S355JR KALİTE ÇELİK PROFİLLER İLE CTP PROFİLLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE YORULMA DAVRANIŞLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Ece Aydan AYDINLI

2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ ve MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI

S355JR KALİTE ÇELİK PROFİLLER İLE CTP PROFİLLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE YORULMA DAVRANIŞLARININ KARŞLAŞTIRILMASI

Ece Aydan AYDINLI

T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI

KARABÜK
ARALIK 2021

Ece Aydan AYDINLI tarafından hazırlanan "S355JR KALİTE ÇELİK PROFİLLER İLE CTP PROFİLLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE YORULMA DAVRANIŞLARININ KARŞLAŞTIRILMASI" başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI .....
Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 24/12/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mustafa ACARER (SÜ) .....

Üye : Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI (KBÜ) .....

Üye : Doç. Dr. Yunus TÜREN (KBÜ) .....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ .....
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Ece Aydan AYDINLI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

S355JR KALİTE ÇELİK PROFİLLER İLE CTP PROFİLLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE YORULMA DAVRANIŞLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Ece Aydan AYDINLI

Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:
Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI
Aralık 2021, 44 sayfa

CTP (Camelyaf takviyeli plastik), cam elyafı ile taşıyıcı bir matriks reçinenin birleştirilmesi ile elde edilen kompozit bir malzemedir. Camelyaf takviyeli plastik, ortam koşullarına dayanıklı, esnek ama yeterli mekanik dayanıma sahip olmayan plastik (ör: polyester reçine) ile, yüksek mekanik dayanımlı camelyafının bir araya getirilmesi ile elde edilen üstün nitelikli bir kompozit mühendislik malzemesidir [1]. Cam elyafından mekanik dayanım özelliği, plastikten esneklik özelliği alınarak kusursuz bir malzeme oluşturulmaktadır. Fiziksel performans, takviye malzemesi olan camelyafının, CTP içindeki oranına, CTP içindeki dağılımına ve CTP içindeki yönüne bağlıdır. Cam elyafla güçlendirilmiş plastikler, kompozit malzemelerin yapısal uygulamaları için iyi bir potansiyele sahiptir. Yüksek dayanım ve yüksek performans sağlama yeteneği sebebiyle cam elyaf, yapısal kompozit malzemelerde güçlendirici olarak kullanılır. CTP profillerin seçilmesindeki en büyük avantajlar; hafiftirler ve taşınma maliyeti benzerine göre daha hesaplıdır. Montaj süresince kolayca taşınırlar

ve kolay montaj edilirler. Taşıma kapasite oranları yüksektir bu yüzden çeliğe nazaran çekme, eğme, basma yüksek değerlere sahiptirler.
Esneme ve sonrası eski halini alması darbe mukavetine dirençli olduğunu gösterir. Paslanma ve çürüme olmadığından korozyona dayanıklılığı iyidir. İş güvenliğinin riskli olduğu sahalarda kullanılabilirler elektrik iletkenliği yoktur. Su jeti ile temizlenebilme özelliğine sahip olduğundan boya ve koruma istemezler. Uzun ömürlüdürler ve teorik olarak deformasyon yaşamazlar. Bu çalışmada ise, çelik yapı inşaat ve köprü imalatı gibi birçok alanda önemli bir yere sahip olan S355JR kalite profillerin yorulma deneylerinin yapılması hedeflenmiştir. S355JR kalite profiller sünekliği, yaklaşık 455 MPa mukavemet değerleri ile öne çıkmaktadır. Bu sebeplerden dolayı yorulma davranışının iyi yönde gelişeceği beklenmektedir. Ayrıca bu çalışmada ülkemizde yeni tanınmaya başlanan Cam Elyaf Takviyeli (CTP) kompozit profillerin yorulma davranışlarının çelik profillerle karşılaştırmalı olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Çelik profillerin yorulma davranışının yukarıda saydığımız özelliklerinden dolayı olumlu yönde gelişmesi beklenmektedir.

Anahtar Sözcükler : Paslanmaz çelik, CTP (Cam Elyaf Takviyeli), yorulma, Mekanik özellikler.

Bilim Kodu : 91512

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

COMPARISON OF MECHANICAL PROPERTIES AND FATIGUE BEHAVIORS OF S355JR QUALITY STEEL PROFILES AND GRP PROFILES

Ece Aydan AYDINLI

Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Metallurgy and Material Engineering

Thesis Advisor:
Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI
December 2021, 44 pages

FRP (glass fiber reinforced plastic) is a composite material obtained by combining glass fiber and a carrier matrix resin. Fiberglass reinforced plastic is a high-quality composite engineering material obtained by combining plastic (eg polyester resin) that is resistant to ambient conditions, flexible but does not have sufficient mechanical strength, and glass fiber with advanced mechanical resistance [1].

A perfect material is created by taking the mechanical strength feature from glass fiber and the flexibility feature from plastic. Physical performance depends on the ratio of the reinforcing glass fiber in the FRP, its distribution in the FRP and its orientation in the FRP. Glass fiber reinforced plastics have good potential for structural applications of composite materials. Due to its high strength and ability to provide high performance, glass fiber is used as a reinforcement in structural composite materials. The biggest advantages in choosing FRP profiles are; they are light and the

transportation cost is more affordable than their counterparts. They are easily transported and easily assembled during assembly. Their carrying capacity ratios are high, so they have tensile, bending and compression values compared to steel.
Stretching and regaining its original shape shows that it is resistant to impact strength. Corrosion resistance is good since there is no rust and corrosion. They can be used in areas where occupational safety is risky. There is no electrical conductivity. Since it can be cleaned with water jet, they do not require paint and protection. They are long-lasting and theoretically do not deform. In this study, it is aimed to perform fatigue tests of S355JR quality profiles, which have an important place in a lot of areas such as steel structure construction and bridge manufacturing. S355JR quality profiles stand out with their ductility and 455 MPa strength values. Because of these reasons İt is expected that the fatigue behavior will develop in a good way. In addition, İt is aimed to examine for in the work of the fatigue behavior of Glass Fiber Reinforced (GRP) composite profiles, which are newly recognized in our country, in comparison with steel profiles. That is the expected that the figue behavior of steel profiles will develop positively due to the properties mentioned above.

Key Word : Stainless steel, FRP (Glass Fiber Reinforced), fatigue, mechanical properties.

Science Code : 91512

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, incelenmesinde, oluşumunda ilgi ve desteklerini esirgemeyen, tecrübelerinden yararlandığım, bilgilendirmeleriyle çalışmamı teknik ve bilimsel açıdan yönlendiren sayın hocam Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans tez sürecinde desteklerinden dolayı meslektaşım Metalurji ve Malzeme Yüksek Mühendisi Abdulrezzak ERDEM'e, çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Canipek ALTAN'a, çelik numunelerimin inceltilmesinde kıymetli desteğini esirgemeyen İZA Makina'nın sahibi Makina Mühendisi sevgili arkadaşım İzzettin AKILLI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Değerli aileme manevi hiçbir yardımı esirgemeden yanımda oldukları için, tüm kalbimle aileme teşekkür ederim.

