



Tasarlanmış çimento esaslı kompozit ile uçucu kül ve cüruf esaslı tasarlanmış geopolimer kompozitlerin mekanik ve mikroyapısal özellikleri

Mechanical and microstructural properties of engineered cementitious composite with fly ash and slag-based engineered geopolymer composites

Hatice Öznur Öz¹, Muhammet Güneş^{2,*}

^{1,2} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Öz

Bu çalışmada, literatürde M45 kodu ile bilinen standart tasarlanmış çimento esaslı kompozite (ECC) benzer taşıma gücü ve deformasyon kapasitesine sahip bir uçucu kül+yüksek fırın cürufu (UK+YFC) esaslı tasarlanmış geopolimer kompozit (EGC) karışımının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ECC'nin yanı sıra farklı oranlarda UK ve YFC içeren iki farklı EGC karışımı geliştirilmiştir. Üretilen bu üç karışımın taze ve reolojik özelliklerinin yanı sıra basınç dayanımı, elastisite modülü, hava kurusu birim hacim ağırlığı, yapısal verimliliği, ultrasonik titreşim hızı (UTH), kırılma tokluğu ve eğilme performansı 7. ve 28. günlerde belirlenmiştir. Sonuçta, ECC'den çok daha yüksek basınç dayanımına ve sünekliliğe sahip bir EGC karışımı elde edilmiştir. Ayrıca, artan YFC içeriğinin mekanik dayanımı ve tokluğu artırdığı ancak, sünekliliği azalttığı tespit edilmiştir. Bu durumun nedenleri XRD, TGA/DTA ve FTIR analizleri ile mikroyapısal olarak araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: ECC, EGC, Uçucu kül, Cüruf, Mekanik ve mikroyapısal özellikler

1 Giriş

Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozit (Engineered Cementitious Composite (ECC)), az miktarda süreksiz liflerle (tipik olarak hacimce \leq %2) tasarlanmış yüksek performanslı özel bir harç malzemesidir [1]. 1990'larda geliştirilen ECC, yol, bina, tünel, köprü ve diğer uygulamaların yapımında ve bakımında başarıyla kullanılmaktadır [2]. Şekil değiştirme sertleşmesi özelliğine sahip olan ECC, geleneksel beton ile karşılaştırıldığında %6'ya varan bir çekme şekil değiştirme kapasitesi yanı sıra yaklaşık olarak 600 kat daha yüksek süneklilik sergilemektedir [3, 4]. ECC'nin dikkat çeken özelliği geliştirilmiş süneklilik, tokluk ve kırılma enerjisine yol açan çoklu ince çatlakların (mikro çatlaklar) eşlik ettiği, özellikle çekme ve eğilme altında şekil değiştirme sertleştirme davranışdır [5]. Bu üstün özellikleri elde etmek için, ECC'de kullanılan PVA lifinin varlığı ve içeriğinin yanı sıra kompoziti oluşturan hammaddelerin (çimento, uçucu kül, silis kumu ve silis dumanı) kullanım oranı ve içeriği son derece önemlidir [6]. Ayrıca, ECC'nin matris kırılma

Abstract

In this study, it was aimed to develop a fly ash+blast furnace slag (FA+BFS)-based engineered geopolymer composite (EGC) mixture having similar bearing strength and deformation capacity to the standard engineered cementitious composite (ECC) known with the M45 code in the literature. For this purpose, in addition to ECC, two different EGC mixtures incorporating different ratios of FA and BFS were produced. The compressive strength, modulus of elasticity, air dry unit volume weight, structural efficiency, ultrasonic pulse velocity (UPV), fracture toughness and flexural performance were determined on the 7th and 28th day as well as the fresh and rheological properties of these three mixtures. Finally, an EGC mixture having much higher compressive strength and ductility was obtained than that of ECC. Moreover, it was determined that increasing amount of BFS improved mechanical strength and toughness, but decreased ductility. The reasons of these situations were investigated microstructurally by XRD, TGA/DTA and FTIR analyzes.

Keywords: ECC, EGC, Fly ash, Slag, Mechanical and microstructural properties

tokluğunu azaltmak için iri agrega kullanılmamaktadır [7]. Bu nedenle, tipik bir ECC karışımı genellikle geleneksel beton karışımından 2-3 kat daha yüksek çimento içeriğine ihtiyaç duymaktadır [8]. Portland çimentosunun üretimi yoğun enerji ihtiyacı gerektiren ve ayrıca, yüksek CO₂ emisyonuna neden olan bir süreç olduğundan, ECC üretmek (klinker olmayan çimento, örneğin; geopolimer kullanımı) dikkat çekici sürdürülebilir bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Araştırmalar, uçucu kül (UK) esaslı geopolimer üretiminin Portland çimentosu üretimine kıyasla yaklaşık %60 daha az enerji tükettiğini ve yaklaşık %80 daha az CO₂ emisyonu ürettiğini göstermiştir [9, 10].

Özel bir yüksek performanslı lif takviyeli geopolimer kompozit türü olan, Tasarlanmış Geopolimer Kompozitler (Engineered Geopolymer Composites (EGCs)), ultra yüksek sünekliliğe sahip yeni bir çevre dostu yapı malzemesi olarak ortaya çıkmıştır [11, 12]. Şekil değiştirme sertleşmesi sergileyen geopolimer kompozit olarak da adlandırılan EGC'nin [13] tasarım yöntemi, ECC ile aynıdır. Öyle ki; çimento matrisi yerine geopolimer matrisi kullanılmaktadır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: muhammet-gunes50@hotmail.com (M. Güneş)

Geliş / Received: 08.10.2022 Kabul / Accepted: 14.02.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1186020

Çimentolu matris ile karşılaştırıldığında, geopolimerin enerji tüketimi ve CO₂ emisyonu sırasıyla %70 ve %65 oranında azalmaktadır [2, 14]. Ayrıca, uygun karışım tasarımı ve yeterli kür koşulları altında geopolimerlerin, çimento esaslı malzemelere göre daha yüksek mekanik dayanım ve dayanıklılığa sahiptir [15,16]. Son zamanlarda, EGC'nin temel mekanik özellikleri farklı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Ling vd. [1], uygun karışım tasarımı (bağlayıcının %80'i UK ve %20'si C, aktivatör çözeltisinin (NaOH+Na₂SiO₃) bağlayıcıya (UK+YFC) oranı 0.27 ve %2 PVA lifi (matris hacmine göre)) ve yüksek sıcaklıkta kürleme ile EGC'nin basınç dayanımının 28 günde 102 MPa seviyesine kadar ulaşabileceğini göstermişlerdir. Zahid vd. [17], EGC'nin gerilme davranışları üzerindeki PVA lif geometrisi ve NaOH molaritesinin etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlar, ince lifler (0,04 mm çap ve 8 mm ve 12 mm uzunluk) içeren 8 M matrislen yapılan numunelerin çatlama sonrası aşamada iyi performans gösterdiğini ve şekil değiştirme sertleşmesi kriterlerini karşıladığını göstermiştir [17]. Nguyen vd. [18], aktivatörlerin geopolimerik matris üzerinde etkilerini araştırmanın yanı sıra, %13.7 maksimum çekme gerilmesi ile ultra sünek EGC'yi geliştirmişlerdir. EGC'nin eğilme ve çekme davranışlarını inceleyen Trindade vd. [19], ECC ile karşılaştırıldığında EGC'nin daha küçük çatlak genişliği ile daha iyi çatlama davranışı gösterdiği sonucuna varmışlardır. Dolayısıyla bu sonuç, EGC'nin yapı mühendisliğinde geniş bir uygulama yelpazesi için büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, sıradan lif takviyeli geopolimer kompozitlerle karşılaştırıldığında, EGC, çoklu çatlama modları ile ayırt edici çekme şekil değiştirme sertleşmesi davranışı göstermektedir [20]. Farklı karışım tasarımına sahip EGC'nin temel mekanik davranışları, yani tek eksenli çekme [21], basınç [22] ve eğilme davranışları [17] incelenmiştir. EGC'nin yüksek enerji tüketimi özelliklerine sahip benzersiz çekme şekil değiştirme sertleşmesi davranışları sayesinde depreme ve patlamaya dayanıklı yapılarda, uygulamada dikkat çekici sonuçlar olduğu gözlenmiştir [12]. Trindade vd. [23], EGC'nin yarı statik davranışları üzerinde yapmış olduğu deneysel araştırmalarda, EGC'nin dinamik yüke maruz kaldığında mükemmel enerji yajma kapasitesinin yanı sıra çekme sünekliğine sahip olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Son zamanlarda, EGC olarak adlandırılan geopolimer esaslı ECC'yi geliştirmek için, Portland çimentosunun tamamen UK esaslı bir geopolimer ile değiştirildiği fizibilite çalışması yapılmaktadır [24]. UK, alüminosilikat bileşimi, yüksek işlenebilirlik için düşük su talebi ve dünya çapında bulunabilirliği sayesinde geopolimerlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir alkali çözeltide, UK, katılma yoluyla kayıp partikülleri/lifleri bağlayan, yapısal olarak düzensiz, yüksek oranda çapraz bağlı alüminosilikat-hidrat (N-A-S-H) jelleri oluşturarak geopolimerizasyona uğramaktadır [25]. EGC'nin geleneksel bir ECC ile benzer mekanik özelliklere sahip olduğunu kanıtlanmıştır [24]. Ayrıca, tek eksenli çekme veya eğilme altında, EGC, çoklu mikro çatlakların eşlik ettiği şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergilemektedir. Bununla birlikte, UK'nin düşük reaktivitesinden dolayı, UK esaslı EGC karışımlarından nispeten düşük dayanımlar elde edilmiştir (28 günde 17.4–

27.6 MPa basınç dayanımı ve 2.9–3.4 MPa çekme dayanımı). Tipik bir ECC'nin (M45 kodu ile bilinen ECC) genellikle çok daha yüksek dayanım performansına sahiptir (28 günde 50-60 MPa basınç dayanımı ve 4-5 MPa çekme dayanımı). Mevcut EGC'nin düşük mukavemeti, inşaat sektöründeki uygulamalarını kısıtlamaktadır.

Son zamanlarda, geleneksel UK esaslı geopolimerlerin özelliklerini iyileştirmek için önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Dikkat çekici yaklaşımlardan biri, UK'nin yerine öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) gibi reaktif tozların kullanılması olmuştur [26]. UK ile karşılaştırıldığında, YFC genel olarak çok daha yüksek reaktiviteye ve daha iyi çimentolama özelliklerine sahiptir. C, esas olarak yüksek CaO içeriğine katkıda bulunarak geopolimer kompozitin erken yaş dayanımını arttırmaktadır [27]. Ayrıca, CaO, UK aktivasyon sürecine katılarak UK esaslı geopolimer jel (N-A-S-H) ile birlikte C-S-H/C-A-S-H jeli üretebilmektedir. Böylece geopolimerin mikro yapısını değiştirerek mekanik özelliklerini daha da iyileştirmektedir [28]. Deb vd. [29], YFC ve aktivatör içeriğinin UK esaslı geopolimer betonun işlenebilirlik ve dayanım özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiş ve 180 güne kadar her yaşta YFC içeriğinin artmasıyla UK+YFC esaslı geopolimerin basınç dayanımının arttığını göstermiştir. Nath ve Kumar [28, 30, 31], geopolimerler için UK ile birlikte kullanılan çeşitli YFC türlerini araştırmışlar ve dayanım iyileştirmelerinin esas olarak daha yüksek derecede YFC reaksiyonuna, daha fazla jel fazının oluşumuna ve daha kompakt mikro yapının gelişimine atfedildiği sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte, EGC'nin gelişimi henüz başlangıç safhasında olduğundan, YFC'lerin UK esaslı EGC'lerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırılan sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır.

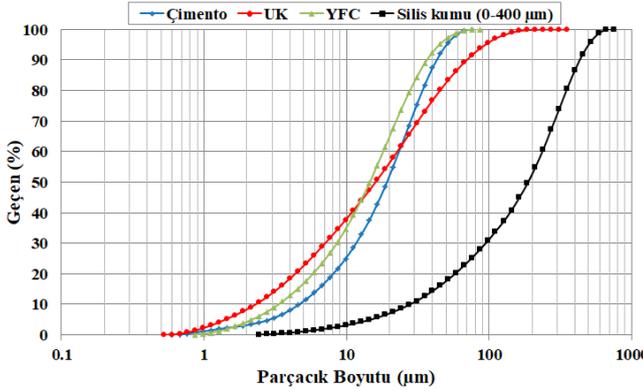
Bu çalışmada, ECC ile benzer taşıma gücü ve deformasyon kapasitesine ulaşabilecek bir UK+ YFC esaslı EGC karışımının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, ECC ile birlikte farklı UK ve YFC içeriklerine sahip EGC karışımları tasarlanmış ve bu karışımların, taze reolojik, mekanik ve mikroyapısal özellikleri belirlenmiştir.

2 Materyal ve metod

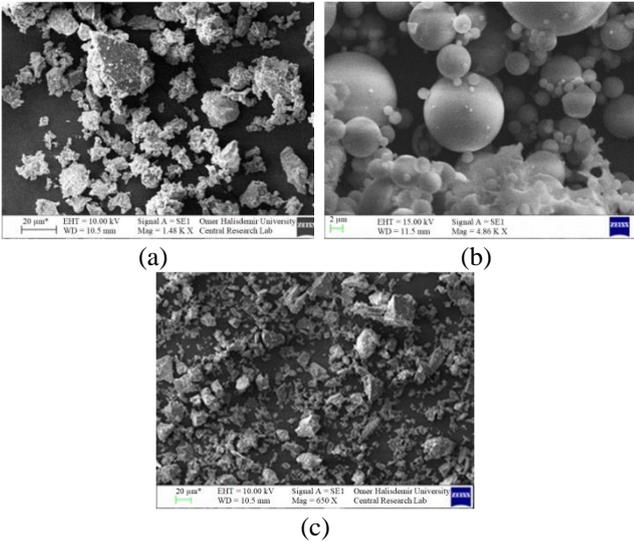
2.1 Malzemeler

ECC üretiminde, TS EN 197-1 [32] standardına uygun ve ASTM Tip I'e uyumlu CEM I 42.5 R tipi Normal Portland çimentosunun yanı sıra UK, su, maksimum tane boyutu 400 µm olan silis kumu, süper akışkanlaştırıcı (SA) ve PVA lifi kullanılmıştır. Kullanılan silis kumunun su emme kapasitesi ve özgül ağırlığı sırasıyla, %0.3 ve 2.65'tir. Bu agregaya için tane boyutu dağılım eğrisi Şekil 1'de gösterilmiştir. ECC karışımlarının işlenebilirliğini artırmak için, BASF Yapı Kimyasalları tarafından üretilen ve eski adı glenium 51 olan masterglenium 51 isimli bir polikarboksilik eter tipi SA kullanılmıştır. SA'nın özgül ağırlığı ve katı içeriği sırasıyla, 1.1 ve %40'tır. UK+YFC esaslı EGC tasarımlarında bağlayıcı malzemeler olarak UK ve YFC, alkali aktivatörler olarak NaOH ve Na₂SiO₃, ekstra su ve PVA lifi kullanılmıştır. ECC ve/veya EGC içerisinde kullanılan çimento, UK ve C'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo

1’de, tane boyut dağılımları Şekil 1’de ve SEM görüntüleri ise Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 1. Çimento, UK, YFC ve silis kumunun tane boyut dağılımları



