

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KİREÇTAŞI TOZUNUN LİF TAKVİYELİ ÇİMENTO ESASLI
KOMPOZİTLERİN REOLOJİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ
ÜZERİNE ETKİSİ**

Serhat DEMİRHAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2012**

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KİREÇTAŞI TOZUNUN LİF TAKVİYELİ ÇİMENTO ESASLI
KOMPOZİTLERİN REOLOJİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ
ÜZERİNE ETKİSİ**

Serhat DEMİRHAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2012**

Yrd. Doç. Dr. Kâzım TÜRK'ün danışmanlığında, Serhat DEMİRHAN'ın hazırladığı “Kireçtaşı Tozunun Lif Takviyeli Çimento Esaslı Kompozitlerin Reolojik ve Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi” konulu bu çalışma 21/06/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Kâzım TÜRK

Jüri Üyesi: Doç. Dr. Paki TURĞUT

Jüri Üyesi: Doç. Dr. Mustafa ŞAHMARAN

Bu Tezin İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylıyorum.

Prof. Dr. Mehmet CİCİ
Enstitü Müdürü

Bu Çalışma HÜBAK Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: 1195

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZ.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	4
2.1. Giriş.....	4
2.2. TASARLANMIŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLER.....	7
2.3. ECC’NİN MEKANİK VE DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİ.....	11
2.4. ECC UYGULAMALARI.....	23
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	28
3.1. MATERYAL.....	28
3.1.1. Çimento.....	28
3.1.2. Mineral Katkılar.....	28
3.1.3. Agregası.....	29
3.1.4. Kimyasal Katkı.....	31
3.1.5. Lif (PVA).....	31
3.2. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	32
3.2.1. Karışımların Hazırlanması.....	32
3.2.2. Taze Özellikleri.....	36
3.2.2.1. Mini Çökme-Yayıma Deneyi.....	36
3.2.2.2. Marsh Hunisi Deneyi.....	37
3.2.2.3. Rotasyonel Viskozimetre Testi.....	38
3.2.3. Sertleşmiş Özellikleri.....	40
3.2.3.1. Eğilmede Çekme Dayanımı.....	40
3.2.3.2. Matris Kırılma Tokluğu.....	42
3.2.3.3. Basınç Dayanımı.....	44
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	45
4.1. TAZE ÖZELLİKLER.....	45
4.1.1. Mini Slump.....	45
4.1.2. Marsh Hunisi.....	45
4.1.3. Rotasyonel Viskozimetre.....	46
4.1.3.1. Akma Dayanımı.....	46
4.1.3.2. Viskozite.....	47
4.2. MEKANİK ÖZELLİKLER.....	51
4.2.1. Basınç Dayanımı.....	51
4.2.2. Kırılma Tokluğu.....	53
4.2.3. Eğilme Performansı.....	54
4.2.3.1. Yük-Sehim Eğrileri.....	54
4.2.3.2. Eğilmede Çekme Mukavemeti.....	57
4.2.3.3. Orta Açıklık Sehimini.....	59
4.2.3.4. Çatlak Karakterizasyonu.....	61
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	70
ÖZET.....	71
SUMMARY.....	72

ÖZ

Yüksek Lisans Tezi

KİREÇTAŞI TOZUNUN LİF TAKVİYELİ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN REOLOJİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Serhat DEMİRHAN

**Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Kâzım TÜRK
Yıl: 2012, Sayfa: 72**

Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozit (ECC), yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin özel bir çeşidi olup, çekme ve kayma yüklemeleri gibi mekanik yükler altında sünek ve hasara karşı toleranslı bir davranış sergilemektedir. Standard ECC karışımları mikro silika kumu ile üretilmektedir. Bu çalışmada, Silis kumu (SK) yerine kireçtaşı tozu (KTT) kullanılarak Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitlerin (Engineered Cementitious Composites-ECC) reolojik ve mekanik özellikleri incelendi. Bu amaçla, beş farklı ECC karışımları belirlendi. Kontrol karışımı olan M1 karışımı %100 silis kumu ve geriye kalan dört karışım ise sırasıyla %25, %50, %75 ve %100 oranlarında kireçtaşı tozu içermektedir. Üretilen ECC karışımlarının mekanik özellikleri 3, 28 ve 90 günlük kür yaşları için incelenmiştir. ECC karışımlarının mekanik özellikleri göz önünde bulundurulduğunda, kontrol karışımı olan M1'e kıyasla, KTT içeren karışımların genel olarak daha iyi bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. KTT kullanım miktarının artması ile basınç dayanımı, kırılma tokluğu ve eğilmede çekme mukavemetinin 3 ve 28 günlük numunelerin olumlu olarak etkilendiği, ama 90 günlük numunelerde ise kayda değer bir değişiklik gözlemlenmemiş neredeyse aynı değerler saptanmıştır. Ayrıca, silis kumu yerine kullanılan KTT miktarı ve numune yaşının ECC kırımlarının sünekliği üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Taze ve reolojik özellikler göz önünde bulundurulduğunda, KTT kullanım miktarı arttıkça slump (çökme) değerinin düştüğü ve marsh hunisi akma süresinin arttığı görülmüştür. Yine KTT tozu artışı ile ECC karışımlarının akma dayanımı ve viskozitelerinin arttığı gözlemlenmiştir. 0, 20 ve 40. dakikalardaki viskozite okumalarında, başlangıçta farklı olan viskozitelerin son okuma süresinde aynı kıvama ulaştığı tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİME: Kireçtaşı tozu, silis kumu, tasarlanmış çimento esaslı kompozitler, reolojik ve mekanik özellikler

ABSTRACT

MSc Thesis

EFFECT OF LIMESTONE POWDER ON MECHANICAL AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES

Serhat DEMİRHAN

**Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Kâzım TÜRK

Year: 2012, Page: 72

Engineered Cementitious Composites (ECC) is a special type of high performance fiber reinforced cementitious composite featuring high ductility and damage tolerance under mechanical loading, including tensile and shear loadings. Standard ECC mixtures are typically produced with microsilica sand. This study presents the influence of limestone powder (LSP) as a replacement material by silica sand (SS) on the mechanical and rheological properties of engineered cementitious composites (ECC). For this purpose, five different ECC mixtures were adopted. M1, a control mixture, was composed of %100 silica sand while the rest of mixtures included 25%, 50%, 75% and 100% limestone powder, respectively. The properties of ECC mixtures were investigated for the ages of 3, 28 and 90 days. For the mechanical properties, it was concluded that ECC mixtures with LSP were in general higher than the reference mixture M1 with only SS for all curing ages. Increase in the LSP content had prominently a positive effect on the performance of the compressive strength, fracture toughness and flexural strength at the ages of 3 and 28 days though there wasn't any significant increase at the age of 90 days when compared to the reference mixture M1. Also, the ductility of the ECC beams had a strongly depend on the LSP content and specimen age. For fresh and rheological properties, test results show that increase in LSP content results in lower slump flow and higher marsh cone flow time. Also, when LSP usage percentage increased both of yield stress and plastic viscosity has increased, but plastic viscosity became the same depending on viscosity reading time 0, 20 and 40 minutes.

KEY WORDS: Limestone powder, silica sand, engineered cementitious composites, rheological and mechanical properties

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezi, Yrd. Doç. Dr. Kâzım TÜRK'ün danışmanlığında tamamlanmıştır.

Bu çalışmanın tüm safahatında desteğini esirgemeyen, beni sürekli yönlendiren ve zamanımı büyük bir içtenlikle bana ayıran başta danışmanım Yrd Doç. Dr. Kâzım TÜRK'e,

Yüksek Lisans tez savunmasına katılımlarından dolayı, jüri üyeleri Doç. Dr. Mustafa ŞAHMARAN ve Doç. Dr. Paki TURĞUT'a,

Hususan, Lisans mezuniyetimden bu yana maddi ve manevi desteğini benden hiçbir vakit esirgemeyen, akademik çalışmalarında yol gösteren komisyon jüri üyesi Doç. Dr. Mustafa ŞAHMARAN'a,

Tezim ile ortak konuları içeren çalışmalarından ve tecrübelerinden dolayı sürekli destek veren İnşaat Yüksek Mühendisi M. Turhan ARIK ve Arş. Gör. Hasan Erhan YÜCEL'e,

Bölüm başkanımız Doç. Dr. H. Murat ALĞIN'a,

Doğrudan veya dolaylı olarak bana sürekli destek veren, teşriki mesaide bulunduğum meslektaşım ve arkadaşım Arş. Gör. Bilal ÇELİK ve Arş. Gör. Zeynep ALĞIN'a,

Sabır, sebat ve özverili bir çalışma gerektiren akademik hayatımda sürekli yanımda olan ve manevi desteğini benden esirgemeyen aileme, teşekkürü bir borç bilirim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2. 1. ECC'nin tipik çekme gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi ve çatlak genişliği gelişimi..	10
Şekil 2. 2. ECC'nin eğilme yüklemeleri altındaki davranışı.....	10
Şekil 2. 3. Kırılma modları.....	12
Şekil 2. 4. ECC numunelerin çevrimlerden sonraki görüntüsü.....	13
Şekil 2. 5. Buz çözücü tuzların varlığında hasarsız harç ve ECC prizmalarında meydana gelen dökülmelerin kütlesi – donma-çözülme çevrim sayısı	15
Şekil 2. 6. ECC için genleşmenin zamanla değişimi.....	16
Şekil 2. 7. Hasarlı ve hasarsız ECC'nin (kare işaretleri) ve çelik donatılı harç numunelerinde (elmas işaretleri) geçirimsizlik. Gri noktalar çatlak miktarı bakımından normalize edilmiş numunelerdeki geçirimsizlik değerleridir	18
Şekil 2. 8. ECC ve harç için difüzyon katsayısı – ön yükleme deformasyon seviyesi	19
Şekil 2. 9. ECC karışımları için kılcal geçirimsizlik – çatlak sayısı grafiği.....	20
Şekil 2. 10. Tuz çözeltisine maruz bırakıldıktan sonra kendiliğinden iyileşen çatlaktaki hidrasyon ürünlerinin SEM görüntüsü.....	21
Şekil 2. 11. Çelik donatı boyunca ölçülen makrocell ve mikrocell korozyon hızları (a) çelik donatılı beton (R/C) ve (b) çelik donatılı ECC (R/ECC).....	23
Şekil 2. 12. Mitaka Barajında su yalıtımı tadilatı amacıyla ECC malzemesinin uygulanması	24
Şekil 2. 13. Yokohoma'daki Nabeaure Gökdeleni, prefabrik ECC bağ kirişlerinin sismik dayanım amacıyla yapının çekirdeğinde kullanımı.....	25
Şekil 2. 14. Michigan'da bulunan köprü tabliyesinde ECC yama tadilatı uygulaması.....	26
Şekil 2. 15. Grove Caddesi Köprüsünde (Michigan) inşa edilen ECC bağlantı döşemesi.....	27
Şekil 3. 1. Sugözü uçucu külünün morfolojik yapısı	29
Şekil 3. 2. Silis kumu ve kireçtaşı tozunun gradasyon eğrisi.....	30
Şekil 3. 3. ECC üretiminde kullanılan PVA lifi.....	32
Şekil 3. 4. ECC üretim aşamaları.....	34
Şekil 3. 5. ECC numunelerinin poşette 7 gün kür edilmesi.....	35
Şekil 3. 6. ECC numunelerinin oda şartlarında muhafaza edilmesi	35
Şekil 3. 7. Mini yayılma testi.....	37
Şekil 3. 8. Marsh hunisi deney aparatı	38
Şekil 3. 9. Rotasyonel viskozimetre cihazı.....	39
Şekil 3. 10. Akışkanlar için Bingham Modeli	39
Şekil 3. 11. Ünlversal test cihazı.....	40
Şekil 3. 12. Dört noktalı eğilmede çekme testi için deney düzeneği yük uygulanma noktaları	41
Şekil 3. 13. Dört noktalı eğilmede çekme testi	41
Şekil 3. 14. Çatlak karakterizasyonu.....	42
Şekil 3. 15. Matris tokluğu tayini için kullanılan deney tertibi.....	43
Şekil 3. 16. Matris tokluğu kesin çentik derinlikleri ölçümü.....	44
Şekil 3. 17. Basınç dayanımı	44
Şekil 4. 1. Mini çökme-yayılma çapının karışımlara göre değişimi.....	45
Şekil 4. 2. Marsh hunisi akma zamanının karışımlara göre değişimi	46
Şekil 4. 3. ECC karışımlarının akma dayanımlarının ölçüm sürelerine göre değişimi.....	47
Şekil 4. 4. ECC karışımları görünür viskozitelerinin kayma hızları ve zamana bağlı değişimleri	49
Şekil 4. 5. Taze ECC karışımlarına ait plastik viskozite değerleri.....	50
Şekil 4. 6. ECC karışımları Marsh hunisi akma zamanı ve plastik viskozite arasındaki ilişki.....	51
Şekil 4. 7. ECC karışımlarında yaşa bağlı relatif basınç dayanımının artışı.....	53
Şekil 4. 8. ECC karışımları yaşa bağlı kırılma tokluğu test sonuçları.....	54
Şekil 4. 9. Üretilen ECC karışımlarının tipik eğilmede çekme mukavemeti ve orta açıklık sehimi.....	56
Şekil 4. 10. Eğilmede çekme ve basınç dayanımı 3, 28 ve 90 gün korelasyonu	59
Şekil 4. 11. Yaşa bağlı orta açıklık sehim test sonuçları	61
Şekil 4. 12. Çekme yüzünde düzgün yayılı çatlak oluşmuş ECC numunesi.....	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 2. 1. ECC malzemesinin tipik karışım tasarımı	9
Çizelge 3. 1. Çimento ve uçucu kül kimyasal kompozisyonları	28
Çizelge 3. 2. PVA liflerinin geometrik ve kimyasal özellikleri	32
Çizelge 3. 3. ECC karışım kompozisyonları (kg/m ³)	33
Çizelge 4. 1. Basınç dayanımı test sonuçları	52
Çizelge 4. 2. Eğilmede çekme mukavemeti test sonuçları.....	57
Çizelge 4. 3. ECC numuneleri OAS kapasitesi test sonuçları.....	59

SİMGELER DİZİNİ

ECC	Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (Engineered Cementitious Composites)
LDB	Lif Donatılı Beton
AAİ	Agrega Aşınma İndeksi
ASR	Alkali-Silika Reaksiyonları
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopu
C-S-H	Kalsiyum-Silika-Hidrat
R/C	Reinforced Concrete (Betonarme)
PÇ	Portland Çimentosu
KTT	Kireçtaşı Tozu
UK	Uçucu Kül
SK	Silis Kumu
Ç	Çimento
R ²	Korelasyon Katsayısı
ASTM	Amerikan Test ve Standart Oluşturma Birliği

1. GİRİŞ

Yapının performansı, kullanılan malzemelerin özelliklerinden etkilendiği yadsınamaz bir gerçektir. Gelişen ülkelerde, beton son yüz yılın en çok kullanılan yapı malzemesidir. Beton, bağlayıcı bir ortam (hidrate olmuş çimento hamuru) ve agrega tanelerinden oluşmaktadır. Birçok noktada enerji tasarrufu ve ekolojik faydaları ile bütünleşmiş, çok ucuz bir maliyette sağlam mühendislik gereksinimlerini sunmaktadır. Özellikle basınç direnci, ham madde erişilebilirliği ve istenilen türden şekillerde üretilebilmesi gibi avantajları onu harika bir yapı malzemesi yapmaktadır.

Lakin beton gibi bağlayıcı malzemeler, düşük çekme mukavemeti ve düşük deformasyon kapasitesi ile mekanik yükler altında gevrek bir davranış sergilemektedir. Bu gevrek davranış dayanıklılık, çekme ve kesme kuvveti gibi yapısal performans parametrelerine bir engel teşkil etmektedir (Li, 2002).

Homojen bir şekilde beton içinde dağılmış ve yüksek mukavemetli olan liflerin çimento esaslı matris içerisine atılıp sünek bir yapının oluşturulması, bu gevrek özelliğin iyileştirilmesi için mantıklı bir çözümdür. Bu çözüme bağlı olarak, yapının performansında engel olan bu gevrekliğin iyileştirilmesi, “Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (Patentli İsmi: Engineered Cementitious Composites – ECC)” olarak adlandırılan, yeni bir kompozit türünün beton dünyasına girmesi ile giderilmiş oldu.

Şekil değiştirme sertleşmesi gösteren yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozitler, yüksek süneklik ve dayanıklılık için mikro-mekanik tabanlı olarak tasarlanan oldukça yeni ve gelecek vadeden bir kompozit malzeme sınıfıdır (Lin ve Li, 1997; Li ve ark., 2001; Li, 2003). Mikro-mekanik olarak tasarlanmış malzemelerin optimizasyonu (Lin ve Li, 1997) ve hacimce %2’lik lif eklenmesi ile eksenel çekme kuvveti altında %3’ü aşan bir şekil değiştirme kapasitesi (tensile strain capacity) elde edilebilmektedir (Lin ve Li, 1997; Lin ve ark., 1999).

Matrisdeki ilk çatlaktan sonra, sıralı birçok mikro çatlak oluşmakta ve şekil değiştirme kapasitesi normal betonun 300-500 katı kadar artmaktadır. Hatta nihai yükte bile çatlak genişlikleri 50-80 µm civarında sabit kalmaktadır.

Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler için sürdürülebilir kalkınmada inşaat ve beton sektörünün hayati bir önemi bulunmaktadır. Yapı tasarımının ve betonun ucuza mal edilmesi ilk maliyeti düşürse bile, binanın yanlış tasarımı, deprem yükleri ve şiddetli çevresel etkiler gibi sebeplerle yapı zamanla onarım ve güçlendirmeye ihtiyaç duymakta; zaman, insan gücü, malzeme ve serviste aksama gibi kayıplarla yapının maliyeti ilk başta hesaplanan maliyetten çok daha yüksek rakamlara ulaşmaktadır. Öte yandan, ECC kullanımıyla yapıların daha sünek ve dayanıklılığı yüksek bir betonla inşa edilmesi, yapı ömrünü uzatıp onarım/güçlendirme ve yeni inşaatlar için harcanan malzeme ihtiyacını azaltacaktır. Böylece hem doğal kaynakların tüketilmesini hem de çimento ve donatı gibi yapısal malzemelerin üretiminde harcanan çok büyük miktardaki enerji kullanımını azaltacaktır. Ayrıca, ECC üretiminde endüstriyel atık malzemelerin (silis dumanı, uçucu kül gibi mineral katkıları) yüksek hacimlerde kullanılmasıyla geri dönüşüm sağlanacak ve çevreye verilen zarar engellenmiş olacaktır.

ECC üretiminde kullanılan malzemelerin yüksek maliyette üretilmesi veya zor temin edilmesi, ECC'nin yapısal uygulama alanlarında kullanılmasının önündeki en önemli problemi teşkil etmektedir. Üretimi aşamasında Portland çimentosunun miktarının azaltılıp mineral katkıları ile yer değiştirilmesi, kullanılan agrega tane boyutunun artırılması veya kısıtlı rezervi olan silis kumu (SK) yerine başka agrega tipinin kullanılmasıyla ECC'nin maliyetini azaltılıp, malzeme çevre ile dost bir hale getirilebilir. Çünkü bu şekilde çimento miktarının azaltılması ile doğaya daha az karbondioksit salınmakta ve SK yerine yerel malzemelerin kullanılması ile malzemenin hem üretim maliyeti azaltılmış hem alternatif malzeme oluşturulmuş hem de çevreye duyarlılığı artırılmış olur.

Bu tezde, şekil değiştirme sertleşmesi gösteren yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin yerel malzemeler ve yüksek oranda endüstriyel yan

ürün (uçucu kül) kullanılmasıyla üretilmesi; reolojik ve mekanik özelliklerinin araştırılması suretiyle yüksek performanslı ve ekonomik kompozit malzemenin geliştirilmesi konusunda çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Böylece, Türkiye’de ve Dünya’da az rezerve sahip silis kumu yerine, Şanlıurfa’da seksen üç milyon ton gibi yüksek bir rezervi bulunan kireçtaşından elde edilebilecek toz (Anonim, 1992) kullanılıp, agrega tipi karışım parametresinin ECC kompozitinin taze ve sertleşmiş özellikleri üzerine etkisi çalışılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler için, sürdürülebilir kalkınmada inşaat ve beton sektörünün çok önemli bir yeri bulunmaktadır. Günümüz uygulamalarında olduğu gibi, sadece düşük maliyetli bir yapı malzemesi üretilmesi sürdürülebilir kalkınma anlayışından çok uzaktır. Bu yüzden bu sektöre bütünsel olarak yaklaşmalı, doğal kaynakların korunması, endüstriyel atıkların değerlendirilmesi, yapıların doğru ve uzun ömürlü olarak tasarlanması suretiyle bakım ve onarım maliyetlerinin azaltılması, çevreye duyarlı üretim yapılması gibi diğer faktörlerin de aynı anda göz önünde tutulması gerekmektedir. Bu faktörlere daha yakından baktığımızda karşımıza çıkan manzara şu şekildedir: Gerek çimento üretiminde gerekse beton üretiminde kullanılan malzemeler doğal kaynaklarımızdan karşılanmaktadır. Hammadde temini için yapılan kazılarda, toprak tabakası ve yeşil alanlar yok edilmektedir. Ayrıca, 1 ton Portland çimentosu üretilmesi için yaklaşık olarak 4 Giga-joule gibi büyük bir enerji ihtiyacının kullanılması ve ülkemizdeki çimento üretiminin 2001'den 2006'ya kadar geçen kısa sürede %61 oranında artarak yıllık 48 milyon-ton gibi bir değere ulaşması dikkate alınınca, durumun ne kadar vahim olduğu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca çimento üretimi için gerekli olan enerjiye ilaveten, 1 ton Portland çimentosu üretilmesi sonucunda yaklaşık olarak 1 ton karbondioksit gazı atmosfere salınmaktadır. Türkiye küresel ısınmaya sebep olan karbondioksit gazının salınımında Avrupa'da 7. sırada bulunmaktadır. Bunun çevreye verdiği zararı gözetip, gerekli önlemleri almak da sürdürülebilir kalkınma için gereklidir. Çimento ve beton üretiminde, silis dumanı, uçucu kül ve cüruf gibi atık malzemelerin kullanılması, gerek ekonomik, gerek teknik ve gerekse çevresel katkılarıyla sürdürülebilir kalkınma için günümüzün olumlu bir uygulaması olmakla birlikte, bu tür malzemelerin kullanım oranları çoğu zaman düşük seviyelerde kalmıştır. Betonarme yapıların ömürleri genellikle 50 yıl olarak tasarlanmasına rağmen, özellikle dayanıklılık problemlerinden kaynaklanan sebeplerden dolayı, bu ömür çoğu zaman 20-30 yıl süreyi pek geçememektedir. Bunun yanı sıra, yanlış tasarım/uygulama gibi sebeplerden dolayı yapılarımız depremden çok ağır hasarlar

görmektedir. Bu durumun sonucu olarak yapı, güçlendirme ve tamirata ihtiyaç duymakta ve böylece hem maddi hem de çevresel kaynakların tüketilmesine sebep olmaktadır.

İlk olarak 2000’li yılların başında Michigan Üniversitesinde bulunan ve geliştirilen, “Engineered Cementitious Composites” (tasarlanmış çimento bazlı kompozitler – ECC) ismiyle patent alınan şekil değiştirme sertleşmesi (strain hardening) gösteren lif donatılı çimento esaslı kompozitler, birçok özellik bakımından orta ve yüksek dayanımlı betonların özelliklerini göstermektedir. Fakat bu kompozit malzemenin çekme şekil değiştirme kapasitesi %3 ile 5 aralığında olup, çimento esaslı bir malzeme için oldukça yüksek bir değerdir. Bu değer, normal betonun ve lif donatılı betonun çekme şekil değiştirme kapasitesinin yaklaşık 300 ile 500 katı kadardır. ECC ilk çatlaktan sonra şekil değiştirme sertleşmesi sergilemekte ve bu özelliği ile ECC’nin betondan öte sünek bir metal gibi davranış sergilemesini sağlamaktadır (şekil değiştirme kapasitesi birçok sünek malzeme için, örneğin alüminyum bileşeni, %6 ile 8 arasında değişmektedir). Öte yandan, ECC hasarlara karşı oldukça toleranslı olup, şiddetli eğilme ve çekme yükleri altında da sünekliğini korumaktadır. Yük altındaki çatlak genişliği lifli betonlarda 300-400 µm seviyelerinde iken, bu değer ECC için 60 µm’den az olmaktadır. Bu ise ECC’nin diğer beton türlerine kıyasla çevresel şartlar altında da daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır.

