

GRAFEN OKSİT İLE YÜZEY İYİLEŞTİRME YAPILMIŞ JÜT LİFLERİN HARÇ KARIŞIMLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE KURUMA BÜZÜLME DAVRANIŞINA ETKİSİ

Süleyman ÖZEN*^{ID}

Alınma: 22.10.2024; düzeltme: 15.11.2024; kabul: 27.11.2024

Öz: Çimentolu sistemlerin mekanik özelliklerini iyileştirebilmek ve süneklik kazandırmak amacı ile genellikle karışımlara lif ilave edilmektedir. Doğal liflerin üretim maliyetinin daha düşük olması, daha az karbon emisyonu ve fosil yakıt tüketimi, biyolojik olarak parçalanabilirlik, daha düşük yoğunluk ve imalat kolaylığı gibi çevresel etkilerinin daha az olması nedeniyle tercih edilmektedir. Diğer yandan, grafen türevi malzemelerin, lif-matris mekanik ve arayüz özelliklerini iyileştirici bir etki gösterdiği kanıtlanmıştır. Bu çalışma kapsamında, grafen-oksit (GO) ile yüzey iyileştirme işlemine tabi tutulan jüt liflerinin harç karışımlarının işlenebilirliğine, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme ve kuruma-büzülme performanslarına etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışma kapsamında lif içermeyen kontrol karışımına ilaveten, 0,5 ve 1 cm uzunluğuna sahip GO kaplamalı ve kaplamasız jüt lifler toplam hacmin %0,1, 0,3 ve 0,5 oranlarında karışıma ilave edilerek farklı lifli harç karışımları hazırlanmıştır. Deneysel sonuçlarına göre lif içeren karışımlarda su azaltıcı katkı ihtiyacı artmıştır. Karışımlara 0,5 cm ve %0,1 lif ilave edilmesi basınç ve eğilme dayanımlarını artırmıştır. GO kaplama yapılması kaplamasız liflere kıyasla dayanımların bir miktar artmasını sağlamıştır. Su emme oranları basınç dayanımı ile ters orantı göstermiştir. Lif ilave edilmesi kuruma-büzülme miktarlarını düşürmüştür. GO kaplama yapılan lifler bu durumda olumlu yönde daha etkili olmuştur. Ancak GO kaplı lif içeriklerinin %0,1'den fazla olması kuruma-büzülmelerin artmasına neden olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Jüt lif, Harç karışımlar, Basınç dayanımı, Eğilme dayanımı, Kuruma büzülme

Effect of Jute Fibers Surface Improved with Graphene Oxide on Mechanical Properties and Drying Shrinkage Behavior of Mortar Mixtures

Abstract: Fibers are generally added to mixtures to improve the mechanical properties of cementitious systems and to provide ductility. Natural fibers are preferred due to their lower production cost, lower carbon emission and fossil fuel consumption, biodegradability, lower density and ease of manufacturing, and less environmental impact. On the other hand, graphene-derived materials have been proven to have an improving effect on fiber-matrix mechanical and interface properties. Within the scope of this study, the effects of jute fibers subjected to surface improvement with graphene-oxide (GO) on the workability of mortar mixtures, compressive strength, flexural strength, water absorption and drying-shrinkage performances were investigated. Within the scope of the experimental study, in addition to the control mixture without fibers, GO coated and uncoated jute fibers with lengths of 0.5 and 1 cm were added to the mixture at 0.1, 0.3 and 0.5% of the total volume to prepare different fiber mortar mixtures. According to the experimental results, the need for water-reducing admixture increased in mixtures containing fibers. Adding 0.5 cm and 0.1% fiber to the mixtures increased the compressive and flexural strengths. GO coating provided a slight increase in strength compared to uncoated fibers. Water absorption ratios were inversely proportional to compressive strength. Adding fibers reduced the drying-shrinkage amounts. GO-coated fibers were more effective in this case. However, GO-coated fiber contents greater than 0.1% caused an increase in drying-shrinkage.

Keywords: Jute fiber, Mortar mixtures, Compressive strength, Flexural strength, Drying shrinkage

* Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 16310, Yıldırım, Bursa.

İletişim Yazarı: Süleyman Özen (suleyman.ozen@btu.edu.tr)

1. GİRİŞ

Çimentolu sistemlerde süneklik, dayanıma bağlı olarak değişmektedir. Bu sistemler dayanım arttıkça daha gevrek davranış göstermektedir. Bununla birlikte çatlak gelişimine karşı direnci de zayıflamaktadır. Çimentolu sistemlere farklı tiplerde lif ilave ederek betonun çekme dayanımını ve çatlak gelişimine karşı direncini artırmak mümkün olmaktadır (Afroughsabet ve diğ., 2015; Boulekbache ve diğ., 2016). Ayrıca, çimentolu sistemlerde lif kullanılması karışımların kırılma enerjisi, tokluk, basınç ve eğilme dayanımları gibi temel birçok mühendislik özelliklerini artırabilir. Yorulma, darbe, termal şok ve yüksek sıcaklıklarda dökülmelere ve kapak atmalara karşı direncini de geliştirebilir (Chandar ve diğ., 2015). Lifler, yukarıda bahsi geçen performans artırıcı etkileri nedeniyle çimentolu sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanılan lifin uzunluğuna bağlı olarak çatlaklar boyunca lifler köprü görevi üstlenerek çatlama sonrası bir süneklik elde edilir. Böylece, betonun tokluğu önemli ölçüde iyileştirilir. Bir malzemenin tokluğu, enerji absorbe etme kapasitesini ve çatlama direncini önemli ölçüde belirler. Betonda çatlakların kontrol altında tutulması ile çatlak gelişimi azaltılarak betonun daha üstün dayanım ve durabilite performansı göstermesi sağlanır (Bazant ve diğ., 2019; Wang ve diğ., 2014; Mazaheripour ve diğ., 2016; Banthia ve diğ., 2014). Ayrıca, lif kullanımının büzülme kaynaklı oluşan çatlakların azalmasına yol açtığı araştırmacılar tarafından beyan edilmiştir. Lifli betonların normal betona göre üstün özellikleri nedeniyle farklı uygulama alanları bulunmaktadır. Örneğin; endüstriyel zemin, havaalanı pisti, tünel uygulamaları ve prefabrik eleman üretimi gibi çeşitli uygulama alanlarında lifli betonun kullanımı birçok üstünlük sağlamaktadır.

Betonda kullanılan lif çeşitleri genel olarak metalik, sentetik, cam ve doğal lif olarak sınıflandırılabilir (Islam ve diğ., 2018). Bu lifler arasında betonda en yaygın olarak kullanılan çelik liflerdir (Islam ve diğ., 2013; Islam 2021). Bununla birlikte, çelik lifinin korozyona karşı direncinin düşük olması kullanılabilirliğini sınırlandırmaktadır. Bu soruna karşı sentetik lifler genellikle bir alternatif olarak kullanılabilir. Ancak sentetik lif üretimi oldukça maliyetli ve enerji gerektirmektedir. Bu durumda, doğal lifler genellikle lifli beton üretmek için alternatif olarak görülebilir. Doğal lifler, enerji ve kaynakların korunmasına ek olarak çevresel ve ekonomik faktörler açısından en uygun lif türü olarak görülmektedir (Onuaguluchi ve diğ., 2016; Sultana ve diğ., 2020). Sentetik liflere göre daha ucuz, esnek ve minimum sağlık tehlikesi oluşturmasından dolayı avantajlı görülmektedir.

Doğal lif içerikli çimentolu sistemler, yapıların depreme karşı direncini artırmak, fabrika yapılarının temeli, hafif çimento esaslı çatı ve tavan levhaların üretimi, duvar sıvası ve düşük maliyetli yapı malzemeleri imalatı için uygundur (Aziz ve diğ., 1981). Ayrıca düşük oranda doğal liflerin kullanılmasıyla bile betonun darbe direnci, yorulma dayanımı, basınç ve çekme dayanımı, çatlama davranışı ve tokluğu geliştirilebilmektedir (Aziz ve diğ., 1981; Zia ve diğ., 2017). Öte yandan, organik bir malzeme olan doğal lifler, biyolojik saldırılara karşı savunmasızdır. Nem koşullarından etkilenir ve lignin ve diğer bileşenleri parçalayabilen alkali saldırılarına karşı hassastır. Alkali ortamda doğal liflerin uzun süre maruz kalması lif dayanımında azalmaya neden olmaktadır (Ramakrishna ve diğ., 2005). Buna karşı lif yüzeyine kaplama yapılarak kimyasal etkileşimin önüne geçilebileceği ileri sürülmüştür (Stancato ve diğ., 2005; Asprone ve diğ., 2011). Ek olarak, birbirlerine yapışmalarından dolayı doğal lifleri beton ve harç karışımlarda homojen olarak dağıtılması mümkün olmamaktadır (Kundu ve diğ., 2012).

