

Atf İçin: Ramazanoğlu, B. ve Kaya, N. (2024). Çimento Esaslı Kompozitlerde Çatlak Oluşumu ve Çatlak Kontrolünde Lif Kullanımının ve Karışım Parametrelerinin Etkisi: Derleme. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(1), 422-436.

To Cite: Ramazanoğlu, B. & Kaya, N. (2024). Effect of Fiber Usage and Mixture Parameters on Crack Development and Crack Control in Cement Based Composites: Review. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 14(1), 422-436.

Çimento Esaslı Kompozitlerde Çatlak Oluşumu ve Çatlak Kontrolünde Lif Kullanımının ve Karışım Parametrelerinin Etkisi: Derleme

Berfin RAMAZANOĞLU^{1*}, Necim KAYA²

Öne Çıkanlar:

- Lifli kompozitlerin temel mühendislik özellikleri
- Lifli kompozitlerde çatlak gelişim mekanizması
- Karışım parametrelerinin çatlak gelişimine etkisi

Anahtar Kelimeler:

- Beton
- Beton bileşenleri
- Çatlak gelişimi
- Dayanım

ÖZET:

Beton, yüksek basınç dayanımlarını karşılayabilmesine rağmen doğası gereği çekme ve eğilme dayanımı düşük olduğundan çatlak oluşumuna karşı hassas bir yapı malzemesidir. Beton, çok fazlı kompozit bir malzeme olup, davranışı kendisini oluşturan bileşenlerin özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir. Her bir karışım parametresinin çatlak gelişim mekanizması üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Mevcut derleme çalışmasında çimento esaslı malzemelerde çatlak gelişim mekanizması ve karışım parametrelerinin çatlak oluşum mekanizması üzerine olan etkileri özellikle son 10 yılda yapılan çalışmalar esas alınarak geniş bir literatür taramasıyla araştırılmıştır. Literatür araştırması sonucunda, düşük su/çimento oranı, parçacık boyutu dağılımı ve karışım oranlarının optimize edilmesiyle maksimum agrega parçacık yoğunluğunun elde edilmesi, çimentonun bir kısmının optimum miktarda mineral katkıları ve nano malzemelerle değiştirilmesi, gevrek özellik gösteren çimento matrisinin çeşitli liflerle hibrit kombinasyonun, betonun dayanımını, sünekliğini ve tokluğunu iyileştirerek çatlak oluşumuna karşı dayanımı arttırdığı anlaşılmıştır.

Effect of Fiber Usage and Mixture Parameters on Crack Development and Crack Control in Cement Based Composites: Review

Highlights:

- Basic engineering properties of fiber composites
- Crack development mechanism in fibers composites
- Effect of mixing parameters on crack development

Keywords:

- Concrete
- Concrete components
- Crack development
- Strength

ABSTRACT:

Although concrete can meet high compressive strength, it is a building material that is sensitive to crack formation due to its inherently low tensile and bending strength. Concrete is a multi-phase composite material, and its behavior varies depending on the properties of the components that make it up. Each mixture parameter has significant effects on the crack development mechanism. In the current review study, the crack development mechanism in cement-based materials and the effects of mixture parameters on the crack formation mechanism were investigated with an extensive literature review, especially based on the studies carried out in the last 10 years. As a result of the literature research, obtaining maximum aggregate particle density by optimizing low water/cement ratio, particle size distribution and mixture ratios, replacing some of the cement with optimum amount of mineral additives and nano materials, hybrid combination of brittle cement matrix with various fibers, increasing the strength of concrete, It has been understood that it increases the resistance against crack formation by improving its ductility and toughness.

^{1*}Berfin RAMAZANOĞLU ([Orcid ID: 0000-0001-5263-1531](https://orcid.org/0000-0001-5263-1531)), Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Batman, Türkiye

²Necim KAYA ([Orcid ID: 0000-0003-1478-761X](https://orcid.org/0000-0003-1478-761X)), Batman Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Batman, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Berfin RAMAZANOĞLU, e-mail: berfinramazanoglu@gmail.com

GİRİŞ

Beton, inşaat sektöründe yaygın kullanılan bir yapı malzemesidir (Jiao ve ark., 2017). Beton, yüksek basınç dayanımlarını karşılayabilmesine rağmen sınırlı çekme ve eğilme dayanımına sahip olduğundan (Badugea ve ark., 2021), çatlak oluşumuna karşı oldukça duyarlı bir malzemedir (Tittelboom ve De Belie, 2013; Khalilpour ve ark., 2019; Sidiq ve ark., 2019). Beton bünyesinde meydana gelen ve ilk olarak mikro boyutta olan çatlaklar giderek makro boyuta ulaşarak beton dayanıklılığını olumsuz etkilemektedir. Zamanla büyüyen çatlakların neden olduğu zararlar çatlak onarımının zorlaşmasına ve yapının tamamen yıkılmasına neden olmaktadır (Tittelboom ve De Belie, 2013; Scherer, 2015; Sidiq ve ark., 2019). Bu yüzden dayanımı yüksek betonların tasarlanması günden güne daha çok önem kazanmaktadır. Mevcut derleme çalışmasında, başta geleneksel beton olmak üzere çimento esaslı malzemeleri oluşturan bileşenlerin çatlak gelişim mekanizmasına olan etkileri geniş bir literatür araştırması ile incelenmiştir. Literatür araştırmasının çoğunluğunu derleme makalelerinin oluşturmasının yanı sıra konu ile alakalı özgün araştırmalar da incelenmiştir. Literatür araştırması yapılırken özellikle son 10 yıldaki çalışmalar incelenmiştir.

Yapı Elemanlarında Çatlak Sınırı

Betonun çekme mukavemeti basınç mukavemetine göre oldukça sınırlıdır ve çekme gerilmeleri betonun çekme kapasitesini aştığında betonarme elemanlarda çatlak oluşumu kaçınılmazdır. Çoğunlukla elemanlar öngörülen kullanma yüklerinden daha düşük yük seviyesinde bulduklarından normal durumlarda çatlağa rastlanmaz. Öngörülen kullanma yükü seviyelerine ulaşıldığında oluşacak çatlakların genişliklerinin yapı görünüşünü bozmamasını ve donatıda korozyona neden olmamasını sağlayacak biçimde sınırlandırılması gerekir. İzin verilecek çatlak genişliği elemanın yapı içinde nerede bulunduğu (dış koşullara açık/açık değil), yapının türüne (su deposu, bina) gibi birçok değişkene bağlıdır. Yapıyı kullananlara güvensizlik hissi vermeyen çatlak genişliği 0.25~0.40 mm dolaylarındadır. TS 500 standardında çatlak genişlik sınırları, yapı içi normal çevre koşulları için 0.4 mm, yapı içi nemli ve yapı dışı normal çevre koşulları için 0.3 mm, yapı dışı nemli çevre koşulları için 0.2 mm ve yapı içi ve dışı agresif çevre koşulları için 0.1 mm olarak sınırlandırılmıştır (TS 500, 2000).

Lifli betonlarda liflerin asıl etkisi ilk çatlamalardan sonra olmaktadır. İlk çatlak oluşumundan sonra lifler çatlakları köprülemekte ve çatlak boyunca gerilimi aktarma yeteneğine sahip olduklarından çatlama sonrası betonun davranışını ve betonun tokluğunu iyileştirmektedirler (Afroughsabet ve ark., 2016).

Karışım Parametreleri

Lif

Düşük çatlak direnci, beton için oldukça önemli bir dayanım problemi olduğundan betonun taze ve sertleşmiş özelliklerini iyileştirmek için birçok araştırma yapılmış ve yöntem geliştirilmiştir. Dayanımı yüksek yeni beton teknolojilerine duyulan ihtiyaç talebinin artması bu çalışmaları yoğunlaştırmıştır (Hassanpour ve ark., 2012; Afroughsabet ve ark., 2016; Shaikh ve ark., 2020; Biswas ve ark., 2021). Kullanım alanı veya kullanılan yapıya göre betondan farklı performanslar beklenmekte ve bu beklentiler ancak özel betonlarla karşılanabilmektedir. Lifli beton, özel beton türlerinden biri olup, beton ve çimentolu malzemelerde çeşitli özelliklerde liflerin kullanımı esasına dayanmaktadır. Farklı özellikleri ve kullanım alanları bakımından birçok lif türü vardır (Akin ve ark., 2022). Lif takviyeli beton, kırılğan yapıdaki çimento hamurunun çeşitli fiberlerle güçlendirilmesiyle elde edilmekte (Akeed M. ve ark., 2022), matris içine rastgele yayılmış lifler matristeki çatlak yayılmasına ve çatlak genişlemesine direnerek kırılğanlığı azaltmakta hem statik hem darbe yükleri altında betonun çatlama