Bu çalışma KBÜBAP-21-YL-041 no'lu proje kapsamında Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL ii
ÖZET iv
ABSTRACT vi
TEŞEKKÜR viii
İÇİNDEKİLER ix
ŞEKİLLER DİZİNİ xii
ÇİZELGELER DİZİNİ xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xiv

BÖLÜM 1 1
GİRİŞ 1

BÖLÜM 2 5
KOMPOZİT BİLEŞENLERİ 5
2.1. LİFLER 5
2.1.1. Fiber Tipleri 5
2.1.2. Cam Elyafları 7
2.1.3. Karbon Fiberler 8
2.2. MATRİS 8
2.2.1. Matris bileşenleri 9
2.2.2. Reçineler 9
2.2.3. Dolgu 11
2.2.4. Katkı Maddeleri 11
2.3. FİBER-MATRİS UYUMU 12

Sayfa

BÖLÜM 3 13
CTP UYGULAMA ALANLARI 13
3.1. BETONUN GÜÇLENDİRİLMESİ 14
3.2. TÜM KOMPOZİT KÖPRÜ YAPILARI 15

BÖLÜM 4 17
DENEYSEL ÇALIŞMALAR CTP ÜRETİM 17
4.1. ÜRETİM YÖNTEMİ SEÇİMİ 17
4.2. MANUEL VE YARI OTOMATİK YÖNTEMLER 18
4.3. TAM OTOMATİK YÖNTEMLER 20
4.3.1. Pultruzyon 20
4.3.2. Filament Sargı 25
4.3.3. Reçine Transfer Kalıplama 26

BÖLÜM 5 28
GELENEKSEL MALZEMELER İLE KARŞILAŞTIRMA 28
5.1. GELENEKSEL MALZEMELERE GÖRE AVANTAJ ve DEZAVANTAJLARI 28

BÖLÜM 6 30
DENEYSEL ÇALIŞMALAR 30
6.1. MİKRO YAPI ÇALIŞMALARI 30
6.2. ÇEKME EĞME TESTLERİ 30
6.3. YORULMA DENEYİ ÇALIŞMALARI 31

BÖLÜM 7 33
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA 33
7.1. MİKROYAPI SONUÇLARI 33
7.2. ÇEKME-EĞME DENEYİ SONUÇLARI 34
7.3. YORULMA DENEYİ 35

Sayfa

BÖLÜM 8 40
GENEL SONUÇLAR 40
KAYNAKLAR 41
ÖZGEÇMİŞ 44

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Pultruzyon metodu ile üretilmiş CTP profil örnekleri [8] 2
Şekil 1.2. CTP profillerle üretilmiş hafif yapı [8] 3
Şekil 2.1. Yüzey takviye örnekleri: düz fitil kumaşlar: a) örgü, b) eğik, c) saten, d) pürüzsüz tek yönlü fitil kumaş, e) mat, f) fitil düz geçmeli örgü kumaş [13] 6
Şekil 2.2. (a) Cam fiber kumaş [15] (b) Karbon fiber kumaş [16] 7
Şekil 3.1. Yapısal CTP'nin bazı uygulamaları – (a) Merdivenler ve platformlar (Brezil'yada) (b) Kolding yaya köprüsü (Danimarka'da) (c) Eyecatcher Binası (İsviçre'de), (d) ETAR Vila Moura (Portekizde) 13
Şekil 3.2. E.T Techtonics tarafından inşa edilen Audubon Canyon Ranch [30] 15
Şekil 3.3. İngiltere'deki Smith Road Köprüsü'nün CTP U şeklindeki kirişleri [31]. 16
Şekil 4.1. Yarı otomotik (a) Elle döşeme ve (b) Püskürtme işlemi [33] 18
Şekil 4.2. Pultruzyon işlemi [6] ve Pultruzyon makinesinin taslak gösterimi [34].... 21
Şekil 4.3. Cam elyaf takviyeli polimerlerin pultruzyon işlemi 21
Şekil 4.4. Fiberimsi pultruzyon (toz alma) ekipmanları [14] 22
Şekil 4.5. Pultruzyon metodu ile üretilmiş profil detayı [34] 23
Şekil 4.6. Filament sargı işlemi [35] 25
Şekil 4.7. Reçine transfer kalıplama işlemi / çizimi [33] 26
Şekil 4.8. Vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) işlemi 27
Şekil 6.1. Yorulma test düzeneği 31
Şekil 6.2. Yorulma deney numunesi (CTP) 32
Şekil 7.1. S355JR kalite çeliğin 10X, 20X, 50X ve 100X büyütmedeki mikroyapı görüntüleri 33
Şekil 7.2. S-N Egrisi (Maksimum Gerilme-Çevrim Sayısı) 36
Şekil 7.3. S355JR (a) düşük (b) yüksek yorulma ömürlerine sahip numunelerin makro kırık yüzey görüntüleri 37
Şekil 7.4. Düşük büyütmede (a) yüksek gerilmedeki ve (b) düşük gerilmedeki yorulma ömürlerine karşılık gelen CTP malzemesinin kırık yüzey SEM görüntüsü 38
Şekil 7.5. Yüksek büyütmede (a) yüksek gerilmedeki ve (b) düşük gerilmedeki yorulma ömürlerine karşılık gelen CTP malzemesinin kırık yüzey SEM görüntüsü 39

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Cam,aramid ve karbon liflerin özellikleri [13] 6
Çizelge 2.2. Malzemelerin mukavemet ve % uzama değerleri 34

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

ρC	: Kompozitin Yoğunluğu
ρM	: Matris Malzemesinin Yoğunluğu
V_m	: Matris Malzemesinin Hacim Kesri
ρF	: Fiber Malzemesinin Yoğunluğu
V_f	: Fiber Malzemesinin Hacim Kesri
E_l	: Kompozitin Uzunlamasına Modulu (Fiberlerin Yönünde)
E_f	: Fiberlerin Modülü
E_m	: Matrisin Modülü
E_t	: Kompozitin Enine Modulu (Fiberlerin Yönüne Dik)
V_c	: Kompozitin Poisson Oranı
ρ	: Yoğunluk
E	: Young Modülü
S355JR	: En 10025-2 Standardına Göre Akma Mukavemeti 355 Mpa Değerini Sağlayan Çelik Kalitesi

KISALTMALAR

Ctp : Cam Elyaf Takviyeli Plastik

Hs : High Strength (Yüksek Mukavemet)

Hm : High Modulus (Yüksek Modüllü)

Pan : Poliakrilonitril

Uv : Ultraviyole

Pp : Polipropilen

Pps : Polifenilen Sülfürdür

Epc : Epoxy Polimer Concrete (Epoksi Polimer Beton)

Hpr : High Performance Composite Rods (Yüksek Performanslı Kompozit Çubuklar)

Smc : Sheet Moulding Compound (Saç Kalıplama Bileşimi)

