



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin eğilme özellikleri

## *Flexural characteristics of engineered cementitious composites*

Yazar(lar) (Author(s)): Serhat DEMİRHAN<sup>1</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-5448-9495

**To cite to this article:** Demirhan S., “Tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin eğilme özellikleri”, *Journal of Polytechnic*, 27(4): 1365-1374, (2024).

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz:** Demirhan S., “Tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin eğilme özellikleri”, *Politeknik Dergisi*, 27(4): 1365-1374, (2024).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.1224004

# Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitlerin Eğilme Özellikleri

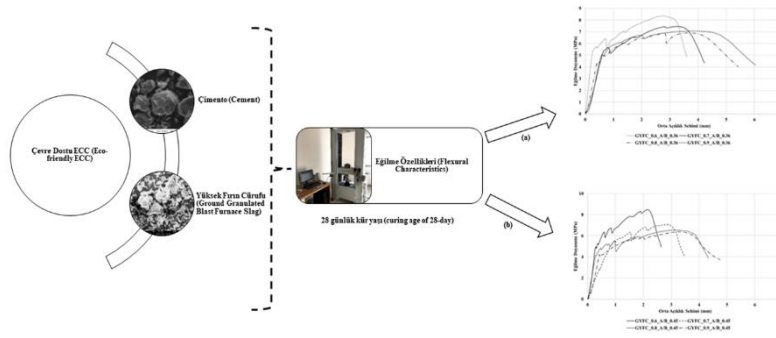
## Flexural Characteristics of Engineered Cementitious Composites

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Çok yüksek hacimlerde ikame edilen yüksek fırın cürufunun ve agrega-bağlayıcı oranının Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitlerin eğilme parametrelerine etkisi / The effect of blast furnace slag utilized with very high volumes and aggregate to binder ratio on flexural parameters of Engineered Cementitious Composites.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Çalışma safhaları ve gözlemlenen sonuçlar. / Study phases and observed results.



Şekil. Deneysel çalışmanın grafik özeti /Figure. Graphical abstract of experimental study

### Amaç (Aim)

Mineral katkı ve agrega kullanım oranlarının tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin eğilme özellikleri üzerine olan etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. / It was aimed to examine the effects of mineral admixture and aggregate utilization rates on the flexural properties of Engineered Cementitious Composites.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Toplam sekiz karışımdan üretilen kiriş numunelerinin 28 günlük küür yaşı için dört noktalı eğilme testi yapılmıştır. / A four-point bending test was performed for the 28-day curing age of beam samples produced from a total of eight mixtures.

### Özgünlük (Originality)

Tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin eğilme özelliklerinin incelenmesi, çalışmanın özgünlüğünü göstermektedir. / Examining the flexural properties of Engineered Cementitious Composites indicates the originality of the experimental study.

### Bulgular (Findings)

GYFC-bağlayıcı ve agrega-bağlayıcı oranı arttıkça eğilme dayanımında azalış gözlemlenirken diğer parametrelerde farkı seviyelerde sonuçlar elde edilmiştir. / As the ratio of GYFC-binder and aggregate-binder increased, a decrease was observed in flexural strength, while results were obtained at different levels in other parameters.

### Sonuç (Conclusion)

Deneysel araştırma değişkenlerinin eğilme parametreleri üzerine belirgin seviyelerde etkileri gözlemlenmiştir. / Significant effects of experimental research variables on bending parameters were observed.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitlerin Eğilme Özellikleri

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Serhat DEMİRHAN\*

Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Batman Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 24.12.2022 ; Kabul/Accepted : 14.06.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 31.08.2023)

## ÖZ

Beton gibi çimento esaslı malzemeler gevrek malzemeler olup, çekme dayanımına erişildiğinde mikroyapısal çatlaklar oluşur. Yapılarda çatlak oluşumu, agresif kimyasal bileşenlerin çimento esaslı malzemeye kolayca nüfuz edip geçmesine izin vererek malzemenin servis ömrünü azaltmaktadır. Çimento esaslı malzemelerin yük etkisi altındaki gevrek davranışının olumsuz yönlerinin üstesinden gelmek için birçok girişimde bulunulmuştur. Sünekliği yüksek seviyelerde arttırılmış olan Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (ECC) bu girişimlerden biridir. ECC, mekanik yükleme altında yüksek süneklik gösteren ve yüksek hasar toleransı karakteristiğine sahip yüksek performanslı lif takviyeli çimento esaslı bir kompozit türüdür. Mevcut deneysel çalışmada, yüksek oranda granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) içeren ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergileyen tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin eğilme tokluğundaki değişimin incelenmesi hedeflenmiştir. Böylece, üretilen karışımların 28 günlük kür yaşı için hem yüksek fırın cürufu hem de agrega kullanım oranının eğilme tokluğu üzerine olan etkisi değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, GYFC-bağlayıcı oranı 0.6, 0.7, 0.8 ve 0.9 ve agrega-bağlayıcı oranı ise 0.36 ve 0.45 olan toplam sekiz farklı karışım üretilmiştir. Tüm karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0.3 ve en büyük agrega tane boyutu ise 600 µm olarak seçilmiştir. Test sonuçları, GYFC ikame oranı ve agrega-bağlayıcı oranındaki artışla sırasıyla eğilme tokluğunda azalma ve artış elde edildiğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Eğilme tokluğu, granüle yüksek fırın cürufu, tasarlanmış çimento esaslı kompozitler.

## Flexural Characteristics of Engineered Cementitious Composites

### ABSTRACT

Cement-based materials such as concrete are brittle materials, and microstructural cracks occur when tensile strength is exceeded. The formation of cracks in the structures allows the aggressive chemical components to easily penetrate and pass into the cement-based material, thus reducing the durability of the material. Many attempts have been made to overcome the negative aspects of the brittle behavior of cementitious materials under load. Engineered Cementitious Composites (ECC) with highly increased ductility is one such initiative. ECC is a high-performance PVA fiber-reinforced cementitious composite with high ductility and high damage tolerance characteristics under mechanical loading. In the current experimental study, it was aimed to investigate the change in flexural toughness of engineered cementitious composites (ECC) containing high volume of ground granulated blast furnace slag (GGBFS). Thus, the effect of both utilization rate of GGBFS and aggregate on the flexural toughness of the designed mixtures was evaluated for the curing age of 28 day. Accordingly, a total of eight different mixtures with GGBFS to binder ratios of 0.6, 0.7, 0.8 and 0.9 and aggregate to binder ratios of 0.36 and 0.45 were produced. The water to binder ratio was kept constant as 0.3 and the maximum particle size of aggregate was 600 µm. Test results showed that a decrease and an increase in flexural toughness were obtained with the increase in both GYFC substitution ratio and aggregate-binder ratio, respectively.