Şekil 2. (a) Çimento, (b) UK ve (c) YFC'nin SEM fotoğrafları

Daha önceki çalışmalar, geopolimerlerde hammaddede olarak UK kullanıldığında NaOH molarite konsantrasyonunun 8 ila 16 M aralığında olması gerektiğini belirtmiştir [33, 34]. Pavithra vd. [35], farklı NaOH molaritelerinin (10M, 12M, 14M, 16M ve 18M) UK esaslı geopolimer harçlar üzerindeki etkilerini incelemiş ve 16M’ye kadar NaOH molaritesinin artmasıyla basınç dayanımının arttığı ve daha sonra bulunan dayanımın NaOH molaritesinin daha da artmasıyla azaldığını tespit etmiştir. Sentez parametrelerinin UK esaslı geopolimer betonun basınç dayanımına etkisi üzerine yapılan bir çalışmada [36], yüksek basınç dayanımlı beton üretmek için en iyi NaOH konsantrasyonunun 12 M olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, UK+YFC esaslı EGC karışımlarının tasarımında Na₂SiO₃ ve 13 M NaOH alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. %98 saflıktaki NaOH peletleri, 13 M konsantrasyonlu NaOH çözeltisi hazırlamak için bir imalatçı tarafından saf suda damıtılmış ve NaOH çözeltisi özgül ağırlığı 1.50 olan sıvı formda tedarik edilmiştir. Özgül ağırlığı 1.399 olan Na₂SiO₃,

yani su camı, bir imalatçıdan sıvı formda alınmıştır. SiO₂/Na₂O mol oranı (Na₂SiO₃’ün modülü) 2.5 olan sıvı Na₂SiO₃ solüsyonu %38.5 katı ve %61.5 sudan (H₂O) üretilmiştir. Na₂SiO₃ alkali aktivatörünün katı kısmı %27.56 SiO₂ ve %10.94 Na₂O oksit içerir. ECC ile UK+YFC esaslı EGC’lerin tasarımlarında kullanılan PVA lifinin mikro-mekanik hesaplamalar sonucunda belirlenen geometrik özellikleri Tablo 2’de listelenmiştir. Tablo 2’de ayrıca PVA lifinin mekanik özellikleri de verilmiştir. PVA lifi, moleküler zincirlerinde hidroksil grubunun mevcudiyetinden dolayı çimento ile güçlü kimyasal bağ kurması nedeniyle, çimento esaslı bir matriste çekip çıkmak yerine kopma eğilimindedir [37]. Aşırı lif kopması, kompozitin şekil değiştirme sertleşmesi kapasitesini sınırlamaktadır. Kompozitin şekil değiştirme sertleşmesi performansını sergileyebilmesi için lif/matris ara yüzey bağ kuvvetini azaltmak gerekir. Bu nedenle, PVA lifinin yüzeyi ağırlıkça %1.2 hidrofobik yağ ile kaplanmaktadır. Malzeme homojenliğini dikkate alarak karışım tasarımında hesaplanan kritik lif içeriğinin üzerinde bir lif içeriği kullanılmaktadır. Hacimce %2 olarak kullanılan bu lif içeriği, ECC’nin mikro-mekanik tasarım teorisi ile belirlenmiştir. Bu lif oranının önceki araştırmalarda [37, 38] ECC özellikleri için optimum değer olduğu kanıtlanmıştır. Bu nedenle, UK+YFC esaslı EGC karışımlarında da PVA lif içeriği hacimce %2 olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Çimento, UK ve C’nin, kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Bileşim (%)	Çimento	UK	C
CaO	60.15	1.47	38.83
SiO ₂	20.46	61.25	36.82
Al ₂ O ₃	7.78	22.19	13.31
Fe ₂ O ₃	3.09	7.02	0.70
MgO	2.66	1.70	5.65
SO ₃	2.33	0.06	0.50
K ₂ O	0.82	2.34	0.75
Na ₂ O	0.22	0.27	-
TiO ₂	0.30	0.90	-
Fiziksel Özellikler	Çimento	UK	C
Kızdırma Kaybı	2.55	2.6	1.92
Özgül Ağırlık	3.10	2.31	2.89

Tablo 2. PVA lifinin mekanik ve geometrik özellikleri

Nominal Dayanım (MPa)	1620
Görünen Dayanım (MPa)	1092
Çap (µm)	39
Uzunluk (mm)	8
Elastik Modülü (GPa)	42.8
Uzama (%)	6
Özgül Ağırlık	1.3

2.2 Karışım oranları ve üretim prosedürü

İlk olarak, ECC karışımı üretilmiştir. ECC'nin karışım oranları Tablo 3'te verilmiştir. Daha sonra ECC ile benzer taşıma gücü ve deformasyon kapasitesine ulaşabilecek bir EGC karışımı tasarlayabilmek için Tablo 4'te sunulan UK+YFC esaslı EGC'ler tasarlanmıştır. Üretilen EGC30 ve EGC40 karışımlarının sırasıyla, %70 ve %60 oranlarında F sınıfı UK içerdiği Tablo 4'te verilmiştir. Son derece düşük CaO içeriğine sahip olan F sınıfı UK içeren geopolimerlerin ortam sıcaklığında kürlenme ile düşük dayanım gelişimi sağladığı ve dayanım kazanması için etüv kürüne (40 °C ile 85 °C arasında) ihtiyaç duyduğu bilinmektedir [39-41]. Bununla birlikte, ön çalışmalarda EGC30 ve EGC40 karışımlarının etüv küründe YFC'nin yüksek CaO içeriğinden dolayı çatlama problemlerinin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, EGC30 ve EGC40 karışımları deney gününe kadar ortam küründe bekletildiğinde ise yüksek UK ve düşük YFC içeriğinden dolayı dayanımları düşük kalmıştır. Bu nedenle, karşılaşılan sorunları çözmek için literatür çalışmaları incelenmiştir. Coppala vd. [42], eşit su/ön madde oranında sodyum silikat, potasyum hidroksit ve sodyum karbonat ile aktive edilen farklı YFC/UK oranlarıyla tasarlanan geopolimer harçlar üzerinde ısı ve/veya buharla kürlenmenin etkisini incelemişler ve buharla kürlenme sıcaklıklarının 40 °C veya 60°C olduğu sonucuna varmışlardır. Özellikle, yüksek YFC/UK kullanım oranlarında ortam kürü ile karşılaştırıldığında daha yüksek erken basınç dayanımı gelişimi sağlanmıştır. Dolayısıyla bu çalışmada, YFC'nin sıcak su içerisinde sağladığı önemli dayanım gelişiminden faydalanılmıştır. Bu nedenle, kalıba döküldükten sonra laboratuvar ortamında 24 saat kür edilen ECC ve UK+YFC esaslı EGC'ler deney gününe kadar sırasıyla, kapalı poşetler içerisinde ve 60 °C sıcaklığındaki su içerisinde bekletilmiştir. UK+YFC esaslı EGC karışımlarında Na₂SiO₃ çözeltisi/NaOH çözeltisi oranı 2.5 olarak kullanılmıştır. Karışımlar arasındaki tek farklılık UK ve YFC içerikleridir. Öyle ki, %30 YFC içeren EGC30 kodlu UK+YFC esaslı EGC karışımındaki YFC içeriği %40'a çıkarılarak ikinci bir UK+YFC esaslı EGC karışımı elde edilmiştir. Bu iki karışıma ait karışım oranları Tablo 4'te verilmiştir. EGC30 karışımındaki M6, 0.33, 1720 ve 30C sırasıyla, karışımın ismini, karışımlarda alkali aktivatörler toplamının (Na₂SiO₃+NaOH), UK+YFC'ye oranını ve toplam alkali aktivatör+bağlayıcı (Na₂SiO₃+NaOH+UK+YFC) içeriğini ve bağlayıcıdaki ağırlıkça YFC kullanım yüzdesini göstermektedir.

ECC ve EGC karışımlarının üretilmesi için 20 litre kapasiteli bir harç mikseri kullanılmıştır. İlk olarak, katı bileşenler 100 RPM'de bir dakika süreyle karıştırılmıştır. Daha sonra, kuru karışıma ECC için su ve SA, EGC'ler için ise su+SA+Na₂SiO₃+NaOH ilave edilmiş ve PVA lifi içermeyen homojen bir ECC/EGC matrisi üretmek amacıyla 150 ve 300 RPM'de ikişer dakika boyunca karıştırılmıştır. Son aşamada, PVA lifi ilave edilmiş ve karışım 150 ve 300 RPM'de sırasıyla, iki ve dört dakika karıştırılmıştır. Karışımlardan her test günü ve yükleme koşulu için 3'er adet numune alınmıştır. 50 mm'lik küp numuneler; basınç dayanımı ve elastisite modülü testleri için, 360x50x75 mm prizma numuneler; kırılma tokluğu ve dört noktalı eğilme testleri için kullanılmıştır.

2.3 Test Prosedürleri

2.3.1 Taze ve reolojik özellikler

ECC'nin mikro-mekanik tabanlı tasarım hesaplamaları, liflerin matrise homojen bir şekilde dağıldığı kabul edilerek yapılmaktadır. Üretilen karışımın özellikleri mikro-mekanik tabanlı tasarım hesaplamalarından elde edilen bulgulara uygun olsa da lifler matrise homojen olarak dağılamayabilmektedir. Bu nedenle, homojen lif dağılımını etkileyen en önemli parametrelerden birisi ECC/EGC matrisinin (PVA lifi içermeyen ECC/EGC) işlenebilirlik, eşik gerilmesi ve plastik viskozite gibi taze ve reolojik özellikleridir. Bunun yanı sıra, ECC/EGC'nin taze ve reolojik özellikleri malzemenin akışkanlık derecesini ve kalıba yerleştirilebilirliğini etkileyen parametrelerdir.

Bir Bingham sıvı davranışını izleyen ECC ve EGC matrislerinin akışı (reolojik özellikler), reoloji testlerinden ölçülen akma gerilmesi ve plastik viskozite gibi parametrelerle tamamen belirlenebilmektedir. Bununla birlikte, taze özellik testi, işlenebilirliğin yalnızca bir özelliğini ifade etmektedir. Örneğin, ECC ile ilgili literatür çalışmaları, mini-yayılma akışının akma gerilmesini gösterebileceğini ve mini-v hunisi ile Marsh hunisi akış sürelerinin viskozite hakkında fikir verebileceğini belirtmektedir [43, 44]. Bu nedenle, ECC ve EGC matrislerinin akış davranışlarını belirlemek için daha fazla işlenebilirlik testi gereklidir. Akış özelliklerinin tam tanımını sağlayamayan işlenebilirlik testlerinin hala temel birimlerde sonuç veremediği bilinmektedir. Ancak, saha koşullarında uygulanabilirliği, test ekipmanının nispeten düşük maliyeti ve test prosedürlerinin kolaylığı nedeniyle bazı testler de alternatif reoloji testleri olarak kullanılabilir.

Tablo 3. ECC'nin karışım oranları (1 kg/m³)

Karışım İsmi	UK/C	Çimento	UK	Su	PVA	Silis Kumu	SA
ECC	1.2	564.4	677.7	329.9	26	451.1	5

Tablo 4. Farklı UK ve YFC içerikleriyle tasarlanan UK+YFC esaslı EGC'lerin karışım oranları (1 kg/m³)

Karışım İsmi	NaOH Çözeltisi	Na ₂ SiO ₃ Çözeltisi	UK	YFC	PVA	Ekstra Su
EGC30	122.9	307.1	903.0	387.0	26.0	153.7
EGC40	124.6	311.6	785.2	523.5	26.0	157.1

Bu nedenle hem ECC matrisinin hem de EGC matrislerinin akış özelliklerini tanımlamak için mini-v hunisi ve Marsh hunisi testleri ile mini-yayılma akış testi de uygulanmıştır. Ayrıca, reoloji testinin işlenebilirlik testlerinden bir diğer farkı, reoloji testinin matris stabilitesinin fiziksel olarak incelenmesini sağlayabilmesidir. Reolojik parametrelerin uygulanması için testler sırasında matris sabit kalmalıdır.

2.3.1.1 Mini-yayılma hunisi

Mini-yayılma hunisi ile yayılma çapı hem lifsiz hem de lifli ECC/EGC'ler için belirlenmiştir. Mini-yayılma hunisi kesik koni şeklinde olup, üst çapı, alt çapı ve yüksekliği sırasıyla, 70, 100 ve 60 mm olan metal bir hunidir. Karıştırma işlemi tamamlanan lifsiz veya lifli malzeme herhangi bir sıkıştırma işlemine maruz bırakılmaksızın bu huni içerisine yerleştirilir. Daha sonra huni yukarıya doğru dik bir şekilde düşük hızla kaldırılır ve malzeme yayılmaya başlar. Malzeme akışını tamamladığında, dairesel bir şekil ortaya çıkmaktadır. Bu dairesel şeklin çapı, birbirine dik iki doğrultuda ölçülür ve ölçümlerin ortalaması ile yayılma çapı belirlenir. ECC ve EGC'lerin çökme akışındaki deformasyonlar, harcın akışının durduğu andaki akış çapı olarak tanımlanmıştır [43].

2.3.1.2 Mini-V hunisi

Numunelerin viskozite/akıcılık özelliklerini tespit etmek amacıyla mini-v hunisi deney aparatı kullanılmıştır. Mini-V hunisi taze ECC/EGC matrisi ile doldurulduktan sonra alt taraftaki kapağın açılmasıyla ECC/EGC matrisinin boşalma süresi ölçülmüştür [44].

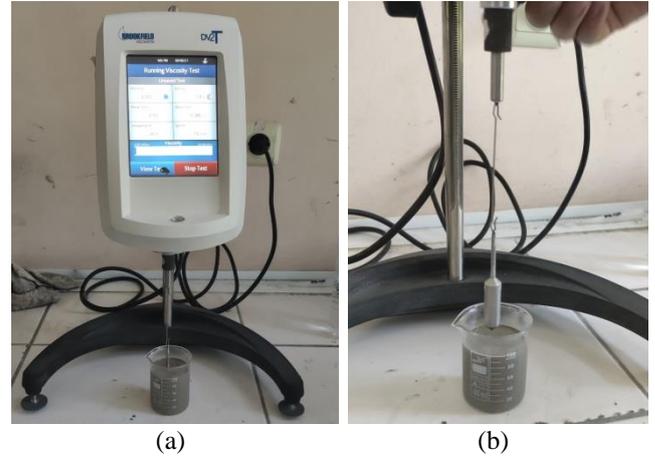
2.3.1.3 Marsh hunisi

Marsh hunisi akış süresi, belirli bir malzeme hacmi için gerekli akış süresinin ölçülmesiyle belirlenmektedir [43]. Bu çalışmada, 4.56 mm iç delik çapına ve 1.5 L hacme sahip demir huni kullanılmıştır. Alt çıkış deliği kapatılan huninin içine ECC/EGC matrisi konulmuş ve deliğin açılmasıyla beraber kronometrenin çalıştırılmasıyla malzemenin akması sağlanmıştır. Huninin altına konulan dereceli bir silindirik kap vasıtasıyla 100 ml hacmindeki ECC/EGC'nin kaç saniyede aktığı belirlenmiştir. Marsh hunisinde, 100 ml suyun akma süresi 23 ± 2 °C sıcaklıkta 1.76 saniyedir.

