



Araştırma Makalesi

Journal of Innovative Engineering and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

Üç boyutlu polimer kafes yapıları ile çimento esaslı kompozitlerin üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi

Mehmet Yavuz Karabulut^{a,b,*}, Salih Yazıcıoğlu^c

^aAnkara Medipol University, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey.

^bGazi University, Institute of Science, PhD, Ankara, Turkey.

^cGazi University, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey.

MAKELE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 9 Kasım 2024

Düzeltilme 2 Ocak 2025

Kabul 21 Ocak 2025

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Üç boyutlu yazıcılar

Gyroid

Fluorite

Mekanik özellikler

3 nokta eğme testi

Düşürme testi

ÖZET

İnşaat mühendisliğinde beton en yaygın kullanılan mühendislik malzemesidir. Basınç dayanımının yüksek olmasına rağmen, çekme dayanımına karşı zayıftır ve düşük süneklik gösterir. Betonun sünekliğini artırmak için takviye malzemeleri kullanılır. Bu çalışmada hem sünekliğini arttırmak hem hafiflik sağlamak ve hem de enerji emme kapasitesini arttırmak için Gyroid ve Fluorite gibi hücresel kafes yapılar çimento esaslı harç içerisine gömülmüştür. Ayrıca, üç boyutlu polimer kafes yapılar ile üretilen çimento esaslı kompozitlerin mekanik özellikleri kontrol harcı (KH), lifli harç (LH) ve iki farklı kafes konfigürasyonu ile üretilen Gyroid harç (GH) ve Fluorite harç (FH) kullanılarak araştırılmıştır. Kafes yapılar eriterek biriktirme modellemesi (EBM) ile 3B yazıcılar kullanılarak akrilonitril bütadien stiren (ABS) malzemeden üretilmiştir. Kafes yapılar çimento esaslı harcın içine gömülerek numuneler hazırlanmıştır. Üretilen kafes takviyeli numuneler üzerinde basınç, orta noktadan yüklemeli 3 nokta eğilme testi ve darbe deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; en yüksek basınç dayanım değerini lifli harç (LH) numune göstermiştir. Lifli harcın (LH) kafes takviyeli çimento esaslı harç numunelerinden daha yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Darbe dayanımından elde edilen sonuçlara göre ise kafes yapılı çimento esaslı harç numunelerin sünek bir davranış gösterdiği ve daha yüksek darbe emme enerjisi değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

Production of cement-based composites with three-dimensional polymer lattice structures and investigation of their mechanical properties

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 November 2024

Received in revised form 2 January 2025

Accepted 21 January 2025

Available online

Keywords:

3D Printing

Gyroid

Fluorite

Mechanical properties

3-point bending

Drop test

ABSTRACT

In civil engineering, concrete is the most commonly used engineering material. Despite its high compressive strength, it is weak against tensile strength and shows low ductility. Reinforcement materials are used to increase the ductility of concrete. In this study, cellular lattice structures such as Gyroid and Fluorite were embedded in cement-based mortar in order to increase ductility, provide lightness and increase energy absorption capacity. In addition, the mechanical properties of cement-based composites produced with three-dimensional polymer lattice structures were investigated using control mortar (KH), fiber mortar (LH) and Gyroid mortar (GH) and Fluorite mortar (FH) produced with two different lattice configurations. The lattice structures were produced from acrylonitrile butadiene styrene (ABS) material using 3D printers by fusion deposition modelling (EBM). Samples were prepared by embedding the lattice structures in cement-based mortar. Compression, mid-loading 3-point bending test and impact tests were performed on the produced lattice-reinforced samples. According to the results obtained; The highest compressive strength value was shown by the fiber mortar (LH) sample. It was observed that the cage-reinforced cement-based mortar samples had higher energy absorption capacity. According to the results obtained from the impact strength, it was observed that the cage-structured cement-based mortar samples showed a ductile behaviour and had higher impact absorption energy values.

I. GİRİŞ

Beton, performans, maliyet ve bulunabilirlik arasında dengeli bir malzemedir. Dünyanın en büyük ve en zorlu mühendislik projelerinin çoğunda beton kullanılmıştır. Ancak, betonun çekme kuvvetleri altındaki kırılma tepkisi ve basınç kuvvetleri altındaki yarı kırılma tepkisi, onu tek başına kullanıldığında sadece basınç yükü durumlarıyla sınırlandırmıştır. Bu nedenle, çeşitli yükleme koşulları altında sünek ve öngörülebilir bir davranış sağlamak için takviye malzemeleri ile kullanılması gerekli olmuştur. Günümüzde en yaygın kullanılan kompozit malzemelerden biri olan beton, teknolojik gelişmelerle yeniden yorumlandıkça yeni hedefler ortaya çıkmaktadır. Yüksek performans talebiyle geliştirilen betonlar, en olumsuz koşullarda bile yüksek dayanım gösterecek şekilde tasarlanmaktadır. Yüksek dayanımlı betonlarda amaç, olumsuzluklara karşı yüksek dayanım eşliğini aşarak 100 MPa sınırını geçmek ve 140 MPa ve üzeri değerleri hedeflemektir. Bu seviyelere ulaşmak için, betonun agrega çapı küçültülerek daha fazla yüzey alanı ve rijitlik elde edilir. Azaltılmış su/çimento oranı, seçilen çimento sınıfı ve agrega türü de yüksek dayanım hedefi için gereken önemli kriterlerdir. Ayrıca, belirlenen dayanım hedeflerine ulaşan betonun, zamanla dayanım kazanmaya devam etmesi de kritik bir husustur [1-4].

