

**MERMER TOZU VE CAM ELYAF KATKILI
ÇİMENTO HARÇLARININ SÜLFAT
DAYANIKLILIĞININ ARAŞTIRILMASI**

Birsu ALİŞER

**Yüksek Lisans Tezi
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Servet YILDIZ
EYLÜL-2013**

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MERMER TOZU VE CAM ELYAF KATKILI ÇİMENTO HARÇLARININ SÜLFAT
DAYANIKLILIĞININ ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Birsu ALİŞER

(091125110)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06.09.2013

Tezin Savunulduğu Tarih : 30.09.2013

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Servet YILDIZ (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Zülfü Çınar ULUCAN (F.Ü)

Doç. Dr. Oğuzhan KELEŞTEMUR (F.Ü)



EYLÜL-2013

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince beni destekleyen, bilgi ve birikimlerinden yararlandığım danışman hocam Sayın Doç. Dr. Servet YILDIZ'a, bana ayırdığı zaman ve verdiği tüm emekleri için sonsuz teşekkür ederim. Tecrübeleri ile katkıda bulunan deneysel çalışmalarına hoşgörüsüyle yardım eden değerli hocam Sayın Doç. Dr. Oğuzhan KELEŞTEMUR'a Sayın Doç. Dr. Bahar DEMİREL'e, Sayın Yrd.Doç.Dr. Erdinç ARICI'ya ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU'na Öğr. Gör. Mustafa Ethem Kizirgil'e çalışmam süresince bilgilerinden yararlandığım bölüm hocalarıma, laboratuarda birlikte çalıştığım arkadaşım Sayın Bihter GÖKÇER'e ve destek veren tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı TEF 11.02 nolu proje ile destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Sadece bu çalışmam boyunca değil, tüm yaşamım boyunca desteği ile yanımda olan, beni bugünlere getiren aileme ve hep yanımda olan desteğini esirgemeyen her zaman ve her konuda yanımda olan kız kardeşim Beyhan Alişer'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Birsu ALİŞER

ELAZIĞ-2013

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
SEMBOLLER LİSTESİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Mermer Tozu ve Cam Elyaf Katkılı Beton	3
1.1.1. Mermer Tozu	3
1.1.2. Mermerin Tarihsel Gelişimi	3
1.1.3. Mermer Tozunun Oluşumu, Üretimi ve Kullanımı	4
1.1.4. Mermer Oluşum Yerlerine Göre Mermer Atıklarının Çeşitleri	5
1.1.4.1. Ocaklarda Oluşan Atıklar	5
1.1.4.2. Fabrikalarda Oluşan Atıklar	5
1.1.5. Mermer Atıklarının Değerlendirme Alanları	5
1.2. Lifli Beton	6
1.2.1. Lifli Betonun Tarihsel Gelişimi	7
1.2.2. Lifli Betonun Kullanım Alanları	7
1.2.3. Betonda Kullanılan Lif Çeşitleri	7
1.2.3.1. Çelik Lifler	7
1.2.3.2. Cam Elyaf	8
1.2.3.3. Cam Elyafın Üretim Tekniği	9
1.2.3.4. Cam Elyafların Genel Özellikleri	10
1.2.3.5. Cam Elyafı Takviye Malzemeleri ve Çeşitleri	11
1.2.3.5.1. Fitil	11
1.2.3.5.2. Cam elyafı iplik (Tekstil ipliği - Yarn)	12
1.2.3.5.3. Kumaşlar (Fabric-Cloth)	12
1.2.3.5.3.1. Dokunmuş Fitiller (Woven Roving)	12
1.2.3.5.3.2. Dokunmuş Cam Kumaş (Woven Glass Cloth) :	13
1.2.3.5.3.3. Dikilmiş Kumaşlar (Stitch Mat)	13
1.2.3.5.3.4. Tek yönlü Fitil kumaşlar (Unidirectional Roving Cloth) :	14
1.2.3.5.3.5. Devamlı demetli keçe (Continuous Mat) :	14
1.2.3.5.3.6. Kırpılmış Demetten Keçeler (Chopped Strand Mat) :	15
1.2.3.5.4. Kırpılmış demetler	16
1.2.3.5.5. Öğütülmüş Lifler	16

1.2.3.6.	Cam Elyafı Üretimindeki Başlıca Cam Cinsleri	17
1.2.3.7.	Polipropilen Lifler	19
1.2.3.7.1.	Polipropilen Liflerin Kullanım Alanları	19
1.3.	Sülfat Etkisi	19
1.3.1.	Magnezyum Sülfat Etki Mekanizması	21
1.3.2.	Sodyum Sülfatın Etki Mekanizması	22
1.4.	Literatür Araştırması	23
1.5.	Tezin Literatürdeki Yeri	26
2.	MATERYAL VE METOT	27
2.1.	Kullanılan Malzemeler	27
2.1.1.	Çimento	27
2.1.2.	Mermer Tozu	27
2.1.3.	Agrega	29
2.1.4.	Karışım Suyu	29
2.1.5.	Kimyasal Katkı	30
2.2.	Cam Elyaf	30
2.2.1.	Sodyum Sülfat	30
2.2.2.	Karışım Oranları	31
2.2.3.	Numunelerin Hazırlanışı	32
2.2.4.	Sertleşmiş Beton Deneyleri	35
2.2.4.1.	Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi	35
2.2.4.2.	Basınç Dayanımı Deneyi	35
2.2.4.3.	Kılcal (Kapiler) Su Emme Deneyi	36
2.2.4.4.	Porozite, Birim Hacim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deneyi	37
2.3.1.	Islanma-Kuruma Deneyi	38
2.3.2.	Sülfat Etkisi (Sülfat Hücumu) Deneyi	39
2.3.3.	Boy Ölçümü Deneyi	39
2.4.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi	39
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	41
3.1.	Basınç Dayanımı Deneyi	41
3.2.	Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi Sonuçları	49
3.3.	Kılcal (Kapiler) Su Emme Deneyi	54
3.4.	Görünür Porozite Deneyi	59
3.5.	Birim Hacim Ağırlık ve Özgül Ağırlık	63
3.6.	Su Numuneleri Boy Ölçümü Deneyi Bulgularının İncelenmesi	65
3.7.	Sülfatta Islanma-Kuruma Çevrimi Deneyi Boy Ölçümü Deneyi Bulgularının İncelenmesi	68

3.8.	Sürekli Sülfat Deneyi Boy Ölçümü Deneyi Bulgularının İncelenmesi	72
4.	SONUÇ ve ÖNERİLER.....	75
	KAYNAKLAR.....	77
	ÖZGEÇMİŞ	80

ÖZET

Bu tez çalışmasında, cam elyaf ve mermer tozu kullanılarak elde edilen harçların sülfat dayanıklılığı incelenmiştir.

Harç numuneleri ağırlıkça 0.25, 0.50, 0.75, 1 kg/m³ oranlarında cam elyaf ile filler malzeme yerine hacimce %10, %20, %30, %40, %50 oranlarında mermer tozu ilave edilerek hazırlanmıştır. Numunelere deneyler öncesi ve sonrası, birim hacim ağırlık, porozite, kılcal su emme, eğilmede çekme dayanımı, eğilme sonrası basınç dayanımı ve boy ölçümü deneyleri uygulanmıştır. Harç numunelerine 150 gün suda, 150 gün sürekli %5'lik Na₂SO₄ çözeltisinde ve 150 gün sülfatta ıslanma-kuruma çevrimi olmak üzere üç farklı kür uygulanmıştır. ASTM C 1012-87'de belirtilen esaslar çerçevesinde, her kürdeki harç çubuklarının boy ölçümleri alınarak numuneler üzerindeki kür etkisi incelenmiştir. Ayrıca numuneler üzerinde SEM ve EDX çalışmaları yapılmıştır.

Yapılan deneysel çalışma sonucunda, harç numunelerine ilave edilen cam elyaf oranının artışıyla numunelerin birim hacim ağırlık, porozite, kılcal su emme ve eğilmede çekme dayanımı değerlerinde artma, basınç dayanımı değerlerinde ise azalma olduğu belirlenmiştir. Mermer tozunun artışı ile lif takviyeli harç numunelerinin birim hacim ağırlık, eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı değerlerinde artma, porozite ve kılcal su emme değerlerinde ise azalmalar olduğu saptanmıştır.

Boy ölçümü deneyi sonrası ölçülen değerlere göre sürekli sülfat deneyi sonrası en fazla genleşen harç serisi; %20 mermer tozu ikameli 0,25 kg/m³ elyaf katkılı numunedir. Islanma- kuruma deneyi sonrası en çok genleşen numune ise %40 mermer tozu ikameli 1 kg/m³ elyaf katkılı numunedir. Su kürü uygulanan serilerden en fazla genleşme gözlenen numune, %30 mermer tozu ikameli 0,75 kg/m³ elyaf katkılı numunedir.

150 gün sürekli suda, 150 gün sürekli %5'lik Na₂SO₄ çözeltisinde ve 150 gün sülfatta ıslanma-kuruma çevrimine maruz bırakılan harç numunelerinin deneysel sonuçları kıyaslanmıştır. Sülfatta ıslanma-kuruma çevrimine bırakılan numunelerde en fazla zararlı etki görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Harç, Atık Mermer Tozu, Cam Lif, Sülfat Etkisi, SEM ve EDX analizi

SUMMARY

Investigation of The Sulfate Resistance of Cement Mortar With Marble Powder And Fiber Glass

In this study, obtained by fiber glass and marble dust, sulphate resistant mortars were investigated.

Mortar specimens by weight 0.25, 0.50, 0.75, 1 kg/m³ and with the filler material instead of ratios by volume of glass fiber, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% were prepared by adding marble dust ratio. Samples before and after the experiments, unit weight, porosity, capillary water absorption, flexural strength, flexural tests were carried out after the measurement of compressive strength and size. 150 days in the water samples of mortar, 150 days and 150 days of continuous sulfate 5% Na₂SO₄ solution, wetting-drying cycles were applied to three different treatments. ASTM C 1012-87 in accordance with the principles of each kürdeki taking height measurements on samples cured mortar bars were investigated. Also SEM and EDX studies were carried out on the samples.

As a result of the experimental study, an increase in the rate of glass fiber added to the mortar samples of samples, bulk density, porosity, capillary water absorption and flexural strength values increase, the reduction in compressive strength values were determined. Marble powder samples with the increase of carbon fiber reinforced mortar unit weight, an increase in flexural strength and compressive strength values, the values of porosity and capillary water absorption was found to be decreased.

Length measurement of the values measured by the continuous sulfate test after test after mortar expanding the range of more than 20% of 0.25 kg/m³ fiber reinforced specimen of marble powder is substituted. After wetting-drying test sample of 40% of the high modulus fiber reinforced specimen of marble powder substituted 1 kg/m³. The maximum expansion observed in the sample series are applied to water cure, 30% fiber reinforced specimen of marble powder substituted 0.75 kg/m³.

150 days of continuous water, 5% Na₂SO₄ solution of 150 days and 150 days of continuous sulfate mortar samples exposed to wetting-drying cycles compared with the experimental results. More harmful to the wetting-drying cycles sulfate effect was observed in samples that are left.

Key Words: Mortar, Waste marble powder, Glass Fiber, Sulfate Attack, SEM and EDX Analysis

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Lif çeşitleri	8
Şekil 1.2	Cam Elyafın Üretim Tekniği.....	10
Şekil 1.3.	Bileşik ve direk sarma fitil	12
Şekil 1.4.	Dokunmuş fitiller.....	13
Şekil 1.5.	Dokunmuş cam kumaş	13
Şekil 1.6.	Dikilmiş kumaşlar.....	14
Şekil 1.7.	Tek yönlü fitil kumaş çeşitleri.....	14
Şekil 1.8.	Devamlı demetli keçe	15
Şekil 1.9.	Kırpılmış demetten keçeler	15
Şekil 1.10.	Kırpılmış Demetler	16
Şekil 1.11.	Öğütülmüş Lifler	16
Şekil 2.1.	Kullanılan mermer tozu ve ince agreganın granülometri eğrisi	28
Şekil 2.2.	Kullanılan agreganın granülometri eğrisi	29
Şekil 2.3.	Deneylerde kullanılan sodyum sülfat	31
Şekil 2.4.	Slump deneyi.....	33
Şekil 2.5.	Harç karıştırma mikseri.....	34
Şekil 2.6.	Eğilmede çekme dayanımı	35
Şekil 2.7.	Eğilme sonrası basınç deneyinin yapılması	36
Şekil 2.8.	Kapiler su emme deney düzeneği.....	37
Şekil 2.9.	Islanma-kuruma çevriminde kullanılan etüv.....	38
Şekil 2.10.	Boy değişimi ölçümünde kullanılan düzenek ve numuneler	39
Şekil 2.11.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analiz ünitesi.....	40
Şekil 3.1.	150 günlük su kürü ve 150 günlük sürekli sülfat kürü sonrası basınç dayanımı.....	42
Şekil 3.2.	Elyafsız %50 mermer tozu içeren harç numunesine ait SEM görüntüsü.....	43
Şekil 3.3.	Cam elyafın olmadığı %50 mermer tozu içeren numunede ıslanma-kuruma çevrimi sonrası SEM ve EDX sonucu.....	44
Şekil 3.4.	CE1-MT50 kodlu seri, 1 kg/m ³ cam lif ve %50 mermer tozu içeren harç numunesine ait SEM görüntüsü.....	45
Şekil 3.5.	150 günlük su kürü ve 150 günlük sülfatta ıslanma-kuruma çevrimi sonrası basınç dayanımı	46
Şekil 3.6.	150 günlük su kürü, 150 günlük sürekli sülfat kürü ve 150 günlük ıslanma-kuruma çevrimi sonrası basınç dayanımı.....	47
Şekil 3.7.	Cam elyafın 1 kg/m ³ mermer tozunun olmadığı numuneye ait SEM görüntüsü.....	48

Şekil 3.8. Elyafsız ve mermer tozu olmayan CE0-MT0 olduğu numuneye ait SEM görüntüsü.....	48
Şekil 3.9. Su ve sürekli sülfat kürü numunelerinin eğilmede çekme dayanımı.....	50
Şekil 3.10. Mermer tozlarının boşlukları doldurması	52
Şekil 3.11. Su ve sülfatta ıslanma-kuruma çevrimi numunelerinin eğilmede çekme dayanımı.....	52
Şekil 3.12. Farklı kür koşullarındaki numunelerinin eğilmede çekme dayanımı	53
Şekil 3.14. Sülfatta ıslanma-kuruma sonrası numunelerin görünümü	56
Şekil 3.15. Islanma-Kuruma çevrimi sonrası CE1-MT0 nolu numune.....	56
Şekil 3.16. Farklı kür koşullarındaki numunelerinin kapilarite katsayısı.....	57
Şekil 3.17. Su ve sürekli sülfat deney numunelerinin kapilarite katsayısı	58
Şekil 3.18. Su ve sülfatta ıslanma-kuruma deney numunelerinin kapilarite katsayısı.....	58
Şekil 3.19. Farklı kür koşullarındaki numunelerinin görünür porozite deney sonuçları.....	60
Şekil 3.20. Lif ve mermer tozu katkılı numunelerde porozite oluşumu SEM görüntüsü.....	61
Şekil 3.21. Numune içerisindeki çatlak oluşumu SEM görüntüsü.....	62
Şekil 3.22. Su kürü ve sürekli sülfat kürünün görünür porozite değerlerinin karşılaştırılması.....	62
Şekil 3.23. Su kürü ve sülfatta ıslanma-kuruma çevrimi numunelerinin görünür porozite değerlerinin karşılaştırılması	63
Şekil 3.24. Su ve sülfat kürü birim hacim ağırlık deneylerinin karşılaştırılması.....	64
Şekil 3.25. Su ve sülfatta ıslanma-kuruma çevrimi kürü birim hacim ağırlık deneylerinin karşılaştırılması	65
Şekil 3.26. Numunelerin birim hacim ağırlık deneylerinin karşılaştırılması.....	65
Şekil 3.27. Su kürü sonrası numunelerin boy ölçümü değişimi	67
Şekil 3.28. Cam elyafın olmadığı mermer tozunun %50 olduğu ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan numunenin SEM görüntüsü.....	69
Şekil 3.29. Islanma-kuruma çevrimi sonrası zarar gören numuneler.....	70
Şekil 3.30. Islanma-kuruma çevrimi sonrası genişleyen numune.....	70
Şekil 3.31. Sülfatta ıslanma-kuruma çevrimi deneyi sonrası numunelerin boy ölçümü değişimi	71
Şekil 3.32. 1 kg/m ³ elyaf ve %50 mermer tozu içeren sürekli sülfat etkisine maruz kalan numunenin SEM görüntüsü	73
Şekil 3.33. Sürekli sülfat numuneleri boy ölçümü deneyi.....	74

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Cam tipleri ve özellikleri.....	17
Tablo 1.2. Cam elyafı cinslerinin kompozisyonu (%).....	18
Tablo 1.3. Cam elyafların mekanik özellikleri ve bileşimleri	18
Tablo 2.1. Kullanılan çimentonun özellikleri	27
Tablo 2.2. Kullanılan mermer tozunun fiziksel ve mekanik özellikleri.....	28
Tablo 2.3. Mermer tozunun kimyasal özellikleri (%)	28
Tablo 2.4. Fuller eğrisine göre kumun elek analizi.....	29
Tablo 2.5. Kimyasal katkıya ilişkin teknik bilgiler	30
Tablo 2.6. Cam Elyaf'a ait özellikler	30
Tablo 2.7. Deney için hazırlanan numunelere ait karışım oranları (kg/m ³)	32
Tablo 3.1. Eğilmede çekme deneyi sonrası su, sülfat, ıslanma-kuruma numunelerinin basınç dayanımı değerleri	41
Tablo 3.2. Eğilmede çekme dayanımı numunelerinin deney sonrası değerleri	49
Tablo 3.3. Numunelerin kapiler su emme deneyi sonrası değerleri.....	55
Tablo 3.4. Numunelerin görünür porozite değerleri.....	59
Tablo 3.5. Birim hacim ağırlık deney sonuçları.....	64
Tablo 3.6. 150 günlük su deneyi boy ölçümü sonuçları.....	66
Tablo 3.7. Islanma kuruma deneyi sonrası boy ölçümü sonuçları.....	68
Tablo 3.8. 150 günlük sürekli sülfat deneyi boy ölçümü sonuçları	72

SEMBOLLER LİSTESİ

σ	: Beton deney numunesi basınç dayanımı (N/mm ²)
A	: Kesit alanı (mm ²)
A	: Suya temas eden yüzeyin alanı
ASTM	: American Society for Testing Materials
b	: Dörtgen kesitli numunenin eni (mm)
CSH	: Kalsiyum Silikat Hidrat
d	: Dörtgen kesitli numunenin yüksekliği (mm)
H	: Numunenin hacmi
k	: Kapiler su emme katsayısı
L	: Mesnetler arası uzaklık (mm)
P	: Kırılma yükü (N)
P	: Uygulanan yük (N)
Q	: Numunenin absorbe ettiği su miktarı
SEM	: Scanning Electron Microscope
t	: Zaman
TS	: Türk Standartları
W₀	: Etüv kurusu ağırlık
W₁	: Su altındaki ağırlık
W_{dyk}	: Suya doymun kuru yüzey ağırlığı
ϵ	: Harç numunelerinin boy değişimi değerleri
σ_e	: Eğilme dayanımı,

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun, yeryüzündeki varlığını sürdürebilmesi için beslenmeden hemen sonra karşılamak zorunda olduğu barınma ve ortak yaşam alanları oluşturma gereksinimi, uygarlık tarihindeki önemli gelişmelerin de itici gücü olmuştur. İlkel çağların mağaralarında başlayıp, günümüzün devasa gökdelenlerine kadar gelen bu süreçte büyük ilerlemeler kaydedilmesini sağlayan iki temel buluştan söz etmek mümkündür: Çimento ve Beton [1].

Silisli bir kumla bağlayıcı madde olan çimento veya sönmüş kirecin karıştırılması ve buna su ilavesiyle elde edilen karışıma harç denir. Bu karışım önce plastik özelliğe sahip olup, sonra sertleşir. Harcın esas görevi, yapıya gelen yüklerin yapı parçalarında birinden diğerine geçerken düzgün yayılmasını sağlamaktır. Ayrıca hava şartlarına dayanıklı bir bağlayıcı olan harç, bütün yapının beraber çalışmasında yardımcı olur. Harcın yapılmasında, plastik özelliğinin yerleştirme yönünde kâfi derecede olmasına dikkat edilmelidir [2].

Lifli beton uygulamaları, esas itibariyle betonda çatlakların ilerlemesini ve yayılmasını önlemek, sünekliği ve tokluğu artırmak maksadıyla yapılır. Lifli betonlar, genel olarak çatlak ilerlemesinin istenmediği, enerji yutma kapasitesinin yüksek olması gereken yerlerde kullanılır [3].

Lifli betonlarda, bütün lif çeşitlerinde sağlanması gereken en önemli özellik liflerin beton içerisinde homojen olarak dağılması ve bu dağılımın beton karıştırıldıktan sonra da bozulmamasıdır. Üniform bir şekilde dağılan lifler, beton içerisinde oluşan çatlakları önlemekte ve çatlakların beton içerisinde ilerlemesini yavaşlatarak betonu daha dayanıklı hale getirdiği bilinmektedir. Bu özelliğinden dolayı lifli betonun özellikle çekme ve eğilme dayanımını artıran faktörler darbe etkisine karşı dayanımını da artırır [4].

Doğal kaynakların daha az tüketilmesi, çevre kirliliğinin daha aza indirgenmesi ve enerji maliyetlerinin azaltılması amacıyla endüstriyel atık kullanımı gün geçtikçe daha fazla ilgi çeken bir konu olmaktadır. Atıklar çevre sorununun yanı sıra birçok durumda depolanma zorunluluğundan dolayı ilave maliyet getirmektedir. Bu nedenle, birçok atık içeriğine bakılmaksızın ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır. Ancak, atık malzemelerin de bir değeri vardır ve atıklar katma değeri yüksek ürünlerin elde edilmesinde kullanılabilir [5].

Mermerin gerek üretimi sürecinde gerekse işleme tesislerinde işlenmesi sürecinde açığa çıkan boyutlu parça mermer atıkları, belirli bir boyuta kırıldıktan sonra farklı kullanım alanları bulabilmektedir. Bunlar beton ve asfalt karışımlarda agrega, yol zemini ve baraj inşaatlarında dolgu malzemesi, suni mermer plağı, karosiman ve bir mermer süsleme sanatı olarak antik taş yapımında kullanılmasıdır [6].

Mermer fabrikalarından üretim atığı olarak ortaya çıkan tozların kullanılabilirliği endüstriyel açıdan kazanç olduğu kadar çevresel açıdan da bir sorunun giderilmesi anlamını taşımaktadır. Bu nedenle mermer toz atıklarının değerlendirilmesi konusunda bulunabilecek alternatifler, mermer fabrika işletmecilerine ve ülke ekonomisine kaynak sağlayacağı gibi bu fabrikaların çevre kirleticisi özelliğini de tamamen ortadan kaldıracaktır [7].

Betona zarar veren aşındırıcı ortamlar sulu çözeltiler olup, bunların başlıcaları, sodyum, potasyum, kalsiyum, magnezyum ve amonyum gibi katyonların, sülfat, sülfat, klorür halindeki tuzlarını, asitleri ve bazı organik bileşenleri içeren yer altı suları, yüzey suları, deniz suları, atık sular v.b.'dir. Bu ortamlarda bulunan çeşitli iyonlar betonun bileşenleri ile reaksiyona girerler. Bu iyonların en önemlileri sodyum sülfat ve magnezyum sülfat halinde bulunan sülfat iyonlarıdır. Bu iyonların sertleşmiş betonda yaptıkları reaksiyon sonucu oluşan ürünlerin betonun hacimsel stabilitesini bozucu yönde etki yaptığını belirten pek çok araştırma vardır [8,9,10].

Bu çalışmada, elyaf katkısı ve mermer tozu ikamesi ile hazırlanan harç numuneleri üzerinde, standart kür, sürekli sülfat çözeltisi ve sülfat çözeltisinde ıslanma kuruma koşullarının etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

Üretilen harçlarda sodyum sülfat tuzlarının birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, kılcal su emme, görünür porozite, boy ölçüm, basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı değerlerine etkisi belirlenmiştir. Numunelerin SEM görüntüleri alınmıştır.

Sülfat etkisine maruz bırakılan numunelerin boy ölçümlerindeki değişimler 6 süresince 1, 2, 3, 4, 8, 13, 15, 17, 21. haftalarda periyodik olarak ölçülmüştür.

1.1. Mermer Tozu ve Cam Elyaf Katkılı Beton

1.1.1. Mermer Tozu

Mermer tozları çeşitli sektörlerde ana hammadde veya dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır [11].

Mermer tozu beton üretiminde, beton karışımına ince malzeme olarak belli oranlarda katılır. Mermer tozunun beton karışımına katılması betonun geçirimsizliğini azaltır, işlenebilirliğini artırır ve donma-çözülme direncini artırır [11].

1.1.2. Mermerin Tarihsel Gelişimi

İlk çağlardan beri insanlar yapı, konut ve yaşadıkları diğer yerleri doğal taşlardan yapmaya özen göstermişlerdir. Zamanla, yaşam seviyeleri yükselen toplumların, güzel görünümlü ve dayanıklı olması nedeniyle doğal taşları tercih etmeleri, bu ürünü zenginliğin ve refahın sembolü haline getirmiştir. Gelişen endüstri ve teknolojiye paralel olarak doğal taşların kullanımının artması da bunu göstermektedir. Anadolu'da doğal taşların, bunların içinde de özellikle mermerciliğin tarihi ilk çağa kadar uzanmaktadır. Ülkemizdeki mermer yatakları, Anadolu yarımadasını yurt edinen bütün uygarlıklar tarafından işletilmiştir. Etiler devrinin kabartma ve heykelleri, eski Yunan ve Roma devrinin amfileri, arenaları ve diğer çeşitli sanat eserleri, Selçuklular ve Osmanlı devrinin saray, hamam, kervansaray, cami ve medreseleri, minareleri, çeşmeleri, ülkemizde mermer işlemeciliğinin tarihsel gelişimini oldukça güzel sergilemektedir [12].

Mermer, tarih boyunca değişik uygarlıklar tarafından dayanıklılığı ve estetik görünümü nedeni ile özellikle anıtlarda, görkemli yapı malzemesi olarak kullanılmış olup; günümüzde genellikle zemin döşeme (%36), iç (%14) ve dış cephe kaplama (%10) malzemesi olarak inşaat sektöründe, mezarlıkta (%11) ve süs eşyası (%8) yapımında kullanılmaktadır. Bunların dışında fabrika ve atölyelerdeki yüksek CaCO_3 bileşimli artıklar öğütülerek boya, seramik, soda, kostik, şeker, yem, suni gübre sanayilerinde değerlendirilmektedir [12].

Mermer en çok inşaat sektöründe kullanıldığından, bu sektördeki gelişmeler mermere olan talebi artırmıştır. Son on yıl içinde sürekli gelişme gösteren mermer talebi ülkemizin Marmara, Ege ve Akdeniz bölgesinde yer alan turistik yatırımlardan kaynaklanmaktadır. 2000 yıl önce Marmara adasında başlayan antik mermer işlemeciliğinden dolayı adını

Marmara adasından alan mermer, son yıllarda gerçekleştirdiği hızlı gelişmeye paralel olarak sağladığı istihdam, yarattığı katma değer ve kazandırdığı yüz milyonlarca dolarlık ihracat geliriyle madencilik sektörünün lokomotifi olmuştur [12].

1.1.3. Mermer Tozunun Oluşumu, Üretimi ve Kullanımı

Mermer tozu, mermerin işlenmesi esnasında oluşur ve çökeltme havuzlarında biriken malzemelerden biridir [13].

Mermerlerin düzgün geometrik şekil alabilmesi için kesilmesi gerekmektedir. Kesme işlemi sonunda mermer tozu ortaya çıkmaktadır. Mermerlerin kesiminde soğutma suyu kullanıldığından ve toz bastırıcı olarak sulu kesim yapıldığından, mermer kesiminden çıkan ince şlam halindeki parçacıklar başlangıçta ıslak olarak depo edilmekte veya doğrudan araziye bırakılmaktadır. Dolayısıyla çevre kirlenmesi söz konusudur. Mermerlerin ocaktan çıkarılması, blok mermerin fabrikada işlenmesi ve mamul mermer üretiminden geriye kalan bütün mermer parça ve tozları mermer atığı olarak kabul edilmektedir. Mermer atıkları, oluşum yerlerine göre ocaklarda ve fabrikalarda oluşan atıklar, boyutlarına göre ise; molozlar, paledyenler ve toz atıkları olarak adlandırılıp sınıflandırılmaktadırlar. Tesislerde işlenen mermerlerden toz ve kırıntı artıkları, işlenen mermerlerin yaklaşık olarak %30'unu oluşturmaktadır. Mermer fabrikalarında üretim atığı olarak çıkan toz atıklar genellikle değerlendirilememekte ve çevre kirliliği açısından da sorunlar yaratmaktadır [14].

Üretimi ve işlenmesi esnasında meydana gelen atık miktarı %60'lara ulaşan mermer sektörü'nde yeniden kullanım için önemli miktarlarda hammadde açığa çıkarmaktadır. Meydana gelen atıklar toz ve parça atıklar olmak üzere ikiye ayrılmakta ve bunlar çeşitli şekillerde değerlendirilmektedir. Bu atıklardan inşaat sektöründeki değişik alanlarda yararlanma yöntemleriyle ilgili literatürde çeşitli çalışmalar yapılmakta, sanayideki bazı uygulamaları günlük hayata yansımaktadır [15].

Parça atıklar inşaat temellerinde dolgu malzemesi, mozaik yem sanayi hammaddesi (toz haline getirilerek), inşaatlarda zemin üzerine paletyen gibi farklı alanlarda kısmen kullanılmaktadır.

İnşaat malzemesi olarak kullanılacak mermer atıklarının fiziksel ve mekanik özellikleri önemli olmaktadır. Çimento veya kireç üretimi sürecinde katkı malzemesi olarak kullanılacak atıklarda ise kimyasal özellikler daha önemli olmaktadır. Mermer toz atıklarının değişik alanlarda kullanabilme 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 kullanabilme imkânı oluşturmaktadır [16].

1.1.4. Mermer Oluşum Yerlerine Göre Mermer Atıklarının Çeşitleri

1.1.4.1. Ocaklarda Oluşan Atıklar

Mermer ocaklarında bulunan arızalar (fay, çatlak, yarık) blok üretimi sırasında; blok elde edilmemesine, dolayısıyla da irili ufaklı molozların açığa çıkmasına sebep olmaktadır. Bu tür mermer atıklarına, ocağın jeolojik yapısına ve kristal yapısına uygun üretim yöntemi seçmemek, yani yanlış üretim metodu uygulamak atıkların oluşumuna sebep olur [14].

Ocaklarda mermer atıklarının oluşmasına diğer bir etken de sayalama işlemidir. Ocakların tektonik yapısına uygun olarak elde edilen çok büyük ve şekilsiz parçalar, çeşitli amaçlar için farklı yöntemlerle istenilen ebatlarda alt, üst ve yanlardan kesilirler. Bu atıklara genel olarak pasa adı verilir. Ocak üretim miktarının yaklaşık %50'sini oluşturan bu atıkların tamamının değerlendirilmesi mümkün olmamakta, mermer ocak işletmelerinin etrafında bir taş toprak yığını halinde bekletilmektedir [14].

1.1.4.2. Fabrikalarda Oluşan Atıklar

Fabrikalarda kesilen bloklardan belirli ebatlarda plakalar elde edilmektedir. Elde edilen bu plakaların baş kesme ve yan kesmelerde uygun ölçülerde ebatlandırma yapılır. Parlatma ve cilalama işlemlerine tabi tutulur. Bu işlemler sırasında çok küçük boyuttaki mermer tozu atıkları oluşmaktadır. Bu işlemler sulu olarak yapıldığında açığa çıkan atıklar su ile birlikte taşınmakta ve genellikle havuz yöntemi uygulanarak toplanmaktadır. Bu suyun geri kazanılması sonucunda artık tozlar elde edilmektedir [14].