**Keywords:** Flexural toughness, ground granulated blast furnace slag, engineered cementitious composites.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tasarlanmış çimento esaslı kompozitler (Engineered Cementitious Composites, ECC) genel olarak çimento, mineral katkı, kuvars (silis) kumu, içilebilir su, PVA lif ve hedeflenen taze özelliklerin elde edilmesi için kullanılan yüksek oranda su azaltıcı yeni nesil süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkıdan oluşmaktadır [1, 2]. ECC, şekil değiştirme sertleşmesi sergileyen ve çok yüksek deformasyon kapasitesine sahip özel bir lifli kompozit türüdür [3, 4]. Mikromekanik prensiplere göre tasarlanan ECC [5], eksenel çekme gerilmesi altında %3-

5 aralığında eksenel çekme şekil değiştirme kapasitesine sahip olduğundan [6] ve eğilme etkisi altında yüksek performans sergilediğinden dolayı yüksek düzeyde süneklik ve tokluk sağlamaktadır. ECC'nin belirtilen eşsiz mühendislik özelliklerinin elde edilebilmesi için sertleşmiş çimento hamuru, PVA lifi ve lif-matris ara yüz özelliklerinin çok hassas bir şekilde tasarlanması gerekmektedir [7, 8, 9]. Silis dumanı, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) ve uçucu kül gibi endüstriyel yan ürün olan mineral katkılar veya puzolanik özelliğe sahip olan doğal mineral katkılarla ECC'nin üretimi sağlanabilir [10, 11] ve daha çevre dostu bir kompozitin üretimi mümkün kılınarak CO<sub>2</sub> emisyonu çok yüksek seviyelerde düşürülebilmektedir

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : [drserhatdemirhan@gmail.com](mailto:drserhatdemirhan@gmail.com);  
[serhat.demirhan@batman.edu.tr](mailto:serhat.demirhan@batman.edu.tr)

[12, 13]. Yüksek oranda mineral katkı kullanımı erken dönem dayanım gelişimi başta olmak üzere pek çok temel mühendislik özelliklerini etkilediğinden dolayı mineral katkı oranı çok yüksek seviyelere çıkarılmamaktadır [14, 15, 16, 17]. Nitekim literatürde farklı mineral katkı kullanımıyla tasarlanan ECC'lerde belirli seviyelere kadar mineral katkı kullanılmıştır [18, 19, 20, 21]. ECC tasarımında mineral katkı ikamesindeki artış kompozitin kırılma tokluğunun azalması ile neticelendiği için ECC'nin mikromekanik tabanlı tasarım yaklaşımına göre bu durum çoklu mikro çatlak dağılımı [22, 23] ve daha üstün bir sünek davranışın sergilenmesi için önemli bir parametre olup, yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıkların tasarıma dahil edilmesi matris kırılma tokluğunun azalması ile neticelendiğinden dolayı yüksek oranda kullanımları büyük önem arz etmektedir [24]. Hem yüksek puzolanik bağlayıcılık özelliği hem de hidrolik bağlayıcılık özelliği itibarıyla GYFC diğer mineral katkılardan daha üstün özelliklere sahiptir [12, 13, 25, 26,]. Bu durumun bir neticesidir ki, TS EN 197-1'e [27] göre CEM III tipi çimentoda CEM III-C için GYFC ikame oranı %95'e kadar izin verilebilir bir aralık olarak karşımıza çıkmaktadır [15].

Lifli kompozitlerde eğilme özellikleri, hem yapısal hem de sismik tasarımda en önemli tasarım parametrelerinden biridir. Lifli kompozitlerden olan ECC, yüksek süneklik ve deformasyon kapasitesine sahip olduğundan dolayı yüksek eğilme tokluğu sergilemektedir [11, 28, 29]. ECC, mikro-mekanik tasarım yöntemleriyle tasarlandığı için her bir karışım bileşeninin farklı düzeylerde performansa etkisi olmaktadır [30, 31]. ECC'nin eğilme parametreleri (eğilme dayanımı, orta açıklık sehim ve eğilme tokluğu); PVA lifi boy ve narinlik oranına, sertleşmiş çimento hamuru fazına ve PVA lifi-matris ara yüz özelliklerine yüksek düzeyde bağlıdır. Performansa katkı sağlayan bu parametrelerden, PVA lifi hariç, sertleşmiş çimento hamuru karakteristiği ve lif-matris ara yüz özellikleri hem agregaya bağlayıcı oranına hem de ikame edilen mineral katkı türüne yüksek seviyelerde bağlı olduğundan dolayı, literatürdeki boşluğun da kapatılması adına farklı agregaya bağlayıcı oranı ve çok yüksek oranda mineral katkı oranına bağlı olarak karışımların tasarlanması hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, mevcut çalışmada, bu etkileyici parametrelerden hem çimento hamuru fazını hem de lif-matris ara yüz özelliklerini etkileyen faktörlerden olan mineral katkı ikame oranı ve agregaya-bağlayıcı oranının ECC'nin eğilme özellikleri üzerine olan etkisi incelenmiştir. Literatürde çok yüksek hacimlere kadar (cüruf-bağlayıcı oranı: 0.9) granüle yüksek fırın cürufu ikame edilerek ECC karışımlarının eğilme özelliklerinin incelenmemiş olması mevcut çalışmanın özgünlüğünü göstermektedir.

ECC'de yüksek süneklik elde etmek, dayanım ve enerji yutma kapasitesi gibi kriterleri sağlamak için ECC kompoziti mikro mekanik tabanlı bir malzeme tasarımı ile üretildiğinden dolayı yüksek oranda agregaya içeriği ve nispeten daha iri agregaya varlığında matris tokluğunda artış eğilimi gözlemlenmektedir. Bu durum, hem çatlak

