



Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonun Mekanik Özellikleri ve Dayanıklılığı

Mechanical Properties and Durability of Steel Fiber Self-Compacting Concrete

Serkan BİÇİCİ^{1,*} , Yusuf TOLA² ¹ İnşaat Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-4838-3157² İnşaat Teknolojisi, Kocaeli Meslek Yüksek Okulu, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0001-9019-2605

Derleme Makale

Gönderilme Tarihi : 16/02/2022

Kabul Tarihi : 15/06/2023

Anahtar Kelimeler

Beton
Çelik Lif Oranı
Dayanım
Mekanik Deneyler

Özet

Bu çalışma çelik fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun (SFRSCC) özelliklerini nasıl etkilediğini araştırmaktadır. Bu amaçla mekanik özelliklerini karakterize etmek ve dayanıklılık göstergelerini değerlendirmek için SFRSCC ve kendiliğinden yerleşen beton (SCC) numuneleri ile yapılan deneysel çalışmalar incelenip değerlendirilmiştir. Mekanik özellikler, basınç, yarmada çekme, elastisite modülü ve eğilme dayanımları için test analiz edilmektedir.

Çelik fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun (SFRSCC) dayanıklılığına ilişkin araştırmalar hala çok azdır. Bu yüzden çelik fiberlerin korozyonunun çatlamaya ve ardından parçalanmaya yol açıp açmayacağı henüz net bir şekilde ortaya koyulmamıştır.

Sonuçlar, çelik liflerin SCC'ye eklenmesinin, çatlama sonrası eğilme direncini ve enerji absorpsiyonunu artırma açısından çok etkili olduğunu ve SCC'nin kendi kendine yerleşen gereksinimleri ve dayanıklılık göstergelerini önemli ölçüde etkilemediğini göstermiştir. Ayrıca araştırmalardan elde edilen bulgulara göre liflerin karışım özelliklerinin ve hacim oranının bu ana özellikleri önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermiştir.

Bu çalışma, birçok araştırmacı tarafından rapor edilen çok çeşitli uluslararası kaynaklardan toplanan veri tabanları ve deneysel olarak elde edilen veriler kullanılarak kapsamlı karşılaştırmalar sunmaktadır. Sunulan uygulama örnekleri ile ilgili bir derleme makale çalışması yapılmıştır.

Review Paper

Received Date : 16/02/2022

Accepted Date : 15/06/2023

Keywords

Concrete
Steel Fiber ratio
Strength
Mechanical Experiment

Abstract

This study is about how steel-reinforced SFRSCC can grow in reinforced concrete construction. In order to create reinforced concrete samples that can be designed and formed for this purpose, the applications made with SFRSCC and settling concrete samples were examined and measured. The test is analyzed for mechanical properties, compressive strength, tensile patch strength, elasticity and bending strength.

Research on the durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete (SFRSCC) is still very scarce. Therefore, it has not yet been clearly established whether corrosion of steel fibers will lead to cracking and subsequent fragmentation.

The results showed that the addition of steel fibers to SCC was very effective in increasing the flexural strength and energy absorption after cracking, and did not significantly affect the self-contained requirements and strength indicators of SCC. It has also been shown that the blend properties and volume ratio of the fibers can significantly affect these main properties.

This study offers comprehensive comparisons using empirically obtained data and databases collected from a wide variety of international sources reported by many researchers. A review article study was made about the application examples presented.

1. Giriş

Kendiliğinden yerleşen beton (SCC), geleneksel beton gibi çimento, su, agrega, mineral ve kimyasal katkılardan oluşmaktadır [1]. Dayanıklı beton yapılara ulaşmak amacıyla ilk olarak yaklaşık 32 yıl önce Japonya'da geliştirildi. Bu tip betonlarda vibrasyon gerekli olmayıp,

kendi ağırlıkları nedeniyle kalıp içerisinde hava kalmayacak şekilde yerleşmektedir [2]. Ayrıca SCC kullanımı şantiyedeki gürültü seviyesini düşürüp bu sayede çevreye olan etkiyi azaltmaktadır. SCC' de büyük partiküllerin ayrılmasını önlemek için viskoziteyi artırıcı katkı maddeleri veya dolgu maddeleri kullanılmaktadır [3]. Su altında tüneller ile dökülen betonlarda SCC için genellikle viskoziteyi artıran mineral katkı maddesi kullanılmaktadır [4]. Bu katkı maddeleri kireçtaşı, silis

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): biciciserkan@hotmail.com



dumanı, uçucu kül, ince kum ve cam dolgu malzemeleridir [5]. Aynı zamanda SCC karışım bileşimine yeterli çelik lif takviyesi yapıldığı takdirde betonun gevrek bir malzeme olarak davranışı sünek davranışa dönüşmektedir [6].

Çelik lifler betonda çatlama sonrası yük taşıma kapasitesi ve enerji emme performansı gibi mekanik özelliklerini artırmak amacıyla kullanılmıştır [7]. Fiberler ayrıca çatlak genişliğini sınırlamak amacıyla kullanılır ve beton dayanımı açısından faydalı sonuçlar vermektedir. Artan çatlak genişliği, betonun geçirgenliğini artırarak donatının korozyona uğraması için ortam oluşturmaktadır [8]. Çatlakların oluşması ve yayılması nedeniyle betonun artan geçirgenliği, su, klorür ve diğer aşındırıcı maddelerin girmesine izin vererek bozulmayı kolaylaştırmaktadır [9]. Betonun geçirgenliği düşük ise klorür iyonları, sülfat iyonları ve asitler gibi zararlı maddeler betona kolayca girememekte ve böylece yapının mukavemeti daha iyi korunmaktadır [10].

Beton karışımlarına çelik lifler takviye edildiği takdirde, beton karışımındaki enerjinin absorbe kapasitesi, çatlak gelişimi, süneklilik düzeyi, basınç, çekme, eğilme ve darbe dayanımı gibi mekanik özellikleri iyileşmektedir. Bu sebeple çelik lifli betonlar yapı sektöründe giderek daha fazla önem kazanmaktadır [11]. Ancak lifli betonların bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Çelik lif kullanımı beton karışımının kıvamını ve işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir [12]. Taze betonun işlenebilirliği kullanılan liflerin uzunluğuna, miktarına ve şekline göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada varılan önemli sonuçlarından birisi de, betonun yapısında çelik liflerin kullanılması ile betonun mekanik özellikleri ve dayanımının önemli ölçüde değişikliğe uğradığı değerlendirilmiştir.

Betonarme yapılarıdaki dayanım günümüzde önemli bir konu haline gelmiştir. Bu durumda çelik lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton (SFRSCC) kullanım alanlarının giderek artması kaçınılmazdır [13]. SFRSCC kompozit malzemelerin yayılması amacıyla dayanıklılık (durabilite) analizleri ile desteklenmesi önem taşımaktadır. Bu nedenle çalışma içerisinde dayanıklılık performansına ilişkin bazı analizler verilip kıyaslamalar yapılmaktadır [14].

Araştırma SFRSCC ve SCC performansını analiz etmek amacıyla mekanik özellikler (basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü ve eğilme mukavemeti) ve geleneksel betonun dayanıklılık analiz değerlendirmesine yöneliktir. Bu geleneksel yöntemler ile su emme kapasitesi, hava geçirgenliği, elektrik direnci, çelik liflerin korozyonu, klor penetrasyonuna direnci ve karbonatlaşma miktarlarında ortaya çıkan araştırma bulguları ışığında çalışma analiz edilmektedir. Basınç dayanımını tam anlamıyla kazanmış numune üzerinden yapılan çalışmalar gösterge olarak alınmaktadır.