1.1.5. Mermer Atıklarının Değerlendirme Alanları

Mermer atıkları inşaat sanayide, beton üretiminde, gaz beton üretiminde, seramik sektöründe, çimento imalat sanayide, kireç üretiminde, plastik, kağıt, tarım ve gübre, yem, cam, kimya ve boya sanayilerinde, yol yapımında, demir yolu zemin malzemesinde ve diğer (Bu alanlar dışında; soda imalinde, refrakter malzeme imalinde, oto lastiği imalinde, patlayıcı malzeme imalatında, temizlik malzemeleri, haşere öldürücü ilaçlarda kullanılır. Ayrıca madencilikte; Yeraltı işletmeleri, cüruf yapıcı, flotasyon, kalsine dolomit üretiminde kullanılır.) [14].

Mermer atıkları inşaat sektöründe; sıva harcı karışımlarında, dolgu malzemesi olarak, mozaik üretiminde, kaplama ve döşemelerde, kireç üretiminde, mıcır olarak, paledyen olarak, karayolu ve demir yollarında, kullanım alanları bulmaktadır [14].

1.2. Lifli Beton

Beton özelliklerini olumlu yönde değiştirerek iyileştirmek amacıyla taze beton içerisine çeşitli yöntemlerle değişik miktarlarda katılan, belirli boy/çap (narinlik oranı) oranına sahip olan metalik, polimerik, mineral veya tabii yapıdaki malzemelere lif (fiber) denir [4].

Lifli beton; çimento, agrega ve çoğunlukla süreksiz dağılımlı liflerin su ile karıştırılmasıyla meydana gelen beton olarak tanımlanmaktadır [17].

Beton içerisinde yaygın olarak kullanılan lifler; çelik, polipropilen, karbon ve alkali dirençli cam liflerdir. Lifli betonlarda, bütün lif çeşitlerinde sağlanması gereken en önemli özellik liflerin beton içerisinde homojen olarak dağılması ve bu dağılımın beton karıştırıldıktan sonra da bozulmamasıdır [4].

Lifli betonlarda donatı malzemesi olarak kullanılan lifler cam, polipropilen, çelik, karbon gibi çeşitli malzemelerden farklı tip ve boyutlarda üretilmektedirler. Bir malzemenin lif olarak tanımlanabilmesi için boy/çap oranının en az 10 olması ($l/d > 10$), lifin en büyük genişliğinin 0.25 mm'den ve en büyük kesit alanının da 0.05 mm²'den daha küçük olması gibi sınırlandırmalar getirilmiştir. ACI Committe 544'e göre bir lifi tanımlayan en uygun sayısal parametre "lif narinlik oranı" dır [18].

İnsanlığın ilk olarak doğal malzemelerden yararlanarak elde ettiği kompozit malzemeler üzerinde fiberlerin etkisinin farkına vardığı günden bugüne ve teknik imkânların sağladığı avantajlarla çok çeşitli fiber tipleri, gerek ticari gerekse deneysel kullanım amaçlı olarak üretilmektedir [19].

Lifler betonda hangi amaç için kullanılacaksa, o yönde lif çeşidinin seçilmesi gerekir. Taze beton çatlaklarının önlenmesi için; cam, sentetik (polipropilen, poliefin, naylon) lif, sertleşmiş betonda eğilme ve çekme dayanımının arttırılması için; çelik, karbon lifler, enerji yutabilme kapasitesinin (süneklik) arttırılması için; polipropilen, çelik lif, aşınma dayanımının arttırılması için çelik lif kullanılmalıdır [20].

Lifli beton; büzülme çatlağı oluşma riskini azaltır, yüzey aşınma direncini artırır. Betonda olabilecek rötre ve kılcal çatlakları önler. Su geçirimsizliğini artırır. Ufalanma, tozuma ve pullanma oluşumunu önler. Donma-Çözünme dayanımında artış sağlar. Kılcal çatlak gelişimini engeller. Standart betona oranla daha sünek davranış gösterir. Paslanmaz. Yüksek alkali dayanımı sağlar. Prekast uygulamalarında, plastik, termal, çökme ve ayrışma

çatlaklarına karşı daha yüksek dayanım sağlar. Beton taşıyıcı sistemleri için yangın dayanımı sağlar [4].

Beton içerisinde homojen olarak dağılım gösteren, kısa kesilmiş lifler betonda; çatlak oluşmasını geciktirir, çatlak yayılımını ve ilerlemesini önler, aşamalı olarak matrsten sıyrılma ve kopma mekanizması ile betonun enerji yutma kapasitesini önemli oranda geliştirirler [20].

1.2.1. Lifli Betonun Tarihsel Gelişimi

Eski zamanlardan beri gevrek malzemeleri güçlendirmek için fiberler kullanılmaktadır. Saman çöpünün güneş pişirimli tuğlaların güçlendirilmesinde kullanımı ve at kıllarının kâgir harcı ve sıvada kullanımı bu malzemenin yapı teknolojisinde ilk kullanımlarına örnek olarak verilebilir [19].

MÖ 1900'de Asbest, fiberin yaklaşık 5000 yıl önce kil çanakların yapısını güçlendirmede kullanıldığına dair kanıtlar olduğunu ileri sürmüştür [19].

Betonda takviye ve güçlendirme elemanı olarak ise çelik fiberlerin potansiyelini değerlendirmek için ilk büyük araştırma, ABD'de 1950'li yılların sonlarında ve 1960'ların başında yapıldı. Cam fiberlerin ilk kullanım denemeleri 1950'li yılların sonlarında Rusya'da yapılmıştır. 1990 da yeni lif üretim teknikleri geliştirilmeye çalışılmış 2000 ve sonrasında ise yapısal uygulamalar ve yeni ürünler ortaya konulmuştur [19].

1.2.2. Lifli Betonun Kullanım Alanları

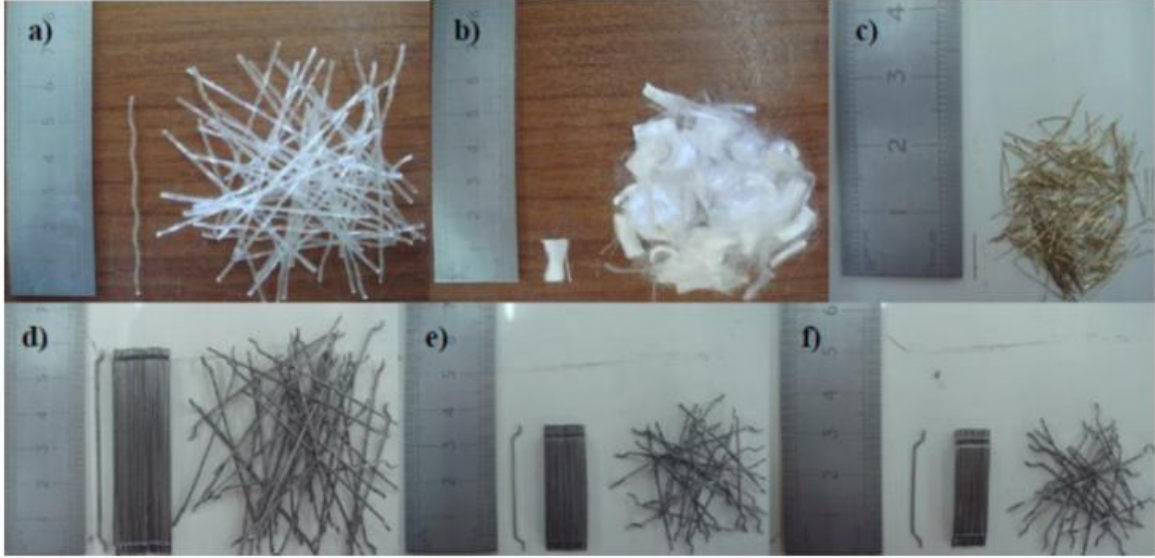
Endüstriyel yapılarda; döşemelerde dinamik yüklemeler ve termal etkilere karşı, Su yapılarında; kavitasyon hasarları ve dinamik yüklemeler için, Püskürtme beton uygulamalarında; hasır çelik kullanılmaması, esneklik ve zaman tasarrufu için, Şev ve tünel kaplamalarında; stabilite sağlanması için, Havaalanı, liman ve karayolu döşemelerinde; tekrarlı yükler ve yorulma durumuna karşı, Kabuk yapılarda; mimari nedenler ve ince kesitler için, Depreme dayanıklı yapılarda; sünekliği arttırmak için, Yangına dayanıklı yapılarda; termal ve mekanik şok etkilerine karşı ve ön yapımlı betonarme elemanlarda; çatlak oluşumunun engellenmesi için kullanılırlar [21].

1.2.3. Betonda Kullanılan Lif Çeşitleri

1.2.3.1. Çelik Lifler

Antik çağlardan beri lifler gevrek malzemelerin donatılandırılması amacı ile kullanılmıştır. (ACI 544, 1997). Tarihi yapıların bazılarında, balçık karışımları içerisine hayvan kuyruk ve yele kıllarının katıldığı bilinmektedir. Benzer şekilde, büyük usta Mimar

Sinan'ın (d. 1489–ö. 1588) yaptığı şaheserlerde kullanılan Horasan Harcı içerisinde saman ve keçi kılı kullanıldığı bilinmektedir. Liflerin bağlayıcı içerisinde en sık kullanımı güneşte kurutulan kerpiç bloklar içerisinde saman kullanılmasıdır. Şekil 1.1'de lif çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Lif çeşitleri

Beton içerisindeki çelik lifi, betonun yapısını değiştiren ve ona plastik davranış özelliği kazandıran bir malzeme olarak nitelendirebiliriz. Çelik lifli betonun en temel özelliği, onun arttırılmış plastik davranışı ve enerji yutma yeteneğidir [22].

Çelik lif takviyeli betonda, genellikle özel olarak bükülmüş kanca uçlu lifler kullanılır. Lif uçlarındaki bükülmeler, betona olan ankrajı kuvvetlendirir. Çelik lifler betonarme elemanları her doğrultuda takviye etmektedir. Özel tutkal ile yapıştırılmış demetler halinde bulunan lifler, beton karıştırma makinelerinde basit ve hızlı bir şekilde dağılmaktadırlar [23].

Çelik lifli betonlar, lifsiz betona göre daha yüksek çevrim sayılarında kırılmaktadır. Hatta, aynı su/çimento oranında olan lifli numunelerin çözelti içinde kalanları bile, lifsiz numunelerin su içinde kalanlarına göre daha yüksek performans göstermektedir [24].

1.2.3.2. Cam Elyaf

Cam elyaf silika, kolemanit, alüminyum oksit soda gibi cam üretim maddelerinden üretilmektedir. Cam elyaf, elyaf takviyeli kompozitler arasında en bilinen ve en kullanılanıdır. Cam elyaf özel olarak tasarlanmış ve dibinde küçük deliklerin bulunduğu

özel bir ocaktan eritilmiş camın itilmesiyle üretilir. Bu ince lifler soğutulduktan sonra makaralara sarılarak kompozit hammaddesi olarak nakliye edilir. Elyaf lar işlem sırasında dayanıklılıklarının %50'sini kaybetmelerine rağmen son derece sağlamdırlar. Cam elyaf aramid ve karbon elyaf larından daha yüksek dayanıklılık özelliğine sahiptir. Cam elyaf ın kullanım amacına bağı olarak elyaf sarma biçimleri farklı olabilir. Elyaf çapı ve demetteki lif sayısı farklılaşabilir [25].

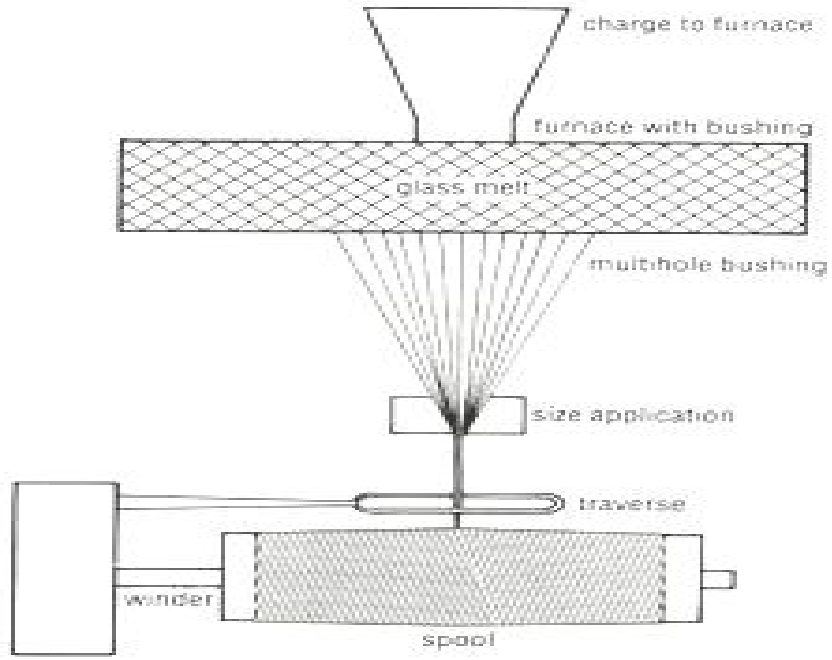
Cam fiberler ham maddelerin yüksek sıcaklık fırınlarında karıştırılıp eritilmesi ile üretilirler. Cam fiberler dayanım, esneklik ve sertlik gibi fiber özelliklerinin yanı sıra, sağlamlık şeffaflık, kimyasal etkilere karşı dayanım, kararlılık ve durağanlık gibi faydalı kütle özellikleri sergilerler. Bu gibi üstün özelliklerinin yanında ekonomik bir donatı türü olması dolayısı ile endüstride sıkça kullanılmaktadır [19].

Fiberin betona katılması, betonun; çekme ve eğilme dayanımını, düktilitesini, enerji tüketme kapasitesini ve çatlak gelişim karakteristiklerini geliştirmek için kullanılan en etkin yöntemlerden biridir. Kullanılan fiberin cinsi, miktarı, boyutu gibi özellikler betonun mekanik özelliklerini farklı şekilde etkilemektedir [26].

Cam lifler çok hassas oldukları için beton yerine harç ile daha iyi bir uyum sağlarlar [27].

1.2.3.3. Cam Elyaf ın Üretim Tekniğı

Cam elyaf ı silika, kolemanit, alüminyum oksit, soda gibi cam üretim maddelerinden üretilmektedir. Cam elyaf ı özel olarak tasarlanmış ve dibinde küçük deliklerin bulunduğu özel bir ocaktan eritilmiş camın itilmesiyle üretilir. Bu ince lifler soğutulduktan sonra makaralara sarılarak kompozit hammaddesi olarak nakliye edilir. Cam elyaf ın üretim tekniğı Şekil 1.2'de gösterilmiştir.



Şekil 1.2 Cam Elyafın Üretim Tekniği

Cam elyafı biçimlendirildikten sonra yıpranmaya dayanımının artması için kimyasallarla bir kaplama işlemi yapılır. Kaplama malzemesi olarak genellikle elyafın kompozit malzemeye uygulanmasından önce kolaylıkla kaldırılabilen ve suyla çözülebilen polimerler kullanılmaktadır.

Elyaf ile reçinenin birbirine iyi yapışması çok önemlidir.

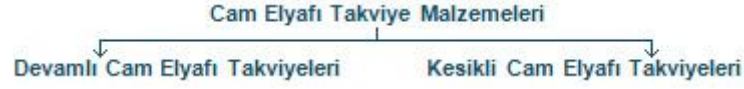
Cam elyafı kompozit malzemeler, takviye malzemesi ve taşıyıcı reçinenin (matriksin) birlikte kalıplanması ile elde edilmektedir. Bu işlem, birçok farklı metotla yapılmakla birlikte, tüm metotlarla geçerli olan esas, cam elyafının, taşıyıcı reçine ile uygun bir şekilde ısıtılabilmesidir [28].

1.2.3.4. Cam Elyafının Genel Özellikleri

Çekme mukavemeti yüksektir, birim ağırlık başına mukavemeti çeliğinkinden yüksektir. Isıl dirençleri düşüktür. Yanmazlar, ancak yüksek sıcaklıkta yumuşarlar. Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler. Nem absorbe etme özellikleri yoktur, ancak cam elyafı kompozitlerde matris ile cam elyaf arasında nemin etkisi ile bir çözülme olabilir. Özel elyaf kaplama işlemleri ile bu etki ortadan kaldırılabilir. Elektrik iletmezler. Bu özellik sayesinde elektriksel yalıtımın önem kazandığı durumlarda cam elyafı kompozitlerin kullanılmasına imkân tanır [28].

1.2.3.5. Cam Elyafı Takviye Malzemeleri ve Çeşitleri

Cam elyafı takviye malzemelerinin çeşitleri ayrıntılı bir şekilde aşağıda verilmiştir.



Fitil

- Tek Uçlu Fitil (Direkt Sarma Fitil)
- Çok Uçlu Fitil (Bileşik Fitil)
- Kırpılmış demetten keçeler (*)
- Kırpılmış demetler
- Öğütülmüş Lifler

Cam elyafı iplik (Tekstil ipliği – Yarn)

Kumaşlar (Fabric-Cloth)

- Dokunmuş Fitiller
- Dokunmuş Cam Kumaş
- Dikilmiş Kumaşlar (Dokunmamış)
- Tek Yönlü Fitil Kumaşlar (Dokunmamış Fitil)
- Devamlı Demetli Keçe (Dokunmamış)
- Yüzey Tülü (Dokunmamış)

(*) Kırpılmış demetten keçelerde bir kumaş (Fabric- Cloth) türü olup, Kesikli Cam elyafı Takviyeleri grubunda yer almaktadır.

1.2.3.5.1. Fitil

Devamlı yapıya sahip bir cam elyafı takviye malzemesidir. Çok sayıda delik içeren kovanlardan akan cam liflerinin doğrudan doğruya sarılması ile “Direkt Sarma Fitil” olarak üretilebildiği gibi, daha az sayıda delik içeren kovanlardan üretilen cam elyafı demetlerinin birbirine paralel olarak bükülmeden sarılması ile “Bileşik Fitil” olarak ta üretilebilir.

Fitil ürünleri 10-24 mikron çapında liflerden oluşur ve genellikle 1000 metre uzunluğu 600, 1200, 2400 ve 4800 gram ağırlığında olacak şekilde üretilir. Kullanım yeri ve prosesine bağlı olarak, sertlik, lifler arasında eş gerilim, kayganlık ve kolay kırılabilme gibi farklı özellikler fitillere kazandırılabilir.

Özel olarak üretilen ve “Spun roving” adı verilen düğümlü fitilde ana doğrultuya dik yönde takviye sağlayan ilmekler bulunmaktadır. Bunun amacı; tek yönde takviye edilmiş

pultruzyon ürünleri gibi kompozitlerde yanıl mukavemeti arttırmaktır. Genellikle “R” camı elyafından yapılmış fitillere en yaygın olarak epoksi reçine emdirilerek yapılan “Stratipreg veya Prepreg” ismi verilen bir diğler cam elyafı takviye malzemesi de elyaf sarma metodu ile yüksek mekanik dayanım aranan depo ve borularda otoklavda kalıplanmak üzere kullanılmaktadır. Şekil 1.3'de bileşik ve direk sarma fitil görölmektedir



Şekil 1.3. Bileşik ve direk sarma fitil

1.2.3.5.2. Cam elyafı iplik (Tekstil ipliğı - Yarn)

Cam elyafı demetlerinin bükümlü hale getirilmesi ile elde edilen takviye çeşididir. Genellikle dokunmuş kumaş olarak plastiklerin takviyesinde kullanılır.

1.2.3.5.3. Kumaşlar (Fabric-Cloth)

1.2.3.5.3.1. Dokunmuş Fitiller (Woven Roving)

Dokuma amacı ile üretilmiş fitillerin belirli bir düzen içinde dokunması ile yapılan cam elyafı takviye malzemesidir. Dokunmuş fitiller, birbirlerine 90°'lik açı ile atkı ve çözgüsünde aynı teksde fitillerin kullanıldığı kumaşlar olarak tanımlanmaktadır. Farklı ağırlık (300-1200 gr/m²) ve enlerde (125-300 cm) üretilen kumaşlar, cam tülü veya keçe ile dikilerek kombine ürün haline getirilerekte kullanılmaktadır. Dokunmuş fitiller; otomotiv, denizcilik gibi sektörlerde el yatırması uygulamalarında kullanılmaktadır. Ayrıca, özel dokuma tipleri ile fenolik reçine emdirilerek kesme taşlarının üretiminde de kullanılmaktadır. Şekil 1.4'de Dokunmuş fitiller gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Dokunmuş fitiller

1.2.3.5.3.2. Dokunmuş Cam Kumaş (Woven Glass Cloth)

Cam elyafı ipliklerinden dokunmuş kumaşlardır. Başlıca uygulamaları, baskılı devre üretimi, devre kesici tüpleri üretimi gibi elektrik araç gereç üretimidir. Şekil 1.5'de verilmiştir.



Şekil 1.5. Dokunmuş cam kumaş

1.2.3.5.3.3. Dikilmiş Kumaşlar (Stitch Mat)

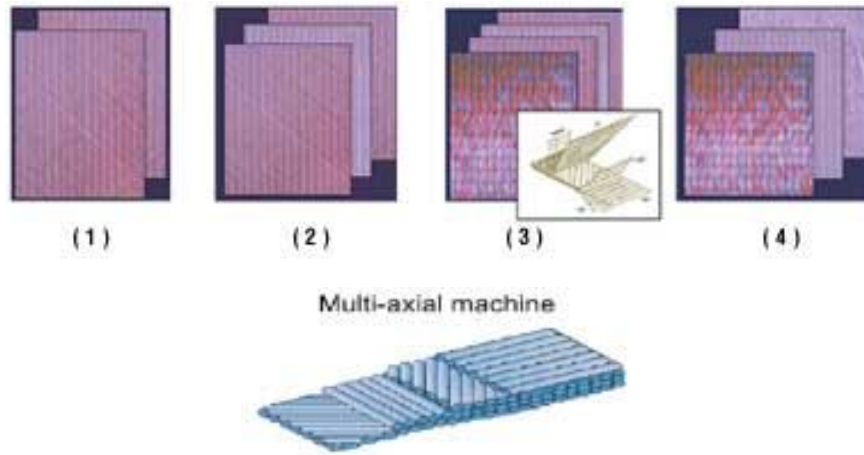
Diğer türlerine göre pazara yeni katılmış bir takviye türüdür. Dokuma prosesi söz konusu olmadığından yüzey performansı yüksektir. Takviye için kırılan elyaflar, takviye performansına katkıda bulunmayan polyester iplik ile dikilerek bir arada tutulmaktadır. Aynı ağırlıktaki bir dokuma ile karşılaştırıldığında daha iyi mekanik değerler elde edilmektedir. Şekil 1.6'da dikilmiş kumaşlar gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Dikilmiş kumaşlar

1.2.3.5.3.4. Tek yönlü Fitol kumaşlar (Unidirectional Roving Cloth) :

Çok yönlü mukavemet sağlaması amacıyla dokunmamış fitiller ile devamlı fitillerin iki (biaxial) veya üç katlı (Triaxial) oluşturulması ve sonrasında bu katların polyester iplik ile dikilmesi ile elde edilen dokunmamış (non-woven) fitil ürünüdür. Bu kumaşlarda, 45 veya 90 derecelik açılarının bir arada kullanılmasının yanı sıra keçe ile de dikilmesi mümkündür. Şekil 1.7'de tek yönlü fitil kumaş çeşitleri verilmiştir.



Şekil 1.7. Tek yönlü fitil kumaş çeşitleri

(1- İkili açılı 2- Üç açılı 3- Dört açılı 4- İkili açılı ve keçe)

1.2.3.5.3.5. Devamlı demetli keçe (Continuous Mat)

Kovandan akan liflerin, düzgün dağılımlı tabakalar oluşturacak şekilde, yayılmasından oluşan cam elyafı takviye çeşididir. Bu şekilde yayılan lifler, ikinci bir bağlayıcı kullanılarak bir arada tutulur. Bağlayıcı cinsi ve miktarı öngörülen uygulama alanına bağlıdır. Başlıca kullanım alanları; önceden şekillendirilerek (preform) veya

şekillendirilmeden maçalı kapalı kalıplama, pultruzyon, devamlı levha ve baskılı devre plakası üretimleridir. Ayrıca köpük takviyesinde de kullanılır. Şekil 1.8'de devamlı demetli keçe gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Devamlı demetli keçe

1.2.3.5.3.6. Kırpılmış Demetten Keçeler (Chopped Strand Mat)



Şekil 1.9. Kırpılmış demetten keçeler

Bu cam elyafı takviye çeşidi, 50 mm uzunluğunda kırpılmış cam elyafı demetlerinin, stirende çözünür bir bağlayıcı ile bir arada tutulmasından oluşmaktadır. Kullanılan bağlayıcı miktarı, proses gereklerine ve bitmiş ürün özelliklerine bağlı olarak %3-10 arasında değişmektedir. Kırpılmış demetten keçeler, açık kalıplama uygulamaları ve levha üretiminde kullanılmaktadır. Şekil 1.9'da verilmiştir.

1.2.3.5.4. Kırpılmış demetler

Cam elyafı demetlerinin 3-12 mm uzunluğunda kırpılmış şeklidir. Termoplastik granüllerin ve termoset esaslı kalıplama yöntemlerinden, BMC üretiminde kullanılmaktadır. Şekil 1.10'da kırpılmış demetler gösterilmiştir.



Şekil 1.10 Kırpılmış Demetler

1.2.3.5.5. Öğütülmüş Lifler

Öğütme işlemi sonucunda, uzunlukları, 0.1-0.2 mm'ye düşürülmüş cam elyafı takviye malzemesidir. Bu liflerin çapları 10-17 mikron arasında değişir. Öğütülmüş liflerin başlıca kullanım alanı termoplastik reçinelerin ve poliüretan reçinenin takviyesidir. Kompozit'in rijitlik, boyut stabilitesi ve darbe dayanımı gibi özelliklerini yükseltmek için öğütülmüş lif boyu çok kısa olduğundan, bu takviye malzemesi, diğer kompozitlerin takviyesinde kullanılmaz [29]. Şekil 1.11'de gösterilmiştir.



Şekil 1.11. Öğütülmüş Lifler

1.2.3.6. Cam Elyafı Üretimindeki Başlıca Cam Cinsleri

Kompozisyonlarına bağlı olarak, değişik cam elyafı cinsleri vardır. Bunlar içinde “E” camı elyafının en başta geldiği görülmektedir. Elektrik ve mekanik özellikleri ile maliyetinin iyi bir denge oluşturması sonucu, bu kalsiyum alüminosilikat bileşiminin, kullanılan toplam cam elyafı takviye malzemeleri içinde %90 pazar payına sahip olduğu görülmektedir.

“E-CR”camı, “E” camının modifiye edilmiş şekli olup, asitlere karşı dayanım sağlamak amacı ile kompozisyonunda bor içermemektedir. “E-CR” camı elyafı, genellikle kimyasal dayanım istenen tank ve boru imalatında kullanılmaktadır.

Yüksek mekanik dayanım aranan ürünler için kullanılan cam elyafı cinsleri Amerika'da “S” Camı; Avrupa'da “R” camı olarak nitelenmektedir. Kompozitin mukavemetini ve rijitliğini arttıran bu cins cam elyafı havacılık, uzay ve askeri alanlarda, yüksek teknik performans gereksinimi nedeni ile kullanılmaktadır. Ayrıca, nakliye, spor ve dinlence alanlarında da bazı ürünler için kullanıldığı görülmektedir.

Bunların dışında, mükemmel dielektrik özellikler taşıyan ve elektronik endüstrisinde sıkça kullanılan, “D” camı elyafı ve özellikle yüzey tüllerinde kullanılan kimyasal dayanımlı “C” camı elyafı da bulunmaktadır. Cam tipleri ve özellikleri tablo 1.1'de verilmiştir.

Tablo 1.1. Cam tipleri ve özellikleri

Cam Tipi	Özellikleri
A-camı	Yüksek alkali oranı-düşük maliyet
C-camı	Kimyasal dayanım (Yüzey tüller)
E-camı	Elektriksel özellikler
L-camı	Radyasyona karşı kurşun içerir
M-camı	Yüksek elastik modül
S-2 camı	Yüksek çekme dayanımı
W-2 camı	Paneller için yarı şeffaf
AR-camı	Alkali dayanım
R-camı	Yüksek çekme dayanımı

Başlıca cam elyafı cinslerinin kompozisyonları aşağıdaki Tablo 1.2'de görülmektedir [22].

Tablo 1.2. Cam elyafı cinslerinin kompozisyonu (%)

	A	C	E	R	S
SiO ₂	72.0	64.6	52.4	60.0	64.4
Al ₂ O ₃	1.5	4.1	14.4	25.0	25.0
CaO	10.0	13.4	17.2	9.0	---
MgO	2.5	3.3	4.6	6.0	10.3
Na ₂ O, K ₂ O	14.2	9.6	0.8	---	0.3
B ₂ O ₃	---	4.7	10.6	---	---
BaO	---	0.9	---	---	---

Tablo 1.3'de cam elyafların mekanik özellikleri ve bileşimleri verilmiştir.

Tablo 1.3. Cam elyafların mekanik özellikleri ve bileşimleri [28]

Özellikler	A	C	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 (m/m/°Cx10 ⁶)	8.6	7.2	5.0	5.6
Yumuşama sıcaklığı (°C)	727.0	749.0	841.0	970.0
Katkı Malzemeleri (%)				
SiO ₂	72.0	64.4	52.4	64.4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O 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 ₂ O, K ₂ O	14.2	9.6	0.8	0.3
B ₂ O ₃	-	4.7	10.6	-
BaO	-	0.9	-	-

1.2.3.7. Polipropilen Lifler

Polipropilen lifler, birim ağırlıklarına göre mikro ve makro lifler olarak ayrılırlar. Mikro lifler özellikle erken dönemde oluşan kılcal çatlaklarda etkilidirler. 1m³'te 0,60 kg - 0,90 kg oranında uygulanırlar.

Makro lifler ise daha ağır olup 1,8 kg/m³ oranında betona uygulanırlar. Makro lifler plastik dönemle birlikte uzun dönemdeki çatlaklarda da etkili olup çelik liflere de alternatif olarak kullanılmaktadır. Çelik liflere oranla daha düşük dozajda aynı performansı gösteren bu lifler için korozyon riski de bulunmamaktadır. Makro lifler, dalga şeklindeki yapıları sayesinde betona sıkıca tutunurlar ve böylece betonun çekme mukavemetini arttırırlar [30].

1.2.3.7.1. Polipropilen Liflerin Kullanım Alanları

Saha betonu ve şap uygulamaları, tamir ve yapıştırma harçları, yapısal taşıyıcı betonarme sistemler ve püskürtme beton uygulamalarıdır.

Polipropilen Liflerin Betona Sağladığı Avantajlar

- Betonda oluşacak rötre ve büzülme çatlaklarını engelliyor,
- Betonu üç boyutlu olarak donatılandırıyor,
- Segregasyonu/ayrışmayı azaltıyor,
- Betona tokluk kazandırıyor, sünek hale getiriyor,
- Beton geçirgenliğini azaltıyor,
- Betonun darbeye karşı dayanımını arttırıyor,
- Basınç ve eğilme mukavemetini arttırıyor,
- Asit ve bazlardan etkilenmiyor. Degrade olmuyor,
- Donatının korozyonunu, paslanmasını engelliyor,
- Betonun dağılmasını ve parçalanmasını engelleyerek depreme karşı dayanımı arttırıyor,
- Beton hizmet ömrünü arttırıyor,
- Yüzey aşınmasını, tozumasını, ufalanmasını engelliyor,
- Yangın dayanımı sağlıyor [31].

1.3. Sülfat Etkisi

Betonun dayanıklılığına etki eden ve bozulmasına yol açan başlıca prosesleri sülfat etkisi, donatı korozyonu, alkali-agrega reaksiyonları ve karbonatlaşma olarak sıralamak

mümkündür. Doğal olarak sodyum, potasyum, kalsiyum ve magnezyumla birlikte zeminde veya yer altı sularında çözülmüş halde bulunan sülfatlar betona zarar vermekte ve sülfatların betonda yarattığı yıpratıcı etki, "sülfat etkisi" veya "sülfat hücumu" olarak adlandırılmaktadır. Sülfat etkisiyle betonda zaman içinde dayanım kaybı, hacim genleşmesi, çatlama, yumuşama, pullanma ve tabakalaşma gibi bozulmalar gözlenmektedir.