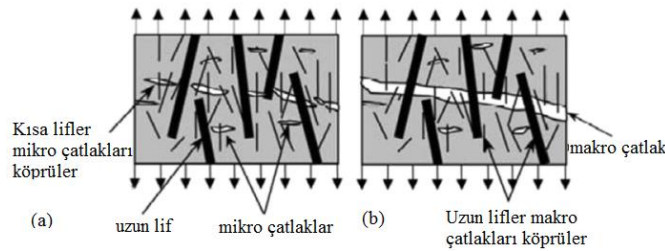
sonrası sünekliliğini, betonun dayanımını ve enerji yutma kapasitesini iyileştirmektedir. (Yoo ve Banthia, 2019; Wu ve ark., 2020; Akeed M. ve ark., 2022). Çeşitli malzemelere liflerin eklenmesiyle dayanım özelliklerini iyileştirmeye yönelik çalışmaların ele alınması eskilere dayanmaktadır. Kerpiç malzemesinin bitkisel elyaf ve samanla karıştırılarak kullanılması 4500 yıl öncesine dayanmaktadır (Kozak, 2013). Günümüzde laboratuvar ortamında lifli beton çalışmaları yaygınlaşmaktadır ve son yıllarda bu betonlarla ilgili yapısal boyutlardaki çalışmalar da artış göstererek bu betonların gerçek yapılarda kullanılması için önemli adımlar atılmaktadır. Yakın geçmişte, yaklaşık 100 yıl öncesine kadar asbest lifleri, 50 yıl öncesine kadar selüloz lifler, 30 yıl öncesine kadar polipropilen ve cam lifleri güçlendirme materyali olarak kullanılmıştır. Günümüzde lifli beton üretiminde, hedeflenen amaç doğrultusunda çelik liflerin en yaygın şekilde kullanıldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra son yıllarda yapılan çalışmalarda bu liflere alternatif olabileceği düşünülen doğal lifler ile ilgili yapılan çalışmaların sayısında da artış söz konusudur (Kızılkıran ve ark., 2014). Çeşitli lif türleri içerisinde, çelik lifler en yaygın kullanılan lif türüdür. Çelik lifi sırasıyla polipropilen, cam ve diğer lif türleri takip etmektedir. Çelik lifler, yüksek narinlik, daha kompleks geometri, yüksek paslanma direnci, yüksek elastisite modülü, yüksek yük taşıma kapasitesi, zorlu çevreye karşı direncinin daha yüksek olması ve çoğunlukla yüksek dayanıma sahip olduklarından dolayı daha çok tercih edilmektedir (Türkmenoğlu ve Varol, 2016; Demirhan, 2017). Doğal lifler, kolaylıkla elde edilebilen lif türlerinden olup diğer liflere kıyasen çok yüksek performans sergilemese de doğal liflerin kullanımı, çevresel etkileri azaltmakta ve yeşil bina uygulamaları için önem arz etmektedir. Polipropilen lifler ise hafiflikleri ve korozyona dayanıklılıklarıyla öne çıkmaktadır. Özellikle yangın dayanımının öne çıktığı kullanım alanlarında polipropilen liflerin tercih edilmesi oldukça önemlidir. Sertlik, korozyona dayanıklılık ve diğer malzemelerle fazla tepkimeye girmemesi cam liflerin tipik özelliklerindedir. Ayrıca hafif, esnek ve ekonomik olmaları, cam liflerini endüstriyel uygulamalarda tercih edilen lif türü yapmaktadır (Kurt, 2006). Kullanılacak olan lifin verimliliği lifin özelliklerine bağlı olup, lif-matris özellikleri, lif içerme hacmi, lif narinlik oranı, lif geometrisi, lif türü, lifin yapısı, lifin beton matrisi içinde homojen dağılımı lif verimliliğinde etkili olmaktadır (Türkmenoğlu ve Varol, 2016).

Hibrit lif

Uygulamalarda kullanılan geleneksel lif takviyeli beton, genellikle tek tip lif içermektedir. Lif takviyeli betonun karakteristikleri, lifin hacimsel oranına ve özelliğine bağlıdır ve her bir lif tipi bazı özel işlevsellikler bakımından etkili olabilmektedir. Betondaki kırılma aşamalı ve çok ölçekli bir süreçtir. Bu nedenle tek tip lif sadece bir seviyede ve şekil değiştirmelerin olduğu sınırlı bir bölge içinde etkili olabilmektedir ve istenilen performansa ulaşılamamaktadır. Bu nedenle, beton malzemelerin özelliklerini en iyi şekilde kullanmak ve betonarme elemanların mekanik performanslarını geliştirmek için çimento esaslı kompozitlerde değişik yapısal tepkileri, boyutları ve işlevleri olan lif kombinasyonları kullanmaya başlanmıştır. Bu amaçla birden çok süreksiz lif tipinin karışımı ile geleneksel beton matrisinin birleşiminden elde edilen lif takviyeli betona karma lif takviyeli beton denilmektedir (Türk ve Kına, 2017). İki ya da daha fazla liflerin kullanılmış olduğu bu sistemlerde, lifler arasında olumlu bir etkileşim oluşmakta ve münferit olarak kullanılan her bir lifin yalnız başına gösterdiği performansın toplamı karma sistemlerde elde edilmektedir. Farklı özelliklere sahip olan liflerin belirli oranlarda kombine edilmesi ile oluşan bu pozitif etkileşim olan sinerjinin neticesi olarak karma lif donatılı betonların mekanik performansı daha dengeli olduğundan dolayı hem mukavemette hem de deformasyon kapasitesinde önemli ölçüde iyileşmeler gözlemlenmektedir (Demirhan, 2017).

İki veya daha fazla tipte lif kullanılan hibrit lif takviyeli betonlarda mekanizmalar 3 gruba ayrılmaktadırlar. Birinci mekanizmada rölatif olarak esnek olan lif tipi, çatlak sonrası bölgedeki

tokluğun ve şekil değiştirme kapasitesinin artmasına öncülük ederken, daha güçlü ve daha rijit olan lif tipi, uygun ilk çatlak dayanımı ve nihai dayanım sağlamaktadır. İkinci mekanizmada daha küçük olan lif tipi, mikro çatlakları köprülemekte ve böylece çatlakların büyümesini kontrol ederek çatlakların birleşmesini geciktirmektedir. Bu durum, kompozitin daha yüksek çekme dayanımına sahip olmasını sağlamaktadır. İkinci lif daha büyüktür ve bu tip lifle makro çatlakların yayılmasının engellenmesi amaçlanır ve böylece kompozitin kırılma tokluğunda önemli artışa neden olur. Küçük boyuttaki lifler (mikro lifler) çimento hamurundaki ve harç fazındaki çatlakların birleşmesini geciktirir ve bu fazlardaki görünür çekme dayanımını artırır. Üçüncü mekanizmada ise kompozitin üretim kolaylığı ve plastik rötre gibi taze ve erken yaş özelliklerini iyileştirmeyi amaçlayan lif tipi ile mekanik özellikleri geliştiren diğer bir lif tipinden oluşan karma liflerdir (Türk ve Kına, 2017).



Şekil 1. Farklı boyuttaki hibrit lifin etkisi, (a) birinci faz ve (b) yüklemenin ikinci fazı (Pakravan ve ark., 2017)

Lif (mono-hibrit) donatılı betonların mekanik özellikleri

Liflerin tipi, içeriği, en-boy oranı, uzunluğu gibi farklı parametreleri takviyeli betonların özelliklerini etkilemektedirler. İncelenen çalışmalar sonucunda yüksek performanslı lifli betonların basınç dayanımlarının lifsiz betondan daha yüksek olduğu genel sonucuna varılmaktadır. Bunun yanı sıra literatürde basınç dayanımına ilişkin çelişkili sonuçların bildirildiği durumlarda mevcuttur. Liflerin etkilerini inceleyen Song ve Hwang, farklı oranlarda kullanılan (%0.5- %1-%1.5%-2) çelik lifin basınç dayanımı üzerinde etkilerini incelediğinde çelik lifin basınç dayanımını arttırdığı, maksimum basınç dayanımının %1.5 oranında lif ilave edilen betondan elde edildiğini bildirmişlerdir. Elde edilen basınç dayanımı lifsiz betonun basınç dayanımından %15.3 daha yüksek değerde bulunmuştur (Afroughsabet ve ark., 2016).

Guleria ve Kamboj'un yaptığı incelemeler neticesinde çelik lif takviyeli betonun, yapının mekanik özelliklerinde iyileşmelere katkı sağladığı görülmüştür. Çelik lif takviyesi betonun eğilme dayanımı arttırmakta, çatlama dayanımını azaltarak betonun çatlama davranışını iyileştirmektedir. Bunlara ek olarak yapının tokluğunda ve enerji yutma kapasitesinde de gelişim görülmektedir. Optimum çelik lif takviyesi (%1.5) betonun basınç dayanımını, kabarma direncini, sünekliğini, çekme dayanımını arttırmıştır. Yapılan inceleme sonucuna göre çelik lif ilavesi, ilavesiz betona kıyasla betonun kesme mukavemetinde de artışa sebep olmuştur. Çelik lifin bir diğer olumlu etkisi darbe direncini ilavesiz betonunkinden 8-10 kat daha fazla arttırması olmuştur. Yapılan incelemenin bir diğer önemli sonucu ise dayanım için oldukça önemli bir sorun olan korozyon direnci ile ilgilidir. Çelik lif ilavesi betonun korozyon direncini ilavesiz betona göre arttırmıştır. Çelik lif ilaveli beton geleneksel betona kıyasla daha az korozyon göstermiştir. %2'lik oranda lif ilavesinin de betonun eğilme dayanımını %55 daha fazla arttırdığı gözlemlenmiştir (Guleria ve Kamboj, 2016).

