

ÇİMENTO ESASLI İNCE KOMPOZİTLER*

Bekir Yılmaz Pekmezci¹

Özet

İnce çimentolu kompozitler, genellikle 2 cm'den daha ince toplam kalınlığa sahip çimento bağlayıcı kullanılarak imal edilen, matris içine kırılmış veya çeşitli formdaki sürekli liflerin donatı olarak eklenmesiyle üretilen kompozit malzemelerdir. İnce çimento esaslı kompozitlerin kullanım alanı, yapısal olmayan ve yapısal olan olarak ikiye ayrılabilir. Yapısal olmayan kompozitler genellikle panel olarak üretilirler ve yapıların bölme duvarları ve dış cephe kaplamalarında kullanılırlar. Yapısal olarak kullanılan kompozitler ise şantiyede, güçlendirme elemanı olarak teşkil edilirler. Bu çalışmada yapısal ve yapısal olmayan çimentolu kompozitler ile ilgili detaylı bir literatür çalışması sunulmuştur. Bunun yanında, yapısal amaçla kullanılan dokunmuş karbon kumaş donatılı çimentolu kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Deneysel çalışmada iki farklı karbon kumaş ve iki farklı basınç dayanımına sahip çimentolu matris, kompozit üretiminde kullanılmıştır.

Thin Cement-Based Composites

Thin cementitious composites are composite materials manufactured using a cement binder with a total thickness of less than 2 cm, which is produced by adding chopped or continuous fibers of various forms as reinforcement into the matrix. The usage area of thin cement-based composites can be divided into two as non-structural and structural. Non-structural composites are usually produced as panels and are used in partition walls and exterior cladding of buildings. Structural composites, on the other hand, are formed at the construction site as reinforcement elements. In this study, a detailed literature review on structural and non-structural cementitious composites is presented. In addition, the results obtained from an experimental study on the mechanical properties of cementitious composites with woven carbon fabric reinforcement used for structural purposes are presented. In the experimental study, two different carbon fabrics and cementitious matrices with two different compressive strengths were used in the production of composites.

olarak adlandırılacak olan tekstil donatılı kompozitler ise yapısal olmayan dış cephe kaplamaları, sandviç dış cephe kaplamaları [1,2] olarak kullanılırken bununla birlikte yapısal uygulamalarda da kendine yer edinmiş ve güçlendirme sistemleri olarak kullanılmaya başlanmıştır [3]. Her iki kullanım

1. GİRİŞ

Yapıda kullanılan kompozit panel malzemeler çeşitli formdaki liflerin genellikle çimento ve diğer bağlayıcılar ile elde edilen matrisler içine gömülmesiyle elde edilmektedir. Son yıllarda kompozit panel malzemelerin yapılar da kullanımı, yapının diğer bileşenleri ile kolay uyum sağlaması, uygulama kolaylığı, stoklanabilirliği, kolay erişilebilirliği gibi nedenlerle giderek artmaktadır. Kompozit panel malzemelere olan ilginin artmasında, şantiyede yapılan kuru imalat sayesinde şantiye işçilik oranlarının ve buna bağlı olarak da sahada meydana gelebilecek kaza gibi istenmeyen durumların olasılıklarının azalması da etkili olmaktadır. Kompozit panel malzemelerin yapıdaki kullanım alanları genellikle kaplama ve tamamlayıcı ürün olmaktadır. Yeni nesil kompozit malzeme

1) İTÜ, TICEMLABS, İstanbul, Türkiye, bekirp@ticemgroup.com

(*) Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen BETON 2023 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

alanında kompozitlerin davranışları deneysel olarak belirlenmiş, çeşitli hesap yöntemleri geliştirilmiş ve kompozitlerin mühendislik tasarımlarında kendine yer bulması sağlanmış- tır [3,4]. Kompozit panel malzemelerin dayanım, tokluk ve dürabilite bakımından yüksek performanslara erişmesi ile birlikte bu malzemelerin kullanımı önemli ölçüde artmıştır. Kompozit malzemeler, kendi başına bazı özellikleri zayıf olan bir malzemeyi başka bir malzeme ile birlikte kullanarak zayıf özelliklerini ortadan kaldırmak suretiyle daha güçlü bir yapı oluşturmak amacıyla üretilir. Örneğin beton, basınç dayanımı oldukça yüksek bir malzeme olmasına karşın çekme dayanımı ve buna bağlı olarak eğilme dayanımı basınç dayanımına oranla oldukça düşük bir malzemedir. Bununla birlikte, betonun çekme hâlindeki deformasyon kapasitesi de oldukça düşük mertebededir. Betonun çeşitli mekanik etkiler altında yüksek oranda şekil değiştirebilmesi ve mekanik enerjiyi sö- nümlemesi için, beton içinde farklı formdaki lif donatılar kul- lanılmaktadır. Lif donatıların çeşitli formlarının donatı olarak kullanıldığı betonlar, çekme ve eğilme kapasitesi yüksek mal- zemeler hâline gelirler [5]. Farklı formdaki lif kullanımıyla bir- likte değişen özelliklere sahip matrislerin kullanımı da farklı ihtiyaçlara yönelik ve büyük bir alanda dağılan özelliklere sahip kompozit panel üretimlerini mümkün hâle getirmiştir [6,7]. Kompozit malzemelerde kullanılan lif donatılar, kırpıl- mış kısa lifler, sürekli lifler ve dokunmuş tekstil formundaki lifler olabilir [8].

Çimento esaslı kompozitlerde, lifler donatı olarak kullanıl- dığında, daha yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip kom- pozitler elde edilebilmektedir. Böylece, kompozit daha ince kesitlerde üretilebilmektedir. Kompozitin dürabilitesinin yük- sek olması ise, uzun yıllar boyunca kendi mekanik ve fiziksel özelliklerini koruyabilmenin yanında, uygulandıkları yapının da özelliklerini korumasına yardımcı olmaktadır. Bu kom- pozitler kendilerinin dış ortam koşullarına gösterdikleri direnç sayesinde yapıların dış ortam koşullarına karşı daha uzun yıllar dayanmasına yardımcı olmaktadır. Lif donatılı kom- pozitlerin performansı birçok parametreye bağlıdır. Bunlar, liflerin geometrisi, boyu ve narinliği ile birlikte liflerin karı- şımdaki kullanım oranı olarak sıralanabilir [9]. Lif boyunun betonun mekanik ve dürabilite özellikleri üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu daha önceki çalışmalarda ortaya koyul- muştur. Uzun liflerin oluşan çatlakların üzerine gelme olasılığı daha düşük olacağından, çatlakların ilerlemelerini kolaylıkla engelleyemezler. Kısa lifler ise daha yüksek olasılıkla liflerin üzerine denk geleceklerinden çatlakları daha fazla köprüle- yerek, kompozitin direncini arttırmaktadırlar [10]. Kısa lifler

kullanıldığında kompozit içinde aynı miktarda lif kullanımı durumunda bir çatlağı köprüleyen lif miktarının artması, bu davranış üzerindeki önemli bir etken olarak vurgulanabilir. Lif donatılı kompozitlerde eğer kırpılmış lif kullanılıyorsa, lif oranının artmasına bağlı olarak taze hâldeki kompozitin karıştırılmasında ve kalıba yerleştirilmesinde zorluklar yaşa- nabilir. Bu zorlukların en önemlisi matris içerisinde fiberle- rin topaklanmasıdır. Topaklanan bu fiberler, kompozit içinde kusur etkisi oluşturur. Liflerin topaklanmaması için alınması gereken önlemler arasında, matris karışımında ince agre- ga kullanılması, narinlik oranının belirli bir değerin üzerine çıkmaması, fiberlerin karışım kuru iken karışıma katılması, karışımda süper akışkanlaştırıcı kullanılması sayılabilir [11]. Gevrek matrislerle birlikte lif olarak genellikle, cam, bazalt, karbon, aramid ve PBO gibi lifler kompozit üretiminde kulla- nılmakla birlikte [12-19], bazı üretim yöntemleri ahşap yon- galı veya selülozik lif donatılı kompozitlerin üretimi için daha uygundur. Ahşap yongalı paneller, ahşap yongaların çimento esaslı matris ile birbirine bağlanması sonucunda elde edil- mektedirler. Bu panellerin en önemli avantajı, üretim hattının hızlı ve yüksek metrajlarda üretime izin vermesidir. Bu saye- de oldukça kolay temin edilebilmektedir. Ahşap, yüz yılı aş- kın bir süredir çimento esaslı malzemelerde kullanılmaktadır. Yaklaşık 90 yıldır endüstriyel olarak bu kullanım devam et- mektedir. Ahşabın çimentolu matrislerde kullanımı son 40 yıl içinde önemli ölçüde hızlanmıştır. Son 40 yıl içinde, üretimde büyük kolaylıklar sağlayan asbest liflerin kanserojen olduğu- nun ispatlanmasından sonra ahşap lifli çimentolu matrislere olan ilgi artmıştır. Üreticiler de asbest lif donatılı çimentolu panel üretim tesislerinin bir kısmını ahşap yongalı çimento- lu panel üretim tesislerine dönüştürmüştür [20]. Bu panel- ler çok kısa sürede inşaat sektöründe büyük ilgi görmüş ve birçok ülkede uygulanmıştır [21]. Daha sağlık riskleri ortaya çıkmamışken asbest liflere alternatif olarak selülozik lifler çimento esaslı kompozitlerin içerisinde 2. Dünya savaşı sonrası kullanılmaya başlamıştır. 1970'li yıllarda sağlık risklerinin or- taya koyulmasıyla asbest liflerin kullanımı oldukça azalmaya başlamıştır. Bunun sonucunda selülozik liflerin çimento esas- lı kompozitler içinde kullanımı artmış, asbest liflerin kullanımı azalmıştır. Bazı firmalar asbest lif kullanımından, selülozik lif kullanımına geçmiştir, çimentolu kompozit panellerini selülo- zik lif kullanarak üretmeye devam etmiştir [22].