2. Taze Betonun Karışım Özellikleri

Betonun içerisindeki çelik lif oranındaki artışla işlenebilirliğin azalmasına ve bu oranın %0.75 üzerinde olduğu zamanlarda ise hava içeriğinin arttığı tespit edilmiştir [15]. Bu durumda betondaki çelik lif oranının işlenebilirlik ve hava içeriği arasında bir bağlantı olduğunu göstermektedir.

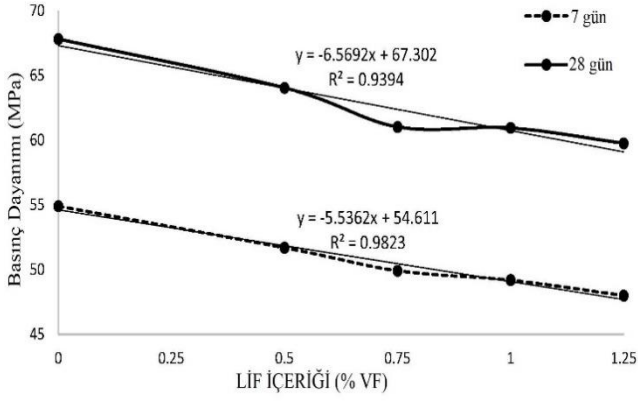
Madandoust vd. ile Iqbal vd. tarafından yapılan araştırmalar incelendiğinde SFRSCC ile ilgili analiz sonuçları, çelik lif eklenmesiyle betonun çökme akışında çok az oranda değişiklik olduğunu ve betonun işlenebilirliği üzerinde büyük bir etkisi olmadığını tespit etmişlerdir. Lif içeriği arttıkça, özellikle %0.75 çelik lif içeriğinin üzerinde çökme akışı azalır. %1,25 lif içeriğine sahip beton karışımı için çökme akışı minimum gereklilik olan 600 mm'nin altına düşmüştür. Ancak araştırma sonuçları çelik liflerin çökme değeri üzerinde önemli olumsuz etkilerin olmadığını göstermektedir.

Khaloo vd. çalışmasında betona özellikle %2 olmak üzere yüksek lif oranları ile takviye edilmiş orta dayanımlı numunelerinin, taze betonun donatılar arasından geçişinin zorluğu nedeniyle ağır donatılı kesitler için kabul edilebilir bir karışım olmadığı görülmektedir [16]. Mazaheripour vd. araştırmasında ise maksimum agrega boyutu, lif hacmi, lif tipi, lif geometrisi ve lif en-boy oranı gibi birçok parametreye bağlı olarak betona lif katılması betonun işlenebilirliğini azaltmaktadır.

3. Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonun Mekanik Özellikleri

3.1. Basınç Dayanımı

Betonun basınç dayanımı, eksenel basınç yükünün etkisi altında betonun kırılmaması için maksimum kapasite olarak tanımlanmaktadır [17]. Çelik liflerin etkisi altında basınç dayanımı %25 oranında artış gösterirken, bazı durumlarda ise aynı oranlarda dayanım kaybı da yaşanmaktadır. Bunun nedeni liflerin beton içerisindeki dağılımıdır [18]. Yükleme yapıldığında dik olan çelik lifler herhangi bir yüke karşı direnç göstermez iken, diğer çelik lifler paralelliği oranında direnç göstermektedir [19].



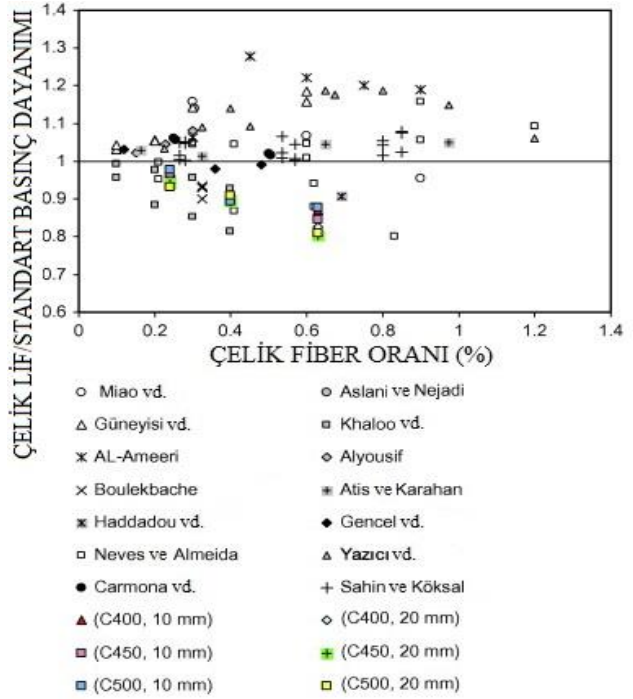
Şekil 1. Betonun Basınç Dayanımındaki Değişim

Iqbal vd. beton basınç dayanımı testlerinin sonucunda; Beton içerisindeki çelik lif oranındaki artışın, beton basınç dayanımında belli oranlarda azalmaya neden olduğunu göstermektedir. Bu ilişki 7 günlük ve 28 günlük beton dayanımları üzerinden ölçülerek belirlenmektedir. Test edilen numunelerin bu davranış verileri Şekil 1'de grafiksel olarak sunulmaktadır. Şekil 1. bizlere 7 günlük ve 28 günlük lif içerikli betonların lif oranı arttıkça aynı doğrultuda basınç dayanımlarının azaldığı görülmektedir [20].

Şekil 1'de lif ilave edilmemiş betonun basınç dayanımı 67.8 Mpa iken, %1.25 çelik lif ilaveli betonda ise 59.74 Mpa olarak bulunmuştur. Bu durumda betonun basınç dayanımında %11.9 azalma olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar beton içerisindeki çelik lif oranındaki artışın beton içerisindeki hava oranını artırdığından, basınç dayanımını olumsuz yönde etkilediği değerlendirilmektedir.

Bentur ve Mindess araştırması incelendiğinde çelik lifli betonların mekanik dayanımları arasındaki en büyük değişimin basınç dayanımında olduğu görülmektedir [21]. Iqbal vd. ile Khaloo vd. basınç dayanımı çalışmalarında benzer şekilde, çelik liflerin eklenmesi ile beraber yüksek mukavemetli SCC' nin basınç dayanımında ortalama %10'luk bir azalma olduğunu bildirmişlerdir [22].

Şekil 2'de betonların normalleştirilmiş basınç dayanımına karşılık gelen çelik lif faktörüne göre arasındaki ilişki göstermektedir. Araştırmacılar tarafından çelik liflerin hacmi ve en boy oranının beton özellikleri üzerindeki etkisi incelemektedir [23, 24]. Belirli çelik lif faktöründe ölçülen basınç dayanımı için önemli çelişkili bulgular bulunmaktadır [25, 26]. Bazı araştırmacılar ihmal edilebilir etkiler bulurken bir kısım araştırmacı lif faktörünün basınç oranının iyileştirdiğini belirtmiştir [27, 28, 29, 30, 31, 32]. Bunun yanında basınç oranını negatif etkilediğine dair sonuçlarda çıkarılmaktadır [34, 33]. Şekil 2'ye göre çelik lif faktörünün basınç dayanımını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmaktadır.