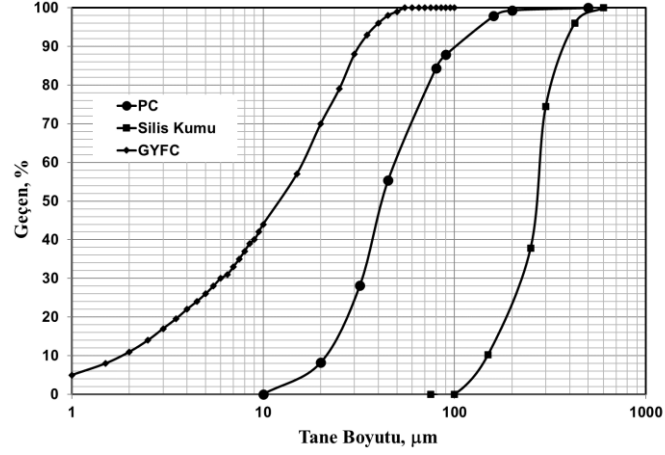
başlangıcını geciktirmekte hem de çatlakların yayılmasını önleyerek ECC'nin çekme sünekliğinde bir azalma ile neticelenir. Ayrıca, ortalama lif aralığına nispeten daha büyük bir tane boyutuna sahip agregaların eklenmesi, liflerin topaklaşmasına neden olmaktadır. Öte yandan, yüksek oranda mineral katkıların bağlayıcı sistemde kullanılması, özellikle uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıkların yüksek oranlarda dahil edilmesi, matris tokluğunu azaltabileceği ve eksenel gerilme sünekliği açısından ECC'nin sürdürülebilirliğini geliştirebileceği bilinmektedir. Bu nedenle, hem agregaya miktarı hem de agregaya tane boyutundaki artış matris tokluğunda artış ile neticeleneceğinden dolayı ECC üretiminde yüksek hacimde mineral katkı kullanımıyla toklukta sağlanacak azalma ile potansiyel olarak bu durum dengelenebilir. Mevcut deneysel çalışmada, normal Portland çimentosu yerine çok yüksek oranlarda ikame edilebilen GYFC'nin ve kuvars kumu kullanım oranının ECC'nin eğilme özellikleri (Eğilme dayanımı, orta açıklık sehim ve eğilme tokluğu) üzerine olan etkisinin incelenmesini amaçlanmaktadır. Hedeflenen bu amaç doğrultusunda, önceki çalışmalarla da [3] kıyas etmek amacıyla 0.36 ve 0.45 olmak üzere iki farklı agregaya-bağlayıcı oranı seçilmiştir. Ayrıca, puzolanik malzemeler içerisinde nispeten daha yüksek oranlarda çimento yerine ikame edilebilen GYFC de bağlayıcı malzemenin %60, %70, %80 ve %90'nına kadar kullanılmak üzere ECC'nin eğilme performansına olan etkisi incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

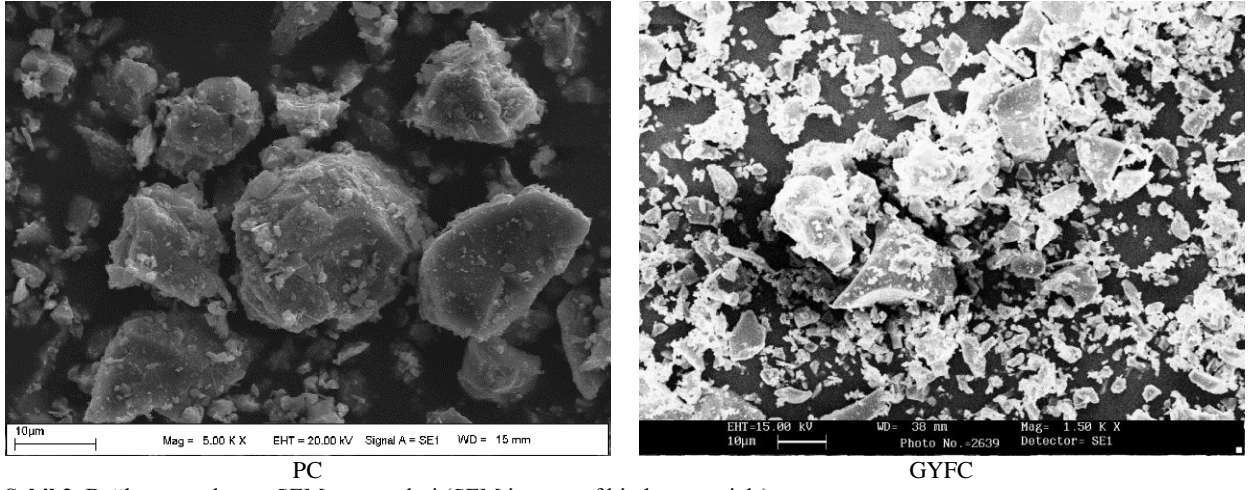
TS EN 197-1 (2012) şartlarını sağlayan CEM I 42.5 Normal Portland Çimentosu ve Karabük Demir Çelik Fabrikasından temin edilmiş granüle yüksek fırın cüruf bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Tane boyutu dağılımları, taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, bağlayıcı malzeme fiziksel ve kimyasal özellikleri sırasıyla Şekil 1, Şekil 2 ve Tablo 1'de verilmiştir. En büyük tane boyutu 0,6 mm olan silis kumu ince agregaya olarak üretimlerde kullanılmıştır. Silis kumu tane boyutu dağılımı Şekil 1'de verilmiştir. Lif-matris ara yüzey bağ kuvvetini azaltmak için hidrofobik yağla kaplanmış (ağırlıkça %1.2) olan PVA lifi hacimce %2 oranında karışımlarda kullanılmıştır. PVA lifinin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Üretilen karışımların yeterli işlenebilirliğe erişmesi ve liflerin matris içine homojen bir dağılım sağlaması adına BASF Yapı Kimyasallarından temin edilen MasterGlenium 51 hiper akışkanlaştırıcı (HA), kimyasal katkı olarak kullanılmıştır.

GYFC-bağlayıcı oranı 0.6, 0.7, 0.8 ve 0.9, Su-bağlayıcı oranı 0.3 ve agregaya-bağlayıcı oranları 0.36 ve 0.45 olan toplam sekiz farklı karışım tasarlanmıştır. Üretilen karışımların karışım miktarları Tablo 3'te verilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere, her karışım harf ve rakamlardan oluşan bir kod ile ifade edilmekte olup, kodlar karışım bileşenlerine göre değişkenlik göstermektedir. Örneğin; GYFC\_0.6\_A/B\_0.36 kodlu birinci karışımındaki GYFC\_0.6, GYFC/Bağlayıcı oranını

ifade ederken, A/B 0.36 kodu ise Agrega/Bağlayıcı oranını ifade etmektedir.