Keten, kenevir ve jüt lifler en yaygın kullanılan doğal liflerdendir. Bunlar arasında jüt lifler, cam liflere kıyasla daha düşük özgül ağırlıkları ve daha yüksek özgül modülleri nedeniyle cam liflerin yerini kısmen veya tamamen alabilecekleri için önemli olmaktadır. Ayrıca jüt, pamuktan sonra en çok üretilen doğal lif olup, keten ve diğer doğal liflere göre en az yüzde 50 daha ucuzdur (Sarker ve diğ., 2018). Doğal lifler içinde jüt lifler bitkilerde bol miktarda bulunmaktadır. Jüt lifi, doğal lifler arasında en güçlü, en dayanıklı ve en ucuz olan liflerden biridir. Yapılan bir çalışmada jüt liflerin çelik liflerden yaklaşık yedi kat daha hafif ve 250-300 MPa çekme dayanımına sahip olduğu bulunmuştur (Kundu ve diğ., 2012). Jüt lifler çimentolu sistemlerde yaygın olarak

kullanılmaktadır. Kısa jüt lif içeren çimentolu sistemlerin kırılma ve darbe özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır (Zhou ve diğ., 2013). Karışımlara jüt liflerinin ilave edilmesi betonun dayanımını, darbe direncini ve çatlama direncini artırmıştır. Jüt liflerinin, betonda kullanılan geleneksel liflerle ikameli olarak kullanılabileceğini bildirmişlerdir. Jüt liflerinin betona ilave edilmesi olumlu ve olumsuz yönden betonun bazı özelliklerini değiştirebilir. Farklı araştırmacılar tarafından jüt liflerinin betonlarda çatlakların gelişimini engellediği, çatlak oluşumu sonrasında önemli miktarda enerji absorbe ettiği ve çekme dayanımları önemli ölçüde artırdığı beyan edilmiştir (Zhou ve diğ., 2013; Mansur ve diğ., 1982; Zakaria ve diğ., 2017). Ayrıca beton yüksek sıcaklık etkilerine maruz kaldığı zaman jüt lifli betonların durabilite performansı lifsiz betonlara kıyasla artabilir (Chakma ve diğ., 2016). Bazı durumlarda beton karışımlarda işlenmemiş jüt liflerin kullanılması çimentonun hidrasyon kinetiğini etkileyip priz süresinin uzamasına sebep olabilir. Bu bağlamda işlenmemiş jüt lif kullanılmaması önerilmektedir (Chakraborty ve diğ., 2013). Beton boru üretiminde jüt liflerin kullanılması hem üretimin maliyetini düşürmüş hem de ürünün dayanımını geliştirmiştir (Kundu ve diğ., 2012). Çalışmada, jüt liflerin çimento matrisine homojen dağılımını sağlamak için lifler doğranmış ve kimyasallarla işlenmiştir. Jüt lif içerikli boruların yük taşıma kapasitesinin, lifsiz beton borulara kıyasla önemli ölçüde arttığı bildirilmiştir. Karışımlara ilave edilen jüt liflerinin türleri, şekilleri ve yüzey yapıları betonun taze ve sertleşmiş hal özelliklerini etkilediği görülmüştür (Aziz ve diğ., 1981). Bir çalışmada belirli bir miktara kadar jüt lifi eklemenin betonun basınç ve çekme dayanımını artırdığını gözlemlenmiştir (Raval ve diğ., 2017). Ancak lif en boy oranındaki artışın dayanımı azalttığı belirtilmiştir. Jüt lif uzunluğu ve hacminin sertleşmiş beton özelliklerinde olumlu bir etkisinin olduğu görülmektedir. Yapılan bir çalışmada lifsiz yalın betona kıyasla 10 mm uzunluğa sahip %0,25 jüt lif içeren betonun 28 günlük basınç ve çekme dayanımının yaklaşık %26 arttığını tespit edilmiştir (Rahman ve diğ., 2018). Başka bir çalışmada ise jüt liflerin beton karışımlara ilave edilmesiyle betonun basınç, yarma-çekme ve eğilme dayanımlarında sırasıyla %27, %12 ve %44 oranlarında artış olduğunu görülmektedir (Chandar ve diğ., 2015). Jüt lifli betonların özellikle Güney Asya ülkelerinde beton üretiminde etkili ve ekonomik bir malzeme olabileceği söylenebilir (Mansur ve diğ., 1982).

Khan ve diğ., (2023) yaptıkları çalışmada jüt lifinin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Farklı oranlarda (%0, 0,10, 0,25, 0,50 ve 0,75) jüt lif içeren beton karışımların taze ve sertleştirilmiş beton özelliklerini incelemişlerdir. Sonuçlar, %0,10 jüt lif içerikli beton karışımları optimum performansı göstererek basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarını sırasıyla %6,77, %6,91 ve %9,63 oranında geliştirmiştir. Lif oranı %0,10'u aştığında betonun taze ve sertleşmiş özelliklerinde olumlu bir değişiklik görülmemiştir.

Hasan ve diğ., (2023) 20 mm'lik belirli bir uzunluk için %0,1, %0,25, %0,50, %0,75 ve %1'lik çeşitli hacimsel oranlarda jüt liflerinin kendiliğinden yerleşen betonun reolojik ve mekanik özellikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Jüt lif içeren KYB karışımlar 28 günde %0,25 lif oranında en iyi performansı göstererek basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını ve eğilme dayanımını artırmıştır. Daha yüksek lif dozajlarında (%0,5'ten fazla) viskoziteyi geliştirirken, akışkanlığı ve geçiş kabiliyetini azaltmıştır. SEM analizi, jüt elyaflarının gözenekliliği azalttığını, sünekliği iyileştirdiğini göstermiştir. %0,25 dozaj, taze hal, mekanik ve çatlak sonrası özellikleri için optimum oran olarak belirlenmiştir.

Literatürden de görüldüğü üzere çimentolu sistemlerdeki jüt lifin boyutuna ve kullanım oranına göre beton ve harç karışımların mekanik özellikleri ve durabilite performansları olumlu veya olumsuz etkilenmektedir. Karışımlara jüt lif ilave edilmesiyle beton karışımların taze hal özellikleri genel olarak olumsuz etkilenmekte ve lifin homojen olarak matriste dağılımının sağlanmasında zorluklar meydana gelmektedir. Ayrıca jüt lifler alkali ortamdan olumsuz etkilenmektedir.

Jüt liflerin çimentolu sistemlerin taze hal özellikleri üzerine olumsuz etkilerini azaltacak veya mekanik özelliklerini geliştirecek ölçüde çalışmaların yeterli olarak bulunmadığı görülmektedir. Birçok çalışmada jüt liflerin boyutsal özellikleri değiştirilerek veya farklı tip

liflerle birlikte kullanılıp çimentolu sistemlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Ancak jüt lif özelinde lifin performansını artırıcı işlemlerin yeterince yapılmadığı görülmektedir. Çalışma kapsamında jüt liflerin yüzeyleri grafen oksit ile kaplanarak yüzey iyileştirme işlemi yapılmıştır. Bu işlem ile jüt liflerin yüzeyleri pürüzlü hale getirilerek matris-lif aderansının artması ve jüt liflerin çimentolu sistemlerdeki alkali ortamın olumsuz etkilerinden korunması sağlanmıştır. Böylece jüt lif içeren harç karışımların mekanik özellikleri geliştirilmeye, su emme ve kuruma-büzülmesi düşürülmeye çalışılmıştır. Çevreye zarar vermeksizin ve herhangi bir sağlık tehlikesi olmadan düşük maliyetle güçlendirilmiş harç karışımı elde etmek için GO ile yüzey iyileştirilmesi yapılmış jüt lifin kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Bu çalışma kapsamında 0,5 ve 1 cm boylarında grafen oksit yüzey kaplaması yapılan ve herhangi bir işlem uygulanmayan jüt lifler hacimce %0,1, 0,3 ve 0,5 oranlarında harç karışımlarda kullanılmıştır. Üretilen harç karışımların taze hal özellikleri, 28 günlük basınç ve eğilme dayanımları, su emme oranları ile kuruma büzülme davranışları incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

2.1.1. Çimento

Bu çalışma kapsamında harç karışımlarda kullanılmak üzere TS EN 197-1 standartlarına uygun, CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Oksit (%)	Çimento	Fiziksel Özellikler	
SiO ₂	18,86	Özgül Ağırlık	3,15
Al ₂ O ₃	5,71	İncelik	
Fe ₂ O ₃	3,09	Özgül yüzey (Blaine, cm ² /g)	3530
CaO	62,70	0,045 mm elekta kalıntı (%)	7,6
MgO	1,16	Mekanik Özellikleri	
SO ₃	2,39	1-günlük	14,7
Na ₂ O+0,658 K ₂ O	0,92	Basınç Dayanımı	2-günlük
Cl’	0,01	(MPa)	7-günlük
Çözünmeyen kalıntı	0,32		28 günlük
Kızdırma kaybı	3,20		
Serbest CaO	1,26		

2.1.2. Jüt Lif

Jüt lifler GO kaplamalı ve kaplamasız olarak harç karışımlarda farklı oran ve boyutlarda kullanılmıştır. GO kaplı ve kaplı olmayan jüt liflerin özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Harç karışımlarda kullanılan jüt liflerin özellikleri

Lif uzunluğu (cm)	Lif kalınlığı (mm)	Özgül ağırlık	Çekme Dayanımı (MPa) (Aluko ve diğ., 2020)	Elastisite Modülü (GPa) (Aluko ve diğ., 2020)
0,5 ve 1	1,5	1,40	610-780	20-55

Jüt liflerine kaplanan grafen oksit sentezi Geliştirilmiş Hummers Metoduna (Chen ve diğ., 2013) göre gerçekleştirilmiştir. GO sentezleme, jüt liflerin yıkanma ve kaplama işlemleri Özen ve diğ. (2024) belirttiği yöntemle yapılmıştır. Özetlenecek olursa aşağıdaki işlemler uygulanmıştır.

Öncelikle grafit tozu $H_2SO_4:H_3PO_4$ asit karışımı içerisine ilave edilerek homojen bir karışım hazırlanmıştır. Daha sonra $KMnO_4$ karışıma eklenmiş ve 12 saat boyunca manyetik karıştırıcı yardımı ile karıştırılmıştır. Karışım buz banyosu içerisine aktarılmıştır. Elde edilen karışım üzerine reaksiyona girmeyen $KMnO_4$ 'ü uzaklaştırmak için 1 ml H_2O_2 ilave edilmiştir. Karışım içerisindeki katı faz santrifüj yardımı ile ayrılmış olup sonrasında saf su, HCl ve etanol ile yıkanarak katı kalıntı ayrıştırılmıştır. Katı kalıntı, saf su ile pH'ı 7 civarına gelene kadar yıkanmasıyla grafen oksit sentezi tamamlanmıştır.

