

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

FRP MALZEMELERDE DURABİLİTE

Dilara ÖZŞENOL

Bölümü : **İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : **Yard. Doç. Dr. Ferhat AYDIN**

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

FRP MALZEMELERDE DURABİLİTE

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ PROJESİ

Dilara ÖZŞENOL

Bölümü : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MÜHENDİSLİK YÖNETİMİ

Bu tez 17 / 12 /2014 tarihinde aşağıdaki öğretim üyesi tarafından kabul edilmiştir.

.....
Yard.Doç.Dr.FerhatAydın

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER LİSTESİ	iv
ÖZET	ix
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	10
BÖLÜM 2. FRP MALZEMELER	15
2.1. FRP	15
2.2. FRP Malzemelerin Tarihçesi	17
BÖLÜM 3. MALZEMELERDE DURABİLİTE	43
3.1. Beton Malzemesinde Durabilite.....	43
BÖLÜM 4: FRP MALZEMELERDE DURABİLİTE	55
BÖLÜM 5: SONUÇ VE ÖNERİLER	78
KAYNAKLAR	80
[17] Yanchun Yun, Yu-Fei Wu Department of Building and Construction, City University of Hong Kong, Hong Kong	82
[18] Michael J. Chajes, Theodore A. Thomson, Jr. and Cory A. Farschman Department of Civil Engineering, University of Delaware, 137 DuPont Hall, Newark, DE 19716, USA Received 1 August 1994; revised 5 November 1994; accepted 21 November 1994	82
[19] Francesco Micelli , Antonio Nanni Innovation Engineering Department, University of Lecce, Via per Monteroni, 73100 Lecce, Italy Center for Infrastructure Engineering Studies, The University of Missouri–Rolla, 218 Engineering Research Lab, Rolla, MO 65409-0710, USA Received 17 July 2003; received in revised form 1 April 2004; accepted 2 April 2004 Available online 10 June 2004	82
[20] J.R. Cromwell , K.A. Harries , B.M. Shahrooz THP Limited, Cincinnati, United States Department of Civil and Environmental Engineering, University of Pittsburgh, United States School of Advanced Structures, University of Cincinnati, United States	82
[21] Saud Aldajah, Ghydaa Alawsi, Safaa Abdul Rahmaan United Arab Emirates University, Al-Ain, United Arab Emirates University of Technology, Baghdad, Iraq.....	82
[22] Hyeong-Yeol Kim , Young-Hwan Park , Young-Jun You , Chang-Kwon Moon Structure Research Department, Korea Institute of Construction Technology, 2311 Daewha-Dong Ilsan-Gu Goyang, Gyeonggi-Do 411-712, Republic of Korea Department of Materials Science	

and Engineering, Pukyoung National University, 100 Yongdang-Dong, Busan 608-739,
Republic of Korea Available online 20 March 2007..... 82

ÖZGEÇMİŞ**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1: Lif Matris Ara Yüzeyi

Şekil 2: Pultrüzyon yöntemiyle üretilen lif takviyeli kompozitler

Şekil 3: FRP kompozit malzemelerinin, nervürlü inşaat çeliğine ait tipik gerilme ve deformasyon grafiği

Şekil 4: sargılanmamış ve sargılanmış betonarme elemanların gerilme ve deformasyon ilişkileri grafiği

Şekil 5: 1945 yılına ait FRP ile yapılmış radar örnekleri

Şekil 6: 35 yıldır kullanılmakta olan bir GFRP kapak, Japonya

Şekil 7: 1974 Mandial House, Londra, İngiltere; betonarme iskelete FRP giydirmeye yapılmış

Şekil 8: American Express Binası, taşıyıcı sisteminde GFRP kompozitler kullanılmıştır

Şekil 9: FRP kullanılarak farklı şekilde yapılmış çatı örneği

Şekil 10: 2000 yılında inşaa edilen Milenyum Kubbesi, tamamı FRP yapı

Şekil 11: 1975 yılında İsrail de inşa edilen ilk FRP yaya köprüsü

Şekil 12: En geniş açıklıklı GFRP köprü, 1992, İskoçya

Şekil 13: 1994 yılında inşa edilen GFRP aç-kapa köprüsü

Şekil 14: İsviçre’de 1996’ da inşa edilen GFRP kabloların denendiği ilk asma köprü

Şekil 15: Korozyona uğramış çelik profiller FRP ile değiştirilmiş

Şekil 16: Japonya’nın ilk FRP köprüsü

Şekil 17: Sandviç döşeme sistemi, GFRP

Şekil 18: 1872 yılında yapılan, korozyona uğramış çelik köprü sökülüp, FRP kompozit aç-kapa köprü yerleştirilmiştir

Şekil 19: Dr. Dan Richards tarafından geliştirilen kompozit tabliye üretim yöntemi

Şekil 20: Vakum infüzyon yöntemi ile üretilen ilk FRP kompozit köprü

2008, Lancashire, İngiltere

Şekil 21: İngiltere’de ilk FRP tabliyeli taşıt köprüsü

Şekil 22: Almanya’da çok hücreli GFRP tabliye veçelik kompozit köprü

Şekil 23: GFRP ile ilk karayolu uygulaması

Şekil 24: Dünyanın en uzun monolitik FRP köprü kirişi

Şekil 25: Eski köprülerden bazıları, kemer kompozit köprülerle yeniden yapılmıştır

Şekil 26: Aşınmaya uğramış beton örneği

Şekil 27: Çevresel etkilere maruz kalmış beton örneği

Şekil 28: Çevresel etkilere maruz kalmış beton

Şekil 29: Nemden etkilenmiş beton yol örneği

Şekil 30: Korozyon tehlikesi, betona etkileri

Şekil 31: Korozyon etkisiyle yıpranmış çelik köprü

Şekil 32: Kiriş elemanında korozyondan kaynaklı deformasyon

Şekil 33: Deniz suyu etkisinden, hasara uğramış, betonarme yapı

Şekil 34: Dış etkilerden hasara uğramış betonarme köprü ayağı

Şekil 35: GFRP çubukların solisyonlara maruz kalmadan önce ve

Gömülü GFRP çubuklar, normal betondan ayrıldıktan sonra

Gömülü GFRP çubukları yüksek dayamalı betondan ayrıldıktan sonra

Şekil 36: GFRP çubuklar için tipik hata modu

Şekil 37: Kısa çekme testinde GFRP numunelerin tipik hata modu

Şekil 38 : Çekilme testinden sonra numuneler

Şekil 39: CSR için GFRP laminatların sünme ve yorulma testleri sonucu kırılma görüntüleri

Şekil 40: a) Pull-off numuneler için kalıplar içine beton dökülmesi

b) Pull-off numuneler için beton blokların dökümünün tamamlanması

c) Islak turnike kumaş üzerine uygun şekilde hazırlanan betonun yüzeye uygulanması

d) Şerit halinde uygun hazırlanmış yüzeyi beton yüzeyine uygun yapıştırma ile uygulanması

e) Basınç uygulanarak FRP şerit beton yüzeyine yapıştırılmıştır

Şekil 41: a) Beton örneği içindeki örnek gösteriyorki iyi başarıda değil

b)Tipik pull-off örneği gösteriyor ki, kırılma modu üst ince tabakada betonun bir sonraki birleşme hattında

c)Tipik pull-off örneği gösteriyor ki hata yapıştırıcı bağ hattında

d)Pull-off örneklerinde interlaminer yetmezliği sistem 100 kere tuzlu suya maruz kalınca oluşur

Şekil 42: İzolasyonlu daldırılmış çubuk sonunda

Şekil 43: FRP demiri hazırlanması için pultrüzyon proses

Şekil 44: DIC ve pull-off test mekanizması

Şekil 45: Test mekanizması

Şekil 46: Test Mekanizması

Şekil 47: 60 °C de 42 gün bekletilmiş numuneler, testten önce

Şekil 48: FRP çubuklar alkali ortam

Şekil 49: Test mekanizmaları

Şekil 50: CFRP plaka çekme test sonuçları , normalize sonuçlar

Şekil 51: Uygulanan sistem

Şekil 52: Musluk suyu ve deniz suyu etkisi

Şekil 53: Ara yüzey kayma testi mekanizması

Şekil 54: İki farklı numune fotoğrafları

Şekil 55: Örnek G2 SEM görüntüsü (a) koşulsuz ve (b) 60 gün süreyle 40 ° C sıcaklıkta alkalin çözeltisi içinde daldırıldı

Şekil 56: Gerilme mukavemetindeki tüm boy örneklerin muhafaza durumu a) su; b) NaCl çözeltisi c) Alkalın çözeltisi ve d) donma-çözünme döngüsü

ÖZET

Anahtar kelimeler: FRP malzeme, Durabilite

Günümüzdeki teknoloji, bilinçlenme ve doğal kaynakların hızlı tüketiminden meydana gelen değişim ile birlikte, biz mühendisler ve kimyagerler değişen çevre şartlarına (asit yağmuru, çok daha kuvvetli fırtınalar gibi) daha uyumlu olan yeni yapı elemanları arayışına koyulduk. Bu sebeple de hem dayanımı hem dayanıklılığı yüksek ürünler tasarlayıp, üretip, kullanmaya başladık. Bunlardan en önemlisi FRP veya GFRP malzemedir. Bu malzemenin çeliğe oranla, asit erozyonuna ve korozyona çok daha dayanıklı olduğu, çekme dayanımının normal şartar altında çok daha yüksek olduğu yapılan araştırmalar sonucunda belirlenmiştir. Malzemenin kullanımında üretim tekniğinin, kullanılacak bağlayıcının, betonarme yapının güçlendirilmesinde de eski betonla uyumunun oldukça önemli ve durabilite ve dayanımını oldukça etkileyen unsurlar olduğu unutulmamalıdır.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Yapı malzemesi olarak, yüzyıllarca *ahşap* kullanılmıştır, fakat ahşap sürekli bakım gerektiren bir malzemedir. Bu yüzden uzun vadede ekonomik açıdan olumsuzdur. Daha sonra beton ve çeliğin birleşiminden oluşan *betonarme* yapılarda kullanılmaya başlanmıştır, bu malzemenin de belli süreler içinde bakım yapılması gerekmektedir. Ayrıca durabilite problemleri olan ve zaman içinde taşıyıcılık özelliklerini kaybetmesi nedeniyle onarım, güçlendirme veya yeniden yapım isteyen; orta vadede ekonomik, uzun vadede ekonomik olmayan bir malzemedir. Betonarmeden daha sonra kullanılmaya başlanan ve çok daha yüksek yapılar, dayanıklı köprüler, geniş açıklıklar geçmemizi sağlayan bir başka malzeme ise *çelik* olmuştur. Çeliğin dezavantajı ise korozyona karşı sürekli bir korunma istemesi ve yangına karşı dayanıksızlığıdır. Ayrıca hem bakım istemesi hem de betonarmeye oranla çok daha yüksek ilk maliyetli olması sebebiyle, özel yapılar haricinde çok tercih edilmemektedir.

Şimdilerde çeliğe alternatif olarak kullanımı yaygınlaşan, diğer malzemelere kıyasla yeni bir malzeme daha vardır: *Fibre Reinforced Polimers (FRP)*.

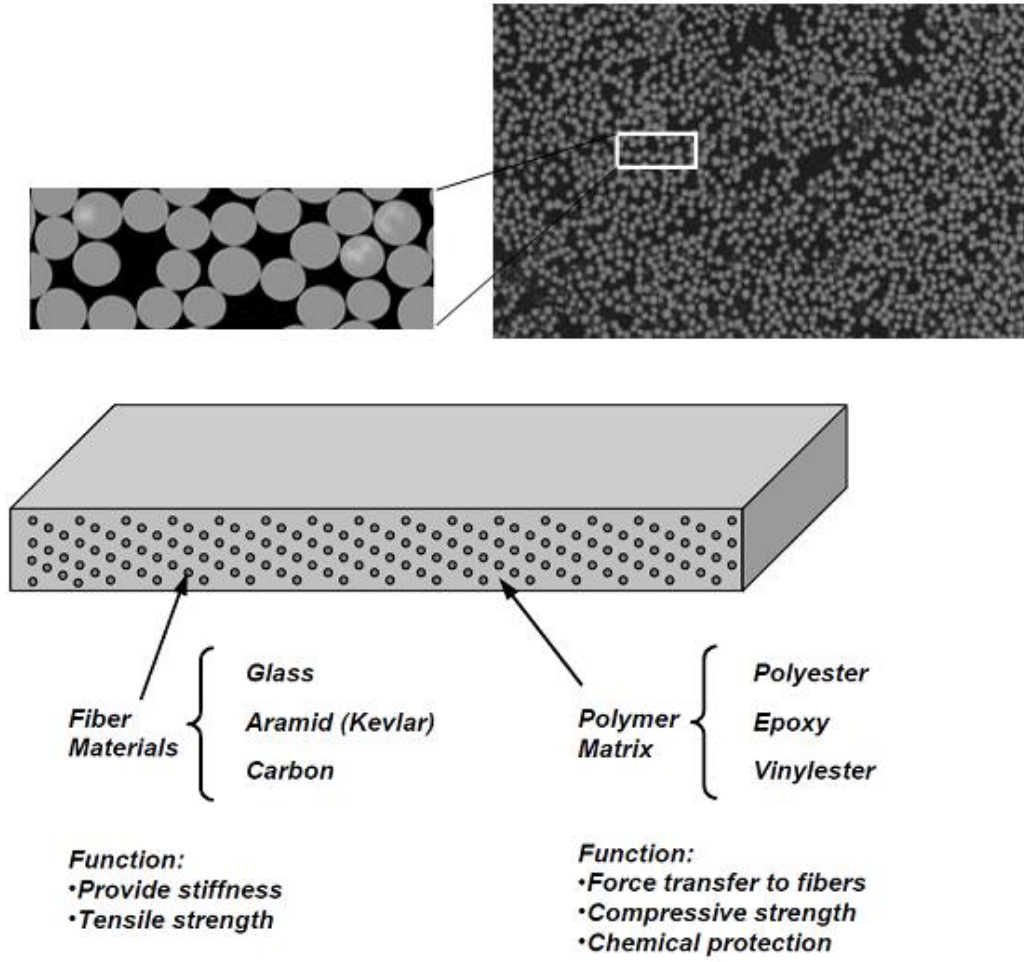
Bu malzemenin diğer malzemelere kıyasla tercih edilmesini sağlayacak özelliklerinden en önemlileri; dayanıklılığı, dayanımı, uzun vadede ekonomik olmasıdır.

Bizim burada özellikle üzerinde duracağımız konu, FRP malzemelerin durabilitesidir.

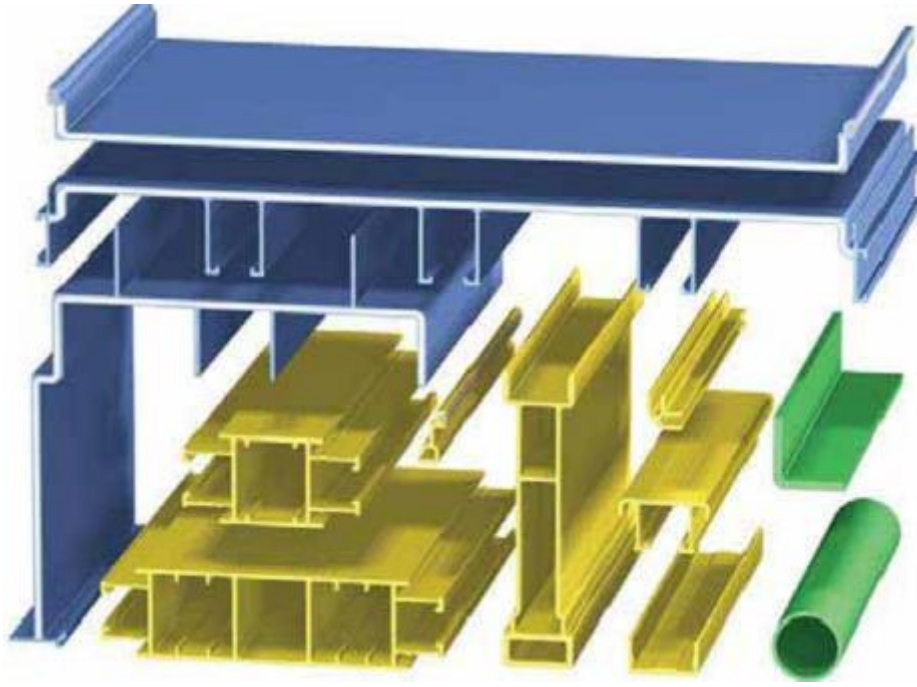
Yapı malzemelerinin ve yapıların işlevlerini servis ömürleri boyunca bozulmadan yerine getirmelerine durabilite, dayanıklılık veya kalıcılık adı verilir.

FRP malzemelerin, asit ortam karşısında, tuzlu suda, korozyon karşısında, donma-çözülme etkisinde vs. çekme ve basınç dayanımını ne kadar koruduğunu; yani durabilitesini, karşılaştırmalı olarak, çeşitli deneylerin sonuçlarından yararlanarak, ortaya koyacağız.

FRP malzemenin, betonla aderansı da dikkete alınarak, gelecekte çelik yerine, donatı olarak kullanılıp, kullanılamayacağı, çeliğe üstün yönleri, yapı malzemesi olarak geleceğin malzemesi olup olmadığını, özelde durabilitesi üzerinden ortaya koyacağımız bir çalışma oluşturulmuştur.



Şekil 1: Lif Matris Ara Yüzeyi



Şekil 2: Pultrüzyon yöntemiyle üretilen lif takviyeli kompozitler

Poros Köprüsü, Yunanistan ; Köprü kirişlerinin güçlendirilmesi



Olimpiyat Stadyumu, Atina; Kolon ve kirişlerin güçlendirilmesi



Telekominikasyon Binası, Kıbrıs; Kolon, kiriş ve döşemelerin, statik ve dinamik güçlere karşı 3-4 kat güçlendirilmesi



BÖLÜM 2. FRP MALZEMELER

2.1. FRP

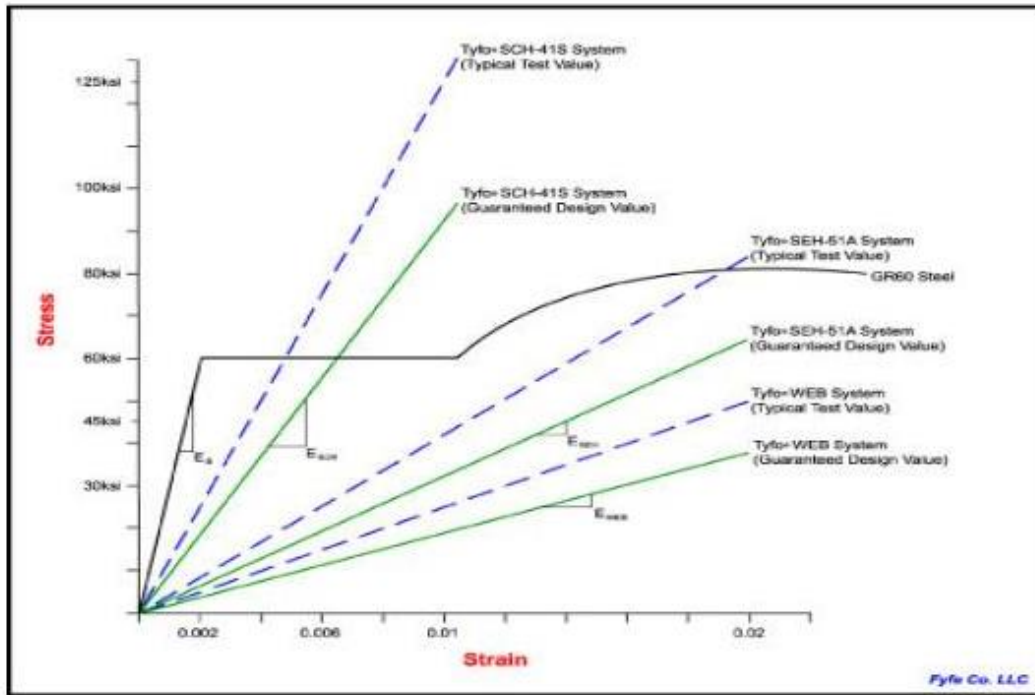
İngilizce Fiber Reinforced Polymers – FRPs kelimelerinin kısaltılması ile dilimize Türkçe lifli polimer olarak geçen ve son yıllarda yurtiçi ve yurtdışında giderek kullanılan yapısal güçlendirme malzemesidir.