Lif takviyeli betonlardaki optimizasyon ihtiyaçları, liflerin kom- pozit içinde dokunmuş veya dokunmamış kumaş formunda kullanılmasını da gündeme getirmiş ve tekstil donatılı betonla- rın geliştirilmesine araştırmacılar tarafından başlanmıştır. Bu

esnada üreticiler de değişen amaçlar için yapıda tekstil donatılı betonların üretimine başlamışlardır. Kesilmiş kısa fiberler, beton içerisine katıldığında düzensiz bir şekilde rastgele dağılmaktadır. Burada, fiberlerin yönleri de rastgele olmakta ve ihtiyaç duyulan doğrultuda aktif olarak çalışan fiber oranı kısıtlı kalmaktadır. Kumaş donatılı kompozitlerde ise kumaş içindeki fiberler, istenen doğrultuda yönlendirilebilmektedir. Böylece fiberler kuvvet doğrultusunda kullanılabilir [23]. Ancak, bu kompozitlerde de kompozit performansını düşüren önemli etkiler vardır. Tekstil donatılı kompozitlerde matrisin, tekstil içine nüfuz edememesi kompozit performansını düşüren önemli bir parametre olarak gösterilmektedir. Kumaş donatılı çimento esaslı kompozitlerde, çimentolu matrisin kumaş bünyesinde bulunan fiberlerin arasından geçmesi ve kumaşın tamamının çevresini sarması, kompozitin mekanik özelliklerini arttırmaktadır [24]. Çimento esaslı matrisin fiberler arası boşluklardan geçerek kumaşın tamamına nüfuz etmesi, çimentolu matris ile kumaş arasındaki aderansı artırır. Aderanstaki artış da eğilme dayanımı gibi mekanik performansın artışına yardımcı olur. [25]. Tam tersi durumda, yani matrisin filamentlerin arasından yeterince nüfuz etmemesi durumunda, filamentlerin güçlendirme performansı azalır, buna bağlı olarak kompozitin performansı düşer [26]. Bu durumun üstesinden gelebilmek için penetrasyon oranı yüksek matrisler geliştirilmekte, bununla birlikte matrisin penetrasyonunu kolaylaştıran tekstil yapıları üzerinde de çalışılmaktadır.

Yukarıda özetlenen kompozit panel malzemeler çeşitli yöntemlerle üretilmektedirler. Üreticiler, bu metotları kullanarak üretim hatlarını oluşturmakta ve üretim hattının izin verdiği limitler dâhilinde üretim yapmaktadırlar. Üretim sistemlerine uygun malzeme kullanımı sonucunda üretilen farklı kompozit malzemelerinin fiziksel, mekanik ve dürabilite özellikleri kompozit malzeme tipine göre büyük değişiklikler gösterebilmektedir. Bu kompozit malzemeler, genellikle yapısal eleman üretiminde kullanılmamaktadır. Bununla birlikte dış cephe kaplama, bölme duvarları gibi amaçlarla kullanılmakta olan kompozit malzemelerin performansı, binada kullanılan yapısal olmayan sistemlerden beklenmekte olan mekanik dayanım ve stabilitesi ile dış etkenlere karşı yüksek direnç özelliklerini etkilemektedir. Bununla birlikte lif donatılı malzemelerin yapısal ürünler olarak kullanılmaya başlandığını ve bu ürünlerin yapısal elemanlar olarak da kendilerinden beklenen performansları sağladığını belirtmek gerekir. Yüksek basınç dayanımı, düşük çekme dayanımı ve tokluğa sahip çimento esaslı malzemeler genellikle bir donatı ile güçlendirilir. Mevcut uygulamalarda donatı olarak geleneksel beton donatı çelikleri kul-

lanılmaktadır. Betonarme, onlarca yıldır tüm dünyada yaygın olarak kullanılan bir sistemdir. Betonarme birçok koşul altında başarı göstererek kendini kanıtlamıştır. Buna bağlı olarak hesap yöntemleri de oldukça gelişmiştir ve mühendisler betonarme hesap yöntemleri konusunda yüksek düzeyde deneyim ve güvene sahiptirler. Ancak betonarme elemanların istenilen performansı sağlayabilmesi için belirli boyutlarda tasarlanması gerekmektedir [7,27]. Günümüz mimari yaklaşımında yapılar daha küçük kesitli elemanların kullanımı ile tasarlanmaktadır. Bu elemanlar küçük agrega boyutları ile üretilmektedir. Bunun için yüksek performanslı ve küçük kesitli donatılara ihtiyaç duyulmaktadır [28]. Genellikle çimento esaslı malzemeler ile üretilen bu elemanlar, ihtiyaç duyulan yüksek çekme dayanımı, tokluk ve sünekliği sağlamak için uzun süredir ayırık (kesilmiş) lifler ile güçlendirilmektedir [7,27]. Çimentolu yapısal kompozitlerin üretiminde kullanılan ayırık lifler akrilik, pamuk, asbest, cam, bazalt, karbon, naylon, polyester, polietilen, polipropilen, çelik ve PVA olarak sıralanabilir [9,30]. Elyaf lar esaslarına göre sınıflandırıldığında polimer, metal ve mineral esaslı oldukları anlaşılmaktadır. Lifler mukavemet ve elastisite modülleri açısından farklılıklar göstermektedir. Karbon ve çelik en yüksek elastisite modülüne sahipken, polimer esaslı lifler en düşük elastisite modülüne sahiptir [7,28]. Lif takviyeli betonların uzun bir geçmişi olmasına rağmen, gelişen yeni tekstil teknolojileri sayesinde kumaş formuna getirilen lifler de donatı olarak kullanılmaya başlanmıştır [31,32]. Kumaşlar, çimentolu kompozitlerin kolay üretimine ve yüksek mekanik adhezyona olanak sağlamaktadır [33]. Ayırık elyaf lar kompozit içerisinde rastgele dağılırken, kumaş olarak kullanıldığında elyaf lar istenilen ve ihtiyaç duyulan yönde yönlendirildiği için elyaf lar daha etkin kullanılmaktadır [34]. Ayrıca kumaş kullanılması durumunda çatlağın izlediği yol değişmekte ve çatlağın izlediği yol sünekliği arttırmaktadır [31].

Söz konusu kumaşlar kullanılarak üretilen kompozitler kumaş takviyeli çimentolu matrisler (FRCM) veya tekstil takviyeli harç (TRM) olarak adlandırılmaktadır. FRCM kompozitler farklı kumaşlar ve farklı matrisler kullanılarak elde edilebilir. Kumaşların ham maddeleri liflerinkine benzerdir ve cam, bazalt, karbon, polipropilen, polivinil alkol, sisal ve p-Fenilen Benzobis Oksazol olabilir [12-15,18,35,36]. Bu kumaşlar dokuma, dokuma olmayan veya örme olabilir. İplik boyutları, filamentlerin dağılımı, matrisin lifler boyunca penetrasyonu ve ara yüzeydeki bağ kompozitin kırılma davranışını etkiler [7,37,38]. Matrisler çimento, kireç veya geopolimer esaslı olabilir [39,40]. Üretimde kullanılan ham maddelerin özelliklerine ve kompoziti oluşturan bileşenlerin özelliklerine göre

kompozit özellikleri değişmektedir. Kaplanmamış kumaş kullanıldığında yeterli bağın sağlanabilmesi için uygun elyaf tipi kullanılarak penetrasyonun gerçekleşmesi ve çimento partiküllerinin kumaşı oluşturan filamentlerin içinden tatmin edici bir şekilde geçmesi gerekmektedir [24,25,41]. Kumaş ile matrisin uyumu ve kumaş matris ara yüzeyinde kullanılan kaplamaların özellikleri kompozitin performansı üzerinde önemli rol oynamaktadır [18]. Elyaf lar polimer bazlı kaplamalarla kaplandığında, bağ karakteri bu kaplamalarla matris uyumluluğuna ve bu kaplamanın özelliklerine bağlıdır [42,43]. Kumaş formundaki elyaf lar üzerindeki kaplamanın yapışmanın da artmasına katkıda bulunur [41].

Düşük, normal ve yüksek mukavemetli matrisler kullanılarak elde edilen kompozitler birçok alanda kullanılmaktadır. Bu kompozitler bazı yapı elemanlarının [34], kalıcı kalıpların, kaplama panellerinin [44,45] ve mevcut yapıların güçlendirme elemanlarının [13,46] üretiminde kullanılmaktadır. FRM'lerin boruların güçlendirilmesinde de kullanıldığı bilinmektedir [47]. Yüksek yapışma ve buna bağlı olarak yüksek kompozit performansı elde etmek için normal dayanımlı matrislerin yanı sıra yüksek dayanımlı matrisler de kullanılmaktadır. Orta ve yüksek dayanımlı çimento esaslı matrislerle üretilen kompozitler genellikle binaların dış cephe kaplamalarında ya da yığma ve betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılmaktadır [13,34,44-46,48]. FRM kullanılarak üretilen sandviç paneller, kendisinden beklenen yüksek mekanik performansı karşılayabilmektedir. Bu tip sandviç paneller için çeşitli çekirdek malzemeler kullanılmış, mekanik davranışı tahmin etmek için analitik modeller geliştirilmiştir [2,49,50]. FRM kompozitler, betonarme elemanların [42,52,53] ve duvarların [54-56] mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırmaktadır. FRM'nin yüksek sıcaklık dayanımı en önemli avantajlarından biridir [57]. Yüksek dayanımlı betonlardan sonra pratikte FRM üretiminde ultra yüksek performanslı matrisler de kullanılmaktadır. Ultra yüksek performanslı betonlarda, betonlarda yüksek süneklik ve tokluk seviyeleri elde etmek için genellikle ayrı lifler kullanılır [58]. UHPC'nin geleneksel donatı ile bağ performansı ile uyumluluğu iyi bilinmektedir [59-61]. Ancak, UHPC ile kumaş uyumu birkaç araştırmacının dikkatini çekmiş ve bu konu üzerinde çalışmaya başlamışlardır [62]. Ultra yüksek performanslı beton (UHPC), ACI239-R18'e göre geleneksel ve hatta yüksek performanslı betonla karşılaştırıldığında daha yüksek mukavemet, çekme sünekliği ve dayanıklılık özelliklerine sahip gelişmiş bir çimentolu malzeme sınıfıdır [19]. Ultra yüksek performanslı harçların gelişmiş özellikleri, tasarımlarının geleneksel betondan farklı olmasının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Burada, çok ince bağlayıcılar, tamamlayıcı