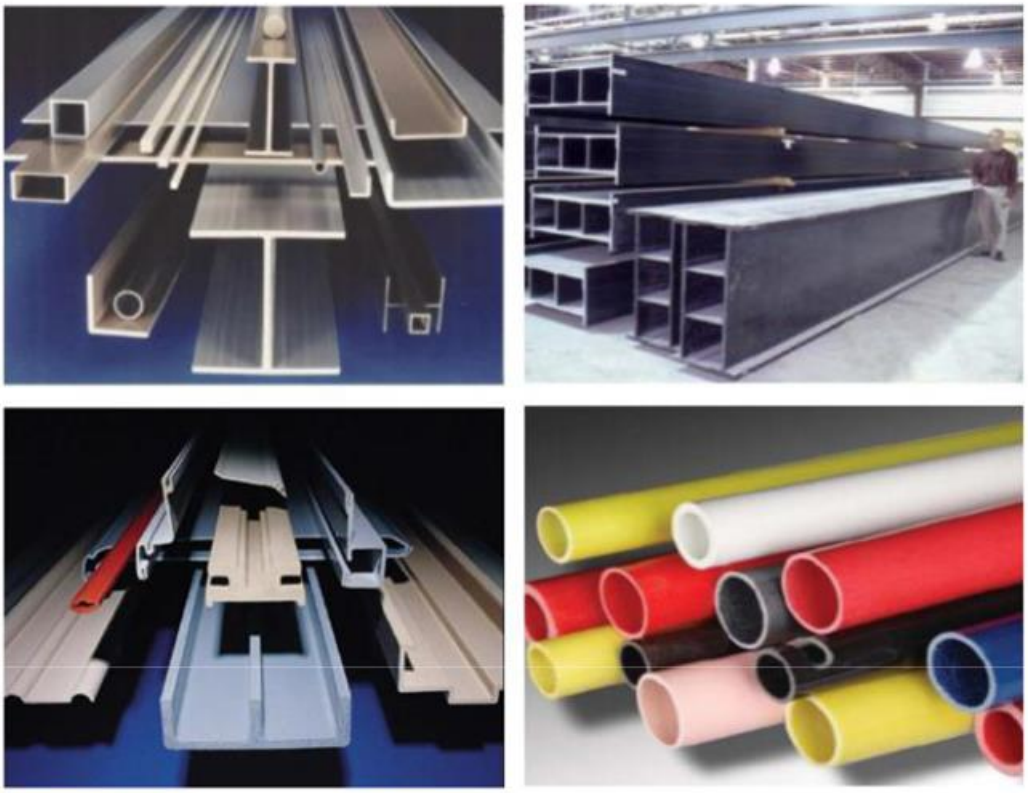
BÖLÜM 1

GİRİŞ

Birden fazla malzemelerin oluşturduğu ve özellik bakımından daha üstünlükler sergilediği malzeme adına kompozit denilmektedir. Oluşan bu malzemelere takviye malzemesi denilmektedir. Yani kompozit malzeme farklı matris özelliklerine sahip malzemelerin bir araya geldikten sonra her matrisin kendi fiziksel özelliğinin avantajını taşıması ile ortaya çıkan üründe bu özelliklerin birleşmesi anlamına gelir [1-3]. Kompozit malzeme, yıllardır insanların değişik özelliklere sahip malzmeleri bir araya getirerek elde ettiği malzemelerdir. Örneğin inşaat sektöründe kullanılan OSB ürünü de farklı bir matrisdeki malzemelerin bir araya gelerek oluşturduğu kompozit malzemedir. Yaşadığımız dünya konjönktüründe ise bu malzemelerin geliştirilmesine ihtiyaç duulmaktadır.

Hafif olmalarının dışında eksi yönde etkileyen özellikleri olan dayanım ve sertlik değerleri düşük olduğundan malzemelerde güçlendirme çalışmaları yapılması ihtiyaç haline gelmiştir. Bu sebepden dolayı 19. yy başlarında polimer içerikli kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Değişik türdeki özellikler birleştirilerek takviye elemanı olarak kullanılacak şekilde üretimler yapılmıştır. Cam epoksi karbon türlerindeki elyaf takviyeli malzemeler en çok kullanılan malzmeler sınıfına girmişlerdir [5]. Fiziksel mukavemetler artılarak elde edilen kompozit türü cam elyaf malzemesi olmuştur.

Cam Elyaf Takviyeli Plastikler (CTP) uygulanabilir durum içinde model kalıp içi reçinelenmiş, gömülü sürekli veya parça kırpılmış cam elyaflardan oluşur. Çeşitli üretim yöntemleriyle elde edilebilir. Profil çekme, tamamlayıcı ve takviye malzme olarak kullanılan en yaygın yöntemdir diyebiliriz.



Şekil 1.1. Pultruzyon metodu ile üretilmiş CTP profil örnekleri [8].

Bağlayıcı ve Matrislere benzer davranan polimerik reçinelerin, destekleme elemanı olarak güçlü ve katı elyaf düzenekleriyle birleşimine Elyaf Takviyeli Polimer kompozitler denir. Takviye edici kısımların oldukça değişkenlik gösterdiği (yani, genel olarak takviye edilmiş beton, nadiren % 5' ten daha fazla takviye içerir, oysa CTP kompozitlerinde, çeşitli kaynaklar takviye edici hacim fraksiyonu % 30-70 arasında değişmektedir) ancak Matris fazının bir takviye fazı ile birleştirilmesi, çelik takviyeli betona benzer yeni bir malzeme sistemi sunar.

Üstün mukavetli olduklarından ötürü inşaat sektöründe ana (taşıyıcı) eleman olarak kullanılma olasığı aranmış ve CTP malzemenin mekanik dayanımının yanısıra, hafifliği, korozyon dayanımı, düşük yoğunluk ve dayanım/yoğunluk oranının yüksekliği, düşük ısı iletkenliğine sahip olması, uzun yıllar bakım ve boya gibi ek bir hizmete ihtiyaç duymaması, üretimin düşük iş gücü ile yapılabilir olması, kolay kesilebilir ve işlenebilir olması gibi özelliklerinden dolayı CTP profilleri inşaat sektöründe birçok malzemenin alternatifi olma yönünde hızla ilerlemektedir. Aşağıdaki şekilde CTP malzeme ile üretilen hafif yapı görseli verilmiştir.

Şekil 1.3. CTP profillerle üretilmiş hafif yapı [8].

CTP tasarımlarda takviye elemanı olarak kullanımlarda gerekliliği önemli ölçüde gelişmesi üretimini hızlandırmıştır. CTP taşıyıcı bir matris reçineyle cam elyafı birleştirilmesi ile elde edilen kompozit bir malzemedir. Yüksek korozyon direnci sergilediğinden dolayı mukavetide yüksek sergilemektedir. Ceylan kompozit ülkemizde, bilinen çelik yapı elemanlarına üstün yapıda fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip cam elyaf takviyeli CTP profil kompozit ürünler üretilmektedir [12].

BÖLÜM 2

KOMPOZİT BİLEŞENLERİ

2.1. LİFLER

Güçlendirici lifler, bir malzemeye mukavemet ve sertlik sağlamaktan doğrudan sorumludur. Kompozit, lifler çekme mukavemetinden ve Young modülünden yararlanmak için gereklidir. Kompozitin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Lifler kompozit arızasına yol açmaz, ancak matriste stres artışına neden olur. Lif miktarının arttırılması eğilme modülünüde artırmaktadır.

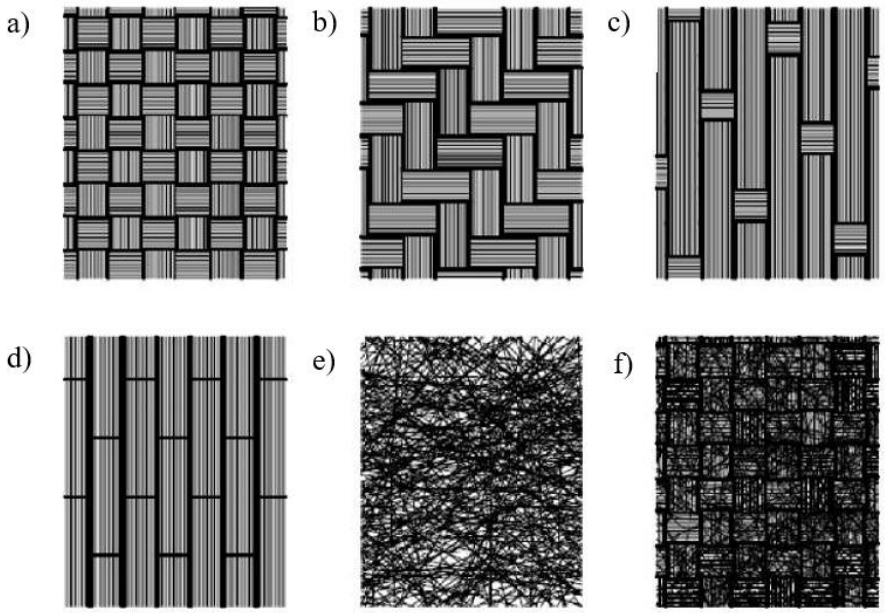
Liflerle takviye edilen kompozit malzemenin özellikleri, lifin özellikleriyle (lif çapı, hacim fraksiyonu, lif uzunluğu, lif bileşimi) yakından ilişkilidir ve lifler metalik, seramik veya plastik, doğal veya sentetik olabilir. Cam elyafın ana görevi yükü taşımak dirençlik sağlamak gibi yapısal özellikler sağlamaktır. Maliyet açısından düşüktür.