FRP kompozit güçlendirme sistemi betonarme, beton, tuğla, taş, ahşap, çelik bütün yapı elemanlarına dıştan rahatlıkla uygulanan yapısal güçlendirme malzemesidir. frp sistemleri; karbon, aramid, kevlar, cam ve bazalt gibi yüksek fiziksel özellikleri olan malzemelerden üretilen kompozit sistemlerdir.Çeşitli epoksilerle kompozit hale getirilirler. Betonarme de kompozit bir sistemdir; farklı fiziksel özelliği olan beton ve demir donatısının muhteşem iş birliğidir. Kompozit FRP malzemeleri çok hafif ve fakat çok iyi fiziksel özelliklere, çok yüksek mekanik dayanımlara ve anti korozyon özelliklere sahiptirler.

FRP malzeme temel olarak kalıp görevi gören reçine içine gömülmüş sürekli veya kırılmış elyaflardan oluşmaktadır ve çeşitli üretim metotları kullanılarak üretilmektedir. Bu metotlardan Pultrüzyon metodu, FRP kalıplamasında, özellikle inşaat sektöründe hem ana malzeme hem de tamamlayıcı malzeme olarak kullanılan profil türündeki ürünlerin yapımında kullanılmaktadır. FRP malzemenin üstün mekanik dayanımının yanı sıra, hafifliği, korozyon dayanımı ve kimyasallara karşı yüksek direnç göstermesi, elektrik yalıtımı, düşük yoğunluk ve dayanım/yoğunluk oranının yüksekliği, düşük ısı iletkenliğine sahip olması, uzun yıllar bakım ve boya gibi ek bir hizmete ihtiyaç duymaması, elektromanyetik alan oluşturmaması nedeni ile radyo ve mikro dalga frekanslarını etkilememesi v.b. özellikler FRP profilleri inşaat sektöründe birçok malzemenin alternatifi olma yönünde hızla ilerlemektedir. Halen inşaat sektöründe hem ana malzeme hem de tamamlayıcı malzeme olarak

kullanılmakta olan FRP ile yapılmış az sayıda yapı örnekleri bulunmaktadır. FRP'ler strüktürel malzeme olarak inşaat sektörüne yeterince girememiştir.

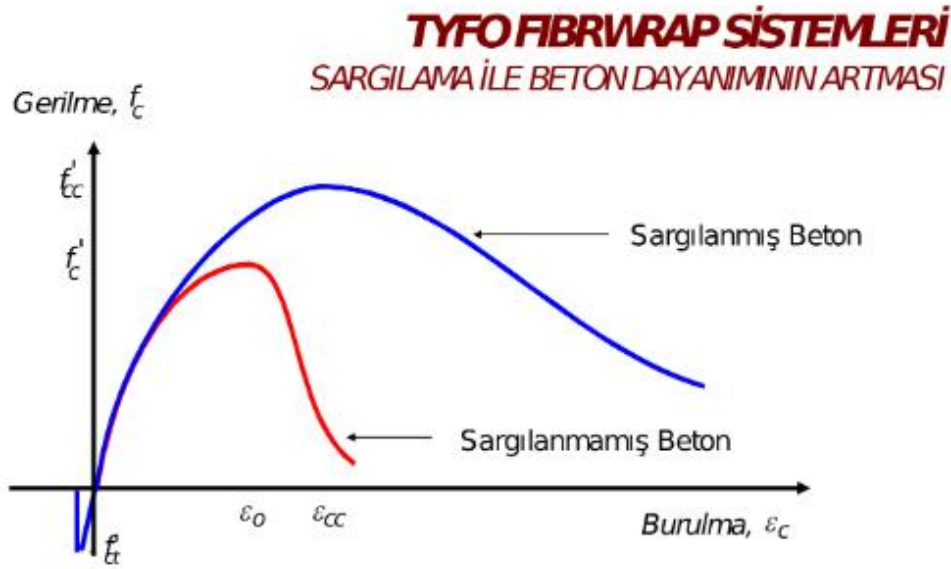
FRP kompozit malzemeler tek ve çift yönlü şeritler (plaka) ve kumaşlar (fabrik), ankrajlar ve çubuklar olarak üretilebilmektedir. Epoksi, fiber matrisinden oluşan CFRP plakalar (Karbon Fiberle Güçlendirilmiş Polymerler) çelik plakaları her türlü fiziki değerlerde geride bırakmaktadır. Düşük sünme ve uzama gösterir ve çeliğe kıyasla hafif ve fakat çekme dayanımı 5-10 kat daha fazladır. FRP kompozit malzemelerinin, nervürlü inşaat çeliğine ait tipik gerilme ve deformasyon grafiği üzerindeki gerilme ve deformasyon ilişkileri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Cam esaslı FRP malzemeler çeliğe yakın değerler verirken karbon esaslı FRP malzemeler çeliğin çok üzerinde değerler vermektedir.



Şekil 3: FRP kompozit malzemelerinin, nervürlü inşaat çeliğine ait tipik gerilme ve deformasyon grafiği

Harici yapıştırırmalı kompozit sistemler, yapı elemanlarının yük taşıma kapasitesini ve eğilme dayanımını artırır. Yükler epoksi reçine yapıştırıcısı vasıtasıyla kompozite aktarılır ,böylelikle üniform bir yük aktarımı sağlanır.

FRP kompozitlerle takviye edilen betonarme elemanlardaki kapasite artışları çok yüksektir. Aşağıdaki şekillerde; sargılanmamış ve sargılanmış betonarme elemanların gerilme ve deformasyon ilişkileri grafiklerle gösterilmiştir:



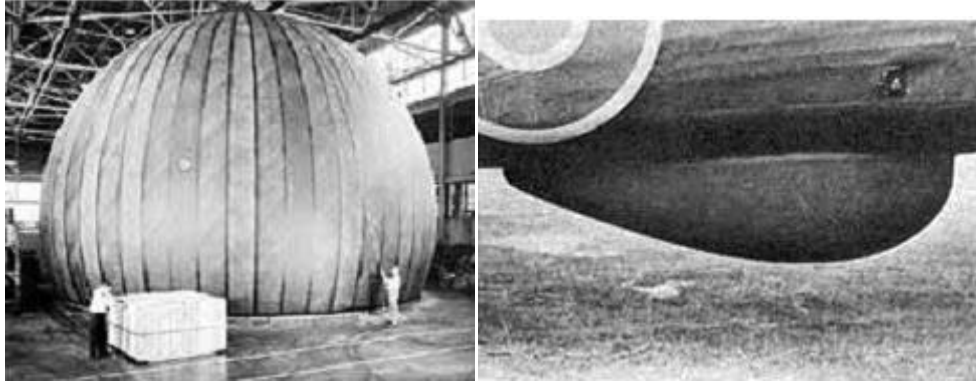
Şekil 4: sargılanmamış ve sargılanmış betonarme elemanların gerilme ve deformasyon ilişkileri grafiği

2.2. FRP Malzemelerin Tarihçesi

İlk modern sentetik plastiklerin 1900'lerin başlarında geliştirilmesinin ardından, 1930'ların sonunda plastik malzemelerin özellikleri diğer malzeme çeşitleri ile boy ölçüşür düzeye gelmiştir. Bir çok üstün özelliklerinin yanı sıra sertlik ve dayanıklılık özelliklerinin düşük olması plastik malzemelerin güçlendirilmesi için çalışmalar yapılmasına neden olmuştur. Bu eksikliğin giderilmesi amacıyla 1950'lerde polimer esaslı kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Bu gelişmelere bağlı olarak değişik türde matris ve takviye elemanı kullanılarak farklı yapıda kompozitler üretilmiştir. En çok kullanılan kompozit malzeme kombinasyonları; cam elyaf + polyester, karbon elyaf + epoksi ve aramid elyafı + epoksi bileşenleri olmuştur.

1945: radarlar

Cam lifi takviyeli polimer kompozitler İkinci dünya savaşında kullanılan radarların (radomes) üretiminde radyo dalgalarını geçirebilme özelliği nedeniyle kullanılmıştır. Böylece alıcı ve vericiler olumsuz hava koşullarından etkilenmeden işlev görmüştür.



Şekil 5: 1945 yılına ait FRP ile yapılmış radar örnekleri

1950 ve 60'lı yıllarda FRP üretimine yönelik ilkel yöntemlerle yapılan çalışmalar kompozitin temel prensipleri tam olarak anlayamadığı ve üretim- kütleme teknikleri yeni geliştiği için istisnalar dışında genelde başarısızlıkla sonuçlanmıştır.



Şekil 6: 35 yıldır kullanılmakta olan bir GFRP kapak, Japonya

1970'lerde FRP kompozitlerin yapımalzemesi olarak tasarımda kullanımının ilk başarılı örnekleri görülmüştür. Daha organize ve büyük ölçekli firmalar fabrikasyon yöntemlerle FRP kompozitleri üretmeye başlamıştır. Bu fabrikalarda yük taşımayan veya yarıyük taşıyan panel FRP elemanlar üretilmiştir.

1974 Mandial House, Londra, İngiltere Betonarme iskelete **FRP giydirmce cephe kaplaması** yapılmıştır. Kullanılan lif cam lifi, matris ise doymamış polyester reçinesidir. Yangına dayanıklılık için polyestere kaplama yapılmıştır. Ayrıca nem difüzyonunu engelleyici bir kaplama daha bulunmaktadır (isophthalic polyester gel-coat 65PA). Panellerin üretiminde yaş yayma yöntemi (wet lay-up process) kullanılmıştır. Eski adı "hand lay-up" Serme işleminde lifler şaşırtmalı yönlendirilerek yerleştirilmiştir.



Şekil 7: 1974 Mandial House, Londra, İngiltere; betonarme iskelete FRP giydirmce yapılmış

1977: Amex House in Brighton, İngiltere

American Express Binasının taşıyıcı sisteminde GFRP kompozitler kullanılmıştır. Betonarme kolon kiriş sisteminde ana kirişlere ilave olarak 7.2 m ve 12.5 m açıklık için GFRP'den üretilen panellerle kirişler ilave edilmiştir. Bu kirişler her katta 2 metre yüksekliğindeki cam dış cephe kaplamasının yükünü kolonlara aktarmaktadır. GFRP kompozitlerin ilk yarı-yapısal uygulaması olarak gösterilmektedir. Bina ekonomik ömrünü 2016'da tamamlayacaktır. Panellerin üretiminde yaş yayma yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 8: American Express Binası, taşıyıcı sisteminde GFRP kompozitler kullanılmıştır

1980'lere gelindiğinde zor koşullarda performansını koruyacak İnşaat Mühendisliği kompozit uygulamalarında FRP kullanımı gündeme gelmiştir.

Ayrıca FRP kompozitlere farklı şekiller verilebilmesi nedeniyle çatı kaplama elemanı olarak kullanılmaktadır. Geometrik yapı modifiye edilerek çatı yükü daha da azaltılabilmektedir.



Şekil 9: FRP kullanılarak farklı şekilde yapılmış çatı örneği

2000 yılı Milenyum kubbesi, Londra sergisinde inşaa edilen iki adet FRP yapı binalarıdır. Home planette 36 metre açıklığa sahip kar ve rüzgar yükü hesabı yapılmış, modellenmiş kabuk yapı bulunmaktadır. Gelecekte okul, işyeri, endüstriyel tesis, sergi yapısı gibi amaçlara yönelik kullanılabilir.



Şekil 10: 2000 yılında inşaa edilen Milenyum Kubbesi, tamamı FRP yapı

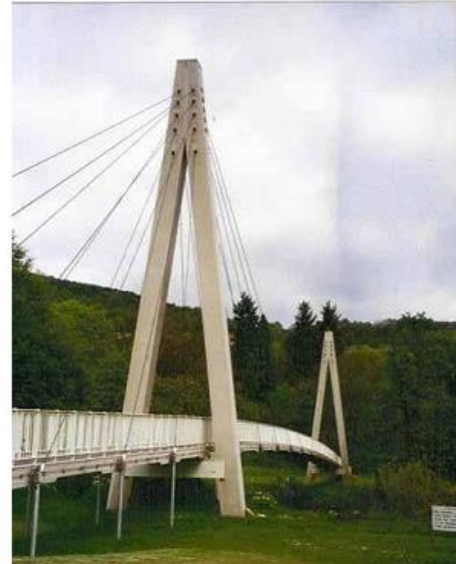
İlk FRP yaya köprüsü 1975 yılında Tel Aviv,İsrail'de inşaa edilmiştir. Pultrüzyon yöntemi ile üretilen FRP yapı elemanları kullanılarak çok sayıda yaya köprüsü üretilmiştir. Hafifliği, kolay taşınmasıve hızlı montajı en önemli avantajlarıdır.

Parçalar ayrı ayrı veya tüm köprü fabrikada kurulup bir helikopter yardımı ile yol olmayan noktalara taşınabilmektedir.



Şekil 11: 1975 yılında İsrail de inşa edilen ilk FRP yaya köprüsü

1992: İlk ve en geniş açıklığa sahip (113 m) GFRP beton köprü Aberfeldy, İskoçya'da yapılmıştır. Döşeme ve kablo bağlantı direkleri tamamen geçmeli kompozit plakalardan oluşturulmuştur (ACCS Plank). Halen servistedir.



Şekil 12: En geniş açıklıklı GFRP köprü, 1992, İskoçya

1994 yılında inşa edilen Bonds Mill aç-kapa köprüsü (İngiltere).

8.5 m açıklık

4.25 m genişlik ve

4.5 tonağırlığındadır.

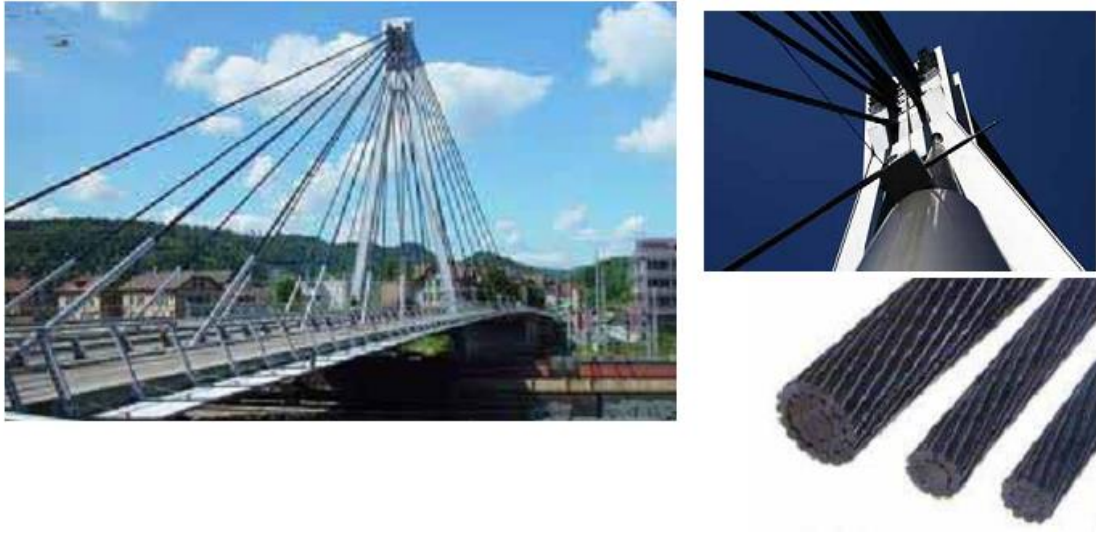
Bonds Mill aç-kapa köprüsünün döşemesi üç boyutlu hücreli yapılı geçmeli GFRP kompozitlerden inşa edilmiştir (pultrüzyonla fabrikada üretilen parçalar). Geçmeli parçalar soğuk kürlenmiş epoksi yapıştırıcılarla bağlanmıştır. Malzemelerin taşınması ve montaj küçük kapasiteli araçlarla yapılmıştır.

44 tona kadar yüklü araçların geçmesi dikkate alınarak tasarlanmıştır.



Şekil 13: 1994 yılında inşa edilen GFRP aç-kapa köprüsü

1996, Stork köprüsü, İsviçre: CFRP kabloların denendiği ilk asma araç köprüsüdür. 61 ve 63 metrelik iki açıklığı olan köprüde 24 kablonun 2 tanesi karbon liften imal, diğerleri ise çeliktir. Karbon lif kabloların uzun dönemli performansı burada izlenerek güvenilirlikleri test edilmektedir. Karbon kabloların hafif olması, korozyona uğramaması ve teorik yorulma dayanımlarının çok yüksek olması avantajlarıdır. Ancak kabloların ankraj detaylarına dikkat edilmelidir.



Şekil 14: İsviçre'de 1996'da inşa edilen GFRP kabloların denendiği ilk asma köprü

2001, Sugar Grove, Virginia: Korozyona uğramış çelik profil kirişler 8 adet FRP kirişle değiştirilmiştir. Köprü iki şeritlidir.



203mm x 152mm ve 914mm x 457mm boyutlarında iki tür kiriş kullanılmaktadır.

Şekil 15: Korozyona uğramış çelik profiller FRP ile değiştirilmiştir

2001 Japonya'nın ilk FRP köprü uygulaması (yüksek maliyet)

2 açıklıklı 37m (20+17 m) GFRP kirişler

Japonya Okinawa'da okyanus kıyısında yol üzerinde yaya köprüsü
Çelik ve betonarme yaya köprülerine bu derece kuvvetli etkide korozyona dayanıklılık problemleri var. Alternatif olabilir mi?

