

Atık Mermer Tozu ve Cam Lif Katkılı Betonun Mekanik ve Fiziksel Özellikleri Üzerine Karbonatlaşmanın Etkisi

Leyla Gülan¹, Servet YILDIZ², Oğuzhan KELEŞTEMUR^{2*}

¹Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, Elazığ, Türkiye.

²Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye.

*okelestemur@firat.edu.tr

(Geliş/Received:23.09.2016 ; Kabul/Accepted:27.09.2016)

Özet

Bu çalışmada atık mermer tozu ve cam lif katkı betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine karbonatlaşmanın etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, ağırlıkça 0.25, 0.50, 0.75, ve 1 kg/m³ oranlarında cam lif içeren beton numunelerine hacimce %25, %50, %75 ve %100 oranlarında filler malzemesi ile yer değiştirecek şekilde mermer tozu ilave edilerek 25 farklı beton serisi hazırlanmıştır. Elde edilen numuneler üzerinde porozite, kilcal su emme, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri yapılarak, karbonatlaşma deneyi sonrası meydana gelen değişimler belirlenmiştir. Yapılan çalışma neticesinde, karbonatlaşma deneyi sonrası numunelerin, porozite, kapillarite, basınç ve yarmada çekme dayanımı değerlerinde azalma, ultrases geçiş hızı değerinde ise artış olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton, Cam Lif, Mermer Tozu, Karbonatlaşma

Effect of Carbonation on Mechanical and Physical Properties of Concrete with Waste Marble Dust and Glass Fiber

Abstract

In this study, the effect carbonation on the mechanical and physical properties of concrete including waste marble dust and glass fiber has been examined. For this purpose, 25 different concrete series has been prepared by substituting waste marble dust with filler material by volume 25%, 50%, 75% and 100% in the concrete including glass fiber by weight 0.25, 0.50, 0.75 and 1 kg/m³. Porosity, sorptivity, ultrasonic pulse velocity, compressive strengths and splitting tensile strength tests have been performed on the specimens and the changes occurred after carbonation have been determined. As a result of this study, it is determined that the porosity, capillarity, compressive and splitting tensile strength values of the specimens have decreased after carbonation test, while ultrasonic pulse velocity value has increased.

Keywords: Concrete, Glass Fiber, Marble Dust, Carbonation

1. Giriş

Beton, üzerinde yapılan çalışmalarla basınç mukavemeti günden güne artan ve bu özelliğinden dolayı fazlasıyla yararlanılan bir malzemedir. Ancak artan basınç dayanımı betonun diğer mekanik kusurlarını kapatmamaktadır. Yüksek dayanımın yanında boşluk oranının minimuma indirilmesiyle basınç dayanımı ve durabilitesi artan betonun çekme dayanımı hep düşük seviyelerde kalmıştır. Bununla beraber artan basınç mukavemetleri betonu daha da gevrek bir malzeme haline getirmiştir [1]. Bu nedenle betonun kırılma süreci süreksizliklerle doludur. Betonun

kırılması da çimento agrega yüzeyindeki süreksizliklerden meydana gelmektedir. Çimento agrega yüzeyindeki oluşan gerilmelerden ötürü oluşabilecek çatlaklar, betona katılacak liflerle bu mikro çatlakların büyümesini engellemektedir. Bu sayede betona katılacak lif, betonda başta süneklik olmak üzere diğer mekanik özellikleri geliştirir ve ani göçmelerin önüne geçmektedir. Lif donatılı betonlarda kullanılan lifler, yüksek çekme mukavemetleri sayesinde, betondaki çatlakların başlangıcını, yayılmasını ve birleşmesini önlemektedir [2]. Amacına uygun yeterli miktarlarda kullanılan lifler betonda oluşabilecek çatlaklardaki gerilmeleri betonda çatlak oluşmamış kısımlara

iletmektedir. Lifler çatlak sonlarına bitişik olduklarından, matristeki gerilmelerin üzerlerinden geçmesini ve böylece, daha önce çatlamamış beton kesitlerinin de dayanımından yararlanılmasını sağlamaktadırlar [3]. Bu çalışmada kullanılan cam lifler sertlik derecesi yüksek ve aşınmaya karşı dirençlidirler. Ayrıca esnek, hafif ve düşük maliyetli lifler olarak da karşımıza çıkmaktadırlar [4].

İnşaat sektörü, Türkiye açısından düşünüldüğünde, büyüme rakamları ve istihdam anlamında oldukça önemli bir yere sahiptir. Gelişen teknolojik imkanlarla birlikte, yapı malzemeleri alanında, enerji verimliliği, düşük maliyet, ekolojik verimliliğin artırılması amacıyla mevcut üretim teknikleri ve kaynak kullanımına ikame teknik ve kaynak arayışı devam etmektedir [5]. Bu anlamda mermer işleme tesisleri blok halindeki mermer kütlelerinin işlenmesi sırasında açığa çıkan atık mermer tozunun çok az miktarını, geri dönüşümle üretime kazandırmakta, geri kalan kısmını ise atık alanlarında depolamaktadırlar. Üretim sektöründe çevre korunumu ve atık malzemelerin tekrar geri dönüşümü amacıyla bu çalışmada Elazığ ilinde faaliyet gösteren mermer işleme tesislerinden elde edilen atık mermer tozu kullanılmıştır. Bu çalışmada, farklı oranlarda atık mermer tozu ve cam lif içeren beton numuneler üretilerek bu betonların karbonatlaşma etkisi altında göstermiş oldukları mekanik ve fiziksel değişimler incelenmiştir.

2. Malzeme ve Yöntem

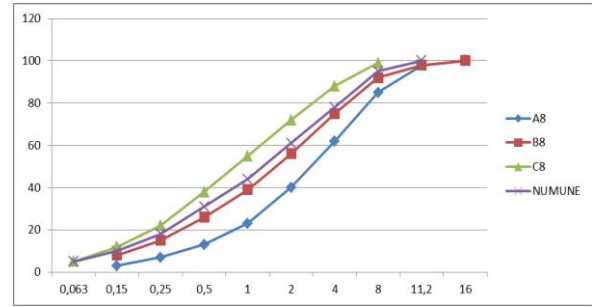
2.1. Malzeme

Deneylerde agrega olarak Elazığ Palu yöresine maksimum tane büyüklüğü 8 mm olan yıkanmış dere agregası kullanılmıştır. Özgül ağırlığı 2.80 g/cm³ olan agreganın kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Agregası; 0-0,25 mm, 0,25-4 mm ve 4-8 mm olmak üzere üç sınıfa ayrılarak kullanılmıştır. Elek aralıklarına göre sınıflandırılan agreganın granülometri eğrisi Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Agreganın kimyasal özellikleri (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
49,87	12,24	11,56	18,76	7,57