Şekil 1. Silis kumu ve bağlayıcı malzeme tane boyutu dağılımı (Particle size distribution of silica sand and binder material)




Şekil 2. Bağlayıcı malzeme SEM görüntüleri (SEM images of binder materials)

Tablo 1. Bağlayıcı malzeme fiziksel ve kimyasal bileşenleri (Physical and chemical components of binder materials)

Kimyasal Kompozisyon, %	PC	GYFC
SiO <sub>2</sub>	19.23	39.62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.51	10.62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.76	1.40
MgO	1.82	6.11
CaO	62.90	37.43
SO <sub>3</sub>	2.91	0.79
Na <sub>2</sub> O	0.41	0.27
K <sub>2</sub> O	0.65	0.96
Kızdırma kaybı	3.45	2.80
<b>Fiziksel Özellikler</b>		
Özgül ağırlık, gr/cm <sup>3</sup>	3.12	2.90
Blaine özgül yüzey alanı, cm <sup>2</sup> /gr	3850	4320

**Tablo 2.** PVA lifi fiziksel ve mekanik özellikleri (Physical and mechanical properties of PVA fiber) [3]

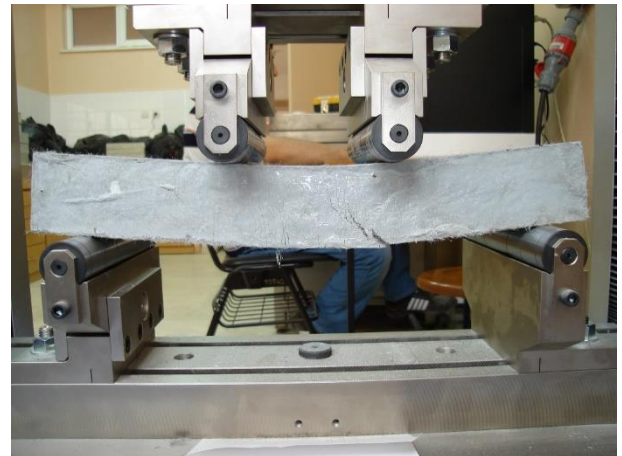
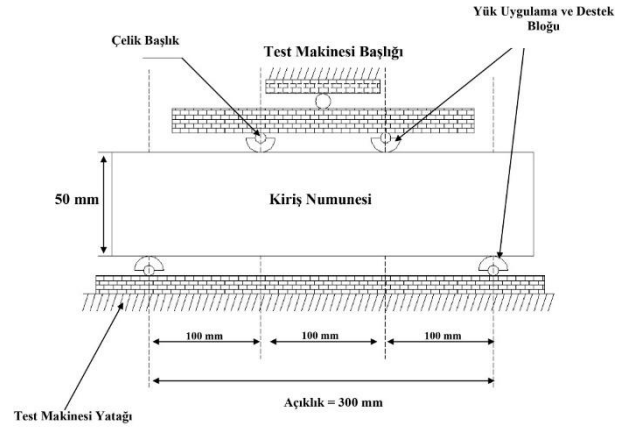
	Nominal Dayanım (GPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Çap (µm)	Uzunluk (mm)	Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )
	1.62	42.8	39	8	1.3

**Tablo 3.** Karışım oranları (kg/m<sup>3</sup>) (Mixture proportions)

Karışım #	Karışım ID	PC	GYFC	GYFC/B*	Su/B*	Agrega	A/B*	HA	PVA**
1	GYFC_0.6_A/B_0.36	501	752			455	0.36	5.6	
2	GYFC_0.6_A/B_0.45	487	717	0.6		537	0.45	5.5	
3	GYFC_0.7_A/B_0.36	372	871			451	0.36	4.7	
4	GYFC_0.7_A/B_0.45	356	832			535	0.45	4.2	
5	GYFC_0.8_A/B_0.36	240	998		0.3	445	0.36	5.0	26
6	GYFC_0.8_A/B_0.45	238	955	0.8		538	0.45	4.9	
7	GYFC_0.9_A/B_0.36	122	1115			442	0.36	3.1	
8	GYFC_0.9_A/B_0.45	117	1065	0.9		527	0.45	3.2	

\*Bağlayıcı malzemeyi ifade etmektedir. \*\* Hacimce %2 oranında kullanılmaktadır.

ECC karışımlarının üretilmesi için 25 lt kapasiteli mikser kullanılmıştır. Üretimde, öncelikli olarak katı bileşenler bir dakika boyunca 100 rpm’de karıştırılmış ve kimyasal katkıların içinde karıştırıldığı su, kuru karışıma eklenerek bir dakika boyunca 150 rpm’de hepsi birlikte karıştırılmıştır. En son aşamada, taze karışım ilave iki dakikalık süre zarfında 300 rpm’de karıştırıldıktan sonra PVA lifleri yavaşça karışım içine eklenmiştir. PVA lifleri eklendikten sonra ilave 3 dakikalık karıştırma süresiyle 300 rpm’de taze karışım karıştırılmaya devam edilmiştir. Üretilen taze ECC karışımları boyutları 360 x 75 x 50 mm olan prizmatik kalıplara eklenerek 24 saat sonrasında kalıptan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler, ilk 7 günlük kür yaşı için hava geçirimsiz poşetlerde ve laboratuvar koşullarında muhafaza edilirken, 7 günlük hava geçirimsiz poşetteki kür koşulları sonrasında relatif nem oranı  $50 \pm 5\%$  ve ortam sıcaklığı  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  olan koşullarda 28 günlük test yaşına kadar dışarıda bekletilmiştir. 28 günlük kür yaşında, kiriş açıklığı 300 mm olan numuneler 0.005 mm/sn. yükleme hızıyla 100 kN kapasiteli Shimadzu marka universal test cihazı ile Şekil 3’te şematize edildiği şekliyle test edildi. Her kür yaşı için dört adet kiriş numunesi test edilmiştir. Elde edilen veri yardımıyla her bir numune için orta açıklık sehim değerine mukabil kuvvet grafiği çizildi. Numunelerin eğilme tokluğu değerleri ise ASTM C 1609’a [32] göre hesaplanmıştır.

**Şekil 3.** Deney düzeneği (The experimental setup)



### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1 Yük-Orta Açıklık Sehimi Eğrileri, Eğilme Dayanımı ve Orta Açıklık Sehimi (Load-Mid-Span Deflection Curves, Flexural Strength and Mid-Span Deflection)

ECC numunelerinin hem agregası kullanım oranı hem de GYFC ikame oranına bağlı olarak eğilme özelliklerinde meydana gelen değişimin incelenmesi amacıyla mevcut deneysel çalışma kapsamında üretilen ECC numunelerine dört noktalı eğilme testi uygulanmıştır [32]. Eğilme etkisi altında Karışım #7 için çoklu çatlak oluşumunu ifade eden numune görseli Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 5 ve 6, üretilen numunelerin 28 günlük kür yaşı için eğilme dayanımı-orta açıklık sehimi değerleri eğrilerini göstermektedir. Yüksek performanslı özel bir lifli kompozit türü olan ECC'nin eğilme etkisi altındaki davranışının tarif edilmesi ve tanımlanmasında (i) şekil değiştirme sertleşmesi ve (ii) şekil değiştirme yumuşaması gibi iki temel kavram kullanılmaktadır. Şekil değiştirme sertleşmesinin gözlemlenmesi numune eğilme dayanımı ve bu dayanıma karşılık gelen orta açıklık sehimi değerinin sırasıyla ilk çatlak dayanımı ve bu dayanıma karşılık gelen orta açıklık sehiminden büyük olarak elde edilmesiyle elde edilmektedir. Şekil 5 ve 6'da görüldüğü üzere tüm ECC numunelerinde şekil değiştirme sertleşmesi gözlemlenirken plastik deformasyon bölgesi boyunca sünek bir davranış sergilenmiştir.