Tasarım yükleri:

Sabit: 350 kg/m² , hareketli 500 kg/m²

Rüzgar: 52 m/s

Deprem: yatay sismik katsayı ,0.18



2001 Japonya'nın ilk FRP köprü uygulaması

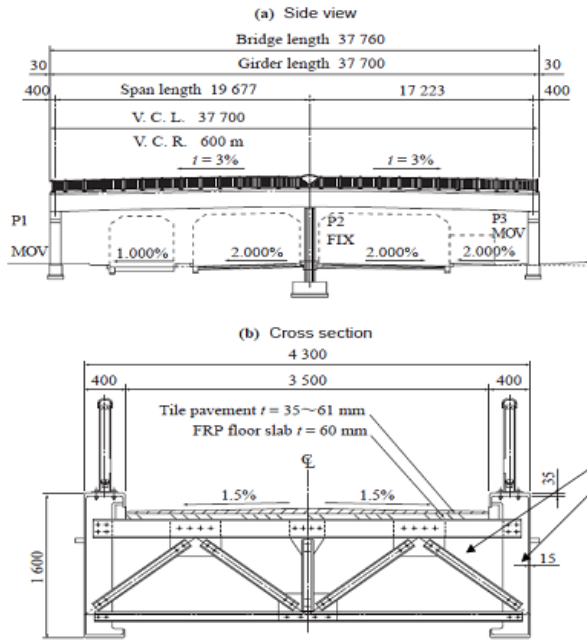
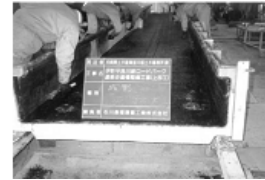
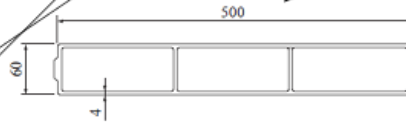


Fig. 1 General arrangement (unit : mm)

Table 1 Materials' physical properties

Item	Unit	Hand lay-up formed material		Drawn formed material
		Main girder	Stiffener	
Tensile strength	MPa	130	200	300
Bending strength	MPa	130	200	—
Compressive strength	MPa	130	200	240
Shear strength	MPa	50	50	50
Bearing strength	MPa	195	300	450
Tensile modulus	GPa	12	12	20
Flexural modulus	GPa	12	12	20
Coefficient of linear expansion	$^{\circ}\text{C}$	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}
Density	t/m^3	1.7	1.7	1.9

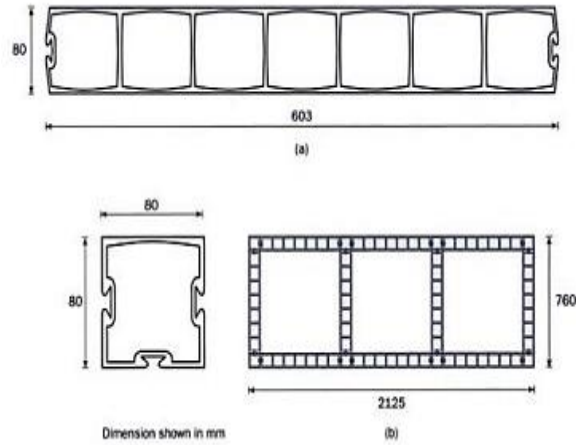


99

Şekil 16: Japonya'nın ilk FRP köprüsü

2003, Fredrikstad, Norveç:

İskandinavya'nın en büyük hareketli köprüsüdür. Aç-kapa (baskül) FRP kompozit yaya köprüsü 28x2=56 m açıklık. Tüm ekipman 20 ton, kullanılan FRP malzeme ağırlığı 4.5 ton Sandviç döşeme sisteminde CFRP laminelerin arasında balza ahşabından çekirdek doldurulmuş. Isıtma kabloları ile kışın buz tutma engelleniyor. Yaya köprüsü ancak 2 ton dingil yükünü taşıyabilecek şekilde tasarlanmış.



Şekil 17: Sandviç döşeme sistemi, GFRP

2006, New Chamberlain Bridge, Bridgetown, Barbados:

1872 yılında yapılan çelik köprü sökülüp yerine ekstrüzyon FRP kompozit aç-kapa köprü monte edilmiştir. Bonds köprüsü (COMPOSOLITE) ile aynı proje kullanılmıştır.

2.13 m' ye 4 m boyutlarındadır.

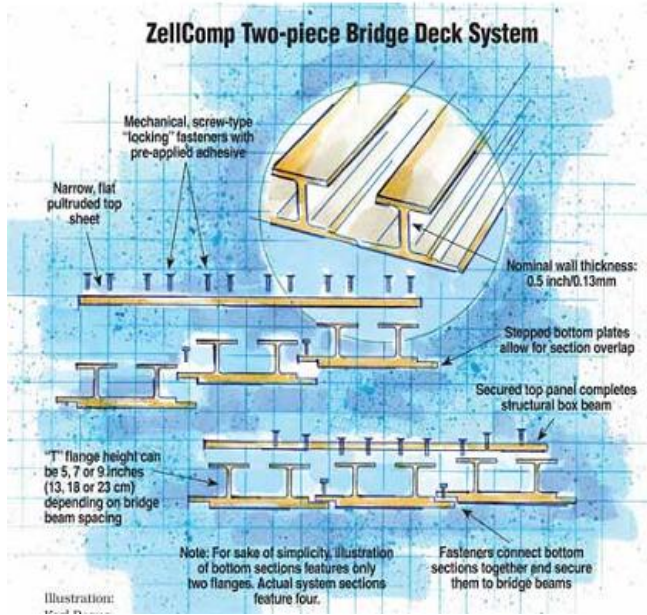
Komagari barajı FRP hidrolik kanal kapakları,

Korozyona dirençli



Şekil 18: 1872 yılında yapılan, korozyona uğramış çelik köprü sökülüp, FRP kompozit aç-kapa köprü yerleştirilmiştir

Emekli uzay mühendisi Dr. Dan Richards tarafından geliştirilen bir kompozit tabliye üretim yöntemidir. Kompozit FRP köprü pultrüzyon ve döşeme bağlantıları patentli bir sistemle tanımlanmıştır (2002). Kuzey Karolayna Laboratuvarlarında prototip testleri yapılmış ve 2006'da ilk imalat gerçekleştirilmiştir.



107

Şekil 19: Dr. Dan Richards tarafından geliştirilen kompozit tabliye üretim yöntemi

2008, Rusya: Rusya'da vakum infüzyon yöntemi ile üretilen ilk FRP kompozit köprüdür.

22.6 metre uzunluğunda ve 2.8 metre genişliğindedir. Köprü ağırlığı ise 5.5 tondur.

100 yıl servis ömrü hedeflenmektedir.



Şekil 20: Vakum infüzyon yöntemi ile üretilen ilk FRP kompozit köprü

2008, Lancashire, İngiltere

İngiltere'de ilk FRP tabliyeli taşıt köprüsüdür (tren yoluna çevrilmiştir).

10 metrelik açıklık

20 tonluk GFRP tabliye ile geçilmiştir.

E-cam lif ve UV dirençli polimer reçine kullanılmıştır.



Şekil 21: İngiltere'de ilk FRP tabliyeli taşıt köprüsü

2008, Almanya, Frankfurt

27 metre uzunluğunda,

5 metre genişliğinde,
80 ton ağırlığında çok hücreli GFRP tabliye (pultrüzyon profiller) ve çelik kompozit köprü.



Şekil 22: Almanya'da çok hücreli GFRP tabliye ve çelik kompozit köprü

2009: Kaliforniya Karayolları Bölümü (Cal Trans) San Francisco-Oakland Körfez köprüsünde köprüyü karaya bağlayan 100 metrelik kısımda **vakum infüzyonu yöntemi ile üretilen tabliyeleri eski betonarme tabliyelerle değiştirerek** pilot bir uygulama başlatmıştır. Değiştirilen kısım sürekli kontrol altında tutularak performansı izlenmektedir. Yüksek hacimli vakum infiltrasyonu vinil ester reçinesi kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 23: GFRP ile ilk karayolu uygulaması

Dünyanın en uzun monolitik FRP köprü kirişi, Madrit, İspanya, 2010

Bu yaya köprüsü betonarme veya çelikten yapılmış olsaydı, aynı taşıma kapasitesi için; gerekli kiriş ağırlığı 50 ton iken, CFRP kompozitle üretilen kiriş 25 ton gelmiştir. Köprünün montajı 75 ton kapasiteli bir vinçle 2 saatte tamamlanmıştır. Betonarme veya çelikten yapılmış olsaydı daha yüksek kapasiteli bir vinç ve daha uzun süre gerekecekti.



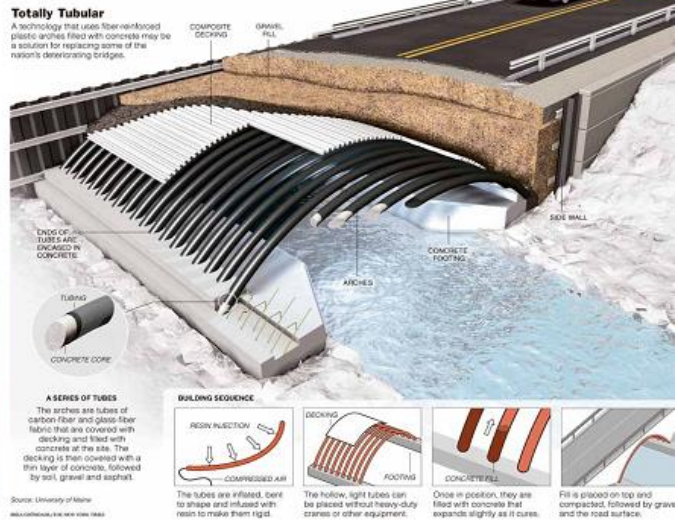
44m uzunluk, 3.5m genişlikte tek parça köprü kirişinin üretiminde 12 ton karbon lif kullanılmıştır.

Şekil 24: Dünyanın en uzun monolitik FRP köprü kirişi

Farklı malzemelerden üretilen hibrit yapı elemanları

ABD'de 250,000'den fazla betonarme ve çelik yapının (çoğunluğu köprü veya menfez) onarım (repair), eski haline döndürme amacıyla güçlendirme (retrofit) veya yıkılıp yenisi ile değiştirilmeye (replacement) ihtiyacı vardır.

2008-2009 yıllarında bazı köprülerin (6 adet) yerine Maine Üniversitesi'nde (Pittsfield) geliştirilen kompozit köprüde kemer köprüler inşa edilmiştir.





Açıklık (11m x 13m) inşaat 3 günde tamamlanmıştır.

Şekil 25: Eski köprülerden bazıları, kemer kompozit köprülerle yeniden yapılmıştır

Reçine infüzyon yöntemi ile üretilen karbon lif takviyeli tüplerin için şantiyede montajdan sonra beton doldurulmuştur.

2.3. FRP Malzemelerin Kullanım Özellikleri

FRP (Fiber Reinforced Plastic) olarak adlandırılan bu kompozitler, kendi başına taşıyıcımalzeme olarak kullanılabilecekleri gibi; betonarme veya öngerilmeli betonda donatı olarak da kullanılabilirler. Ayrıca eski yapıların yenilenmesinde veya güçlendirilme işlerinde kullanılmaktadırlar.

Kompozitin performansı aşağıdakilere bağlıdır:

1. Polymer matris
2. Lif
3. Lif-matris arası
4. Kompozitin bileşenleri arasındaki oran (kullanılan lif hacmi: düşük dozaj yetersiz performans, yüksek dozaj üretme güçlüğü ve matrisle tam olarak bütünleşme sorunu)
5. Kompozitin üretim metodu

Lifli kompozitte matris olarak termoset reçineler kullanılmakta, bu reçineler seçilirken;

- Yüksek sıcaklıklarda boyutsal kararlılık (termal etkilere direnç)
- Düşük su emme özelliği
- Yüksek mekanik dayanım (daha çok basınç ama aynı zamanda çekme dayanımının da yüksek olması bazı uygulamalarda gerekir.)
- Rijitlik ve aynı zamanda kırılma olmama özelliği gibi özellikler aranmaktadır.

2.3.1. Polimer Matris

Termoset reçinelerde polimerizasyon reaksiyonları ile oluşan çapraz bağların çokluğu söz konusu polimerlerin (yüksek dayanımlı olmanın yanında) gevrek, kırılma davranış göstermesine yol açabilmektedir. Lif takviyeli polimer (FRP) kompozitlerin başlangıçtaki mekanik özellikleri servis süresi boyunca taşıyacakları yüklerle karşı koyacak şekilde tasarlanmalıdır. Ancak servis koşullarının yıpratıcı etkisine dayanıklılıkları da en az başlangıçtaki mekanik özellikleri kadar önemlidir. Özellikle matris fazı (termoset polimer reçinesi) hava koşullarına dayanıklı malzemeden seçilmelidir. Polimerin başlangıçtaki ve servis ömrü boyunca;

- Yoğunluğu
- Bağ yapısı
- Molekül yapısındaki çapraz bağlı yapı oranı(degree of cross-linking)

nihai performansı belirler. Pek çok yapı malzemesi ile kıyaslığında FRP kompozitler zorlu koşullara dayanıklı yapıların inşasında tercih edilebilir.

İnşaat Mühendisliği uygulamalarında FRP kompozitin matrisi olarak çapraz bağlı polimer yapısına sahip olan **vinil-ester**, **epoksi** ve **polyester** reçine türleri kullanılmaktadır.

Reçinelerin reaksiyona başlaması için bir sertleştirici (hardener veya curing agent) ile karıştırılması gerekir. Bazı durumlarda reaksiyonun hızını arttırmak için hızlandırıcı katalizörler de ilave edilebilir. Ancak reçine ile sertleştiricinin karışım oranları hassas bir şekilde ölçülmelidir. Reaksiyona girmeyen reçinenin karışımda kalması veya sertleştiricinin karışımda kalması halinde termoset reçinenin nihai mekanik özelliklerine ulaşamaz. Çapraz bağlı termoset reçineler polimerizasyon reaksiyonları (ilave polimerizasyonu veya kondansasyon) sırasında açığa çıkmasının da etkisiyle hızla polimerize olurlar ve moleküler bir kafes sistemi meydana gelir. Bu kafes yapı bir kez oluştuktan sonra yeniden ısıtılsa da belli sıcaklığa kadar yumuşama veya erime meydana gelmez.

Termoplastiklerden ayrılan üstün yanları bu özellikleridir. İnşaat Mühendisliği uygulamalarında termoset reçinelerin polimerizasyonunda iki yöntem uygulanmaktadır. Soğuk ve sıcak yöntemdeki sertleştirici kompozisyonları farklıdır, birbiri yerine kullanılmamalıdır.

Soğuk kür: Polimerizasyon oda sıcaklığı civarında şantiyede gerçekleşir (10–30 °C). Kür sıcaklığı azaldıkça süresi uzar. İmkan varsa (şantiyede zor) önceden ısıtılan malzeme, ekipman ve uygulama alanı ile kür süresi kısaltılabilir. Soğuk kürlemede şantiyedeki sıcaklığı polimerin camsı geçiş sıcaklığına 20 °C'den fazla yaklaşmamasına dikkat edilmelidir.

Sıcak kür:Prefabrik üretime uygundur. 130o C'de otomatik fırınlarda Lif takviyeli kompozitlerin üretiminde tercih edilen termoset reçinelerin mekanik özellikleri:

Basınç dayanımları çekme dayanımına kıyasla genellikle 1.5 ile 4 kat daha yüksektir. Farkın nedeni matriste oluşan kusurların çekme gerilmesinde daha belirleyici olmasıdır. Basınç gerilmesinde boşluklar kapanmaktadır.

Diğer yandan polimerlerin sünme değerleridiğer çimento esaslımalzemelere kıyasla daha yüksektir. Epoksi reçineleri üstün mekanik özellikleri ve dış etkilere dayanıklılıkları nedeniyle lif takviyeli kompozit matrisi olarak en çok tercih edilen malzemelerdir.

Farklı derecelerde amorf veya kristalin yapıya sahip polimerlerden lif üretilebilmektedir.(amorf yapıli polimerlerde polimer zincirleri düzensiz yönlenmiştir. Kristal yapıli polimerlerde ise polimer zincirlerinde bir düzenli dizilim söz konusudur. Polimerlerde bu iki yapı birlikte de gözlenebilir.)

Ancak İnşaat Mühendisliğindeki FRP uygulamalarında daha çok aşağıda sıralanan üç kökenden lif kullanımı tercih edilmektedir:

- Cam lifler
- Aramit lifler Lifler birlikte de kullanılabilir (hibrit).
- Karbon lifler

Her lifin fiziksel ve mekanik özellikleri kullanılan hammadde ve üretim yöntemin göre değişmektedir.

2.3.1.1. Cam Lifi veya Elyaf

Beton içine ilave edilen cam liflerinde alkali ortamda cam problemli ! silikanın jelleşmesi söz konusu. Alkali dirençli (Z-glass) Zirkonya cam lifi (beton ve harç için uygun) Dış cephelere püskürtme kaplama malzemesi (plastik rötreye dirençli)

2.3.1.2. Karbon Lifler

Karbon lifler farklı yöntemlerle üretilen ve türüne göre çelikten daha yüksek çekme dayanıma sahip malzemelerdir. Üstelik çelikten çok daha hafiftir.

Karbon lif takviyeli polimer kompozitler, CFRP (carbon fiber reinforced composites) olarak adlandırılırlar. Temel olarak karbon lifler poliakrilonitril (PAN) ve zift kökenli olup, üretim yöntemine göre farklı özellikler gösterirler.

2.3.1.2.1. Poliakrilonitril kökenli (PAN) karbon lifler

Yüksek elastisite modüllü (inşaat sektörü) ve ultra yüksek elastisite modüllü (uzay endüstrisi) lifler üretiminde kullanılır. Karbon lifler su emmez ve her türlü alkali ve çözücüye karşı dirençlidir.

Poliakrilonitril karbon lifler üç grupta incelenecektir:

1. Ultra yüksek modüllü
2. Yüksek E modüllü
3. Yüksek dayanımlı

Üç türde aynı yöntemle üretilmektedir. Ancak uygulanan ısı işlem sıcaklığı farklıdır. Bu nedenle farklı dayanım ve rijitlik özelliklerine sahiptirler.

Ultra yüksek modüllü karbon lifler 2400 °C sıcaklıkta üretilmektedir ve 400 GPa elastisite modülüne ulaşılmaktadır (daha da artırılabilir). Ancak çekme dayanımı 1800 MPa'dır. Kopma uzaması oldukça azdır. **İnşaat Mühendisliği uygulamalarında** tercih edilir.

Yüksek modüllü karbon lifler ise daha düşük sıcaklıklarda üretilir ve elastisite modülü 240 GPa'dır. Diğer yandan 4000 MPa gibi yüksek bir çekme dayanımına sahiptir. Ayrıca kopma uzaması ultra yüksek modüllü liflere kıyasal daha fazladır.

Yüksek dayanımlı karbon liflerde ise çekme dayanımı 4400 MPa ve elastisite modülü 200 GPa seviyelerindedir.

2.3.1.2.2. Zift Kökenli Karbon Lifler

Zift (katran) veya petrol türevleri, PVC kullanılarak üretilir. Karbon oranı yüksek olmasına rağmen en kesitteki lif dağılımı çok uniform değildir. Kristal yapısı daha iri ve heterojendir. Özellikleri karışımdan karışıma bir miktar değişir. İnşaat Mühendisliğinde uygun fiyatı nedeniyle yüksek elastisite modüllü olan türü kullanılmaktadır.

2.3.1.3. Poliamit Grubu Lifler

- Alifatik poliamitler (nylon) (göreceli olarak zayıftır, lifli kompozitlerde kullanılmaz)
- Aromatik poliamitler (**aramit**) (güçlüdür. Ticari ürünler: Kevlar 49, Nomex, Technora...)