Jüt iplikler uygun uzunlukta parçalara ayrılarak yıkamaya uygun boyutlara getirilmiştir. Hazırlanan jüt yumakları NaOH içerisinde yıkanmıştır. Sonrasında saf su ile yıkanarak kurutulmuştur. Kaplamaya hazır hale gelen jüt lifler için GO solüsyonları hazırlanmıştır. 2 mg/ml konsantrasyonundaki su içerisindeki GO süspansiyonu 1 saat boyunca prop homojenizatör yardımı ile homojenize edilmiştir. NaOH çözeltisi içerisinde yıkanmış ve etüv içerisinde kurutulmuş jüt iplikler GO solüsyonu içerisine daldırılarak 30 dk. boyunca GO solüsyonunu emmesi sağlanmıştır. Belli aralıklar ile sıkılıp tekrar GO solüsyonuna daldırılan jüt iplikleri kaplama işlemi sonrasında sıkılıp kurumaya bırakılmıştır.

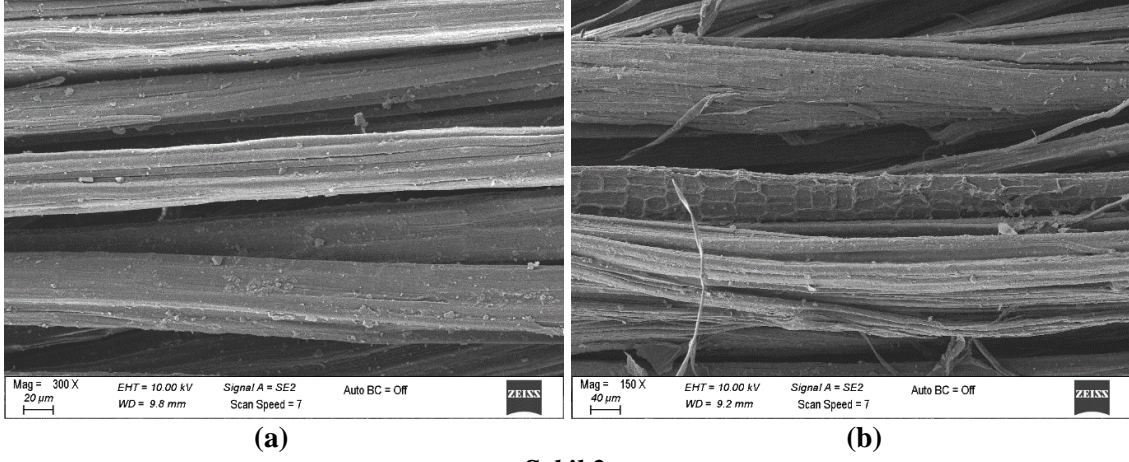
Harç deneylerinde kullanılan GO kaplamalı ve kaplamasız jüt lifler Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1:
a) Grafen oksit kaplamasız jüt lif, b) Grafen oksit kaplamalı jüt lif

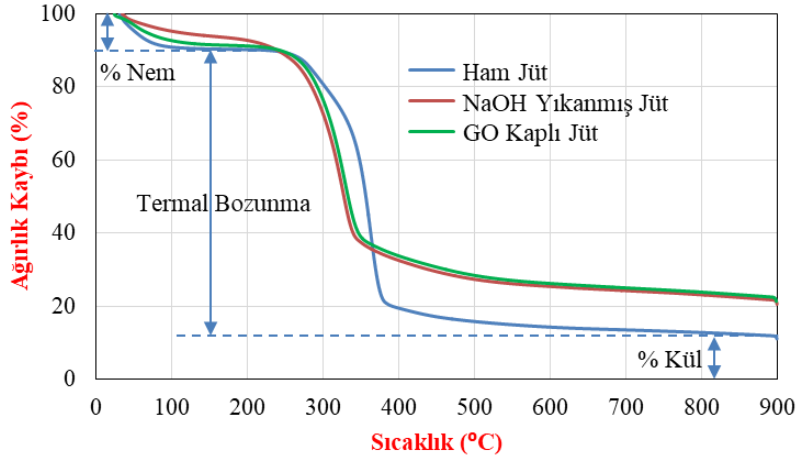
Şekil 2'de GO kaplı olmayan ve GO kaplı olan jüt liflerden alınan SEM görüntüleri gösterilmiştir. Şekil 2a'den GO kaplı olmayan jüt liflerin yüzeylerinin düz ve GO kaplı olan jüt liflerin yüzeylerinin daha pürüzlü olduğu görülmektedir. Grafen oksit, pürüzsüz jüt lif

yüzeylerinin daha pürüzlü olmasına sebep olmaktadır. Böylece çimentolu sistemlerde lifin matris fazına daha iyi tutunmasını planlanmıştır.



Şekil 2:
a) GO kaplı olmayan ve b) GO kaplı olan jüt liflerin SEM görüntüleri

Şekil 3'te jüt ipliklerin TGA termogramları görülmektedir. Aynı lifler Özen ve diğ. (2024) çalışmasında da kullanılmıştır. Jüt ipliklerin 100°C'ye kadar absorbladığı nemin uzaklaştığı, 250°C civarında ise termal bozunmanın başladığı görülmektedir. 900 °C'ye kadar yapıdaki termal bozunma tamamlanmış ve sadece kül kalmıştır.



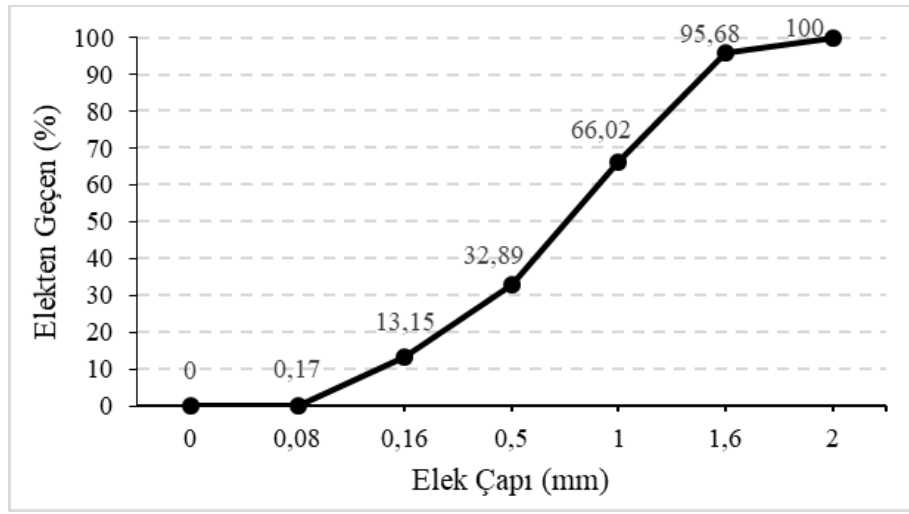
Şekil 3:
Jüt ipliklerin TGA termogramları (Özen ve diğ., 2024)

2.1.3. Agrega

Harç karışımlarının üretiminde, TS EN 196-1 standardına uygun, 0-2 mm tane çapına sahip CEN Standart silis kumu agregası kullanılmıştır. Kullanılan agreganın tane büyüklüğü dağılımı Tablo 3'te ve gradasyon eğrisi Şekil 4'te verilmiştir. Agreganın TS EN 1097-6 standardına göre suya doymuş yüzey kuru özgül ağırlığı 2,64 ve su emme kapasitesi %0,4 olarak ölçülmüştür.

Tablo 3. Standart kumun tane büyüklüğü dağılımı

Kare Göz Açıklığı	Kalan (%)	Yığılımlı Elekten Geçen (%)
2,00	0	100
1,60	4,32	95,68
1,00	33,98	66,02
0,50	67,11	32,89
0,16	86,85	13,15
0,08	99,83	0,17

**Şekil 4:**
Standart kum tane dağılımı

2.1.4. Su Azaltıcı Katkı

Harç karışımlarda hedeflenen yayılma değerlerini sağlamak için tek tip polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Kullanılan su azaltıcı katkının üretici firma tarafından temin edilen bazı özellikleri Tablo 4'te gösterilmektedir.

Tablo 4. Su azaltıcı katkı kimyasal özellikleri

Özellikler	Değerler
Plastik kıvamlı beton karışım oranı	%0,8-1,5
Yoğunluğu (gr/cm ³)	1,073
Kimyasal bileşiği	Polikarboksilat esaslı sıvı
Katı madde oranı (%)	28,76
Clor içeriği (% kütlece)	0,0618
Alkali miktarı (% kütlece)	≤4
pH Değeri (%10 çözelti)	4,89

2.2. Karışım Oranları

0,5 ve 1 cm boylarında grafen oksit yüzevi kaplama yapılan ve herhangi bir işlem uygulanmayan jüt lifler hacimce %0,1, 0,3 ve 0,5 oranlarında harç karışımlarda kullanılmıştır. ASTM C109 standardına uygun olacak şekilde harç karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan harç karışımlarının su/çimento oranı, kum/bağlayıcı oranı değerleri sırasıyla 0,485, 2,75 olarak alınmıştır. Tablo 5'te harç üretiminde kullanılan karışım oranları gösterilmektedir.