Zhang ve Maaalej'in yapmış olduğu bir başka çalışma da normal beton, çelik lifli beton ve hibrit (çelik + polipropilen) lifli beton üzerinde yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda çelik lifli betonun darbe direncinin normal betondan daha iyi olduğu, hibrit lifli betonunda çelik lifli betondan daha iyi darbe direnci gösterdiği gözlemlenmiştir (Soufeiani ve ark., 2016).

Banthia ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada hibrit lif takviyesinin etkisi eğilme ve kesme kuvveti altında incelenmiştir. Referans olarak geleneksel beton karışımı, tek lifli beton karışımları ve iki lifli hibrit kompozit karışımlar çeşitli lif kombinasyonları kullanılarak dökümler gerçekleştirilmiştir. İki tip makro çelik lif ve selüloz lif incelenmiştir. Eğilme altında incelenen hibrit lifli kompozitlerde, çelik lif ile selüloz lif arasında pozitif bir sinerji oluşmuştur. Tek başına betonun tokluğuna etki etmeyen selüloz lif, çelik lifin varlığında tokluğa etkili bir katkı sağlamıştır. Daha büyük çatlak genişliğinde ise selüloz lif verimini kaybettiğinde bu sinerjinin azaldığı gözlemlenmiştir (Mukhopadhyay ve Khatana, 2015).

Literatürdeki araştırmaları incelendiğimizde farklı narinlik, farklı şekil ve farklı türdeki liflerin hibritlenmesinin çimento esaslı kompozitlerde değişik yapısal tepkileri, boyutları ve işlevleri olan lif kombinasyonları kullanılmasının, lif kullanılmayan veya tek tip lif içeren kompozitlere göre fiziksel ve mekanik özelliklerinde olumlu yönde iyileşmeler olduğu görülmüştür. Bu yüzden liflerin hibritlenmesi önerilmektedir (Fehmi Çivici, 2016; Türk ve Kına, 2017). Hibrit lif kullanımı betonun basınç dayanımı, tokluğunu, çekme dayanımını, eğilme dayanımını, bükülme dayanımını, çatlak direnci gibi mekanik özellikleri tek tip lif içeren betona kıyasla daha fazla arttırdığından araştırmacılar hibrit lif kullanımını önermektedirler (Khan ve ark., 2017).

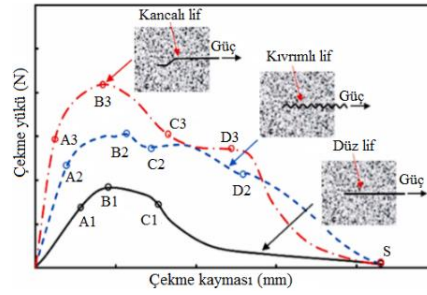
Lif performansını etkileyen faktörler

Lif takviyeli beton kompozit bir malzeme olduğundan, lif tipi, içeriği, boy/çap oranı, uzunluğu, matris özellikleri, liflerin matris içinde dağılımı, liflerin oryantasyonu gibi özellikler lif takviyeli betonun özelliklerini etkilemektedirler (Türkmenoğlu ve Varol, 2016).

Lif tipi

Gevrek davranış gösteren kompozitlerin mekanik davranışları, liflerin çatlak köprüleme performansından etkilendiğinden tüm lif türlerinin kullanılmasıyla lif donatılı betonların performansı iyileşmektedir. Lifler, yüksek yüzey alanına sahip olduğundan karışımın vizkozitesini arttırmaktadır. Diğer karışım parametrelerine de bağlı olarak tazen betonun işlenebilirliği, genel olarak liflerin eklenmesiyle azalmaktadır (Demirhan, 2017). Lif türlerinin farklılığı işlenebilirlik üzerinde farklı etkiler göstermektedir. Sert liflere kıyasen elastik liflerin kullanımında işlenebilirlikte daha az kayıp meydana gelmektedir (Akeed M. H. ve ark., 2022). Literatürdeki çalışmalar sonucunda çelik liflere kıyasen polipropilen lif kullanımında işlenebilirlikte daha az kayıp meydana geldiği gözlemlenmiştir (Demirhan, 2017).

Düz, kanca ve oluklu lifler en çok kullanılan çelik lif tipleridir. Düz liflerle karşılaştırıldığında kancalı çelik lif akma gerilmesini daha fazla arttırmaktadır. Deforme olmuş lifin hem yapışkan hem de ankraj etkisi olduğundan deforme olmuş lifler düz liflerden daha fazla çekme dayanımı sağlayarak çatlakların daha verimli bir şekilde köprülenmesini sağlamaktadır (Akeed M. H. ve ark., 2022). Wille ve Naaman'ın çengel uçlu ve düz liflerle yapılan çalışmalar sonucunda çengel uçlu liflerde düz liflere oranla daha yüksek lif gerilimi elde edildiğini bildirmişlerdir. Ultra yüksek performanslı betonun gerilme dayanımı ve çatlak sonrası gerilme kapasitesi kısa düz çelik liflere kıyasla deforme olmuş (bükülmüş ve kancalı) çelik lifler kullanılarak önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Yapılan bir başka çalışmada Yoo ve Yoon bükülmüş çelik lifli ultra yüksek performanslı kirişlerin, kısa ve düz çelik lifli kirişlerden daha yüksek eğilme dayanımı verdiği gözlemlenmiştir. Lif geometrisinin (şeklinin) basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemek için düz ve bükülmüş çelik lifler ile yapılan bir çalışmada basınç dayanımında gözlenen gelişmelerin, eğilme ve çekme dayanımlarında gözlenen gelişmelere kıyasla daha önemsiz olduğu anlaşılmıştır (Yoo ve Banthia, 2016).



Şekil 2. Farklı şekilli çelik liflerin tipik çekme yük-kayma eğrilerinin karşılaştırılması (Akeed M. H. ve ark., 2022)

Lif uzunluğu, çapı ve narinliği

Lif boyunun lif çapına oranı lifin narinlik oranı olarak tanımlanmaktadır. Eğilme dayanımındaki artış lifin boy/çap oranına bağlıdır. Boy/çap oranı ne kadar yüksekse eğilme dayanımı, çatlama sonrası dayanım o kadar yüksek olmaktadır. Bunu nedeni daha büyük boy/çap oranına sahip liflerin daha etkili daha büyük lif-matris bağ alanına sahip olmasıdır (Tiberti ve ark., 2018; Akeed M. H. ve ark., 2022). Bunun yanı sıra lif narinliğinin artması topaklaşma riskini arttıracığından malzemenin performansını kötü etkilemektedir. Narinlik oranının düşük tutulması lif dağılımını kolaylaştırmaktadır. Genel olarak lif donatılı betonlarda narinlik oranı 20 ile 100 arasında olan lif türleri kullanılmaktadır (Demirhan, 2017). Her ne kadar narinliğin artması, lifli betonun performansını arttırsa da betonun işlenebilirliği açısından bu değer 100 gibi bir değerle sınırlı kalması önerilmektedir (Sarı, 2013). Yoo ve arkadaşları, ultra yüksek performanslı lif takviyeli betonun tek eksenli ve çift eksenli gerilmeler altında eğilme performansını ve kırılma enerjisi kapasitesini farklı uzunluklara sahip çelik lifler kullanarak incelemiştir. Yapılan çalışma sonucunda lif boyunun artmasıyla lif-matris arası bağlanma alanı arttığından betonun kırılma enerjisinin, eğilme dayanımının, tokluğunun fark edilir şekilde iyileştiği gözlemlenmiştir (Yoo ve Banthia, 2016).

Yazıcı, yapmış olduğu çalışmada değişik oranlarda kısa ve uzun çelik kullanımının betonun özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. Çalışmada bu amaçla s/ç oranı 0.50 olan betonlarda uzunlukları 40 mm ve 60 mm olan 0.75 mm çaplı (l/d oranı 40 ve 60) çelik lifler kullanılmıştır. Çelik lifler betonlara hacimce %0, %0,5, %0,75 ve %1 oranlarında katılmıştır. Betonda çelik lif kullanımı ile kontrol betonuna kıyasla yarmada çekme dayanımının arttığı, bu artışın betona katılan çelik lif oranının artmasına bağlı olarak yükseldiği, yarmada çekme dayanımındaki artışın kısa liflerde %35'e, uzun liflerde ise %63'e varan oranlara ulaştığı, uzun çelik liflerin kısa liflere kıyasla yarmada çekme dayanımını daha fazla etkilediği görülmüştür (Yazıcı, 2017). Kızılırmak ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada, çok kancalı yeni nesil liflerin (4D,5D) dozaj ve narinlik (boy/çap) oranının yüksek dayanımlı betonun statik ve darbe eğilme yükleri altında dayanım ve kırılma enerjisi gibi özelliklerine etkileri geleneksel 3D lifler ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda darbe yükleri altında en iyi performans, narinlik oranı 80 olan 4D ve narinlik oranı 65 olan 5D lifli yüksek dayanımlı betonlardan elde edilmiştir (Kızılırmak ve ark., 2019). Literatürdeki araştırmalardan çıkan genel sonuçlara bakıldığında lif narinliğinin önerilen optimum miktara kadar (100) artmasının beton performansını iyileştirdiği görülmektedir (Alkayış ve Başyigit, 2021).

