

NANO SİLİKA KÜR UYGULAMASININ ÇİMENTO BAĞLAYICILI KOMPOZİTLERİN DONMA-ÇÖZÜLME DİRENCİ ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Arife AKIN¹ (ORCID: 0000-0002-7675-7769)*

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye

Geliş / Received: 06.05.2019

Kabul / Accepted: 05.07.2019

ÖZ

Bu çalışmada nano silica solüsyonunda kür etkisine maruz bırakılan çimento bağlayıcılı kompozitlerin (ECC), donma-çözülme döngüleri gibi ağır çevresel koşullar altında gösterdikleri direnç araştırılmıştır. Bu amaçla iki farklı tip uçucu kül iki farklı oranda kullanılarak dört farklı karışım olarak hazırlanan ECC numuneleri, ASTM C666 Prosedür A'ya uygun olarak 300 donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılmıştır. Numunelerin mekanik özelliklerindeki değişimler basınç ve eğilme testleri ile, fiziksel özelliklerindeki değişimler ise, 30 çevrimde bir ağırlıklarının ölçülmesi ile belirlenmiştir. Çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar, çimento bağlayıcılı kompozitlerde nano silica (NS) kür uygulamasının, zorlayıcı çevresel koşullar altında numunelerin dayanım ve dayanıklılık gibi özelliklerinde suda kür uygulamasına göre kayda değer artışlar sergilediğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Çimento bağlayıcılı kompozitler, donma-çözülme etkileri, uçucu kül, mekanik ve fiziksel özellikler

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF NANO-SILICA CURING ON THE FREEZE-THAW RESISTANCE OF CEMENTITIOUS COMPOSITES

ABSTRACT

In this study, the resistance of cementitious composites (ECC) exposed to the curing effect in nano-silica solution under heavy environmental conditions such as freeze-thaw cycles is investigated. For this purpose, ECC samples prepared as four different mixtures using two different types of fly ash in two different ratios were subjected to 300 freeze-thaw cycles in accordance with ASTM C666 Procedure A. The changes in the mechanical properties of the samples were tested with compressive and bending tests, changes in the physical properties of the samples were determined by measuring their weights in every 30 cycles. The results of the study showed that nano-silica curing in cementitious composites exhibit remarkable increases in the properties such as strength and durability of the samples even under challenging environmental conditions compared to water curing.

Keywords: Cementitious composites, freeze-thaw effects, flyash, mechanical and physical properties

1. GİRİŞ

Yapılar servis süreleri boyunca olumsuz çevre koşullarıyla sürekli yüz yüze gelirler. Bu çevresel etkilerden öncelikle dış ortama açık olan elemanların yüzeyleri etkilenir ve zamanla zararlı etkiler elemanların iç

* Corresponding author/Sorumlu yazar, Tel.:+90 332 223 22 56; e-mail/e-posta: aakin@ktun.edu.tr

A. AKIN

kısımlarına doğru ilerleyerek yapıların servis ömrü tamamlanmadan kısa süre içerisinde özelliklerini kaybetmesine neden olur. Yapım maliyeti yüksek, sürekli kullanımda olması gereken ya da toprak altında kalmış yapılarda meydana gelmiş çevresel bozulmalar nedeniyle bunların onarımlarının yapılması önemli ekonomik kayıplara sebep olmakta, aynı zamanda onarım süresince hizmete kapanması büyük aksaklıkların yaşanmasına neden olmaktadır. Donma-çözülme (D-Ç), özellikle geniş dış yüzey alanına sahip yapılar üzerinde etkili, ağır çevresel yıpratıcı etkilerden biridir. İklim koşullarına bağlı olarak birçok yapı hizmet ömrü boyunca çok kez (D-Ç) döngüsüyle zorlanmaktadır.

ECC, tasarımı mikro mekanik tabanlı prensiplere dayanan, yüksek performanslı lif donatılı çimento bağlayıcılı kompozitlerin özel bir türüdür [1-9]. ECC malzemesinin sahip olduğu üstün mekanik ve durabilite özellikleri mikro mekanik tabanlı tasarımına dayanmaktadır. Genellikle bileşiminde yüksek hacimlerde puzolanik atık malzeme kullanılarak çimento miktarı azaltılmakta, bu sayede çimento üretimi sırasında havaya salınan CO₂ miktarı azaltılabilmekte, aynı zamanda atık bir malzeme endüstriye kazandırılarak hem çevresel hem ekonomik kazançlar elde edilebilmektedir. ECC üretimi sırasında kullanılan diğer bileşenler genellikle, Portland çimentosu, quartz kumu, su, yüksek performanslı lifler ve yüksek oranda su azaltıcı katkı maddeleridir. Geleneksel betondan farklı olarak bileşiminde iri agrega tercih edilmemekte, böylece iri agreganın sebep olabileceği iç yapı düzensizlikleri ve agrega- matris arasındaki aderans zayıflıklarının önüne geçilebilmektedir. Li (2002) tarafından geliştirilen ECC, geleneksel betona ve liflerle güçlendirilmiş betonlara yakın bir kompozisyona sahip olmakla birlikte, süneklik özellikleri oldukça farklıdır [10]. Geleneksel beton son derece gevrek bir malzemedir, çekmede birim şekil değiştirme kapasitesi %0.01 seviyelerindedir. Yalın beton ve lifli betonlarda ilk çatlak oluşumundan sonra yük artışı olmadan çatlak genişleyerek deformasyon yumuşaması olurken, yüksek performanslı lif içeren çimento bağlayıcılı kompozitler deformasyon sertleşmesi davranışı gösteren malzemelerdir. Deformasyon sertleşmesi davranışı, kompozitin çoklu çatlak davranışı gösterme potansiyelidir. Genellikle çatlak genişlikleri 100 µm'nin altındadır[11]. Son yıllarda araştırmacılar tarafından farklı özelliklerdeki çimento bağlayıcılı kompozitlerin mekanik ve durabilite özelliklerinin araştırılmasına yönelik çok sayıda çalışma yapılmıştır[12-18]. Bu çalışmalarda genel olarak, matris içerisinde kullanılan farklı özellik ve miktarlarda mineral katkıların, nano partiküllerin, lif özelliklerinin kompozitin mekanik, durabilite gibi özelliklerine etkileri araştırılmıştır.