2.1.1. Fiber Tipleri

CTP kompozitlerinin sınıflandırılma ölçütünü takviye olarak kullanılan elyafların tipi belirlemektedir. İnşaat saha mühendisliğinde 3 farklı tür vardır: aramid, fiber ve karbon lifleri. Farklı elyaf çeşitlerinin özellikleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Cam, aramid ve karbon liflerin özellikleri [13].

Tipik özellikler	Elyaflar					
	cam		aramid		karbon	
	E Cam	S-Cam	Kevlar 29	Kevlar 49	HS (Yüksek Mukavemet)	HM (Yüksek Modüllü)
Yoğunluk ρ [g/cm3]	2,60	2,50	1,44	1,44	1,80	1,90
Young Modülü E [GPa]	72	87	100	124	230	370
Çekme dayanımı Rm [MPa]	1,72	2,53	2,27	2,27	2,48	1,79
Uzama [%]	2,40	2,90	2,80	1,80	11,00	0,50



Şekil 2.1. Yüzey takviye örnekleri: düz fitil kumaşlar: a) örgü, b) eğik, c), saten, d) pürüzsüz tek yönlü fitil kumaş, e) mat, f) fitil düz geçmeli örgü kumaş [13].

2.1.2. Cam Elyafları

Cam elyaf, genel olarak reçineleri güçlendirmek için en yaygın kullanılan malzemelerden biridir, çünkü bu elyafların üretimi ve şekillendirilmesi nispeten kolaydır ve iyi "özelliklere" sahiptir düşük ekonomik maliyetlidir. Cam elyafları, camın silis tuzları, kireçtaşı, borik asit gibi temel bileşenleri ile kil, kömür ve feldispat taşları gibi bazı bileşenlerin kuru olarak karıştırılması ve daha sonra özel tanklarda eritilmesiyle üretilir. Karışım genellikle 1260 °C sıcaklığındadır, daha sonra erimiş cam, sigortanın geçmesine izin vermek için delikli bir ucu olan platinden yapılmış dairesel bir kaptan geçirilir bu işlem sonrası çekilir ve işlenir. Böylece uzun ve ince cam elyaf sargıları elde edilir. Cam elyafların son formlarını elde etmek için soğutulur ve döndürülür. Genellikle bu elyafların yüzeylerinin bağlayıcı reçineye yapışması için kimyasal işlem yapılır.

(a) (b)

Şekil 2.2. (a) Cam fiber kumaş [15] (b) Karbon fiber kumaş [16].

2.1.3. Karbon Fiberler

Karbon fiberleri genellikle poliakrilonitril (PAN) lifleri, suni ipek ve zift, polivinil alkol, poliamidler ve fenoliklerden elde edilenler gibi organik öncü liflerin karbonizasyonu ile yapılır. Öncü lifler ön oksidasyon, karbonizasyon ve yüzey işlemine tabi tutulur. Yüzeyi oksitlenmiş karbon fiberler de yapışmayı arttırmak için üretilmiştir. Ayrıca, karbon fiberlerin dahil edilmesine yardımcı olmak için çeşitli reçinelerle (çoğunlukla epoksi ve bismaleimid) prepregler üretilir. Prepreg terimi, önceden emprenye edilmiş liflerin kısa bir şeklidir. Prepreg, bu nedenle, bir polimerik kompozit bileşenin imalatında bir ara aşamayı temsil eder. Karbonizasyon koşulları, karbon liflerinin özellikleri ve fiyatları üzerinde etkilidir. PAN'dan üretilen en ucuz karbon fiberler, 300ºC'den 1000ºC'ye kadar olan ilk yönlendirme sıcaklığından gerilim altında hızlı ısıtma ile üretilir. Bu işlem, düşük modüllü lifler üretir. Yüksek mukavemetli lifler 1500ºC'ye ısıtılır ve yüksek modüllü lifler argon altında 2200ºC'ye kadar çıkarılır. Bu çeşitli koşullar, liflerin mekanik performansını etkileyen farklı yapılara sahip grafit kristalleri ile sonuçlanır. Rayon, öncü malzemenin çevresel etkisi nedeniyle daha az kullanılır. Kömür katranı veya petrol zift işlemlerinde, ilk malzeme düşük moleküler ağırlıklı uçucu bileşenlerin çıkarılmasına yardımcı olan ısı ile polimerize edilir. Elde edilen nematik sıvı kristal veya mezofaz, eğirme işlemi sırasında lifleri oluşturmak üzere yönlendirilir (Wypych, 2000). Karbon fiberler, elastik modülleri yüksek olduğundan cam fiberlere göre yüksek yorulma dayanımlarına sahiptir. Daha fazla potansiyel özelliklerede sahiptirler.

2.2. MATRİS

Matris, temel kompozit yapısını oluşturan, lifleri bir arada tutarak kompozitin sıkışmaya karşı dayanımı arttırır. Matris seçimi kullanım yerine göre belirlenmektedir. CTP uygulamalarında uygun özelliklere sahip malzemeler polyester malzemelerdir [2]. Matris, elyafların maksimum yükünü taşıyabilmesi için elyaflarından daha düşük bir modül ve daha büyük bir uzamaya sahip olmalıdır.

Önemli işlevleri şunlardır:

- Birbiri içinde bağlayan liflerin geometrik düzenini sahip tutmak;
- Şekilalabilme ve sağlamlık sağlamak;
- Lif bağlantılarının hareketini ayrı ayrı sağlayarak çatlak oluşumunu engellemek;
- Hasara karşı korunaklı olması;
- Darbe direnci ve esneklik özelliklerini olumsuz etkilememek;
- Ara bağlantılar için yüzeyin kalitesini artırmak

Malzeme karakteristik yapısıda matris etkin rol oynamaktadır.

2.2.1. Matris bileşenleri

Tamamlayıcı ve bağlayıcı maddelerden meydana gelmektedir.

2.2.2. Reçineler

Ana matris bileşeni olarak tanımlanan ve imalat ve özelliklerine göre iki ana reçine türü termoplastik ve termoset polimerleridir [13].

Lineer polimerler oldukça esnektir ancak zincirdeki moleküler halkalar ve zincirdeki yan gruplar sertleştirici etkiye sahiptir. Termoset polimerlerden daha tokturlar. Yeniden şekil alabilme özelliğini sahiptirler ıstılır ve soğutulurlar. Esnek ve deforme olmalarının nedeni çapraz bağlanmadıklarındandır. Daha çok solvent duyarlı olup düşük sürünme dirençlerine sahiptir. Naylon, polipropilen (PP) ve polifenilen sülfür (PPS), polietereterketin (PEEK) sıkça kullanılan termoplastiklerdir. CTP yapıları için üretim işleminin sonunda 3 boyutta zincir ağını polimerik üreterek sert katıya dönüştürülürler.