Lif hacminin etkisi

Lif takviyeli betonlarda hacimce lif kullanım oranı temelde 3 grupta sınıflandırılmaktadır. En düşük lif içeriği olarak %1'den az oranda lif kullanılarak büzülme çatlaklarını engellemek, orta hacimde %1-%2 oranında lif kullanılarak darbe direnci, eğilme mukavemeti ve betonun diğer mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, yüksek hacim içeriği ile %2'den fazla lif kullanılarak yüksek mekanik özelliklerin elde edilmesi amaçlanmaktadır (Guleria ve Kamboj, 2016; Soufeiani ve ark., 2016). Liflerin

hacimce kullanım oranı malzemenin özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Lif donatılı betonlarda lif kullanım oranı %2-3 arasında kullanılabilen ve bu oran betonun kullanım amacına göre değişiklik göstermektedir (Demirhan, 2017). Çelik lifli betonlar için ACI 544 standardına göre lif hacim oranı %0.5-1.5 arasında olmalıdır (Alkayış ve Başyigit, 2021). Artan lif içeriği, azaltılmış paketleme yoğunluğu ve lifler arası artan sürtünme ve bunların katı malzemelerle etkileşiminin artması nedeniyle çimentolu malzemelerin akma stresini ve vizkozitesini artırarak işlenebilirliğini, kötü etkilemektedir. Bunun yanı sıra lif miktarının artması homojen dağılımı zorlaştırarak lif kenetlenme olasılığını artırarak topaklaşmalara sebep olmaktadır (Akeed M. H. ve ark., 2022).

Şahan ve Ünsal, çelik lif takviyeli beton kırımlarında lif oranının eğilme çarpma davranışına etkisi araştırmak amacıyla kontrol karışımının yanı sıra beton hacminin %0.25 (19.5 kg/m³), % 0.50 (39 kg/m³) ve % 0.75 (58.5 kg/m³) oranlarında çelik lif takviyeli kırımlar üretilmiştir. Kırımlar üzerinde basınç, eğilme ve aletli ağırlık düşürme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca ağırlık düşürme deneyleri sonucunda kırılma ortasında meydana gelen çatlak genişliği ölçümü yapılmıştır. Yapılan deneylerde, çelik lif takviyeli betonların kontrol numunesine kıyasla ani kırılmaya karşı daha dirençli olduğu, çelik lif miktarının artması ile oluşan çatlak genişliklerinin azaldığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda çelik lifin betonun statik ve dinamik özelliklerine olumlu etkilerinin olduğu görülmüştür (Şahan ve Ünsal, 2021).

Yazıcı, değişik oranlarda kısa ve uzun çelik lif kullanımının betonun özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. Çelik lifler betonlara hacimce % 0, % 0.5, % 0.75 ve % 1 oranlarında katılmıştır. Çalışma sonucunda lif oranının artmasıyla betonun sünekliğinin arttığı görülmüştür (Yazıcı, 2017). Şimşek ve arkadaşlarının farklı oranlarda (%0.0, %0.10, %0.15 ve %0.20) lifli betonun mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmada, lif oranının artmasının betonun eğilme ve aşınma direncini arttırdığını gözlemlemişlerdir (Şimşek ve ark., 2021). Literatürdeki araştırmalardan çıkan genel sonuçlara bakıldığında lif kullanım oranının artması lif türüne göre değişiklik göstermektedir. Çelik liflerin %1 ve %2 oranında kullanılmasının en iyi performansı verdiği görülmektedir (Alkayış ve Başyigit, 2021; Şahan ve Ünsal, 2021).

Lif dağılımı

Lif dağılımı liflerin düzenini göstermekte ve birim alan başına düşen lif sayısının tüm kesitteki toplam lif sayısından sapması olarak ölçülmektedir. Matris içine homojen dağılan lifler betonun eğilme dayanımını arttırmaktadır. Homojen lif dağılımı harcın lif yüzeyinde kapsüllenme etkisini artırarak, lif-matris ara yüzey özelliklerini iyileştirmektedir. Harcın vizkozitesi, lif dağılımı düzenlemek için kullanılmaktadır. Plastik vizkozite ile lif dağılım katsayısı artmaktadır. Artan dağılım katsayısıyla eğilme dayanımı, toklukta artmaktadır (Akeed M. H. ve ark., 2022).

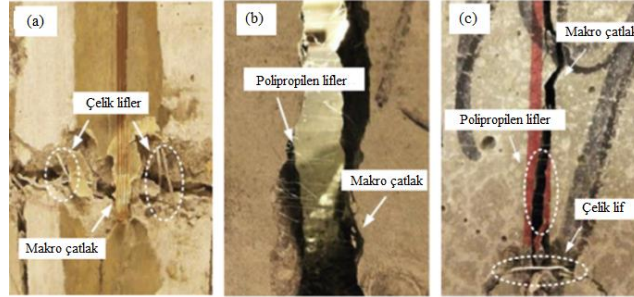
Lif oryantasyonu

Lif oryantasyonu (açısı) çekme yönünden 30 dereceden fazla olduğunda enerji dağıtma kapasitesi ve bağ dayanımı azalmaktadır. Yüksek eğilme dayanımı liflerin çekme yönüne yönlendirilmesiyle elde edilmektedir (Akeed M. H. ve ark., 2022). Liflerin performansı, liflerin gerilim yönünde çatlak açıklıklarına dik olarak hizalandığında maksimuma çıkmaktadır (Afroughsabet ve ark., 2016).

Çatlak kontrol mekanizması

Beton, iri agregaların varlığı ve sınır koşullarıyla kısıtlandığından dolayı büzülme ve termal gerilmelerin neden olduğu gözeneklere ve mikro çatlaklara sahip heterojen yapıda bir malzemedir. Bu nedenle, yükleme esnasında matris makro çatlak oluşmadan önce yükün bir kısmını liflere aktarmaktadır (Afroughsabet ve ark., 2016). Liflerin elastisite modülü matrisin elastisite modülünden daha yüksek olduğunda betonun çekme, eğilme, darbe ve kesme dayanımında artış gözlenmektedir (Demirhan, 2017). Lifli betonlarda liflerin asıl etkisi ilk çatlamalardan sonra olmaktadır. İlk çatlak oluşumundan sonra lifler

çatlakları köprülemekte ve çatlak boyunca gerilimi aktarma yeteneğine sahip olduklarından çatlama sonrası betonun davranışını ve betonun tokluğunu iyileştirmektedirler. Çelik lifler çatlak ilerlemesini sınırlayabilmektedir. Çelik liflerin çekme dayanımı sertleşmiş betonun çekme dayanımından daha yüksek olduğundan, lifli betondaki başarısızlık lif kaynaklı değil beton harcı ile lif arasındaki arayüz bağ dayanımının başarısızlığından kaynaklanmaktadır (Afroughsabet ve ark., 2016).



Şekil 4. Çatlak genişleme sırasında lif köprüleme etkisi; (a) çelik lif takviyeli beton, (b) polipropilen lif takviyeli beton, (c) hibrit lif takviyeli beton (Pakravan ve ark., 2017)

Lif-matris arayüzü

Kompozit malzemelerdeki arayüz, stres aktarımı sırasında çok önemli rol oynamaktadır. Arayüz geçiş bölgesinin mikro yapısı harcın mikro yapısından önemli ölçüde farklıdır. Bu yüzden lif-matris arayüzünün özelliklerinin ve etkilerinin dikkate alınması oldukça önemlidir. Matrisin partikül yapısı çimento esaslı kompozitlerde geçiş bölgesinin mikro yapısını etkilemektedir. Lif çevresindeki matris, harç matrisinden çok daha fazla gözenek yapısına sahiptir (Mukhopadhyay ve Khatana, 2015). Lif matris arayüz bölgesi zayıf bölge olduğundan çatlaklar bu bölgede oluşmaya başlamakta ve yayılmaktadır. Arayüzde oluşan ve gelişen çatlaklar betonun mekanik özelliklerini etkilemektedir (Afroughsabet ve ark., 2016). Yüksek dayanımlı lifli betonlarda optimum miktarda puzolanların çimento ikamesi olarak kullanılması arayüz gözenek yapısını iyileştirmektedir. Puzolanlar $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarını azaltarak, C-S-H jel miktarını arttırmakta daha yoğun daha homojen matris oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra nano malzemelerin kullanılmasıyla da elde edilen daha az gözenekli daha yoğun matris sayesinde mekanik özellikler iyileştirilebilmektedir (Akeed M. H. ve ark., 2022).