Teknolojinin hızlı bir şekilde ilerlemesi, her alanda önemli gelişmelerin yaşanmasına neden olmaktadır. Nano teknoloji alanındaki gelişmeler sayesinde nano boyutlardaki maddeler beton veya çelik gibi malzemelerle karıştırılarak yüksek performansa sahip yapı malzemeleri elde edilebilmektedir. Nano partiküllerin kullanımı ile malzemelerin dayanım, durabilite, işlenebilirlik gibi özelliklerinin iyileştirilmesi mümkün olabilmektedir [19-21]. Nano malzemelerin önemini ve betonun özelliklerine etkilerini anlamak son dönemlerde araştırmacılar arasında oldukça ilgi çekicidir. Bu araştırmaların bir kısmında çimento esaslı kompozitlerin tasarlanmasında nano boyutta modifiye edilmiş SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃, CaCO₃ ve karbon nanotüp gibi malzemeler kullanılmıştır [22-25]. Yapılan deneysel çalışmalarda genellikle nano parçacıklar bağlayıcının belirli bir yüzdesi ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Çalışmalar neticesinde nano malzemelerin, betonun ya da özel bir beton çeşidi olan çimento bağlayıcılı kompozitlerin basınç, eğilmede çekme, yarmada çekme gibi mekanik özelliklerinde ve su emme, su geçirimsizliği, donma-çözülme tekrarları gibi durabilite özelliklerindeki iyileşmelerde etkili olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak kolloid nano silika (bu çalışmada %2'lik nano silika çözeltisi) matris içerisinde bir bileşen olarak değil, yalın suya alternatif olarak kür aşamasında uygulanmış, deneysel çalışmalar neticesinde nano silikanın ECC malzemelerinin donma-çözülme etkileri altında davranışlarına etkisi araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1.Malzeme Özellikleri

Deneysel çalışmalar kapsamında ASTM C618'e göre F ve C sınıfı olarak ayrılan iki farklı karakterde uçucu kül(UK), iki farklı oranda kullanılarak 4 farklı çimento bağlayıcılı kompozit (ECC) üretilmiştir. F sınıfı küller, toplam SiO₂+ Al₂O₃+ Fe₂O₃ miktarı %70'den fazla, CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli, C sınıfı küller SiO₂+ Al₂O₃+ Fe₂O₃ miktarı %50'den fazla, CaO> %10 olduğu için yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. Farklı karışımlarda kullanılan ortak bileşenler, CEM I 42.5R (PÇ), quartz kumu (S), polivinil alkol lif (PVA), süperakışkanlaştırıcı (SA) ve sudur. Tablo 1'de karışımlarda kullanılan çimento, uçucu küller ve kumun kimyasal ve fiziksel özellikleri, Tablo 2'de ise, kullanılan PVA lifinin mekanik ve geometrik özellikleri verilmiştir. ECC karışımlarının hazırlanmasında F ve C sınıfı uçucu küller (UK/PÇ=1.2 ve 2.2) iki farklı oranda kullanılmıştır. F sınıfı uçucu kül Zonguldak-Çatalağzı Termik Santrali'nden, C sınıfı uçucu kül ise Manisa-Soma Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı, BASF

NANO SİLİKA KÜR UYGULAMASININ ÇİMENTO BAĞLAYICILI KOMPOZİTLERİN DONMA DİRENCİ ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Yapı Kimyasalları tarafından Glenium 51 ismi ile üretilen, özgül ağırlığı yaklaşık 1.1, katı madde içeriği %40 olan akrilik esaslı polikarboksilik eter tipi yüksek oranda su azaltıcı bir katkı malzemesidir. Çalışmada ECC üretiminde agrega olarak, ülkemizin yerel kaynaklarından elde edilmiş maksimum tane büyüklüğü 400 µm olan ince kuvars kumu, toplam bağlayıcının %36'sı oranında kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan PVA lifleri, matris (lifsiz ECC) ve lif arasında yer alan arayüzde noptimum özelliklerin elde edilebilmesi için ağırlıkça %1.2 oranında özel bir hidrofobik (su itici) yağ ile kaplanmıştır. ECC numunelerinin kürü aşamasında kullanılan NS solüsyonu(%2), BİYOTEZ Mak. Kimya Ar-Ge ve Danışmanlık Firması tarafından üretilen %30 katı parçacık içeren solüsyondur. Tane büyüklüğü dağılımı 10-20 nm arasında değişmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan %2'lik nano silika çözeltisi, hazır olarak %30 konsantrasyon değerine sahip solüsyonun su ile seyreltilmesi ile elde edilmiştir.