ECC, şu an sadece özel bir kum (mikronize kuvars kumu) ile başarılı bir şekilde üretilebilmektedir. Ancak, ECC’nin yerel malzemelerle üretilmesi, kum tane boyu dağılımının etkileri, üretimin tekrarlanabilirliği, çok yüksek hacimde uçucu kül kullanımının mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerine etkileri, mekanik ve çevresel yüklerin aynı anda uygulanması durumundaki performansı, otojen rötresi, lif dağılımının homojen olması için gerekli olan reolojik özellikler, lif-matris ara yüzeylerinin mineral katkı miktarına bağlı özellikleri, kendiliğinden iyileşmesi, mikro yapısı, darbe dayanımı gibi konular hala aydınlık bekleyen hususlardır.

Betonarme yapıların yüksek dayanıklılığı, genellikle yoğun beton matrisiyle ilişkilendirilebilir. Örneğin, yoğun bir mikro yapının geçirgenliği düşürmesi ve zararlı maddelerin çelik donatıya taşınımını azaltması beklenir (Beeldens ve Vandewalle, 2001; Oh ve ark., 2002). Bu durum sürekli granülometrilili agrega, uçucu kül ve silis dumanı kullanımı, ya da düşük su/çimento oranıyla elde edilebilir (Mehta, 1986; Hwang ve ark., 1996; Chang ve ark., 2001). Ancak, bu kavramlar betonun servis ömrü boyunca çatlaksız bir şekilde kalmasına ve yoğun mikro yapısı sayesinde su, klor iyonları ve oksijen gibi materyallerin geçirimsizliğine direnç gösterdiği durumda geçerlidir. Laboratuvar testlerinde, beton varsayılan çatlaksız durumunda, çok umut vadeden bir dayanıklılık göstermektedir (Weiss ve Shah, 2002; Mora ve ark., 2003). Halbuki, uygulamada betonarme elemanlar, uygulanan mekanik yükler ve neredeyse kaçınılmaz olan kısıtlanmış durumlarda beklenen rötre ve termal deformasyonlar sebebiyle çatlaklar (Wittmann, 2002; Mihashi ve De Leite, 2004). Bu çatlaklar betonda bozulmaya sebep olan zararlı maddelerin nüfuzu için kolay yollar sağlar. Klor, oksijen ve karbonatlaşmaya neden olan maddeler bu çatlaklar vasıtasıyla taşınır ve sonuç olarak çelik donatının paslanmasına sebep olurlar. Komşu çatlaklar arasındaki sağlam betonun çok yoğun ve neredeyse tamamen geçirimsiz olduğu durumlarda dahi, çatlakların varlığı genel geçirimsizliğin artmasına ve zararlı maddelerin çelik donatıya ulaşmasına sebebiyet verir (Bakker, 1988; Gerard ve ark., 1997; Hearn, 1999). Bu sebepten dolayı, dayanıklılık problemlerinin kökünde, beton malzemelerin gevrek yapısı yer almaktadır. Bu sorunu çözmek için, betonun gevrek yapısını azaltacak temel bir çözüm gereklidir.

Donatılı betondan (R/C) önemli derecede daha yüksek sünekliğe sahip Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitlerin (YPLDÇK) kullanımı, çatlak oluşumu sebebiyle ortaya çıkan dayanıklılık problemlerinin çözümünde kullanılabilir (Li ve Lepech, 2004). Bu malzemelerin birçok uygulamada kullanılabilirliğini kanıtlamak için, geniş çatlaklar oluşturmadan yüksek süneklik göstermesi, çelik donatıyı paslanmadan koruması, mükemmel donma-çözülme ve pullanma dayanımı, uzun vadede mekanik performansı ile yapısal ve yüksek malzeme dayanıklılığı göstermesi gereklidir. Süneklik ve sağlamlık sağlayan

malzemelerin kullanımı daha sağlam altyapı sistemlerini ve geleceğin tasarımlarını önemli ölçüde etkileyebilir.

2.2. Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler

Avrupa Tasarım Kodlarında, beton kullanılarak inşa edilen kamu yapılarından 75 yılın üzerinde bir servis ömrü istenmektedir (Anonim, 2003). Ancak, tecrübeler mekanik yüklerin ve çevre koşullarının etkileri birleşince birçok beton altyapıların sadece 20 ya da 30 yıl sonra bozulmaya başladığını göstermiştir. Bozulmuş altyapıların değiştirilmesi ya da tamiri için malzeme üretimi esnasında trafik sıklığıyla alakalı araç emisyonu ve yakıt tüketiminden dolayı Portland çimentolu betonunun kullanıldığı alt yapıların kısa kullanım ömrü, önemli etkiye sahiptir. Beton çatlakları ile birlikte donatılı Portland çimentolu betonunun dayanıklılığındaki zayıflık, beton altyapıların kısa kullanım ömrünün temel sebeplerinden biridir. Çatlaklar genellikle beton ve çevre koşulları arasındaki çeşitli fiziksel, kimyasal ve mekanik etkileşimlerin sonucu olup yapının kullanım süresi boyunca farklı aşamalarda oluşabilir. Çatlak genişliği kontrolü olmayan gevrek geleneksel betonlarda çatlakların yapısı öncelikle iki olağanüstü hasardan sorumludur. Bu hasarlar, betonun mukavemeti ve rijitliğinin düşmesi ve korozyon, alkali-silika reaksiyonları, donma-çözülme hasarları ve sülfat hücumu gibi diğer beton bozulma tiplerine önderlik eden zararlı kimyasalların girişinin hızlanmasıdır. Bu nedenle, dayanıklılık bütün beton yapılar için son derece önemli olup bu özellik büyük oranla betonun gevrek doğasıyla ilgilidir.

Yüksek basınç dayanımına sahip betonlar geçmiş yıllardan bu yana yapısal amaçlarda kullanılmaktadır. Fakat, yüksek dayanıma sahip betonlar normal dayanımlı betonlara oranla daha gevrek bir davranış sergilemektedir. Ayrıca, betonun gevrekliği basınç dayanımı yükseldikçe daha da artmaktadır. Bu durum ise yapısal uygulamalarda olması muhtemel tehlikeleri meydana getirmektedir. Günümüzde sık sık karşılaşılan dayanıklılık problemlerinin ve beton ömrünün az olmasının en önemli sebeplerinden birisi de betonun bu gevrek davranışdır. Oysaki yüksek sünekliğe sahip betonların kullanımı ile beton yapıların deprem yüküne vereceği

tepkilerde ve çevresel koşullar altındaki dayanıklılığında kayda değer bir biçimde iyileşmeler olacaktır.

Bu nedenlerden dolayı yapısal uygulamalarda çimento esaslı yüksek sünekliliğe sahip bir kompozit malzemenin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin yeni bir türü olan mikro-mekanik olarak tasarlanmış şekil değiştirme sertleşmesi gösteren yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozitler (patentli ismi: Engineered Cementitious Composites – ECC), ağır yüklemeler altında yüksek hasar toleransı ve normal servis şartlarında yüksek dayanıklılık göstermesi için mikro-mekanik olarak tasarlanmış sünek lif donatılı çimento esaslı kompozitlerdir (Li, 1998; Li ve ark., 2001; Li, 2003). ECC'yi geleneksel ve lif donatılı betonlardan (LDB) ayıran en önemli özelliği, karışımına göre %3 ile %5 arasında değişen aksel çekme şekil değiştirme kapasitesine sahip olmasıdır. Bu kapasite, normal betonun 300 katından daha fazla şekil değiştirme kapasitesine izin veren çok sıkı aralıklı mikro çatlakların oluşumuyla ilgilidir. Çatlakların oluşumundan sonra daha yüksek yükleri taşıyabilen bu çatlaklar, malzemenin sünek metallere benzer bir şekilde şekil değiştirme sertleşmesi göstermesini sağlar.

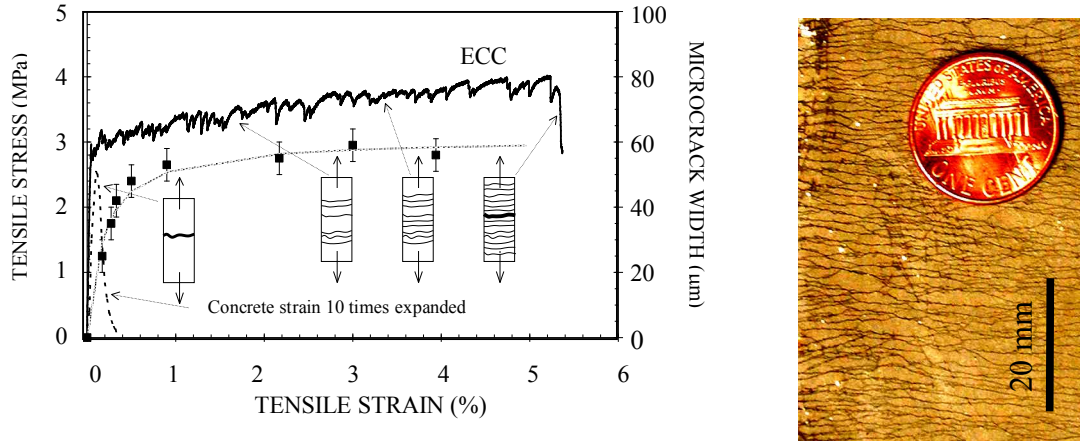
ECC'nin bileşenleri LDB'ye benzer olmasına rağmen, ECC'de mikro çatlaklar aracılığıyla göstermiş olduğu şekil değiştirme sertleşmesi özelliği, bileşenleri (çimento, kum ve lif) arasındaki ara yüz özelliklerinin kontrolü ve mikro-mekanik uyarlamalar yoluyla elde edilmektedir (Li, 1998; Lin ve ark., 1999; Li ve ark., 2001; Li, 2003). Çimento esaslı matrisin kırılma özellikleri karışım oranları sayesinde dikkatlice kontrol edilmektedir. Dayanım, elastisite modülü ve en-boy oranı gibi lif özellikleri ECC'de kullanım amacıyla isteğe göre uyarlanmıştır. Ayrıca, lif ve matris arasındaki ara yüz özellikleride bu malzemede kullanılmak üzere üreticiyle işbirliği yapılarak optimize edilmiştir. Poli-vinil-alkol (PVA) lifler kullanılarak üretilen tipik ECC'nin karışım oranları Çizelge 2.1.'de verilmiştir.

Çizelge 2. 1. ECC malzemesinin tipik karışım tasarımı
(SA = süperakışkanlaştırıcı; lif hariç tüm bileşenlerin ağırlıkça oranları)

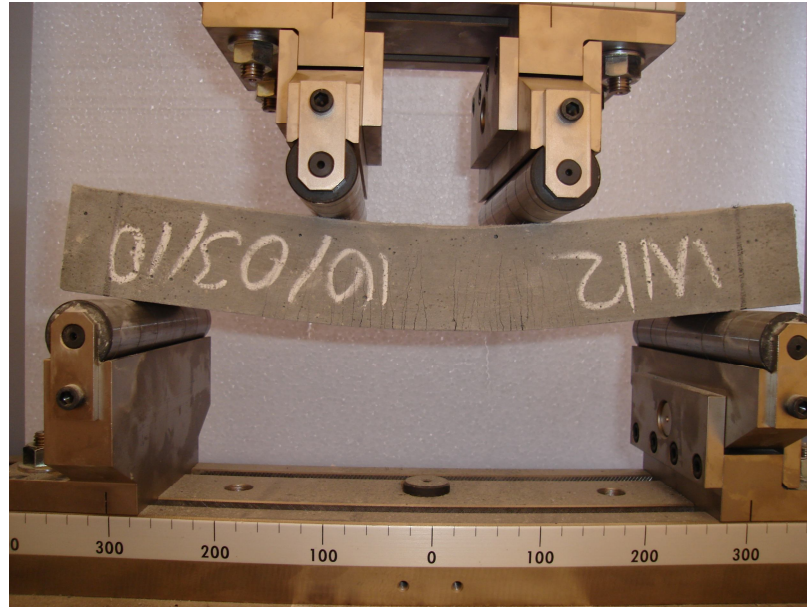
Çimento	Su	Kum	Uçucu Kül	SA	Lif (%)
1.00	0.58	0.80	1.20	0.013	2.00

Birçok yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozit malzemelerde yüksek performans elde edebilmek için yüksek hacimde life ihtiyaç duymasına rağmen, ECC üretiminde hacimce %2 oranında kısa süreksiz lifler kullanılmaktadır. ECC üretiminde düşük hacimde lif kullanımı ile beraber yaygın bileşenlerin kullanımı inşaat uygulamalarında esnekliğe olanak sağlamaktadır. Bugüne kadar, ECC malzemeleri, kendiliğinden yerleşen dökümler, ekstrüzyon, püskürtme ve geleneksel karıştırıcı ya da hazır beton kamyonu kullanılarak üretimi gerçekleştirilmiştir (Stang ve Li, 1999; Kong ve ark., 2003; Kim ve ark., 2003; Lepech ve Li, 2007).

Üretiminde %2 oranında PVA lif içeren ECC'nin tipik bir aksenal çekme gerilmesi – birim şekil değiştirme eğrisi Şekil 2.1.'de gösterilmektedir (Weimann ve Li, 2003). Şekilden görüleceği üzere ilk çatlaktan sonra karakteristik şekil değiştirme sertleşmesi özelliği çoklu mikro çatlak özelliği ile birlikte meydana gelmiştir. Plastik deformasyon sırasında meydana gelen çatlakların gelişimi de Şekil 2.1.'de gösterilmiştir. Şekil 2.1.'den görüleceği üzere, çatlak genişliği azami yük taşıma kapasitesinde dahi 100 µm seviyesinin çok altında kalmıştır. ECC geleneksel donatıyla birlikte kullanılmasına bağlı olmaksızın, meydana gelen dar çatlak genişliği kendiliğinden kontrollü olup, çelik donatı oranından bağımsızdır. Çok aşırı eğilme yüklemelerinde, ECC kiriş numunesi plastik deformasyon göstererek sünek bir metal gibi deformasyon göstermektedir (Şekil 2.2.). Basınç yüklemeleri altında ise ECC malzemesi normal veya yüksek dayanımlı betona benzer basınç dayanımı göstermektedir (Lepech ve Li, 2007).



Şekil 2. 1. ECC'nin tipik çekme gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi ve çatlak genişliği gelişimi (Weimann ve Li, 2003)



Şekil 2. 2. ECC'nin eğilme yüklemeleri altındaki davranışı

2.3. ECC'nin Mekanik ve Dayanıklılık Özellikleri

ECC'nin rijit üstyapı kaplamalarının iyileştirilmesinde olduğu gibi, yapının yüksek yorulmaya maruz kaldığı durumdaki performansı da araştırılmıştır. Yeni üretilen üst yapı kaplamasına aktarılan yansıma çatlakları üstyapı uygulamalarında karşılaşılan en büyük problemlerden biridir. Mevcut çatlaklar ve alt tabakadaki lokal olarak azalmış yük taşıma kapasitesi, kaplamada eğilme yorulması ile sonuçlanabilir. Üretilen ECC/beton ve beton/beton kaplama numuneleri ECC'nin rijit üstyapı malzemesi olarak performansını belirlemek için, eğilme yorulması testine tabi tutulmuştur (Zhang ve Li, 2002). Test sonuçları ECC/beton kaplama numunelerinin beton/beton kaplama numunelerine nispeten şekil değiştirme kapasitesinin önemli ölçüde yüksek olduğunu, yük kapasitesinin iki kat olduğunu ve yorulma ömrünün büyük ölçüde gelişmiş olduğunu göstermektedir. Bunlara ilave olarak, mekanizma olarak mikro çatlaklı bir davranış sergileyen ECC kaplama numuneleri ile yansıma çatlaklarının önemli ölçüde ortadan kalktığı tespit edilmiştir. Polimerli çimento harçları ve ECC'nin yorulma dayanımları karşılaştırıldığında benzer avantajlara sahip oldukları tespit edilmiştir (Suthiwarapirak ve ark., 2002). Tren yüklerine maruz kalmış viyadüklerin tamiri için kullanılan ECC'nin yorulma dayanımı Inaguma ve ark. (2005) tarafından çalışılmıştır. ECC malzemesinin uygulaması, zayıf beton altyapının yorulma dayanımına karşı servis ömrünü önemli ölçüde arttırmıştır. Ayrıca, bakım, onarım ve kullanım süresi boyunca oluşacak masrafları önemli ölçüde düşürebilmektedir.

Çelik donatının paslanması ile oluşan kabuk atma ECC malzemesindeki yüksek sünek davranışla azaltılabilir. Betonun donatısında paslanma başladıktan sonra, paslanma ürünleri beton içinde genişleyip dâhili çekme gerilmeleri oluşturur. Bu durum ise, kabuk atma ile sonuçlanıp, yapının servis ömrünü kısaltmaktadır. ECC'nin kabuk atma dayanımı, korozyona uğramış demirdeki genişleme yüklerini göstermek amacıyla bir ECC döşemesi içine konik çelik bir çubuk sıkıştırarak araştırılmıştır (Miyazato ve Hiraishi, 2005; Kanda ve ark., 2003). Deney sonuçları, beton numunesinin gevrek bir davranış sergileyerek parçalandığını ve ECC

numunesinde çevresel mikro çatlaklar oluşturarak plastik akma yaptığını göstermiştir. Test sonucunda ECC ve beton numunelerinde oluşan hasar şekli ve kırılma modları Şekil 2.3.a ve b’de gösterilmektedir. ECC döşemeler (30 kN) aynı malzeme basınç dayanımına sahip olsalar dahi normal beton döşemelere (~7 kN) kıyasla önemli ölçüde fazla yük taşımışlardır.

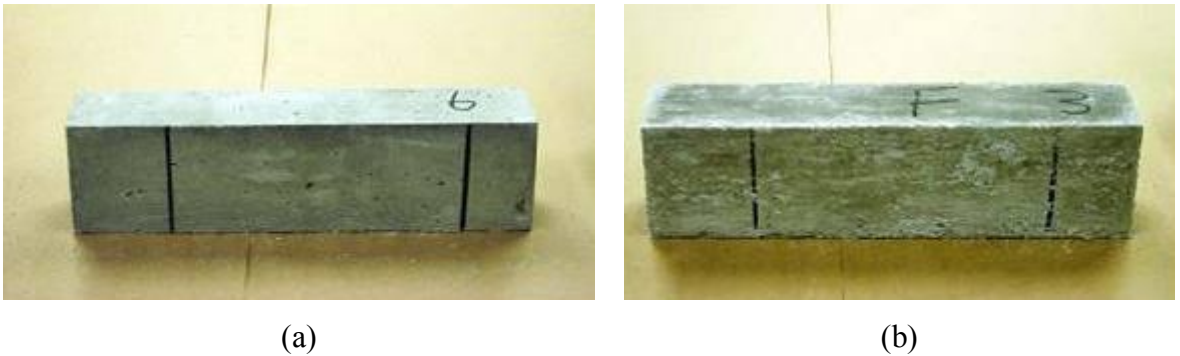


Şekil 2. 3. Kırılma modları a) Beton numunesi ve b) ECC numunesi
(Miyazato ve Hiraishi, 2005; Kanda ve ark., 2003)

Kaplama yüzeyi ve köprü döşemesi onarımında ECC malzemesi kullanıldığında, sürüş ve frenleme için (trafik aşınmasına dayanırken) yeterli yüzeye sahip olmalıdır. 28 gün boyunca kür edilmiş numuneler Michigan Test Yöntemi 111’e göre statik sürtünme ve aşınma testlerine tabi tutulmuştur (Anonim, 2003). 65 km/saat hızla dönen araç tekerlekleriyle ECC numuneler arasındaki sürtünme kuvvetleri Michigan Ulaştırma Dairesi’nin statik sürtünme test cihazıyla hesaplanmıştır. Statik sürtünme testlerinin tamamı ıslak kaplama yüzeyinde gerçekleştirilmiştir. İlk sürtünme testinde ECC numuneler, uzun vadede lastik aşınmasını gözlemleyebilmek için, 4 milyon lastik geçişine maruz bırakılmıştır. Sürtünme kuvvetleri, aşınmadan sonra bozulmayı ya da aşınma sırasındaki yüzey düzelmesini değerlendirebilmek için yeniden belirlenmiştir. Bu son sürtünme kuvvetleri uzun vadede kaplama aşınmasını değerlendirebilmek için kullanılan Agreg Aşınma İndeksi (AAİ)’ne denk bulunmuştur. Pürüzlü ECC numuneler için AAİ değerleri 1.6 kN ile 2.3 kN arasında olduğu tespit edilmiştir (Li ve ark., 2003).

Michigan ana hat yol yüzeyleri için belirlenmiş minimum AAİ 1.2 kN olup bu değer test edilen ECC yüzeylerinin tamamından düşüktür. Dolayısıyla ECC'nin ağır trafiğe maruz kalan yol yüzeylerinde kullanılabilirliği kolaylıkla anlaşılmaktadır.

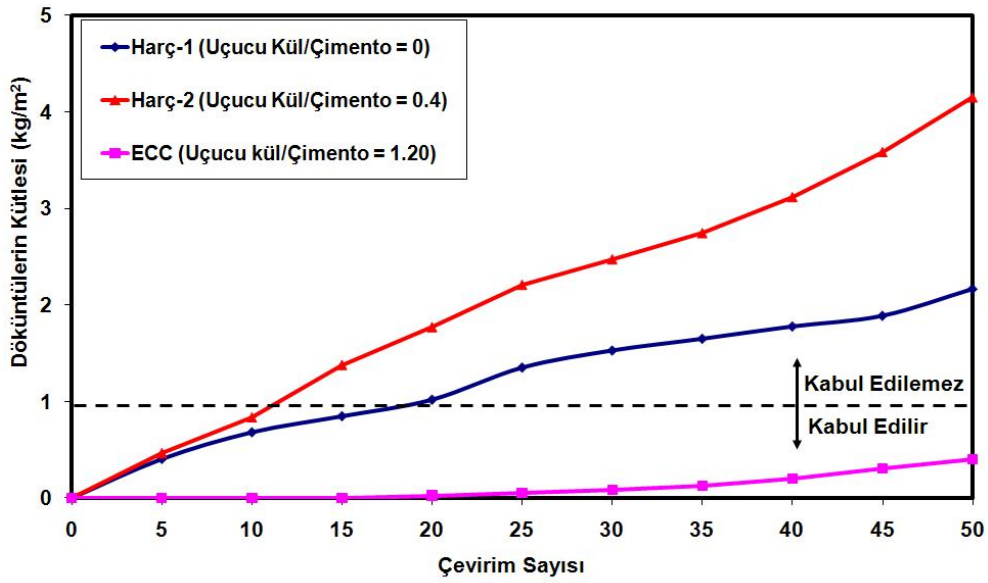
Beton kullanılması ile üretilen yapıların (kaldırım, park yapıları gibi) servis ömrünün az ve kısa süre içinde bozulmasının iki önemli sebebi donma-çözülme döngüsü ve kış aylarında buzların çözülmesi için kullanılan buz çözücü tuzlardır. Bu tarz uygulamalarda kullanılacak olan ECC'nin belirtilen dayanıklılık problemlerine karşı dayanıklı olması gerekir. Donma-çözülme çevrimlerinin ve buz çözücü tuzların etkisi ile oluşan çatlakların engellenmesi için, matris içinde bir hava boşluğu sistemine ihtiyaç olduğu bilinmektedir. ECC'nin donma-çözülme karşı dayanıklılığının incelenmesi için ASTM C666'ya uygun olarak, hava sürüklenmemiş ECC numuneler donma-çözülme çevrimlerine maruz bırakılarak test edilmiştir (Li ve ark., 2003; Şahmaran ve ark., 2009). Referans numune olarak üretilen hava sürüklenmemiş beton numuneleri ayrıca test edilmiştir. ECC numunelere hava sürükleyici katkı eklenmediği için, hava sürüklenmemiş numuneler kontrol olarak kullanılmıştır. 110 döngü sonrasında, üretilen beton numunelerinde ciddi hasarlar gözlemlenmiş ve test standartlarına göre donma-çözülme kabininden çıkarılmıştır. Beton numunelerinin aksine, 300 döngüden sonra bile ECC numuneleri dinamik modülünde azalma görülmemiştir. Şekil 2.4., nemli ortamda muhafaza edilmiş ve 300 donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılmış olan ECC numunelerinin yüzey durumlarını göstermektedir.