Termosetler çapraz bağlı malzemelerdir, bir kez kürlenirler ve sonra yeniden eritilemezler veya yeniden şekillendirilemezler. Sertlik ve termal direnç için çapraz bağlantıların miktarı önemlidir. Elastomerlerde, çapraz bağların yoğunluğu termosetlerden daha düşüktür, dolayısıyla elastomerler elastiktir. Termosetler, iyi sertlik ile büyük elektriksel ve kimyasal dirence sahiptir. En yaygın termosetler; polyesterler, poliamidler ve epoksiler (Mazumdar S., 2002).

Epoksi: Epoksiler en popüler reçine malzemeleridir ve havacılıktan bazı spor malzemelerine kadar çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Epoksi reçinelerin birçok çeşidi vardır, farklı formüllerle kullanım alanına göre değişiklik gösterebilir. Formüller değiştiğinde; kürlenme, tokluk, termal direnç değişecektir. Epoksi reçineler, polyesterler ve vinilesterlerle karşılaştırıldığında pahalıdır.
Epoksiler, elle yatırma yöntemi, RTM ve filament sarma için yaygın olarak kullanılmaktadır. (Mazumdar Ş., 2002).

Polyester: Polyesterler düşük maliyetli reçinelerdir ve aşındırıcılığa karşı dirençlidirler. Öte yandan polyester, epoksi reçinelerine göre daha düşük termal özelliklere sahiptir. Polyesterler daha çok RTM, pultrüzyon ve filament sarımda kullanılmaktadır (Mazumdar S., 2002).

Vinylester: Vinylester düşük maliyetlidir, büyük korozyon ve kimyasal dirence sahiptir. Daha çok kimyasal uygulamalarda ve kesikli üretimlerde kullanılırlar. Çapraz bağlı vinilesterler kürlendiklerinde yüksek tokluk ve süneklik sunarlar (Mazumdar S., 2002). Karbon takviyeli profillerde kullanılan istenilen ölçüde bir yorulma direnci gösteren profillerin üretiminde optimum şartları sağladığı için epoksi kullanılır. Termal dirençleri iyidir.

2.2.3. Dolgu

Yüksek maliyetlerden kaçınılırak donatı ve matrisin kullanımını azaltmak için bir profil formunu doldurmaktır. Sıklıkla kullanılan dolgu malzemesi kalsiyum karbonat, kaolinit vb inorganik malzemelerdir [13].

2.2.4. Katkı Maddeleri

Katkı maddeleri, özelliklerini değiştirmek ve genel olarak performansını arttırmak için bileşik matrise ilave edilebilecek bileşenlerdir. Katkı maddeleri arasında katalizörler, renklendiriciler, alev geciktiriciler ve matrisin özelliklerini genişleten ve geliştiren diğer bileşenler bulunur. Amaçlarına bağlı olarak, katkı maddelerine göre üretim ile ilgili ve işlevle ilgili katkı maddeleri olmak üzere iki temel gruba ayrılabilir.

Proses ile ilgili, imalat prosesinde ve bir elementin özellikleri ve görünümünde avantaj sağlayan etkiye sahiptir. Bunun bir örneği, profillerin kürlenmesi sırasında aşırı büzülmeyi önlemek için, sıkıştırma işleminde kullanılan düşük profilli bir katkı maddesidir. Katkı maddesi, korozyona karşı profil direncini arttırmanın yanı sıra yorulma özelliklerini iyileştirirken, yüzeylerde saç çizgisi çatlaklarının oluşmasını da önler daha düşük iç gerilme verir.

İşlevle ilgili olanı ise, bitmiş bir profilin kullanımı ile ilgili olarak avantajlı bir etkiye sahiptir. Buna bir örnek, pigmentlerin veya yangın geciktiricilerin eklenmesidir. Sonuncusu kendi kendine sönme özelliklerinin elde edilmesi ve alev yayılmasını geciktirmek için eklenir. Ayrıca, fonksiyonla ilgili katkı maddeleri, bir profilin mekanik özelliklerini bozacak kadar büyük miktarlarda da eklenebilir.

2.3. FİBER-MATRİS UYUMU

Bu bağların mekaniksel özelliklerine bakıldığında elyaflar ve matrisin yapışması, uyumluluktan daha çok yüklenen takviye elemanındaki yön önemlidir. İyi düzeyde bir mekanik etkileşim eldesi için tüm parameter şartlarının birbirine uyması gerekmektedir. Deformasyon davranışı bir önce kullanılan elyaf takviye elemanı tarafından yönlendirilir. Bununla birlikte, yüke maruz kaldığında, fiberin bükülmemesi için matrisin minimum bir sertliği gerekir [11]. Sabit bir yükleme yönü ve elyafların bu yöne karşılık gelen bir düzenlemesi için en yüksek değerler elde edilir. Bu yön değişirse, yarı izotropik davranışı olan çok katmanlı yapılar kullanılır.

BÖLÜM 3

CTP UYGULAMA ALANLARI

Havacılık, otomotiv, deniz, inşaat sektörü alanlarında uygulama kullanımı büyük oranda artış gösteren Cam Elyaf Takviyeli Polimerler (CTP) çeşitli sektörlerin son derece popüler kompozit malzemesi haline gelmiştir bunlar ise kullanım sahalarında fiberglass cam fiber olarak adlandırılır. Örneğin; korkuluklar, basamaklı merdivenler, yapı platformları vb. 1940'lı yıllarda bu kompozit malzemelerin ticari kullanım alanları özellikle deniz endüstrisindeki ihtiyaç nedeniyle gerçekleşebilmiştir. 1960'lı yıllarda artan küresel üretim hızının 1960'ların sonlarında, ağırlığı düşük malzeme ve fiyat performans açısından bakılan bütçe çalışmalarında, ekonomik bir üretim haritası çizmiş ve yaygınlaşmıştır. Fiyat performans arasındaki kullanım ilişkisine bakıldığında fayda verdiği görülmüştür.

Şekil 3.1. Yapısal CTP'nin bazı uygulamaları – (a) Merdivenler ve platformlar (Brezil'yada) (b) Kolding yaya köprüsü (Danimarka'da) (c) Eyecatcher Binası (İsviçre'de), (d) ETAR Vila Moura (Portekizde)

3.1. BETONUN GÜÇLENDİRİLMESİ

Yapının içinde bulunan çeliğin çimentolu harç (beton) ile korunabilmesi halinde dahi, değişken çevresel şartlar nedeniyle betonun patlamasıyla çelikte hidratlı demir oksit oluşumunu uyararak yapıda kullanılan betonun yıkılmasına sebep olur. Çelik yapının korozyona uğraması betonarme köprünün bozulmasına neden olur. Korozyon direnci büyük olduğundan, bükme ve kesme işlemleri için nervürlü formunda gerilme önleyici çelik takviye yerine CTP kompozit kullanılabilir. Boyutsal uygulamalarda bir veya çok boyutlu şekil formları alabilirler. Kablosuz altyapı güçlendirmelerinde dahi CTP malzemeleri kullanılmıştır. Nervürlü yapının, hasara uğrayana kadar yük altında kalması elastik davranış göstermesi bir sorun teşkil edecektir. Nervürlü yapıyla takviye edilmiş malzemeye kıyasla çelik takviyeli eleman kadar süneklikden kaynaklı arızaya sebep olamayacağı anlamına gelmektedir. Çatlak genişlikleri problemlerine düşük elastikiyet modülü fazla oranda yol açmaktadır.