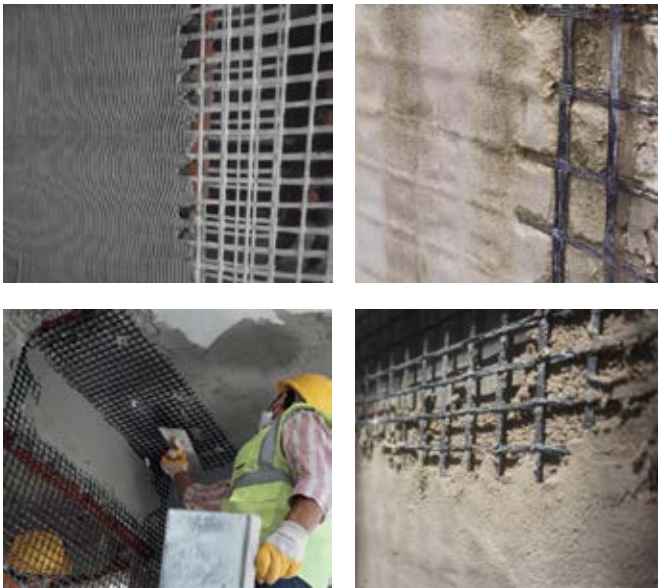
çimentolu malzemeler ve dolgu malzemeleri önemli bir etkiye sahiptir. [63-65]. Kumaş takviyeli çimento esaslı matrisler genellikle çekme ve eğilme test sonuçları ile karakterize edilir. Genellikle dış cephe kaplamalarında kullanılan kompozitler için eğilme deneyleri yeterli olsa da güçlendirme sistemi olarak kullanılan kompozitlerde çekme deneylerinin yapılması tavsiye edilmektedir. Çekme deneyleri genellikle iki dokümana göre yapılmaktadır. Bu dokümanlardan biri RILEM 232 [65], diğeri ise ACI 549.4R-20'de [3] atıfta bulunulan ICC-ES AC434 [67] dokümanıdır.

Çimentolu kompozitlerin yapıda kullanımında sağladığı avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Beton altyapı ile kimyasal, fiziksel ve mekanik uyumluluk,
- Sıva yapar gibi uygulama kolaylığı,
- Boşluklu matris yapısı nedeniyle hava ve nem geçirimsizliği,
- Yüksek sıcaklıklarda, plastik esaslı kompozitlere göre yüksek performans,
- Kolay sökülebilirlik.

Yukarıda sıralananlardan beton altyapı ile kimyasal fiziksel ve mekanik uyumluluk, bir yapıya sonradan uygulanan yeni malzemelerden beklenen bir özelliktir. Özellikle güçlendirme uygulamalarında kullanılan kompozitlerin, mevcut yapıyla uyumlu mekanik özellikler göstermesi beklenmektedir. Benzer kimyasal fiziksel özellikler göstermesi de, uygulamada eski yapıyla en fazla uyumu ve birleşmeyi sağlamaktadır. Uygulama kolaylığı da bu kompozitlerin yapıda tercih edilmesinde en önemli etkenlerden birisidir. Sıva yapar gibi matrisin alt elemana uygulanabiliyor olması, yerinde kompozit imalatının tercih edilmesinde çok etkilidir. Alt tabaka matris, mevcut yapı elemanına uygulanır. Bunun üzerine genellikle boşluklu grid formundaki kumaş hâline getirilmiş fiberler uygulanır. En üst tabaka matris uygulanması ile kompozit imalatı tamamlanmış olur. Bu tip uygulamalarda genellikle, SBR veya epoksi ile kaplanmış fiberlerin kullanılması tercih edilmektedir. Bu sayede fiberlerin yönlendirilmeleri istendiği gibi yapılabilen, kontrol dışındaki yönelmelerin önüne geçilmektedir. Çimentolu kompozitlerin yapıya uygulanmasında etkili etkenlerden bir tanesi de boşluklu matris yapısı nedeniyle hava ve nem geçirimsizliğidir. Çimento esaslı matrisin geçirimsizliği, uygulanan betonarme veya yığma altyapıya benzer özellikler taşıdığından, hava ve özellikle nem geçişi sırasında, tabakalar arasında nem birikmesi sorunu olmamaktadır. Bu da uygulanan kompozit tabakasının yüzeyden ayrılmasını önlemektedir. Yapıya uygulanan kompozitler yüksek sıcaklıklara da dayanıklı olmalıdır. Çimento esaslı kompozitler, plastik matrisli kompozitlere göre yüksek sıcaklıklara daha dayanıklıdır. Yapıda oluşması muhtemel bir yangında daha yüksek

sıcaklıklara kadar bütünlüğünü muhafaza edebilmektedirler. Bununla birlikte, belirli sıcaklıklara kadar yeniden uygulama gerektirmeden kendini koruyabilmektedirler. Kolay sökülebilirlik ise daha çok miras yapılarda kullanılan bir kavramdır. Uluslararası koruma tüzüklerine göre miras yapılara uygulanan her malzeme ve sistem, sökülmesi gerektiğinde, yapıya zarar vermeksizin sökülebilmelidir. Özellikle hidrolik kireç matrisli kompozitler, miras yapılardan kolaylıkla sökülebilmektedir. Bu matrislerden yapıya herhangi bir kalıcı tuz vs. geçişi olmamaktadır. Yapısal eleman olarak kullanılan kompozitlere örnekler Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Yapısal kullanılan çimentolu kompozitlere örnekler

Yapısal olmayan çimentolu kompozitler genellikle dış cephe kaplaması fonksiyonuyla kullanılmaktadır. Dış cephe kaplaması olarak kullanılan çimentolu kompozitlere iki örnek Şekil 2'de gösterilmektedir.



(a)

(b)

Şekil 2. Yapısal olmayan çimentolu kompozitlere örnekler

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

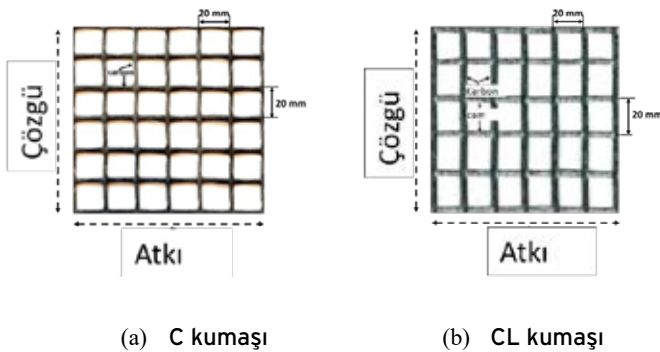
Bu deneysel çalışmada, karbon elyafların iki farklı yönde farklı oranlarda kullanılmasıyla üretilen karbon kumaş, yüksek dayanımlı matrislerde kullanılmıştır. Bu kumaşlar iki farklı tipte yüksek dayanımlı çimentolu matrislerde kullanılarak kumaş takviyeli çimentolu matris (FRCM) kompozitler üretilmiştir. Üretilen FRCM kompozitlerin özellikleri incelenmiştir. İki farklı matris ve iki farklı karbon kumaş ile üretilen kompozitler üzerinde çekme ve eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Karbon elyafların üretiminde enerji kullanılmaktadır. Gereksiz kullanımdan kaçınmak için bu elyafların akıllı bir tasarımla kullanılması sürdürülebilir çevrenin korunmasına yardımcı olacağı gibi yüksek maliyetlerin de önüne geçecektir. FRCM'lerin kullanıldığı iki uygulama alanından biri olan giydirme panellerde, panelin uzun açıklığındaki momentler önemli ölçüde yüksek olduğundan, uzun açıklığa dik yönde takviye ihtiyacı uzun açıklık yönü ile kıyaslanamayacak şekildedir. Gerilmeler uzun açıklık yönünde başarılı bir şekilde taşındığında, kısa açıklık yönünde takviyeye gerek kalmayacaktır. FRCM kompozitler genellikle çekme gerilmesinin yüksek olduğu kısımlarda bu gerilmelere karşı güçlendirme amacıyla kullanılır. FRCM'lerin çekme gerilmesine karşılık gelen yöndeki donatılar aktif olarak çalışırken, diğer yöndeki donatılar ikinci plandadır. Kompozitin hiç yüke maruz kalmadığı veya çok düşük yüklere maruz kaldığı yönlerde karbon elyaf kullanmak yerine montaj için konulan e-glass cam elyafların kullanılması gereksiz karbon elyaf kullanımının önüne geçecektir. Bu sayede daha az miktarda karbon elyaf kullanılarak benzer performans elde edilmesi veya aynı miktarda karbon elyaf kullanılarak daha üstün performans elde edilmesi hedeflenmektedir. Yüksek mukavemetli matrislerde birincil yönde karbon, ikincil yönde e-cam kullanılarak üretilen (CL, faydalı yönde yüksek karbon elyaf miktarı) kumaş takviyeli kompozitler ile sadece karbon (C, her iki yönde eşit karbon elyaf) kullanılarak üretilen kompozitlerin performansları deneysel olarak karşılaştırılmıştır.

3. MALZEMELER VE DENEY YÖNTEMLERİ

Deneysel çalışmada iki farklı hazır kuru karışım yüksek mukavemetli harç ve iki farklı karbon kumaş kullanılmıştır. Kullanılan hazır karışımlar 60 MPa (M60) ve 120 MPa (M120) karakteristik dayanıma sahip kuru karışımlardır. M60 harcı düşey yüzeylerde uygulanabilen tiksotropik bir harçtır, ancak M120 harcı kendiliğinden yayılan bir harçtır. Her iki harç üretilirken CEM1 52.5 çimentosu, kuru polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı, kuvars esaslı agreg ve mineral katkıları kullanılmıştır. Kullanılan kuvars esaslı agreganın maksimum tane

boyutu 1 mm'dir. M60 harcı üretiminde mineral katkı maddesi olarak F sınıfı uçucu kül kullanılırken, M120 harcı üretiminde mineral katkı maddesi olarak silis dumanı kullanılmıştır. Harçlar, üretici tarafından belirtilen su miktarı kullanılarak laboratuvar da karıştırılmıştır. Karışımlar için 600 rpm'lik bir mikser kullanılmıştır. Hazırlanan harçlar 40 mm x 40 mm x 160 mm'lik kalıplara dökülmüş ve 28 gün sonra basınç dayanımları elde edilmiştir.