2.3.1.4 Reolojik özellikler

Harç, beton ve geopolimer genellikle yüksek gerilmelerde viskoz akışkan olarak akan ancak düşük gerilmelerde katı bir cisim gibi davranan visko-plastik malzemeler olarak bilinmektedir [45]. Bu akış, Bingham'ın reolojik modelini ifade etmektedir. Bingham plastik, belirli bir akma gerilmesine ulaşılan kadar herhangi bir kesme hızı göstermez. Akma gerilmesi eşiği aşıldığında, taze harç, beton veya geopolimer akmaya başlar ve plastik viskozite ile tarif edildiği gibi gerinim hızının artmasıyla paralel olarak kayma gerilmesi yükselmektedir [46]. Bu nedenle, taze ECC ve EGC matrislerinin reolojik özelliklerini Bingham modeliyle tam anlamıyla tanımlamak için akma gerilmesi ve plastik viskozite esastır [47].

ECC/EGC matrislerinin reolojik parametreleri (eşik gerilmesi ve plastik viskozite) Şekil 3(a)'da verilen rotasyonel bir viskozimetre kullanılarak ölçülmüştür. Deney esnasında kullanılan başlığa ait fotoğraf ise Şekil 3(b)'de verilmiştir. Numune, ölçme kabına konulduktan sonra, viskozimetrenin ölçüm yapan ucu numune içine daldırılmıştır. Daha sonra hız 0.5 rpm (devir/dakika) değerinden 200 RPM değerine yavaş yavaş çıkarılmıştır. Daha sonra hız, 200 RPM'den (68 s^{-1}), 0.5 RPM (0.17 s^{-1}) değerine basamaklar halinde azaltılmış ve her basamakta ölçümler alınmıştır. Bu basamaklarda dikkate alınan hızlar: 68.0, 34.0, 17.0, 6.80, 3.40, 1.70, 0.85, 0.34 ve 0.17 s^{-1} olarak belirlenmiştir. Her basamakta numune 20 saniye süreyle aynı kayma hızına tabi tutulup, bu sürenin sonunda kayma gerilmesi (Pa) 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 oluşturmaktadır. Bu çizginin eğimi plastik viskoziteyi, çizginin kayma eksenini kestiği nokta ise eşik gerilmesini vermektedir. Bingham davranışına ait kayma gerilmesi-kayma hızı ilişkisi Şekil 4'te verilmiştir. Her bir ECC ve EGC için Bingham davranışı dikkate alınarak kayma gerilmesi-kayma hızı ve görünen viskozite-kayma hızı eğrileri çizilmiştir.

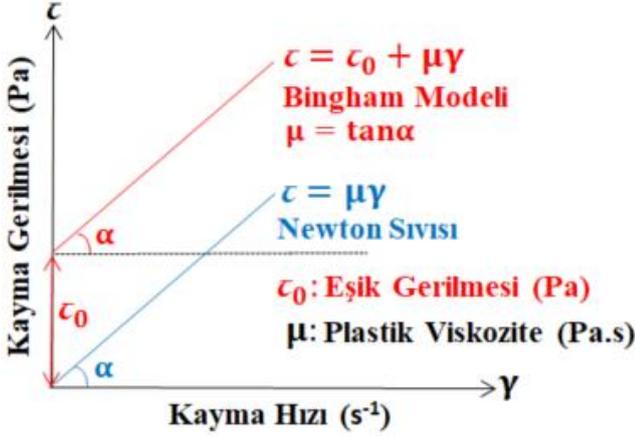


Şekil 3. (a) Viskozimetre ile reolojik parametrelerin belirlenmesi ve (b) deneyde kullanılan başlık

2.4.2 Mekanik özellikler

2.4.2.1 Basınç dayanımı

ASTM C109 [48] standardına uygun olarak gerçekleştirilen basınç dayanımı testi 50 mm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde 0.9 kN/s yükleme hızı ile yapılmıştır. ECC/EGC matrisi ve PVA lifli içeren ECC/EGC karışımlarından üçer adet küp numune alınmıştır. Karışımların basınç dayanımları üç numunenin ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Bingham davranışına ait kayma gerilmesi-kayma hızı ilişkisi

2.4.2.2 Elastisite modülü

ECC ve EGC'lerin elastisite modülü, ASTM C 469'a [49] göre test edilebilmektedir. Elastisite modülünün genellikle incelik oranı 2.0 olan silindirler ve prizmalar için ölçüldüğü bilinmektedir. Bununla birlikte, literatür çalışmaları tarafından desteklendiği gibi beton küplerin birim şekil değiştirme deformasyonu, elastisite modülü ve gerilme-şekil değiştirme eğrisi de araştırılmaktadır [44, 50-55]. Bu nedenle, elastisite modülünün belirlenmesi için bir boyutu 50 mm küp numuneler üretilmiştir. Basınç yüklemesine maruz bırakılan kübik numuneler, basınç dayanımının %40'ına kadar dört kez yüklenip boşaltılmış ve video ekstansometre ile numunelerdeki deformasyonlar belirlenmiştir.

2.4.2.3 Hava kuruşu birim hacim ağırlık, yapısal verimlilik ve ultrasonik titreşim hızı

Lifsiz ve lifli ECC karışımı ile lifsiz ve lifli UK esaslı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının kırılma tokluğu ve eğilme performansı deneylerinde kullanılan 360x75x50 mm boyutlarındaki kiriş numunelerinin deney gününde ağırlık tartımları yapılmıştır. Kiriş ağırlığının kalıp hacmine oranı ile hava kuruşu birim hacim ağırlık ve basınç dayanımının hava kuruşu birim hacim ağırlığa oranı ile yapısal verimlilik değeri belirlenmiştir.

Ultrasonik dalgaının numunenin bir tarafından diğer tarafına ilk varış süresinin ölçülmesi esasına dayanan ultrasonik titreşim hızı (UTH) testi ASTM C597'ye [56] göre uygulanmıştır. UTH testi, çimento esaslı kompozitlerin veya geopolimer kompozitlerin göreceli kalitelerinin ve boşluklar ve çatlaklar gibi bazı kusurlarının değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. UTH testi, 360x75x50 mm boyutlarındaki, 3 prizmatik lifsiz ve lifli ECC ve EGC numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu test deney gününde kirişlerin 360 mm'lik uzunluğuna uygulanmıştır. Donma-çözülme deneyinde de kullanılan UTH testi, 400x100x100 mm boyutlarındaki prizmatik

numunelere de uygulanmıştır. Bir numuneden 2 adet olmak üzere toplamda alınan 6 adet okumanın ortalaması deney sonucu olarak tespit edilmiştir. Elde edilen UTH verilerine göre ECC ve EGC'lerin kalitesinin değerlendirilebilmesi için Tablo 5'te verilen Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı [57] kriterleri kullanılmıştır.

Tablo 5. UTH'ye göre beton kalitesinin sınıflandırılması [57]

Boyuna Titreşim Hızı (m/s)	Betonun Kalitesi
>4500	Mükemmel
3500-4500	İyi
3000-3500	Orta
2000-3000	Kötü
<2000	Çok Kötü

2.4.2.4 Kırılma tokluğu

Çimento esaslı kompozitlerin kırılma tokluğunu belirlemek için standart bir test yöntemi yoktur. ASTM E399 [58] "Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{IC} of Metallic Materials", maksimum agrega boyutu 1000 μm olan çimento esaslı kompozitlere uygulanmış ve laboratuvarında kullanılan numune boyutuna kıyasla küçük işlem bölgesi boyutuna bağlı olarak doğrulanmıştır [7]. Bu test yönteminin iri agrega içermeyen çimento esaslı matrislere uygulaması daha önce yapılmış olan çalışmalarda detaylı bir şekilde incelenmiş ve ECC gibi matris içerisinde iri agrega içermeyen sistemlerde uygulanabilirliği ispatlanmış ve kullanılmıştır [7,8,59-62]. Ayrıca, bu standart metotla belirlenen ECC matrisinin kırılma tokluğu değeri mikromekanik tasarım hesaplamaları aşamasında oldukça etkin bir rol oynamıştır [7,63]. Kırılma tokluğu tayini için her bir karışımdan her bir test için 360x75x50 mm boyutlarında 3 adet kiriş numunesi üretilmiş ve numunelerin tam ortalarına yaklaşık olarak 30 mm derinliğinde çentik açılmıştır. Bu nedenle, kırılma tokluğunun belirlenmesi aşamasında çentik açılan bölgeyi ihmal edebilmek için $f(a/W)$ değeri hesaplanmıştır. Ardından, numunelere üç noktalı eğilmede-çekme testi uygulanmış ve 0.002 mm/saniye hızla yükleme yapılmıştır. Çentik bölgesinden kırılan numunelerin önce çentik derinlikleri net olarak belirlenmiş ve daha sonra kırılma tokluğu değerleri Denklem (1)'e göre hesaplanmıştır.

$$K_Q = \frac{P_Q S}{BW^2} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (1)$$

P_Q : Tepe yükü, S : Açıklık uzunluğu, B : Numunenin yüksekliği, W : Numunenin derinliği ve $f(a/W)$: geometrik kalibrasyon faktörü (deney sonrasında ölçülen gerçek çatlak derinliğine göre 1.91 ile 2.18 aralığında değişmektedir). $f(a/W)$ 'nin formülü Denklem (2)'de sunulmuştur.

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} \left[1.99 - \left(\frac{a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)\left(2.15 - 3.93\frac{a}{W} + 2.7\frac{a^2}{W^2}\right)\right]}{2\left(1 + 2\left(\frac{a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)\right)^{3/2}} \quad (2)$$

2.4.2.5 Eğilme performansı

ECC/EGC'lerin eğilme yükü-orta noktadaki sehim değerlerini tespit etmek amacıyla geliştirilen her karışımdan 360x75x50 mm boyutlarında üçer adet prizmatik numune her test yaşı için üretilmiştir. Universal test sistemi kullanılarak gerçekleştirilen eğilme-çekme deneyinde, merkez açıklık uzunluğu ile 304.8 mm ve eğilme yükünün açıklık uzunluğu 101.6 mm'dir. Eğilme deneyi, maksimum yük kapasitesi 100 kN olan kapalı devre elektro-mekanik test cihazı kullanılarak, 0.003 mm/saniye deformasyon kontrollü olarak literatüre uygun yapılmıştır [44]. Test esnasında, numunelerin orta noktasında oluşan sehim, yüksek hassasiyetli bir video ekstansometre seti ile ölçülmüş ve şekil değiştirmeye karşılık gelen yük bilgisayar sistemi yardımıyla saniyede 10 veri olacak şekilde kaydedilmiştir. Eğilme-çekme testinden sonra, el mikroskobu kullanılarak numunelerin yüzeyindeki çatlak genişlikleri tespit edilmiştir [44].

2.4.3 Mikroyapısal özellikler

UK+YFC esaslı EGC karışımları ile cüruf içeriğindeki artışın mikroyapısal özellikler üzerindeki etkisi 7. ve 28. gün için tespit edilmiştir. ECC ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının mikroyapısal özellikleri X-ışını kırınım yöntemi (XRD), termogravimetrik analiz/diferansiyel termal analiz (TGA/DTA) ve Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) analizleri ile belirlenmiştir. Panalytical/Empyrean (Marka/Model) cihazı ile yapılan XRD analizinin tarama işlemi 10-90 açısal konumda [°2θ] ve 0.013°'lik adımlarla gerçekleştirilmiştir. Linseis/ STA TG-DSC/DTA PT1600 (Marka/Model) cihazı ile gerçekleştirilen TGA/DTA analizi 15 mg'lık toz numuneler üzerinde, 25–1000 °C sıcaklık aralıklarında, 10 °C/dk tarama hızı ile nitrojen atmosferi koşullarında uygulanmıştır. Bruker/Vertex 70 (Marka/Model) cihazı ile yapılan FTIR ile bireysel spektrumların analizi, numunedeki bir kimyasal reaksiyonu tespit etmektedir. Kızılötesi ışık numuneden geçtiğinde, her bir fonksiyonel grup, spektrumların karakteristik absorpsiyon frekanslarında rezonansa girmesini sağlamaktadır. Elde edilen veriler, moleküller arasındaki kimyasal reaksiyonu tanımlar. FTIR analizindeki sıcaklık ve relatif nem sırasıyla, 20 °C ve %60 olarak sabit tutulmuştur.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Taze ve reolojik özellikler

ECC, EGC30 ve EGC40 karışımlarının lifli ve liffsiz yayılma çapları, mini-V hunisi akış süreleri, Marsh hunisi akış süreleri Tablo 6'da verildiği gibidir. Tablo 6'dan görüldüğü üzere bu üç karışım benzer yayılma çapına sahip olacak şekilde tasarlandığı için taze özellik verileri birbirine oldukça yakın değerler sağlamıştır. Ayrıca, Şekil 5'te verilen, Bingham modeline iyi derecede uyumlu olan uydurma eğrilere göre, R² için, 0.999'dan fazla değerler elde edilmiştir. Şekil 5'te verilen bu reolojik eğrilerden elde edilen kayma gerilmesi ve plastik viskozite değerleri Tablo 6'da listelenmiştir. Farklı tasarım parametreleri ile geliştirilen UK+YFC esaslı M6 matrislerinin ve ECC matrisinin kayma gerilmesi, kayma hızındaki değişimle aynı

davranışı göstermiş ve kayma hızının artması sonucu kayma gerilmesi artmıştır. Şekil 6'da verilen kayma hızına bağlı olarak görünür viskozite değerlerindeki değişimlerden görüldüğü üzere, bu artışın bir sonucu olarak, matrislerin görünür viskozitesi kademeli bir şekilde azalmış ve daha sonra stabil davranış sergilemiştir.

Şekil 5 ve Şekil 6'da verilen sonuçlara göre, ECC ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının kayma gerilmesi, plastik viskozite ve görünür viskozite değerleri, yukarıda açıklanan taze özellik sonuçları gibi benzer reolojik ve işlenebilirlik özellikleri sergilemektedir. EGC40 karışımı %2.2 daha fazla su içeriğiyle EGC30 karışımı ile benzer taze ve reolojik özellik değerlerine ulaşmıştır. EGC40 karışımındaki YFC içeriği EGC30 karışımından %10 daha fazla olmasından dolayı EGC40 karışımındaki su içeriği artırılmıştır. Bu durum muhtemelen karışımların fiziksel özelliklerindeki ve kimyasal reaksiyonlarındaki farklılıkların bir sonucudur [64,65]. Ayrıca, bağlayıcı malzemelerin kıvamı ve işlenebilirliği malzemenin tipine ve inceliğine bağlı olmaktadır [66-68]. Bu nedenle, bu durum UK ve YFC minerallerinin Şekil 2'de verilen SEM görüntüleri yardımıyla açıklanabilir. Şekil 2'den görüldüğü üzere YFC minerali mikrodüzeyde köşeli bir tanecik yapısına sahipken, UK minerali küresel bir tanecik yapısına sahiptir [64]. Sonuç olarak, YFC içeriği arttıkça, köşeli parçacıkların sayısı artarken UK'nin küresel parçacıklarının miktarı azalmaktadır. Bu nedenle akış esnasında, UK mineralinin bu özel yapısı işlenebilirliği olumlu yönde etkilerken, YFC mineralinin pürüzlü tanecikleri işlenebilirliği olumsuz yönde etkilemiştir. Ayrıca, YFC ve UK'nin karıştırılması, daha reaktif malzeme sunarak hızlı sertleşmeye neden olarak işlenebilirliği azaltmaktadır [64].