Şekil 7'de ise 28 günlük kür yaşı için sırasıyla (a) eğilme dayanımı ve (b) orta açıklık sehimi değerleri değişimleri karışımlara bağlı olarak verilmiştir. Şekil 5-7'de verilen eğrilerden ve sonuçlardan görüldüğü üzere, hem GYFC ikame oranı artışıyla hem de agregası-kullanıcı oranı artışıyla birlikte ilk çatlak dayanımında düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum, mineral katkı ve agregası kullanım oranı artışıyla birlikte PVA lifi ve matris arasındaki sürtünme kuvvetinin artmasıyla birlikte kimyasal bağlanma etkisinin azalması sonucunda ilk çatlak dayanımında düşüş ile neticelenmesine dayandırılabilir. En yüksek ilk çatlak dayanımı değeri GYFC\_0.6\_A/B\_0.36 karışımında 5,37 MPa olarak elde edilirken en düşük değeri ise GYFC\_0.8\_A/B\_0.45 karışımında 4,09 MPa olarak tespit edilmiştir. Şekil 5-7 incelendiğinde, agregası-kullanıcı oranı artışıyla birlikte hem eğilme dayanımında hem de orta açıklık sehimi değerinde genel olarak düşüş elde edilirken GYFC kullanım oranı artışıyla birlikte hem eğilme dayanımında hem de orta açıklık sehimi değerlerinde belirgin bir düşüş elde edilmiştir. Bu durumla elde edilen bulgular, literatürle benzer sonuçları göstermektedir [3].

#### 3.2. Eğilme Tokluğu (Flexural Toughness)

Lifli kompozitlerde eğilme tokluğu; lif karakteristiği,

sertleşmiş çimento hamuru ve lif-matris arayüz özelliklerine bağlı olup, lifli kompozitlerin enerji yutma kapasitelerini temsil eden bir parametredir. Eğilme etkisi altındaki kompozitlerin yük-orta açıklık sehimi grafiği altında kalan alan eğilme tokluğunu ifade etmektedir. Literatürde, eğilme tokluğunun belirlenmesinde referans alınan pek çok yöntem bulunmaktadır [33]. Eğilme tokluğu hesaplanmasında, bu metodların bir kısmında (ACI Committee 544, ASTM C1018 ve CECS 13:89) ilk çatlak noktası belirleyici bir parametre olarak değerlendirilmeye dahil edilirken diğer metodlarda ise (ASTM C1069, JG/T 472-2015 ve JSCE SF-4) ilk çatlak noktasının belirlenmesine bağlı olmadan değerlendirme yapılmaktadır [3]. Lifli kompozitlerde lif karakteristiği, lif ve agregası kullanım oranı gibi pek çok faktörden dolayı lifler hedeflenen düzeyde bir dağılım sergileyemediğinden dolayı aynı karışımlardan elde edilen numunelerden elde edilen sonuçlarda bile farklılık oluşabilmektedir [34]. Bu durumun bir neticesi olarak, ilk çatlak dayanımında varyasyonlar gözlemlenmekte ve özellikle ilk çatlak noktasını referans alan metodlardaki sonuçlarda değerlendirme hatalarını oluşturabilmektedir [33]. Bu nedenle, yani ilk çatlak noktasının belirlenmesindeki handikaplardan dolayı, mevcut çalışmada ASTM C1609/C1609M-19a standardında belirtilen yöntem referans alınmıştır. Böylece, standart gereğince açıklık mesafesinin (L) 1/150'sine kadar yani yaklaşık 2 mm'lik ( $304/150=2,03$  mm) orta açıklık sehimi değerine kadar referans alınarak tokluk değeri belirlenmiştir. Literatürde uçucu kül kullanımını ile yapılan bir çalışmada [33] lif takviyeli betonların eğilme tokluğunun değerlendirilmesi için yaygın olarak kullanılan JSCE-SF4, ASTM C1609 ve çatlak sonrası dayanım (PCS) yöntemleri, ECC yüksek deformasyon gösterdiği için [35] ECC'nin tokluğunun değerlendirilmesinde geçerli bulunmamış olsa da, mevcut çalışmada uçucu küle kıyasen nispeten daha yüksek dayanım ve daha düşük eğilme performansı sergileyecek olan yüksek fırın cürufu kullanıldığı için bu durum göz ardı edilmiştir. Her bir karışım için yük-orta açıklık sehimi eğrisi altında kalan alanlar ASTM C1609'a göre hesaplanmış ve eğilme toklukları Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8'de görüldüğü üzere, agregası-kullanıcı oranı 0.36 olan karışımlarda, genel olarak, GYFC kullanım oranı arttıkça eğilme tokluğunda düşüş tespit edilirken bu durum agregası-kullanıcı oranı 0.45 olan karışımlarda nispeten artış ile sonuçlanmıştır. Ortalama lif aralığına kıyasen nispeten daha iri bir tane boyutuna sahip agregaların matrise ilave edilmesi veya agregası oranının artması, liflerin toplaşması ile sonuçlanmakta ve matris içinde zayıf bir lif dağılımı oluşturmaktadır [24].

Bir başka deyişle, agregası kullanım oranı artışıyla birlikte liflerin dağılımındaki olumsuz durumlar ve nispeten daha yüksek topraklaşma ihtimali gibi nedenlerden dolayı bu durum, yani agregası kullanım oranı ve eğilme tokluğu