Şekil 2. 4. ECC numunelerin çevrimlerden sonraki görüntüsü (a) ıslak kür ve (b) donma-çözülme (Li ve ark., 2003; Şahmaran ve ark., 2009)

ASTM C666'ya göre, bu donma-çözülme performansı normal betonda 10 ve ECC'de ise 100 dayanıklılık faktörü sonucunu vermiştir. Aynı yaşta donma-çözülme maruz bırakılmış ve normal suda kür edilmiş ECC numunelerine uygulanan tek eksenli çekme deneyinde, 300 döngüye maruz kalmış ECC numunelerinin şekil değiştirme kapasitelerinde ciddi bir kayıp tespit edilmemiştir. Her iki numunelerde ortalama %3 şekil değiştirme kapasitesi göstermiştir.

ASTM C672 testine uygun olarak yapılan deneysel çalışmalarda, yüksek hacimde uçucu kül içeren hava sürüklenmiş betonların, buz çözücü tuzların varlığında donma-çözülme çevrimlerine maruz bırakıldıklarında çoğunlukla yetersiz performans sergilediği gözlemlenmiştir. Portland çimentosunun %67'si kadar uçucu kül ile yer değiştirilip ECC numuneleri üretilmiştir. Yüksek hacimde uçucu kül kullanılarak üretilen bu ECC numunelerinin buz çözücü tuzların varlığında donma-çözülme döngüleri sonucunda performanslarının incelenmesi önemlidir. ASTM C672'ye uygun olarak hava sürüklenmemiş hasarsız ve ön yükleme yapıp hasar verilmiş ECC numunelerinin pullanma dayanımı Şahmaran ve Li (2007) tarafından değerlendirilmiştir. Ayrıca, uçucu kül bulunduran ve bulundurmayan hava sürüklenmemiş harç numuneler referans numuneleri olarak test edilmiştir. Buz çözücü tuzların varlığında, 50 donma-çözülme çevriminden sonra, ECC numunelerin yüzey durumunun görsel derecesi ve pullanma kalıntılarının toplam kütlesi, yüksek oranda uçucu kül bulunduran numunelerde dahi, ASTM C 672'nin kabul edilebilir limit değerlerinin içinde kalmıştır (Şekil 2.5.).

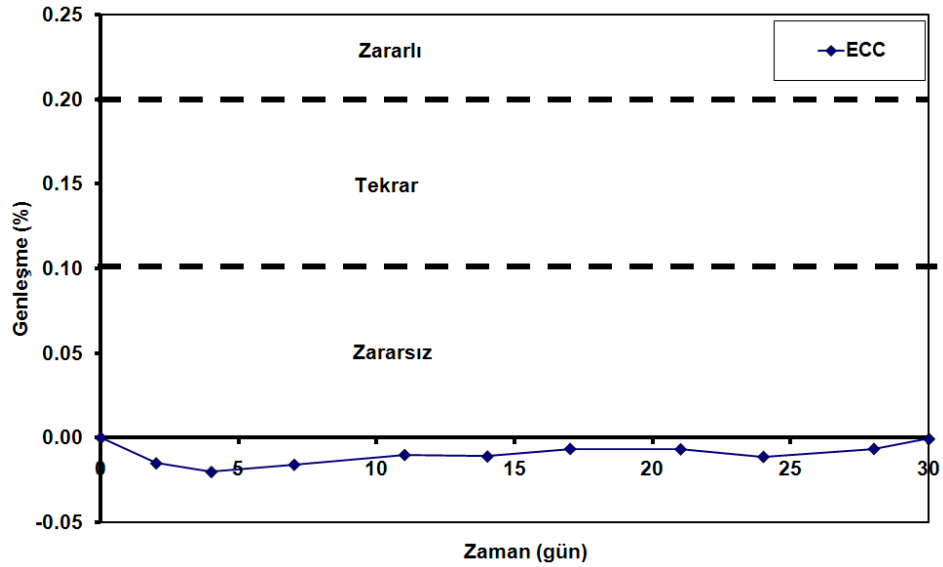


Şekil 2. 5. Buz çözücü tuzların varlığında hasarsız harç ve ECC prizmalarında meydana gelen dökülmelerin kütlesi – donma-çözülme çevrim sayısı (Şahmaran ve Li, 2007)

Kış mevsiminde meydana gelen sıcaklık farkları nedeniyle oluşan donma-çözülme deneylerinden farklı olarak, sıcak ve nemli ortamların ECC üzerindeki etkisini incelemek için sıcak suda bekletme testleri yapılmıştır. Çevresel etkilenemenin sonuçlarını araştırmak için, tekil lifler, ECC matrisi içine gömülmüş lifler ve kompozit ECC numuneler üzerinde sıcak suya daldırma testleri uygulanmıştır (Li ve ark., 2004). 26 hafta boyunca 60 °C sıcak suyun içerisinde bekletmeden önce, lif sıyrılma deneyi numuneleri ve kompozit ECC numuneleri 28 gün boyunca oda sıcaklığında kür edilmiştir. Sıcak su içerisinde geçen 26 haftadan sonra, lif dayanımı, lif elastik modülü ve uzama gibi özelliklerde küçük değişiklikler görülmüştür. Sıcak su içerisinde geçen 26 haftadan sonra, ECC'nin çekme şekil değiştirme kapasitesi %4.5'ten %2.75'e düşmüştür. Hızlandırılmış sıcak hava testi ECC'de düşük şekil değiştirme kapasitesine sebep olsada, 26 hafta sonunda gösterilen 2.75%'lik şekil değiştirme kapasitesi normal betonun çekme şekil değiştirme kapasitesinin yaklaşık 250 katından daha fazladır.

Yüksek alkaliniteli ortamlar ECC'nin mikro yapı ve kompozit özelliklerini etkileyebilecek bir diğer ortamdır. ECC matrisindeki yüksek alkaliniteli boşluk suyuna ilave olarak, çeşitli kimyasallar, zemine sızan çözeltiler ve deniz suyuyla yüksek alkaliniteli ortamlara maruz kalabilir. ECC üretiminde kullanılan yüksek

hacimde uçucu kül, çok ince taneli kum ve mikro lifler kullanılması nedeniyle alkali-silika reaksiyonları (ASR) sebebiyle zararlı bir genişleme beklenilmemesine rağmen (Şahmaran ve ark., 2008), ECC'nin bu tür ortamlardaki dayanıklılığının incelenmesi gerekmektedir. Alkaliler mikro düzeydeki çatlaklardan veya matris yoluyla ECC malzemesinin mikro yapısında ve kompozit özelliklerinde değişikliklere yol açabilir. Şahmaran ve Li (2008), ECC'nin yüksek alkaliniteli ortamlardaki dayanıklılığını incelemişlerdir. Betonun yüksek alkaliniteli ortamlardaki performansı ASTM C1260'a göre test edilmektedir. Bu teste göre 30 gün boyunca, üretilen ECC çubuklarındaki boy değişimi incelenmiştir. Şekil 2.6., ECC'nin yüksek alkaliniteli ortamdaki davranışını göstermektedir.

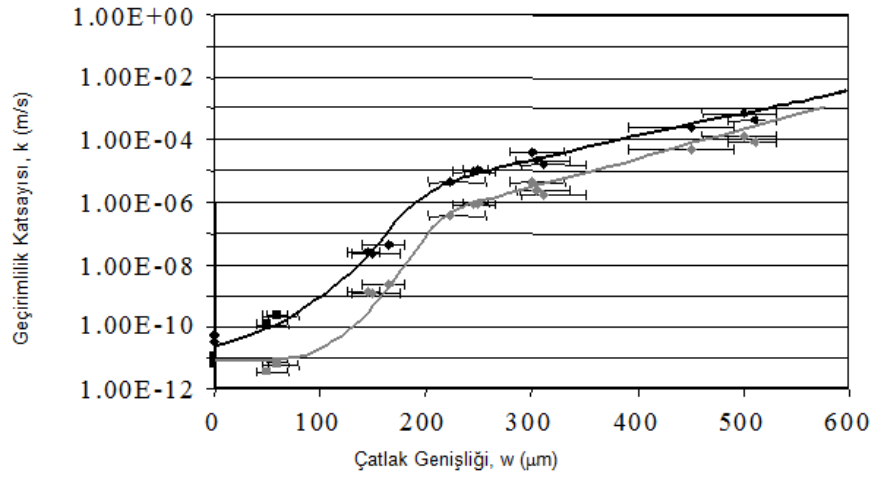


Şekil 2. 6. ECC için genişlemenin zamanla değişimi (ASTM C1260)

ASTM C1260'dan alınan sınıflandırma aralıkları Şekil 2.6.'da yatay çizgiler olarak gösterilmiştir. Hızlandırılmış harç çubuğu testi, ECC'nin muhtemelen reaktif olmayan silika kumu sebebiyle, 30 günlük yüksek alkaliniteli ortama maruz bırakma süreci sonunda bir genişleme göstermediğini göstermiştir. Ancak, ECC'de aynı anda reaktif silika kumu ve alkalilerin bulunması durumunda dahi, yüksek hacimde uçucu kül, küçük kum tane boyutu ve mikro lifler sayesinde, ASR sebebiyle zararlı bir genişleme göstermesi beklenmemektedir.

Sertleşmiş betonda katı, sıvı ve gaz fazlarındaki maddelerin taşınması geçirimsizlik, absorpsiyon ve difüzyon ile ilgilidir. Ortam şartlarına bağlı olarak maddelerin taşınması bu üç mekanizmanın tekil veya kombinasyonu tarafından yönlendirilebilir. Geçirimsizlikteki asıl parametre basınç farkıdır. Kılcal emilim sayesinde meydana gelen absorpsiyon, doygun olmayan bir betonun sıvılara maruz kaldığında baskın olan taşınma mekanizmasıdır. Difüzyon, betona gömülü çelik donatıda paslanmanın başlangıcını hızlandıran klorür gibi iyonların taşınma mekanizması olarak en çok çalışılan taşınma mekanizmasıdır.

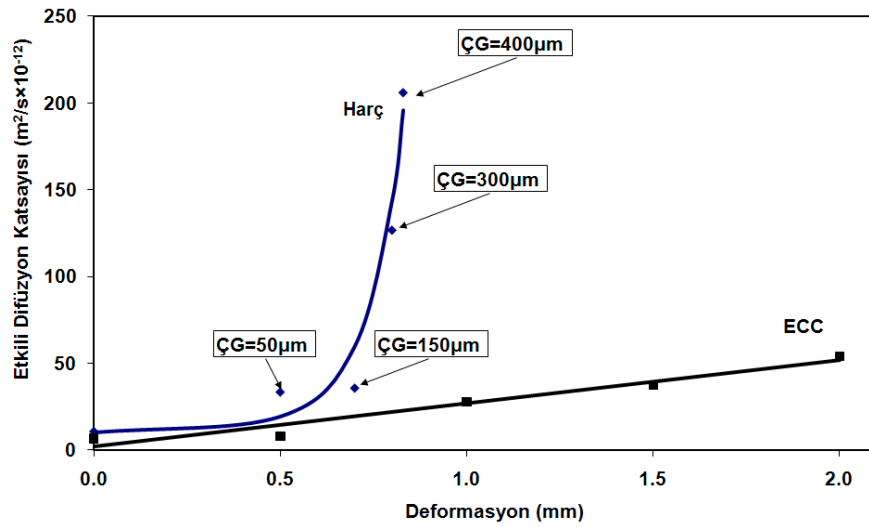
Betonda oluşan mikro veya makro ölçekteki çatlaklar taşınma özelliklerini arttırmaktadır. Böylece su, oksijen ve klorür iyonlarının beton içerisine kolayca nüfuz etmesine, çelik donatıya ulaşmasına ve korozyon başlangıcının hızlanmasına olanak sağlar. Lepech ve Li (2005) ECC ve donatılı harç numunelerinin su geçirimsizliğini incelemek için mekanik olarak önceden yüklenmiş ECC ve normal donatılı harç numunelerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, ECC ve donatılı harç numuneleri %1.5'lik birim şekil değiştirme değerine kadar aksenal çekme yükleri altında yüklenip çeşitli numunelerde farklı çatlak genişliği ve miktarı gözlenmiştir. Uygulanan deformasyona rağmen, ECC numunelerinde 60 µm'dan küçük mikro çatlaklar ortaya çıkmış ve çatlaklı numunelerin neredeyse hasarsız betonla aynı oranda su geçirimsizliğine sahip olduğu görülmüştür (Şekil 2.7.). Bunun aksine, aksenal deformasyona maruz bırakılan donatılı harç numunelerinde 150 µm'dan büyük çatlaklar kolayca oluşmuştur. Az çatlak sayısına rağmen, büyük çatlak genişliği donatılı harç numunesinin su geçirimsizliğinde önemli ölçüde artışa sebep olmuştur. Ayrıca, geçirimsizlik değerleri numunedeki çatlak sayısı bakımından normalize edildiğinde, hasarlı ECC'nin hasarsız malzeme ile karşılaştırılabilir su geçirimsizliği daha da belirginleşmektedir (Şekil 2.7.).



Şekil 2. 7. Hasarlı ve hasarsız ECC'nin (kare işaretleri) ve çelik donatılı harç numunelerinde (elmas işaretleri) geçirimsizlik. Gri noktalar çatlak miktarı bakımından normalize edilmiş numunelerdeki geçirimsizlik değerleridir (Lepech ve Li, 2005)

Betonarme yapılarda durabilite ile ilgili en büyük problemlerden biri çelik donatının korozyonu olup, klorür iyonlarının betona nüfuzu korozyonun en büyük sebebi olarak kabul edilmektedir. Miyazato ve Hiraishi (2005) aynı oranda eğilme sehim seviyesinde ön yüklenmiş ve hızlandırılmış klorür testine maruz bırakılmış çelik donatılı ECC ve çelik donatılı beton kirişler kullanarak ECC kaplamalardaki klorür penetrasyon derinliğinin normal beton kaplamalardan önemli ölçüde düşük olduğunu gösteren ilk araştırmacılar dır. Buna ilave olarak, ECC ve çelik donatılı harç numunelerin eğilme deformasyon seviyeleri ve klorür difüzyon katsayıları arasındaki ilişki Şahmaran ve ark. (2007) tarafından incelenmiştir. Yüksek eğilme deformasyonu altında, ön yüklemeye maruz bırakılmış ECC kiriş numunelerde genişliği 50 µm'dan dar birçok mikro çatlak görülmüş olup, ECC'deki sık çatlak genişliği kontrolü sayesinde, difüzyon katsayısı aynı seviyede ön yüklemeye maruz bırakılmış çelik donatılı harç kiriş numunelerden önemli ölçüde düşük bulunmuştur (Şekil 2.8.). Bunun aksine, çelik donatılı harç numunelerinde aynı deformasyon altında difüzyon katsayısında büyük ölçüde artışa sebep olan 150 µm'dan büyük çatlaklar kolayca oluşmuştur. ECC'nin difüzyon katsayısı çatlak sayısı ile doğru orantılı bulunurken, donatılı harç numunelerinin difüzyon katsayısı çatlak genişliğinin karesiyle doğru orantılı bulunmuştur. Bu nedenle klorür taşınmasında çatlak genişliğinin etkisi, çatlak sayısından daha fazla telaffuz edilmeye başlanmıştır. Ayrıca, deniz suyuna maruz kalan hasarlı ve hasarsız ECC numunelerinin çekme

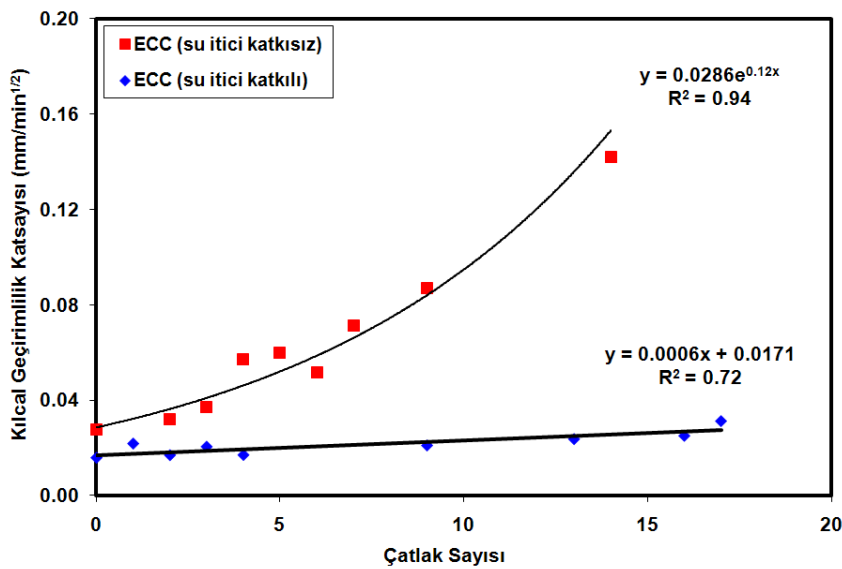
yükleri altındaki performansları Li ve ark. (2007) tarafından incelenmiştir. Test sonuçları maksimum aksenal birim şekil değiştirme ve mukavemet değerlerindeki küçük azalmalar ve biraz daha geniş artık çatlak genişliğinin dışında, mekanik yüklemenin kırılmadan önce şekil değiştirme sertleşmesine sebep olacağı durumlarda dahil, hızlandırılmış yaşlanma altında ECC'nin durabilite performansını doğruladığını göstermiştir. Deniz suyuna maruz kalan hasarlı ECC numunelerinin rijitliklerinde meydana gelen iyileşmeler, ön yüklemeye oluşan mikro çatlakların iyileştiğinin bir göstergesidir.



Şekil 2. 8. ECC ve harç için difüzyon katsayısı – ön yükleme deformasyon seviyesi (Şahmaran ve ark., 2007)

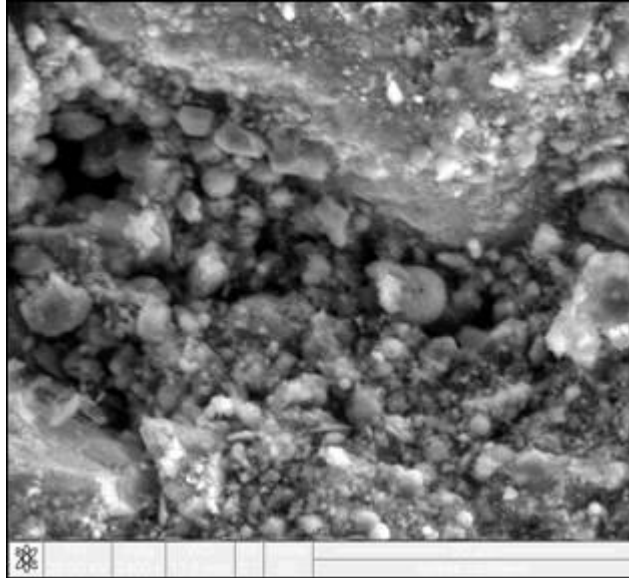
Beton yapılar genel olarak rüzgâr ve güneşin kurutucu etkilerine maruz kaldıkları için, servis ömürleri boyunca nadiren tam doygun durumda bulunurlar. Bu durumda, beton malzemelerde geçirimsizlik ve difüzyon baskın olan taşınma mekanizmaları olmayabilir. Tamamen kuru ya da kısmen doygun durumlarda, betondaki suyun hareketi matraste bulunan boşalmış kılcal boşluklarda oluşan kılcal emme kuvvetleriyle kontrol edilir (Martys ve Ferraris, 1997). Yukarıda bahsedildiği gibi, ECC'deki çatlama temel olarak normal ya da donatılı betondan farklıdır. ECC'deki endişelerden biri, kılcal emme ile alakalı yakın aralıklı ve dar genişlikli çatlak modelidir. Bu endişe, Şahmaran ve Li (2009) tarafından yapılan bir çalışmada, önceden hasar verilmiş çatlaklı ECC numunelerinin kılcal geçirimsizlik ve su emme özellikleri ölçülerek doğrudan ele alınmıştır. Mekanik yükleme yardımıyla çeşitli

sayıda mikro çatlaklar oluşturulduktan sonra, mikro çatlakların bozulma sürecini nasıl hızlandırdıklarını öğrenmek için su emme ve kılcal geçirimlilik testleri yapılmıştır. Şekil 2.9., altı saatten fazla bir süre için ECC numunelerindeki kılcal geçirimlilik değeri ile çatlak sayısı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekil 9’da ayrıca hasarsız ECC numuneler için değerlerde sıfır çatlak sayısına karşılık gelen veriler dahil edilmiştir. Şekil 2.9.’da görüldüğü gibi, ECC’deki mikro çatlakların varlığı mikro çatlak sayısına bağlı bir fonksiyon olarak ölçülen taşıma özelliklerini önemli ölçüde değiştirmektedir. ECC numunelerin yüzeylerindeki çatlak sayısı arttıkça, su emme kapasitesi oldukça artmaktadır. Bu sebepten dolayı, kılcal geçirimlilik testi, mikro çatlaklara sahip ECC numunelerin hasarsız numunelerden daha fazla hücumu karşı savunmasız kalacağını göstermektedir. Numune boyunca çatlak sayısı arttıkça, ECC’nin kılcal geçirimliliği katlanarak artmaktadır. Buna rağmen, ön yüklemeye maruz bırakılmış ve %1.5’a kadar şekil değiştirme gösteren ECC numunelerinde kılcal geçirimlilik değerleri, normal betonla karşılaştırıldığında çok daha yüksek değildir. Bunun muhtemel sebepleri; ECC üretiminde yüksek miktarda bağlayıcı malzeme kullanımı, düşük su-bağlayıcı malzeme oranı, yüksek uçucu kül oranı ve iri agreganın yokluğudur. Ayrıca aynı çalışmada Şahmaran ve Li (2009), hasarlı ECC’de su emme oranını da çalışmış ve ECC üretiminde su itici katkı malzemesi kullanımının mekanik ön yüklemeye maruz bırakılmış ECC numuneler için bile kılcal geçirimliliği kolayca kısıtladığı görülmüştür (Şekil 2.9.).



Şekil 2. 9. ECC karışımları için kılcal geçirimlilik – çatlak sayısı grafiği (Şahmaran ve Li, 2009)

Çatlamış ECC numuneler için düşük geçirimsizlik ve difüzyonun sebebi sadece dar çatlak genişliği değil ayrıca mikro çatlakların kendiliğinden iyileşmesidir. Çatlak genişliğinin küçük olduğu durumlarda, kendiliğinden iyileşme daha belirgindir. Deneysel sonuçlara dayanarak, Evardsen (1999) ve Reinhardt ve Jooss (2003) 0.10 mm'den küçük genişliğine sahip çatlakların kendiliğinden iyileştiğini savunmuşlardır. Çatlamış ECC numunelerin su ya da tuz solüsyonuna veya ıslanma ve kuruma döngülerine maruz kaldığı durumlarda, mikro çatlakların kendiliğinden iyileşme sayesinde kapandığı, bu sayede fazladan su alımının yavaşladığı ve su geçirimsizlik ve difüzyon oranlarının düştüğü görülmüştür (Lepech ve ark., 2005; Şahmaran ve ark., 2007). Örneğin, Şekil 2.10.'da ECC yüzeyinin tuz çözeltisine maruz bırakıldıktan sonra iyileşmiş bir çatlağın taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü verilmiştir. SEM gözlemleri çatlaklarda görülen birçok ürünün normal hidrasyon reaksiyonlarında üretilen kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jeli olduğunu göstermiştir. Bu durum büyük ölçüde, ECC karışımı içindeki yüksek uçucu kül miktarına ve düşük su-bağlayıcı madde oranına dayandırılabilir. Uçucu külün devamlı puzolanik aktivitesi, kendiliğinden iyileşmenin nedeni olarak kabul edilip, klorür iyonu girişini azaltmaktadır.