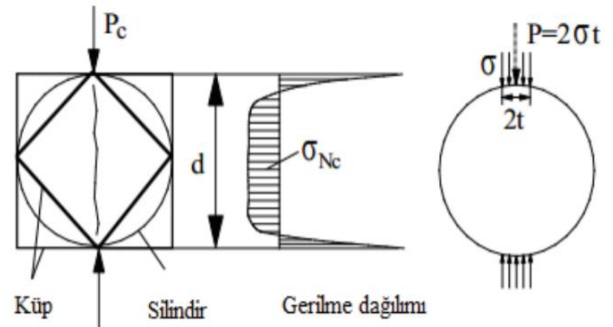


Şekil 2. Çelik Lif/ Standart Betonun Basınç Dayanımı

3.2. Yarmada Çekme Dayanımı

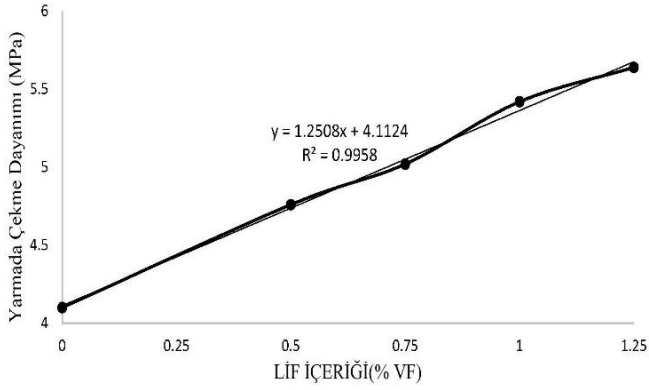
Betonun çekme dayanımının basınç dayanımından daha zayıf olmasının nedeni çekme gerilmesi altında çatlakların kolay oluşup ilerlemesinden kaynaklanmaktadır [35]. Tasarımlarda betonun çekme dayanımı göz ardı edilse bile, betonun kırılmaya karşı hassas olması nedeniyle göz ardı edilmemesi gerekmektedir.

Çekme dayanımında yarmada çekme, eğilmede çekme ve direkt çekme deneyleri kullanılmaktadır. Bu deneylerden en basit şekilde dayanımı tespit edebileceğimiz yarmada çekme dayanımı metodudur [36]. Şekil 3'de gösterilen deney numunesinin alt ve üst kısımlarına standartlara göre farklı uzunluk ve genişlikte plakalar yerleştirilmiştir. Bu sayede yükleme bölgelerindeki ezilme ve birçok çatlama önlenmektedir. Şekilde yarmada çekme gerilmesi, test numunesine uygulanan doğrusal bir yük boyunca, basınç gerilmesine dik olan yönde meydana gelmektedir [37].

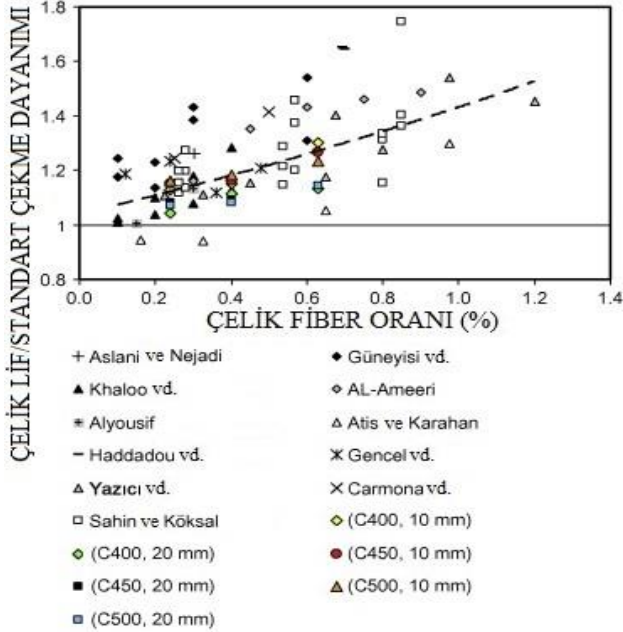


Şekil 3. Yarma Deneyi Ve Gerilme Dağılımları

Iqbal vd. yarmada çekme dayanımı verilerinden yararlanarak sonuç Şekil 4'de grafiksel olarak sunulmuştur. Beton içerisine %1.25 oranında çelik lif takviye edilmesi ile analiz edilen numunelerin yarmada çekme dayanımlarında %37'lik artış olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Altun ve Aktaş tarafından yapılan araştırmada çelik lif oranındaki artışın SCC'nin çekme ve eğilme mukavemetinde kademeli olarak bir artış olduğunu bildirmişlerdir. Analiz sonuçları betona %2 çelik lif eklenmesiyle yüksek mukavemetli SFRSCC'nin yarma çekme mukavemetinde %17'lik bir artış olduğu görülmektedir. Mazaheripour vd. %0.3 oranındaki poliprobilen lif ilavesiyle SCC'nin çekme mukavemetinde %14'lük bir artış olduğu sonucuna varmıştır [38].



Şekil 4. Betonun Yarmada Çekme Dayanımındaki Değişim



Şekil 5. Çelik Lif/ Standart Betonun Çekme Dayanımı

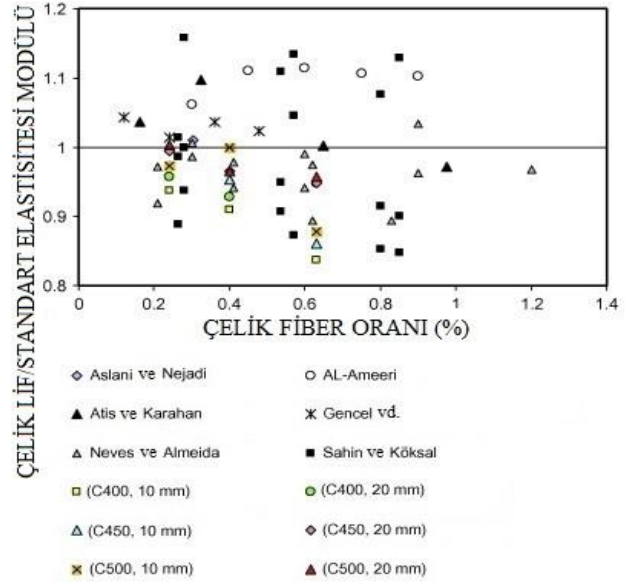
Şekil 5'de betonların normalleştirilmiş yarmada çekme dayanımına karşılık gelen lif faktörüne göre arasındaki ilişki göstermektedir. Fiber oranı arttıkça grafikte daha fazla saçılma gözlemlenmektedir. Diğer bir deyişle, normalleştirilmiş yarmada çekme dayanım oranı ile lif

faktörü arasında benzersiz bir ilişki yoktur. Bu kullanılan malzemelerin agrega, çimento, çelik liflerin türü ve boyutu gibi çeşitli özelliklerinden ve ayrıca karıştırma test prosedürlerinden kaynaklanıyor olabilmektedir.

3.3. Elastisite Modülü

Elastisite modülü, bir malzemenin bir kuvvete maruz kaldığında göstereceği elastik deformasyonunun bir ölçüsüdür. Yük kaldırıldığında önceki şekline geri dönen şekil değiştirmelerine "elastik şekil değiştirme" adı verilmektedir [39]. Elastik şekil değiştirme çoğu yapı malzemesindeki gerilme ile orantılı ve doğrusaldır [40].