Yer altı sularında, bazı killi topraklarda ve cüruflla doldurulmuş arazilerde oldukça yüksek miktarda sodyum sülfat, kalsiyum sülfat, magnezyum sülfat ve potasyum sülfat gibi tuzlar bulunabilmektedir. Sertleşmiş betonun içerisine dışarıdan sızan sularla birlikte giren sülfatlar, betonun genişip çatlamasına yol açan kimyasal olayların gelişmesine neden olmaktadır. Sülfatların betonda yarattığı yıpratıcı etki, "sülfat hücumu" olarak adlandırılmaktadır. Sülfat hücumuna maruz kalan betonların yüzeyi, karakteristik olarak beyazımsı bir görünüm almaktadır. Sülfatların yıpratıcı etkisi, genel olarak beton blokların kenarından ve köşelerinden başlamaktadır. Daha sonra bu etki, betonun iç kısımlarına doğru yoğunlaşarak, beton yüzeyinin tabaka tabaka büyük parçalar halinde parçalanmasına neden olmaktadır [32].

Çimentonun yapısında bulunan ana bileşenlerden C_3A ve C_4AF çimentonun sülfata karşı göstereceği performansı etkileyen en önemli bileşenlerdir. Çünkü sülfat hücumu sonucunda meydana gelen ve sertleşmiş çimento ve betonun yapısında genleşmelere sebep olan etrenjit ve monosülfoalüminatların oluşumunda bu ana bileşenler doğrudan rol oynamaktadır. Çimentonun yapısında bulunan C_3A miktarı, beton taze haldeyken meydana gelecek monosülfoalüminat miktarını belirlemekte, monosülfoalüminatlar ise sertleşmiş betonda zararlı genleşmelere sebep olan etrenjit oluşumuna sebep olmaktadır [33].

Beton ile sülfatlı çözeltiler arasında oluşan reaksiyon ürünlerinin miktarı ve özelliği, sülfata bağlı katyonlara, farklı sülfat karışımlarına, bunların birbirine oranlarına ve miktarlarına bağlıdır. Reaksiyon ürünleri ayrıca, çimentodaki trikalsiyumalüminat (C_3A) miktarına göre değişir. Sülfatların etki mekanizması çok karmaşıktır. Sülfatlı çözeltilerdeki sülfat iyonları, çimentonun hidratasyon ürünü olan CH ile reaksiyona girerek jips (CSH_2) meydana getirir. Oluşan jipsin betondaki hacim artışına ve yumuşamaya olan etkisi sınırlıdır ve her zaman zararlı değildir. Fakat reaksiyon sonunda oluşan jips çimentodaki C_3A ve bunun hidratasyon ürünü olan C_3AH_6 , C_4AH_{13} , C_4ASH_{12-18} ile Candlot tuzu

(C₄AS₃H₃₂) oluşturur. Candlot tuzu doğal mineral olan etrinjit'e çok benzer, içerdiği 32 molekül kristal suyu nedeni ile de büyük hacim artışı meydana getirir [34].

Betonda sülfat tahribatı için, çeşitli standartlarda ve çalışmalarda farklı belirleme yöntemleri mevcuttur. Bunlar,

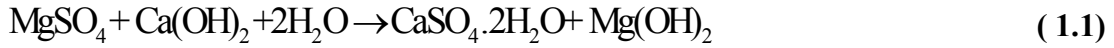
1) Belirli boylardaki beton prizmaların bir veya beş sene sülfatlı ortamlarda kaldıktan sonra genişleme miktarını tespit eden boylarındaki uzamanın ölçülmesi,

2) Numunelerin preste kırılarak basınç mukavemetlerini ölçerek baştaki ile birkaç yıl sonundaki basınç mukavemeti kaybının belirlenmesi,

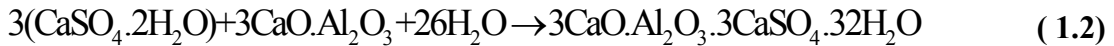
3) Numunelerde uzun zaman sonunda oluşan yüzeysel dökülmenin ve çatlak oluşumunun ölçülmesi olarak sınıflandırılabilir [35].

1.3.1. Magnezyum Sülfat Etki Mekanizması

Magnezyum sülfat, taze harçlarda ilk olarak çözeltideki Ca(OH)₂ ile reaksiyona girer.



Bu reaksiyonda oluşan Mg(OH)₂ brunit olarak adlandırılır. Brunitin çözünürlüğü çok düşüktür. Ayrıca brunit oluşumu yüksek oranda kalsiyum hidroksit tüketimini sağlar. Bu da çözeltinin pH'ını düşürür. Ayrıca taze harçlarda yukarıdaki reaksiyonda oluşan CaSO₄·2H₂O (alçıtaşı), hidrate olmamış kalsiyum alüminat ile reaksiyona girer ve (1.2) denklemindeki reaksiyon sonucunda 3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·32H₂O (etrenjit) oluşur. Oluşan bu etrenjit zararsızdır. Çünkü taze harçta olduğundan dolayı sadece taze harcın hacminin artmasına neden olur.



Magnezyum sülfat çözelti harçlarda sertleşme olduktan sonra alçıtaşı oluşumu devam eder ve alçıtaşı oluşumunun artması şişmeye neden olarak ilk zararlı etkiyi meydana getirir. Öte yandan magnezyum sülfat çözelti harçlarda sertleşme olduktan sonra etrenjit oluşumu devam etmez. Çünkü brunit oluşumu ve çözeltinin pH değerinin düşük olması hem etrenjit hem de C-S-H'nin (kalsiyum silika hidrat) stabitesini bozar. Bilindiği üzere C-S-H yapısı, çimento hamurunun ana bağlayıcı özelliği olan önemli bir bileşendir. Magnezyum ve kalsiyum iyonlarının valans değerlerinin aynı ve iyonik yarıçaplarının yakın olmasından dolayı magnezyum sülfat, C-S-H jeli ile aşağıdaki reaksiyonu oluşturur.



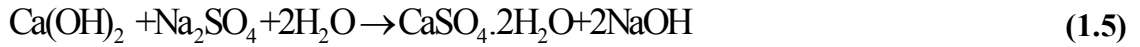
Burada oluşan $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ silika jelidir ve bu jelin bağlayıcı ve dayanım özelliği C-S-H jelinin bağlayıcı ve dayanım özelliğine göre çok düşüktür. Çimento hamurunda alçıtaşının ve brusitin konsantrasyonu artarken, C-S-H gittikçe kirecini kaybeder ve bağlayıcı özelliği azalır. Brusit konsantrasyonunun artmasıyla beraber brusit, silika jeli ile (1.4) deklemine göre reaksiyona girer ve bunun sonucunda bağlayıcı ve dayanım özelliği olmayan M-S-H'ye dönüştükçe oranı da gittikçe azalır.



Sonuç olarak bu oluşum sertleşmiş çimento hamurunun yumuşamasına ve bozulmasına neden olur.

1.3.2. Sodyum Sülfatın Etki Mekanizması

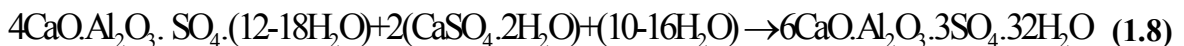
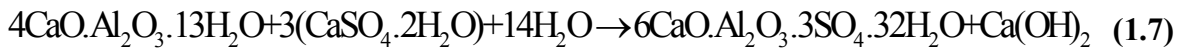
Sodyum sülfat, taze harçlarda magnezyum sülfattaki gibi aynı şekilde ilk olarak $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girer:



Bu reaksiyonda oluşan NaOH (sodyum hidroksit) çimento hamurunun pH değerini yükseltir. Ayrıca taze harçlarda yukarıdaki oluşan $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (alçıtaşı) hidrate olmamış kalsiyum alüminat ile (1.6) denklemindeki gibi reaksiyona girer ve bu reaksiyon sonucunda $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ (ilk etrenjit) oluşur. Oluşan bu etrenjit zararsızdır. Çünkü taze harçta oluştuğunda dolayı sadece taze harcın hacminin artmasına neden olur.



Sodyum sülfat çözeltili harçlarda da magnezyum sülfat çözeltili harçlarda olduğu gibi sertleşme olduktan sonra alçıtaşı oluşumu devam eder ve alçıtaşı oluşumunun artması şişmeye neden olarak ilk zararlı etkiyi meydana getirir. Diğer taraftan sertleşmiş harçlarda oluşan alçıtaşı, hidrate kalsiyum alüminatlarla, hidrate kalsiyum sülfoalüminatlarla veya anhidr trikalsiyum alüminatlarla reaksiyona girerek aşağıdaki denklemlere göre sertleşme başlangıcından itibaren etrenjit oluşur:





Oluşan bu etrenjit harçta şişme ve çatlamalara sebep olarak bozulma ve dayanım kaybına neden olur. Sodyum sülfatın etki mekanizması temel olarak sertleştikten sonraki etrenjit oluşumu üzerinde odaklanır. Bu yüzden çimentolarda C_3A oranını sınırlamak gerekir [36].

1.4.Literatür Araştırması

Uyan ve Kılınç (2003), çalışmalarında karışım suyu olarak kullanılan magnezyum sülfat ve sodyum sülfat çözeltilerinin çimento harçlarında eğilme ve basınç dayanımına etkisini araştırılmışlardır. Çalışmada su/çimento oranları 0,60 ve 0,75 olarak seçilmiştir. Magnezyum sülfatın zararlı etkisi %6'dan itibaren oluşurken, sodyum sülfatın olumsuz etkisi esas olarak %0,5 değerinde ortaya çıkmıştır. Sodyum sülfatın magnezyum sülfata göre sülfat etkisi açısından daha zararlı olduğu ve bu tuzların etkilerinin su/çimento oranına göre değiştiği bu çalışmada belirtilmiştir [36].

Duru (2006), çalışmasında uçucu kül ve doğal puzolan katkılı çimentoların sülfat direnci üzerine etkisini araştırmıştır. Karşılaştırma amacıyla ayrıca farklı bir klinkerden sülfata dayanıklı çimento da elde edilmiştir. Geçirimliliğin sülfat direncine etkisini görmek amacıyla her tip çimentodan su/çimento (S/Ç) oranı 0.485 ve 0.560 olan iki farklı harç karışımı hazırlanmıştır. Çimentoların sülfat hücumuna karşı performanslarını belirlemek üzere hazırlanan 25x25x285 mm'lik prizmatik numuneler 78 hafta, 50 mm'lik küp numuneler ise 52 hafta süresince %5'lik Na_2SO_4 çözeltisine maruz bırakılarak gözlenmiştir. Numunelerin farklı yaşlardaki göreceli bozulmaları, boy, yoğunluk, ultrasonik ses hızı değişimleri ve dayanımları ölçülerek belirlenmiştir. Kullanılan katkının miktarı ve etkisine bağlı olmakla birlikte mineral katkılı çimentoların orta ve yüksek sülfatlı ortamlar için etkili sayılabileceği görüşüne varılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda, S/Ç oranının artmasıyla bozulmaya kadar geçen sürenin kısaldığı, S/Ç oranının yüksek C_3A içeren ve sülfata karşı daha az dayanıklı olan çimentolarda, düşük oranda C_3A içeren çimentolara kıyasla daha önemli olduğu gözlemlenmiştir [37].

Yıldız ve ark. (2010), çalışmalarında beton dayanım sınıfı C30 olarak belirlenmiş, farklı oranlardaki cam elyaf katkısının betonun basınç ve çekme dayanımı üzerindeki etkisini belirleyebilmek amacıyla, C30 beton sınıfında, sabit su/çimento oranına sahip 300 ve 350 dozlu beton numuneler hazırlanarak bu numunelerin ultrases geçiş hızı, basınç ve

yarmada çekme dayanımları incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde özellikle 5 ve 10 kg/m³ cam lif katkısının beton basınç dayanımına olumlu etkisi gözlenmiştir. Ayrıca, cam lif oranındaki artışa bağlı olarak betonların çekme dayanımlarında artış meydana gelirken, ultrases geçiş hızlarında da düşüşler meydana gelmiştir [38].

Biricik ve Ark. (2003), doksan gün sülfat etkisinde kaldıktan sonra kalker ve silis dumanı katkılı betonların özelliklerini araştırmışlardır. Silis dumanı ve kalker filleri katkılı betonların sülfata karşı dayanıklılığını araştırmak için SO₄⁻² konsantrasyonu 10000 mg/L ve 40000mg/L olan sodyum sülfat çözeltileri kullanılmıştır. Üretimde beyaz kalker agregası ve beyaz portland çimentosu 42,5 kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,60 olarak sabit tutulmuş, silis dumanın ağırlıkça çimentonun %5, %10, ve %20'si, kalker ise ağırlıkça filler malzemenin %5, %10 ve %20'si oranında ikame edilmiştir. Katkılı ve katkısız olarak üretilen betonlara sülfat etkisi, basınç dayanımı, kılcal su emme ve ağırlık değişimi deneyleri ile belirlenmiştir. Her üç ortamda da silis dumanı ve kalker içeren betonun basınç dayanımının normal betona göre belirgin biçimde yüksek olduğu görülmüştür. Ancak basınç dayanımı ile kılcal su emme arasındaki ilişki anlamlı bulunmamıştır. Ağırlık değişimindeki artış ihmal edilebilir düzeydedir. Su ve sülfat çözeltilerinde bekletilen, katkılı ve katkısız numune gruplarında bu süre zarfında sülfat etkisi gözlemlenmiştir [8].

Güneyisi ve Gesoğlu, çalışmalarında metakaolin katkılı betonların sülfat dayanıklılığını araştırmışlardır. Su-bağlayıcı oranı 0.35 ve 0.55 olan toplam altı farklı karışım içerisinde bağlayıcı olarak yalnız portland çimentosu ve portland çimentosu ve metakaolin birlikte kullanılmıştır. Bu karışımlarda metakaolin ağırlıkça %10 ve %20 oranında portland çimentosu ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Birinci başlangıç küründeki numuneler sürekli havada ikinci başlangıç küründeki numuneler ise sürekli suda bekletilmişlerdir. 28 günlük başlangıç kürü sonrası numuneler üç eşit gruba ayrılmış ve üç farklı ortam koşuluna maruz bırakılmıştır. Birinci koşulda, numuneler deney zamanına kadar suda bırakılmış (kontrol numuneleri), ikinci koşulda ise, numuneler %10 Na₂SO₄ çözeltisinde sürekli olarak bekletilmiş, diğer üçüncü koşulda ise numuneler aynı çözeltide fakat ıslama-kuruma etkisine maruz bırakılmışlardır. Islama-kuruma çevrimi her 10 günde bir periyodik olarak yapılmıştır. Daha sonra, 0, 60, 90, 180, 270 ve 365 gün su ve sodyum sülfat etkisine maruz bırakılan numunelerde basınç dayanımındaki değişimler saptanmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, beton üretiminde metakaolin kullanımı betonun sülfat direncini önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. Ayrıca, özellikle suda kür edilmiş betonlarda metakaolin katkı oranının %20'ye ulaştığı betonların performanslarında önemli düzeyde iyileşme tespit edilmiştir. Islama-kuruma çevrimine maruz kalan beton numunelerde daha olumsuz sonuçlar elde edilmiştir [39].

Erdoğan ve Karataş (2002), yaptıkları çalışmada sülfat iyonu konsantrasyonu düşük ortamlara maruz betonun durabilitesinin karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Araştırmada, çimento miktarının ağırlıkça %10'u oranında silis dumanı ikame edilmiş ve 40x40x160 mm ebadında prizmatik numuneler üretilmiştir. Numuneler 14 günlük standart kürü takiben, deniz suyu ile SO_4^{2-} iyonu konsantrasyonu deniz suyuna eşdeğer sülfat iyonu içeren Na_2SO_4 ve $MgSO_4$ çözeltilerine maruz bırakılmışlardır. Ayrıca silis dumanı içermeyen karışımlar hazırlanmış ve elde edilen prizmatik numuneler karşılaştırma yapmak amacıyla aynı ortamda saklanmıştır. Değerlendirme, numunelerin zamanla basınç dayanımları ile ağırlıklarında meydana gelen değişimler ölçülerek gerçekleştirilmiştir [40].

Şahmaran ve ark. (2002), tras ve uçucu kül katkılı çimentoların sülfat etkisindeki performanslarını incelemişlerdir. Bu çalışmada farklı yüzdelerde uçucu kül ve tras içeren katkılı çimentoların normal portland çimentosu ve sülfata dayanıklı çimentoya göre sülfat etkisinde gösterdikleri performanslarını karşılaştırmışlardır. Hazırlanan harç numuneler %5'lik Na_2SO_4 çözeltisine 52 hafta süreyle maruz bırakılmıştır. Bu süre boyunca harç numuneleri üzerinde genleşme ve basınç dayanımı ölçümleri yapılarak çimentoların sülfatlı sulara karşı performansları belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda, mineral katkılı çimentoların sülfata karşı performanslarının kayda değer bir biçimde yüksek olduğu görülmüştür [33].

Kızıllıgın (2009), yapmış olduğu çalışmada, çelik ve karbon mikroliflerin farklı dozajlarında çimento harçlarında kullanımının sülfata dayanıklılığı incelenmiştir. Çalışma kapsamında, farklı lif dozajlarında ve farklı uçucu kül ikame oranlarında kontrol karışımı dahil olmak üzere toplam 28 harç karışımı hazırlanmıştır. Bu karışımlar üzerinde yayılma çapı, eğilme, eğilme sonrası basınç ve boy ölçüm deneyleri uygulanmıştır. Harç numuneleri 28 ve 150 gün suda ve 150 gün sülfatta bekletildikten sonra numunelerin eğilme dayanımı, eğilme sonrası basınç dayanımları belirlenmiştir. 150 gün suda ve 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin her orandaki uçucu kül ikamesi için, en az ve en fazla lif hacmi içeren karışımlarında tokluk değerleri saptanmıştır. Ayrıca her farklı harç

karışımı için haftalık boy ölçümleri alınmıştır. Sülfatın farklı lif ve uçucu kül oranları ile hazırlanmış harç örnekleri üzerindeki etkileri incelenmiştir [35].

1.5. Tezin Literatürdeki Yeri

Literatürde mermer tozunun betonda kullanımı ile ilgili mekanik, donma-çözülme, yüksek sıcaklık deneyleri gibi çalışmalar yapılmıştır. Mermer tozunun kendiliğinden yerleşen betonun özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Cam elyaf ise bir çok çalışmada betonda farklı lif yada puzolan çeşitleri kullanılmış durabilite deneylerine, fiziksel ve mekanik özelliklerine bakılmıştır.

Farklı tip çimentoların farklı dozajlarda, puzolanların ve lif çeşitlerinin değiştirilerek betonda kullanımı ile ilgili bir çok çalışma yapılmıştır.

Bu çalışmalar ışığında literatürden farklı olarak bu tezde farklı mermer tozu oranları ve cam elyaf katkılı çimento harçlarının su, sürekli sülfat ve sülfatta ıslanma-kuruma kurlerinde bırakılarak dayanıklılığına etkisi araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Kullanılan Malzemeler

2.1.1. Çimento

Tez çalışmasında tüm deney numunelerinin üretiminde Elazığ çimento fabrikasından elde edilen CEM I 42,5 N tipi çimento kullanılmıştır. Taze olarak temin edilen ve uygun koşullarda saklanarak kullanılan çimento, süresi içinde bozulmaya uğramadan tüketilmiştir. Kullanılan çimentoya ait kimyasal ve bazı fiziksel özellikler Tablo 2.1.'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Kullanılan çimentonun özellikleri

Çimento 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		

2.1.2. Mermer Tozu

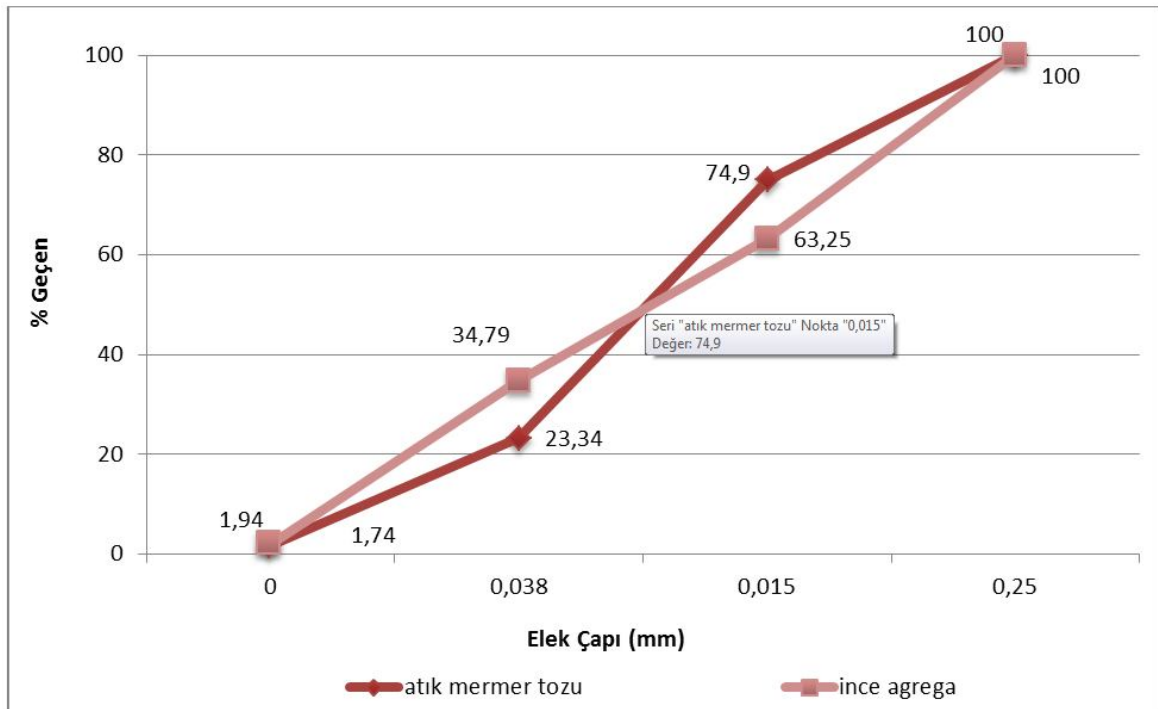
Çalışmada mermer tozu katkısı olarak, Elazığ Alacakaya Mermer ve Maden İşletmesi San. ve Tic. A.Ş. tarafından üretilen iki ayrı mermer türünün karıştırılmasıyla (Elazığ vişne, Hazar bej) üretimleri sırasında açığa çıkan sulu atıklar kurutulup öğütülerek kullanılmıştır. Atık mermer tozu olarak kullanılacak ürünün elde edildiği mermer malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir. Mermer tozunun kimyasal özellikleri Tablo 2.3'de verilmiştir. Şekil 2.1'de kullanılan mermer tozu ve ince agreganın granülometri eğrisi verilmiştir.

Tablo 2.2. Kullanılan mermer tozunun fiziksel ve mekanik özellikleri

Elazığ Vişne Mermeri		Hazar Bej Mermeri	
Mohs Sertliği	3,5-4	Mohs Sertliği	3-4
Shore Sertliği	53	Shore Sertliği	55
Birim Hacim Ağırlığı (gr/cm ³)	2,69	Birim Hacim Ağırlığı (gr/cm ³)	2,69
Ağırlıkça Su Emme (%)	0,7	Ağırlıkça Su Emme (%)	0,14
Görünür Gözeneklilik (%)	1,86	Görünür Gözeneklilik (%)	0,36
Tek Eksenli Basınç Day. (Mpa)	94,5	Tek Eksenli Basınç Day. (Mpa)	61,4
Çekme Dayanımı (Mpa)	8,54	Çekme Dayanımı (Mpa)	5,65
Eğilme Dayanımı (Mpa)	13,50	Eğilme Dayanımı (Mpa)	14
Darbe Dayanımı (Mpa)	1,2	Darbe Dayanımı (Mpa)	2,0

Tablo 2.3. Mermer tozunun kimyasal özellikleri (%) [41].

Kimyasal Özellikler	Elazığ Vişne	Hazar Bej
SiO ₂	28.35	0.12
Fe ₂ O ₃	9.70	0.10
CaCO ₃	60.48	55.24



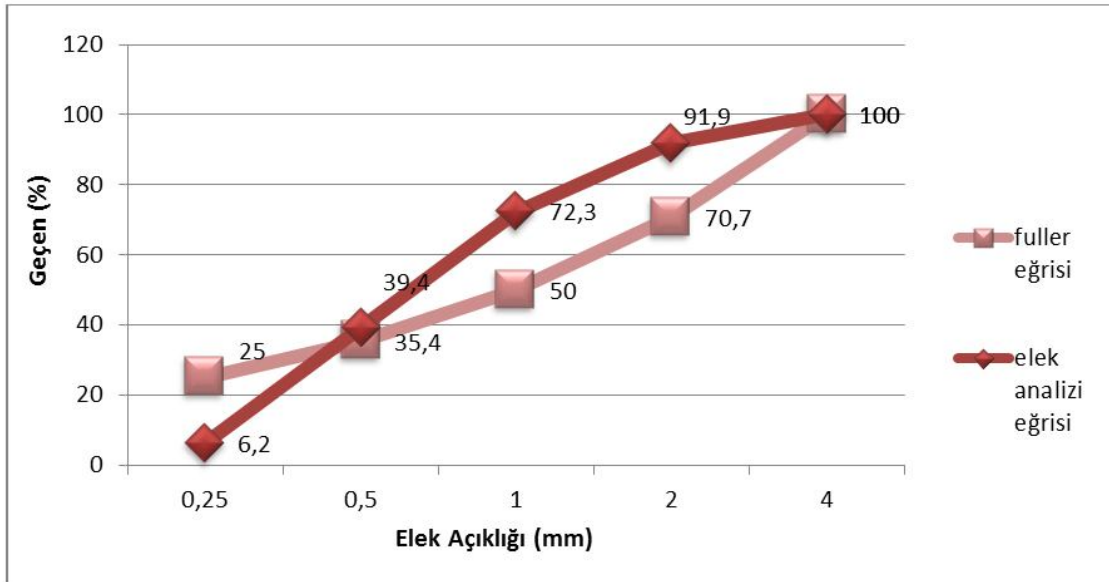
Şekil 2.1. Kullanılan mermer tozu ve ince agreganın granülometri eğrisi

2.1.3. Agregat

Harç numunelerinin hazırlanması amacıyla, agregat olarak Elazığ Palu yöresine ait yıkanmış, 4 mm'lik dere agregası kullanılmıştır. Kullanılan agregat Tablo 2.4 ve Şekil 2.2'deki elek aralıklarına göre elenerek sınıflandırılmış ve fuller parabolüne uygun hale getirilerek kullanılmıştır.

Tablo 2.4. Fuller eğrisine göre kumun elek analizi

Elek Çapı (mm)	Elekten Geçen (%)
4	100
2	70,7
1	50
0,5	35,4
0,25	25



Şekil 2.2. Kullanılan agreganın granülometri eğrisi

Şekil 2.2'de açıkça görüldüğü üzere kullanılan agreganın 0,25 mm'lik elekten geçen miktarı fuller eğrisine göre oldukça düşüktür. Bu çalışmada 0,25 mm'lik agregat ile mermer tozu ikame edilmesi planlandığından gözlemlenecek etkinin daha açık bir şekilde gözlemlenebilmesi açısından mevcut agregat yığını fuller eğrisine uygun olarak elenerek sınıflandırılmıştır.

2.1.4. Karışım Suyu

Deneyisel çalışma süresince, karışımların tasarımında ve deney numunelerinin üretiminde Elazığ şehir şebekesi içme suyu kullanılmıştır. Karışım suyu herhangi bir

bekletme, dinlendirme gibi işlemlere tabi tutulmadan şebekeden alındığı gibi TS EN 1008'e uygun olarak kullanılmıştır [42].

2.1.5. Kimyasal Katkı

Çalışmada kimyasal katkı olarak, Sika Yapı Kimyasalları AŞ'den temin edilen, yüksek performanslı bir hiper-akışkanlaştırıcı olan 3. Nesil beton ve harç katkısı Sika ViscoCrete Hi- Tech 30 ürünü kullanılmıştır [43]. Bu ürün yüksek oranda su azaltması yanında uzun işlenebilirlik sağlaması sebebiyle tercih edilmiştir. Bu özelliklerinin yanı sıra sık donatılı betonarme imalatında kullanımında da oldukça iyi performans sergilediği bilinmektedir. Tablo 2.5’de kimyasal katkıya ait özellikler verilmiştir.

Tablo 2.5. Kimyasal katkıya ilişkin teknik bilgiler [44].

Sika ViscoCrete Hi-Tech 30	
Görünüm/Renk	Açık kahverengi sıvı
Kimyasal yapı	Modifiye polikarboksilat esaslı polimer
Yoğunluk (kg/l, 20°C’de)	1.07-1.11
Ph değeri	3-7
Donma noktası (°C)	-9
Suda çözünabilir klorür (%)	Maks. 0.1, klorür içermez
Alkali miktarı (%Na ² O eşdeğeri olarak)	Maks. 4

2.2. Cam Elyaf

Deneylerde Camelsan Sanayi A.Ş. tarafından üretilen kırılmış 6 mm’ lik cam lif kullanılmıştır. Kullanılan cam elyafa ait teknik özellikler Tablo 2.6’ da verilmiştir.

Tablo 2.6. Cam Elyaf’a ait özellikler [45]

Lif Çeşidi	Lif Boyu (mm)	Lif Çapı (µm)	Özgül Ağırlık (mg/m ³)	Elastisite Modülü (MPa)	Çekme Mukavemeti(MPa)
Cam	6	13	2,68	72000	1700

2.2.1. Sodyum Sülfat

Deneylerde sodyum sülfat anhydrous kullanılmıştır. %99 saftır. Şekil 2.3’de görülmektedir.



Şekil 2.3. Deneylerde kullanılan sodyum sülfat

2.2.2. Karışım Oranları

Atık mermer tozu ve cam elyaf katkılı harçların sülfat dayanıklılığını araştırmak amacıyla 30 grup seri hazırlanmıştır.

Deneyisel çalışmada hazırlanan karışım oranları TS 802'de belirtilen karışım esaslarına göre hazırlanmıştır.

Örneklerin üretilmesi için kullanılacak kum 0-4 mm olarak ayarlanmış, ayrıca taze harcın işlenebilirliğini düzenlemek amacıyla, bağlayıcı miktarının %1'i oranında akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Cam elyaf katkılı numuneler (CE), mermer tozu katkılı numuneler (MT) olarak kodlandırılmıştır.

Bir metreküp harç içinde bulunan ağırlıkça malzeme miktarları Tablo 2.7'de verilmiştir.

