:

Tuna (2010), çalışmasında, yapının kabuğunu oluşturan cam elyaf takviyeli çimento (CTÇ/GRC) cephe panellerinin, su emme, boşluk yapısı ve geçirimlilik deneyleriyle malzemenin fiziksel özelliklerini incelemiştir. Daha sonra, tekrarlı hava şartlarında yıpranma, don tesirlerine dayanıklılık ve rutubet nedeniyle en büyük boyutsal değişimlerin ölçülmesi deneyleriyle, malzemenin durabilite özelliklerini gözlemleyerek, tekrarlı hava şartlarında yıpranma deneyi numunelerine, tabii don tesirlerine, dayanıklılık

deneyi numunelerine ve kontrol numunelerine eğilme deneyi yapmış ve malzemenin mekanik özelliklerini araştırmıştır [19].

Baştürk (2008), çalışmasında, C20 ve C16 beton sınıflı malzeme kullanarak hazırladığı 14 adet 150x300 mm boyutlu silindir numunelere, elyaf takviyeli kompozitleri (karbon elyafı ve cam elyafı) tek kat ve çift kat olarak sarmıştır. Oluşturulan lifli kompozit malzemeler ile şahit numunelerin basınç dayanımları, gerilme-zaman, yük-zaman değerleri yapılan deneylerle belirlemeye çalışmıştır. Sonuçlara göre, şahit numunelerin ortalama basınç dayanımları ile kompozit sarılı beton numunelerin basınç dayanımlarını karşılaştırmalı olarak sunmuştur [20].

Yıldız ve Ulucan (2008), çalışmalarında; ağırlıkça %0,2, %0,4 ve %0,6 oranlarında cam elyaf katılarak elde ettikleri beton boruların tepe yükü dayanımlarındaki değişimini araştırmışlardır. Cam elyaflı boruların kırılma yüklerinin, lifsiz boruların kırılma yüklerinden daha fazla olduğunu ve cam elyaf oranı arttıkça tepe yükü dayanımlarında artış gözlendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca aynı şartlarda dökülmüş beton borular, bir yıl toprak altında bekletilerek ve içerisinden pis su ve yağmur suları geçirilerek tepe yükü dayanımları araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, 28 gün sonunda, % 0,6 cam elyaf katkılı boruların tepe yükü dayanımlarında %21,54'lük bir artış sağlanırken, bir yıl sonrasında bu değer aynı cam elyaf oranı için %27,40 değerine yükselmiştir. Cam elyaf oranının arttırılması ile beton boruların daha fazla deplasman yaptığı ve boruların kırılma yüklerinin arttığı görülmüştür [21].

Kurt (2006), değişik oranlarda cam elyaf içeren ve farklı S/Ç oranına sahip betonların basınç dayanımları, elastisite modülleri, yarmada çekme dayanımları, kırılma enerjileri, karakteristik boylarının birbiriyle ve cam elyaf içermeyen betonlarla karşılaştırarak, mekanik davranış ve özeliklerini değerlendirmiştir. S/Ç oranı 0,34 olan yalın betonun (matris) kırılma enerjisi, cam elyafın eklenmesiyle 109 katına kadar ulaştığını belirtmiştir. S/Ç oranı 0,36 olan fibrobetonda ise matrise kıyasla kırılma enerjisi 66 kat arttığını, böylece cam elyaf takviyeli kompozitler yalın olanlara kıyasla daha tok ve sünek davranış sergilediğini belirtmiştir. Cam elyaf takviyeli betonlarda, cam elyaf içeriği arttıkça yarmada çekme dayanımının %52-73 oranında arttığını ve cam elyaf içermeyen betonlara göre cam elyaf içeriği arttıkça, silindir basınç dayanımlarında %3,5-20 arasında, elastisite modüllerinde ise %3,2-10,5 arasında azalma oluştuğunu tespit etmiştir [12].

Yaprak ve ark., (2004), yapmış oldukları çalışmada, uçucu kül ve çelik lif ile üretilen betona 0,5, 0,75, 1,0, ve 1.25 kg/m³ cam elyaf katılarak, betonun basınç ve çekme

dayanımındaki değişimlerini araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda, cam elyafın, basınç ve çekme dayanımına olumlu yönde etkide bulunduğunu belirtmişlerdir [22].

Yıldız ve Keleştemur (2000), çalışmalarında, %0,2, %0,4 ve %0,6 ağırlık oranlarında cam elyafla katkılandırılmış beton matrisli kompozit malzemenin mekanik davranışlarını araştırmışlardır. Cam elyafla katkılandırılan betonun çekme ve eğilme dayanımlarının arttığı, basınç mukavemetinin ise azaldığı yapılan deneylerde tespit edilmiştir. Üç nokta eğilme deneyleri ile elde edilen mukavemet sonuçlarının, dört nokta eğilmeye göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir [23].

2.3. Mermer Tozu

Mermer tozu, ısı, basınç ve sulu çözeltilerin etkisiyle $CaCO_3$ (kireçtaşı) ya da $CaMg(CO_3)_2$ [dolomitin], metamorfoza uğraması sonucunda yeniden kristalleşmesiyle ortaya çıkan kayaçların (kristalize kalker), düzgün geometrik şekil alabilmesi için kesilmesi sürecinde elde edilmektedir.

Bileşimlerinin %90-98'i $CaCO_3$'ten oluşurken, düşük oranda $MgCO_3$ içermektedir. $CaCO_3$ kristallerinden oluşan mermerlerde esas mineral "Kalsit"tir. Aynı zamanda az miktarda silis, silika, feldspat, demiroksit, mika, fluorin ve organik maddeler bulunabilir. Renkleri genellikle beyaz ve grimsidir. Fakat yabancı maddeler nedeniyle sarı, pembe, kırmızı, mavimtırak, esmerimsi ve siyah gibi renklerde de olabilirler. Mikroskop altında incelendiğinde, birbirine iyice kenetlenmiş Kalsit Kristalleri'nden oluştuğu görülür [24].

Türker vd. (2002), farklı oranlarda mermer tozu kullanarak ürettikleri çimentolarda CH morfolojosinin portland çimentosundan tamamen farklı olduğunu ve reaksiyon ürünlerinin kalsit kristallerinin çevresinde toplandığını belirtmişlerdir [25].

2.3.1. Atık Mermer Tozlarının Çevresel Etkileri

Mermer atıklarının ekosisteme ciddi zararları vardır. Bu atıklar çevreye ait fiziksel, kimyasal ve biyolojik bileşenlere önemli ölçüde etki eder.

- Karada toprağın porozitesini ve su emmesini azalttığı için ürün verimini düşürür. Bu alanlarda bitkisel yaşam yok olur.

- Küçük parçalar havada uçuşur ve hava kirliliğine sebep olur. İnsan sağlığını etkiler ve nehirlerde, kanallarda yoldan akan su içinde hem suyun kalitesini bozar hem de suyun depolanma kapasitesini düşürür.
- Karada uzun süre kaldıklarında suyun akış rejimini engeller ve yer altı su havzaları üzerinde olumsuz etki yapar. Ayrıca yolların yapısını bozmakla beraber araçların ilerleyişini engeller.
- Etrafa dağılan atık yığınları görsel açıdan çevreyi çirkinleştirir. Yerleşim alanının turizm ve endüstriyel potansiyeli üzerinde olumsuz etki yapar [26].

Mermer fabrikalarında üretim atığı olarak çıkan toz atıklar genellikle değerlendirilmemekte ve çevresel açıdan kirliliğe yol açmaktadır. Atıkların faydalı biçimde kullanılmasını sağlamak, sürdürülebilir gelişimi başarmak için çok önemli bir çevresel girişimdir. Öte yandan bilimsel araştırmalar olmadan yapılan bir geri dönüşüm tam aksine daha kötü etkilere sebep olabilir. Başarılı bir araştırma ve yeni yapı malzemesinin geliştirilmesi veya atık bileşenin hammadde olarak kullanımı, teknik, çevresel, finansal, pazarlama, kanunlar ve sosyal açıdan bakıldığında çok karmaşık ve disiplinler arası bir iştir.

Endüstriyel atıkların alternatif yeni malzemelerin gelişiminde kullanılması veya hammadde olarak kullanımı düşük maliyet sağlayacağı gibi çevrenin korunmasını da beraberinde sağlayacaktır [27].

Gürü ve ark., (2007), çalışmalarında tarım alanlarına, sağlığa ve çevreye olumsuz etkileri olan mermer tozlarının, uçucu külün, hurda termoplastiklerin bu araştırma sonucunda elde edilen malzeme ile bir taraftan kirlilik önlenirken diğer taraftan ekonomiye önemli kazançlar sağlanabileceğini belirtmişlerdir [28].

Bilgin (2010), çalışmasında; ocaklarda ve işleme tesislerinde oluşan mermer atıklarını yapı malzemesi üretiminde kullanmak ve dolayısıyla çevreye olan zararlarını en aza indirerek hem çevreyi korumak hem de hammadde ve enerjiden tasarruf ederek ekonomiyi kalkındırmak istemiştir. Çalışmada; üç farklı yöreye ait ocaklardan alınan atık tozlar karakterizasyon testlerinin ardından yapay mermer karo ve tuğla üretiminde kullanılmıştır. Sonuçlar mermer atıklarının ağırlıkça %20 oranda reçine ile karıştırılarak en iyi özellikte karo üretimini sağladığı ve tuğla harcı içerisinde %50'ye kadar kullanılarak değerlendirilebileceğini göstermiştir [29].

2.3.2. Mermer Atıklarının Değerlendirildiği Yerler

Mermer toz atıklarının değişik alanlarda kullanılabilme imkânını belirleyen en önemli özellikler, kimyasal bileşim, tane boyutu ve renktir. Mermer tozlarının kimyasal bileşimindeki $CaCO_3$ oranının büyüklüğü, kullanım alanını genişletmekte ve endüstride oldukça fazla ihtiyaç duyulan kalsitin yerine kullanılabilme imkânı oluşturmaktadır. Zira özellikle İtalya'da Carrara mermerlerinin atıkları ve blok alınamayan ocaklardaki mermer oluşumları kalsit olarak üretilip endüstrinin kullanımına sunulmaktadır [30]. Ancak burada kalsitin yerine kullanılabilme kriteri, yüksek $CaCO_3$ yüzdesi ve beyazlıktır. Tane boyutu ise kullanılan sektöre göre 1-2 μ'dan 50-100 μ'a kadar küçük boyutlarda istenmektedir [31]. Bu tez çalışmasında beton üzerine çalışıldığı için mermer tozunun inşaat alanında kullanılabilirliği araştırılmıştır.

İnşaat alanında mozaik, yapı taşı, çimento, harç ve sıva olarak kullanıldığı gibi kireç elde edilen en önemli hammaddelerden de birisidir. Kireç elde edilecek kireçtaşlarının mineralojik bileşimindeki oranı %5'i aşmamalıdır. Karo imalatında % 10-12 oranında boyutu 0,5 mm'nin altında olan mermer tozu kullanılmaktadır [32].

Özata (2009), çalışmasında bağlayıcı olarak polimer atıklarının ve dolgu maddesi olarak mermer tozlarının kullanılarak inşaat malzemesi niteliğinde maddelerin üretilmesini hedeflemiştir. Çalışmasının sonunda, polimerik beton türündeki kompozit malzemelerin ayarlanmış kompozisyonlarda belirli mukavemete getirilerek, inşaat malzemesi olarak kullanılabileceği görülmüştür [33].

Garcia ve ark., (2003), mermer artıklarının kimyasal analizlerini gerçekleştirmişler ve yapısında %99 oranında karbonat içeren taneciklerin varlığını tespit etmişlerdir. Buradan yola çıkarak, seramik ürünlerin eldesinde mermer artıklarının kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Bu amaçla duvar kaplamalarda kullanılan seramik malzeme üretmek amacıyla kalsit ve dolomit içerisine az miktarda mermer tozu ilavesinin de mümkün olabileceğini göstermişlerdir [34].

Çimento sanayiinde her ne kadar çok miktarda $CaCO_3$ bileşimli hammaddeler kullanılsa da mermer sadece beyaz portland çimentosu yapımında kullanılmaktadır. Nem oranının çok yüksek olması, çimento sanayiinde kullanılmasında olumsuz etki yapmaktadır. Çimento sanayiinde nem oranı max. %15 oranında istenirken, atıklarda bu oran çok yüksektir. Kurutma masrafı nedeniyle, bu sektörde sorun olmaktadır.

Stabilizasyon malzemesi olarak ise yollarda kullanılabilmektedir. Kireç, yol zeminindeki kil mineralleri ile birleşerek plastisite, genleşme ve kabarma katsayılarına etki eder. Ayrıca mıcır olarak da yol yapımlarında kullanılır [32].

Gücek (2011), çalışmasında mermer tozu ve uçucu külün kil zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabilirliğini araştırmıştır. Numuneler kil zemin kuru ağırlığına göre mermer tozu (%5, %10 ve %15) ve uçucu kül (%10, %20 ve %30) ile belli oranlarda karıştırılarak elde edilmiştir. Numunelere, Kaliforniya taşıma oranı (CBR), şişme, donma-çözünme öncesi ve sonrası eksenel basınç deneyleri uygulanmıştır. Sonuçta mermer tozu ve uçucu kül katkısının dayanımı yükselttiği, şişmeyi azalttığı gözlenmiştir. Ayrıca en uygun karışım oranının %10 MT + % 20 UK olduğunu belirtmiştir [35].

2.3.3. Beton Üretiminde Mermer Tozunun Filler Malzeme Olarak Kullanımı

Betonun işlenebilirliği ve geçirimlilik üzerinde ince malzemenin belirli bir kısmı farklı malzemelerle değiştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Mermer işletmelerinde açığa çıkan ve değerlendirilemeyen mermer havuz çökelti malzemesi yapısal olarak filler malzemesine benzemektedir. Yapılan çalışmalara göre, kırma taş tesislerinde taşların kırılması sonucunda açığa çıkan ve taş unu adı verilen ince malzemenin beton karışımına %14 oranında ince agrega olarak katılması ile üretilen numuneler üzerinde yapılan deneylere göre betonun basınç dayanımı normal betonun özelliklerine yakın sonuçlar verdiği vurgulanmaktadır [36].

Şimşek (1999), düşük dozajlı betonlarda işlenebilmenin sağlanabilmesi için 0,25 mm'den küçük tanelerin bulunmasında büyük yarar olduğu, yüksek dozajlı betonlarda ise ince malzemeye gerek olmadığını belirtmiştir. Aynı çalışmada düşük dozajlı beton üretiminde ekonomik, işlenebilir ve dayanımlı beton elde edebilmek için çimento hamurunun, içyapıda boşlukları doldurmada yetersiz kaldığı durumlarda tane çapı 0,25 mm'den küçük kum, taş unu, kırma taş tozu ve mermer tozu gibi malzemelerin kullanılabileceği belirtilmektedir [37].

Vlahovic vd. (2011), fillerin beton özelliklerine etkisini temelde tane şekli ve boyut etkisine bağlı olduğunu belirtmesine rağmen, Moosberg-Bustnes vd. (2004), en büyük boyutu 125 mikron olan filler malzemenin fiziksel boyutta çimento taneleri arasındaki boşlukları doldurarak betonun kompasitesini geliştirdiğini belirtmiştir. Ayrıca kimyasal düzeyde çimento taneleri ile bütünleşerek nükleasyon (hidrate elemanların kristalleşmesini

veya meydana gelmesi) gibi hareket ederek hidratasyonu geliştirdiği ve çimentonun bileşenleri ile reaksiyona girerek (örneğin kalsiyum hidroksit ile) çimento jeli formunu aldığını belirtmiştir. Beton içindeki boşluklar; iri parçalar ile ince parçalar arasındaki boşluklar ve iri parçalar arasında oluşan boşluklar olmak üzere iki farklı durumda oluşur [38,39].

Taşdemir ve Atahan (1996), fillerin agrega-harç ara yüzeyindeki boşlukların doldurulmasında önemli rol oynadığını, betonun geçirimliliği ve bunun sonucu olarak durabilitesi için yararlı sonuçlar verebileceğini belirtmişlerdir [40].

Uğurlu (1996), fillerin beton üzerinde geçirgenlik, su emme ve porozite değerlerinde iyileşmeler olduğunu tespit etmiştir [41].

Ceylan ve Mança (2013), çalışmalarında; iri parçalı mermer atıklarının, beton agregası olarak kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Mermer parça atık agregası ve kontrol grubu kırmataş agregası ile beton numuneleri üreterek, elde edilen bulgulara göre mermer atık agregaların değerlerinin kontrol grubu ile çok yakın olduğunu belirtmiştir. Beton numunelerine basınç dayanımı, Schmidt yüzey sertliği ve ultrasonik ses geçirgenliği deneyleri uygulamıştır. Bu sonuçlara göre; parça mermer atıklarının beton agregası olarak kullanımının uygun olacağı düşünülmektedir [42].

Özel ve ark. (2012), çalışmalarında; S/Ç oranı 0,50 ve 0.55 olarak üretilen betonların içine farklı oranlarda filler olarak kullanılan mermer tozunun taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Mermer tozu oranı, S/Ç oranı, çimentonun mukavemeti ve çökme değerlerinin girdi olarak kullanıldığı sertleşmiş özelliklerinin tahmin edildiği bulanık mantık modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model ile deneysel sonuçlar arasında yüksek belirleyici katsayıları (0.9903-0.9995) elde edilmiştir. Filler oranı ve bazı temel parametreler kullanılarak sertleşmiş beton özelliklerinin bulunması için bulanık mantığın kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır [43].

Ünal ve Kibici (2001), çalışmalarında mermer atıklarının beton karışımı içerisinde, ince malzeme olarak kullanılması durumunda beton basınç dayanımına etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmada, üretilen beton karışımlarında ince malzeme olarak kumun yanında hacim olarak %0, %10, %15 ve %20 oranlarında mermer tozu katılmıştır. Max. agrega tane çapı 16 mm ve S/Ç oranı 0.65 olarak seçilen karışımlarda çimento dozajı 300 ve 350 kg olmak üzere toplam 8 seri beton üretilmiştir. Üretilen mermer tozu katkılı beton numuneler üzerinde basınç dayanımı, ultra ses hızı ve kılcal su emme deneyleri

yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre mermer tozunun belirli oranlarda karışıma katılması beton özelliklerine olumlu bir etki yapabileceği gözlenmiştir [44].

Ceylan (2000), mermer toz atıklarının endüstriyel hammadde olarak kullanılabilirliğini incelemiştir. Mermer toz atıklarının derz dolgu malzemesi üretiminde kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla dört özelliği analiz edilmiştir. Bu özellikler, tane boyut dağılımı, kimyasal bileşim, beyazlık ve rutubet oranıdır. Analiz bulgularında, fabrikalardan alınan mermer toz atıklarının $CaCO_3$ oranlarının yüksek çıkmasına rağmen, tane boyut dağılımı, beyazlık ve rutubet oran değerlerine göre, derz dolgu malzemesi üretiminde doğrudan kullanımının mümkün olmadığı anlaşılmaktadır. Bu durumda, mermer toz atıklarının, derz dolgu malzemesi üretiminde kullanılabilmesi için, temizlenmesi, kurutulması ve öğütülmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Kırma ve eleme sonucu elde edilen Afyon Şeker, Roza1ya ve Bilecik Bej mermerlerine ait tozların tane boyut dağılımı, kimyasal bileşim, beyazlık ve rutubet oranı analizlerinden, derz dolgu malzemesi üretiminde kullanılabileceği anlaşılmaktadır [45].

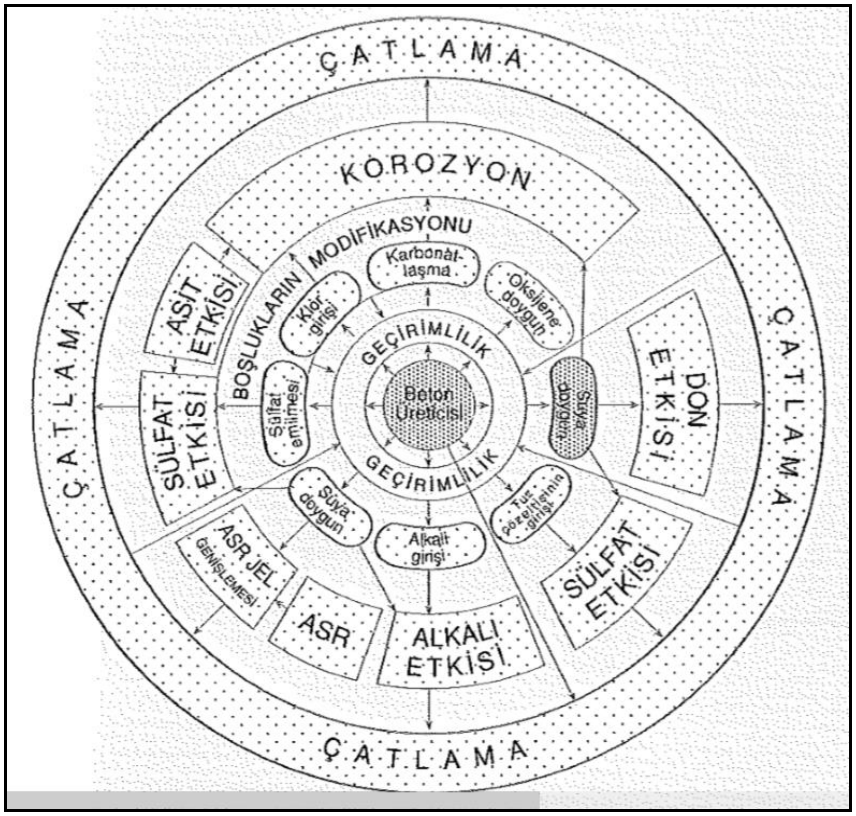
2.4. Betonda Dayanıklılık (Durabilite)

Betonun dayanıklılığı (durabilite), betonun dış etkilere maruz kalması sonucu oluşabilecek bozulmalara karşı göstereceği dirençtir. Yapıların uzun ömürlü olması sadece doğru taşıyıcı sistemin seçimi, projelendirilmesi ve imal edilmesine bağlı değildir. Aynı zamanda, yapının mantıklı bir zaman süreci içerisinde kalıcı denecek kadar uzun ömürlü olmasını sağlayacak önlemler alınmalı ve en az bakımı gerektirecek şekilde yaşlanması yavaşlatılmalıdır [46]. Beton durabilitesi, betonun boşluk yapısı ve betondaki boşlukların dağılımı ile doğrudan ilgilidir. Beton üretiminde S/Ç oranının yüksek olması ve betonun kötü yerleştirilmesi gibi etkilerle betonda boşluk oranı artmaktadır [47]. Betonun içerisine sızan su, karbondioksit, oksijen, sülfat, asit ve klorür gibi maddeler, betonda değişik türlerdeki kimyasal olayların oluşmasına neden olmaktadır [48]. Bu nedenle betonun fiziksel ve kimyasal etkilere karşı direnci azalmaktadır. Bu etkilere örnek olarak; kıyı veya açık deniz yapılarındaki dalga hareketi, donma-çözülme ve ıslanma-kuruma gibi fiziksel nedenlerden ileri gelebileceği gibi asit, klorür, sülfat etkisi, karbonatlaşma betonun içerisindeki çeliğin korozyonu ve alkalisilika reaksiyonu gibi kimyasal nedenler de söz konusudur. Alt yapıda ve binalarda kullanılan beton için üretim sırasında ve kullanımda,

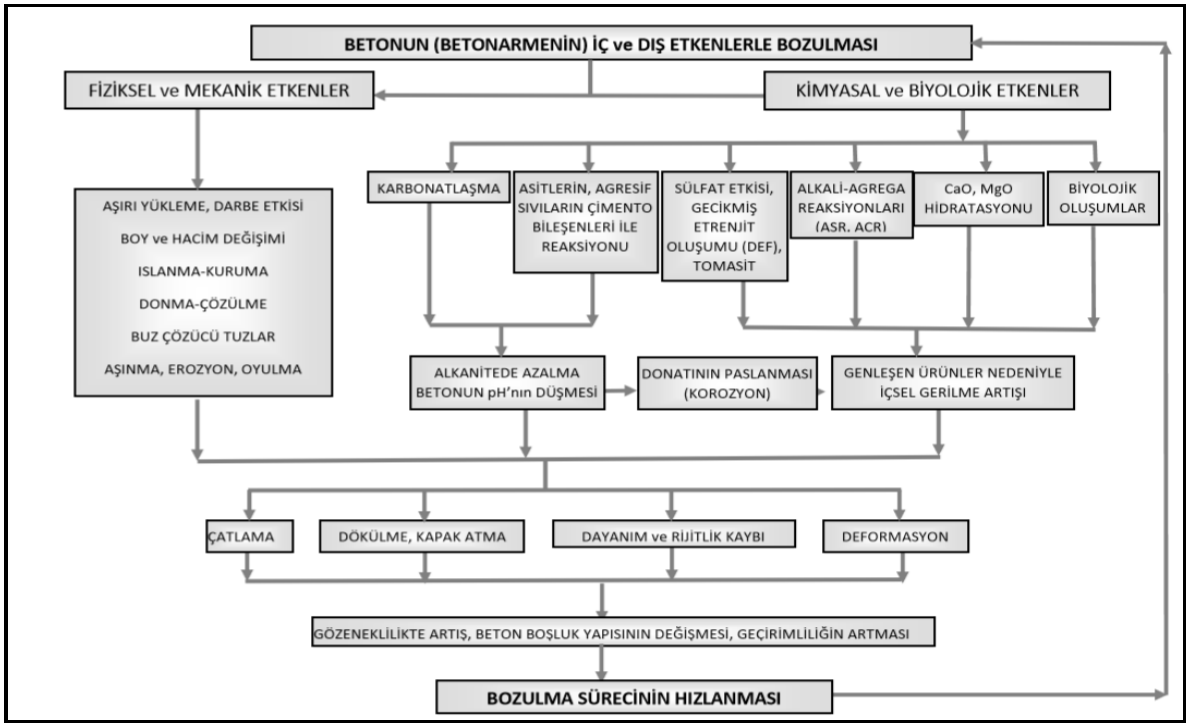
ortam koşullarının gerektirdiği önlemlerin alınmaması durumunda durabilite sorunuyla karşılaşılır [46].

Betonda mekanik etkiler dışında bozulma süreçlerini kontrol eden ana faktör, ortamda su veya nemin varlığıdır; çünkü su, beton içine zararlı maddeleri taşır ve kimyasal reaksiyonların oluşumunu hızlandırır. Suyun taşınımı, beton içerisindeki boşlukların türüne, çapına, dağılımına ve mikro veya makro boyuttaki çatlakların varlığına bağlıdır. Beton bünyesinde veya hemen yakın çevresindeki sıcaklık, nem ve kimyasal maddelerin taşınım mekanizması betonun kalıcılığını etkileyen önemli faktörlerdir [49].

Yapılan çalışmalara göre, betonda kimyasal kullanımıyla daha az su miktarında istenilen işlenebilmeyi sağlamak mümkündür. Bunun yanında mineral katkı kullanımı ile beton içerisindeki boşluklar azalmakta ve betonun dış etkilere karşı direnci artmaktadır [48]. Beton ne kadar boşluksuz olursa geçirimliliği de buna bağlı olarak düşük olur; bu da betonarme yapılarda, beton içerisindeki çeliğin kimyasal etkilere maruz kalmadan, servis süresi boyunca sağlıklı bir şekilde hizmet vermesini sağlar [46].



Şekil 2.1. Geçirimlilik-hasar girişimi diyagramı [50].



Şekil 2.2. Beton veya betonarme yapıların iç ve dış etmenlerle bozulması [51].

Şekil 2.2'de açık bir şekilde kalıcılığı etkileyen parametreler gösterilmektedir. Betonun dayanıklılığını olumsuz etkileyen bu olaylardan betonda oluşan karbonatlaşma etkisi hakkında araştırma yapılmıştır.

2.5. Betonda Karbonatlaşma

Çimento içinde bulunan ana bileşenlerinden (trikalsiyum silikat, dikalsiyum silikat, trikalsiyum alüminat, tetrakalsiyum alüminoferrit) başka, belirli oranlarda CaO, MgO, SO_3, Na_2O, K_2O gibi oksitler de bulunur. Silikatların ve alüminatların su ile birleşmesi sonucu silikat hidratlar (C-S-H) ve alüminat hidratlar (C-A-H) meydana gelmektedir. Silikatların hidratasyonundan ayrıca (C-H) açığa çıkar, bu serbest kireç, baz ortam oluşturarak, betonarme elemanlarda donatıyı korozyona karşı korur. Serbest kireç havanın CO_2 (karbondioksit) etkisi ile betonun hava ile temas eden yüzeyinden başlayarak karbonatlaşır, beton yüzey sertliği artar ve suda çözünmez hale gelir. Karbonatlaşmamış bölgelerdeki serbest kireç su ile karşılaştığında erir ve yeri boşluk kalır, betonun dayanımı düşer, dayanıklılığı azalır. Basit tarifle alkalin birleşimi sayesinde betonarme donatılarını korozyondan koruyan beton, zamanla karbonatlaşarak bu niteliğini kaybeder [52]. Beton yüzeyi ile temas eden ve betonun içine giren CO_2, betonun içerisinde bulunan kalsiyum

hidroksitle ($Ca(OH)_2$) reaksiyona girerek kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) oluşturmakta ve bir miktarda su açığa çıkarmaktadır (Eşitlik 2.1). Buradaki su kuruduğu zaman betonda karbonatlaşma büzülmesi oluşarak, çatlamaya neden olmakta ve böylece karbonatlaşmanın hızlanmasını kolaylaştırmaktadır [53].

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (2.1)$$

Atmosferdeki gazlar betonun gözenek sistemine işlerler ve gözenek suyu ile reaksiyona girerler. Karbonatlaşma olayında, havadaki CO_2, karbonatlaşmamış bölgedeki boşluk suyunda çözünür ve bikarbonata dönüşür. İnce bir su filmi ve devamlı CO_2 akışı gerektiğinden bağıl hava nemi %30'un altındaki değerinde CO_2 gazı, karbonik asite dönüşmez ve karbonatlaşma meydana gelmez. Havanın bağıl neminin %60 olması, karbonatlaşmanın oluşabileceği en uygun ortamdır. Nemin %90'ın üzerinde olması durumunda karbonatlaşma reaksiyonu pratik olarak durmaktadır. Suya doygun bir betona, CO_2 difüzyonu ihmal edilebilir mertebelerde olduğu için karbonatlaşma meydana gelmez [49].

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \text{ (Karbonik Asit)} \quad (2.2)$$

Boşluk suyunda çözünen bir diğer madde $Ca(OH)_2$'dir Eşitlik 2.3'te ayrışan $Ca(OH)_2$, karbonik asit (H_2CO_3) ile reaksiyona girerek kararlı haldeki nötr bir tuz olan kalsiyum karbonata ($CaCO_3$) ve suya (2.4, 2.5) dönüşür.

$$Ca(OH)_2 \leftrightarrow Ca^{++} + 2(OH)^- \quad (2.3)$$

$$Ca^{++} + 2(OH)^- + H_2CO_3 \leftrightarrow CaCO_3 + 2\,H_2O \quad (2.4)$$

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (2.5)$$

Doğal koşullarda şehirlerdeki havada CO_2 oranı %0.03 iken endüstriyel bölgelerde normalin 10~100 kat fazlasına rastlanmaktadır [54,55]. Bu sorunun sanayileşmiş kentlerde daha büyük boyutlu olduğu görülmektedir. Karbonatlaşma, beton yüzeyinde başlayarak, betonun iç kısmına doğru ilerlediğinden, yüzeye yakın bölgeler karbonatlaşmanın etkisi altındadır. Beton yüzeyinden iç bölgelere doğru hızı azalan karbonatlaşma reaksiyonu; betonun iç yüzeyine doğru CO_2 girişinin zorlaşmasıyla yavaşlamaktadır [49].

Karbonatlaşmanın gerçekleşme hızı, havadaki CO_2'e, neme ve betonun geçirimliliğine bağlıdır. Karbonatlaşma, betonun bozulmasına yol açmaz ancak betonun içyapısında meydana getirdiği değişiklikler nedeniyle önemli sonuçlar doğurur [56].

2.5.1. Karbonatlaşmanın Betona Olumsuz Etkileri

- Karbonatlaşma sonucunda; sertleşmiş çimento hamuru büzülme göstermekte ve bundan dolayı betonda çatlaklar oluşmaktadır.
- Kalsiyum hidroksitin çözünmesiyle, betonun içerisindeki alkalin ortam daha düşük düzeye inmektedir. Alkalinitenin azalması ile betonda karbonatlaşmanın yer aldığı bölgelerdeki betonarme demirlerinin korozyonu daha hızlı olabilmektedir.

2.5.2. Karbonatlaşmanın Betona Olumlu Etkileri

- Beton dayanımında çok az bir artış meydana gelmektedir. Bunun nedeni, karbonatlaşma olayı sonunda bir miktar suyun serbest kalmasıdır. Serbest kalan su, çimentoda yer alan hidratasyona yardımcı olmaktadır.
- Karbonatlaşma nedeniyle oluşan $CaCO_3$ kristalleri, çimento hamurundaki kapiler boşlukların içerisine yerleştikleri için beton nispeten daha geçirimsiz olabilmektedir [53].