Nanomalzemeler

100 nm'den küçük tane boyutundaki nano malzemelerin, harç ve betona eklenmesiyle yapının mekanik özellikleri ve dayanımı iyileşmektedir. Nano parçalar boyutlarından dolayı dolgu görevi görmekte ve yüksek reaktiviteleri sayesinde gözenekleri azaltmakta, arayüzü iyileştirmekte buna bağlı olarak nano düzeydeki çatlak oluşumunun önüne geçerek, çatlak gelişimine karşı direnç sağlamaktadır (Singh ve ark., 2013; Chuah ve ark., 2014; Norhasri ve ark., 2017; Balapour ve ark., 2018; Paul ve ark., 2018; Reches, 2018; Nazar ve ark., 2020).

Nano malzemelerin matris içindeki dağılımı, nanoların reaktivitesini ve akıbetini etkilemektedir. Matris içinde homojen dağılmayan nano malzemeler topaklaşmaya sebep olduğundan, parçacıkların yüzey alanlarından bir kısmının kaplanmasına ve bu nedenle reaksiyon için kullanılmaz hale gelmelerine sebep olmaktadır. Nano malzemelerin homojen dağılımını sağlamak için kullanılan yöntemler ultrasonifikasyon yöntemi, su azaltıcılar ve sonikasyon yöntemidir (Chuah ve ark., 2014; Reches, 2018).

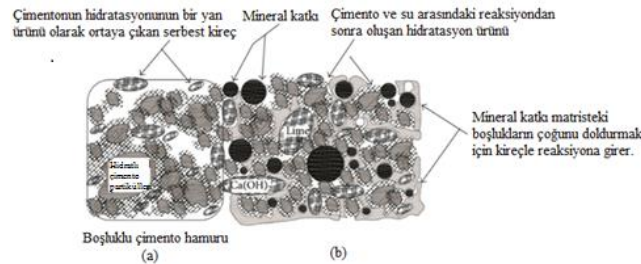
Nano malzemelerin mekanik özelliklere etkisi

Nano parçacıklar betonun gözenekliliğini azalttığından beton dayanımını olumlu yönde etkilemekte ve betonu iyileştirmektedir. Nano malzemelerin dahil edildiği çalışmaların sonuçları incelendiğinde nanoların gözenekleri doldurması, betonda istenmeyen malzeme olan kalsiyum hidroksiti

(Ca(OH)₂) tüketmesi, C-S-H jel oluşumunu artırarak arayüz geçiş bölgesini iyileştirmesi, daha yoğun matris oluşumuna katkı sağlaması betonun basınç ve eğilme dayanımını, kırılma tokluğunu, çekme dayanımını, çatlama karşı direncini arttırmaktadır. Nano malzemelerin hidratasyon ısısını yükseltmesi erken yaşta mekanik özelliklerin gelişmesine de katkı sağlamaktadır (Chuah ve ark., 2014; Paul ve ark., 2018; Reches, 2018).

Mineral katkılar

Betonun birincil bağlayıcı malzemesi Portland çimentosudur (Rashad, 2014; Thomas ve ark., 2021). Standart Portland çimentosuyla üretilen beton bazı dayanım problemleriyle karşı karşıya kalabilmekte ve oluşan hasarların çözülmesi zor olabilmektedir (Rashad, 2014). Bu problemlerin önüne geçmenin en güzel alternatiflerinden biri sanayi yan ürünleriyle ya da doğal puzolanlarla çimentoyu kısmen değiştirmektir. Ek katkılı çimentolar, tamamlayıcı çimento esaslı malzemeler olarak adlandırılmaktadır (Khan ve ark., 2014; Grace ve ark., 2019; Thomas ve ark., 2021; Tayeh ve ark., 2022). Tamamlayıcı çimento esaslı malzemeler, iyileştirilmiş işlenebilirlik ve yüksek dayanım için tercih edilmektedir. Standart çimentonun dayanımını etkileyen en önemli unsur hidratasyon sonucu oluşan sönmüş kireçtir. Sönmüş kireç asidik ortamlarda reaksiyona girerek düşük dayanıma sebep olmaktadır. Buna ek olarak yüksek çimento miktarına sahip betonlar çatlama karşı oldukça hassastır ve bu önemli bir dayanım problemidir. Mineral katkıları kullanılarak bu etkilerin azaltılması, kontrol altında tutulması mümkün olmaktadır. Puzolanik malzemeler hidratasyon sonucu oluşan Ca(OH)₂ ile reaksiyona girerek sönmüş kireç miktarını azaltırken, agresif çevre faktörlerine karşı dayanımı artırmakta, reaksiyon sonucu oluşan ilave C-S-H jelleri jel yapısını kuvvetlendirmektedir. Artan jel dayanımıyla betonun mikro yapısı iyileşmekte, daha yoğun ve geçirimsiz bir yapı olduğundan basınç dayanımını ve çekme dayanımını arttırmaktadır. Yoğun beton yapısından dolayı çatlak oluşum direnci, donma çözünme direnci, klor geçirgenlik direnci, sülfat direnci, karbonatlaşma direnci artmaktadır (Ayub ve ark., 2014; Khan ve ark., 2014; Hossain ve ark., 2016; Gou ve ark., 2019; Grace ve ark., 2019; Tayeh ve ark., 2022). Mineral katkıları arasında en çok kullanılan mineral katkıları uçucu kül, silis dumanı, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, metakaolindir (Ayub ve ark., 2014).



Şekil 5. (a) Gözenekli bir macuna neden olan kireç oluşumu. (b) kireç ve mineral karışımı arasındaki puzolanik reaksiyon (Ayub ve ark., 2014)

Su/çimento oranının çatlama etkisi

Su miktarı betonun hem taze hem de sertleşmiş özelliklerini üzerinde oldukça etkilidir. Su/çimento oranı betonun en zayıf bölgesi olarak tanımlanan arayüz geçiş bölgesinin dayanımını etkileyen bir faktördür. Arayüz geçiş bölgesi betonun davranışının ve kırılma enerjisinin belirlenmesinde, betonun mekanik davranışında önemli bir role sahiptir. Arayüz geçiş bölgesi, yapısından kaynaklı birçok mikro çatlak barındırmaktadır. Bu çatlaklar ileriki dönemde makro çatlaklara sebep olabileceğinden arayüz geçiş bölgesi, kırılma enerjisinin belirlenmesinde oldukça etkilidir. Su/çimento oranı düşük olan betonlar geçirgenliğin düşük olmasından dolayı yüksek dayanıma ve daha pürüzsüz bir kırılma yüzeyine sahip olmaktadır. Su/çimento oranının azaltılmasıyla harç ve arayüz geçiş bölgesindeki gözenekli yapıda

azalma meydana gelerek, harcın dayanımının, bağ gücünün, basınç ve eğilme dayanımının artmasına katkı sağlamaktadır (Zhang ve ark., 2018; Khalilpour ve ark., 2019). Güçlenen bağ sayesinde çatlak ilerlemesi arayüz geçiş bölgesinde meydana gelmeyecek, agrega üzerinden çatlağın ilerlemesine müsaade edecektir. Agrega üzerinden ilerleyen çatlak daha fazla enerji tüketeceğinden yüksek kırılma enerjisine sebep olacaktır. Yan ve arkadaşlarının farklı oranlarda su içeriğine sahip betonlar üzerinde yapmış olduğu çalışmada görüldüğü üzere; belirli seviyeye kadar (optimum) su miktarının artması kırılma tokluğunu arttırmış ancak giderek artan su/çimento oranlarında kırılma tokluğunda düşüş meydana getirmiştir. Su/çimento oranının artması kırılma enerjisinde azalmaya sebep olmuş ve buna bağlı olarak mikro çatlakların arayüz geçiş bölgesi yoluyla birleşmesine, mikro çatlakların makro çatlaklara dönüşmesine neden olarak daha büyük çatlak hasarlarının oluşmasına yol açmıştır. Bunun; artan su miktarının sebep olduğu gözenek artışından kaynaklandığı anlaşılmıştır. Artan gözenekler enerji absorpsiyonunu azaltarak düşük kırılma enerjisine sebep olmuştur (Khalilpour ve ark., 2019). TS 10514'e göre çelik lif takviyeli betonda su/çimento oranı en çok 0.55 olmalıdır (TS 10514, 2015).