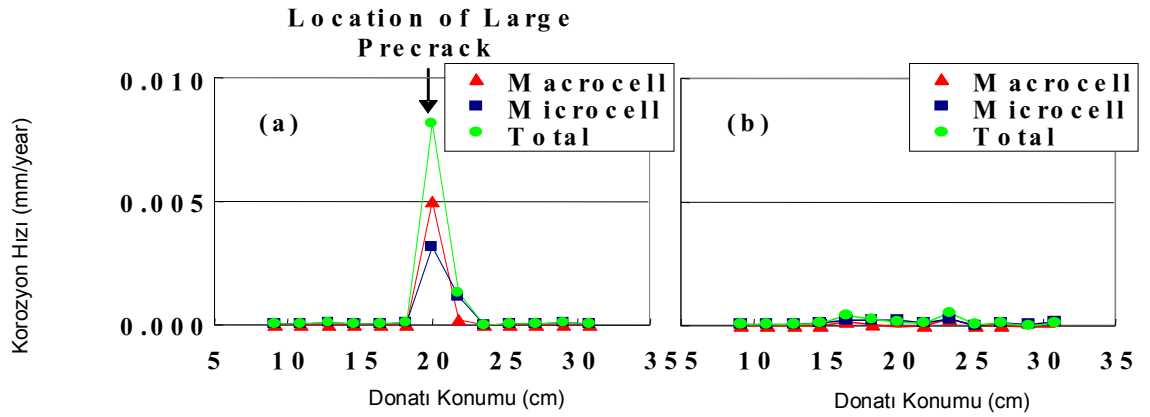


Şekil 2. 10. Tuz çözeltisine maruz bırakıldıktan sonra kendiliğinden iyileşen çatlaktaki hidrasyon ürünlerinin SEM görüntüsü (Lepech ve Li, 2005; Şahmaran ve ark., 2007)

Betonun yüksek alkalinite ortamına sahip olmasından dolayı betondaki çelik donatı etrafında pasif bir tabaka oluşmakta ve çelik donatıyı korozyona karşı korumaktadır. Beton yapılar da klorür konsantrasyonu eşik değerine ulaştığında veya karbonatlaşma nedeniyle ortam pH değerinin düşmesinden dolayı, çelik donatının yüzeyindeki pasif tabaka ortadan kalkmaktadır (Tuutti, 1982). Yeni yapılar da çelik donatıda korozyonu engellemek amacı ile kullanılan yöntemlerden bazıları yüksek kalitede beton (düşük su-çimento oranı ve iyi sıkıştırma), yüksek paspayı kalınlığı ve epoksi ile kaplanmış donatı kullanımını kapsamaktadır. Genel olarak, düşük su-çimento oranı ve iyi sıkıştırılmış beton, geçirimsizliğin azalmasına katkı sağlar. Paspayı klorür iyonlarının, karbondioksit ve nemin donatılara ulaşmasını engelleyen bir bariyer görevi gördüğünden paspayı kalınlığını arttırmanın daha iyi fiziksel koruma sağlaması beklenir. Ancak, kısıtlanmış rötre, termal deformasyon, kimyasal reaksiyonlar, kötü inşaat uygulamaları ve mekanik yükler sonucunda beton kaçınılmaz olarak çatlak ve zaman içinde klorür iyonları, karbondioksit ve nem daha kalın paspayına sahip ya da yüksek kalitede betonun içine dahi bu zararlı maddeler nüfuz edebilir (Anonim, 2001). Ayrıca, kalın paspayı daha büyük çatlak genişliğine yol açar. Buna ek olarak, donatıların yüzeyinde bulunan epoksi kaplaması zaman zaman bakım sırasında zarar görür ya da yüksek klorür konsantrasyonuna maruz kalan epoksi kaplamalı donatılarda epoksi kaplama zamanla kırılabilir veya tabakalı bir hal alır. Bu yüzden, donatının korunmasında epoksi kaplama kullanımının güvenilirliği sorgulanmaya başlanmıştır (Anonim, 1992; Sagues ve ark., 1994; Manning, 1996). Sonuç olarak, korozyon oluşumu, kabuk atmalara, çelik donatı çapında azalmalara ve çelik donatının yük taşıma kapasitesinin düşmesine sebep olabilir. Korozyon probleminin kökünde, beton malzemelerin gevrek yapısı vardır. Betonun gevrekliği sayesinde doğal olarak aşındırıcı maddelerin nüfuz etmesine sebebiyet veren çatlaklar oluşup, korozyonun başlamasıyla meydana gelen içsel genişleme kuvvetlerine beton direnç gösteremez.

ECC'deki dar çatlak genişliği ve yüksek çekme sünekliği, betonarme (R/C) yapılar da korozyonla alakalı durabilite problemlerinin doğal çözümünde önemli bir potansiyeldir. Normal betonun tersine ECC'de bulunan çok sayıda mikro çatlak ile alakalı olarak, ECC matrisindeki çelik donatının korozyon hızı araştırılmış ve R/C

sistem ile karşılaştırılmıştır (Miyazato ve Hiraishi, 2005). Korozyon sürecini hızlandırmak için, önyüklemeye maruz bırakılmış R/ECC ve R/C kirişler klorür ortamına bırakılmıştır. ECC ve betonun korozyon hızını belirlemek için, makrocell ve mikrocell korozyon hızları ayrı ayrı saptanmıştır. Toplam, (makro ve mikro cell) korozyon hızı R/ECC kirişlerde 0.0004 mm/yıl olarak ölçülürken, bu değer R/C kirişlerde 0.008 mm/yıl olarak ölçülmüştür (Şekil 2.11.).



Şekil 2. 11. Çelik donatı boyunca ölçülen makrocell ve mikrocell korozyon hızları (a) çelik donatılı beton (R/C) ve (b) çelik donatılı ECC (R/ECC) (Miyazato ve Hiraishi, 2005)

2.4. ECC Uygulamaları

ECC'nin çok yönlü kullanılabilirliğini gösterebilmek için, bu malzemenin kullanıldığı ve halen devam etmekte olan projeler aşağıda özetlenmiştir.

Şekil 2.12., 2003 yılının Nisan ayında Japonya'nın Hiroshima-Prefecture bölgesindeki beton yüzeyi ağır bir şekilde hasarlı 60 yıllık bir barajın tamiratını göstermektedir (Sakata ve ark., 2004). ECC'nin su geçirmez kaplama tabakası olarak kullanılmasındaki sebepler, oluşan çatlaklar, kabuk atma ve su sızıntısıdır. 20 mm kalınlığındaki ECC barajın kaynak tarafında kalan 600 m² büyüklüğündeki yüzeyine püskürtülerek uygulanmıştır.



Şekil 2. 12. Mitaka Barajında su yalıtımı tadilatı amacıyla ECC malzemesinin uygulanması (Sakata ve ark., 2004)

Japonya'daki bir diğer geniş ölçekli uygulama, alkali-silika reaksiyonu sonucu oluşan çatlaklardan hasar görmüş (18 m genişliğinde ve 5 m derinliğinde) bir beton istinat duvarıdır (Rokugo ve ark., 2005). 50-70 mm kalınlığındaki ECC'yi kullanma kararı, alt tabakadaki betondan iletilecek yansıma çatlaklarını engelleme ihtiyacından doğmuştur (Li ve ark., 2004). Eğer tamirat için normal beton kullanılsaydı, yansıma çatlakları beton yüzeyde görülebilirdi. Bu tamirat tamamlandıktan sonra, uygulamanın performansı sürekli olarak gözlemlenmiştir. Tamiratı takip eden 10 ve 24 ay sonunda, daha önce tamirat amacıyla dökülmüş betonda (kontrol olarak kullanılan) bulunan maksimum çatlak genişlikleri sırasıyla 0.2 mm ve 0.3mm bulunurken, ECC için bu değerler sırasıyla 50 μm ve 120 μm 'un altında bulunmuştur (Kunieda ve Rokugo, 2006).

Yine Japonya'da, yüksek bina inşaatlarında ECC malzemesi bağ kirişi olarak kullanılmıştır (Maruta ve ark., 2005). ECC'nin yüksek enerji yutma kapasitesi sayesinde, sismik bölgelere inşa edilen yüksek binalarda komşu çekirdek duvarları bağlayan bağ kirişi olarak kullanılmasının birçok avantajı vardır. Japonya'da bulunan Kajima Şirketi'nin ürettiği prefabrik ECC bağ kirişlerindeki son gelişmeler mevcut sismik inşaat uygulamalarına kolayca entegre edilebilmektedir. Şu anda, Japonya Tokyo'da bulunan birçok çok katlı bina ECC bağ kirişleri kullanılarak inşa edilmiştir (Şekil 2.13.).



Şekil 2. 13. Yokohoma'daki Nabeaure Gökdeleni, prefabrik ECC bağ kirişlerinin sismik dayanım amacıyla yapının çekirdeğinde kullanımı (Maruta ve ark., 2005)

ECC'nin Birleşik Devletler'deki ilk uygulamalarından biri olarak, 2002 yılında beton bir köprü tabliyesinde tadilat, Michigan Ulaştırma Dairesi ile işbirliği içerisinde tamamlanmıştır. Bu çalışma Li ve Lepech (2004) tarafından özetlenmiştir. Bu çalışma boyunca, bozulmuş köprü döşemesinin bir kısmı ECC ile kalan kısmı ise Michigan Ulaştırma Dairesi tarafından sıkça kullanılan ticari beton tadilat malzemesi ile onarılmıştır (Şekil 2.14.). Bu onarım ECC ve betonu aynı çevresel ve trafik yükleri altında karşılaştırmak için iyi bir fırsat niteliğindedir. Onarım için, önceden paketlenmiş ve piyasada bulunabilen harç kullanılmıştır. Bu çalışmada, onarılmış köprü döşemesi, hareketli yüklere ek olarak dokuzdan fazla Michigan kışının donma-çözülme çevrimine maruz kalmıştır. ECC kullanılarak yapılan onarım, birleşik yüklerin etkisi altında mikro çatlak genişliğini $50 \mu\text{m}$ 'nin altında tutabildiği halde, beton kullanılarak yapılan onarım kısmında 3.5 mm 'den büyük bölgesel çatlaklar oluşmuş olup 2005 yılında beton kısmın yeniden onarımı gerekmiştir.



Şekil 2. 14. Michigan’da bulunan köprü tabliyesinde ECC yama tadilatı uygulaması
(Li ve Lepech, 2004)

Birleşik Devletler’de ECC’nin köprü tabliyesi onarımına ek olarak kullanıldığı bir diğer uygulama 2005 yılında Michigan Ulaştırma Dairesi işbirliğiyle tamamlanan köprü bağlantı döşemesidir (Şekil 2.15.). Bu bağlantı döşemesi çok açıklıklı köprüde komşu döşemeleri bağlayan sünek bir ECC döşemeyle problemlili genişleme derzlerini değiştirmek için geliştirilmiştir (Li ve ark., 2005). Bu projede, Birleşik Devletler’deki ilk ECC bağlantı döşemesini inşa etmek için yaklaşık 32 m³ standart ECC, hazır beton kamyonları kullanılarak dökülmüştür. %2’lik şekil değiştirme kapasitesiyle bu kompozitler, geleneksel demir genişleme cihazlarının yerini alıp komşu köprü açıklıklarındaki termal deformasyonları telafi edebilmektedir.



a) Yapım esnası

b) Yapım sonrası

Şekil 2. 15. Grove Caddesi Köprüsünde (Michigan) inşa edilen ECC bağlantı döşemesi
(Li ve ark., 2005)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Çimento

Tez kapsamında yapılan tüm deneysel çalışmalarda LİMAK Şanlıurfa Çimento tarafından üretilen standart CEM I 42.5N tipli Portland çimentosu (PÇ) kullanıldı. ASTM Tip I çimentosunun özelliklerini kapsayan CEM I 42.5N tipli Portland çimentosunun özgül ağırlığı 3.18 olup, Blaine özgül yüzeyi 3183 cm²/gr'dır. Çimentoya ait kimyasal özellikler Çizelge 3.1.'de sunulmuştur.

Çizelge 3. 1. Çimento ve uçucu kül kimyasal kompozisyonları

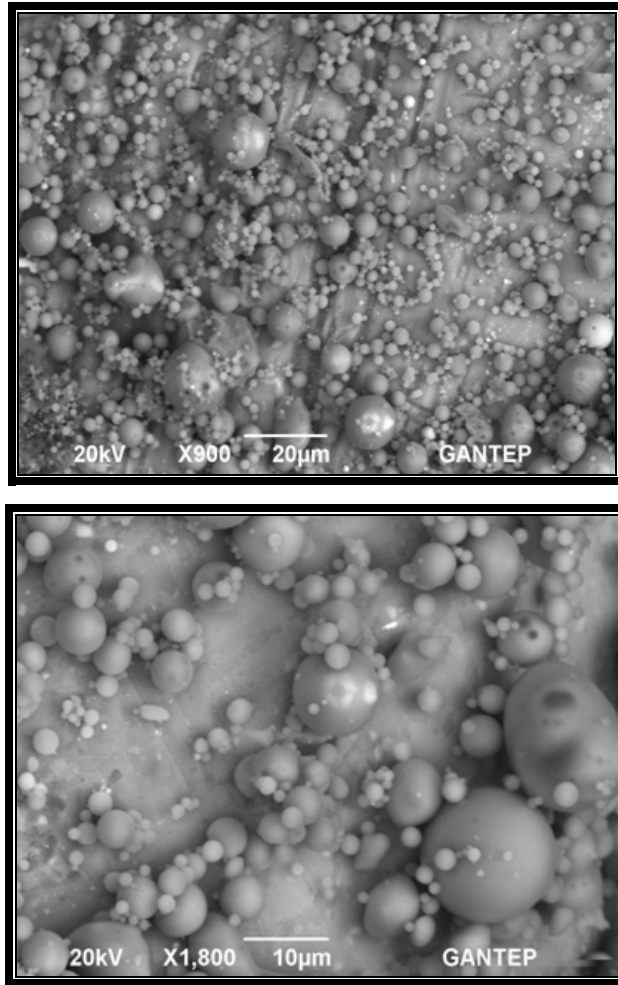
Kimyasal Kompozisyon	Çimento	Uçucu Kül
CaO (%)	64.35	1.64
SiO ₂ (%)	20.08	55.89
Al ₂ O ₃ (%)	4.63	23.06
Fe ₂ O ₃ (%)	2.84	6.66
MgO (%)	2.07	2.57
SO ₃ (%)	2.85	0.30
K ₂ O (%)	-	0.99
Na ₂ O (%)	-	3.37
Kızdırma Kaybı (%)	2.56	2.36
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	27.55	85.61

3.1.2. Mineral Katkılar

Bu çalışmada kullanılmak üzere F sınıfı uçucu kül olarak, taş kömürü yakılarak enerji elde edilmekte olan Sugözü Termik Santralinden, ERG İnşaat Ticaret ve Sanayi A.Ş. aracılığıyla temin edildi. Sugözü uçucu külünün özgül ağırlığı 2.32,

Blaine özgül yüzeyi ise $2910 \text{ cm}^2/\text{gr}$ olup, uçucu küle ait kimyasal özellikler Çizelge 3.1.'de verilmektedir.

Deneylerde kullanılan Sugözü uçucu külünün morfolojik özelliklerini belirlemek amacı ile taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analizleri Gaziantep Üniversitesi Biyoloji Merkez Laboratuvarında yapıp, elde edilen fotoğraflar Şekil 3.1.'de sunulmaktadır.

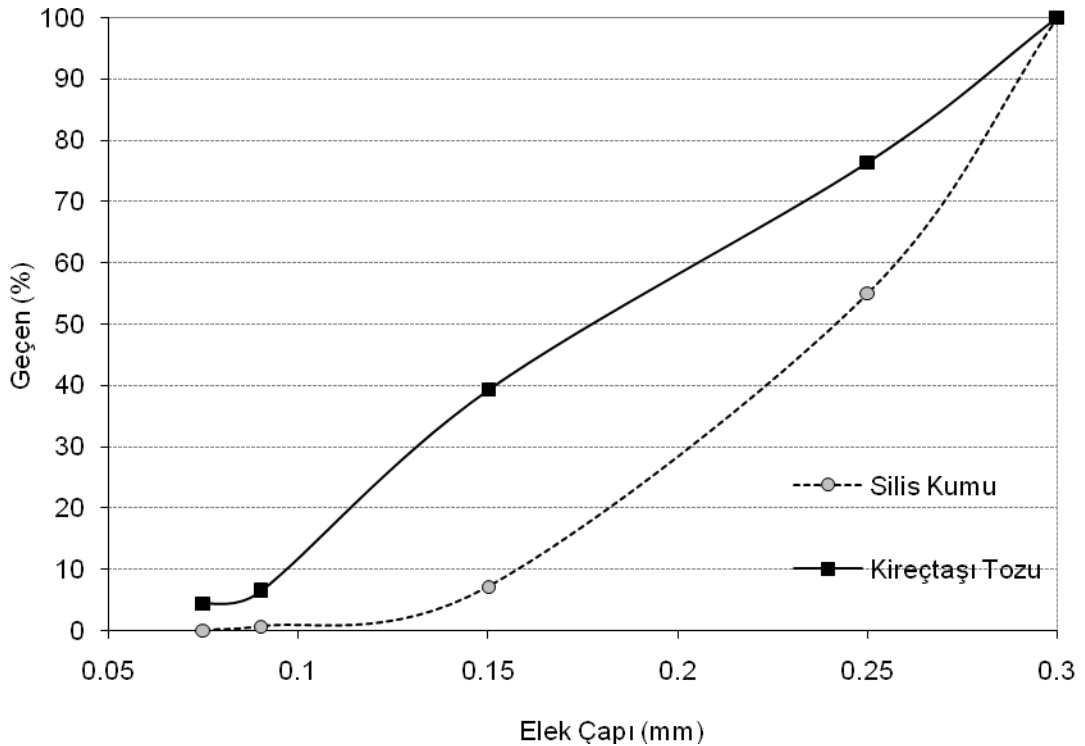


Şekil 3. 1. Sugözü uçucu külünün morfolojik yapısı

3.1.3. Agrega

ECC'nin mikro-mekanik tabanlı tasarımına göre, çimento bağlayıcılı kompozitlerin sünek bir davranış göstermesi ve çok sayıda ama küçük genişlikte çatlama davranışı ile şekil değiştirme sertleşmesi sergilemesi için matris tokluğunun

düşük olması gerekmektedir (Li ve ark., 1995). Ancak, kumun maksimum tane boyutunun artması ile matrisin tokluğu artmakta ve ECC için uygun kum tane büyüklüğü kısıtlanmaktadır. Bu nedenle, ECC şu ana kadar ortalama tane büyüklüğü yaklaşık 110 μm olan kum kullanılarak başarılı bir şekilde üretilmektedir. Yüksek hacimde endüstriyel yan ürünlerin (uçucu kül gibi) ECC üretiminde kullanılması matrisin tokluğunu azaltmakta ve kum boyutunu değiştirmekte özgürlük sağlamaktadır. (Li ve ark., 1995). Normal boyuttaki yerel kaynaklardan elde edilmiş kum ile ECC üretilmesi daha zengin veri tabanı ve ülkemizde bu kompozitin uygulamasının yaygınlaştırılması açısından çok önemlidir. Bu amaçla, yapılan deneysel çalışmada ECC numunelerinin üretiminde silis kumu yerine yerel kaynaklardan temin edilmiş ve ortalama tane çapı 150 μm olan kireçtaşı tozu kullanılmıştır. Silis kumu ve kireç taşı tozunun özgül ağırlığı 2.60 ve su emme kapasiteleri sırasıyla, %0.3 ve 1.58'dir. Bu kumlara ait tane dağılım eğrileri Şekil 3.2.'de sunulmuştur.



Şekil 3. 2. Silis kumu ve kireçtaşı tozunun gradasyon eğrisi

3.1.4. Kimyasal Katkı

ECC karışımlarının işlenebilirliğini arttırmak için SİKA Yapı Kimyasalları tarafından üretilmekte olan yüksek oranda su azaltıcı polikarboksilik esaslı bir süperakışkanlaştırıcı (SA) katkı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan süperakışkanlaştırıcı özgül ağırlığı yaklaşık 1.05 olan sıvı halde bir katkıdır.

3.1.5. Lif (PVA)

ECC'nin gösterdiği yüksek sünekliliğin ana sebebi, mikro-mekanik tabanlı tasarımı sayesinde ECC'nin ilk çatlak oluşumundan sonra şekil değiştirme sertleşmesi sergilemesidir. Mikro-mekanik modellerle kompozitin mikro yapısı, istenen mekanik özelliklerin elde edilmesi için en uygun hale getirilmektedir. Bu şekilde, lif, matris ve arayüz etkileşiminin kontrolü ile yüksek performanslı kompozitler elde edilmektedir. Mikro-mekanik tasarım aşamasında lifin mekanik ve fiziksel özellikleri gibi parametreler kullanılmaktadır. ECC üretiminde başarılı bir şekilde kullanılan ve mikro-mekanik tabanlı tasarım sonucu geliştirilmiş PVA lifleri, bu tezin deneysel çalışmalarında kullanılmıştır (Şekil 3.3.). Bu liflerin özelliği, yüzeyinin ağırlıkça %1.2 oranında özel bir hidrofobik (su iten) yağ ile kaplı olmasıdır. Bu özellik sayesinde, matris (lifsiz ECC) ve lif arasında yer alan optimum arayüz özellikleri elde edilmektedir. Projede kullanılan PVA lifinin geometrik özellikleri mikro-mekanik hesaplar sonucunda hesaplanmış olup, bu life ait mekanik ve geometrik özellikler Çizelge 3.2.'de özetlenmektedir.



Şekil 3. 3. ECC üretiminde kullanılan PVA lifi

Çizelge 3. 2. PVA liflerinin geometrik ve kimyasal özellikleri

Lif	PVA
Nominal Dayanım, MPa	1620
Görünen Dayanım, MPa	1092
Çap, μm	26
Boy, mm	6
Young modülü, GPa	42.8
Uzama, %	6
Özgül Ağırlığı, kg/m^3	1300
Erime Sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$	230

3.2. Deneysel Çalışma

3.2.1. Karışımların Hazırlanması

Yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin üretiminde kullanılması planlanan, ülkemizin yerel kaynaklarından elde edilmiş aynı maksimum

tane boyutlarındaki kireçtaşı tozu (KTT) ve silis kumu (SK), fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlendikten sonra kum tipinin ECC'nin reolojik ve mekanik özellikleri ve matris tokluğu üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla Çizelge 3.3.'te detayları verilen toplamda 5 adet karışım hazırlanmıştır.

Çizelge 3. 3. ECC karışım kompozisyonları (kg/m³)

Karışım Kodu	Çimento (Ç)	Uçucu Kül (UK)	Su/B*	Su/Ç	Kum (S)	S/B	LIF (% Hacimce)	SA
M1_KTT_0.0	1	1.2	0.26	0.57	0.8	0.36	2	5
M2_KTT_0.25	1	1.2	0.26	0.57	0.8	0.36	2	5.2
M3_KTT_0.50	1	1.2	0.26	0.57	0.8	0.36	2	5.5
M4_KTT_0.75	1	1.2	0.26	0.57	0.8	0.36	2	5.6
M5_KTT_1.0	1	1.2	0.26	0.57	0.8	0.36	2	6.2

*B: Bağlayıcı (Çimento+Uçucu Kül)

Üretilen karışımlarda, uçucu kül/çimento oranı 1.2 ve su/çimento oranı 0.27 olmak üzere sabit tutulmuş olup, maksimum tane boyutu 300 µm olan kireçtaşı tozu ve silis kumu belli oranlarda yer değiştirilerek kullanılmıştır. Çizelge 3.3.'te verilen, su-çimento oranı 0.27, uçucu kül/çimento oranı 1.2 ve kum/bağlayıcı oranı 0.36 olan M1_KTT_0.0, bu çalışmada kontrol karışımı olarak seçilmiştir.

Üretilen tüm karışımlar, 25 litre kapasiteli mikser (Şekil 3.5a) kullanılarak hazırlanmıştır. Çimento, uçucu kül ve kum önce kuru olarak 100 devir/dakika hızda 1 dakika karıştırılmıştır. Ardından su ve süperakışkanlaştırıcı eklenip 150 devir/dakika hızda 1 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra karıştırma işlemi 300 devir/dakika hızda 2 dakika daha devam etmiştir. Son olarak PVA lifleri matrise eklenip ve karıştırma işlemi mikserde 150 devir/dakika hızda 3 dakika devam etmiştir. ECC karışımları üretim aşamaları Şekil 3.5a, b, c ve d'de gösterilmiştir.



a)



b)



c)



d)

Şekil 3. 4. ECC üretim aşamaları a) Kuru bileşenlerin karıştırılması, b) Su eklenmesi, c) Süperakışkanlaştırıcının eklenmesi ve d) PVA lifinin eklenmesi

3, 28 ve 90 günlük karışımların her birinden, basınç dayanımı için her yaşta 3 adet numune kullanılmak üzere toplam 9 adet 50x50x50 mm boyutlarında küp numunesi, eğilmede çekme dayanımı için her yaşta 3 adet numune kullanılmak üzere toplam 9 adet 360x75x50 mm boyutlarında kiriş numunesi ve matris (lifsiz ECC)

kırılma tokluğu tayini için her yaşta 3 adet numune kullanılmak üzere toplam 9 adet 360x75x50 mm boyutlarında kiriş numunesi hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan deney numunelerinin boyutları, literatürde daha önce yapılmış olan ECC ile ilgili çalışmalarla aynı boyutlara sahip olup, gerektiğinde numune boyut etkisi dikkate alınmadan literatürde bulunmuş olan sonuçlarla karşılaştırma amacı ile kullanılabilir. Tüm numuneler, daha önce tamamlanmış çalışmalar ve gerçek saha şartları dikkate alınarak, 7 gün özel hava geçirimsiz poşetlerde (Şekil 3.5.) kür edilmiş, daha sonra ortalama sıcaklığı 23 ± 2 °C ve nemi $\%50 \pm 5$ olan kür odasında (Şekil 3.6.) deney tarihine kadar muhafaza edilmiştir.