Yüksek dayanımlı betonların kullanılması ile gevrekliğin yüksek oranda arttığı gözlenmiştir. Süneklik hedefinden uzaklaşması betonun gevrek olması ile sonuçlanmıştır. Gevrekliği azaltmak için donatı kullanılabileceği gibi alternatif bir yol olarak da lifler kullanılabilir. Betonun sünekliğini arttırmanın alternatif bir yolu, çelik veya polimer liflerin kullanılmasıdır. Liflerin dağılımı bazı düzlemlerde yığılmaya bazılarının da ise hiç yer almamasına neden olmaktadır. Bu heterojenlik, lif takviyeli kompozitlerin genel performansında öngörülemezliğe yol açmakta ve malzemenin beklenen çekme dayanımını ve kırılma tokluğunu azaltabilmektedir. Üç boyutlu takviyelerin sağladığı süreklilik ve öngörülebilirlik, bu sorunları azaltmanın anahtarı olabilir. Kiriş testleri ve araştırmalar sonucunda yüksek performanslı lifli beton sünekliği artmıştır. Test sonuçlarında tokluk süneklik çatlak dayanımı ve enerji emiliminin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir [4-8].Lifli beton; beton karışımının içerisine belirli oranlarda lif atılması ve beton karışımına devam edilmesi sonucu olarak üretilmektedir. Lifler karışımın devam etmesi ve kalıba yerleştirilmesi sırasında üç boyutlu olarak beton içerisine rastgele dağılmaktadır.[9] Rastgele dağılım ne yazık ki bazı sorunlara neden olmaktadır. [10] Hangi düzlemde ne kadar sıklıkla oldukları bilinmemekle birlikte bazı eşit olmayan heterojen karışımlarla sonuçlanmaktadır [11]. Lifli betonda liflerin dağılımına müdahale edilebileceği gibi kalıba yerleştirilmesi sırasında betonun liflerinin yönlendirilmesi söz konusudur [12]. Bu yönelim sayesinde çekme numunelerinin ve basınç numunelerinin amaçlanan ya da hedeflenen dayanımlara ulaşması sağlanmaktadır [9-15]. Çimentolu malzemeleri takviye etmek için 3D yazdırılmış polimerler kullanılarak daha önce çok sayıda çalışma yapılmıştır. Salazar ve diğerleri üç boyutlu oktet kafesle takviye edilmiş çimentolu malzemelerin ilk araştırmasını yapmış ve yüksek işlenebilirliğe sahip bir harç kullanarak artan süneklik elde etmişlerdir [16]. Farina ve diğerleri fotopolimer reçineden 3D yazdırılmış basit, ayrık 7.5 mm çapında silindirik çubuklar şeklinde polimerik "liflerle" çimento harcını takviye etmişlerdir. Yazıcıdan çıkan takviye silindirlerinin yüzeylerini mm ölçeğinde çıkıntılarla güçlendirmenin, aynı çap ve malzemedeki pürüzsüz takviye çubuklarına göre kompozitin çok daha fazla deformasyon sertleşmesine yol açtığını bulmuşlardır [17]. Pürüzlü takviyeye sahip numuneler üç noktalı eğilme testlerinde kayma kırılması gösterirken, daha pürüzsüz silindirlerle takviye edilen yapılar eğilme kırılması sergilemiştir. Bu arada, Nam ve diğerleri, bağlantılı fotopolimer reçine liflerinden oluşan takviye ağlarının farklı mekânsal dağılımlarıyla 3D yazdırılarak yapılan takviyenin yönelimi ve dağılımının etkilerini araştırmışlardır. Daha yüksek çekme geriliminin olduğu bölgelerde daha yoğun bir örgüye sahip üçgenleştirilmiş bir takviye yapısı kullanıldığında daha yüksek tepe eğilme dayanımı elde ettiklerine dair bazı

bulgular bulmuşlardır [18]. Ancak, herhangi bir numunede çimentonun doğasında var olan kırılma eğilimi önemli ölçüde azaltılamamıştır; bu, kullanılan polimer takviyenin görece düşük hacim oranından kaynaklanıyor olabileceğini öngörmüşlerdir. Rosewitz ve diğerleri biyomimetik çimento-polimer kompozitleri geliştirmiş ve arttırılmış süneklik ve bazı durumlarda takviye edilmemiş harçtan daha yüksek tepe dayanımı gösteren çeşitli hücreli polimerik takviye yapıları değerlendirmiştir [19]. Xu ve diğerleri FDM kullanarak ABS'den üretilen petek kafeslerle takviye edilmiş ince panellerin performansını test etmişlerdir. Bu paneller, eğilme testlerinde süneklik ve çoklu çatlama göstermiştir [20]. Ancak hem Rosewitz'in hem de Xu'nun çalışmaları, karmaşık geometriler veya yük durumlarına uygulanabilirliğini sınırlayabilecek prizmatik veya "iki boyutlu" takviye geometrileri kullanmıştır.

Diğer çalışmalarda da üç boyutlu kafes yapısı tasarımında farklı kafes yapıların deneysel olarak ölçümleri yapıldığı görülmektedir [20-30]. En çok kullanılan kafes tasarımları kübik, hegzagonal, oktet, Kelvin olarak öne çıkmaktadır. Yapılan bilimsel araştırmalarda düz kübik yapı ve hegzagonal yapıdan uzaklaşmıştır. Kafes yapıların öne çıkan bir başka özelliği ise aynı birim hacim düşünüldüğünde bu hacmin ne kadarının hacimce doldurabildiğidir. Kafesler bu özelliklerine göre kendi aralarında modellendiklerinde dayanım artışları gözlenmiş olup bu kafes türleri yaygınlaşmıştır. En önemli hacim alabilen ve diğerlerine göre daha fazla dayanım sağlayan model gyroid'tir [31-38]. Bu nedenle çalışmada gyroid yapı kullanılmıştır.

Yüksek dayanımlı betonun sünekliğinin artırılması liflerin dağılımı ve yerleştirilmesi ile sağlanması farklı sonuçlar oluşturabilir. Önceden tasarlanmış olan tasarımın kullanılması gerekmektedir. Üç boyutlu kafeslerin tasarımı ve ona uygun kalıp oluşturularak, kalıba yerleştirilmesi önemlidir. Literatürde polimerik üç boyutlu kafes yapıların, beton içerisinde kullanıldığında süneklik artışına neden oldukları belirlenmiştir [20, 22-30]. Skratko ve arkadaşları gyroid modellerden oluşturdukları farklı hacimdeki kafes yapılarının beton içerisindeki dayanımlarını incelemişlerdir. Farklı hacimde aynı modelin kıyaslanması yapıldığında basınç dayanımı hacim arttıkça azalmış, eğilme dayanımı ise artmıştır. Çalışma sonucunda yük azalmasının ani olduğu küçük kuvvetlerde uzamanın devam ettiği gözlenmiştir [39].

Bu çalışmanın amacı, betonun süneklik ve enerji emme kapasitesini artırmak, aynı zamanda yapının hafifliğini korumak için yeni yaklaşımlar geliştirmektir. Beton, inşaat mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan yüksek basınç dayanımına sahip bir malzeme olmasına rağmen, çekme dayanımının düşük olması ve sınırlı süneklik sunması gibi özellikleri nedeniyle bazı kısıtlamalara sahiptir. Çalışmada, bu dezavantajları gidermek için Gyroid ve Flourite gibi hücreli kafes yapılar, üç boyutlu (3D) yazıcılarla üretilen akrilonitril bütadien stiren (ABS) malzemeler kullanılarak çimento esaslı harç içine gömülmüştür. Bu hücreli yapılar, çimento esaslı harçların hafifliğini korurken aynı zamanda mekanik özelliklerini iyileştirmeyi hedeflemektedir.

II. DENEYSEL METOT / TEORİK METOD

Çalışma deneysel bir çalışmadır. Bu bölümde araştırma kapsamında üç boyutlu yazıcı ile üretilen kafes yapıda kullanılan malzeme, çimento esaslı harcı oluşturan malzemeler ve numunelerin hazırlanması ve deney süreci yer almaktadır.

2.1 Kullanılan malzemeler-ABS filament

Çalışmada üç boyutlu yazıcıda kafes sistemin oluşturulması için Akrilonitril bütadien stiren (ABS) filament kullanılmıştır. Kafes yapının üretilmesinde Eriterek Biriktirme Modellemesi (EBM) yöntemi kullanılmıştır. ABS filamentinin ürün özellikleri üreticiden alınmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Çalışmada kullanılan ABS filamentinin teknik özellikleri

	Çekme dayanımı (Mpa)	Elastik modül (MPa)	Akma gerilimi (Mpa)	Poisson oranı	Yoğunluk (gr/cm ³)
ABS	30	2000	29	0,35	1,05

ABS ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde çimento esaslı harç içerisinde istediğimiz performansı göstermesi beklenmektedir [40-42].