Karbon kumaşlar tasarlanırken, karbon elyaf miktarının FRCM kompozitlerin faydalı özellikleri üzerindeki etkilerinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Bir karbon elyafın çekme dayanımı üretici beyanına göre 3600 MPa'dır. Hedeflenen çalışma için iki farklı karbon kumaş tasarlanmıştır. Bunlardan ilkinde, çözgü ve atkı yönlerinde 44 mm²/m karbon elyaf alanına sahip kumaşlar tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu kumaşlar makalenin bundan sonraki kısmında (C) olarak kısaltılacaktır. İkinci tip karbon kumaşta, ilkinden farklı olarak, tüm karbon lifleri tek bir yönde, çözgü yönünde atanmıştır. Atkı yönünde, karbon liflerinin birleştirilmesi için e-cam cam lifleri kullanılmıştır. Bu kumaşta çözgü yönündeki karbon elyaf miktarı 110 mm²/m'dir. Çalışmanın başlangıcında CL kumaşlarda çözgü doğrultusunda C kumaşta iki katı elyaf kullanılması planlanmıştır. Ancak üretim hatlarındaki üretim tekniğinin bu oranı kullanmaya izin vermemesi nedeniyle C kumaşının çözgü yönünde tam iki katı karbon elyaf miktarı kullanılamamıştır. Bu miktar C kumaşının çözgü yönündeki karbon elyafının iki katının %20 fazlası olarak kabul edilmiş ve deneysel çalışmalara devam edilmiştir. Bu kumaşlar yazının bundan sonraki kısmında (CL) olarak kısaltılmıştır. Her iki kumaş da kullanım ve uygulama kolaylığı için SBR (Styrene Butadiene Rubber) ile kaplanmıştır. Kompozit üretiminde kullanılan her iki kumaş da Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Kompozitlerde kullanılan kumaşlar

Kompozit numunelerin üretimi için numune boyutlarına göre plywood kalıplar hazırlanmıştır. Numune boyutları çekme testi numuneleri için 600 mm x 130 mm x 20 mm, eğilme

testi numuneleri için ise 300 mm x 100 mm x 20 mm olarak seçilmiştir. M120 matrisi kendiliğinden yayılma özelliğine sahip olduğu için takviyeler kalıp kenarlarından zımbalanarak sabitlenmiştir. Daha sonra kendiliğinden yayılan M120 harcı kalıba dökülerek kompozitin üretimi tamamlanmıştır. M120 matris ile üretilen kompozitlerin üretim aşamaları Şekil 4'te gösterilmiştir. Ancak M60 matrisi tiksotropik bir yapıya sahip olduğu için M60 harcı kullanılan kompozitlerde takviye sabitlemesi yapılmamıştır. Bu kompozitlerde ilk kat harç kalıp içerisine dökülmüştür. Daha sonra donatılar harcın üzerine yerleştirilmiştir. Son olarak ikinci kat harç dökülmüş ve kompozitin üretimi tamamlanmıştır. M60 matrisi kullanılarak üretilen kompozitlerin üretim aşamaları Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. M120 matrisi ile kompozitlerin üretim aşamaları



Şekil 5. M60 matrisi ile kompozitlerin üretim aşamaları

Örnek kodlar oluşturulurken matris ve karbon kumaş kodları kullanılmıştır. Örnek kodundaki ilk gösterim matrisi gösterirken, ikinci gösterim karbon kumaşı temsil etmektedir. Örneğin M120CL; 120 MPa karakteristik dayanıma sahip harç ile üretilen ve tek yönde karbonun (CL) kullanıldığı kumaşı içeren kompoziti ifade etmektedir.

Her bir deney serisi için beş adet numune üretilmiştir. Üretilen kompozitler, üretimden sonraki gün kalıplardan çıkarılarak dış ortamdan izole edilmiştir. Polietilen streç film daha sonra deney gününe kadar 26 gün boyunca katmanlar hâlinde

sarılmıştır. Deney gününden iki gün önce numune üzerindeki polietilen tabakalar kaldırılmıştır. Çekme ve eğilme testi için hazırlanan numuneler daha sonra deney gününe kadar laboratuvarda saklanmıştır. Çekme deneyi için çelik aparatlar ICC- ES C434 dokümanında tarif edildiği şekilde numunelere yapıştırılmıştır. Çelik aparatların çekme numunelerine uygulanması Şekil 6'da gösterilmiştir. Eğilme testleri için numune üzerinde herhangi bir hazırlık yapılmamıştır.



Şekil 6. Çekme deneyi için çelik aparatların yapıştırılma aşaması

Eğilme ve çekme testleri için MTS Criterion C43 504E universal deformasyon kontrollü servo test sistemi kullanılmıştır. Test sisteminin kapasitesi 50 kN'dur. Testler sırasında laboratuvar sıcaklığı 18 ± 2 °C olarak ölçülmüştür. Eğilme testleri dört nokta eğilme testi olarak gerçekleştirilmiştir. Eğilme testlerinde mesnet açıklık uzunluğu 300 mm olarak seçilmiştir. Eğilme testleri sırasında şekil değiştirme hızı 0,6 mm/s olarak seçilmiştir. Çekme testlerinde metal plakalar numuneler üzerine yapıştırıldıktan sonra, metal plakalar her iki uçtan her iki yönde hareket edebilen çelik konektörlere tutturulmuştur. Bu çelik konektörlerin uygulanmasındaki amaç, çekme testi sırasında herhangi bir eksantriklik yaratmamaktır. Daha sonra deformasyonların ölçüldüğü çerçevenin uzunluğu 120 mm'dir. Deformasyonlar, numunenin orta ekseninde ön ve arka olmak üzere iki noktadan LVDT'ler kullanılarak elde edilmiştir. Her iki LVDT'den elde edilen uzamaların ortalaması numunenin uzaması olarak alınmıştır. Çekme testleri deformasyon kontrolü ile gerçekleştirilmiştir. Uzamalar çapraz kafa hareketinden kontrol edilmiştir. Çekme deneyleri sırasında çapraz kafa hızı 0,8 N/s olarak programlanmıştır. Çekme ve eğilme deneylerinde kullanılan test sistemi sırasıyla Şekil 7 (a) ve (b)'de verilmiştir.



(a) Çekme deneyi



(b) Eğilme deneyi

Şekil 7. Çekme ve eğilme deney sistemleri

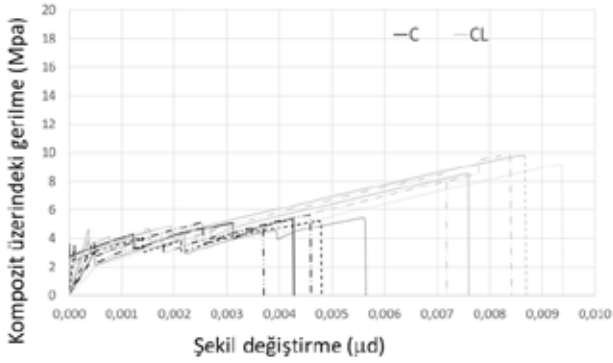
4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Harçlardan alınan numuneler kirece doygun su içerisinde 23 ± 2 °C'de 28 gün kür edildikten sonra basınç dayanımı testleri uygulanmıştır. Basınç dayanımı testleri sonucunda M60 ve M120 harçlarından alınan numunelerin ortalama dayanımı sırasıyla 76 MPa ve 132 MPa olarak elde edilmiştir.

M60 matrisi ile iki farklı tipte kompozit üretilmiştir. Üretilen kompozitlerden ilki, M60 matrisi ve her iki yönde karbon elyaf kullanılan C kumaşı kullanılarak elde edilmiştir. Bu kumaşa hem çözgü yönünde hem de atkı yönünde $44 \text{ mm}^2/\text{m}$ karbon elyaf kullanılmıştır. M60 matris ile üretilen ikinci tip kompozit olan M60CL kompoziti ise çözgü yönünde $105 \text{ mm}^2/\text{m}$ karbon elyaf ve atkı yönünde e-cam elyaf içeren kumaşı (CL) içermektedir. Çekme testleri verilerinden elde edilen grafikler Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmiştir. Çekme deneylerinin sonuçları işlenerek iki farklı grafik elde edilmiştir. Bu grafiklerin her ikisinde de yatay eksen gerilme değerini göstermektedir. Ancak dikey eksenlerdeki gerilmeler farklıdır. Şekil 8'de gösterilen grafikte düşey eksen kompozit üzerindeki gerilmeyi temsil etmektedir. Kompozit üzerindeki gerilme, çekme testinde elde edilen yüklerin kompozitin kesit alanına bölünmesi ile elde edilir.

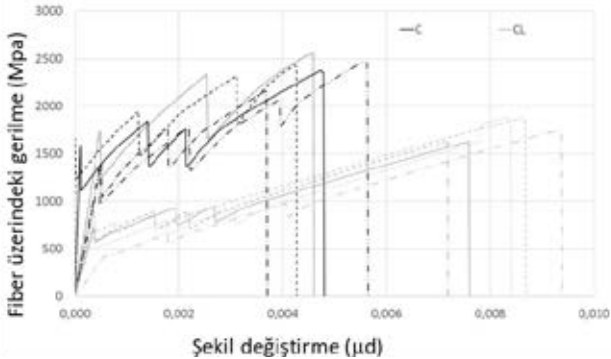
Bu değer dış cephe kaplama uygulamalarındaki tasarımlarda kullanılmaktadır. Ancak Şekil 9'da gösterilen grafikte düşey eksen de deney sırasında elde edilen yükün yük yönünde fiber alanına bölünmesi ile elde edilen gerilme değeri sunulmuştur. Güçlendirme uygulamalarında kesit çatlamlarından sonra lifin yük taşıma kapasitesi dikkate alınır. Bu aşamada elyaf üzerindeki gerilmeler dikkate alınarak tasarım yapılır. Kompozit çatladıktan sonra lifler baskın hâle gelir ve lifler üzerindeki gerilmeler etkili olur. Bunun için iki yaklaşımda da gerilmeler farklı hesaplanmaktadır.