Deney numunelerinin hazırlanmasında, Elazığ Altınova Çimento Fabrikasında üretilen CEM I 42,5 N tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Agreganın granülometri eğrisi

Tablo 2. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

CEM I 42,5 N			
Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler	
S(SiO ₂)	21,12	Yoğunluk(g/cm ³)	3,13
A(Al ₂ O ₃)	5,62	Özgül yüzey(cm ² /g)	3370
F(Fe ₂ O 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 ₂ O	--	7. gün(Mpa)	41,8
K ₂ O	--	28. gün(Mpa)	50,7
Cl	0,009		
Kızdırma kaybı	1,78		

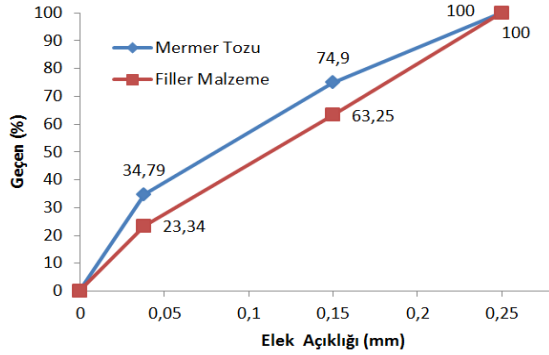
Çalışmada kullanılan mermer tozu Elazığ Alacakaya Mermer ve Maden İşletmesi San. ve Tic. A.Ş. den temin edilmiştir. Özgül yüzeyi 5750 cm²/g, yoğunluğu 2.78 g/cm³ olan atık mermer tozunun kimyasal özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Mermer tozunun kimyasal özellikleri (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
49,87	12,24	11,56	18,76	7,57

Mermer tozu filler malzemesi ile belirli oranlarda yer değiştirecek şekilde numunelere ilave edildiği için, mermer tozu ve filler malzemesine ait granülometri eğrileri Şekil 2'de verilmiştir.

Beton numunelerde lif katkısı olarak, Camelsan Sanayi A.Ş. tarafından üretilen kırılmış 12 mm'lik cam lif kullanılmıştır. Kullanılan cam life ait özellikler Tablo 4'te verilmiştir.

**Şekil 2.** Mermer tozu ve filler malzemenin granülometri eğrileri**Tablo 4.** Cam life ait özellikler

Lif Boyu (mm)	12
Lif Çapı (µm)	14
Özgül Ağırlık (mg/m ³)	2.68
Elastisite Modülü (MPa)	72000
Çekme Mukavemeti (MPa)	1700

Beton numunelerde lif takviyesindeki artışa bağlı olarak meydana gelen işlenebilirlikteki azalmayı önlemek amacıyla Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından üretilen, Sika ViscoCrete Hi-Tech 28 kodlu polikarboksilat bazlı yüksek oranda su azaltıcı, hiper akışkanlaştırıcı beton katkı maddesi TSE EN 943-2'de belirtilen standartlara uygun olarak kullanılmıştır. Deneylerde, üretici firma talimatlarına uygun olarak çimento ağırlığının %1 oranında akışkanlaştırıcı ilave edilmiştir.

Karbonatlaşma deneyinde tankın içindeki nem miktarını %60±5 seviyesinde tutabilmek amacıyla kullanılan sodyum dikromat tuzu Tekkim Kimya San. ve Tic. Ltd. Şti. tarafından temin edilmiştir. Bu tuz 1 litre suda doymun hale gelene kadar karıştırılmıştır. Daha sonra gaz sızdırmaz tankın içine yerleştirilerek ortamın nemi %60±5 arasında tutulmuştur [6]. Deneylerde karışım suyu olarak Elazığ ili şebeke suyu kullanılmıştır.

2.2. Yöntem

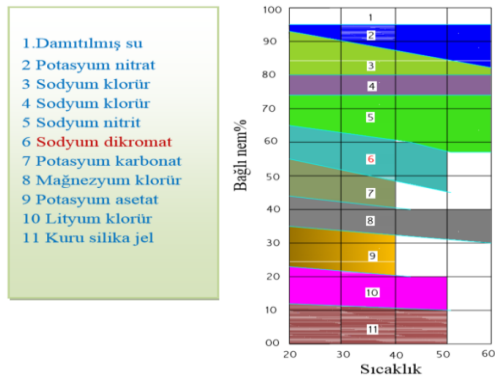
TS 802 'de belirtilen karışım esaslarına göre 25 farklı beton karışımı hazırlanmıştır [7]. Cam lif içeren beton numuneler (CE), mermer tozu içeren beton numuneler ise (MT) olarak kodlanmıştır. Numunelere katılan MT %25, %50, %75 ve %100 oranlarında filler malzeme ile hacimce yer değiştirilerek kullanılmıştır. Beton numunelerinin üretimi sırasında karışıma; 0,25, 0,50, 0,75 ve 1 kg/m³ oranlarında ağırlıkça kırılmış 12 mm boyunda CE ilave edilmiştir. Çimento dozajı 400 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Deneyde kullanılan beton numunelerine ait karışım oranları Tablo 5'te verilmiştir.

100x100x100 mm'lik kalıplardan çıkarılan beton numuneleri 28 gün boyunca 22±3 0C kirece doymun suda kür edilmiştir. Kür süresini tamamlayan numuneler kür tankından çıkartılarak, 3 gün boyunca dış ortamda bekletilmiştir. Karbonatlaşma deneyi öncesinde beton numunelerin basınç ve yarmada çekme dayanımı tayini yapılmıştır. Ayrıca beton numunelerin karbonatlaşma sonrası fiziksel özelliklerini belirleyebilmek amacıyla numuneler üzerinde porozite tayini, ultrases geçiş hızı tayini ve kapiler su emme tayini deneyleri de yapılmıştır. Beton numunelerine hızlandırılmış karbonatlaşma testi uygulanmıştır. Bu test betonun zenginleştirilmiş CO₂ ortamına maruz bırakılmasından ibarettir. Bu amaçla hazırlanmış gaz sızdırmaz tankın içindeki ekipmanlar kontrol edilerek 25 farklı seri sırasıyla tankın içine yerleştirilmiştir. Tankın içinde gaz miktarının belirlenmesi için manometre, ortamın bağıl neminin kontrolü için termostat ve rezistanslı su kabı, tank içindeki havanın türbülansı için fan ve kontrol paneli bulunmaktadır.