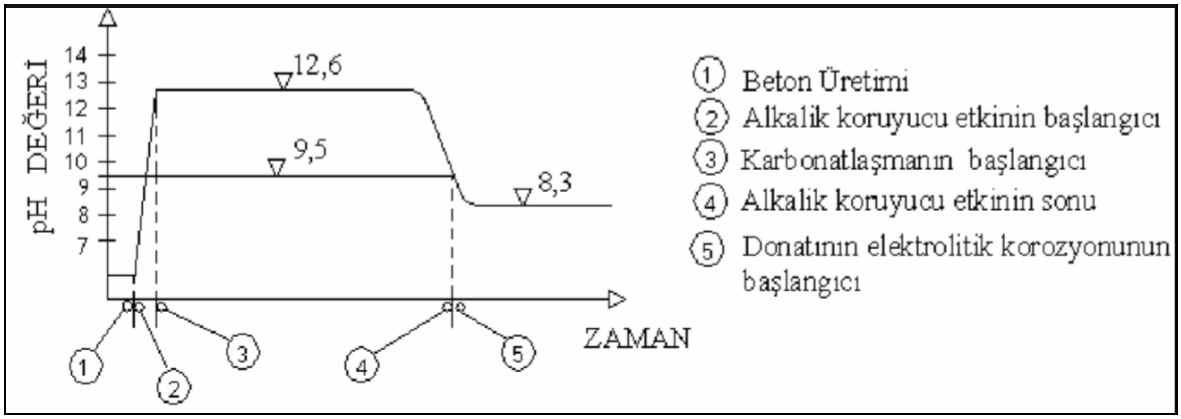
Tablo 2.4. Karbonatlaşmayı etkileyen faktörler [57,58].

Faktör	**Karbonatlaşma hızı**	
S/Ç oranı	Artarsa	Artar
Kür süresi	Artarsa	Azalır
Çimento dozajı	Artarsa	Azalır
Betonun kuruması	Artarsa	Azalır
Suya doygunluk	Artarsa	Azalır
Bağıl nem %50-70		MAX.
CO_2 konsantrasyonu	Artarsa	Artar
Betonun alkali içeriği	Artarsa	Artar
Beton basınç dayanımı	Artarsa	Azalır
Sıcaklık (normal)	Artarsa	Artar
Sıcaklık (aşırı)	Artarsa	Azalır

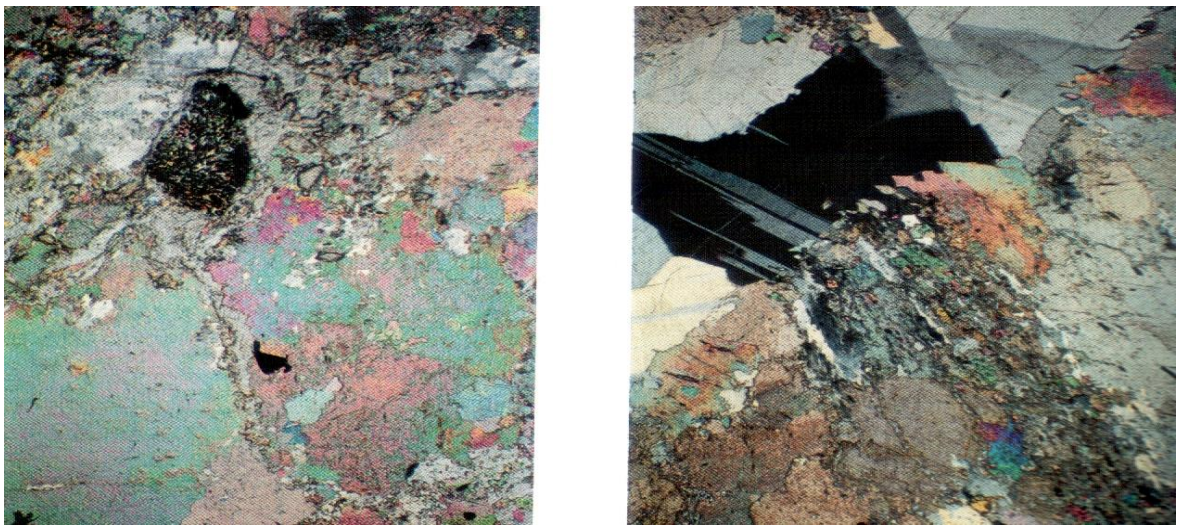
2.5.3. Karbonatlaşmanın pH Değerine Etkisi

Taze betonun pH değeri 12,5–13,2 arasındadır. Karbonatlaşma olayı ile bu değer 8-9 arasında bir değere düşer ve betonda alkali ortam kaybolur. Böylece beton içerisindeki donatıda paslanma meydana gelmesi için zemin meydana gelir.

Betonun alkalinitesi, büyük ölçüde, çimentonun hidratasyonundan kaynaklanan ve gözenek suyu içindeki çözünmüş $Ca(OH)_2$ tarafından sağlanır [59]. Şekil 2.3'te görüldüğü üzere beton üretimini takip eden süreç ile başlayan yüksek alkali etkisi, karbonatlaşma olayı ile zaman içinde yok olabilmektedir. Şekil 2.4'te karbonatlaşmış beton örnekleri gösterilmektedir.



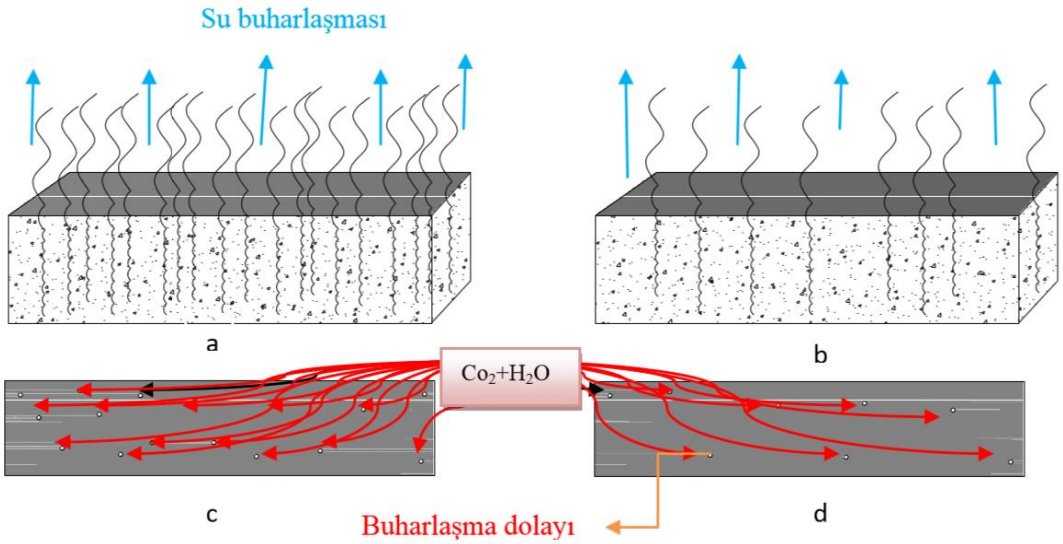
Şekil 2.3. Beton örtü tabakasında pH-zaman ilişkisi [49].



Şekil 2.4. Karbonatlaşmış beton örnekleri

2.5.4. S/Ç Oranının Karbonatlaşmaya Etkisi

Karbonatlaşma faktörlerinden biri betonun poroziteliğinin fazla olmasıdır. Beton içindeki boşluklar min. düzeyde ise beton geçirimsiz ve dışarıdan gelen afetlere daha dayanıklıdır. Betonu daha geçirimsiz yapma metotlarından birisi S/Ç oranını az tutmaktır. Çünkü S/Ç oranı az olduğunda betonun karışım suyu az olur ve beton kururken, betondan az miktarda su buharlaşır. Bu buharlaşma sonucu kılcal boşluklar azalır.



Şekil 2.5. Fazla buharlaşma ve fazla kılcal delikler

Şekil 2.5. a'da S/Ç oranı fazla olan bir beton görünmektedir. Beton kuruduktan sonra Şekil 2.5. c gibi daha fazla kılcal deliklere sahip olmakta ve fazla miktarda CO_2 ve H_2O emerek daha fazla karbonatlaşmaktadır. Tam tersi Şekil 2.5. b'de suyun az olmasından dolayı buharlaşma az olmakta ve CO_2 ve H_2O nüfuzu az olduğundan, karbonatlaşma için gerekli maddeler az olduğundan karbonatlaşma da azalmaktadır. Fakat betonda S/Ç oranı düşük olmasına rağmen betonu yerleştirme işlemi tam olarak yapılmamışsa, dışarıdan nüfuz eden maddeler için gözenekli bir beton olacaktır [60].

2.5.5. Karbonatlaşma Rötresi

Alexander ve Wardlaw (1959), karbonatlaşma rötresinin karbonatlaşma derecesi ile doğrusal bağlantılı olduğunu gözlemlemişlerdir [61].

Bu düşünce ışığında Pawers, rötrenin $Ca(OH)_2$ kristallerinin çözünmesine ve basınç gerilmeleri altında kalmalarına bağlı olduğu hipotezinde bulunmuştur. Sabit rutubet altında

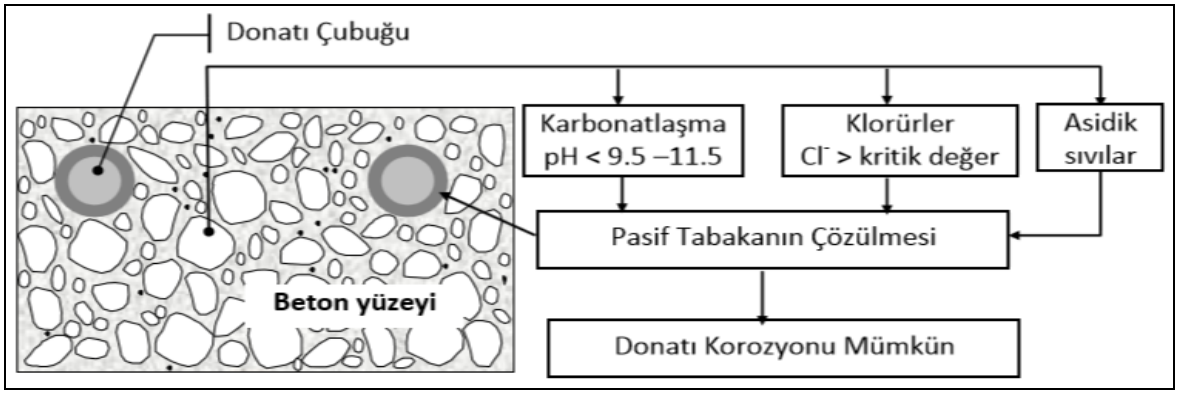
da oluşabilen bu rötre basınçlı bölgedeki $Ca(OH)_2$ ve $CaCO_3$ kristallerinin yer değiştirmeleri ve yeni geldikleri bölgede basınç gerilmeleri oluşturarak çimento hamurunu sıkıştırmalarına bağlı olduğunu varsaymıştır [62]. Bu hipoteze göre CSH ların karbonatlaşmaları biraz önce açıklandığı gibi $Ca(OH)_2$ kristallerinin çözünmesinden kaynaklanmadığına göre rötreyede yol açmayacaklardır sonucu çıkmaktadır. Halbu ki CSH ların karbonatlaşmaları da rötreye yol açabilmektedir. Böylece açığa çıkan suyun buharlaşarak kaybolmasının karbonatlaşma rötresinde rol oynadığı fikrinin de aynı şekilde geçerli olduğu kabul edilmelidir [63].

Dongxue vd. (1997), tarafından yapılan çalışma, bu görüşü doğrular niteliktedir. Karbonatlaşma sonucu oluşan $CaCO_3$'ın boşlukları doldurarak yoğunluk ve dayanım artışı sağladığını ve özellikle cüruf katkılı betonların dayanımının karbonatlaşmadan sonra artabileceğini, rötre çatlaklarının neden olduğu dayanım kaybını telafi edebileceğini belirtmişlerdir [64]. Ancak olumlu ve olumsuz özellikleri karşılaştırıldığında, karbonatlaşma, özellikle betonarme betonlarında donatının korozyonuna neden olduğundan istenen bir durum değildir. Çünkü kalsiyum hidroksitin çözünmesi ile betonun alkalinitesi düşük düzeye inmekte, alkalinitenin azalmasıyla, betonda karbonatlaşmanın oluştuğu bölgelerdeki betonarme demirlerinin korozyonu daha hızlı olabilmektedir [49,53,65].

Persson (1998), yüksek mukavemetli betonların rötresi üzerine yaptığı çalışmasında 8 farklı beton karışımına değişik tip ve miktarlarda silis dumanı ilave etmiş, toplam rötrenin numune yaşı, S/Ç oranı ve silis dumanının tip ve miktarına bağlı olduğunu, silis dumanı ilavesi ile karbonatlaşma rötresinden kaçınılabileceğini belirtmiştir [66].

2.5.6. Karbonatlaşmanın Donatı Korozyonuna Etkisi

Doğru dizayn edilmiş, geçirimsiz, kaliteli bir beton, çeliği korozyondan koruyarak yapının dayanımını ve dayanıklılığını istenen düzeyde sağlamaktadır. Kimyasal koruma betonun alkalinitesi sayesinde, fiziksel koruma ise ortamda bulunan ve korozyona yol açan maddelerin yapı elemanı içine difüzyonunun önlenmesi ile gerçekleşmektedir. Betonun bu olumlu özelliğine rağmen uygulamada yapılan hatalar nedeniyle korozyon günümüzde betonarme yapıların servis ömürlerini belirleyen en önemli faktör olarak kabul edilmektedir. Şekil 2.6'da betonun çeliği korozyondan koruma etkinliğinin kaybolması gösterilmiştir [67].



Şekil 2.6. Karbonatlaşma veya klorür iyonları nedeniyle betonun donatıyı korozyondan koruma etkinliğinin kaybolması

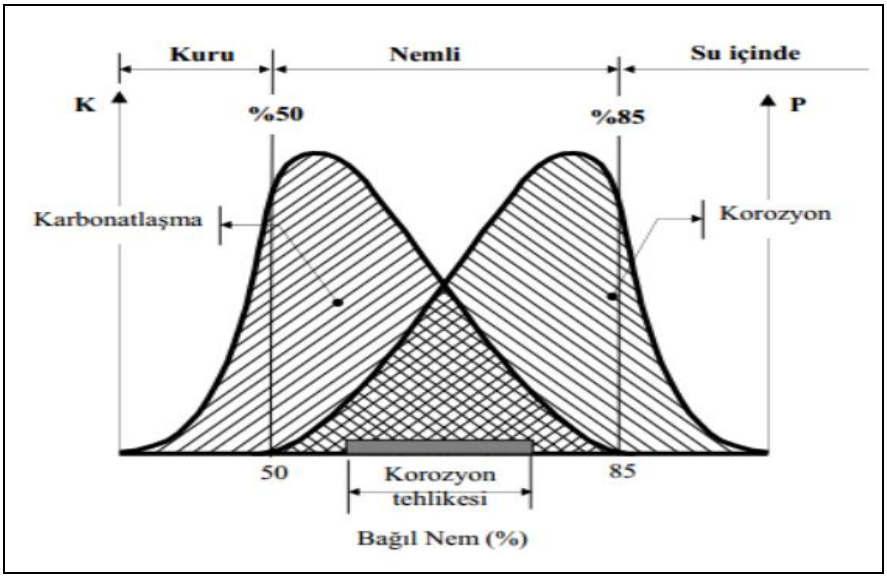
Karbonatlaşmış beton içindeki donatının korozyonu, elektrokimyasal reaksiyonla gelişir. Korozyon elemanı elektron ve iyon akışını sağlayan beton boşluk suyunun oluşturduğu elektrolitik ortamla birbirine bağlı anot ve katot elemanlarından oluşur. Anodik işlem demirin çözülmesi olayıdır. Pozitif yüklü iyonlar çözeltiye karışırlar. Katodik işlemde ise çelik vasıtasıyla katoda geçen elektronlar su ve oksijenle birleşip hidroksil iyonlarını oluştururlar. Anottan çözeltiye geçen demir iyonları hidroksil iyonlarıyla reaksiyona girerek demir hidroksiti oluştururlar. Demir hidroksit oksidasyonla demiroksite (pas) dönüşür (Eş. 2.6, 2.7, 2.8).

$$(Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^{-}) \quad (2.6)$$

$$(2e^{-} + 1/2\ O_2 + H2O \rightarrow 2(OH)^{-}) \quad (2.7)$$

$$(Fe^{++} + 2(OH) \rightarrow Fe(OH)_2) \quad (2.8)$$

Korozyon hızı büyük ölçüde, beton içine O_2 ve H_2O difüzyonu hızına bağlıdır. Bu nedenle betonun boşluk yapısını etkileyen tüm faktörler korozyon hızını da etkilerler. Bunlar arasında betonun S/Ç oranı ilk sırada yer alır. Korozyon max. hızına %70-80 bağıl hava nemi değerlerinde ulaşır. Kuru betonda elektrolitik ortam mevcut olmadığından suya doygun betona oksijen difüzyonu ihmal edilebilir mertebelerdedir. Bu nedenle beton karbonatlaşmış olsa bile korozyon gerçekleşmez. En çok zararı ise ıslanma-kuruma etkisine maruz yapılar görür. Yarı-ıslak periyotta karbonatlaşma gelişirken, daha doygun ortamda korozyon hızla gelişir [62]. Şekil 2.7'de karbonatlaşma ve korozyon hızlarının bağıl hava nemi ile değişimi şematik olarak gösterilmektedir.

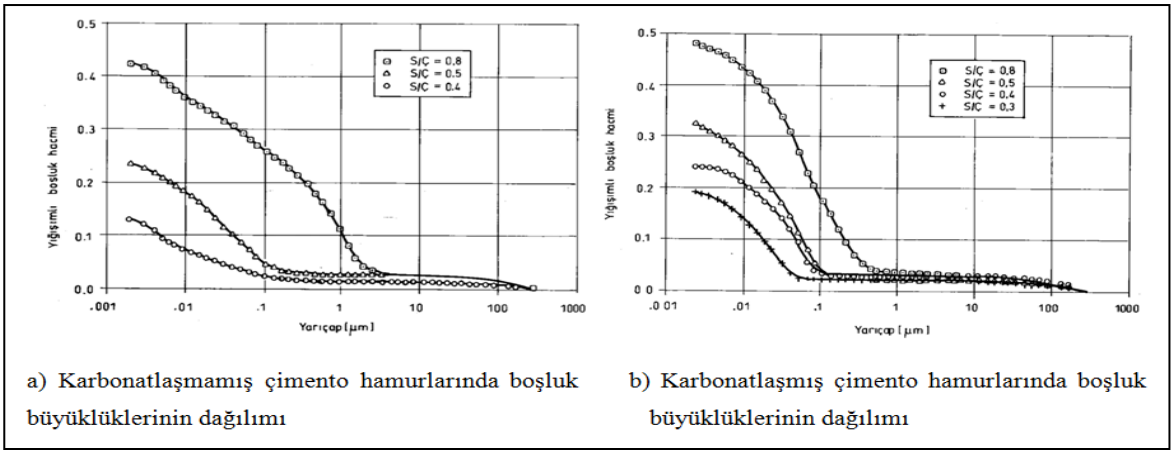


Şekil 2.7. Karbonatlaşma ve korozyon hızının bağıl nem ile ilişkisi [68].

Zivica (2003), çalışmasında betonarme yapıları etkileyen karbonatlaşma ve klorür etkilerini incelemiştir. Bu olayların etki sırasının donatının korozyon davranışında önemli rolü olduğunu tespit etmiştir. Betonarme elemanın öncelikle karbonatlaşmaya ardından da klorürlere maruz kalması, korozyon hızını ve şiddetini önemli derecede arttıran bir faktördür. Öncelikle karbonatlaşma, ardından klorid saldırısının korozyonu şiddetlendirici etkisi, betondaki boşluk çözeltisinin alkalinitesinin azalmasının ve sonuçta donatının elektrokimyasal olarak depasivasyonu ile klorid saldırısına çok daha hassas hale gelmesinin bir sonucudur [69].

2.5.7. Karbonatlaşmanın Mikro-Yapıya Etkisi

Karbonatlaşma çimento fazının mikro-yapısını önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Belirli çaptaki boşluklarda anlamlı oranda daralmalar meydana gelmektedir. Kalsiyum silikathidrat'lar (C-S-H) üzerine Na_2CO_3'in etkimesiyle oluştuğunda reaksiyon ürünleri arasında SiO_2 silis jeli meydana gelmektedir. Bu jel boşlukları tıkayan öğe olmaktadır. Şekil 2.7' de görüldüğü üzere; karbonatlaşma etkisine maruz kalmayan Portland çimentosu hamurlarında hidratasyon sonucu yığışımlı hacimleri azalan boşlukların 0.01 µm ile 0.5 µm yarıçapları arasında oldukları anlaşılmaktadır. S/Ç oranı yüksek karışımlarda etkilenmenin daha belirgenleştiği ve 0,5 µm yarıçaptan daha büyük boşluklarda azalmanın azaldığı ve S/Ç faktöründen bağımsız hale geldiği de görülmektedir.



a) Karbonatlaşmamış çimento hamurlarında boşluk büyüklüklerinin dağılımı

b) Karbonatlaşmış çimento hamurlarında boşluk büyüklüklerinin dağılımı

Şekil 2.8. Karbonatlaşmış ve karbonatlaşmamış çimento hamurlarında boşluk büyüklüklerinin dağılımı [70].

2.5.8. Kür İşleminin Karbonatlaşmaya Olan Etkisi

Kür işleminin karbonatlaşmaya olan etkisi birçok ülkede araştırılmıştır. Araştırmalara göre;

- Su ile yapılan kür işlemi çok önemlidir. Bu kür işlemi 1 günden 3, 7, 21 veya 28 güne kadar uzatıldığında karbonatlaşma derinliği % 61 den 43,25 ve17'ye kadar azalmıştır.
- İlk kür işleminin su ile yapılması ve 7 gün süreyle ıslak küre devam edilmesi en iyi neticeyi vermiştir.
- Sıcak iklimlerde beton dökümünün güçlüğü ve bu yapıların çok kısa sürede servis ömürlerini yitirmesi araştırmacıları, kür işlemi konusunda bir anda geniş çaplı çalışmalar yapmaya yönlendirmiştir. Bu çalışmalar 1970' li yılların ortasında başlamış 1980 ve 1990 lı yıllarda çok hızlı devam etmiş ve halen devam etmektedir.

Lo ve Lee (2002); betonun karbonatlaşma derinliğine kür etkisini inceledikleri çalışmada, betonun yaşı ve S/Ç oranı arttıkça karbonatlaşma derinliğinin arttığı ve su içindeki ilk kür süresinin karbonatlaşma için kritik olduğu belirlenmiştir. Su kürü yapılmış ve havada kür edilmiş örnekler arasında karbonatlaşma derinliği açısından büyük fark olduğu, ama bu farkın zamanla azaldığı elde edilen bulgular arasındadır. Havada kür edilmiş örneklerin karbonatlaşma derinliğinin daha fazla olduğu görülmüştür [71].

2.5.9. Karbonatlaşma Derinliğinin Belirlenmesi

Karbonatlaşma deneyi; normal ortamda ve laboratuarlarda hızlandırılmak suretiyle iki şekilde yapılmaktadır. Herhangi bir katkının veya beton içindeki bir değişikliğin karbonatlaşma hızına veya derinliğine yaptığı etkiyi belirlemek için hızlandırılmış karbonatlaşma test tekniği kullanılmaktadır. Normal ortamdaki karbonatlaşma ise genelde o bölgenin çevre koşullarının yıllara bağlı olarak karbonatlaşma etkisini belirlemek için kullanılmaktadır.

Hızlandırılmış karbonatlaşma test metodunda, beton normal atmosferdekinden daha fazla oranda CO_2 ortamına maruz bırakılır. Düzgün geometrik numunelerin ölçülmek istenilen yüzeyi olabildiğince dik bir şekilde kesilir. Gerçek ortamdan ise karot numuneler alınarak uygulanabilir. Betonun karbonatlaşma derinliğinin belirleneceği yüzey üzerindeki partiküller çelik fırça ile temizlenir. Taze kesilmiş betonun yüzeyine asit/baz belirleyicisi (indikatör) püskürtülür. Püskürtme sonucu oluşan renk farklılığı kumpas yardımıyla ölçülür. Bu amaç için kullanılan 4 çeşit indikatör vardır. Bu indikatörler ve belirledikleri pH değerleri şunlardır; nitramin 11,5, thymolphtalein 10,0-9,0, in-nitrophenol 8,0 ve yaygın olarak kullanılan 9,0 phenolphtaleindir [72]. %1 phenolphtalein ($C_2OH_{14}O_4$) %70 etil alkolde çözülerek hazırlanır. Phenolphtaleinin püskürtüldüğü yüzeydeki renksiz bölgelerin pH derecesi 9.0'ın altındadır. Mor renge dönüştüğü alanlar ise betonun alkalin olduğu bölgelerdir. Asit/baz belirleyicisinin püskürtüldüğü betonun yüzeyi hemen ölçülmelidir. Renklenme meydana gelmez ise renklenmenin olmadığı bölümler karbonatlaşan bölümlerdir ve bu bölümlerde karbonatlaşma derinliği ölçülebilir [73].

Karbonatlaşma hızı hakkında önceden bilgi alabilmek amacıyla çeşitli denklemler ortaya atılmıştır. Bir beton için karbonatlaşmanın hızını zamana göre veren en temel denklem;

$$C = K\sqrt{T}$$

C = Karbonatlaşma Derinliği (mm),

K =Fiziksel Değişkenleri İçeren Parametre,

T =Zaman (yıl)

Düşük dayanımlı bir beton için K parametresi genellikle 3-4 mm/yıl 0,5'den büyük bir değer alır. Betonun maruz kalacağı dış ortam koşullarının değişken olmasından dolayı

pratikte bu bağıntıyı kullanmak pek güvenli olmamaktadır. Karbonatlaşma derinliğinin yerinde örnekler alınarak belirlenmesi daha güvenli sonuçlar vermektedir [74].

Çalışmalarda genellikle hızlandırılmış karbonatlaşma yöntemine rastlanmaktadır. Fakat her iki yöntemi kullanarak yapılan çalışmalar da mevcuttur. Buna bağlı olarak yapılan literatür araştırmaları sonucunda aşağıdaki çalışmalar incelenmiştir:

Malami (2014), çalışmasında, Kıbrıs'ta gerek kıyı gerekse de iç bölgelerde bulunan 8 bina üzerinden karot numuneler alarak basınç dayanımına, yoğunluk ve karbonatlaşma derinliğine bakmıştır. Bulgular, çalışılan binalardaki ortalama karbonatlaşma oranının 1.10mm/yıl olduğunu göstermektedir. İç kesimlerdeki binalarda karbonatlaşma oranının kıyı kesimlerdeki binalara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Çalışmalar kapsamında hesaplanan karbonatlaşma sabit sayıları ile binaların ileriki yıllardaki karbonatlaşma seviyelerini de belirlemek mümkün olabilecektir. Karbonatlaşma sorunun en aza indirgenmesi için yoğunluğu ve mukavemeti yüksek beton üretimi en etkili çözümdür [75].

Bernal ve ark., (2014), 7 yıl boyunca atmosferik koşullarda bırakılan alkali-aktivite cüruflu betonların değerlendirilmesi ve doğal olarak karbonatlaşan kısımların yapısal özelliklerinin incelenmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Betonlar 400 kg/m^3 dozajlı, 0.42 ve 0.48 S/Ç oranlı betonlar, benzer doğal karbonatlaşma derinliği, ancak 28 günlük kür sonucunda farklı geçirimlilikler göstermişlerdir. Bağlayıcının artan miktarları bu betonda (500 kg/m^3) 2 mm karbonatlaşma derinliği şeklinde, CO_2 penetrasyonunda azalmaya neden olmuştur. Bu betonlarda kalsit, vaterit ve natron olmak üzere mineraller tespit edilmiştir. Sonuçta, normal betonlara kıyasla alkaliyle aktive cüruflu betonun geçirimlilik özellikleri nedeniyle doğal atmosferik koşullarda daha yavaş karbonatlaşma reaksiyonu verdikleri anlaşılmıştır [76].

Baharavar (2012), yapmış olduğu çalışmasında, uçucu kül çimento ile kütlece %0, %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edilerek, 30 mm uzunluğunda ve %30 mm çapındaki çelik lif ise hacimce %1 oranında betonlara ilave edilmiştir. Betonlar üzerinde birim ağırlık, işlenebilirlik, aşınma, basınç dayanımı, elastisite modülü, eğilme dayanımı, tokluk, ultra ses hızı ve karbonatlaşma özellikleri incelenmiştir. Uçucu kül oranının tokluğa etkisi olmaz iken liflerin tokluğa önemli etkisi olduğu görünmüştür. Uçucu kül ve çelik lif karbonatlaşmada olumlu etki göstermiştir. Uçucu kül oranları karbonatlaşma derinliği ile ters ilişkiye sahip olduğu saptanmıştır. Uçucu kül oranı arttıkça CaO'in azalması ile karbonatlaşmada düşüşler görülmüştür [77].

Lımbachıya ve ark., (2012), çalışmasında, kaba atık beton agregadan farklı oranlarda olmak üzere, normal doğal agregalı betonla benzer 28 günlük dayanım verecek şekilde dizayn etmek istemiştir. Farklı kaynaklardan aldığı atık betonu %30, %50 ve %100 oranlarında olacak şekilde kullanmış ve çeşitli S/Ç oranlı ve farklı dayanım sınıflarında beton karışımlar hazırlamıştır. Portland çimentosu, silis dumanı ve atık agregalı betonun mekanik özellikleri ve dayanıklılık performansını incelemiştir. Sonuç olarak; kaba atık beton agregalı betonun S/Ç oranındaki azalma, basınç dayanımını, klorür ve karbonatlaşma direncini arttırmıştır [78].

Shaou ve Lin (2011), betonun erken yaşta karbonatlaşması için numune hazırlanması ve karışım oranları, uygulama yöntemi, kür koşulları ve deney sonrası betonun özelliklerinin dayanım, pH ve mineraloji açısından değerlendirilmesini anlatmışlardır. Betonun erken yaşta CO_2'e maruz kalmasının hidratasyonu hızlandırdığı bilinmektedir. Bu kürleme metodu, taze betona hemen kürleme sonrası uygulanabilir; böylece kalsiyum silikat bileşenleri hızla karbonatlaşır. Ayrıca bu metod kürlenmiş betona da uygulanabilir; bu durumda hem anhidro kalsiyum silikatlar hem de hidratasyon ürünleri karbonatlaşır. Sonuçta, kalsiyum karbonatların hibrit yapısı ve düşük kireçli kalsiyum silikat hidratlar meydana gelir [79].

Gönen ve Yazıcıoğlu (2005), karbonatlaşma deneylerini daha çabuk sonuçlandırmak amacıyla, ortam neminin, sıcaklığının ve CO_2 miktarının kontrol edilebildiği bir aparat ve deney düzeneği geliştirmişlerdir. İlk etapta gaz sızdırmazlığı olan bir tank tasarlanmış ve içerisine sırasıyla; gaz miktarının belirlenmesi için manometre, ortamın bağıl neminin kontrolü için termostat ve resistanslı su kabı, tank içindeki havanın türbülânsı için fan ve kontrol paneli konulmuştur. Silindir şeklinde, 90 cm derinlikte ve 50 cm çapında bir tank tasarlanmıştır. Çok sayıda beton numunenin aynı anda koyulabilmesi amacıyla iki katlı olarak tasarlanan tankın katları delikli raflar ile ayrılmıştır. Bu delikli raflar ve tankın alt kısmına yerleştirilen fan, her iki katta da CO_2'in eşit bir şekilde dağılmasını sağlamıştır. Deney boyunca tankın dış tarafından içerideki sıcaklığı ve basıncı kontrol etmek için; tankın üst tarafına, üzerinde açma kapama anahtarları bulunan kontrol ünitesi yerleştirilmiştir. İçeriye giren gaz miktarının kontrolü amacıyla tankın dışına hava tahliye vanası ve manometre konulmuştur. Sonuçta; bu aparatın çok uzun yıllar alabilen karbonatlaşmanın hızlandırılması amacıyla kullanılabilecek nitelikte olduğu kanısına varılmıştır [80].

Ramezanianpour ve Tarighat (2004), çalışmalarında, betonda karbonatlaşma için yeni bir model geliştirmek istemişlerdir. Oluşturdukları model ile belirli bir zamandaki karbonatlaşma derinliği, S/Ç malzeme orantısı (w/(c+csf)), silis dumanı-bağlayıcı malzeme orantısı (csf/(c+csf)) ve ortamdaki bağıl nem yüzdesi (RH%) gibi parametreler tahmin edilebilmektedir. Uzun süreli ve hızlandırılmış olarak iki şekilde karbonatlaşma testi yapılmıştır. Uzun süreli deneyler İran Körfezi'nin tipik bir bölgesinde Bandar-Abbas şehrinde yapılarak, bu sonuçlar hızlandırılmış test sonuçlarının kalibrasyonunda kullanılmıştır. Hızlandırılmış deney bölümünde ise silis dumanlı beton numuneleri için 0.35, 0.42 ve 0.50 gibi üç farklı S/Ç malzeme orantısı seçilmiştir. Yoğunluğu %50 olan CO_2 gazına maruz bırakılan numunelerin %RH değerleri 40, 60, 70 ve 90 olarak belirlenmiştir. Deney sürecinde 1., 3., 7., 10.,15. ve 21. günlerden sonra karbonatlaşma derinliklerine bakılmıştır.