Tablo 2.7. Deney için hazırlanan numunelere ait karışım oranları (kg/m³)

SERİLER	SERİNİN ADI	CAM ELYAF	MERMER TOZU	AGREGA (0-0,25)	AKIŞKANLAŞTIRICI	SU	ÇİMENTO	AGREGA (0,25-4)
1	CE0-MT0	0	0	407	4,45	221,4	450	1253,8
2	CE0-MT10		38,63	367	4,45	221,4	450	1253,8
3	CE0-MT20		77,25	325,4	4,45	221,4	450	1253,8
4	CE0-MT30		115,9	285,2	4,45	221,4	450	1253,8
5	CE0-MT40		154,5	243,6	4,45	222,8	450	1253,8
6	CE0-MT50		193,12	203,6	4,45	222,8	450	1253,8
7	CE0,25-MT0	0,25	0	407	4,45	221,4	450	1253,8
8	CE0,25-MT10		38,63	367	4,45	221,4	450	1253,8
9	CE0,25-MT20		77,25	325,4	4,45	221,4	450	1253,8
10	CE0,25-MT30		115,9	285,2	4,45	221,4	450	1253,8
11	CE0,25-MT40		154,5	243,6	4,45	222,8	450	1253,8
12	CE0,25-MT50		193,12	203,6	4,45	222,8	450	1253,8
13	CE0,5-MT0	0,50	0	407	4,45	221,4	450	1253,8
14	CE0,5-MT10		38,63	367	4,45	221,4	450	1253,8
15	CE0,5-MT20		77,25	325,4	4,45	221,4	450	1253,8
16	CE0,5-MT30		115,9	285,2	4,45	221,4	450	1253,8
17	CE0,5-MT40		154,5	243,6	4,45	222,8	450	1253,8
18	CE0,5-MT50		193,12	203,6	4,45	222,8	450	1253,8
19	CE0,75-MT0	0,75	0	407	4,45	221,4	450	1253,8
20	CE0,75-MT10		38,63	367	4,45	221,4	450	1253,8
21	CE0,75-MT20		77,25	325,4	4,45	221,4	450	1253,8
22	CE0,75-MT30		115,9	285,2	4,45	221,4	450	1253,8
23	CE0,75-MT40		154,5	243,6	4,45	222,8	450	1253,8
24	CE0,75-MT50		193,12	203,6	4,45	222,8	450	1253,8
25	CE1-MT0	1	0	407	4,45	221,4	450	1253,8
26	CE1-MT10		38,63	367	4,45	221,4	450	1253,8
27	CE1-MT20		77,25	325,4	4,45	221,4	450	1253,8
28	CE1-MT30		115,9	285,2	4,45	221,4	450	1253,8
29	CE1-MT40		154,5	243,6	4,45	222,8	450	1253,8
30	CE1-MT50		193,12	203,6	4,45	222,8	450	1253,8

2.2.3. Numunelerin Hazırlanışı

Çimento, mermer tozu, kum ve su deney öncesinde 1 g hassasiyetli terazide tartılarak hazırlanmıştır. Kimyasal katkı ve mikro liflerin tartılabilmesi için 0,001 g hassasiyetli terazi kullanılmıştır. TS 802 beton karışım esasları kullanılmıştır [46].

Numunelerde cam elyaf (CE), mermer tozu (MT) şeklinde kısaltılmıştır.

Öncelikle çimento, kum ve mermer tozu kuru bir şekilde mikserde karıştırılmıştır. Mikser çalışır konumdayken su ve kimyasal katkı eklenmiştir. Kuru karışım 1 dakika boyunca mikser içinde döndükten sonra su ve akışkanlaştırıcı katkı maddesi ilave edilmiştir ve yaklaşık 1 dakika karıştırılmıştır.

Lifli seriler için su ve kimyasal katkıdan önce lifler mikser çalışır durumdayken topaklanmaması için yavaş yavaş eklenmiştir.

Topaklaşmanın engellenmesi için karışım gözle kontrol edilmiş ve homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir.

Hazırlanan karışıma TS EN 12350-2'de tanımlandığı şekilde slump deneyi uygulanmıştır. Slump 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 ortalama (7 cm) ölçülmüştür. Şekil 2.4'de slump deneyi verilmiştir.



Şekil 2.4. Slump deneyi

Hazırlanan karışım önceden yağlanarak hazırlanan 40x40x160 mm boyutlu prizma kalıpların yarısını doldurulacak şekilde kalıplara yerleştirilmiş ve bir tokmak vasıtasıyla

sıkıştırılmıştır. Bu işlemin ardından kalıplar sarsma tablasına yerleştirilerek, harçlara hava kabarcıkları çıkışı azalana kadar ve ayrılmaya meydan vermeyecek şekilde sıkıştırma enerjisi uygulanmıştır.

Ayrıca hazırlanan karışımlar boy ölçümlerinin yapılması için, 25x25x285 mm boyutlu önceden pimleri yerleştirilmiş ve yağlanmış kalıplara, pimlerin altını iyice doldurmak suretiyle kalıbın yarısını dolduracak şekilde yerleştirilmiş ve sarsma tablasına yerleştirilerek, sıkıştırma enerjisi uygulanmıştır.

Her seri için 3'er adet prizmatik örnek hazırlanmıştır. Suda, sülfatta ve sülfatta ıslanma-kuruma şeklinde 3 ayrı kür ortamı hazırlanmıştır. 24 saat sonra kalıplardan çıkarılan örnekler 28 gün su kürüne tabi tutulmuştur. Su kürünü tamamlayan numuneler 3 adedi ayrı bir yerde 150 gün boyunca standart su kürüne, 3 adedi 150 gün boyunca %5'lik sülfatlı (Na_2SO_4) su kürüne bırakılmıştır. Geriye kalan 3 adedi de %5'lik sülfatlı (Na_2SO_4) suda ıslanma kuruma kürüne tabi tutulmuştur. Sülfatın numunelerin her yerine aynı şekilde nüfuz edebilmesi için, numunelerin arasına çubuklar yerleştirilmiştir. Ayrıca sülfatlı suyun başlangıç pH'ı 8,5 olup, haftada bir pH ölçümü yapılarak sülfatlı su eklenmesi yolu ile bu değerde sabitlenmesi sağlanmıştır.



Şekil 2.5. Harç karıştırma mikseri

2.2.4. Sertleşmiş Beton Deneyleri

2.2.4.1. Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi

Bu deney için 40x40x160 mm boyutlarında numuneler hazırlanmış, TS 196-1'e uygun olarak eğilmede çekme dayanımı tayini deneyi yapılmıştır. ELE Autotest test cihazında deney yapılmış, uygulanan yükleme hızı 0,05 N/sn olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 2.6. Eğilmede çekme dayanımı

2.2.4.2. Basınç Dayanımı Deneyi

40x40x160 mm boyutlarındaki örnekler üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulduktan sonra, elde edilen parçalara döküm yönüne dik olacak şekilde basınç deneyi uygulanmıştır. Basınç dayanımlarının tespiti için ELE Autotest 3000 modelinde 3000 kN kapasiteli dijital göstergeli hidrolik pres kullanılmıştır. Kullanılan pres Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Eğilme sonrası basınç deneyinin yapılması

2.2.4.3. Kılcal (Kapiler) Su Emme Deneyi

Kılcal su emme deneyi için etüv kurusu 40x40x160 mm'lik numunelerin yan yüzeyleri tamamen parafin ile kaplanarak sadece alt yüzeyinden su emmesi sağlanmıştır [47]. Deney süresince beton numunenin tabanından itibaren 5 mm su içerisinde kalması sağlandı. Numuneler belirli zamanlarda (0, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360, 1440 dak.) tartılarak kapiler su emme katsayıları 2.1 no'lu denklem kullanılarak hesaplandı [48],[49]. Şekil 2.8'de kapiler su emme deney düzeneği gösterilmiştir.

$$K = \frac{Q}{A \times \sqrt{t}} \quad (2.1)$$

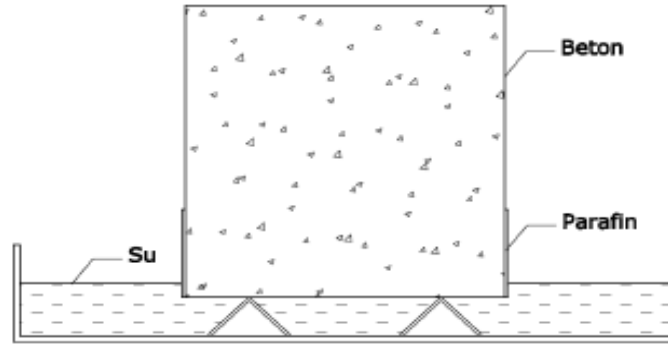
denklemden yer alan;

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

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

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

t = Zaman, (s) parametrelerini ifade etmektedir.



Şekil 2.8. Kapiler su emme deney düzeneği

2.2.4.4. Porozite, Birim Hacim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deneyi

Bu deneyler için 40x40x160 mmlik prizmatik numuneler hazırlanmıştır. Numuneler değişmez ağırlığa gelene kadar su içinde bekletilmiştir. Su altındaki ağırlıkları su altında ölçüm yapabilen tartı ile tartılmıştır. Sudan çıkarılıp doymun yüzey kuru hale getirilip tartılmıştır. Numuneler etüve bırakılarak değişmez ağırlığa gelene kadar kurutulmuştur. Etüvden çıkan numuneler tartılarak etüv kurusu ağırlıkları bulunmuştur.

Tartımlar sonucunda elde edilen değerler aşağıdaki formüllerde yerlerine konularak bulunmuştur.

$$\text{Su Emme (\%)} = \frac{W_{\text{dyk}} - W_0}{W_0} \times 100 \quad (2.2)$$

$$\text{Görünür Porozite (\%)} = \frac{W_{\text{dyk}} - W_0}{W_{\text{dyk}} - W_1} \times 100 \quad (2.3)$$

$$\text{Özgül Ağırlık (gr/cm}^3\text{)} = \frac{W_0}{W_{\text{dyk}} - W_1} \times 100 \quad (2.4)$$

$$\text{Numunenin Hacmi} = \frac{W_{\text{dyk}} - W_1}{998} \times 1000 \quad (2.5)$$

$$\text{Birim Hacim Ağırlık} = \left(\frac{W_0}{H} \right) \quad (2.6)$$

W_{dyk} = Suya doymun kuru yüzey ağırlığı (gr)

W_0 = Etüv kurusu ağırlık (gr)

W_1 = Su altındaki ağırlık (gr)

H = Numunenin hacmi (cm³)

2.3.1. Islanma-Kuruma Deneyi

Uygulanan ıslanma-kuruma deneyinde numuneler için öncelikle %5'lik sodyum sülfat çözeltisi hazırlanmıştır. Islanma-kuruma deneyine tabi tutulacak numuneler üzerinde bu deneye tabi tutulmadan önce deney sonrası karşılaştırma amaçlı birim hacim ağırlık, kılcal su emme ve porozite tayini gibi bazı ön testler uygulanmıştır. Daha sonra bu numuneler hazırlanan sülfat çözeltisine yerleştirilerek ıslanma etkisine bırakılmıştır.

Numunelere bu şekilde haftada bir periyodik olarak ıslanma ve kuruma çevrimi yapılmıştır. Numuneler 50 °C sıcaklıktaki etüve yerleştirilerek ıslanma-kuruma çevrimi yapılmıştır.

Kullanılan etüv Şekil 2.9'da görülmektedir. Bu çevrim sonrasında numuneler üzerinde porozite, birim hacim ağırlık, kılcal su emme, eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen veriler laboratuvar şartlarında aynı süre boyunca bekletilen numunelerden elde edilen sonuçlarla kıyaslanarak bulgular kaydedilmiştir. 150 gün sülfatta ıslanma-kuruma çevrimi etkisine maruz kalan numunelerin ASTM C1012-87'de belirtilen esaslar çerçevesinde 1,2,3,4,8,13,15,17,21 haftalar şeklinde ölçümü yapılmıştır.



Şekil 2.9. Islanma-kuruma çevriminde kullanılan etüv

2.3.2. Sülfat Etkisi (Sülfat Hücumu) Deneyi

150 gün sürekli sülfat etkisine maruz kalan numunelerin ASTM C1012-87'de belirtilen esaslar çerçevesinde 1,2,3,4,8,13,15,17,21 haftalar şeklinde ölçümü yapılmıştır.

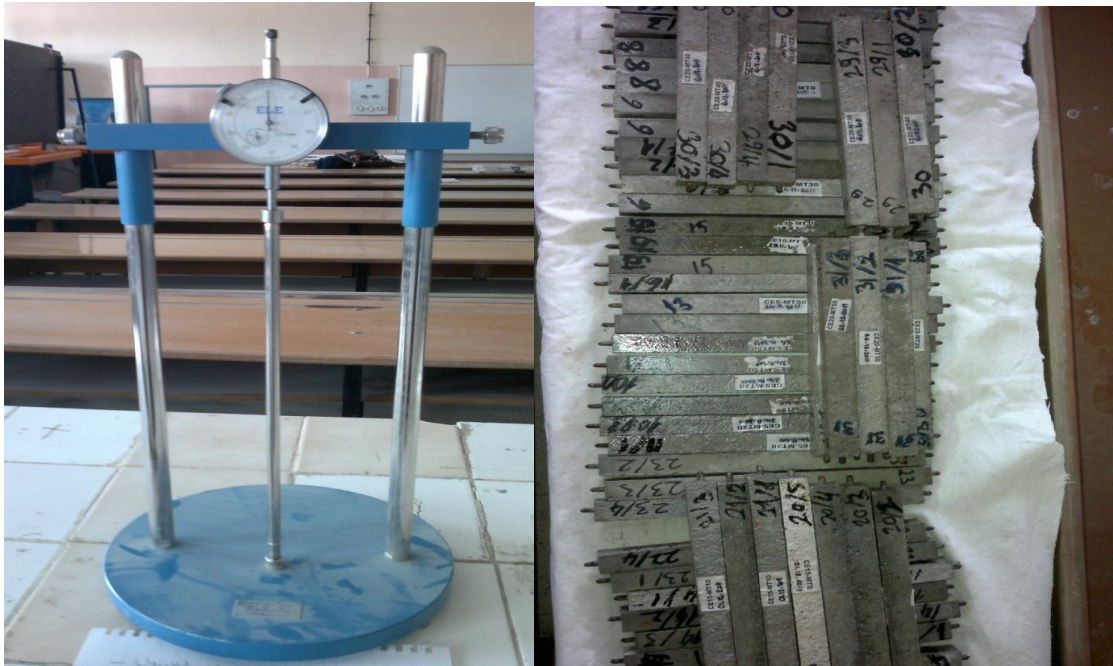
2.3.3. Boy Ölçümü Deneyi

Deneyisel çalışma kapsamında, 25x25x285 mm boyutlarındaki harç çubuğu örneklerinin boy değişimleri 150 gün boyunca ASTM C1012-87'de belirtilen esaslar çerçevesinde 1,2,3,4,8,13,15,17,21. haftalar şeklinde bir ELE marka 0,01 mm hassasiyetli komparatör ile ölçülmüştür.

$$\varepsilon = (\text{son ölçüm} - \text{ilk ölçüm}) * 0.01 / 285 * 100 \quad (2.7)$$

formülü ile bulunmuştur.

Boy değişimi deneyinin yapıldığı düzenek şekilde görülmektedir. Şekil 2.10'da boy değişimi ölçümünde kullanılan düzenek ve numuneler gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Boy değişimi ölçümünde kullanılan düzenek ve numuneler

2.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

SEM analizleri, su numuneleri, sürekli sülfat ve sülfatta ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılan numuneler üzerinde yapılmıştır. Her üç kür içinde analiz yapılmış ve numuneler ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Normal şartlar altında deneyleri yapılmış

betonlardan alınan numunelerde içyapıya ve fiberlerin durumuna bakılmış ve bu numuneler kontrol numuneleri olarak kabul edilerek, üzerinde deneyleri yapılmış harçlardan çıkarılmış numuneler ile karşılaştırmalar yapılmıştır.

Fırat Üniversitesi Elektron Mikroskopi Laboratuvarı (FÜEM lab.) elektron tarama mikroskobu kullanılarak analiz görüntüleri alınmıştır.



Şekil 2.11. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analiz ünitesi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Basınç Dayanımı Deneyi

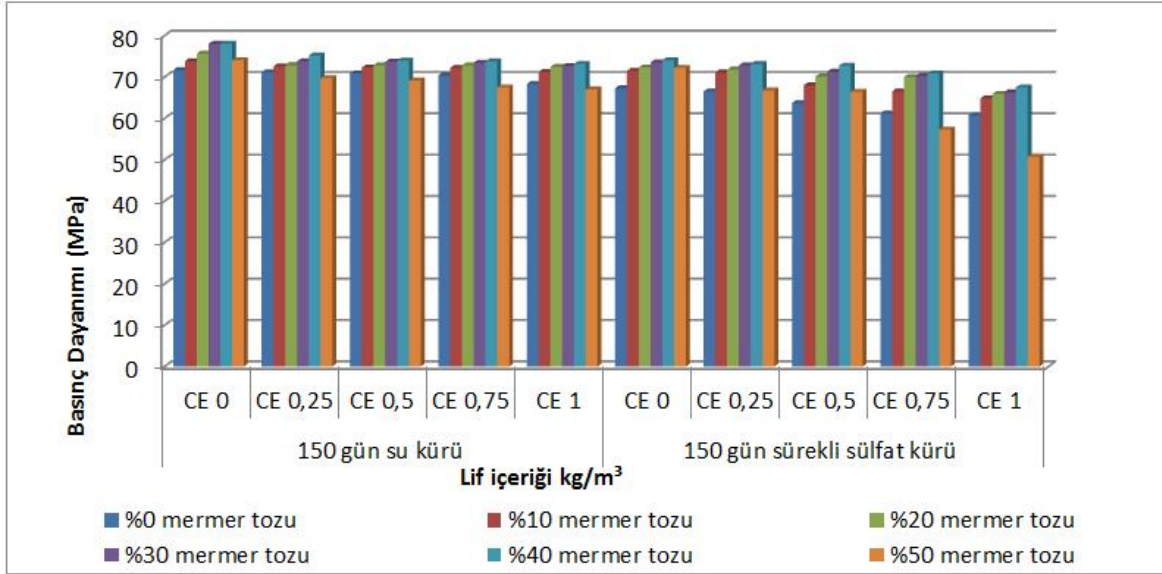
Tüm numuneler ait deney sonuçları Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1. Eğilmede çekme deneyi sonrası su, sülfat, ıslanma-kuruma numunelerinin basınç dayanımı değerleri

	Numuneler	150 gün Su kürü sonrası basınç dayanımı	150 gün sürekli sülfat etkisi basınç dayanımı	150 gün sülfatta ıslanma kuruma çevirimi sonrası basınç dayanımı
1	CE0-MT0	71,71	67,3	53,9
2	CE0-MT10	73,86	71,52	54,74
3	CE0-MT20	75,73	72,33	64,68
4	CE0-MT30	78,06	73,58	69,01
5	CE0-MT40	78,13	74,06	69,09
6	CE0-MT50	74,12	72,24	59,72
7	CE0,25-MT0	71,2	66,56	52,42
8	CE0,25-MT10	72,61	71,14	53,88
9	CE0,25-MT20	72,91	71,84	61,19
10	CE0,25-MT30	73,83	72,88	62,21
11	CE0,25-MT40	75,23	73,16	64,35
12	CE0,25-MT50	69,77	66,79	56,66
13	CE0,5-MT0	70,92	63,73	49,56
14	CE0,5-MT10	72,31	68,03	53,82
15	CE0,5-MT20	72,89	70,16	59,3
16	CE0,5-MT30	73,73	71,32	60,83
17	CE0,5-MT40	74,03	72,77	63,1
18	CE0,5-MT50	69,17	66,45	50,9
19	CE0,75-MT0	70,43	61,25	48,22
20	CE0,75-MT10	72,23	66,58	50,36
21	CE0,75-MT20	72,86	70,01	55,4
22	CE0,75-MT30	73,51	70,28	56,91
23	CE0,75-MT40	73,8	70,93	60
24	CE0,75-MT50	67,56	57,3	50,56
25	CE1-MT0	68,33	60,76	31,04
26	CE1-MT10	71,24	64,88	45,24
27	CE1-MT20	72,49	65,91	55,2
28	CE1-MT30	72,66	66,32	55,83
29	CE1-MT40	73,22	67,54	58,99
30	CE1-MT50	67,05	50,79	43,36

Harç serilerinin basınç dayanımı deney sonuçları, katkı oranlarına ve kür şekline göre Şekil 3.1, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da grafikler halinde sunulmuştur. 150 günlük su kürü

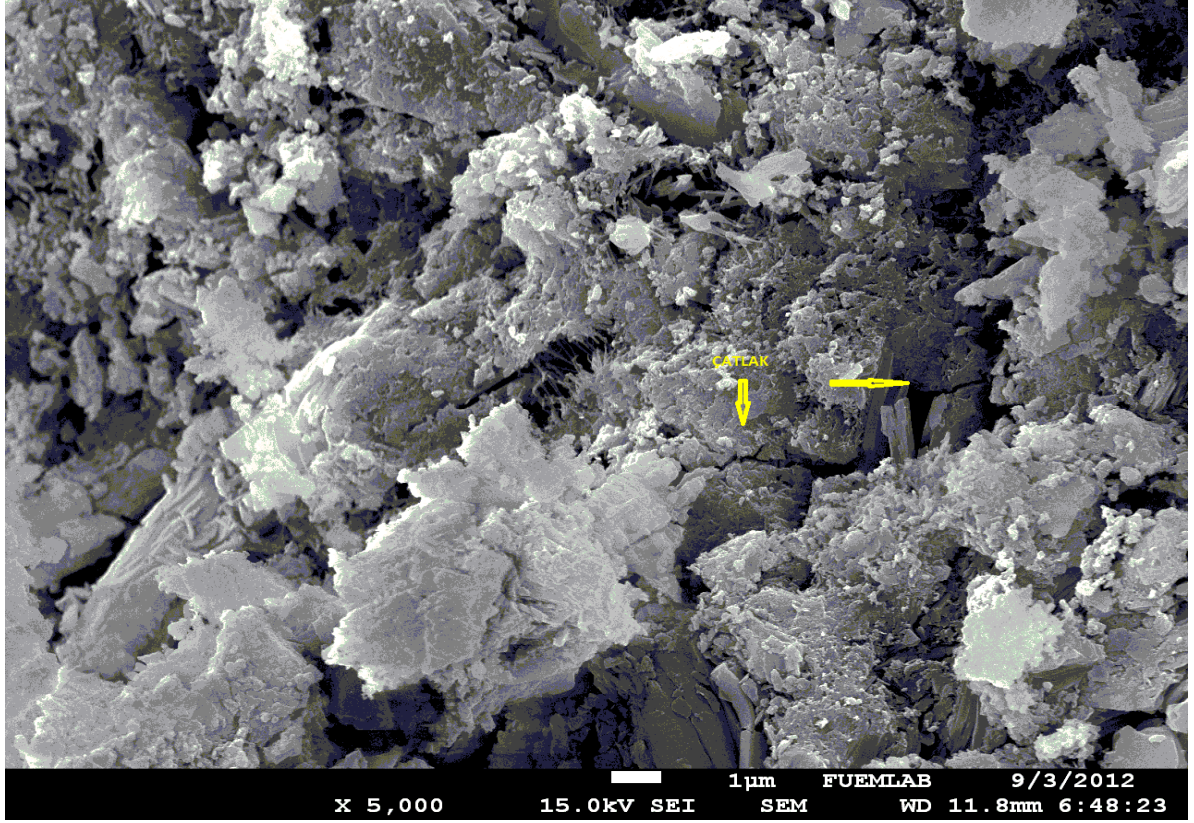
ve 150 günlük sürekli sülfat kürü sonrasında uygulanan basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. 150 günlük su kürü ve 150 günlük sürekli sülfat kürü sonrası basınç dayanımı

Basınç dayanımı grafikleri incelendiğinde, 150 gün su kürü uygulanan numunelerde mermer tozu oranının artmasıyla belli bir değere kadar basınç dayanımı artmıştır. Numuneler sülfat kürü sonrası daha çok zarar görmüş ve kontrol harçlarına göre dayanımları düşmüştür.

Su kürü uygulanan numunelerde, cam elyaf içermeyen serilerde mermer tozu katkısıyla basınç dayanımı, %40 mermer tozu katkısına kadar artış göstermiştir. Tüm mermer tozu ikamelerinde basınç dayanımı değerlerinde artış gözlenmiştir. Kontrol grubuna göre mermer tozunun artışı boşlukları doldurarak dayanım artışı sağlamış ve en yüksek dayanım CE0-MT40 kodlu numunede yani %40 mermer tozunun olduğu seride gözlenmiştir. Şekil 3.2'de elyafın olmadığı mermer tozu oranının %50 olduğu seriye ait SEM analizi sonucu görülmektedir. numunede çatlaklar oluşmuştur. Şekil 3.3'de SEM görüntüsü ve EDX analizi sonucu görülmektedir.

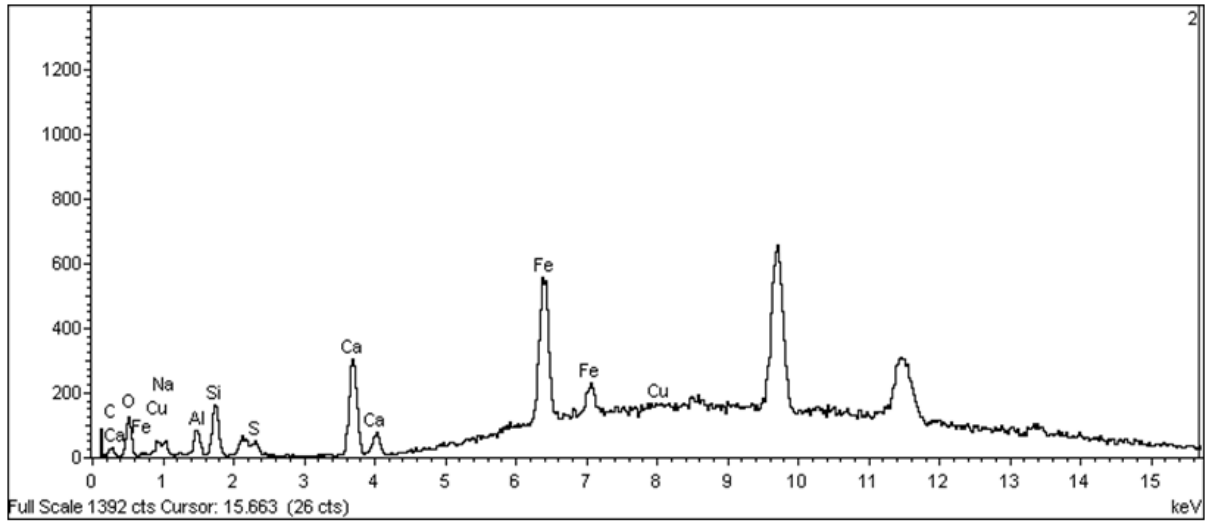
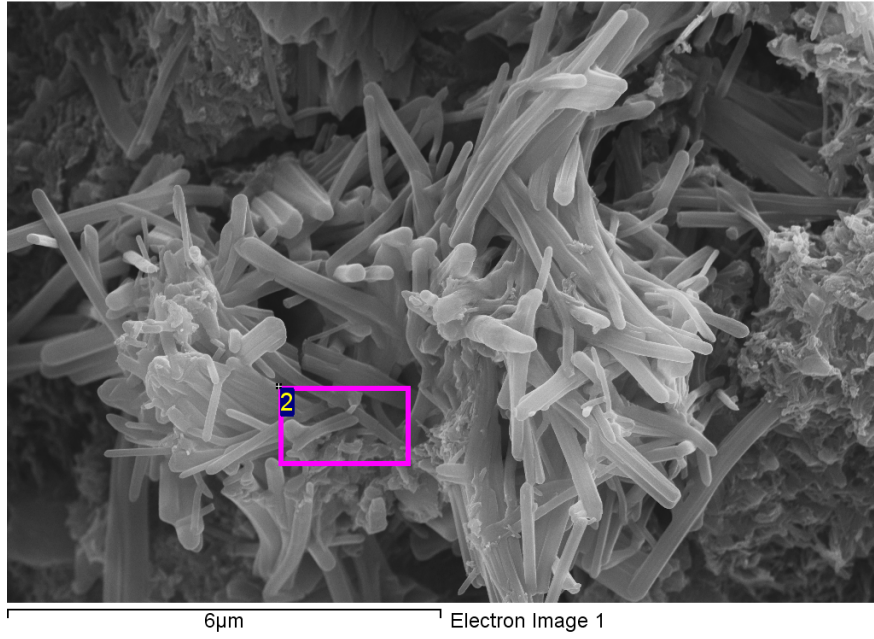


Şekil 3.2. Elyafsız %50 mermer tozu içeren harç numunesine ait SEM görüntüsü

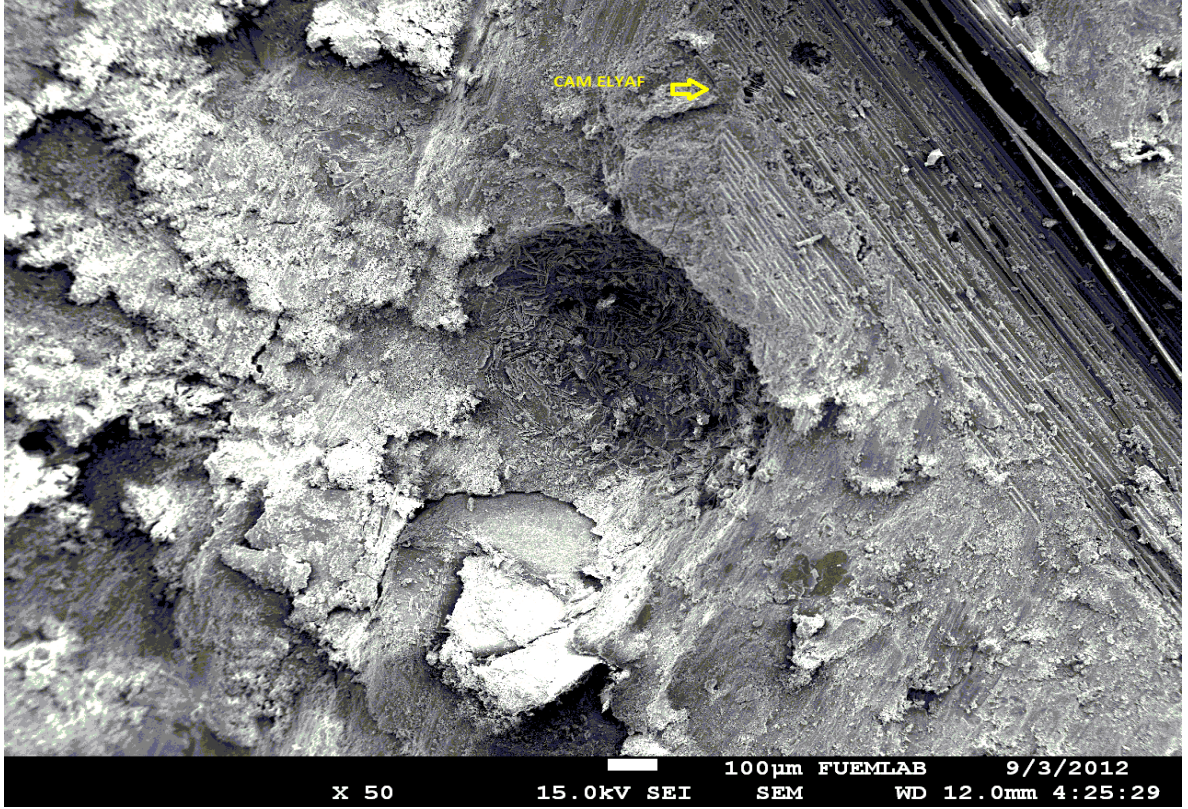
Cam elyafın $0,25 \text{ kg/m}^3$ olduğu seride cam elyafın olmadığı seriye göre mermer tozu yüzdesinin artışıyla dayanımda artış meydana gelmiştir. Lif oranı arttıkça basınç dayanımında düşüş gözlenmektedir. Ahmet ve ark. (2007), benzer sonuçlar bildirmiştir [19]. Yıldız S. ve ark. yaptıkları çalışmada cam lif katkısının basınç dayanımını düşürdüğünü söylemişlerdir[17]. En yüksek basınç dayanımı CE0-MT40 nolu seride, %40 mermer tozu oranında gözlenmiştir.

Cam elyafın $0,5 \text{ kg/m}^3$ ve $0,75 \text{ kg/m}^3$ olduğu seride en yüksek dayanıma %40 mermer tozuyla ulaşılmıştır.

Cam elyafın en yoğun olduğu 1 kg/m^3 katkılı seride CE1-MT40 nolu seride %40 mermer tozu oranı katısıyla en yüksek dayanım değeri gözlenmiştir. Genel olarak mermer tozu yüzdesinin artışı dayanımda artışı sağlamıştır. CE1-MT50 nolu seride Şekil 3.4'de görüldüğü gibi lif artışı topaklanmaya neden olmuştur. Lifin topaklaşması dayanımda düşüşe neden olmuştur. Cam elyafın harç ile yeterli aderans sağlayamadığından harç içinde boşluklar meydana gelmiştir. Buda lif artışıyla basınç dayanımında azalmalara sebep olmaktadır.