Tablo 5. Beton numunelerinin karışım oranları (kg/m³)

Seri Adı	Çimento	Su	Agrega 0 - 0,25	Agrega 0,25 - 4	Agrega 4 - 8	Mermer tozu	Cam lif
CE0-MT0	5,52	2,88	1,94	18,47	3,89	-	-
CE0-MT25	5,52	2,87	1,44	18,29	3,85	0,32	-
CE0-MT50	5,52	2,85	0,95	18,12	3,81	0,64	-
CE0-MT75	5,52	2,83	0,47	17,95	3,78	0,95	-
CE0-MT100	5,52	2,81	-	17,78	3,74	1,26	-
CE0,25-MT0	5,52	2,80	1,94	18,44	3,89	-	0,02837
CE0,25-MT25	5,52	2,77	1,44	18,27	3,85	0,32	0,02811
CE0,25-MT50	5,52	2,75	0,95	18,09	3,81	0,64	0,02785
CE0,25-MT75	5,52	2,73	0,47	17,92	3,78	0,95	0,02760
CE0,25-MT100	5,52	2,69	-	17,76	3,74	1,26	0,02735
CE0,50-MT0	5,52	2,87	1,93	18,42	3,89	-	0,05675
CE0,50-MT25	5,52	2,80	1,44	18,25	3,85	0,32	0,05623
CE0,50-MT50	5,52	2,77	0,95	18,07	3,81	0,64	0,05571
CE0,50-MT75	5,52	2,70	0,47	17,90	3,78	0,95	0,05521
CE0,50-MT100	5,52	2,68	-	17,74	3,74	1,25	0,05471
CE0,75-MT0	5,52	3,00	1,93	18,40	3,89	-	0,08513
CE0,75-MT25	5,52	2,98	1,43	18,22	3,85	0,32	0,08435
CE0,75-MT50	5,52	2,95	0,95	18,05	3,81	0,64	0,08358
CE0,75-MT75	5,52	2,80	0,47	17,88	3,78	0,95	0,08282
CE0,75-MT100	5,52	2,70	-	17,72	3,74	1,25	0,08208
CE1-MT0	5,52	3,10	1,92	18,38	3,89	-	0,11351
CE1-MT25	5,52	2,90	1,43	18,20	3,85	0,32	0,11247
CE1-MT50	5,52	2,83	0,94	18,03	3,82	0,64	0,11145
CE1-MT75	5,52	2,80	0,47	17,86	3,78	0,95	0,11044
CE1-MT100	5,52	2,78	-	17,70	3,74	1,25	0,10945

Tank içindeki nemin ayarlanmasında Şekil 3'te verilen grafikten yararlanılmıştır [8]. %65 nem için sodyum dikromat tuzu seçilmiştir. Seçilen bu tuzun doymuş haldeki çözeltisi, sırası geldiğinde tankın su kabına konulmak üzere Tablo 6'ya göre hazırlanmıştır [9]. Tankın kapağı sıkıca kapatılmıştır. Tek yönlü valf aracılığı ile CO₂ dolu tüpten tankın içerisine basınç 0,8 bar (%40 CO₂) olana kadar CO₂ verilmiştir. Numuneler 7, 14 ve 28 gün süreler halinde bekletilmiştir. Gaz sızdırmaz tank içerisine yerleştirilen numuneler Şekil 4'te gösterilmiştir. Karbonatlaşma deneyi sonrası beton numunelerin tekrar mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir.

**Şekil 3.** Değişik tuzların nem sağlama miktarları**Şekil 4.** Gaz sızdırmaz tanka yerleştirilen beton numuneleri

Porozite tayini deneyi TS EN 772-4'e uygun olarak yapılmıştır [10]. Karbonatlaşma deneyi öncesi ve sonrasında, numunelerin hassas terazide doymuş yüzey kuru ağırlığı (W_{dyk}), sualtındaki ağırlığı (W_{su}) ve etüvde kurutulduktan sonra kuru ağırlığı (W_{kuru}) tartılmıştır. Eşitlik 1'de verilen formül kullanılarak numunelerin porozite değerleri elde edilmiştir [11].

$$P = \frac{(W_{dyk} - W_{kuru})}{(W_{dyk} - W_{su})} 100 \quad (1)$$

eşitlikte yer alan;

P = Porozite (%),

W_{dyk} = Numunelerin doymuş yüzey kuru ağırlığı (kg),

W_{kuru} = Numunelerin etüv kuru ağırlığı (kg),

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

Ultras ses hız ölçümü, 12 voltluk akümülatör ile çalışan dijital göstergeli Ultras ses ölçme aleti ile yapılmıştır. BS 1881 Part 203 (1986)'ya uygun olan ultras ses aletinin frekansı 55 kHz, modeli ASTM 597-02 (2002) olarak belirtilmiştir [12,13]. Her seriden üç adet küp numune üzerinde yapılan deney ile ses dalgaları geçiş süreleri ölçülmüştür. Ölçümlerde direkt iletim yöntemi uygulanmıştır. Ultras ses hızı geçiş süresi değerleri (t, ms) olarak ölçülmüştür. Ultras ses hızı değerleri (2) no'lu denklem ile hesaplanarak bulunmuştur.

$$V = \frac{h}{t} \times 10^6 \quad (2)$$

denklemden yer alan;

V = Ultras ses 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 (μ sn) dır.

Kılcal su emme deneyi için hazırlanan numuneler etüv kuru haline getirildikten sonra

numunelerin yan yüzeyleri ve buharlaşma neticesinde meydana gelecek su kaybını önlemek amacıyla da üst kısımları tamamen parafin ile kaplanarak sadece alt yüzeyinden su emmesi sağlanmıştır.

Deney süresince beton numunenin tabanından itibaren 5 mm su içerisinde kalması sağlanmıştır. Numuneler belirli zamanlarda (0, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360, 1440 dak.) tartılarak kapiler su emme katsayıları (3) no'lu denklem kullanılarak hesaplanmıştır [14, 15].

$$K = \frac{Q}{A \times \sqrt{t}} \quad (3)$$

denklemden yer alan;

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

Q = Numunenin absorbe ettiği su miktarı, (cm³);

A = Suya temas eden yüzeyin alanı, (cm²);

t = Zaman, (s) parametrelerini ifade etmektedir.

10 cm³ boyutunda hazırlanan küp numunelere TS EN 12390-3'e uygun olarak basınç dayanımı deneyi yapılmıştır [16]. ELE Autotest 3000 hidrolik yük kontrolü Beton Basınç Dayanım Presinde, 3 kN/sn yükleme hızı uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Yarmada çekme dayanımı tayini deneyi TS EN 12390-6'ya uygun olarak [17] yapılmıştır. Deney esnasında uygulanan yükleme hızı 0,47 KN/sn olacak şekilde sabit tutulmuştur.