2.2 Çimento esaslı harç

Üç boyutlu yazıcılardan üretilen kafes yapılar için çimento esaslı harç karışımı hazırlanıp kullanılmıştır. Çimento esaslı harç hazırlamak için karışımlarda CEM 1 42,5 portland çimentosu, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan bağlayıcıların kimyasal özellikleri Tablo 2 de verilmiştir. Ayrıca agrega olarak iki farklı kuvars kumu kullanılmıştır. Kuvars kumunun maksimum tane çapı 3 mm'dir. Lifli beton içeriğinde sika PPM-12 polipropilene mikro lif bir metreküpte 600 gram olacak şekilde eklenmiştir. Çimento esaslı harcın karışımına ait oranlar ise Tablo 3'te, çalışmada kullanılan lifin teknik özellikleri de Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 2. Bağlayıcıların kimyasal analizi

Bileşen	Çimento (%)	Yüksek fırın cürufu (%)	Silis dumanı (%)
SiO ₂	19,06	36,65	90,14
CaO	60,90	31,45	2,33
Al ₂ O ₃	5,32	14,32	0,42
Fe ₂ O ₃	3,18	0,97	0,27
MgO	2,16	10,02	4,42
SO ₃	3,47	0,98	0,22
Na ₂ O	0,74	0,45	0,53
K ₂ O	1,41	0,74	0,81
Kızdırma kaybı	3,7	-	0,42

Tablo 3. Betonun karışım oranları

Seri	Portland Çimento (kg)	YFC (kg)	SF (kg)	Kum(1) (kg)	Kum (2) (kg)	Su / Bağlayıcı	Lif (g)	SA (kg)
KB, BG, BF	621	249	179	477	477	0.5	-	15.5
LB	621	249	179	476.7	476.7	0.5	600	15.5

Tablo 4. Lifin teknik özellikleri

Lif adı	Çap (µm)	Boy (mm)	Yoğunluk (g/cm ³)	Erime derecesi (°C)	Polipropilene	İlgili standart
Sika ppm-12	32	12	0,91	160	%100	(EN 14889-2)

2.3 Numunelerin hazırlanması

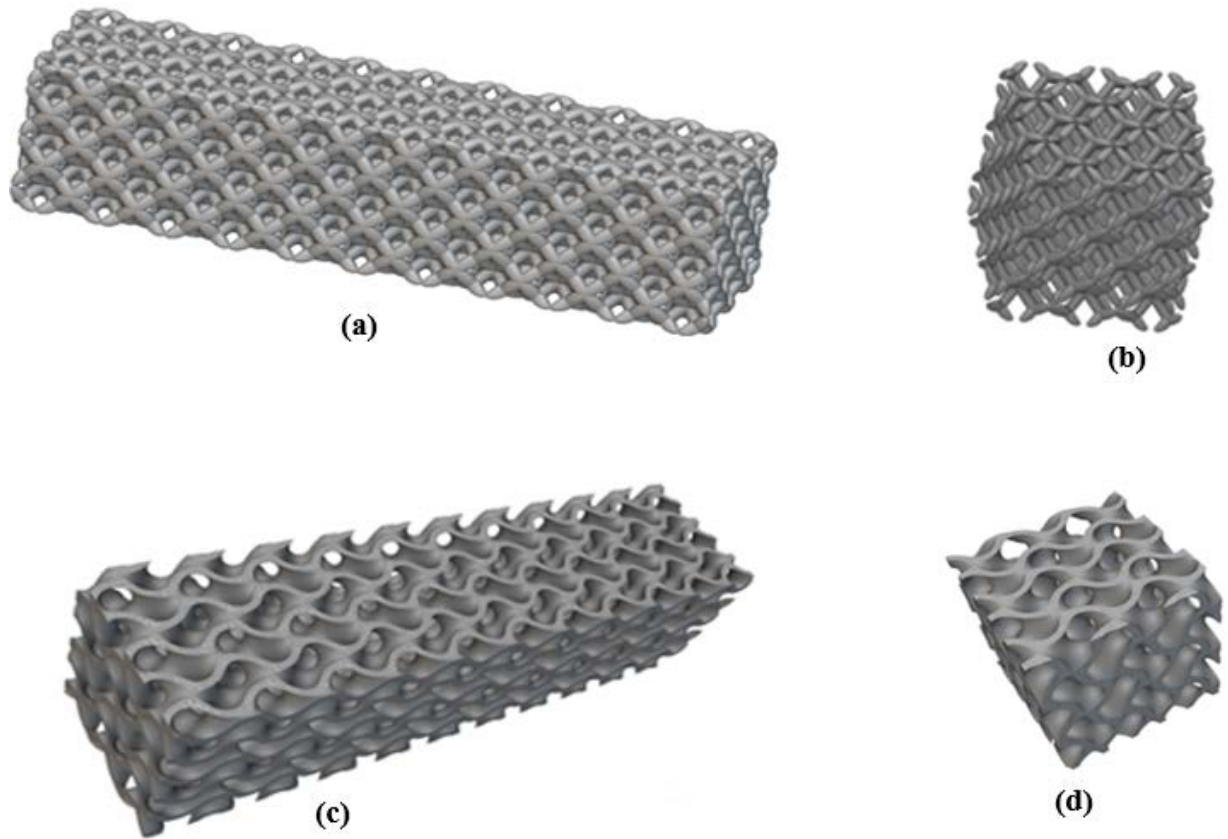
Bu çalışmada, Fluorite ve gyroid kafes model yapılarının kullanılması tercih edilmiştir. Fluorite kafes yapısı yüzey merkezli kübik kafes yapısını temsil eden benzersiz birbirini kesen köşe noktalardan oluşur. Bu yapı birbirinin içerisine geçen tekrarlayan üç boyutlu yapı modelleri arasındaki en iyi dayanım özellikleri gösteren modellerden birisi olduğu için çalışma kapsamında seçilmiştir. 45°'lik açılar ile düğüm noktalarını oluşturan uzay kafes sistemin bir örneğidir.