Tablo 1. Karışımlarda kullanılan çimento, uçucu küller ve kumun özellikleri

Kimyasal Bileşimi(%)	PÇ	UK (F)	UK (C)	S
SiO ₂	20.8	58.75	42.82	99.79
Al ₂ O ₃	5.42	25.24	20.82	0.06
Fe ₂ O ₃	2.98	5.76	4.57	0.02
S+A+F	29.2	89.75	68.21	99.87
CaO	61.53	1.46	23.45	0.02
MgO	2.39	2.22	1.74	0.01
SO ₃	2.4	0.08	1.47	-
K ₂ O	0.75	4.05	1.31	0.01
Na ₂ O	0.21	0.60	0.32	0.02
Fiziksel Özellikleri				
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3.06	2	2.27	2.6
İncelik (cm ² /g)	3250	2900	3060	

Tablo 2. ECC üretiminde kullanılan PVA lifinin mekanik ve geometrik özellikleri

Lif Türü	Nominal Dayanım (MPa)	Görünen Dayanım (MPa)	Çap (µm)	Boy (mm)	Elastisite Modülü (GPa)	Kopma-Uzama oranı (%)	Özgül Ağırlık
PVA	1620	1092	39	8	42.8	6.0	1.3

2.2.ECC karışımlarının hazırlanması

Tüm karışımların hazırlanmasında 25 lt. kapasiteli planet tipi mikser kullanılmıştır. Öncelikle kuru malzemeler (çimento, uçucu kül ve kum) 100 devir/dak. hızda 1 dak. karıştırılmıştır. Ardından su eklenerek 150 devir/dak. hızda 1 dak., SA eklenerek aynı hızda 2 dak. daha karıştırılmış, son olarak PVA lifleri karışıma eklenmiş ve 150 devir/dak. hızda 1 dak., ilave olarak 300 devir/dak. hızda 3 dak. karıştırılarak karıştırma işlemi tamamlanmıştır. Aynı gün içerisinde hazırlanan karışımlar 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik kalıplara yerleştirilmiştir. 1 gün boyunca üzerleri örtülü bir şekilde kalıplarında bekletilen numuneler, ertesi gün kalıptan çıkarılarak yarısı su içerisinde, yarısı ise %2 nano silika çözeltisi içerisinde küre bırakılmıştır. Hazırlanan ECC numunelerine (D-Ç) döngüsü ASTM C666'ya uygun olarak üretimi izleyen 14. günde uygulanmaya başlanmıştır. Tablo 3'de hazırlanan ECC numunelerine ait malzeme karışım oranları verilmiştir.

Tablo 3. ECC karışımlarında kullanılan malzeme oranları

Karışım Oranları	ECC-F1.2	ECC-F2.2	ECC-C1.2	ECC-C2.2
Çimento(PÇ)	1	1	1	1
(UK-F)/PÇ	1.2	2.2	-	-
(UK-C)/PÇ	-	-	1.2	2.2
Su/(UK+PÇ)	0.32	0.32	0.32	0.32
Kum/(UK+PÇ)	0.36	0.36	0.36	0.36
SA (kg/m ³)	4	3.8	11.5	12
PVA Lif (Hacim,%)	2	2	2	2

A. AKIN

2.3. Deney Yöntemi

Çalışmada gerçekleştirilen deneyler kapsamında uçucu külün tipi ve miktarına bağlı olarak dört ECC karışımı hazırlanmıştır. 40x40x160 mm boyutlarında giriş numuneleri olarak hazırlanan karışımlar üretilen 13 gün boyunca yarısı %2'lik NS solüsyonunda yarısı ise sadece su içerisinde kür koşullarına bırakılmıştır. Numunelerine ağırlıkları, eğilme ve basınç dayanımları en az üç numune ortalaması alınarak belirlenmiştir. 14. günde her karışımdan altı adet numuneye (3 adedi NS solüsyonunda, 3 adedi suda kür edilen) önce üç noktalı eğilme deneyi, ardından aynı numunelerin hasarsız kısımlarına 40x40 mm basınç başlığı kullanılarak basınç deneyi uygulanmış, böylece (D-Ç) öncesi mekanik özellikleri belirlenmiştir. Her karışımdan altı adet numunenin ise ağırlıkları belirlenerek 300 (D-Ç) döngüsü uygulanmıştır. (D-Ç) çevrimleri sıcaklığın +4 ile -18 °C arasında kademeli olarak değişimi ile gerçekleştirilmiştir. +4 °C'den -18 °C'ye donma ve -18 °C'den +4 °C'ye çözülme bir döngü olmak üzere 24 saat içerisinde en fazla 5-6 döngü gerçekleşecek şekilde çevrimler uygulanmıştır. 300 (D-Ç) çevrimi boyunca her 30 çevrim sonrasında numunelerin ağırlıkları tartularak kütle kayıpları belirlenmiştir. 300 çevrim sonrasında (D-Ç) kabininden çıkarılan numuneler, basınç ve üç noktalı eğilme yüklemeleri altında teste tabi tutularak (D-Ç) öncesi ve (D-Ç) sonrası dayanımlarında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Altışar adet numune ise, herhangi bir işlem yapılmadan 300 (D-Ç) çevrimi süresince 3 adedi su içerisinde 3 adedi NS solüsyonu içerisinde kürde bırakılmış (yaklaşık 13+50 gün), ardından eğilme ve basınç deneyleri ile (D-Ç) uygulanmamış numunelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. (D-Ç) uygulanmamış ve uygulanmış numunelerin dayanımları karşılaştırılarak aynı yaştaki numunelerin dayanımlarındaki azalmalar incelenmiştir.