Tablo 6. 100 gr suda değişik sıcaklıklardaki doymuş tuz çözeltileri

%	40	50	60	70	80	90	100
Potasyum nitrat (KNO₃)	63,9	85,5	110	138	169	202	246
Sodyum klorür (NaCl)	36,6	37	37,3	37,8	38,4	39	39,8
Sodyum nitrit (NaNO₂)	98,4	104,1			132,6		163,2
Sodyumdikromat (Na₂Cr₂O₇)		244,8		316,7	376,2		
Potasyumkarbonat (K₂CO₃)	116,9	121,2	126,8	133,1	139,8	147,5	155,7
Magnezyumklorit (MgCl₂)	57,5		61		66		73
Lityum klorit	323,3						

3. Bulgular ve Tartışma

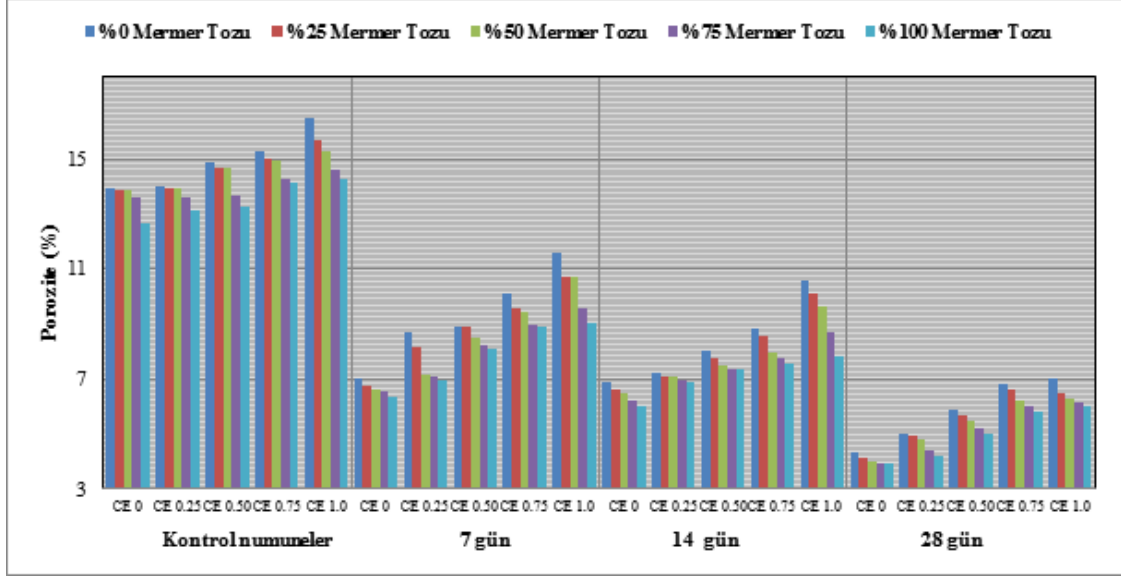
3.1 Porozite tayini deneyi sonuçları

Numuneler üzerinde yapılan porozite deneyi sonucu elde edilen veriler Şekil 5'te grafik olarak gösterilmiştir. Şekil 5 incelediğinde karbonatlaşma süresi arttıkça, numunelerin ortalama porozite değerlerinin kontrol grubuna

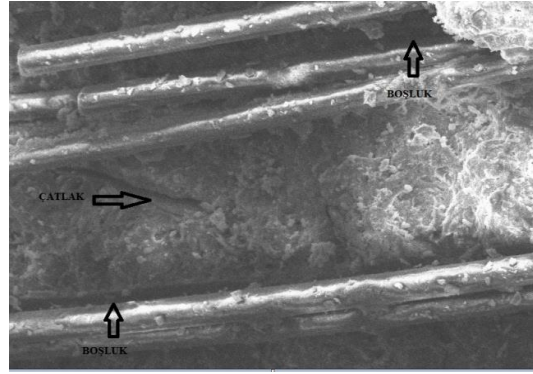
göre azaldığı görülmektedir. Karbonatlaşmanın ürünü olarak ortaya çıkan kalsiyum karbonat, kalsiyum hidroksitten daha fazla yer işgal ettiğinden dolayı karbonatlaşmış betonların yüzey porozitesi azalır [18,19]. Ayrıca cam lifin artmasıyla porozite değerleri artarken, mermer tozunun artmasıyla da porozite değerlerinde azalma meydana geldiği Şekil 5'ten açıkça görülmektedir. Beton numunelerindeki en

yüksek porozite değeri, cam lifin en yoğun olduğu ve mermer tozunun bulunmadığı kontrol CE1-MT0 serilerinde görülmüştür. Cam lif içeren serilerde meydana gelen porozite artışının nedeni beton ile cam lif arasında oluşan aderans yetersizliğidir. Ancak cam lif içeren beton

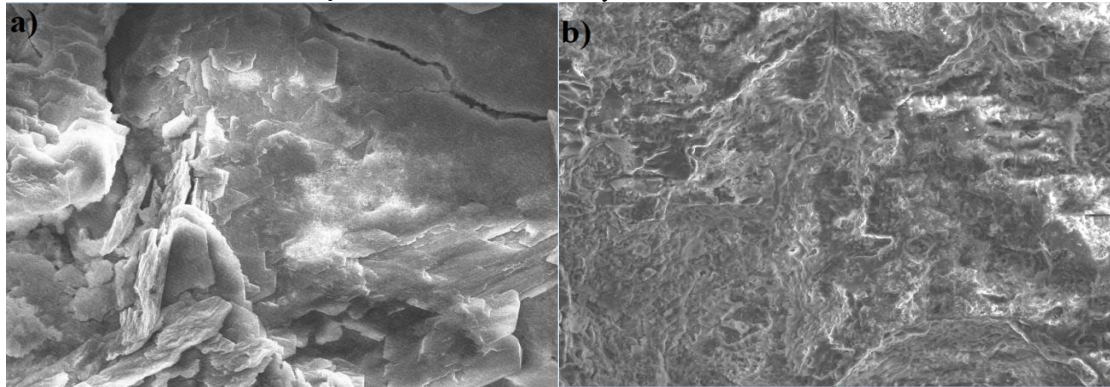
numunelere mermer tozu ilavesi ile birlikte daha kompakt bir yapı elde edildiğinden porozite değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. Şekil 6'daki taramalı elektron mikroskobu (TEM) görüntüsü bu sonuçları desteklemektedir.