3.2 Mekanik özellikler

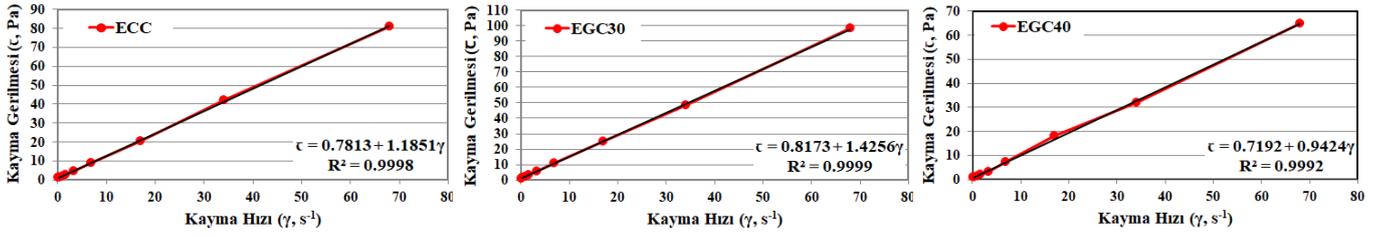
3.2.1 Basınç dayanımı

ECC ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının basınç dayanımları Şekil 7'de verilmiştir. %30 YFC ile geliştirilen EGC30 karışımının liffsiz ve lifli basınç dayanımları ECC'den 7. günde sırasıyla, %9.8 ve %-0.3 oranlarında daha düşük çıkmıştır. 28. günde ise bu değerler sırasıyla, %31.1 ve %27.8 olarak belirlenmiştir. EGC30 karışımı ECC'den daha düşük basınç dayanımına sahip olduğu için bu karışımdaki YFC içeriği %40 oranına çıkarılarak M6_0.33_1745_40YFC karışımı geliştirilmiştir. Bu karışımın 7. gündeki liffsiz ve lifli basınç dayanımı ECC'den sırasıyla, %107.5 ve %119.6 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. 28. günde ise bu değerler sırasıyla, %47.0 ve %40.8 olarak belirlenmiştir. Böylece, ECC'den çok daha yüksek basınç dayanımına sahip bir UK+YFC esaslı EGC karışımı geliştirilmiştir.

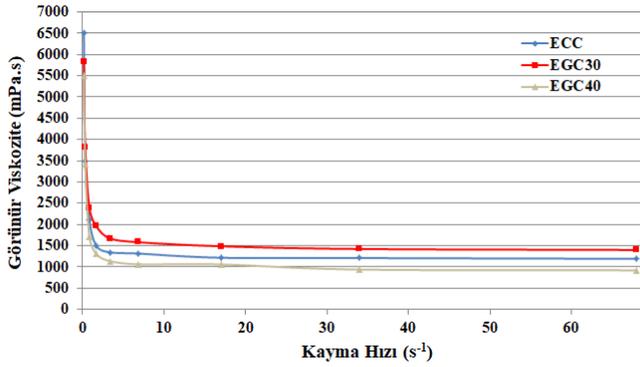
EGC40 karışımının basınç dayanımı EGC30 karışımından ise 7. günde sırasıyla, %130.2 ve %118.9 oranlarında, 28. günde ise sırasıyla %113.5 ve %94.9 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. Benzer şekilde, Škvára vd. [69], YFC içeriğindeki artışla geopolimerde yüksek basınç dayanımı, düşük kuruma büzülmesi, düşük sünme, takviye ile iyi bağlanma ve asit, sülfat ve ateşe karşı iyi direncin baskın olduğunu ortaya çıkarmışlardır.

Tablo 6. ECC ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının taze ve reolojik özellikleri

Taze Özellikler	ECC	EGC30	EGC40
Mini-Yayılma Hunisi Lifsiz Yayılma Çapı (cm)	31.85	31.70	32.60
Mini-Yayılma Hunisi Lifli Yayılma Çapı (cm)	15.80	15.80	16.60
Mini-V Hunisi Akış Süresi (sn)	4.50	4.29	3.97
Marsh Hunisi 100 ml Akış Süresi (sn)	135	124	120
Eşik Gerilmesi (Pa)	0.781	0.817	0.719
Plastik Viskozite (Pa.s)	1.185	1.426	0.942



Şekil 5. ECC ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının eşik gerilmesi ve plastik viskozite değerlerinin belirlenmesi



Şekil 6. ECC ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının kayma hızına bağlı olarak görünür viskozite değerlerindeki değişimler

Öyle ki, YFC gibi kalsiyum bakımından zengin alümino silikatlar bazen sistemin reaktivitesini artırmak için F sınıfı UK gibi CaO bakımından düşük reaktifle birlikte kullanılabilir ve sonuç olarak ısıyla kürlenme ihtiyacını ortadan kaldırdığı söylenebilir [70-72]. UK, YFC ile değiştirildiğinde, esas olarak değişen birincil bileşenin, hem geopolimerlerde hem de alkali ile aktive edilmiş malzemelerde basınç dayanımının geliştirilmesi için etkili bir bileşen olarak rapor edilen CaO olduğu bilinmektedir [73,73]. Bununla birlikte, C'nin UK yerine yüksek oranlarda kullanıldığı durumlarda sistemde önemli miktarda CaO'nin varlığının sertleşmeyi hızla gerçekleştirdiği ve sistemin uygulanabilirliğini tehlikeye atabileceği söylenebilir [71,75]. Bu nedenle, sistemdeki kalsiyum miktarının geopolimer malzemelerin hem taze hem de sertleşmiş özelliklerine etkileri göz önünde bulundurularak optimize edilmesi gerekmektedir [65].

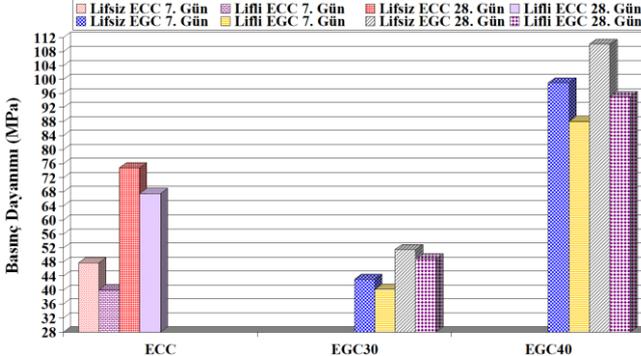
3.2.2 Elastisite modülü

ECC ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının elastisite modülü verileri Şekil 8'de grafiksel olarak sunulmuştur. Elde edilen bulgulara göre ECC'nin 7. gündeki lifsiz ve lifli elastisite modülü değerleri EGC30 karışımından sırasıyla, %8.3 ve %2.9, 28. gündeki elastisite modülü değerleri ise sırasıyla, %12.9 ve %6.6 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. EGC40'un 7. gündeki lifsiz ve lifli elastisite modülü değerleri EGC30 karışımından sırasıyla, %25.5 ve %26.5, 28. gündeki elastisite modülü değerleri ise sırasıyla, %23.8 ve %25.0 oranlarında çok daha yüksek değerlere ulaşmıştır. EGC40 7. gündeki lifsiz ve lifli elastisite modülü değerleri ECC karışımından sırasıyla, %15.1 ve %22.8, 28. gündeki elastisite modülü değerleri ise sırasıyla, %7.9 ve %16.8 oranlarında çok daha yüksek çıkmıştır. Benzer bir bulgu olarak, Oderji vd. [65] YFC içeriğinin artmasının dayanımı geliştirdiğini belirtmişlerdir. Bilindiği üzere, UK veya metakaolinin kısmi ikamesi olarak YFC'nin matrisine eklenmesi ile geopolimerin laboratuvar ortamında sertleşmesinin sağlanmakta ve daha kısa sürede daha yüksek dayanım gelişimine ulaşmaktadır [76]. Bu nedenle, artan YFC içeriği sayesinde EGC40 karışımının ulaştığı bu yüksek elastisite modülü değerleri YFC'nin matrisine eklenmesi ile artan C-S-H jellerinin bir sonucu olarak geopolimerin daha kısa sürede daha yüksek dayanım gelişimi sağladığını göstermektedir [76].

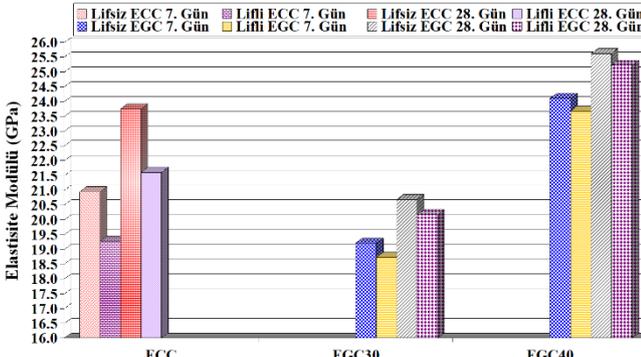
3.2.3 Hava kuru birim hacim ağırlık

Şekil 9'da ECC, EGC30 ve EGC40 karışımlarının hava kuru birim hacim ağırlık değerleri verilmiştir. Bu karışımların teorik birim hacim ağırlıkları sırasıyla, 2054.1, 1899.7 ve 1928.0 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu verilerden ve Şekil 9'dan görüldüğü üzere ECC ve EGC40 karışımlarının teorik birim hacim ağırlıkları ve hava kuru birim hacim ağırlık değerleri hem 7. günde hem de 28. günde

EGC30 karışımından daha yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte, ECC ve EGC40 karışımları karşılaştırıldığında teorik birim hacim ağırlığı daha yüksek olan ECC'nin hava kuru birim hacim ağırlık değerlerinin genel olarak EGC40'tan daha yüksek olduğu söylenebilir.



Şekil 7. ECC karışımı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 7. ve 28. gündeki basınç dayanımı verileri



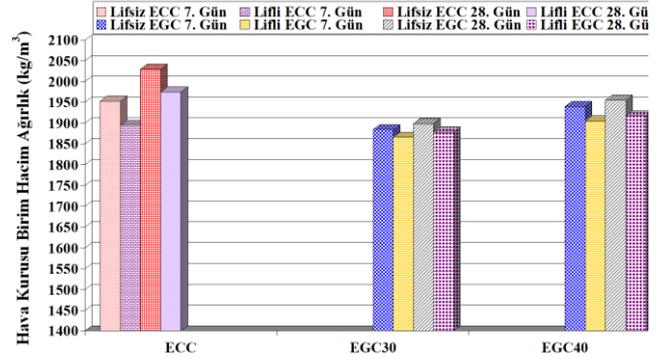
Şekil 8. ECC karışımı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 7. ve 28. gündeki elastisite modülü verileri

3.2.4 Yapısal verimlilik

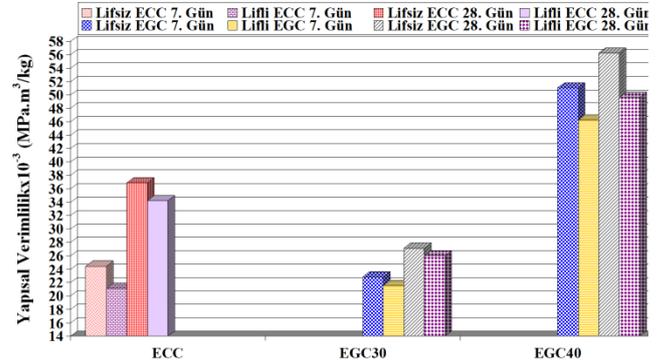
ECC ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının yapısal verimlilik değerleri Şekil 10'da grafiksel olarak sunulmuştur. Sonuçlara göre ECC'nin 7. gündeki lifsiz ve lifli yapısal verimlilik değerleri EGC30 karışımından sırasıyla, %6.5 ve %1.8, 28. gündeki elastisite modülü değerleri ise sırasıyla, %26.4 ve %24.1 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. EGC40'ın 7. gündeki lifsiz ve lifli yapısal verimlilik değerleri EGC30 karışımından sırasıyla, %123.5 ve %114.4, 28. gündeki yapısal verimlilik değerleri ise sırasıyla, %107.3 ve %90.9 oranlarında çok daha yüksek değerlere ulaşmıştır. EGC40 7. gündeki lifsiz ve lifli yapısal verimlilik değerleri ECC karışımından sırasıyla, %108.8 ve %118.4, 28. gündeki yapısal verimlilik değerleri ise sırasıyla, %52.6 ve %44.9 oranlarında çok daha yüksek çıkmıştır. M6_0.33-1745_40C karışımının hem ECC hem de EGC30 karışımına göre bu son derece yüksek yapısal verimlilik değerleri çok yüksek basınç dayanımının bir sonucu olarak açıklanabilir. Bu nedenle, bu karışımların yapısal verimlilik değerlerinin basınç dayanımına paralel olarak değiştiği söylenebilir [77].

3.2.5 Ultrasonik titreşim hızı

ECC ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının UTH değerleri Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 11'den görüldüğü üzere basınç dayanımı ve elastisite modülü hem ECC hem de EGC30 karışımından önemli ölçüde yüksek olan EGC40 karışımının UTH sonuçları ECC'den çok daha düşük veriler göstermiştir. ECC'nin lifsiz ve lifli UTH verileri EGC40 karışımından 7. günde sırasıyla, %32.6 ve %26.2 oranlarında, 28. günde ise sırasıyla, %38.6 ve %32.7 oranlarında daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 9. ECC karışımı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 7. ve 28. gündeki hava kuru birim hacim ağırlık verileri

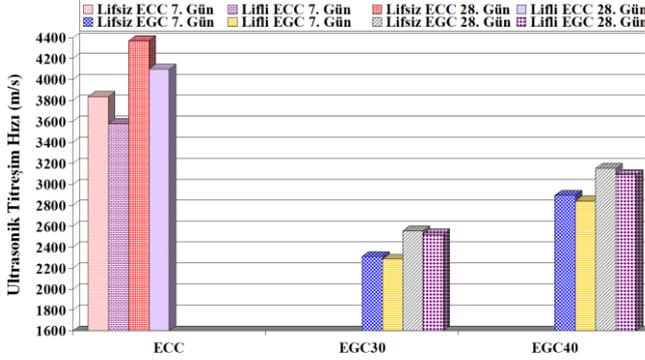


Şekil 10. ECC karışımı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 7. ve 28. gündeki yapısal verimlilik verileri

Öyle ki, Tablo 5'te verilen Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı kriterlerine [57] göre, lifsiz/lifli ECC'nin 7 ve 28 gündeki UTH verileri sırasıyla, 3500-4500m/sn aralığında olduğundan dolayı "iyi" kaliteli kompozit olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte, lifsiz/lifli EGC40 karışımı sadece 28 gün için "orta" kalite olarak sınıflandırılmıştır. Bu karışımın diğer test yaşı ve lifsiz/lifli EGC30 karışımı 7 ve 28 gün için "zayıf" kaliteli kompozit olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, artan YFC içeriğinin bir sonucu olarak gelişen basınç dayanımı ve elastisite modülünün yanı sıra UTH verileri de artmıştır. EGC40 karışımının lifsiz ve lifli UTH verileri EGC30 karışımından 7. günde sırasıyla, %25.3 ve %24.3 oranlarında, 28. günde ise sırasıyla, %23.4 ve %22.4 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. Benzer şekilde, Omer vd. [78] UPV ölçümlerinin basınç dayanımı ile benzer davranış gösterdiğini ve UPV ile basınç dayanımı arasındaki ilişkinin üstel olduğunu belirtmiştir.