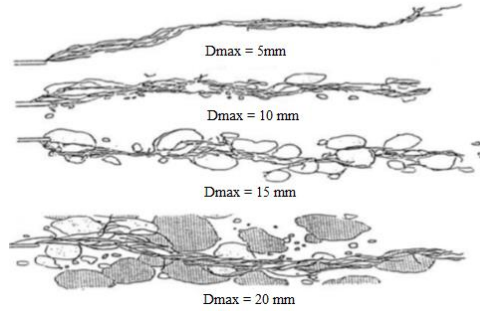
Agreganın etkisi

Agregalar belirli hacimlerde ve şekillerde olmayan inert granüler malzeme olarak tanımlanmaktadır. Agregalar kökenlerine göre doğal ve yapay, özgül ağırlıklarına göre hafif ve ağır, tane büyüklüklerine göre ince veya iri, tane şekillerine göre, yuvarlak, köşeli, yassı ve uzun olarak sınıflandırılmaktadırlar. Agrega boyutunun, gradasyonunun ve fiziksel özelliklerinin betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerinde etkisi vardır. Parçacık boyutu dağılımını ve karışım oranlarını optimize ederek maksimum parçacık yoğunluğu elde edilerek betonun taze ve sertleşmiş özellikleri iyileştirilebilmektedir (Marvila ve ark., 2021). En uygun gradasyon için ince ve kaba agregaların kombinasyonları oldukça önemlidir. Agrega boyutunun yanı sıra yüzey özellikleri de oldukça önemlidir. Pürüzlü yüzeye sahip agregalar betonun akışını kısıtlayarak taze özellikleri buna bağlı olarak sertleşmiş özellikleri etkilemektedir (Jiao ve ark., 2017). İnce malzemenin gereğinden fazla kullanılması su ihtiyacını arttırabileceğinden optimum miktarda kullanılmalıdır. Zhao ve arkadaşları, 3 farklı iri agrega geometrisinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemek için katmanlı, düzensiz ve yuvarlak agregalar kullanarak yapmış olduğu çalışmada düzensiz ve pürüzsüz yuvarlak agregaların betonun mekanik özelliklerinin iyileştirdiğini gözlemlemiştir (Marvila ve ark., 2021).

Beton işlenebilirliğine etki eden faktörlerden biri agreganın tipi ve yüzey morfolojisidir. Pürüzlü yüzeye ait agregalar vizkoziteyi arttırarak, işlenebilirliği azaltırken, yuvarlak pürüzsüz yüzeye sahip agregalar sürtünmeyi azaltarak işlenebilirliği arttırmaktadır. Düz ve uzun agregalar ise parçacık çarpışmasını arttırarak işlenebilirliği olumsuz etkilemektedir. Agrega hacmi de işlenebilirliği önemli derece de etkilemektedir. İri agrega miktarının artması vizkoziteyi arttırmakta, agrega ve çimento hamuru arasındaki yapışmayı azaltmaktadır. İnce agrega miktarının artması da su talebini arttırarak dayanımı olumsuz etkilemekte, yüksek plastik vizkoziteye yol açmaktadır. Bu yüzden iri agregaların oluşturacağı boşlukları dolduracak optimum miktarda ince agrega kullanılarak en iyi gradasyon dağılımı belirlenerek yüksek yapışma, kenetlenme, yoğunluk elde edilmelidir (Jiao ve ark., 2017).

Yapılan araştırmalar betonun kırılma enerjisinin sırasıyla beton, harç ve çimento hamuruyla ilişkili olduğu göstermektedir. Agrega boyutu, oluşan çatlağın izleyeceği yolu belirlemektedir. Agrega boyutunun artması çatlağın agrega etrafında alacağı yol miktarını arttırmaktadır. Optimum miktarda iri agrega kenetlenmeyi ve yoğunluğu arttıracığından çatlak ilerlemesi için gerekli olan enerji artacaktır. Maksimum agrega miktarının artması sünekliği arttırmaktadır. Artan miktar eğilme numunelerinin pik sonrasında eğimlerinin azaldığı, yük-deplasman eğrisinin arttığını göstermektedir. Agregalar, çimento esaslı matristen daha güçlü bir yapıda olduğunda çatlak çimento hamuru boyunca yayılım

göstermektedir. Yoğunluğunun fazla, gözenek miktarının düşük olduğu yüksek dayanımlı betonlarda oluşan çatlak, agreganın etrafından geçmek ya da agregayı kırmak zorundadır. Çatlağın izleyeceği her iki yolda da çatlağın yayılması için gerekli olan enerji miktarı artmaktadır. Agregada, çimento- hamur matrisinden daha güçlü olduğundan agregada meydana gelecek olan hasar matrisinkinden daha azdır. Dayanımı yüksek, homojen, az gözenekli, kuvvetli bağlara sahip betonlarda agregada ve matris arasında dayanım ve elastik özellikler tutarlı olduğundan matris ve agregada ara yüzeyi oluşacak gerilme etkileri azalmakta, buna bağlı olarak da agregada yüzeyinde kırılma olasılığı ve çatlak yayılması azalmaktadır. Özetleyecek olursak; agregada tipi, boyutu, düzgünlüğü, boyut dağılımı, yüzey dokusu, arayüz bölge özellikleri, dayanım, çatlak kontrol mekanizması ve çatlak yayılım direnci için oldukça önemlidir. Kaba ve ince agregada oranının optimum düzeyde olacak şekilde kaba agregada miktarının artması kırılma enerjisini ve kırılma tokluğunu arttırmaktadır (Khalilpour ve ark., 2019). TS 10514'e göre çelik lif takviyeli betonda kum miktarı toplam agregada kütlelerinin %40-45'i kadar olmalıdır. En büyük tane büyüklüğü doğal agregada için 28 mm, kırma taş için 32 mm olmalıdır. 14 mm'den büyük agregada oranı % 15-20 ile sınırlandırılmalıdır (TS 10514, 2015).



Şekil 6. Agregada boyutunun betondaki çatlak uzama yoluna etkisi (Khalilpour ve ark., 2019)

Çimento etkisi

Çimento agregada tanelerinin yüzeylerini, agregaların arasındaki boşluğu doldurarak bağlayıcılık özelliği göstermektedir. Geleneksel Portland çimentosunun ana mineral bileşenleri C_3S , C_2S , C_3A , C_3AF bileşenleridir. Her bir mineralin reaksiyon hızı, reaksiyon su ihtiyacı farklı olduğundan çimento özellikleri çimento bileşenlerinden etkilenmektedir (Jiao ve ark., 2017).

Portland çimentosu, silis dumanlı, uçucu küllü, yüksek fırın cürufu gibi çimentolar başlıca çimento türleridir. Bu katkıları çimento yerine ya da kısmen çimento tamamlayıcı malzeme olarak kullanılabilir. Bu çimento türlerinin kimyasal birleşimleri birbirlerinden farklıdır ve farklı kullanımlar için üretilirler. Bu katkıları Portland çimentolu betonda; su geçirimsizliğinin artması, hidratasyon ısısının düşmesi ile termal çatlakların azalması, alkali-agregada reaksiyonu ile oluşan çatlamlara karşı dayanımın artması, işlenebilirliğin artması, sülfat ve asit ortamlarında durabilitenin artması gibi amaçlara yönelik olarak kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe farklı amaçlar ve farklı kullanım yerleri için kullanılan birçok çimento tipi vardır. Bunlardan bazıları çabuk sertleşen çimento, düşük ısı çimento, sülfata dayanıklı çimento, yüksek fırın cürufu çimento, yüksek alümina çimentosu, puzolanik çimento, hidrofobik çimento, hava sürükleyici çimentodur. Çabuk sertleşen çimento az miktarda alüminyum sülfat eklenerek üretilmekte, işin çok hızlı bitmesi gereken durumlarda tercih edilmektedir. Düşük ısı çimentoda, C_3A miktarı düşük olduğundan hidratasyon ısısı düşmektedir. Bu yüzden düşük ısı çimentonun, kütle betonları gibi hidratasyon ısısının problem olacağı uygulamalarda tercih edilmesi oldukça önemlidir. Sülfata dayanıklı çimento, sülfat saldırısına maruz kalacak yapılarda kullanılmaktadır. Sülfat saldırısı, çimento bünyesindeki C_3A ve $Ca(OH)_2$ ile tepkimeye girerek etrenjiti oluşturmada, oluşan etrenjit hacim değişikliğine neden olduğundan betonun çatlmasına ve beton macununun hasar

görmesine neden olmaktadır. Sülfatlı çimentolarda C_3A oranının %5'in altında olması nedeniyle sülfat etkisinde olan ortamlarda daha dayanıklı olmakta ve bu çimentodan üretilen betonlar sülfat saldırısından zarar görmemektedir. Bu yüzden sülfat saldırısına maruz kalınacak yerlerde sülfata dayanıklı çimento kullanılması önem arz etmektedir. Yüksek alümina çimentosu; betonun yüksek sıcaklığa, dona ve asidik koşullara maruz kaldığı durumlarda kullanılarak bu faktörlerin betonda sebep olabileceği hasarların önüne geçilebilmektedir. Hava sürükleyici çimentolar, hava sürükleyici katkıların eklenmesiyle üretilmektedir. Birbirinden bağımsız, küçük, sert hava kabarcıkları betonun donma çözünme direncini arttırmada ve böylece çatlak oluşum direncinin artırılmasında etkili olmaktadır. Hidrofobik çimento, su itici kimyasallar eklenerek hazırlanmakta, klinkere belirli oranlarda streaik asit, oleic asit gibi hidrofob bir eleman eklenip öğütülmesiyle elde edilmektedir. Su emilimini önlemek için özellikle yüksek yağışlı bölgelerde kullanılmak amacıyla üretilip; bu katkı ile üretilen çimento parçacıkları ıslanmayarak ve eğimli durumlarda da yüzeyde küresel parçacıklar şeklinde yuvarlanmaktadır. Bu hidrofobik kaplama sayesinde beton, klorür ve sülfat iyonlarının betona vereceği zararlara, bozulmalara karşı direnç göstermektedir (Dunuweera ve Rajapakse, 2018). Belirtilen gerekçelere göre çimentonun, yapının kullanım amacı ve kullanım yerine göre doğru seçilmesi çatlak oluşumunun önlenmesi açısından önem arz etmektedir. TS 10514'e göre çelik lif takviyeli betonda çimento miktarı en az 320 kg/m^3 olmalıdır (TS 10514, 2015).

