



Metakaolin Katkılı Sisal Lifle Güçlendirilmiş Kendiliğinden Yerleşen Betonların Bazı Özelliklerinin İncelenmesi

Evaluation of Some Properties of Metakaolin Added and Sisal Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete

Mehmet Uzun¹

¹Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 70100, Karaman Türkiye

Başvuru/Received: 11/03/2024 Kabul/Accepted: 10/05/2024 Çevrimiçi Basım/Published Online: 30/06/2024
Son Versiyon/Final Version: 30/06/2024

Öz

Beton en yaygın yapı malzemelerinden biridir. Beton yüksek durabilite, düşük maliyet gibi özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Ancak beton düşük eğilme ve çekme dayanımı, gözenekli yapı gibi olumsuz özelliklere de sahiptir. Bu nedenle betonun olumsuz özelliklerini geliştirmek için çeşitli çalışmalar devam etmektedir. Betonun içerisinde lif kullanımı son yıllarda betonun düşük mekanik özelliklerini yükseltmek için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Lifler endüstriyel ve doğal yollarla elde edilmektedir. Doğal yollarla elde edilen liflerin kullanımı çevre dostu olması nedeniyle daha çok tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, karışım hacminin %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0' si kadar sisal lif eklenmiş betonun mekanik özellikleri incelenmiştir. Sisal lif ekli kendiliğinden yerleşen betonların işlenebilirliği, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve donma çözünme dayanımları incelenmiştir. Sonuç olarak betonun işlenebilirliğini ve donma çözünme dayanımını çok kaybetmeden diğer mekanik özelliklerini geliştiren bir lif oranı elde edilmiştir. Lif oranına bağlı olarak betonun basınç dayanımında %11.7 civarında, eğilme dayanımında ise neredeyse 2 kat dayanım artışları görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

“Sisal lif, kendiliğinden yerleşen beton, metakaolin, doğal lifler, donma-çözünme”

Abstract

Concrete is one of the most common building materials. Concrete stands out with its properties such as high durability and low cost. However, concrete also has negative properties such as low flexural and tensile strength and porous structure. Therefore, various studies are ongoing to improve the negative properties of concrete. The use of fiber in concrete is a frequently used method in recent years to increase the low mechanical properties of concrete. Fibers are obtained by industrial and natural means. The use of fibers obtained by natural means is more preferred due to their environmental friendliness.

In this study, the mechanical properties of concrete with sisal fiber added at 0.5%, 1.0%, 1.5% and 2.0% of the mixture volume were examined. Workability, compressive strength, flexural strength and freeze-thaw resistance of sisal fiber added self-compacting concretes were examined. As a result, a certain fiber ratio that improves the concrete's mechanical properties without losing much of its workability and freeze-thaw resistance was obtained. There was an increase of around 11.7% in the compressive strength of the concrete and almost a 2 times increase in the flexural strength by depending on the fiber content.

Key Words

“Sisal fiber, self-compacting concrete, metakaolin, natural fibers, freeze-thaw”

1. Giriş

Dünya nüfusunun giderek artması bina inşaatlarının da artmasına neden olmaktadır (Althoey & Farnam, 2019; Alvee et al., 2022). Temel insani ihtiyaçları karşılamak amacıyla gerekli temel binaların (konut, hastane, işyeri, havaalanı, alışveriş merkezi v.b.) insanların kullanımına sunulması gerekmektedir. Binaların yapımı esnasında ise en önemli yapı malzemesi olarak beton karşımıza çıkmaktadır.

Beton yüksek basınç dayanımı, düşük maliyeti, yangın dayanımı, hammaddeye ulaşım kolaylığı gibi birçok avantajı nedeniyle binaların yapımında en önemli yapı malzemesi olmaya yıllardır devam etmektedir (Ahmad et al., 2022). Dünya çapında her yıl yaklaşık 6 milyar ton üretilerek sudan sonra en çok tüketilen madde olarak ikinci sırada gelmektedir (Sabir et al., 2001). Betonun en önemli yapı taşlarından biri olan çimento ise termal ve dayanıklılık gibi mekanik özelliklerinden dolayı inşaat sektöründeki yerini ve kullanımını her geçen gün artırmaktadır. Ancak çimento üretiminin çevreye karbondioksit salınımı nedeniyle ciddi zararları da olmaktadır. Yapılan araştırmalara göre dünya genelindeki CO₂ salınımının yaklaşık olarak % 5'i çimento üretiminden kaynaklanmaktadır. Her bir ton çimento üretmek için 0.85 ton CO₂ salınımı gerçekleşmektedir (Huntzinger & Eatmon, 2009; Meena et al., 2023). CO₂ salınımının yüksek olması nedeniyle çevresel kaygılar artmaktadır. Bu nedenle, daha az karbon ayak izine sahip, üretimi sırasında daha az enerji kullanan ve endüstriyel katı atıkların tüketimini sağlayan yeni beton karışımlarının tasarlanması yaygınlaşmaktadır (Dhasmana & Singh, 2023). Bu durum ise, tamamlayıcı maddelerin beton içerisinde kullanımını beraberinde getirmiştir. Bu malzemeler genellikle atıklardan, doğal yollardan ya da az CO₂ salınımı ile elde edilen malzemelerdir (D. Zhang et al., 2020).

Çimentonun karbon ayak izini düşürmek için birçok çalışma gerçekleştirilirken (Kaplan et al., 2018), çimento yerine beton içerisinde kullanılmak amacıyla bir çok malzeme çalışmalarda kullanılmaktadır (Yıldızel & Toktas, 2022). Deneysel çalışmalarda öne çıkan ikame malzemeleri olarak metakaolin, yüksek fırın cürufu, cam tozu, kömür tozu, öğütülmüş kalsiyum karbonat örnek olarak gösterilebilir. Jeopolimerler, sülfat çimentosu, emülsifiye asfalt ve magnezyum fosfat çimentosu (MPC) gibi ikame malzemeleri inşaat sektöründe çokça kullanılmaktadır. MPC, teknik özellikleri itibarıyla hızlı katılaşma ve sertleşme, minimum genleşme, sınırlı hacim stabilitesi ve güçlü aderans özelliklerine sahiptir (Villanueva et al., 2024).