Aramit liflerin çekme dayanımı 2000-2500 MPa mertebelerindedir. Alkaliye dayanıksız olduklarına dair bazı bulgular rapor edilmiştir.

Polimer kompozitlerin mekanik performansı, donatılandırmada kullanılan lifin ve matrisin özelliklerinin yanında, lif-matris arayüzey özelliklerinede bağlıdır. Lif matris ara yüzeyindeki aderansı değiştirecek yöntemler iki grupta toplanabilir:

- **Fiziksel etkileşimle performans arttırılması:**Lif yüzeyinin uygun yöntemle pürüzlendirilmesi veya lif ile reçinenin daha iyi kaynaşması için reçine viskozitesinin azaltılması ara yüzey alanını arttırır. Böylece lif-matris aderansı fiziksel olarak geliştirilebilir.

- **Kimyasal etkileşimle performans arttırılması:**Organik-inorganik yüzeyler arasında bağ oluşturacak kimyasallar (örn: silan bağajları- silane coupling agents) ya lif yüzeylerine önceden uygulanarak ya da matrise karıştırılarak kullanılmaktadır. Bu ajanların bir tarafı organik, diğer tarafı inorganik olan molekül yapısı lif-matris yüzeyleri arasında kimyasal bağ oluşumunu sağlar.

2.3.2. Lif takviyeli polimer kompozitlerin üretim yöntemleri

2.3.2.1. Manuel yöntemler:

1. Yaş serme (wet lay-up process)

2.3.2.2. Yarıotomatik yöntemler:

2. Kalıplama (molding)

a- Elyaf reçinelendirmesi sonrası pres kalıplama

b- Açık kalıplama elyaf püskürtme

2.3.2.3. Otomatik yöntemler:

3. Pultrüzyon yöntemi (pultrusion)

4. Fitil sarma yöntemi (filament winding)

5. Reçine transferiyle kalıplama yöntemleri

(RTM: resin transfer molding or vacuum infusion)

Otomatik yöntemler son yıllarda gelişmekte ve tercih edilmektedir.

2.3.2.1.1. Yaş yayma yöntemi (wet lay-up process):

Yüzeye önce Lif yüzeye serilir ve üzerine reçine yayılır. Elle yapılır, kalınlık sabit değildir. Eğimli yüzeylerde sorun çıkabilir. Daha çok plaka formunda FRP üretimi için uygundur. En düşük maliyetli yöntemdir.

2.3.2.2.a. Pres kalıplama yöntemleri (molding)

2.3.2.2.b. Açık kalıplama elyaf püskürtme

Elyaf ve reçineyi püskürtme yoluyla betonarme yapılarda çeşitli onarım uygulamaları yapılmaktadır.

2.3.2.2.c. Açık kalıplama ile plaka formunda üretim (kumaşformundaki elyafın reçineden geçirilmesi veya liflerin kesilip reçineye eklenmesi)

2.3.2.3. Pultrüzyon yöntemi (pultrusion)

Pultrüzyon tekniği ile taşıyıcı FRP kompozitlerin kullanıldığı ilk pilot yapı bir aç-kapa yaya köprüsüdür (Maunsell Plank, İngiltere). Pultrüzyon tekniği ile üretilen polimer kompozitler birbirine geçmeli ve yapıştırılmalı yöntemle monte edilmektedir (Advanced Composite Construction System (ACCS)). Cam liflerle donatılandırılmış izofitalik polyester reçinesi kullanılmıştır. Günümüzde bu teknikle üretim yapan "Strongwell Corporation, USA" firması "**Composolite®**" ticari adıyla sistemi pek çok yapıda uygulamaktadır. Bu teknikle üretilen kompozitlerin çekme dayanımı 200 MPa, eğilme dayanımı ise 150 MPa'a kadar yükselebilmektedir.

Sanayi tesisleri, atık su ve kimyasal işleme tankları...

Köprü döşemesinde korozyona dayanıklı yaya yolu

Köprü tabliyelerinde FRP kompozit kullanımı

Köprü tabliyeleri köprünün yıpratıcı etkilere en fazla maruz kalan elemanıdır. Tekerlek yüküne, kimyasallara, sıcaklık nem etkilerine, donma-çözülme nedeniyle oluşan şekil değişimlerine açıktır. FRP köprü tabliyelerinde genelde vinilester reçinesi matris ve E-camı lif olarak kullanılır ve kompozit elemanlar pultrüzyon yöntemiyle veya kalıplama ile üretilir. Fabrikada üretilen elemanlar yerinde monte edilir ve aşınma tabakası sonradan üzerine eklenir. FRP yıpratıcı etkilere daha dayanıklıdır ve metalik bir malzeme olmadığı için korozyon problemi yoktur.

Tabliyelerde FRP kullanımının avantaj

Hafiflik (aynı taşıma gücüne sahip betonarme döşemeye kıyasla %10-20)

Korozyona dayanıklılık

Çabuk montaj, beton gibi bekleme yok,

Trafiğe hızlı açılma

Yüksek dayanım, rijitlik ve yeterli duktilite

Uzun servis ömrü, daha az bakım onarım masrafı

Dezavantajları

Yüksek ilk inşaat maliyeti

Sünme

Yüksek sıcaklık için koruma

2.3.2.3.4. Fitol sarma yöntemi (filament winding)

2.3.2.3.5. Reçine transferiyle kalıplama yöntemleri (vacuum infusion)

Vakum infüzyon yöntemi: İlk uygulama alanı monolitik tekne gövdesi üretimidir. Bu yöntem köprü elemanı üretiminde kullanılması durumunda pultrüzyon tekniğine kıyasla daha yüksek maliyetlidir. Ancak pultrüzyon yöntemiyle üretilmeyecek büyüklükte ve değişik en kesitlerde yapı elemanı üretmek mümkün olmaktadır.

BÖLÜM 3. MALZEMELERDE DURABİLİTE

Malzemelerde durabilite; beton, çelik ve ahşap malzemeler olarak incelenecektir. Malzemelerin durabilitesi, yapı ekonomik ölçütü olarak, kısa, orta ve uzun vadede önem arz eder. Ayrıca dayanımını da belirler.

3.1. Beton Malzemesinde Durabilite

Yapı malzemelerinin ve yapıların işlevlerini servis ömürleri boyunca bozulmadan yerine getirmelerine durabilite, dayanıklılık veya kalıcılık adı verilir. 1970’li yılların ortalarına kadar betonarme yapıların çok dayanıklı, uzun ömürlü bir yapı türü olduğuna inanılmakta idi. Bu inanış betonun zamanla dayanımının artmasına ve çeliğin beton pas payı tabakası tarafından korozyona karşı korunması ile açıklanabilir. Gerçekten beton teknolojisine uygun projelendirilmiş, üretilmiş, geçirimsiz, yalıtımlı ve korunmuş yapılar için bu kavram doğrudur.

Ancak son 20-30 yıla kadar, betonarme yapıların kalıcılığı konusunda yeterli bilgi birikimi olmadığından, yalnızca dayanım göz önüne alınarak üretilen, değişik sanat yapılarının bilgi eksikliği ve uygulama hataları nedeniyle önemli hasarlar gördüğü tespit edilmiştir. Örneğin, birçok Hollywood film sahnesinde gördüğümüz, 1932 yılında inşa edilen Los Angeles’ daki Altıncı Cadde Viyadük köprüsü bugün Alkali silika Reaksiyonu nedeniyle oluşan çatlaklar sonucunda önemli ölçüde hasar görmüştür. Köprünün yapıldığı yıllarda alkali-silika reaksiyonu henüz bilinmediğinden, aktif silis içeren agrega ve yüksek oranda alkali içeren çimento bir arada kullanılmıştır. Elli yıl içerisinde ortaya çıkabilecek önemli bir depremde yıkılma olasılığı %70 olarak görülen köprünün, yerine yeni bir köprü yapılması kararlaştırılmıştır. Öngörülmeyen durabilite sorunlarından dolayı servis dışı kalma tehlikesinde olan bu ve buna benzeyen birçok yapı gerek ülkemizde gerekse gelişmiş

birçok ÷lkede mevcuttur. Bu yapıların yıkılarak yerine yenilerinin yapılması veya onarılması gerekmektedir. Gelişmiş ÷lkelerdeki, inşaat faaliyetlerinin %40'ını tamir ve bakım işlerinin oluşturduğu düşün÷ldüğünde konunun önemi daha iyi anlaşılmaktadır .

Ülkemizde ise özellikle Marmara depreminden sonra göçen birçok binada donatıların korozyon nedeniyle neredeyse sadece izlerinin kaldığı gözlenmiştir.

Yapıların bozulmasına yol açan fiziksel, kimyasal, biyolojik ve mekanik kökenli etmenler gör÷lmektedir. Mekanik yolla oluşan hasarlar arasında, darbe, aşınma, erozyon ve oyulma (kavitasyon) etkileri sayılabilir. Kimyasal etkenler dışarıdan beton içine sızan zararlı maddelerden kaynaklanabileceği gibi, beton bileşimini oluşturan malzemelerden de kaynaklanabilir. Bunlar arasında alkali-agrega reaksiyonları, sülfat etkisi, karbonatlaşma, korozyon, bazı asit ve tuz etkileri sayılabilir. Bozulmanın fiziksel nedenleri; donma-çöz÷lme, buz çöz÷c÷ tuzlar, yüksek sıcaklıklar vb. etkilere dir.



Şekil 26: Aşınmaya uğramış beton örneği

Günümüzde durabilite konusunda önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Artık yeni beton standardı TS EN206-1 ve bu standardın uygulanmasına yönelik tamamlayıcı standard TS13515’de dayanımın yanı sıra çevresel etki sınıfları da devreye girmiştir. Esasen bir yapının farklı elemanları farklı çevresel etkilere maruzdur. Yapının iç kısımlarındaki betonarme elemanlar genellikle kuru ortam koşullarına maruz olup, dışarıdan fiziksel ve kimyasal bir etkiye açık değildir. Bununla birlikte, yapının dış kısmındaki betonarme elemanlar bu tür etkilere her zaman maruz kalabilir. Ancak, bir yapının ortam koşullarına açık betonarme elemanlarını farklı bir betonla üretmek pratik olarak mümkün olmamakla birlikte, böyle bir uygulama anlamlı da değildir. Bu nedenle, söz konusu standartlara göre, ülkemizde inşa edilecek bir yapıda kullanılacak en düşük beton sınıfı dolaylı olarak C30/37 olmaktadır. Bu beton sınıfı, Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkındaki Yönetmeliğe göre en düşük beton sınıfı olan C20/25 sınıfından daha yüksektir. Bir başka deyişle, ülkemizde yapılacak yapılarda kullanılacak en düşük beton sınıfının C30/37 olması gerektiği söylenebilir. Betonarme ve Beton standartlarındaki bu ve benzeri karışıklıkların düzeltilmesi ve özellikle proje yapan meslektaşlarımızın bu konuda aydınlatılması gerekir. Son yıllarda, beton üreticisi ve kullanıcılarının bilinçlenmesinin ve kalite artışının bir sonucu olarak C30/37 sınıfındaki betonların kullanımının arttığı görülmektedir. 2012 yılı verileri İzmir bölgesinde KGS denetimi altındaki Hazır Beton firmalarınca dökülen C30/37 sınıfı beton miktarının C20/25 sınıfında dökülen betonlardan çok daha fazla olduğunu göstermektedir.



Şekil 27: Çevresel etkilere maruz kalmış beton örneği

Özellikle denetimli hazır beton şirketleri sayesinde artık yüksek kaliteli beton üretimi sorun olmaktan çıkmıştır. Söz konusu çevresel etki sınıfına uygun seçilmiş kaliteli taze beton karışımlarının, beton teknolojisine uygun şekilde kalıbına yerleştirilmesi, sıkıştırılması, bakımı ve korunması sağlandığı takdirde, betonarme projenin de doğru yapılması halinde yapıların servis ömürleri boyunca herhangi bir sorun çıkartmayacaktır.

Betonun bozulmasına neden olan fiziksel ve mekanik etkenler iki ana grupta toplanabilir; yüzey aşınması nedeniyle betonda kütle kaybına sebep olanlar ve betonda çatlama gibi hasarlara yol açanlar. Aşınma, erozyon ve oyulma olayları ilk grupta incelenirken, ıslanma-kuruma, boy ve hacim değişimleri, donma-çözülme, aşırı yükleme, yüksek sıcaklıkların ve sıcaklık değişimlerinin etkileri ikinci grupta yer alır. Uygulamada beton, fiziksel ve kimyasal birçok etkiye tekrarlı olarak maruz kalabilmekte ve bu etkiler bir diğerinin gelişimini hızlandırabilmektedir. Örneğin, fiziksel etkilerle betonun çatlaması geçirimsizliğinin artmasına yol açarak betonun kimyasal nedenlerle bozulmasını kolaylaştırabilmektedir. Benzer şekilde betonun

kimyasal süreçlerle bozulması sonucu gözenekliliğinin artması, aşınma gibi fiziksel etkilere dayanıklılığını büyük ölçüde azaltabilmektedir.

Betona Etkiyen Fiziksel ve Kimyasal Etkiler;

1. Aşınma, Erozyon ve Kavitasyon
2. Sertleşmiş Betonda Donma-Çözülme Olayı
3. Yüksek Sıcaklığın Betona Etkisi
1. Sertleşmiş Çimento Bileşenlerinin Hidrolizi ve Yıkanması
2. Betona Asitlerin Etkisi
3. Magnezyum İyonu İçeren Çözeltilerin Kimyasal Saldırıları
4. Sülfatların Betona Etkisi
5. Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR) ve Alkali-Karbonat Reaksiyonu (ACR)
6. Kalsiyum ve Magnezyum Oksidin (CaO, MgO) Gecikmiş Hidratasyonu
7. Betonda Karbonatlaşma ve Çelik Donatının Korozyonu



Şekil 28: Çevresel etkilere maruz kalmış beton

Çevresel etkinin şiddeti dikkate alınarak uygun beton sınıfı seçilmeli, yapısal dizayn açısından ihtiyaç olmasa bile gereğinde beton kalitesi arttırılmalıdır. Bir yapının bazı

kısımları herhangi bir çevresel etkiye maruz kalmayabilmektedir. Ancak, yapının dış kısımlarına bakan betonarme elemanlarında karbonatlaşma tehlikesi her zaman mevcuttur. Pratik olarak, aynı yapının değişik kısımlarında farklı beton sınıflarının kullanılması mümkün olmadığından, beton sınıfının seçilmesinde çevresel etkinin olmadığı durum (X0) söz konusu değildir. Nemin ortamdan uzaklaştırılması çok ender bir durum olduğundan çevresel etki açısından C30/37 ve üstündeki beton sınıflarının kullanılması önerilmektedir.



Şekil 29: Nemden etkilenmiş beton yol örneği

Betonarmenin diğer bileşeni olan çelik ise mühendislik alanında çok yaygın kullanılan çekme dayanımı yüksek sünek bir metaldir. Betonarme elemanda beton basınç kuvvetlerini, çelik çoğunlukla çekme kuvvetlerini karşılar. Beton ile çeliğin birbirine yapışmasının/aderansının iyi, termik genleşme katsayılarının birbirine yakın ve her ikisinin de yük taşıyor olması nedeni ile bu iki malzeme kullanılarak monolitik yapı sistemleri üretilmektedir. Çok farklı yapıların üretimine olanak vermesine, üretiminin diğer malzemelere ve yapım sistemlerine göre kolay ve ucuz olmasına karşinsudan, zararlı çözeltilerden etkilenmesi, korozyona uğraması nedeni ile hasar oluşması, güçlendirme gerektiğinde bu işlemin çok zor olması gibi olumsuzlukları vardır. Bu üstün özelliklerine rağmen betonarme elemanlar çeşitli etkilerle meydana gelen donatı korozyonu nedeni ile hasara uğrar. Korozyon hasarları, başta deniz yapıları ve karayolları olmak üzere ulaştırma sektörünün önemli sorunudur.

Hasarların en aza indirilmesi için betonun basınç dayanımı yüksek, geçirimsiz bir başka deyişle yüksek performanslı olması, örtü betonu kalınlığının yeterli ve sürekli olması çok önemlidir.



Şekil 30: Korozyon tehlikesi, betona etkileri

Betonun ve/veya beton içinde gömülü çelik donatının çevresel dış etkiler ile meydana Gelen fiziko-kimyasal olaylar sonucunda kütle ve nitelik kaybına uğramasına neden olan olaylara da korozyon denir. Hava ile temas halinde olan bir betonarme yapıda, beton içindeki su ve O_2 miktarı, korozyonun oluşmasına neden olabilecek seviyededir.

Gözenekliliği (porozitesi) düşük, yoğunluğu yeterli beton ile üretilen betonarme elemanın örtü betonu kalınlığı (pas payı) yeterli ve sürekli ise betondaki su miktarı fazla olsa bile O_2 difüzyonu azaldığı için korozyon tehlikeli sınırlara ulaşmayacaktır. Ancak $Ca(OH)_2$ 'nin karbonatlaşması veya betona puzolan malzeme katılması nedeni ile pH'sının düşmesi ve ortamda belirli sınırı aşmış serbest Cl^- iyonunun varlığı donatı korozyonuna yol açacaktır. Bu nedenle betonarmede donatının korozyonunu beton özellikleri belirleyecektir. Burada pH'ı düşürdüğü ifade edilen doğal puzolanların (tras), kalsine edilmiş kil ve yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı gibi endüstri atığı puzolanların betonun porozitesini ve geçirimliliğini azaltarak ve serbest kirecin erimesini engelleyerek betonun performansını artırdığını belirtmek

gerekir. Çimentonun ana bileşenlerinden olan trikalsiyumsilikat (C3S: 3CaOSiO₂) Ve dikalsiyumsilikatın (C2S: 2CaOSiO₂) hidratasyonundan(1) bağıntısında görüldüğü gibi suda erimeyen silkat jeli ve suda eriyen serbest kireç çıkar. Serbest kireç (CH₂:Ca(OH)₂), alkalinitesi yüksek (pH~13) ortam oluşturur ve çelik yüzeyinde kararlı, koruyucu bir oksit tabakası oluşturur; dolayısı ile çimento ortamın pH'nı artıran ve donatıyı korozyona karşı koruyan esas unsurdur. Ancak serbest kireç, dış ortamdan gelen su ve suyun taşıdığı sülfatlı nitratlı, klorürlü bileşiklerin etkisine maruz kalan ve değişime uğrayan bir maddedir.



Silikat Jeli (suda erimez) (suda erir)

Serbest kireç, korozyona karşı dayanıklılığı son derece düşük olan çelikte anodik akım yoğunluğunun kısıtlanmasına yardımcı olur; bu olaya alkali pasivasyonu adı verilir. Ancak betonun geçirimli olması, ortamda su ve oksijen bulunması, beton üretiminde Cl⁻ iyonu içeren agregaların ve/veya katkıların kullanılması, karbonatlaşma nedeni ile ortamın pH'nın 11'in altına düşmesi gibi nedenlerle donatı yüzeyindeki pasif demir oksit tabakası tahrip olur, donatı korozyonu süreklilik kazanır. Betonarme, ön gerilmeli beton, çelik lifli beton veya donatısız beton elemanlarda meydana gelen çatlama, kırılma gibi hasarların araştırılması için öncelikle betonda ve çelikte hasara neden olan korozyon mekanizmalarının incelenmesi gerekir.