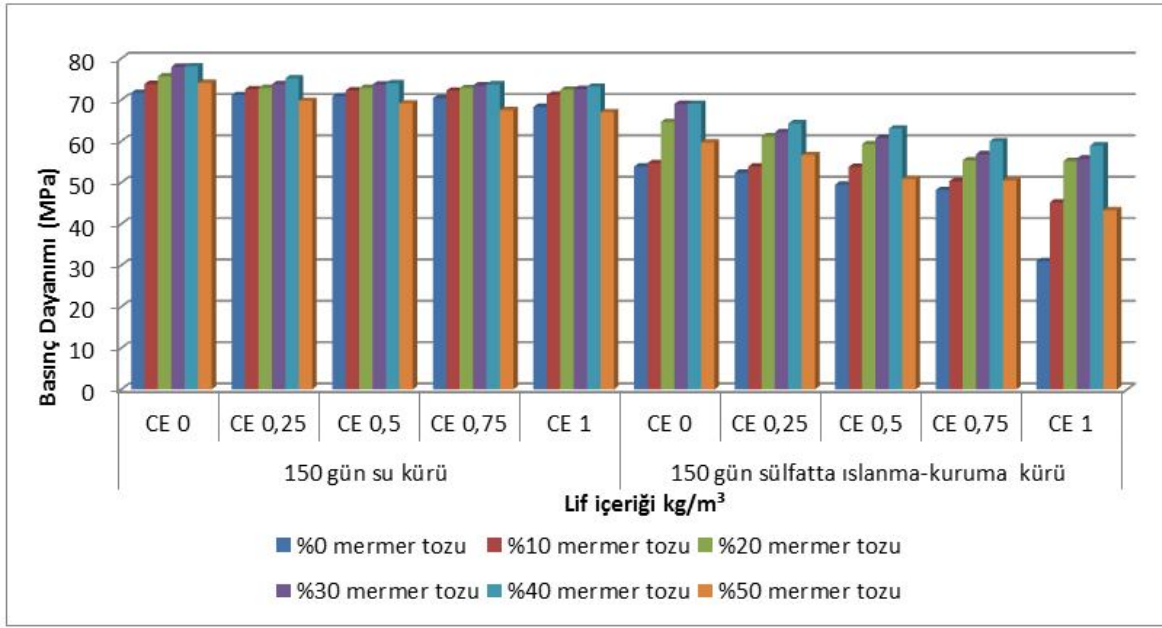
Şekil 3.3. Cam elyafın olmadığı %50 mermer tozu içeren numunede ıslanma-kuruma çevrimi sonrası SEM ve EDX sonucu



Şekil 3.4. CE1-MT50 kodlu seri, 1 kg/m³ cam lif ve %50 mermer tozu içeren harç numunesine ait SEM görüntüsü

150 gün sürekli sülfatta kalan numunelerin suda kürlenmiş numunelere göre, basınç dayanımları daha düşüktür. Bunun nedeni sülfatta kalan numunelerin sülfatın zararlı etkisine maruz kalmasının bir sonucudur [39]. Sülfatların yıpratıcı etkisi, genel olarak, beton blokların kenarından ve köşelerinden başlamaktadır. Daha sonra, bu etki, betonun iç kısımlarına doğru yoğunlaşarak, beton yüzeyinin tabaka tabaka büyük parçalar halinde parçalanmasına neden olmaktadır [32]. En yüksek basınç dayanımına CE0-MT40 serisinde, en düşük basınç dayanımına ise CE1-MT50 serisinde ulaşılmıştır. CE1-MT50 serisinde, CE0-MT40 serisine göre %31,42 oranında dayanım kaybı söz konusudur. Şekil 3.7'de CE1-MT0 serisine ait SEM analizi görüntüsünde de lifler de kopma, yerinden çıkma ve çatlaklar gözlenmektedir.

Numuneler sülfat kürü sonrası daha çok zarar görmüş ve kontrol harçlarına göre dayanımları düşmüştür.



Şekil 3.5. 150 günlük su kürü ve 150 günlük sülfatta ıslanma-kuruma çevrimi sonrası basınç dayanımı

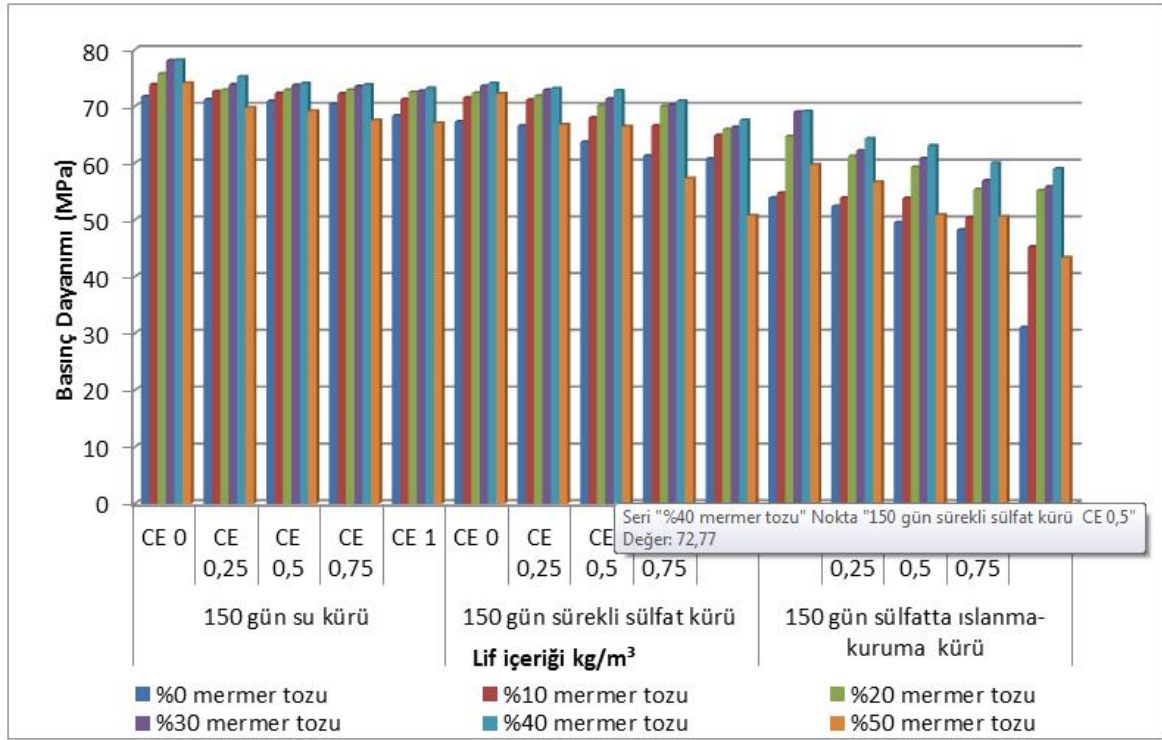
Şekil 3.6'ya göre üç farklı kür ortamından sonra basınç dayanımları karşılaştırıldığında en yüksek dayanım değerlerinin 150 gün suda bekletilen numunelere ait olduğu en düşük basınç dayanımı gösteren numunelerin ise ıslanma-kuruma numunelerine ait olduğu görülmektedir. Bununla beraber sürekli sülfat etkisindeki numunelerin su numunelerine göre basınç dayanımları azalmakla beraber ani bir düşüş gözlenmemiştir. Mermer tozunun filler malzeme olarak kullanımı, boşlukları doldurduğundan dayanımda ani bir düşüşün olmasını engellemiştir.

Sülfatta ıslanma-kuruma numunelerinde cam elyafın olmadığı ve cam elyafın olduğu serilerde %40 mermer tozu içeren numunelerde, en yüksek dayanıma ulaşılmıştır.

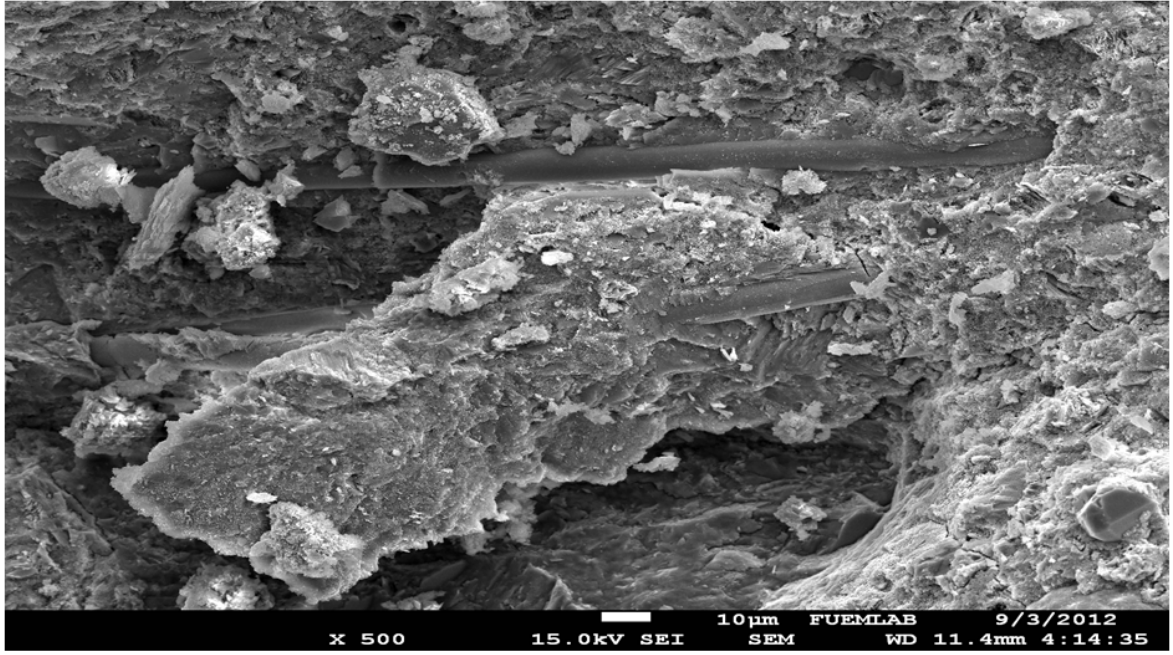
Islanma-kuruma çevrimine maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımlarındaki azalma sürekli sülfat etkisindeki numunelerdekenden genellikle daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Yazıcı (2006), yaptığı çalışmada yüksek fırın cürufu katkılı harçların sülfat çözeltisinde sürekli sülfatta kalan numunelere göre sülfatta ıslanma-kuruma çevrimi yaptırılan numunelerde basınç dayanımı daha düşüktür bu durum deney sonuçları ile uyum göstermektedir [50].

Islanma – kuruma çevrimi sonrası numunelerde çatlaklar ve genleşmeler gözlenmiştir. 150 günlük ıslanma-kuruma çevrimi sonrasında, su numunelerine oranla basınç dayanımlarında azalmalar gözlenmiştir.

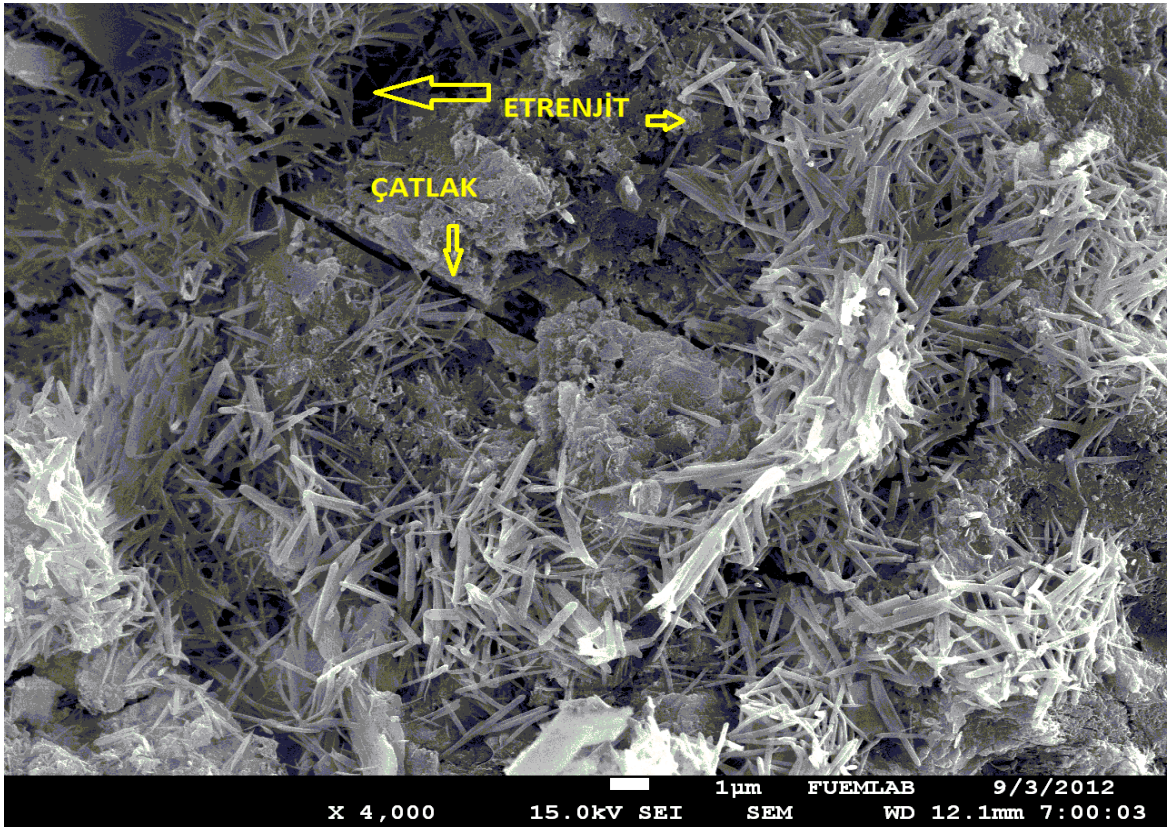
Islanma kuruma çevrimi sonrası en yüksek basınç dayanımı CE0-MT40 nolu seride, en düşük dayanım ise CE1-MT0 nolu seride gözlenmiştir. Basınç dayanımındaki azalma %55,07 oranındadır. Şekil 3.8'de CE0-MT0 nolu seriye ait SEM analizi görüntüsünden etrenjit yapısının bol miktarda gözlendiği ve çatlak oluşumundan dolayı basınç dayanımının düştüğü sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.6. 150 günlük su kürü, 150 günlük sürekli sülfat kürü ve 150 günlük ıslanma-kuruma çevrimi sonrası basınç dayanımı



Şekil 3.7. Cam elyafın 1 kg/m^3 mermer tozunun olmadığı numuneye ait SEM görüntüsü



Şekil 3.8. Elyafsız ve mermer tozu olmayan CE0-MT0 olduğu numuneye ait SEM görüntüsü

3. 2. Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi Sonuçları

Eğilmede çekme dayanımı numunelerine ait deney sonuçları Tablo 3.2'de verilmektedir.

Tablo 3.2. Eğilmede çekme dayanımı numunelerinin deney sonrası değerleri

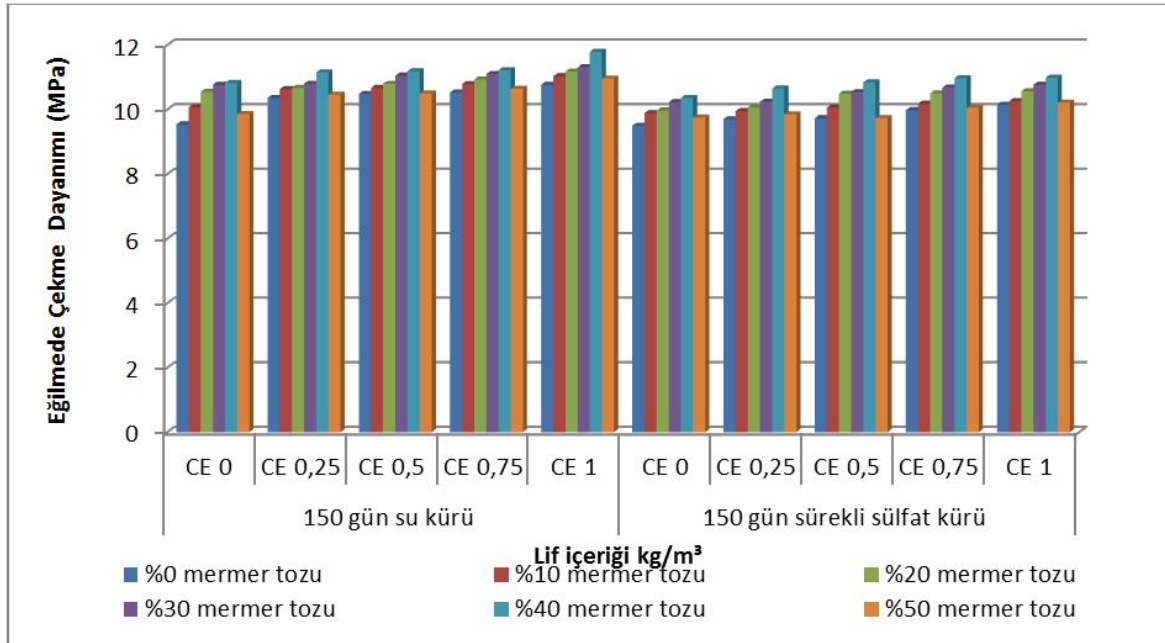
	Numuneler	150 gün Su kürü sonrası eğilmede çekme dayanımı	150 gün sürekli sülfat etkisi eğilmede çekme dayanımı	150 gün sülfatta ıslanma kuruma çevirimi sonrası eğilmede çekme dayanımı
1	CE0-MT0	9,54	9,5	2,39
2	CE0-MT10	10,07	9,89	5,41
3	CE0-MT20	10,55	9,97	5,83
4	CE0-MT30	10,77	10,23	6,38
5	CE0-MT40	10,82	10,36	6,55
6	CE0-MT50	9,86	9,75	6,01
7	CE0,25-MT0	10,36	9,7	5,23
8	CE0,25-MT10	10,63	9,95	6,27
9	CE0,25-MT20	10,67	10,06	6,69
10	CE0,25-MT30	10,8	10,24	7,64
11	CE0,25-MT40	11,15	10,65	7,88
12	CE0,25-MT50	10,46	9,85	7,18
13	CE0,5-MT0	10,48	9,73	5,63
14	CE0,5-MT10	10,67	10,06	6,47
15	CE0,5-MT20	10,8	10,49	7,73
16	CE0,5-MT30	11,05	10,54	8,06
17	CE0,5-MT40	11,19	10,84	8,11
18	CE0,5-MT50	10,5	9,96	7,53
19	CE0,75-MT0	10,53	9,98	5,93
20	CE0,75-MT10	10,79	10,18	6,48
21	CE0,75-MT20	10,93	10,5	8,19
22	CE0,75-MT30	11,1	10,68	8,39
23	CE0,75-MT40	11,22	10,97	8,65
24	CE0,75-MT50	10,64	10,05	7,59
25	CE1-MT0	10,77	10,15	6,19
26	CE1-MT10	11,03	10,26	7,16
27	CE1-MT20	11,18	10,57	9,76
28	CE1-MT30	11,31	10,77	10,02
29	CE1-MT40	11,79	10,99	10,83
30	CE1-MT50	10,96	10,21	9,71

Cam elyaf ve mermer tozunun artmasıyla eğilmede çekme dayanımı artmıştır. En yüksek dayanım CE1-MT40 değerinden elde edilmiştir. En düşük eğilmede çekme dayanımı değeri ise CE0-MT0 elyafsız ve mermer tozu olmayan seride görülmüştür. Lif

takviyesinin eğilmede çekme dayanımı değerini arttırdığını benzer çalışmalarda da gözlenmiştir Yıldız (2008), çalışmasında lif takviyesinin eğilmede çekme dayanımı değerini arttırdığını belirtmiştir [16]. Yaprak ve ark. yaptıkları çalışmada cam ve çelik lifin betonun eğilmede çekme dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir [51].

Su numunelerinde elyafsız seride mermer tozunun artışıyla eğilme dayanımı artmıştır, fakat %40 mermer tozunun olduğu değer optimum miktardır. %50 mermer tozu katkısı %40 mermer tozu ikamesine göre azalma göstermiştir. Elyafsız seride en yüksek dayanım değeri CE0-MT40 nolu seridir. En düşük değer ise CE0-MT0 serisidir. Eğilme dayanımında MT0 ile MT40 serileri arasında %13,41 artış gözlenmiştir.

Cem elyafın $0,25 \text{ kg/m}^3$ olduğu seride en yüksek dayanım CE0,25-MT40 serisindedir. En düşük dayanım değeri ise CE0,25-MT0 numunesidir. Dayanımda bu iki numune arasında %7,62 artış gözlenmiştir. Lifin, eğilmede çekme dayanımına olan etkisiyle elyaf bulunan serilerin elyaf katkısı olmayan serilere göre dayanımları artmıştır.



Şekil 3.9. Su ve sürekli sülfat kürü numunelerinin eğilmede çekme dayanımı

$0,50 \text{ kg/m}^3$ olan seride en yüksek değer CE0,5-MT40 numunesi iken en düşük değer CE0,5-MT0 serisidir. Dayanımdaki artış %6,77 dür. $0,75 \text{ kg/m}^3$ olan seride en yüksek değer CE0,75-MT40, en düşük değer CE0,75-MT0 numunesidir. Dayanımda %6,55 artış gözlenmiştir.

1 kg/m^3 olan seride en yüksek değer CE1-MT40, en düşük değer CE1-MT0 numunesidir. Dayanımda %9,47 azalma gözlenmiştir.

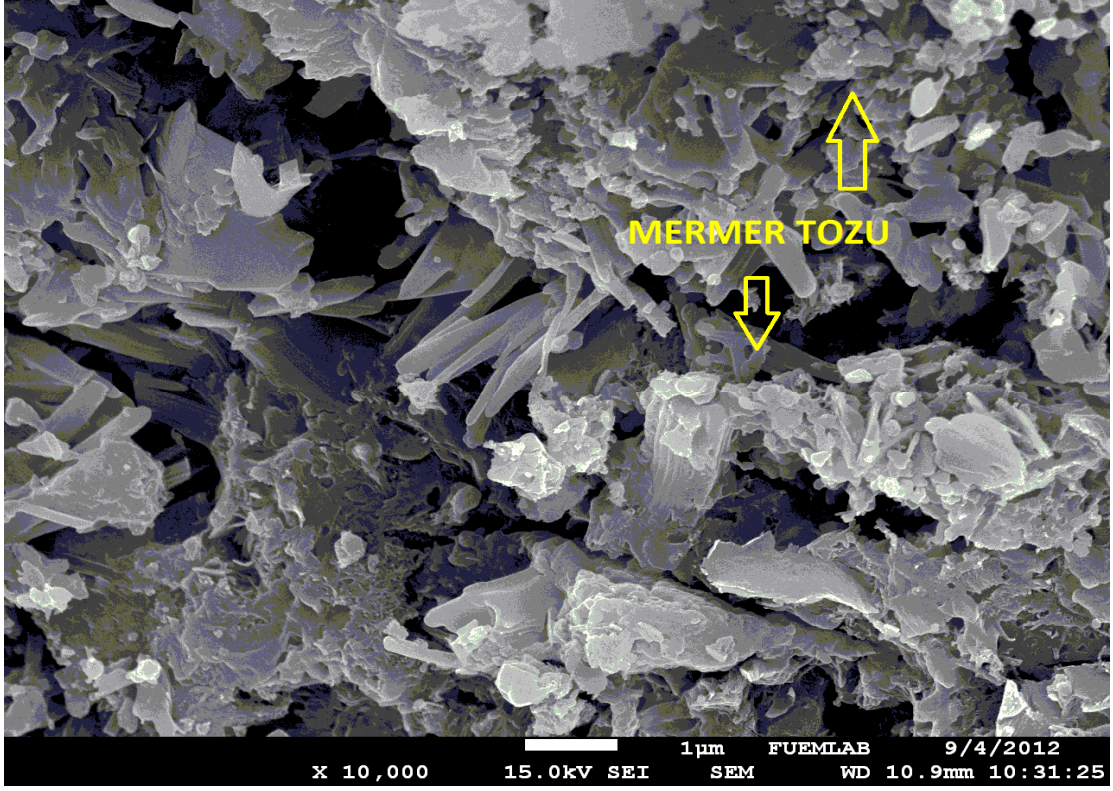
Sürekli sülfat çözeltisinde kalan numunelerde en yüksek değer CE1-MT40 serisinde, ıslanma-kuruma çevirimine maruz bırakılan numunelerde ise en yüksek değer CE1-MT40 serisindedir. Su numunelerine oranla dayanımlarında düşüş gözlenmiştir. Dayanım düşüşünü sülfatın verdiği zararlı etkiye bağlayabiliriz.

Sürekli sülfat çözeltisinde kalan numunelerde lifsiz seride en yüksek dayanımı CE0-MT40 değeri, en düşük değeri ise CE0-MT0 değeri göstermiştir. Elyafsız seride mermer tozu oranının artışıyla belirli bir seviyeye kadar dayanımı artmıştır. Dayanımda azalma yüzdesi %9,05 dir. 0,25 kg/m³ elyaf katılan seride en yüksek dayanımı CE0,25-MT40 değeri, en düşük değeri ise CE0,25-MT0 değeri göstermiştir. %9,79 dayanım artışı meydana gelmiştir. 0,5 kg/m³ elyaf olan seride en yüksek dayanımı CE0,5-MT40 değeri, en düşük değeri ise CE0,5-MT0 değeri göstermiştir. %11,40 dayanım artışı meydana gelmiştir. 0,75 kg/m³ elyaf olan seride en yüksek dayanımı CE0,75-MT40 değeri, en düşük değeri ise CE0,75-MT0 değeri göstermiştir. %9,91 dayanım artışı meydana gelmiştir. 1 kg/m³ elyaf katılan seride en yüksek dayanımı CE1-MT40 değeri, en düşük değeri ise CE1-MT0 değeri göstermiştir. %8,27 dayanım artışı meydana gelmiştir.

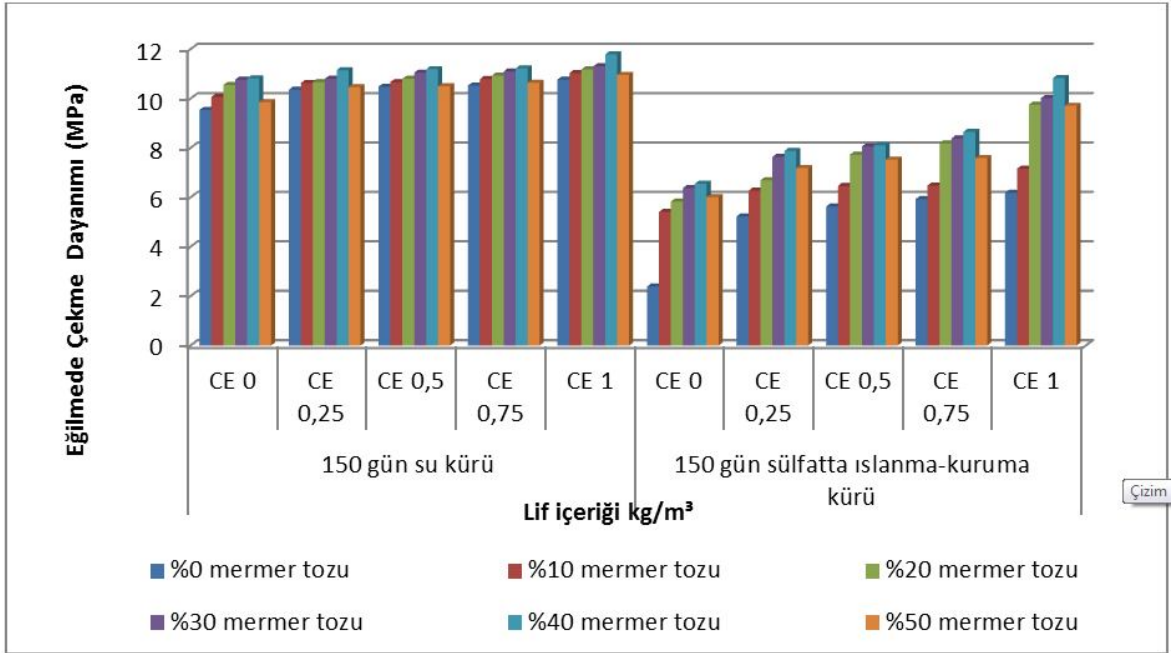
Sülfatta ıslanma-kuruma çevrimi deneyi uygulanan numunelerde mermer tozu %40 değerine kadar artmış ve %50 mermer tozu ikamesi katılan numunede düşüş gözlenmiştir.

0,25 kg/m³ olduğu serilerde %40 değerinde en yüksek dayanımı ve mermer tozu olmayan seride ise en düşük dayanıma ulaşılmıştır. %50,66 dayanım artışı gözlenmiştir. 0,50 kg/m³ olan serilerde 0,25 kg/m³ serisiyle paralellik göstermiştir. %44,04 dayanım artışı gözlenmiştir.

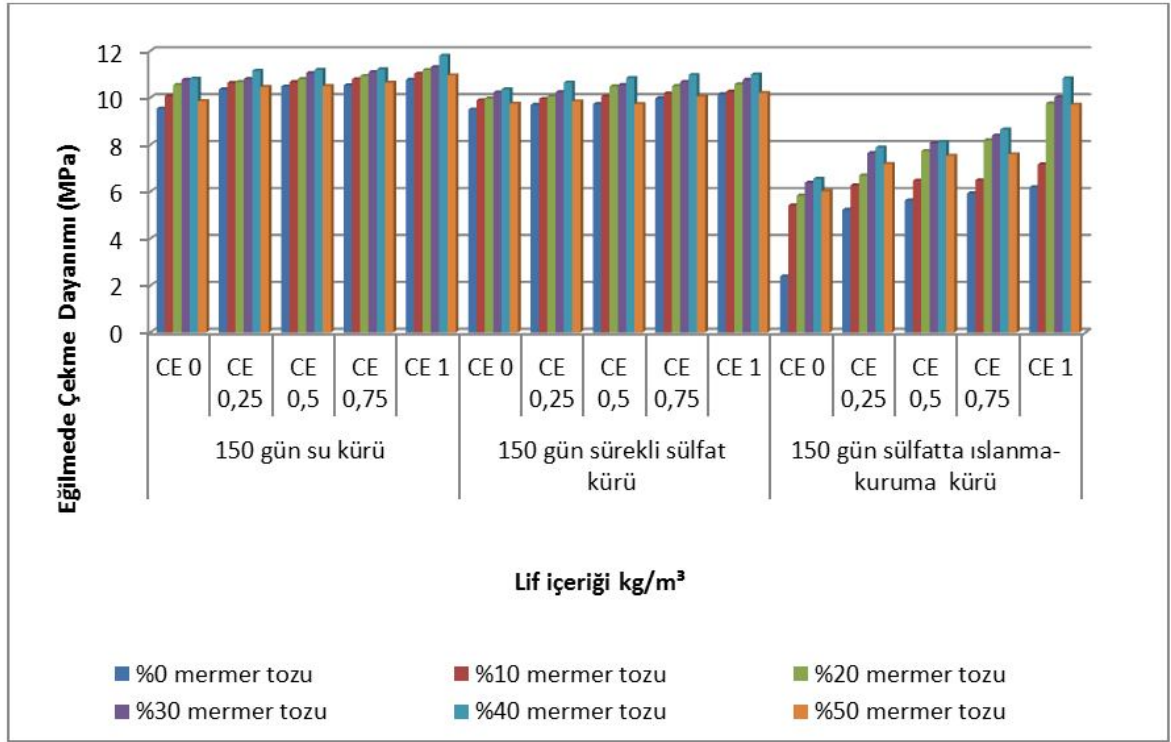
0,75 kg/m³ elyaf içeren seride %40 mermer tozu içeriğinde en yüksek dayanıma ulaşmıştır. En düşük ise mermer tozu olmayan seridir. Dayanımda %45,86 artış gözlenmiştir. 1 kg/m³ elyaf içeren seride %40 mermer tozu içeriğinde en yüksek dayanıma ulaşmıştır. En düşük ise mermer tozu olmayan seridir. Dayanım artışı %74,95 dir. Mermer tozunun artışıyla boşluklar dolmuş ve dayanımda artış gözlemlenmiştir. Şekil 3.10'da SEM resminde mermer tozunun boşlukları doldurduğu gözlenmektedir.