Şekil 8'e göre, elde edilen ilişkinin belirli bir eğilme noktasına kadar doğrusal olduğu açıktır. Bu bükülme noktasının ötesinde yine doğrusal olmaya devam etmekte ancak yük ile uzama arasındaki doğrusal ilişkinin eğimi daha düşük olmaktadır. İlişkinin ilk kısmında matris kompozitin davranışına hâkimdir, ilk çatlak eğilme noktasında meydana gelir, ikinci kısımda ise elyaf lar davranışa hâkimdir. C ve CL kumaş larla üretilen kompozitlerin çekme davranış ları incelendiğinde, CL kumaş kompozit için şek il değ iş tirm e sertleş mesi kısm ı daha uzundur, bu da daha yüksek yük taşıma kapasitesi ve daha yüksek şek il değ iş tirm e oranını gösterir.



Şek il 8. M60 kompozit için kompozit üzerinde gerilme şek il değ iş tirm e ilişkisi

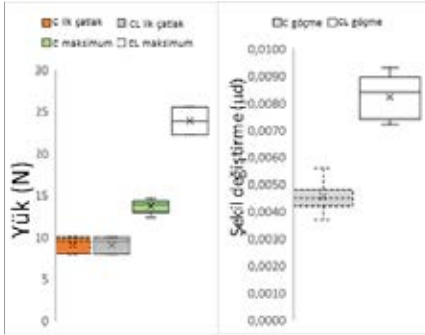
Hem Şek il 8 hem de 9'da kompozitlerin birinci bölgedeki gerilme şek il değ iş tirm e eğrilerinde her bir seride bazı farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Örneğin, çift yönlü C karbon ile üretilen kompozitin birinci bölgedeki eğimleri incelenecek olursa, beş deneyden üçü uyuşmakta ve ikisi daha dik eğimler göstermektedir. Ancak tek yönlü CL kumaş ile üretilen kompozitlerden biri daha düşük eğim göstermektedir. Bu farklılıklar ultra yüksek mukavemetli matris kompozitlerinde görülmemektedir. Ultra yüksek mukavemetli matrisin kendiliğinden yayılan bir harç olduğu düşünül düğünde, M60 harcı ile üretilen kompozitlerdeki bu farklılıkların olası yerleş tirm e sorunlarından kaynaklanabileceğ i düşünölmektedir.



Şek il 9. M60 kompozit için fiber üzerinde gerilme şek il değ iş tirm e ilişkisi

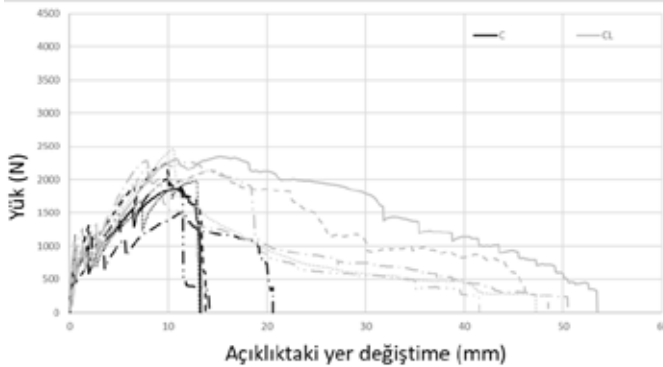
Şek il 9'da C kumaş ı ile üretilen kompozit için ikinci kısımda özellikle elyaf ların etkili olduğ u yerlerde CL kumaş ı üzerindeki gerilmelere kıyasla daha yüksek gerilmeler elde edilmiştir. Daha az elyaf ve matris ile daha büyük arayüzey alanı kullanıldığında, elyaf larla daha yüksek gerilmeler aktarılabilir. Karbon elyaf yüzeyine birim başına düşen arayüzey tabakası miktarı arttıkça karbon elyaf tan elde edilen performans da artmaktadır. Bu şek ilde arayüzey olan kaplama tabakasının yüzey alanı arttıkça, tabakanın elyaf larla veya matrise yapışma mukavemetinin sabit olduğ u düşünölrse, arayüzey tabakasının elyaf larla aktarabileceğ i kuvvetler artmaktadır. Şek il 9'daki davranış ta, C kumaş takviyeli kompozit için yüklem e yönünde daha az elyaf ve daha yüksek elyaf SBR arayüzü ve SBR kaplama-çimento harcı arayüzü olduğ u açıktır. Daha yüksek kaplama ara yüzey alanı sayesinde ara yüzey üzerine gelen kuvvetlere karşı daha düşük gerilmelerle karşılaşmakta ve kapasitesine daha geç ulaşmaktadır. Buna bağılı olarak C kumaş ında yüklem e yönündeki karbon daha yüksek çekme gerilmeleri taşıyabilmektedir. Her iki kumaş ta da aynı kaynaktan elde edilen karbon elyaf lar kullanıldığ ından arayüz performansının etkisi açıktır, daha yüksek miktarda arayüz olması yüklem e yönünde daha fazla yük taşınmasına yardımcı olmaktadır.

Şek il 10'da C ve CL kumaş ile üretilen M60 kompozitlerinin ilk çatlak, maksimum yük ve şek il değ iş tirm e değ erleri gösterilmektedir. Burada çekme testinde elde edilen yük değ erleri doğrudan kullanılmış tır. Şek ilde, ortalama değ erler beş numuneden elde edilen sonuçların dağılım ı ile birlikte verilmiştir. Çarpı işaretler her serinin ortalama değ erini göstermektedir. Şek il 10'da ilk çatlak yükleri her iki kompozit için de maksimum yüklere kıyasla daha düşük değ erler göstermektedir. Matrisin baskın olduğ u bölgenin sonunda meydana gelen ilk çatlak değ erleri hem C hem de CL kompozitler için birbirine çok yakındır. Aynı şek ilde değ erlerin dağılım ı da benzerdir. Maksimum yükler karşılaştırıldığında CL kumaş ile üretilen kompozitin maksimum yükü C ile üretilen kompozitin maksimum yükünün yaklaşık iki katıdır. Maksimum değ erdeki bu artış CL'deki yüksek elyaf miktarının etkisi olarak düşünölebilir. Kırılma anındaki şek il değ iş tirm e değ erlerine bakıldığında CL kumaş ile üretilen kompozitin C kumaş ile üretilen kompozite göre daha yüksek şek il değ iş tirm e değ erleri gösterdiğ i anlaşılmaktadır. CL kumaş ile üretilen kompozitin şek il değ iş tirm e değ erleri C kumaş ile üretilen kompozitin şek il değ iş tirm e değ erlerinin yaklaşık iki katıdır.



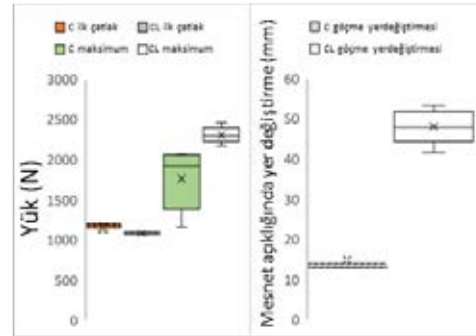
Şekil 10. M60 matis kompozitlerinde çekme deneyinde kritik noktaların değişimi

Şekil 11'de M60 matris ile üretilen kompozitlerin eğilme davranışı incelendiğinde, eğilme noktasına kadar yük ile orta açıklıktaki yer değiştirme arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. Bu noktadan sonra ilk çatlak oluşmakta ve eğilme davranışında çoklu çatlak mekanizması dikkat çekmektedir. C ve CL karbon kumaş kompozitlerde, eğilme noktasını takip eden ikinci kısımda çoklu çatlak mekanizması ile şekil değiştirme sertleşmesi davranışı gözlenmektedir. Şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sonucunda kompozitler maksimum eğilme kapasitesine ulaşmaktadır. Ancak iki kumaş ile üretilen kompozitlerin eğilme yükleri altındaki davranışları maksimum yük noktasından sonra farklılık göstermektedir. İki yönde karbon elyaf içeren C kumaş ile üretilen kompozitlerde maksimum yüke ulaştıktan sonra yük aniden sıfır noktasına düşmektedir. Bu durum kompozitin enerji absorbe etme kapasitesini sınırlamaktadır. Ancak tek yönde iki kat karbon içeren kumaşların eğilme testi sonuçları incelendiğinde, şekil değiştirme sertleşmesi davranışını takiben şekil değiştirme yumuşaması davranışı ortaya çıkmakta ve numune tamamen başarısız olana kadar yük kademeli olarak azalmaktadır.