3.2. Çelik Malzemesinde Durabilite

Doğada altın ve platin dışındaki metallerin tamamı oksitler, karbonatlar, sülfatlar ve silikatlar olarak bileşikler halinde bulunur, enerjileri düşük olduğundan kararlı yapıya sahiptirler. Metalleri oksitlerinden ayırmak zorlu bir süreçtir ve bu süreç, büyük miktarlarda hammadde, enerji ve insan gücünün harcanması ile gerçekleşir. Süreç sonunda metaller, termodinamik anlamda, daha yüksek bir enerji düzeyine taşınırken enerjileri düşer. Metallerin doğadaki asıl durumlarına dönme eğilimi korozyon olayının gerçek nedenidir. Her yıl üretilen metalik malzemelerin yaklaşık 1/3' ü

korozyon nedeni ile kullanılmaz hale gelir; devre dışı kalan metalik malzemeler hurda olarak kısmen değerlendirilse de 1/3'ü bir daha geri kazanılamamak üzere kaybedilir, yani tabiata geri döner. Bu, yıllık metalik malzeme üretiminin yaklaşık 1/10'unun, korozyon nedeni ile bir daha geri kazanılamamak üzere kaybı demektir. Metalik malzemelerin tabiata geri dönen kısmı çevre kirliliğine neden olur; kirli ortam da korozyonu hızlandırır. Görüldüğü gibi korozyon dünyadaki sınırlı metal ve enerji kaynaklarının en önemli israf nedenidir ve korozyon, sanayide yatırım ve üretim maliyetlerini belirleyen başlıca faktörlerden biridir. Bazı tahminlere göre, korozyonun bir ulusa maliyeti gayri safi milli hasılanın % 3,5- 5,0'ine ulaşmaktadır. Türkiye için bu değerin % 4,5'dan daha az olmadığına ilişkin tahminler vardır . 2010 yılı Gayri Safi Yurtiçi Hasılda (GSYH) tarım sektörünün %5,9, inşaat sektörünün %5,6 olduğu dikkate alınırsa korozyonun etkin kontrolünü sağlayacak tekniklerin geliştirip uygulanmasının önemi açıkça görülür. Hava ile temas halinde olan bir betonarme yapıda, beton içindeki su ve O₂ miktarı, donatı korozyonunun oluşmasına neden olabilecek seviyededir.



Şekil 31: Korozyon etkisiyle yıpranmış çelik köprü

Donatıyı kaplayan pas tabakası ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), pasivasyonu sağlayan ve donatıyı korozyona karşı koruyan tabakadır. Donatının yüzeyinde oluşan korozyon ürünü, kütlede çok az kayba neden olmasına rağmen oluşan bileşiğe bağlı olarak demir hacminin 1-6 katı kadar hacim artışına neden olur. Hacim artışı başlangıçta boşlukları doldurarak aderansı artırır ancak ilerleyen dönemde betonda çatlaklar oluşturur, kapak atmalar görülür ve olayın devamında örtü betonu kütlede ayrılır, donatı açığa çıkar. Betondaki çatlak oluşumu, donatının korozyonunu, korozyon da betonun hasarını hızlandıran girişimli olaylardır; betonarme elemanın ömrünü ve yapı güvenliğini azaltır.



Şekil 32: Kiriş elemanında korozyondan kaynaklı deformasyon

Parça atmaların ve hasarların nedeni, donatıdaki hacim artışı ve betonda çekme gerilmeleri doğurmasıdır. Bu gerilmeler, çekme dayanımı ve çekmede uzama oranı çok düşük ve gevrek bir malzeme olan betonda donatıya paralel çatlaklar oluşur.

Betonarme donatısının korozyonunu hızlandıran en önemli faktörlerden biri, betonarme elemanda klorür penetrasyonudur. Beton karışımına giren veya dışarıdan nüfuz eden klorür iyonlarının tamamı boşluk suyunda serbest halde değildir; bir kısmı çimento hidratasyonu ürünleri ile bağlanarak,

Friedel Tuzu'na ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) kalsiyumkloroalüminathidrat'a dönüşür , bir kısmı da çimento hidratları tarafından adsorbe edilir. Bağlanmayan veya adsorbe edilmeyen Cl^- iyonları serbest halde kalır. Beton üretiminde kullanılan

anionik türdeki süper akışkanlaştırıcı katkı maddeleri, çimento hamurunun Cl^- iyonlarını adsorbe etmesini engeller, bu iyonlar da boşluk suyu içinde kalır. İşte bu serbest haldeki klorür iyonları betonarme yapılarda ciddi hasarlara yol açar. Çünkü beton içindeki Cl^- iyonları anodik bölgede, çelik üzerindeki koruyucu pasif tabakayı tahrip eden hidroklorik aside dönüşür, oyuklanma türü korozyona neden olur. Oluşan çukurlardaki asidik ortam nedeni ile olay hızlanır, derinlik artar.



Şekil 33: Deniz suyu etkisinden, hasara uğramış, betonarme yapı

Beton içinde Cl^- iyonu oranının artması ile (çimento ağırlığının) korozyon şiddeti artmaktadır. Standartlarda donatının korozyonuna neden olan Cl^- miktarı çimento veya agrega ağırlığının yüzdesi ya da bir m^3 betonda kg (0,6-0,9 kg/m^3) olarak verilmektedir.

Betonarme elemanlarda donatı korozyonunun gözlenen en belirgin göstergesi, beton örtünün çatlamasıdır ve bu olay, korozyon başlangıç süresi için esas alınan önemli parametrelerden biridir. Örneğin deniz yapılarında beton yüzeyinde ilk çatlağın olduğu an kritiktir ve onarım kaçınılmazdır. Bu amaçla, ilk çatlağın süresi (t) esas alınarak, betonda 0,3-0,4 mm' lik çatlağa neden olan donatı çapındaki azalmaya ilişkin basit nümerik modeller geliştirilmektedir.

$$T = \text{korozyon hızı}(mm/yıl) \div \text{donatı çapındaki kayıp}(mm)$$



Şekil 34: Dış etkilerden hasara uğramış betonarme köprü ayağı

BÖLÜM 4: FRP MALZEMELERDE DURABİLİTE

4.1. Beton yapılarıdaki FRP takviye çubukları için hızlandırılmış yaşlandırma testlerinin dayanıklılık performansı

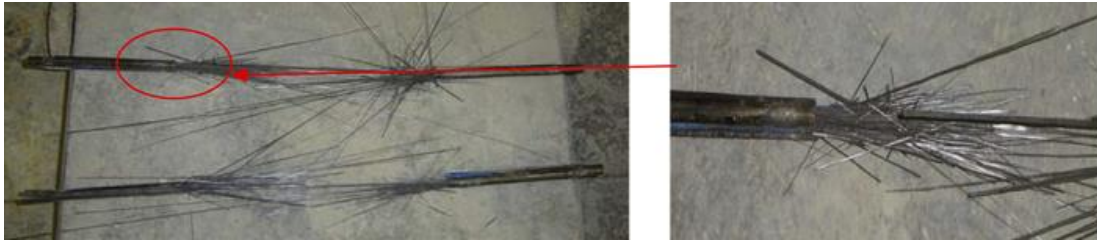
Bu makalede fiber-destekli polimer (FRP) takviye çubuklarının beton yapılar için hızlandırılmış yaşlandırma testlerinin dayanıklılık performansı çalışılmıştır. Saf FRP çubukları ve betona gömülmüş çubuklar, öncelikle cam kompozitler için, 5 farklı çözeltiye konuldu: su, iki çeşit düşük ve yüksek performanslı beton için alkalın çözelti, tuz çözeltisi ve klor iyonlarıyla karıştırılmış alkalın çözeltisi. Yaşlandırma yükselen sıcaklıklar yardımıyla hızlandırıldı. Islatma, kurutma, dondurma ve çözme döngüsü bazı çözeltilerle birleştirilen saha koşullarında beklenen etkiler yaratıldı. FRP çubukların çekme mukavemeti ve interlaminer akma mukavemeti döngülerden önce ve sonra ölçüldü ve bu değerler örneklerin dayanıklılık performansı için ölçüt kabul edildi. Bununla birlikte ilerleyen döngülerin FRP çubuklar ile beton arasındaki bağın dayanıklılığı üzerine etkilerini ölçmek için dışa çekilme testleri yapıldı. Sonuçlar hem saf FRP çubuklar hem de gömülü FRP çubukların bağ kuvveti de dâhil olmak üzere özellikle 60 C sıcaklıkta çözeltilerde dayanımının ilerleyen döngülerle arttığını gösterdi. Öte yandan karbon fiber-destekli polimer (CFRP) çubuklar mükemmel dayanıklılık performansı gösterdi. CRFP çubuklar için sürekli batırmak, ıslatma/kurutma döngülerine maruz bırakmaktan daha fazla etki gösterdi. Diğer bir taraftan, çözeltilerle birlikte dondurma/çözme döngüsüne maruz bırakmanın FRP çubukların dayanıklılığına ufak bir etkisi olduğu gözlemlendi



Şekil 35: GFRP çubukların solisyonlara maruz kalmadan önce ve sonrası

Gömülü GFRP çubuklar, normal betondan ayrıldıktan sonra

Gömülü GFRP çubukları yüksek dayamılı betondan ayrıldıktan sonra[10]



Şekil 36: GFRP çubuklar için tipik hata modu[10]



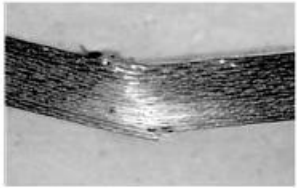
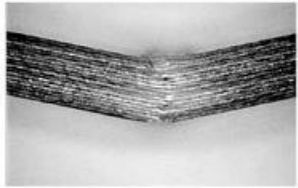
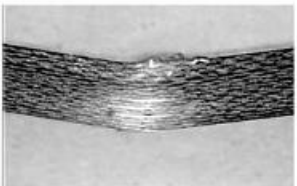
Şekil 37: Kısa çekme testinde GFRP numunelerin tipik hata modu[10]



Şekil 38 : Çekilme testinden sonra numuneler[10]

4.2. Suda kullanılan GFRP laminelerin uzun vadeli dayanıklılığı için hızlandırılmış testler

Önerdiğimiz polimer kompozitler için uzun vadeli dayanıklılık için hızlandırılmış test yöntemi zaman-sıcaklık süperpozisyon ilkesine dayanmakta olup polimer ana yapıların viskoelastisitesi için tasarlanmıştır. Geleneksel denizcilikte kullanılan düz dokunmuş cam fiber/vinil-ester (GFRP) lamineler için uzun vadeli bükülme yorulması ömür süresi önerdiğimiz yöntemle öngörülmüştür. Sonuç olarak, GFRP laminelerin hem bükülme-yorulması dayanımının hem de kopmaya kadar kalan döngü sayısının artan zaman ve sıcaklıkla ciddi şekilde azalmakta olduğu gözlemlendi. Herhangi bir andaki uzun vadeli yorulma dayanımı, kopma noktasına kalan sıcaklık ve döngü sayısı, önerdiğimiz yöntemle elde edilen yorulma ana eğrilerine bakılarak tahmin edilebilmektedir.

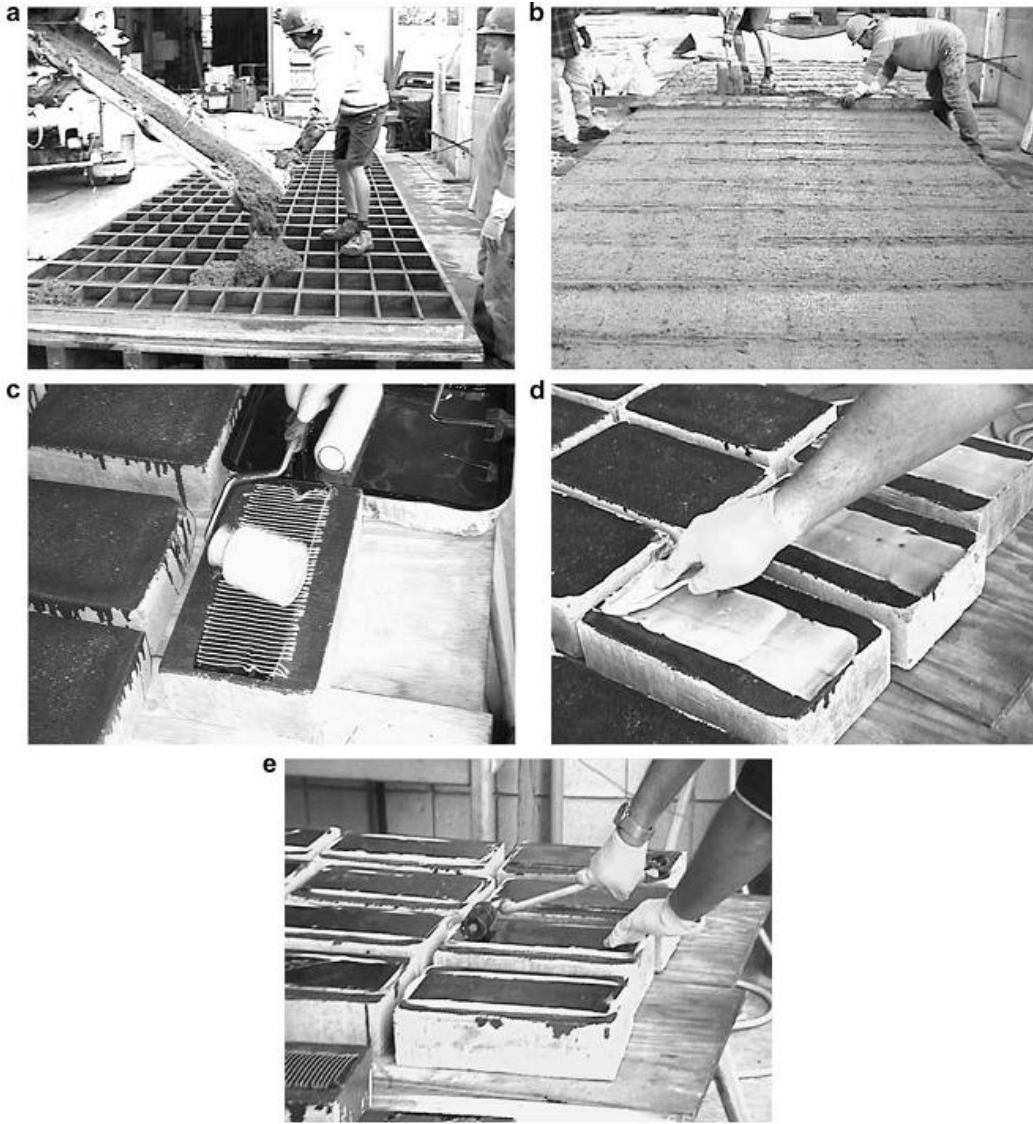
T °C	CSR V=2mm/min	Creep R=1	Fatigue R=0.05 f=2Hz
50	 $\sigma_s=460\text{MPa}$, $t_s=1.92\text{min}$	 $\sigma_c=350\text{MPa}$, $t_c=1429\text{min}$	 $\sigma_f=286\text{MPa}$, $N_f=8935$
100	 $\sigma_s=330\text{MPa}$, $t_s=1.56\text{min}$	 $\sigma_c=252\text{MPa}$, $t_c=157\text{min}$	 $\sigma_f=130\text{MPa}$, $N_f=183271$

1mm

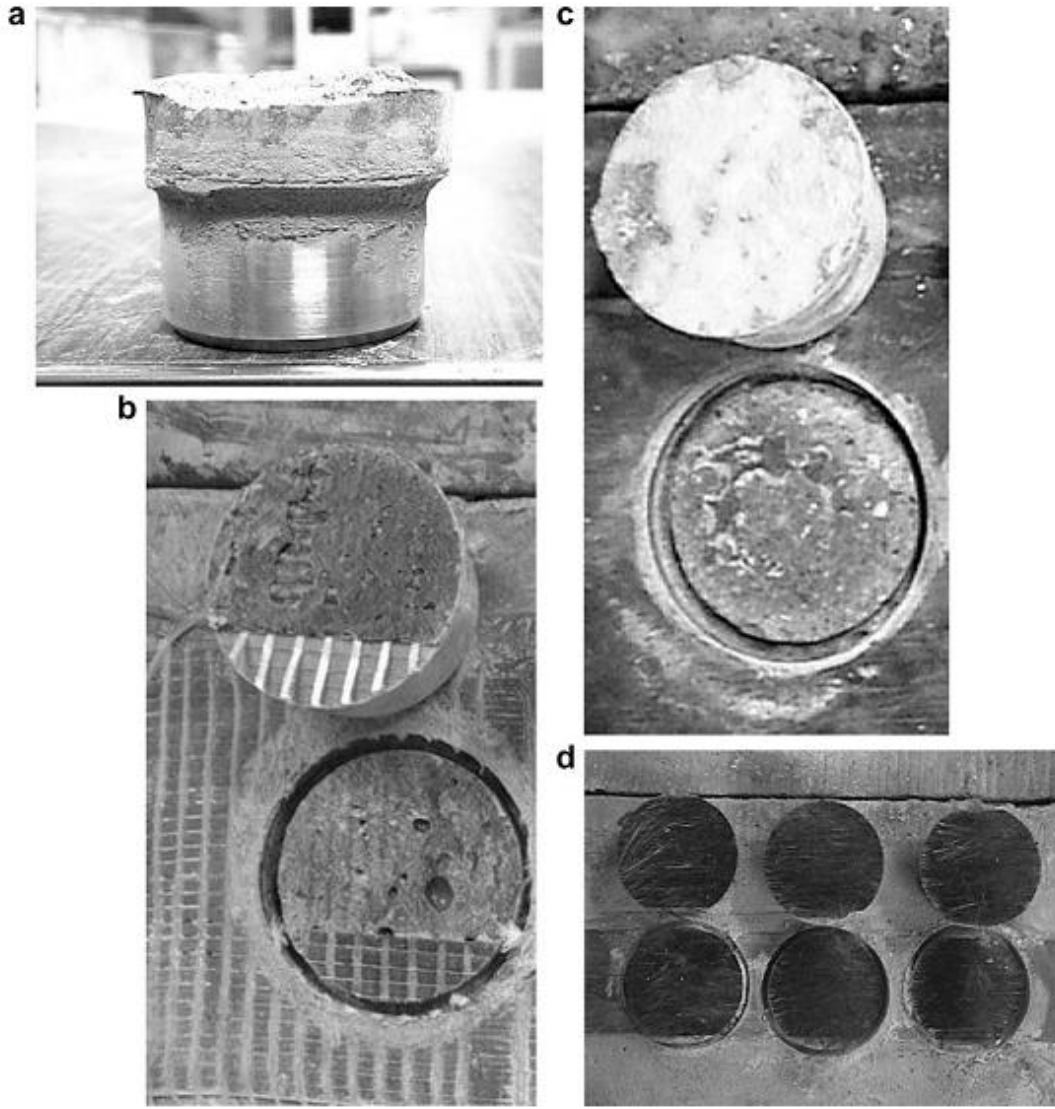
Şekil 39: CSR için GFRP laminatların sünme ve yorulma testleri sonucu kırılma görüntüleri[11]

4.3. GFRP takviye çubuklarının uzun vadeli dayanıklılığın tuz çözeltisi ve nemli betonun etkisi

Bu deneyde, hızlandırılmış koşullar altında betona ve tuz çözeltisine konulmuş gerilim uygulanmamış GFRP takviye çubuklarının mekanik, dayanıklılık ve mikroyapısal karakterini inceler. Bu koşullar deniz suyunun ya da tuz çözeltisinin GFRP çubukları üzerindeki etkilerinin benzetimi için kullanıldı. Uzun vadeli özellik tahmini için Arrhenius teorisine dayanılarak demirlerin maruz bırakılmadan önceki ve sonraki çekme dayanımı kullanıldı. Sonuçlar betonla sarılmış GFRP çubuklarının tuz çözeltisinde ya da şebeke suyunda dayanıklılığın önemli ölçüde değişmediğini ve yüksek uzun vadeli dayanım gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Hesaplamalara göre, GFRP çubukların çekme mukavemeti hafızası 100 yıllık servis ömrü sonunda bile ortalama sıcaklığı 50 C (Orta Asya ve sıcak bölgelerdeki deniz ortamında görülen yıllık ortalama sıcaklık) ilk değerinin %70'ine, 10 C (yıllık ortalama sıcaklığına sahip kuzey bölgelerde) ise %77'sine inmektedir ki bu değerler göreceli olarak ACI 440.1 R'da belirtilen tasarım değerlerinden daha fazladır.