Tablo 5. Harç karışım oranları

	Karışım Kodu	Lif Uzunluğu (cm)	Lif oranı (%)	Çimento (g)	Su (g)	Akışkanlaştırıcı Katkı (g)	Kum (g)	Lif (g)
Kontrol	Kontrol	-	-	500	242,5	0,4	1375	0
Yüzeyleri Grafen Oksit Kaplamasız Lifler	J05-01	0,5	0,1	500	242,5	0,5	1375	1,33
	J05-03		0,3	500	242,5	1	1375	4,00
	J05-05		0,5	500	242,5	3	1375	6,67
	J1-01	1	0,1	500	242,5	0,5	1375	1,33
	J1-03		0,3	500	242,5	1	1375	4,00
	J1-05		0,5	500	242,5	3	1375	6,67
Yüzeyleri Grafen Oksit Kaplamalı Lifler	JG05-01	0,5	0,1	500	242,5	0,5	1375	1,33
	JG05-03		0,3	500	242,5	1	1375	4,00
	JG05-05		0,5	500	242,5	3	1375	6,67
	JG1-01	1	0,1	500	242,5	0,5	1375	1,33
	JG1-03		0,3	500	242,5	1	1375	4,00
	JG1-05		0,5	500	242,5	3	1375	6,67

2.3. Yöntem

2.3.1. Harç Taze Hal Deneyleri

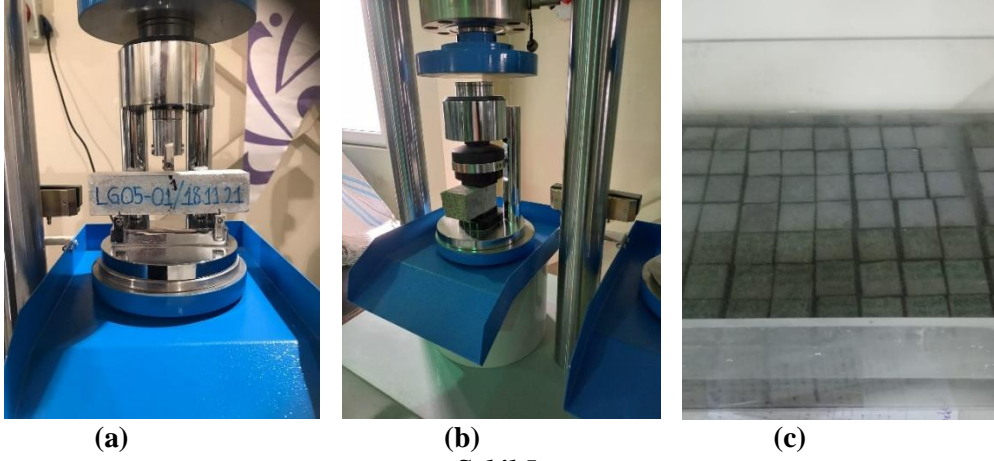
Lif içermeyen kontrol karışımı ile yüzeyinde herhangi bir işlem uygulanmayan ve yüzeyleri GO kaplama yapılan jüt lifli harç karışımların taze hal özellikleri araştırılmıştır. Karışımlarda ASTM C109 standardına uygun olacak şekilde su/çimento oranı, kum/bağlayıcı oranı ve yayılma değerleri sırasıyla 0,485, 2,75 ve 200±20 mm olarak sabit tutulmuştur. 0,5 ve 1 cm uzunluklardaki jüt lifler harç karışımlara hacimce %0,1, 0,3 ve 0,5 oranında ikame edilmiştir.

Karıştırma işlemi ASTM C305 standardına göre çimento mikseri yardımıyla yapılmıştır. İlk olarak su üzerine çimento ilave edildikten sonra 30 saniye boyunca 140 devir/dakika (yavaş) hızla karıştırma işlemi uygulanmıştır. Daha sonra oluşan çimento hamuru üzerine kum ve lif ilave edilerek 30 saniye 140 devir/dakika hızla ve 30 saniye 285 devir/dakika hızla karıştırılmıştır. Mikser durdurulup karışım 90 saniye bekletilmiştir. Bu sürecin ilk 15 saniyesinde mikser kabının kenarları sıyrılmıştır. Su azaltıcı kimyasal katkı eklendikten sonra harç karışımı 285 devir/dakika hızında 60 saniye daha karıştırılmıştır.

Taze hal özellikleri kapsamında hedef yayılma için gerekli su azaltıcı katkı miktarları belirlendikten sonra harç karışımların basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve su emme kapasitelerini araştırmak için kontrol karışımının yanı sıra yüzeyleri kaplamasız ve GO kaplamalı jüt lif içerikli harç karışımları üretilmiştir. Karışımlar vibrasyon uygulaması ile sıkıştırılarak, ayrışma olmayacak şekilde kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıplama işleminden sonra numuneler prizini alması ve sertleşmesi için üstü kapalı olacak şekilde 24 saat süreyle kalıpta bekletilmiştir. 24 saat sonra kalıplardan çıkartılan numuneler deney gününe kadar ASTM C511 standardına uygun olarak 23±2°C sıcaklığa sahip kirece doygun kür havuzunda bekletilmiştir.

2.3.2. Sertleşmiş Harç Deneyleri

28 gün sonra deney günü gelen harç numuneler kür havuzundan çıkarılarak TS EN 196-1 standardına göre her seri için üçer adet 4x4x16 cm prizmatik numuneler üzerinde eğilme ve her seri için altışar adet basınç dayanım deneyleri gerçekleştirilmiş (Şekil 5a, b) ve ASTM C642'ye göre 28 günlük su emme değerleri (Şekil 5c) tespit edilmiştir.



Şekil 5:
Harç numunelerin a) eğilme deneyi, b) basınç deneyi, c) su emme deneyi uygulaması

Karışımların kuruma büzülme rötresini incelemek amacı ile her seri için üçer adet 25x25x285 mm prizmatik numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak 48 saat boyunca sıcaklığı 20°C suda kürlenmiştir. Daha sonra kür havuzundan çıkarılıp sıcaklığı 20°C ve bağıl nemi %50 olan bir odada bekletilmiştir. Bu ortamda prizmatik numunelerin boy değişimi Denklem 1'de gösterildiği gibi ASTM C 596-01 Standardına göre hesaplanmıştır.

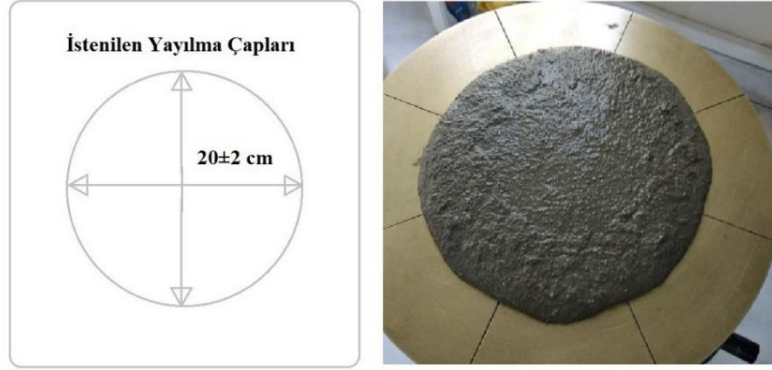
$$S = \frac{L_1 - L}{L_0} \times 100 \quad (1)$$

Burada, S numunenin büzülme yüzdesini, L_1 kür havuzundan çıkarıldıktan sonra başlangıç ölçüm değerini, L geçen günlere göre periyodik ölçüm değerini, L_0 efektif ölçüm boyunu ifade etmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Taze Hal Özellikleri

Harç karışımların yayılma değerleri ASTM C1437'e göre Şekil 6'da görüldüğü gibi yayılma tablasında tespit edilmiştir. Harç karışımlarında hedef yayılma değerini elde etmek için su azaltıcı katkı gereksinimi belirlenmiş ve Tablo 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6:
Harç yayılma tablası deneyi

Tablo 6. Harç karışımları yayılma çapları ve gerekli su azaltıcı kimyasal katkı miktarları

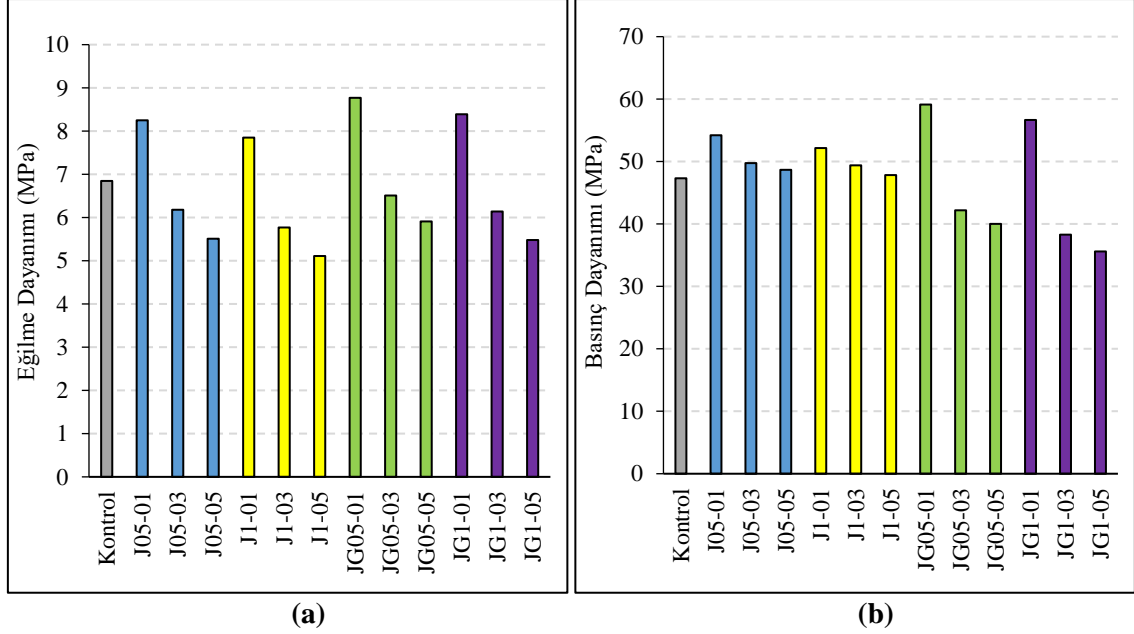
Karışım	Yayılma (cm)	Katkı Miktarı (g)
Kontrol	17,5	0,4
J05-01	18,3	0,5
J05-03	17,8	1
J05-05	17,5	3
J1-01	18,0	0,5
J1-03	17,3	1
J1-05	16,8	3
JG05-01	20,0	0,5
JG05-03	18,8	1
JG05-05	19,3	3
JG1-01	19,8	0,5
JG1-03	18,7	1
JG1-05	18,8	3