Diğer tercih edilen model ise Gyroid'tir. Gyroid kafes yapısı organiktir. Gyroid kafes yapısı hafiflik, dayanıklılık ve yüksek yüzey alanı gerektiren uygulamalarda özellikle 3D baskıda kullanılır. Hem en yüksek hacim yapısı ile hacmi doldururken hem de en boşluklu yapısı ile doluluk oranını azaltmaktadır. Birbirini tekrar eden köşesiz yapısı betonun dayanımına, maksimum dayanım hedefine büyük katkıyı sağlayacağı öngörülmüştür [43-44]. Üretilen kafes yapıların basınç ve eğilme testlerinde kullanılacak örneklerin geometrik özellikleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Kafes yapıların geometrik özellikleri

Örnekler	Hücresel Kafes Boyu (mm ³)	Kalınlık (mm)	Kafes Beton Küp Kalıp Boyutları (mm ³)	Takviyeli	Birim Hücre Kafes Sayısı	Kapladığı Hacim Oranı
Gyroid Küp Basma Testi	67x67x67	4	70x70x70		5x5x5	%27.0
Fluorite Küp Basma Testi	67x67x67	4	70x70x70		5x5x5	%22.7
Gyroid Kiriş Eğme	67x67x267	4	70x70x270		5x5x21	%28.0
Fluorite Kiriş Eğme	67x67x267	4	70x70x270		5x5x21	%24.7

Şekil 1'de gösterildiği gibi, küp ve kiriş şeklindeki kafesler 3D yazıcı ile üretilmiştir. Ayrıca Şekil 1 (a-d) de üretilen numunelerin modelleri verilmiştir.



Şekil 1. Kafes takviyeli beton küp ve kiriş modelleri (a) Fluorite kiriş (b) Fluorite küp (c) Gyroid kiriş (d) Gyroid küp

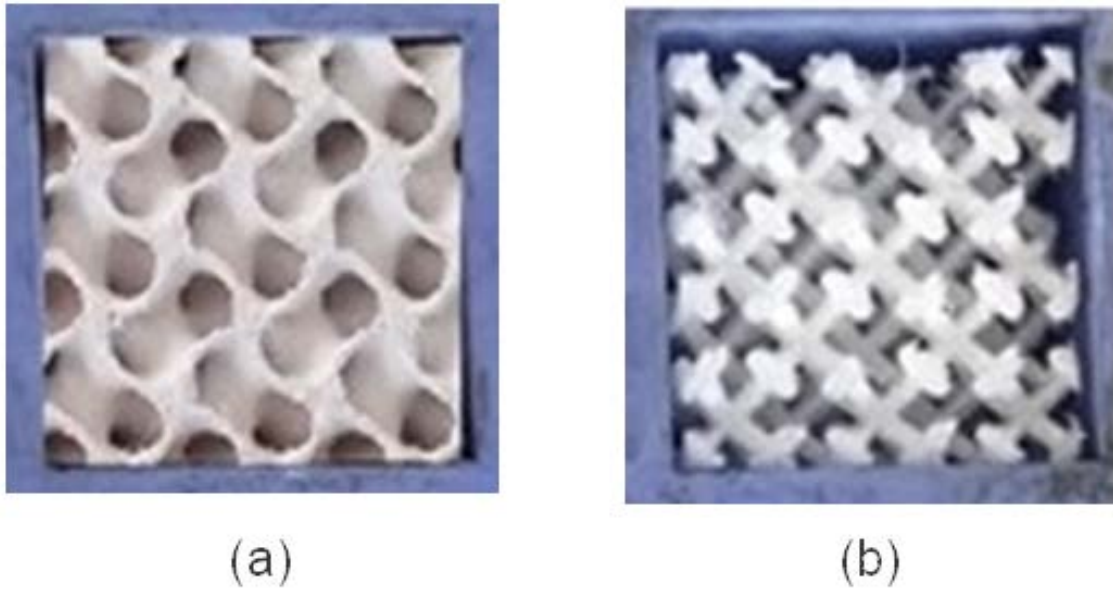
3D yazıcı ile basılan kafes modeller, hazırlanan kalıplar içerisine yerleştirilmiş ve kalıplar çimento esaslı harç ile doldurulmuştur.

2.4. Basınç dayanımı

Üretimi yapılan modeller için çimento esaslı harç seçilmiştir. Modeller laboratuvar ortamında hazırlanan kalıpların içerisine şekil 2’de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Çimento esaslı harçlar hazırlanan kalıplara yerleştirildikten sonra 1 gün kalıp içerisnde bekletildikten sonra kalıplardan çıkarılarak 28 gün boyunca 20 ± 2 °C kür havuzlarında bekletilmiştir. 28. Günün sonunda kür havuzundan çıkarılan numuneler TS EN 12390-3 standardına göre $0,6 \pm 0,2$ MPa/s yükleme hızı uygulanarak basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuş ve denklem 1 ile basınç dayanımları hesaplanmıştır.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (1)$$

Denklemdede: (f_c : Basınç dayanımı (MPa); F : Kırılma anında uygulanan maksimum kuvvet (N); A_c : Numunenin kesit alanını (mm²)) göstermektedir.



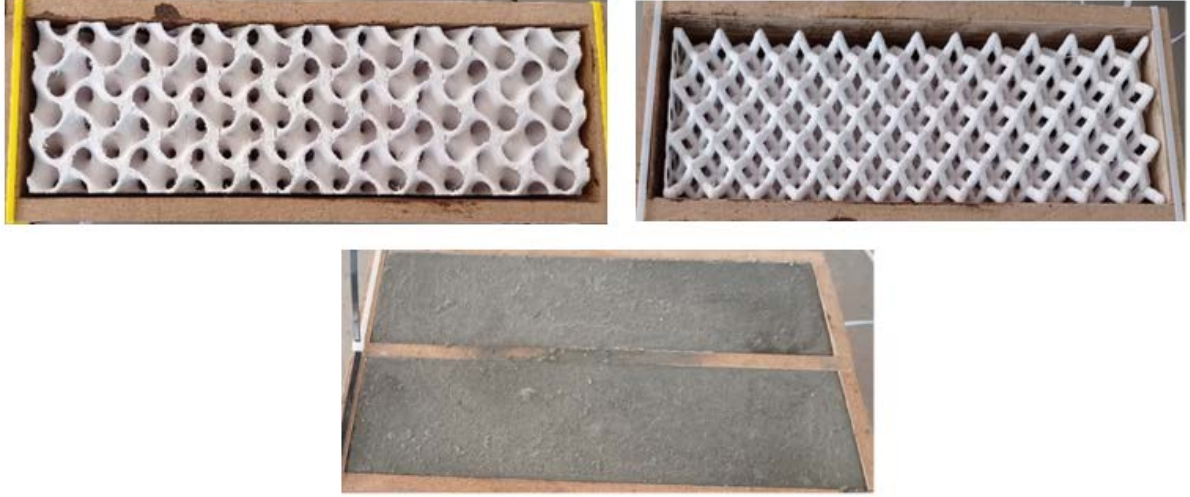
Şekil 2. Kafeslerin kalıplara yerleştirilmesi (a) Gyroid,(b) Fluorite

2.5. Eğilme dayanımı

Çimento esaslı harcın eğilme dayanımını belirlemek için yapılan testler genellikle "iki noktadan yükleme testi" veya "orta noktadan yükleme testi" olarak bilinir. Eğilme deneyi için hazırlanan kafes modeller laboratuvar ortamında hazırlanan kalıpların içerisine şekil 3’te görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler TS EN 12390-5’e göre orta noktadan yük uygulama yöntemi ile teste tabi tutulmuştur. Numunenin kırılma anındaki yük değeri kaydedilerek eğilme dayanımı denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_{ct} = \frac{3FL}{2d_1 d_2^2} \quad (2)$$