Şekil 40: a) Pull-off numuneler için kalıplar içine beton dökülmesi
 b) Pull-off numuneler için beton blokların dökümünün tamamlanması
 c) Islak turnike kumaş üzerine uygun şekilde hazırlanan betonun yüzeye uygulanması
 d) Şerit halinde uygun hazırlanmış yüzeyi beton yüzeyine uygun yapıştırma ile uygulanması
 e) Basınç uygulanarak FRP şerit beton yüzeyine yapıştırılmıştır[12]



Şekil 41: a) Beton örneği içindeki örnek gösteriyorki iyi başarıda değil
 b) Tipik pull-off örneği gösteriyor ki, kırılma modu üst ince tabakada betonun bir sonraki birleşme hattında
 c) Tipik pull-off örneği gösteriyor ki hata yapıştırıcı bağ hattında
 d) Pull-off örneklerinde interlaminer yetmezliği sistem 100 kere tuzlu suya maruz kalınca oluşur[12]

4.4. Köprü onarımı için kullanılan ortam sıcaklığında dışarıdan bağlanmış CRFP ve GFRP kompozit sistemlerin karşılaştırmalı dayanıklılık performansı

Son yıllarda beton yapıların onarımı için dışarıdan bağlanmış FRP malzemelerin kullanımı artmıştır. Önceden yapılmış iki çalışmada, ıslak örgüleme ve önceden örülmüş şeritlerin yapıştırılması, yöntemin güvenilirliğin ve veriminin FRP ile beton yapının yüzeyi arasındaki bağın gücü ve dayanıklılığına yüksek oranda bağlı olduğu görülmüştür. Bu çalışmada 24 ay boyunca 10 farklı FRP dışarıdan güçlendirme sisteminin bağ dayanıklılığı, suya, tuzlu suya, farklı nem seviyelerine ve -18 C sıcaklıkta dondurulma çevresel etkenlerine maruz bırakılarak incelenmiştir. FRP sistemlerinin başarımı nem tutma karakterleri, gerilme gücü, reçine ve yapışkanların gücü ve doğrudan çekme testleri ile ölçülmüştür. Ortam sıcaklığında işlenen sistemlerden beklenildiği üzere, hem gerilme özelliklerinde hem de çekme testi sonuçlarında çevresel maruziyet altında zaman içerisinde kötüleşme görülmüştür. Bağ dayanıklılığındaki farklılıklar sisteme ve maruziyet tipine göre tartışılmış ve -18 C soğuğa maruz bırakmanın en yüksek seviye bozulmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar uygun seçilmiş reçine ve iyi örülmüş kompozitler kullanıldığında ıslak örgüleme yönteminin hali hazırda önceden örülmüş şeritlerin yapıştırılması yöntemine uzun vadeli FRP beton bağ dayanıklılığı yönünden avantajlı olduğunu göstermiştir. Test sonuçları reçine/yapışkan karakterindeki ve çevresel etmenlerden dolayı bağda oluşan değişikliklerin tetiklediği bozulmanın beklenmedik yıkımlardan kaçınmak adına tasarım aşamasında göz önüne alınması gerektiğini vurgulamaktadır.



Şekil 42: İzolasyonlu daldırılmış çubuk sonunda[13]

4.5. Betona gömülmüş GFRP çubuklarının asit ortamındaki dayanımı ve beklenen yaşam ömrü

Son yıllarda GFRP takviye çubukları geleneksel çelik takviye çubuklarına alternatif olarak ortaya çıkmaya başladı. GFRP çubukların asit ortamında betona bağlanma özelliği, Çin’de gün geçtikçe artan asit yağmurlarından dolayı önem kazanmaktadır.

Bu deney GFRP çubuklar ile çelik çubukların asit ortamında betonla yaptıkları bağın dayanıklılığını incelemektedir. Örnekler farklı yoğunluktaki asit çözeltilerine daldırılarak korozyona maruz bırakıldı. 120 çekme örneği ortam farklılıklarının çelik çubuklar ile GFRP çubukların bağ gücünü nasıl etkilediğini araştırmak için kullanıldı. Deney sonuçların göre 75. günün sonunda GFRP çubuklarının bağ kuvveti şebeke suyu, $\text{pH} = 2$, $\text{pH} = 3$, ve $\text{pH} = 4$ olan ortamlarda sırasıyla %11, % 22, %17.2 ve %14 oranında azalma gösterdi. Çelik çubuklar ise 75. günün sonunda $\text{pH}=2$ ve $\text{pH}=3$ olan ortamlarda sırasıyla %19.6 ve %12.3 bağ kuvveti kaybına uğradı. Çözelti yoğunluğunun GFRP çubukların bağ kuvvetine etkisi Arrhenius denklemi ve zaman kaydırma metodu kullanılarak hesaplandı.

J.-P. Won et al./Composite Structures 94 (2012) 1236–1242



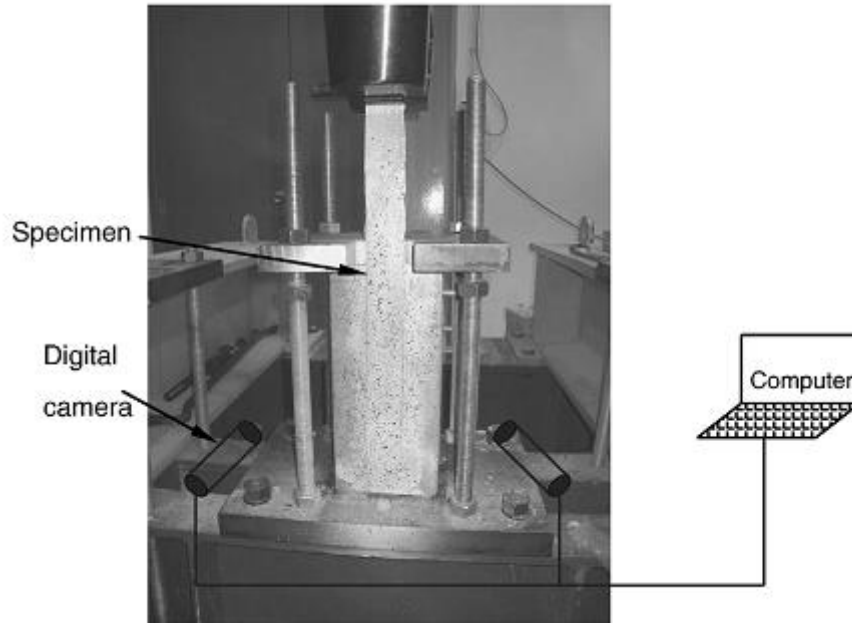
Şekil 43: FRP demiri hazırlanması için pultrüzyon proses[14]

4.6. Nemli ve alkali ortamlarda beton yapılarıdaki nano-GFRP kompozit takviye çubuklarının dayanıklılık karakteri

Bu deneyde, beton yapılar için nano-GFRP kompozit takviye çubukları imal edildi ve uzun süreli suya ve alkalin çözeltilere maruz kaldığındaki performansı incelendi. Nano-GFRP çubuk pultrüzyon yöntemi ile vinil estere nano malzemeler eklenerek elde edildi. Nano materyaller silika (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve silikon nitrat (Si_3N_4) vinil ester reçinesine %1, %3 ve %5 oranında katıldı. Suya ve alkalin çözeltisine 5 ve 115 gün boyunca maruz bırakıldıktan sonra çekme mukavemeti ölçüldü ve nem difüzyon katsayısı belirlendi ve normal GFRP çubuk ile karşılaştırıldı. Sonuçlar suya maruz bırakılan nano-GFRP ile normal GFRP arasında ardıl çekme mukavemeti arasında bir fark göstermezken alkalin çözeltisine maruz bırakıldığında nano-GFRP daha yüksek ardıl çekme mukavemetine sahiptir. Alüminyum oksit ve silikon nitrat örneklerinin nem difüzyon katsayısı alkalin çözeltiye maruz bırakıldığında ufak bir miktar artmışken silika örneği daha yüksek nem difüzyon katsayısına sahiptir. Öte yandan tüm nano-GFRP çubuk örneklerinin nem difüzyon katsayısı genel GFRP çubukları ile benzerdir.

4.7. Güçlendirilmiş beton ürünlerde FRP çubuklarının dayanıklılık durumları

Güçlendirilmiş beton (RC) elemanlar ihtiva eden fiberle güçlendirilmiş polimerlerin (FRPs) kullanımı çelikle güçlendirilmiş elemanların servis ömrünü azaltan korozyon etkilerine engel olması açısından tercih edilir. Fakat FRP çubuklarının dayanıklılığı malzeme özelliklerine ve çubuk beton etkileşimine doğrudan bağlı olduğu kadar açık öngörülemmez. FRP çubukların dayanıklılığı hakkında son teknoloji, malzeme özellikleri ve beton malzeme ile etkileşen mekanizmalar gibi RC elemanların kullanım ömrünü etkileyen hususlar açısından irdelenmiştir. Uluslararası düzlemde kullanılan tasarım yaklaşımları ve dayanıklılık performansını hesaba katan indirgeme faktörleri özetlenmiştir



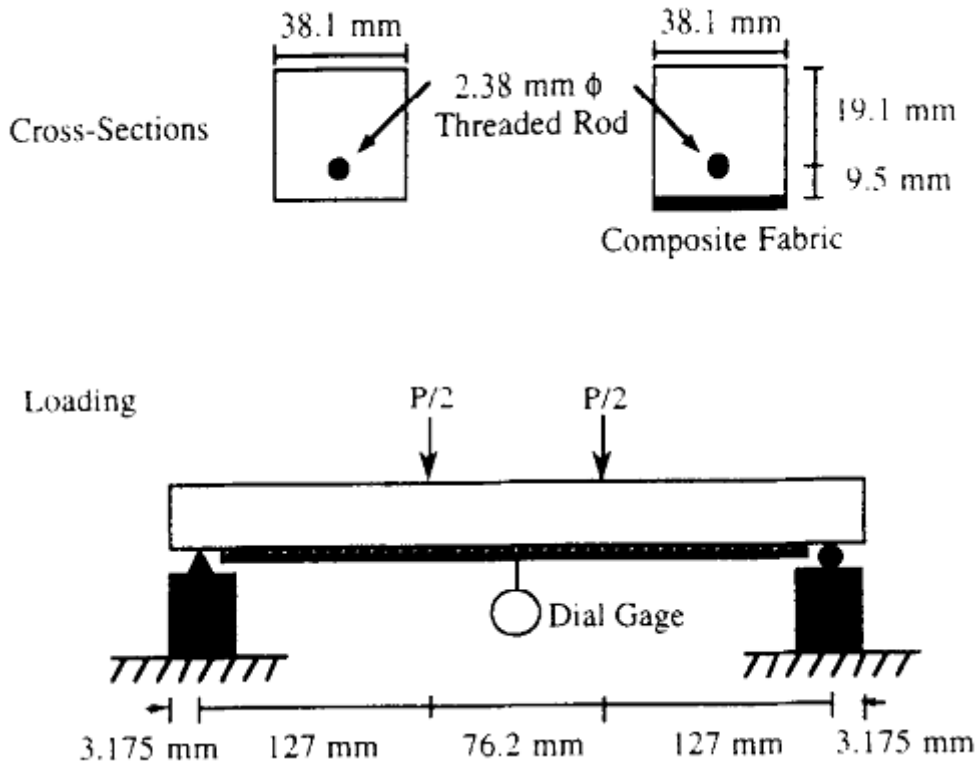
Şekil 44: DIC ve pull-off test mekanizması[16]

4.8. CFRP-beton bağlantı noktalarının donma-çözünme döngülerindeki dayanıklılığı

Soğuk iklimlerdeki yapıların güvenliği açısından FRP güçlendirme sistemlerinin donma/çözünme döngüsü altında uzun dönem dayanıklılığı önemli bir konudur. FRP dayanıklılığı -- beton birleşme ara yüzünün donma/çözünme döngüleri altındaki dayanıklılığı bozulma durumları, açıktayken, beton sınıfı , ve donma/çözünme döngü sayısı parametreleri yönünden incelendi. CFRP-beton bağ noktasının performansı tek yüzlü akma testiyle ölçüldü. Sonuçlar bağ mukavemetinin, bağ katılığı ve bağlantı çatlak enerjisi ve bağlantının maksimum slipinin artan döngü sayısı ile azaldığı ve ortamdan maruz kalma miktarına göre değiştiği gözlemlendi. Çatlağın derinliği ve efektif bağ uzunluğu artan döngü sayısı ile artmakta, dolayısıyla bağ katılığını ve mukavemetini etkilemektedir. Bağ gücündeki azalma donma/çözünme döngüsünün betonda verdiği hasarla bağdaştırılmaktadır.

4.9. Dışarıdan kompozit örgülerle güçlendirilmiş beton çubukların dayanıklılığı

Bu çalışma Delaware Üniversitesinde yürütülmekte olan dışarıdan kompozit örgülerle beton çubukların esneklik dayanımını inceleyen araştırmanın ikinci kısmını sunmaktadır. İlk kısımdaki sonuçlar kompozit örgülerin beton çubuklara gerilim yüzeyinden epoksi bağ ile bağlamanın esnekliği önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Bu çalışma beton-epoksi örgü sisteminin çevresel etmenlere karşı dayanıklılığını incelemektedir. Aramid, E-cam ve grafit dokulardan oluşan üç çeşit örgü çalışılmıştır. Bu çeşit bir güçlendirme yönteminin zorlu çevre şartlarındaki dayanıklılığını ölçmek adına 46 küçük ölçekli güçlendirilmiş beton çubuk kalsiyum klorid çözeltisinde donma/çözünme veya ıslatma/kurutma döngüsüne konulmuş 12 tanesi de kontrol örneği olarak bırakılmıştır. 60 örnek çubuk arasından 45 tanesi (her birinden 15'er tane olmak üzere) aramid, E-cam ve grafit kompozit örgüyle kaplanmış, 15 tanesine ise herhangi bir kaplama yapılmamıştır. Çevre koşullarına maruz bırakılma süresini değiştirerek ve kırılana kadar yükleme yaparak dışarıdan güçlendirilmiş çubukların dayanıklılık performansı ölçülmüştür. Test sonuçlarında klorid çözeltisi içinde ıslatma/kurutma döngüsünde ve donma/çözünme döngüsüne maruz bırakmanın çubukların dayanıklılığını azalttığı, ıslatma/kurutma döngüsünün biraz daha fazla zarar verdiği ortaya çıkmıştır. Her iki döngü de beton ile kompozit örgü arasındaki bağ gücünde azalmaya sebep olmuştur. İncelenen 3 tip malzeme arasında 100 döngü sonunda grafit güçlendirilmiş çubukların en dayanıklı olduğu ve kaplanmamış çubuklara oranla %140 olan dayanıklılığından %15'ten az miktarda kayıp yaşadığını göstermektedir.

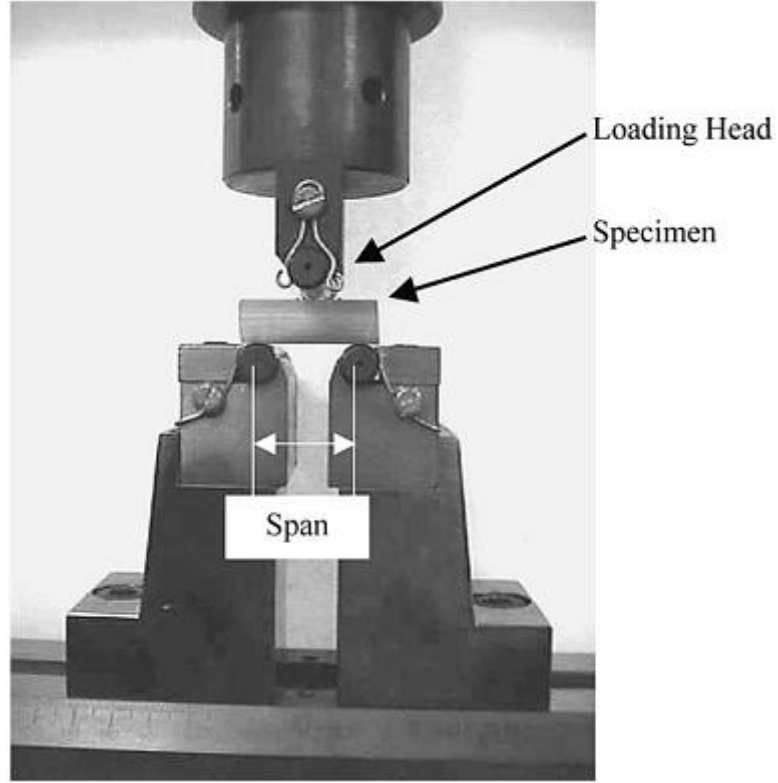


Şekil 45: Test mekanizması[18]