Tablo 6’da görüldüğü gibi karışımlara jüt lif ilave edilmesi taze hal özelliklerini olumsuz etkilemiş. Kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında karışımlara jüt lif ilave edilmesi katkı ihtiyacını ciddi mertebelerde artırmıştır. Ayrıca lif miktarı arttıkça katkı miktarı artış göstermiştir. Genel olarak çimentolu sistemlerde bulunan lif taze halde karışımın hareket kabiliyetini düşürmesinden dolayı işlenebilirliğini zayıflatmaktadır. Lifler karıştırma sırasında hem bir miktar topaklaşma eğiliminde olmakta ve hem de rijitlik sağlamaktadır. Ayrıca jüt liflerin su emme kapasitesinin diğer liflere kıyasla bir miktar fazla olmasından dolayı işlenebilirlik için olan serbest suyu içine emerek hapsedmektedir. Böylece yayılmayı azaltıp katkı miktarının artmasına sebep olmaktadır (Zia ve diğ., 2017; Zakaria ve diğ., 2017; Balaguru ve diğ., 1992). Ancak lif uzunluğunun artışı karışımların yayılma değerlerinde çok düşük oranlarda (%1-4) azalmaya neden olmasına rağmen genel olarak yayılma üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır. Jüt liflere GO kaplanması ise GO kaplı olmayanlara kıyasla taze hali olumlu etkilemiş, yayılma değerlerinde %6-12 bandında artış sağlamıştır.

Jüt liflerin TGA sonuçlarından GO kaplı jüt liflerin ham jüt liflere kıyasla daha az su emdiği görülmektedir. Böylece harç karışımları sırasında ham jüt liflerin ortamdaki karışım suyunu daha fazla emmesinden dolayı taze hal performansını olumsuz etkilediği düşünülmektedir.

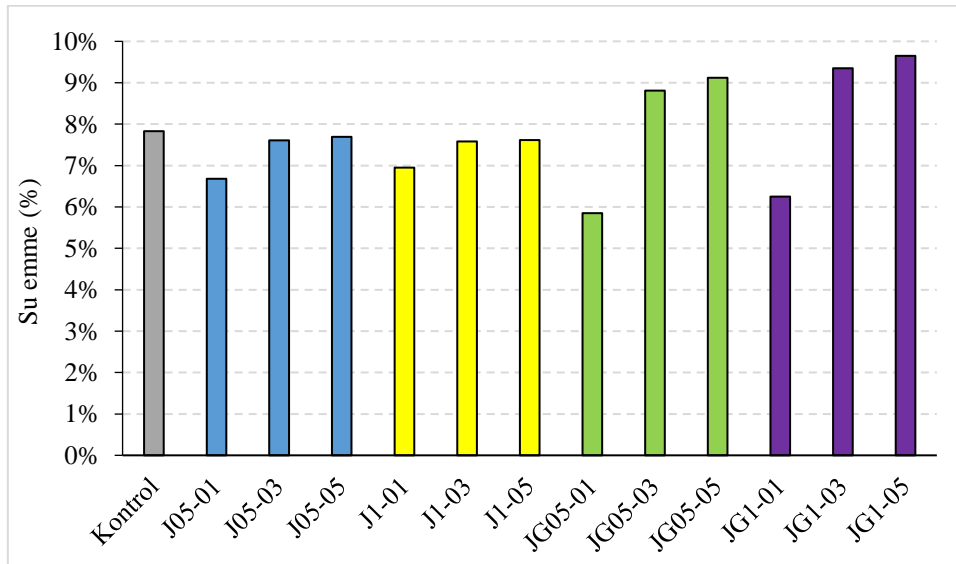
3.2. Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı ve Su Emme Değeri

Kontrol, GO kaplamasız ve GO kaplamalı lifleri içeren numunelerin 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı değerleri Şekil 7a-b'de gösterilmiştir. Su emme deneyi sonuçları Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 7:

(a) 4x4x16 cm prizmatik harç numunelerin 28 günlük eğilme dayanımları,
(b) 5 cm boyutlarında harç küp numunelerin 28 günlük basınç dayanımları

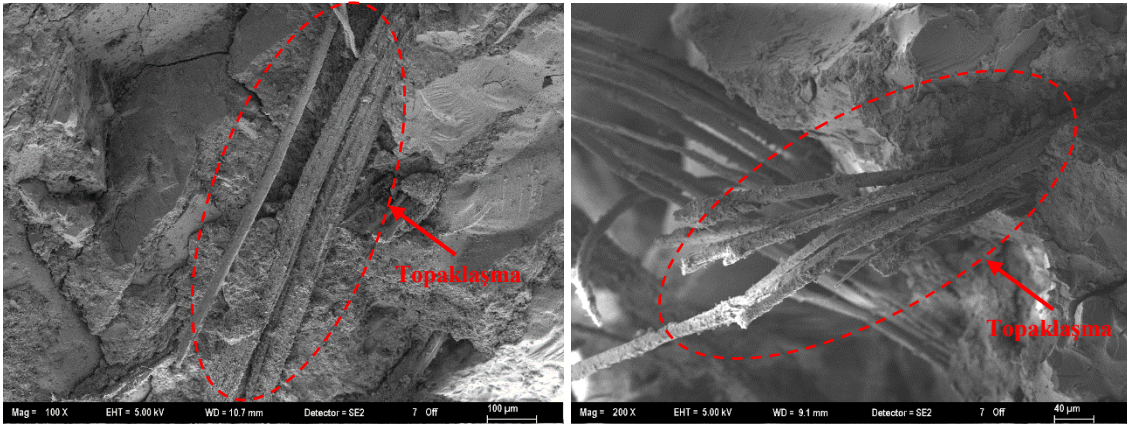


Şekil 8:

5 cm boyutlarında harç küp numunelerin 28 günlük su emme kapasiteleri

Şekil 7a'da görüldüğü üzere GO kaplamasız ve GO kaplamalı lif takviyeli harç karışımlarda en büyük eğilme dayanımı GO kaplı lif içeren JG05-01 numunesinde 8,77 MPa olarak belirlenirken, en düşük eğilme dayanımı GO kaplı olmayan lif içeren J1-05 numunesinde 5,11 MPa görülmüştür. Karışımlara 0,5 veya 1 cm boyutlarında %0,1 oranında jüt lif ilave edilmesi kontrol karışımına kıyasla eğilme dayanımlarını artırırken, bu oranın üzerinde (%0,3 ve 0,5) lif ilavesi eğilme dayanımlarının azalmasına sebep olmuştur. Özellikle karışımlarda kullanılan lif miktarının artması eğilme dayanımının daha fazla azalmasına sebep olmuştur. Ayrıca GO kaplamadan bağımsız olarak lif uzunluğu arttıkça, eğilme dayanımlarında bir miktar (yaklaşık %5) düşme gözlemlenmiştir.

Karışımda lif içeriğinin ve uzunluğunun artmasıyla eğilme dayanımındaki azalma liflerin karışımda belirli bölgelerde topaklaşmasından ve buna bağlı olarak boşluklar oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Faiq 2018). Song ve diğ. (2021) karışımlarda lif içeriğini artmasıyla liflerin karışım içerisinde dağılımının zorlaştığını ve böylece etkisinin azaldığını ifade etmişlerdir. Şekil 9'da J05-05 ve JG1-05 numunelerinin SEM görüntülerinden görüldüğü üzere lif oranı yüksek ve uzun lif içeren karışımlarda topaklaşma eğiliminde olduğunu tespit edilmiştir.



Şekil 9:

J05-05 ve JG1-05 numunelerinin SEM görüntüleri

Karışımlara %0,1 oranında jüt lif ilave edilmesi, eğilme dayanımlarını kontrol karışımına kıyasla %15-28 artırmıştır. %0,1 oranında jüt liflere GO kaplanması ile eğilme dayanımları daha üste taşınmıştır. Söz konusu bu GO kaplı lif içeren karışımlar kontrol karışımından %23-28 daha yüksek eğilme dayanımına sahip olmuştur.

Matris fazda bulunan lifler yüklemeye esnasında çatlaklar köprüleme görevi yaparak çatlakların gelişimini engellemekte ve dayanıklı bölgelere yük aktarımı yapmaktadır. Böylece çatlakların matris üzerinde yayılımını engellemektedir (Zhang ve diğ., 2020b; Mehta ve diğ., 2014). Bu davranış GO kaplı lif içeren numunelerde daha belirgin olarak görülmüştür. GO kaplı liflerin yüzeyleri kaplama yapılmayan liflere kıyasla daha pürüzlü olmasından dolayı matrisle aderansı daha güçlü olmaktadır. Böylece yüklemeye sırasında GO kaplı liflerin matristen sıyrılmaya karşı direnci daha yüksektir (Song ve diğ., 2021; Zia ve diğ., 2017). Ayrıca hidratasyon sırasında GO ile matris arasındaki ara yüzey iyileşir ve matris-lif yük transferi daha verimli olur. Böylece matristeki çatlak gelişiminde azalma tespit edilir. Bunların dışında Sarker ve diğ. (2018) jüt lif yüzeyine GO kaplanmasıyla lifin elastisite modülü ve çekme dayanımının arttığını ifade etmişlerdir. Bu bağlamda jüt lifin mekanik özelliklerinin gelişmesi harç numunelerinin mekanik özelliklerini geliştirmiştir.