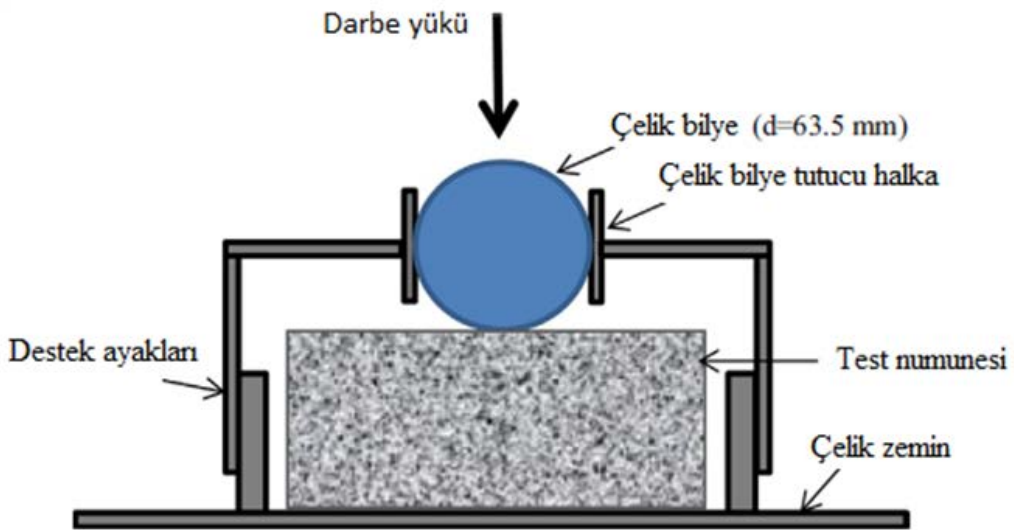
Bu denklemde; f_{ct} =eğilme dayanımını (MPa), F = En büyük yük (N), L = Mesnet silindirleri arasındaki açıklık (mm), d_1 ve d_2 ise deney numunesinin enkesit boyutlarını(mm) göstermektedir.



Şekil 3. Gyroid (G) ve Fluorite (F) kafeslerin kalıp içerisindeki görüntüsü

2.6. Darbe dayanımı

Betonun darbe dayanımı, çeşitli laboratuvar testleri ile belirlenir. Bu testler, beton numunelerinin belirli bir yük altında ne kadar dayanıklı olduğunu ölçmeyi amaçlar. Bu çalışmada üretilen numunelerin darbe dayanımlarının belirlenebilmesi için ACI-544 standardına göre modifiye edilen çarpma test düzeneği kullanılmıştır [45]. Test düzeneği Şekil 4’te gösterilmiştir.



Şekil 4. Darbe testi deney cihazı [47]

Darbe Test deney cihazının özellikleri; üst kısımda görülen kürenin ağırlığı (4,45 kg), test numunesine serbest düşüş ile darbe uygulayıp, numunenin darbe dayanımını ölçer. Ağırlık belirli bir yükseklikten (457 mm) serbest bırakılarak hazırlanan numuneye darbe uygulanır. Alt kısımda yer alan metalik küre, darbe uygulamak için kullanılır. Darbe uygulamak için kullanılan çelik topun çapı 63.5 mm'dir. Bu top, darbenin uygulandığı yüzeyin özelliklerine göre enerji transferini optimize eder. Yapılan çalışmada numunelerin darbe enerjisi değerleri denklem (3)'e göre hesaplanmıştır.

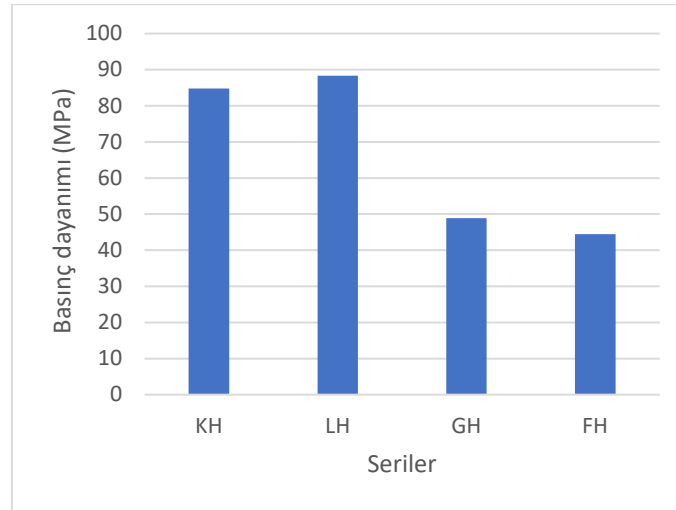
$$EI = N \times m \times g \times h \quad (3)$$

Denklemin (5) de EI = Darbe enerjisi (J), N vuruş sayısı, (m) düşen kütle, (g) yer çekimi ivmesi, (h) ise yükseklik olarak belirtilmiştir [45-49].

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.2. Basınç dayanım deneyi

Çimento esaslı harcın basınç dayanımı, yapı malzemesi olarak kullanılan betonun ezilme kuvvetine karşı gösterdiği direnci, betonun dayanıklılığı ve yapı güvenliği açısından en önemli mekanik özelliklerinden biridir. Çalışmada basınç dayanımı deneyinden elde edilen sonuçlar Şekil 5'te görülmektedir.

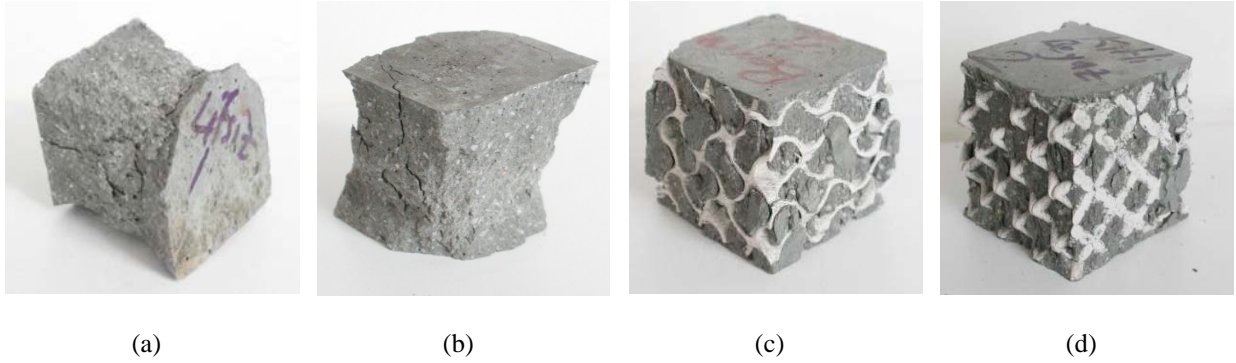


Şekil 5. Basınç dayanımı deney sonuçları grafiği

Şekil 5'ten de görüldüğü gibi çimento esaslı lifli harcın basınç dayanımı en yüksek basınç dayanımını vermiştir. Xu ve diğerleri çalışmalarında, FDM kullanarak ABS'den üretilen petek kafeslerle takviye edilmiş ince panellerin, eğilme testlerinde süneklik ve çoklu çatlama olduğunu bulmuşlardır [20]. Diğer yandan çalışmamızda çimento esaslı lifli harcın, ilk çatlama dayanımını artırıcı etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Liflerin, çimento esaslı harçların deformasyon kapasitesini artırarak çatlak ilerlemesini yavaşlattığını ve betonun kısmi kırılmalar sonrasında bile yük taşıma kapasitesini koruduğu belirlenmiştir. Çimento esaslı lifli ve lifsiz harçlar, diğer kafes