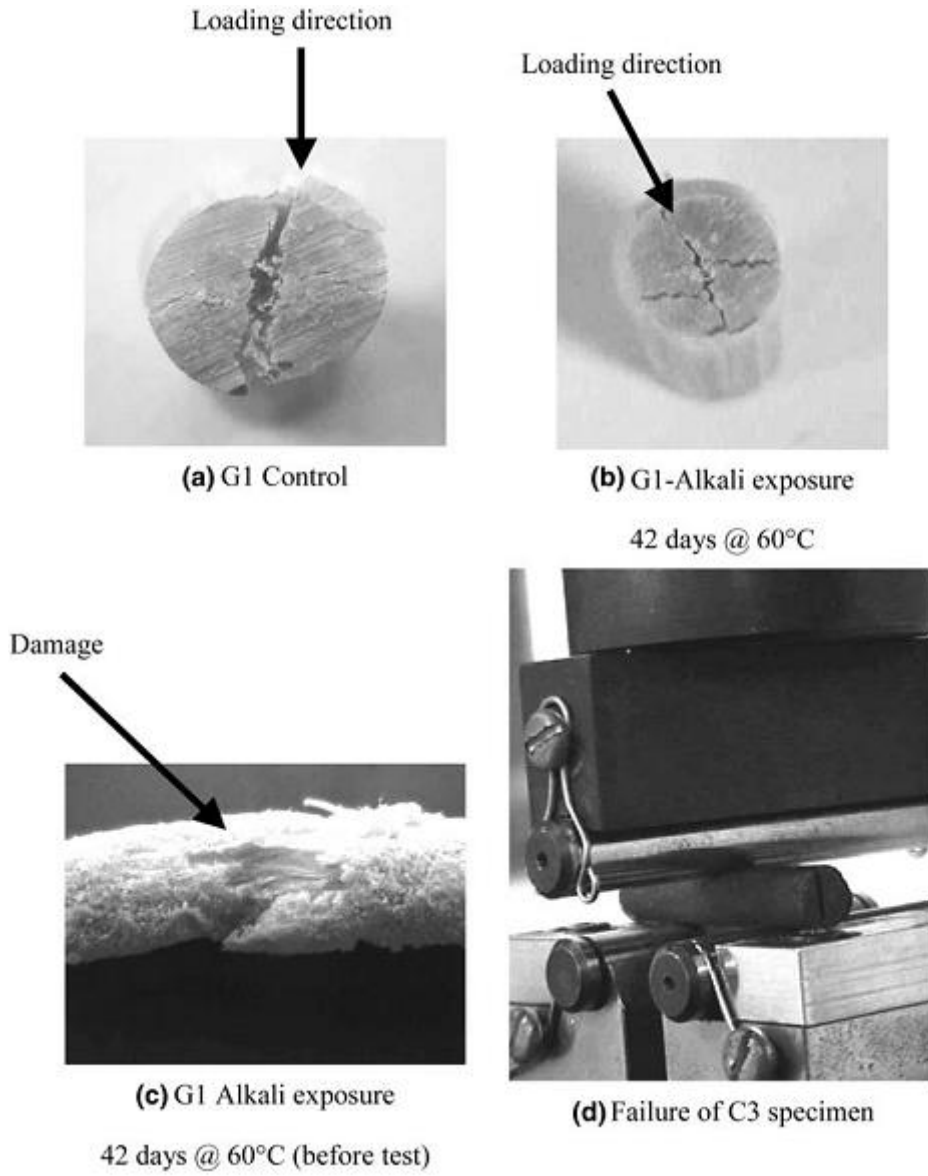
4.10. Beton yapılarda FRP çubukların dayanıklılığı

Geçen 20 yılda FRP çubuklar çelikle güçlendirilmiş beton yapılarda korozyonu önlemek adına en çok ümit vaat eden ve kullanılan malzeme olarak öne çıktı. Yeni veya hasarlı yapılarda FRP çubukların kullanılmasını tasarlamak için FRP ürünlerin mekanik ve dayanıklılık özelliklerini hesaba katmak gerekmektedir. Uzun süreli çevresel etkiler sonrası FRP malzemelerin yapısal davranışı hakkındaki çekinceler devam etmektedir. Cam FRP çubuklar söz konusu olduğunda betonun nemlendirilmesi sırasında ortaya çıkan yüksek pH değerine sahip çözeltiler dokularda kimyasal bozulmalara sebep olabilmektedir. Bu çalışmada hızlandırılmış yaşlanmanın FRP çubuklar üzerine etkisini inceleyen bir deney protokolü tasarlandı. 5 çeşit cam ve karbon FRP çubukların fiziksel ve mekanik özellikleri incelendi. FRP örnekleri alkalin çözeltilisine yatırıldı ve donma/çözünme, yüksek nem, yüksek sıcaklık ve yüksek morötesi ışına maruz bırakıldı. Özelliklerindeki kayıpları ve dayanıklılığındaki azalmanın nedenlerini incelemek üzere fiziksel ve mekanik testler

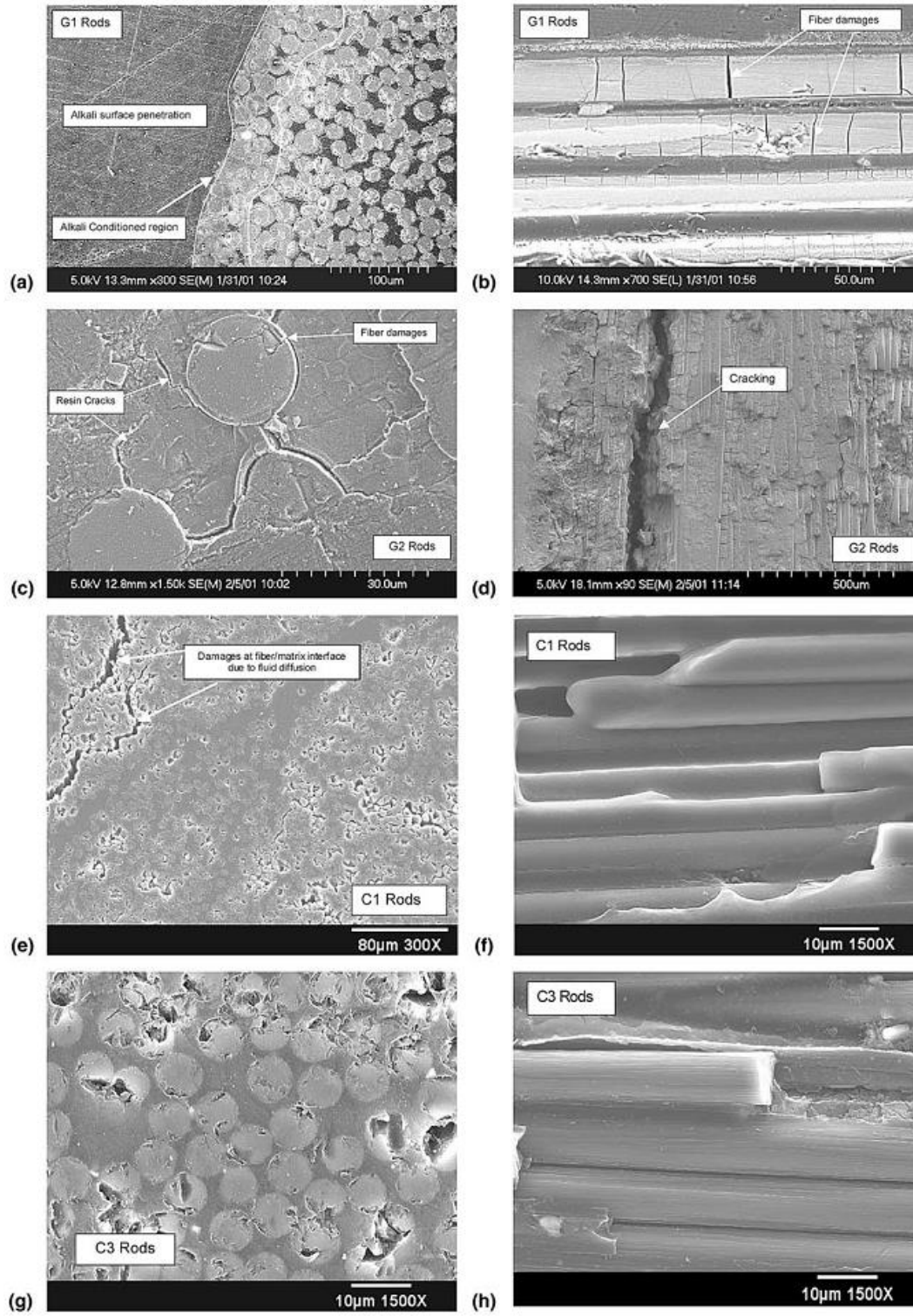
yapıldı. Deney sonuçları reçine özelliklerinin FRP malzemenin dayanıklılığı üzerinde büyük etkisi olduğunu, çevresel koşullardaki döngülerin örnek çubuklar üzerinde ciddi hasar vermediğini ve reçine dokularda yeterli korumayı sağlayamadığında GFRP çubukların alkalın bozulmasına hassas olduğunu göstermektedir.



Şekil 46: Test Mekanizması[19]



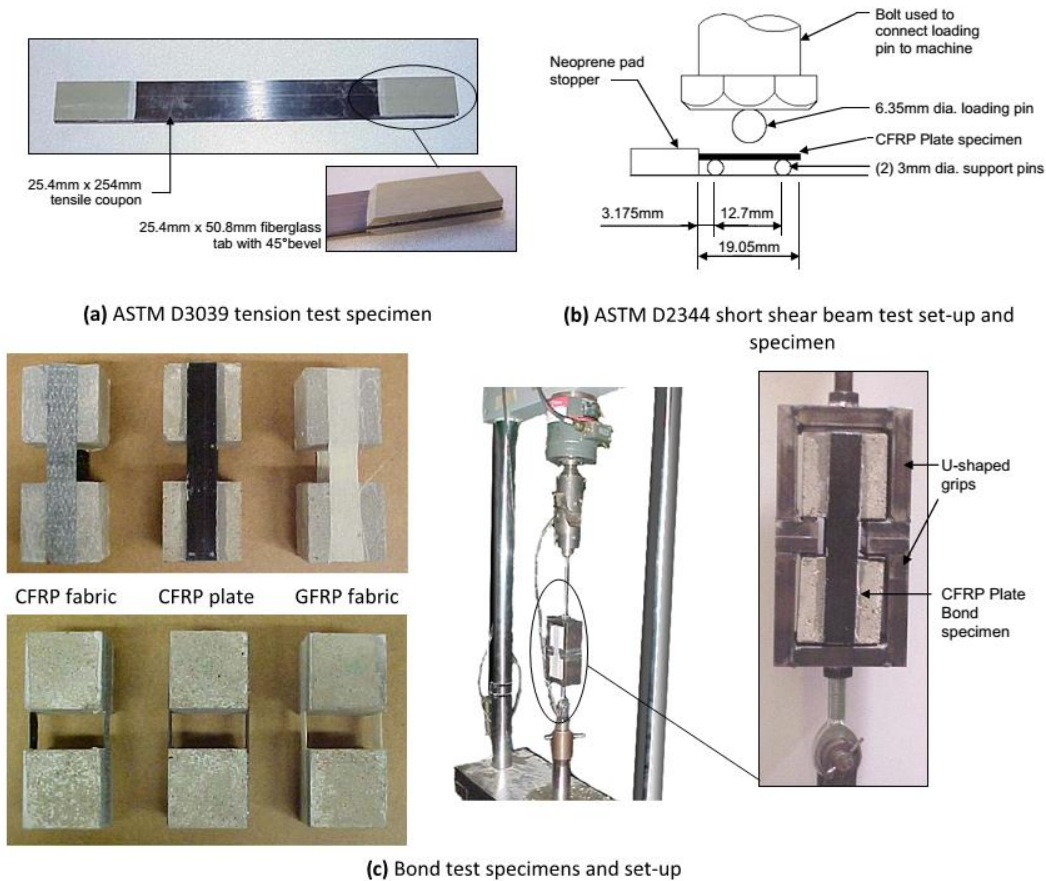
Şekil 47: 60 °C de 42 gün bekletilmiş numuneler, testten önce[19]



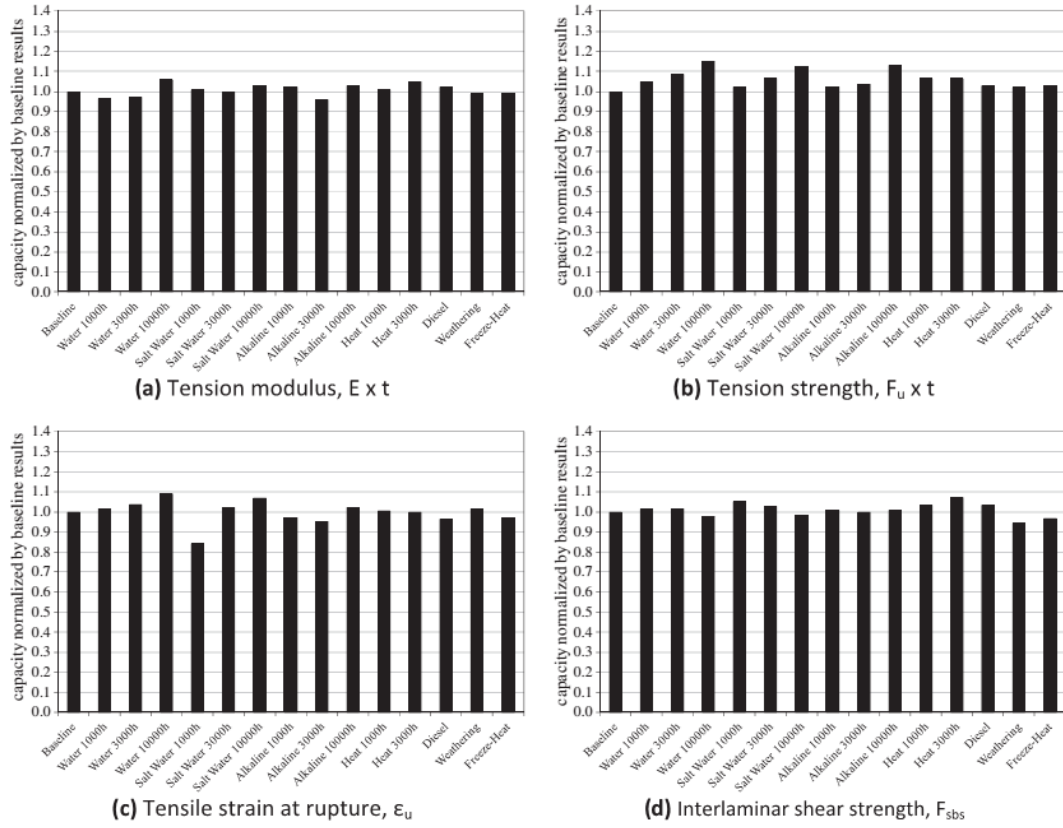
Şekil 48: FRP çubuklar alkali ortam[19]

4.11. Beton yapıların tamiri için dışarıdan bağlanan FRP malzemelerin çevresel dayanıklılığı

Bu deney FRP malzemelerin ve FRP – beton bağlantılarının çeşitli çevre koşulları altındaki performansını incelemektedir. Üç FRP sisteminin dokuz farklı çevresel koşul altındaki davranışını ele alan kapsamlı deneyler ele alınmıştır. Çevresel koşulların etkileri dört farklı standart test yöntemiyle irdelendi. FRP malzemelerin, test metotlarının ve çevre koşullarının 64 farklı permütasyonu ile veritabanı oluşturuldu. Sonuçlar hem FRP sistem performansına hem de çevresel koşullara uygunluk ile değerlendirildi. Son olarak, ACI öngörölmüş çevresel bozulma faktörlerine yeni bir yaklaşım önerildi.



Şekil 49: Test mekanizmaları[20]

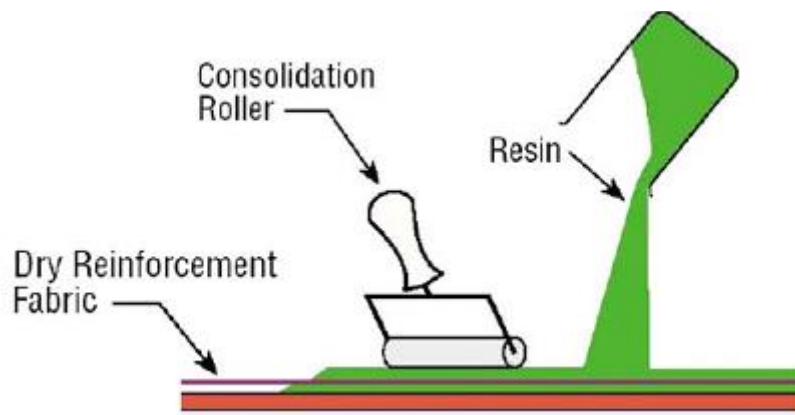


Şekil 50: CFRP plaka çekme test sonuçları , normalize sonuçlar[20]

4.12. Deniz suyu ve şebeke suyunun GFRP laminelerin dayanıklılığı üzerine etkisi

Çevresel kirlilik kompozit malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinde istenmeyen sonuçlar doğurur. Bu makale deniz suyunun ve şebeke suyunun simetrik ve simetrik olmayan sekiz katmanlı GFRP kompozit laminelerin mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisini incelemektedir. Lamineler mekanik ve fiziksel özelliklerini incelemek için üç noktalı eğilme testi ve elektron mikroskop taraması (SEM) kullanıldı. Sonuçlar 2000 saatin sonunda simetrik laminelerin deniz suyuna ve şebeke suyuna maruz kaldıklarında sırasıyla %60 ve %55 oranında esnekliğini

kaybettiğini, simetrik olmayan laminelerin ise sırasıyla %28 ve %29.4 oranında esneklik kaybına uğradığını göstermektedir.



Şekil 51: Uygulanan sistem[21]

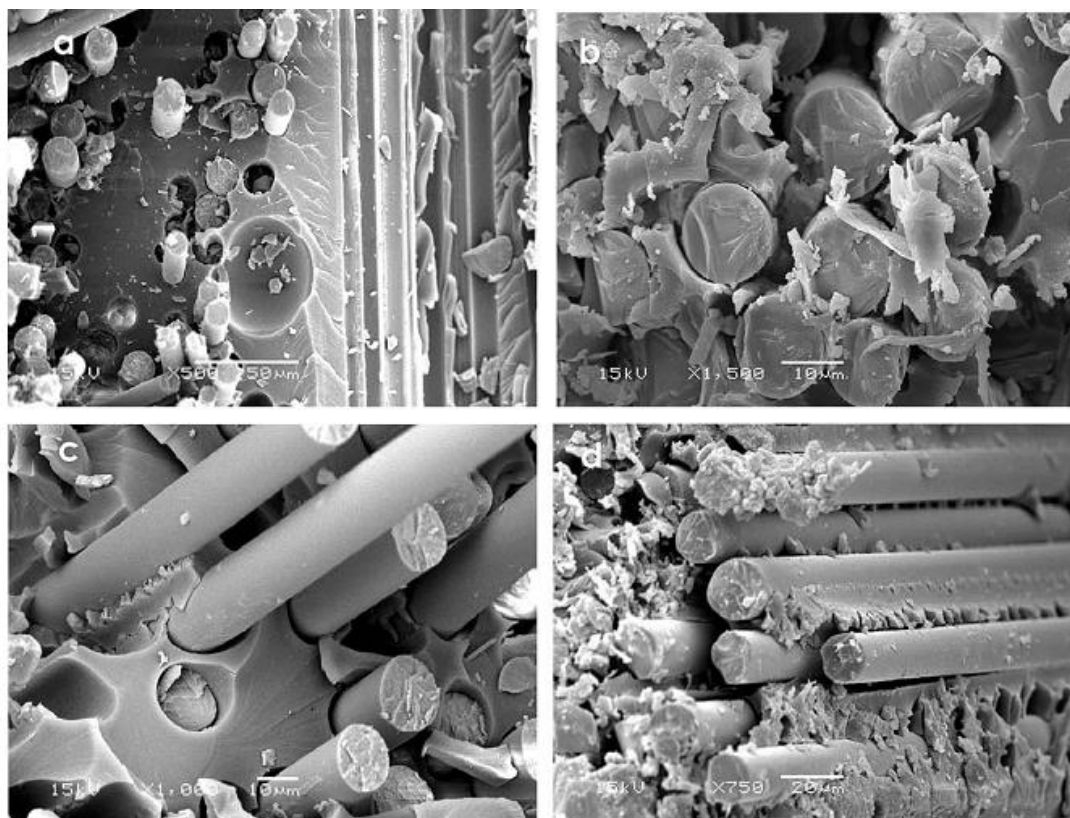


Fig. 5. Sea water exposure of (a) 0 h, (b) 500 h, (c) 1000 h and (d) 2000 h.