Şekil 3. 5. ECC numunelerinin poşette 7 gün kür edilmesi



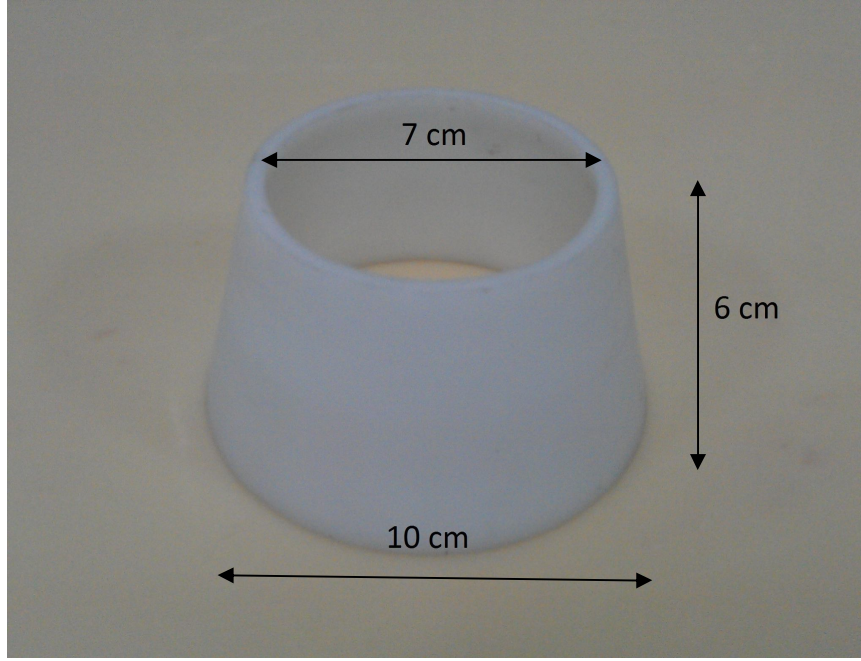
Şekil 3. 6. ECC numunelerinin oda şartlarında muhafaza edilmesi

3.2.2. Taze Özellikleri

ECC karışımlarının mikro-mekanik tabanlı tasarımları yapılırken liflerin matrise homojen olarak dağıldığı kabul edilmektedir. Her ne kadar üretilen karışımın özellikleri mikro-mekanik tabanlı tasarım yöntemlerinden elde edilen parametrelere uygun olsa da, lifler matrise homojen bir şekilde dağılmayabilmektedir. Homojen lif dağılımını etkileyen en önemli faktörlerden birisi ECC matrisinin (lif içermeyen ECC) taze özellikleridir (işlenebilirliği, akma dayanımı ve plastik viskozite vb.). ECC'nin taze özellikleri ayrıca kompozitin akışkanlığını ve kalıba ne derecede kolay yerleştirilebildiğini etkilemektedir. ECC karışımlarının taze durumdaki işlenebilirlik özelliklerinin belirlenmesi için mini çökme-yayılma testi ve marsh hunisi; reolojik özelliklerinin belirlenmesi için de rotasyonel viskozimetre deneyi yapılmıştır.

3.2.2.1. Mini Çökme-Yayılma Deneyi

Mini çökme-yayılma aparatı kesik koni şeklinde olup, üst çapı 70 mm, alt çapı 100 mm ve yüksekliği 60 mm boyutlarındadır (Şekil 3.7.). Mikserde karıştırma işlemi tamamlanan malzeme herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmadan, bu kesik koni içine konur ve ardından koninin yukarıya dik bir şekilde yavaş yavaş kaldırılmasından sonra malzeme yayılmaya başlar. Yayılma tamamlandığında, yaklaşık olarak dairesel bir şekil ortaya çıkar. Bu dairenin çapı, birbirine dik olan iki eksen boyunca ölçülür ve elde edilen değerlerin ortalaması sonucu, “mini çökme-yayılma çapı” bulunur.



Şekil 3. 7. Mini yayılma testi

3.2.2.2. Marsh Hunisi Deneyi

Bu çalışmada kullanılan Marsh hunisi, 1.5 litre iç hacimli ve alt ucunda 4.56 mm çapında bir çıkış deliği olan sert plastikten yapılmış bir hunidir (Şekil 3.8.). Alt çıkış deliği parmakla kapatılan huninin içine malzeme konur ve kronometrenin çalıştırılmasıyla beraber parmak çekilerek malzemenin akmaya başlaması sağlanır. Ne kadar malzemenin aktığı, huninin altına konan dereceli bir silindir vasıtasıyla ölçülür. Belirli bir hacimdeki malzemenin kaç saniyede aktığı ölçülür. Tezde, 100 ml malzemenin akması için geçen süre kaydedilmiştir. (Bu huni için 23 ± 2 °C sıcaklıkta 100 ml suyun akma süresi 1.76 saniyedir.)



Şekil 3. 8. Marsh hunisi deney aparatı

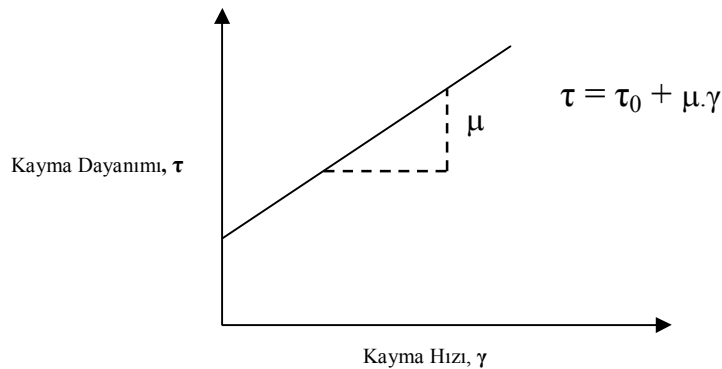
3.2.2.3. Rotasyonel Viskozimetre Testi

ECC matrisinin reolojik parametreleri (eşik gerilmesi ve plastik viskozite) rotasyonel bir viskozimetre kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 3.9.). Numune, ölçme kabına konduktan sonra, viskozimetrenin ölçüm yapan ucu numune içine daldırılır. Daha sonra açısal hız 0.5 devir/dakika değerinden 100 devir/dakika değerine yavaş yavaş çıkarılmıştır. Daha sonra hız, 100 devir/dakika'dan, 0.5 devir/dakika değerine basamaklar halinde azaltılmış ve her basamakta ölçümler alınmıştır. Bu basamaklar şu hızlarda olmuştur: 100 devir/dakika, 50 devir/dakika, 20 devir/dakika, 10 devir/dakika, 5 devir/dakika, 2.5 devir/dakika, 1 devir/dakika ve 0.5 devir/dakika.



Şekil 3. 9. Rotasyonel viskozimetre cihazı

Bu bağlamda, numune 0, 20 ve 40. dakika sürelerinde yukarıda belirtilen açılal hızlara tabi tutulup, bu sürenin sonunda kayma gerilmesi değeri kaydedilmiştir. Bu şekilde elde edilen kayma hızı-kayma gerilmesi veri çiftleri bir grafikte noktalar halinde çizilmiş ve bu noktalara doğrusal eğilim çizgisi oturtulmuştur. Bilindiği gibi bu doğrusal eğilim çizgisi Bingham modelini (Şekil 3.10.) oluşturmaktadır. Bu çizginin eğimi plastik viskoziteyi, çizginin kayma eksenini kestiği nokta ise eşik gerilmesini (akma dayanımını) vermektedir.



Şekil 3. 10. Akışkanlar için Bingham Modeli

3.2.3. Sertleşmiş Özellikleri

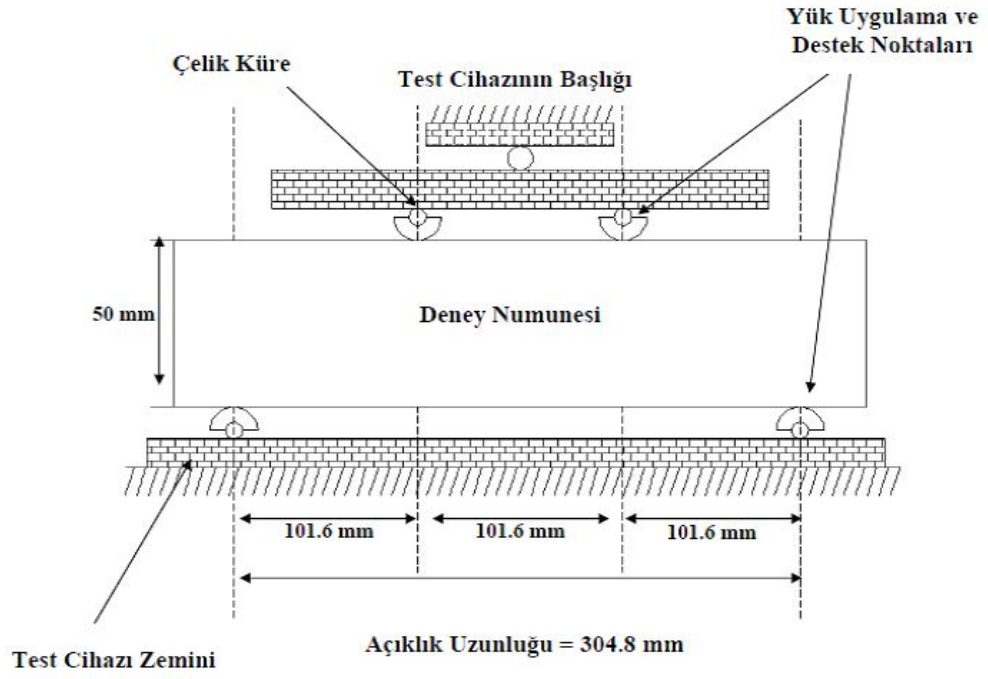
ECC karışımlarının sertleşmiş durumdaki özelliklerinin belirlenmesi için eğilmede çekme deneyi, kırılma tokluğu ve basınç dayanımı testi yapılmıştır.

3.2.3.1. Eğilmede Çekme Dayanımı

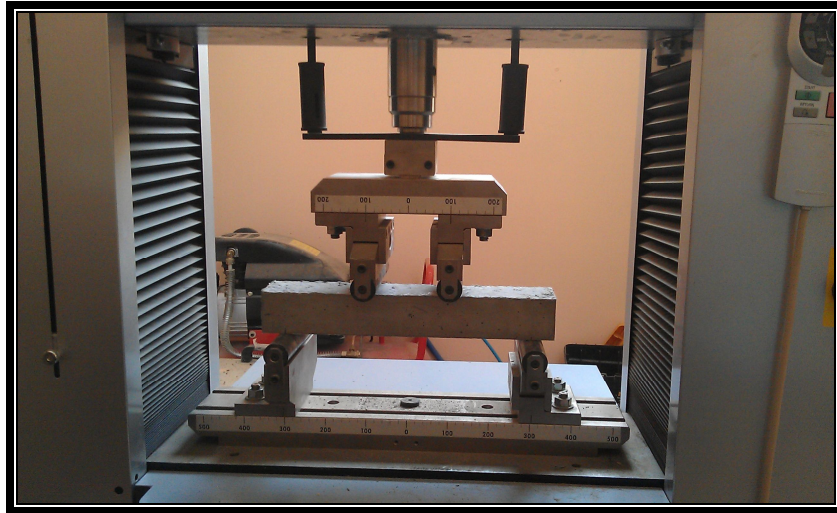
Eğilmede çekme dayanımı ve matris kırılma tokluğu deneyleri universal test cihazında (Şekil 3.11.) yapılmıştır. Karışımların eğilme yükü altında özelliklerinin belirlenmesi için boyutları 360x75x50 mm olan kiriş numuneleri üzerinde, önce numuneler temizlenerek Şekil 3.12.'de görüldüğü gibi yüklerin uygulanacağı noktalar belirlenmiş ve dört noktalı eğilmede çekme testi uygulanmıştır (Şekil 3.13.). Eğilme deneyleri, kapalı devre elektro-mekanik test cihazı ile deformasyon kontrollü olarak (0.003 mm/saniye hızla) yapılmıştır. Deney sırasında, numunenin orta noktasında oluşan şekil değiştirme ve buna karşılık gelen yük bilgisayar sistemi sayesinde hassas bir şekilde kaydedilmiştir. Aynı zamanda, numunelere ait eğilme deplasmanını ölçmek için deney düzeneğine lineer değişken deplasmanlı transdüser de sabitlendi. Ayrıca kırılan numunelerin çatlak analizleri ışıklı el mikroskobu ile yapılmıştır (Şekil 3.14.).



Şekil 3. 11. Üniversal test cihazı



Şekil 3. 12. Dört noktalı eğilmede çekme testi için deney düzeneği yük uygulanma noktaları



Şekil 3. 13. Dört noktalı eğilmede çekme testi



a)

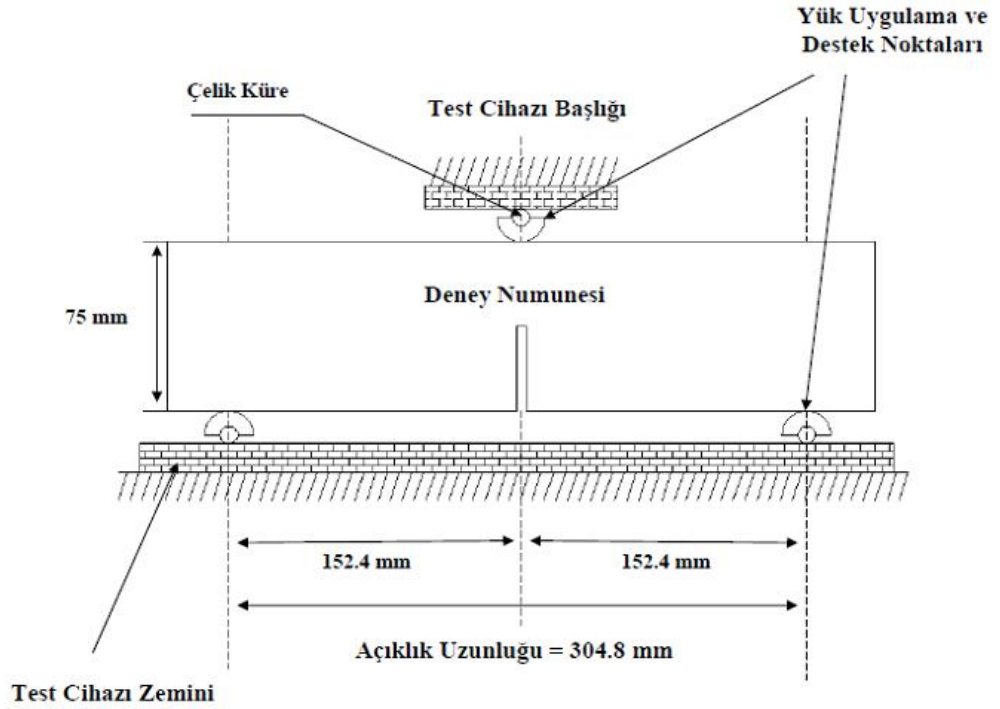


b)

Şekil 3. 14. Çatlak karakterizasyonu a) Numune çatlaklarının ölçülmesi ve b) Mini Mikroskop

3.2.3.2. Matris Kırılma Tokluğu

Matris kırılma tokluğu deneyleri, dört noktalı eğilmede çekme deneyinde olduğu gibi üniversal test cihazında yapılmıştır. Mevcut durumda çimento bağlayıcılı malzemeler için gerilme şiddet faktörünü ölçmek amacıyla standart test yöntemi bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada gerilme şiddet faktörü ölçümü amacıyla ASTM E 399 “Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{IC} of Metallic Materials” standart test yöntemi kullanılmıştır. Bu standart test metodunun çimento bağlayıcılı matrislerde uygulanması daha önce yapılmış olan çalışmalarda detaylı bir biçimde incelenip bu tür sistemlere uygulanabilirliği doğrulanmıştır. Kırılma tokluğunun ölçülmesi için bu çalışmada kullanılan deney tertibi Şekil 3.15.’de gösterilmektedir. Bu deney yöntemine göre her bir karışım için hesaplanan her kırılma tokluğu değeri her yaşta 3 adet 360x75x50 mm boyutlarına sahip numuneler hazırlanıp, numunelerin tam ortalarına yaklaşık 37.5 mm derinliğinde çentik açılmıştır (Şekil 3.15.). Daha sonra bu numuneler 0.006 mm/saniye hızla üç noktalı eğilmede çekme testine tabi tutulmuştur. Bu testten sonra numunelerin kesin çentik derinlikleri ölçülüp matris toklukları hesaplanmıştır (Şekil 3.16.).



Şekil 3. 15. Matris tokluğu tayini için kullanılan deney tertibi

Kırılma tokluğu değeri, test edilen numunenin boyutları dikkate alınarak aşağıda verilen denkleme göre hesaplanmıştır:

$$K_Q = \frac{P_Q S}{BW^{\frac{3}{2}}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (3.1)$$

P_Q : Tepe yükü, S : Açıklık uzunluğu, B : Numune yüksekliği, W : Numune derinliği ve $f\left(\frac{a}{W}\right)$: Geometrik kalibrasyon faktörü (her numunenin deney sonrasında ölçülen gerçek çatlak derinliğine göre 1.91 ile 2.18 aralığında değişmektedir).



Şekil 3. 16. Matris tokluğu kesin çentik derinlikleri ölçümü

3.2.3.3. Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı deneyleri 2 000 kN kapasiteli test cihazında ASTM C39 standartında uygun olarak yapılmış olup, karışımların basınç yükü altında özelliklerinin belirlenmesi için boyutları 50x50x50 mm olan küp numuneleri (Şekil 3.17b) üzerinde, önce numune temizlenerek Şekil 3.17a'da görüldüğü gibi basınç testi uygulanmıştır.



a)



b)

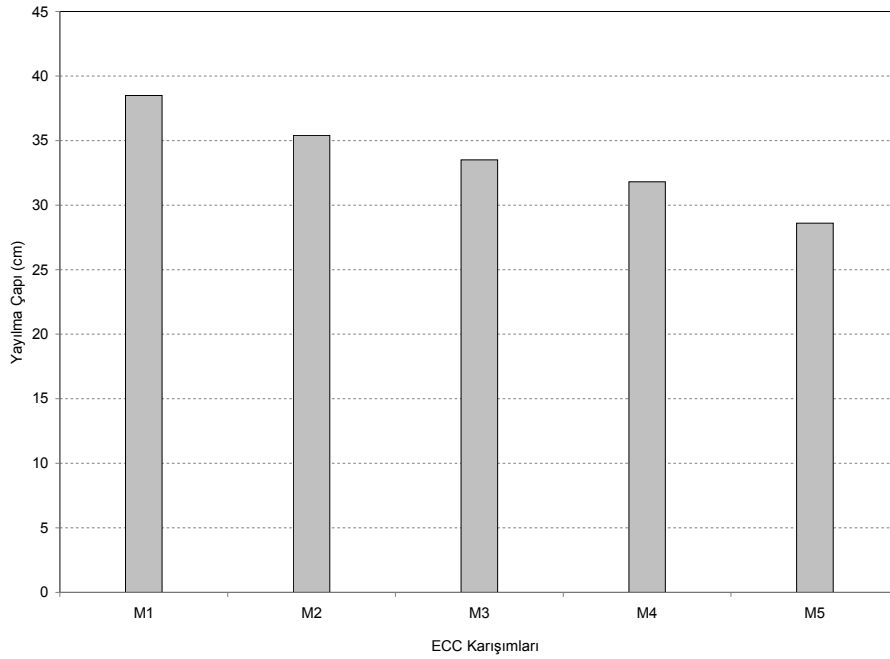
Şekil 3. 17. Basınç dayanımı a) Test cihazı ve b) Küp numuneleri

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Taze Özellikler

4.1.1. Mini Slump

Şekil 4.1.'de ECC karışımlarına ait kireçtaşı tozu miktarına bağlı olarak çökme-yayılma değerleri verilmiştir. Görüldüğü gibi, ECC karışımlarında KTT kullanım miktarı işlenebilirlik özelliklerini önemli derecede etkilemekte ve KTT miktarı arttıkça karışımlara ait çökme-yayılma çapları azalmaktadır.

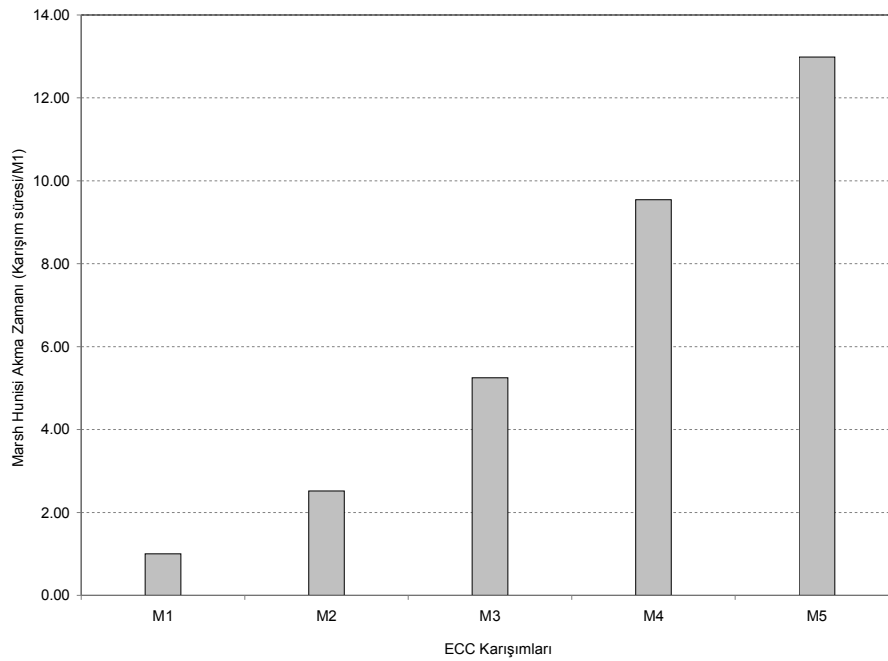


Şekil 4. 1. Mini çökme-yayılma çapının karışımlara göre değişimi

4.1.2. Marsh Hunisi

Marsh hunisi testi, çimento hamuru kalite kontrolü ve sınıflandırılması için kullanılan bir işlenebilirlik testidir (Roussel ve Roy, 2002). Mevcut çalışmada, taze ECC karışımlarının akma zamanını ölçmek için kullanıldı. Bu akma zamanı, ECC matrisinin akıcılığı ile ilişkilendirildi. Marsh Hunisi test sonuçları Şekil 4.2.'de gösterilmiştir. Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi, karışımlarda kullanılan KTT miktarı

arttıkça karışımın oluşan yüksek kıvamından dolayı, Marsh hunisinin akma zamanı artmaktadır. Kireçtaşı tozu, çimentonun alüminli fazları ile tepkime verdiği için puzolanik bir malzeme değildir. Kireçtaşı tozundan gelen kalsiyum karbonatlar C_3A ile tepkime verip karboalüminatlar oluşur. Oluşan karboalüminatlar çimento taneleri arasını doldurur (Soroka ve Stern, 1976; Ingram ve Daugherty, 1991; Taylor, 1997; Péra ve ark., 1999; Tsivilis ve ark., 1999; Bonavetti ve ark., 2001; Vuk ve ark., 2001). Buna bağlı olarak yüzde olarak daha yüksek miktarda KTT içeren karışımlar daha kohesif ve daha viskoz bir davranış sergilediğinden KTT artışı ile birlikte Marsh hunisi akma süresi de artmaktadır.