Mazaheripour vd. ile Altun ve Akbaş araştırmalarında beton içerisindeki çelik lif oranındaki artışın betonun elastisite modülü üzerinde belirgin bir değişime neden olmadığı ve değerlerin aynı seviyelere yakın kaldığını belirtmişlerdir [41].



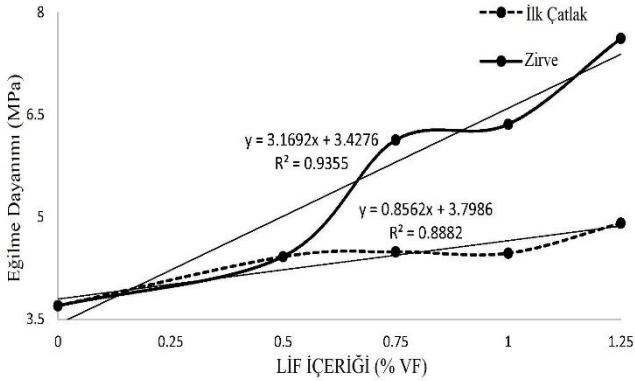
Şekil 6. Çelik Lif/ Standart Betonun Elastisite Modülü

Şekil 6'da çelik lif takviyeli betonların elastisite modülü ile ilgili kapsamlı çalışmalardan elde edilen bulgular dayalı olarak lif faktörünün değişimi göstermektedir. Ancak diğer mekanik özelliklere benzer şekilde olması bir genellemeye ulaşmayı zorlaştırmaktadır. Bazı araştırmacılar, çelik fiber takviyeli betonun standart betondan daha yüksek elastik sertliğe sahip olduğu kanısını varmaktadır [42]. Bazıları, çelik takviyeli ve standart betonların elastisite modülü arasında ihmal edilebilir bir fark olduğunu bildirmiştir [43, 44, 45]. Oysa tam tersi bulgular başka yazarlar tarafından gözlemlenmektedir [46]. Varyasyonun genel olarak yaklaşık $\pm\%20$ sınırları içinde olduğu ifade edilebilmektedir. Bu çelişkili bulgulardan net bir davranış bulunamayacağı anlaşılmaktadır.

3.4. Eğilme Dayanımı

Bir şekilde mesnetlenmiş olan, eksene dik ya da eksene dik bileşene sahip olan yük etkisi altında yapı elemanlarını eğilmeye maruz bırakan ve elemanın eğilmesine neden olan, elemanda gerilme ve şekil değiştirmelere neden olan kesit tesirlerine “eğilme momenti” denir [47, 48]. Eğilme momentinin değeri, mesnetler arasındaki açıklığa ve açıklığa etki eden yükün büyüklüğüne bağlıdır. Eğilme momentinin etkisi altında elemanlarda çekme ve basınç gerilmeleri oluşmaktadır [49].

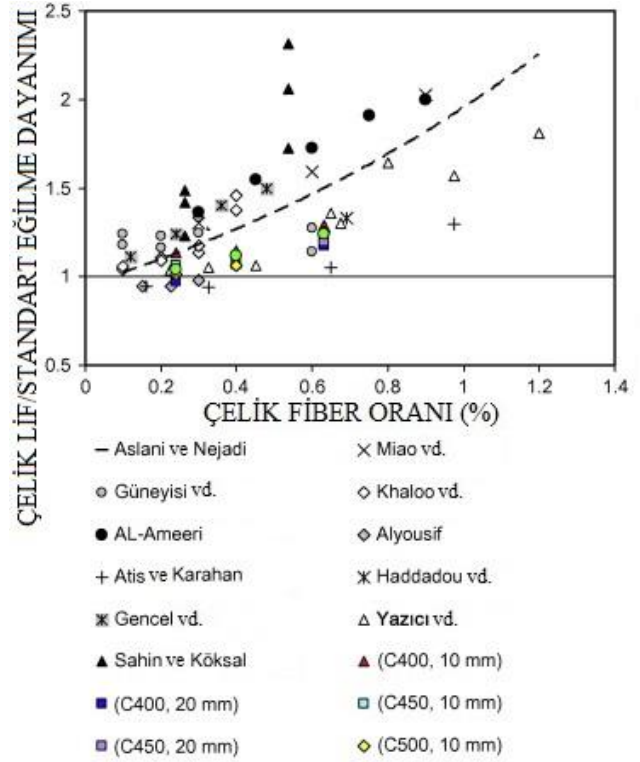
Altun ve Aktaş ile Iqbal vd. araştırmalarındaki veriler ışığında beton içerisindeki çelik lif oranındaki artış ile eğilme dayanımındaki artışın doğru orantılı olduğunu göstermektedir. İlk çatlak ve nihai yükteki eğilme mukavemeti için sonuçlar Şekil 7’de grafik olarak gösterilmektedir. Betonun içeriğine %1.25 oranında fiber lif takviye edildiğinde ilk çatlak yükü %32 artarken, maksimum yüklemde %110’ luk artış meydana gelmektedir. Çelik lifler çatlakları birbirine bağlamaya başlamaktadır. Eğilme dayanımı testlerinin ikinci önemli bulgusu, % 0,5 çelik lif içerikli beton karışımının, ilk çatlak yükü ve maksimum yükü birbirine eşit olacak şekilde şekil değiştirme davranışı sergilemesidir.



Şekil 7. Betonun eğilme mukavemetindeki değişim

Pajak ve Ponikiewski SFRSCC'nin eğilme özelliklerini araştırırken, çelik lif içeriğinin artmasıyla eğilme dayanımının arttığını gözlemlemişlerdir. Bu araştırmanın test sonuçları da diğer araştırmalarla uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak düz çelik lifli beton, %1.5 oranında çelik lif takviye edilmesiyle deformasyon yumuşama davranışı göstermiştir. Bu yumuşama davranışı betonun kırılma, kopma veya çatlak oluşumunda azalma olayını ifade etmektedir. Iqbal vd. araştırmasında betonda %0.75 çelik lif kullanımı ile pekleşme (deformasyon sertleşmesi) davranışı gözlemlenmiştir [50]. Mazaheripour vd. tarafından yürütülen test sonuçları ile polipropilen elyaf ilavesinin hafif SCC'nin özellikleri üzerindeki etkisini araştırarak, %0.3 polipropilen elyaf ilavesiyle eğilme mukavemetinde %10,7'ye varan bir artışa işaret edilmiştir

[51]. Ayrıca Ponikiewski ve Golaszewski SCC üzerine yaptıkları araştırmada çelik liflerin eğilme dayanımını %80'e kadar arttırdığını bildirmişlerdir [52].



Şekil 8. Çelik Lif/ Standart Betonun Çekme Dayanımı

Şekil 8’de betonların normalleştirilmiş eğilme dayanımına karşılık gelen lif faktörüne göre aralarındaki ilişki göstermektedir. Sonuçlar özellikle yüksek miktarda lif kullanılmaya başlandıkça saçılma gözlemlenmektedir. Ancak liflerin çatlaklara karşı köprü oluşturması etkisinden dolayı betonun eğilme davranışını iyileştirdiği görülmektedir.

4. Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonun Dayanıklılığı

4.1. Su Emme Kapasitesi

Su emme kapasitesi hesaplamalarında en çok daldırma ve kılcallık ile su emme testi kullanılmaktadır [53]. Betonun kılcal su emilimini belirlemek için prizmatik bir kalıba yerleştirilen beton numunesi kullanılmaktadır [54]. Yararlanılan çalışmalarda 90 gün olarak tanımlanan sertleşme süresine ulaşıldığında, numuneler kesici yardımıyla üç parça olacak şekilde kesilmiş ve ardından 70°C’lik etüvde 1 gün bekletilerek tamamen kurumaya sağlanmaktadır. Numuneler, yüzeye temas eden yüzey hariç yüzeylerinden su emilmesini önlemek amacıyla parafinle kaplanmakta ve kuru ağırlığı belirlenmektedir.