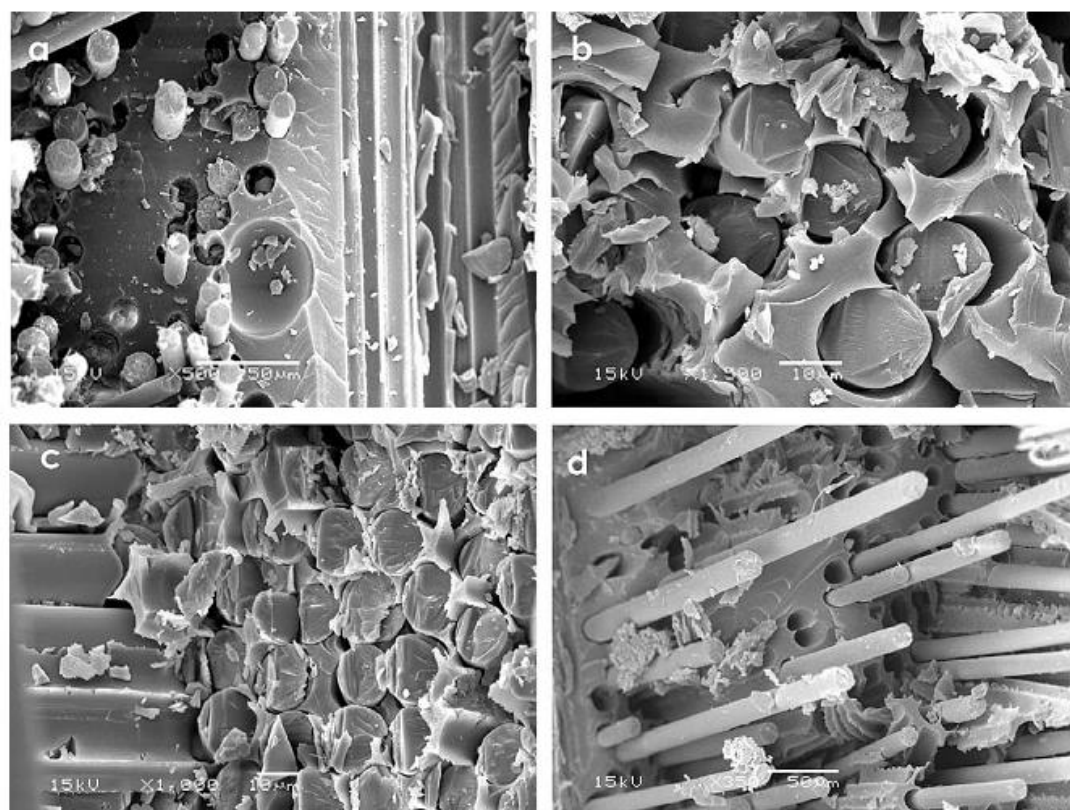


Fig. 6. Tap water exposure of (a) 0 h, (b) 500 h, (c) 1000 h and (d) 2000 h.

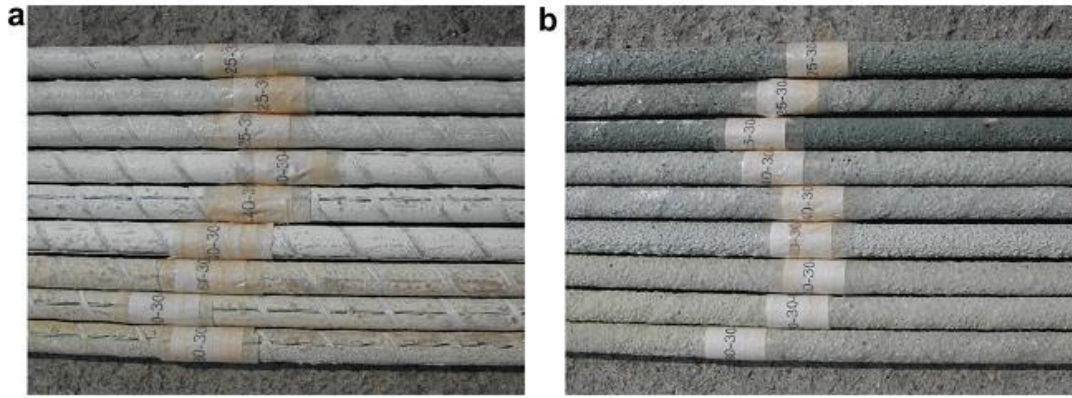
Şekil 52: Musluk suyu ve deniz suyu etkisi[21]

4.13. Çeşitli çevresel durum altındaki GFRP çubuklarının kısa dönem dayanıklılık testi

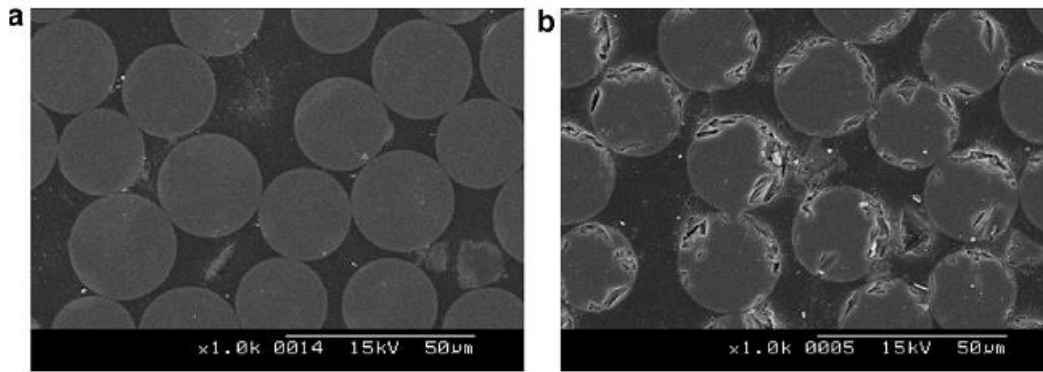
Bu çalışma çeşitli çevresel şartlara maruz kalmış GFRP çubuklarının kısa dönem dayanıklılık testi sonuçlarını sunar. Bu çalışmanın asıl amacı, hızlandırılmış yaşlandırma yöntemi kullanılarak bozulmuş GFRP kompoziti ve bunun çekme özelliklerine etkisini incelemektir. Yaklaşık 132 gün boyunca iki tip E-glass/vinylester çubukları nem, klorür, alkali ve donma/çözünme döngüsü durumlarına maruz bırakılmıştır. GFRP kompozitin micro seviyedeki bozulmasını incelemek amacıyla, strand-type E-glass/vinylester çubuk örnekleri de üretilmiş ve test edilmiştir. GFRP çubuklarının çekme özellikleri, koşullara maruz kaldıktan sonra önemli ölçüde indirgendiklerini test sonuçları göstermiştir.



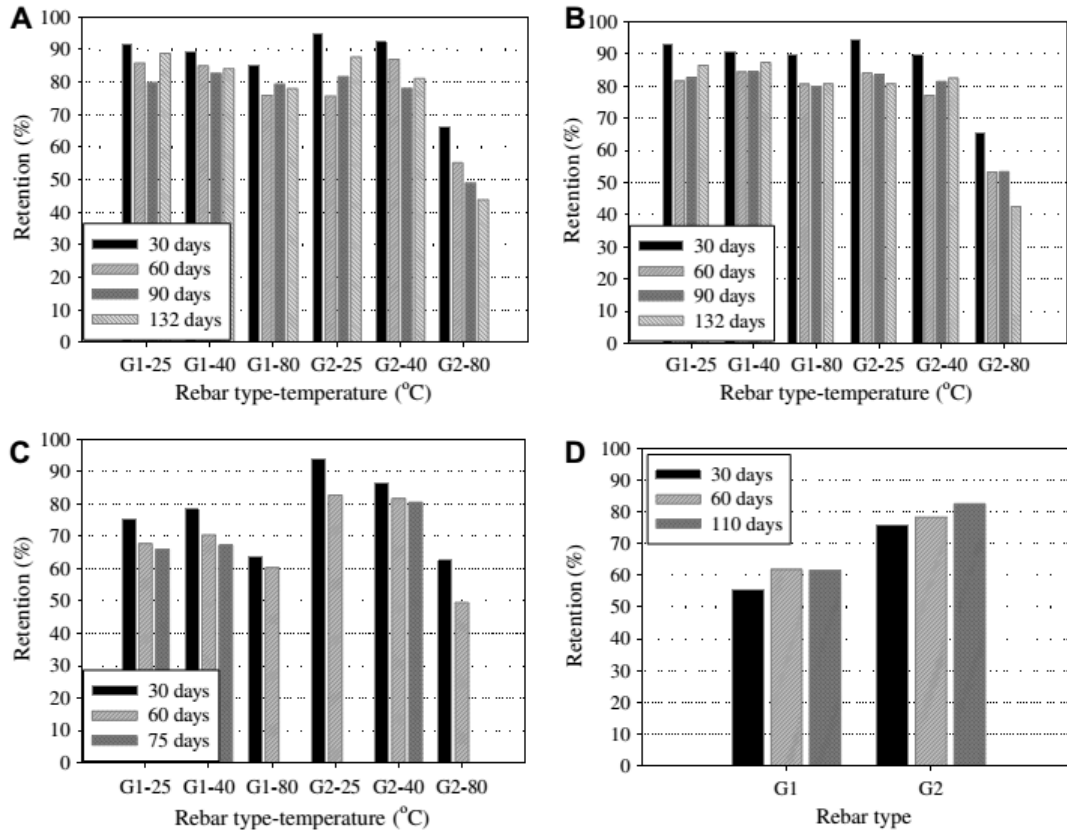
Şekil 53: Ara yüzey kayma testi mekanizması[22]



Şekil 54: İki farklı numune fotoğrafları[22]



Şekil 55: Örnek G2 SEM görüntüsü (a) koşulsuz ve (b) 60 gün süreyle 40 ° C sıcaklıkta alkalın çözeltisi içinde daldırıldı[22]



Şekil 56: Gerilme mukavemetindeki tüm boy örneklerin muhafaza durumu a) su; b) NaCl çözeltisi c) Alkalın çözeltisi ve d) donma-çözünme döngüsü[22]

BÖLÜM 5: SONUÇ VE ÖNERİLER

- Yapılan araştırmaların sonuçları gösteriyor ki; durabilite, GFRP ya da FRP malzemeler dahi kullanılsa, yapı bilimi için hala oldukça büyük bir sorun halindedir.
- Her ne kadar GFRP malzemeler çelik, beton ve ahşap karşısında, fiziksel, mekanik ve kimyasal etkilere karşı daha dayanıklı olsa da, bu istenen değerde olmamaktadır.
- GFRP malzemelerden en üst dayanıklılığı almak için sadece maddenin kendisinin değil, birleşim için kullanılan reçinenin, GFRP donatı olarak kullanılacaksa betonun ve betonla arasındaki aderansın uygun olması gerekmektedir. Ayrıca çok çeşitte üretimi olan FRP malzemenin hangi teknikle üretilmiş olanını kullanmak gerektiğine dair seçimde, yapının kullanım amacına göre oldukça titizlik ve dikkatlice seçilmek zorundadır.
- Tüm bu kusurlara, sorunlara karşın, günümüzde FRP yapı bilimi için çeliğin önüne geçebilecek oldukça değerli bir malzemedir. Uzun vadede (100 yıl) bakım onarım gerektirmeyeceği için ekonomik olduğu da söylenebilir.
- FRP malzemelerin onarım ve güçlendirme amacıyla kullanımı ise oldukça iyi sonuçlar vermekle birlikte burada da betonun kalitesi ve beton-FRP malzeme arası uyum, reçine bağ kuvveti gibi bir çok etmen dayanım ve dayanıklılığı değiştirmektedir.
- Özellikle günümüzde sertleşen çevre koşulları (asit yağmurları, iklim değişiklikleri, deniz suyundaki asitlik oranı vs.) bu malzemelerin dayanım ve dayanıklılığını önemli ölçüde azalttığı için ilk kullanımda beklenen performans sonraki zamanlar için geçerli olmayacaktır.
- Tüm değerlendirme sonuçlarını kıyaslarsak, FRP çeliğe göre, dayanım ve dayanıklılık(durabilite) açısından bir nebze daha tercih edilebilir bir malzemedir.

Tablo1: Elementlerin çelik alaşımı üzerindeki etkileri

ELEMENTLERİN ÇELİK ALAŞIMI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ													
	Si	Mn*	Mn**	Cr	Ni*	Ni**	Al	W	V	Co	Mo	S	P
Sertlik	artar	artar	azalır	artar	artar	azalır	-	artar	artar	artar	artar	-	artar
Mukavemet	artar	artar	artar	artar	artar	artar	-	artar	artar	artar	artar	-	artar
Akma Noktası	artar	artar	azalır	artar	artar	azalır	-	artar	artar	artar	artar	-	artar
Uzama	azalır	değişmez	azalır	azalır	değişmez	artar	-	azalır	değişmez	azalır	azalır	azalır	azalır
Darbe Direnci	azalır	değişmez	-	azalır	değişmez	artar	azalır	-	artar	azalır	artar	azalır	azalır
Elastisite	artar	artar	-	artar	-	-	azalır	-	artar	-	-	-	-
Sıcaklığa dayanım	artar	değişmez	-	artar	artar	artar	-	artar	artar	artar	artar	-	-
Soğutma hızı	azalır	azalır	azalır	azalır	azalır	azalır	-	azalır	azalır	artar	azalır	-	-
Aşınma direnci	azalır	azalır	-	artar	azalır	-	-	artar	artar	artar	artar	-	-
Dövülebilirlik	azalır	artar	azalır	azalır	azalır	azalır	azalır	azalır	artar	azalır	azalır	azalır	azalır
İşlenebilirlik	azalır	azalır	azalır	-	azalır	azalır	-	azalır	-	değişmez	azalır	artar	azalır

KAYNAKLAR

- [1] Bülent Baradan, Serdar Aydın; Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir
- [2] Fevziye Aköz, Özgür Çakır Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü İstanbul
- [3] Salih Taner YILDIRIM1 ve Cevdet Emin EKİNCİ Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Kocaeli, Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü Elazığ styildirim@kou.edu.tr
- [4] DETERIORATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF PULTRUDED FRP THROUGH EXPOSURE TESTS
I.Nishizaki, T, Kishima and Sasaki 1 Team Leader, Public Works Research Institute, Tsukuba, Japan 2 Senior Researcher, Public Works Research Institute, Tsukuba, Japan 3 Senior Researcher, Public Works Research Institute, Tsukuba, Japan
- [5] Masmoudi, R., Nkurunziza, G., Benmokrane, B., and Cousin, P. Associate Professor ,Ph.D. Candidate , NSERC Chair Professor , Research Associate NSERC Chair, ISIS Canada, Department of Civil Engineering, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, J1 K 2R1 , Canada
- [6] Fiber Takvyeli Polimer Uygulamalarında Yapışma Yüzeyi Kalitesinin Kompozit Performansına Etkisi K. Yılmaz, M. Akçil, A. Çelik
- [7] Semih S. TEZCAN (1) / İnşaat Mühendisliği Bölümü, Boğaziçi Üniversitesi İdil Yurdakul PEKER / Sika Yapı Kimyasalları AŞ Teknik Servis Sorumlusu

- [8] Deprem Sempozyumu, Kocaeli 2005, Mehmet SARIBIYIK, Onur ÖZTÜRK
- [9] Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
- [10] Yi Chen , Julio F. Davalos , Indrajit Ray , Hyeong-Yeol Kim
Department of Civil and Environmental Engineering, West Virginia University, Morgantown, WV 26506-6103, USA
Department of Structural Engineering, Korea Institute of Construction Technology, Republic of Korea Available online 29 September 2005
- [11] Yasushi Miyanoa,, Masayuki Nakadaa, Naoyuki Sekineb
Materials System Research Laboratory, Kanazawa Institute of Technology 3-1 Yatsukaho, Matto, Ishikawa 924-0838, Japan Graduate School, Kanazawa Institute of Technology 7-1 Ohgigaoka, Nonoichi, Ishikawa 921-8501, Japan Received 31 May 2003; accepted 6 November 2003
Available online 12 April 2004
- [12] Mathieu Robert, Brahim Benmokrane Department of Civil Engineering, University of Sherbrooke, 2500 blvd Université, Sherbrooke, Quebec, Canada
- [13] Vistasp M. Karbhari , Kumar Ghosh University of Alabama in Huntsville, 366 Shelbie King Hall, Huntsville, AL 35899, USA b California Department of Transportation, 21073 Pathfinder Rd., Suite 200, Diamond Bar, CA 91765, USA
- [14] Jikai Zhou, Xudong Chen ,Shixue Chen College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China
- [15] Jong-Pil Won , Yi-Na Yoon, Byung-Tak Hong, Tei-Joon Choi, Su-Jin Lee
Department of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Republic of Korea
- [16] Francesca Ceroni a, Edoardo Cosenza , Manfredi Gaetano , Marisa Pecce a
Department of Engineering, University of Sannio, P.zza Roma 21, 82100 Benevento, Italy Department of Structural Analysis and Design, University of Naples Federico II, via Claudio 21, 80125, Italy
Available online 30 August 2006

- [17] Yanchun Yun, Yu-Fei Wu Department of Building and Construction, City University of Hong Kong, Hong Kong
- [18] Michael J. Chajes, Theodore A. Thomson, Jr. and Cory A. Farschman Department of Civil Engineering, University of Delaware, 137 DuPont Hall, Newark, DE 19716, USA Received 1 August 1994; revised 5 November 1994; accepted 21 November 1994
- [19] Francesco Micelli , Antonio Nanni Innovation Engineering Department, University of Lecce, Via per Monteroni, 73100 Lecce, Italy Center for Infrastructure Engineering Studies, The University of Missouri–Rolla, 218 Engineering Research Lab, Rolla, MO 65409-0710, USA Received 17 July 2003; received in revised form 1 April 2004; accepted 2 April 2004 Available online 10 June 2004
- [20] J.R. Cromwell , K.A. Harries , B.M. Shahrooz THP Limited, Cincinnati, United States Department of Civil and Environmental Engineering, University of Pittsburgh, United States School of Advanced Structures, University of Cincinnati, United States
- [21] Saud Aldajah, Ghydaa Alawsi, Safaa Abdul Rahmaan United Arab Emirates University, Al-Ain, United Arab Emirates University of Technology, Baghdad, Iraq
- [22] Hyeong-Yeol Kim , Young-Hwan Park , Young-Jun You , Chang-Kwon Moon Structure Research Department, Korea Institute of Construction Technology, 2311 Daewha-Dong Ilsan-Gu Goyang, Gyeonggi-Do 411-712, Republic of Korea Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, 100 Yongdang-Dong, Busan 608-739, Republic of Korea Available online 20 March 2007