3.2. TÜM KOMPOZİT KÖPRÜ YAPILARI

Üst yapı olarak adlandırılan kompozit köprü yapılarının tamamı, sadece CTP malzemelerden yapılmış üst yapı grubuna girmektedir. Altyapı elemanlarında geleneksel malzemeler kullanılmaktadır. Şekil 3.2'ye göre, ilk olarak 1982 yılında Çin'de yapılmış 20,7 m'lik bir açıklığa sahip ve 6 kat cam elyaf sandviç kirişten oluşmaktadır.

Yapı köprü İnşaat yapıları 1980'lerde inşa edilmiş ve gerekli önemi anlaşılmıştır. Bu yaya köprüleri üst yapıdaki püskürtülmüş CTP profillerinden oluşan yan makasları olan kompozit bileşenli köprülerdir. Nadiren CTP'nin özelliklerini yapı gruplarında kullanılmaktadır.

Şekil 3.2. E.T. Techtonics tarafından inşa edilen Audubon Canyon Ranch [30].

Şekil 3.3. İngiltere'deki Smith Road Köprüsü'nün CTP U şeklindeki kirişleri [31].

Ülkemiz şartlarında değerlendirme yapacak olursak farklı şekil, ölçü ve renklerde takviye kompozit malzeme profillerin üretimini yapabilen bir fabrikanın çok geniş ürün portföyü bulunmaktadır. Bu ürün çeşitliliği CTP kompozit malzemesi üretimi ve pazarı açısından önem arz etmektedir.

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR CTP ÜRETİMİ

4.1. ÜRETİM YÖNTEMİ SEÇİMİ

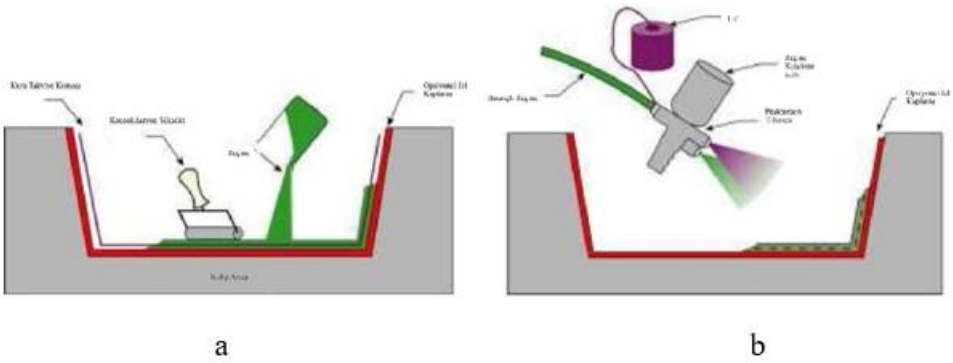
Fiber takviyeli elemanların hangi türü için imal edilecek metodu seçerken teknik bilgileri göz önünde tutmamız gerekir. Bunlar; miktar, şekil ve boyuttur. Yüzeyindeki kalite, çekme dayanımı, boyut doğrusallığı, young modülü gibi özellikleri de büyük önem taşımaktadır. Isıl genleşme katsayısına çok dikkat edilmelidir. Bundan dolayı takviye ve matris arasında istenilen en uygun mekanik uyumluluk ortaya çıkar [13].

CTP kalıplama yöntemlerinde kullanım olarak en yaygını püskürtme ve el yatırma olan iki temel kalıplamadır. Yaygın olan bu iki yöntemdeki ana prensip destekleyici malzmeyi kalıba yatırıp ve açık kalıp üzerine sıvı reçine uygulanmasıdır. Kalıp imalatında ürün yapımındaki gibi kompozit içeriği kullanılır. Proseslerden anlaşılacağı üzere reçine ve takviye malzemeleri ilavesi elle yapılırken, püskürtme yönteminde bu malzemeler kalıba bir püskürtme cihazı ile yapılmaktadır. Her iki yöntemde düşük maliyetlidir.

Her iki yöntemin ortak noktası; hacimsel boyutu küçük olan malzemelerin üretiminde kolaylıkla kullanılabilir olmasıdır. Hacimsel boyutları büyük olan üretimlerde ise pres kalıplama kullanılır.

4.2. MANUEL VE YARI OTOMATİK YÖNTEMLER

Püskürtme ve elle döşeme yöntemleri elle döşeme sınıfına girmektedir. En eski kompozit üretim teknolojilerinden biridir. İşçilik bakımından yoğun bir yöntem olan akışkan reçine maddesinin içine elle elyafın yerleştirilmesidir. İçerde basınçlanan havanın tahliyesi için metal silindir laminasyonu kullanılır. Çevre sağlığı açısından tehlikeli oluşu, el müdahalesinin sınırları olduğu için üretim malzmesinin kalitesindeki tutarsızlık, hacimsel lif fraksiyonunu ve stiren emisyonu konusunda endişeleri oluşturmuştur.



Şekil 4.1. Yarı otomotik (a) Elle Döşeme ve (b) püskürtme işlemi [33].

Püskürtme işlemide elle bırakma yöntemine benzemektedir, fakat hız limiti daha yüksek ve maliyeti düşüktür. Bu uygulamada, nozullu tabanca sprey, parçalı takviye malzeme model kalıbı ve bağlayıcı reçine ile yapılır. Parçalı cam lif malzemeleri yaklaşık on ile kırk mm uzunluğa destekleyici olarak kullanılır. Aşırı dayanım istemeyen yapısal olmayan malzeme üretimi için ideal bir yöntemdir. Üretim anında lif hacmi fraksiyonu, kalınlığını kontrol etmek zor olduğu gibi işlemi yapan operatör yeteneğide çok önemlidir. Bundan dolayı büyük boyutlarda bu işlem kullanışlı değildir.

Püskürtmenin avantajları:

- Pekçok çeşitlilikte CTP ürünü için püskürtme yöntemi özellikle üretimde verimli kullanılabilen bir yöntemdir.
- Maliyet performansı düşük ve iyi oranda olmakla birlikte uygulaması basittir.
- Karmaşık parka üretimi içinde elverişli olarak kullanılan bir yöntem olup boyut sınırlaması yoktur.
- Üretim alanında daha çok makinalar kullanılır. El yatırma modeli çok tercih edilmemektedir. İşcilik bakımından maliyeti çok düşüktür.