Şekil 11. M60 karbon kompozitlerin eğilmede yük-mesnet açıklığı deplasman ilişkileri

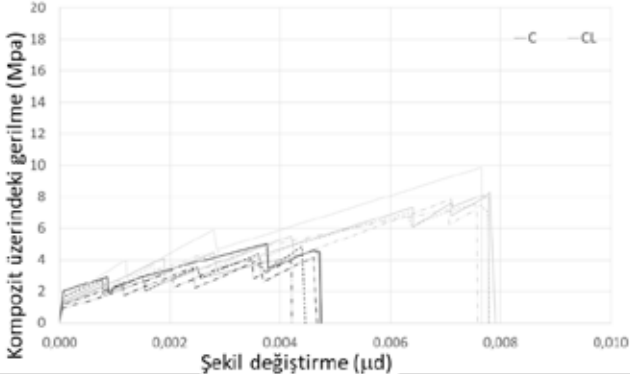
Şekil 12'de M60 harcı ile üretilen kompozitlerin eğilme testleri sonucunda elde edilen grafiklerdeki ilk çatlak, maksimum yükler ve göçme deplasman değerleri gösterilmektedir. Şekil 12'de ayrıca 5 numuneden elde edilen test sonuçlarının dağılımı da gösterilmektedir. C kumaş ile üretilen kompozitin ilk çatlak değerleri CL kumaş ile üretilen kompozitlere göre önemsiz derecede yüksek olmasına rağmen elde edilen yük değerleri aynı seviyede kabul edilebilir. CL kumaşlı kompozitin taşıdığı maksimum yükler C kumaşlı kompozitin taşıdığı yüklerden oldukça yüksektir. Ancak C kumaş ile üretilen kompozitlerin maksimum yük değerlerindeki yüksek dağılım da dikkat çekicidir. Göçme anındaki orta nokta yer değiştirme değerlerine göre CL ile üretilen kompozitin göçme anındaki orta nokta deformasyon miktarları C kompozitin deformasyon miktarlarının üç katına ulaşmaktadır. Eğilme testinde elde edilen bu sonuç, çekme testi sonuçları ile birbirini doğrulamaktadır. CL kumaş ile üretilen kompozitler daha yüksek oranda başarısızlık deformasyonuna neden olmaktadır. Buna göre CL ile üretilen kompozitlerin daha sünek davranış gösterdiği net bir şekilde kabul edilebilir.



Şekil 12. M60 matis kompozitlerinde eğilme deneyinde kritik noktaların değişimi

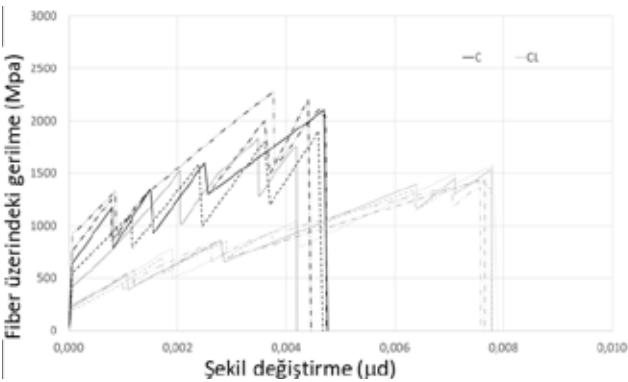
M120 harcı ile üretilen FRCM kompozitlerin çekme testi sonuçları Şekil 13 ve Şekil 14'te sunulmuştur. Grafikler ultra yüksek mukavemetli harç, C ve CL kumaşlar kullanılarak elde edilen FRCM kompozitlerin grafiklerini sunmaktadır. M120 harcı ile üretilen kompozitlerin çekme testi sonuçları kullanılarak iki farklı çekme testi sonucu grafiği elde edilmiştir. Şekil 13'te kompozit üzerindeki gerilmeler ve şekil değiştirmeler arasındaki ilişkiler gösterilmektedir. Her iki kumaş ile üretilen kompozitlerde ilk çatlaklar oluşana kadar kompozit üzerindeki gerilmeler birbirine çok yakındır. Bu kısımda her iki kumaş ile üretilen kompozitlerde gerilme ve şekil değiştirme arasındaki eğim birbirine çok yakındır. Bu kısımda matris baskın olduğu için elyafın çizginin eğimine etkisi görülmemektedir. İlk çatlak oluşuktan sonra gerilme-şekil değiştirme ilişkisi daha düşük bir eğimle doğrusal bir şekilde devam etmektedir. Her iki kumaş ile üretilen kompo-

zitte şekil değiştirme sertleşmesi davranışı maksimum gerilme değerine kadar devam etmektedir. Maksimum yükten sonra ise sıfıra doğru bir düşüş elde edilmektedir. İkinci bölümde ise her iki kompozitte de maksimum noktaya ulaşana kadar çoklu çatlak davranışı gözlemlenmektedir. Çatlaklar grafiklere anlık gerilme düşüşleri olarak yansımaktadır.



Şekil 13. M120 kompozit için kompozit üzerinde gerilme şekil değiştirme ilişkisi

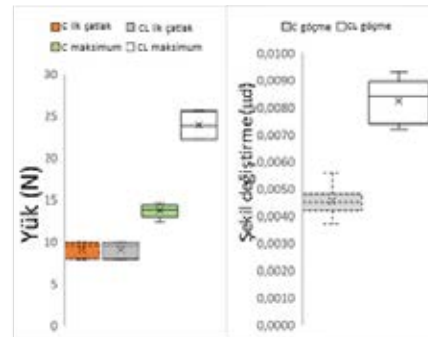
Şekil 14'te elyaf üzerindeki gerilme ile şekil değiştirme arasındaki ilişki verilmiştir. Şekil 14'te verilen grafiğe göre hem M120C hem de M120CL kompozitleri başlangıçta yüksek bir eğimle elde edilmiştir. Grafiğin başlangıç kısmı bittiğinde numuneler üzerinde ilk çatlaklar gözlemlenmiştir. Daha sonra her iki tip numune de göçme meydana gelene kadar oluşan mikro çatlakların sayısı artmış, mikro çatlakların oluşmasını takiben çatlaklar genişlemiş ve deney sonunda oluşan çoklu çatlaklardan birinin büyümesi ve karbon fiberlerin göçmesi ile deney sona ermiştir. İlk kısımdaki eğim her iki kompozit için de birbirine çok yakındır. Bu da kompozitin bu ilk bölgedeki davranışının matris tarafından yönetildiği düşüncesini desteklemektedir. Ancak ilk çatlak oluştuğundan sonra her iki kompozitin gerilme eğrilerinin gösterdiği eğimler birbirinden farklılaşmaktadır. Çatlaklar, ikinci aşamada gerilmeye anlık düşüşler olarak grafiklere yansımaktadır.



Şekil 14. M120 kompozit için fiber üzerindeki gerilme şekil değiştirme ilişkisi

Ultra yüksek mukavemetli M120 harcı ile üretilen kompozitlerde, çekme testi sonuçlarındaki kritik noktalar Şekil 15'te gösterilmiştir. C ve CL kompozitlerde ilk çatlak yükleri karşılaştırıldığında ortalama değerler arasında bir fark elde edilemediği açıktır. M120C ve M120 CL kompozitlerinin ilk çatlak yükleri arasındaki fark, test numunelerinden elde edilen sonuçların dağılımından kaynaklanmaktadır. C kompozitinin çekme testinden elde edilen sonuçlar arasındaki dağılım daha az iken CL numunesi ile üretilen kompozit numunelerin dağılımı daha fazladır. Kompozitlerin maksimum yüklerinin karşılaştırılmasına göre CL kumaş ile üretilen kompozitin maksimum yük değeri C kumaş ile üretilen kompozitin maksimum yük değerinden daha yüksektir. Ancak CL kumaş ile üretilen kompozitin maksimum yükü aynı kumaşa sahip M60 matris ile üretilen kompozitlerin iki katına ulaşmamıştır. Eğrinin ikinci kısmında elyaflar daha etkili olmasına rağmen kompozit üzerindeki gerilmenin iki kat mertebesinin altında kalması yine ara yüzeydeki kaplamanın performansına bağlanabilir. CL kumaşı toplamda daha düşük bir kaplama alanına sahiptir.

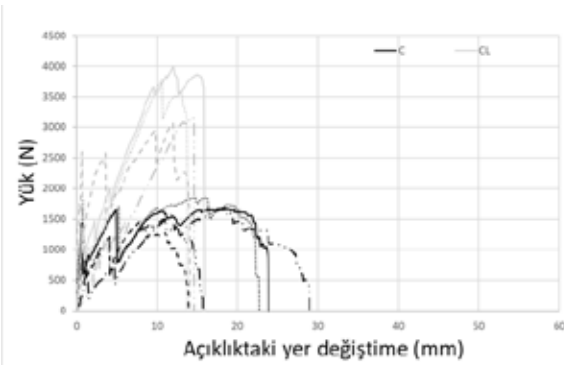
Kaplamanın düşük yüzey alanı, kaplama üzerinde daha yüksek gerilmelere ve kaplamanın başarısız olmasına neden olur. Bu da iki katından fazla elyaf kullanılmasına rağmen çekme performansının iki katına ulaşamamasının sonucudur. C ve CL kumaş ile üretilen kompozitlerin maksimum şekil değiştirme değerleri karşılaştırılırsa, CL kumaş ile üretilen kompozitlerin göçmesi anındaki şekil değiştirme değerlerinin C kumaş ile üretilen kompozitten daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Bu yüksek deformasyon kapasitesi CL kumaş ile üretilen kompozitin yüksek yük taşıma kapasitesi ile ilişkilidir.



Şekil 15. M120 matis kompozitlerinde çekme deneyinde kritik noktaların değişimi

Şekil 16 eğilme testindeki yük-orta açıklık yer değiştirmelerini göstermektedir. CL takviyesi ile üretilen kompozit numuneler, C takviyesi ile üretilen kompozit numunelere göre

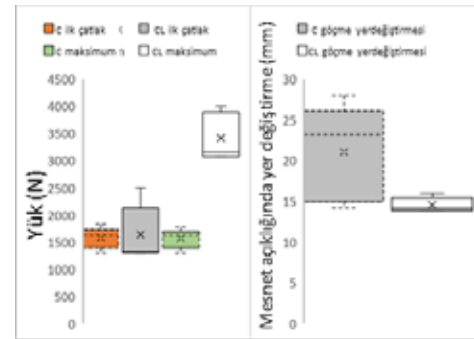
yaklaşık 2 kat daha yüksek eğilme performansına sahiptir. Eğilme etkisi altında yük taşıma kapasitesi elyaf miktarından daha fazla artmıştır. Elyaf oranındaki artış sırasına göre meydana gelen bu performans artışının nedeni, yüksek performanslı harç ile elyaf-matris ara yüzündeki SBR kaplamanın yüksek yapışma performansına bağlanabilir. Bu sayede karbon elyaflar çekme yüklerine karşı amaçlandığı gibi kullanılabilir. M60 matrisinin aksine, kompozitlerin eğilme yükleri altında gösterdiği yer değiştirme miktarları önemli ölçüde farklılık göstermemektedir. C kumaşı ile üretilen kompozitler, şekil değiştirme sertleşmesi sonrasında ulaşılan maksimum yükü takiben ani bir yük düşüşü göstermektedir. CL kumaşı ile üretilen kompozitlerde, M60 harcı ile üretilen kompozit performansına benzer şekilde ve maksimum yük sonrası şekil değiştirme sertleşmesi davranışını takiben şekil değiştirme yumuşaması davranışı elde edilmektedir. Ancak yüksek mukavemetli matris ile üretilen kompozitlerde fark, CL kumaş kullanıldığında şekil değiştirme yumuşaması kısmının M60 matris ile üretilen kompozite göre daha kısa olması, yani bu kısımdaki deformasyonun daha düşük olmasıdır. Daha düşük deformasyon, yüksek performanslı harç matrisi ile karbon yüzey kaplaması SBR arasındaki yüksek yapışma performansına bağlanabilir.