MPC, sıcaklık etkisi ile inorganik seramik malzemeye dönüşmektedir. Bu sıcaklık etkisi 85°C ile 700°C arasından ise MPC' nin hidratasyon ürünü olan struvitin amorf faza erişim sağlamaktadır. Dolayısı ile kaolinin kalsinasyonu ile metakaolin (Al₂O₃.2SiO₂) şeklinde ürün olarak ortaya çıkmaktadır (Mo et al., 2021). Metakaolin, çimentonun ilk hidratasyon sürecini hızlandırmakta ve katkılı betonun mekanik özelliklerini artırmaktadır (Evangelista & de Brito, 2010).

Beton üretiminde kullanılan farklı türdeki katkı malzemeleri bilimsel ve teknik olarak uzun yıllardır araştırılmaktadır (Bangi & Horiguchi, 2011). Bu yenilikçi araştırmalar sonucunda ortaya çıkan malzemelerden biri de çeşitli kullanımlar için beton üretiminde değerlendirilen liflerdir (Ahmad & Zhou, 2022). Liflerin genel olarak yüksek çekme dayanımı sayesinde betonun zayıf olan çekme ve eğilme mukavemetini geliştirmek için kullanımı yaygındır. Bu lifler doğal ve sentetik elyaflar olarak karşımıza çıkmakla birlikte, düşük maliyetleri, doğada kolayca bulunabilmeleri gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca ekosisteme sağladıkları pozitif katkıları ile de yalnızca inşaat sektöründe değil, otomotiv ve havacılık sektörü gibi endüstriyel sektörlerde de kullanılmaktadır. Doğal liflerin zorlu koşullarda bile kimyasal yapıları bozulmadan beton içerisinde kalabilmeleri önemli bir tercih nedeni olmaktadır. Lifler yoğunluk bakımından düşük değere sahiptir ve özellikleri bakımından da kullanışlıdır (Wang et al., 2023).

Lifler organik ve inorganik olmak üzere çeşitli türlere ayrılmaktadır. Yapılarda mukavemeti ve sünekliği artırıcı bağlamda fiber katkılı malzemelerin kullanılması, beton türevi malzemelerin kullanımında etken rol oynamaktadır. Mekanik özellikleri artırıcı özellikleri ile yapısal elemanlarda tercih edilen lifli betonlar, yapısal olmayan elemanlarda ise ısı ve ses yalıtımı, yangın dayanımı gibi özellikleri ile tercih edilmektedir. Bu lifler sentetik lifler ve doğal lifler olarak çeşitlendirilebilir (Ren et al., 2021).

Tablo 1' de hayvansal, mineral ve selülozik türleri olarak lifler 3 başlık altında verilmektedir ve bu lif türlerinin neler olduğu ve yapısal özellikleri bu tabloda yer almaktadır.

Tablo 1. Doğal lif çeşitleri (Ahmad & Zhou, 2022)

Doğal lif çeşiti	Elde edildiği yer	Lif Türü
Selülozik lif	Odun	Okalıptüs
	Çim/Kamış	Mısır ve bambu
	Meyve	Hindistan cevizi
	Sap	Pirinç, buğday, mısır
	Bast	Kenevir, kenef, keten, sisal
	Yaprak	Ananas, muz, pamuk
Hayvansal lif	Tohum	Ceviz, küspe
	İpek	Keçi, koyun, at kılı
	Saç/Yün	Koyun yünü, tiftik
Mineral lif		Asbest, cam, grafit

Bu tarz lifler inşaat sektöründe genellikle beton boru ve türevi beton esaslı malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. Doğal ürünlerden elde edilen doğal lifler, ekolojik dengeyi koruma amacıyla kullanılmaktadır (Melo Filho et al., 2013). Bu tarz lifler ürün kalitesi ve ekolojik dengeye olan zararsızlığı nedeniyle de daha çok tercih edilmektedir. Sentetik liflerin üretimi sırasında karbon salınımı olması nedeniyle çevreye zararları vardır. Ancak doğal liflerin doğal ortamdan elde edilmesi doğal lifleri sürdürülebilir karbon ayak izi düşük yapı malzemelerinden biri yapmaktadır.

Doğal liflerden biri olan sisal lifleri özellikle tropikal bölgelerde bol miktarda bulunur. Kolay ve çok miktarda bulunması nedeniyle de kıymetli bir lif türü olarak görülmektedir (Wang et al., 2023). Tohum ve meyve lifleri içerisinde yer alan Hindistan cevizi lifi betonda kullanımı bakımından en uygun olan liftir (Ren et al., 2021). Ayrıca tropikal alanlar bambu çeşitleri açısından zengindir ve bu durum beton üretimi açısından da avantaj sağlamaktadır (Ahmad & Zhou, 2022).

Bu çalışmada metakaolin ve sisal fiber eklentili beton numuneleri hazırlanarak, sisal fiber miktarındaki değişimin betonun, taze beton ve sertleşmiş beton olarak teknik özelliklerine etkileri incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Malzeme Özellikleri

Çalışma kapsamında TS-EN 197/1 standardına uygun olarak CEM I 42,5 R sınıfındaki çimento tercih edilmiştir (TS-EN-197-1, 2012). Kullanılan numune çimentoya ait veriler, fiziksel ve kimyasal niteliklerinin yer aldığı Tablo 2 'de verilmiştir. Numune karışımında kaba agrega olarak kırma taş agrega kullanılmıştır. İnce agrega olarak ise doğal kum agrega kullanılmıştır. Doğal kum özellikleri itibarıyla (maksimum tane çapı, özgül ağırlığı, su emme ve incelik modülü sırasıyla %4,70, %2,62, %1 ve %2,72) tespit edilmiştir. Numunede kullanılan agrega TS 706 EN 12620 Standardına uygun koşullarda karışımda yer almıştır (TS 706 EN 12620, 2009). Ayrıca numune karışımlarda polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı malzeme kullanılmıştır. Kullanılan süper akışkanlaştırıcıya ait teknik özellikler aşağıda bulunan Tablo 3' te yer almaktadır.