Püskürtmenin dezavantajları:

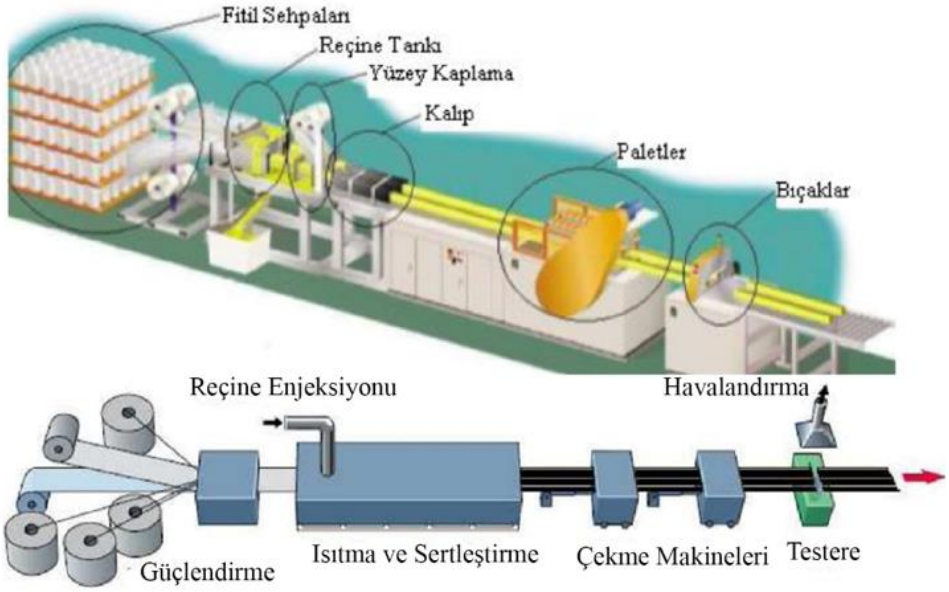
- Elyaf malzemenin bir yüzü pürüzlü olduğundan tek yüzü düzgün yüzey elde edilememektedir.
- Operator becerisi ürün kalitesini ve referanslarını doğrudan etkilemektedir.
- Bağlayıcı reçine maddesinin kimyasal gaz çıkışının sağlığa zararlılığı söz konusudur.
- Ürün başına oluşan maliyet diğer yöntemlerden daha pahalıdır.

4.3. TAM OTOMATİK YÖNTEMLER

4.3.1. Pultruzyon

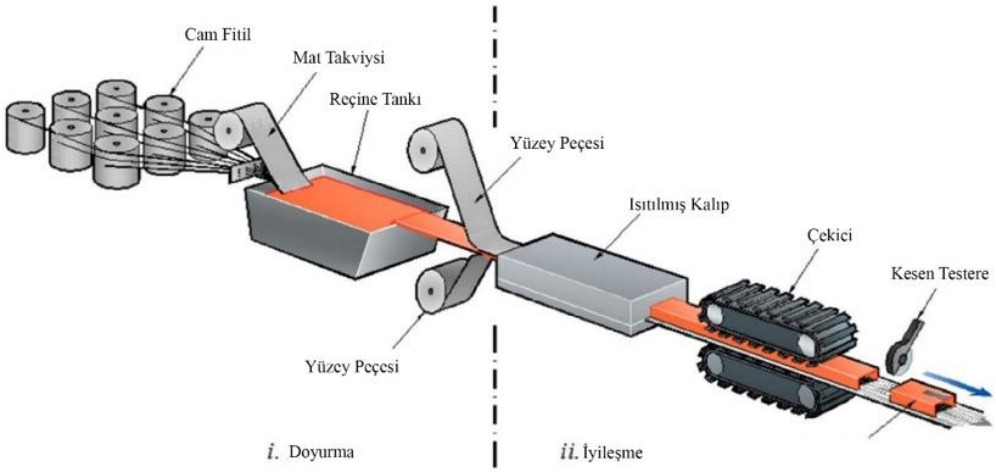
Pultrüzyon yöntemi ile farklı şekillerdeki malzemeler sürekli olarak üretilebilir. Düşük maliyetle üretilir. Otomotiv endüstrisinde otomobil gövdesi parçaları ve tamponlar gibi çeşitli parçalar üretilebilmektedir. Pultrüzyon işlemi Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Elyaflar reçine banyosuna çekilir, ıslak lifler kılavuzlarla şekillendirilir. Son kılavuz, profilin son şeklini belirler. Bu işlem sırasında nem emilimi ve hava sirkülasyonu engellenmelidir. Bu işlemde termosetler ve termoplastik reçineler kullanılabilir.

CTP'ler özellikle mekaniksel anlamda plastik malzemenin mukavemetini ve direngenliğini artırmak için cam elyaf malzemeleri kullanan plastik kompozitin bir kategorisidir. Reçine ilave koruma sağlamaktadır. Pultruzyon metodu dışındaki üretilen kompozitlerin yapı sektöründe ana yapı olarak kullanılması mümkün değildir. Çünkü üretilen bu malzemeler, yapıda taşıyıcı olarak kullanılan elemanların karşılaması gereken çekme, basma veya kesme kuvvetlerine karşı gereken mukavemeti gösterememektedirler. Bu sıkıntıların çözümü için sabit kesitlere ve malzeme özelliklerine sahip CTP profillerinin sürekli olarak üretilmesine olanak sağlayan yeni kompozit üretim yöntemi pultruzyon metodu geliştirilmiştir.



Şekil 4.2. Pultruzyon işlemi [6] ve Pultruzyon makinesinin taslak gösterimi [34].

Şekilde iki aşamalı üretim sürecini göstermektedir: (1) emprenye etmek: burada cam paketi ve yarık kumaşlar imal edilir ve düzensiz parça şekli oluşturulur sonrasında ıslak reçine (matris) banyosu boyunca çekilir. (2) Kürlemek: elde edilen doymuş malzeme ısıtılmış kalıptan ekstrüzyonla geçirilerek pultruzyon son ürünleri elde edillir [35].



Şekil 4.3. Cam elyaf takviyeli polimerlerin pultruzyon işlemi.

Sistem içinde lifler profil kesitine tam yerleştirlir ve durmadan klavuzdan çekilerek takviye edilen bir yapı yöntemine sabitleştirme ekipmanlarıyla lifler yönlendirilerek matrisle empenye edilir. Malzeme, ısıtan ekipmanlarla karışık dağılımda çekilir ve profil son geometrisine göre kürlenir. Sonrasında askılı testere sistemine gönderilir. Anlatılan tüm bu sistem bir nevi pultruzyon üretim yöntemidir.

Şekil 4.4. Fiberimsi pultruzyon (toz alma) ekipmanları [14].

Mukavemet açısından boyunu oluşan kuvvetin yüksek olması ile malzemenin enine mukavemetini de yükseltmek için özel yapı barındıran ve üretim yöntemi düğümlü fitil (keçe), eksen yön ve açıları farklı olan cam kumaşlar ile kaplanır (Şekil 4.5). Sonrasında ise yüzeyi tüylü takviye malzemeler kullanılarak düzgünlüğü ve çevresel etkileri (atmosferik) azaltılmaktadır**.** Yöntemin en önemli özelliklerinden biri bağlayıcı reçinenin beklenilen özelliklerde olması için geliştirici olarak dolgu malzemeleri eklenebilmesidir. Maliyetin karlı olabilmesi için farklı elementler eklenebilir. Elektrik izolasyon için alüminyum thidrat, aleve karşı direnç istendiğinde hidroksit ve kil ise korozyon dayanımı için kullanılabilir.

Şekil 4.5. Pultruzyon metodu ile üretilmiş profil detayı [34].

Çekme hızının yüksek düzeyde kararlı olabilecek reaktiviteye sahip olması, ısınma özelliğini iyi derecede sağlayarak vizkozitenin düşük olmasını veya seyreltebilme özelliğine olanak sağlaması bu üretim yöntemindeki reçineden beklenen en önemli özelliktir. Bundan dolayı tercihen en fazla kullanıma sahip olan reçineler %90'ı polyester ve vinildir. Bunların dışında duman miktarının az olması yanmazlık özelliklerinden ziyade mukavet direncinin yüksek performanslar sağladığı için fenolik reçinelerde tercih edilir.