Uzun süreli deney kısmında Bandar-Abbas'daki numuneler, yağmurdan korunmuş olarak havaya maruz bırakılmıştır. Yıllık ortalama sıcaklık 27 °C ve yıllık ortalama bağıl nem %66 olarak ölçülmüştür. Yaklaşık 216 ölçümden alınan değerler önerilen modelin kalibrasyonu olarak kullanılmıştır. Elde edilen verilerde, daha düşük w/(c+csf) kullanarak betonda karbonatlaşma derinliğinin önemli ölçüde azaltılabileceği, beton karışımlarında çimento yerine kısmen silis dumanı katılmasının karbonatlaşma derinliği üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Elde edilen ifade betonda hızlandırılmış karbonatlaşma için en uygun model olarak belirlenmiştir. Aynı yöntem uzun süreli deney sonuçlarına da uygulanarak ikinci bir model elde edilmiştir. Daha sonra kalibrasyon için bu iki model dikkate alınarak aşağıdaki kalibre edilmiş model oluşturulmuştur:

$$\times = k.\left[(w/(c+csf)).(-3.57+0.36RH\% -0.00326RH\%^{2}) + 1.38\,(csf/(c+csf)) \right].\sqrt{t}$$

Burada;

× = karbonatlaşma değeri (mm)

k = aşağıda ifade edilen kalibrasyon faktörü

$$k = 2.51 - 1.84\,(w/(c+csf)) + 2.18\,(csf/(c+csf))$$

w/(c+csf) = su-bağlayıcı malzeme orantısı

csf/(c+csf) = silis dumanı-bağlayıcı malzeme orantısı

t = süre (yıl)

RH% = ortamdaki bağıl nem

$$0.35 \leq (w/(c+csf)) \leq 0.50 \qquad 0.00 \leq (csf/(c+csf)) \leq 0.10 \qquad 40\% \leq RH\% \leq 90\%$$

Model, parametrelerin yukarıdaki sınırlar içinde geçerlidir. Modeli kullanırken bu kısıtlamalara dikkat edilmelidir [81].

Zhang ve ark. (2004), çalışmalarında çimento miktarından %50 oranında normal incelikte öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile çok ince öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunu ikame ederek iki farklı karışımdan üretilen numunelerin karbonatlaşma etkilerini incelemişlerdir. Karbonatlaşma değerlerine göre, çok ince öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflu betonun, normal incelikte öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren diğer betona göre karbonatlaşma dayanıklılığı açısından üstün özellikler göstermiştir. Cürufu çok ince öğütmenin, sertleşmiş çimento hamurunda daha yoğun bir yapı meydana getirmesinden dolayı, hamur içerisine CO_2 girişini engellediğini tespit etmişlerdir [82].

Gönen ve Yazıcıoğlu (2004), farklı nem ortamlarındaki beton numunelerde karbonatlaşma gelişimini araştırmışlardır. Numuneler özel olarak tasarlanmış, hızlandırılmış karbonatlaşma deney düzeneğinde %35, %55 ve %80 bağıl nemde ve %40 CO_2'li ortamda bekletilmiştir. Sonuçlara göre; çok nemli bir ortam sayılabilecek olan %80 bağıl nemde karbonatlaşma biraz yavaş gelişmiştir. Nemin fazlalığı CO_2'in difüzyonunu zorlaştırmaktadır. Çoğu iklimlerde sıklıkla karşılaşılabilecek olan %55 nem gurubunda ise karbonatlaşma diğer nem oranlarına göre oldukça yüksektir. En az karbonatlaşma kuru bir ortam sayılabilecek olan %35 nem ortamında gerçekleşmiştir. Burada; karbonatlaşma reaksiyonunun ihtiyaç duyduğu suyun azlığı bu sonucu ortaya çıkarmıştır. 6, 24, 72 saat sonunda karbonatlaşma derinliklerine bakılan numunelerde, zamanla birlikte %80 ve %55 bağıl nem grubuna ait numunelerin karbonatlaşma derinliklerindeki fark azalmıştır. Azalmadaki sebep karbonatlaşmanın gelişimi için en müsait ortam olan %55 nemdeki numunelerin CO_2'e daha erken doymaya başlamasından kaynaklanmaktadır [83].

Sideris ve Savva (2004), çalışmalarında biri normal portland çimentosu ve diğer 4'ü katkılı olmak üzere 5 adet çimento çeşidi kullanmışlardır. Katkılı çimentoların iki tanesinde doğal puzolan, diğer iki tanesinde ise linyit uçucu külü katılmıştır. Numunelerde sülfat ve klor direnci, karbonasyon derinliği ve basınç dayanımı tayin edilmiştir. Yaş olarak bir yıla kadar elde edilen sonuçlara göre, PÇ yerine puzolanik malzeme ikame edilmesi çimentonun ve karışımın sülfata karşı dayanıklılığını arttırmaktadır. Bir yıla kadar olan herhangi bir yaş için karbonasyon derinliğinin puzolanik karışımlarda, kontrol karışımına göre daha fazla olduğu görülmüştür. 4 adet puzolonik karışım içinde en iyi performansı Ptolemaida linyit uçucu külü göstermiştir [84].

Yazıcıoğlu ve diğ. (2003), çalışmalarında Elazığ ferrokrom cürufunu öğütüp, çimento ile %3, %5, %7 ve %15 oranlarında yer değiştirerek, hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi yöntemiyle %55 bağıl nemde karbonatlaşma derinliği, basınç dayanımları ve su emme miktarlarını ölçmüşlerdir. Cüruf katkısı %3'e kadar basınç dayanımını arttırmış, %5'de dayanım düşmesine karşın referans ile hemen hemen aynı seviyeye kadar düşmüştür. Cüruf içeriği artmaya devam ettikçe de basınç dayanımı buna paralel olarak azalmıştır. Numunelerin basınç dayanımlarına ters orantılı olarak su emme miktarları da değişmektedir. En düşük su emme miktarı cüruf içeriği %3 olan numunelerde, en yükseği ise %15 olanlarda elde edilmiştir. Çimento içerisindeki cüruf miktarının artması ile karbonatlaşma derinliği de artmıştır. Referans numune ile cüruf katkılı numuneler kıyaslandığında karbonatlaşma derinliği; %3'de %6, %5'de %13, %7'de %17 ve %15'de %30 daha fazladır. Ayrıca karbonatlaşma hızı tüm numunelerde hazırlanan deney düzeneğine göre 1 günden sonra azalmıştır. Numunelerde reaksiyona giren CO_2 ağırlığı ile cüruf miktarı ters orantılıdır. En fazla CO_2 miktarı, referans numunede olmasına rağmen en az karbonatlaşma derinliği de referans numunede meydana gelmiştir. Cürufun puzolonik özelliğinin olması ve kalsiyum hidroksiti bağlaması karbonatlaşmanın daha derine inmesinde sebep olarak gösterilebilirliği vurgulanmıştır. Karbonatlaşma reaksiyonları sonucu kalsiyum karbonatın yanı sıra suyun da oluşmasından dolayı ağırlık farkından gidilerek karbonatlaşma hakkında tam bir fikir elde etmenin mümkün olmadığını belirtmişlerdir [85].

Papadakis ve ark. (1992), beton karbonasyonuna yol açan proseslerin temel ve kapsamlı modellerini geliştirmiş ve deneysel olarak ispatlamışlardır. Parametrelerin olağan aralığında (genellikle bağıl nem BN>%50 için), karbonasyonun henüz başlamadığı bölgeleri karbonatlaşmış bölgelerden tamamen ayıran, karbonasyon bölgesinin oluşmasına yol açan kesin ve basit varsayımlar yapılabilmektedir [86].

Torii ve Kawamura (1992), çalışmalarında, normal Portland çimentosu ile üretilen ve yüksek karbonatlaşma derinliğine sahip betonların, düşük klorür geçirimliliği gösterdiği ve karbonatlaşmanın sonucunda boşlukların bloklanması ve klorür geçirimliliğinin buna bağlı olarak azalması açıklanmıştır. Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı katkılı betonların, havada kür edilseler bile, klorür penetrasyonunu azaltmada çok etkili oldukları, puzolanik reaksiyonun kuru ortamda bile devam ettiği, çimento pastasının ve çimento pastası-agrega arayüz geçiş bölgesinin daha yoğun olmasını sağladığı ifade edilmektedir. Karbonatlaşma sonucunda sertleşmiş çimento hamuru büzülme göstermekte ve betonda

çatlaklar oluşmaktadır. Bunun olumlu tarafı; bir miktar suyun serbest kalması ve bu suyun çimentonun hidratasyonuna yardımcı olması ile beton dayanımında çok az da olsa bir artış meydana getirmesi ve oluşan $CaCO_3$ kristallerinin, çimento hamurundaki kapiler boşluklara yerleşmesi ile betonu nispeten daha geçirimsiz hale getirmeleridir [87].

Carette ve Malhotra (1992), S/Ç oranını 0,25-0,40 arasında değiştirdikleri betonların, 3,5 yıl sonra karbonatlaşma derinliğini ölçmüşler ve 0,25 S/Ç oranına sahip betonlarda herhangi bir karbonatlaşma görememişlerdir. Fakat S/Ç oranındaki artışla birlikte silis dumanı ilave edilen betonlarda karbonatlaşma ile karşılaşmışlardır. Su/(çimento+silis dumanı) oranının 0.40 olduğu betonlarda karbonatlaşma derinliği 8 mm, şahit betonlarda ise 5 mm olarak ölçülmüştür [88].

2.5.10. Tez Çalışmasının Literatürdeki Yeri

Literatür taramalarına göre; cam elyaf, betonun özelliklerini iyileştirmek için farklı şekillerde kullanılmıştır. Katkı olarak, diğer lif çeşitleriyle birlikte kullanılarak betona katıldığı gibi, betonun yüzeyine yapıştırılmak suretiyle de kullanılmıştır. Ayrıca atık mermer tozunun agrega ile ikame edilerek kullanılabilirliği ve farklı oranlarda betonun içerisine katılarak betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkisinin de araştırıldığı görülmektedir.

Karbonatlaşma olayını ise beton bileşimine giren malzemeler ile uygulama teknikleri açısından birçok faktör etkileyebilmektedir. Yapılan tüm çalışmaların büyük bir kısmı betona giren malzemeler üzerinedir. Fakat mermer tozu ve cam elyaf katkısının birlikte kullanımıyla, betonda oluşabilecek karbonatlaşma etkisi üzerine bir çalışmaya şimdiye kadar rastlanmamıştır. Bu tez çalışmasında; hazırlanan 25 farklı beton serisi, farklı zaman periyodlarında (7, 14 ve 28 gün) karbonatlaşmaya maruz bırakılmış ve karbonatlaşma derinlikleri ölçülerek, beton serileri arasında kıyaslama yapılmıştır. Çalışma, zaman açısından tasarruf kazanılması nedeniyle hızlandırılmış karbonatlaşma test tekniği kullanılarak yapılmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, beton üretiminde kullanılan malzemeler, bu malzemelerin özellikleri, karışım oranları, uygulanan sertleşmiş beton deneyleri, deneylerin yapılışı ve deneylerden elde edilen sonuçlar hakkında bilgiler verilmektedir.

3.1. Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması

3.1.1. Agrega

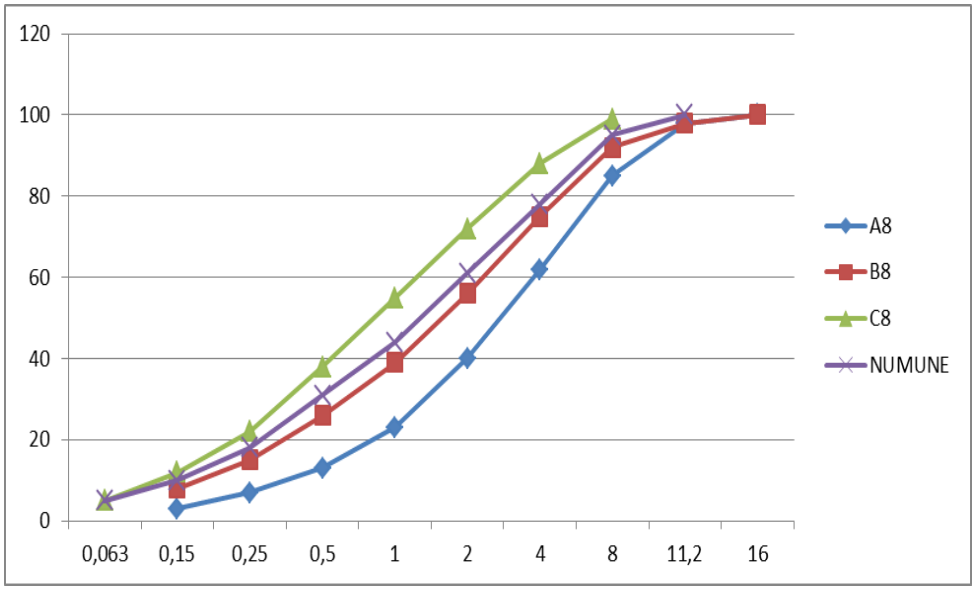
Beton numunelerinin hazırlanması sırasında kullanılan agreganın, betonun kullanılacağı yapı elemanının şekil, cins ve en dar kesitinin boyutu, beton örtü tabakası (pas payı) kalınlığı ile betonun dökümünde kullanılacak yönteme bağlıdır. Çalışmada Elazığ Palu yöresine ait yıkanmış, max. tane büyüklüğü 8 mm olarak seçilmiş dere agregası kullanılmıştır. Kullanılan agreganın kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Agrega; 0-0,25 mm, 0,25-4 mm ve 4-8 mm olmak üzere üç sınıfa ayrılarak kullanılmıştır. Elek aralıklarına göre sınıflandırılan agreganın Şekil 3.1'de granülometri eğrisi verilmiştir.

Tablo 3.1. Kullanılan agreganın kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal özellikler					**Fiziksel özellikler**
(SiO_2) %	**Al_2O_3 %**	**Fe_2O_3 %**	**CaO %**	**MgO %**	**Yoğunluk(g/cm^3) (özgül ağ.)**
49,87	12,24	11,56	18,76	7,57	2,80

Tablo 3.2. TS (2009) elek numarasına göre yüzdelik oranları

Elek No	Elek Üzerinde Kalan Miktar (gr)	Elek Üzerinde Kalan Miktar (%)	Elek Üzerinde Kalan Yığışımlı Miktar (%)	Elekten Geçen Miktar (%)
11,2	0	0	0	100
8	249	5	5	95
4	847	17	22	78
2	847	17	39	61
1	847	17	56	44
0,5	647	13	69	31
0,25	647	13	82	18
0,15	398	8	90	10
0,063	249	5	95	5
KAP	249	5	100	0
TOPLAM	4980	100		



Şekil 3.1. Kullanılan agreganın granülometri eğrisi

Şekil 3.1'de; kullanılan agreganın 0,25 mm'lik elekten geçen yüzdesi, düşük miktarda görülmektedir. Mermer tozunun etkisini daha iyi görebilmek amacıyla; 0,25 mm elek altında kalan malzemeler ikame edilmiştir. Cam elyaf takviyeli betonların işlenebilirliğini kolaylaştırmak amacıyla ince agrega oranı fazla seçilmiştir.

3.1.2. Çimento

Deney numunelerinin hazırlanmasında, Elazığ'ın Altınova Çimento Fabrikası'ndan taze olarak temin edilen CEM I 42,5 N çimento tipi kullanılmıştır. Uygun koşullarda saklanan çimento, belirli süre içinde bozulmaya uğramadan tüketilmiştir.

Tablo 3.3. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Çimento CEM I 42,5 N			
Kimyasal Özellikler		**Fiziksel Özellikler**	
S($SİO_2$)	21.12	Yoğunluk(g/cm^3)	3.13
A(Al_2O_3)	5.62	Özgül yüzey(cm^2/g)	3370
F(Fe_2O_3)	3.24	Priz başlama süresi(dk)	168
C(CaO)	62.94	Priz bitiş süresi(dk)	258
MgO	2.73	**Basınç Dayanımı**	
SO_3	2.30	2. gün(Mpa)	25.8
Na_2O	--	7. gün(Mpa)	41.8
K_2O	--	28. gün(Mpa)	50.7
Cl	0.009		
Kızdırma kaybı	1.78		

3.1.3. Cam Elyaf

Beton numunelerde lif katkısı olarak, Camelsan Sanayi A.Ş. tarafından üretilen kırpılmış 12 mm'lik cam elyaf kullanılmıştır. Kullanılan cam elyafa ait özellikler Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.4. Kullanılan cam elyafa ait özellikler

Lif Çeşidi	**Lif Boyu (mm)**	**Lif Çapı (µm)**	**Özgül Ağırlık (mg/m^3)**	**Elastisite Modülü (MPa)**	**Çekme Mukavemeti (MPa)**
Cam	12	14	2,68	72000	1700

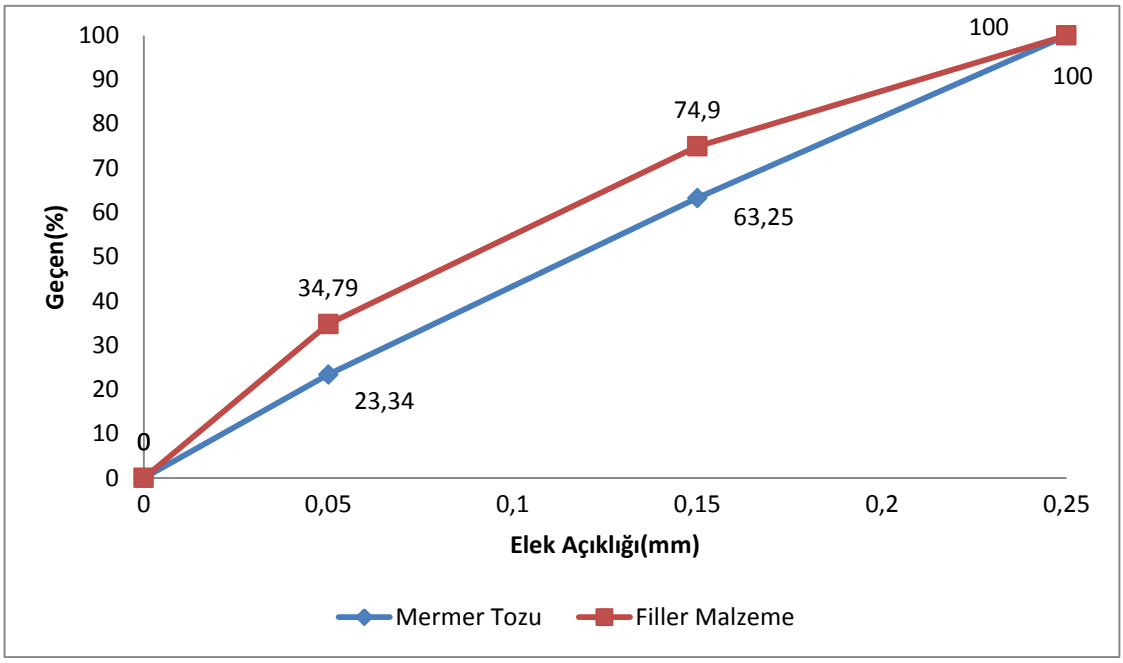
3.1.4. Mermer Tozu

Çalışmada kullanılan atık mermer tozu, Elazığ Alacakaya Mermer ve Maden İşletmesi'ne ait mermer üretim atölyesindeki çökelti havuzundan alınarak 105°C lik sıcaklıkta etüvde kurutulmuştur. Kurutulan malzeme elle ovuşturma ve mala gibi aletlerle ezilerek toz haline getirilmiştir. Elde edilen mermer tozu 0,25 mm açıklıklı elekten elenerek, filler malzeme olarak kullanılmıştır. Tablo 3.5'te kullanılan atık mermer tozunun kimyasal ve fiziksel özellikleri yer almaktadır. Şekil 3.2'de mermer tozu ve ince agreganın granülometri eğrisi verilmiştir.

Tablo 3.5. Kullanılan atık mermer tozunun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Fiziksel Özellikler	
Mohs sertliği	3,5-4
Shore sertliği	54
Birim Hacim Ağırlığı (gr/cm³)	2,69
Ağırlıkça Su Emme (%)	0,11
Görünür Gözeneklilik (%)	1,11
Kimyasal Özellikler	
SiO_2 (%)	14,25
Fe_2O_3 (%)	4,90
$CaCO_3$ (%)	57,40
Al_2O_3 (%)	1,10

Mermerlerin kimyasal bileşimi TS EN 197-1'e [89] göre belirlenmiştir. Kimyasal analiz sonuçlarına göre mermer tozlarının $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ toplamı ≤ 70 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.2. Mermer tozu ve ince agreganın granülometri eğrisi

3.1.5. Süperakışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı

Beton numunelerin üretimi esnasında, artan su ihtiyacını karşılayabilmek amacıyla, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından üretilen, Sika ViscoCrete Hi-Tech 28 ürün kodlu polikarboksilat bazlı yüksek oranda su azaltıcı, hiper akışkanlaştırıcı beton katkı maddesi kullanılmıştır. TSE EN 943-2'de belirtilen standartlara uygun olarak kullanılmıştır [90].

Tablo 3.6. Süperakışkanlaştırıcı katkının teknik özellikleri

Teknik Özellikler	
Görünüm:	Açık kahverengi sıvı
Yoğunluk:	1.055 - 1.095 kg/l, 20^{o}C
pH:	3.00-7.00
Klorür:	≤ %0.1 (TS EN 934–2)
Donma Noktası:	-5 ^{o}C
Kullanım şekli ve dozaj:	Çimento miktarına göre; plastik ve akıcı betonlar için %0.4–1.0, kendiliğinden yerleşen betonlar için %1.0–2.0, oranlarında kullanılır.
Özellikleri :	-Betonun karışım suyunu oldukça yüksek oranda azaltması ile yüksek birim ağırlık ve dayanım olanağı sağlar. -Betonda büzülmeyi oldukça azaltır. -Dona karşı dayanıklılığı arttırır. -Klorür içermez, betonda donatıya zarar vermez. -Betonun karbonatlaşma hızını düşürür.

3.1.6. Sodyum Dikromat

Karbonatlaşma deneyinde tankın içindeki nem miktarını % 60±5 de tutması için Şekil 3.3'te görünen sodyum dikromat tuzu Tekkim Kimya San. ve Tic. Ltd. Şti. tarafından temin edilmiştir. Bu tuz 1 litre suda doygun hale gelene kadar karıştırılmıştır. Daha sonra gaz sızdırmaz tankın içine yerleştirilerek ortamın nemini % 60±5 arasında tutmuştur [77]. Kullanılan sodyum dikromatın fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.7'de gösterilmiştir.

Şekil 3.3. Sodyum dikromat

Tablo 3.7. Karbonatlaşma deneyinde kullanılan sodyum dikromatın kimyasal ve fiziksel özellikleri

Fiziksel Görünüş	Katı
Renk	Turuncu
Koku	Hemen hemen kokusuz
Yoğunluk	~ 2.35 gr/cm^3 (20 °C)
Çözünürlük	~731.8 g/Lt (20 °C, H_2O)
Parlama Noktası	Uygulanamaz.
Erime Noktası	~356.7 °C
pH	~3.5 (100 g/Lt, H_2O, 20 °C)

3.1.7. Karma Suyu

Deneysel çalışma sürecinde, karışım sırasında ve karışımdan sonra kürde kullanılmak üzere, TS EN 1008'de [91] belirtilen standartlara uygun olarak Elazığ şehir şebeke içme suyu kullanılmıştır.

3.2. Karışım Oranları

Deneyde kullanılan malzemelerin karışım oranları Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.8. Deney için hazırlanan numunelere ait karışım oranları (kg/m^3)

SERİNİN ADI	CAM ELYAF	AGREGA (0-0,25)	AGREGA (0,25-4)	AGREGA (4-8)	AKIŞKANLAŞTIRICI	SU	ÇİMENTO	MERMER TOZU
CE0-MT0	0	161.67	1539.17	324.17	5	240	450	0
CE0-MT25		120.00	1524.17	320.83	5	239.16	450	26.67
CE0-MT50		79.17	1510.00	317.50	5	237.5	450	53.33
CE0-MT75		39.17	1495.83	315.00	5	235.83	450	79.16
CE0-MT100		0	1481.67	311.67	5	234.17	450	105.00
CE0.25-MT0	0.25	161.67	1536.67	324.17	5	233.33	450	0
CE0.25-MT25		120.00	1522.50	320.83	5	230.83	450	26.67
CE0.25-MT50		79.17	1507.50	317.50	5	229.17	450	53.33
CE0.25-MT75		39.17	1493.33	315.00	5	227.50	450	79.16
CE0.25-MT100		0	1480.00	311.67	5	224.17	450	105.00
CE0.50-MT0	0.50	160.83	1535.00	324.17	5	239.16	450	0
CE0.50-MT25		120.00	1520.83	320.83	5	233.33	450	26.67
CE0.50-MT50		79.17	1505.83	317.50	5	230.83	450	53.33
CE0.50-MT75		39.17	1491.67	315.00	5	225.00	450	79.16
CE0.50-MT100		0	1478.33	311.67	5	223.33	450	104.17
CE0.75-MT0	0.75	160.83	1533.33	324.17	5	250.00	450	0
CE0.75-MT25		119.17	1518.33	320.83	5	248.33	450	26.67
CE0.75-MT50		79.17	1504.17	317.50	5	245.83	450	53.33
CE0.75-MT75		39.17	1490.00	315.00	5	233.33	450	79.16
CE0.75-MT100		0	1476.67	311.67	5	225.00	450	104.17
CE1-MT0	1	160.00	1531.67	324.17	5	258.33	450	0
CE1-MT25		119.17	1516.67	320.83	5	241.67	450	26.67
CE1-MT50		78.33	1502.50	317.50	5	235.83	450	53.33
CE1-MT75		39.17	1488.33	315.00	5	233.33	450	79.16
CE1-MT100		0	1475.00	311.67	5	231.67	450	104.17

TS 802 ’de belirtilen karışım esaslarına göre 25 farklı beton karışımı hazırlanmıştır [92]. Cam elyaf bulunan numuneler (CE), mermer tozu bulunan numuneler (MT) olarak kodlanmıştır. Numunelere katılan MT %25, %50, %75 ve %100 oranlarında filler malzeme ile hacimce yer değiştirilerek kullanılmıştır. Beton numunelerinin üretimi sırasında karışıma; 0,25, 0,50, 0,75 ve 1 kg/m^3 oranlarında ağırlıkça kırpılmış 12 mm boyunda CE ilave edilmiştir. Tüm serilerde sabit olacak şekilde bağlayıcı miktarının %1’i oranında akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

3.3. Numunelerin Hazırlanması

Deney serilerinin hazırlanması, dökülmesi ve deneylerin uygulanması işlemleri Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan 25 serinin her bir serisi 24 adet numuneden oluşmaktadır. Toplamda 600 numune üretilmiştir. Bir serideki 24 adet numunenin 18 tanesi farklı sürelerde karbonatlaşma deneyi için diğer 6 tanesi kontrol grubu için belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda agrega, çimento, mermer tozu ve su deney öncesinde 1 gr hassasiyetli terazide tartılarak hazırlanmıştır. Kimyasal katkı ve cam elyafın tartılabilmesi için 0,001 gr hassasiyetli terazi kullanılmıştır.

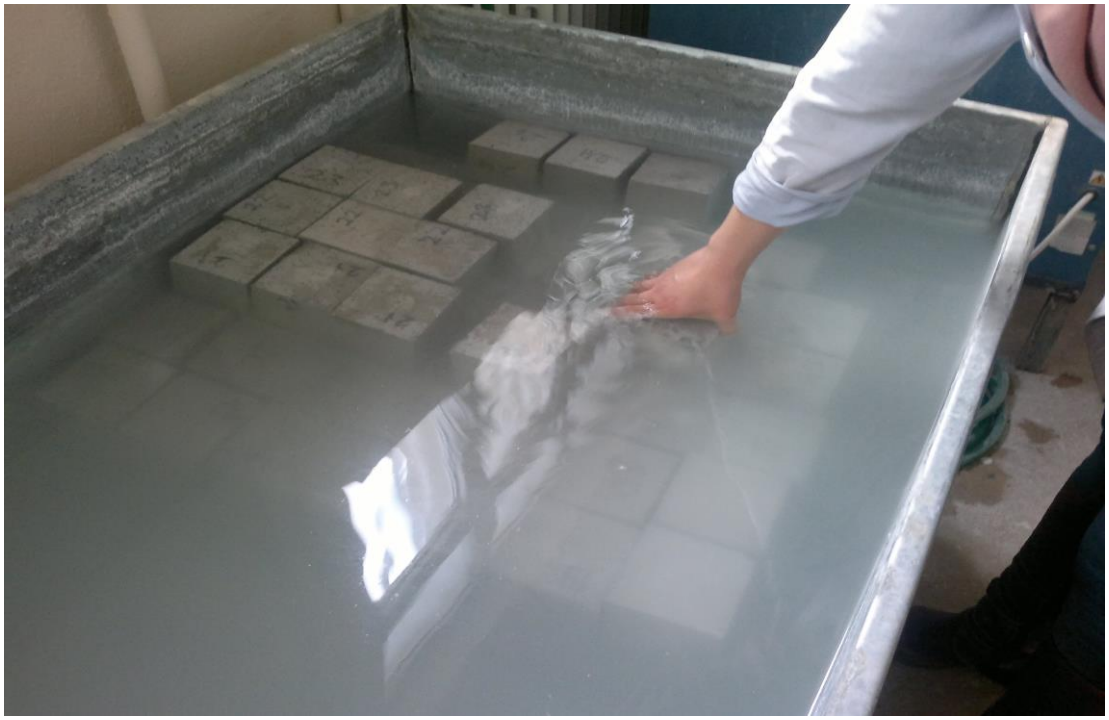
Belirlenen oranlarla malzemelerden, sırasıyla agrega ve mermer tozu beton mikserine katılmıştır. Karışım için gerekli malzemelerin hepsi laboratuvar tipi beton mikserinde TS 1247 standardında belirtilen şekilde sabit hızla karıştırılmıştır [93]. Cam elyaflı serilerde CE, mikser çalışır durumdayken topaklanmaması için yavaş yavaş eklenmiştir. Karışma işlemi devam ederken önce ıslatma suyu olarak su miktarının 1/3 ilave edilmiş, daha sonra çimento katılmıştır. Suyun diğer 1/3’üne akışkanlaştırıcı eklenerek mikser içerisine azar azar eklenmiş ve son olarakta kalan su ilave edilerek karıştırmaya devam edilmiştir. Topaklaşma bitinceye ve segregasyona sebebiyet vermeyinceye kadar mikser çalıştırılmaya devam edilmiştir. Bu şekilde 25 farklı karışım hazırlanmıştır.

Şekil 3.4. Beton karışım mikseri

TS EN 12350-2 standardına göre taze betonun çökme miktarı belirlenmiştir [94]. Çökme deneyi için üst çapı 10 cm, alt çapı 20 cm ve yüksekliği 30 cm olan abrams konisi kullanılmıştır. Koni düz ve su emmeyen bir yüzeye oturtularak üç eşit yükseklikte tabakalar halinde taze betonla doldurulmuş her tabaka, çapı 16 mm olan özel deney çubuğu ile 25 kez şişlenerek sıkıştırılmıştır. Kalıp tamamen doldurularak üzeri mala ile düzeltildikten sonra bekletilmeden, kulplarından tutularak yavaşça ve sarsılmadan kaldırılarak taze betonun kendi ağırlığı etkisi ile yaptığı çökme miktarı ölçülmüştür. Deneye ait çökme değeri Şekil 3.5'te verilmiştir. Tüm beton gruplarında sabit çökme değeri ortalama olarak 7 cm seçilmiştir. Her seride sabit çökme değerini yakalamak için su ilavesinde değişikliğe gidilmiştir. Ayrıca her seride su ihtiyacını azaltmak için akışkanlık kazandırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır.

Şekil 3.5. Beton numunelerinin hazırlanmasında yapılan çökme deneyi

TS 1247 [93] standardında belirtilen esaslara uygun olarak betonun kalıplara dökümü, yerleştirilmesi ve sıkıştırılması gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan beton karışımı deneyler için 100x100x100 mm'lik önceden yağlanmış küp kalıplara yerleştirilmiştir. Ardından kalıplar sarsma tablasına yerleştirilerek, harçtaki hava kabarcıkları çıkışı azalana kadar ve ayrışmaya meydan vermeyecek şekilde sıkıştırma enerjisi uygulanmıştır. Kalıplardan çıkarılan beton numuneler 28 gün boyunca 22±3 °C kirece doygun suda kür edilmiştir. Şekil 3.6'da kür tankında bekletilen beton numuneler gösterilmektedir. Kür süresini tamamlayan numuneler kür tankından çıkartılarak, Şekil 3.7'de gösterildiği üzere 3 gün boyunca dış ortamda bekletilmiştir. Betonun mekanik davranışları üzerindeki etkilerini belirleyebilmek amacıyla basınç ve yarmada çekme dayanımı tayini yapılmıştır. Mekanik davranışları açıklamada yardımcı olması için ise numunelerin fiziksel özellikleri; porozite tayini, ultrases geçiş hızı tayini ve kapiler su emme tayini deneyleri ile tespit edilmiştir.