Şekil 7b'da görüldüğü üzere GO kaplamasız ve GO kaplamalı lif takviyeli harç karışımlarda en büyük basınç dayanımı eğilme dayanımında olduğu gibi JG05-01 numunesinde 59,13 MPa olarak belirlenirken, en düşük basınç dayanımı JG1-05 numunesinde 35,60 MPa olarak tespit edilmiştir.

Karışımlara 0,5 veya 1 cm boyutlarında %0,1 oranında jüt lif ilave edilmesi kontrol karışımına kıyasla basınç dayanımlarını %10-25 arasında artırmıştır. Bu oranın üzerinde (%0,3 ve 0,5) lif ilavesi lifin kaplama durumuna göre basınç dayanımlarında değişiklik göstermiştir. %0,3 ve 0,5 oranlarında GO kaplı olmayan jüt lif içeren numunelerin basınç dayanımlarında kontrol karışımına kıyasla önemli bir değişim olmazken, GO kaplı olan jüt lif içeren numunelerin dayanımları kontrol karışımından yaklaşık %11-25 arasında daha düşük olmuştur. GO kaplı lif içeriğinin ve lif uzunluğunun artması bu olumsuz etkiyi daha da baskın hale getirmiştir.

%0,1 oranında jüt lif içeren karışımlarda basınç dayanımlarının artışında eğilme dayanımının artışına benzer bir mekanizma gerçekleşmiştir. Bu oranda matriste homojen olarak dağılan lifler basınç yüklemesi esnasında liflerin çatlak uçları arasında yaptığı köprüleme etkileri ile olumlu etki göstererek kontrol karışımına kıyasla basınç dayanımlarının artmasını sağlamıştır (Ali ve diğ., 2022; Teng ve diğ., 2018; Islam ve diğ., 2018; Zakaria ve diğ., 2017; Mehta ve diğ., 2014). Ayrıca jüt liflerin çatlakları yayılmasını engellemesi sırasında betonun enine deformasyona karşı direncini artırdığı da bildirilmektedir (Alomayri ve diğ., 2023; Islam ve diğ., 2018).

Söz konusu artış GO kaplı jüt lifler kullanıldığından daha fazla olmuştur. Önceden de bahsedildiği üzere GO ile matrisin güçlü aderansı basınç dayanımını da olumlu yönde etkilemiştir (Song ve diğ., 2021; Zia ve diğ., 2017). Ancak karışımlarda yüksek oranda (%0,3 ve 0,5) jüt lif kullanılması lifin basınç dayanımı üzerine olumlu etkisini yok etmiştir. %0,3 ve 0,5 oranlarında GO kaplamasız lifler kullanıldığından kontrol karışımına kıyasla basınç dayanımlarında önemli bir değişim olmamıştır. GO kaplamalı liflerde ise dayanım değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir. Zhang ve diğ. (2020a) benzer sonuçları tespit etmişlerdir. Belirli oranlarda lif kullandıklarında dayanımlarda önemli bir değişim olmazken lif içeriği arttıkça topaklaşmalara bağlı olarak porozitede artış ve basınç dayanımlarında azalma görülmüştür (Mello ve diğ., 2014; Boulekbache ve diğ., 2016). GO kaplı liflerde bu topaklaşmaların daha etkili olmasından dolayı dayanımlarda olumsuz etkiler tespit edilmiştir. Bu yüzden dayanım üzerine matriste lifin dağılımı önemlidir.

Şekil 8’de numunelerin su emme oranları incelendiğinde basınç dayanımı ile ters bir orantı olduğu görülmektedir.

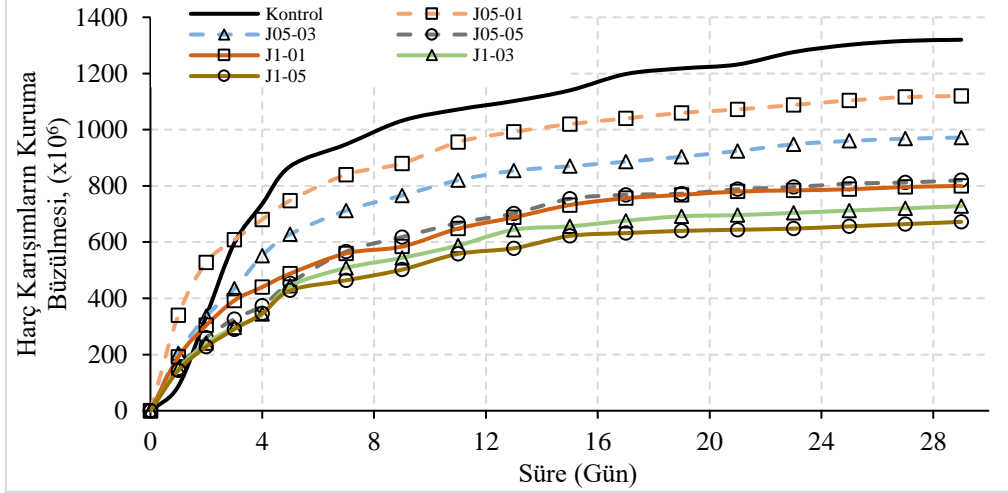
Lif uzunluğundan bağımsız olarak karışımlara GO kaplamasız ve GO kaplamalı %0,1 oranlarında jüt lif ilave edildiğinde numunelerin su emme değerlerinin kontrol karışımına kıyasla azaldığı görülmüştür. GO kaplı olmayan %0,3 ve %0,5 oranlarında jüt lifleri içeren karışımların su emme oranları kontrol karışımıninkine benzer olmuştur. %0,3 ve %0,5 oranlarında GO kaplamalı lif içeren karışımların su emme oranları kontrol karışımından yaklaşık %2 civarında daha yüksek olmuştur. Önceden bahsedildiği üzere karışımlarda yüksek oranda lif kullanılması topaklaşmaya bağlı olarak numunelerde boşluk oluşumuna bağlı olarak porozitesinin artmasına sebep olmaktadır (Bheel ve diğ., 2021; Zakaria ve diğ., 2015). Bu yüzden söz konusu numunelerin su emme oranlarında artış meydana gelmiştir.

Harç karışımlara 0,5 veya 1 cm boyutlarında hacimce %0,3-0,5 arasında lif ilave edilmesiyle matris ve lif arasında boşluk oluşumuna bağlı olarak yeterli aderans sağlanmadığı ve yükleme sırasında lif ile matrisin yekpare olarak çalışmadığı düşünülmektedir. Böylece yükleme esnasında liflerin çatlak engelleyici mekanizması gerçekleşmemiştir. Sonuç olarak harç karışımlara lif ilave edilmesiyle numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarında azalma ve su emme oranlarında artış meydana gelmiştir.

3.3 Kuruma Büzülme Deneyi

Kontrol, GO kaplamalı ve kaplamasız lifleri içeren harç numunelerin 29 güne kadar kuruma büzülme değerleri Şekil 10 ve 11’de verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere GO kaplamadan bağımsız olarak karışımlarda lif kullanılması numunelerin kuruma-büzülme değerlerini düşürmüştür. Şekil 10’da GO kaplı olmayan lif içerikli numuneler incelendiğinde lif uzunluğunun ve lif içeriğinin artmasıyla kuruma büzülme değerlerinde azalma devam etmiştir. 0,5 cm lif uzunluğuna ve %0,5 lif içeriğine sahip numunelerde (J05-05) kontrol karışımına kıyasla %38

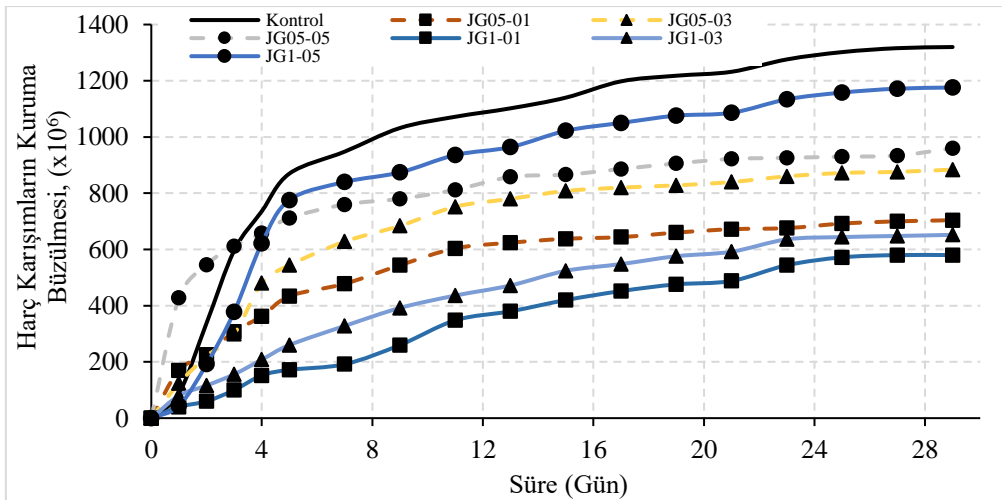
kuruma büzülmede azalma meydana gelirken, 1 cm lif uzunluğunda ve aynı oranda lif içeriğine sahip numunelerde (J1-05) bu oran %49'a yükselmiştir. Ancak lif içeriğindeki artış lif uzunluğu artışının kuruma büzülme üzerine olan olumlu etkisini düşürmüştür. Lif uzunluğunun artışı ile kuruma büzülme oranındaki azalma, lif içeriğinin artmasıyla bir miktar azalmıştır. Örneğin %0,1 lif içeriğine sahip karışımlarda lif uzunluğunun 0,5 cm'den 1 cm'e yükselmesi kuruma büzülme oranını %28,5 azaltırken, %0,3 ve %0,5 lif içeriklerinde bu oran sırasıyla %25 ve %18'e gerilemiştir.