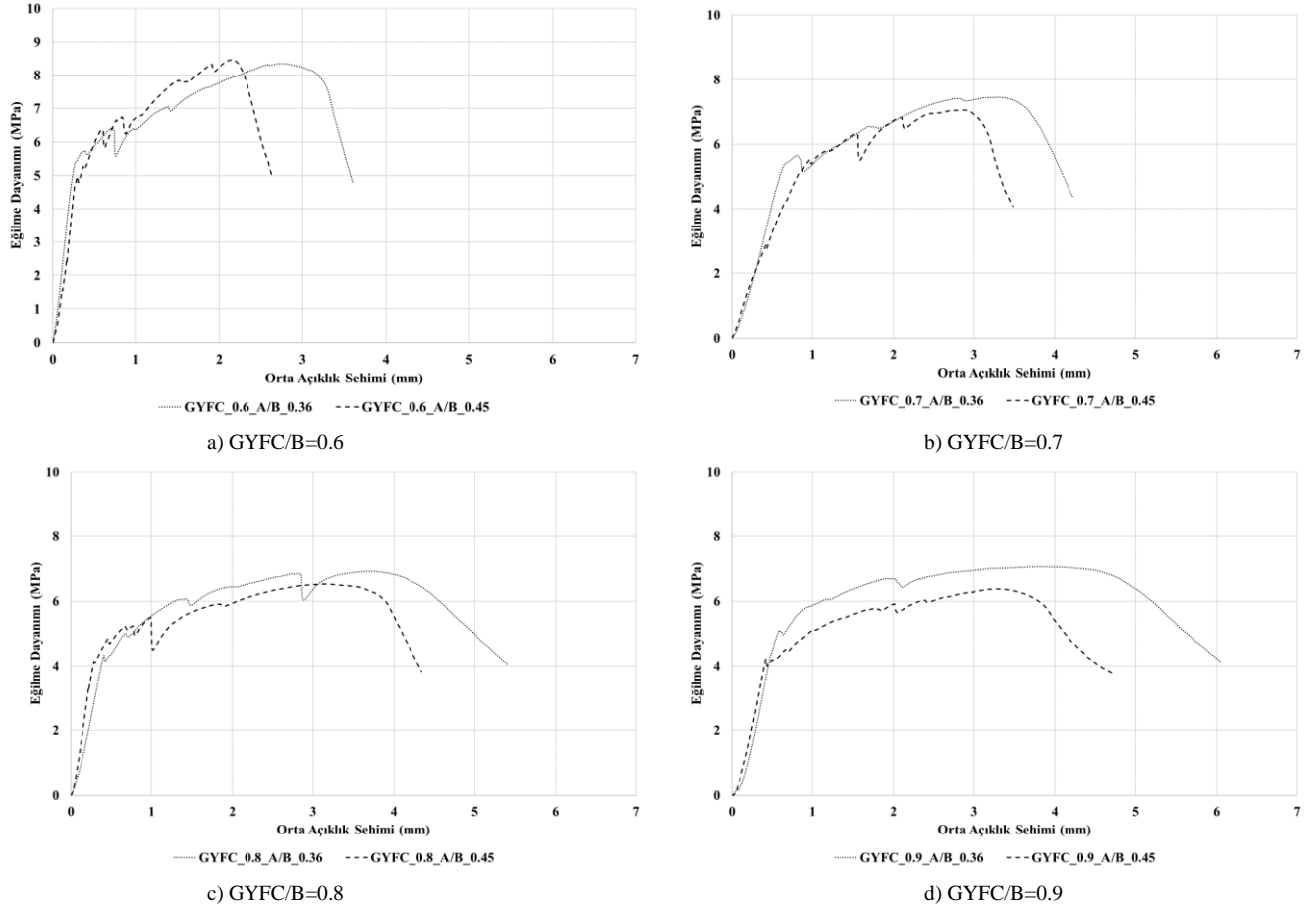
arasındaki ters orantı, gözlemlenmiş olabilir. En yüksek eğilme tokluğu değeri GYFC\_0.9\_A/B\_0.45 karışımında 8,45 N.m olarak elde edilirken en düşük değeri ise GYFC\_0.9\_A/B\_0.36 karışımında 5,44 N.m olarak tespit edilmiştir. Lif-matris arayüz karakteristiği, kompozitlerin eğilme tokluğu karışım parametrelerinin performansına katılım seviyelerine bağlı olarak gelişmektedir. Hem fiziksel (filler etkisi gibi) hem de kimyasal etkiyle gelişen (normal ve ilave hidrasyon ürünleri gibi) lif-matris arayüz içindeki bağ direncini

artıracak etkenler önem arz ettiğinden dolayı yüksek hacimde GYFC'nin ikame edildiği karışımlarda puzolanik reaktiviteye giremeyen bileşen oranı arttığı için lif matris arasındaki bağ enerjisi azalacağından dolayı enerji yutma kapasitesinde de düşüş gözlemlenmiştir. Agrega-bağlayıcı oranı artışıyla birlikte (0.36'dan 0.45'e çıkınca) eğilme tokluğunda genel olarak daha düşük veya yakın bir sonuç gözlemlenmiş olup, bu durum literatürle benzer sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır [3].

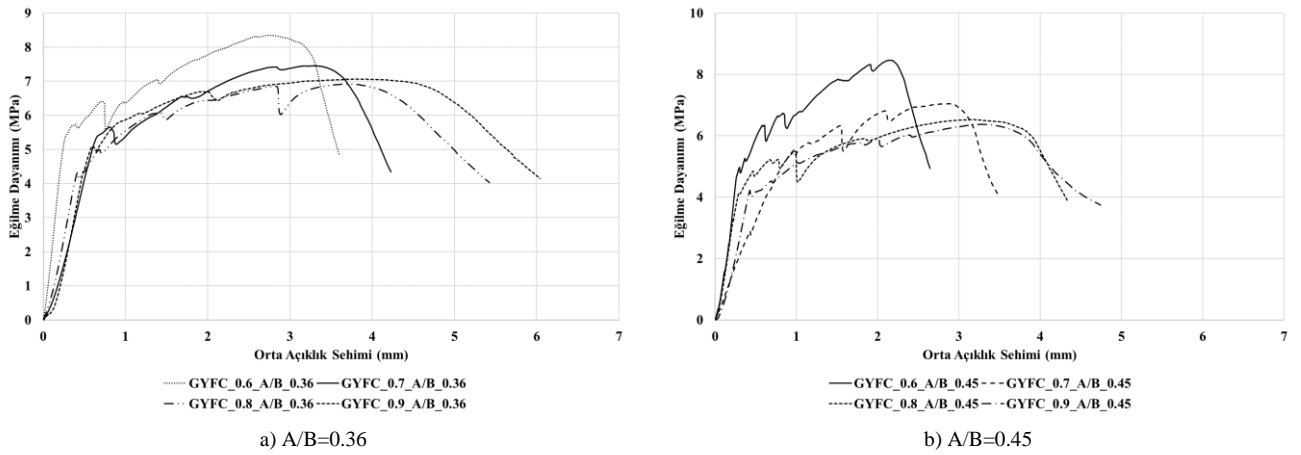


Şekil 4. Karışım #7 için temsili numunelerin çoklu çatlak dağılımı (Multiple crack distribution of representative samples for Mixture #7)