SONUÇ

Yapılan literatür araştırması sonucunda, çimento esaslı malzemelerde çatlak oluşum mekanizmasının uygun tasarımla optimize edilebilirliği anlaşılmıştır. Yapılan detaylı literatür araştırması sonucunda;

- Betonun kullanım alanına ve betondan beklenen performansa göre en etkili lif türü kullanılmalıdır.
- Betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirmesi için kullanılacak olan lif miktarı hacimce %1-%2 oranında ve lif narinlik oranı 60/80 aralığında tercih edilmelidir. Lif narinliği 100'ü aşmamalıdır.
- Farklı narinlik, farklı şekil ve farklı türdeki liflerin hibritlenmesi, homojen dağılıma, betonun işlenebilirliğine, basınç dayanımı, eğilme ve yarmada çekme dayanımı değerlerine katkı sağladığından liflerin hibritlenmesi tercih edilmelidir.
- Matris ara yüzü, stres aktarımında önemli rol oynadığından mineral katkıları ve nano malzemeler, optimum miktarlarda harç ve betona eklenerek yapının gevrekliği, çatlak dayanım direnci iyileştirilmelidir.
- Yapının kullanım amacına ve kullanım alanına en uygun çimento türü seçilerek olası agresif dış etkenlerin etkisi önlenmelidir.
- Parçacık dağılımı ve karışım oranları optimize edilerek maksimum agrega yoğunluğu elde edilmelidir. Çelik lif takviyeli betonda kum miktarı toplam agrega kütlelerinin %40-45'i kadar olmalıdır. En büyük tane büyüklüğü doğal agrega için 28 mm, kırma taş için 32 mm olmalıdır. 14 mm'den büyük agrega oranı %15-20 ile sınırlandırılmalıdır.
- Su/çimento 0.30-0.40 oranlarında tercih edilmesinin betonun özellikleri üzerinde iyileştirici etkileri olacaktır. Bu oran, çelik lif takviyeli betonda en fazla 0.55 olmalıdır.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Afroughsabet, V., Biolzi, L., & Ozbakkaloglu, T. (2016). High-Performance Fiber-Reinforced Concrete: A Review. *Journal of Materials Science*, 51, s. 6517–6551. doi:<https://doi.org/10.1007/s10853-016-9917-4>
- Akeed, M. H., Qaidi, S., Ahmed, H. U., Faraj, R. H., Mohammed, A. S., Emad, W., . . . Azevedo, A. G. (2022). Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. Part II: Hydration And Microstructure. *Case Studies in Construction Materials*, 17(e01289). doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01289>
- Akeed, M. H., Qaidi, S., Ahmed, H. U., Emad, W., Faraj, R. H., Mohammed, A. S., . . . Azevedo, A. G. (2022). Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. Part III: Fresh And Hardened Properties. *Case Studies in Construction Materials*, 17(e01265). doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01265>
- Akeed, M., Qaidi, S., Ahmed, H., Faraj, R., Mohammed, A., Emad, W., . . . Azevedo, A. (2022). Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. Part I: Developments, Principles, Raw Materials. *Case Studies in Construction Materials*, 17(e01290). doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01290>
- Akeed, M., Qaidi, S., Ahmed, H., Faraj, R., Majeed, S., Mohammed, A., . . . Azevedo, A. (2022). Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. Part V: Mixture Design, Preparation, Mixing, Casting, And Curing. *Case Studies in Construction Materials*, 17(e01363).
- Akın, S., Kaplan, A. N., & Özel, C. (2022). Farklı Uzunluktaki Doğal Liflerin Beton Performansı Üzerine Etkileri. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 6(2), s. 80-84.
- Alkayış, M. H., & Başyigit, C. (2021). Lif Katkısının Beton Darbe Dayanımına Etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (24), s. 455-462.
- Ayub, T., Khan, S. U., & Memon, F. A. (2014). Mechanical Characteristics of Hardened Concrete with Different Mineral Admixtures: A Review. *The Scientific World Journal*, doi:<http://dx.doi.org/10.1155/2014/875082>
- Badugea, S. K., Navaratnam, S., Abu-Zidan, Y., McCormack, T., Nguyen, K., Mendis, P., . . . Aye, L. (2021). Improving Performance Of Additive Manufactured (3D Printed) Concrete: A Review On Material Mix Design, Processing, İnterlayer Bonding, And Reinforcing Methods. *Structures*, 29, s. 1597-1609. doi:<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.061>
- Balapour, M., Joshaghani, A., & Althoey, F. (2018). Nano-Sio2 Contribution To Mechanical, Durability, Fresh And Microstructural Characteristics Of Concrete: A Review. *Construction and Building Materials*, 181, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.266>
- Beton- Çelik Tel Takviyeli- Çelik Telleri- Betona Karıştırma ve Kontrol Kuralları. (2015). Ankara, Türkiye: Türk Standardları Enstitüsü.
- Betonarme Yapıların Tasarım Ve Yapım Kuralları. (2000). s. 65. Ankara, Türkiye: Türk Standardları Enstitüsü.
- Biswas, R. K., Ahmed, F. B., Haque, E., Provasha, A. A., Hasan, Z., Hayat, F., & Sen, D. (2021). Review Effects of Steel Fiber Percentage and Aspect Ratios on Fresh and Harden Properties of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete. *Applied mechanics*, 2(3), s. 501-515. doi:<https://doi.org/10.3390/applmech2030028>
- Chuah, S., Pan, Z., Sanjayan, J. G., Wang, C. M., & Duan, W. H. (2014). Nano Reinforced Cement And Concrete Composites And New Perspective From Graphene Oxide. *Construction and Building Materials*, 73, s. 113-124. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.040>
- Demirhan, S. (2017). *Nano Malzemeler İle Modifiye Edilmiş Yüksek Performanslı Hibrid Lif Donatılı Betonlar* (Doktora tezi). Erişim adresi: <https://acikbilim.yok.gov.tr/>
- Dunuweera, S. P., & Rajapakse, R. M. (2018). Cement Types, Composition, Uses and Advantages of Nanocement, Environmental Impact on Cement Production, and Possible Solutions. *Advances in Materials Science and Engineering*, s. 1-11. doi:<https://doi.org/10.1155/2018/4158682>
- Fehmi Çivici, E. G. (2016). Karma Lifli Betonların Tokluk Açısından Değerlendirilmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(3), s. 365-376.
- Gou, M., Zhou, L., & Then, N. W. (2019). Utilization of Tailings In Cement And Concrete:A review. *Science and Engineering of Composite Materials*, 26(1), s. 449-464. doi:<https://doi.org/10.1515/secm-2019-0029>
- Grace, M. O., Ede, A. N., Olofinnade, O., Bamigboye, G., Okeke, C., Oyebisi, S. O., & Arum, C. (2019). Influence of Some Selected Supplementary Cementitious Materials on Workability and Compressive Strength of Concrete – A Review. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 640. doi:[doi:10.1088/1757-899X/640/1/012071](https://doi.org/10.1088/1757-899X/640/1/012071)
- Guleria , D., & Kamboj, J. (2016). Study of Mechanical Properties of High Strength Concrete by Using Steel Fiber – A Review. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 7(5), s. 63-71. <http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=7&IType=5> adresinden alındı