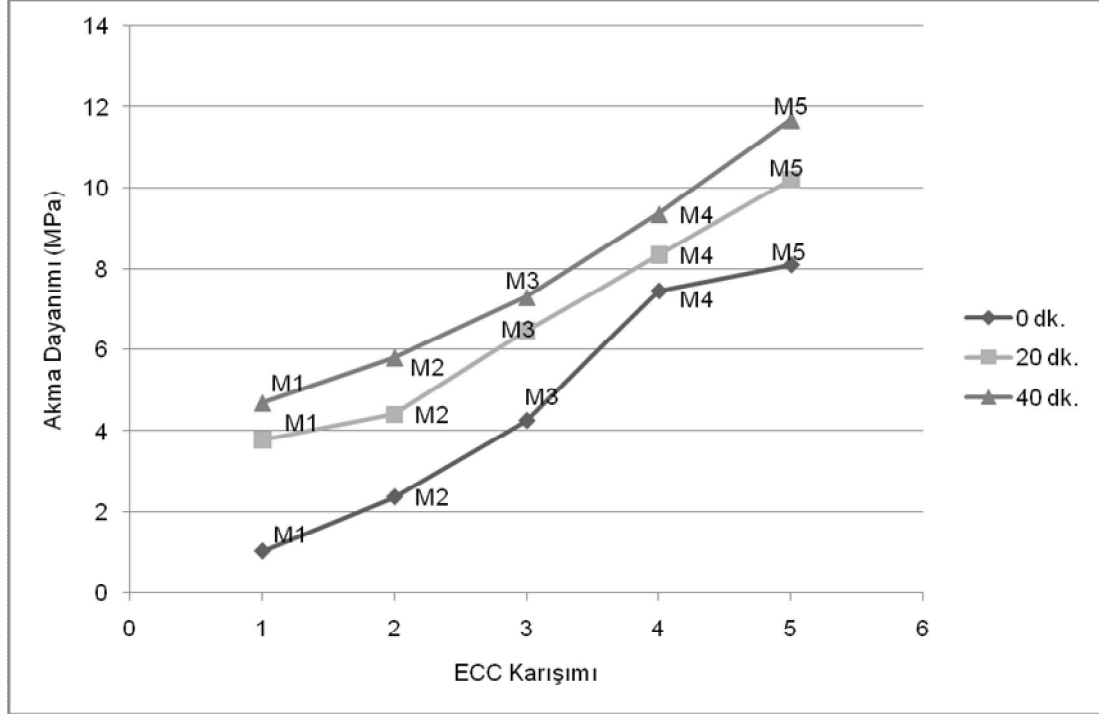
Şekil 4. 2. Marsh hunisi akma zamanının karışımlara göre değişimi

4.1.3. Rotasyonel Viskozimetre

4.1.3.1. Akma Dayanımı

Viskoelastik bir malzemede plastik deformasyon oluşumu için gerekli olan kesme mukavemetine akma dayanımı denilmektedir. Akma dayanımı malzemenin durağan halde olduğu ve bu değer aşılması durumunda malzemenin akmaya başladığı maksimum değerdir (Lu ve Wang, 2010). Düşük akma dayanımına sahip ECC karışımları, akma için düşük gerilme istemektedir (düşük akma dayanımı

genellikle yüksek yayılma ile sonuçlanmaktadır). Üretilen ECC karışımlarının akma dayanımı deney sonuçları Şekil 4.3.'te verilmiştir.



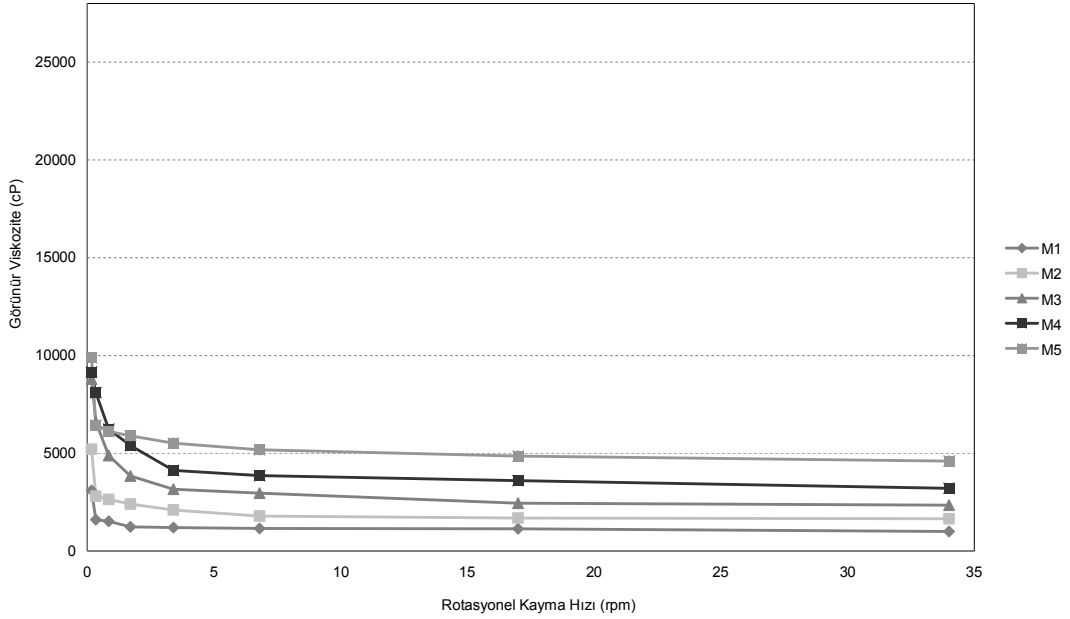
Şekil 4. 3. ECC karışımlarının akma dayanımlarının ölçüm sürelerine göre değişimi

Şekil 4.3.'te görüldüğü gibi, ECC karışımlarındaki KTT kullanım miktarı arttıkça, tüm ölçüm zamanlarında akma dayanımında bir artış görülmektedir. Bu sonucun olası nedenleri; KTT taneleri SK'den daha az etkili olarak çimento tanelerini yaydığından (Vikan ve Justnes, 2007) ve KTT kullanımı çimento hamurunun kohesifliğini (Ozawa ve ark., 1995; Khayat ve ark., 1997; Sakamoto ve ark., 1998; Khayat, 1999) ve viskozitesini (Yahia ve Yahia, 2005) arttırdığından, üretilen ECC karışımlarında KTT kullanım oranı arttıkça, çimento hamurunun akma dayanımı artmaktadır.

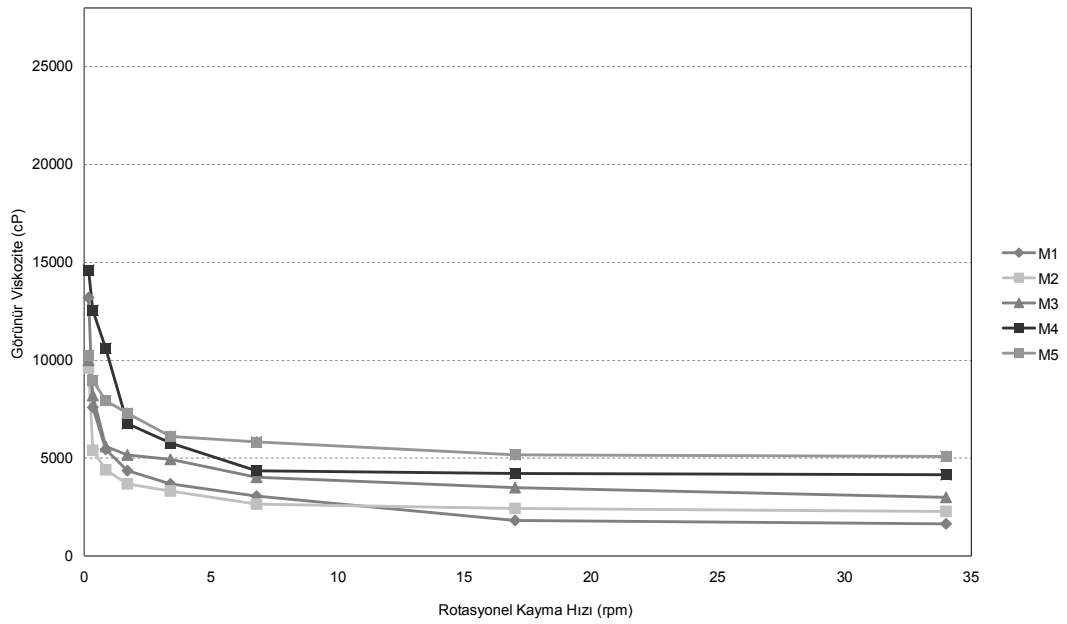
4.1.3.2. Viskozite

Plastik viskozite, akma dayanımı aşıldıktan sonra ECC matrisinin akışını kontrol etmektedir. Geleneksel betona kıyasla, matrisin kendiliğinden yerleşmesi durumunda akma dayanımı daha düşüktür (Feys ve ark., 2008). Böyle bir durumda,

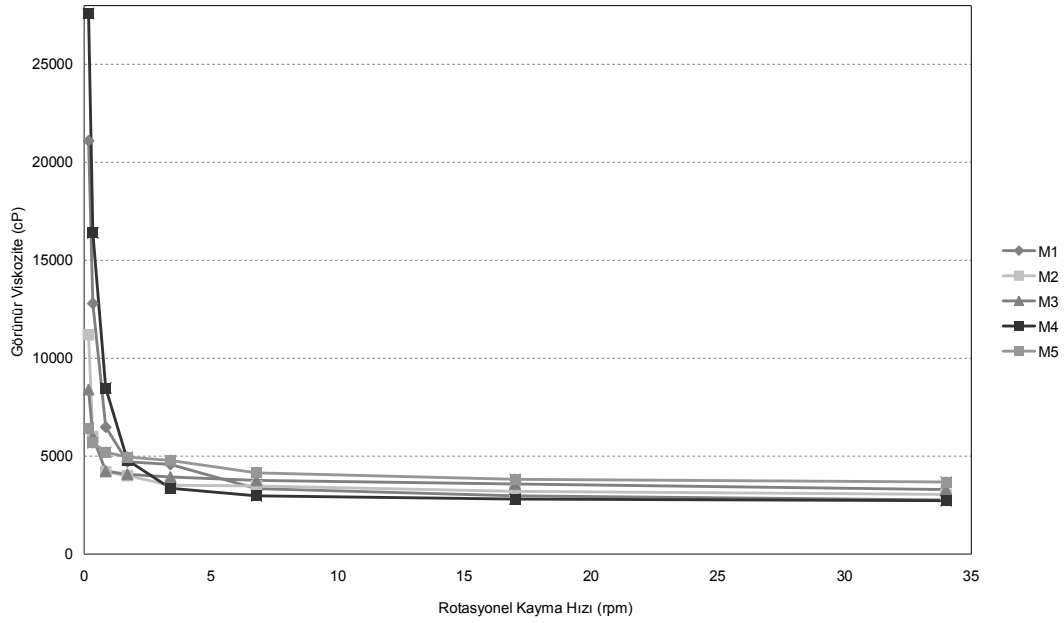
matrisin stabilitesinin korunması için daha yüksek plastik viskozite gerekmektedir. ECC matrisinde PVA lifinin düzgün bir şekilde dağılımı ve hedeflenen lif köprü verimliliğinin sağlanması için matrisin viskozitesi çok büyük bir önem teşkil etmektedir. Üretilen ECC karışımlarına ait viskozite deney sonuçları Şekil 4.4a, b ve c'de 0, 20 ve 40. dakikalar için verilmiştir.



(a)



(b)

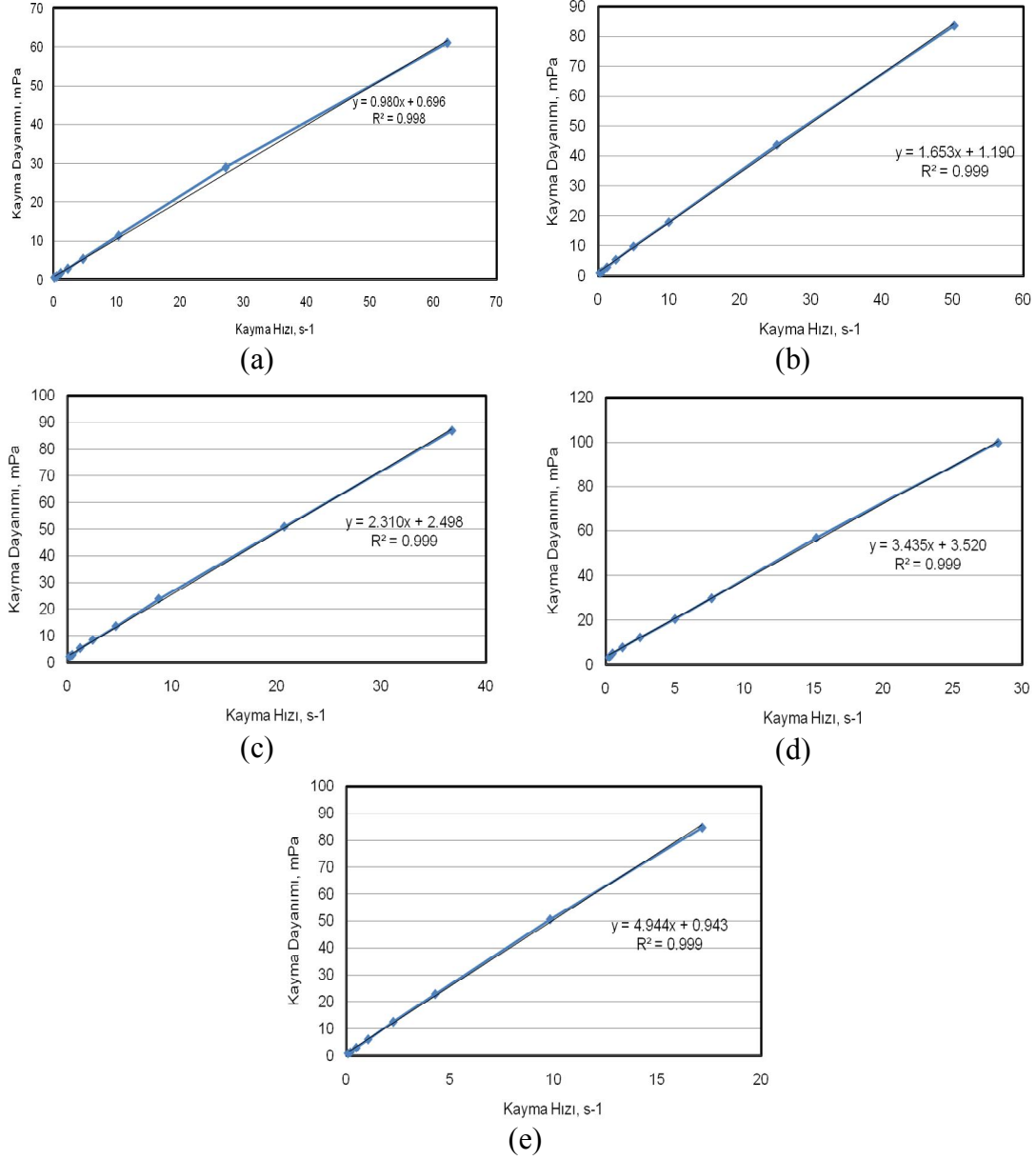


(c)

Şekil 4. 4. ECC karışımları görünür viskozitelerinin kayma hızları ve zamana bağlı değişimleri
a)T=0 dk. b) T=20 dk. ve c) T=40 dk.

Şekil 4.4.'te görüldüğü gibi, başlangıç matris viskozitesi KTT kullanımının artması ile artmaktadır. 20. dakikada birbirlerine yakınlaşmakta ve 40. dakikada ise karışım viskoziteleri hemen hemen aynı kıvama ulaşmaktadır. Yani, ECC karışımlarında KTT kullanımını sadece silis kumu içeren M1 kontrol karışımıyla karşılaştırıldığında, başlangıç viskozitesini arttırmakta (Yahia ve ark., 2005) ve belli bir süre sonra normal kıvamına ulaşmaktadır. Çünkü silis kumuna göre daha ince olan yapısının yanında, KTT'de bulunan kalsiyum karbonatlar (CaCO_3) C_3A ile tepkime verip karboalüminatlar oluşur. Oluşan bu ürünler çimento taneleri arasını doldurmakta, (Soroka ve Stern, 1976; Ingram ve Daugherty., 1991; Taylor, 1997; Péra ve ark., 1999; Tsivilis ve ark., 1999; Bonavetti ve ark., 2001; Vuk ve ark., 2001) ve oluşan bu durum da, başlangıç viskozitesini arttırmaktadır. Nitekim yapılan deneysel çalışmalarda, KTT miktarının artırılması ile matrisin ilk ve son priz alma sürelerini azaltması (Heikal ve ark., 2000; Elkhadiri ve ark., 2002), matrisin kohesifliğini arttırması (Ozawa ve ark., 1995; Khayat ve Yahia, 1997; Sakamoto ve ark., 1998; Khayat, 1999) bu çalışmadaki bulguları teyid eder niteliktedir. Ayrıca, 40. dakikadaki KTT içeren karışımlara ait görünür viskozite değerlerindeki (0. ve 20.

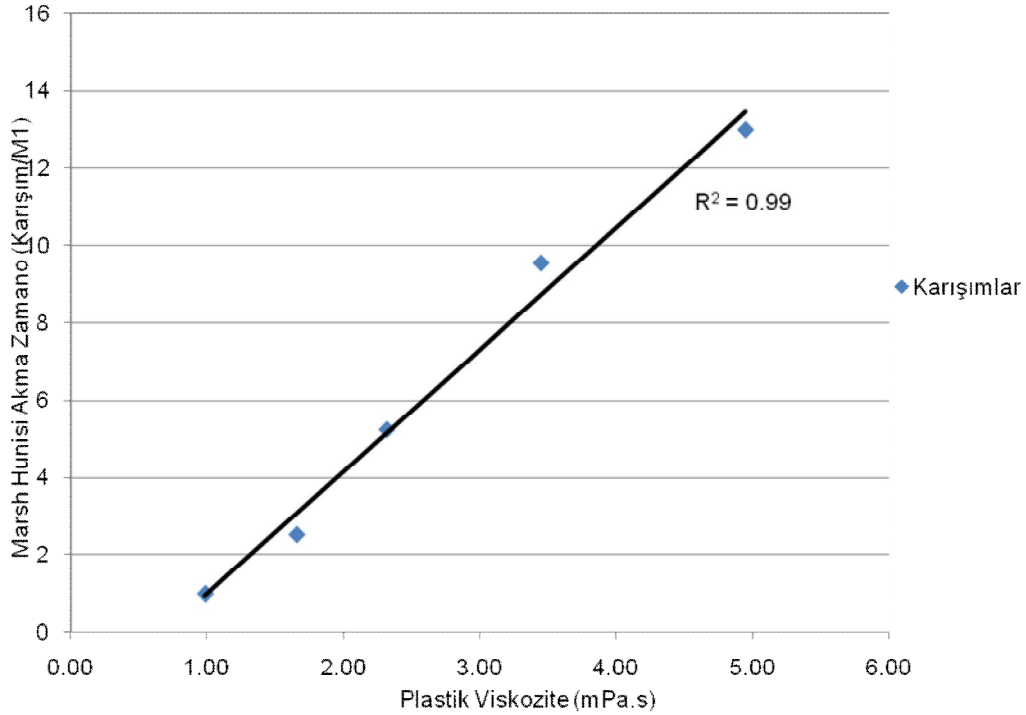
dakikadaki görünür viskozite değerlerine kıyasla) düşük KTT'nin adsorbsiyon kapasitesine dayandırılabilir.



Şekil 4. 5. Taze ECC karışımlarına ait plastik viskozite değerleri
a)M1 b) M2 c)M3 d)M4 ve e) M5

Taze ECC karışımları üzerinde rostasyonel viskozimetre testi ile yapılan ölçümlerden Şekil 4.5'te verilmiş olan plastik viskozite değerlerini veren eğriler çizilmiştir. Şekil 4.5'ten görüldüğü gibi, karışımlarda kullanılan KTT kullanım miktarı arttıkça plastik viskozite değerlerinde bir artış gözlemlenmiştir.

Üretilen ECC karışımlarının farklı rotasyonel hızlarda marsh hunisi akma süresi ve plastik viskozite ölçümleri arasındaki ilişki de araştırılmış ve güçlü bir korelasyon saptanmıştır. Marsh hunisi akma zamanı ve plastik viskozite ölçümleri arasındaki ilişki Şekil 4.6.'te verilmiş olup, korelasyon katsayısı çok kuvvetli görülmekte ve genel bir eğilimi yansıtmaktadır.



Şekil 4. 6. ECC karışımları Marsh hunisi akma zamanı ve plastik viskozite arasındaki ilişki

4.2. Mekanik Özellikler

4.2.1. Basınç Dayanımı

Üretilen her karışım numunelerinin 3, 28 ve 90. günde basınç dayanımları ölçülmüştür. ECC karışımlarının 3, 28 ve 90 günlük basınç mukavemeti deney sonuçları Çizelge 4.1.'de özetlenmiştir. Her bir karışımdan bütün kür yaşları için 3'er numune test edilmiştir. Çizelge 4.1.'de kolaylıkla görülmektedir ki, karışımlardaki KTT içeriğinin artması erken yaş basınç dayanımında önemli bir artış ile sonuçlanmaktadır. Kireçtaşı tozu miktarı değişiminin 28 günlük numunelerde önemli

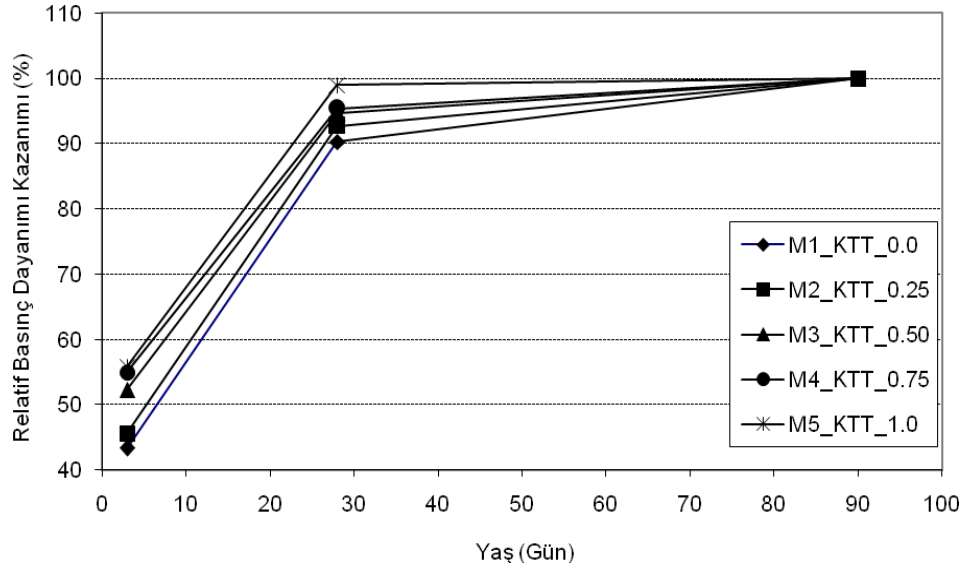
bir etki oluşturmadığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, karboalüminat oluşumundan dolayı çimento taneleri arasındaki gözeneklerin dolması ile çimento hidrasyon hızının geliştiğini ortaya koyan Heikal ve diğ.' nin bulmuş olduğu sonuçlar ile tutarlıdır (Heikal ve ark., 2000). Bu durum, betonun 90 gün gibi ileri yaşlarda nihai dayanımını kazanmasından ve karışımlarda kullanılan agregaların maksimum tane boyutunun aynı olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, KTT kullanım miktarının artması ileri yaşlardaki puzolanik reaksiyonu seyrelttiği gerçeğine dayandırılabilir (Heikal ve ark., 2000).

Çizelge 4. 1. Basınç dayanımı test sonuçları

Karışım No	Karışım Adı	Basınç Dayanımı, Mpa		
		3 Gün	28 Gün	90 Gün
M1	M1_KTT_0.0	29.70	61.89	68.55
M2	M2_KTT_0.25	30.55	62.11	67.03
M3	M3_KTT_0.50	35.04	63.44	66.99
M4	M4_KTT_0.75	37.00	64.21	67.34
M5	M5_KTT_1.0	38.08	67.27	68.21

ECC karışımlarının ortalama basınç dayanımları 90 günlük basınç dayanımları referans alınarak, her karışımın basınç deney sonuçları normalize edilip, farklı oranlarda KTT içeren karışımların basınç mukavemeti kazanım karakteristikleri zamana bağlı olarak belirlenmiştir. Böylece, her yaşta, yüzde basınç mukavemeti kazanımının (90 günlük numunelere nispeten) zamana bağlı sonuçları grafiksel olarak çizilebildi (Şekil 4.7.).