Tablo 2. Çimentonun mekanik özellikleri

Kimyasal özellikler (%)	Fiziksel ve mekanik özellikler		
K ₂ O	0.41	İlk prizlenme süresi (dak.)	132
SiO ₂	16.26	Son sertleşme süresi (dak.)	183
CaO	64.53	2 günlük basınç dayanımı (MPa)	26.83
MgO	19.42	28 günlük basınç dayanımı (MPa)	50.16
SÖ ₃	2.82	Özgül ağırlık (g/cm ³)	3.09
Fe ₂ O ₃	0.143	Spesifik yüzey (cm ² /g)	3418
Al ₂ O ₃	4.92		
Na ₂ O	3.76		
Cl ⁻	0.0192		

Tablo 3. Süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri

Süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri	Değer
Renk	Sütlü kahverengi
Kaynama noktası	90-110 °C
Termal ayrışma	> 684 °C
Yoğunluk	1.21 gr/ cm ³
PH değeri	8.9-11.7
Su çözünürlüğü	<u>Suda çözünür</u>

2.2. Sisal Lif ve Teknik Özellikleri

Sisal lif, sert ve doğal bir liftir ve agave sisalana adlı bir bitki türünün yapraklarında bulunmaktadır. Sisal elyafı lacivert halat, balık ağları, halı, hasır gibi ürünlerin imalatında kullanılmaktadır (Şekil 1). Bu özellikleri itibariyle dünya genelinde en yaygın kullanılan lif türüdür (A. Zhang et al., 2024).



Şekil 1. Sisal lif

Ayrıca sisal, ekolojik dengeye pozitif katkı sunmakta, temin edilebilirliği bakımından da kolay ulaşılabilir durumda ve düşük maliyetlidir.

Teknik özellikleri bakımından aşınma direnci, tuz ve alkali direnci, korozyon direnci ve çekme mukavemetine sahip bulunmaktadır. Ayrıca bilimsel araştırmalarda görüldüğü üzere sisal lif-çimento kompozitlerin dayanıklılığını sağlamak, Portland çimentolarının hidratasyonu sırasında üretilen kalsiyum hidroksiti tüketmek için çimento karışımına metakaolin eklenmiştir. Sisal lif takviyeli yapılan çalışmalar da temel olarak dört grupta incelenmektedir (Ren et al., 2022). Bunlar; statik ve mekanik özelliklerin güçlendirilmesi ve yüksek sıcaklık direncinin artırılmasıdır. Sisal lif katkılı karışımdaki yüksek güçlendirme sonucu, çelik ve polimer lif takviyeli karışıma göre çok daha düşük maliyet ve kaynak kullanımına sahiptir. Bu duruma rağmen, sisal lif maliyeti, karışımın maliyetinden daha fazladır. Dolayısıyla sisal içeriğini en aza indirgeyerek karışımın performans sonucu sağlanmalı ve lif kullanılmasına dikkat edilmelidir (Soni et al., 2023).

2.3. Karışımın Hazırlanması ve Özellikleri

Çalışma kapsamında hazırlanan karışımda 50 mm uzunluğunda ve 0.2 mm çapında lifler kullanılmıştır. Sonrasında karışımda yer alan çimento miktarının %10' u kadar metakaolin eklenmiş ve karışımdaki çimento aynı oranda azaltılmıştır. Karışımda toplam 350 kg bağlayıcı kullanılmış, çimento miktarının %2' si kadar da akışkanlaştırıcı malzeme eklenmiştir. Tablo 4' te çalışmada oluşturulan karışım oranları sunulmuştur.

Tablo 4. Karışım oranları tablosu

Numune	Çimento	Su	İnce Agregata	Kaba Agregata	Metakaolin	Süper Akışkanlaştırıcı	Sisal Lif	Su / Bağlayıcı
	kg / m ³	kg / m ³	kg / m ³	kg / m ³	kg / m ³	kg / m ³	%(Karışım hacmine oranla)	
R	315	126	490	910	35	6.3	0	0.36
SFRC-0.5	315	126	490	910	35	6.3	0,5	0,36
SFRC-1.0	315	126	490	910	35	6.3	1	0.36
SFRC-1.5	315	126	490	910	35	6.3	1,5	0.36
SFRC-2.0	315	126	490	910	35	6.3	2	0.36

2.4. Deney Yöntemleri

Tablo 4' te karışım özellikleri verilen numunelerden alınan taze beton örnekleri üzerinde yayılma çapı ölçümleri Şekil 2' de ve Şekil 3' te gösterildiği gibi yapılmıştır. Çökme deneyleri TS EN 1170-1 ve TS EN 12350-8 yönetmeliklerine göre ayrı ayrı yapılmıştır (TS-EN-1170-1, 1999; TS EN 12350-8, 2019). İki yönetmeliğin tercih edilmesinin nedeni, sisal fiber için ayrı bir standart olmayışı ve cam fiber takviyeli beton standardıyla karşılaştırma yapılması içindir. Ayrıca taze beton üzerinde L-Kutusu deneyi Şekil 4' te verilen düzenek ile yapılmıştır (TS-EN-12350-10, 2011). Deney sonuçlarına bağlı olarak betonun işlenebilirliği incelenmiştir.

Sertleşmiş beton numunelerinde ise ilk olarak basınç dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanım deneyleri TS EN 12390-3 yönetmeliğine uygun olarak yapılmıştır (TS-EN-12390-3, 2019). 150x150x150 mm ölçülerinde küp numuneler deney için hazırlanmıştır. Numuneler 2, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonrasında test edilmiştir. Numuneler darbe etkisi oluşturmayan 2000 kN yük kapasitesine sahip Şekil 5' te verilen basınç deney cihazı ile test edilmiştir. Deney sırasında yükleme hızı sabit tutulmuştur. Her karışım türünden üçer adet deney numunesi hazırlanmıştır. Numunelerin deney sonuçlarının ortalaması basınç dayanımı olarak kabul edilmiştir.