yapıdaki betonlara göre çok daha yüksek dayanımına sahiptir. Bu, klasik betona eklenen liflerin ve lifsiz yapıların kafes yapıdaki betonlardan daha fazla basınç dayanımı sunduğunu göstermektedir. Basınç dayanımındaki bu azalma kafes yapıların daha yumuşak davranışına atfedilebilir. Kafes yapılar, çimento hamuru ile kafes yapı arasındaki daha zayıf bağ dayanımı veya daha düşük aderans nedeniyle çimento matrisinde boşluk görevi görebilir.

Şekil 5'te görüldüğü gibi Gyroid kafes yapılı çimento esaslı harçların basınç dayanımı, fluorite kafes yapılı çimento esaslı harçların dayanımından yüksektir. Burada gyroid daha iyi bir başlangıç direnci ve ilave olarak, başlangıçta ve kırılmalar boyunca daha güçlü bir yapı sunmaktadır. Kafes yapılar arasında en düşük dayanım kaybını fluorite kafes yapılar göstermiştir. Sonuç olarak, farklı çimento esaslı harç tipleri arasında çimento esaslı lifli harç dayanım açısından en iyi performansı sergilemiştir. Basınç deneyine tabi tutulan numunelerin kırılma sonrası görüntüleri Resim 1'de verilmiştir.



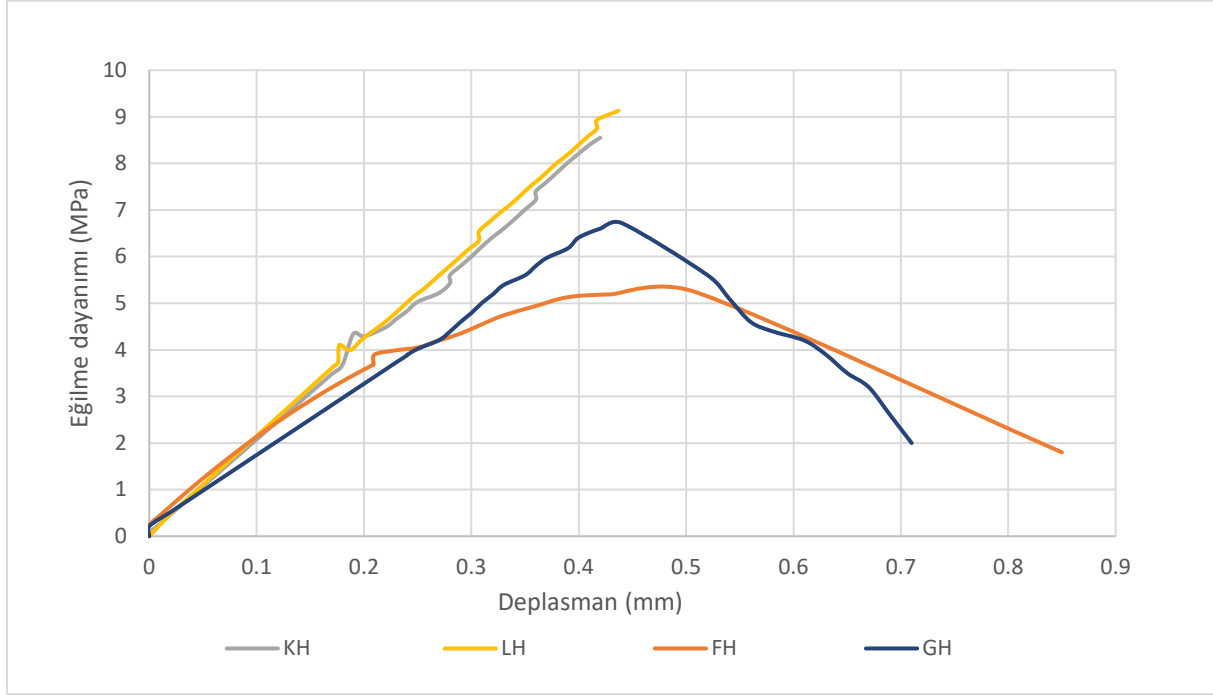
Resim 1. Beton numuneler kırılma sonrası (a) Kontrol harcı-KH, (b) Lifli Harc-LH, (c) Gyroid (G), (d) Fluorite (F)

Resim 1(c) ve (d) de görüldüğü gibi kafes yapıların kalıp içerisinde kapladığı belirli bir hacim vardır. Kaplanan hacimden dolayı Fluorite ve gyroid kafes yapılı modellerde numunelerin içerisinde bulunan çimento esaslı harç miktarı diğer numunelere göre daha azdır. Ancak bu kafes yapıların içerisinde çimento esaslı harcın hacmi daha az olsa da resim 1(c) ve (d) den de görüldüğü gibi numuneler dağılmamış ve hacim stabilitesini korumuştur. Diğer yandan, çimento esaslı lifsiz harç kırılma sonrasında aniden büyük çatlaklar oluşturarak kırılmıştır. Kırılma sonrasında Çimento esaslı lifsiz harçlar tamamen parçalara ayrılmış ya da numunelerde büyük bir çatlaklar oluşmuştur. Çimento esaslı lifsiz harçlarda, kırılma enerjisini absorbe etme kapasitesi düşük olduğu için yük altında çatlama aniden meydana gelmiş ve gevrek bir kırılma oluşmuştur. Şekil 1c ve d görüldüğü gibi gyroid ve fluorite kafes yapılı numunelerin basınç dayanımı sonrası parçalanması veya ani kırılması daha sünek olmuştur.

3.2. Eğilme deneyi

Kür işlemi yapılan numunelere orta noktadan yükleme testi uygulanmış ve eğilme deneyi testinin sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde grafik üzerinden tokluk değerleri Excel programı kullanılarak hesaplanmıştır. Eğri altında kalan alan hesaplandığında KH 1,79, LH 1,99 olarak bulunmuş olmasına rağmen; FH 3,01, GH ise 2,89 olarak hesaplanmıştır. Grafik üzerinden de anlaşılacağı gibi Gyroid ve Fluorite kafes yapılarla en yüksek tokluk ve deplasman değerleri elde edilmiştir. Bu sonuç ile Xu ve Šavija'nın çalışmasına

benzer sonuçlar elde edilmiştir [20]. Çalışmadaki deneyin sonucunda kaynak [4-8] deki çalışmalardaki gibi tokluk, süneklik, çatlak dayanımı ve enerji emiliminin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Literatürde bu çalışmadan farklı olarak Salazar ve diğerleri çalışmalarında üç boyutlu oktet kafesle takviye edilmiş çimentolu malzemelerini kullanmışlardır. Çalışmadan elde edilen bulgularla bu çalışmanın bulguları karşılaştırıldığında, yüksek işlenebilirliğe sahip bir harç kullanıldığında süneklikte artış elde edilmiştir [16].