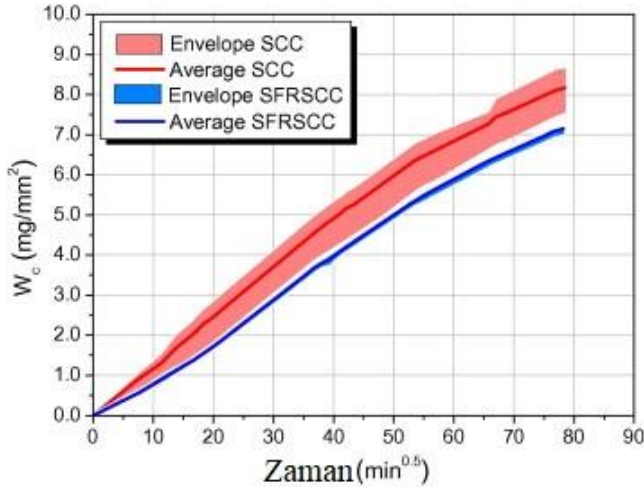
Bu deney yönteminde numunenin sadece bir yüzü suya maruz kaldığında, betonun ağırlığındaki artıştan su emme hızına ilişkin zamana bağlı veriler elde edilmektedir [55]. Çok küçük çaplı boşluklar içerisinde emilen su kılcallık etkisi ile yükselir [56]. Betonarme yapılarda bu istenmeyen durumu kontrol altına almak için beton üzerinde kılcal su emme testleri yapılmaktadır [57].

Kılcallık (Kapiler Olay) yöntemiyle emilen su (W_c), deklemler (1)'de numunenin su ile temas halinde olan alt yüzeyinin alanı, Ω_i ile kütle numunesinin artması arasındaki oran ile belirlenmektedir.

$$W_c = \frac{(M_i - M_0)}{\Omega_i} \quad (1)$$

Formüldeki M_i , farklı zamanlardaki okuma süreleri için su ile temas halinde olan numunenin kütlesidir. ($\sqrt{t_i}$) ve M_0 , numunenin 40 ± 5 °C'deki kuru kütlesidir.

Frazao vd. yaptığı araştırmada SCC' de emilen toplam su miktarı SFRSCC' dekinden daha fazladır. Su emme oranları Şekil 9'da grafiksel olarak verilmiştir. Bozulan maddelerin penetrasyonunu kolaylaştırmak için liflerin varlığının SFRSCC yüzeyinin kılcal gözenekliliğinde önemli bir değişikliğe neden olmadığı anlamına gelmektedir.



Şekil 9. SCC ve SFRSCC' nin kılcallığı ile su absorpsiyonu

4.2. Hava Geçirgenliği

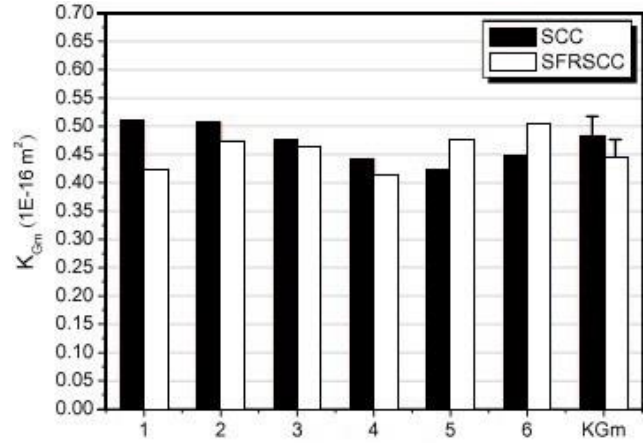
Betonun geçirgenliği, beton boşlukları ile çimento hamuru agregası arasındaki ara yüzeydeki küçük çatlakların bir fonksiyonudur [58]. Betonun dayanıklılığı için boşluk ve geçirimsizlikten arındırılmış olması önem taşımaktadır [59]. Betonun mukavemeti ve geçirgenliği birbirleriyle yakından ilişkili olaylardır [60]. Betonun geçirimsizliği; basınçlı su geçirimsizliği, kılcal yolla su emme ve hava geçirimsizliğinden oluşmaktadır [61]. Hava geçirgenliğinin belirlenmesi amacıyla hava geçirgenlik test

cihazı kullanılmaktadır [62]. Bu cihaz numunenin belirli süre zarfında ve belirli basınç altında numunelerden geçen sıvının sabit durum akışına maruz kalmasını sağlamaktadır. Denklem (3)'te gazlar için gereklilik katsayısı (KG), sıvının sıkıştırılabilirliği ve viskozitesini dikkate alan denkleme göre değiştirilmiş denklem 2'deki Darcy yasasına (Q) göre belirlenmektedir.

$$Q = \frac{kA}{\eta L} \Delta p, \quad \Delta p = P_1 - P_2 \quad (2)$$

$$K_G = \frac{2v \times \eta \times L \times P_2}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (3)$$

Buradaki Q debi, k geçirgenlik katsayısı, A gazın geçtiği beton kesiti, L gazın geçtiği beton kesitinin kalınlığı, v gaz akışı, η gazın dinamik viskozitesi ($2.02 \times 10^{-16} \text{Ns/m}^2$), P_1 mutlak basınçlı gaz girişi ve P_2 mutlak basınçlı gaz çıkışıdır.



Şekil 10. Numuneler için hava geçirgenlik katsayıları

Frazao vd. araştırmalarında numunelerin geçirgenlik katsayısı ortalaması SCC için $0.483 \times 10^{-16} \text{m}^2$ ve SFRSCC için $0.443 \times 10^{-16} \text{m}^2$ bulunmaktadır. Ölçümdeki verilerden yola çıkarak Şekil 10'da grafiğe aktarılmıştır. Bu testlerde hataların yüksek olmasından dolayı yüzde %8.3'lük farklılık normal karşılanmaktadır. Bileşimin uygun şekilde optimize edilmesi şartıyla, SCC'ye liflerin eklenmesinin bu tip betonun hava geçirgenliğini etkilemediği kabul edilmektedir [63].

4.3. Elektrik Direnci

Elektrik özdirenci, Proceq beton elektriksel özdirenç ölçer kullanılarak suya doymuş numunelerde ölçülmektedir [64]. Araştırmalara göre özdirenç ölçerde akımı iletmek amacıyla iki uç elektrot kullanılmaktadır [65]. Bu sayede iki elektrot arasındaki voltaj ölçülmektedir. Elektrik özdirenci (ρ) denklem (4)'te göre hesaplanmaktadır.

$$\rho = 2 \times \pi \times a \times \frac{V}{l} \quad (4)$$

Formülde V ölçülen potansiyel fark, I uygulanan akım, a iki iç elektrot arasındaki mesafe olarak gösterilmektedir. El-Dieb ile Frazao vd. yaptıkları çalışmalarda çelik lifler betonun toplam yük geçişini ve elektriksel iletkenliğini arttırdığını tespit etmişlerdir. Bu artış çelik liflerin hacim oranına bağlıdır. Araştırmalarda test edilen numunelerin ortalama elektrik özdirenci karşılaştırıldığında beton içerisine eklenen çelik liflerin elektrik direncini %70'e kadar azaldığı tespit edilmektedir [66]. SFRSCC yüksek iletkenliği özdirenç ölçümünü etkileyen çelik liflerin tipi ve miktarı dikkate alınmalıdır [67].