- Hassanpour, M., Shafiq, P., & Mahmud, H. B. (2012). Lightweight Aggregate Concrete Fiber Reinforcement – A Review. *Construction and Building Materials*, 37, s. 452-461. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.071
- Hossain, M. M., Karim, M. R., Hasan, M., Hossain, M. K., & Zain, M. F. (2016). Durability Of Mortar And Concrete Made Up Of Pozzolans As A Partial Replacement Of Cement: A Review. *Construction and Building Materials*, 116, s. 128-140. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.147
- Jiao, D., Shi, C., Yuan, Q., An, X., Liu, Y., & Li, H. (2017). Effect Of Constituents On Rheological Properties Of Fresh Concrete-A Review. *Cement and Concrete Composites*, 83, s. 146-159. doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.016
- Khalilpour, S., BaniAsad, E., & Dehestani, M. (2019). A Review On Concrete Fracture Energy And Effective Parameters. *Cement And Concrete Research*, 120, s. 294-321. doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.013
- Khan, M. I., Abbas, Y. M., & Fares, G. (2017). Review Of High And Ultrahigh Performance Cementitious Composites Incorporating Various Combinations Of Fibers And Ultrafines. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 29(4), s. 339-347. doi:https://doi.org/10.1016/j.jksues.2017.03.006
- Khan, S. U., Nuruddin, M. F., Ayub, T., & Shafiq, N. (2014). Effects Of Different Mineral Admixtures On The Properties Of Fresh Concrete. *The Scientific World Journal*, s. 1-11. doi: https://doi.org/10.1155/2014/986567
- Kızıllırmak, C., Aydın, S., & Yardımcı, M. Y. (2019). Çelik Lif Kanca Geometrisinin Yüksek Dayanımlı Lifli Betonların Statik ve Darbe Yükleri Altında Eğilme Özelliklerine Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(3), s. 1609-1627.
- Kızıllıkanat, A. B., Kabay, N., Akyüncü, V., & Erdoğan, G. (2014). Bazalt Lifler Ve Bazalt Lifli Betonların Mekanik Özellikleri . *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi* (32), s. 444-442.
- Kozak, M. (2013). Çelik Lifli Betonlar ve Kullanım Alanlarının Araştırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, 3(5), s. 26-35.
- Kurt, G. (2006). Lif içeriği ve su/çimento oranının fibrobetonun mekanik davranışına etkileri (Yüksek lisans tezi). Erişim adresi: https://polen.itu.edu.tr/
- Marvila , M. T., de Azevedo , A. G., de Matos, P. R., Monteiro , S. N., & Vieira , C. F. (2021). Materials for Production of High and Ultra-High Performance Concrete: Review and Perspective of Possible Novel Materials. *Materials*, 14(15), s. 1-36. doi:https://doi.org/10.3390/ma14154304
- Mukhopadhyay, S., & Khatana, S. (2015). A Review On The Use Of Fibers İn Reinforced Cementitious Concrete. *Journal of Industrial Textiles*, 45(2), s. 239-264. doi:https://doi.org/10.1177/1528083714529806
- Nazar, S., Yang, J., Thomas, B. S., Azim, I., & Rehman, S. K. (2020). Rheological Properties Of Cementitious Composites With And Without Nano-Materials: A Comprehensive Review. *Journal of Cleaner Production*, 272(122701). doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122701
- Norhasri, M. M., Hamidah, M. S., & Fadzil, A. M. (2017). Applications Of Using Nano Material İn Concrete: A Review. *Construction and Building Materials*, 133, s. 91-97. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.005
- Özbay, E., Erdemir, M., & Durmuş, H. İ. (2016). Utilization And Efficiency Of Ground Granulated Blast Furnace Slag On Concrete Properties – A Review. *Construction and Building Materials*, 105, s. 423-434. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153
- Pakravan, H. R., Latifi, M., & Jamshidi, M. (2017). Hybrid Short Fiber Reinforcement System İn Concrete: A Review. *Construction and Building Materials*, 142, s. 280-294. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.059
- Paul, S. C., Van Rooyen, A. S., Van Zijl, G. P., & Petrik, L. F. (2018). Properties Of Cement-Based Composites Using Nanoparticles: A Comprehensive Review. *Construction and Building Materials*, 189, s. 1019-1034. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.062
- Plank, J., Sakai, E., Miao, C. W., & Hong, J. X. (2015). Chemical Admixtures — Chemistry, Applications And Their Impact On Concrete Microstructure And Durability. *Cement and Concrete Research*, 78, s. 81-99. doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.016
- Rashad, A. M. (2014). A Comprehensive Overview About The İnfluence Of Different Admixtures And Additives On The Properties Of Alkali-Activated Fly Ash. *Materials & Design*, 53, s. 1005-1025. doi:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.074
- Reches, Y. (2018). Nanoparticles As Concrete Additives: Review And Perspectives. *Construction and Building Materials*, 175, s. 483-495. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.214
- Sarı, M. (2013). Farklı tipteki liflerin betonun mekanik davranışına etkisi (Yüksek lisans tezi). Erişim adresi: https://polen.itu.edu.tr/

- Scherer, G. (2015). Drying, Shrinkage, and Cracking of Cementitious Materials. *Transport in Porous Media*, 110, s. 311–331. doi:DOI 10.1007/s11242-015-0518-5
- Shaikh, F. A., Luhar, S., Arel, H. Ş., & Luhar, I. (2020). Performance Evaluation Of Ultrahigh Performance Fibre Reinforced Concrete – A Review. *Construction and Building Materials*, 232. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117152
- Sidiq, A., Gravina, R., & Giustozzi, F. (2019). Is Concrete Healing Really Efficient? A Review. *Construction and Building Materials*, 205, s. 257-273. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.002
- Singh, L. P., Karade, S. R., Bhattacharyya, S. K., Yousuf, M. M., & Ahalawat, S. (2013). Beneficial Role Of Nanosilica In Cement Based Materials – A Review. *Construction and Building Materials*, 47, s. 1069-1077. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.052
- Soufeiani, L., Raman, S. N., Jumaat, M. Z., Alengaram, U. J., Ghadyani, G., & Mendis, P. (2016). Influences Of The Volume Fraction And Shape Of Steel Fibers On Fiber-Reinforced Concrete Subjected To Dynamic Loading – A Review. *Engineering Structures*, 124, s. 405-417. doi:https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.029
- Şahan, M.F., Ünsal, İ. (2021). Farklı Lif Oranına Sahip Çelik Lif Takviyeli Beton Kirişlerde Çarpma Etkisi. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 5(2), s. 212-217. DOI: 10.46460/ijiea.986369
- Şimşek, O., Toklu, K., & Ünal, M. T. (2021). Çelik Liflerin Geometrik Şeklinin ve Oranının Beton Özelleriklerine Etkisinin Araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 24(2), s. 409-415. doi: 10.2339/politeknik.691640
- Tayeh, B. A., Hamada, H. M., Almeshal, I., & Bakar, B. A. (2022). Durability And Mechanical Properties Of Cement Concrete Comprising Pozzolanic Materials With Alkali-Activated Binder: A Comprehensive Review. *Case Studies in Construction Materials*, 17(e01429). doi:https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01429
- Thomas, B. S., Yang, J., Mo, K. H., Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., & Ariyachandra, E. (2021). Biomass Ashes From Agricultural Wastes As Supplementary Cementitious Materials Or Aggregate Replacement In Cement/Geopolymer Concrete: A Comprehensive Review. *Journal of Building Engineering*, 40(102332). doi:https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102332
- Tiberti, G., Germano, F., Mudadu, A., & Plizzari, G. A. (2018). An Overview Of The Flexural Post-Cracking Behavior Of Steel Fiber Reinforced Concrete. *Structural Concrete*, 19(3), s. 695-718. doi:https://doi.org/10.1002/suco.201700068
- Tittelboom, K. V., & De Belie, N. (2013). Self-Healing in Cementitious Materials—A Review. *Materials*, 6(6), s. 2182-2217. doi:https://doi.org/10.3390/ma6062182
- Türk, K., & Kına, C. (2017). Çimento Esaslı Kompozitlerde Karma Lif Kullanımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(6), s. 671-678. doi:doi: 10.5505/pajes.2016.17047
- Türkmenoğlu, Z. F., & Varol, O. O. (2016). Lifli Beton Türleri Ve Kullanım Alanları. *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress*, (s. 3792-3795). Adana.
- Wu, H., Lin, X., & Zhou, A. (2020). A Review Of Mechanical Properties Of Fibre Reinforced Concrete At Elevated Temperatures. *Cement and Concrete Research*, 135. doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106117
- Yazıcı, Ş. (2017). Çelik Lif Boyu Ve Kullanım Oranının Çelik Lifli Betonun Özelliklerine Etkisi. *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*. Bakü.
- Yoo, D.-Y., & Banthia, N. (2016). Mechanical Properties Of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete: A Review. *Cement and Concrete Composites*, 73, s. 267-280. doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001
- Yoo, D.-Y., & Banthia, N. (2019). Impact Resistance Of Fiber-Reinforced Concrete – A Review. *Cement and Concrete Composites*, 104(103389). doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103389
- Zhang, D., Yu, J., Wu, H., Jaworska, B., Ellis, B. R., & Li, V. C. (2020). Discontinuous Micro-Fibers As Intrinsic Reinforcement For Ductile Engineered Cementitious Composites (ECC). *Composites Part B: Engineering*, 184(107741). doi:https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107741
- Zhang, P., Wittmann, F. H., Lura, P., Müller, H. S., Han, S., & Zhao, T. (2018). Application Of Neutron Imaging To Investigate Fundamental Aspects Of Durability Of Cement-Based Materials: A Review. *Cement and Concrete Research*, 108, s. 152-166. doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.003