Şekil 2. Çökme deneyi (TS EN 1170-1' e göre)



Şekil 3. Çökme deneyi (TS EN 12350-8' e göre)



Şekil 4. L-Kutusu deneyi



Şekil 5. Basınç dayanım deneyi

TS EN 12390-5 yönetmeliğine göre eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir (TS-EN-12390-5, 2019). Deneyler için 40x40x160 mm ölçülerinde prizmatik numuneler hazırlanmıştır. Numuneler 2, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda Şekil 6' da görüldüğü gibi deneylere tabi tutulmuştur. Her bir karışım ve farklı kür süreleri için üçer adet numune hazırlanmıştır. Deney sonuçlarının ortalaması eğilme dayanımı olarak kabul edilmiştir.



Şekil 6. Eğilme dayanım deneyi

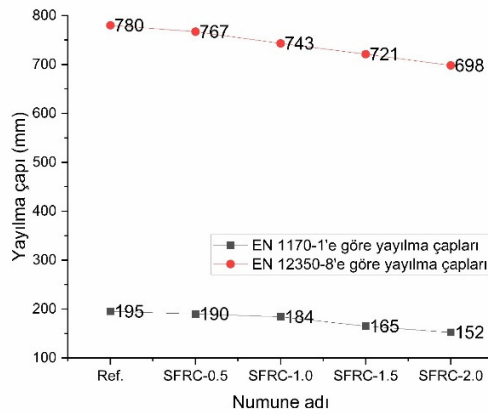
Donma çözünme deneylerinde sıcaklık 4 °C' den -18 °C' ye düşürülmüş, tekrardan 4 °C' ye çıkarılmıştır. Bu döngü 300 kere tekrarlanmış daha sonra numunelerin basınç ve eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde ASTM C666-03 yönetmeliğindeki adımlar takip edilmiştir (ASTM C666/C666M - 03, 2008).

3. Bulgular ve Tartışma

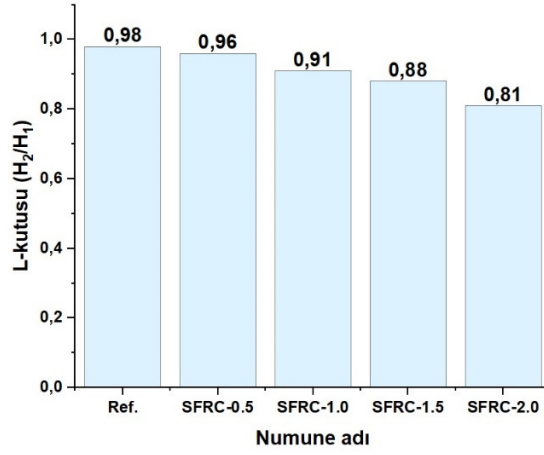
3.1. Taze Beton Değerlendirmesi

Farklı lif miktarlarına bağlı olarak hazırlanan R, SFRC-0.5, SFRC-1.0, SFRC-1.5, SFRC-2.0' a ait yayılma çapı değerleri iki farklı yönetmelik için Şekil 7' de yer almaktadır. Taze beton ile yapılan L-Kutusu deney sonuçları ise Şekil 8' de verilmiştir. Taze betonun ayrışmadan kolayca taşınmasına ve kalıba yerleştirilebilmesine işlenebilirlik denir (Okeola et al., 2018). İşlenebilirlik su/çimento oranı, agrega/çimento oranı, agrega granülometrisi gibi birçok faktörden etkilenir. İşlenebilirlik, yapılar da kalıp içerisinde beton yerleşimini etkilediği için önemli bir parametredir. Özellikle beton yerleşiminin zor olduğu kısımlarda (kolon-kiriş birleşimi gibi) işlenebilirliğin önemi daha da çok artmaktadır (Ismail & AL-Hashmi, 2008).

Çalışmadan elde edilen değerler, sabit su/çimento oranı ve sabit süper akışkanlaştırıcı miktarına bağlı olarak karışımdaki lif oranı arttıkça betonun işlenebilirliğinin azaldığını, buna bağlı olarak da yayılma çapının düştüğünü göstermektedir. Özellikle %1 lif oranına kadar kabul edilebilir bir işlenebilirlik ortaya çıkarken %1' den daha fazla lif eklenmesi durumunda ekstra önlemler alınması gerekecektir (Tolga Cogurcu, 2022). Lif oranı karışım içerisinde arttıkça topaklanma etkisi de daha çok artmıştır. Ayrıca liflerin karışım içerisindeki suyu emmesi nedeniyle karışımdaki lif oranının artması karışımdaki su ihtiyacını artırmakta sabit su/çimento oranı nedeniyle işlenebilirlik azalmaktadır (Tolga Cogurcu, 2022). L-Kutusu deneyi kalıp içerisinde donatının varlığı durumunda betonun yerleşimi hakkında yorum yapabilmeyi sağlayan bir deney yöntemidir. L-Kutusu deneyi sonuçlarına göre lif oranındaki artışın betonda topaklanma ve akışkanlığın azalmasına neden olduğu görülmektedir. Lif oranındaki artış nedeniyle bir tıkanma olmamakla birlikte beton yayılma oranının azaldığı gözlemlenmiştir (Çelik & Bingöl, 2020). Lif oranındaki azalma betonun ilerlemesinde azalmaya neden olmuş bloklanma oranını düşürmüştür. Lif oranının artışı ile topaklanma, betonda geçiş ve akışkanlık yeteneğinde azalma olmasına rağmen genel kabul gören 0.8 bloklanma oranından büyük değerler bütün numunelerde elde edilmiştir (Ramanathan et al., 2013).