Şekil 3.6. Beton numunelere kür uygulanması

Şekil 3.7. Kürden çıkarılan numuneler

3.4. Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler

3.4.1. Görünür Porozite Tayini Deneyi

Porozite tayini için 100x100x100 mm'lik küp numuneler hazırlanmıştır. 28 gün kirece doygun su içerisinde kür işlemine tabi tutulan numuneler, kür havuzundan çıkarılarak dış ortamda 3 gün bekletilmiştir. TS EN 772-4' e uygun olarak porozite tayini [95] deneyi yapılmıştır. Karbonatlaşma deneyi öncesi ve sonrasında, numunelerin hassas terazide doygun yüzey kuru ağırlığı (W_{dyk}), sualtındaki ağırlığı (W_{su}) ve etüvde kurutulduktan sonra kuru ağırlığı (W_{kuru}) tartılmıştır. Elde edilen bu ağırlıklar ile Eşitlik 3.1'de verilen formül kullanılarak porozite değeri elde edilmiştir [96].

$$P = \frac{(W_{dyk} - W_{kuru})}{(W_{dyk} - W_{su})} 100 \qquad (3.1)$$

Burada;

P : Porozite (%),

W_{dyk} : Numunelerin doygun yüzey kuru ağırlığı (kg),

W_{kuru} : Numunelerin etüv kurusu ağırlığı (kg),

W_{su} : Numunelerin su altındaki ağırlığı (kg).

3.4.2. Ultra Ses Geçiş Hızı Tayini Deneyi

Ultrasonik testler betonun nem durumundan etkilendiği için [53], test öncesinde numuneler etüvde kurutulmuştur. Hazırlanan beton numunelerinin, 75±5 °C' de sabit kütleye ulaşana kadar etüvde kurutulduktan sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar soğuması beklenmiştir. Ultrases hız ölçümü, 12 voltluk akümülatör ile çalışan dijital göstergeli Ultrases ölçme aleti ile yapılmıştır. BS 1881 Part 203 (1986)'ya uygun olan ultrases aletinin frekansı 55 kHz, modeli ASTM 597-02 (2002) olarak belirtilmiştir [97,98]. Aletin önce sıfır ayarı yapılarak kalibre edilmiştir. Numunelerin her iki yanına vazelin sürülerek proplar ile numune arasında boşluk oluşması önlenmiştir. Beton numunenin bir ucuna ultrasesi oluşturan verici, diğer ucuna da malzeme içinden geçen ses dalgalarını alan bir alıcı yerleştirilmiştir. Alıcı tarafından tutulan ses dalgaları bir osilografa

nakledilerek sesin örnek içinden geçiş zamanı tespit edilerek burada sesin örnekteki yayılma hızı bulunmuştur. Her seriden üç adet küp numune üzerinde yapılan deney ile ses dalgaları geçirme süreleri ölçülmüştür. Ölçümlerde direkt iletim yöntemi uygulanmıştır. Ultrases hızı geçiş süresi değerleri (t, ms) olarak ölçülmüştür. Eş. 3.2 nolu denklem ile hesaplanarak bulunmuştur. Deneyde kullanılan ultrases geçiş hızı deney düzeneği ve ölçüm cihazı Şekil 3.8'de verilmiştir.

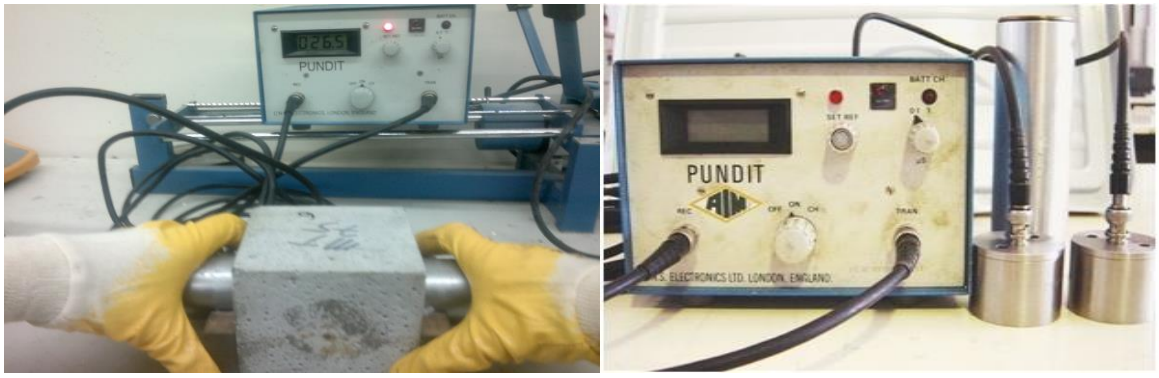
$$V = \frac{h}{t} \times 10^6 \tag{3.2}$$

Formüldeki;

V = Ultrases hızı (km/sn),

h = Beton numunenin ses üstü dalga gönderilen yüzeyi ile dalganın alındığı yüzeyi arasındaki mesafe (km),

t = Sesüstü dalganın gönderilmiş olduğu beton yüzeyinden alındığı yüzeye kadar geçen zaman (µsn) dır.



Şekil 3.8. Ultrases geçiş hızı deney düzeneği ve ölçüm cihazı

3.4.3. Kılcal Su Emme Deneyi

Her bir seriden; kontrol ve 7, 14, 28 günlük karbonatlaşma deneyi sonrasında 3'er adet 100x100x100 mm'lik küp numuneler üzerinde, TS 4045' e uygun olarak kapiler su emme tayini [99] deneyi yapılmıştır. Numuneler 28 günlük kürden sonra 75±5°C 'de değişmez ağırlığa kadar kurutulduktan sonra laboratuar ortamında (20 ±2 °C) soğumaya bırakılmıştır. Numunelerin sınırlı bir alandan su emmesi için yan yüzeyleri tamamen parafin ile kaplanarak suya yerleştirilmiştir. Su yüksekliği numune tabanından 5 mm

olacak şekilde ayarlanmış ve deney boyunca bu seviye korunmuştur. Numuneler belirli zamanlarda (0, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360 ve 1440 dk.) tartılmıştır. Kılcal su emme katsayıları Eş. 3.3 nolu bağıntı kullanılarak belirlenmiştir. Kılcal su emmede kullanılan deney düzeneği Şekil 3.9'da verilmiştir.

$$K = \frac{Q}{A \times \sqrt{t}} \tag{3.3}$$

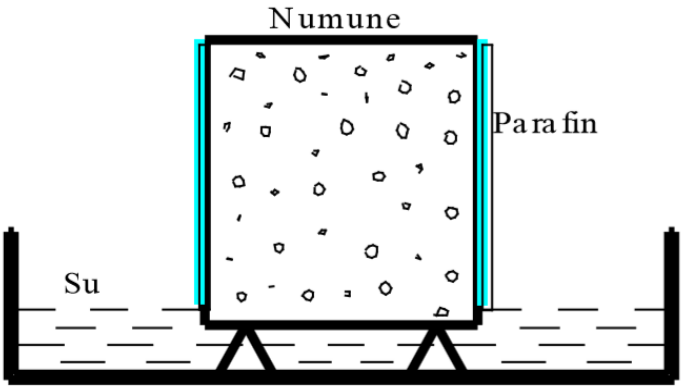
Denklemde yer alan;

Q = Numunenin absorbe ettiği su miktarı, (cm^3);

A = Suya temas eden yüzeyin alanı, (cm^2);

K = Kapiler su emme katsayısı ($cm/sn^{1/2}$) ve

t = Zaman, (s) parametrelerini ifade etmektedir.



Şekil 3.9. Kılcal su emme deney düzeneği

3.4.4. Basınç Dayanımı Deneyi

TS EN 12390-3' e uygun olarak basınç dayanımı deneyi yapılmıştır [100]. Serilerde kontrol, 7, 14 ve 28 günlük karbonatlaşmaya tabii tutulan numuneler için farklı gün sürelerine göre basınç dayanımlarına ayrı ayrı bakılmıştır. Küp numunelerin basınç deneyleri Şekil 3.10'da görülen Autotest 3000 hidrolik yük kontrolü Beton Basınç Dayanım Presinde, 3 kN/sn yükleme hızı uygulanarak gerçekleştirildi. 25 farklı beton serisinin her birinden 3'er numune kırılarak bunların ortalamaları o seriye ait basınç dayanımı değeri olarak kaydedildi. İşlem sabit hızla ve darbe etkisi yapmayacak şekilde kırılma gerçekleşene kadar devam etmiş, kırılma anında deney presinde okunan değer, basınç kuvveti olarak kaydedilmiştir.

$$\sigma_{basınç} = \left[\frac{P}{A} \right] \quad (3.4)$$

σ = Basınç dayanımı (N/mm^2)

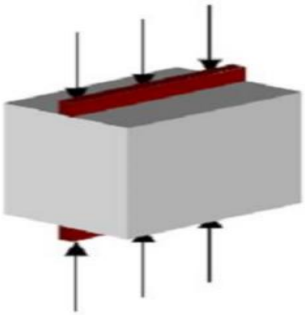
P = Kırılma yükü (N)

A = Yüklemenin yapıldığı kesit alanı (mm^2)

Şekil 3.10. Basınç dayanımı deney düzeneği

3.4.5. Yarmada-Çekme Dayanımı Deneyi

Hazırlanan küp numuneler üzerinde, TS EN 12390-6' ya uygun olarak yarmada çekme dayanımı tayini deneyi [101] yapılmıştır. Deney esnasında uygulanan yükleme hızı 0,47 KN/sn olacak şekilde sabit tutulmuştur. Küp veya prizma şekilli numunelere deney uygulanması esnasında, sabitleme işlemi için bilinen düz yükleme plâkaları yerine eğri (yarım daire kesitli) çelik yükleme parçaları kullanılabilir. Sabitleme cihazı numune ve sıkıştırma şeridini konumunda tutmak için kullanılmıştır. Sabitleme cihazı, deney esnasında numunede oluşacak şekil değişimini engellememelidir.



Şekil 3.11. Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği [102].

Şekil 3.11'de görülen sıkıştırma şeritleri, TS EN 316' ya [103] uygun, yoğunluğu ±900 kg/m3 ve genişliği (a) = (10±1) mm, kalınlığı (t) = (4±1) mm ve uzunluğu, deney numunesine temas boyundan daha fazla olan, sert mukavvadan yapılmıştır. Sert mukavva sıkıştırma şeridi, bir defa kullanıldıktan sonra atılır, tekrar kullanılmaz. Yarmada çekme dayanımı tayininde, aşağıda verilen Eşitlik 3.5 kullanılmıştır.

Şekil 3.12. Yarmada çekme dayanımı tayini uygulaması

$$f_{ct} = \frac{2.F}{\pi.L.d} \tag{3.5}$$

f_{ct} = Yarmada çekme dayanımı (MPa)

F = Kırılma yükü (N)

L = Numunenin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğu(mm)

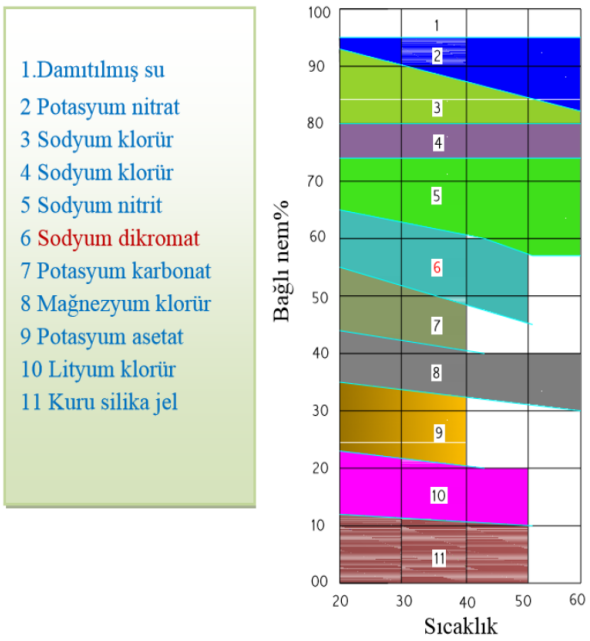
D = Numunenin en kesit boyutu (mm) ifade etmektedir.

3.4.6. Karbonatlaşma Deneyi

Karbonatlaşma deneyinde sonuçların çabuk elde edilmesi için numunelere, hızlandırılmış karbonatlaşma testi uygulanmıştır. Bu test betonun zenginleştirilmiş CO_2 ortamına maruz bırakılmasından ibarettir. Öncelikle 25 farklı serinin 7, 14 ve 28 günlük karbonatlaşma derinliğine bakılması amaçlanmıştır. Bu amaçla hazırlanmış gaz sızdırmaz tankın içindeki ekipmânlar kontrol edilerek numuneler yerleştirilmiştir. Tankın içinde gaz miktarının belirlenmesi için manometre, ortamın bağıl neminin kontrolü için termostat ve resistanslı su kabı, tank içindeki havanın türbülânsı için fan ve kontrol paneli bulunmaktadır. Tank içindeki nemin ayarlanmasında Şekil 3.13'te verilen grafikten yararlanılmıştır. %65 nem için sodyum dikromat tuzu seçilmiştir. Seçilen bu tuzun doymuş haldeki çözeltisi, sırası geldiğinde tankın su kabına konulmak üzere Tablo 3.8'e göre hazırlanmıştır.

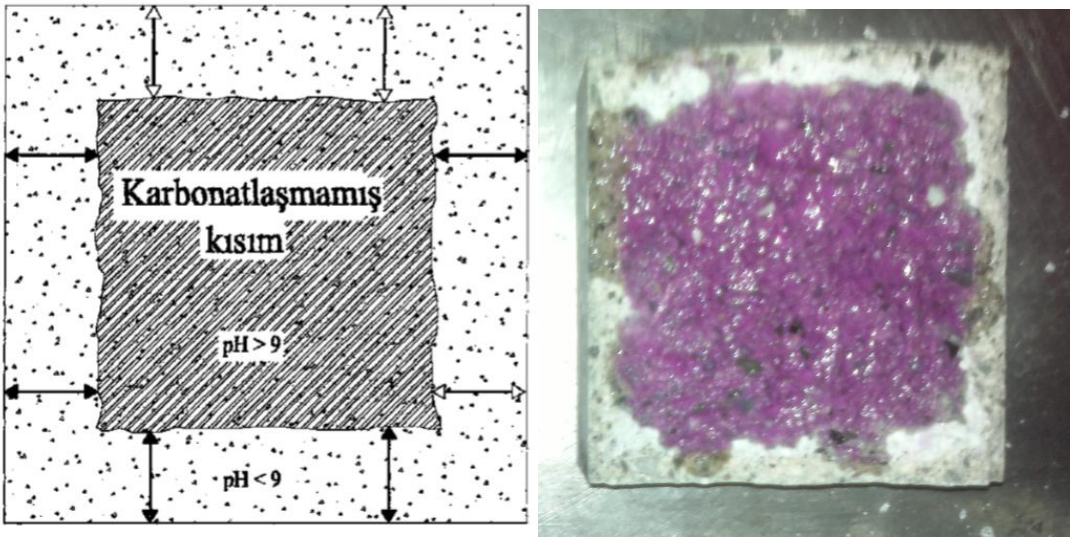
Tablo 3.9. 100 gr suda değişik sıcaklıklardaki doymuş tuz çözeltileri [104].

Çözelti Adı	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Potasyumnitrat (KNO_3)	13,3	20,9	31,6	45,8	63,9	85,5	110	138	169	202	246
Sodyumklorür (NaCl)	35,7	35,8	36	36,3	36,6	37	37,3	37,8	38,4	39	39,8
Sodyumnitrür ($NaNO_2$)	72,1	78	84,5	91,6	98,4	104,1			132,6		163,2
Sodyumdikromat ($Na_2Cr_2O_7$)	163		177,8			244,8		316,7	376,2		
Potasyumkarbonat (K_2CO_3)	105,5	108	110,5	113,7	116,9	121,2	126,8	133,1	139,8	147,5	155,7
Magnezyumklorit ($MgCl_2$)	52,8	53,5	54,5		57,5		61		66		73
Lityum klorit	216,7	233,9	255,6	238,8	323,3						



Şekil 3.13. Değişik tuzların nem sağlama miktarları [105].

Numuneler tankın içine yerleştirilerek tankın kapağı sıkıca kapatılmıştır. Tek yönlü valf aracılığı ile CO_2 dolu tüpten tankın içerisine basınç 0,8 bar (%40 CO_2) olana kadar CO_2 verilmiştir. Numuneler 7, 14 ve 28 gün süreler halinde bekletilmiştir. Tanktan çıkarılan numunelerin porozite, ultreses geçiş hızı ve kılcal su emme tayini deneyleri yapıldıktan sonra basınç dayanımlarına bakılmıştır. Karbonatlaşma deneyi için yarmada çekme dayanımına bakılması esnasında, pres aletinde kırılan numuneler kalıp gören karşılıklı iki yüzeyi doğrultusunda kesilmiş ve kesilen bu yüzey tel fırça ile toz ve gevşek partiküllerden arındırılmıştır. %1 phenolphtaleinin ($C_2OH_{14}O_4$) %70 etil alkolde çözülmesiyle hazırlanan indikatör kesilen yüzeyin temizlenmesinin hemen ardından yüzeye püskürtülmüş ve yüzeyde oluşan renksiz kısım 0,01 hassasiyetli elektronik kumpas ile Şekil 3.14'deki gibi 8 farklı yerden ölçüm alınmıştır. Şekil 3.15'te farklı serilerde fenolftalein çözeltisi sıkılmış beton numuneleri yer almaktadır.



Şekil 3.14. Karbonatlaşma derinliğinin belirlenmesi [5].

Şekil 3.15. Farklı serilerde fenolftalein çözeltisi sıkılmış beton numuneleri

Şekil 3.16. Elektronik kumpas

Karbonatlaşma derinliği (KD) Şekil 3.16'da gösterilen elektronik kumpas aleti yardımıyla ölçülmüştür. Bu tip ölçümler daha önce Ramezanianpour [106], Claisse [107] ve Paillere [108] tarafından Eş. 3.6 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$KD = \frac{A1 + A2 + B1 + B2 + C1 + C2 + D1 + D2}{8} \tag{3.6}$$

Karbonatlaşma derinliği BS EN 13293-2004 standardına uygun olarak ölçülmüştür [109]. Şekil 3.17'de gaz sızdırmaz tank düzeneği, Şekil 3.18'de gaz sızdırmaz tanka yerleştirilen beton numuneleri gösterilmektedir.

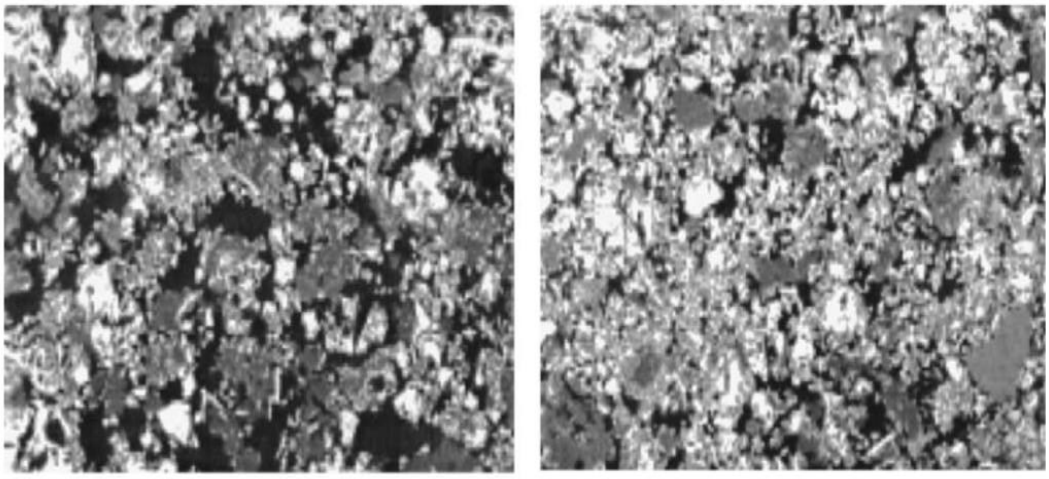
Şekil 3.17. Gaz sızdırmaz tank düzeneği

Şekil 3.18. Gaz sızdırmaz tanka yerleştirilen beton numuneleri

3.4.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

SEM analiz çalışması, Fırat Üniversitesi FÜEM laboratuvarı bünyesinde JEOL JSM 7001F Taramalı mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. SEM tekniği kısaca, özel hazırlanmış sınırlı kalınlıktaki numunelerden yüksek enerjili elektron demeti geçirerek görüntü almaya olanak veren ve elektron demetinin numune içinden geçerken uğradığı difraksiyonla faz karakterizasyonu da sağlayan bir tekniktir. SEM çimento kimyasında çimento klinkerinin ve betondaki agreganın muayenesi için kapsamlı bir şekilde kullanılmaktadır. Çimento kimyasını ilgilendiren pek çok materyal optik mikroskoptan çözümlemek imkânsız olduğundan SEM bu alanda oldukça kullanışlıdır [110].

SEM hidradatlaşmış çimento yapısının anlaşılmasında önemli rol oynar. Numunenin yüzeyine elektron saçılır, saçılan elektronlar bir dedektör tarafından toplanır ve ışın tüpü üzerine düşen görüntü gözlemlenir [111]. Şekil 3.18a'da karbonatlaşma reaksiyonu göstermeyen beton numunesi ve Şekil 3.18b'de karbonatlaşma reaksiyonu gösteren beton numunesinden örnek görüntüler gösterilmektedir.

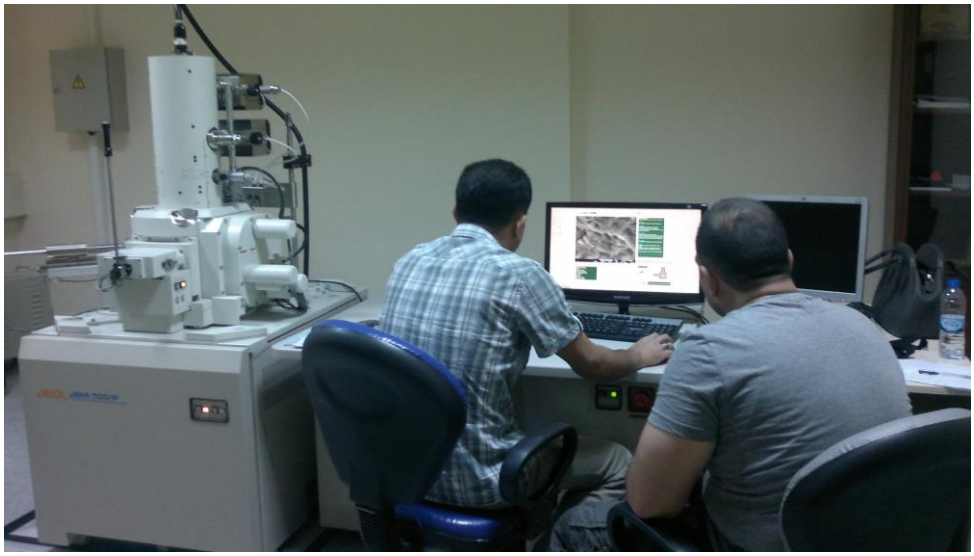


a) Karbonatlaşmayan bölge **b**) Karbonatlaşan bölge

Şekil 3.19. Karbonatlaşma reaksiyonu gösteren ve göstermeyen beton kesitinin elektron mikroskobunda görünümü [112].

Şekil 3.18'de karbonatlaşma reaksiyonu gerçekleşen ve karbonatlaşma reaksiyonu gerçekleşmeyen beton kesitinin SEM görüntüleri örnek olarak gösterilmiştir. Bu görüntülerde karbonatlaşma reaksiyonu gerçekleşen bölgenin açık renkte, karbonatlaşma reaksiyonu gerçekleşmeyen bölgenin ise koyu renkte olduğu saptanmıştır.

Bu tez çalışmasından elde edilen beton numunelerinin, içyapılarının incelenmesi amacıyla numunelerden alınan küçük parçalara, elektron mikroskobunda 10-20 kV hızlandırılmış elektron bombardımanı uygulanarak numune yüzeyi hakkında detaylı bir topografik çalışma yapılmıştır. Çalışmada kullanılan SEM cihazı Şekil 3.19'da gösterilmektedir.



Şekil 3.20. JEOL JSM 7001F taramalı mikroskobu

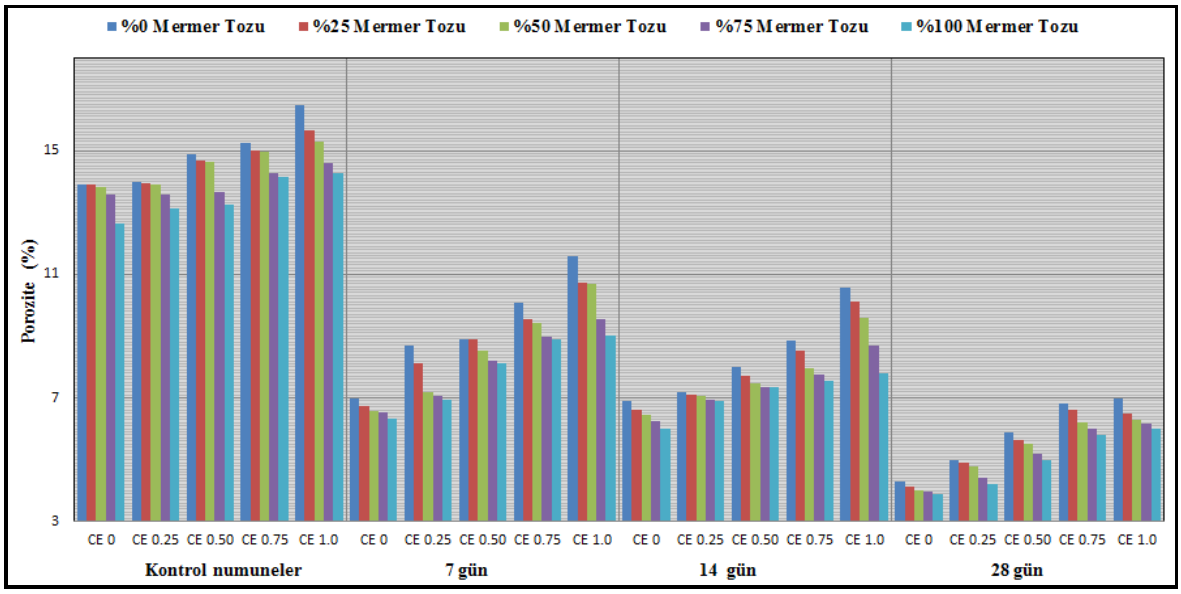
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Porozite Deney Sonuçları

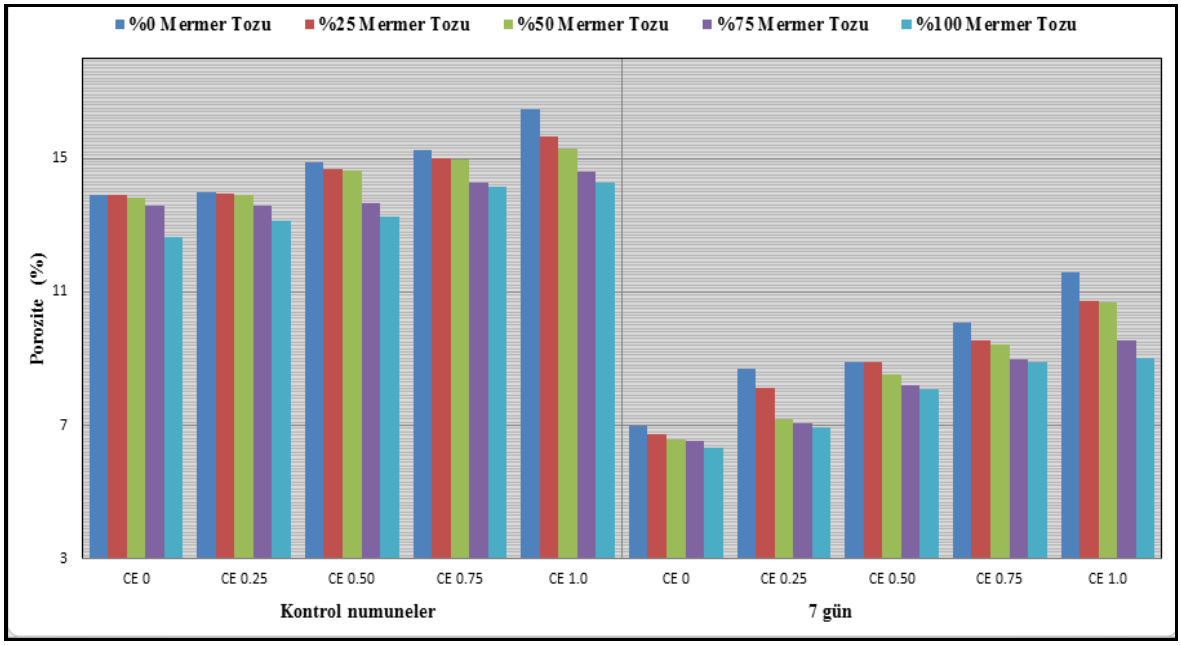
Tablo 4.1. Numunelerin ortalama porozite değerleri

KONTROL NUMUNELERİNİN POROZİTE DEĞERLERİ (%)									
CE0-MT0	13.92	**CE0.25-MT0**	14.00	**CE0.50-MT0**	14.88	**CE0.75-MT0**	15.26	**CE1-MT0**	16.48
CE0-MT25	13.89	**CE0.25-MT25**	13.94	**CE0.50-MT25**	14.69	**CE0.75-MT25**	15.00	**CE1-MT25**	15.65
CE0-MT50	13.83	**CE0.25-MT50**	13.90	**CE0.50-MT50**	14.65	**CE0.75-MT50**	14.96	**CE1-MT50**	15.28
CE0-MT75	13.56	**CE0.25-MT75**	13.56	**CE0.50-MT75**	13.65	**CE0.75-MT75**	14.28	**CE1-MT75**	14.59
CE0-MT100	12.63	**CE0.25-MT100**	13.12	**CE0.50-MT100**	13.23	**CE0.75-MT100**	14.13	**CE1-MT100**	14.26
7 GÜN KARBONATLAŞMAYA MARUZ BIRAKILMIŞ NUMUNELERİN POROZİTE DEĞERLERİ (%)									
CE0-MT0	6.99	**CE0.25-MT0**	8.68	**CE0.50-MT0**	8.91	**CE0.75-MT0**	10.08	**CE1-MT0**	11.58
CE0-MT25	6.73	**CE0.25-MT25**	8.14	**CE0.50-MT25**	8.89	**CE0.75-MT25**	9.54	**CE1-MT25**	10.72
CE0-MT50	6.58	**CE0.25-MT50**	7.18	**CE0.50-MT50**	8.52	**CE0.75-MT50**	9.41	**CE1-MT50**	10.68
CE0-MT75	6.54	**CE0.25-MT75**	7.08	**CE0.50-MT75**	8.22	**CE0.75-MT75**	8.98	**CE1-MT75**	9.54
CE0-MT100	6.33	**CE0.25-MT100**	6.99	**CE0.50-MT100**	8.10	**CE0.75-MT100**	8.88	**CE1-MT100**	9.00
14 GÜN KARBONATLAŞMAYA MARUZ BIRAKILMIŞ NUMUNELERİN POROZİTE DEĞERLERİ (%)									
CE0-MT0	6.89	**CE0.25-MT0**	7.20	**CE0.50-MT0**	8.00	**CE0.75-MT0**	8.84	**CE1-MT0**	10.58
CE0-MT25	6.60	**CE0.25-MT25**	7.10	**CE0.50-MT25**	7.73	**CE0.75-MT25**	8.54	**CE1-MT25**	10.10
CE0-MT50	6.47	**CE0.25-MT50**	7.05	**CE0.50-MT50**	7.48	**CE0.75-MT50**	7.97	**CE1-MT50**	9.60
CE0-MT75	6.23	**CE0.25-MT75**	6.96	**CE0.50-MT75**	7.36	**CE0.75-MT75**	7.77	**CE1-MT75**	8.70
CE0-MT100	6.00	**CE0.25-MT100**	6.94	**CE0.50-MT100**	7.33	**CE0.75-MT100**	7.57	**CE1-MT100**	7.81
28 GÜN KARBONATLAŞMAYA MARUZ BIRAKILMIŞ NUMUNELERİN POROZİTE DEĞERLERİ (%)									
CE0-MT0	4.30	**CE0.25-MT0**	5.00	**CE0.50-MT0**	5.90	**CE0.75-MT0**	6.80	**CE1-MT0**	7.00
CE0-MT25	4.15	**CE0.25-MT25**	4.90	**CE0.50-MT25**	5.65	**CE0.75-MT25**	6.60	**CE1-MT25**	6.50
CE0-MT50	4.00	**CE0.25-MT50**	4.77	**CE0.50-MT50**	5.50	**CE0.75-MT50**	6.20	**CE1-MT50**	6.30
CE0-MT75	3.95	**CE0.25-MT75**	4.40	**CE0.50-MT75**	5.20	**CE0.75-MT75**	6.00	**CE1-MT75**	6.15
CE0-MT100	3.90	**CE0.25-MT100**	4.20	**CE0.50-MT100**	5.00	**CE0.75-MT100**	5.80	**CE1-MT100**	6.00

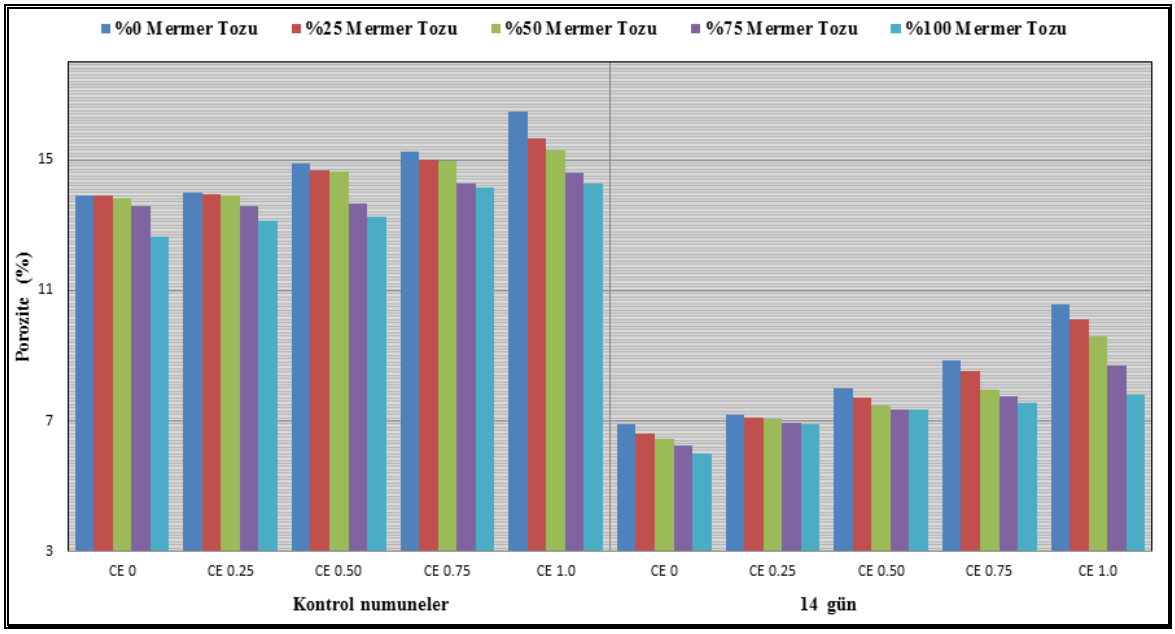
Deneysel çalışmalardan elde edilen beton numunelere ait ortalama porozite değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Numunelerden elde edilen porozite değerlerinin, değişen karbonatlaşma süreleri ve cam elyaf oranlarına göre değişim grafikleri Şekil 4.1 - Şekil 4.4'de verilmiştir.