Şekil 5. Beton numunelerin porozite değerleri



Şekil 6. Beton numunede yer alan cam lifler



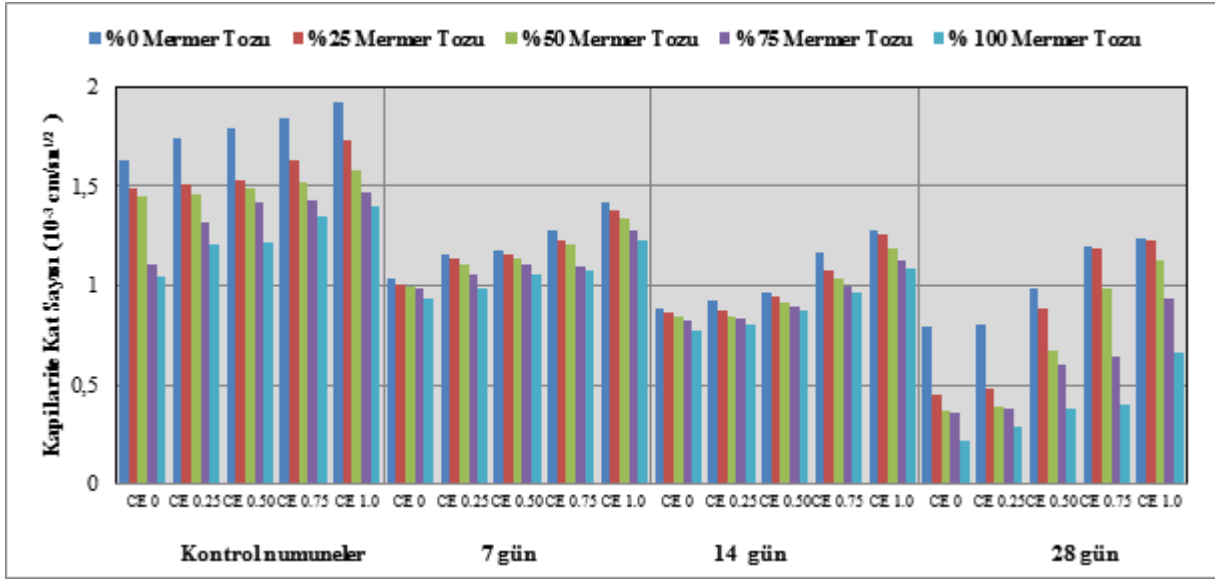
Şekil 7. a) Mermer tozu bulunmayan numune, b) Mermer tozu bulunan numune

Şekil 7’de görüldüğü üzere; mermer tozu tane boyutu, 250 µm’den küçük olduğu için boşlukları doldurarak geçirimsiz bir yapı oluşturmuştur. Bu nedenle mermer tozunun artışı boşluk miktarını azaltmış ve porozite değerlerini düşürmüştür. Şekil 5’teki grafikte en düşük porozite değerlerinin mermer tozunun en yoğun olduğu ve cam lifin bulunmadığı 28 gün karbonatlaşmaya maruz bırakılan CE0 – MT100 serilerinde görüldüğü belirlenmiştir. Literatürde

bu durumu destekleyen çeşitli çalışmalar mevcuttur [20, 21].

3.2 Kapiler su emme deney sonuçları

Beton numunelerden elde edilen kapilarite katsayılarının, değişen karbonatlaşma süreleri ve cam lif oranlarına göre değişim grafikleri Şekil 8’de verilmiştir.



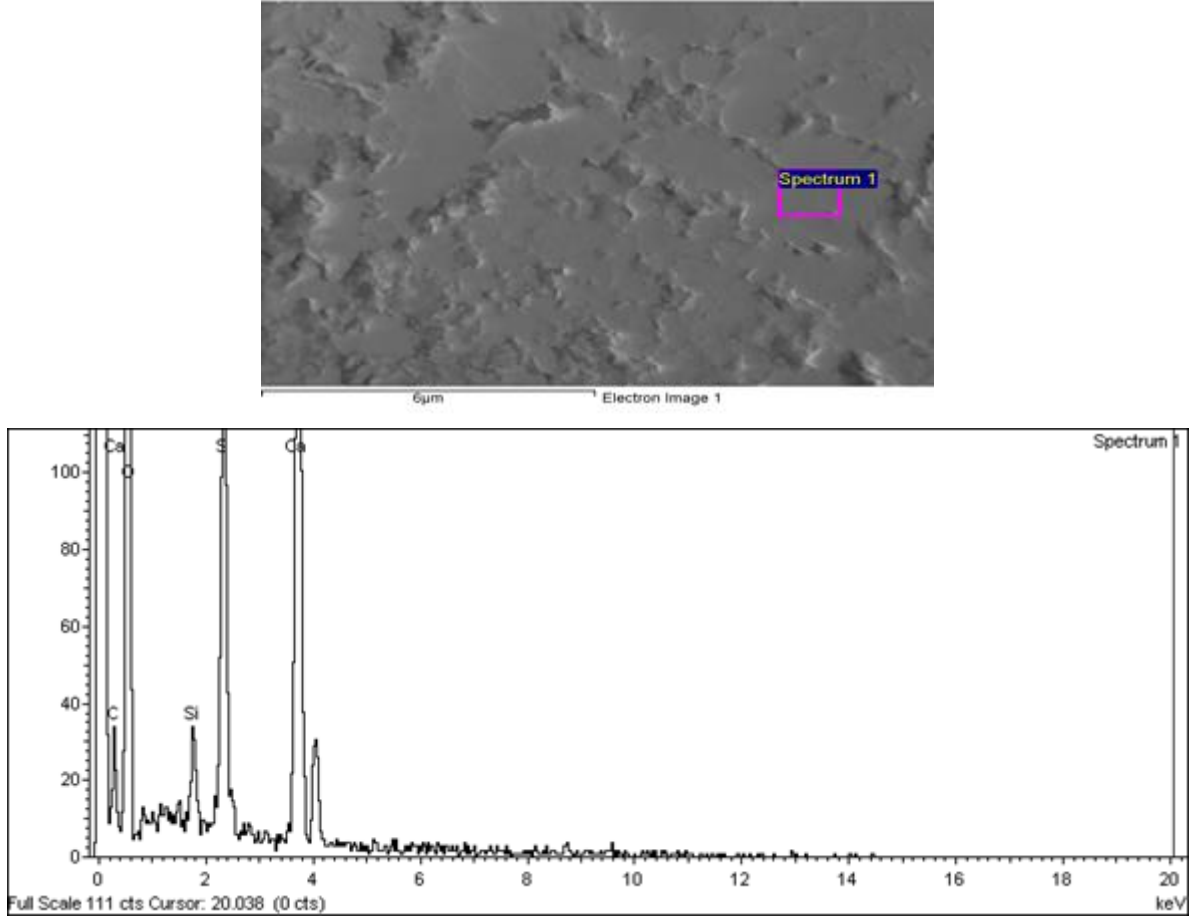
Şekil 8. Beton numunelerin kılcak su emme değerleri

Şekil 8 incelendiğinde, beton numunelerde ortalama kapilarite değerlerinin, karbonatlaşma süresinin artmasıyla kontrol numunelerine göre daha düşük seviyelerde kaldığı görülmüştür. Ayrıca beton numunelerinin kapilarite değerleri, mermer tozunun boşlukları doldurmasıyla azalırken, cam lifin harç ile yeterli aderansı sağlayamaması ve boşluk oluşturması sebebiyle de artış göstermiştir. En yüksek kapilarite değeri kontrol CE1–MT0 serisinden elde edilirken, en düşük kapilarite değeri ise cam lifin bulunmadığı ve %100 mermer tozunun bulunduğu 28 gün karbonatlaşmaya maruz kalmış CE0–MT100 serisinden elde edilmiştir.