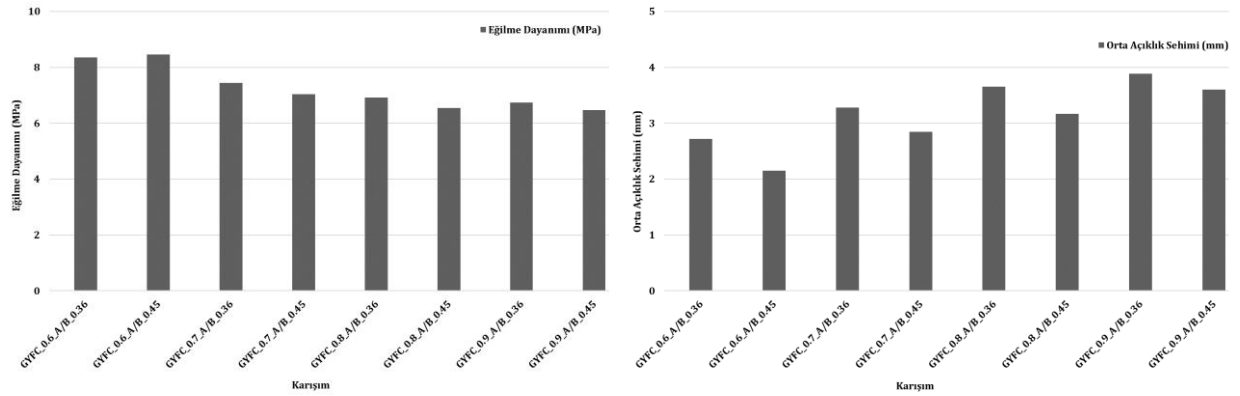




Şekil 5. GYFC/B oranına göre 28 günlük eğilme dayanımı-sehim grafikleri (28-day flexural strength-deflection figures in accordance with GYFC/B ratio)



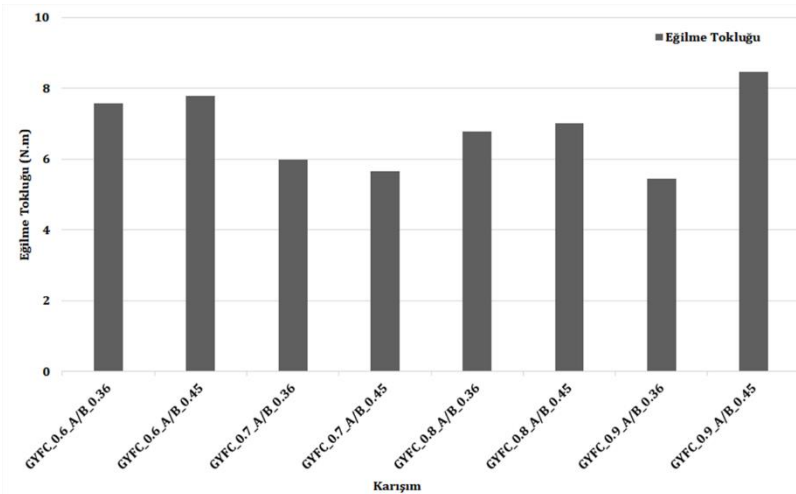
Şekil 6. A/B oranına göre 28 günlük eğilme dayanımı-sehim grafikleri (28-day flexural strength-deflection figures in accordance with A/B ratio)



a) Eğilme Dayanımı

b) Orta açıklık sehimi

Şekil 7. Karışım bazlı (a) eğilme dayanımı ve (b) orta açıklık sehimi sonuçları (Mixture-based a. flexural strength and, b. mid-span deflection results)



Şekil 8. Karışım eğilme tokluğu sonuçları (Flexural toughness results of mixtures)

## 6. SONUÇ (CONCLUSION)

Mevcut deneysel çalışmada, iki farklı agrega-bağlayıcı oranı (0,36 ve 0,45) ve dört farklı granüle yüksek fırın cürufu (GYFC)-bağlayıcı oranı (0,6, 0,7, 0,8 ve 0,9) tasarımı dikkate alınarak sekiz farklı ECC karışımı tasarlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, üretilen ECC karışımlarının 28 günlük kür yaşı için dört noktalı eğilme testine tabi tutulup her bir karışım için eğilme özellikleri (eğilme dayanımı-orta açıklık sehimi eğrileri, eğilme dayanımı, orta açıklık sehimi ve eğilme tokluğu) incelenmiştir. Deneysel analiz neticesinde elde edilen sonuçlara göre aşağıda verilen sonuçlara varılabilir.

- ✓ Tüm üretilen ECC karışımlarında şekil değiştirme sertleşmesi davranışı gözlemlenmiştir.
- ✓ Hem GYFC-bağlayıcı oranı hem agrega-bağlayıcı oranı arttıkça eğilme dayanımında azalış gözlemlenmiştir.
- ✓ Agregabağlayıcı oranı artışı orta açıklık sehimi değerinde azalış ile neticelenirken GYFC-

bağlayıcı oranı artışı daha yüksek orta açıklık sehimi değerleri ile neticelenmiştir.

- ✓ Agregabağlayıcı oranı arttıkça eğilme tokluğunda genel olarak bir artış elde edilmiştir. Bu sonuç, GYFC\_0.6\_A/B\_0.36, GYFC\_0.7\_A/B\_0.36, GYFC\_0.8\_A/B\_0.36 ve GYFC\_0.9\_A/B\_0.36 karışımları için sırasıyla 7.6 N.m, 6.0 N.m, 6.8 N.m ve 5.4 N.m olarak elde edilirken GYFC\_0.6\_A/B\_0.45, GYFC\_0.7\_A/B\_0.45, GYFC\_0.8\_A/B\_0.45 ve GYFC\_0.9\_A/B\_0.45 karışımları için sırasıyla 7.78 N.m, 5.7 N.m, 7.0 N.m ve 8.5 N.m olarak tespit edilmiştir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

**YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)**

**Serhat DEMİRHAN:** Numune üretim, analiz ve makale yazım işlemlerini gerçekleştirmiştir.

**ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)**

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Uygunoğlu T., Topçu İ. B., Şimşek B., Eryeşil Ö. and Al-Turki Y. A., "Çimento esaslı harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinde polivinil alkol (PVA) liflerin etkisi", *Politeknik Dergisi*, 25(1): 29-36, (2022).
- [2] Shoji D., He Z., Zhang D. and Li V. C., "The greening of engineered cementitious composites (ECC): a review", *Construction and Building Materials*, 327: 126701, (2022)..
- [3] Demirhan S., "Effect of different nanosized limestone formations on fiber-matrix interface properties of engineered cementitious composites", *Structural Concrete*, 23(3): 1890-1906, (2022).
- [4] Zhou Y., Xi B., Sui L., Zheng S., Xing F. and Li L., "Development of high strain-hardening lightweight engineered cementitious composites: Design and performance", *Cement and Concrete Composites*, 104: 103370, (2019).
- [5] Lu C., Wang J., Leung C. K., Yao Y. and Yu B., "Micromechanics-based model of single crack propagation in Engineered cementitious composites (ECC)", *Construction and Building Materials*, 369: 130519, (2023).
- [6] Zhang Z., Ji Y., and Ji W., "Durability Performance Investigation for Engineering Fiber Cementitious Composites (ECC)", *Polymers*, 15(4): 931, (2023).
- [7] Li V.C., Wu C., Wang S., Ogawa A. and Saito T., "Interface tailoring for strain-hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC)", *Materials Journal*, 99(5): 463-472, (2002).
- [8] Ma H., Qian S., Zhang Z., Lin Z. and Li V.C., "Tailoring engineered cementitious composites with local ingredients", *Construction and Building Materials*, 101: 584-595, (2015).
- [9] Zhang Z. and Zhang Q., "Matrix tailoring of Engineered Cementitious Composites (ECC) with non-oil-coated, low tensile strength PVA fiber", *Construction and Building Materials*, 161: 420-431, (2018).
- [10] Karakurt C., "Fresh and hardened behaviour of self-compacted concrete with different mineral additives", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(2): 304-309, (2020).
- [11] Turk K. and Nehdi M. L., "Flexural toughness of sustainable ECC with high-volume substitution of cement and silica sand", *Construction and Building Materials*, 270: 121438, (2021).
- [12] ŞENGÜN E., "Farklı kimyasal katkıların mineral katkılı taze ve sertleşmiş harç özelliklerine etkisi", *Politeknik Dergisi*, DOI:10.2339/politeknik.992277, (2022).
- [13] Tuyan M., Soykan K. S., Namal İ. and ÇAKIR Ö. A., "Mineral katkı içeren kalsiyum alüminat çimento esaslı harçların mekanik dayanıklılık, termal ve içyapı özelliklerinin araştırılması", *Politeknik Dergisi*, 23(2): 311-320, (2020).
- [14] Demirhan S., "Combined effects of nano-sized calcite and fly ash on hydration and microstructural properties of mortars", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(6): 1051-1067, (2020).
- [15] Çiftçi M. and Demirhan S., "Effect of nano type and slag replacement level on cement mortars", *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(2): 482-496, (2021).
- [16] Demirel Ö. and Demirhan S., "Mikronize kalsit içeren yüksek hacimde uçucu kül katkılı çimento harçlarının mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(4): 2255-2270, (2021).
- [17] Sharma R., Jang J. G. and Bansal P. P., "A comprehensive review on effects of mineral admixtures and fibers on engineering properties of ultra-high-performance concrete", *Journal of Building Engineering*, 45: 103314, (2022).
- [18] Ajith G., Shanmugasundaram N. and Praveenkumar S., "Effect of mineral admixtures and manufactured sand on compressive strength of engineered cementitious composite", *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 6(1): 1-9, (2021).
- [19] Singh M., Saini B. and Chalak H. D., "Performance and composition analysis of engineered cementitious composite (ECC)—A review", *Journal of Building Engineering*, 26: 100851, (2019).
- [20] Zhu Y., Yang Y. and Yao Y., "Use of slag to improve mechanical properties of engineered cementitious composites (ECCs) with high volumes of fly ash", *Construction and Building Materials*, 36: 1076-1081, (2012).
- [21] Shanmugasundaram N. and Praveenkumar S., "Mechanical properties of engineered cementitious composites (ECC) incorporating different mineral admixtures and fibre: a review", *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 7(1): 40, (2022).
- [22] Lepech M.D., Li V.C., Robertson R.E., and Keoleian G.A., "Design of green engineered cementitious composites for improved sustainability", *ACI Materials Journal*, 105(6): 567, (2008).
- [23] Liu H., Zhang Q., Gu C., Su H. and Li V. C., "Influence of micro-cracking on the permeability of engineered cementitious composites", *Cement and Concrete Composites*, 72: 104-113, (2016).
- [24] Sahmaran M., Yücel H. E., Demirhan S., Arık M. T. and Li V. C., "Combined effect of aggregate and mineral admixtures on tensile ductility of engineered cementitious composites", *ACI Materials Journal*, 109(6): 627, (2012).
- [25] Ahmad J., Kontoleon K. J., Majdi A., Naqash M. T., Deifalla A. F., Ben Kahla N. and Qaidi S. M., "A comprehensive review on the ground granulated blast furnace slag (GGBS) in concrete production", *Sustainability*, 14(14): 8783, (2022).
- [26] Abdila S. R., Abdullah M. M. A. B., Ahmad R., Nergis B., Doru D., Rahim S. Z. A. and Vizureanu P., "Potential of soil stabilization using ground granulated blast furnace slag (GGBFS) and fly ash via geopolymerization method: A Review", *Materials*, 15(1): 375, (2022)..
- [27] TS EN 197-1, "Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri", (2012).

- [28] Ding Y., Yu K. and Li M., “A review on high-strength engineered cementitious composites (HS-ECC): Design, mechanical property and structural application”, *Structures*, 35: 903-921, (2022).
- [29] Yu K., Zhu H., Hou M. and Li V. C., “Self-healing of PE-fiber reinforced lightweight high-strength engineered cementitious composite”, *Cement and Concrete Composites*, 123: 104209, (2021).
- [30] Yıldırım G., Khiavi F. E., Anıl Ö., Şahin O., Şahmaran M. and Erdem R. T., “Performance of engineered cementitious composites under drop-weight impact: Effect of different mixture parameters”, *Structural Concrete*, 21(3): 1051-1070, (2020).
- [31] Zhu M., Chen B., Wu M. and Han J. “Effects of different mixing ratio parameters on mechanical properties of cost-effective green engineered cementitious composites (ECC)”, *Construction and Building Materials*, 328: 127093, (2022).
- [32] ASTM C 1609/C 1690M-19, “Standard test method for flexural performance of fiber reinforced concrete (using beam with third-point loading)”, American Society of Testing and Materials, (2019).
- [33] ZHANG Y., ZHANG S. and DENG M., “Four-point bending tests of ECC: Mechanical response and toughness evaluation”, *Case Studies in Construction Materials*, 17: e01573, (2022).
- [34] Şimşek O. and Demir Ş., “Mermer Tozu Katkılı Lifli Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Lif Tipi ve Oranının Etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 25(3): 1143 – 1155, (2022).
- [35] Yuan Z., Zhang C., Xia C., Wu L., Yu Z. and Li Z., “Flexural properties of PVA fiber reinforced high ductility cementitious composites containing calcium carbonate whisker”, *Construction and Building Materials*, 300: 124329, (2021).