3.2.6 Kırılma tokluğu

Kırılma tokluğu deneyi yapılan ECC karışımı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 7. ve 28. günde tipik yük-orta noktadaki sehim eğrileri sırasıyla, Şekil 12 ve Şekil 13'te grafiksel olarak sunulmuştur. Kırılma tokluğunun hesaplanmasında kullanılan çentik derinliği değerleri ise Tablo 7'de parantez içerisinde verilmiştir.



Şekil 11. ECC karışımı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 7. ve 28. günde UTH verileri

Tablo 7'de sunulan kırılma tokluğu verilerine göre M6_0.33_1720C karışımının kırılma tokluğu değeri ECC'den 7. ve 28. günde sırasıyla, %40.4 ve %35.7 oranlarında daha düşük çıkmıştır. Kırılma tokluğu değeri 7. ve 28. günde EGC30 karışımının yaklaşık 2.6 katı olan EGC40 karışımının kırılma tokluğu verileri 7. ve 28. günde ECC'den sırasıyla, %55.9 ve %69.6 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. YFC içeriğindeki artış ile, UK+YFC esaslı EGC numuneleri için üstün kırılma performansı sergilemiştir. Başka bir çalışmada, Nath ve Sarker [79] genel olarak, geopolimer betonların kırılma enerjisinin, karışımdaki YFC içeriğinin artmasıyla artma eğiliminde olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, daha yüksek kırılma enerjisi sonuçlarının bir başka nedeni, Şekil 7'de gösterildiği gibi %30 ve %40 YFC içeren karışımlar için basınç dayanımındaki artışa bağlanabilir [80]. Öyle ki, araştırmacılar [80] UK+C esaslı kendiliğinden yerleşen geopolimer beton numunelerinde kırılma enerjisinin değişimini incelemişler ve numunelerin basınç dayanımı arttıkça kırılma enerjisinin arttığı sonucuna varmışlardır. Bu nedenle, artan YFC içeriğiyle sağlanan yüksek kırılma tokluğu değeri, YFC içeriğindeki yüksek CaO içeriğinin sağladığı önemli dayanım gelişiminin önemli bir sonucu olarak yorumlanabilir. Böylece, ECC'den kırılma tokluğu çok daha yüksek bir UK+YFC esaslı EGC karışımı geliştirilmiştir. EGC40 karışımının lifsiz ve lifli UTH verileri EGC30 karışımından 7. günde sırasıyla, %25.3 ve %24.3 oranlarında, 28. günde ise sırasıyla, %23.4 ve %22.4 oranlarında daha yüksek çıkmıştır.

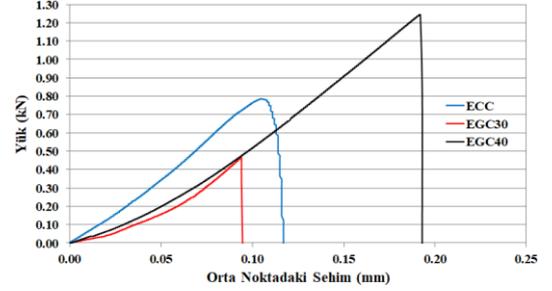
Tablo 7. ECC matrisi ile UK+YFC esaslı EGC matrislerinin kırılma tokluğu (MPa.m^{1/2}) test sonuçları

Mix ID	7. Gün	28. Gün
ECC	0.465(30.14)	0.552(30.31)
EGC30	0.277(30.28)	0.355(29.88)
EGC40	0.725(29.75)	0.936(29.95)

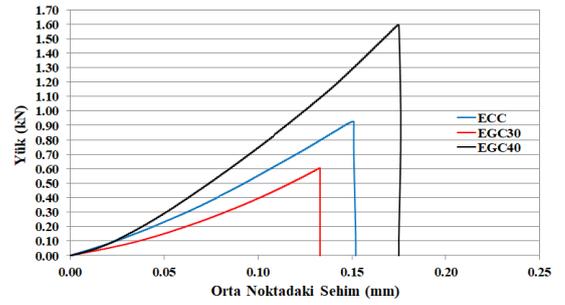
Parantez içerisindeki sayılar çentik derinliğini (mm) göstermektedir.

3.2.7 Eğilme performansı

ECC karışımı ile UK+YFC esaslı EGC karışımlarına ait maksimum eğilme yükü ve orta noktadaki sehim değerleri Tablo 8'de verilmiştir. Ayrıca, bu karışımların 7. ve 28. günde maksimum eğilme yükü ve orta noktadaki sehim eğrileri sırasıyla, Şekil 14 ve Şekil 15'de sunulmuştur.



Şekil 12. Kırılma tokluğu deneyi yapılan ECC karışımı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 7. günde tipik yük-orta noktadaki sehim eğrileri



Şekil 13. Kırılma tokluğu deneyi yapılan ECC karışımı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 28. günde tipik yük-orta noktadaki sehim eğrileri

Hem 7. hem de 28. günde en yüksek eğilme yükü değerleri ECC karışımından elde edilmiştir. Basınç dayanımı, elastisite modülü ve kırılma tokluğu açısından ECC'den önemli ölçüde yüksek performans sergileyen EGC40 karışımının taşıdığı maksimum eğilme yükü hem 7 hem de 28. günde ECC karışımından daha düşük çıkmıştır. Benzer şekilde, Sitarz vd. [81] UK+YFC esaslı geopolimerde YFC içeriği %30'dan %50'ye yükseltildiğinde basınç dayanımında önemli bir artış olduğunu bildirmiştir. Ancak, yoğunluk ve eğilme dayanımı %50 cürufufta önemli ölçüde artmamıştır. Dolayısıyla, ECC karışımının eğilme yükü 7. ve 28. günde EGC30 karışımından sırasıyla, %36.1 ve %36.3 oranlarında, EGC40 karışımından ise sırasıyla, %13.1 ve %8.2 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte, daha fazla YFC içeriğiyle tasarlanan EGC40 karışımının maksimum eğilme yükü EGC30 karışımından sırasıyla, %20.4 ve %26.0 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, artan YFC içeriğinin bir sonucu olarak arttığı düşünülen C-S-H jellerinin bir sonucu olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, cürufun aktivasyonu ile ilave C-S-H jel oluşumu nedeniyle gözeneklilik ve gözenek çapının da küçüldüğü düşünülebilir [82-84]. Böylece, daha yüksek YFC içeriği, daha kompakt bir mikro yapı ve daha yüksek

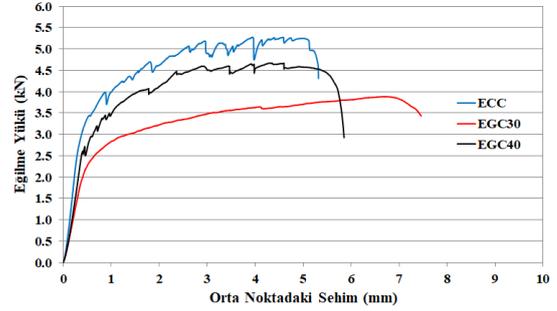
yoğunluk sağlayarak maksimum eğilme yükünü artırmıştır [85].

Maksimum eğilme yükü açısından UK+YFC esaslı EGC karışımlarından daha yüksek performans sergileyen ECC karışımı süneklik açısından bu iki karışımdan daha düşük performans sergilemiştir. Özellikle, EGC30 karışımı 7. ve 28. günde ECC'den sırasıyla, %37.8 ve %44.1 oranlarında daha yüksek deformasyon kapasitesine ulaşmıştır. EGC40 karışımı için ise bu gelişim %9.2 ve %11.0 olarak gerçekleşmiştir. EGC40 karışımından daha fazla UK ve daha az YFC içeriğine sahip olan EGC30 karışımı ise 7. ve 28. günde EGC40 karışımından %26.2 ve %29.8 oranlarında daha yüksek süneklik performansı sergilemiştir. UK+YFC esaslı EGC karışımlarının dayanım gelişimi ve çekme sünekliği arasındaki önemli ilişkiden deformasyon kapasitesindeki azalma beklenmektedir [86]. Artan maksimum eğilme yükü ve azalan süneklik, geopolimerizasyon nedeniyle daha yüksek mekanik özelliklere sahip C-(Na, Al)-S-H'ye daha yakın yeni bir C-S-H bileşiminin oluşumuyla birlikte artan yoğunluğu ve artan lift matris kimyasal bağı gösterir. Lif ve çevreleyen matris arasındaki bağı özelliklerinin, ECC/EGC sünekliğini yöneten anahtar parametrelerdir [87]. Ayrıca, UK+YFC esaslı EGC karışımlarının deformasyon kapasiteleri, özellikle UK parçacıklarının pürüzsüz küresel şekli ile yüksek hacimde UK içeren ECC karışımının artırılmış sünekliği arasında bildirilen yakın ilişki ile, FA ikamesi olarak kullanılan YFC parçacıklarının pürüzlü ve köşeli parçacık morfolojisinden de olumsuz etkilenmiş olabilir [88].

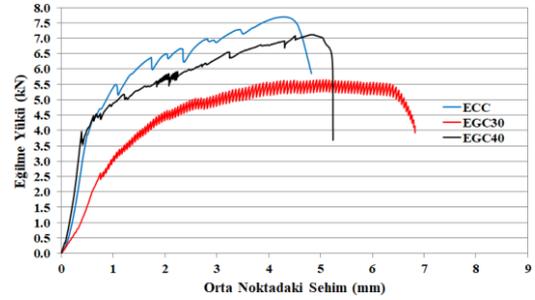
ECC karışımı ile UK+YFC esaslı EGC karışımlarının ortalama çatlak sayıları ve ortalama çatlak genişliği değerleri Tablo 9'da verilmiştir. Her numune için ölçülen en yüksek çatlak genişliği hariç diğer bütün çatlak genişliklerinin ortalaması alınarak ortalama çatlak genişliği hesaplanmış ve üç numunenin ortalaması ilgili karışıma ait ortalama çatlak genişliği elde edilmiştir. Her numune için ölçülen en yüksek çatlak genişliği hariç diğer tüm çatlak genişlikleri hesaba katılarak standart sapma değerleri ayrıca belirlenmiştir. Üç numunenin elde edilen standart sapma değerlerinin ortalaması alınarak, Tablo 9'da karışımların çatlak genişliğine ait standart sapma değerleri parantez içerisinde sunulmuştur. Elde edilen maksimum standart sapma değeri 1.97 olarak belirlenmiş ve bu da verilerin çok az dağılım gösterdiğini ve tartışmaların güçlü bir temele dayandığını göstermiştir.

Eğilme-çekme deneyi sonucunda elde edilen çatlak dağılımları süneklik performansları daha belirgin olan 7 günlük numuneler yardımıyla Şekil 16 ile incelenmiş ve numuneler üzerinde oluşan çoklu mikro-çatlakların dağılımı değerlendirilmiştir. Şekil 16'dan görüldüğü üzere EGC30 ve EGC40 karışımlarındaki çoklu mikro çatlak yapısının M45-ECC'den daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Karışımların çatlak sayısının sünekliğe paralel olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, çatlak genişlikleri süneklik arttıkça azalmıştır. Karışımların çoklu mikro çatlak oluşumu sağladığı belirlenmiştir. Özellikle, ECC'den daha yüksek basınç dayanımına, elastisite modülüne, kırılma tokluğuna

ve deformasyon kapasitesine sahip olan EGC40 karışımının daha düşük çatlak genişliğine ulaşarak ECC'den daha çok çoklu mikro çatlak oluşumu sağladığı belirlenmiştir.



Şekil 14. ECC karışımı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 7. günde tipik eğilme yükü ve orta noktadaki sehimi eğrileri



Şekil 15. ECC karışımı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 28. günde tipik eğilme yükü ve orta noktadaki sehimi eğrileri

3.3 Mikroyapısal özellikler

3.3.1 UK+YFC esaslı EGC'lerin XRD analizi

Şekil 17, UK+YFC esaslı EGC karışımlarında meydana gelen kimyasal bileşim varyasyonlarını (artış/azaltma) göstermektedir. UK+YFC esaslı EGC karışımları için Kuvars ($\text{SiO}_2\text{-K}$), Mullit ($\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2\text{-M}$), Kalsit ($\text{CaCO}_3\text{-CC}$), Hatrurit ($\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O-Ht}$), Albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-A}$), Nefelin ($\text{AlNaSiO}_4\text{-N}$) ve Hematit ($\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-H}$) pikleri ve bu piklerdeki değişim Şekil 17'den ayrıca gözlemlenebilir. UK ve C'nin bireysel difraktogramlarının K ve M'nin varlığını gösterdiği bilinmektedir. Ancak CC sadece C'de kalsiyum varlığını göstermektedir [89]. Bu nedenle, UK+YFC esaslı EGC karışımlarının XRD spektrumundaki tepe yoğunlukları, UK'de K, M ve H'nin varlığından, C'de K, M, CC ve H'nin varlığından, silis kumu ve Na_2SiO_3 'te ise K'nin varlığından kaynaklanmıştır [89-91]. Ayrıca, XRD spektrumlarındaki A ve N pikleri, UK'nin AA ile reaksiyona girdiğini, XRD spektrumlarındaki Ht pikleri ise C'nin AL ile reaksiyona girdiğini göstermektedir. Bununla birlikte, Şekil 17; Ht, A ve N tepe noktalarının kimyasal reaksiyon sonucu oluştuğunu ve diğer bileşenlerin tepe noktaları ile birlikte var olduğunu göstermektedir. İlk büyük ve bağımsız tepe noktası, tüm UK+YFC esaslı EGC karışımlarında K için $26.8^\circ 2\theta$ 'da tanımlanmıştır.

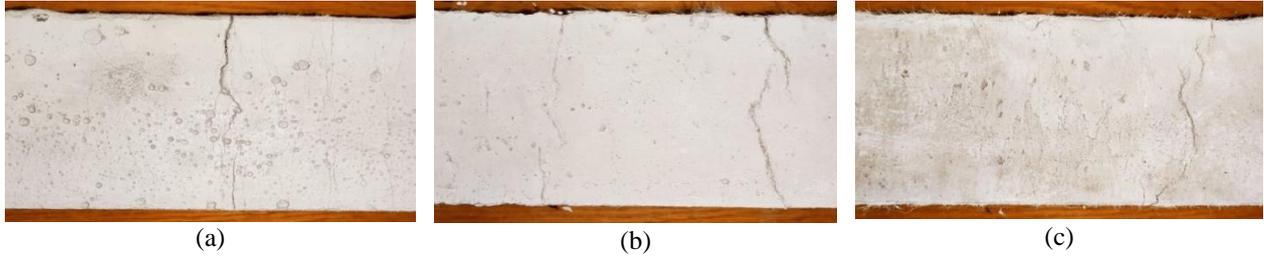
Tablo 8. ECC karışımı ile UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 7. ve 28. gündeki maksimum eğilme yükü ve orta noktadaki sehim değerleri

Karışım İsmi	7. Gün		28. Gün	
	Orta Noktadaki Sehim (mm)	Maksimum Eğilme Yükü (kN)	Orta Noktadaki Sehim (mm)	Maksimum Eğilme Yükü (kN)
ECC	5.32	5.28	4.72	7.70
EGC30	7.33	3.88	6.80	5.65
EGC40	5.81	4.67	5.24	7.12

Tablo 9. ECC karışımı ile UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 7. ve 28. gündeki çatlak sayıları ve çatlak genişlikleri

Karışım İsmi	Çatlak Sayısı		Ortalama Çatlak Genişliği (µm)	
	7. Gün	28. Gün	7. Gün	28. Gün
ECC	19	12	52(1.52)	75(1.39)
EGC30	51	46	36(1.49)	50(1.79)
EGC40	27	19	48(1.17)	66(1.97)

Parantez içerisindeki sayılar standart sapma değerlerini göstermektedir.