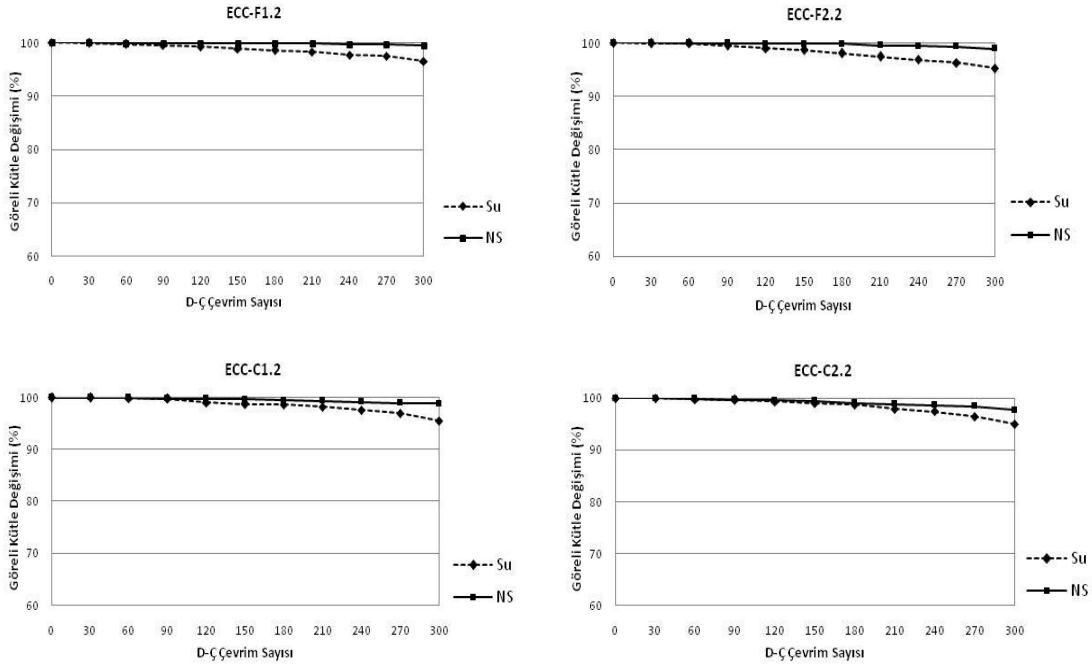
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma ile NS solüsyonunda kür uygulanmış çimento bağlayıcı kompozitlerde mekanik özelliklerin değişimi ve (D-Ç) döngüleri etkisinde fiziksel özelliklerindeki değişimler incelenmiştir.

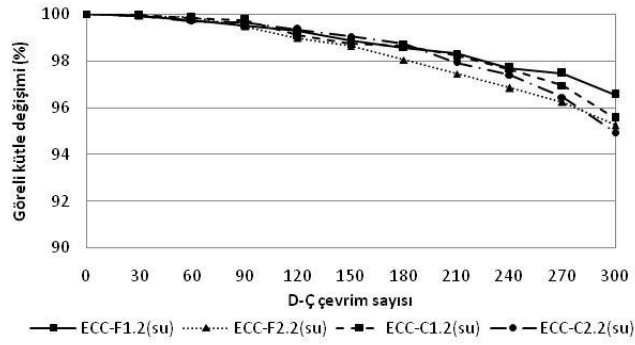
Şekil 1'de NS solüsyonu veya sadece su içerisinde başlangıç kür koşulları uygulanan 4 farklı ECC karışımı için her 30 çevrimde ölçülen ağırlıkların başlangıç ağırlıklarına göre kütle değişim yüzdeleri grafik olarak verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi 13 günlük NS solüsyonunda başlangıç kürü etkisiyle, ECC numunelerinin (D-Ç) döngüleri altında ağırlık değerlerindeki kayıplar su içerisinde kür yöntemine göre daha az çıkmıştır. Bunun sebebi, nano silikanın yüksek reaktivitesi ve özgül yüzey alanı sayesinde, çimentonun hidratasyonunu hızlandırması ve hidratasyonun erken yaşlarda hızlı bir şekilde gelişmesinin (D-Ç) etkisi altındaki numunelerin ağırlık kayıpları üzerinde önemli bir etkiye sahip olması ile açıklanabilir.