4.4. Çelik Liflerin Korozyonu

Korozyon, betonarme yapıların dayanıklılığı üzerinde zararlı bir etkiye sahiptir [68]. Korozyonun başlıca nedenleri klorür penetrasyonu ve karbonatlaşma nedeniyle beton matrisinin pH'nın düşmesidir. Aynı zamanda çatlakları köprüleyen lifleri etkiler ve SFRC yapılarının performansı açısından zararlı sonuçlar doğurmaktadır [69]. Olumsuz ortamlara maruz kalan beton yüzeylerde korozyon lekeleri oluşmaktadır. Saojeng ve Weiting, klorür geçirgenliği ve korozyon davranışını değerlendirmek için SFRC numunelerinde hızlandırılmış bir korozyon testi gerçekleştirmiştir. Korozyon hücresi, donatı çubuğu çalışma elektrodu, doymuş kalomel elektrodu referans elektrodu ve titanyum ağ karşı elektrot görevi görece şekilde bağlanmıştır. 0.5 mA/cm² lik akım uygulandığında lineer polarizasyon direnci ölçülmüştür [70]. Bu test sırasında çelik lif içeriğinin artmasıyla hem OCP (30 saat süren açık devre potansiyeli)'nin hem de polarizasyon direncinin ilkinde hafif, ikincisinde ise önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir [71].

Saojeng ve Weiting ile Frazao vd. araştırmada SFRSCC numunelerinde korozyona bağlı olarak lif kesitindeki azalma ve aşınmış lif etrafındaki mikro kaybın lif bağlarındaki bozulmadan daha güçlü bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir [47]. Gerçekleştirilen bu testler ile, çelik liflerin korozyonunun, betondaki mikro çatlakların oluşumuna ve ardından mikro-dökülmeye neden olabileceğini ve bunun matris direnci açısından zararlı bir etki yarattığını belirtmişlerdir [72].

4.5. Klorür Penetrasyonuna Direnci

Klorür penetrasyonuna direnci hesaplanırken en çok doğal daldırma yöntemi kullanılmaktadır [73]. Bu yöntem numunenin %15 sodyum klorür içeren doymuş bir kalsiyum hidroksit çözeltisine daldırıldıktan sonra numunelerdeki klorür penetrasyon oranının ölçülmesi

tespit edilmektedir [74]. Sertleşmiş betonda klorür penetrasyonu ile ilgili parametrelerin belirlenmesine dayanmaktadır. Bu test genellikle 90 gün daldırma yapıldığı için uzun sürmektedir [75].

Denklem (5)'te Fick'in 2. yasası fonksiyonu çözümüne eğri uydurma yoluyla difüzyon katsayısı (Dd) ve yüzey klorür içeriği (Cs) değerlerini vermektedir.

$$C_x = C_s - (C_s - C_0) \operatorname{erf}\left(\frac{1}{\sqrt{D_{at}}}\right) \quad (5)$$

Formüldeki C_x , x derinliğinde t daldırma süresi için ölçülen klorür içeriği, C_s , t daldırma süresinden sonra beton yüzeyinde hesaplanan klorür içeriği ve C_0 betondaki ilk klorür içeriği ve erf hatadır. Değerler çelik liflerin bulunması, bu sayede klorür iyonlarının lifler üzerine yerleşmesine neden olmaktadır. İyonların matrise nüfuz etmesini geciktirmesine ve hatta engellemesine neden olduğu için SCC'de klorür penetrasyonuna karşı direncin SFRSCC' den daha yüksek olduğuna dair kanıt sunmaktadır [76].

4.6. Karbonatlaşma

SCC ve SFRSCC kirişlerindeki potansiyel karbonatlaşma direncinin değerlendirilmesi, hızlandırılmış bir karbonatlaşma testi kullanılarak gerçekleştirilmektedir [77]. Karbonatlaşma testi fenolftalein çözeltisi kullanılarak, farklı maruziyet yaşlarında betonun bölünmüş yüzeyine gösterge püskürtülerek gerçekleştirilmektedir [78]. Fenolftalenin, açık sarı renge ve formülü $C_{20}H_{14}O_4$ olan bir organik bileşiktir. Bu bileşik suda çözünmemekte olup, genellikle asit-baz indikatörü olarak kullanılmaktadır [79]. Fenolftalein indikatör çözeltisi, betonun kırılma yüzeyine uygulanmaktadır. Gösterge mora dönerse, pH 8,6'nın üzerindedir. Çözeltinin renksiz kaldığı durumlarda betonun pH'ı 8,6'nın altındadır [80]. Tamamen karbonatlı bir betonun pH'ı yaklaşık 8.4 bulunmaktadır. Bundan dolayı çözelti, karbonatsız betonda pembe bir renk haline gelmektedir. Genellikle karbonatlaşma direnci, R_{c65} portekiz standardına göre denklem (6)'da verilmektedir.

$$R_{c65} = \frac{2 \times C_{acel} \times t_1}{X_1^2} \quad (6)$$

Formüldeki C_{acel} , karbonatlaşma sürecini hızlandıran CO_2 konsantrasyonudur. Bu oran genellikle $90 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ olarak alınmaktadır. T_1 numunede karbonatlaşma derinliği X_1 değerine ulaşmak için gerekli süredir.

Papadakis ile diğlerinin yaptığı çalışmada SCC 'nin elde edilen karbonatlaşma direnci $1774.62 \text{ kg yıl/m}^5$),

SFRSCC' de 1695.67 kg yıl/m⁵ olarak bulunmuştur. Sonuçlar SCC' nin karbonatlaşma direnci %4,67 daha yüksek olduğunu göstermektedir. SCC ve SFRSCC için, betonun azaltılmış geçirgenliği nedeniyle CO₂ 'ye maruz kalma süresi boyunca karbonatlaşma derinliğinde düşük bir artış bulunmaktadır. SCC karışımlarında yüzeye yakın beton, karbonatlaşmaya karşı daha yüksek dirence neden olan geleneksel vibrasyonlu betona göre daha yoğun ve daha dirençlidir [81].

5. Sonuçlar

İyi işlenebilirlik/kendiliğinden sıkışma ile birlikte betonun iyi çekme dayanımı istendiğinde kısa çelik lifleri kullanılmalıdır. SFRSCC ' nin işlenebilirliği, yüksek çelik lif ilavesi ile güçleşmektedir.

Yukarıda referans alınan çalışmalarda betona kısa çelik lifler eklemek, betonun çekme ve eğilme mukavemetini büyük ölçüde iyileştirdiği görülmektedir. Aynı zamanda, bu özellikleri daha da iyileştirmek için farklı uzunluk ve oranlarda çelik mikro liflerin kullanımına yönelik daha fazla araştırma ihtiyacını da teşvik etmektedir. Çelik lifler, betonarme elemanları güçlendirmek için kullanılmakta ve çelik lifli kendiliğinden yerleşen betonun mekanik özelliklerinde değişme olup olmadığını görmek için test edilebilmektedir. Yapılan çalışmalardan elde edilen bir diğer önemli sonuç; Çelik lif ilavesinin SFRSCC' nin elastisite modülü ve basınç mukavemeti üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı değerlendirilebilir.