Karbonatlaşma sonrası beton bünyesinde oluşan Kalsiyum karbonat (CaCO₃) betonun boşluklarına yerleşerek geçirgenliği azaltmakta, daha küçük kapiler bağlantılı gözenekler

arasındaki bağlantıları tıkamaktadır [22]. Karbonatlaşmaya maruz bırakılmış örneklerin kapilarite katsayılarının karbonatlaşmamış örneklere göre daha düşük çıkması beklenen bir durumdur. Karbonatlaşma sonucu meydana gelen CaCO₃ kristalleri, çimento hamurundaki boşlukların içine yerleştiği için nispeten daha geçirimsiz bir beton meydana gelmiştir [23]. Özkul ve Yıldırım (1996) yaptıkları çalışmada, kılcaklık ile karbonatlaşma arasında doğrusal bir ilişkinin olduğunu belirlemişlerdir [24].

Şekil 9’da CE0-MT100 kodlu numunenin karbonatlaşma reaksiyonu gerçekleşen bölgesinden bir kesit alınıp EDX (Enerji Dağılımlı X-Işınları Analizi) sonucuna bakılmıştır. Analizden de anlaşılacağı üzere, numunede yoğun miktarda CaCO₃ oluşumu gözlenmiştir.



Şekil 9. Karbonatlaşma reaksiyonu gerçekleşen bölgenin SEM görüntüsü ve EDX sonucu

3.3 Ultrases geçiş hızı deney sonuçları

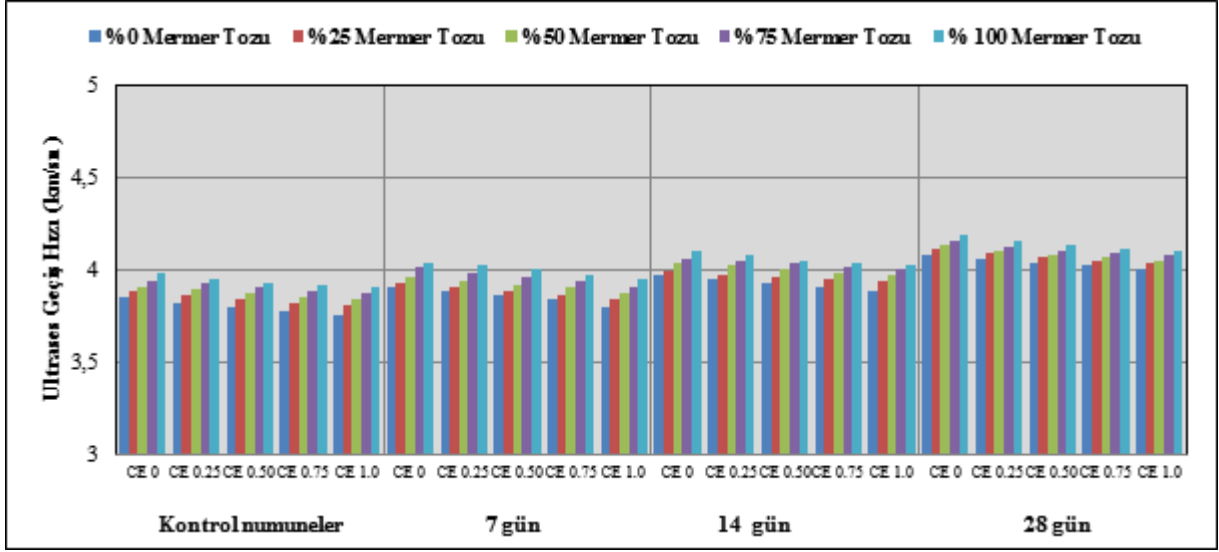
Beton numunelerin, karbonatlaşma süresine bağlı olarak değişen ultrases geçiş hızı değerleri Şekil 10'da verilmiştir.

Mermer tozu tane boyutunun küçük olması beton içindeki boşlukları doldurarak daha yoğun bir yapı oluşturmuştur. Şekil 10'daki grafik incelendiğinde, mermer tozunun artışı ultrases geçiş hızının da artmasını sağlamıştır. Cam lif oranındaki artışa bağlı olarak ise oluşan boşluklardan dolayı ultrases geçiş hızında azalma görülmüştür. Beton numunelerdeki en yüksek ultrases geçiş hızı değerini, cam lifin bulunmadığı mermer tozunun %100 olduğu 28 gün karbonatlaşmaya maruz kalmış CE0-MT100 serisi gösterirken, en düşük ultrases geçiş

değerini ise cam lifin en yoğun olduğu ve mermer tozunun bulunmadığı kontrol CE1-MT0 serisi göstermiştir.

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.

Kara (2013), yapmış olduğu çalışmasında mermer tozu içeren beton numunelerin karbonatlaşma sonrasında ultrases ses geçiş hızı değerlerinin arttığını belirtmiştir [25].



Şekil 10. Beton numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri

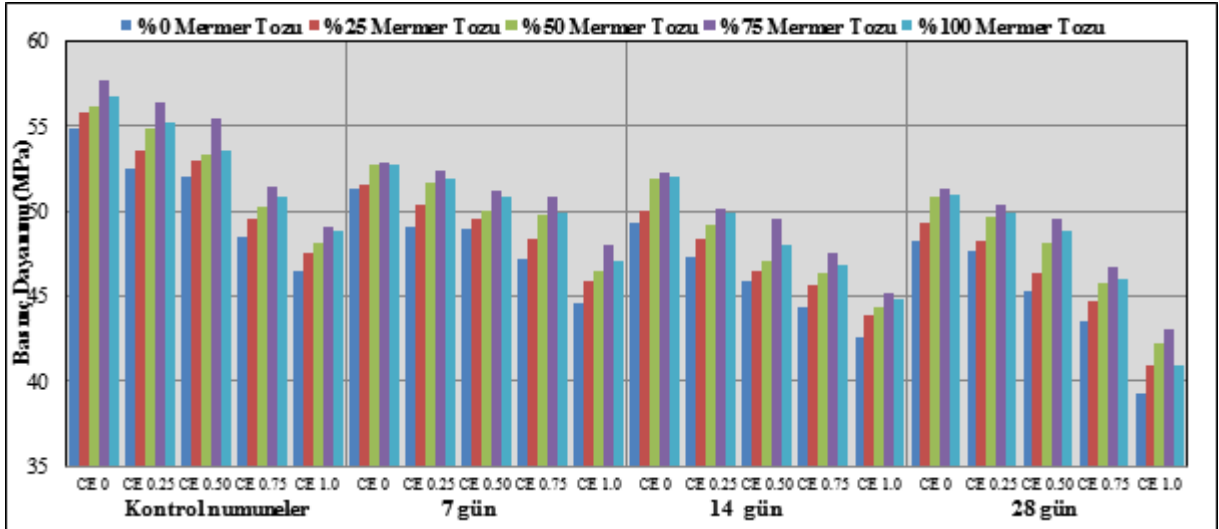
3.4 Basınç dayanımı deney sonuçları

Beton numunelerden elde edilen ortalama basınç dayanımı değerleri Şekil 11'de verilmiştir.