Şekil 4.7.'da, tamamen KTT ile üretilen M5 karışımının 28. günden sonra asimptot durumuna geldiği ve geriye kalan karışımlarda ise bu asimptot durumun gelişiminin 90. güne kadar devam ettiği gözlemlenmektedir. Buradan, KTT kullanım miktarının artması ile basınç mukavemeti ve dayanım kazanım hızının büyük bir çoğunluğunun erken yaşta kazanıldığı ve ileri yaşlarda azaldığı anlaşılmaktadır.



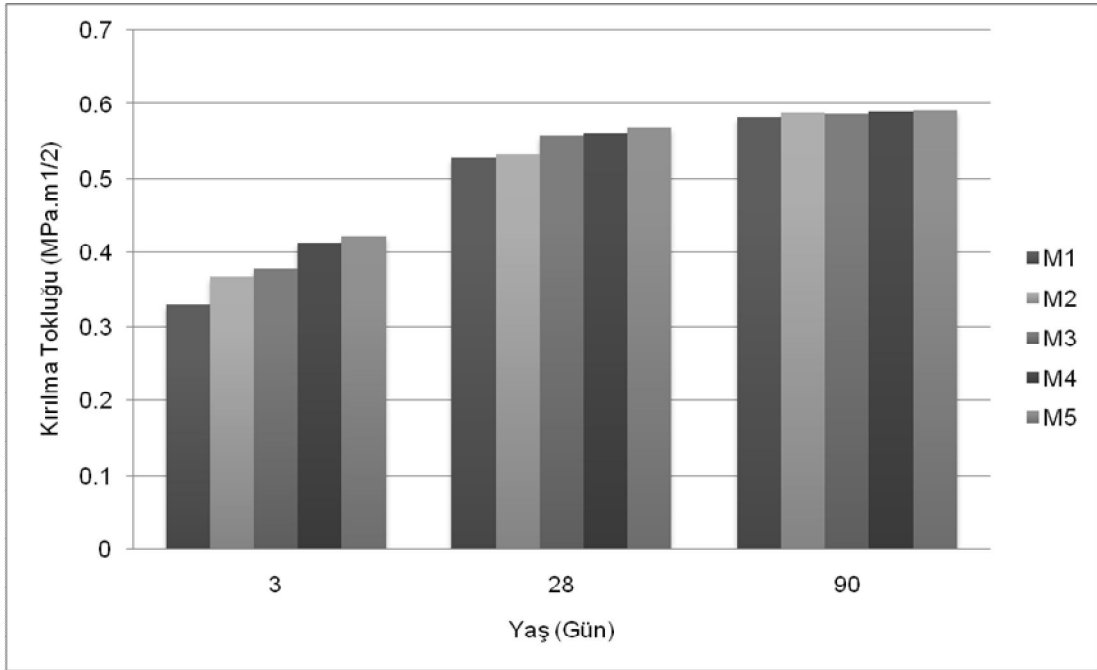
Şekil 4. 7. ECC karışımlarında yaşa bağlı relatif basınç dayanımının artışı

Tüm karışımlarda 28 günlük basınç dayanımı 60 MPa' dan fazla olup, geleneksel normal beton mukavemetinden oldukça yüksek ve bir çok mühendislik gereksinimlerini karşılayacak düzeydedir.

4.2.2. Kırılma Tokluğu

Kırılma tokluğu testi lifsiz ECC numunelerinin 3, 28 ve 90 günlük numuneleri için yapılmıştır. Şekil 4.8.'de, ECC karışımlarının kırılma tokluğu değerinin yaşa göre değişimleri görülmektedir. Şekil 4.7. görülüyor ki, karışımlarda kullanılan KTT kullanımı arttıkça, 3 ve 28. günlerde kırılma tokluğu değeri tutarlı bir şekilde artmaktadır. Ama gözlemlenen bu düzenli artış, 28. güne kıyasen 3 günlük numunelerde daha belirgin bir durumdadır. Çünkü karboaluminat oluşumundan dolayı çimento parçacıkları arasındaki gözeneklerin dolmasıyla daha dolu bir matris oluşmakta ve bu da kırılma tokluğu değerinin artması ile neticelenmektedir. İleri yaşlarda test sonuçları neredeyse aynı değerdedir. Bu sonuçlar, KTT ileri yaşlardaki puzolanik reaksiyonu seyreltmesinden kaynaklanmaktadır (Heikal ve ark., 2000). Ayrıca, kullanılan agrega maksimum tane boyutunun aynı olması nedeniyle nihai dayanımda aynı sonuçları vermiştir.

Belirtilen nedenlere ilave olarak, KTT kullanım miktarı arttıkça çimento hidrasyon ürünlerinde bir artış gözlemlendiğinden ve bu da daha az boşluklu bir matris oluşturduğundan, kırılma tokluğu hidrate olmuş ECC matrisindeki toplam porozite ve gözenek boyu dağılımından etkilenmektedir. Nitekim bu sonuç çimento hamurundaki düşük porozitenin daha yüksek kırılma tokluğu ile sonuçlandığını gösteren Mai ve Cotterell'in (1985) test sonuçları ile tutarlıdır.



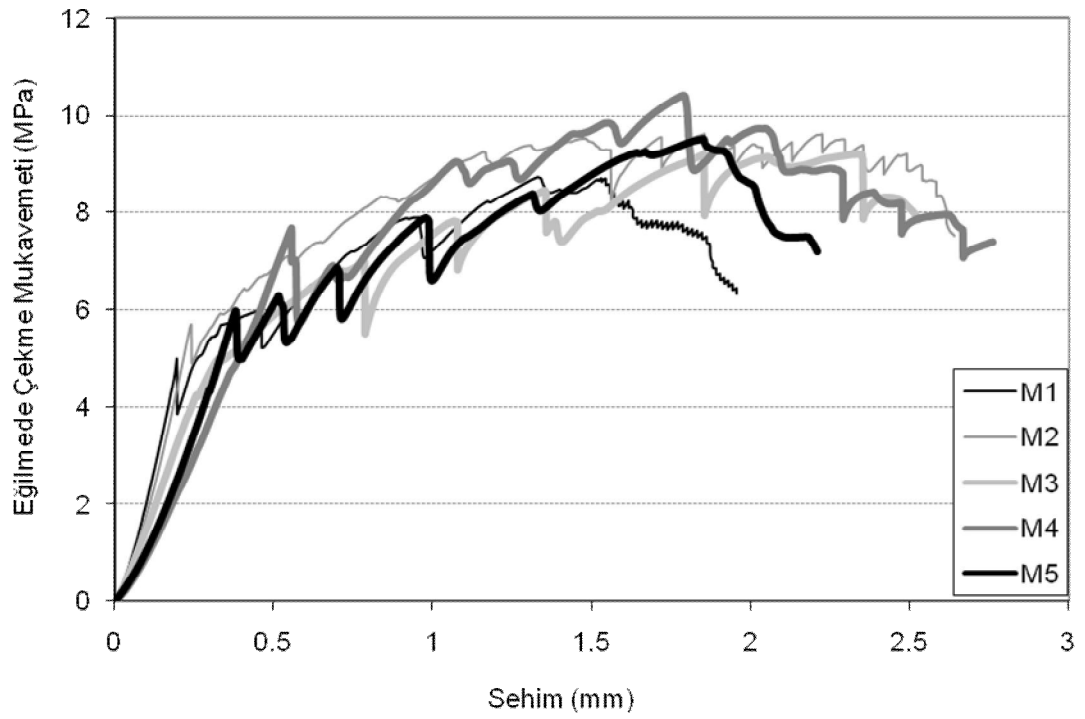
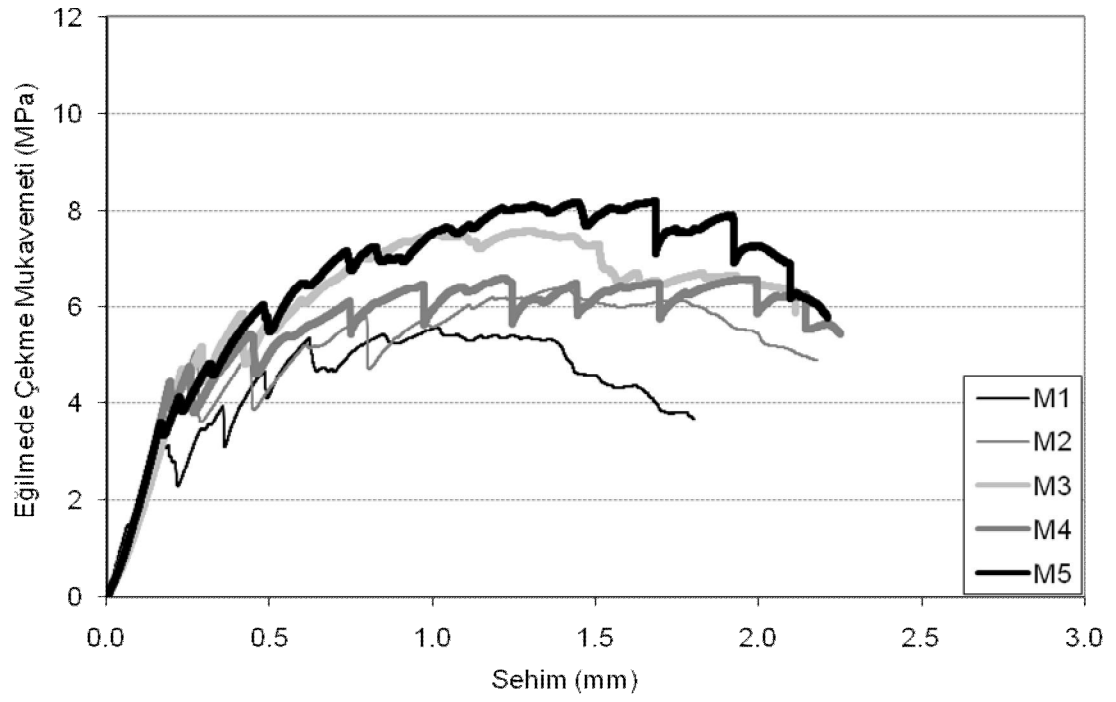
Şekil 4. 8. ECC karışımları yaşa bağlı kırılma tokluğu test sonuçları

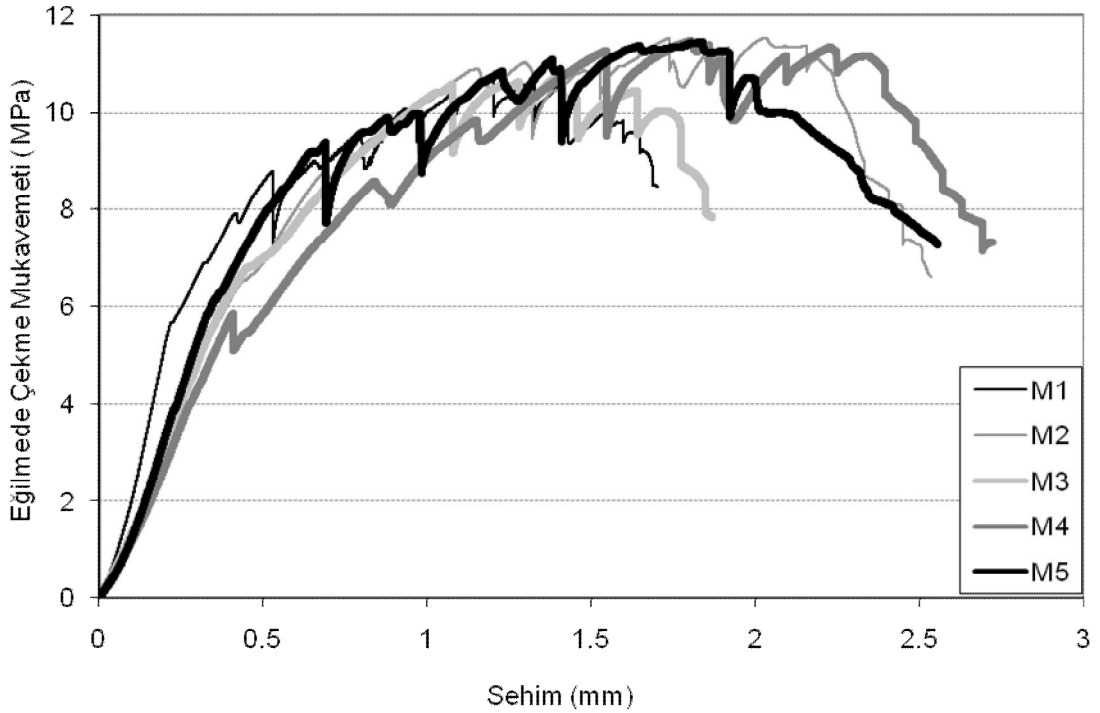
4.2.3. Eğilme Performansı

4.2.3.1. Yük-Sehim Eğrileri

Şekil 4.9. mevcut deneysel çalışmada üretilen ECC karışımlarının tipik eğilmeye çekme (EÇ) mukavemeti ve orta açıklık sehimini (OAS) göstermektedir. Yükleme altındaki numunede ilk çatlama ile oluşan ve gerilmedeki ilk düşüş olarak saptanan mukavemete ilk çatlama mukavemeti denilir. Oluşan en büyük gerilmeye, EÇ mukavemeti ve bu EÇ mukavemetine tekabül eden maksimum deplasmana da OAS kapasitesi denir. Üretilen tüm numunelerin EÇ mukavemeti ve OAS kapasitesi değerleri, üç tane dört noktalı eğilme testinden elde edilen sonuçların ortalamasıyla

belirlenmiştir. Hesaplanan her bir numunenin EÇ mukavemeti varyans katsayısı değerinin % 9'dan küçük olduğu saptanmıştır.





(c)

Şekil 4. 9. Üretilen ECC karışımlarının tipik eğilmede çekme mukavemeti ve orta açıklık sehim (a) 3 Günlük, (b) 28 Günlük ve (c) 90 Günlük

Şekil 4.9.'de görüldüğü gibi üretilen her ECC kirişi dört noktalı yükleme altında metal gibi bir davranış sergilemektedir. İlk çatlama sonrası karışımlardaki KTT kullanım miktarı arttıkça, tüm yaşlarda numunelerin daha sünek bir davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. KTT kullanım miktarı arttıkça, 3 günlük numunelerin EÇ mukavemeti ve OAS kapasitesinin belirgin bir şekilde pozitif olarak etkilendiği ve bu pozitif etkinin 28 ve 90 günlük numunelerde puzolanik reaksiyonun seyrekleşmesinden dolayı belirgin olmadığı gözlemlenmiştir. Bundan dolayı, en iyi EÇ mukavemeti ve OAS kapasitesi performansı genel olarak 90 günlük numunelerde gözlemlenmiştir. Yükleme sonrasında numunenin çekme bölgesinde meydana gelen çatlakların genişlik ve dağılımlarını incelemek için küçük bir mikroskop kullanıldı. ECC kirişlerindeki çok çatlaklı davranışın sergilenmesi lif, matris ve ara yüz arasındaki etkileşime bağlıdır. Bundan dolayı, ECC numunelerinde çok çatlaklı bir davranış sağlamak için, çatlak düzleminde matris çekme mukavemetinin lifler arasındaki köprü mukavemetinden daha küçük olması istenmektedir (Li, 2003). Çok çatlak oluşumu yükleme arttıkça görülmekte ve sonra ilk çatlak genişliği sehim artışı

ile ilerleyip artmakta ve daha sonra 70-100 µm arası çatlak genişliğinde sabit kalmaktadır. Eğilme dayanımına yaklaşıldığında, açıklık ortasındaki bir bölgede, lif köprü mukavemeti aşıldığında ECC numuneleri eğilme altında geçer.

28 günlük ECC karışımları, KTT ve SK kullanım oranlarına bağlı olarak ortalama ilk çatlak mukavemeti değerleri 3.18 ve 5.96 MPa arasında değişmektedir. Kontrol karışımı kontrol numunesi M1'e kıyasla tüm KTT içeren numunelerin ilk çatlama mukavemetinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir. KTT artışı 3 ve 28 günlük numunelerde etkisini daha belirgin bir şekilde gösterirken, 90 günlük numunelerde bu etki daha hafiftir.

Gerilme-sehim eğrisinin eğimi malzemenin rijitliğini temsil etmektedir. M1 kontrol karışımının rijitliği kür yaşının artışı ile artmakta ve tüm kür yaşlarında en yüksek değere sahiptir. Bu sonuç, SK maksimum tane boyutunun KTT'ninkinden daha büyük olmasına dayandırılabilir. KTT içeren numuneler kıyas edildiğinde, 3 günde KTT kullanım miktarı arttıkça rijitlikte hafif bir artış gözlemlenmiştir. Ama 28 ve 90 günlük numunelerde neredeyse hiçbir değişiklik gözlemlenmemiştir.

4.2.3.2. Eğilmede Çekme Mukavemeti

Tüm üretilen ECC karışımlarının EÇ mukavemeti test sonuçları Çizelge 4.2.'de özetlenmiştir. 28 günlük numunelerde ortalama nihai EÇ mukavemeti değerleri 8.70 ve 10.11 MPa değerleri arasında değişmektedir. Çizelge 4.2.'de görüldüğü üzere, tüm kür yaşlarında KTT kullanılan tüm numuneler referans karışımı olan M1'e kıyasla daha yüksek EÇ mukavemeti ve OAS kapasitesi göstermiştir.

Çizelge 4. 2. Eğilmede çekme mukavemeti test sonuçları

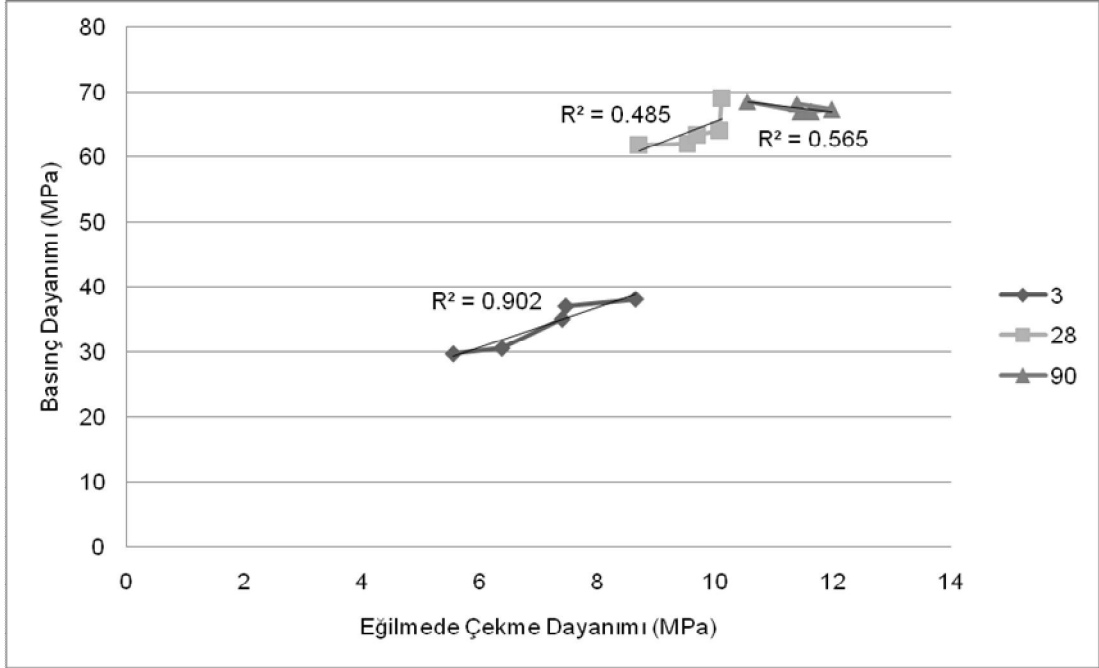
Karışım Kodu	EÇ mukavemeti, MPa		
	3 Gün	28 Gün	90 Gün
M1_KTT_0.0	5.54	8.7	10.55
M2_KTT_0.25	6.37	9.53	11.45

Çizelge 4.2. (Devam)

Karışım Kodu	EÇ mukavemeti, MPa		
	3 Gün	28 Gün	90 Gün
M3_KTT_0.50	7.4	9.69	11.63
M4_KTT_0.75	7.46	10.07	11.98
M5_KTT_1.0	8.65	10.11	11.39

Kontrol karışımı olan M1_KTT_0.0 karışımına kıyasen, en yüksek eğilmede çekme mukavemeti kazanımı 3 günlük ECC kirişlerinde ve %36 oranında gözlemlenmiş olup, bu oran 28 günlük numunelerde ise %14 oranındadır. Bu gelişim 90 günlük numunelerde ihmal edilecek düzeydedir. Bu durum, karışımların ileri yaşlarda gelişimlerinin çoğunluğunu tamamladıklarından ve kullanılan maksimum tane boyutunun aynı olmasından kaynaklanmaktadır. Nitekim bu sonuç daha önce yapılmış ve KTT kullanımının hidrasyon hızı ve çimento hamurunun erken yaşta gelişimini pozitif olarak etkilediğini ispatlayan çalışmalarla tutarlıdır (El-Didamony ve ark., 1995; Heikal ve ark., 2000).

Şekil 4.10. erken yaş basınç dayanımı ve EÇ mukavemeti arasında $R^2=0.902$ gibi iyi bir korelasyon olduğunu, 28 ve 90 gün gibi ileri yaşlarda bu durumun geçerli olmadığını göstermektedir.



Şekil 4. 10. Eğilmeye çekme ve basınç dayanımı 3, 28 ve 90 gün korelasyonu

4.2.3.3. Orta Açıklık Sehimi

ECC karışımlarının süneklik derecelerini yansıtan orta açıklık sehimi kapasitesi değerleri Şekil 4.11.'de ve Çizelge 4.3.'te özetlenmiştir. Şekil 4.11., ECC numunelerinin OAS kapasitelerinin KTT kullanım miktarına ve kür yaşına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. KTT içeren ECC karışımlarının referans karışıma nispeten daha sünek bir davranış göstermektedir. KTT içeren 3 günlük ECC karışım numunelerinde, KTT kullanım oranı arttıkça daha sünek bir davranış sergilemesine rağmen, 28 ve 90 günlük numunelerde ise sünekliğin azaldığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak söylenebilir ki, 3 günlük numuneler dışında KTT kullanımının genel olarak OAS kapasitesi üzerinde pozitif bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

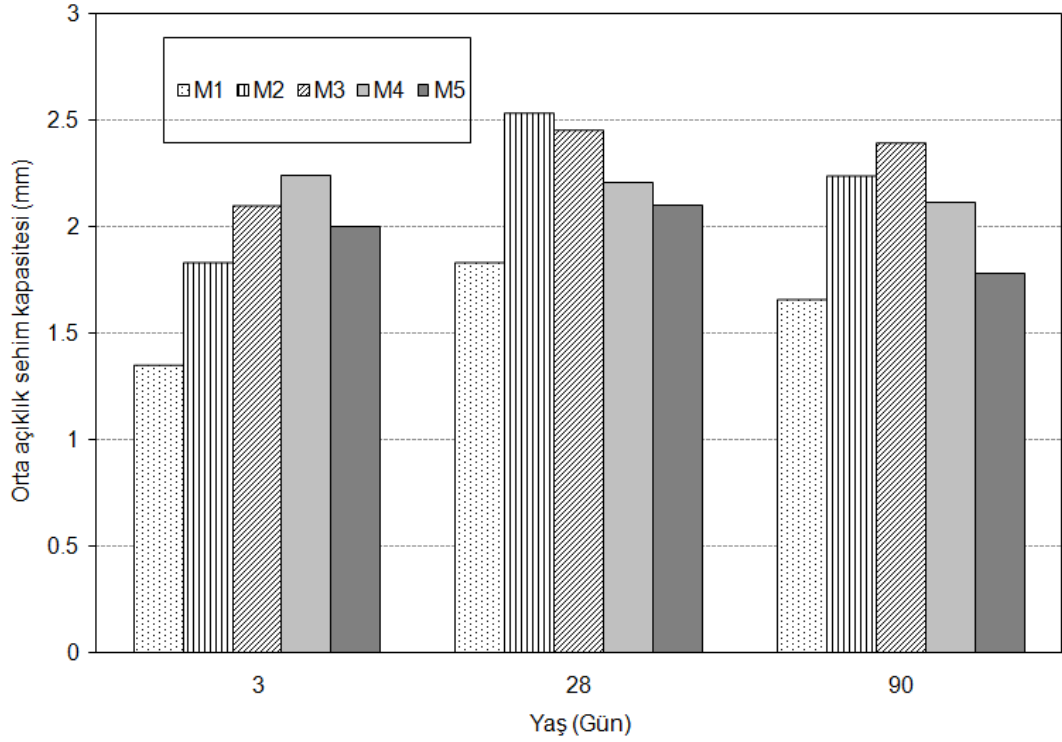
Çizelge 4. 3. ECC numuneleri OAS kapasitesi test sonuçları

Karışım Kodu	OAS Kapasitesi, mm		
	3 Gün	28 Gün	90 Gün
M1_KTT_0.0	1.35	1.83	1.66
M2_KTT_0.25	1.83	2.53	2.24

Çizelge 4.3. (Devam)

Karışım Kodu	OAS Kapasitesi, mm		
	3 Gün	28 Gün	90 Gün
M3_ KTT_0.50	2.1	2.45	2.39
M4_ KTT_0.75	2.24	2.21	2.11
M5_ KTT_1.0	2	2.1	1.78

Mikro-mekanik olarak tasarlanmış ECC karışım numunelerinde, OAS şu dört parametreye bağlıdır. Şöyle ki; Matris kimyası, matris tokluğu, matris-lif ara yüz ve lif özelliğidir. OAS, matris (kırılma) tokluğu ve matris-lif ara yüz ile ters orantılıdır. Yani, kırılma tokluğunun artması ve ara yüzün iyileşmesi OAS'yi azaltmaktadır. Bu bağlamda bakıldığında kırılma tokluğu ve OAS test sonuçlarından 3 günlük numunelerde ters orantı beklenmesi gerekirken doğru bir orantının olduğu gözlemlenmektedir. Bu sonucun sebebi şu olmak gerektir ki, erken yaşta KTT kullanımı matris tokluğunu iyileştirdiği için kırılma tokluğu değeri artmıştır ve lif-matris ara yüz bağları daha olgunlaşmadığından lifler matris içinden kopmadan kaymakta ve bu durum da numunede daha yüksek bir OAS yaptırmaktadır. Nitekim 28 ve 90 günlük numunelerde matris-lif ara yüzü kimyasal bağları kuvvet kazandığından dolayı, numuneler genel olarak beklenen davranışı sergilemiştir.