Betona çelik liflerin eklenmesi kılcallık yoluyla su absorpsiyonunu önemli ölçüde değiştirmedikinden dolayı kılcallık gözenek boyutunun önemli ölçüde değişmediği sonucuna varılmaktadır.

SFRSCC yapısındaki çelik liflerden kaynaklı hava geçirgenliği önemli ölçüde değişme görülmezken, elektrik direncinde ise ortalama 70% oranında azalma tespit edilmiştir.

SFRSCC yapısındaki çelik liflerde artan korozyon belirtileri görülmekte ve beton içerisine giren klorür iyonu çelik liflerde etrafındaki koruyucu tabakanın yok olmasına sebep olmaktadır. Korozyon olayında çelik lif kesit alanında bir miktar küçülmeye yol açabilmektedir. Aşırı yüklenme durumunda, çelik liflerin korozyonu betonda çatlamaya neden olmaktadır. Bu da SFRSCC için çekme dayanımının azalmasına neden olmaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması belirtilmemiştir.

Etik Standartlar Beyanı

Yazarlar bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

Kaynaklar

- [1] Okamura H., Ouchi M., 2003. Self-Compacting Concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, 1(1), 5-15.
- [2] Persson B., 1999. Tunnel through water-distributing sediments without injection in advance. Bygg & Teknik, 28-29.
- [3] Louis Granju J., Balouch S., 2005. Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks. Cement and Concrete Research, 35(3), 572-577.
- [4] Wang K., Jansen D., Shah S., Karr A., 1997. Permeability Study of Cracked Concrete. Cement and Concrete Research, 27(3), 381-393.
- [5] Anomin., 1994. Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton. Ankara: T.C Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı.
- [6] Iqbal S., Ali A., Holschemacher K., Bier T., 2015. Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC). Construction and Building Materials, 98, 325-333.
- [7] Bentur A., Mindess S., 1990. Fibre Reinforced. London: Modern Concrete Technology Series.
- [8] Abu-Lebdeh T., Fini E., Lumpkin M., 2012. Flexural and Tensile Characteristics of Micro Fiber-Reinforced Very High Strength Concrete Thin Panels. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 5(2), 184-197.
- [9] Neville A., 2011. Properties of Concrete. Harlow: The Royal Academy of Engineering.
- [10] Öztekin E., 2019. Karma Çelik Lif İçeren Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kesme Davranışının İncelenmesi. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 40.
- [11] Pajak M., Ponikiewski T., 2013. Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers. Construction and Building Materials, 47(10), 397-408.
- [12] Mazaheripour H., Ghanbarpour S., Mirmoradi S., Hosseinpour I., 2011. The effect of polypropylene

- fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 25(1), 351-358.
- [13] Ponikiewski T., Golaszewski J., 2013. Properties of steel fiber reinforced self-compacting concrete for optimal rheological and mechanical properties in precast beams. *Concrete and Concrete Structures Conference*, 65, 290-295.
- [14] Frazao C., Camões A., Barros J., Gonçalves D., (2015). Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 155-166.
- [15] Chao S., Lin W., 2013. Effects of silica fume and steel fiber on chloride ion penetration and corrosion behavior of cement-based composites. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* , 28, 279-284.
- [16] Papadakis V., 2000. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance. *Cement and Concrete Research* , 30(2), 291-299.
- [17] Khaloo A., Raisi E., Hosseini P., Tahsiri H., 2014. Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials*, 51, 179-186.
- [18] Altun F., Aktaş B., 2013. Investigation of reinforced concrete beams behavior of steel fiber added lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 38, 575-581.
- [19] Birincioglu M., Ulusoy S., Arslan G., 2015. Influence of steel fibers on the shear strength of RC beams without stirrups. *International Conference on Civil and Environmental Engineering ICOCEE-Cappadocia*. Nevşehir, Türkiye, 20 May: 185-192.
- [20] Naik T., Kumar R., Ramme B., Canpolat F., 2012. Development of high-strength, economical self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 463-469.
- [21] Yan W., Cui W., Qi L., 2020. Effect of aggregate gradation and mortar rheology on static segregation of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 119816.
- [22] Lu H., Sun X., Ma H., 2022. Anti-washout Concrete: An overview. *Construction and Building Materials*, 128151.
- [23] Guler S., Akbulut Z., Siad H., Lachemi, M., 2021. Effect of macro polypropylene, polyamide and steel fibers on the residual properties of SCC at ambient and elevated temperatures. *Construction and Building Materials*.
- [24] Ferdosian I., Camões A., 2021. Mechanical performance and post-cracking behavior of self-compacting steel-fiber reinforced eco-efficient ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*.
- [25] Idir R., Cyr M., Pavoine A., 2020. Investigations on the durability of alkali-activated recycled glass. *Construction and Building Materials*.
- [26] Alsaif A., Koutas L., Bernal S., Guadagnini M., Pilakoutas K., 2018. Mechanical performance of steel fibre reinforced rubberised concrete for flexible concrete pavements. *Construction and Building Materials*, 533-543.
- [27] Ahmad H., Hashim M., Bakar A., Rahman F., 2019. Flexural performance of full and partially steel fibre reinforced self-compacting concrete (SCFRC) ribbed slab. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- [28] Ahmad J., Lezcano R., Majdi A., El-Shorbagy M., Kahla N., Deifalla A., 2022. Glass Fibers Reinforced Concrete: Overview on Mechanical, Durability and Microstructure Analysis. *Materials*, 1-15.
- [29] Chen M., Si H., Fan X., Xuan Y., Zhang M., 2022. Dynamic compressive behaviour of recycled tyre steel fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*.
- [30] Li D., Jin L., Fu J., Lu A., 2016. Size effect tests of normal-strength and high-strength RC columns subjected to axial compressive loading. *Engineering Structures*.
- [31] Gao J., Sha A., Wang Z., Hu L., Yun D., Liu Z., Huang, Y., 2018. Characterization of carbon fiber distribution in cement-based composites by Computed Tomography. *Construction and Building Materials*, 134-147.
- [32] Wang D., Ju Y., Shen H., Xu L., 2019. Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber. *Construction and Building Materials*, 464-473.
- [33] Safiuddin M., Amrul Kaish A., Woo C.O., Raman S., 2018. Early-Age Cracking in Concrete: Causes, Consequences, Remedial Measures, and Recommendations. *Applied Sciences*, 8-10.
- [34] Sapieta M., Dekýš V., Štalmach O., Sapietová A., Svoboda M., 2021. Detection of Elastic Deformation in Metal Materials in Infrared Spectral Range. *Materials*.
- [35] Du C., Liu T., Zou D., Teng J., 2015. Time dependent strain development of early age concrete under step-by-step load history. *Construction and Building*

Materials.