Şekil 10:

GO kaplamasız jüt lif içeren numunelerin kuruma büzülme değerleri

Şekil 11'de GO kaplamalı lif takviyeli harç numuneler incelendiğinde GO kaplı olmayan lif içeren numunelere benzer olarak kontrol numunelerine kıyasla kuruma büzülmeleri azalmıştır. Ancak hem 0,5 cm hem de 1 cm lif içeren karışımlarda GO kaplı lif içeriğinin %0,1'den daha fazla olması kuruma büzülme değerlerinin artmasına sebep olmuştur. Örneğin JG05-05 numunesinin kuruma büzülme değeri JG05-01 numunesine kıyasla %36 daha fazla olmuştur. Ancak lif uzunluğunun kuruma büzülme etkisi farklı olmuştur. %0,1 ve %0,3 lif içeriklerinde lif uzunluğunun 0,5 cm'den 1 cm'e artması kuruma büzülme oranını düşürürken, %0,5 lif içeriğinde lif uzunluğunun artması kuruma büzülme oranını artırmıştır.



Şekil 11:

GO kaplamalı jüt lif içeren numunelerin kuruma büzülme değerleri

GO kaplamalı ve kaplamasız jüt lif içeren numunelerin kurulma büzülme davranışları karşılaştırıldığında liflere GO kaplama yapılması numunelerin kuruma büzülmesini engelleme açısından avantaj sağlamıştır. %0,5 lif içeriğine sahip numuneler hariç diğer numunelerde liflere GO kaplama yapılması kuruma büzülme değerlerinin azalmasını sağlamıştır. Ancak %0,5 lif içeriğine sahip numunelerde GO kaplamalı jüt liflerin etkinliği olumsuz yönde olmuştur. GO kaplamasızlara kıyasla 0,5 cm lif uzunluğunda %17, 1 cm lif uzunluğunda %75 kadar kuruma büzülme değerlerinde artışa sebep olmuştur.

Çimentolu sistemlerde matriste suyun buharlaşmasıyla küçük kapiler boşluklar oluşmaktadır. Böylece matriste negatif basınç gelişmekte ve sistemin hacminin azalmasına sebep olmaktadır. Söz konusu bu hacim azalması çimentolu sistemin kuruma büzülmesi ve çatlakların oluşmasıyla sonuçlanmaktadır (Ali ve diğ., 2022). Literatürden de bilindiği üzere çimentolu sistemlere jüt lif ilave edilmesiyle kuruma büzülmenin azaldığı görülmüştür (Bheel ve diğ., 2021). Lifler matriste bağ dayanımını artırarak çatlakların oluşumunu ve gelişimini engelleyerek fiziksel olarak kuruma-büzülmenin azalmasını sağlamaktadır (Li ve diğ., 2006; Zhang ve diğ., 2001; Barr ve diğ., 2003). Ayrıca doğal liflerin yüksek su emme özelliklerinden dolayı matriste içten kürlenme etkisi sağlayabilmektedir. Böylece büzülme kaynaklı çatlakların azalmasına yol açabilir (Choi ve diğ., 2023; Juarez ve diğ., 2015). Bu çalışmada da görüldüğü üzere jüt lif ilave edilmesiyle kuruma büzülmenin azaldığı tespit edilmiştir. Choi ve diğ. (2023) lifin yüzey pürüzlülüğünün etkisinden bahsetmişlerdir. Lifin pürüzlü yapısının matris ve lif arasındaki temas alanının artıracağını ifade etmişlerdir. Bu bağlamda bu tip liflerin çatlakları azaltma etkileri daha belirgin olmaktadır. Bu çalışmada da GO kaplı jüt liflerin yüzeyinin GO kaplı olmayan liflere kıyasla daha pürüzlü olmasından dolayı kuruma büzülmesinin engellenmesi üzerine daha olumlu etkileri olmuştur. Diğer taraftan karışımlarda yüksek hacimde jüt lif kullanılması numunelerin kuruma-büzülmesi artmasına sebep olmaktadır (Alomayri ve diğ., 2023). Bu durumun jüt liflerin yapısının fazla su emmesinden ve buna bağlı olarak daha fazla boşluk oluşturmasından ve daha hızlı kurumasından kaynaklandığı belirtilmektedir (Davila-Pompermayer ve diğ., 2020). Ayrıca lif içeriğini fazla olması matristeki poroziteyi ve birbirine bağlı boşlukları artırmaktadır. Lif-matris ara yüzeyi boyunca mikro kanalların oluşmasına neden olmaktadır. Böylece matriste oluşan geniş geçirgen boşluklar kuruma büzülmeyi artırmaktadır (Ali ve diğ., 2022; Toledo Filho ve diğ., 2005). Bu çalışmada da benzer mekanizma olduğu düşünülmektedir. Özellikle GO kaplı yüksek jüt lif oranlarında kuruma-büzülmenin bir miktar arttığı görülmektedir.

4. SONUÇLAR

- Karışımlara jüt lif ilave edilmesi ve lif miktarının artması harç karışımlarında hedef yayılma için gerekli katkı ihtiyacını artırmıştır. Buna karşın lif uzunluğunun işlenebilirliğe önemli bir etkisi olmamıştır. GO kaplı jüt lif içeren karışımların katkı ihtiyacı azalmıştır. Bu durum GO kaplamalı jüt liflerin kaplamasız liflere kıyasla daha az su emmesinden kaynaklanmaktadır.
- Harç karışımlarda %0,1 GO kaplamalı 0,5 cm jüt lif içeren numuneler en büyük basınç ve eğilme dayanımına sahiptir. Aynı oran ve uzunlukta lifli karışımların eğilme dayanımları karşılaştırıldığında liflere GO kaplama yapılması eğilme dayanımlarını geliştirmiştir. Harç karışımlara 0,5 ve 1 cm boyutlarında %0,1 oranlarında lif ilave edilmesi eğilme dayanımlarını artırmıştır. Liflere GO kaplama yapılması bu artışı daha da geliştirmiştir. Karışımlarda lif oranı arttıkça eğilme dayanımları olumsuz etkilenmiş, kontrol karışımının altına inmesine neden olmuştur. Ayrıca lif uzunluğunun artması eğilme dayanımlarını az da olsa düşürmüştür.
- Harç karışımlara 0,5 veya 1 cm boyutlarında %0,1 oranında jüt lif ilave edilmesi kontrol karışımına kıyasla basınç dayanımlarını artırmıştır. Ayrıca jüt liflere GO kaplama yapılması basınç dayanımlarının bir miktar daha artmasını sağlamıştır. Ancak karışımlarda GO kaplı olmayan jüt lif içeriğinin artması basınç dayanımlarını önemli mertebelerde etkilemezken, GO kaplı olan liflerin karışımlarda oranının artmasıyla basınç dayanımlarında azalma görülmüştür. Ayrıca lif uzunluğunun artması bu olumsuz etkiyi daha da artırmıştır.

- Genel olarak karışımların su emme oranları basınç dayanımı ile ters orantı göstermiştir. Harç karışımlara %0,1 oranlarında jüt lif ilave edilmesi su emme değerlerinin azalmasını sağlamıştır. GO kaplı olmayan %0,3 ve 0,5 oranlarında jüt lif içeren karışımların su emme oranlarında önemli bir değişim olmamıştır. Aynı oranlarda GO kaplı lif içeren karışımların su emme oranlarında düşük de olsa artış olmuştur.
- Genel olarak jüt lif içeren numunelerin kuruma-büzülmeleri kontrol numunesinden daha az olmuştur. GO kaplı olmayan jüt liflerin karışım içerisinde miktarının ve uzunluğunun artması kuruma büzülmesi azaltıcı etki göstermiştir. Liflere GO kaplama yapılması kuruma büzülme üzerine daha da olumlu etki oluşturmuştur. Ancak GO kaplı lifler %0,3 ve %0,5 oranlarında kuruma büzülme üzerine olumlu etkinin azalmasına neden olmuştur.
- Doğal liflerden olan jüt lifler maliyeti düşük olmasından ve çimentolu sistemlerin mekanik ve durabilite özelliklerini geliştirmesinden dolayı karışımlarda kullanılması tavsiye edilmektedir. Ancak karışımlarda içeriklerinin fazla olması ve uzun boylarda kullanılması taze ve mekanik özellikler bakımından olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Bu yüzden optimum miktarda ve uzunlukta jüt liflerin kullanılması önerilmektedir. Ayrıca jüt lifin içyapısından kaynaklı olarak su emme özelliklerinin fazla olması ve alkali ortamdan olumsuz etkilenmesinin önüne geçilmesi için yüzey özelliklerinde farklı kimyasal ve fiziksel işlemler uygulanması önerilmektedir. Bu çalışma kapsamında harç karışımlarda 0,5 cm boyutlarında %0,1 oranında GO kaplı jüt lif kullanılması taze hal, mekanik ve durabilite özellikleri açısından önerilmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Süleyman ÖZEN çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, deneysel çalışmaların yönetilmesi ve makalenin yazımı konularında katkı sunmuştur.