Şekil 6: Eğilme deneyi sonuçları grafiği

3.2. Darbe enerjisi deneyi

Çimento esaslı harç serilerinin darbe direnci performansları tablo 6'da verilmiştir. İlk görünür çatlakla sonuçlanan darbe sayısı (N1) ve nihai darbe sayısı (N2) olarak gösterilmiştir.

Tablo 6. Darbe testi sonuçları tablosu


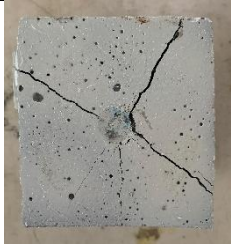






Seriler	Vuruş sayısı		Darbe enerjisi (kN mm)	
	İlk çatlak (N1)	Nihai vuruş (N2)	İlk çatlak (W1)	Nihai enerji (W2)
KH	1	2	19,95	39,90
LH	1	3	19,95	59,85
GH	1	30	19,95	598,50
FH	1	23	19,95	458,85

Kontrol numunesinin ilk vuruş ile son vuruş arasındaki enerji değişimi 19.95 iken Gyroid kafes yapılı çimento esaslı harç numuneler 598,50 ile en yüksek enerji performansını göstermiştir. Düşük performans gösteren Fluorite

kafes yapılı çimento esaslı harçlı numunenin 458,85 ile enerji artışı göstermesi kafes yapının olumlu etkisini göstermektedir.

Darbe deneyine ait görseller Tablo 7’de verilmiştir. Çimento esaslı kontrol harcı ve lifli harcın darbe etkisiyle ani bir kırılma gösterdiği görülmektedir. Gyroid ve fluorite kafes yapılı çimento esaslı harçların ise darbe etkisiyle dağılmadığı ve kendi geometrik şeklini koruduğu görülmektedir. Bu, betonun darbe dayanımı veya sismik dayanım gibi zorlayıcı koşullarda daha dayanıklı olmasına katkı sağlamaktadır.

Tablo 7. Darbe deneyi görselleri

	Kontrol Harcı (KH)	Lifli Harç (LH)	Gyroid (GH)	Fluorite (FH)
İlk vuruş				
Nihai vuruş				
Son vuruş sayısı	2	3	30	23

IV. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında, çimento esaslı kontrol harcı (KH), lifli harç (LH), Gyroid harç (GH) ve Flourite harç (FH) numuneler üzerinde basınç, üç nokta eğilme ve darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular ışığında, çimento esaslı lifli harcın (LH) en yüksek basınç dayanımını verdiği, ancak kafes takviyeli çimento esaslı harçların daha yüksek enerji yutma kapasitesine ve darbe dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Bu da yeni nesil inşaat projelerinde sünekliği ve enerji emme kapasitesi yüksek bileşenlerin kullanım potansiyelini ortaya koymaktadır. Numunelerin basınç dayanımı sonuçlarına göre en yüksek dayanımı sırasıyla çimento esaslı lifli ve çimento esaslı kontrol harçları (KH) göstermiştir. Çimento esaslı lifli harç ve çimento esaslı kontrol harcında kırılma gevrek oluşmuşken kafes yapılı betonlarda daha sünek kırılma meydana geldiği görülmüştür. Eğilme deneyi sonuçlarına göre kafes yapılı çimento esaslı harçların tokluk değeri daha yüksek çıkmıştır. Gyroid ve fluorite kafes yapılı çimento esaslı harçların basınç ve darbe etkisiyle dağılmadığı ve kendi geometrik şekillerini koruduğu görülmüştür. Gyroid ve fluorite kafes yapılar betonun darbe, çarpma, deprem gibi zorlayıcı koşullarda daha dayanıklı olmasına katkı sağlamaktadır. Darbe testi sonuçlarına göre gyroid yapısı diğer numunelere göre daha fazla enerji potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. Deneylerin daha çok numune ve kafes yapısı ile test edilmesi gelecek çalışmalarda incelenmesi önem arz etmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Gazi Üniversitesi BAP FDK-2022-8071 kodlu “üç boyutlu farklı polimer kafes yapılı çimento esaslı kompozitlerin mühendislik özelliklerinin araştırılması” başlıklı doktora projesi kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Teng L, Zhang R, Khayat KH (2022) Tension-stiffening effect consideration for modeling deflection of cracked reinforced uhpc beams. *Sustainability* 14(1):415. <https://doi.org/10.3390/su14010415>
2. Salahaddin SD, Haido JH, Wardeh G (2022) The behavior of UHPC containing recycled glass waste in place of cementitious materials: A comprehensive review. *Case Studies in Construction Materials* 17:e01494. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01494>
3. Kilany RM, Sharobim K, Husseien N (2014) Mechanical properties of UHPC with hybrid fibers. *Port-said Engineering Research Journal* 18(1):106-113. <https://doi.org/10.21608/pserj.2014.46805>
4. Hematibahar M, Hasanzadeh A et al (2023) Influence of 3D-printed reinforcement on the mechanical and fracture characteristics of ultra high performance concrete. *Result in Engineering* 19:101365, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101365>
5. İsa MN, Pilakoutas K, Guadagnini M (2021) Determination of tensile characteristics and design of eco-efficient UHPC. *Structures* 32:2174-2194. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.114>
6. Medicis C, Gonzalez S, Alvarado YA et al (2022) Mechanical performance of commercially available premix uhpc-based 3d printable concrete. *Materials* 15:6326. <https://doi.org/10.3390/ma15186326>
7. Nasrin S, İbrahim A (2021) Flexural response of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) hybrid bridge deck connections made with local materials. *Construction and Building Materials* 270:121451. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121451>
8. Thomas RJ, Sorensen AD (2020) Review of strain rate effects for UHPC in tension. *Construction and Building Materials* 153:846-856. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.168>
9. Bolander JE, Choi S (2008) Fracture of fiber-reinforced cement composites: effects of fiber dispersion. *International Journal of Fracture* 154: 73–86. <https://doi.org/10.1007/s10704-008-9269-4>
10. Stähli P, Custer R, Van Mier JGM (2008) On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC. *Materials and Structures* 41:189–196. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9229-x>
11. Abrishambaf A, Barros JAO, Cunha VMCF (2013) Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels. *Cement and Concrete Research* 51:57–66. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.04.009>
12. Sarmiento EV, Geiker MR, Kanstad T (2016) Influence of fibre distribution and orientation on the flexural behaviour of beams cast from flowable hybrid polymer-steel FRC. *Construction and Building Materials* 109:166–176. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.005>
13. Zhou B, Uchida Y (2017) Relationship between fiber orientation/distribution and post-cracking behaviour in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC). *Cement and Concrete Composites* 83:66–75. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.007>
14. Stähli P, Van Mier JGM (2007) Manufacturing, fibre anisotropy and fracture of hybrid fibre concrete. *Engineering Fracture Mechanics* 74:223–242. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.01.028>
15. Švec O, Žirgulis G, Bolander JE, Stang H (2014) Influence of formwork surface on the orientation of steel fibres within self-compacting concrete and on the mechanical properties of cast structural elements. *Cement and Concrete Composites* 50:60–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.12.002>
16. Salazar B, Williams I, Aghdasi P, Ostertag C, Taylor H (2018) International congress on polymers in concrete (ICPIC 2018). *International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC 2018)*:261–266. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78175-4_32
17. Farina I, Fabbrocino F, Carpentieri G, Modano M, Amendola A, Goodall R et al (2016) On the reinforcement of cement mortars through 3D printed polymeric and metallic fibers. *Composites Part B: Engineering* 90:76–85. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.006>
18. Nam YJ, Hwang YK, Park JW, Lim YM (2019) Feasibility study to control fiber distribution for enhancement of composite properties via three-dimensional printing. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 26:465–469. <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1432809>
19. Rosewitz JA, Choshali HA, Rahbar N (2019) Bioinspired design of architected cementpolymer composites. *Cement Concrete Composites* 96:252–265. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.010>
20. Xu Y, Šavija B (2019) Development of strain hardening cementitious composite (SHCC) reinforced with 3D printed polymeric reinforcement: mechanical properties. *Composites Part B: Engineering* 174. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107011>