- [36] Shi X., Park P., Rew Y., Huang K., Sim C., 2020. Constitutive behaviors of steel fiber reinforced concrete under uniaxial compression and tension. *Construction and Building Materials*.
- [37] Gordo J., Guedes Soares C., 2014. Experimental analysis of the effect of frame spacing variation on the ultimate bending moment of box girders. *Marine Structures*, 111-134.
- [38] Wang Y., Wang W., Wang D., Liu Y., Liu J., 2021. Study on the influence of sample size and test conditions on the capillary water absorption coefficient of porous building materials. *Journal of Building Engineering*.
- [39] Van Belleghem B., Montoya R., Dewanckele J., Van den Steen N., De Graeve I., Deconinck J., De Belie N., 2016. Capillary water absorption in cracked and uncracked mortar – A comparison between experimental study and finite element analysis. *Construction and Building Materials*, 154-162.
- [40] Zhang P., Wittmann F., Vogel M., Müller H., Zhao T., 2017. Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete. *Cement and Concrete Research*, 60-67.
- [41] Çelik M., Kaçmaz A., 2016. The investigation of static and dynamic capillary by water absorption in porous building stones under normal and salty water conditions. *Environmental Earth Sciences*.
- [42] Liu B., Jiang J., Shen S., Zhou F., Shi J., He Z., 2020. Effects of curing methods of concrete after steam curing on mechanical strength and permeability. *Construction and Building Materials*.
- [43] Liu R., Xiao H., Liu J., Guo S., Pei Y., 2019. Improving the microstructure of ITZ and reducing the permeability of concrete with various water/cement ratios using nano-silica. *Journal of Materials Science*, 444-456.
- [44] Aslam F., Zaid O., Althoey F., Alyami S., Qaidi S., Prado Gil J., García R., 2022. Evaluating the influence of fly ash and waste glass on the characteristics of coconut fibers reinforced concrete. *Structural Concrete*.
- [45] Gong F., Maekawa K., 2019. Proposal of poromechanical coupling among ASR, corrosion and frost action for damage assessment of structural concrete with water. *Engineering Structures*, 418-429.
- [46] Oliveira L., Nepomuceno M., Gomes J., Vila M., 2014. Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 113-120.
- [47] Yang K., Basheer P., Bai Y., Magee B., Long A., (2014). Development of a new in situ test method to measure the air permeability of high performance concretes. *NDT & E International*, 30-40.
- [48] Ghosh P., Tran Q., 2014. Correlation Between Bulk and Surface Resistivity of Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 119-132.
- [49] Robles K., Jae Yee J., Hoon Kee S., 2022. Electrical Resistivity Measurements for Nondestructive Evaluation of Chloride-Induced Deterioration of Reinforced Concrete—A Review. *Materials*.
- [50] Belli A., Mobili A., Bellezze T., Tittarelli F., 2020. Commercial and recycled carbon/steel fibers for fiber-reinforced cement mortars with high electrical conductivity. *Cement and Concrete Composites*.
- [51] Ganta J., Seshagiri Rao M., Mousavi S., Srinivasa Reddy V., Bhojaraju C., 2020. Hybrid steel/glass fiber-reinforced self-consolidating concrete considering packing factor: Mechanical and durability characteristics. *Structures*, 956-972.
- [52] Melchers R., 2019. Modelling durability of reinforced concrete structures. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 171-181.
- [53] Wang X., Fan F., Lai J., Xie Y., 2021. Steel fiber reinforced concrete: A review of its material properties and usage in tunnel lining. *Structures*.
- [54] Chen Z., Koleva D., 2017. Effect of Stray Current on Corrosion Behavior of Reinforcing Steel: Importance of Cell Geometry and Orientation with Respect to the Electrical Field. *International Journal of Structural and Civil Engineering*.
- [55] Beglarigale A., Yazıcı H., 2015. Pull-out behavior of steel fiber embedded in flowable RPC and ordinary mortar. *Construction and Building Materials*.
- [56] Jajcinovic M., Fischer W., Mautner A., Bauer W., Hirn U., 2018. Influence of relative humidity on the strength of hardwood and softwood pulp fibres and fibre to fibre joints. *Cellulose*.
- [57] Alsaif A., Bernal S., Guadagnini M., Pilakoutas, K., 2018. Durability of steel fibre reinforced rubberised concrete exposed to chlorides. *Construction and Building Materials*.
- [58] Wang Y., Ueda T., Gong F., Zhang D., 2019. Meso-scale mechanical deterioration of mortar due to sodium chloride attack. *Cement and Concrete Composites*.

- [59] Samimi K., Bernard S., Maghsoudi A., Maghsoudi M., Siad H., 2017. Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*.
- [60] Yehia S., Douba A., Abdullahi O., Farrag S., 2016. Mechanical and durability evaluation of fiber-reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*.
- [61] Grünewald S., Walraven J., 2020. Properties of fibre reinforced SCC. *Self-Compacting Concrete: Materials, Properties and Applications*.
- [62] Ameer A., Rafiq M., Tsioulou O., 2021. Combined impact of carbonation and crack width on the Chloride Penetration and Corrosion Resistance of Concrete Structures. *Cement and Concrete Composites*.
- [63] Otieno M., Ikotun J., Ballim Y., 2020. Experimental investigations on the effect of concrete quality, exposure conditions and duration of initial moist curing on carbonation rate in concretes exposed to urban, inland environment. *Construction and Building Materials*.
- [64] Paul S., Panda B., Huang Y., Garg A., Peng X., 2018. An empirical model design for evaluation and estimation of carbonation depth in concrete. *Measurement*.
- [65] AL-Ameer A., 2013. The effect of steel fiber on some mechanical properties of self compacting concrete. *Am. J. Civ. Eng.*, 102-110.
- [66] Aslani F., Nejadi S., 2013. Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress-strain curve, and energy dissipated under compression. *Compos. B*, 121-133.
- [67] Atis C., O K., 2009. Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete. *Constr. Build. Mater.*, 392-399.
- [68] Gencil O., Brostow W., Datashvili T., Thedford M., 2011. Workability and mechanical performance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete with fly ash. *Compos. Interfaces*, 169-184.
- [69] Neves R., Almeida J., 2005. Compressive behaviour of steel fibre reinforced concrete. *Struct. Concr.*, 1-8.
- [70] El-Dieb A., Taha M., 2012. Flow characteristics and acceptance criteria of fiber-reinforced self-compacted concrete (FR-SCC). *Constr. Build. Mater.*, 585-596.
- [71] Sahmaran M., Yurtseven A., Yaman I., 2015. Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete. *Build. Environ.*, 1672-1677.
- [72] Thomas J., Ramaswamy A., 2007. Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete. *J. Mater. Civ. Eng. ASCE*, 385-392.
- [73] Musmar M., 2013. Tensile strength of steel fiber reinforced concrete. *Contemp. Eng. Sci.*, 225-237.
- [74] Sahin Y., Köksal F., 2009. The influences of matrix and steel fibre tensile strengths on the fracture energy of high-strength concrete. *Constr. Build. Mater.*, 1801-1806.
- [75] Carmona S., Aguado A., Molins C., 2013. Characterization of the properties of steel fiber reinforced concrete by means of the generalized Barcelona test. *Constr. Build. Mater.*, 592-600.
- [76] Güneysi E., Gesoglu M., Akoi A., Mermerdas K., 2014. Combined effect of steel fiber and metakaolin incorporation on mechanical properties of concrete. *Composites Part B*, 83-91.
- [77] Miao B., Chern J., Yang C., 2003. Influences of fiber content on properties of self-compacting steel fiber reinforced concrete. *J. Chin. Inst. Eng.*, 523-530.
- [78] Alyousif A., 2010. Design and Testing of Fiber Reinforced Self Compacting Concrete. M.Sc. Thesis. Eastern Mediterranean University.
- [79] Yazıcı S., Inan G., Tabak V., 2007. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Constr. Build. Mater.*, 1250-1253.
- [80] Boulekbache B., Hamrat M., Chemrouk M., Amziane S., 2010. Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material. *Constr. Build. Mater.*
- [81] Haddadou N., Chaid R., Ghernouti Y., Adjou N., 2014. The effect of hybrid steel fiber on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete. *J. Build. Mater. Struct.*, 65-76.