Şekil 2'de su da kür edilen, Şekil 3'de ise NS solüsyonu içerisinde kür edilen tüm ECC numunelerinin göreceli kütle değişim yüzdesi değerlerinin karşılaştırması verilmiştir. Şekiller incelendiğinde 300 (D-Ç) çevrimi sonucunda maksimum ağırlık kaybının ECC-C2.2 numunelerinde olduğu görülmektedir. C sınıfı külün inceliğinin fazla olması nedeniyle, F sınıfı küle göre filler (doldurma) etkisinin daha fazla olacağı, bu durumda C sınıfı külün özellikle geçirimsizliğin önemli olduğu yapılarda tercih edilebileceği düşünülebilir. Fakat geçirimsizlik açısından külün inceliğinin yanısıra minerolojik ve kristal yapısı da etkili olmaktadır. F sınıfı küllerin C sınıfı küllere göre daha düzgün yüzeyli küresel tanelerden oluşması işlenebilirliği olumlu yönde etkilemektedirler. Karışımların hazırlanmasında C sınıfı külün işlenebilirliği olumsuz etkilemesi sebebiyle süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi F sınıfı kül içeren karışımlara göre daha fazla kullanılmıştır. Hem süperakışkanlaştırıcı katkının daha az kullanılması, hem de küresel yapılı tane hacminin fazla olması sebebiyle karışımın daha homojen yapıya sahip olması F sınıfı kül içeren ECC numunelerinin daha geçirimsiz olmasını, bu sayede (D-Ç) gibi çevresel etkilere karşı daha dayanıklı olmalarını sağlamıştır.

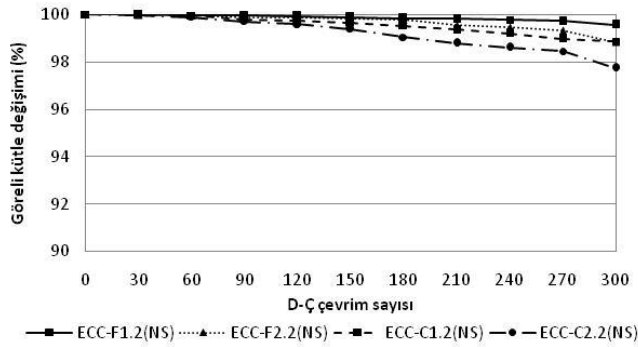
NANO SİLİKA KÜR UYGULAMASININ ÇİMENTO BAĞLAYICILI KOMPOZİTLERİN DONMA DİRENCİ ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI



Şekil 1.ECC numunelerinin her 30 (D-Ç) çevriminde görel kütle değişimleri



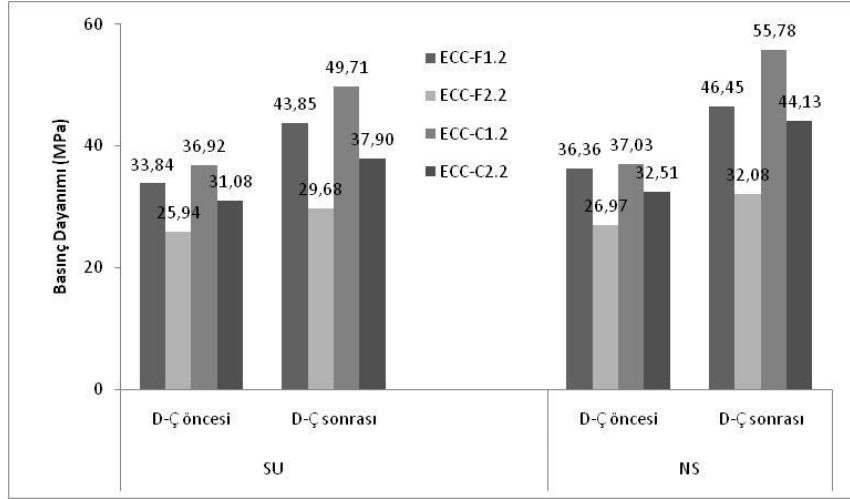
Şekil 2. Suda kür edilen ECC numunelerin görel kütle değişimleri



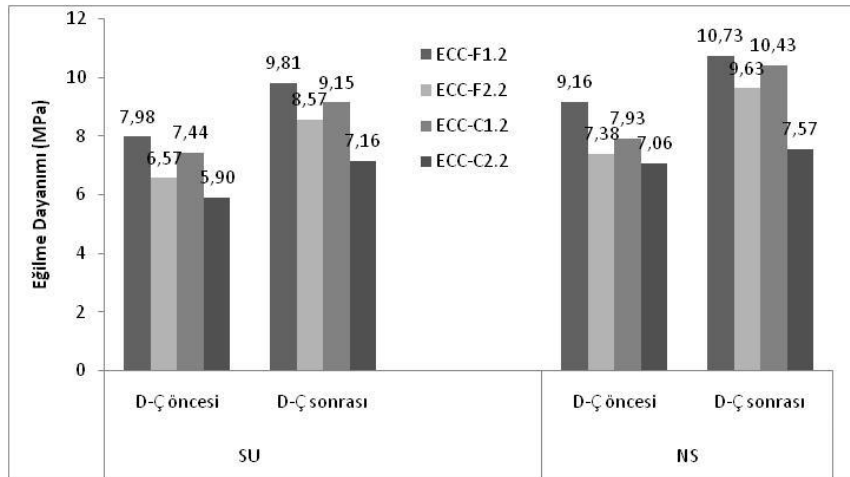
Şekil 3.NS solüsyonunda kür edilen ECC numunelerin görel kütle değişimleri