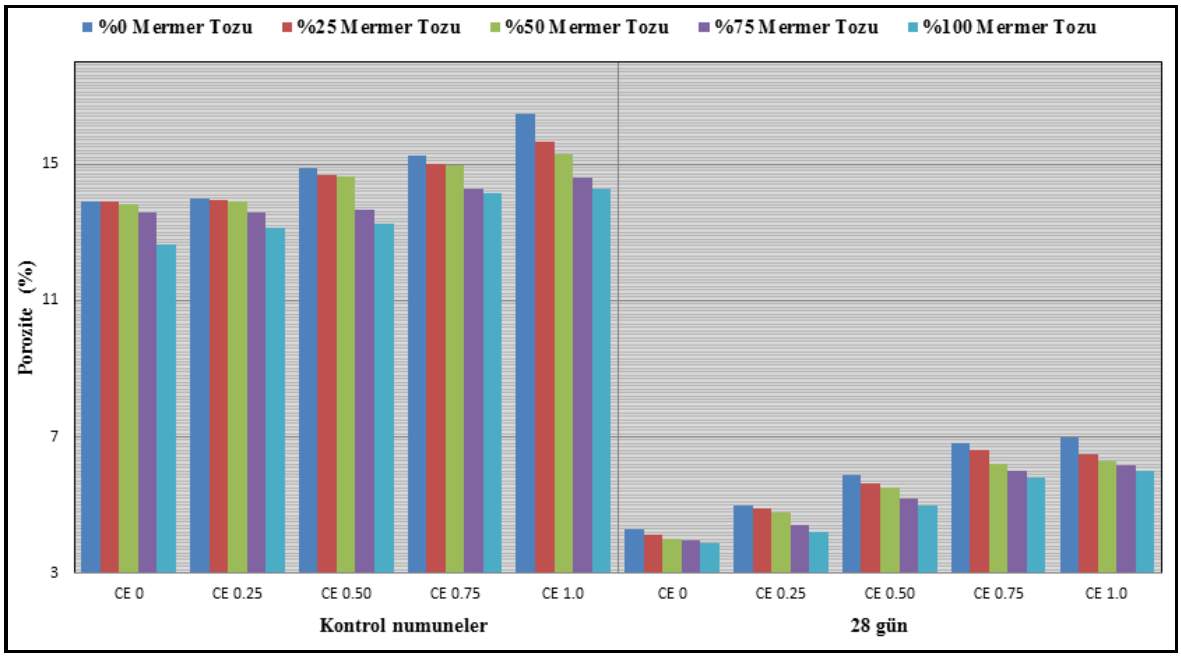
Şekil 4.1. Kontrol ve 7, 14, 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin porozite değerleri



Şekil 4.2. Kontrol ve 7 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin porozite değerleri



Şekil 4.3. Kontrol ve 14 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin porozite değerleri



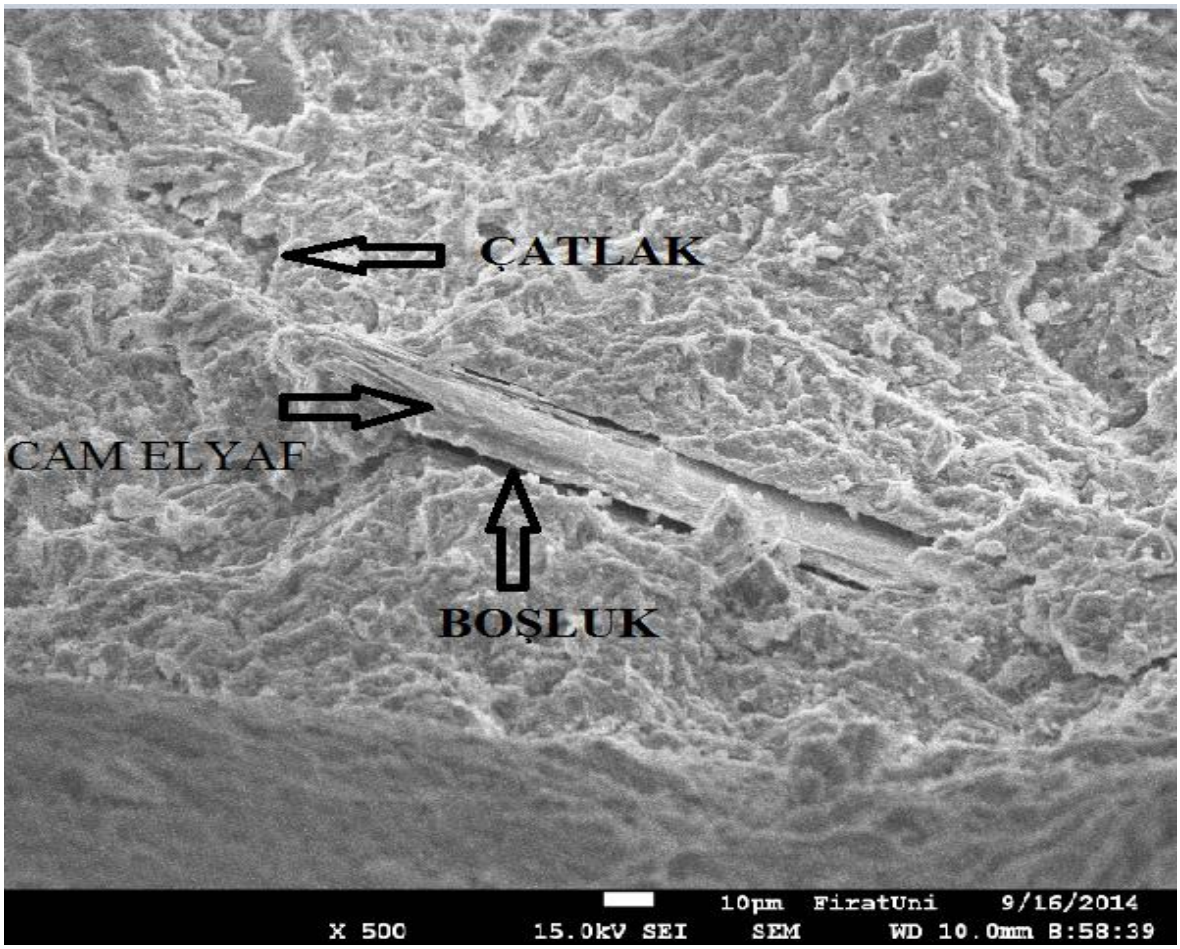
Şekil 4.4. Kontrol ve 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin porozite değerleri

Şekil 4.1'deki grafiği incelediğimizde karbonatlaşma süresi arttıkça, numunelerin ortalama porozite değerlerinin kontrol grubuna göre azaldığı görülmektedir. Çünkü karbonatlaşma belirli çaptaki boşluklarda anlamlı oranlarda daralmalar meydana getirir. [63]. Karbonatlaşmanın ürünü olarak ortaya çıkan kalsiyum karbonat kalsiyum hidroksitten

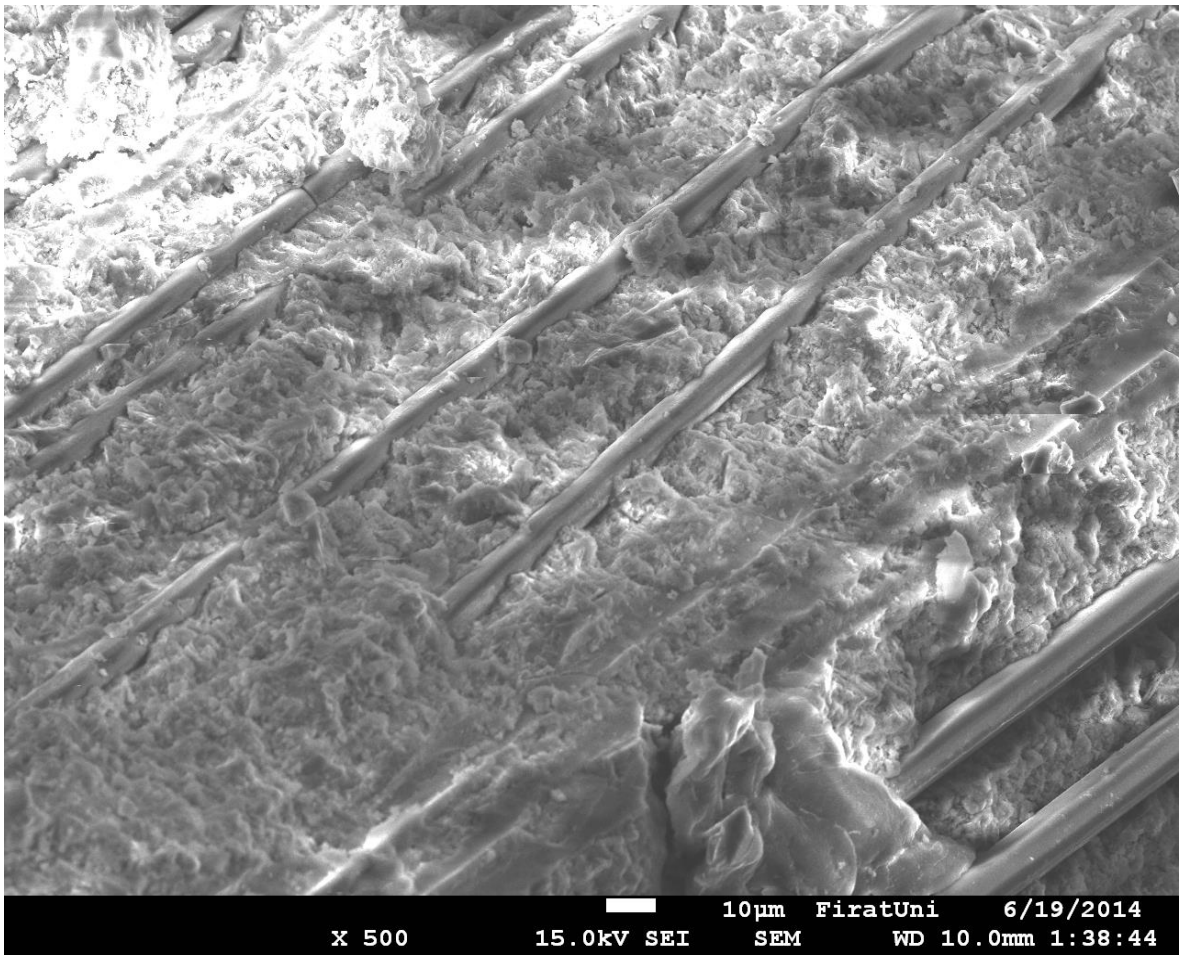
daha fazla yer işgal ettiğinden dolayı karbonatlaşmış betonların yüzey porozitesi azalır [113,114].

Ayrıca cam elyafın artmasıyla porozite değerleri artarken, mermer tozunun artmasıyla da porozite değerlerinde azalma görülmüştür. Beton numunelerindeki en yüksek porozite değeri, cam elyafın en yoğun olduğu ve mermer tozunun bulunmadığı kontrol CE1–MT0 serilerinde görülmüştür. En yüksek değerin cam elyaflı seride çıkmasının nedeni beton ile cam elyaf arasında oluşan aderans yetersizliğidir. Bu sebepten dolayı oluşan boşluklar poroziteyi arttırmaktadır. Bu durum Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 daki SEM görüntüleriyle desteklenmiştir.

Mermer tozunun tane boyutunun, 250 μm'den küçük olması boşlukları doldurarak daha geçirimsiz bir yapı oluşturmuştur. Bu nedenle mermer tozunun artışı boşluk miktarını azaltmış ve porozite değerlerini düşürmüştür. Şekil 4.1'deki grafikte en düşük porozite değerlerinin mermer tozunun en yoğun olduğu ve cam elyaf bulunmadığı 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılan CE0 – MT100 serilerinde görüldüğü belirlenmiştir.



Şekil 4.5. Cam elyaf ve mermer tozu katkılı beton numunelerinin SEM görüntüsü



Şekil 4.6. Cam elyaf ve mermer tozu katkılı beton numunelerinin SEM görüntüsü

Şekil 4.2'ye bakıldığında 7 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılan numunelerin porozite değerlerinde, kontrol numunelerine göre %30.10-%52.42 oranları arasında azalma meydana gelmiştir. Şekil 4.3'deki 14 gün karbonatlaşma sonrası porozite grafiğinde, numunelerin porozite değerlerinde %35.46-%54.05 arasında bir azalış olduğu belirlenmiştir. Gün sayısının 28'e çıkmasıyla porozite değerleri deneydeki en düşük sonuçlara ulaşmıştır. Şekil 4.4'deki grafikte numunelerin porozite değerlerinde kontrol grubuna göre %55.44-%71.07 değerleri arasında azalma olmuştur.

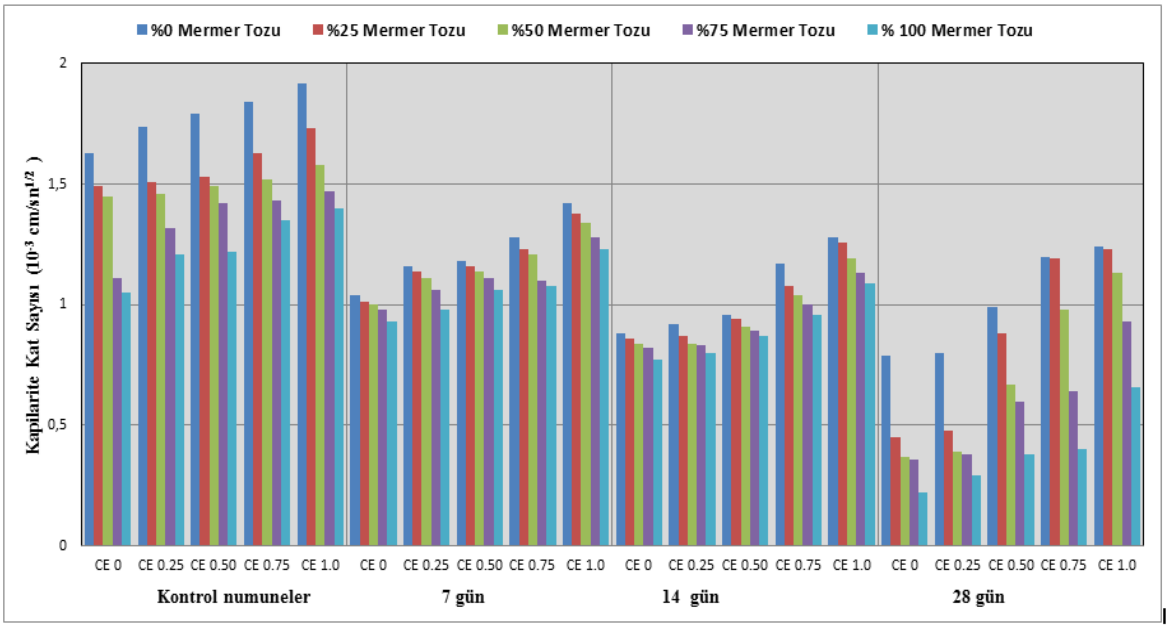
Bu durum literatürlede uyumludur. Houst çalışmasında; toplam porozitede %10.6 - %5.7 arasında bir indirgemenin meydana geldiğini ve etkinliğin düşük S/Ç oranlı hamurlarda oluştuğunu, karbonatlaşmanın etkinliğinin 0.01 µm'den ince yarıçaplı boşluklarda arttığını gözlemlemiştir [115].

4.2. Kapiler Su Emme Deney Sonuçları

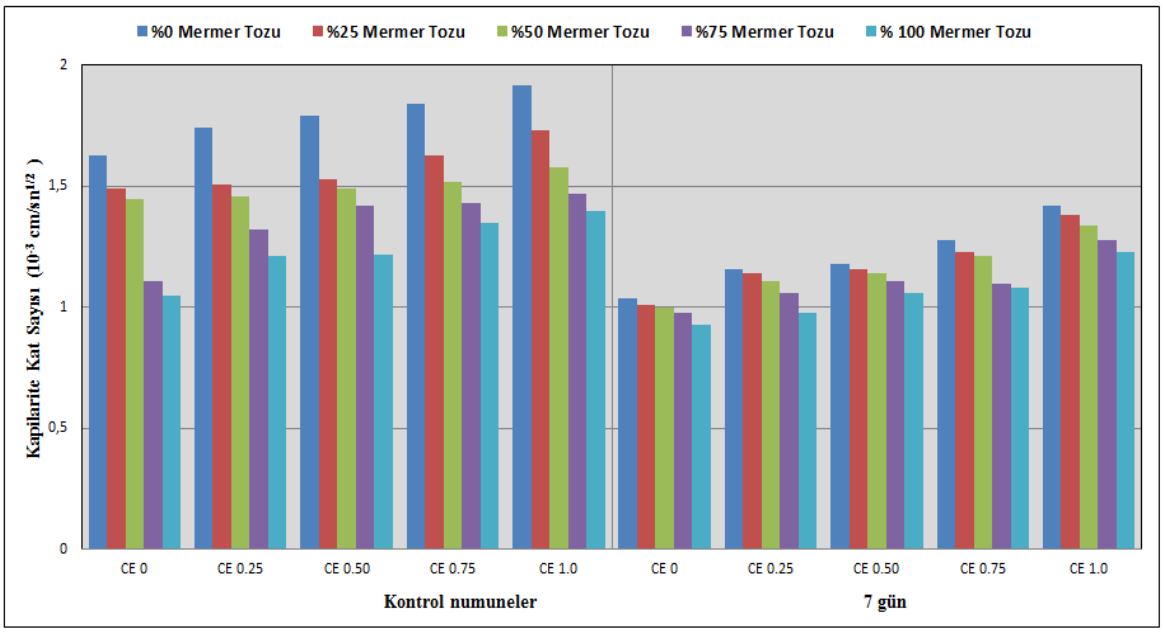
Tablo 4.2. Numunelerin ortalama kapiler su emme katsayıları

KONTROL NUMUNELERİNİN KAPİLARİTE DEĞERLERİ (10^{-3} cm/sn$^{1/2}$)									
CE0-MT0	1.63	**CE0.25-MT0**	1.74	**CE0.50-MT0**	1.79	**CE0.75-MT0**	1.84	**CE1-MT0**	1.92
CE0-MT25	1.49	**CE0.25-MT25**	1.51	**CE0.50-MT25**	1.53	**CE0.75-MT25**	1.63	**CE1-MT25**	1.73
CE0-MT50	1.45	**CE0.25-MT50**	1.46	**CE0.50-MT50**	1.49	**CE0.75-MT50**	1.52	**CE1-MT50**	1.58
CE0-MT75	1.11	**CE0.25-MT75**	1.32	**CE0.50-MT75**	1.42	**CE0.75-MT75**	1.43	**CE1-MT75**	1.47
CE0-MT100	1.05	**CE0.25-MT100**	1.21	**CE0.50-MT100**	1.22	**CE0.75-MT100**	1.35	**CE1-MT100**	1.40
7 GÜN KARBONATLAŞMAYA MARUZ BIRAKILMIŞ NUMUNELERİN KAPİLARİTE DEĞERLERİ (10^{-3} cm/sn$^{1/2}$)									
CE0-MT0	1.04	**CE0.25-MT0**	1.16	**CE0.50-MT0**	1.18	**CE0.75-MT0**	1.28	**CE1-MT0**	1.42
CE0-MT25	1.01	**CE0.25-MT25**	1.14	**CE0.50-MT25**	1.16	**CE0.75-MT25**	1.23	**CE1-MT25**	1.38
CE0-MT50	1.00	**CE0.25-MT50**	1.11	**CE0.50-MT50**	1.14	**CE0.75-MT50**	1.21	**CE1-MT50**	1.34
CE0-MT75	0.98	**CE0.25-MT75**	1.06	**CE0.50-MT75**	1.11	**CE0.75-MT75**	1.10	**CE1-MT75**	1.28
CE0-MT100	0.93	**CE0.25-MT100**	0.98	**CE0.50-MT100**	1.06	**CE0.75-MT100**	1.08	**CE1-MT100**	1.23
14 GÜN KARBONATLAŞMAYA MARUZ BIRAKILMIŞ NUMUNELERİN KAPİLARİTE DEĞERLERİ (10^{-3} cm/sn$^{1/2}$)									
CE0-MT0	0.88	**CE0.25-MT0**	0.92	**CE0.50-MT0**	0.96	**CE0.75-MT0**	1.17	**CE1-MT0**	1.28
CE0-MT25	0.86	**CE0.25-MT25**	0.87	**CE0.50-MT25**	0.94	**CE0.75-MT25**	1.08	**CE1-MT25**	1.26
CE0-MT50	0.84	**CE0.25-MT50**	0.84	**CE0.50-MT50**	0.91	**CE0.75-MT50**	1.04	**CE1-MT50**	1.19
CE0-MT75	0.82	**CE0.25-MT75**	0.83	**CE0.50-MT75**	0.89	**CE0.75-MT75**	1.00	**CE1-MT75**	1.13
CE0-MT100	0.77	**CE0.25-MT100**	0.80	**CE0.50-MT100**	0.87	**CE0.75-MT100**	0.96	**CE1-MT100**	1.09
28 GÜN KARBONATLAŞMAYA MARUZ BIRAKILMIŞ NUMUNELERİN KAPİLARİTE DEĞERLERİ (10^{-3} cm/sn$^{1/2}$)									
CE0-MT0	0.79	**CE0.25-MT0**	0.80	**CE0.50-MT0**	0.99	**CE0.75-MT0**	1.20	**CE1-MT0**	1.24
CE0-MT25	0.45	**CE0.25-MT25**	0.48	**CE0.50-MT25**	0.88	**CE0.75-MT25**	1.19	**CE1-MT25**	1.23
CE0-MT50	0.37	**CE0.25-MT50**	0.39	**CE0.50-MT50**	0.67	**CE0.75-MT50**	0.98	**CE1-MT50**	1.13
CE0-MT75	0.36	**CE0.25-MT75**	0.38	**CE0.50-MT75**	0.60	**CE0.75-MT75**	0.64	**CE1-MT75**	0.93
CE0-MT100	0.22	**CE0.25-MT100**	0.29	**CE0.50-MT100**	0.38	**CE0.75-MT100**	0.40	**CE1-MT100**	0.66

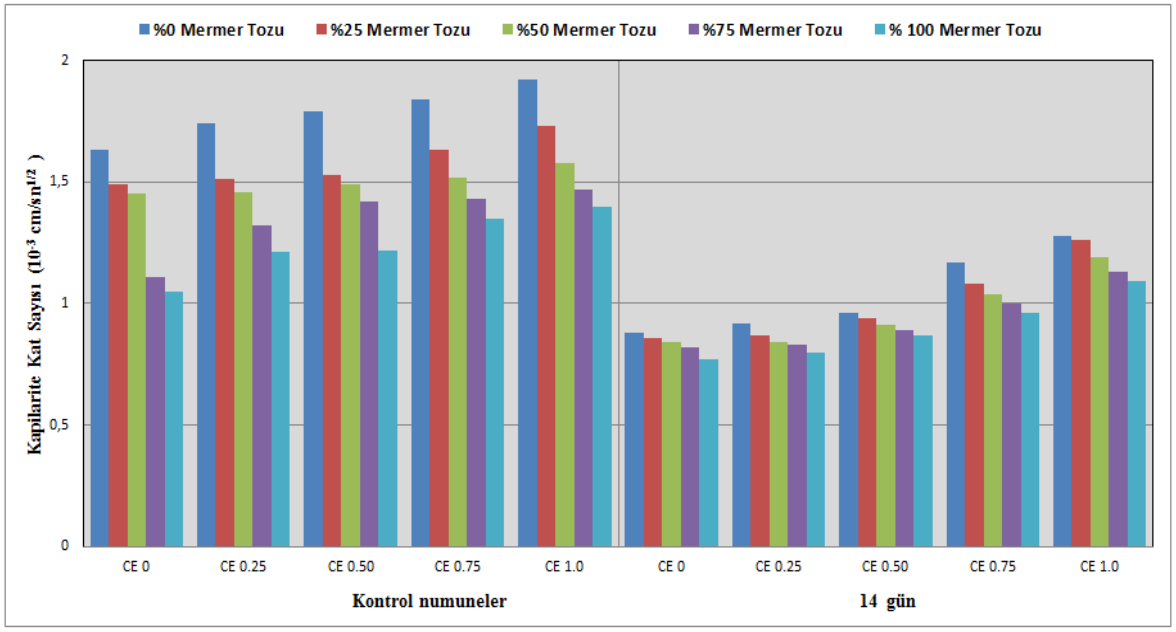
Deneysel çalışmalarda elde edilen beton numunelere ait ortalama kapiler su emme katsayıları Tablo 4.2'de verilmiştir. Numunelerden elde edilen kapilarite katsayılarının, değişen karbonatlaşma süreleri ve cam elyaf oranlarına göre değişim grafikleri Şekil 4.7 - Şekil 4.10'da verilmiştir.



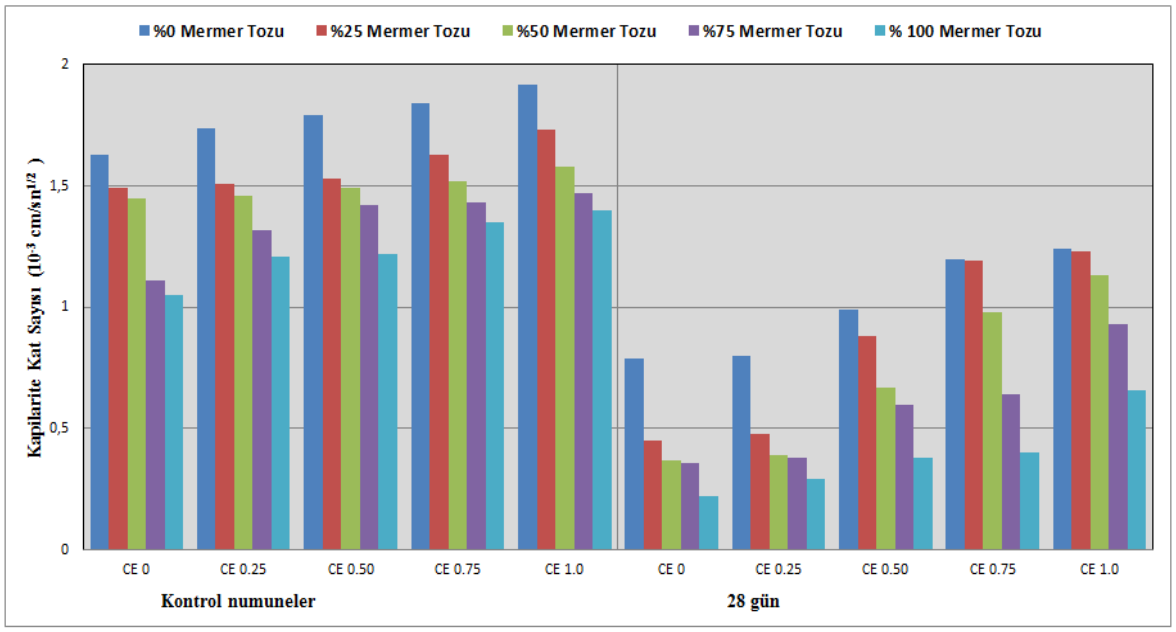
Şekil 4.7. Kontrol ve 7, 14, 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin kılcal su emme değerleri



Şekil 4.8. Kontrol ve 7 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin kılcal su emme değerleri



Şekil 4.9. Kontrol ve 14 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin kılcal su emme değerleri



Şekil 4.10. Kontrol ve 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin kılcal su emme değerleri

Karbonatlaşma toplam boşluk oranını değiştirmemekle beraber kılcal boşlukların mezo ve mikroporozite bölgelerinde etkili olmaktadır. Bu bölge beton durabilitesi üzerinde en önemli rolü olan bölgedir. Geçirimsizliğin sağlanması durabilitede birincil faktördür. Karbonatlaşmanın sağladığı geçirimsizlik agrega-harç ara bölgesinde de etkindir [63]. Böylece karbonatlaşma ile boşluk miktarı azalmaktadır. Boşluk miktarının azalması da

kapilerite değerlerinin azalmasına neden olmaktadır. Bu duruma göre Şekil 4.7'deki grafik incelendiğinde numunelerin ortalama kapilarite değerleri, karbonatlaşma süresinin artmasıyla kontrol numunelere göre azalma göstermiştir. Ayrıca beton numunelerinin kapilarite değerleri, mermer tozunun boşlukları doldurmasıyla azalırken, cam elyafın harç ile yeterli aderansı sağlayamaması ve boşluk oluşturmasıyla artış göstermiştir. En yüksek kapilarite değerini kontrol CE1–MT0 serisi alırken, en düşük kapilarite değerini ise cam elyafın bulunmadığı ve %100 mermer tozunun bulunduğu 28 gün karbonatlaşmaya maruz kalmış CE0–MT100 serisi almıştır.

Şekil 4.8'deki grafik incelendiğinde 7 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin kapilerite değerlerinde, kontrol numunelerine göre %11.43-%36.19 değerleri arasında azalma meydana gelmiştir.

Şekil 4.9'da ise 14 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin kapilarite değerlerinde %22.14-%46.01 arasında azalma belirlenmiştir.

Şekil 4.10'da 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerde ise %28.48-%76.04 değerleri arasında azalma görülmüştür.

Kalsiyum karbonat bileşimi geçirgenliği azaltmakta, daha küçük kapiler bağlantılı gözenekler arasındaki bağlantıları tıkamaktadır [116]. Karbonatlaşmaya maruz bırakılmış örneklerin kapilarite katsayılarının karbonatlaşmamış örneklere göre daha düşük çıkması beklenen bir durumdur. Karbonatlaşma sonucu meydana gelen $CaCO_3$ kristalleri, çimento hamurundaki boşlukların içine yerleştiği için nispeten daha geçirimsiz bir beton meydana gelmiştir [53].