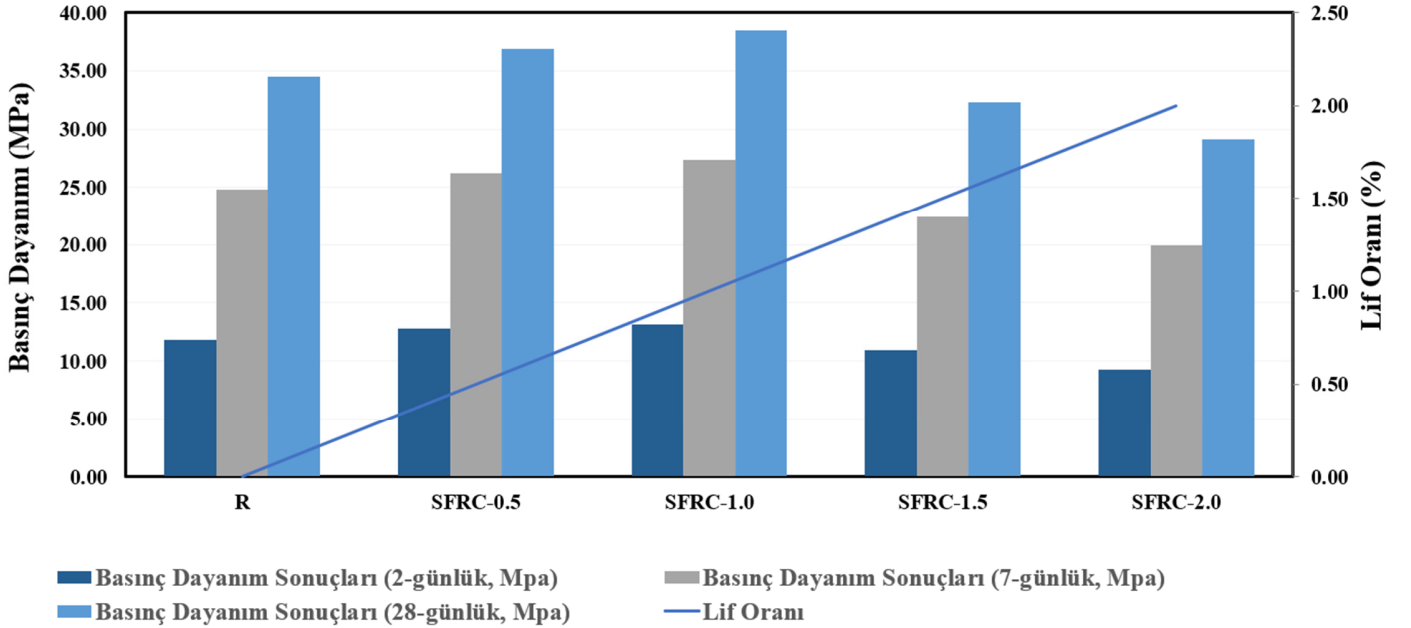
Şekil 7. Yayılma çapı değerleri



Şekil 8. L-Kutusu deney sonuçları

3.2. Basınç Dayanım Sonuçları

R, SFRC-0.5, SFRC-1.0, SFRC-1.5, SFRC-2.0 adlı numunelerin lif oranlarına göre 2 günlük, 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanım değerleri Şekil 9' da sunulmuştur. Numunelerde lif oranının belirli bir orana kadar artması literatürdeki çalışmalarla paralel bir şekilde basınç dayanımını artırırken lif oranının daha fazla artması basınç dayanımında kayıplara neden olmuştur (Afroughsabet & Ozbakkaloglu, 2015; Ahmad et al., 2022). Hacimce %1 lif kullanımı 28 günlük basınç dayanımını referans numuneye göre %11.7 artırmıştır. Liflerin kullanımı betonda belirli bir orana kadar çatlakların ilerlemesini ve oluşumunu azaltmaktadır (Mastali & Dalvand, 2017; Yıldız et al., 2023). Ancak belirli bir orandan daha fazla lif kullanımı beton içerisinde topaklanmaya ve boşluklara neden olduğu için basınç dayanımını azaltmaktadır (Ahmad et al., 2022; Yıldız, Sadık Alper, Calis, 2019).