A. AKIN

13 günlük kür koşulundan (su ya da NS solüsyonu) çıkarılan numunelerin (D-Ç) sonrası hem basınç hem de eğilme dayanımlarında artışlar olmuştur. Bu sonuç, numunelerin ilerleyen yaşlarda olumsuz çevre koşullarına rağmen hidrasyon reaksiyonlarının devam ettiğini göstermektedir. Hem su içerisinde kür edilen, hem de NS içerisinde kür edilen numunelerde maksimum artışlar ECC-C1.2 numunelerinde olmuştur. Su içerisinde kür edilen ECC-C1.2 numunesinde dayanımdaki artış %35 iken NS solüsyonu içerisinde kür edilen ECC-C1.2 numunelerinde artış %51 olmuştur (Şekil 4). Eğilme dayanımında maksimum artış gösteren numune ise su içerisinde kür edilenler arasında ECC-F2.2 numunesi (%30 artış), NS solüsyonu içerisinde kür edilen numunelerden ise ECC-C1.2 numunesi (%31 artış) olmuştur (Şekil 5).



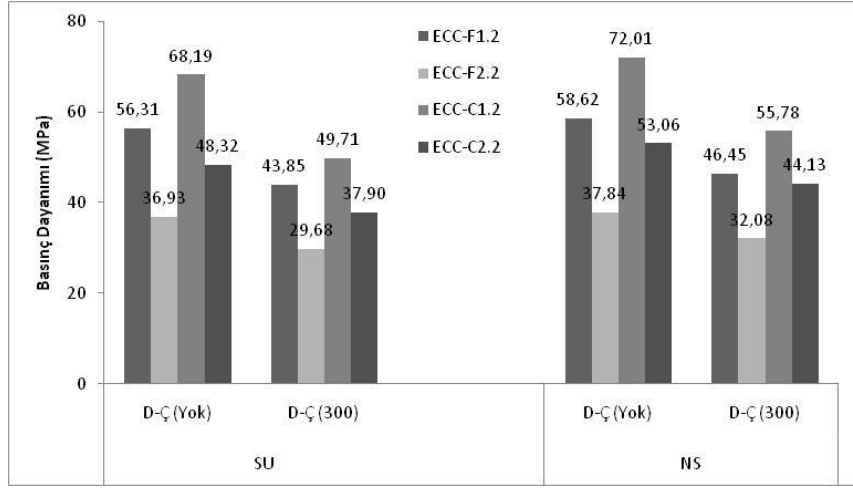
Şekil 4. ECC numunelerinin (D-Ç) öncesi ve sonrası basınç dayanımları



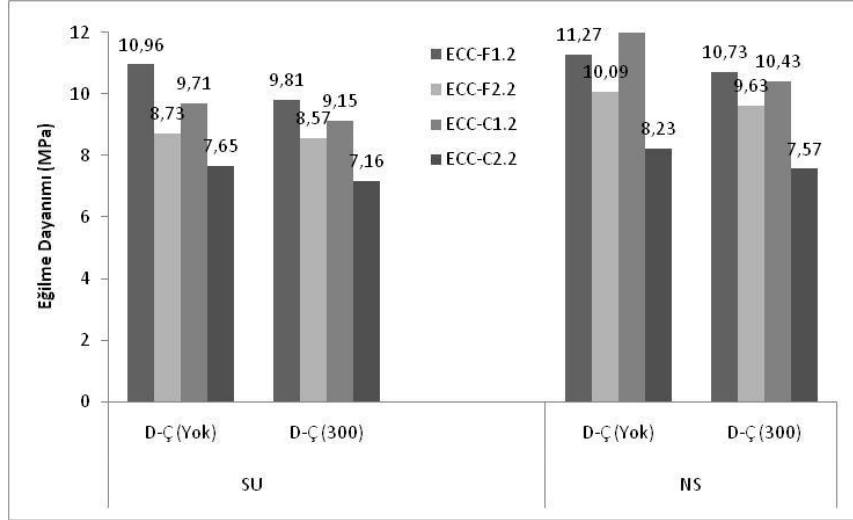
Şekil 5. ECC numunelerinin (D-Ç) öncesi ve sonrası eğilme dayanımları

(D-Ç) etkisiyle numunelerde oluşan dayanım kayıplarını görebilmek için, aynı yaştaki (13 gün başlangıç kür süresi+300 D-Ç çevrimi) (D-Ç) uygulanmadan su veya NS kürü içerisinde bekletilen numunelere de eğilme ve basınç deneyleri uygulanmış ve (D-Ç) çevrimi uygulanan numunelerin dayanım değerleriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 6-7). Şekiller incelendiğinde aynı yaştaki (D-Ç) uygulanmayan numunelerin dayanımlarının, (D-Ç) uygulanan numunelere göre daha yüksek çıktığı görülmektedir. Şekil 6'dan basınç dayanımlarında maksimum azalmanın ECC-C1.2 numunelerinde ve suda kür uygulanmasıyla %27, NS solüsyonu ile kür uygulanmasıyla ise azalmanın yaklaşık %22,5 olduğu görülmüştür. Eğilme dayanımlarında ise maksimum azalmanın su içerisinde kür edilen numunelerden ECC-F1.2 numunelerinde yaklaşık %10,5, NS solüsyonu içerisinde kür edilen numunelerde ise ECC-C1.2 numunelerinde %13,15 olduğu ölçülmüştür.