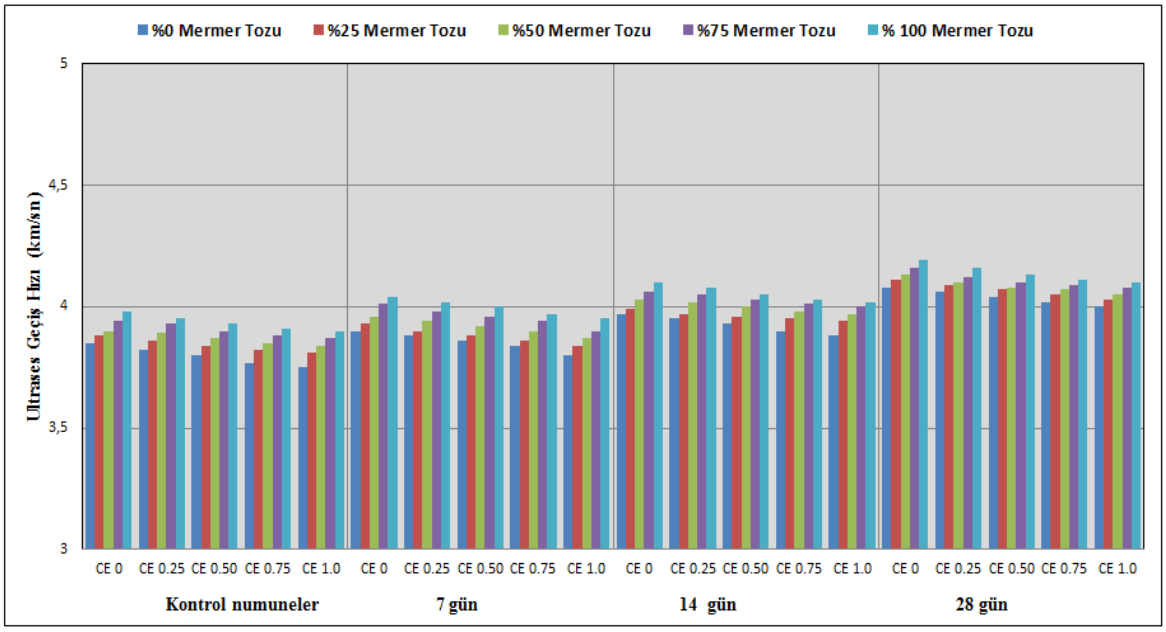
Özkul ve Yıldırım (1996), çalışmalarında kılcallık ile karbonatlaşma arasında doğrusal ilişki elde ettiğini vurgulamışlardır [117]. Elde edilen kapilarite deney sonuçlarının literatürle uyumlu olduğu görülmektedir.

4.3. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları

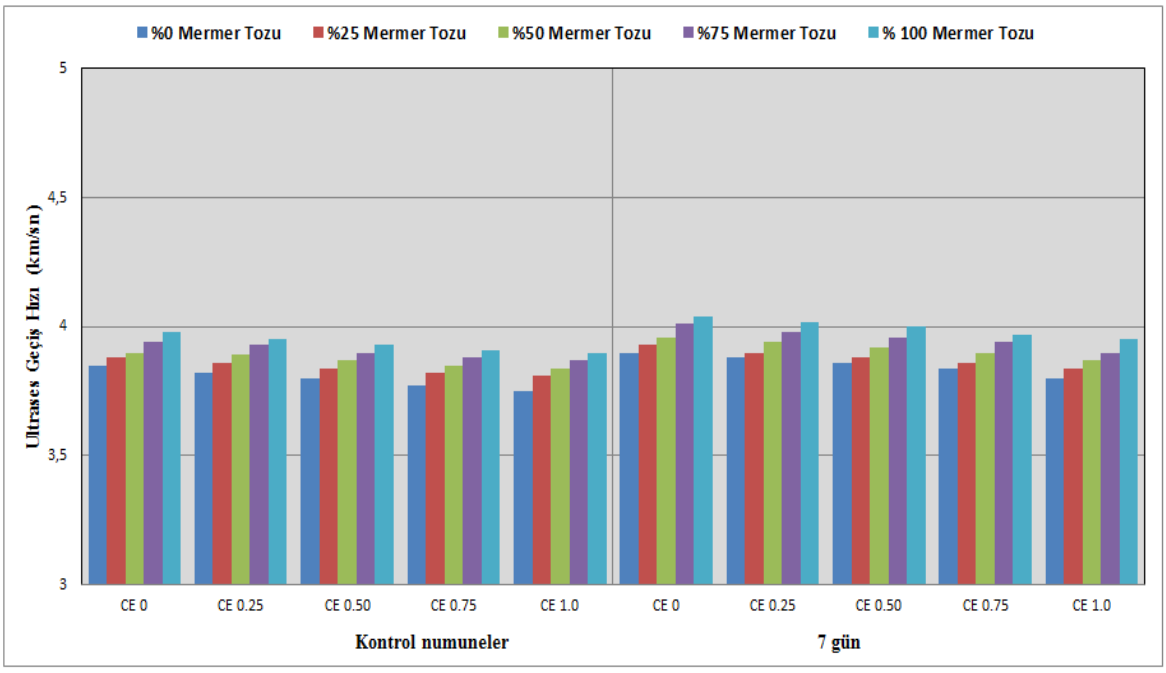
Tablo 4.3. Numunelere ait ortalama ultrases geçiş hızı değerleri

KONTROL NUMUNELERİNİN ULTRASES GEÇİŞ HIZI DEĞERLERİ (km/sn)									
CE0-MT0	3.85	**CE0.25-MT0**	3.82	**CE0.50-MT0**	3.80	**CE0.75-MT0**	3.77	**CE1-MT0**	3.75
CE0-MT25	3.88	**CE0.25-MT25**	3.86	**CE0.50-MT25**	3.84	**CE0.75-MT25**	3.82	**CE1-MT25**	3.81
CE0-MT50	3.90	**CE0.25-MT50**	3.89	**CE0.50-MT50**	3.87	**CE0.75-MT50**	3.85	**CE1-MT50**	3.84
CE0-MT75	3.94	**CE0.25-MT75**	3.93	**CE0.50-MT75**	3.90	**CE0.75-MT75**	3.88	**CE1-MT75**	3.87
CE0-MT100	3.98	**CE0.25-MT100**	3.95	**CE0.50-MT100**	3.93	**CE0.75-MT100**	3.91	**CE1-MT100**	3.90
7 GÜN KARBONATLAŞMAYA MARUZ BIRAKILMIŞ NUMUNELERİN ULTRASES GEÇİŞ HIZI DEĞERLERİ (km/sn)									
CE0-MT0	3.90	**CE0.25-MT0**	3.88	**CE0.50-MT0**	3.86	**CE0.75-MT0**	3.84	**CE1-MT0**	3.80
CE0-MT25	3.93	**CE0.25-MT25**	3.90	**CE0.50-MT25**	3.88	**CE0.75-MT25**	3.86	**CE1-MT25**	3.84
CE0-MT50	3.96	**CE0.25-MT50**	3.94	**CE0.50-MT50**	3.92	**CE0.75-MT50**	3.90	**CE1-MT50**	3.87
CE0-MT75	4.01	**CE0.25-MT75**	3.98	**CE0.50-MT75**	3.96	**CE0.75-MT75**	3.94	**CE1-MT75**	3.90
CE0-MT100	4.04	**CE0.25-MT100**	4.02	**CE0.50-MT100**	4.00	**CE0.75-MT100**	3.97	**CE1-MT100**	3.95
14 GÜN KARBONATLAŞMAYA MARUZ BIRAKILMIŞ NUMUNELERİN ULTRASES GEÇİŞ HIZI DEĞERLERİ (km/sn)									
CE0-MT0	3.97	**CE0.25-MT0**	3.95	**CE0.50-MT0**	3.93	**CE0.75-MT0**	3.90	**CE1-MT0**	3.88
CE0-MT25	3.99	**CE0.25-MT25**	3.97	**CE0.50-MT25**	3.96	**CE0.75-MT25**	3.95	**CE1-MT25**	3.94
CE0-MT50	4.03	**CE0.25-MT50**	4.02	**CE0.50-MT50**	4.00	**CE0.75-MT50**	3.98	**CE1-MT50**	3.97
CE0-MT75	4.06	**CE0.25-MT75**	4.05	**CE0.50-MT75**	4.03	**CE0.75-MT75**	4.01	**CE1-MT75**	4.00
CE0-MT100	4.10	**CE0.25-MT100**	4.08	**CE0.50-MT100**	4.05	**CE0.75-MT100**	4.03	**CE1-MT100**	4.02
28 GÜN KARBONATLAŞMAYA MARUZ BIRAKILMIŞ NUMUNELERİN ULTRASES GEÇİŞ HIZI DEĞERLERİ (km/sn)									
CE0-MT0	4.08	**CE0.25-MT0**	4.06	**CE0.50-MT0**	4.04	**CE0.75-MT0**	4.02	**CE1-MT0**	4.00
CE0-MT25	4.11	**CE0.25-MT25**	4.09	**CE0.50-MT25**	4.07	**CE0.75-MT25**	4.05	**CE1-MT25**	4.03
CE0-MT50	4.13	**CE0.25-MT50**	4.10	**CE0.50-MT50**	4.08	**CE0.75-MT50**	4.07	**CE1-MT50**	4.05
CE0-MT75	4.16	**CE0.25-MT75**	4.12	**CE0.50-MT75**	4.10	**CE0.75-MT75**	4.09	**CE1-MT75**	4.08
CE0-MT100	4.19	**CE0.25-MT100**	4.16	**CE0.50-MT100**	4.13	**CE0.75-MT100**	4.11	**CE1-MT100**	4.10

Deneysel çalışmalarda elde edilen beton numunelere ait ortalama ultrases geçiş hızı değerleri Tablo 4.3'te verilmiştir. Numunelerin ultrases geçiş hızlarıyla, değişen karbonatlaşma süresi ve cam elyaf oranlarına göre oluşan grafikler Şekil 4.11 - Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.11. Kontrol ve 7, 14, 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri



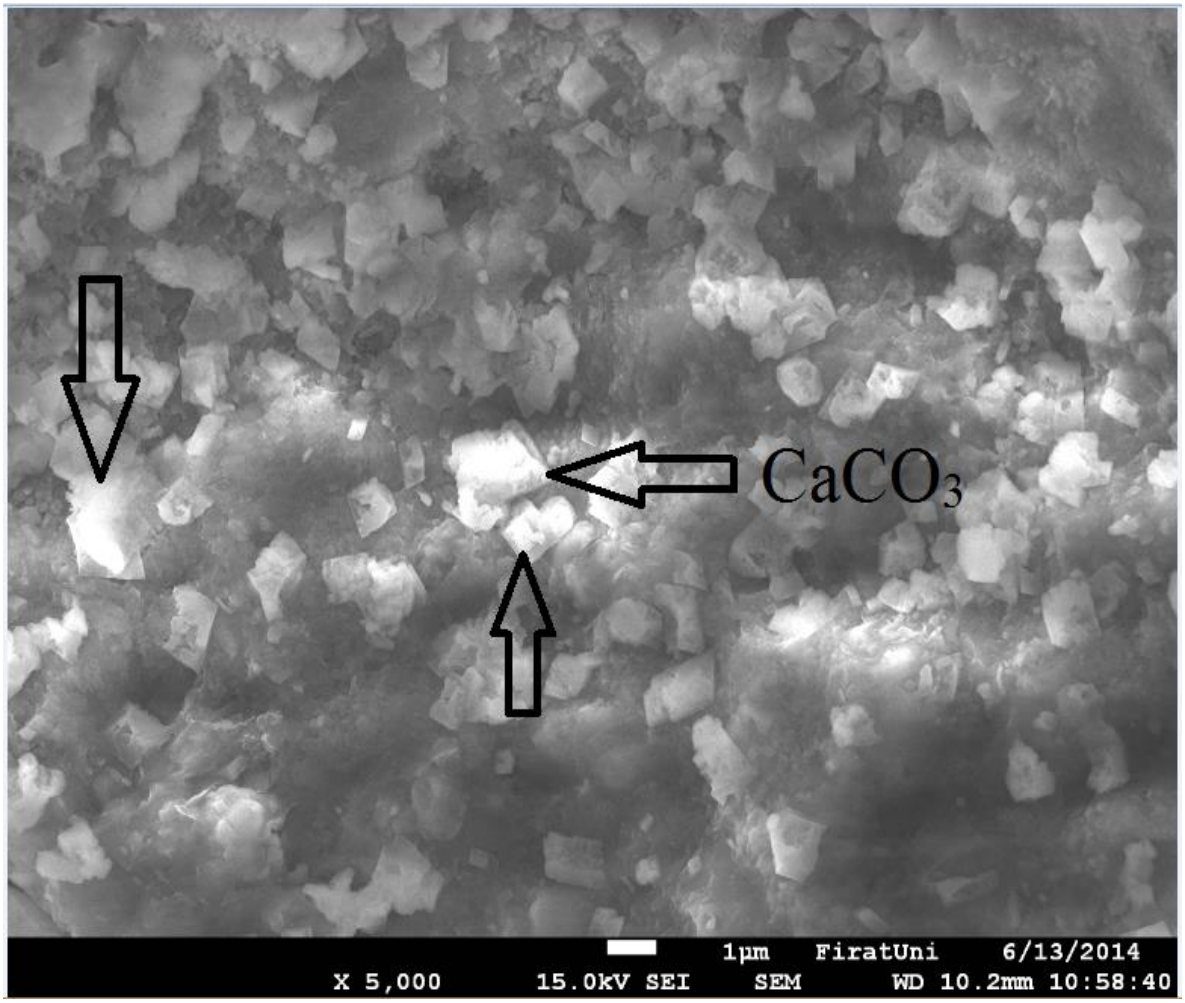
Şekil 4.12. Kontrol ve 7 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin ulrases geçiş hızı değerleri

Şekil 4.13. Kontrol ve 14 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin ulrases geçiş hızı değerleri

Şekil 4.14. Kontrol ve 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin ulrases geçiş hızı değerleri

Mermer tozu tane boyutunun küçük olması beton içindeki boşlukları doldurarak daha yoğun bir yapı oluşturmuştur. Şekil 4.11'deki grafik incelendiğinde, mermer tozunun artışı ultrases geçiş hızının da artmasını sağlamıştır. Cam elyaf oranındaki artışa bağlı olarak ise oluşan boşluklardan dolayı ultrases geçiş hızında azalma görülmüştür. Buna göre grafiklere bakıldığında, beton numuneleri en yüksek ultrases geçiş hızı değerini, cam

elyafın bulunmadığı mermer tozunun %100 olduğu 28 gün karbonatlaşmaya maruz kalmış CE0–MT100 serisinde alırken, en düşük ultrases geçiş değerini ise cam elyafın en yoğun olduğu ve mermer tozunun bulunmadığı kontrol CE1–MT0 serisinde almıştır.



Şekil 4.15. Cam elyafın olmadığı mermer tozunun %100 olduğu 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunenin SEM görüntüsü

Şekil 4.15'te 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunenin SEM görüntüsüne bakıldığında yoğun miktarda kalsiyum karbonatın oluştuğu görülmektedir. Karbonatlaşma süresi arttıkça ultrases geçiş hızı değerlerinde kontrol numunelerine göre artış görülmüştür. Çünkü karbonatlaşma sonucu oluşan kalsiyum karbonat, geçirgenliği azaltarak daha boşluksuz bir yapı meydana getirmektedir. Böylece ultrases dalgaları beton içerisinde daha az boşluğa rastlayıp, daha hızlı ilerlediğinden ultrases değerlerinde karbonatlaşmadan dolayı artış meydana gelmiştir.

Şekil 4.12'de 7 gün boyunca karbonatlaşmaya maruz kalmış numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri verilmiştir. Numunelerin ultrases geçiş hızlarında, kontrol numunelerine göre %0.77-%1.86 değerleri arasında artış meydana gelmiştir.

Şekil 4.13'te 14 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin ultrases değerlerinde %2.83-%3.58 oranları arasında artış görülmüştür.

Şekil 4.14'te ise 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri, kontrol numunelerine göre %4.61-%6.25 değerleri arasında artış göstermiştir.

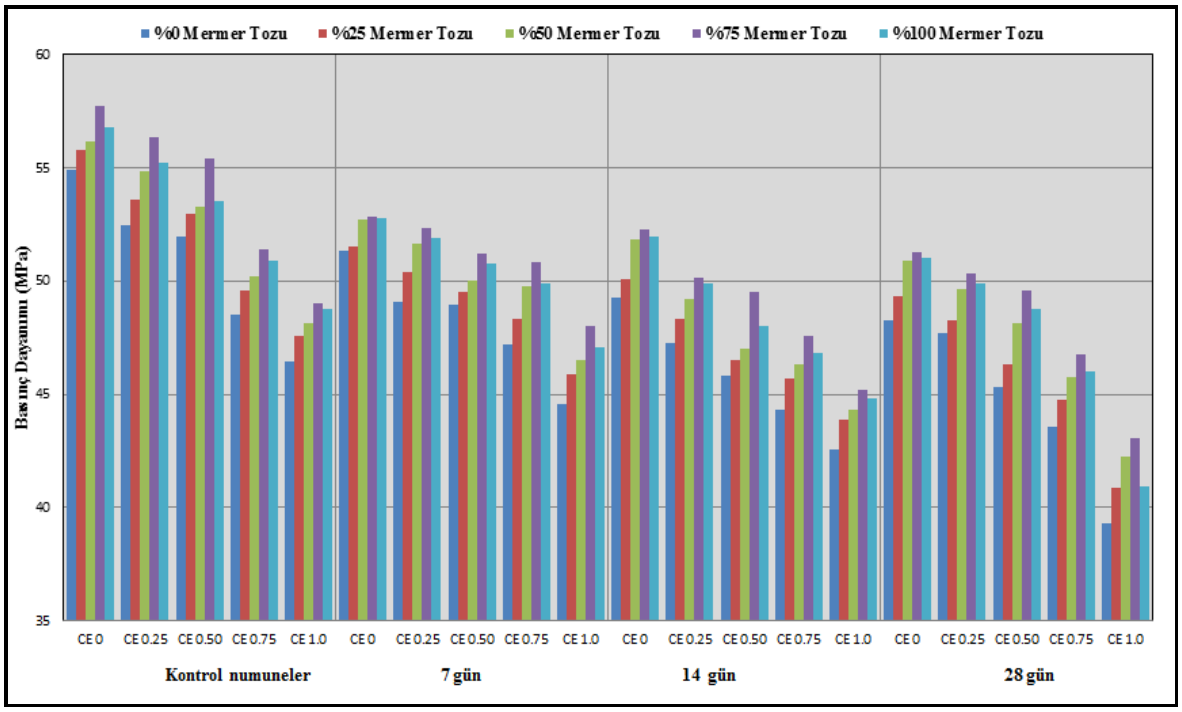
Bu durum literatür ile de uyumludur. Kara (2013), yapmış olduğu çalışmasında %5, % 10 ve %15 MT kullandığı beton numunelerine karbonatlaşma deneyi uygulamıştır. Karbonatlaşma sonrasında tüm beton karışımlarında ses hızı değerlerinin arttığını belirtmiştir [118].

4.4. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

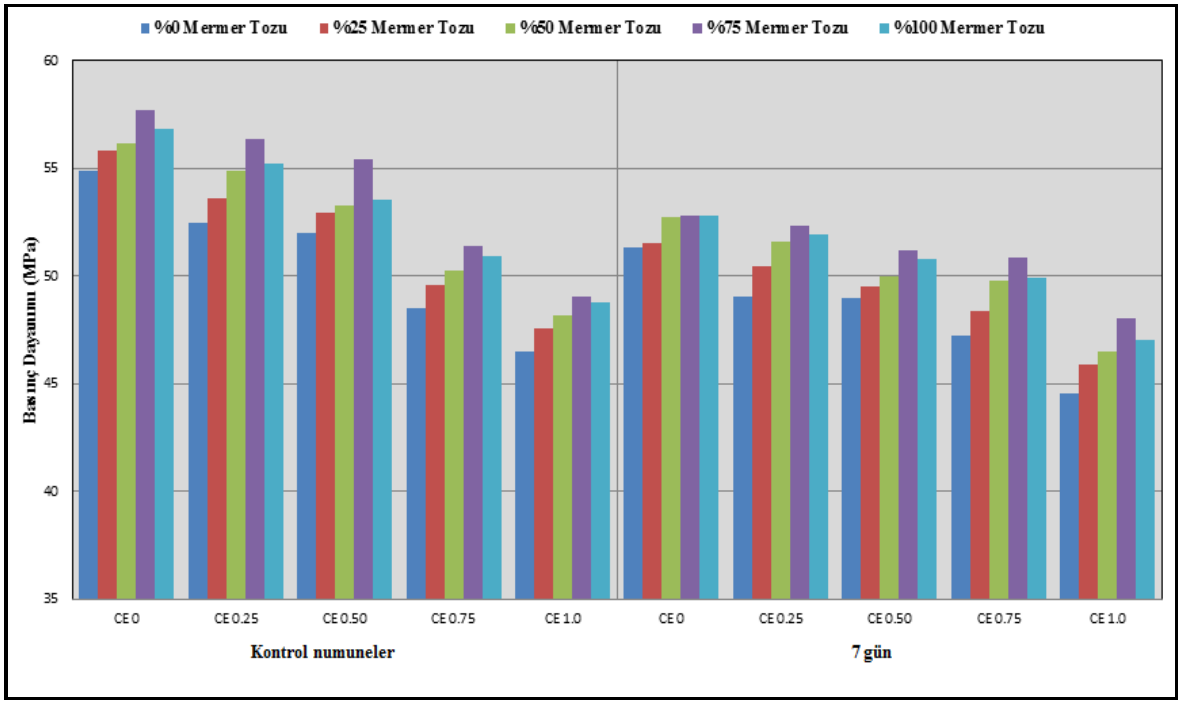
Tablo 4.4. Beton numunelerine ait ortalama basınç dayanımı değerleri

KONTROL NUMUNELERİNİN BASINÇ DAYANIM DEĞERLERİ (MPa)									
CE0-MT0	54.89	**CE0.25-MT0**	52.50	**CE0.50-MT0**	52.00	**CE0.75-MT0**	48.54	**CE1-MT0**	46.47
CE0-MT25	55.82	**CE0.25-MT25**	53.60	**CE0.50-MT25**	52.96	**CE0.75-MT25**	49.56	**CE1-MT25**	47.60
CE0-MT50	56.16	**CE0.25-MT50**	54.88	**CE0.50-MT50**	53.30	**CE0.75-MT50**	50.23	**CE1-MT50**	48.16
CE0-MT75	57.72	**CE0.25-MT75**	56.37	**CE0.50-MT75**	55.45	**CE0.75-MT75**	51.40	**CE1-MT75**	49.03
CE0-MT100	56.80	**CE0.25-MT100**	55.21	**CE0.50-MT100**	53.55	**CE0.75-MT100**	50.90	**CE1-MT100**	48.79
7 GÜN KARBONATLAŞMAYA MARUZ BIRAKILMIŞ NUMUNELERİN BASINÇ DAYANIM DEĞERLERİ (MPa)									
CE0-MT0	51.35	**CE0.25-MT0**	49.07	**CE0.50-MT0**	48.98	**CE0.75-MT0**	47.23	**CE1-MT0**	44.57
CE0-MT25	51.54	**CE0.25-MT25**	50.43	**CE0.50-MT25**	49.54	**CE0.75-MT25**	48.36	**CE1-MT25**	45.89
CE0-MT50	52.73	**CE0.25-MT50**	51.63	**CE0.50-MT50**	50.0	**CE0.75-MT50**	49.78	**CE1-MT50**	46.53
CE0-MT75	52.84	**CE0.25-MT75**	52.37	**CE0.50-MT75**	51.23	**CE0.75-MT75**	50.86	**CE1-MT75**	48.02
CE0-MT100	52.80	**CE0.25-MT100**	51.92	**CE0.50-MT100**	50.81	**CE0.75-MT100**	49.92	**CE1-MT100**	47.07
14 GÜN KARBONATLAŞMAYA MARUZ BIRAKILMIŞ NUMUNELERİN BASINÇ DAYANIM DEĞERLERİ (MPa)									
CE0-MT0	49.30	**CE0.25-MT0**	47.25	**CE0.50-MT0**	45.85	**CE0.75-MT0**	44.30	**CE1-MT0**	42.57
CE0-MT25	50.07	**CE0.25-MT25**	48.34	**CE0.50-MT25**	46.52	**CE0.75-MT25**	45.70	**CE1-MT25**	43.89
CE0-MT50	51.86	**CE0.25-MT50**	49.21	**CE0.50-MT50**	47.03	**CE0.75-MT50**	46.35	**CE1-MT50**	44.35
CE0-MT75	52.26	**CE0.25-MT75**	50.18	**CE0.50-MT75**	49.55	**CE0.75-MT75**	47.58	**CE1-MT75**	45.20
CE0-MT100	51.98	**CE0.25-MT100**	49.89	**CE0.50-MT100**	48.00	**CE0.75-MT100**	46.83	**CE1-MT100**	44.84
28 GÜN KARBONATLAŞMAYA MARUZ BIRAKILMIŞ NUMUNELERİN BASINÇ DAYANIM DEĞERLERİ (MPa)									
CE0-MT0	48.26	**CE0.25-MT0**	47.68	**CE0.50-MT0**	45.31	**CE0.75-MT0**	43.58	**CE1-MT0**	36.91
CE0-MT25	49.32	**CE0.25-MT25**	48.27	**CE0.50-MT25**	46.32	**CE0.75-MT25**	44.73	**CE1-MT25**	38.42
CE0-MT50	50.90	**CE0.25-MT50**	49.66	**CE0.50-MT50**	48.17	**CE0.75-MT50**	45.77	**CE1-MT50**	39.78
CE0-MT75	51.30	**CE0.25-MT75**	50.35	**CE0.50-MT75**	49.57	**CE0.75-MT75**	46.77	**CE1-MT75**	43.36
CE0-MT100	51.00	**CE0.25-MT100**	49.92	**CE0.50-MT100**	48.79	**CE0.75-MT100**	46.00	**CE1-MT100**	40.24

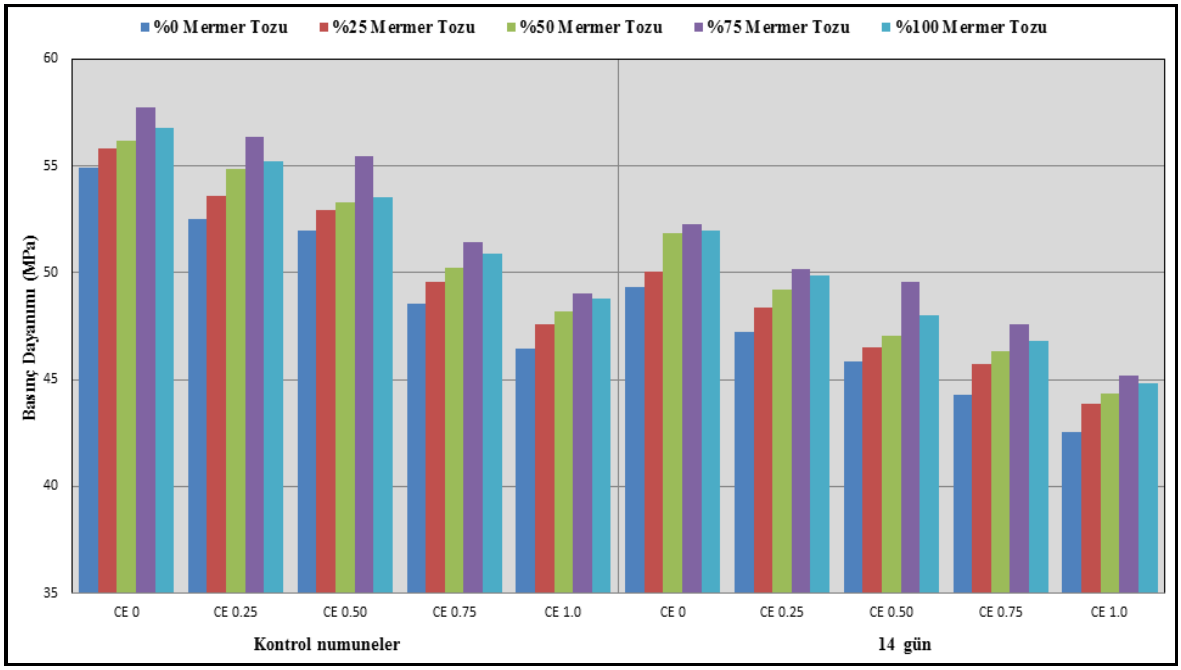
Farklı oranlarda MT ve CE kullanılarak üretilen beton numunelerinin ortalama basınç dayanımı değerleri Tablo 4.4'de verilmiştir. Numunelerden elde edilen ortalama basınç dayanımı değerlerinin grafikleri Şekil 4.16 - Şekil 4.19'da verilmiştir.



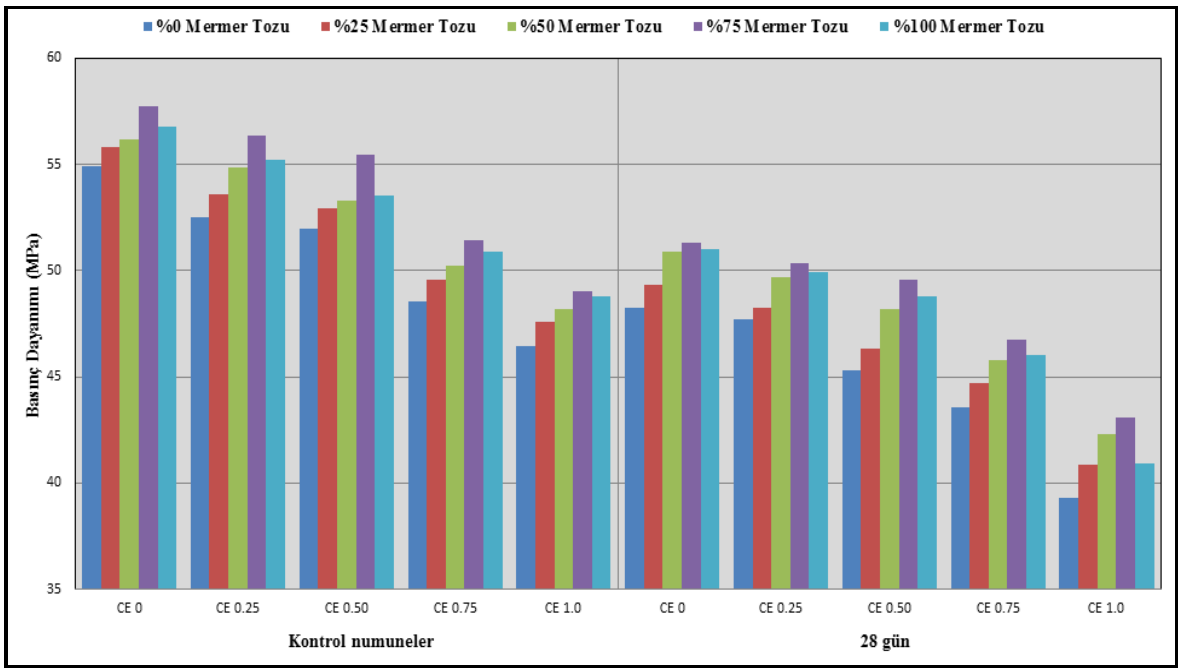
Şekil 4.16. Kontrol ve 7, 14, 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.17. Kontrol ve 7 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.18. Kontrol ve 14 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.19. Kontrol ve 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin basınç dayanımı değerleri

Basınç dayanımı grafikleri incelendiğinde, karbonatlaşma uygulanan ve uygulanmayan tüm numunelerde mermer tozu oranının artmasıyla belli bir değere kadar basınç dayanımı artmıştır. Numunelerin karbonatlaşmaya maruz kalma süreleri arttıkça, kontrol numunelerine göre dayanımları düşmüştür.

Serilerde mermer tozu katkısıyla basınç dayanımı, %75 mermer tozu katkısına kadar artış göstermiştir. % 100 mermer tozu katkılı serilerdeki basınç dayanımı kontrol numunelerine göre azalmıştır. Amacımız ince malzeme artışıyla boşlukları doldurarak dayanıma katkı sağlamaktır. Fakat bu durum Şekil 4.16'da görüldüğü gibi belli bir değere kadar olmuştur. Çünkü beton harcındaki ince malzemeyi arttırdığımız zaman iri malzememiz azalmakta ve bu durum dayanımı olumsuz yönde etkilemektedir.

Karbonatlaşma öncesi ve sonrası numunelerdeki mermer tozunun artışı boşlukları doldurarak dayanım artışı sağlamış ve en yüksek dayanım cam elyafın bulunmadığı kontrol CE0-MT75 kodlu kontrol numunede gözlenmiştir. En düşük basınç dayanımı değerini ise mermer tozunun bulunmadığı ve 1 kg/m^3 oranında cam elyaf içeren 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış CE1– MT0 serisi almıştır.

Demirel ve Yazıcıoğlu (2010), çalışmalarının sonucunda, betona 0.25 mm'lik elekten geçen ince malzeme ile ikame olacak şekilde belirli oranlarda atık mermer tozu ilavesinin tüm kür yaşlarında basınç dayanımını arttırıcı etkisi olduğunu belirtmişlerdir [51].

Aydın (2013), deneysel çalışmasında; mermer tozunu kum ile yer değiştirerek kullandığında %50 oranına kadar kullanılmasının işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık açısından betona olumlu özellikler kattığını belirtmiştir. Mermer tozunu D<1mm olan ince agrega ile yer değiştirerek kullandığında ise %90 oranına kadar kullanılmasının işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık açısından betona olumlu özellikler kattığını ifade etmiştir. Test sonuçları mermer tozunun betonda ince agrega ile yer değiştirilerek kullanılabileceğini göstermektedir [119].