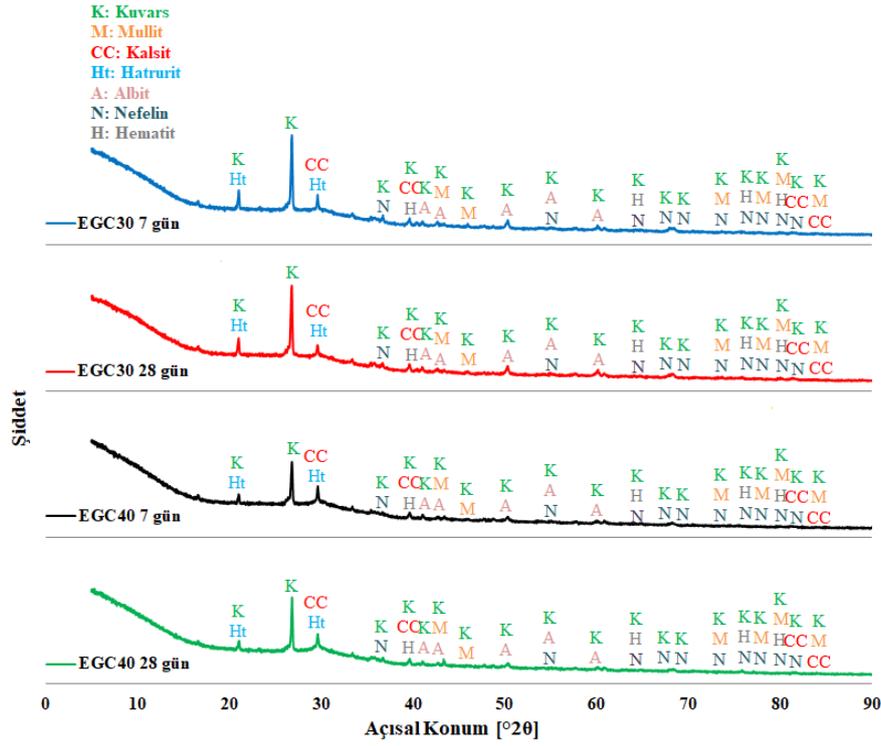
Şekil 16. (a) ECC, (b) EGC30 ve (c) EGC40'ın 7. gündeki çatlak görselleri

Bu nedenle, 26.8° 20'da tek başına gözlenen K piklerindeki değişiklikler tartışılmıştır. Ayrıca, UK+YFC esaslı EGC'lerdeki YFC içeriğinden kaynaklanan 29.5° 20'da gözlemlenen CC ve Ht piklerindeki ortak değişimler de incelenmiştir. EGC30 karışımında 26.8° 20'da gözlemlenen K piklerinin 7 ve 28 gün için benzer pik şiddetlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, EGC40 karışımının 7 ve 28 günlük numuneleri için de aynı şekilde benzer K pik zirveleri ile sonuçlanmıştır. Ancak, EGC40 karışımının 26.8° 20'daki 7 ve 28 günlük K pik şiddeti, EGC30 karışımından daha düşük zirvelere ulaşmıştır. Bu sonuç, Tablo 4'te verilen karışım oranlarını doğrular niteliktedir. Öyle ki, EGC40'ın UK içeriği EGC30 karışımından daha düşük, ancak YFC içeriği daha yüksektir. Tablo 1'den görülebileceği üzere, UK'nin kimyasal bileşiminde %61.25 oranındaki SiO₂ içeriği varken, C'nin SiO₂ içeriği %36.82 olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, EGC40'ın K pik şiddeti hem 7 hem de 28 gün için EGC30'dan daha düşük çıkmıştır. 29.5° 20'daki CC ve Ht pik şiddetleri değerlendirildiğinde, EGC30'nin 28 gündeki pik şiddetinin 7 güne göre daha az olduğu söylenebilir. Aynı bulgu, EGC40 için de tespit edilmiştir. Bu durum 28. günde azalan karbonatlaşmanın kimyasal reaksiyondan daha etkili olduğu şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca, EGC40'ın 29.5° 20'daki pik şiddetinin her iki test yaşı için de EGC30'dan daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, EGC40'ın daha yüksek YFC içeriği sayesinde artan kimyasal

reaksiyonların ve kalsiyum miktarının bir etkisi olarak değerlendirilmiştir.

3.3.2 UK+YFC esaslı EGC'lerin TGA/DTA analizi

UK+YFC esaslı EGC karışımlarının TGA ve DTA eğrileri sırasıyla, Şekil 18 ve Şekil 19'da verilmiştir. UK esaslı geopolimer kompozitler için, kütledeki keskin düşüşün bir sonucu olarak 50-150 °C aralığında bir tepe noktası, UK esaslı EGC'lerin N-A-S-H jelindeki suyun azalmasıyla görülebilir [91,92]. TGA/DTA, UK esaslı geopolimer kompozitler için 400-800 °C'de karbonatların ve sodyum karbonatların faz oluşumunu gösterir [93,94]. Ayrıca, alkali ile aktive edilen YFC esaslı geopolimer kompozitler için, 50-200 °C'deki ilk ağırlık kaybı, pastadaki dehidrasyonu ve C-S-H benzeri katının (C-A-S-H ve/veya C-(N)-A-S-H) varlığını göstermektedir. 200 °C ve 400 °C'deki ağırlık kaybı ise, hidrotalsit benzeri katı fazların ağırlık kaybıyla tutarlıdır [95-98]. Hem C-S-H hem de hidrotalsit genellikle hidratlı alkali ile aktifleştirilmiş YFC esaslı geopolimerlerde gözlemlenir [95,99]. Bununla birlikte, hidrotalsit benzeri faz ile ilişkili 200 ve 400 °C'de TGA'daki omuzlar, daha yüksek MgO içeriği ile daha belirgindir. Bu nedenle, 200 ve 400 °C aralığındaki TGA/DTA değişiklikleri incelenmemiştir. 520-750 °C sıcaklık aralığı arasındaki pikler, alkali ile aktifleştirilmiş YFC esaslı geopolimerlerdeki CC'nin karbondan arınması ile açıklanmaktadır [100, 101].



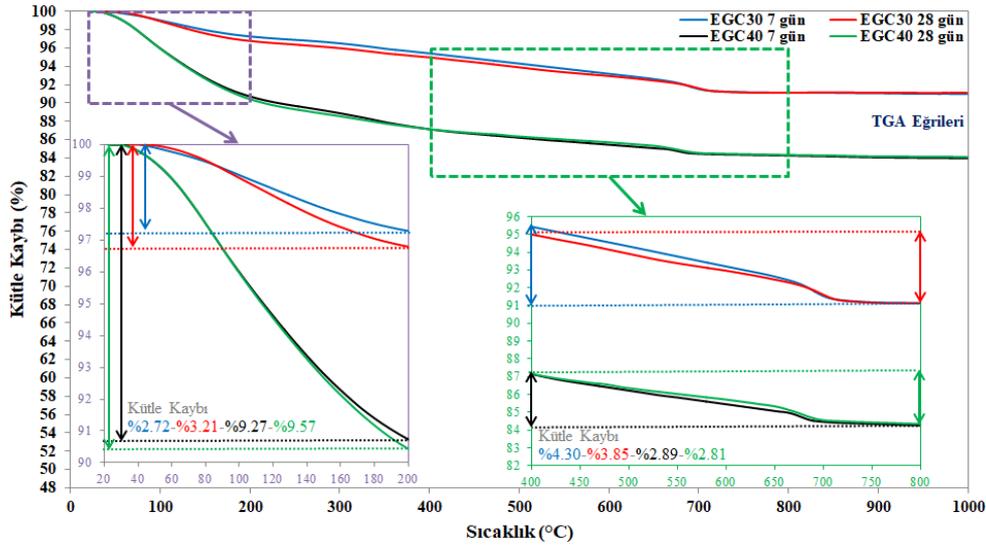
Şekil 17. 7 ve 28 günlük UK+YFC esaslı EGC karışımlarının XRD analizi

UK+YFC ile geliştirilen geopolimer kompozitler için daha önceki çalışmalarda belirlenen pik aralıkları dikkate alınarak bu çalışmadaki pik aralıkları DTA eğrilerinden elde edilmiş ve pik şiddetlerindeki farklılıklar tartışılmıştır. Bu çalışmada, UK+YFC esaslı EGC karışımlarının toplam C-S-H ve N-A-S-H miktarı, DTA grafiklerinde 20-200 °C (ilk-nihai) arasındaki TGA eğrileri tepe sıcaklıkları ile hesaplanan ağırlık kayıpları ile belirlenmiştir. 7 ve 28 günlük EGC30 için ağırlık kayıpları sırasıyla, %2.72 ve 3.21 olarak elde edilmiştir 7 ve 28 günlük EGC40 için bu değerler sırasıyla, %9.27 ve 9.57 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, UK+YFC esaslı EGC karışımlarının C-S-H ve N-A-S-H miktarının basınç dayanımına paralel olarak değiştiğini göstermiştir [91,92,95,100]. Ayrıca, bu sonuçlardan basınç dayanımı EGC30'dan her iki test yaşı için de çok daha yüksek olan EGC40'ın jel miktarının da çok daha yüksek seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir. Artan test yaşının her iki EGC karışımında da basınç dayanımında olduğu gibi jel içeriğinin artışı sağladığı sonucuna varılmıştır. UK+YFC esaslı EGC karışımlarının sodyum karbonat ve karbonat içerikleri, DTA eğrilerinde 400 °C (ilk) ve 800 °C (son) pik aralıklarındaki TGA grafiklerinden elde edilen ağırlık kayıplarından belirlenmiştir. 7 ve 28 günlük EGC30 için ağırlık kayıpları sırasıyla, %4.30 ve 3.85 olarak elde edilmiştir 7 ve 28 günlük EGC40 için bu değerler sırasıyla, %2.89 ve 2.81 olarak belirlenmiştir. Böylece, EGC40'ın her iki test yaşı için de CC içeriğinin EGC30'dan daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, artan test yaşının CC içeriğini azalttığı her iki EGC karışımının da ortak bulgusu olarak elde edilmiştir. Bu nedenle, artan test yaşı ile birlikte N-A-

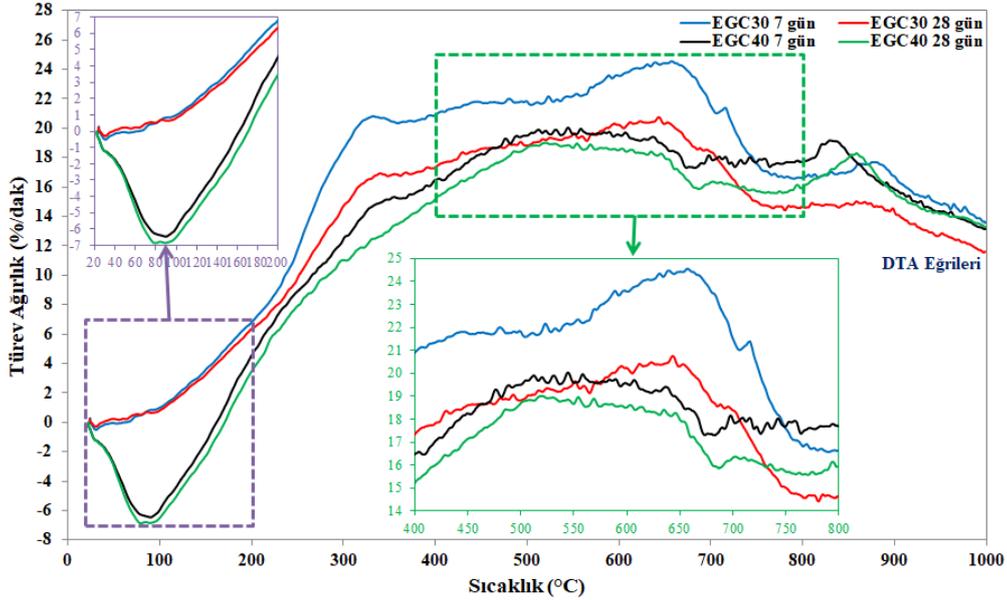
S-H ve C-S-H jel içeriği artarken, CC içeriğinin azaldığı söylenebilir.

3.3.3 UK+YFC esaslı EGC'lerin FTIR analizi

UK+YFC esaslı EGC karışımlarının FTIR spektrumları Şekil 20'de gösterilmiştir. Geopolimerin yapısı yaygın olarak Si-O-Si ve Si-O-Al olarak belirtilen alümino silikat ağlarının tetrahedral bağlarından oluşmaktadır [92,102-105]. Bu nedenle, geopolimerlerde yaklaşık 900-1200 cm⁻¹'de gözlemlenen Si-O-T'nin (T: Si veya Al) asimetrik gerilme titreşim bandı, geopolimerizasyon ile oluşturulan alkalin alüminosilikat jele bağlanmıştır [106-108]. Öyle ki, geopolimerin karakteristik FTIR titreşim bantlarından biri olan 980-1030 cm⁻¹'deki bant, N-A-S-H jelin (Si-O-Si ve Al-O-Si) asimetrik gerilmesini göstermektedir [109]. Na₂SiO₃ ile aktive olan cüruf spektrumlarına göre 974 ile 1033 cm⁻¹ arasındaki bant ise, C-S-H jelinin önemli dekalsifikasyonunun bir sonucu olarak Si-O titreşim bandını ifade etmektedir [110]. Ayrıca, önceki bir çalışmaya göre [108], geniş Si-O-T bandının cürufta 960 cm⁻¹'deki merkezi konumunun geopolimer malzemede daha yüksek bir frekansa kaydığı bilinmektedir. Yukarıdaki bilgilere göre, bu çalışmada, yaklaşık 993 cm⁻¹ ana bantta alt pik yapan uydu bantları, alümino silikat camlara ait spektral omuz olmalıdır [92]. Ayrıca, yaklaşık 993 cm⁻¹'deki alt tepe, C(N)-A-S-H globülleri içindeki kristallik derecesi ile ilişkili olabilir [108,111]. 779 cm⁻¹'de gözlemlenen diğer önemli bant, UK esaslı geopolimer kompozitler için Si-O-Si/Si-O-Al gerilmesine atfedilebilir [92]. Ayrıca, C(N)-A-S-H için 600 ile 800 cm⁻¹ arasındaki bant Si-O-T'nin simetrik gerilme titreşimlerinden dolayıdır [103,108,112].