NANO SİLİKA KÜR UYGULAMASININ ÇİMENTO BAĞLAYICILI KOMPOZİTLERİN DONMA DİRENCİ ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI



Şekil 6.(D-Ç) uygulanan ve uygulanmayan ECC numunelerinin basınç dayanımları



Şekil 7. (D-Ç) uygulanan ve uygulanmayan ECC numunelerinin eğilme dayanımları

4. SONUÇLAR

Bu deneysel çalışmanın temel hedefi, farklı kür koşullarının (nano silika solüsyonu veya sadece su) farklı özelliklerde ve farklı miktarlarda uçucu küller içeren çimento bağlayıcılı kompozitlerin donma-çözülme döngüleri altında mekanik ve fiziksel özelliklerindeki değişimleri araştırmaktır. Deneyler neticesinde, aşağıda maddeler halinde sunulan sonuçlar elde edilmiştir.

- Nano silika kür uygulamasının su kürüne göre, özellikle hidrasyon olayının en hızlı gerçekleştiği ilk günlerde numunelerin mekanik özelliklerinin gelişmesinde etkili olduğu görülmüştür. Bu sonuç, nano silikanın aktif yüzey alanı genişliğinin ve üstün puzolanik özelliğinin kimyasal reaksiyonların daha hızlı ve etkili oluşmasında etkili rol oynadığını göstermektedir.
- Karışımların hazırlanmasında mineral katkı olarak kullanılan uçucu küllerin kompozitlerin (D-Ç) öncesi ve sonrası mekanik özelliklerinde ve (D-Ç) süresince ağırlık kayıplarında etkili olduğu görülmüştür. C sınıfı uçucu küller F sınıfı küllere göre daha ince taneli yapıya sahiptir. Bu özelliği sayesinde karışımdaki ince taneli malzemelerin yüzey alanlarının artmasına sebep olmaktadır. Fakat tane şeklinin köşeli olması mineralojik ve kristal yapıları, taze betonun işlenebilirliğini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle, F sınıfı uçucu kül içeren karışımlarda lifler matris içerisine daha homojen dağıtılabilmiş, aynı zamanda numuneler daha boşluksuz üretilebilmiştir. Her ne

A. AKIN

kadar en yüksek basınç dayanımları ECC-C1.2 numunelerinden elde edilmiş olsa da, basınç dayanımlarındaki maksimum düşüşlerde bu numunelerde gözlemlenmiştir. Buna göre hem mekanik hem de durabilite özellikleri açısından ECC malzemesinde mineral katkı olarak F sınıfı küllerin tercih edilmesi gerektiği düşünülmektedir.

- Karışımlarda yüksek hacimده uçucu kül kullanılması, numunelerin (D-Ç) çevrimleri süresince ağırlık kayıplarını etkilemiştir. Su ve NS solüsyonu içerisinde kür edilen numunelerde maksimum ağırlık kayıpları ECC-C2.2 numunelerinde olmuştur. ECC-F2.2 numunelerinin ağırlıklarındaki azalmalar da ECC-F1.2 numunelerine göre daha fazla olmuştur. Bunun nedeninin uçucu küllerin çimentoya göre çimentolaşma sürecinin daha uzun sürmesi olduğu düşünülmektedir.
- Genel olarak, deneysel çalışmalar neticesinde çimento bağlayıcı kompozitlerin teşkilinde kullanılan mineral katkıların, özelliklerinin ve miktarlarının sonuçlar üzerinde etkili olduğu görülmesine rağmen, ECC malzemesinin geleneksel betona ya da lifli betonlara göre (D-Ç) gibi ağır yıpratıcı etkiler altında mineral katkı türü ve miktarından bağımsız olarak numunelerin mekanik özelliklerinde ve ağırlıklarında önemli düşüşler olmadan direnç gösterebildikleri anlaşılmaktadır. Araştırmacılar tarafından üstün mekanik ve durabilite özellikleri açısından ilgi odağı haline gelen ECC'nin uygulamada hizmet ömrü uzun, üretim maliyeti yüksek özellikle yıpratıcı çevresel etkilere maruz kalabilecek yapılarda tercih edilebilir bir malzeme olduğu düşünülmektedir.
- Literatürdeki pek çok çalışmadan farklı olarak nano teknolojinin beton üretiminde kür aşamasında kullanılmasının etkinliğini araştıran bu çalışma sonucunda, benzer konularda daha fazla sayıda çalışmanın yapılması gerektiği, bu sayede nano teknolojiye yararlanan kuruluşların artması ile bu teknolojinin ülke ekonomisine katkıda bulunan aktif bir pazara sahip olabileceği düşünülmektedir. Bunun yanı sıra nano malzemelerin davranışının daha iyi anlaşılması ile olası olumsuz etkileri de anlaşılabilir.