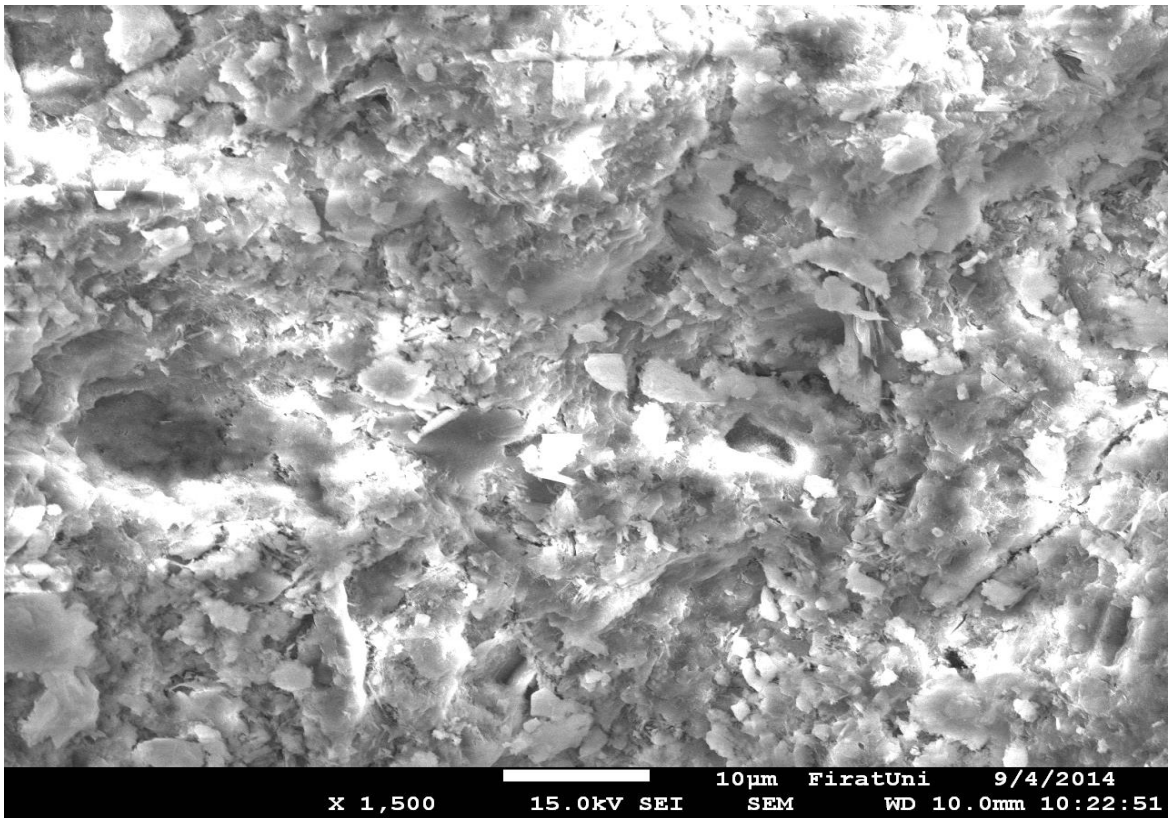
Cam elyaflı numunelerde basınç dayanımının artmadığı gözlemlenmiştir. Numunelerde cam elyaf oranının artmasıyla yer yer oluşan topaklanma ve cam elyaf ile beton arasında yeterli aderans oluşmamasından dolayı oluşan boşluklar betonu geçirimli hale getirmiştir. Bu yüzden meydana gelen boşluklar beton basınç dayanımını olumsuz yönde etkilemiştir.

Özdal ve ark., (2013), çalışmalarında cam elyafın, beton karışımına ilave oranına bağlı olarak işlenebilirlikte düşüş meydana getirdiğini belirtmişlerdir. Cam elyaf katkısının betonun basınç dayanımına etkisi belirli cam elyaf oranlarında olumlu etki göstermiştir. %3 ve %5 cam elyaf içeren numunelerin basınç değerleri referans numunesinden daha iyi sonuç verirken bu değer %5 ve % 7 cam elyaf oranlarında referans numunenin basınç dayanım değerinin altında kalmıştır [120].

Şekil 4.17'deki 7 gün karbonatlaşmaya maruz kalmış numunelerin basınç dayanımı değerlerinde kontrol numunelerine göre %0.89-%8.45 değerleri arasında azalma olmuştur.

Şekil 4.18'e bakıldığında 14 gün karbonatlaşmaya maruz kalmış numunelerin basınç dayanımı değerleri, kontrol numunelerine göre %7.43-%12.16 oranları arasında azalmıştır.

Şekil 4.19'da ise 28 gün karbonatlaşmaya maruz kalmış numunelerin basınç dayanımı değerlerinde kontrol numunelerine göre %8.88-%20.57 gibi oranlarda azalma olmuştur.



Şekil 4.20. 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış CE0-MT25 kodlu numunenin karbonatlaşma görülen bölgesindeki $CaCO_3$

Silikatlı ve alüminatlı ana bileşenlerin su ile birleşmesi sonucu silikat hidratlar (C-S-H) ve alüminat hidratlar (C-A-H) meydana gelir. Silikatların hidratasyonundan ayrıca (C-H) açığa çıkar, bu serbest kireç baz ortam oluşturarak betonarme elemanlarda donatıyı korozyona karşı korur. Serbest kireç havanın CO_2 etkisi ile betonun hava ile temas eden yüzeyinden başlayarak karbonatlaşır, beton yüzey sertliği artar ve suda çözünmez hale gelir. Karbonatlaşmamış bölgelerdeki serbest kireç su ile karşılaştığında erir ve yeri boşluk kalır, betonun dayanımı düşer, dayanıklılığı azalır. Bu da basınç dayanımının azalmasında

etkin bir faktördür. Şekil 4.20'de 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış CE0-MT25 kodlu numunenin karbonatlaşma görülen bölgesinde oluşan $CaCO_3$ ' lar görülmektedir.

Karbonatlaşmadan sonra betonun kimyasal kompozisyonu ve mikro yapısı değişir. Bu değişiklikten dolayı karbonatlaşmış betonun ve normal betonun mukavemet, deformasyon ve düktilite kabiliyetlerinde farklılıklar olmaktadır. Beton dayanımının artmasıyla karbonatlaşma miktarı azalmaktadır [113,114].

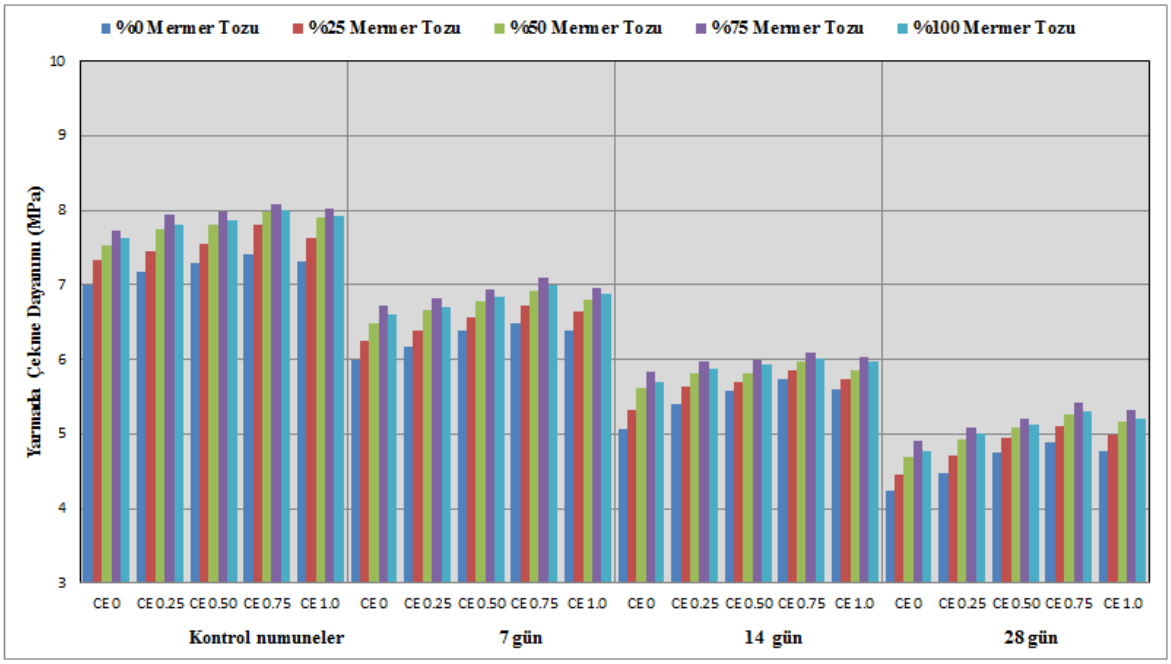
Ustabaş ve Erdoğdu (2013), çalışmalarında karbonatlaşma derinliği arttıkça, basınç dayanımında belirgin bir azalmanın meydana geldiğini belirtmişlerdir. Basınç dayanımı düştükçe betonun geçirgenliği artmakta ve bunun sonucunda karbonatlaşma derinliği artmaktadır [121].

4.5.Yarmada Çekme Dayanımı Deney Sonuçları

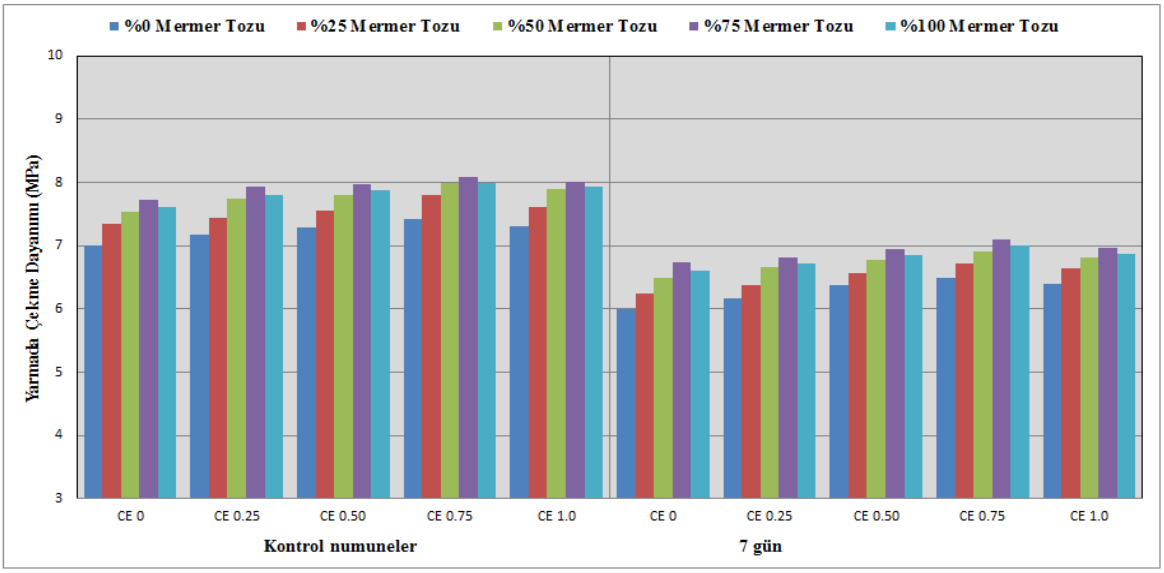
Tablo 4.5. Numunelere ait ortalama yarmada çekme dayanımı değerleri

KONTROL NUMUNELERİNİN YARMADA ÇEKME DAYANIM DEĞERLERİ (MPa)									
CE0-MT0	7.00	**CE0.25-MT0**	7.17	**CE0.50-MT0**	7.29	**CE0.75-MT0**	7.42	**CE1-MT0**	7.31
CE0-MT25	7.34	**CE0.25-MT25**	7.45	**CE0.50-MT25**	7.56	**CE0.75-MT25**	7.81	**CE1-MT25**	7.62
CE0-MT50	7.53	**CE0.25-MT50**	7.75	**CE0.50-MT50**	7.80	**CE0.75-MT50**	7.99	**CE1-MT50**	7.90
CE0-MT75	7.73	**CE0.25-MT75**	7.94	**CE0.50-MT75**	7.98	**CE0.75-MT75**	8.08	**CE1-MT75**	8,02
CE0-MT100	7.62	**CE0.25-MT100**	7.80	**CE0.50-MT100**	7.87	**CE0.75-MT100**	8.00	**CE1-MT100**	7.93
7 GÜN KARBONATLAŞMAYA MARUZ BIRAKILMIŞ NUMUNELERİN YARMADA ÇEKME DAYANIM DEĞERLERİ (MPa)									
CE0-MT0	6.00	**CE0.25-MT0**	6.16	**CE0.50-MT0**	6.38	**CE0.75-MT0**	6.49	**CE1-MT0**	6.39
CE0-MT25	6.25	**CE0.25-MT25**	6.38	**CE0.50-MT25**	6.57	**CE0.75-MT25**	6.72	**CE1-MT25**	6.64
CE0-MT50	6.49	**CE0.25-MT50**	6.67	**CE0.50-MT50**	6.78	**CE0.75-MT50**	6.91	**CE1-MT50**	6.81
CE0-MT75	6.73	**CE0.25-MT75**	6.82	**CE0.50-MT75**	6.94	**CE0.75-MT75**	7.09	**CE1-MT75**	6.96
CE0-MT100	6.60	**CE0.25-MT100**	6.71	**CE0.50-MT100**	6.85	**CE0.75-MT100**	7.00	**CE1-MT100**	6.87
14 GÜN KARBONATLAŞMAYA MARUZ BIRAKILMIŞ NUMUNELERİN YARMADA ÇEKME DAYANIM DEĞERLERİ (MPa)									
CE0-MT0	5.06	**CE0.25-MT0**	5.41	**CE0.50-MT0**	5.57	**CE0.75-MT0**	5.73	**CE1-MT0**	5.59
CE0-MT25	5.33	**CE0.25-MT25**	5.63	**CE0.50-MT25**	5.69	**CE0.75-MT25**	5.86	**CE1-MT25**	5.74
CE0-MT50	5.62	**CE0.25-MT50**	5.82	**CE0.50-MT50**	5.81	**CE0.75-MT50**	5.98	**CE1-MT50**	5.85
CE0-MT75	5.84	**CE0.25-MT75**	5.98	**CE0.50-MT75**	6.00	**CE0.75-MT75**	6.09	**CE1-MT75**	6.04
CE0-MT100	5.70	**CE0.25-MT100**	5.87	**CE0.50-MT100**	5.93	**CE0.75-MT100**	6.01	**CE1-MT100**	5.98
28 GÜN KARBONATLAŞMAYA MARUZ BIRAKILMIŞ NUMUNELERİN YARMADA ÇEKME DAYANIM DEĞERLERİ (MPa)									
CE0-MT0	4.23	**CE0.25-MT0**	4.48	**CE0.50-MT0**	4.74	**CE0.75-MT0**	4.88	**CE1-MT0**	4.77
CE0-MT25	4.46	**CE0.25-MT25**	4.71	**CE0.50-MT25**	4.94	**CE0.75-MT25**	5.10	**CE1-MT25**	4.98
CE0-MT50	4.69	**CE0.25-MT50**	4.93	**CE0.50-MT50**	5.09	**CE0.75-MT50**	5.26	**CE1-MT50**	5.17
CE0-MT75	4.91	**CE0.25-MT75**	5.08	**CE0.50-MT75**	5.21	**CE0.75-MT75**	5.42	**CE1-MT75**	5.33
CE0-MT100	4.77	**CE0.25-MT100**	5.00	**CE0.50-MT100**	5.12	**CE0.75-MT100**	5.30	**CE1-MT100**	5.21

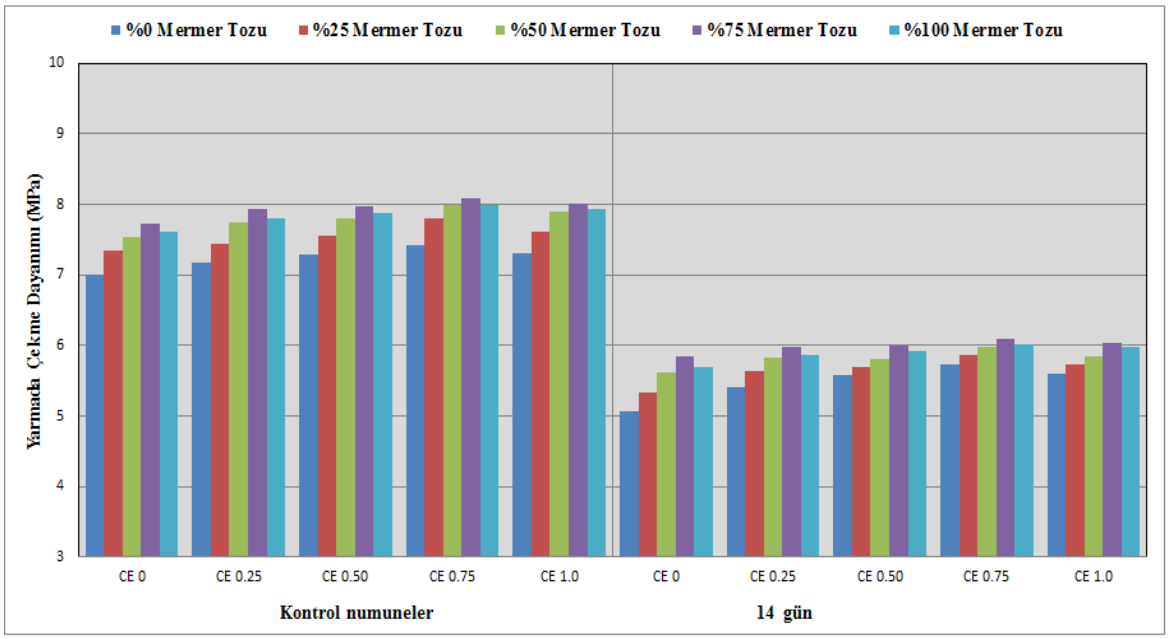
Deneysel çalışmalarda elde edilen beton numunelere ait ortalama yarmada çekme dayanımı değerleri Tablo 4.5'te verilmiştir. Numunelerden elde edilen yarmada çekme dayanımı değerlerinin, değişen karbonatlaşma süresi ve cam elyaf oranlarına göre değişim grafikleri Şekil 4.21 - Şekil 4.24'te verilmiştir.



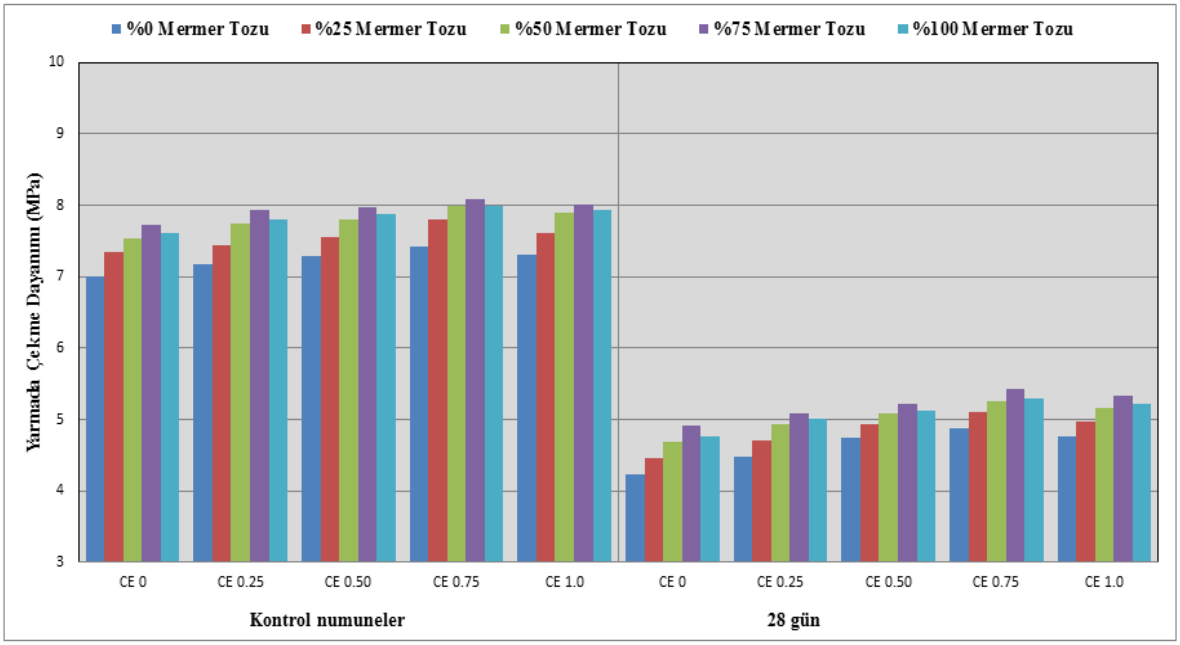
Şekil 4.21. Kontrol ve 7, 14, 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin yarmada çekme dayanımı değerleri



Şekil 4.22. Kontrol ve 7 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin yarmada çekme dayanımı değerleri



Şekil 4.23. Kontrol ve 14 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin yarmada çekme dayanımı değerleri



Şekil 4.24. Kontrol ve 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin yarmada çekme dayanımı değerleri

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, grafiklerdeki yarmada çekme dayanım değerleri incelendiğinde, karbonatlaşmaya uğramış numunelerin yarmada çekme dayanımları, kontrol numunelerine göre karbonatlaşma süresinin artması ile azalmıştır. Diğer yandan karbonatlaşma uygulanmış ve uygulanmamış tüm serilerde mermer tozu arttıkça basınç dayanımına paralel olarak, %75 mermer tozu katkısına kadar yarmada çekme dayanımının artış gösterdiği görülmektedir. Mermer tozu oranı %100'e çıkarıldığında yarmada çekme dayanımının azaldığı görülmüştür.

Serilerde basınç dayanımının aksine cam elyaf oranının artması yarmada çekme dayanımında artış göstermiştir. En yüksek yarmada çekme dayanımı değerinin kontrol CE0,75-MT75 kodlu numunenin aldığı görülmektedir.

Yaprak ve ark., (2004), çalışmalarında cam elyafların betonda yarmada çekme dayanımına olumlu yönde etkide bulunduğunu saptamışlardır [122].

Şekil 4.22'deki 7 gün karbonatlaşmaya maruz kalmış numunelerin yarmada çekme dayanımı değerlerinde kontrol numunelerine göre %12.48-%14.85 değerleri arasında azalma olmuştur.

Şekil 4.23'e bakıldığında 14 gün karbonatlaşmaya maruz kalmış numunelerin yarmada çekme dayanımı değerleri, kontrol numunelerine göre %22.77-%27.71 oranları arasında azalmıştır.

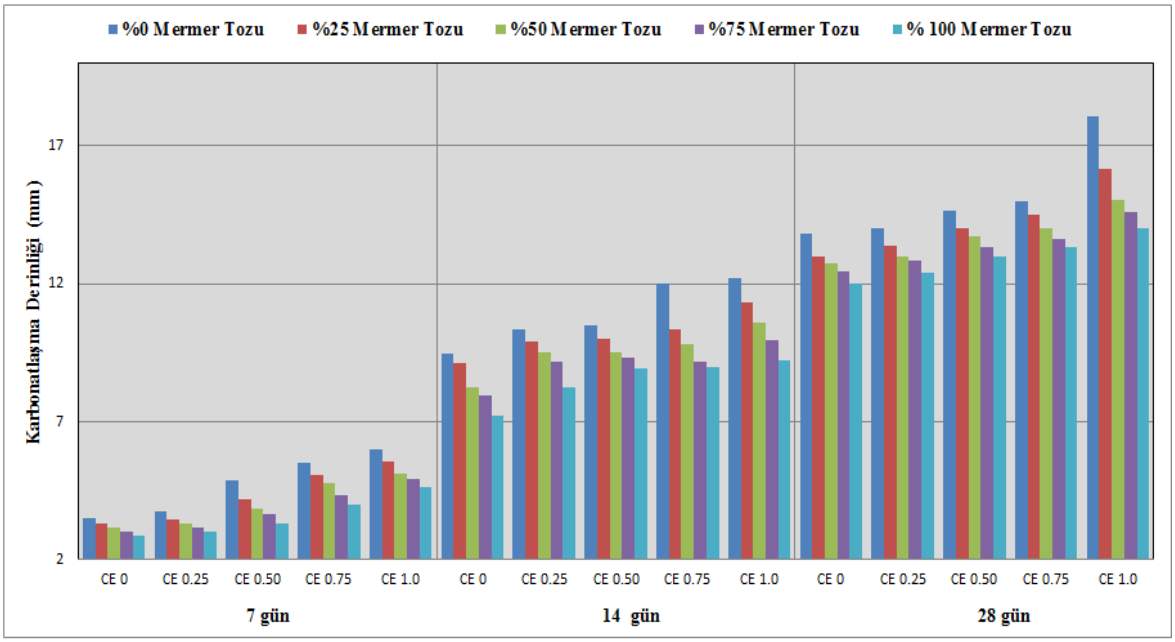
Şekil 4.24'te ise 28 gün karbonatlaşmaya maruz kalmış numunelerin yarmada çekme dayanımı değerlerinde kontrol numunelerine göre %32.92-%39.57 gibi oranlarda azalma olmuştur.

4.6. Karbonatlaşma Derinliği Tayini Sonuçları

Tablo 4.6. Numunelere ait ortalama karbonatlaşma derinliği değerleri

7 GÜN KARBONATLAŞMAYA MARUZ BIRAKILMIŞ NUMUNELERİN KARBONATLAŞMA DERİNLİĞİ DEĞERLERİ (mm)									
CE0-MT0	3.50	**CE0.25-MT0**	3.75	**CE0.50-MT0**	4.88	**CE0.75-MT0**	5.50	**CE1-MT0**	6.00
CE0-MT25	3.32	**CE0.25-MT25**	3.48	**CE0.50-MT25**	4.20	**CE0.75-MT25**	5.05	**CE1-MT25**	5.55
CE0-MT50	3.14	**CE0.25-MT50**	3.30	**CE0.50-MT50**	3.87	**CE0.75-MT50**	4.77	**CE1-MT50**	5.10
CE0-MT75	3.00	**CE0.25-MT75**	3.15	**CE0.50-MT75**	3.63	**CE0.75-MT75**	4.33	**CE1-MT75**	4.90
CE0-MT100	2.85	**CE0.25-MT100**	3.00	**CE0.50-MT100**	3.30	**CE0.75-MT100**	4.00	**CE1-MT100**	4.62
14 GÜN KARBONATLAŞMAYA MARUZ BIRAKILMIŞ NUMUNELERİN KARBONATLAŞMA DERİNLİĞİ DEĞERLERİ (mm)									
CE0-MT0	9.45	**CE0.25-MT0**	10.32	**CE0.50-MT0**	10.47	**CE0.75-MT0**	12.01	**CE1-MT0**	12.20
CE0-MT25	9.12	**CE0.25-MT25**	9.90	**CE0.50-MT25**	9.99	**CE0.75-MT25**	10.34	**CE1-MT25**	11.32
CE0-MT50	8.26	**CE0.25-MT50**	9.53	**CE0.50-MT50**	9.51	**CE0.75-MT50**	9.80	**CE1-MT50**	10.60
CE0-MT75	7.93	**CE0.25-MT75**	9.15	**CE0.50-MT75**	9.30	**CE0.75-MT75**	9.18	**CE1-MT75**	9.94
CE0-MT100	7.20	**CE0.25-MT100**	8.25	**CE0.50-MT100**	8.92	**CE0.75-MT100**	9.00	**CE1-MT100**	9.23
28 GÜN KARBONATLAŞMAYA MARUZ BIRAKILMIŞ NUMUNELERİN KARBONATLAŞMA DERİNLİĞİ DEĞERLERİ (mm)									
CE0-MT0	13.80	**CE0.25-MT0**	14.00	**CE0.50-MT0**	14.63	**CE0.75-MT0**	14.97	**CE1-MT0**	18.04
CE0-MT25	13.00	**CE0.25-MT25**	13.36	**CE0.50-MT25**	14.01	**CE0.75-MT25**	14.48	**CE1-MT25**	16.18
CE0-MT50	12.75	**CE0.25-MT50**	13.00	**CE0.50-MT50**	13.72	**CE0.75-MT50**	14.00	**CE1-MT50**	15.01
CE0-MT75	12.42	**CE0.25-MT75**	12.83	**CE0.50-MT75**	13.33	**CE0.75-MT75**	13.60	**CE1-MT75**	14.57
CE0-MT100	12.00	**CE0.25-MT100**	12.38	**CE0.50-MT100**	13.00	**CE0.75-MT100**	13.32	**CE1-MT100**	14.00

Deneysel çalışmalarda elde edilen beton numunelere ait ortalama karbonatlaşma derinliği değerleri Tablo 4.6'da verilmiştir. Numunelerden elde edilen değerler, değişen karbonatlaşma süresi ve elyaf oranlarına göre değişim grafikleri Şekil 4.25'te verilmiştir.

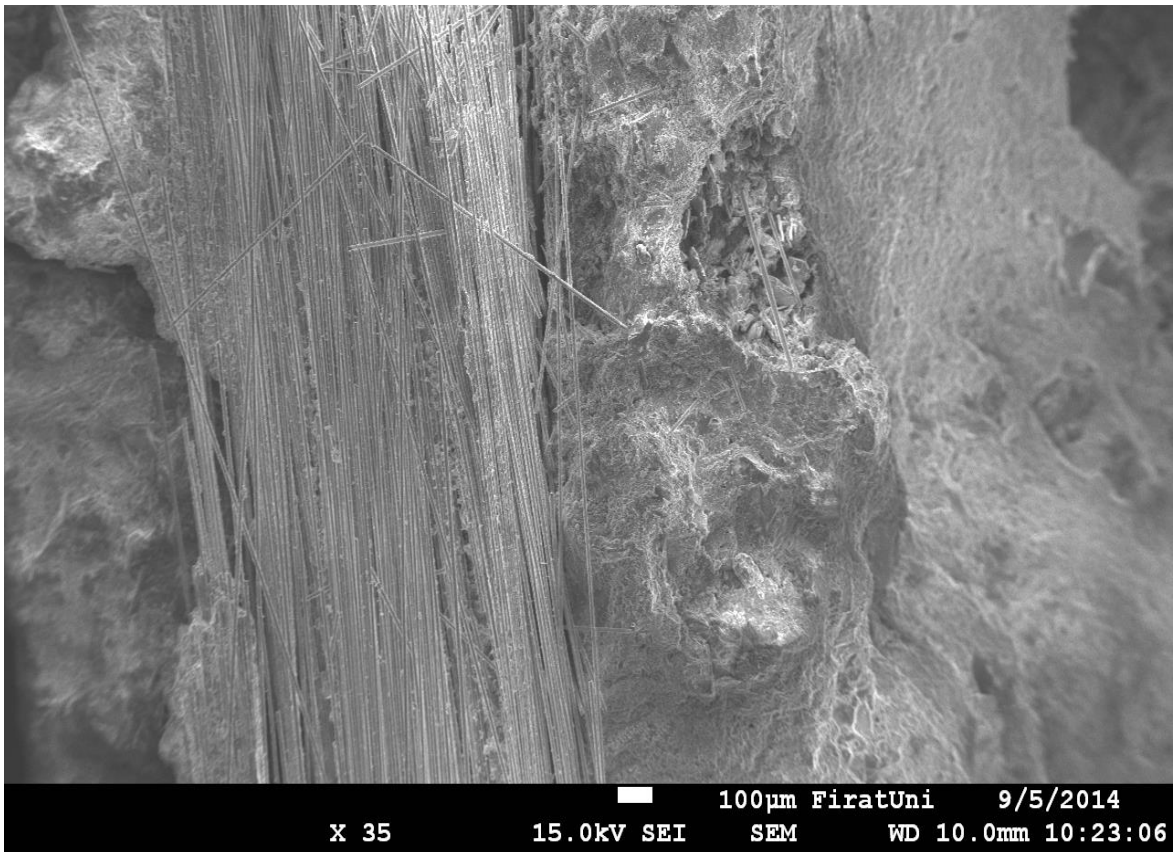


Şekil 4.25. 7, 14 ve 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış numunelerin karbonatlaşma derinliği değerleri

Farklı zaman dilimlerindeki karbonatlaşma derinliklerine bakılan tüm serilerin karbonatlaşmaya karşı gösterdikleri tepkiler farklıdır. Genel olarak bakıldığında karbonatlaşma derinliği az olan yani karbonatlaşmaya karşı en fazla direnç gösteren beton seriler mermer tozunun %100 olduğu beton seriler olmuştur. En düşük karbonatlaşma derinliği değeri 7 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılan CE0-MT100 kodlu numunede, en yüksek değer ise 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılan CE1-MT0 kodlu numunede görülmüştür.