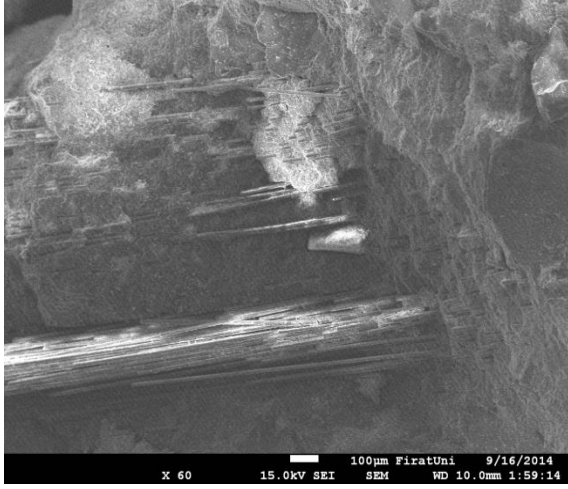
Şekil 11 incelendiğinde, basınç dayanımı %75 mermer tozu katkısına kadar artarken, %100 mermer tozu katkılı serilerdeki basınç dayanımı kontrol numunelerine göre düşüş göstermiştir. Beton harcındaki ince malzemenin artırılmasıyla iri malzeme miktarı azalmakta ve optimum değer in üzerine çıkması durumunda ise

beton dayanımı olumsuz yönde etkilenmektedir. Bu durumu destekleyen çeşitli çalışmalar literatürde mevcuttur [26, 27].

Cam lifli numunelerde basınç dayanımının artmadığı gözlemlenmiştir. Numunelerde cam lif oranının artmasıyla yer yer oluşan topaklanma ve cam lif ile beton arasında yeterli aderans oluşmamasından dolayı oluşan boşluklar betonun basınç dayanımını olumsuz yönde etkilemiştir. Bu durum Şekil 12'de yer alan elektron mikroskobu resminde açık bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 11. Beton numunelerin basınç dayanımı değerleri



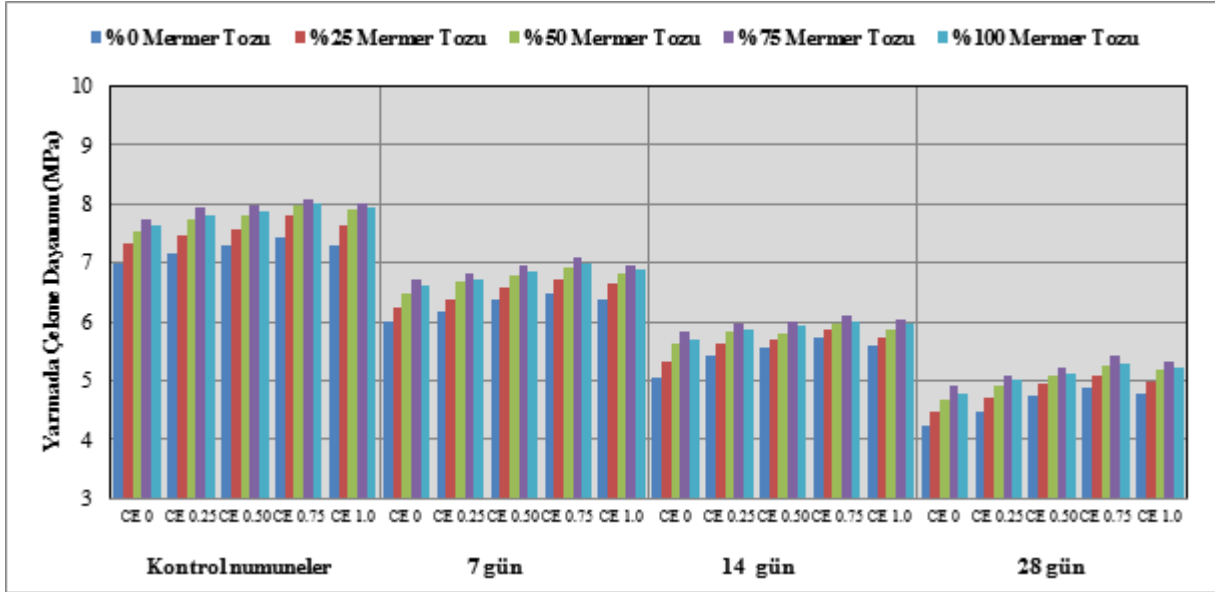
Şekil 12. Yer yer meydana gelen lif topaklanmaları

Özdal ve ark., (2013), çalışmalarında cam lifin, beton karışımına ilave oranına bağlı olarak işlenebilirlikte düşüş meydana getirdiğini belirtmişlerdir [28].

Karbonatlaşmadan sonra betonun yüzeye yakın bölgelerinin kimyasal kompozisyonu ve mikro yapısı değişmektedir. Bu değişiklikten dolayı karbonatlaşmış betonun ve normal betonun mukavemet, deformasyon ve düktilite kabiliyetlerinde farklılıklar olmaktadır. Beton dayanımının artmasıyla karbonatlaşma miktarı azalmaktadır [18,19]. Ustabaş ve Erdoğan (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 [29]. Çalışma neticesinde elde edilen veriler literatür ile uyum içerisindedir.

3.5 Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları

Beton numunelerin karbonatlaşma süresine bağlı olarak değişen yarmada çekme dayanımı değerleri Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. Beton numunelerin yarmada çekme dayanımı değerleri

Şekil 13 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 lif oranının artması yarmada çekme dayanımında

artış göstermiştir. En yüksek yarmada çekme dayanımı değerinin kontrol CE0,75-MT75 kodlu numunenin aldığı görülmektedir. Bu durum liflerin çatlak ilerleyişini yavaşlatmaları ve engellemelerinden kaynaklanmaktadır. Yaprak ve ark., (2004), çalışmalarında cam liflerin betonda yarmada çekme dayanımına olumlu yönde etkide bulunduğunu saptamışlardır [30].