Şekil 18. 7 ve 28 günlük UK+YFC esaslı EGC karışımlarının TGA eğrileri

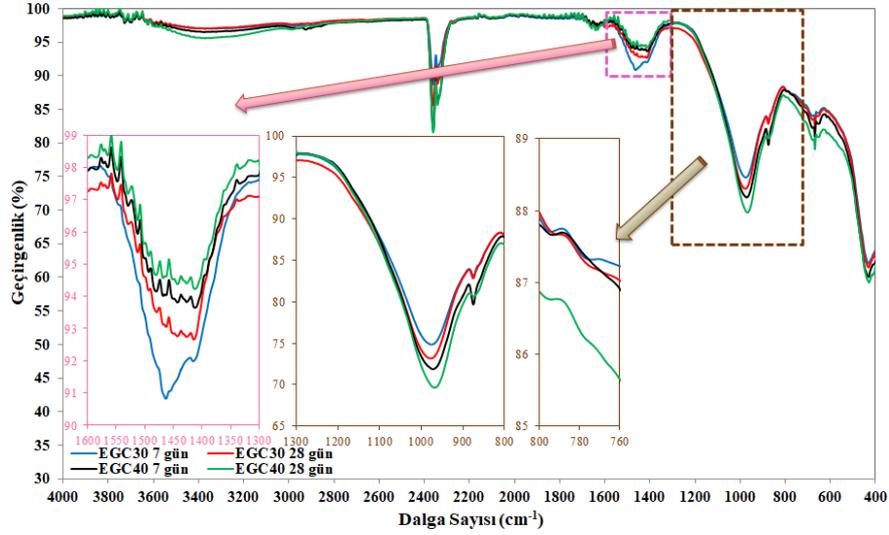


Şekil 19. 7 ve 28 günlük UK+YFC esaslı EGC karışımlarının DTA eğrileri

Bu nedenle, C-S-H ve N-A-S-H jel oluşumu, UK+YFC esaslı EGC'ler için 993 ve 777 cm^{-1} tepe yoğunluğunun yükselmesine katkı sağlamaktadır [90,113]. UK+YFC esaslı EGC'ler için bu iki dalga sayısı karakteristiğine ilişkin derin geçirgenlik tepe noktasına göre FTIR spektrumlarının TGA/DTA ile benzer sonuçlar gösterdiği ve basınç dayanımı test sonuçlarını desteklediği söylenebilir. Böylece, Şekil 20'de gösterildiği gibi, 993 ve 777 cm^{-1} 'deki derin geçirgenlik değeri ve tepe yoğunluğu incelendiğinde; en yüksekten en düşüğe N-A-S-H ve C-S-H jel içeriklerinin 28 günlük EGC40>7 günlük EGC40>28 günlük EGC30>7 günlük EGC30 olduğu görülebilir.

UK esaslı geopolimerlerde gözlemlenen 1440-1470 cm^{-1} ve 840-860 cm^{-1} 'deki bantlar, sırasıyla, O-C-O bağının gerilmesiyle ve bükülmesiyle açıklanabilir, bu da sodyum karbonatın varlığını gösterir ve 800 $^{\circ}\text{C}$ 'den sonra kaybolan

karbonatlardan gelen CO_2 'ye atfedilebilir [90,114]. Ayrıca, Mozgawa ve Deja [115], alkali ile aktifleştirilmiş cüruf geopolimerlerinden kalsite karşılık gelen absorpsiyon piklerinin 1480 cm^{-1} ve 875 cm^{-1} olduğunu bildirmiştir. Önceki bir araştırmaya göre [116], 875 cm^{-1} 'deki bant CO_3^{2-} 'nin düzlem dışı bükülmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, alkali ile aktive edilen cüruf harçları için 875 cm^{-1} 'deki bant, kalsitin karakteristik bir zirvesidir [117]. Yukarıda belirtilen bilgilere göre, bu çalışmada özellikle 1417-1485 cm^{-1} ve 879 cm^{-1} 'deki pik yoğunlukları ve geçirgenlik derinlikleri CaCO_3 içeriklerindeki değişimi göstermiştir. Böylece TGA/DTA'da elde edilen bulgular FTIR spektrumu ile desteklenmiştir. Dolayısıyla, UK+YFC esaslı EGC karışımlarının CC içeriklerinin 28 günlük EGC40<7 günlük EGC40<28 günlük EGC30<7 günlük EGC30 şeklinde sıralandığı Şekil 20'den görülebilir.



Şekil 20. 7 ve 28 günlük UK+YFC esaslı EGC karışımlarının FTIR spektrumları

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, UK+YFC esaslı EGC karışımlarının taze ve reolojik özellikleri ECC'ye benzer olacak şekilde geliştirilmiştir. Bunu sağlayabilmek için daha fazla YFC ve daha az UK içeriğine sahip olan EGC karışımının su içeriği artırılmıştır. Böylece, mikroyapıdaki küresel tanecik yapısıyla UK'nin C'den daha iyi işlenebilirliğe sahip olduğu belirlenmiştir.

Hava kuru birim hacim ağırlığa EGC30'dan daha yüksek ve ECC'den düşük olmasına rağmen oldukça yakın olan EGC40 karışımının yapısal verimliliği bu iki karışımdan çok daha yüksek değerlere ulaşmıştır. EGC40 karışımının basınç dayanımı, elastisite modülü ve kırılma tokluğu EGC30 ve ECC'den hem 7. hem de 28. günde çok daha yüksek değerlere ulaşmıştır. %40 YFC ile üretilen EGC40'ın, gelişen dayanımının artan C-S-H jelinin bir sonucu olduğu TGA/DTA ve FTIR analizleriyle ispatlanmıştır. UK yerine kullanılan YFC yüzdesinin artması ile artan jel içeriğinin tersine CC içeriği azalmıştır. Ayrıca, bu analizler ile artan test yaşı ile birlikte C-S-H ve N-A-S-H jel içeriğinin arttığı ve CC içeriğinin azaldığı belirlenmiştir. XRD analizi ise, YFC içeriğinin artması ve UK içeriğinin azalmasının bir sonucu olarak kuvars pik şiddetinin azaldığını, kalsit ve hatrurit pik şiddetinin arttığını göstermiştir. EGC40'ın UTH verileri ve maksimum eğilme yükü %30 YFC içeren EGC karışımından daha yüksek, ancak ECC'den daha düşük çıkmıştır. Ayrıca, EGC40'ın EGC30'a göre deformasyon kapasitesi daha düşük seviyelerde kalmasına rağmen, ECC'den daha yüksek çıkmıştır. Böylece, ECC'den çok daha yüksek basınç dayanımına, daha yüksek deformasyon kapasitesine ve daha düşük maksimum eğilme yükü taşıma kapasitesine sahip olan UK+YFC esaslı bir EGC karışımı geliştirilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından MMT 2021/2-BAGEP no'lu ve "Sentetik Vollaştonit İçeren Tasarlanmış Geopolimer Kompozitlerin

Taze, Mekanik, Durabilite ve Boyutsal Stabilite Özellikleri" başlıklı proje ile desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] Y. Ling, K. Wang, W. Li, G. Shi and P. Lu, Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash-based engineered geopolymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 164, 747–757, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.092>.
- [2] J. Cai, J. Pan, J. Han, Y. Lin and Z. Sheng, Low-energy impact behavior of ambient cured engineered geopolymer composites. *Ceramics International*, 48, 9378–9389, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.12.133>.
- [3] V.C. Li and T. Kanda, Engineered cementitious composites for structural applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10 (2), 66–69. 1998.
- [4] H.J. Kong, S.G. Bike and V.C. Li, Development of a self-consolidating engineered cementitious composite employing electrosteric dispersion/stabilization. *Cement and Concrete Composites*, 25 (3), 301–309, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00057-4](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00057-4).
- [5] B. Nematollahi, J. Sanjayan and F.U.A. Shaikh, Tensile strain hardening behavior of PVA fiber-reinforced engineered geopolymer composite. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (10), 04015001, 2005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001242](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001242).
- [6] J. Pan, J. Cai, H. Ma and C.K. Leung, Development of multiscale fiber-reinforced engineered cementitious composites with PVA Fiber and CaCO₃ whisker. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30, 04018106, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002305](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002305).

- [7] V.C. Li, D.K. Mishra and H.C. Wu, Matrix design for pseudo-strain-hardening fibre reinforced cementitious composites. *Materials and Structures*, 28, 586–595, 1995.
- [8] S. Wang and V.C. Li, Engineered cementitious composites with high-volume fly ash. *ACI Materials Journal* 104 (3), 233–241, 2007. <https://doi.org/10.1201/b15883-8>
- [9] C. Shi and A. Palomo, New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 41 (7), 750–763, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>.
- [10] M. Juenger, F. Winnefeld, J. Provis and J. Ideker, Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research* 41 (12), 1232–1243, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012>.
- [11] J. Cai, J. Pan, J. Han, Y. Lin, and Z. Sheng, Impact behaviours of engineered geopolymer composite exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 312, 125421, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125421>.
- [12] B.-C. Lyu, C. Ding, L.-P. Guo, B.O. Chen, and A.-G. Wang, Basic performances and potential research problems of strain hardening geopolymer composites: A critical review. *Construction and Building Materials*, 287, 123030, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123030>.
- [13] Y. Wang, Y. Wang, and M. Zhang, Effect of sand content on engineering properties of fly ash-slag based strain hardening geopolymer composites. *Journal of Building Engineering*, 34, 101951, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101951>.
- [14] J. Davidovits, Environmentally driven geopolymer cement applications. in: *Proceedings of 2002 Geopolymer Conference*, Melbourne, Australia, 2002.
- [15] K. Chen, D. Wu, L. Xia, Q. Cai and Z. Zhang, Geopolymer concrete durability subjected to aggressive environments—A review of influence factors and comparison with ordinary Portland cement. *Construction and Building Materials*, 279, 122496, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122496>.
- [16] P. Zhang, Y. Zheng, K. Wang, and J. Zhang, A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. *Composites Part B: Engineering*, 152, 79–95, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.031>.
- [17] M. Zahid, N. Shafiq, S.N.A. Razak and R.F. Tufail, Investigating the effects of NaOH molarity and the geometry of PVA fibers on the post-cracking and the fracture behavior of engineered geopolymer composite. *Construction and Building Materials*, 265, 120295, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120295>.
- [18] H.H. Nguyen, Q.H. Luong, J.I. Choi, R. Ranade, V.C. Li and B.Y. Lee, Ultra-ductile behavior of fly ash-based engineered geopolymer composites with a tensile strain capacity up to 13.7%. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104133, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104133>.
- [19] A.C.C. Trindade, I. Curosu, M. Liebscher, V. Mechtcherine and F.A. Silva, On the mechanical performance of K- and Na-based strain-hardening geopolymer composites (SHGC) reinforced with PVA fibers. *Construction and Building Materials*, 248, 118558, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125649>.
- [20] M. Ohno, and V.C. Li, An integrated design method of engineered geopolymer composite. *Cement and Concrete Composites*, 88, 73–85, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.02.001>.
- [21] Y. Alrefaei and J.G. Dai, Tensile behavior and microstructure of hybrid fiber ambient cured one-part engineered geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 184, 419–431, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.012>.
- [22] L.L. Kan, W.S. Wang, W.D. Liu, M. Wu, Development and characterization of fly ash based PVA fiber reinforced Engineered Geopolymer Composites incorporating metakaolin. *Cement and Concrete Composites*, 108, 103521, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103521>.
- [23] A.C.C. Trindade, A.A. Heravi, I. Curosu, M. Liebscher, F. de Andrade Silva and V. Mechtcherine, Tensile behavior of strain-hardening geopolymer composites (SHGC) under impact loading. *Cement and Concrete Composites*, 113, 103703, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103703>.
- [24] M. Ohno and V.C. Li, A feasibility study of strain hardening fiber reinforced fly ash-based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 57, 163–168, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.005>.
- [25] S.K. Nath, S. Maitra, S. Mukherjee and S. Kumar, Microstructural and morphological evolution of fly ash based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 111, 758–765, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.106>.
- [26] Z. Li and S. Liu, Influence of slag as additive on compressive strength of fly-ash-based geopolymers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19 (6), 470–474, 2007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:6\(470\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:6(470)).
- [27] J. Chang, A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes. *Cement and Concrete Research*, 33(7), 1005–1011, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01096-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01096-7).
- [28] S.K. Nath and S. Kumar, Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolymers. *Construction and Building Materials*, 38, 924–930, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.070>.
- [29] P. Deb, P. Nath and P. Sarker, The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient

- temperature. *Materials and Design*, 62, 32–39, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.001>.
- [30] S.K. Nath, Geopolymerization behavior of ferrochrome slag and fly ash blends. *Construction and Building Materials*, 181, 487–494, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.070>.
- [31] S.K. Nath and S. Kumar, Influence of granulated silico-manganese slag on compressive strength and microstructure of ambient cured alkali-activated fly ash binder. *Waste and Biomass Valorization*, 10 (7), 2045–2055, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0213-1>.
- [32] TS EN 197-1, Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- [33] D. Hardjito, S.E. Wallah, D.M.J. Sumajouw and B.V. Rangan, On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal*, 101, 467–472, 2004. <https://doi.org/10.14359/13485>.
- [34] M.D.J. Sumajouw and B.V. Rangan, Low-calcium fly-ash-based geopolymer concrete. Faculty of Engineering, Curtin University of Technology. Perth, Australia, 2006.
- [35] P. Pavithra, M.S. Reddy, P. Dinakar, B.H. Rao, B.K. Satpathy and A.N. Mohanty, Effect of the $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio and NaOH molarity on the synthesis of fly ash-based geopolymer mortar. *Geo-Chicago 2016*. DOI: 10.1061/9780784480151.034.
- [36] A. Patra, M. Chowdhry and B. Prusty, Effect of synthesis parameters on the compressive strength of fly ash based geopolymer concrete. *International Journal of Environment and Pollution*, 3, 79–88, 2012.
- [37] V.C. Li, S. Wang and C. Wu, Tensile strain-hardening behavior of PVA-ECC. *ACI Materials Journal*, 98(6), 483–492, 2001. <https://hdl.handle.net/2027.42/84671>.
- [38] H.J. Kong, S. Bike and V.C. Li, Development of a self-consolidating engineered cementitious composite employing electrosteric dispersion/stabilization. *Cement and Concrete Composites*, 25, 301–309, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00057-4](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00057-4).
- [39] S. Kumar, R. Kumar and S.P. Mehrotra, Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymers. *Journal of Materials Science*, 45(3), 607–615, 2010. DOI 10.1007/s10853-009-3934-5.
- [40] J.G.S. van Jaarsveld, J.S.J. van Deventer and G.C. Lukey, The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite based geopolymers. *Chemical Engineering Journal*, 89, 63–73, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00025-6](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00025-6).
- [41] J. Cai, X. Li, J. Tan and B. Vandevyvere, Thermal and compressive behaviors of fly ash and metakaolin-based geopolymers. *Journal of Building Engineering*, 30, 101307, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101307>.
- [42] L. Coppola, D. Coffetti, E. Crotti, R.D., Aversano and G. Gazzaniga, The influence of heat and steam curing on the properties of one-part fly ash/slag alkali activated materials: Preliminary results. *AIP Conf. Pro.* 2196, 020038, 2019.
- [43] M. Şahmaran, Z. Bilici, E. Özbay, T.K. Erdem, H.E. Yücel and M. Lachemi, Improving the workability and rheological properties of Engineered Cementitious Composites using factorial experimental design. *Composites Part B: Engineering*, 45, 356–368, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.08.015>.
- [44] H.E. Yücel, H.Ö. Öz, M. Güneş and Y. Kaya, Rheological properties, strength characteristics and flexural performances of engineered cementitious composites incorporating synthetic wollastonite microfibers with two different high aspect ratios. *Construction and Building Materials* 306, 124921, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124921>.
- [45] C.F. Ferraris, K. Obla and R. Hill, The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. *Cement and Concrete Research* 31 (2), 245–255, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00454-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00454-3).
- [46] M. Lachemi, K.M.A. Hossain, R. Patel, M. Shehata and N. Bouzoubaa, Influence of paste/ mortar rheology on the flow characteristics of high-volume fly ash self-consolidating concrete. *Magazine and Concrete Research*, 59 (7), 517–528, 2007. <https://doi.org/10.1680/macr.2007.59.7.517>.
- [47] E.H. Yang, M. Şahmaran, Y. Yang and V.C. Li, Rheological control in production of engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 106 (4), 357–366, 2009. <https://doi.org/10.14359/56656>
- [48] ASTM C109, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, United States, 2016.
- [49] ASTM C469, Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression. American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States, 2014.
- [50] J.R. Del Viso, J.R. Carmona and G. Ruiz, Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete. *Cement and Concrete Research*, 38 (3), 386–395, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.020>.
- [51] S. Sinaie, A. Heidarpour, X.L. Zhao and J.G. Sanjayan, Effect of size on the response of cylindrical concrete samples under cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 84, 399–408, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.076>.
- [52] F. Stochino, M. Valdesa, F. Mistretta and M. Sassu, Assessment of lightweight concrete properties under cryogenic temperatures: influence on the modulus of elasticity. *Procedia Structural Integrity*, 28, 1467–1472, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.10.120>
- [53] B. Wu, C.H. Liu and Y. Yang, Size effect on compressive behaviors of normal strength concrete cubes made from demolished concrete blocks and fresh