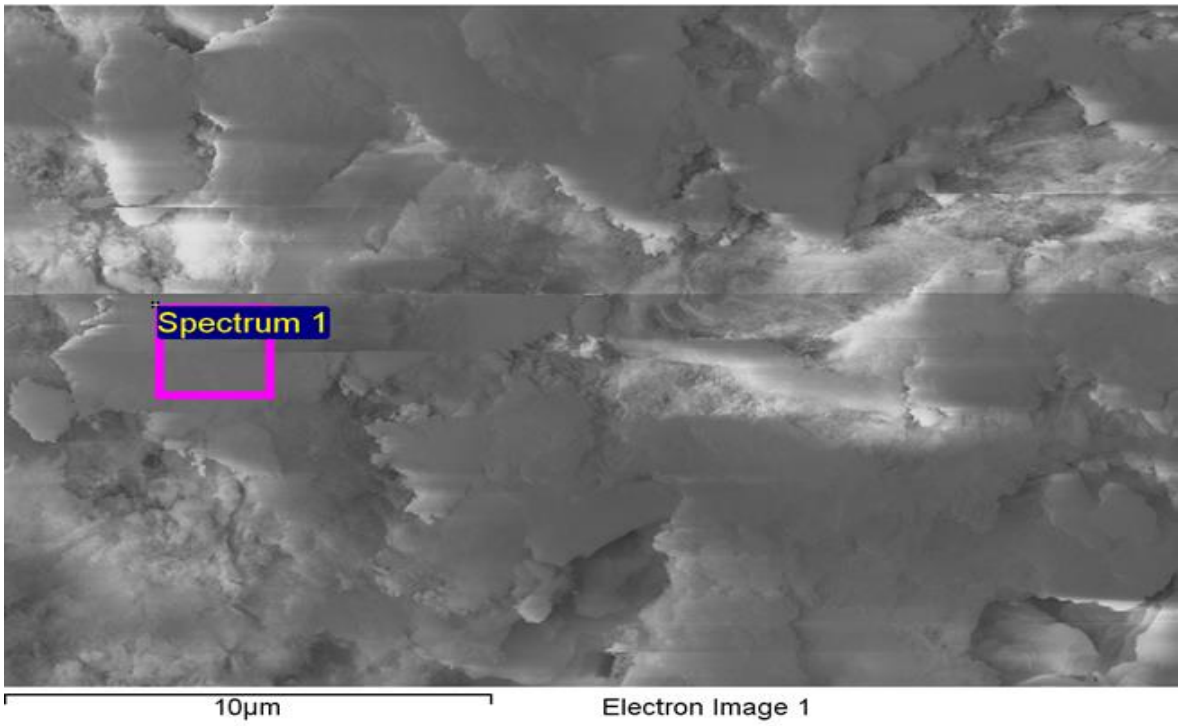
Şekil 4.25'e bakıldığında mermer tozu oranının artmasıyla karbonatlaşma derinliği azalırken, cam elyaf oranının artması karbonatlaşma derinliğinde artış göstermiştir. Ayrıca karbonatlaşma süresinin artmasıyla da tüm numunelerdeki karbonatlaşma derinliği artmaktadır.

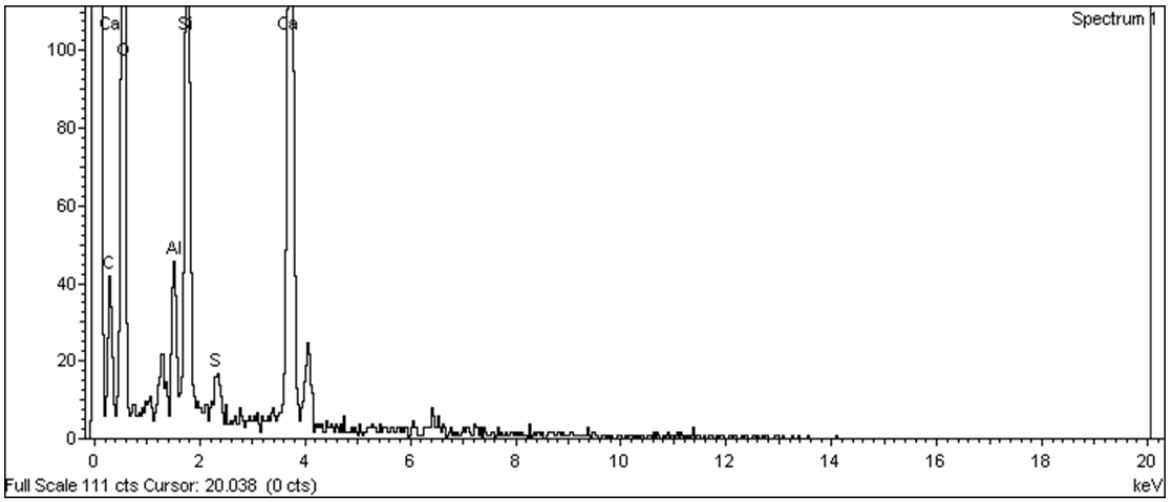
Cam elyafın ince ve düz yapısından dolayı betonda oluşturduğu aderans yetersizliği ve cam elyaf miktarındaki artışa bağlı olarak yer yer oluşan topaklanmalar boşluk oluşturmakta ve betona CO_2'in daha kolay şekilde girmesini sağlamaktadır. Fakat mermer tozunun filler malzeme olarak kullanımından dolayı betondaki boşluklar azalmakta ve daha geçirimsiz bir beton oluşarak CO_2'in girmesini engellemektedir. Gün sayısı arttıkça karbonatlaşma derinliğinin arttığı da elde edilen sonuçlarla gösterilmektedir.



Şekil 4.26. Mermer tozunun bulunmadığı 1 kg/m^3 cam elyaf içeren beton numunesinde karbonatlaşma reaksiyonu gerçekleşen bölgenin SEM görüntüsü

Şekil 4.26'da CE1-MT0 kodlu numuneye ait SEM resminde cam elyafların miktarındaki artışa bağlı olarak yer yer oluşan topaklaşma açık bir şekilde görülmektedir. Karbonatlaşma reaksiyonu gerçekleşen bu bölgeden bir kesit alınıp EDX sonucuna bakılmıştır.





Şekil 4.27. Mermer tozunun bulunmadığı 1 kg/m^3 cam elyaf içeren beton numunesinde karbonatlaşma reaksiyonu gerçekleşen bölgenin SEM görüntüsü ve EDX sonucu

Şekil 4.27'de CE1-MT0 kodlu numunenin karbonatlaşma reaksiyonu gerçekleşen bölgesinden elde edilen EDX sonucu gösterilmektedir. Analizden de anlaşılacağı üzere, yoğun miktarda $CaCO_3$ oluşumu gözlenmiştir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada atık mermer tozu ve cam elyaf katkısının betondaki karbonatlaşmaya etkisi incelenmiştir. Mermer tozu ve cam elyafın farklı özelliklere sahip olmasından dolayı bu değişiklikler her seride farklılık göstermiştir. Tüm numunelerde 3 farklı zaman diliminde karbonatlaşma derinlikleri ölçülmüştür. Karbonatlaşma öncesi ve sonrası olmak üzere yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Karbonatlaşma süresi arttıkça beton numunelerinin porozite değerlerinde azalma görülmüştür. Karbonatlaşma belirli çaptaki boşluklarda anlamlı oranlarda daralmalar meydana getirerek betonda poroziteyi azaltarak olumlu etki göstermiştir. Cam elyafın beton harcı ile yeterli aderansı sağlayamaması boşluk miktarını arttırdığından porozite değerlerini arttırırken, mermer tozunun artışı porozite değerlerinin azalmasına neden olmuştur. En düşük porozite değeri 28 gün karbonatlaşmaya maruz kalmış CE0-MT100 serisi alırken en yüksek değeri kontrol CE1-MT0 serisi almıştır.
- Karbonatlaşma süresi arttıkça beton numunelerinin kapilarite değerlerinde azalma görülmüştür. Karbonatlaşma sonucu meydana gelen $CaCO_3$ kristalleri, harç içerisindeki boşlukların içine yerleştiği için nispeten daha geçirimsiz bir beton meydana gelmiştir. En düşük kapilarite değerini 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılmış CE0-MT100 serisi alırken, en yüksek değer kontrol CE1-MT0 serisinde görülmektedir.
- Karbonatlaşma süresi arttıkça beton numunelerinin ultrases geçiş hızı değerlerinde artış görülmüştür. Ultrases dalgaları beton içerisinde daha az boşluğa rastlayıp, daha hızlı ilerlediğinden ultrases değerlerinde karbonatlaşmadan dolayı artış meydana gelmiştir. Numuneler kendi içinde incelendiğinde mermer tozu numunelerin boşluk miktarını azaltmış ve daha yoğun bir yapı oluşturmuştur. Cam elyaf artışı ise harcın boşluk miktarını arttırmış ve ultrases geçiş hızını azaltmıştır. En yüksek değer 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılan CE0-MT100 serisinde, en düşük değer ise kontrol CE1-MT0 serisi almıştır.
- Karbonatlaşma süresi arttıkça beton numunelerinin basınç dayanımlarında azalma görülmüştür. Karbonatlaşmadan sonra betonun kimyasal kompozisyonu ve mikro yapısı değiştiğinden dolayı karbonatlaşmış betonun ve normal betonun

mukavemet, deformasyon ve düktilite kabiliyetlerinde farklılıklar olmaktadır. Beton numuneler kendi içinde değerlendirildiğinde, cam elyaf artışına bağlı olarak basınç dayanımlarındaki azalma artmıştır. Cam elyafın harç ile yeterli aderansı sağlayamaması boşluk miktarını arttırmış ve çatlak oluşumuna zemin hazırlamıştır. Mermer tozunun artmasıyla betondaki boşluklar doldurulmuş, böylece numunenin basınç dayanımı artmıştır. Mermer tozu ilavesinin, cam elyafın meydana getirdiği olumsuz etkileri iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Beton numunelerinde; %75 oranında mermer tozu ilavesine kadar basınç dayanımı artmıştır. Fakat beton karışımı içerisindeki iri malzeme miktarı azaldığından, mermer tozu oranı %100'e çıkınca basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir. En yüksek dayanım kontrol CE0-MT75 serisinde görülürken, en düşük dayanım 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılan CE1-MT0 serisinde görülmüştür.

- Karbonatlaşma süresi arttıkça beton numunelerinin yarmada çekme dayanımlarında basınç dayanımına paralel olarak azalma görülmüştür. Numuneler kendi içinde değerlendirildiğinde, beton karışımına katılan cam elyaf ve mermer tozu yarmada çekme dayanımını arttırmıştır. Cam elyafların beton içerisinde donatı görevi görmesi numunenin tokluğunu arttırmıştır. Serilerde 0,75 kg/m^3 cam elyaf oranlarına kadar yarmada çekme dayanımı artış göstermiştir. Fakat cam elyaf oranı 1 kg/m^3 olan serilerde, meydana gelen topaklanma sebebiyle, yarmada çekme dayanımlarında azalma meydana gelmiştir. Yalnız bu azalmaya rağmen kontrol numunesinden daha yüksek bir yarmada çekme dayanımı sağlamıştır. Elde edilen verilere göre en iyi dayanım CE0,75-MT75 serisinde görülmüştür.
- Karbonatlaşmaya uğrayan tüm beton serilerde gün sayısı arttıkça karbonatlaşma derinliğinin de arttığı görülmüştür. Serilerdeki karışım oranlarının farklı olmasından dolayı tüm beton serilerindeki karbonatlaşma derinliği farklı değerlerde çıkmıştır. Arttırılan mermer tozu miktarı hem mukavemeti arttırmakta hem de geçirimliliği azaltmaktadır. Geçirimsizlik tamamen sağlanamasa bile betona karbondioksit girişini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu nedenle mermer tozlu betonların, karbonatlaşma miktarı ve hızını azalttığı yönündeki etkisi, elde edilen sonuçlarda görülmektedir.

- Betonda karbonatlaşma reaksiyonunun ürünü olan ve yerini aldığı $Ca(OH)_2$'den hacimce büyük olan $CaCO_3$'ın ortaya çıkmasıyla, karbonatlaşan kısımlarda yoğunluk artmaktadır. Yüzeydeki yoğunluğun artışı da karbondioksit girişini yavaşlatmaktadır.
- Karbonatlaşma derinliği en az olan ve karbonatlaşmaya en fazla direnç gösteren seri CE0-MT100 kodlu seri olmuştur.
- Farklı oranlarda cam elyaf ve mermer tozu katılarak hazırlanan beton serilerinin karbonatlaşma miktarları kendi aralarında kıyaslandığında; cam elyaf miktarındaki artışın karbonatlaşma hızını ve derinliklerini arttırdığı görülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Baradan B., Yazıcı H., (2003), Betonarme Yapılarda Durabilite ve TS EN 206-1 Standardının Getirdiği Yenilikler, TMH, Sayı 426 - 2003/4.

[2] Karahan O., (2006), Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu Küllü Betonların Özellikleri, İnşaat Mühendisliği A.B.D., Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.

[3] Türkiye III. Mermer Sempozyumu (MERSEM ' 2001), Bildiriler Kitabi, 3-5 Mayıs Afyon.

[4] Halilov, S., (2003), "Silis Dumanı ve Süper Akışkanlaştırıcı Katkılı Lifli Betonların Özellikleri", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Temmuz, Ankara, 38-42, 64-73.

[5] Gönen, T., (2003), Betonda Sıkıştırma Faktörünün Karbonatlaşmaya Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

[6] Bekaert, (2001), Çelik Teller Hakkında Genel Bilgiler Kılavuzu. Bekaert, Belgium.

[7] Bentur, A., Mindess, S., (1990), Fibre Reinforced Cementitious Composites, Elsevier, Essex, UK, 449 p.

[8] Ekincioğlu, Ö., (2002), "Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışının İncelenmesi", Sika Teknik Bülten, 10-11.

[9] Durmaz, B., (2007), Bölgesel Basınca Maruz Lifli Betonlarda Yatak Mukavemeti, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

[10] Biber, Ş.A., (2001), Karmaşık Çelik Tel Takviyeli Betonların Mekanik Davranışı, Bitirme Ödevi , İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.

[11] http://www.archprecast.org/documents/GFRC_handbook.pdf

[12] Kurt G., (2006), Lif İçeriği ve Su/çimento Oranının Fibrobetonun Mekanik Davranışına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ.

[13] Bahadır, B., (2007), Liflerin Beton Kırılma Tokluğuna Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

[14] Barbero, E.J., (1999), Introduction to Composite Materials Design, Edwards Brothers, Ann Arbor , MI, U.S.A.

[15] Sayman O., (2007), Kompozit Malzemeler Ders Notları, Dokuz Eylül Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir.

[16] Ekincioğlu, Ö., (2002), "Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışının İncelenmesi". Sika Teknik Bülten, 10-11.

[17] Özyurt, N., (2000), Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, Yüksek Lisans Tezi , İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[18] Zollo, R. F., (1997), Fiber-Reinforced Concrete: An Overview after 30 years of Development, Cement and Concrete Composites, 19, s:107-122.

[19] Tuna Ş., (2010), Dış Cephede Kullanılan Cam Elyaf Takviyeli Beton Panellerin Durabilitesi, Yüksek Lisans Tezi, Mimarlık Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

[20] Baştürk Ö., (2008), Beton Yüzeylerine Sarılan Lifli Kompozitlerin Basınç Dayanımına Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yapı Eğitimi A.B.D., Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi**.**

[21] Yıldız S., Ulucan Ç., (2008), Beton Borularda Cam Lif Katkısının Tepe Yük Dayanımına Etkisinin Araştırılması, Gazi Üniversitesi, Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 23, No 2, 267-271.

[22] Yaprak H., Şimşek O., Öneş A., (2004), Cam ve Çelik Liflerin Bazı Beton Özelliklerine Etkisi, Politeknik Dergisi, Cilt: 7, Sayı: 4, s. 353-358.

[23] Yıldız S., Keleştemur H., (2000), Cam Lif Katkısının Beton Dayanımına Etkisi, F.Ü Fen ve Müh. Bilimleri Dergisi 12(1), 2000, 373-381.

[24] Tanyıldızı, H. ve Coşkun, A., (2011), Elazığ Yöresi Vişne Mermer Tozu Katkılı Hafif Betonun Basınç ve Ultrasonik Ses Geçirgenliği Özelliğinin Araştırılması, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi: 27(2), 150-154.

[25] Türker, P., Erdogan, B., and Erdogdu, K., (2002). Mermer Tozunun Çimentonun Hidratasyonuna ve Mikroyapısına Etkileri, Çimento ve Beton Dünyası: 7(38), 50-6.

[26] Vijayalakshmi, V., Singh, S. ve Bhatnagar, D., (2001), "Marble Slurry-A New Perspective", Technology Information, Forecasting and Assesment Council, New Delhi, India. M.B.M. Engineering College National Seminar on Small Scale Mining Jodhppur, Rajasthan.

[27] Dhanapandian S., Gnanavel, B. ve Ramkumar T., (2009b), "Utiliation of Granite and marble sawing Powder wastes as Brick Metarials", Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, Ekim, Vol.4.

[28] Gürü. M., Tekeli, S., Akın, E., (2007), ''Manufacturing of Polymer Matrix Composite Material Using Marble Dust and Fly Ash'' J.of Key Engineering Material, 336- 338 :1353-1356.

[29] Bilgin N., (2010), Mermer Tozu Atıklarının Yapı Malzemesi Üretiminde Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği A.B.D., Yıldız Teknik Üniversitesi.

[30] DPT, 1996-a. Madencilik Özel İhtisas Komisyonu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Çalışma Grubu Raporu, Cilt 2, Yayın No: DPT: 2421- Ö.İ.K.: 480, II 1-130. Ankara.

[31] Ceylan H., (2000), Mermer Fabrikalarındaki Mermer Toz Atıklarının Ekonomik Olarak Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Isparta, No.2:47-160.

[32] Çelik, M., Y., (1996), Mermer Artıklarının (Parça-Tozlarının) Değerlendirilmesi, Akü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

[33] Özata G., (2009), Mermer ve Polietilentreftalat (pet) Atıklarının Yapı Malzemesi Olarak Geri Dönüşümü, Yüksek Lisans Tezi, Seramik Mühendisliği, Afyon Kocatepe Üniversitesi.

[34] Garcia, J., Mallol, C., Bou, E., Silva, G., Fernandez, J., Molina, A., Romera, J., (2003), ''Recycling Marble working wastes in manufacturing ceramic products'' CFI Ceramic Forum International, 80:84-90.

[35] Gücek S., (2011), Mermer Tozu ve Uçucu Külün Kil Zeminlerin İyileştirilmesinde Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon Kocatepe Üniversitesi.

[36] Üğücü, Ramazan., (2000), Mermer Tozunun Beton Özelliklerine Etkisi. Mezuniyet Tezi.

[37] Şimşek, Osman., (1999), Beton Teknolojisi Ders Notu.

[38] Vlahovic, M.M., Martinovic, S.P., Boljanac, T.D., Jovanic, P.B., and Volkov-Husovic, T.D., (2011), Durability of sulfur concrete in various aggressive environments. Construction and Building Materials:25 (10), 3926-3934.

[39] Moosberg-Bustnes, H., Lagerblad, B., and Forssberg, E., (2004), The function of fillers in concrete. Materials and Structures / Mat6riaux et Constructions: Vol. 37, 74-81.

[40] Taşdemir, C. ve Atahan, H.N., (1996), Filler Malzemelerin Betonun Mekanik Özeliklerine Ve Durabilitesine Etkisi. I. Ulusal Kırmataş Sempozyumu'96, İstanbul:251-265.

[41] Uğurlu, A., (1996). Taşunu kullanımının beton özellikleri üzerindeki etkisi. I. Ulusal Kırmataş Sempozyumu', İstanbul: 303-323.

[42] Ceylan H., Mança S., (2013), Mermer Parça Atıklarının Beton Agregası Olarak Değerlendirilmesi, SDU Teknik Bilimler Dergisi, sayı:2, sayfa:21-25.

[43] Özel C., Soykan O., Zengin B., (2012), Filler Olarak Mermer Tozu İçeren Beton Özelliklerinin Bulanık Mantık Kullanılarak Belirlenmesi, e-Journal of New World Sciences Academy 2012, Volume: 7, Number: 2, Article Number: 2A0075.

[44] Ünal O., Kibici A., (2001), Mermer Tozu Atıklarının Beton Üretiminde Kullanılmasının Araştırılması, Türkiye III. Mermer Sempozyumu (MERSEM 2001) Bildiriler Kitabi, Afyon.

[45] Ceylan H., (2000), Mermer Fabrikalarındaki Mermer Toz Atıklarının Ekonomik OlarakDeğerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

[46] Mather, Bryant., (2004), Concrete Durability, 26, 3-4.

[47] Saran, A., G., (2007), Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Betonun Durabilite Özelliklerine Etkisi, İnşaat Mühendisliği,Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

[48] Öner, A., Yıldız, R., (2003), Betonun İç ve Dış Ortam Etkilerine Dayanıklılığı Üzerine Genel Bir Bakış, Kocaeli Teknik Bülten.

[49] Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., (2002), Betonarme Yapılarda Kalıcılık, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, Yayın No:298, ISBN: 975-441-189-1, İzmir.

[50] Taşdemir M. A., Akyüz S., (1999), Betonun Durabilitesi Üzerine Genel Bir Değerlendirme, Hazır Beton Dergisi, syf:37-42.

[51] Baradan B., Aydın S., (2013), Betonun Durabilitesi (Dayanıklılık, Kalıcılık), Hazır Beton Dergisi, syf:54-68.

[52] Shah, S.P., Balaguru, P.N., (1992), "Fiber-Reinforced Cement Composites. McGraw-Hill Inc", ACI JOURNAL, Singapore, 399-408.

[53] Erdoğan T.Y., (2003), "Beton1" Baskı Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnş Fak., Metu Press., Ankara, 550-580.

[54] Yüzer, N., (1998), Silis Dumanı Katkılı Betonarme Elemanlara Klorür Etkisinin Hızlandırılmış Korozyon Deneyi ile Araştırılması, Doktora Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[55] ACI 222R-01, Protection of Metals in Concrete Against Corrosion, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.

[56] Akçaözoğlu. S., (2008), Atık Pet Şişe Kırıklarının Hafif Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliği, İnşaat Mühendisliği, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi.

[57] Yazıcı H., Ders Notları, Betonarmenin kalıcılığı (durabilite, dayanıklılık), İnşaat Mühendisliği Dokuz Eylül Üniversitesi.

[58] İnternet: http://www.theconstructioncivil.com/2010/02/concrete-carbonation.html.(2013).

[59] Neville, A.M. ve Brooks, J.J., (2001), Concrete Technology, Revised Edition, Pearson Education Limited.

[60] Şimşek, O., (2004), "Beton ve Beton Teknolojisi" 3, Seçkin Yay. San. ve Tic. A.Ş, Ankara, Pp23,46,153-172,97-109.

[61] Alexander K. M., Wardlaw J., (1959), 'A Possible Mechanism for Carbonation Shrinkage and Crazing, Based on Thin Layers on Hydrated Cement', Aust, J. Appl, Sci., N10, pp 470-483.

[62] Powers T.C., (1962), 'A Hypothesis on Carbonation Shrinkage' J. of Port. Cem. Assoc. Res. and Dev. Lab., pp. 40-50.

[63] Akman, M.S., (1989) "Betona Gömülü Çeliğin Korozyonu, Riskin Saptanması, Önlemeler", Sika Teknik Bülten, Yıl 3, Sayı 4, İstanbul, 2002. Rosenberg, A., Hansson, C., Andrade, C., "Mechanisms of Corrosion in Concrete", Materials Science of Concrete I, Ed. By Skalny, P.J., The American Ceramic Society.

[64] Dongxue, L., Xinhua, F., Xuequan, W. ve Mingshu, T., (1997), "Durability Study of Steel Slag Cement", Cement and Concrete Research 27: 983-987.

[65] Neville, A. M., (1990), Properties of Concrete, Third Edition, Longman Scientific and Technical, New York.

[66] Persson, B., (1998), Experimental Studies on Shrinkage of High-Performance Concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 7, pp. 1023-1036.

[67] CEB (Comite Euro-International du Beton), (1992), Durable Concrete Structures, Lausanne: Thomas Telford Ltd.

[68] Yiğiter, H., (2008), Betonarme Donatısında Klorid Korozyonu Gelişiminin Elektrokimyasal Yöntemlerle Belirlenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.

[69] Zivica, V., (2003), Corrosion of reinforcement induced by environment containing chloride and carbondioxide. Bulletin of Materials Science, 26 (6), 605-608.

[70] Winslow D., Liu D., (1990), 'The Pore Structure of Paste in Concrete', Cem. Conc. Res. N20, pp. 227-235.

[71] Lo, Y., Lee, H. M., (2002), "Curing Effects On Carbonation Of Concrete Using A Phenolphthalein İndicator And Fourier-Transform Đnfrared Spectroscopy", Building and Environment 37, 507-514.

[72] Gönen, T., Yazıcıoğlu, S., (2004), "Farklı Nem Ortamlarındaki Betonlarda Karbonatlaşma Gelişimi, F.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16, 367-373.

[73] Parrott, L.J., Killoh, DC, (1989), Carbonation in a 36 Year Old, İn-Situ Concrete, Cement and Concrete Research, 19,649-656.

[74] Subaşı S., (2005), "Farklı Yüzey Astarları ile Kaplanmış Drenaj Ozelliği Bulunan Kalıpların Betonun Bazı Fiziksel özelliklerine Etkileri", Doktora Tezi, Gazi ünv., Fen Bilimleri Enst., Ankara.

[75] Malami S., (2014), Experımental Investıgatıons on the Extent of Carbonatıon Problem ın Reınforced Concrete Buıldıngs of North Cyprus, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Civil Engineering, Nıcosıa.

[76] Bernal S., ve ark., (2014), Natural Carbonation of Aged Alkali-Activated Slog Concretes, Materials and Structures, C. 47, No:4, s693-707, Haziran.

[77] Baharavar S., R., (2012), Karbonatlaşmanın Çelik Lifli ve Uçucu Küllü Betonlarda Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Yapı Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi**,** Ankara**.**

[78] Lımbachıya, M. ve ark., (2012), Performance of Portland/Silica Fume Cement Concrete Produced with Recycled Concrete Aggregate, ACI Materials Journal, C.109, No.1, s.91-97.

[79] Shaou, X. ve Lın,X., (2011), Early Age Carbonation Curing of Conc- rete Using Recovered CO_2, Concrete International, s.50-56.

[80] Gönen, T., and Yazıcıoğlu, S., (2005), "Betonda Hızlandırılmış Karbonatlaşma Deneyi ve Aparatı", Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü;Elazığı., Politeknik Dergisi Journal of Polytechnic Cilt: 8 Sayı: 2 s.Elazığ, 233-237.

[81] Ramezanianpour A. A., TarighatA., (2004), Modeling Carbonation of Concrete With and Without Condensed Silica Fume for The Persion Gulf Region of İran, Çimento ve Beton Dünyası, syf:44-53.

[82] Zhang, X., Wu, K., Yan, A., (2004), Carbonation property of hardened binder pastes containing super-pulverized blast-furnace slag. Cement and Concrete Composites, Vol. 26, pp. 371–374.

[83] Gönen T., Yazıcıoğlu S., (2004), Farklı Nem Ortamlarındaki Betonlarda Karbonatlaşma Gelişimi, Fırat Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16(2), 367-373.

[84] Sideris, Kosmas K., Savva, (2004), Athina E. Thrace Democritus Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Lab. Xanthi, Greece, Çimento ve Beton Dünyası, 9(51):46-56 Ref: 17.

[85] Yazıcıoğlu ve diğ., (2003), Elazığ Ferrokrom Cürufunun Betonda Karbonatlaşmaya Etkisi, 5. Ulusal Beton Kongresi Betonun Dayanıklılığı (Durabilite), İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi.

[86] Papadakis, V. G., Fardis, M.N., and Vayenas C.G., (1992), Effect of Composition, Environmental Factors and Cement-Lime Mortar Coating on Concrete Carbonation, Materials and Structures, Vol. 25, p. 293.

[87] Torii, K. ve Kawamura, M., (1992), "Pore Structure and Chloride Permeability of Concretes Containing Fly Ash, Blast Furnace Slag, and Silica Fume", Fourth CANMET/ACI, International Conference on Fly ash, Blast Furnace Slag, Silica Fume and Natural Pozzolans in Concrete, Vol 1, SP132-9,135-150.

[88] Carette, G.G., Malhotra V.M., (1992), Long-Term Strength Development of Silica Fume Concrete. Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in

Concrete. Proceedings Fourth International Conference (V. M. Malhotra editör). ACI-SP-132, İstanbul, Turkey. pp. 1017-1044.

[89] TS EN 197-1, (2002), Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri**,** TSE Ankara.

[90] TS EN 934-2, (2002), Kimyasal Katkılar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[91] TS EN 1008, (2003), Beton Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, TSE Ankara.

[92] TS 802, (1984), Beton Karışım Hesap Esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[93] TS 1247, (1984), Beton Yapım, Döküm Ve Bakım Kuralları (Normal Hava Koşullarında), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[94] TS EN 12350-2, (2002), Beton- Taze Beton Deneyleri- Bölüm 2: Çökme (Slamp) Deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[95] TS EN 772-4, (2000), Tabii Taş Kagir Birimlerin Toplam ve Görünen Porozitesi ile Boşluksuz ve Boşluklu Birim Hacim Kütlesinin Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[96] The Concrete Society, (1987), "Permeability Testing of Site Concrete – A Review of Methods and Experience", Technical Report No. 31.

[97] BS 1881: Part 203, (1986), Recommendations on the Non-Destructive Testing in the Form of Plain, Reinforced and Prestressed Test Specimens, Precast Components and Structures by the Measurement of Ultrasonic Pulse Velocity

[98] ASTM C 597-02, American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.

[99] TS 4045, (1985), Yapı Malzemelerinde Kapiler Su Emme Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[100] TS EN 12390-3, (2010), Sertleşmiş Beton Deneyleri-Deney Numunelerinde Basınç Dayanımı Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[101] TS EN 12390-6, (2010), Sertleşmiş Beton Deneyleri-Deney Numunelerinde Yarmada Çekme Dayanımı Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[102] Rocco, G.V., Planas, J. and Elices, M., (2000), Review Of The Splitting-Test Standards From A Fracture Mechanics Point of View, Cement and Concrete Research, 31, 73-82.

[103] TS EN 316, (2011), Odundan Mamul Lif Levhalar – Tarifler Sınıflandırma ve Semboller, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[104] Perry, J. H., (1963), Chemical Engineers Handbook, Kogakusha Company LTD, Tokyo.

[105] ELE İnternational, 'Civil and Enviromental Engineering Test Equipment', 9th edition Catalogue, England.

[106] Ramezanianpour AA., (1987), Properties and Durability of Pozzolanic Cement Mortars and Concretes, PhD Thesis, Civil Engineering Department, The University of Leeds, UK.

[107] Claisse PA., (1998), 'The Properties and Performance of High Strength Silica Fume Concrete', PhD Thesis, The University of Leeds, UK.

[108] Paillere AM, Raverdy M, Grimaldi G., (1986), Carbonation of Concrete with Low- Calcium Fly Ash and Granulated Blast Furnace Slag: Influence of Air-Entraining Agents and Freezing and Thawing Cycles, Proceedings of ACI Canmet Second International Conference on Fly Ash, Silica Fume , Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Spain, Madrid; SP-91, pp541,562.

[109] BS EN 13293-2004 (2004)"Products And Systems For The Protectgion And Repair Of Concrete Structures-Test Methods-Determination Of Resistance To Carbonation".

[110] Yazıcı, H., (1997), Accelerated Carbonation Test of Concrete, Yüksek Lisans Tezi, 9 Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

[111] Bakharev, T., Sanjayan, J. G., Cheng Y. B., (2001), Resistance of Alcali-Activated Slag Concrete to Carbonation, Cement and Concrete Research, 31 pp. 1277-1283.

[112] Johannesson, B., Utgenannt, P., (2001) Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar, Cem. Concr. Res. 31 (2001) 925.

[113] Chi, M. J., Huang, R., Yang, C. C., (2002), Effects of Carbonation on Mechanical Properties and Durability of Concrete using Accelerated Testing Method, Journal of Marine Science and Technology, Vol:10, No:1, 14-20.

[114] Xiao, J., Li, J., Zhu, B., Fan, Z., (2001), Experimental Study on Strength and Ductility of Carbonated Concrete Elements, Consruction and Building Materials, 16, 187-192.

[115] Houst Y. F., (1992) 'Diffusion de Gaz Carbonatation et Retrait de la Pate de Ciment Durci' These de Doctorat, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, N1108.

[116] Massazza F., (2005), "Betonun Dayanımı ve Yapıların Hizmet Ömrü: İki, Çözülebilir Sorun", Hazır Beton Dergisi, Aralık.

[117] Özkul, M. H., Yıldırım, H., (1996), 4. Ulusal Beton Kongresi, Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar, 'Kimyasal Katkıların Uzun Süreli Davranışları', İstanbul Teknik Üniversitesi.

[118] Kara C., (2013), 'Mermer Tozu Atığının Betonun Karbonatlaşmasına Etkisini Araştırılması', Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

[119] Aydın A., (2013), İnce Agregasında Farklı Oranlarda Mermer Tozu Kullanılmış Betonların Dayanım ve Dayanıklılık Özellikleri, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.

[120] Özdal V., Bilim E., Subaşı S., (2013), Cam Elyaf Takviyeli Betonlarda Lif Yoğunluğunun İncelenmesi II. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, Ege Üniversitesi, İzmir.

[121] Ustabaş İ., Erdoğdu Ş., (2013), Rize İlindeki Bazı Kamu Bina Betonlarında Karbonatlaşma Derinliği ve Beton Kalitesi.

[122] Yaprak, H., Şimşek O., ÖNEŞ A., (2004), Cam ve Çelik Liflerin Bazı Beton Özelliklerine Etkisi, Politeknik Dergisi, cilt 7, sayı 4.

ÖZGEÇMİŞ

Leyla GÜLAN, 1987 yılında Elazığ'da doğdu. İlköğretim, ortaöğretim, lise eğitimini Elazığ' da tamamladı. 2006 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Öğretmenliği Programında başladığı lisans eğitimini 2010 yılında tamamladı. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek lisans eğitimine başladı ve eğitimine devam etmektedir.