Şekil 16. M120 karbon kompozitlerin eğilmede yük-mesnet açıklığı deplasman ilişkileri

Şekil 17'de ultra yüksek mukavemetli M120 matrisi ve her iki tip karbon kumaş kullanılarak elde edilen kompozitlerin eğilme testlerinden elde edilen kritik noktalar gösterilmektedir. İlk çatlak yüklerine göre C ve CL kumaş ile üretilen kompozitlerin ilk çatlak ortalama yüklerinin birbirine çok yakın olduğu anlaşılmaktadır. Ancak M120CL kompozitinin test edilen beş numunesinin dağılımı, M120C kompozitinin numunelerinin eğilme testi sonuçlarının dağılımından daha yüksektir. Eğilme testinde C kumaşı ile üretilen kompozitin maksimum yükünün ilk çatlak yükü ile aynı sırada olduğu açıkça elde edilmektedir. CL kumaş ile üretilen kompozitin maksimum yükü,

C ile üretilen kompozitin maksimum yükünün iki katından daha fazladır. M120C kompozitler test sonuçlarında büyük bir dağılım sergilemektedir. C kumaşı ile üretilen kompozitlerin ortalama başarısızlık deformasyon değeri, M120CL kompozitinin başarısızlık anındaki ortalama deformasyon değerinden daha yüksektir. Bu davranış, yüksek kayma oranlarına ve daha yüksek arayüzey miktarının neden olduğu yüksek deformasyona bağlanabilir.



Şekil 17. M120 matis kompozitlerinde eğilme deneyinde kritik noktaların değişimi

5. GENEL SONUÇLAR

Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, kullanılan malzemelerin sınırları dahilinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir;

- Kompozit üzerinde yapılan deneylerde yükleme yönündeki elyaf miktarına bakılmaksızın grafiklerin ilk çatlağın oluşmasına kadar olan kısımları matris özelliklerine bağlıdır ve matris tarafından yönetilmektedir. İlk çatlak oluşuktan sonra çekme ve eğilme testlerinde tüm numunelerde çoklu çatlama mekanizması devreye girmiş ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışı gözlenmiştir. Çekme testlerinde, numunelerin tamamında maksimum yüke ulaşıldıktan sonra yük aniden sifıra düşmüş ve ardından başarısızlık meydana gelmiştir. Eğilme testlerinde ise M60 kompozitlerde CL kumaş ile üretilenler şekil değiştirme yumuşaması davranışı gösterirken, M120 harcı ile üretilen kompozitler C kumaş ile kullanıldığında benzer şekil değiştirme yumuşaması davranışı göstermiştir. Şekil değiştirme yumuşaması davranışı eğilme testlerinde numunenin sünekliği üzerinde etkilidir. Karbon elyafların faydalı yönde kullanılması durumunda, maksimum yüke ulaşıldıktan sonraki aşamada absorbe edilen mekanik enerji daha yüksek olmuştur.

- Eğilme ve çekme testleri için farklı kumaşlar kullanıldığında ilk çatlak yükleri önemli bir farklılık göstermez. CL kumaş

kullanıldığında maksimum yükler artmaktadır. Yük yönünde elyaf alanının artmasıyla, bu yönde taşınan yük sırası artar. Ancak bu artış yük yönünde kullanılan elyaf alanı ile orantılı olmak zorunda değildir. Matris özelliklerinin 60 MPa mertebesinde üzerinde iyileştirilmesinin kompozit mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi yoktur.

- Yüksek mukavemetli çimento esaslı harç ve karbon fiber kompozitlerin performansında, kaplamaların karbon fiber veya çimento esaslı matris ile arayüzü performansı etkiler. Kompozitin en iyi performansı göstermesi için elyaflar, elyaf matris arayüzü, kaplama malzemesi ve matris özellikleri optimize edilmelidir. Optimizasyon, kaplamanın elyaflar üzerindeki soyulma mukavemetlerini modelleyerek yapılabilir. Ara yüzeydeki kusurların ve homojenliği bozan unsurların kompozit performansını önemli ölçüde etkilediği unutulmamalıdır.

Kaynaklar

1. Portal N. W., Flansbjer M., Zandi K., Wlasak L., Malaga K., Bending behaviour of novel textile reinforced concrete-foamed concrete (TRC-FC) sandwich elements, *Composite Structure (Compos. Struct.)* 177 104-118, 2017
2. Dey V., Zani G., Colombo M., Di Prisco M., Mobasher B., Flexural impact response of textile-reinforced aerated concrete sandwich panels, *Materials and Design (Mater. Des.)* 86, 187-197, 2015.
3. ACI 549.4-R20: Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix and Steel-Reinforced Grout Systems for Repair and Strengthening of Concrete Structures, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2020.
4. Colombo I.G., Colombo M., Di Prisco M., Bending behaviour of textile reinforced concrete sandwich beams, *Construction and Building Materials (Constr. Build. Mater.)* 95, 675-685, 2015.
5. Ersoy, H. Y., Kompozit Mazleme, Literatür Yayınları: 66, İstanbul, Türkiye, 2001.
6. Gibson, F., Ronald, "Principles of Composite Material Mechanics", McGraw Hills Inc., New York, USA, 1994.
7. Peled A., Bentur A., Fabric structure and its reinforcing efficiency in textile reinforced cement composites, *Composites, Part A Applied Science and Manufacturing (Composites: Part A)*, 34 (2), 107-118, 2003.
8. Çelik R., Farklı türde kumaş donatılı çimento esaslı kompozitlerin eğilme performanslarının karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
9. Kurt G., Lif içeriği ve su/çimento oranının fibrobetonun mekanik davranışına etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
10. Betterman L.R., Quyang C., and Shah S.P., Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar, *Advanced Cement Based Materials (Adv. Cem. Bas. Mater)*, 2, 53-61, 1995.
11. Özyurt N., Ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2000.
12. Tetta Z.C., Triantafillou T.C., Bournas D.A., On the design of shear-strengthened RC members through the use of textile reinforced mortar overlays, *Composites Part B: Engineering, (Composites, Part B)*, 147, 178-196, 2018.
13. Trapko T., Confined concrete elements with PBO-FRCM composites, *Construction and Building Materials (Constr. Build. Mater.)* 73, 332-338, 2014.
14. D'Ambrisi A., Feo L., Focacci F., Experimental analysis on bond between PBO-FRCM strengthening materials and concrete, *Composites Part B: Engineering (Composites, Part B)*, 44, (1), 524-532, 201.
15. Lignolaa G.P., Caggegi C., Ceroni F., De Santis S., Krajewski P., Lourenço P.B., Morganti M., Papanicolaou C., Pellegrino C., Prota A., Zuccarino L., Performance assessment of basalt FRCM for retrofit applications on masonry, *Composites Part B: Engineering (Composites, Part B)*, 128 (1), 1-18, 2017.
16. Donnini J., Corinaldesi V., Mechanical characterization of different FRCM systems for structural reinforcement, *Construction and Building Materials, (Constr. Build. Mater.)*, 145 (1), 565-575, 2017.
17. Younis A., Ebead U., A Study on The Bond Behavior of Different FRCM Systems, *International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*, Cape Town, South Africa, 2018
18. Donnini J., Corinaldesi V., Nanni A., Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments, *Composites Part B Engineering (Composites, Part B)* 88, 220-228, 2016.
19. ACI 239-R18, Ultra-High-Performance Concrete: An Emerging Technology Report, American Concrete Institute, Country Club Drive Farmington Hills, MI 48331, 2018.
20. Frybort S., Mauritz R., Teischinger A., Müller U., Cement bonded composites - a mechanical review, *Bio Resources*, 3 (2) 602-626, 2008.
21. Ajayi B., The Dimensional Stability and Strength Properties of Inorganic Bonded Particleboards Made From Eupatorium