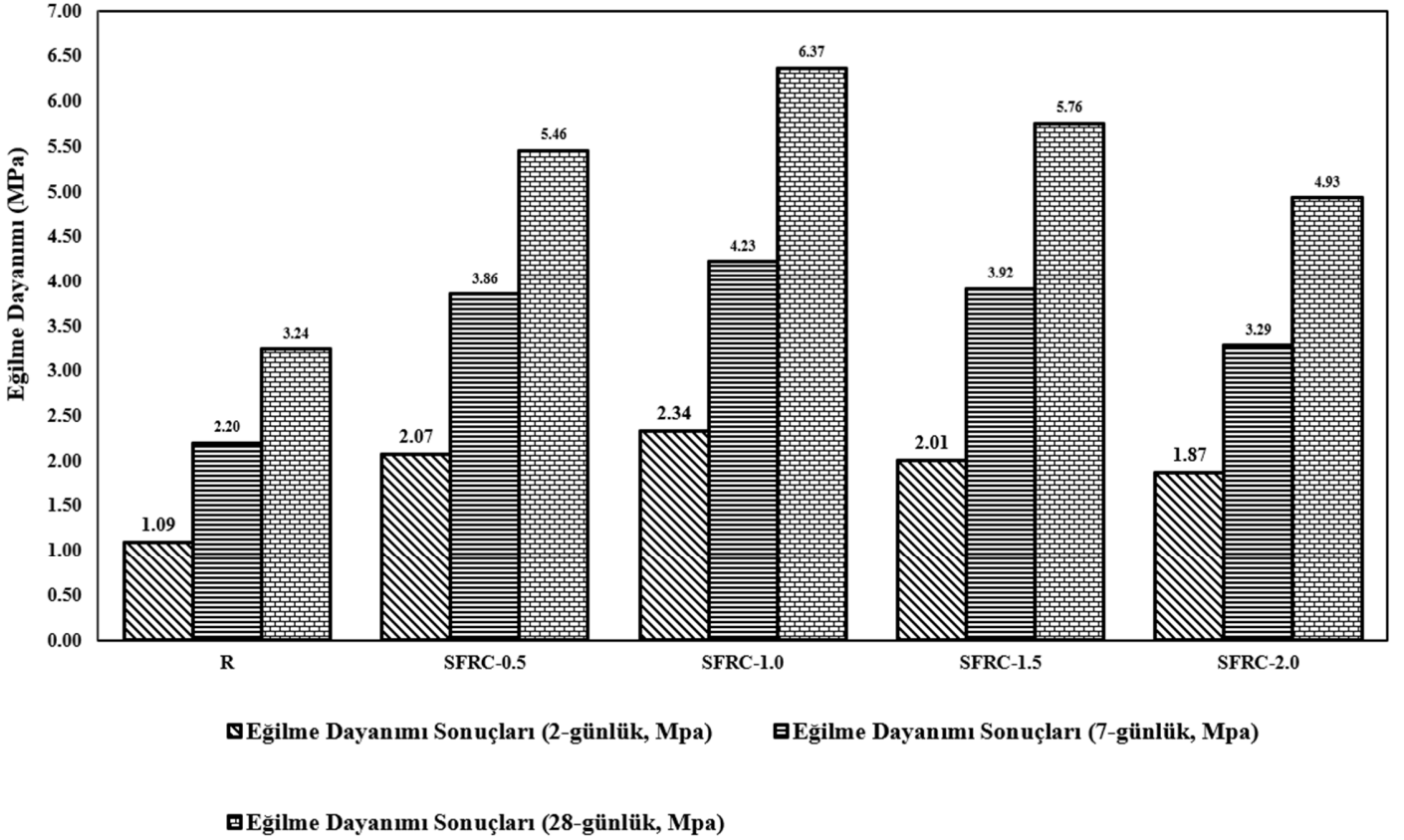


Şekil 9. Numunelerin 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları

3.3. Eğilme Dayanım Sonuçları

Farklı sisal lif oranlarına göre hazırlanan R, SFRC-0.5, SFRC-1.0, SFRC-1.5, SFRC-2.0 numunelerinin 2 günlük, 7 günlük ve 28 günlük eğilme dayanım değerleri Şekil 10' da sunulmuştur. Eğilme dayanımına liflerin önemli katkısı olmaktadır. Lif oranının belirli bir orana kadar artması eğilme dayanımını artırırken belirli bir orandan fazla kullanımı ise eğilme dayanımında kayıplara neden olmaktadır (Falliano et al., 2019; Pehlivanlı et al., 2015). Sisal lif oranının %1' e kadar artırılması eğilme dayanımını artırmış daha fazla kullanımı ise eğilme dayanımında kayıplara neden olmuştur. %1 oranında sisal lif eklenmiş olan beton numunelerinde referans numunesine kıyasla 28 günlük eğilme dayanımı kazanımları neredeyse 2 kat olmuştur. Daha fazla sisal lif kullanılan numunelerde ise eğilme dayanımı giderek azalmıştır. Ancak bu kayıplara rağmen yine de referans numuneden daha yüksek eğilme dayanımı elde edilmiştir. Lifler beton içerisinde bağ kuvvetlerini artırarak eğilme dayanımında kazanımlara neden olmaktadır (Leone et al., 2018). Bir başka deyişle betona lif eklenmesi çatlaklar üzerinde köprü etkisi yaratarak daha büyük çatlakların oluşmasına mani olmaktadır

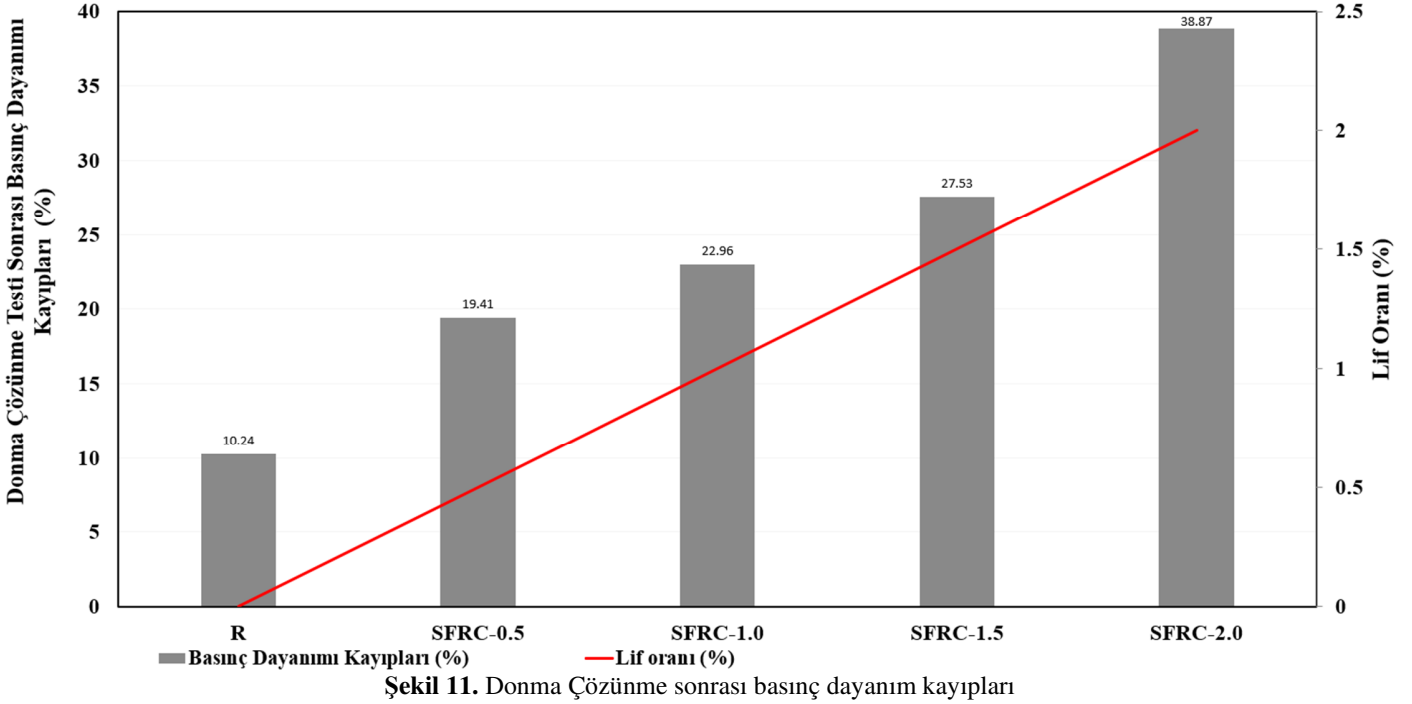
(Sanjeev & Sai Nitesh, 2020). Sisal liflerin yüksek su emme kabiliyeti nedeniyle yüksek oranda kullanımı beton içerisindeki hidratasyon suyunun azalmasına ve dayanım kayıplarına neden olmuştur. Ayrıca suyun azalması işlenebilirliği de azaltmıştır.