Şekil 3.10. Mermer tozlarının boşlukları doldurması

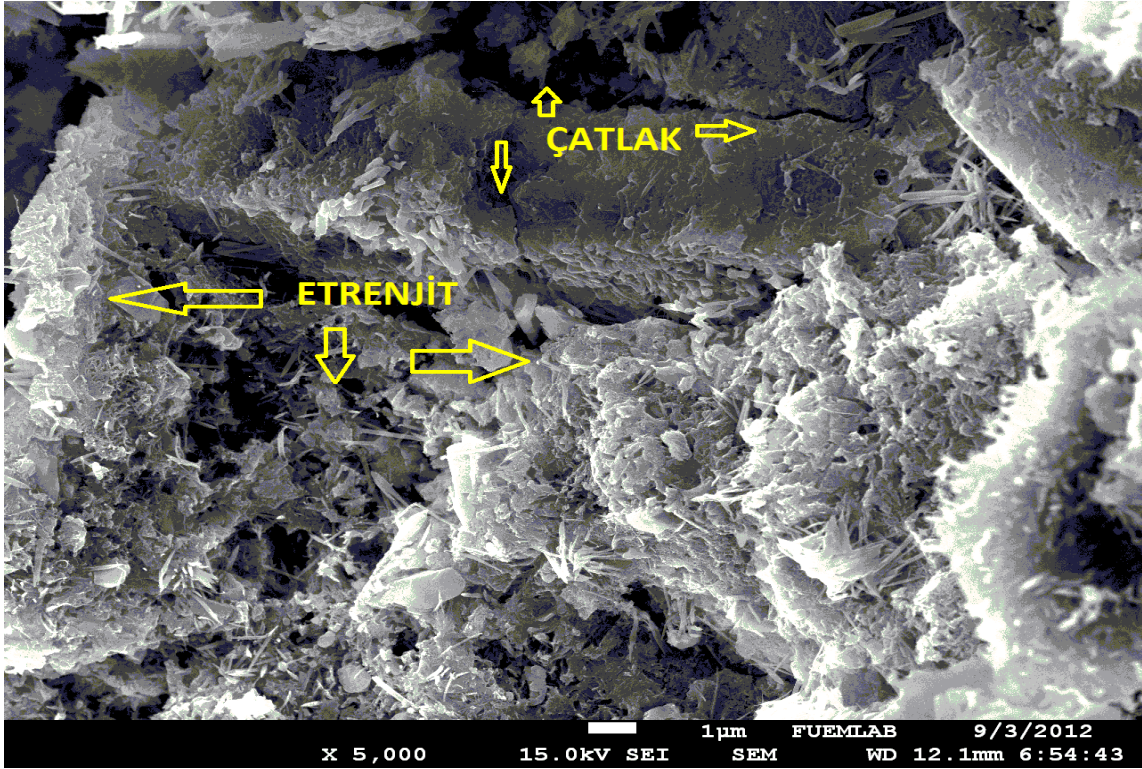


Şekil 3.11. Su ve sülfatta ıslanma-kuruma çevrimi numunelerinin eğilmede çekme dayanımı



Şekil 3.12. Farklı kür koşullarındaki numunelerinin eğilmede çekme dayanımı

Tüm sonuçlar incelendiğinde, eğilmede çekme dayanımı açısından en yüksek dayanımı değeri 150 gün süre su da kür uygulanan CE1-MT40 numunesinde en düşük dayanım değeri ise 150 gün süre sülfatta ıslanma-kuruma kürü uygulanan CE0-MT0 numunesinde elde edilmiştir. Şekil 3.13'de CE0-MT0 nolu numuneye ait SEM resmi görülmektedir. Numunede çatlaklar ve etrenjit oluşumları gözlenmektedir. Bu da eğilmede çekme dayanımı değerini düşürmektedir.



Şekil 3.13. CE0-MT0 nolu numunenin ıslanma-kuruma çevrimi sonrası SEM görüntüsü

3. 3. Kılcal (Kapiler) Su Emme Deneyi

Tüm numunelerin kapiler su emme deneyi sonrası sonuçları Tablo 3.3'de verilmiştir.

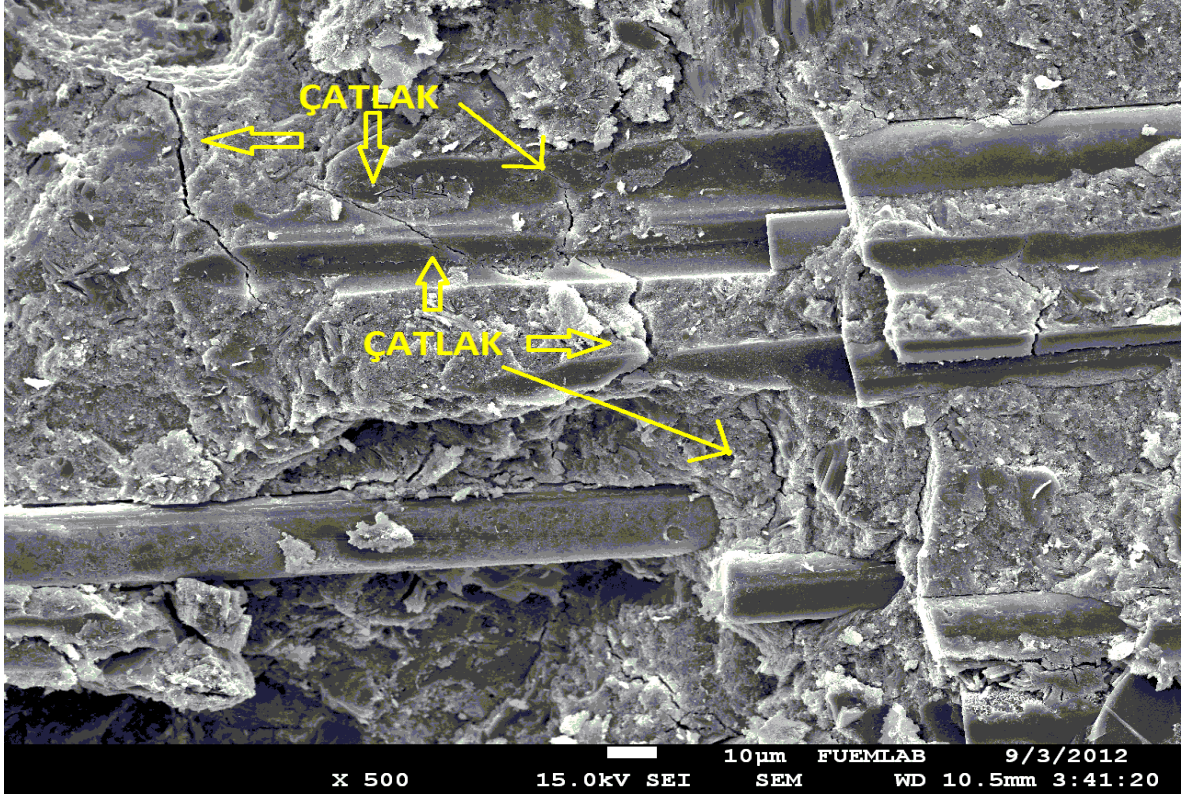
Mermer tozu katkısı ile su emme değerlerinde düşüş gözlenmiştir. En düşük kapilarite değeri CE0-MT40 olan karışımdan elde edilmiştir. En yüksek kapilarite değeri ise sülfatta ıslanma-kuruma sonrası CE1-MT0 serisindedir. Şekil 3.15'de SEM analizi resminde CE1-MT0 nolu numunede ıslanma-kuruma çevrimi sonrası çatlaklar gözlenmektedir. Sülfat çözeltisine bırakılan numunelerin kapilarite değerleri daha yüksektir. Sülfat çözeltisinde numuneler şişmiş etrenjit yapıları oluşmuş ve bünyesine daha çok su almıştır. Şekil 3.14'de ıslanma kuruma sonrası numunelerde oluşan çatlaklar gözlenmektedir. Aynı şekilde sülfat çözeltisindeki numunelerinde mermer tozu oranı arttıkça ince malzemenin boşlukları doldurmasından dolayı kapilarite değeri düşmüştür. Numunelerin benzer şekilde kapilarite katsayıları azalmaktadır fakat lif içeriğinin artması ile kapilarite katsayılarında artış meydana gelmiştir. Bu durum Demirel ve Gönen (2007). kapiler su emme özelliğinin numunelerin boşluk yapıları ile alakalı olduğunu belirtmişlerdir. (Deneyisel verilerimiz yazarların deney sonuçları ile uyum içerisindedir) [52].

Tablo 3.3. Numunelerin kapiler su emme deneyi sonrası değerleri

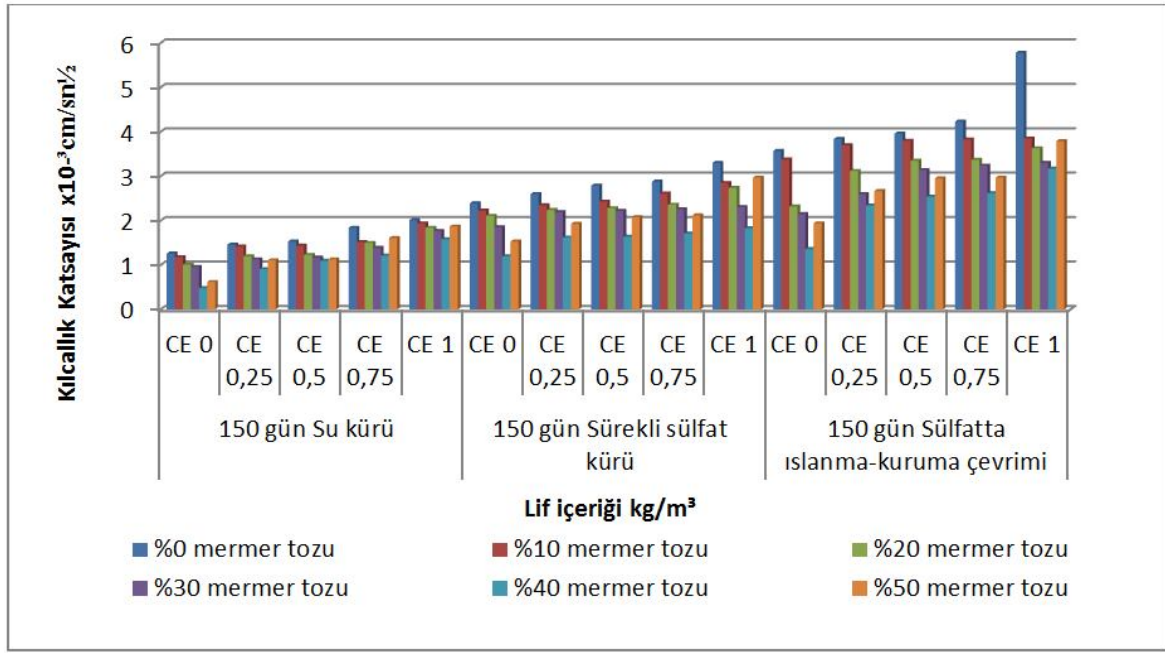
	Numuneler	150 gün Su kürü sonrası kapiler su emme miktarları	150 gün sürekli sülfat etkisi sonrası kapiler su emme miktarları	150 gün sülfatta ıslanma kuruma çevirimi sonrası kapiler su emme miktarları
1	CE0-MT0	1,26	2,39	3,57
2	CE0-MT10	1,18	2,23	3,38
3	CE0-MT20	1,01	2,11	2,32
4	CE0-MT30	0,96	1,85	2,15
5	CE0-MT40	0,48	1,2	1,36
6	CE0-MT50	0,62	1,53	1,94
7	CE0,25-MT0	1,46	2,6	3,84
8	CE0,25-MT10	1,42	2,35	3,7
9	CE0,25-MT20	1,2	2,24	3,12
10	CE0,25-MT30	1,13	2,19	2,6
11	CE0,25-MT40	0,91	1,62	2,34
12	CE0,25-MT50	1,11	1,93	2,67
13	CE0,5-MT0	1,53	2,79	3,96
14	CE0,5-MT10	1,44	2,43	3,8
15	CE0,5-MT20	1,23	2,28	3,35
16	CE0,5-MT30	1,17	2,22	3,14
17	CE0,5-MT40	1,1	1,64	2,54
18	CE0,5-MT50	1,13	2,08	2,95
19	CE0,75-MT0	1,84	2,88	4,23
20	CE0,75-MT10	1,52	2,61	3,83
21	CE0,75-MT20	1,5	2,36	3,37
22	CE0,75-MT30	1,39	2,26	3,24
23	CE0,75-MT40	1,21	1,71	2,62
24	CE0,75-MT50	1,61	2,12	2,97
25	CE1-MT0	2,01	3,3	5,78
26	CE1-MT10	1,94	2,85	3,85
27	CE1-MT20	1,84	2,74	3,63
28	CE1-MT30	1,77	2,31	3,3
29	CE1-MT40	1,58	1,83	3,17
30	CE1-MT50	1,87	2,97	3,79



Şekil 3.14. Sülfatta ıslanma-kuruma sonrası numunelerin görünümü

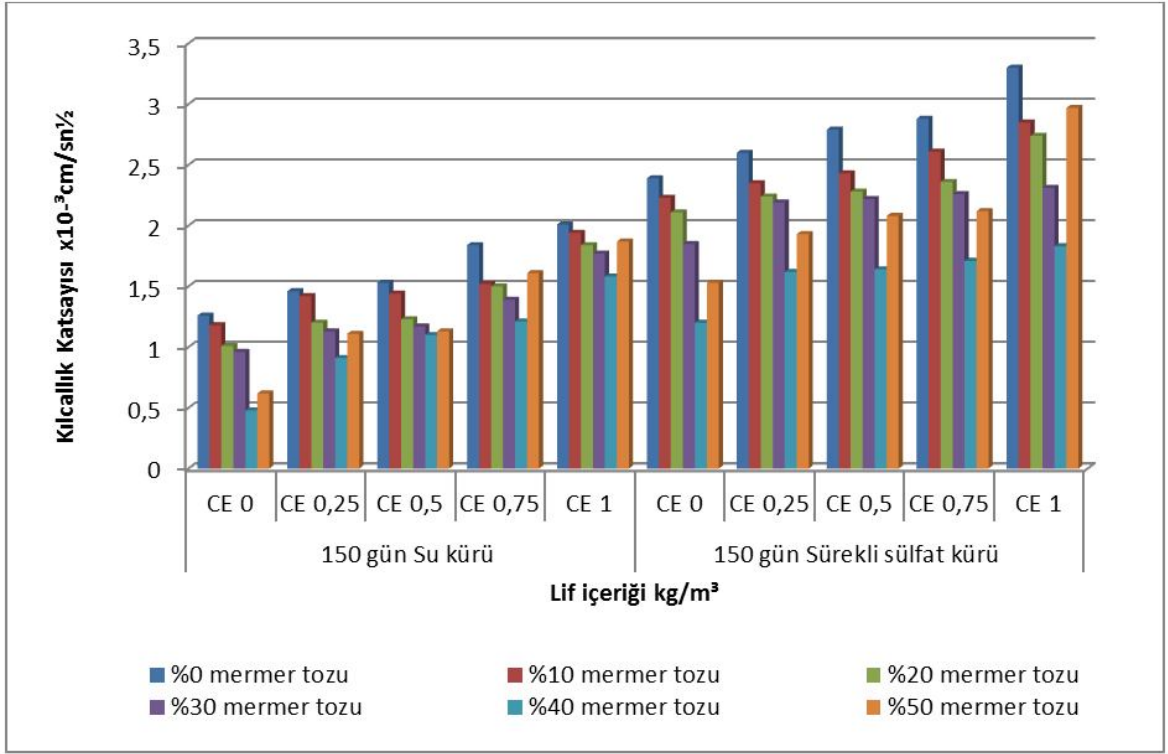


Şekil 3.15. Islanma-Kuruma çevrimi sonrası CE1-MT0 nolu numune



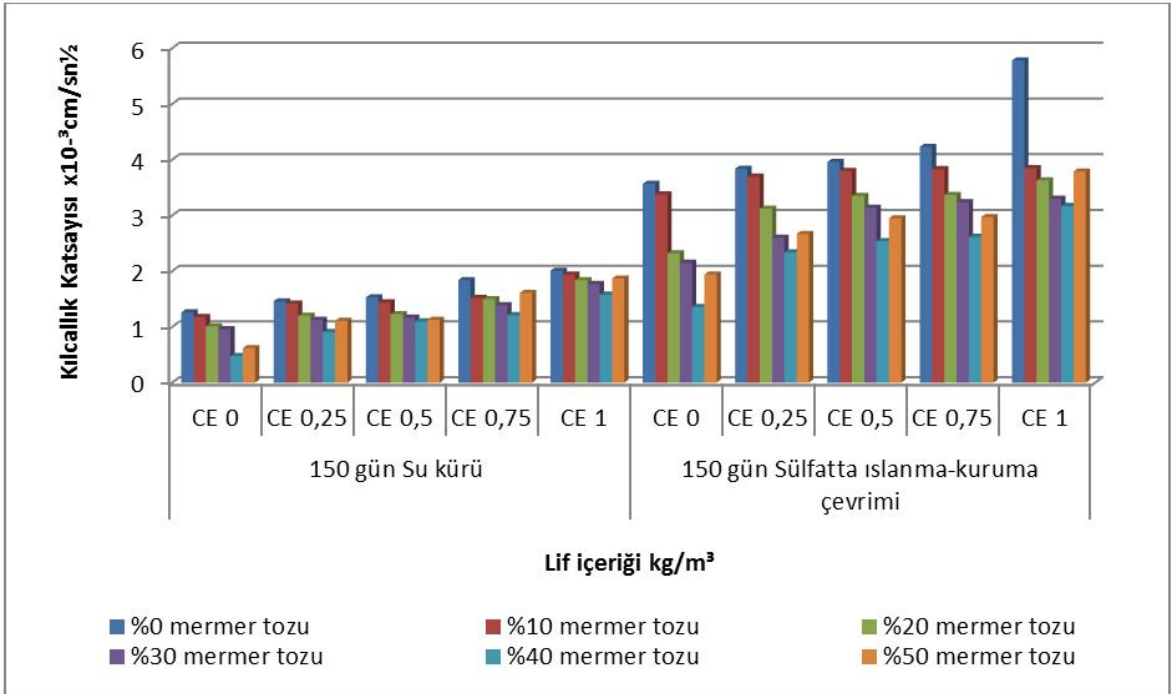
Şekil 3.16. Farklı kür koşullarındaki numunelerinin kapilarite katsayısı

Elyafın artışıyla kapilarite değerlerinde artış olmuştur. Numuneler içerisinde lif katkısı ile boşluk oluşmuş ve (bu boşluklardan numune içerisine su ve sülfatlı sular numunede) kapilarite artışı sağlamıştır. Mermer tozu oranının artmasıyla bu değer düşmüştür. Mermer tozu numunedeki boşlukları doldurarak kapilarite değerini düşürmüştür.



Şekil 3.17. Su ve sürekli sülfat deney numunelerinin kapilarite katsayısı

Şekil 3.17'de su ve sürekli sülfat deney numunelerinin kapilarite değerleri verilmiştir.



Şekil 3.18. Su ve sülfatta ıslanma-kuruma deney numunelerinin kapilarite katsayısı

Grafikler incelendiğinde her üç koşulda da görülüyor ki mermer tozu boşlukları doldurmaktadır. Islanma kuruma deneyi sonrası CE1-MT0 iken mermer tozu artışıyla

referans numunesine göre CE1-MT10 da %33,39 – CE1-MT20 serisinde %37,19 – CE1-MT30 nolu seride %42,90 – CE1-MT40 serisinde %45,15 ve CE1-MT50 nolu seride %34,42 kapilarite katsayılarında yüzdesel değişimleri gözlenmiştir.

3. 4. Görünür Porozite Deneyi

Yapılan deneysel çalışma sonucunda numunelerin porozite değerleri Tablo 3.4'de verilmiştir.

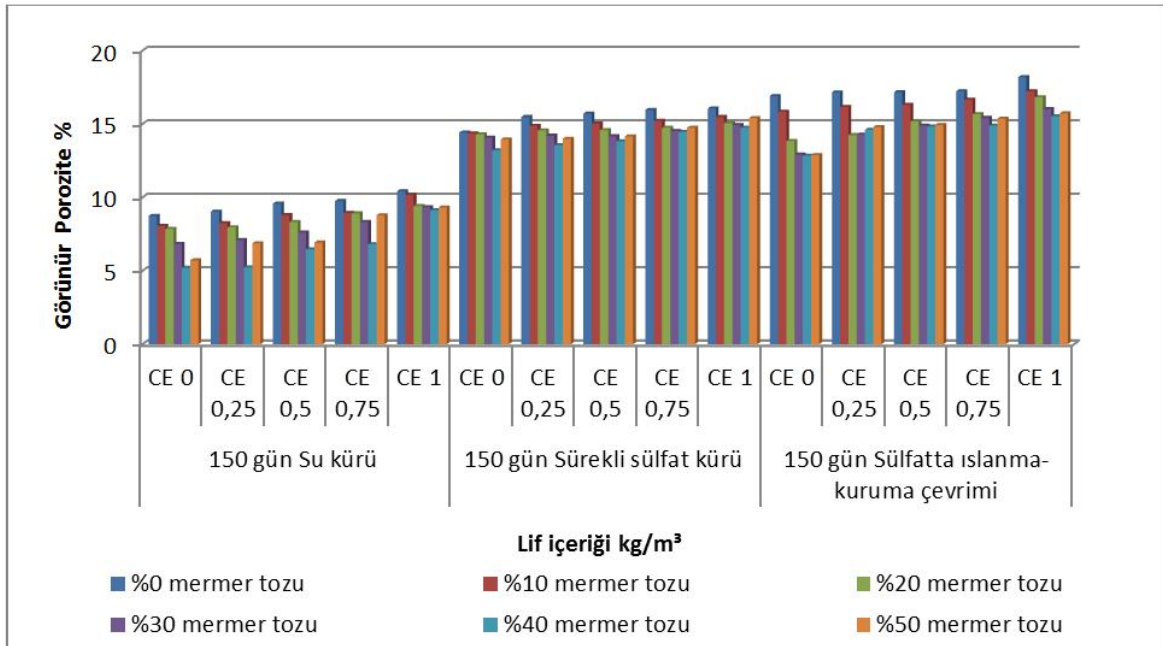
Tablo 3.4. Numunelerin görünür porozite değerleri

	Numuneler	Görünür porozite	150 gün sürekli sülfatta bekleyen numunelerin görünür porozitesi	150 gün sülfatta ıslanma kuruma çevirimi yapan numunelerin görünür porozitesi
1	CE0-MT0	8,74	14,42	16,9
2	CE0-MT10	8,06	14,36	15,83
3	CE0-MT20	7,85	14,3	13,84
4	CE0-MT30	6,83	14,06	12,91
5	CE0-MT40	5,21	13,2	12,83
6	CE0-MT50	5,71	13,94	12,87
7	CE0,25-MT0	9,02	15,47	17,15
8	CE0,25-MT10	8,24	14,87	16,15
9	CE0,25-MT20	7,96	14,55	14,24
10	CE0,25-MT30	7,1	14,2	14,27
11	CE0,25-MT40	5,22	13,55	14,6
12	CE0,25-MT50	6,87	13,99	14,79
13	CE0,5-MT0	9,57	15,71	17,17
14	CE0,5-MT10	8,79	15,03	16,31
15	CE0,5-MT20	8,33	14,58	15,17
16	CE0,5-MT30	7,61	14,16	14,89
17	CE0,5-MT40	6,46	13,82	14,82
18	CE0,5-MT50	6,92	14,15	14,93
19	CE0,75-MT0	9,75	15,96	17,22
20	CE0,75-MT10	8,94	15,21	16,65
21	CE0,75-MT20	8,91	14,74	15,67
22	CE0,75-MT30	8,32	14,52	15,41
23	CE0,75-MT40	6,81	14,45	14,89
24	CE0,75-MT50	8,78	14,74	15,36
25	CE1-MT0	10,42	16,05	18,18
26	CE1-MT10	10,17	15,49	17,22
27	CE1-MT20	9,42	15,06	16,82
28	CE1-MT30	9,33	14,93	16,02
29	CE1-MT40	9,13	14,75	15,52
30	CE1-MT50	9,31	15,4	15,72

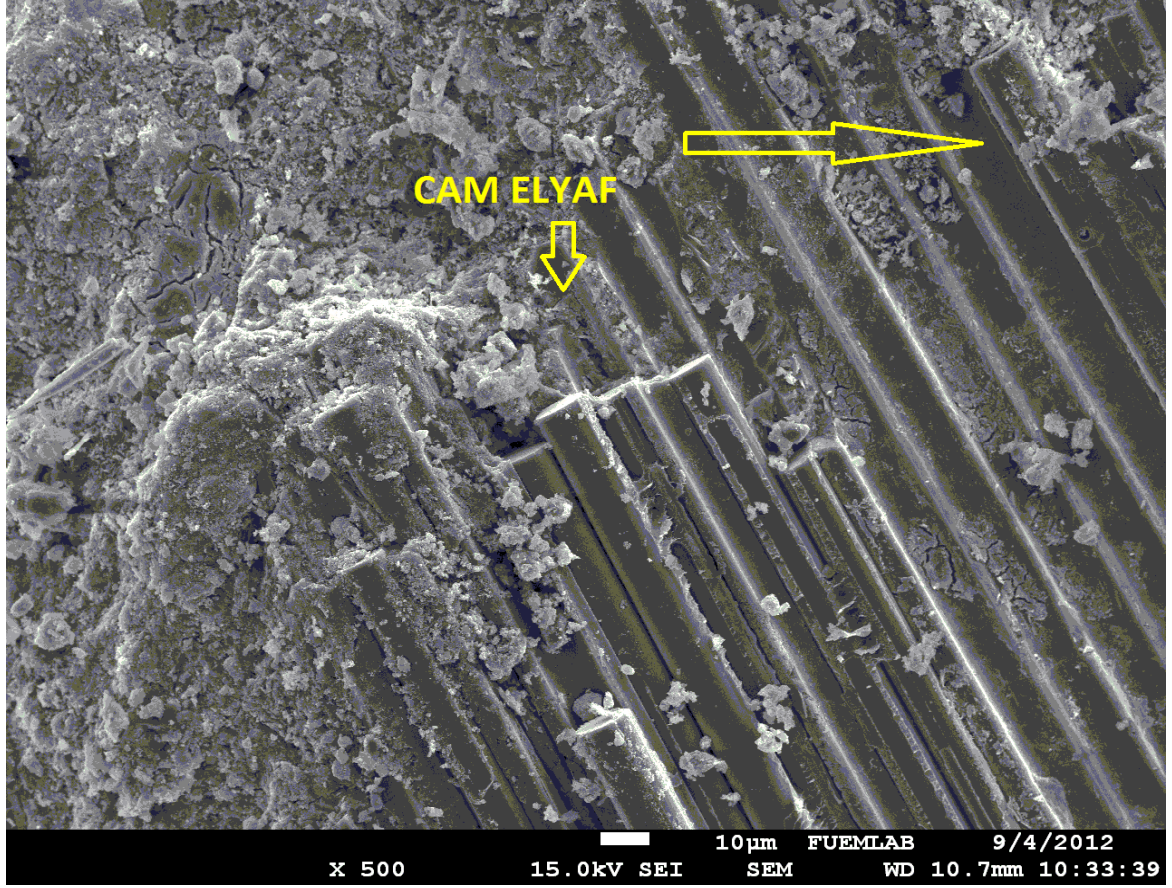
3 farklı kür şartında da mermer tozu oranının artışıyla porozite değerleri düşmüştür. Mermer tozunun boşlukları doldurmasıyla porozite değerinde düşüş gözlenmiştir. Cam elyaf oranının artışı ile porozite değeri artmıştır. Sülfat etkisindeki numunelerin porozite değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

Islanma- kuruma çevirimi sonrası porozite grafiği incelendiğinde, cam elyaf katkısının artışı ile harç numunelerinin porozite değerlerinde de artış görülmüştür. Bu durum cam elyafın topaklanma sonucu boşluklu yapı oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. Porozite grafiğinde en yüksek değeri, cam elyafın en yoğun olduğu ve %0 mermer tozunun bulunduğu CE1-MT0 serisi almıştır. Şekil 3.21'de SEM analizinde de bu numunede oluşan çatlak ve buna bağlı boşluk gözlenmiştir. Çatlak oluşumu ve sülfatlı suyun etkisiyle sülfatlı su çatlaklardan içeri sızmış ve numunede şişme gözlenmiştir.

Mermer tozunun artışı ile numuneler üzerinde, cam elyafın artışının tersi bir etkide bulunarak, harç numunelerinin porozite değerlerini düşürmüştür. Mermer tozu, tane boyutunun küçük olması filler malzeme olarak kullanılması nedeniyle boşlukların dolmasını, harcın daha yoğun bir hal almasıyla da porozite değerlerinin düşmesini sağlamıştır. Cam lif içeriğinin artması ile porozite değerinde artış meydana gelmiştir. Cam elyaf harç ile yeterli aderansı sağlayamadığından harç içinde boşluklar meydana gelmiştir. Şekil 3.20'de SEM görüntüsünde görülmektedir.