- concrete. Magazine of Concrete Research, 65 (19), 1155–1167, 2013. <https://doi.org/10.1680/macrcr.13.00053>.
- [54] B. Wu, Y. Yu, Z. Chen and X. Zhao, Shape effect on compressive mechanical properties of compound concrete containing demolished concrete lumps. Construction and Building Materials, 187, 50–64, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.086>.
- [55] H. Yang, L. Lv, Z. Deng, et al., Residual compressive stress-strain relation of recycled aggregate concrete after exposure to high temperatures. Structural Concrete, 18 (3), 1-8, 2017. <https://doi.org/10.1002/suco.201500153>.
- [56] ASTM C597, Standard test method for pulse velocity through concrete. American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States, 2016.
- [57] IAEA, Guide book on non-destructive testing of concrete structures. Training Courses Series no. 17, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2002.
- [58] ASTM E399, Test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials. American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States, 2003.
- [59] V.C. Li and Wu, H.C., Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites. Applied Mechanics Review (ASME), 45 (8), 390–398, 1992. <https://hdl.handle.net/2027.42/84708>.
- [60] S. Wang, and V.C. Li, High-early-strength engineered cementitious composites. ACI Material Journal, 103 (2), 97–105, 2006.
- [61] M.D. Lepech, V.C. Li, R.E. Robertson and G.A. Keoleian, Design of green engineered cementitious composites for improved sustainability. ACI Materials Journal, 105 (6), 567-575, 2008. <https://hdl.handle.net/2027.42/84660>.
- [62] M.D. Stults, R. Ranade, V.C. Li and T.S. Rushing, Mechanical effects of rice hush ash in ultra-high performance concretes: a matrix study. in Advances in Cement-Based Materials, Proc., International Conference on Advanced Concrete Materials, sayfa 21–28, Stellenbosch, South Africa, November 2009.
- [63] V.C. Li, ECC tailored composites through micromechanical modeling. fiber reinforced concrete: Present and the future edited by Banthia, N., Bentur, A. and Mufti, A. (Eds.)', CSCE, Montreal, 64-97, 1998.
- [64] M.H. Al-Majidi, A. Lampropoulos, A. Cundy and S. Meikle, Development of geopolymer mortar under ambient temperature for in situ applications. Construction and Building Materials, 120, 198–211. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.085>.
- [65] S.Y. Oderji, B. Chen, M.R. Ahmad and S.F.A. Shah, Fresh and hardened properties of one-part fly ash-based Geopolymer binders cured at room temperature: Effect of slag and alkali activators. Journal of Cleaner Production, 225, 1–10, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.290>.
- [66] K. Ganesan, K. Rajagopal and K. Thangavel, Rice hush ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. Construction and Building Materials, 22 (8), 1675–1683, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.011>.
- [67] G.A. Rao, Investigations on the performance of silica fume-incorporated cement pastes and mortars. Cement and Concrete Research, 33 (11), 1765–1770, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00171-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00171-6).
- [68] H. Temiz, M.M. Kose and S. Koksall, Effects of portland composite and composite cements on durability of mortar and permeability of concrete. Construction and Building Materials, 21 (6), 1170–1176, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.011>.
- [69] F. Škvára, T. Jílek and L. Kopecký', Geopolymer materials based on fly ash. Ceramics Silikaty, 49 (3), 195–204, 2005.
- [70] A.M. Rashad, A comprehensive overview about the influence of different admixtures and additives on the properties of alkali-activated fly ash. Materials Design 53, 1005–1025, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.074>.
- [71] S. Saha and C. Rajasekaran, Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag. Construction and Building Materials, 146, 615–620. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.139>.
- [72] J. Shang, J.G. Dai, T.J. Zhao, S.Y. Guo, P. Zhang and B. Mu, Alternation of traditional cement mortars using fly ash-based geopolymer mortars modified by slag. Journal of Cleaner Production 203, 746–756, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.255>.
- [73] N.K. Lee and H.K. Lee, Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature. Construction and Building Materials, 47, 1201–1209, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.107>.
- [74] J. Temuujin, A. van Riessen and R. Williams, Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. Journal of Hazardous Materials, 167 (1–3), 82–88, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.12.121>.
- [75] I. Perna and T. Hanzlíček, The setting time of a clay-slag geopolymer matrix: the influence of blast-furnace-slag addition and the mixing method. Journal of Cleaner Production, 112, 1150–1155, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.069>.
- [76] R. Gopalakrishnan and K. Chinnaraju, Durability of ambient cured alumina silicate concrete based on slag/fly ash blends against sulfate environment. Construction and Building Materials, 204, 70–83, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.153>.

- [77] M. Gesoğlu, E. Güneyisi, T. Özturan, H.Ö. Öz and D.S. Asaad, Permeation characteristics of self compacting concrete made with partially substitution of natural aggregates with rounded lightweight aggregates. *Construction and Building Materials*, 59, 1–9, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.031>.
- [78] S.A. Omer, R. Demirboga, W.H. Khushefati, Relationship between compressive strength and UPV of GGBFS based geopolymer mortars exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 94, 189–195, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.006>.
- [79] P. Nath and P.K. Sarker, Fracture properties of GGBFS-blended fly ash geopolymers concrete cured in ambient temperature. *Materials and Structures*, 50 (32), 2016. <http://hdl.handle.net/20.500.11937/15620>.
- [80] M.E. Gülşan, R. Alzebaree, A.A. Rasheed, A. Niş and A.E. Kurtoğlu, Development of fly ash/slag based self-compacting geopolymer concrete using nano-silica and steel fiber. *Construction and Building Materials*, 211, 271–283, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.228>.
- [81] M. Sitarz, I. Hager and M. Choinska, Evolution of mechanical properties with time of fly-ash-based geopolymer mortars under the effect of granulated ground blast furnace slag addition. *Energies*, 13(1135), 2020. <https://doi.org/10.3390/en13051135>
- [82] H. Alanazi, J. Hu and Y.R. Kim, Effect of slag, silica fume, and metakaolin on properties and performance of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 197, 747–756, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.172>.
- [83] X. Guo and X. Pan, Mechanical properties and mechanisms of fiber reinforced fly ash–steel slag based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 179, 633–664, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.198>.
- [84] N. Ismail, H. El-hassan and M. Asce, Development and characterization of fly ash – slag blended geopolymer mortar and lightweight concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 30, 1–14, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002209](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002209).
- [85] M. Sitarz, M. Urban and I. Hager, Rheology and mechanical properties of fly ashbased geopolymer mortars with ground granulated blast furnace slag addition. *Energies*, 13 (10), 2639, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13102639>.
- [86] N.M. Altwair, M.M. Johari and S.S. Hashim, Flexural performance of green engineered cementitious composites containing high volume of palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 37, 518–525, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.003>.
- [87] M. Şahmaran, H.E. Yücel, S. Demirhan, M.T. Arik and V.C. Li, Combined effect of aggregate and mineral admixtures on tensile ductility of engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 109 (6), 627–638, 2012.
- [88] M. Şahmaran, M. Lachemi, K.M. Hossain, R. Ranade and V.C. Li, Influence of aggregate type and size on ductility and mechanical properties of engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 106 (3), 308–316, 2009. <https://aperta.ulakbim.gov.tr/record/42333>.
- [89] S.M. Mustakim, S.K. Das, J. Mishra, A. Aftab, T.S. Alomayri, H.S. Assaedi and C.R. Kaze, Improvement in fresh, mechanical and microstructural properties of fly ash- blast furnace slag based geopolymer concrete by addition of nano and micro silica. *Silicon*, 13, 2415–2428, 2021.
- [90] S. Luhar, S. Chaudhary and I. Luhar, Thermal resistance of fly ash based rubberized geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*, 19, 420–428, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.05.025>.
- [91] H.Ö. Öz, H.E. Yücel, M. Güneş and T.Ş. Köker, Fly-ash-based geopolymer composites incorporating cold-bonded lightweight fly ash aggregates. *Construction and Building Materials*, 272, 121963, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121963>.
- [92] M. Sivasakthi, R. Jeyalakshmi, N.P. Rajamane and R. Jose, Thermal and structural micro analysis of micro silica blended fly ash based geopolymer composites. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 499, 117–130, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.07.027>
- [93] V.K.J. Bohra, R. Nerella, S.R.C. Madduru and P. Rohith, Microstructural characterization of fly ash based geopolymers. *Materials Transactions*, 2020.
- [94] G.M. Kim, et al., Heavy metal leaching, CO₂ uptake & mechanical characteristics of carbonated porous concrete with alkali-activated slag & bottom ash. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 9 (3), 283–294, 2015. <https://doi.org/10.1007/s40069-015-0111-x>.
- [95] M. Ben Haha, B. Lothenbach, G. Le Saout and F. Winnefeld, Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag – Part I: Effect of MgO. *Cement and Concrete Research*, 41, 955–963, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.002>.
- [96] A. Gruskovnjak, B. Lothenbach, F. Winnefeld, B. Münch, R. Figi, S. Ko, M. Adler and U. Mäder, Quantification of hydration phases in supersulphated cements : review and new approaches. *Advances in Cement Research*, 23 (6), 265–275, 2011. <https://doi.org/10.1680/adcr.2011.23.6.265>.
- [97] E. Kanazaki, Thermal behavior of the hydrotalcite-like layered structure of Mg and Al-layered double hydroxides with interlayer carbonate by means of in situ powder HTXRD and DTA/TG. *Solid State Ionics*, 106 (3–4), 279–284, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(97\)00494-3](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(97)00494-3).
- [98] K. Rozov, U. Berner, C. Taviot-Gueho, F. Leroux, G. Renaudin, D. Kulik and L.W. Diamond, Synthesis and characterization of the LDH hydrotalcite–pyroaurite solid-solution series. *Cement and Concrete Research*,

- 40, 1248–1254, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.031>.
- [99] B. Lothenbach and A. Gruskovnjak, Hydration of alkali-activated slag: thermodynamic modelling. *Advances in Cement Research*, 19, 81–92, 2007. <https://doi.org/10.1680/adcr.2007.19.2.81>.
- [100] E. Adesanya, K. Ohenoja, A. Di Maria, P. Kinnunen and M. Illikainen, Alternative alkali-activator from steel making waste for one-part alkali-activated slag. *Journal of Cleaner Production*, 274, 123020, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123020>.
- [101] P. Zhang and Q.-F. Li, Durability of high performance concrete composites containing silica fume. *Proceedings of the IMechE*, 227, 343–349, 2013. <https://doi.org/10.1177/1464420712460617>.
- [102] R.B. Barnes, Infrared spectra and organic chemistry. *Review of Scientific Instruments*, 7, 265–271, 1936. <https://doi.org/10.1063/1.1752148>.
- [103] W.K.W. Lee and J.S.J. van Deventer, Use of infrared spectroscopy to study geopolymerization of heterogeneous amorphous aluminosilicates. *American Chemical Society*, 19 (21), 8726–8734, 2003. <https://doi.org/10.1021/la026127e>.
- [104] P.I.K. Onorato, M.N. Alexander, C.W. Struck, G.W. Tasker and D.R. Uhlmann, Bridging and non bridging oxygen-atoms in alkali aluminosilicate glasses. *Journal of the American Ceramic Society*, 68, 148–150, 1985. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1985.tb15223.x>.
- [105] T. Takei, K. Kato, A. Meguro and M. Chikazawa, Infrared spectra of geminal and novel triple hydroxyl groups on silica surface. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 150, 77–84, 1999.
- [106] A. Palomo, M.W. Grutzeck and M.T., Blanco Alkali-activated fly ashes: a cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29 (8), 1323–1329, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9).
- [107] D. Ren, C. Yan, P. Duan, Z. Zhang, L. Li and Z. Yan, Durability performances of wollastonite, tremolite and basalt fiber-reinforced metakaolin geopolymer composites under sulfate and chloride attack. *Construction and Building Materials*, 134, 56–66, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.103>.
- [108] J. Xiang, L. Liu, Y. He, N. Zhang and X. Cui, Early mechanical properties and microstructural evolution of slag/metakaolin-based geopolymers exposed to karst water. *Cement and Concrete Composites*, 99, 140–150, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.009>.
- [109] C.A. Rosas-Casarez, S.P. Arredondo-Rea, A. Cruz-Enríquez, R. Corral-Higuera, M.J. Pellegrini-Cervantes, J.M. Gómez-Soberón and T.J. Medina-Serna, Influence of size reduction of fly ash particles by grinding on the chemical properties of geopolymers. *Applied Sciences*, 8 (365), 2018.
- [110] F. Puartes, M. Palacios and T. Vazquez, Carbonation process of alkali-activated slag mortars. *Journal Material Science*, 41, 3071–3082, 2006. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-005-1821-2>.
- [111] E. Kapeluszna, Ł. Kotwica, A. Różycka and Ł. Gołek, Incorporation of Al in C-A-S-H gels with various Ca/Si and Al/Si ratio: microstructural and structural characteristics with DTA/TG, XRD, FTIR and TEM analysis. *Construction and Building Materials*, 155, 643–653, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.091>.
- [112] Y.Y. Ge, X.M. Cui, Y. Kong, Z.L. Li, He, Y. and Q.Q. Zhou, Porous geopolymeric spheres for removal of Cu(II) from aqueous solution: synthesis and evaluation. *Journal of Hazardous Materials*, 283, 244–251, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.09.038>.
- [113] M. Palacios and F. Puartes, Effect of carbonation on alkali-activated slag paste. *Journal of the American Ceramic Society*, 89 (10), 3211–3221, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01214.x>.
- [114] V.F. Barbosa, K.J. MacKenzie and C. Thaumaturgo, Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. *International Journal of Inorganic Materials*, 2 (4), 309–317, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1466-6049\(00\)00041-6](https://doi.org/10.1016/S1466-6049(00)00041-6).
- [115] W. Mozgawa and J. Deja, Spectroscopic studies of alkaline activated slag geopolymers. *Journal of Molecular Structure*, 924–926 (30), 434–441, 2009.
- [116] P. Yu, R.J. Kirkpatrick, B. Poe, P.F. McMillan and X.D. Cong, Structure of calcium silicate hydrate (C-S-H): near-, mid-, and far-infrared spectroscopy. *Journal of the American Ceramic Society*, 82 (3), 742–748, 1999.
- [117] N. Li, N. Farzadnia and C.J. Shi, Microstructural changes in alkali-activated slag mortars induced by accelerated carbonation. *Cement and Concrete Research*, 100 (9), 214–226, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.07.008>.