Şekil 10. Eğilme dayanımı sonuçları

3.4. Donma-Çözünme Deney Sonuçları

Farklı fiber oranlarına göre hazırlanmış olan numunelerin 300 döngüden oluşan donma çözünme deneyi sonrası basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 11' de sunulmuştur. Beton boşluklu bir yapıya sahiptir. Boşlukların olabildiğince azaltılması, betonun kullanım ömrü boyunca maruz kalabileceği sıvı temasları açısından oldukça önemlidir. Betondaki boşluklu yapı içerisine su girmesi ve bu suyun gözenek içerisinde donması beton içerisinde ilave iç kuvvetlerin oluşmasına neden olmaktadır (Gong et al., 2015; Yıldız et al., 2016). Bu iç kuvvetler ise sürekli donma çözünme döngüleri sonrası betonda dayanım kayıplarına sebebiyet vermektedir (Wang et al., 2016). Şekil 11' de görüldüğü gibi lif miktarının belli bir orandan sonra artması betonda dayanım kayıplarını artırmaktadır. Çünkü beton içerisindeki lif miktarının artması betonda işlenebilirliği azalmakta ve topaklanmaya neden olmaktadır. Bu da beton içerisinden yerleşme problemlerine bağlı olarak boşluklu yapı oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 11. Donma Çözünme sonrası basınç dayanım kayıpları

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı sisal lif oranlarına sahip kendiliğinden yerleşen betonun bazı mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- %1 oranında sisal lif kullanılması betonda işlenebilirliği çok fazla düşürmediği için kabul edilebilir bir orandır. Ancak daha fazla kullanılması durumunda süper akışkanlaştırıcı miktarını artırmak gerekir.
- %1 oranında sisal lif kullanılması betonun mekanik özelliklerini olumlu etkilemektedir. Basınç dayanımı ve eğilme dayanımına önemli katkıları olmaktadır. Ancak daha fazla kullanılması beton içerisinde topaklanmaya ve boşluklu yapının artmasına neden olmaktadır. Bu durumda ise mekanik özellikler olumsuz etkilenmektedir.
- %1 oranında sisal lif eklentili beton numunelerinde elde edilen 28 günlük basınç dayanımı referans numunesine göre %11.7 artmıştır. Artan oranlarda lif kullanımı ise referans numunesine göre basınç dayanımı kayıplarına neden olmuştur.
- %1 oranında sisal lif kullanılan beton numunelerinde 28 günlük eğilme dayanımı referans numunesine göre neredeyse 2 kat daha fazladır. Ancak daha fazla lif kullanılması eğilme dayanımlarında da azalmalara neden olmuştur.
- Betona lif eklenmesinin betonda akışkanlığı azaltması nedeniyle boşluklu bir yapı oluşmaktadır. Bundan dolayı ise betonun donma çözünme mukavemeti azalmaktadır.
- Sisal lifler doğal yoldan elde edildiği için beton içerisinde kullanımı çevre dostu bir kullanım şekli oluşturmaktadır.
- Sisal lif kullanımı ile beton karbon ayak izi azaltılmaktadır.
- Sisal lif kullanımında optimum karışımın elde edilebilmesi için gelecek çalışmalarda sisal liflerinin optimizasyonu üzerine çalışmalar yapılabilir.
- Diğer doğal lifler ile karşılaştırılarak en optimum kullanımı sağlayan lifler tespit edilebilir.

Referanslar

Afrouhsabet, V., & Ozbakkaloglu, T. (2015). Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 94(2015), 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051>

Ahmad, J., Majdi, A., Deifalla, A. F., Ben Kahla, N., & El-Shorbagy, M. A. (2022). Concrete Reinforced with Sisal Fibers (SSF): Overview of Mechanical and Physical Properties. *Crystals*, 12(7), 952. <https://doi.org/10.3390/cryst12070952>

Ahmad, J., & Zhou, Z. (2022). Mechanical Properties of Natural as well as Synthetic Fiber Reinforced Concrete: A Review. *Construction and Building Materials*, 333, 127353. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127353>

Althoey, F., & Farnam, Y. (2019). The effect of using supplementary cementitious materials on damage development due to the formation of a chemical phase change in cementitious materials exposed to sodium chloride. *Construction and Building Materials*, 210, 685–695. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.230>