KAYNAKLAR

1. Afroughsabet, V., & Ozbakkaloglu, T. (2015). Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and building materials*, 94, 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051>
2. Ali, B., Hawreen, A., Kahla, N. B., Amir, M. T., Azab, M., & Raza, A. (2022). A critical review on the utilization of coir (coconut fiber) in cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 351, 128957. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128957>
3. Alomayri, T., & Ali, B. (2023). Investigating the load-deflection behaviour and drying shrinkage resistance of HPC reinforced using different cellulose fibres. *Journal of Building Engineering*, 73, 106714. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106714>
4. Aluko, O. G., Yatim, J. M., Kadir, M. A. A., & Yahya, K. (2020). A review of properties of bio-fibrous concrete exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 260, 119671. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119671>
5. Asprone, D., Durante, M., Prota, A., & Manfredi, G. (2011). Potential of structural pozzolanic matrix-hemp fiber grid composites. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2867-2874. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.046>
6. Aziz, M. A., Paramasivam, P., & Lee, S. L. (1981). Prospects for natural fibre reinforced concretes in construction. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 3(2), 123-132. [https://doi.org/10.1016/0262-5075\(81\)90006-3](https://doi.org/10.1016/0262-5075(81)90006-3)

7. Balaguru, P. N., & Shah, S. P. (1992). Fibre-reinforced cement composites. New York: Macgraw-Hill.
8. Banthia, N., Zanotti, C., & Sappakittipakorn, M. (2014). Sustainable fiber reinforced concrete for repair applications. *Construction and Building Materials*, 67, 405-412. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.073>
9. Barr, B., Hoseinian, S. B., & Beygi, M. A. (2003). Shrinkage of concrete stored in natural environments. *Cement and Concrete Composites*, 25(1), 19-29. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(01\)00044-0](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(01)00044-0)
10. Bazant, Z. P., & Planas, J. (2019). Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials. 1st Edition. CRC Press.
11. Bheel, N., Tafsirojjaman, T., Liu, Y., Awoyera, P., Kumar, A., & Keerio, M. A. (2021). Experimental study on engineering properties of cement concrete reinforced with nylon and jute fibers. *Buildings*, 11(10), 454. <https://doi.org/10.3390/buildings11100454>
12. Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M., & Amziane, S. (2016). Flexural behaviour of steel fibre-reinforced concrete under cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 126, 253-262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.035>
13. Chakma, M. A., & Amin, R. (2016). Strength and Durability Properties of Concrete by using Jute and Polypropylene Fibers. BUET-ANWAR ISPAT 1st Bangladesh Civ. Eng. SUMMIT, Dhaka.
14. Chakraborty, S., Kundu, S. P., Roy, A., Adhikari, B., & Majumder, S. B. (2013). Effect of jute as fiber reinforcement controlling the hydration characteristics of cement matrix. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(3), 1252-1260. <https://doi.org/10.1021/ie300607r>
15. Chandar, S. P., & Balaji, C. J. (2015). Experimental study on the mechanical properties of concrete mixed with jute fiber and steel fiber. *Int Res J Eng Technol*, 1, 77-82.
16. Chen, J., Yao, B. W., Li, C., & Shi, G. Q. (2013). An improved Hummers method for eco-friendly synthesis of graphene oxide. *Carbon*, 64, 225-229. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.07.055>
17. Choi, S., Panov, V., Han, S., & Yun, K. K. (2023). Natural fiber-reinforced shotcrete mixture: Quantitative assessment of the impact of fiber on fresh and plastic shrinkage cracking properties. *Construction and Building Materials*, 366, 130032. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130032>
18. Dávila-Pompermayer, R., Lopez-Yepe, L. G., Valdez-Tamez, P., Juárez, C. A., & Durán-Herrera, A. (2020). Lechugilla natural fiber as internal curing agent in self compacting concrete (SCC): Mechanical properties, shrinkage and durability. *Cement and Concrete Composites*, 112, 103686. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103686>
19. Faiq, L. S. (2018). Study of the mechanical properties of jute fiber reinforced cement composites. *Engineering and Technology Journal*, 36(12A), 1244-1248. <https://doi.org/10.30684/etj.36.12a.5>
20. Hasan, R., Sobuz, M. H. R., Akid, A. S. M., Awall, M. R., Houda, M., Saha, A., Meraz, M. M., Islam, M.S. & Sutan, N. M. (2023). Eco-friendly self-consolidating concrete production with reinforcing jute fiber. *Journal of Building Engineering*, 63, 105519. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105519>

21. Islam, M. S., & Alam, S. (2013). Principal component and multiple regression analysis for steel fiber reinforced concrete (SFRC) beams. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7, 303-317. <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0059-7>
22. Islam, M. S., & Ahmed, S. J. (2018). Influence of jute fiber on concrete properties. *Construction and Building Materials*, 189, 768-776. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.048>
23. Islam, M. S. (2021). Simplified shear-strength prediction models for steel-fibre-reinforced concrete beams. *Proceedings of the institution of civil engineers-construction materials*, 174(2), 88-100. <https://doi.org/10.1680/jcoma.16.00073>
24. Khan, M. B., Shafiq, N., Waqar, A., Radu, D., Cismaş, C., Imran, M., Almujiabah, H., & Benjeddou, O. (2023). Effects of jute fiber on fresh and hardened characteristics of concrete with environmental assessment. *Buildings*, 13(7), 1691. <https://doi.org/10.3390/buildings13071691>
25. Juarez, C. A., Fajardo, G., Monroy, S., Duran-Herrera, A., Valdez, P., & Magniont, C. (2015). Comparative study between natural and PVA fibers to reduce plastic shrinkage cracking in cement-based composite. *Construction and Building Materials*, 91, 164-170. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.028>
26. Kundu, S. P., Chakraborty, S., Roy, A., Adhikari, B., & Majumder, S. B. (2012). Chemically modified jute fibre reinforced non-pressure (NP) concrete pipes with improved mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 37, 841-850. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.082>
27. Li, Z., Lara, M. A. P., & Bolander, J. E. (2006). Restraining effects of fibers during non-uniform drying of cement composites. *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1643-1652. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.04.001>
28. Mansur, M. A., & Aziz, M. A. (1982). A study of jute fibre reinforced cement composites. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 4(2), 75-82. [https://doi.org/10.1016/0262-5075\(82\)90011-2](https://doi.org/10.1016/0262-5075(82)90011-2)
29. Mazaheripour, H., Barros, J. A., & Sena-Cruz, J. (2016). Tension-stiffening model for FRC reinforced by hybrid FRP and steel bars. *Composites Part B: Engineering*, 88, 162-181. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.10.042>
30. Mehta P.K., Monteiro P.J.M. (2014). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. 4th ed. Englewood Cliffs (NJ): McGraw- Hill.
31. Mello, E., Ribellato, C., & Mohamedelhassan, E. (2014). Improving concrete properties with fibers addition. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 8(3), 249-254.
32. Onuaguluchi, O., & Banthia, N. (2016). Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 68, 96-108. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.02.014>
33. Özen, S., Benlioğlu, A., Mardani, A., Altın, Y., & Bedeloğlu, A. (2024). Effect of graphene oxide-coated jute fiber on mechanical and durability properties of concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 448, 138225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138225>
34. Rahman, S., & Azad, M. A. K. (2018). Investigation on mechanical strength of jute fiber reinforced concrete JFRC compared to plain concrete. *Int. J. Sci. Eng. Res*, 9, 560-564.

35. Ramakrishna, G., & Sundararajan, T. (2005). Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 575-582. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.008>
36. Raval, G., & Kansagra, M. (2017). Effects of Jute Fibers on Fiber-Reinforced concrete. *International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering*, 4(8), 7-12.
37. Sarker, F., Karim, N., Afroj, S., Koncherry, V., Novoselov, K. S., & Potluri, P. (2018). High-performance graphene-based natural fiber composites. *ACS applied materials & interfaces*, 10(40), 34502-34512. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b13018.s001>
38. Song, H., Liu, J., He, K., & Ahmad, W. (2021). A comprehensive overview of jute fiber reinforced cementitious composites. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00724. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00724>
39. Stancato, A. C., Burke, A. K., & Beraldo, A. L. (2005). Mechanism of a vegetable waste composite with polymer-modified cement (VWCPCMC). *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 599-603. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.011>
40. Sultana, N., Hossain, S. Z., Alam, M. S., Hashish, M. M. A., & Islam, M. S. (2020). An experimental investigation and modeling approach of response surface methodology coupled with crow search algorithm for optimizing the properties of jute fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 243, 118216. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118216>
41. Teng, S., Afroughsabet, V., & Ostertag, C. P. (2018). Flexural behavior and durability properties of high performance hybrid-fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 182, 504-515. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.158>
42. Toledo Filho, R. D., Ghavami, K., Sanjuán, M. A., & England, G. L. (2005). Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. *Cement and concrete composites*, 27(5), 537-546. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.005>
43. Wang, W., Liu, J., Agostini, F., Davy, C. A., Skoczylas, F., & Corvez, D. (2014). Durability of an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under progressive aging. *Cement and Concrete Research*, 55, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.09.008>
44. Zakaria, M., Ahmed, M., Hoque, M. M., & Hannan, A. (2015). Effect of jute yarn on the mechanical behavior of concrete composites. *SpringerPlus*, 4, 1-8. <https://doi.org/10.1186/s40064-015-1504-7>
45. Zakaria, M., Ahmed, M., Hoque, M. M., & Islam, S. (2017). Scope of using jute fiber for the reinforcement of concrete material. *Textiles and Clothing Sustainability*, 2(1), 1-10. <https://doi.org/10.1186/s40689-016-0022-5>
46. Zhang, J., & Li, V. C. (2001). Influences of fibers on drying shrinkage of fiber-reinforced cementitious composite. *Journal of engineering mechanics*, 127(1), 37-44. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(2001\)127:1\(37\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2001)127:1(37))
47. Zhang, D., Tan, K. H., Dasari, A., & Weng, Y. (2020a). Effect of natural fibers on thermal spalling resistance of ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 109, 103512. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103512>
48. Zhang, T., Yin, Y., Gong, Y., & Wang, L. (2020b). Mechanical properties of jute fiber-reinforced high-strength concrete. *Structural Concrete*, 21(2), 703-712. <https://doi.org/10.1002/suco.201900012>

49. Zhou, X., Ghaffar, S. H., Dong, W., Oladiran, O., & Fan, M. (2013). Fracture and impact properties of short discrete jute fibre-reinforced cementitious composites. *Materials & Design*, 49, 35-47. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.01.029>
50. Zia, A., & Ali, M. (2017). Behavior of fiber reinforced concrete for controlling the rate of cracking in canal-lining. *Construction and Building Materials*, 155, 726-739. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.078>