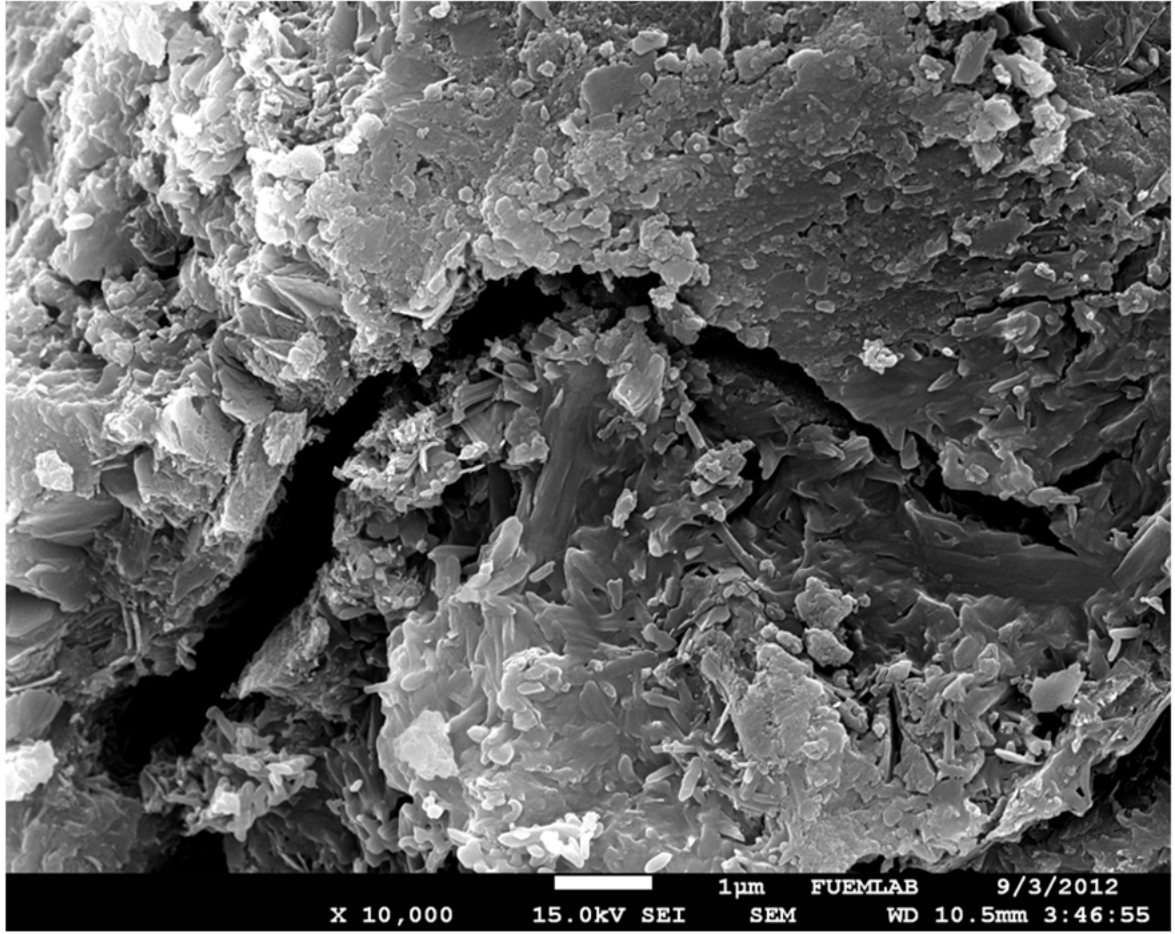


Şekil 3.19. Farklı kür koşullarındaki numunelerinin görünür porozite deney sonuçları

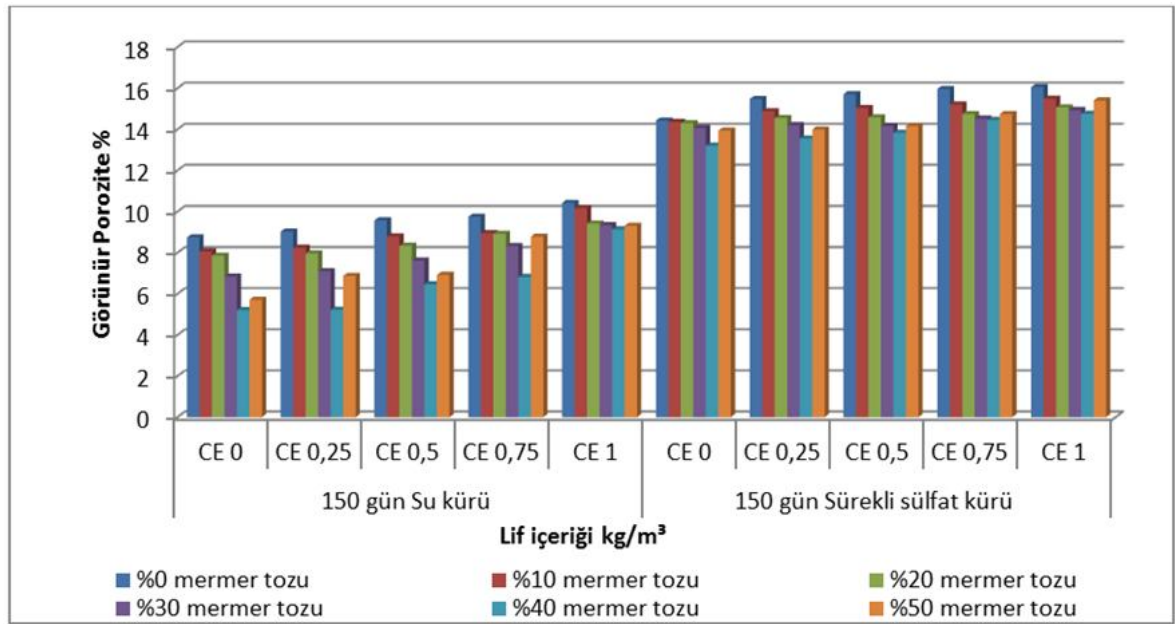


Şekil 3.20. Lif ve mermer tozu katkılı numunelerde porozite oluşumu SEM görüntüsü

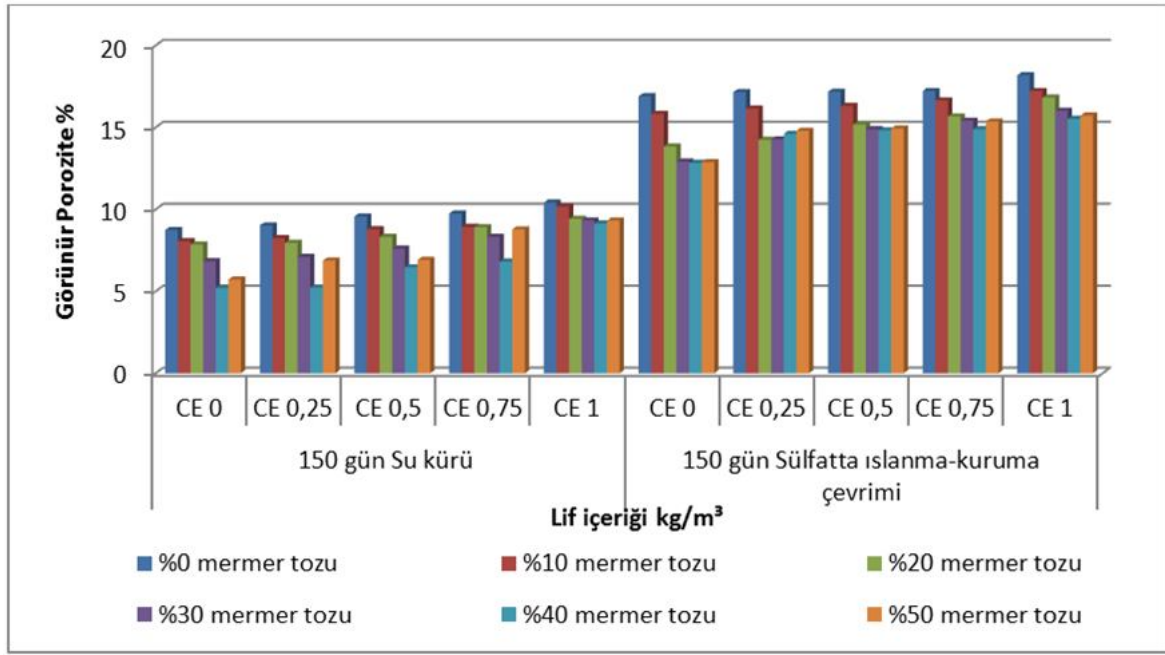
CE0-MT40 nolu serinin porozite değerinin düşük olduğu gözlenmektedir. Basınç dayanımı değerlerine bakıldığında bu serinin en yüksek değer olduğu gözlenmektedir. CE1-MT0 nolu serinin en yüksek poroziteye fakat en düşük basınç dayanımına sahip olduğu gözlenmektedir.



Şekil 3.21. Numune içerisindeki çatlak oluşumu SEM görüntüsü



Şekil 3.22. Su kuru ve sürekli sülfat kuru görünür porozite değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 3.23. Su kürü ve sülfatta ıslanma-kuruma çevrimi numunelerinin görünür porozite değerlerinin karşılaştırılması

3. 5. Birim Hacim Ağırlık ve Özgül Ağırlık

3 kür şartı sonunda numunelerin birim hacim ağırlık deney sonuçları Tablo 3.5'de verilmiştir.

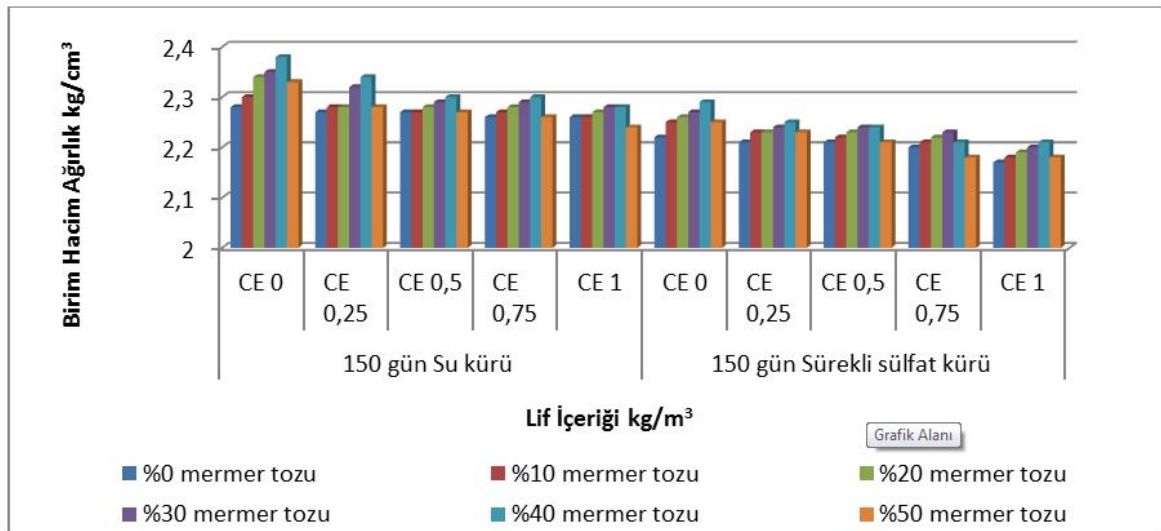
Numunelerin 3 kür şartında da değerleri incelendiğinde ıslanma-kuruma numunelerinin zamanla genleştiği ve sülfat iyonlarının harcın bünyesine girerek şişmesiyle ağırlıkta artış gözlenmiştir. Buda hasara neden olmuştur. Biricik v.d. (2003), Yaptıkları çalışmada ıslanma-kuruma numunelerinde ağırlık artışı gözlemişlerdir [53].

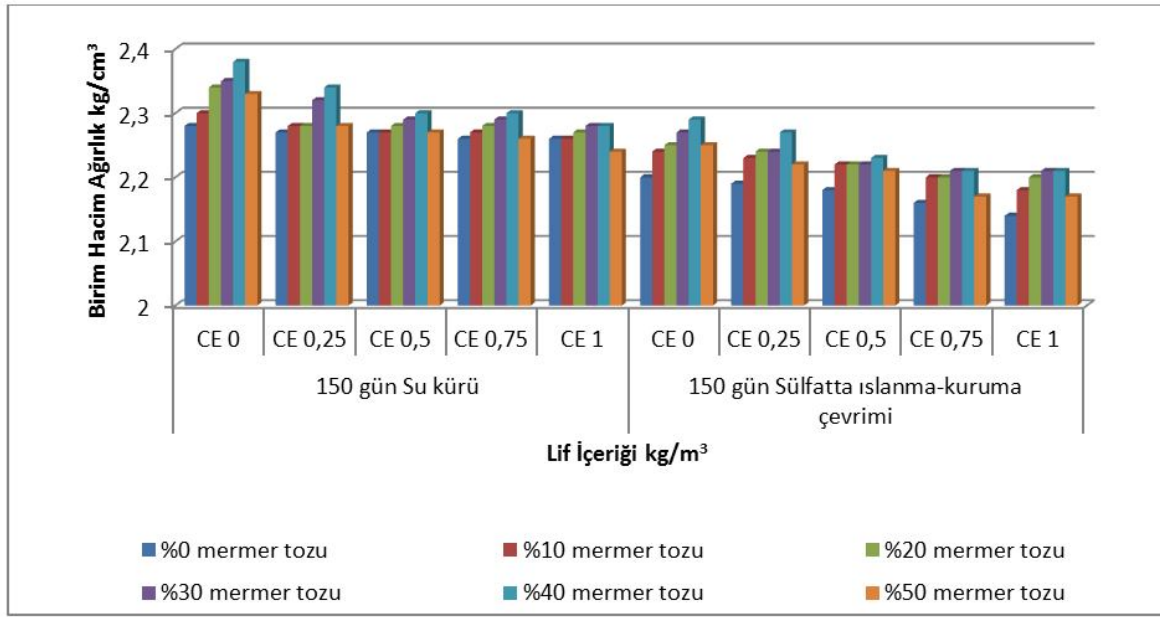
Devamlı olarak su içerisinde bırakılan çimento hamurlarının ve betonların hacimlerinde ve ağırlıklarında küçük bir miktar artma meydana gelmektedir. Çimento hamurunun veya betonun gösterdiği hacim artışına "şişme" denmektedir [54]. Jel boşluklarına girerek bu parçacıkların kohezyonuna karşı koyan negatif bir basınç oluşturarak şişmeye neden olur.

En yüksek birim hacim ağırlığı değerine CE0-MT40 serisinde ulaşılmıştır. Birim hacim ağırlığın artması ile görünen porozite değerleri azalmış ve buna bağlı olarak da basınç dayanımları artmıştır.

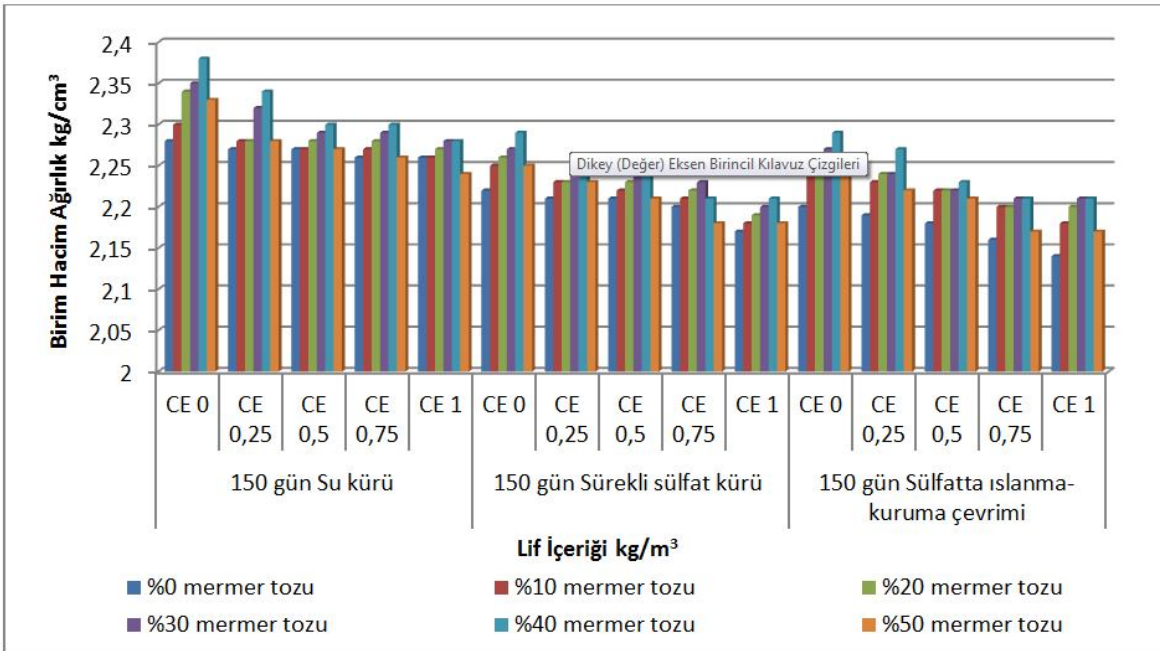
Tablo 3.5. Birim hacim ağırlık deney sonuçları

	Numuneler	Birim Hacim Ağırlık	150 gün sürekli sülfatta bekleyen numunelerin birim hacim ağırlığı	150 gün sülfatta ıslanma kuruma çevirimi yapan numunelerin birim hacim ağırlığı
1	CE0-MT0	2,28	2,22	2,2
2	CE0-MT10	2,3	2,25	2,24
3	CE0-MT20	2,34	2,26	2,25
4	CE0-MT30	2,35	2,27	2,27
5	CE0-MT40	2,38	2,29	2,29
6	CE0-MT50	2,33	2,25	2,25
7	CE0,25-MT0	2,27	2,21	2,19
8	CE0,25-MT10	2,28	2,23	2,23
9	CE0,25-MT20	2,28	2,23	2,24
10	CE0,25-MT30	2,32	2,24	2,24
11	CE0,25-MT40	2,34	2,25	2,27
12	CE0,25-MT50	2,28	2,23	2,22
13	CE0,5-MT0	2,27	2,21	2,18
14	CE0,5-MT10	2,27	2,22	2,22
15	CE0,5-MT20	2,28	2,23	2,22
16	CE0,5-MT30	2,29	2,24	2,22
17	CE0,5-MT40	2,3	2,24	2,23
18	CE0,5-MT50	2,27	2,21	2,21
19	CE0,75-MT0	2,26	2,2	2,16
20	CE0,75-MT10	2,27	2,21	2,2
21	CE0,75-MT20	2,28	2,22	2,2
22	CE0,75-MT30	2,29	2,23	2,21
23	CE0,75-MT40	2,3	2,21	2,21
24	CE0,75-MT50	2,26	2,18	2,17
25	CE1-MT0	2,26	2,17	2,14
26	CE1-MT10	2,26	2,18	2,18
27	CE1-MT20	2,27	2,19	2,2
28	CE1-MT30	2,28	2,2	2,21
29	CE1-MT40	2,28	2,21	2,21
30	CE1-MT50	2,24	2,18	2,17

**Şekil 3.24.** Su ve sülfat kürü birim hacim ağırlık deneylerinin karşılaştırılması



Şekil 3.25. Su ve sülfatta ıslanma-kuruma çevrimi kürü birim hacim ağırlık deneylerinin karşılaştırılması



Şekil 3.26. Numunelerin birim hacim ağırlık deneylerinin karşılaştırılması

3. 6. Su Numuneleri Boy Ölçümü Deneyi Bulgularının İncelenmesi

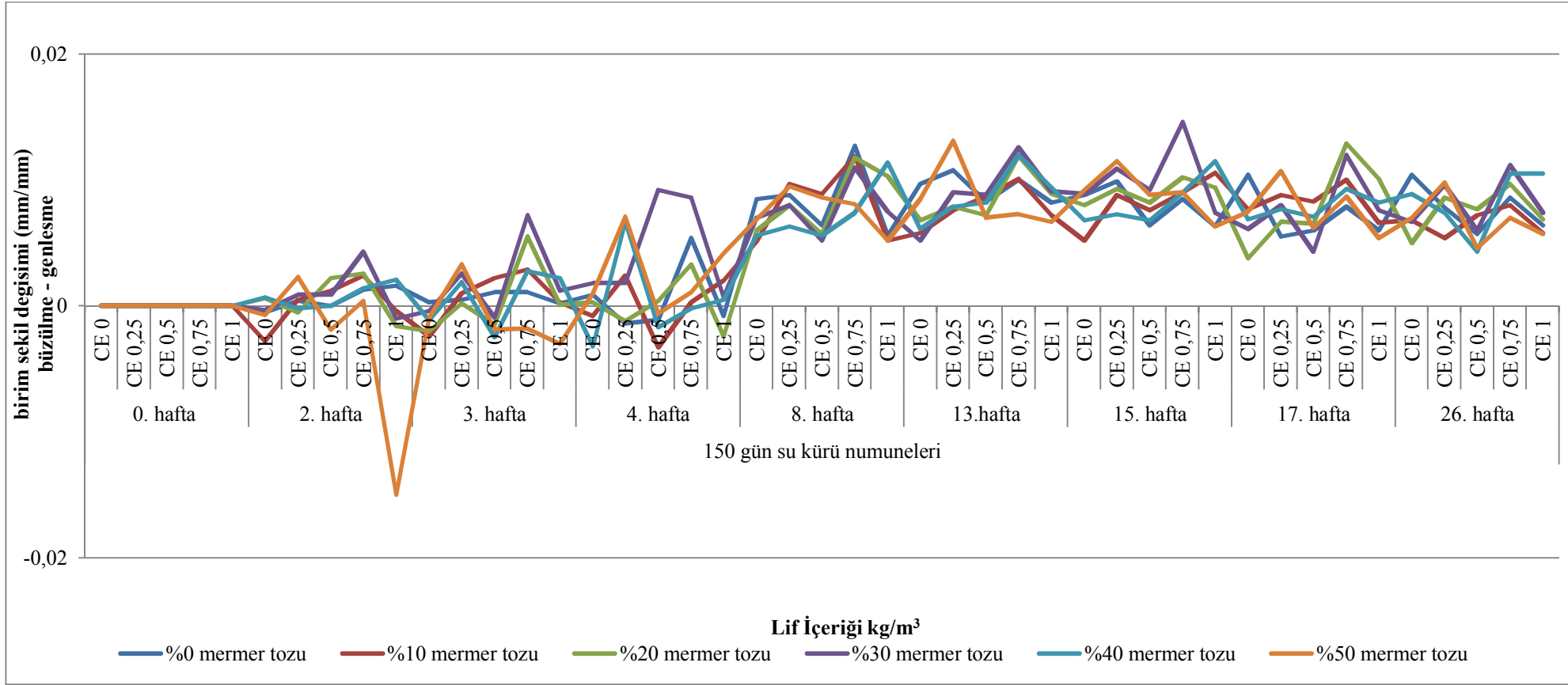
Tablo 3.6'da 150 günlük su deneyi numunelerinin boy ölçüm değerleri verilmiştir. Şekil 3.27'de su numunelerinin gösterdiği boy değişimleri görülmektedir. Negatif değerler büzülme, pozitif değerler ise şişmeyi temsil etmektedir. Grafikteki boy değişim

değerlerinin birimi mm/mm'dir. Büzülmenin en çok görüldüğü numune CE1-MT50 dir. Genleşmenin en yüksek olduğu seri ise CE0,75-MT30 serisidir.

Boy ölçüm değerleri her bir seri için 3 adet numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. 0.01 deplasman ölçen komparatör üzerinde, 285 mm'lik harç numunelerinin boy değişim değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 3.6. 150 günlük su deneyi boy ölçümü sonuçları

Numuneler		Haftalar								
		0	2	3	4	8	13	15	17	26
1	CE0-MT0	0	-0,0005	0,0003	0,0009	0,0085	0,0097	0,0088	0,0104	0,0104
2	CE0-MT10	0	-0,0028	-0,0024	-0,0008	0,0051	0,0058	0,0052	0,0077	0,0068
3	CE0-MT20	0	0,0006	-0,002	0,0003	0,006	0,0068	0,008	0,0038	0,005
4	CE0-MT30	0	-0,0003	-0,0004	0,0018	0,007	0,0052	0,0089	0,0061	0,0067
5	CE0-MT40	0	0,0007	-0,0011	-0,0032	0,0056	0,0061	0,0068	0,0069	0,0089
6	CE0-MT50	0	-0,0007	-0,0009	0,001	0,0069	0,0085	0,0092	0,0075	0,007
7	CE0,25-MT0	0	0,0004	0,0005	-0,0014	0,0088	0,0108	0,0099	0,0055	0,0078
8	CE0,25-MT10	0	0,0005	0,001	0,0024	0,0097	0,0076	0,0088	0,0088	0,0054
9	CE0,25-MT20	0	-0,0005	0,0002	-0,0012	0,008	0,0079	0,0093	0,0067	0,0086
10	CE0,25-MT30	0	0,0009	0,0026	0,0018	0,008	0,009	0,0109	0,008	0,0096
11	CE0,25-MT40	0	-0,0002	0,0019	0,0067	0,0063	0,0079	0,0073	0,0077	0,0074
12	CE0,25-MT50	0	0,0023	0,0033	0,0071	0,0095	0,0131	0,0115	0,0107	0,0098
13	CE0,5-MT0	0	0	0,0011	-0,0011	0,0064	0,0083	0,0064	0,006	0,0057
14	CE0,5-MT10	0	0,0012	0,0022	-0,0033	0,0089	0,0087	0,0076	0,0083	0,0072
15	CE0,5-MT20	0	0,0022	-0,0015	0,0004	0,0057	0,0072	0,0082	0,0065	0,0077
16	CE0,5-MT30	0	0,0009	-0,0009	0,0092	0,0052	0,0088	0,0092	0,0043	0,006
17	CE0,5-MT40	0	0	-0,0025	-0,0017	0,0056	0,0082	0,0068	0,0071	0,0043
18	CE0,5-MT50	0	-0,0019	-0,0019	-0,0006	0,0086	0,007	0,0088	0,0062	0,0046
19	CE0,75-MT0	0	0,0013	0,0011	0,0054	0,0127	0,01	0,0085	0,0079	0,0086
20	CE0,75-MT10	0	0,0024	0,0029	0,0003	0,0119	0,0101	0,009	0,01	0,008
21	CE0,75-MT20	0	0,0026	0,0055	0,0033	0,0118	0,0119	0,0102	0,0129	0,0097
22	CE0,75-MT30	0	0,0043	0,0072	0,0086	0,011	0,0126	0,0146	0,012	0,0112
23	CE0,75-MT40	0	0,0014	0,0028	-0,0002	0,0074	0,012	0,009	0,0093	0,0105
24	CE0,75-MT50	0	0,0004	-0,0018	0,0011	0,0081	0,0073	0,009	0,0087	0,007
25	CE1-MT0	0	0,0016	0,0002	-0,0008	0,0056	0,0082	0,0063	0,006	0,0064
26	CE1-MT10	0	-0,0004	0,0003	0,002	0,0052	0,0072	0,0106	0,0066	0,0058
27	CE1-MT20	0	-0,0016	0,0001	-0,0024	0,0103	0,0089	0,0094	0,0101	0,0069
28	CE1-MT30	0	-0,001	0,0012	0,0007	0,0075	0,0091	0,0074	0,0076	0,0074
29	CE1-MT40	0	0,0021	0,0022	0,0005	0,0114	0,0094	0,0115	0,0082	0,0105
30	CE1-MT50	0	-0,015	-0,003	0,0042	0,0052	0,0067	0,0063	0,0054	0,0057



Şekil 3.27. Su kürü sonrası numunelerin boy ölçümü değişimi

3. 7. Sülfatta İslanma-Kuruma Çevrimi Deneyi Boy Ölçümü Deneyi Bulgularının İncelenmesi

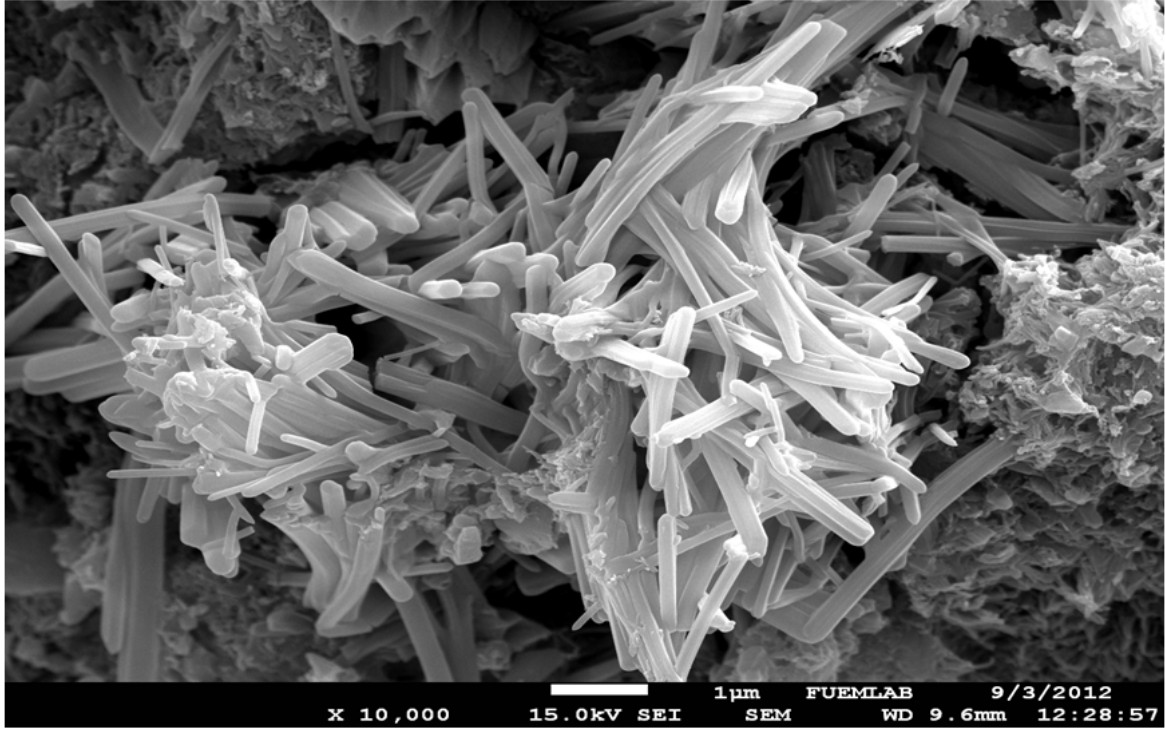
Tablo 3.7'de ıslanma kuruma deney sonrası haftalara göre boy ölçüm değerleri verilmiştir.

Tablo 3.7. İslanma kuruma deneyi sonrası boy ölçümü sonuçları

Numuneler		Haftalar									
		0	1	2	3	4	8	13	15	17	26
1	CE0-MT0	0	0,0008	0,0042	-	0,0026	0,0056	0,0106	0,0111	0,0091	0,0129
2	CE0-MT10	0	0,0021	0,0004	0,0022	0,0011	0,0058	0,0077	0,0099	0,0091	0,0115
3	CE0-MT20	0	-0,0001	0,0034	0,0024	0,0028	0,006	0,0089	0,009	0,0105	0,0089
4	CE0-MT30	0	-0,0017	0,0007	0,0011	-	0,0077	0,0099	0,0107	0,0117	0,0142
5	CE0-MT40	0	-0,0015	-	0,0028	-	0,0038	0,0067	0,0054	0,0075	0,0093
6	CE0-MT50	0	0,00007	-	0,0024	0,0001	0,0047	0,0096	0,0075	0,0076	0,0062
7	CE0,25-	0	0,0009	-	-	-	0,0038	0,0095	0,0095	0,0096	0,013
8	CE0,25-	0	0,00007	-	0,0004	0,0008	0,0045	0,0072	0,0077	0,0104	0,0118
9	CE0,25-	0	0,001	-	-	-	0,0043	0,0081	0,0068	0,0099	0,0067
10	CE0,25-	0	0,0025	0,0005	0,001	0,0027	0,0071	0,0098	0,011	0,0124	0,0096
11	CE0,25-	0	0,0008	0,0009	0,0026	0,0011	0,005	0,0107	0,0096	0,009	0,0098
12	CE0,25-	0	0,0029	0,0023	0,0016	0	0,0054	0,0098	0,0098	0,0128	0,0076
13	CE0,5-MT0	0	0,0041	0,0025	0,0044	0,0038	0,0078	0,0107	0,0143	0,012	0,018
14	CE0,5-	0	0,0028	0,0029	0,0036	0,0035	0,0077	0,0104	0,0115	0,0094	0,0141
15	CE0,5-	0	0,0027	0,0039	0,0017	0,0017	0,0093	0,0105	0,0112	0,0118	0,011
16	CE0,5-	0	0,0029	0,003	0,0042	0,0018	0,0073	0,0104	0,0109	0,0129	0,0124
17	CE0,5-	0	0,0032	0,0039	0,0028	0,0009	0,0072	0,0109	0,0115	0,0103	0,0123
18	CE0,5-	0	-0,0012	0,0014	0,0022	0,0001	0,0067	0,0107	0,011	0,0112	0,0116
19	CE0,75-	0	0,002	0,0042	0,0016	0,001	0,0092	0,0102	0,0106	0,0118	0,0115
20	CE0,75-	0	0,0008	0,0004	-	0,001	0,0056	0,0105	0,0102	0,0101	0,0135
21	CE0,75-	0	0,0028	0,0035	0,0042	0,0022	0,0071	0,0107	0,012	0,0121	0,0116
22	CE0,75-	0	0,0011	0,0008	0,0004	0,0016	0,0061	0,011	0,0119	0,0114	0,0091
23	CE0,75-	0	-0,0007	-	0,0005	0,0003	0,0047	0,0082	0,0084	0,0088	0,009
24	CE0,75-	0	0,0018	0,0035	0,0038	0,0033	0,0131	0,0115	0,0138	0,0124	0,0135
25	CE1-MT0	0	0,0015	0,0024	0,0032	0,0008	0,142	0,0118	0,0139	0,0142	0,0147
26	CE1-MT10	0	0,0025	0,0034	0,0029	0,0024	0,0095	0,0122	0,0119	0,0124	0,0154
27	CE1-MT20	0	0,0017	0,0011	0,0021	0,0026	0,0092	0,0126	0,0126	0,0133	0,0148
28	CE1-MT30	0	0,0003	0,0037	0,0039	0,0034	0,0087	0,0122	0,0136	0,006	0,0147
29	CE1-MT40	0	0,0022	0,0014	0,0027	0,0019	0,009	0,0116	0,0131	0,0128	0,0125
30	CE1-MT50	0	0,0023	-	0,0023	0	0,0062	0,01	0,0092	0,0096	0,009

Şekil 3.31'de sülfatta ıslanma-kuruma çevrimi numunelerinin gösterdiği boy değişimleri görülmektedir.