Şekil 4. 11. Yaşa bağlı orta açıklık sehım test sonuçları

4.2.3.4. Çatlak Karakterizasyonu

Yükleme sonrasında numunenin çekme bölgesinde küçük genişlikte ve sık aralıklı çatlaklar oluşmaktadır (Şekil 4.12.). Üretilen tüm ECC karışımlarında test sonrası oluşan ortalama çatlak genişliği 70 μm ve 100 μm arasında değişmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan lif boyu daha önce yapılan çalışmalara nispeten daha kısa olduğundan, çatlak genişliklerinin daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. 3 günlük numunelere kıyasen, 28 ve 90 günlük numunelerde daha küçük çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu eğilim ileri yaşlarda lif ve matris arasında gelişen ara yüze dayandırılabilir.



Şekil 4. 12. Çekme yüzünde düzgün yayılı çatlak oluşmuş ECC numunesi

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez, KTT'nin SK ile yer değişim oranlarının ECC'nin eğilme altındaki yük-deplasman eğrisi, eğilme özellikleri, çatlak gelişimi ve basınç dayanımı gibi mekanik özellikleri; işlenebilirlik ve reolojik özellikleri üzerine etkisini incelemektedir. Deney sonuçlarına istinaden gelecek sonuçlar ileri sürülebilir.

1. Kontrol karışımı olan M1'e nispeten, KTT kullanım yüzdesinin artması ile 3 ve 28 günlük numunelerin basınç dayanımı ve kırılma tokluğu değerlerinin arttığı gözlemlenirken, 90 günlük numunelerde ise kayda değer bir değişim olmamıştır.

2. Referans karışımı M1_KTT_0.0'a kıyasen, KTT kullanımının artması ile ECC kirişlerinin eğilmede çekme mukavemeti performansının tüm kür yaşlarında olumlu bir etkinin olduğu gözlemlenmiştir. Bir de, 3 günlük ECC kirişlerinde %36 oranında en yüksek eğilmede çekme mukavemeti kazanımı gözlemlenirken, 90 günlük numunelerde ise bu oran neredeyse aynıdır.

3. Referans karışımına nispeten, 3 ve 28 günlük ECC numunelerinin ilk çatlama mukavemetinin KTT miktarı artışı ile arttığı saptanmıştır. Ama bu etki, 90 günlük numunelerde çok azdır. Bir başka deyişle, KTT'li ECC karışımlarının rijitliği KTT miktarı arttıkça hafif arttığı (3 günlük numunelerde) ve 28 ile 90 günlük numunelerde ise neredeyse aynı olduğu gözlemlenmiştir. M1 referans karışımının rijitliği ise tüm kür yaşlarında en yüksektir.

4. Deplasman kapasitesi ölçümlerine bağlı olarak belirlenen ECC kirişleri sünekliği hem KTT kullanım miktarına hem de kür yaşına bağlı olduğu gözlemlenmiştir. KTT içeren tüm karışımlar, referans karışımından daha sünek bir davranış sergilemiştir. Erken yaş numuneler hariç, genel olarak KTT kullanımını arttıkça ECC kirişlerinin deplasman kapasitesi azalmıştır.

5. İnce tane miktarı artışı nedeniyle, KTT kullanım miktarı artışı çatlak genişliğinde azalma ile neticelenmiştir. Ama bu çalışmada test edilen kırıç numunelerinin çatlak sayısı ve genişliğinin lif uzunluğu 6 mm'den yüksek olan diğçer çalışmalara kıyasen sırasıyla daha az ve daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.

6. KTT kullanım oranı arttıkça, işlenebilirlik olarak, yayılma çapı azalmakta ve marsh hunisi akma zamanı artmaktadır.

7. Başlangıç matris viskozitesi KTT kullanımının artması ile artmaktadır. 20. dakikada birbirlerine yakınlaşmakta ve 40. dakikada ise kırıçım viskoziteleri hemen hemen aynı kıvama ulaşmaktadır.

KAYNAKLAR

- ACI COMMITTEE 224, 2001. "Control of Cracking in Concrete Structures", American Concrete Institute, 69(12), pp. 717-753.
- BAKKER, R.F.M., 1988. "Initiation period of corrosion." RILEM Report: Corrosion of Steel in Concrete edited by P. Schiessl, p. 22-55.
- BEELDENS, A., VANDEWALLE, L., 2001. "Durability of high strength concrete for highway pavement restoration." CONSEC '01: Third International Conference on Concrete under Severe Conditions; Vancouver, BC; Canada, p. 1230-1238.
- BONAVETTI, V. L., RAHHAL, V. F., IRASSAR, E. F., 2001. "Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements", Cement and Concrete Research, 31(6), p. 853-859.
- CHANG, P. K., PENG, Y. N., HWANG, C. L., 2001. "A design consideration for durability of high-performance concrete." Cement and Concrete Composites, 23(4-5), p. 375-380.
- EL-DIDAMONY, H., SALEM, T., GABR, N., MOHAMED, T., 1995. "Limestone as a retarder and filler in limestone blended cement", Ceramics(Praha), 39(1), p. 15-19.
- ELKHADIRI, I., DIOURI, A., ARIDE, J., and PUERTAS, F., 2002. "Mechanical behaviour of various mortars made by combined fly ash and limestone in Moroccan Portland cement". Cement and Concrete Research, 32(10), p. 1597-1603.
- EVARDESEN, C., 1999. "Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete", ACI Materials Journal, 96(4), p. 448-454.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA), Corrosion Detection in Reinforced Concrete Bridge Structures, Project 84, Washington, DC, 1992.
- FEYS, D., VERHOEVEN, R., SCHUTTER, G. D., 2008. "Fresh self compacting concrete, a shear thickening material", Cement and Concrete Research, 38(7), p. 920-929.
- GERARD, B., REINHARDT, H. W., BREYSSE, D., 1997. "Measured transport in cracked concrete." Penetration and Permeability of Concrete: RILEM Report 16, p. 265-331.
- HEARN, N., 1999. "Effect of shrinkage and load-induced cracking on water permeability of concrete." ACI Materials Journal, 96(2), p. 234-241.
- HEIKAL, M., EL-DIDAMONY, H., and MORSY, M.S., 2000. "Limestone-filler pozzolanic cement". Cement and Concrete Research, 30(11), p. 1827-1834.
- HWANG, C. L., LIU, J. J., LEE, L. S., LIN, F. Y., 1996. "Densified Mixture Design Algorithm and Early Properties of High Performance Concrete." Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering, 8(2), p. 217-219.
- INAGUMA, H., SEKI, M., SUKA, K., ROKUGO, K., 2005. "Experimental study on crack-bridging ability of ECC for repair under train loading." Proc. Of Int'l Workshop on HPFRCC in Structural Applications, Honolulu, Hawaii, USA. p. 499-508.
- INGRAM, K. D., DAUGHERTY, K. E., 1991. "A review of limestone addition to Portland cement concrete", Cement and Concrete Composites, 13(3), p. 165-170.

- KANDA, T., SAITO, T., SAKATA, N., 2003. "Tensile and anti-spalling properties of direct sprayed ECC." *Advanced Concrete Technology*, 1(3), p. 269-282.
- KHAYAT, K. H., YAHIA, A., 1997. "Effect of welan gum—high-range water reducer combination on rheology of cement grout", *ACI Material Journal*, 94(5), p. 365– 372.
- KHAYAT, K.H., 1999. "Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete", *ACI Material Journal*, 96(3), p. 346– 353.
- KIM, Y. Y., KONG, H. J., LI, V. C., 2003. "Design of Engineered Cementitious Composite (ECC) suitable for wet-mix shotcreting." *ACI Materials Journal*, 100(6), p. 511-518.
- KONG, H. J., BIKE, S., LI, V. C., 2003. "Development of a self-compacting ECC employing electrosteric dispersion/stabilization." *Cement and Concrete Composites*, 25(3), p. 301-309.
- KUNIEDA, M., ROKUGO, K., 2006. "Recent progress on HPFRCC in Japan – Required performance and applications." *J. Advanced Concrete Technology*, 4(1), p. 19-33.
- LEPECH, M., LI, V. C., 2005. "Water permeability of cracked cementitious composites." *Proceedings of Eleventh International Conference on Fracture*, Turin, Italy, March p 20-25.
- LEPECH, M., LI, V. C., 2007. "Large Scale Processing of Engineered Cementitious Composites." Accepted for publication in *ACI Materials Journal*, 105(4), p. 358-366.
- LI, V. C., MISHRA, D. K. and WU, H. C., 1995. "Matrix Design for Pseudo Strain-Hardening Fiber Reinforced Cementitious Composites". *Materials and Structures*, 28(10), p. 586-595.
- LI, V. C., 1998. "Engineered cementitious composites-Tailored composites through micromechanical modeling." In: *Fiber Reinforced Concrete:Present and the Future* edited by N. Banthia, A. Bentur, A. and A. mufti, Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, p. 64-97.
- LI, V.C, WANG, S. and WU, C., 2001. "Tensile Strain-hardening Behavior of PVA-ECC". *ACI Materials Journal*, 98(6), p. 483-492.
- LI, V. C., 2002. "Advances in ECC research," *ACI Special Publication on Concrete:Material Science to Applications*, SP 206-23, p. 373-400.
- LI, V. C., 2003. "On Engineered Cementitious Composites (ECC) A Review of the Material and Its Applications". *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), p. 215-230.
- LI, V. C., FISCHER, G., KIM, Y. Y., LEPECH, M., QIAN, S., WEIMANN, M., WANG, S., 2003. "Durable link slabs for jointless bridge decks based on strain-hardening cementitious composites." Report for Michigan Department of Transportation RC-1438.
- LI, V. C., HORIKOSHI, T., OGAWA, A., TORIGOE, S., SAITO, T., 2004. "Micromechanics-based durability study of Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC)." *ACI Materials Journal*, 101(3), p. 242-248.
- LI, V. C., LEPECH, M., 2004. "Crack resistant concrete material for transportation construction." in *TRB 83rd Annual Meeting*, Washington, D.C., Compendium of Papers CD ROM, Paper 04-4680.

- LI, V. C., STANG, H., 2004. "Elevating FRC material ductility to infrastructure durability." Proceedings of BEFIB, Varenna, Lake Como, Italy, p. 171-186.
- LI, V. C., LEPECH, M., LI, M., 2005. "Final Report on Demonstration of Durable Link Slabs for Jointless Bridge Decks Based on Strain-Hardening Cementitious Composites", Submitted to MDOT.
- LI, M., SAHMARAN, M., LI, V. C., 2007. "Effect of cracking and healing on durability of Engineered Cementitious Composites under marine environment", HPCRCC 5 - High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Stuttgart, Germany, 10-13, p. 313-322.
- LIN, Z. and LI, V. C., 1997. "Crack Bridging in Fiber Reinforced Cementitious Composites with Slip-Hardening Interfaces". Journal of Mechanics and Physics of Solids, 45(5), p. 763-787.
- LIN, Z., KANDA, T. and LI, V. C., 1999. "On interface property characterization and performance of fiber reinforced cementitious composites". Concrete Science and Engineering, RILEM, 1, p. 173-184.
- LU, G. and WANG, K., 2010. "Investigation into Yield Behavior of Fresh Cement Paste: Model and Experiment", ACI Materials Journal, 107(1), p. 12-19.
- MAI, Y. W. and COTTERELL, B., 1985. "Porosity and mechanical properties of cement mortar". Cement and Concrete Research, 15(6), p. 995-1002.
- MANNING, D. G., 1996. "Corrosion performance of epoxy-coated reinforcing steel: North American experience", Construction and Building Materials, 10(5), p. 349-365.
- MARTYS, N. S., FERRARIS, C. F., 1997. "Capillary transport in mortars and concrete", Cement and Concrete Research, 27(5), p. 747-760.
- MARUTA, M., KANDA, T., NAGAI, S., YAMAMOTO, Y., 2005. "New high-rise RC structure using pre-cast ECC coupling beam," Concrete Journal, 43(11), p. 18-26.
- MEHTA, P. K., 1986. "Concrete: Structure, Properties, and Materials." Prentice-Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, p. 353-367.
- MICHIGAN DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2001. "Michigan Test Method 111 - Determining an Aggregate Wear Index (AWI) By Wear Track Polishing Tests." Michigan Department of Transportation. Lansing, Michigan.
- MIHASHI, H., DE LEITE, J. P. B., 2004. "State-of-the-art report on control of cracking in early age concrete." Advanced Concrete Technology. 2(2), p. 141-154.
- MIYAZATO, S., HIRAISHI, Y., 2005. "Transport properties and steel corrosion in ductile fiber reinforced cement composites." Proc. ICF 11, Torino, Italy.
- MORA, J., AGUADO, A., GETTU, R., 2003. "The influence of shrinkage reducing admixtures on plastic shrinkage." Materiales de Construcción, 53(271-272), p. 71-80.
- OH, B.H., CHA, S. W., JANG, B. S., JANG, S. Y., 2002. "Development of high-performance concrete having high resistance to chloride penetration." Elsevier Science SA, Nuclear Engineering and Design (Switzerland), 212(1-3), p. 221-231.
- OZAWA, K., SAKATA, N., OKAMURA, H., 1994. "Evaluation of self-compactability of fresh concrete using the funnel test", Proc. of JSCE, 23(490).

- PÉRA, J., HUSSON, S., GUILHOT, B., 1999. "Influence of ground limestone on cement hydration", *Cement and Concrete Composites*, 21(2), p. 99–105.
- prEN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- REINHARDT, H. W., JOOSS, M., 2003. "Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width", *Cement and Concrete Research*, 33(7), p. 981-985.
- ROKUGO, K., KUNIEDA, M., LIM, S.C., 2005. "Patching repair with ECC on cracked concrete surface." *Proc. CONMAT 5*.
- ROUSSEL, N., ROY, R. L., 2002. "The Marsh cone: a test or a rheological apparatus?", *Cement and Concrete Research*. 35(5), p. 823– 830.
- SAGUES, A. A., POWERS, R. G., LOCKE, C. E., 1994. "Corrosion processes and field performance of epoxy-coated reinforcing steel in marine structures," *Corrosion 94*, Paper No. 299, Houston, TX.
- SAKAMOTO, J., YOKOI, K., SHINDOH, T., 1998. "Influence of powder or coarse aggregate volume on self-compactability of self-compacting concrete", *Proc. JCI*, 20(2), p. 415-420.
- SAKATA, K., KANDA, T., HIRAISHI, M., 2004. "Application of direct sprayed ECC for retrofitting dam structure surface-application for Mitaka-Dam." *JCI Concrete J.*, 42(5).
- SOROKA, I., STERN, N., 1976. "Calcareous fillers and the compressive strength of Portland cement", *Cement and Concrete Research*, 6, p. 367–376.
- STANG, H., LI, V. C., 1999. "Extrusion of ECC-material." in *Proc. Of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 3 (HPFRCC 3)* edited by H. Reinhardt and A. Naaman, Chapman & Hull, p. 203-212.
- SUTHIWARAPIRAK, P., MATSUMOTO, T., KANDA, T., 2002. "Flexural fatigue failure characteristics of an Engineered Cementitious Composite and Polymer Cement Mortars." *Materials, Conc. Struc. Pavements, JSCE*, 57(718), p. 121-134.
- SAHMARAN, M., LACHEMI, M., ve LI, V. C., 2009. "Assessing the Durability of Engineered Cementitious Composites (ECC) under Freezing and Thawing Cycles," *Journal of ASTM International*, 6(7), p. 297-304.
- SAHMARAN, M., LI, V. C., 2007. "De-icing Salt Scaling Resistance of Mechanically Loaded Engineered Cementitious Composites", *Cement and Concrete Research*, 37(7), p. 1035-1046.
- SAHMARAN, M., LI, V. C., 2008. "Durability of mechanically loaded Engineered Cementitious Composites under high alkaline environment", *Cement and Concrete Composites*, 30(2), p. 72-81.
- SAHMARAN, M., LI, M., LI, V. C., 2007. "Transport properties of Engineered Cementitious Composites under chloride exposure." In print, *ACI Materials Journal*, 104(6), p. 604-611.
- SAHMARAN, M. ve LI, V. C., 2009. "Influence of Microcracking on Water Absorption and Sorptivity of ECC," *RILEM-Journal of Materials and Structures*, 42(5), p. 593-603.
- TAYLOR, H. F. W., *Cement Chemistry*, Academic Press (2nd Ed), London, 1997.

- TSIVILIS, S., CHANIOTAKIS, E., BADOGIANNIS E., PAHOULAS G., ILIAS A., 1999. "A study on the parameters affecting the properties of Portland limestone cements", *Cement and concrete composites*, 21(2), p 107–116.
- TUUTTI, K., 1982. "Corrosion of steel in concrete," CBI Swedish Cement and Concrete Research Institute, S-100 44, Stockholm, p. 159.
- VIKAN, H., and JUSTNES, H., 2007. "Rheology of cementitious paste with silica fume or limestone". *Cement and Concrete Research*, 37(11), p. 1512-1517.
- VUK, T., TINTA, V., GABROVEK, R., KAUI, V., 2001. "The effects of limestone addition, clinker type and fineness on properties of Portland cement", *Cement and Concrete Research*, 31(1), p. 135–139.
- WEIMANN, M. B., LI, V. C., 2003. "Hygral behavior of engineered cementitious composites (ECC)." *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, 9(5), p. 513-534.
- WEISS, W. J., SHAH, S. P., 2002. "Restrained shrinkage cracking: the role of shrinkage reducing admixtures and specimen geometry." *Materials and Structures*, 35(246), p. 85-91.
- WITTMANN, F. H., 2002. "Crack formation and fracture energy of normal and high strength concrete." *Sadhana*, 27(4), p. 413-423.
- YAHIA, A., TANUMIRA, M., and SHIMOYAMA, Y., 2005. "Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio". *Cement and Concrete Research*, 35(3), p 532-539.
- ZHANG, J., LI, V. C., 2002. "Monotonic and fatigue performance in bending of fiber reinforced Engineered Cementitious Composite in overlay system." *Cement and Concrete Research*, 32(3), p. 415-423.
- VI. Beş Yıllık Plan,1992. ÖİK Yapı Endüstrisi Hammaddeleri Alt Komisyon Raporu.

ÖZGEÇMİŞ

Batman'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Batman'da tamamladıktan sonra 2004 yılında Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünü kazandı. 2009 yılında aynı üniversitede Yüksek Lisans eğitimine başladı. Y. Lisans eğitiminde MAG 108M495 no'lu TÜBİTAK projesinde araştırmacı görevli olarak yaklaşık bir sene bilfiil görev aldı. Ağustos 2010'da Harran Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne araştırma görevlisi olarak atandı ve yüksek lisans eğitimine de bu üniversitede devam etti. Halen aynı üniversitede araştırma görevlisi olarak hizmet vermektedir. Çalışma alanları; yapı malzemeleri ve inovasyon betonları (kompozitleri) kapsamaktadır.

ÖZET

Yükek Performanslı Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitlerin yeni bir türü olan Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (ECC), ağır yüklemeye altında yüksek hasar toleransı ve normal servis şartlarında yüksek dayanıklılık göstermesi için mikro-mekanik olarak tasarlanmış sünek lif donatılı çimento esaslı kompozitlerdir. ECC'yi geleneksel ve lif donatılı betondan ayıran en önemli özelliği, karışımına göre %3 ile %5 arasında değişen çekme şekil değiştirme kapasitesidir. Bu kapasite normal betonun 300 katından daha fazla şekil değiştirme kapasitesine izin veren çok sıkı aralıklı mikro çatlakların oluşumuyla ilgilidir. Çatlakların oluşumundan sonra daha yüksek yüklemeye taşıyabilen bu çatlaklar, malzemenin sünek metallere benzer şekilde şekil değiştirme sertleşmesi göstermesini sağlar.

ECC'nin geniş ticari alanlarda kullanılmasının önündeki en önemli engel yüksek maliyetidir. ECC üretiminde Portland çimentosunun bir kısmının uçucu kül veya cüruf ile yer değiştirilmesi ve kullanılmakta olan agrega boyut ve miktarının artırılması ile, ECC'nin maliyeti azaltılıp çevreye duyarlılığı artırılabilir. Çünkü bu malzemelerin üretiminde daha az enerjiye ihtiyaç bulunulup üretimleri esnasında çok daha az karbondioksit salınımı gerçekleştirilmektedir.

Bu tezde, şekil değiştirme sertleşmesi gösteren yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin yerel malzemeler ve yüksek oranda endüstriyel yan ürün kullanılmasıyla üretilmesi; reolojik ve mekanik özelliklerinin araştırılması suretiyle yüksek performanslı ve ekonomik kompozit malzemenin geliştirilmesi konusunda çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçları, Tamamen silis kumu ile üretilen ve kontrol karışımı olan M1'e nispeten, KTT kullanım yüzdesinin artması ile ECC karışımlarının genel olarak mekanik özelliklerinin iyileştiğini göstermiştir.

KTT kullanım oranı arttıkça, işlenebilirliğin olumsuz etkilendiği ve başlangıç viskozitesinin arttığı deney sonuçları ile saptanmıştır.

SUMMARY

As a new class of HPFRCC materials, Engineered Cementitious Composites (ECC) is a ductile fiber reinforced cementitious composite micromechanically designed to achieve high damage tolerance under severe loading and high durability under normal service conditions. The most distinctive characteristic separating ECC from conventional concrete and fiber reinforced concrete (FRC) is an ultimate tensile strain capacity between 3% to 5%, depending on the specific ECC mixture. This strain capacity is realized through the formation of many closely spaced microcracks, allowing for a strain capacity over 300 times that of normal concrete. These cracks, which carry increasing load after formation, allow the material to exhibit strain hardening, similar to many ductile metals.

The relative high cost remains an obstacle for wider commercial use of ECC. The replacement of Portland cement by fly ash and slag, and an increase in the amount and size of aggregate used in ECC production can lower its cost and enhance its greenness of composites, since the production of these materials needs less energy and causes less carbon dioxide emission than cement.

This thesis includes production of high performance fiber reinforced engineered cementitious composites composed of local materials and high volume industrial by products and investigation of their rheological and mechanical properties.

Test results show that, in general, ECC mixtures produced with LSP has exhibited better desired mechanical properties compared to control mixtures of M1 of 100% SS.

It was observed from test results that increase in LSP content results in less workable fresh paste and higher viscosity.