21. Hao W, Liu J, Kanwal H (2022) Compressive properties of cementitious composites reinforced by 3D printed PA 6 lattice. *Polymer Testing* 117:107811. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107811>
22. Liu J, Kanwal H, Tang C, Hao W (2022) Study on flexural properties of 3D printed lattice-reinforced concrete structures using acoustic emission and digital image correlation. *Construction and Building Materials* 333:127418. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127418>
23. Qin S, Cao S, Yılmaz E, Li J (2021) Influence of types and shapes of 3D printed polymeric lattice on ductility performance of cementitious backfill composites. *Construction and Building Materials* 307:124973. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124973>
24. Salazar B, Aghdasi P, Williams ID et al (2020) Polymer lattice-reinforcement for enhancing ductility of concrete. *Materials and Design* 196:109184. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109184>
25. Son J, Cao M, Cai L et al (2021) 3D printed polymeric formwork for lattice cementitious composites. *Journal of Building Engineering* 43:103074. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103074>
26. Li J, Cao S, Song W (2023) Flexural behavior of cementitious backfill composites reinforced by various 3D printed polymeric lattices. *Composite Structures* 323:117489. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117489>
27. Xie B, Li X, Zhao X, Hu N (2023) Tunable properties and responses of architected lattice-reinforced cementitious composite components induced by versatile cell topology and distributions. *Composite Structures* 312:116850. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116850>
28. Chen M, Chen Z, Xuan Y et al (2023) Static and dynamic compressive behaviour of 3D printed auxetic lattice reinforced ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites* 139:105046. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105046>
29. Choudhry NK, Nguyen TK, Nguyen-Van V et al (2024) Auxetic lattice reinforcement for tailored mechanical properties in cementitious composite: Experiments and modelling. *Construction and Building Materials* 438:137252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137252>
30. Tang C, Liu J, Hao W, Wei Y (2023) Flexural properties of 3D printed graded lattice reinforced cementitious composites using digital image correlation. *Materials and Design* 227:111734. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111734>
31. Suzuki J, Seki M, Matsushita Y (2000) The tricontinuous double-gyroid structure from a three-component polymer system. *The Journal of Chemical Physics* 112: 4862–4868. <https://doi.org/10.1063/1.481089>
32. Abueidda DW, Elhebeary M et al (2019) Mechanical properties of 3D printed polymeric Gyroid cellular structures: Experimental and finite element study. *Materials and Design* 165:107597. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107597>
33. Nguyen TK, Suhaizan MS et al (2023) Mechanical responses of buoyant bio-inspired foamed concrete structures. *Construction and Building Materials* 391:131731. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131731>
34. Li D, Liao W, Dai N, Xie YM (2019) Comparison of mechanical properties and energy absorption of sheet-based and strut-based gyroid cellular structures with graded densities. *Materials* 12(13): 2183. <https://doi.org/10.3390/ma12132183>
35. Peng C, Tran P (2020) Bioinspired functionally graded gyroid sandwich panel subjected to impulsive loadings. *Composites Part B: Engineering* 188:107773. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107773>
36. Higuera S, Miralbes R, Ranz D (2022) Mechanical properties and energy-absorption capabilities of thermoplastic sheet gyroid structures. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 29(25). <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1919803>
37. Yang L, Mertens R et al (2019) Continuous graded gyroid cellular structures fabricated by selective laser melting: design, manufacturing and mechanical properties. *Materials and Design* 162:394-404. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.12.007>
38. Yang E, Leary M et al (2019) Effect of geometry on the mechanical properties of Ti-6Al-4V Gyroid structures fabricated via SLM: A numerical study. *Materials and Design* 184:108165. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108165>
39. Skoratko A, Szatkiewicz T, Katzer J, Jagoda M (2022) Mechanical properties of mortar beams reinforced by gyroid 3D printed plastic spatial elements. *Cement and Concrete Composites* 134:104809. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104809>
40. Samykano M, Selvamani SK et al (2019) Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102:2779–2796. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03313-0>
41. Abbott AC, Tandon GP et al (2018) Process-structure-property effects on ABS bond strength in fused filament fabrication. *Additive Manufacturing* 19:29-38. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.11.002>
42. Dul S, Fambri L, Pegoretti A (2018) Filaments production and fused deposition modelling of abs/carbon nanotubes composites. *Nanomaterials* 8(1):49. <https://doi.org/10.3390/nano8010049>

43. Schwarz HA (1890) *Gesammelte Mathematische Abhandlungen*. Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-50665-9>
44. Gür Y (2024) Deformation behaviour and energy absorption of 3d printed polymeric gyroid structures. *Tehnički vjesnik* 31(5). <https://doi.org/10.17559/TV-20231224001230>
45. American Concrete Institute (ACI) (1999) *Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete*. ACI 544.2R-89. Farmington Hills, MI: ACI.
46. Khalil E, Abd-Elmohsen M, Anwar AM (2015) Impact resistance of rubberized self-compacting concrete. *Water Science* 29:45-53. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2014.12.002>
47. Ismail MK, Hassan AAA, Lachemi M (2018) Performance of self-consolidating engineered cementitious composite under drop-weight impact loading. *Journal of Materials in Civil Engineering* 31(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002619](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002619)
48. Abid SR, Abdul-Hussein ML et al (2020) Repeated drop-weight impact tests on self-compacting concrete reinforced with micro-steel fiber. *Heliyon* 6:e03198. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03198>
49. Abid SR, Abdul-Hussein ML et al (2020) Suggested modified testing techniques to the ACI 544-R repeated drop-weight impact test. *Construction and Building Materials* 244:118321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118321>