Büzölme değerinin en çok CE0,25-MT20 numunesinde meydana geldiği görülmüştür. Genleşme değeri ise en çok CE1-MT40 serisinde meydana gelmiştir. Şekil 3.28'de sülfatta ıslanma-kuruma çevrimi sonucu numunede etrenjit oluşumu gözlenmektedir.



Şekil 3.28. Cam elyafın olmadığı mermer tozunun %50 olduğu ıslanma-kuruma çevrimi uygulanan numunenin SEM görüntüsü

Numuneler içinde gözle görülür genleşmeler oluşmuştur. Sülfatta ıslanma-kuruma şeklinde maruz bırakılan karışımlarda 26 hafta sonunda elde edilen genleşme değerleri oldukça düşük mertebededir. Bu durum kuruma sırasında oluşan büzülmenin etkisi ile açıklanabilir [50].

Şekil 3.29'da ıslanma-kuruma çevrimi sonrası zarar gören numunelerin görünüşü verilmiştir.



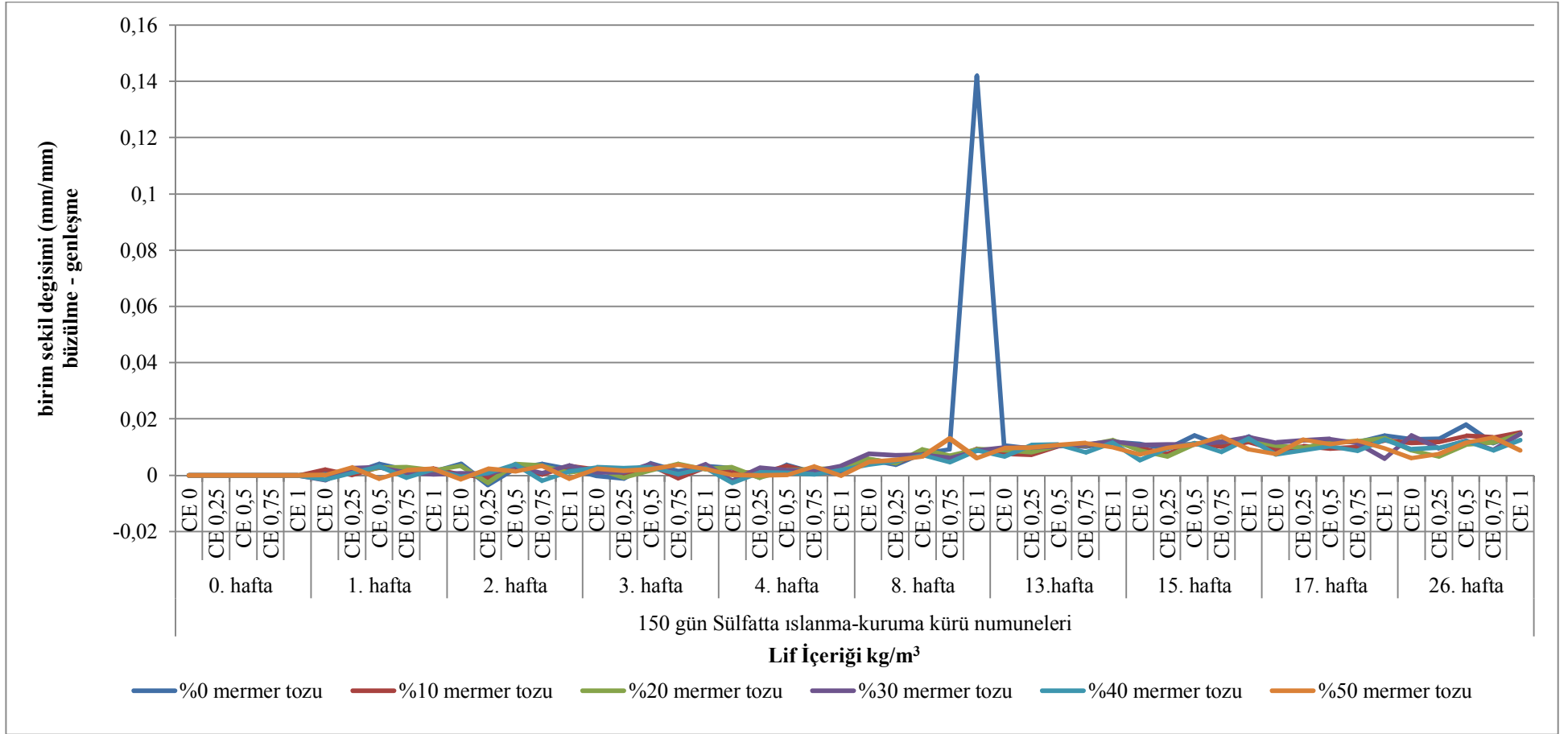
Şekil 3.29. Islanma-kuruma çevrimi sonrası zarar gören numuneler

Islanma-kuruma etkisinde de genleşme ve büzülmenin bir arada oluşması nedeniyle elde edilen sonuç genleşme düşük seviyededir [50].



Şekil 3.30. Islanma-kuruma çevrimi sonrası genleşen numune

Şekil 3.30'da Islanma-kuruma çevrimi sonrası numunede çatlaklar ve dökülmeler gözlenmiştir. Sülfat etkisiyle numunede şişmenin meydana geldiği açıkça gözlemlenmiştir.



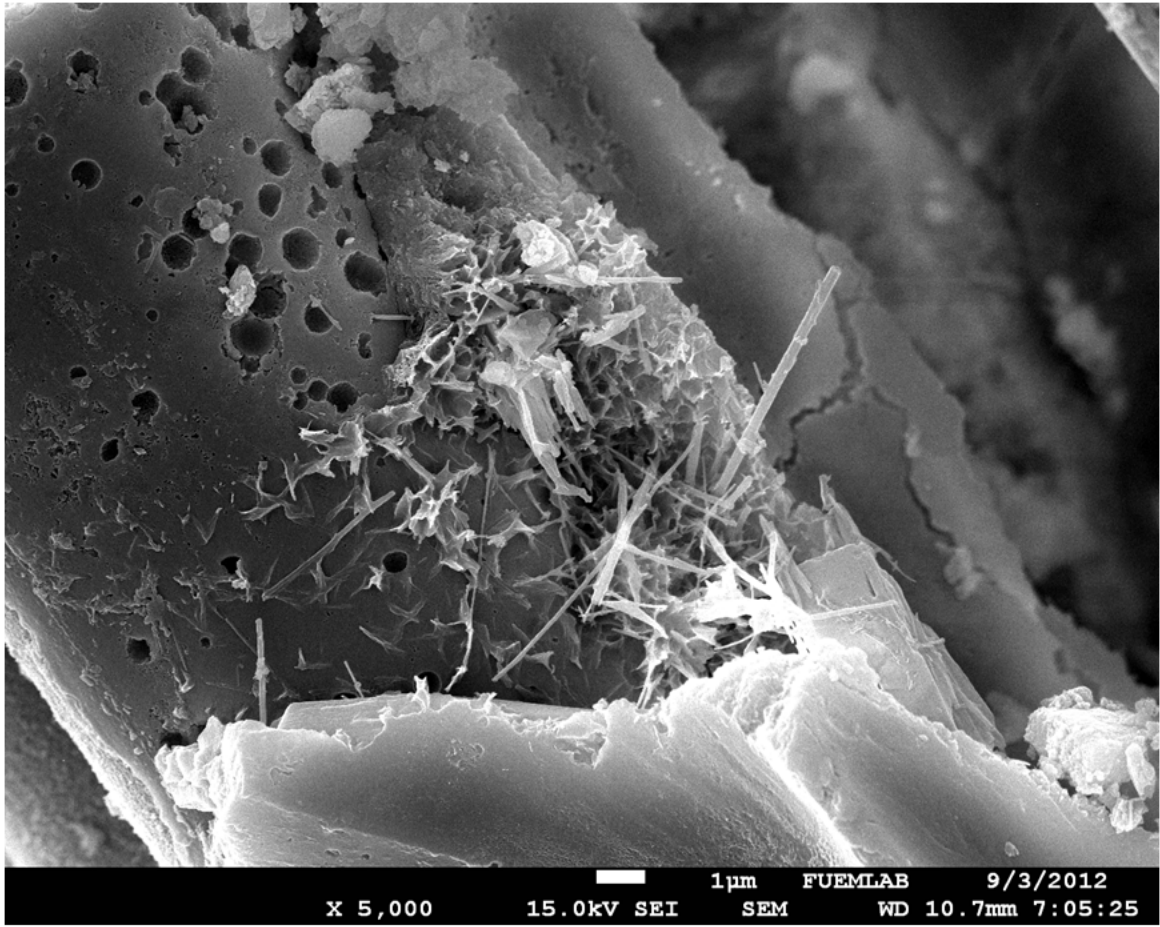
Şekil 3.31. Sülfatta ıslanma-kuruma çevrimi deneyi sonrası numunelerin boy ölçümü değişimi

3.8. Sürekli Sülfat Deneyi Boy Ölçümü Deneyi Bulgularının İncelenmesi

Tablo 3.8'de 150 günlük sürekli sülfat deneyi boy ölçümü sonuçları verilmiştir. Şekil 3.33'de sürekli sülfata maruz kalan numunelerinin gösterdiği boy değişimleri görülmektedir. Büzülme değerinin en çok CE1-MT40 numunesinde görülmüştür. Genleşme değeri ise en çok CE0,25-MT20 serisinde olmuştur.

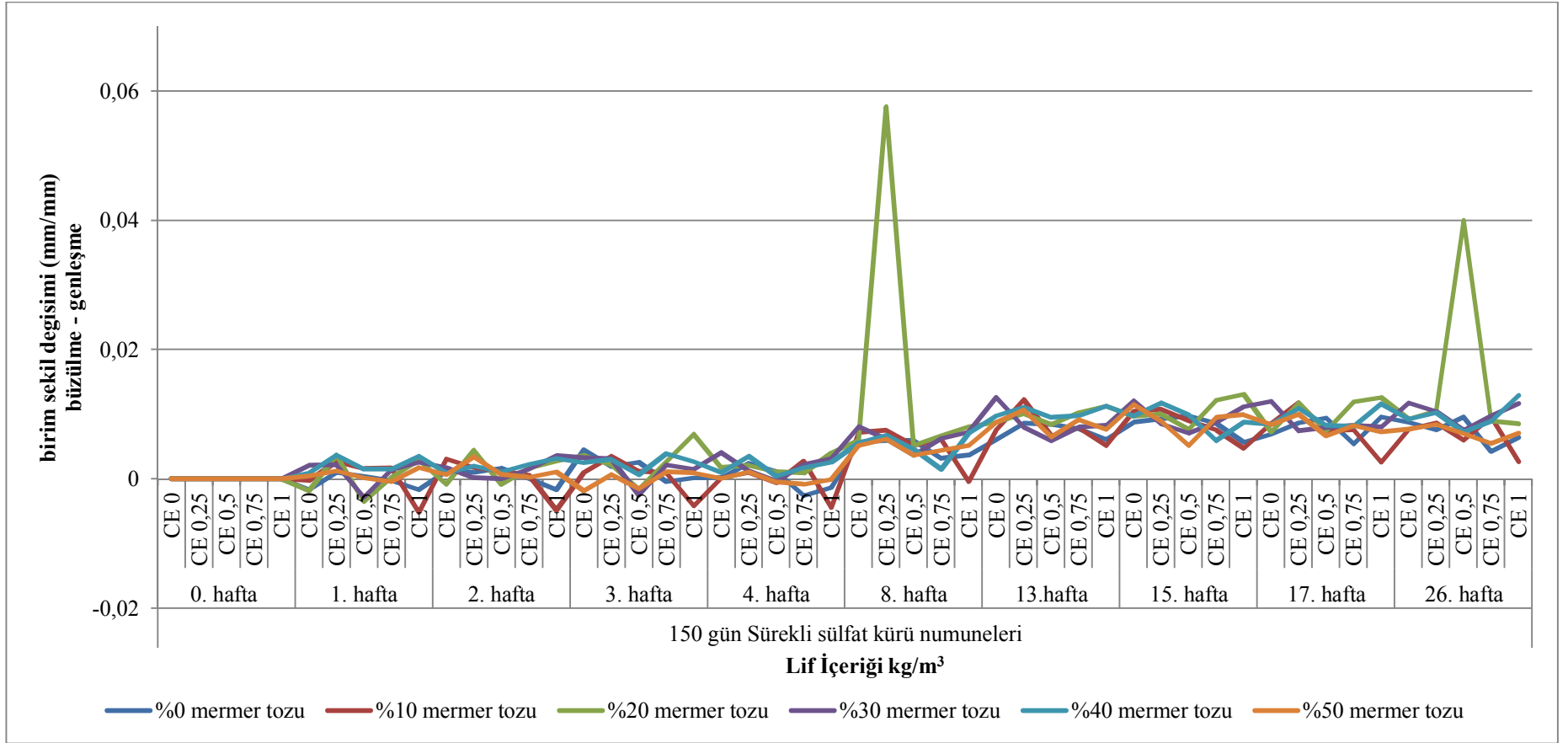
Tablo 3.8. 150 günlük sürekli sülfat deneyi boy ölçümü sonuçları

Numuneler		Haftalar									
		0	1	2	3	4	8	13	15	17	26
1	CE0-MT0	0	-0,0017	0,0012	0,0045	0,0002	0,0057	0,0061	0,0088	0,0069	0,0088
2	CE0-MT10	0	-0,0002	0,0031	0,001	0,0002	0,0072	0,0076	0,0104	0,0086	0,0077
3	CE0-MT20	0	-0,0018	-0,0008	0,0037	0,0018	0,006	0,0088	0,0097	0,0073	0,0093
4	CE0-MT30	0	0,0021	0,0018	0,0033	0,0041	0,0081	0,0126	0,0121	0,012	0,0118
5	CE0-MT40	0	0,0009	0,0009	0,0025	0,001	0,0056	0,0098	0,0098	0,0084	0,0093
6	CE0-MT50	0	0,0004	0,0007	-0,0018	0,0001	0,0052	0,0088	0,0115	0,0084	0,0077
7	CE0,25-MT0	0	0,001	0,001	0,0019	0,0024	0,0059	0,0086	0,0093	0,0087	0,0076
8	CE0,25-MT10	0	0,0027	0,0018	0,0035	0,001	0,0075	0,0123	0,0108	0,0118	0,0087
9	CE0,25-MT20	0	0,0037	0,0044	0,0022	0,0021	0,0576	0,0101	0,01	0,0118	0,0105
10	CE0,25-MT30	0	0,0022	0,0002	0,0031	0,0013	0,0062	0,008	0,0085	0,0074	0,0104
11	CE0,25-MT40	0	0,0037	0,002	0,003	0,0035	0,0068	0,0111	0,0118	0,0109	0,0103
12	CE0,25-MT50	0	0,0013	0,0034	0,0007	0,0011	0,0062	0,0107	0,0089	0,01	0,0084
13	CE0,5-MT0	0	0,0004	0,0017	0,0026	0,0012	0,0059	0,0084	0,0098	0,0094	0,0096
14	CE0,5-MT10	0	0,0016	0,0012	0,0012	-0,0006	0,0052	0,0067	0,009	0,0074	0,006
15	CE0,5-MT20	0	-0,0035	-0,0008	-0,0016	0,0011	0,0052	0,0084	0,0077	0,0074	0,04
16	CE0,5-MT30	0	-0,0028	0	-0,0025	-0,0003	0,0037	0,0059	0,0071	0,0079	0,0075
17	CE0,5-MT40	0	0,0015	0,0011	0,0007	0,0004	0,0046	0,0095	0,0099	0,0083	0,0073
18	CE0,5-MT50	0	0,0002	0,0007	-0,0015	-0,0005	0,0037	0,0065	0,0052	0,0067	0,007
19	CE0,75-MT0	0	-0,0002	0,0001	-0,0004	-0,0026	0,0032	0,0078	0,0086	0,0054	0,0043
20	CE0,75-MT10	0	0,0017	0,0006	0,0009	0,0028	0,0061	0,0079	0,0076	0,0076	0,0096
21	CE0,75-MT20	0	0,0003	0,0017	0,0027	0,0009	0,0067	0,0103	0,0122	0,0119	0,0089
22	CE0,75-MT30	0	0,0014	0,0015	0,0022	0,0023	0,0063	0,008	0,0088	0,0083	0,0098
23	CE0,75-MT40	0	0,0015	0,0023	0,0039	0,0018	0,0015	0,0098	0,0059	0,0081	0,0089
24	CE0,75-MT50	0	-0,0004	0,0003	0,0011	-0,0008	0,0044	0,0092	0,0095	0,0083	0,0055
25	CE1-MT0	0	-0,0017	-0,0017	0,0002	-0,0013	0,0037	0,0061	0,0057	0,0096	0,0064
26	CE1-MT10	0	-0,0052	-0,0048	-0,0042	-0,0044	-0,0004	0,0052	0,0048	0,0026	0,0027
27	CE1-MT20	0	0,0029	0,0028	0,0069	0,004	0,0081	0,0113	0,0131	0,0126	0,0085
28	CE1-MT30	0	0,0026	0,0036	0,0015	0,0032	0,0073	0,0083	0,0112	0,008	0,0117
29	CE1-MT40	0	0,0035	0,0032	0,0027	0,0026	0,0071	0,0113	0,0088	0,0116	0,0129
30	CE1-MT50	0	0,0018	0,0011	0,0009	-0,0001	0,0052	0,0077	0,0099	0,0073	0,0071



Şekil 3.32. 1 kg/m^3 elyaf ve %50 mermer tozu içeren sürekli sülfat etkisine maruz kalan numunenin SEM görüntüsü

Şekil 3.32'de görüldüğü gibi lif üzerinde boşluklar etrenjit oluşumu ve elyafta çatlama, genleşme olmuştur. 150 gün sülfat etkisine maruz bırakılan numunede sülfat iyonlarının etkisiyle elyaf üzerinde boşluklar oluşmuştur. Bu boşlukların üzerinde etrenjit yapısı gözlenmektedir ve elyafda şişme sonucu çatlama görülmüştür.



Şekil 3.33. Sürekli sülfat numuneleri boy ölçümü deneyi

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Tez çalışmasından elde edilen genel sonuçlar ve daha sonraki yapılacak çalışmalar için öneriler aşağıdaki şekilde sıralanmıştır.

Birim hacim ağırlığının artması ile görünen porozite azalmış ve buna bağlı olarak da basınç dayanımları artmıştır. Bu durum literatürle uyumludur.

Mermer tozu oranının %40'a kadar artmasıyla numunelerin basınç dayanımları artmıştır, her grupta en büyük basınç dayanımı bu oranda mermer tozu ilaveli harçlarda gözlemlenmiştir. Ancak mermer tozu oranı %50'ye çıkarıldığında basınç dayanımının, %40 mermer tozu ikamesine oranla düştüğü görülmüştür. Bunun yanında cam elyaf katkısı ile numunelerin basınç dayanımlarının azaldığı gözlemlenmiştir.

Basınç dayanımı açısından en başarılı sonuç; 150 gün suda bekleyen elyafsız %40 mermer tozu içeren numunedir. 150 gün sülfatlı suda bekletilmiş ve sülfatta ıslanma-kuruma çevrimi yapılan numune ise en yüksek basınç dayanımına elyafsız %40 mermer tozu içeren karışımda ulaşılmıştır.

Sülfat çözeltisi içerisindeki numuneler incelendiğinde mermer tozunun boşlukları doldurarak sülfat zararını azalttığı gözlenmiştir.

Eğilmede çekme dayanımı açısından en başarılı sonuç; 150 gün suda bekleyen CE1-MT40 kodlu cam elyafın 1 kg/m³ olduğu %40 mermer tozu içeren numune üzerinden elde edilmiştir. Genel olarak cam elyaf katkısının eğilmede çekme dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir. Suda bekleyen numunelerin eğilmede çekme dayanımları sürekli sülfat etkisinde kalan ve sülfatta ıslanma kuruma etkisine maruz bırakılan numunelerden daha fazladır. Sülfat etkisindeki numunelerde sülfat iyonları numune içindeki elyafa zarar verdiğinden eğilmede çekme dayanımları daha düşüktür. Islanma kuruma numunelerinde ise haftalık periodlarla uygulanan ıslanma kuruma deneyi sonrası numunelerde dayanım düşüşü meydana gelmiştir. Sülfatlı su içerisinde şişme gösteren numuneler kuruma sırasında büzülmüş ve bu 150 gün boyunca tekrarlanmıştır. Numune içerisindeki elyaflarda çatlama gözenekli yapı ve şişme gözlenmiştir. Bu durumun eğilme ve basınç dayanımlarında meydana gelen düşüşün başlıca nedeni olduğu düşünülmektedir.

Boy ölçümü deney sonrası ölçülen değerlere göre sürekli sülfat sonrası en fazla genişleyen harç serisi; %20 mermer tozu ve 0,25 kg/m³ elyaf içeren numunedir. Islanma-kuruma deneyi sonrası en çok genişleyen numune ise %40 mermer tozu ve 1 kg/m³ elyaf içeren numunedir. Lif miktarının artışıyla topaklanma olmuş ve numune oluşun boşluk sonucu daha fazla genişleme gözlenmiştir. Sülfat ortamındaki numunelerin konulduğu

kaplar su buharlaşmasını engellemek için kapalı tutulmuştur. Eğer su buharlaşırsa kristalleşme gerçekleşir ve reaksiyon kayar [38]. Su kürü uygulanan serilerde %30 mermer tozu ve 0,75 kg/m³ elyaf içeren numunede en çok genleşme gözlenmiştir.

Kılcal su emme deneyinde ıslanma-kuruma çevirimi sonrası numune değerlerinin sürekli sülfat numunelerinden ve su kürü numunelerinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Islanma kuruma çevrimine tabi tutulan numunelerde haftalık periodlarla ıslatılıp kurutulmasından kaynaklanan çatlama sonrası kılcal boşluklardan sızan sülfat iyonları jel boşluklarını doldurmuş ve kapilarite değeri yükselmiştir. Mermer tozunun artışıyla filler malzemenin yeri dolmuş ve kapilarite değeri düşmüştür. En yüksek kapilarite katsayısı ıslanma kuruma çevrimi sonrası CE1-MT0 olan seride gözlenmiştir. En düşük kapilarite değeri ise CE0-MT40 kodlu su numunesinde görülmüştür.

Kılcal su emme ve porozite değerleri paralellik göstermiştir. En yüksek porozite değeri ıslanma kuruma çevrimi sonrası CE1-MT0 kodlu numunede oluşmuştur. En düşük porozite değeri ise CE0-MT40 su numunesinde gözlenmiştir.

Gerçekleştirilen bu çalışmada cam elyaf ve mermer tozunun çeşitli oranlarında kullanımının çimento harçların sülfata dayanıklılık özelliklerine etkisi incelenmiştir.

İleriki çalışmalarda; değişik tipteki çimentoların kullanımının, farklı mineral katkı ve puzolan kullanımının, sülfatta deney süresi uzatılarak, farklı boyutlarda lif çeşitlerinin kullanımının, çimento harçlarının sülfata dayanıklılık özelliklerine etkilerinin incelenmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] www.simbeton.com.tr
- [2] <http://harc.nedir.com/#ixzz2IGuepmfl>
- [3] www.thbb.org
- [4] **Kozak, M.**, 2003. Çelik Lifli Betonlar ve Kullanım Alanlarının Araştırılması, Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknik bilimler Dergisi,5-3
- [5] **Beycioğlu, A., Başıyigit C., Subaşı S.**, 14-17 Mayıs 2008, Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanımı ile geri kazanılması ve çevresel etkilerinin azaltılması, Kocaeli Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü
- [6] **Gurer, C., Akbulut, H., Kurklu G.**, İnşaat Endüstrisinde Geri Dönüşüm ve Bir Hammadde Kaynağı Olarak Farklı Yapı Malzemelerinin Yeniden Değerlendirilmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon
- [7] **Ceylan, H.**, 2000. Mermer fabrikalarındaki mermer toz atıklarının ekonomik olarak değerlendirilmesi Yüksek Lisans Tezi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Isparta
- [8] **Biricik, H., Gündüz, A.S., Çakır Ö., Sarier N.**, 2003. Doksan Gün Sülfat Etkisinde Kaldıktan Sonra Kalker ve Silis Dumanı Katkılı Betonların Bazı Özellikleri, 5. Ulusal Beton Kongresi
- [9] **Meyer, A.**, (1974)''Anleitung für die herstellung von dauerhaften beton''. Beton 24 (7), 261-264
- [10] **Hime, W.G., Mather, B.** (1999) ''Sulfate attack, or is it?'', Cement and Concrete Research, Vol.29, ss. 789-791.
- [11] **Ünal, O., Uygunoglu T.**, 18-19 Aralık 2003 Türkiye IV. mermer sempozyumu (mersem'2003) bildiriler kitabı atık mermer tozu katkılı betonların donma-çözülme etkisinde mekanik özelliklerinin araştırılması
- [12] <http://www.dekamaden.com/hizmetlermermer.aspx>
- [13] **Zorluer, İ., Usta, M.**, (mersem '2003) Türkiye IV. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı 18-19 aralık 2003 zeminlerin atık mermer tozu ile iyileştirilmesi
- [14] **Demir, İ.**, Mermer, mermer tozu ve atıklarının kullanım alanları, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi
- [15] **Demir, İ., Başpınar M. S.**, 18-19 aralık 2001. Mermer tozu atıklarının (havuz çökeltisi)hafif yapı blokları üretiminde kullanılması, Türkiye IV. mermer sempozyumu (mersem'2003) bildiriler kitabı
- [16] **Yıldız, A. H.**, 2008. Mermer toz atıklarının yol inşaatında değerlendirilmesi, Doktora Tezi Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Isparta
- [17] **Yıldız, S., Bölükbaş Y., Keleştemur O.**, 16-18 Mayıs 2011 Cam Elyaf Katkılı Betonların Basınç DayanımlarınınYapay Sinir Ağları İle Tahmini 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, Turkey
- [18] **Uğur, A.**, 2007 Lif donatıların yüksek dayanımlı betonlarda yarma dayanımı-basınç dayanımı ilişkisine etkisi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

- [19] **Bozkurt, N.**, 2009. Fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun mekanik ve durabilite özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi Yapı Eğitimi Anabilim Dalı Elazığ
- [20] **Yazıcı, H.**, 2006. Yüksek fırın curufu katkılı harçların sülfat dayanıklılığının incelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü 8 (1), 51-58.
- [21] http://kisi.deu.edu.tr/kamile.tosun/Yapi_Malzemesi_II-11-ozel_betonlar-web.pdf
- [22] **Şimşek, O.**, 2004. Beton Bileşenleri ve Beton Deneyleri
- [23] **Arı, K., Haktanır T., Altun F., Karahan O.**, Beton borulara çelik lif katkısının mekanik özelliklere etkisi.
- [24] **Yıldırım S.T. ve Ekinci C.E.**, 2006. Çelik, Cam ve Polipropilen Lifli Betonlarda Donma-Çözülme Etkilerinin Araştırılması Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi Science and Eng. J of Fırat Univ. 18 (3), 359-366
- [25] **Baştürk, Ö.**, Beton yüzeylerine sarılan lifli kompozitlerin basınç dayanımının etkilerinin araştırılması yıl 2008 sdü
- [26] **Demirel, B., Yazıcıoğlu, S.**, 2007. Silis Dumanının Karbon Fiber Takviyeli Hafif Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11-1, 103-109
- [27] **Gençel, O.**, Farklı çelik lif tipi ve miktarının beton özelliklerine etkisi [The effect of different steel fiber type and amount on properties of concrete]
- [28] <http://oubs.iu.edu.tr/doc/417.ppt>
- [29] <http://www.camelyaf.com.tr>
- [30] <http://www.doruk-yapi.com/ppl.htm>
- [31] <http://v1.raf.com.tr>
- [32] **Erdoğan, Y.T.**, 2003. Beton, *ODTÜ Yayıncılık*, Ankara
- [33] **Şahmaran, M., Kasap Ö. ve Yaman İ.Ö.**, 2002. Tras ve Uçucu Kül Katkılı Çimentoların Sülfat Etkisindeki Performansları, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara *Müh.Mim.Fak.Dergisi C.XVI, S.2, Eng.&Arch.Fac.Osmangazi University, Vol.XVI, No: 2, 2002*
- [34] **Canpolat, F., Yılmaz K.**, Doğal zeolit ve uçucu kül katkılı ve katkısız harçların sülfat dayanıklılığı
- [35] **Kızıllığın, B.**, 2009. Çelik ve karbon lifli harçların sülfat etkilerine dayanıklılığının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi* Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı
- [36] **Kılınç, K., ve Uyan M.**, 2003. Beton karışım suyundaki sülfat tuzlarının çimento harcı özelliklerine etkisi, 5.Ulusal Beton Kongresi, Betonun Dayanıklılığı (Durabilite), İstanbul.
- [37] **Duru, K.**, 2006, Sulfate Resistance Of Blended Cements With Fly Ash And Natural Pozzolan, Middle East Technical University

- [38] Yıldız, S., Bölükbaş Y., Keleştemur O., (2010) Cam Elyaf Katkısının Betonun Basınç ve Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkisi Politeknik Dergisi Journal of Polytechnic Cilt:13 Sayı: 3 s. 239-243
- [39] Güneyisi, E., Gesoğlu M., Mermerdaş K. Metakaolin Katkılı Betonların Sülfat Dayanıklılığının İncelenmesi <http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/3153.pdf>
- [40] Erdoğan, Ş., Karataş E., 2002 Sülfat iyonu konsantrasyonu düşük ortamlara maruz betonun durabilitesinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi.
- [41] Alacakaya Mermer ve Maden İşletmesi San. ve Tic. A.Ş.
<http://www.alacakaya.com/tr/>.
- [42] 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
- [43] Sika Ürün Bilgi Föyü, 2009, Sika ViscoCrete Hi-Tech 30, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş., İstanbul
- [44] tur.sika.com/dms/getredirect.get/tr01.webdms.sika.com/113
- [45] www.camelsan.com.tr
- [46] Türk Standartları Enstitüsü: TSE, TS 802, 2002. Beton Karışımı Hesap Esasları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [47] Koçak, Y., Subaşı, S., Emiroğlu, M., 2011. Uçucu külün betonun bazı fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7 (1), 14-27.
- [48] Bozkurt, N., 2010. Streng thandcapillary water absorption of light weight concreteundr differentcuring conditions, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, April 2010, 17, 145-151.
- [49] TS 4045, 1985. Yapı Malzemelerinde Kapiler Su Emme Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [50] Yazıcı, H., 2006. Yüksek Fırın Curufu Katkılı Harçların Sülfat Dayanıklılığının İncelenmesi, *Deü Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi* Cilt: 8 Sayı: 1 s. 51-58
- [51] Yaprak, H., Şimşek, O., Öneş, A., Cam ve Çelik Liflerin Bazı Beton Özelliklerine Etkisi, *Politeknik Dergisi*, Cilt 7, Sayı 4, 2004.
- [52] Demirel, B. and Gönen, T., 2007. Karbon Fiber Takviyeli Betonda Farklı Fiber Boyunun Kapilariteye Etkisi, *Fırat Üniversitesi D.A.U.M Dergisi*, 6, 12-15.
- [53] Biricik, H., Gündüz, A.S., Çakır, Ö., Sarier, N., 2003. Doksan Gün Sülfat Etkisinde Kaldıktan Sonra Kalker ve Silis Dumanı Katkılı Betonların Bazı Özellikleri, 5. Ulusal Beton Kongresi
- [54] <http://www.mabetas.com.tr/sertlesmisbeton.htm>
- [55] ASTM C-1012-95a 1995. Standard Test Method for Length Change of Hydraulic- Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. American Society for Testing and Materials, Committee C-1, Subcommittee C01.29

ÖZGEÇMİŞ

Birsu ALİŞER 1988 yılında Elazığ'da doğmuştur. İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ'da tamamlamıştır. 2005 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Öğretmenliği Bölümünü kazanmış ve 2009 yılında mezun olmuştur. 2009 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Halen bu bölümde tez çalışmasına devam etmektedir.