- Alvee, A. R., Malinda, R., Akbar, A. M., Ashar, R. D., Rahmawati, C., Alomayri, T., Raza, A., & Shaikh, F. U. A. (2022). Experimental study of the mechanical properties and microstructure of geopolymer paste containing nano-silica from agricultural waste and crystalline admixtures. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00792. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00792>
- ASTM C666/C666M - 03. (2008). Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing.
- Bangi, M. R., & Horiguchi, T. (2011). Pore pressure development in hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 41(11), 1150–1156. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.07.001>
- Çelik, Z., & Bingöl, A. F. (2020). Fracture properties and impact resistance of self-compacting fiber reinforced concrete (SCFRC). *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 53. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01487-8>
- Dhasmana, A., & Singh, S. (2023). Long-term mechanical characteristics of fibre reinforced metakaolin-based geopolymer concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, 93, 106–119. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.030>
- Evangelista, L., & de Brito, J. (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32(1), 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005>
- Falliano, D., De Domenico, D., Ricciardi, G., & Gugliandolo, E. (2019). Improving the flexural capacity of extrudable foamed concrete with glass-fiber bi-directional grid reinforcement: An experimental study. *Composite Structures*, 209, 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.092>
- Gong, F., Sicat, E., Zhang, D., & Ueda, T. (2015). Stress analysis for concrete materials under multiple freeze-thaw cycles. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 13(3), 124–134. <https://doi.org/10.3151/jact.13.124>
- Huntzinger, D. N., & Eatmon, T. D. (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*, 17(7), 668–675. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.007>
- Ismail, Z. Z., & AL-Hashmi, E. A. (2008). Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Management*, 28(11), 2041–2047. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.023>
- Kaplan, G., Yildizel, S. A., Memiş, S., & Öztürk, A. U. (2018). The Optimization of Calcareous Fly Ash-Added Cement Containing Grinding Aids and Strength-Improving Additives. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2018/8917059>
- Leone, M., Centonze, G., Colonna, D., Micelli, F., & Aiello, M. A. (2018). Fiber-reinforced concrete with low content of recycled steel fiber: Shear behaviour. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.101>
- Mastali, M., & Dalvand, A. (2017). Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete Reinforced with Hybrid Recycled Steel-Polypropylene Fiber. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(6). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001851](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001851)
- Meena, A., Singh, N., & Singh, S. P. (2023). High-volume fly ash Self Consolidating Concrete with coal bottom ash and recycled concrete aggregates: Fresh, mechanical and microstructural properties. *Journal of Building Engineering*, 63, 105447. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105447>
- Melo Filho, J. de A., Silva, F. de A., & Toledo Filho, R. D. (2013). Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems. *Cement and Concrete Composites*, 40, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.003>
- Mo, Z., Gao, X., & Su, A. (2021). Mechanical performances and microstructures of metakaolin contained UHPC matrix under steam curing conditions. *Construction and Building Materials*, 268, 121112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121112>
- Okeola, A., Abuodha, S., & Mwero, J. (2018). Experimental Investigation of the Physical and Mechanical Properties of Sisal Fiber-Reinforced Concrete. *Fibers*, 6(3), 53. <https://doi.org/10.3390/fib6030053>
- Pehlivanlı, Z. O., Uzun, İ., & Demir, İ. (2015). Mechanical and microstructural features of autoclaved aerated concrete reinforced with autoclaved polypropylene, carbon, basalt and glass fiber. *Construction and Building Materials*, 96, 428–433. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.104>
- Ramanathan, P., Baskar, I., Muthupriya, P., & Venkatasubramani, R. (2013). Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17, 465–472. <https://doi.org/10.1007/s12205-013-1882-8>

- Ren, G., Gao, X., & Zhang, H. (2022). Utilization of hybrid sisal and steel fibers to improve elevated temperature resistance of ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 130, 104555. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104555>
- Ren, G., Yao, B., Huang, H., & Gao, X. (2021). Influence of sisal fibers on the mechanical performance of ultra-high performance concretes. *Construction and Building Materials*, 286, 122958. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122958>
- Sabir, B. ., Wild, S., & Bai, J. (2001). Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, 23(6), 441–454. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5)
- Sanjeev, J., & Sai Nitesh, K. J. N. (2020). Study on the effect of steel and glass fibers on fresh and hardened properties of vibrated concrete and self-compacting concrete. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.208>
- Soni, C., Kumar Patnaik, P., Kumar Mishra, S., Shekhar Panda, S., & Charan Rath, K. (2023). Sisal fiber and groundnut shell particulate reinforced hybrid epoxy composites: A study on mechanical and tribological properties. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.11.041>
- Tolga Cogurcu, M. (2022). Investigation of mechanical properties of red pine needle fiber reinforced self-compacting ultra high performance concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00970. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00970>
- TS-EN-1170-1. (1999). Prekast beton ürünler-Cam elyaf takviyeli çimento için test yöntemi-Bölüm 1: Matrisin kıvamının ölçülmesi-Çökme testi yöntemi. Türk Standartları Enstitüsü.
- TS-EN-12350-10. (2011). Beton-Taze beton deneyleri-Bölüm 10: Kendiliğinden yerleşen beton-L kutusu deneyi. Türk Standartları Enstitüsü.
- TS-EN-12390-3. (2019). Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. TSE, Ankara, Türkiye.
- TS-EN-12390-5. (2019). Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini. TSE, Ankara, Türkiye.
- TS-EN-197-1. (2012). Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. TSE, Ankara, Türkiye.
- TS 706 EN 12620. (2009). Aggregates for concrete. Turkish Standard.
- TS EN 12350-8. (2019). Testing fresh concrete-Part 8: Self-compacting concrete-Slump flow test. Turkish Standard.
- Villanueva, M. E., Müller, M. A., & Houska, B. (2024). Configuration-Constrained Tube MPC. *Automatica*, 163, 111543. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2024.111543>
- Wang, X., Jin, Y., Huang, W., Li, X., & Ma, Q. (2023). Effect of hybrid basalt and sisal fibers on durability and mechanical properties of lightweight roadbed foam concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02592. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02592>
- Wang, X., Shen, X., Wang, H., Gao, C., & Zhang, T. (2016). Nuclear magnetic resonance analysis of freeze-thaw damage in natural pumice concrete. *Materiales de Construcción*, 66(322), e087. <https://doi.org/10.3989/mc.2016.09014>
- Yıldız, Sadik Alper, Calis, G. (2019). Design and Optimization of Basalt Fiber Added Lightweight Pumice Concrete Using Taguchi Method. *Revista Romana de Materiale/ Romanian Journal of Materials*, 49(4), 544–553.
- Yıldız, S. A., & Toktas, A. (2022). ABC algorithm-based optimization and evaluation of nano carbon black added multi-layer microwave absorbing ultra weight foam concrete. *Materials Today Communications*, 32, 104035. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104035>
- Yıldız, S. A., Kaplan, G., & Öztürk, A. U. (2016). Cost Optimization of Mortars Containing Different Pigments and Their Freeze-Thaw Resistance Properties. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2016/5346213>
- Yıldız, S. A., Özkılıç, Y. O., Bahrami, A., Aksoylu, C., Başaran, B., Hakamy, A., & Arslan, M. H. (2023). Experimental investigation and analytical prediction of flexural behaviour of reinforced concrete beams with steel fibres extracted from waste tyres. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02227. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02227>

Zhang, A., Liu, K., Li, J., Song, R., & Guo, T. (2024). Static and dynamic tensile properties of ultra-high performance concrete (UHPC) reinforced with hybrid sisal fibers. *Construction and Building Materials*, 411, 134492. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134492>

Zhang, D., Tan, K. H., Dasari, A., & Weng, Y. (2020). 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>