- Odorata Particle, 62nd Forest Products Society Conference, St Louis, Missouri, USA, 27-35, 2008.
22. Wolfe R., Gjinolli A., Cement-bonded Wood Composites as an Engineering Material, in The Use of Recycled Wood and Paper in Building Applications, USDA Forest Service and Forest Products Society Proceedings No. 7286, 84-91, 1997.
 23. Hegger J., Voss S., Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete, Engineering Structures (Eng. Struct.), 30, 2050-2056, 2008.
 24. Peled A., Cohen Z., Pasder Y., Roye A., Gries T., Influences of textile characteristics on the tensile properties of warp knitted cement based composites, Cement and Concrete Composites (Cem. Concr. Compos), 30, 174-183, 2008.
 25. Peled A., Bentur A., Yankelevsky D., Effects of woven fabric geometry on the bonding performance of cementitious composites, Advanced Cement Based Materials (Advn. Cem. Bas. Mat.), 7, 20-27, 1998.
 26. Peled A., Sueki S., Mobasher B., Bonding in fabric -cement systems: effects of fabrication methods, Cement and Concrete Research (Cem. Concr. Res.), 36 (9), 1661-1671, 2006.
 27. Bentur, A.; Mindess, S. Fibre Reinforced Cementitious Composites; Elsevier Applied Science: London, England, 1990;
 28. Balaguru, P.N.; Shah, S.P. Fiber-Reinforced Cement Composites; McGraw-Hill: New York, USA 1992; ISBN 978-0-07-056400-8.
 29. Wang, Y. Utilization of Recycled Carpet Waste Fibers for Reinforcement of Concrete Soil. Polym Plast Technol Eng 1999, 38, 533-546, doi:10.1080/03602559909351598.
 30. Horikoshi, T.; Ogawa, A.; Saito, T.; Hoshiro, H. Properties of Polyvinylalcohol Fiber as Reinforcing Materials for Cementitious Composites, International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious, RILEM Publications SARL, 2006; pp. 145-153.
 31. Mobasher, B.; Peled, A.; Pahilajani, J. Distributed Cracking and Stiffness Degradation in Fabric-Cement Composites. Mater Struct 2007, 39, 317-331, doi:10.1007/s11527-005-9005-8.
 32. Peled, A. Pre-Tensioning of Fabrics in Cement-Based Composites. Cem Concr Res 2007, 37, 805-813, doi:10.1016/j.cemconres.2007.02.010.
 33. Peled, A.; Sueki, S.; Mobasher, B. Bonding in Fabric-Cement Systems: Effects of Fabrication Methods. Cem Concr Res 2006, 36, 1661-1671, doi:10.1016/j.cemconres.2006.05.009.
 34. Hegger, J.; Voss, S. Investigations on the Bearing Behaviour and Application Potential of Textile Reinforced Concrete. Eng Struct 2008, 30, 2050-2056, doi:10.1016/j.engstruct.2008.01.006.
 35. Cevallos, O.A.; Olivito, R.S. Effects of Fabric Parameters on the Tensile Behaviour of Sustainable Cementitious Composites. Compos Part B-Eng 2015, 69, 256-266, doi:10.1016/j.compositesb.2014.10.004.
 36. Younis, A.; Ebead, U. A Study on the Bond Behavior of Different FRCM systems. MATEC Web Conf. 2018, 199, 09003, doi:10.1051/mateconf/201819909003.
 37. Scheffler, C.; Gao, S.L.; Plonka, R.; Mäder, E.; Hempel, S.; Butler, M.; Mechtcherine, V. Interphase Modification of Alkali-Resistant Glass Fibres and Carbon Fibres for Textile Reinforced Concrete I: Fibre Properties and Durability. Compos Sci Technol 2009, 69, 531-538, doi:10.1016/j.compscitech.2008.11.027.
 38. Pakravan, H.R.; Jamshidi, M.; Latifi, M. Performance of Fibers Embedded in a Cementitious Matrix. J Appl Polym Sci 2009, NA-NA, doi:10.1002/app.31524.
 39. Tuncel E.Y.; Polat Pekmezci, I.; Pekmezci B.Y. Behavior of Textile Reinforced Lime Composites Under Flexural Loads. 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC2014) Mexico City, Mexico, 14-17 Oct 2014.
 40. Tuncel E.Y.; Polat Pekmezci I.; Pekmezci, B.Y.; Karagüzel Kayaoğlu B. Properties of Lime Based Textile Reinforced Composites. 5th International Istanbul Textile Congress, Istanbul, Turkey, 11-12 Sept 2015.
 41. Peled, A.; Bentur, A. Geometrical Characteristics and Efficiency of Textile Fabrics for Reinforcing Cement Composites. Cem Concr Res 2000, 30, 781-790, doi:10.1016/S0008-8846(00)00239-8.
 42. Raoof, S.M.; Koutas, L.N.; Bournas, D.A. Textile-Reinforced Mortar (TRM) versus Fibre-Reinforced Polymers (FRP) in Flexural Strengthening of RC Beams. Constr Build Mater 2017, 151, 279-291, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.05.023.
 43. Silva, F. de A.; Butler, M.; Hempel, S.; Toledo Filho, R.D.; Mechtcherine, V. Effects of Elevated Temperatures on the Interface Properties of Carbon Textile-Reinforced Concrete. Cem Concr Compos 2014, 48, 26-34, doi:10.1016/j.cemconcomp.2014.01.007.
 44. Hegger, J.; Molter M.; Schneider, H.N.; Schatzke, C. Fassaden aus Textilbewehrtem Beton. Betonwerk Fertigteil Tech 2001, 67, 68-72.
 45. Hegger, J.; Will N.; Voss, S.; Schneider H.N. Extrem Dünne Fassadenelemente aus Textilbewehrtem Beton. Betonwerk Fertigteil Tech 2005, 71, 56-57.
 46. Azam, R.; Soudki, K. FRCM Strengthening of Shear-Critical

- RC Beams. *J. Compos. Constr.* 2014, 18, 04014012, doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000464.
47. R Hempel; U Helbig; M Lieboldt; T Engler Innovative Composite Pipes of Plastic and Textile Reinforced Concrete. *Betonwerk Fertigteil Tech* 2006, 72, 86.
48. Novotná, M.; Kostelecká, M.; Hodková, J.; Vokáč, M. Use of Textile Reinforced Concrete - Especially for Facade Panels. *AMR* 2014, 923, 142-145, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.923.142.
49. Williams Portal, N.; Flansbjer, M.; Zandi, K.; Wlasak, L.; Malaga, K. Bending Behaviour of Novel Textile Reinforced Concrete-Foamed Concrete (TRC-FC) Sandwich Elements. *Compos Struct* 2017, 177, 104-118, doi:10.1016/j.compstruct.2017.06.051.
50. Shams, A.; Hegger, J.; Horstmann, M. An Analytical Model for Sandwich Panels Made of Textile-Reinforced Concrete. *Constr Build Mater* 2014, 64, 451-459, doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.025.
51. Colombo, I.G.; Colombo, M.; di Prisco, M. Bending Behaviour of Textile Reinforced Concrete Sandwich Beams. *Constr Build Mater* 2015, 95, 675-685, doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.169.
52. Koutas, L.N.; Bournas, D.A. Flexural Strengthening of Two-Way RC Slabs with Textile-Reinforced Mortar: Experimental Investigation and Design Equations. *J Compos Constr* 2017, 21, 04016065, doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000713.
53. Koutas, L.N.; Bournas, D.A. Out-of-Plane Strengthening of Masonry-Infilled RC Frames with Textile-Reinforced Mortar Jackets. *J Compos Constr* 2019, 23, 04018079, doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000911.
54. Shabdin, M.; Zargaran, M.; Attari, N.K.A. Experimental Diagonal Tension (Shear) Test of Un-Reinforced Masonry (URM) Walls Strengthened with Textile Reinforced Mortar (TRM). *Constr Build Mater* 2018, 164, 704-715, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.234.
55. Kariou, F.A.; Triantafyllou, S.P.; Bournas, D.A.; Koutas, L.N. Out-of-plane Response of Masonry Walls Strengthened Using Textile-Mortar System. *Constr Build Mater* 2018, 165, 769-781, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.026.
56. Babaeidarabad, S.; Arboleda, D.; Loreto, G.; Nanni, A. Shear Strengthening of Un-Reinforced Concrete Masonry Walls with Fabric-Reinforced-Cementitious-Matrix. *Constr Build Mater* 2014, 65, 243-253, doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.116.
57. Donnini, J.; Spagnuolo, S.; Corinaldesi, V. A Comparison Between the Use of FRP, FRCM and HPM for Concrete Confinement. *Compos Part B-Eng* 2019, 160, 586-594, doi:10.1016/j.compositesb.2018.12.111.
58. Voit, K.; Kirnbauer, J. Tensile Characteristics and Fracture Energy of Fiber Reinforced and Non-Reinforced Ultra High Performance Concrete (UHPC). *Int J Fract* 2014, 188, 147-157, doi:10.1007/s10704-014-9951-7.
59. Alkaysi, M.; El-Tawil, S. Factors Affecting Bond Development Between Ultra High Performance Concrete (UHPC) and Steel Bar Reinforcement. *Constr Build Mater* 2017, 144, 412-422, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.091.
60. Azizinamini, A.; Stark, M.; Roller, J.J.; Ghosh, S.K. Bond Performance of Reinforcing Bars Embedded in High-Strength Concrete. *ACI Struct J* 1993, 90, doi:10.14359/3951.
61. Shih-Ho Chao; Antoine E. Naaman; Gustavo J. Parra-Montesinos Bond Behavior of Reinforcing Bars in Tensile Strain-Hardening Fiber-Reinforced Cement Composites. *ACI Struct J* 2009, 106, 897.
62. Preinstorfer, P.; Kromoser, B.; Kollegger, J. Flexural Behaviour of Filigree Slab Elements Made of Carbon Reinforced UHPC. *Constr Build Mater* 2019, 199, 416-423, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.027.
63. Arora, A.; Aguayo, M.; Hansen, H.; Castro, C.; Federspiel, E.; Mobasher, B.; Neithalath, N. Microstructural Packing- and Rheology-Based Binder Selection and Characterization for Ultra-High Performance Concrete (UHPC). *Cem Concr Res* 2018, 103, 179-190, doi:10.1016/j.cemconres.2017.10.013.
64. Arora, A.; Almujaiddi, A.; Kianmofrad, F.; Mobasher, B.; Neithalath, N. Material Design of Economical Ultra-High Performance Concrete (UHPC) and Evaluation of Their Properties. *Cem Concr Res* 2019, 104, 103346, doi:10.1016/j.cemconcomp.2019.103346.
65. Ford, E.; Arora, A.; Mobasher, B.; Hoover, C.G.; Neithalath, N. Elucidating the Nano-Mechanical Behavior of Multi-Component Binders for Ultra-High Performance Concrete. *Constr Build Mater* 2020, 243, 118214, doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118214.
66. 232-TDT: Test Methods and Design of Textile Reinforced Concrete; RILEM Technical Committee, 2014.
67. AC434: Acceptance Criteria for Masonry and Concrete Strengthening Using Fiber-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composite Systems; ICC-Evaluation Service: Whittier, CA, USA, 2013.
68. De Santis, S.; de Felice, G. Tensile Behaviour of Mortar-Based Composites for Externally Bonded Reinforcement Systems. *Compos Part B-Eng* 2015, 68, 401-413, doi:10.1016/j.compositesb.2014.09.011.