TEŞEKKÜR

Yazar bu çalışmanın gerçekleşmesinde sağladığı finansal kaynaktan ötürü TÜBİTAK' a teşekkürlerini sunar.
Proje No: 116M003

KAYNAKLAR

- [1] LI, V.C., "ECC-tailored composites through micromechanical modeling", To appear in Fiber reinforced concrete: present and the future, CSCE, Canada, 1-38, 1997.
- [2] LI, V.C., WANG, S., WU, C., "Tensile strain-hardening behavior of PVA-ECC", ACI Mater J, 98,483-92, 2001.
- [3] LI, V.C., "On engineered cementitious composites (ECCs) – A review of the material and its applications", Journal of Adv Concr Technol, 1(3), 215-230, 2003.
- [4] ŞAHMARAN, M., LI, V.C., "De-icing salt scaling resistance of mechanically loaded engineered cementitious composites", Cem Concr Res, 37, 1035-1046, 2007.
- [5] LI, M., ŞAHMARAN, M., LI, V.C., "Effect of cracking and healing on durability of engineered cementitious composites under marine environment", High performance fiber reinforced cement composites (HPFRCC-5), Mainz, Germany, 2007.
- [6] ŞAHMARAN, M., LI, V.C., LI, M., "Transport properties of engineered cementitious composites under chloride exposure", ACI Mater J, 104, 604-611, 2007.
- [7] ŞAHMARAN, M., LI, V.C., "Durability of mechanically loaded engineered cementitious composites under high alkaline environment", Cem Concr Comps, 30, 72-81, 2008.
- [8] ŞAHMARAN, M., LI, V.C., ANDRADE, C., "Corrosion resistance performance of steel reinforced engineered cementitious composite beams", ACI Mater J, 105, 243-250, 2008.
- [9] ŞAHMARAN, M., LI, V.C., "Influence of microcracking on water absorption and sorptivity of ECC", Mater Struct, 42, 593-603, 2009.
- [10] LI, V. C., "Reflections on the research and development of engineered cementitious composites (ECC)", Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC)- Application and Evaluation, 2002.

NANO SİLİKA KÜR UYGULAMASININ ÇİMENTO BAĞLAYICILI KOMPOZİTLERİN DONMA DİRENCİ ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

- [11] ŞAHMARAN, M., YILDIRIM, G., ERDEM, T.K., “Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials”, *Cement Concrete Composites*, 35, 89-101, 2013.
- [12] GARCIA CALVO, J. L., PEREZ, G., CARBALLOSA, P., ERKIZIA, E., GAITERO J. J., GUERRERO, A., “Development of ultra-high performance concretes with self-healing micro/nano-additions”, *Construction and Building Materials*, 138, 306-315, 2017.
- [13] BERRA, M., CARASSİTÌ, F., MANGIÀLARDÌ, T., PAOLİNÌ, A. E., SEBASTIANÌ, M., “Effects of nano silica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes”, *Construction and Building Materials*, 35, 666-675, 2012.
- [14] GIVI A, N., RASHID, S. A., AZIZ, F. N. A., SALLEH, M. A. M., “The effects of lime solution on the properties of SiO₂ nano particles binary blended concrete”, *Composites: Part B*, 42, 562-569.
- [15] YEŞİLMEN, S., AL-NAJJAR, Y., BALAV, M. H., ŞAHMARAN, M., YILDIRIM, G., LACHEMİ, M., “Nano-modification to improve the ductility of cementitious composites”, *Cem. Concr. Res.*, 76, 170-179, 2015.
- [16] BENTZ, D.P., SALO, T., DE LA VARGA, I., WEISS, W.J., “Fine limestone additions to regulate setting in high volume flyash mixtures”, *Cem. Concr. Compos.*, 34, 11-17, 2012.
- [17] AKKAYA, Y., PELED, A., SHAH, S.P., “Parameters related to fiber length and processing in cementitious composites”, *Mater. Struct.*, 33, 515-524, 2000.
- [18] FELEKOĞLU B., FELEKOĞLU K. T., KESKİNATEŞ M., GÖDEK E., “A comparative study on the compatibility of PVA and HTPP fibers with various cementitious matrices under flexural loads”, *Construction and Building Materials*, 121, 423-428, 2016.
- [19] COLLEPARDI, M., COLLEPARDI, S., SKARP, U., TROLÌ, R., “Optimization of silicafume, flyash and amorphous nano-silica in superplasticized high-performance concrete”, *ACI Spec. Publ.*, 221, 495-505, 2004.
- [20] GAITERO, J. J., CAMPILLO, I., GUERRERO, A., “Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nano particles”, *Cem. Concr. Res.*, 38(8-9), 1112-1118, 2008.
- [21] KAWASHIMA, S., KIM, J. H., CORR, D. J., SHAH, S. P., “Study of the mechanisms underlying the fresh-state response of cementitious materials modified with nano clays”, *Constr. Build. Mater.*, 36, 749-757, 2012.
- [22] NAZARI, A., RIAHI, S., “The effects of SiO₂ nano particles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete”, *Compos. Part B Eng.*, 42(3), 570-578, 2011.
- [23] JALAL, M., FATHI, M., FARZAD, M., “Effects of flyash and TiO₂ nano particles on rheological, mechanical, micro structural and thermal properties of high strength self compacting concrete”, *Mech. Mater.*, 61, 11-27, 2013.
- [24] MADANDOUST, R., MOHSENI, E., MOUSAVI, S. Y., NAMNEVIS, M., “An experimental investigation on the durability of self compacting mortar containing nano-SiO₂, nano-Fe₂O₃ and nano-CuO”, *Constr. Build. Mater.*, 86, 44-50, 2015.
- [25] HOU, P., KAWASHIMA, S., WANG, K., CORR, D. J., QIAN, J., SHAH, S. P., “Effects of colloidal nano silica on rheological and mechanical properties of flyash-cement mortar”, *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 12-22, 2013.