4. Sonuçlar

Atık mermer tozu ve cam lif takviyeli betonların karbonatlaşma direncini belirlemek amacıyla yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Karbonatlaşma süresi arttıkça beton numunelerinin porozite değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Karbonatlaşma belirli çaptaki boşluklarda anlamlı oranlarda daralmalar meydana getirerek betonda poroziteyi azaltarak olumlu etki göstermiştir. Cam lifin beton harcı ile yeterli aderansı sağlayamaması boşluk miktarını arttırdığından porozite değerlerini arttırırken, mermer tozunun artışı porozite değerlerinin azalmasına neden olmuştur.
- Karbonatlaşma süresi arttıkça beton numunelerinin kapilarite değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Karbonatlaşma sonucu meydana gelen $CaCO_3$ kristalleri, harç içerisindeki boşluklara yerleşerek nispeten daha geçirimsiz bir beton meydana getirmiştir.
- Karbonatlaşma süresi arttıkça beton numunelerinin ultrases geçiş hızı değerlerinde artış görülmüştür. Numuneler kendi içinde incelendiğinde mermer tozu numunelerin boşluk miktarını azaltmış ve daha yoğun bir yapı oluşturarak numunelerin ultrases geçiş hızını arttırmıştır. Cam lif miktarındaki artışı ise harcın boşluk miktarını arttırmış ve ultrases geçiş hızını azaltmıştır.
- Karbonatlaşma süresi arttıkça beton numunelerinin basınç dayanımlarında azalma görülmüştür. Numuneler kendi içinde değerlendirildiğinde cam lif artışına bağlı

olarak basınç dayanımlarındaki azalma artmıştır. Cam lifin harç ile yeterli aderansı sağlayamaması boşluk miktarını arttırmış çatlak oluşumuna zemin hazırlamıştır. Mermer tozunun artması ise boşlukları doldurmuş ve numunenin dayanımını arttırmıştır. Mermer tozu ilavesinin cam lifin meydana getirdiği olumsuz etkileri iyileştirdiği gözlemlenmiştir. %75 oranında mermer tozu ilavesine kadar dayanım artmış, oran %100'e çıkınca basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir.

- Karbonatlaşma süresi arttıkça beton numunelerinin yarmada çekme dayanımlarında basınç dayanımına paralel olarak azalma görülmüştür. Beton karışımına katılan lif ve mermer tozu yarmada çekme dayanımını arttırmıştır. Liflerin beton içerisinde donatı görevi görmesi numunenin tokluğunu arttırmıştır. Serilerde $0,75 \text{ kg/m}^3$ cam lif oranlarına kadar artış gösterirken, daha yüksek miktarlardaki lif takviyesi topaklanmaya neden olarak yarmada çekme dayanımlarında azalma meydana getirmiştir.

5. Kaynaklar

1. Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, A.N., Yerlikaya, M., (2004), Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler, Beton 2004 Kongresi Bildiriler, İstanbul.
2. Sahmaran, M., Yurtseven, A., Yaman, I.O., (2005), Workability of Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete, Building and Environment, **40**, 1672- 1677.
3. Şimşek O., (2003), Yapı Malzemesi I, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., Sayfa 146.
4. Chawla K.K., (1998). Fibrous Materials, Cambridge University Pres, Cambridge.
5. Newman, J., Owens, P., 2003, "Properties of Lightweight Concrete, Advanced Concrete Technology", 3-29.
6. Baharavar S., R., (2012), Karbonatlaşmanın Çelik Lifli ve Uçucu Küllü Betonlarda Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Yapı Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara.
7. TS 802, (2002), Beton Karışım Hesap Esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
8. ELE International, 'Civil and Environmental Engineering Test Equipment', 9th edition Catalogue, England.
9. Perry, J. H., (1963), Chemical Engineers Handbook, Kogakusha Company LTD, Tokyo.

10. TS EN 772-4, (2000), Tabii Taş Kagir Birimlerin Toplam ve Görünen Porozitesi ile Boşluksuz ve Boşluklu Birim Hacim Kütlelerinin Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
11. The Concrete Society, (1987), “Permeability Testing of Site Concrete – A Review of Methods and Experience”, Technical Report No. 31.
12. 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.
13. ASTM C 597-02, American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.
14. Goldman, A., and Bentur, A. (1993), The Influence of Microfiller on Enhancement of Concrete Strength, Cement and Concrete Research, **23**: 962-972.
15. Atiş, C.D., and Bilim, C. (2007), Wet and Dry Cured Compressive Strength of Concrete Containing Ground Granulated Blast-Furnace Slag, Building and Environment, **42(8)**: 3060-3065.
16. TS EN 12390-3, (2010), Sertleşmiş Beton Deneyleri-Deney Numunelerinde Basınç Dayanımı Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
17. TS EN 12390-6, (2010), Sertleşmiş Beton Deneyleri-Deney Numunelerinde Yarmada Çekme Dayanımı Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
18. 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.
19. Xiao J., Li J., Zhu B., Fan, Z., (2001), Experimental Study on Strength and Ductility of Carbonated Concrete Elements, Construction and Building Materials, **16**, 187-192.
20. 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.
21. Gülan L., (2015), Atık Mermer Tozu ve Cam Elyaf Katkısının Betondaki Karbonatlaşmaya Etkisi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
22. Massazza F., (2005), “Betonun Dayanımı ve Yapıların Hizmet Ömrü: İki, Çözülebilir Sorun”, Hazır Beton Dergisi, Aralık.
23. Erdoğan T.Y., (2003), “Beton” Baskı Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnş Fak., Metu Press., Ankara, 550-580.
24. Özkul M. H., Yıldırım H., (1996), 4. Ulusal Beton Kongresi, Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar, ‘Kimyasal Katkılarının Uzun Süreli Davranışları’, İstanbul Teknik Üniversitesi.
25. Kara C., (2013), ‘Mermer Tozu Atığının Betonun Karbonatlaşmasına Etkisini Araştırılması’, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
26. Erdoğan N., (2005), Çimento Harçlarının Niteliklerinin İyileştirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
27. Aydın A., (2013), İnce Agregasında Farklı Oranlarda Mermer Tozu Kullanılmış Betonların Dayanım ve Dayanıklılık Özellikleri, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
28. Özdal V., Bilim E., Subaşı S., (2013), Cam Elyaf Takviyeli Betonlarda Lif Yoğunluğunun İncelenmesi, II. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, Ege Üniversitesi, İzmir.
29. Ustabaş İ., Erdoğan Ş., (2013), Rize İlindeki Bazı Kamu Bina Betonlarında Karbonatlaşma Derinliği ve Beton Kalitesi.
30. Yaprak, H., Şimşek O., ÖNEŞ A., (2004), Cam ve Çelik Liflerin Bazı Beton Özelliklerine Etkisi, Politeknik Dergisi, **4**, 353-358.