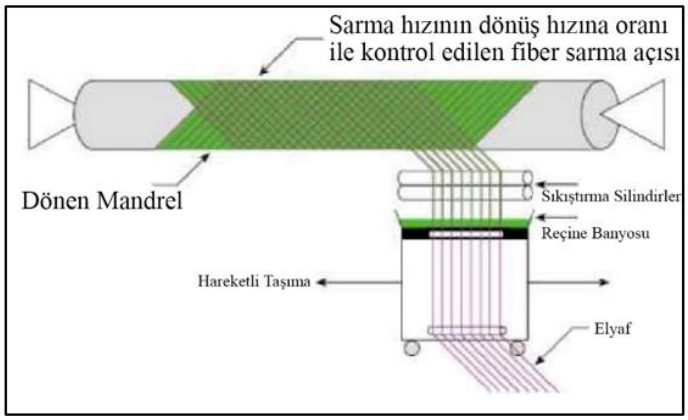
Sürekli liflerin türü ve sayısı ile karmaşık dokuma paspasların türü ve boyutları, lifler ve paspaslar bir profile yerleştirildiğinde, görsel kontrol sağlayacak şekilde düzenlenir. Liflerin ve paspasların bir profilin kesitine göre hassas konumlandırılması, bitmiş ürünün özellikleri ve kalitesi açısından çok önemlidir.

Takviye üretim ekipmanı içine çekildiğinde, matris enjeksiyon ile eklenir. Enjeksiyon ile pultruzyon, bir profilden diğerine değişen hızların kontrolunde ve takviyenin kontrolunde avantajlıdır, ve bir işlem sırasında matris değişikliklerini kolaylaştırır. Liflerin emprenye derecesi bitmiş ürünün özellikleri için bir diğer belirleyici faktördür. Geleneksel pultrozyonda takviye, matris içeren açık bir fıçı ile yönetilir. Ancak enjeksiyon yöntemi, çözücülerin buharlaşmasını minimumda tutan tam kapalı bir işlemdir.

Lifler matrisle emdirildikten sonra, tüm ürün ısıtmanın gerçekleştiği ve profilin kürlenmesinin hızlandırıldığı süreçte bir sonraki bölgeye doğru ilerler. Son kür üretim ekipmanının son bölümünde gerçekleşir. Böylece bir profil, üretim ekipmanından ayrıldığında tamamen kürleşmiştir ve kararlıdır. İşleme ekipmanındaki sürtünmeyi ve böylece işlemde itici gücü aşan çekme gücü, işleme ekipmanının dışına yerleştirilen çekmeceler tarafından sağlanır. Çekme, kemerler veya karşılıklı çekiciler tarafından yapılabilir. İşlemin son aşamasında ekipmandan çıkarılan profiller aynı hızda hareket etmek üzere monte edilmiş bir testereyle kısaltılır. Bu sürekli bir süreç sağlar [14].

4.3.2. Filament Sargı

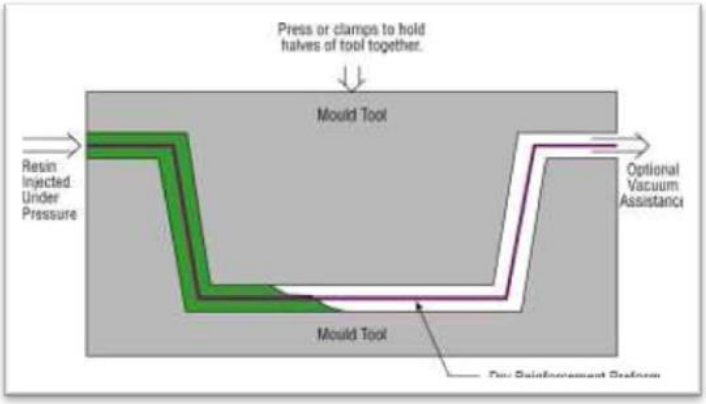
Filament sargı, reçine emdirilmiş liflerin istenilen açıda dönen bir mandrel üzerinde sarıldığı bir süreçtir. Bu nedenle, bu işlem için başlangıç malzemeleri sürekli cam, karbon veya aramid lifleri vardır. Bu işlemde kullanılan sıvı termoset reçineler ise epoksi, polyester ve vinilesterdir. Kompozit ünite daha sonra mandrelden çıkarılır ve 8 saat boyunca 60 °C'de bir fırına yerleştirilerek kürlenir. Bu üretim süreci genellikle boru yapıları ve boruları imal etmek için kullanılır. Ancak kapalı ve konveks yapılar üretmekle sınırlıdır ve nispeten düşük hacimli lifler verir.



Şekil 4.6. Filament sargı işlemi [35].

4.3.3. Reçine Transfer Kalıplama

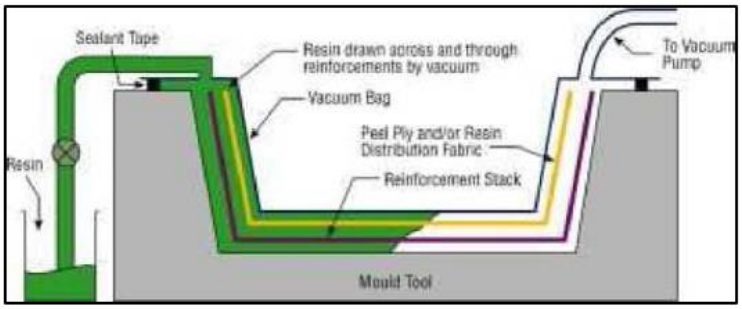
Kapalı kalıp tekniği olan ve karmaşık yapıları imal etmek için çok uygun olan termoset kompozitler için sıvı bir kalıplama işlemidir. Reçine Transfer kalıplamada kuru bir ön kalıp eşleşen bir kalıba yerleştirilir ve ardından kalıp sıkıştırılır. Daha sonra reçine, katalizör veya başka herhangi bir dolgu malzemesi ile karıştırılan termoset reçine sistemi, kalıp tamamen reçine ile dolana kadar tek bir ağızdan veya birden fazla ağızdan kalıba basınçlandırılır. Emprenye işleminden sonra parça reçine sisteminin kür kinetiğine bağlı olarak kürleme işlemine tabi tutulur.



Şekil 4.7. Reçine transfer kalıplama işlemi/ çizim [33].

Bu işlem küçük ve orta ölçekli üretim parametreleri için uygundur. Transfer kalıplama yöntemi sınırlı üretimin uygun maliyetli oluşu karmaşık parçaların üretilebilmekte ve % 65 gibi yüksek lif hacim fraksiyonları bu yöntemle elde edilebilmektedir.

Reçine transfer kalıplama yöntemi takviye malzemesinin reçine ile kalıp boşluğuna girmesiyle, mekaniğinde değişkenlik gösteren çok sayıda çeşitleri olan yöntemdir. Farklılık içeren bu yöntemler, vakum infüzyonundan vakum destekli reçine transfer kalıplamaya (VARTM) kadar her türünü içerir. Vakum torbalama / otoklavla şekillendirme, gelişmiş kompozit parçalar üretmenin geleneksel yöntemidir. İşlem, prepreglerin kesilmesi ve tek taraflı bir kalıp üzerinde elle laminasyon ile başlar. Daha sonra iş parçası vakum poşeti ile kapatılır ve parça vakumlanarak fazla reçine sıkılır. Vakum torbalı parça daha sonra, kürleme işleminin harici basınç altında yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiği bir otoklava aktarılır. Vakum destekli reçine transfer kalıplama işleminin (VARTM) yaptığı enerjinin neredeyse iki katını tüketir.



Şekil 4.8. Vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) işlemi.

BÖLÜM 5

GELENEKSEL MALZEMELER İLE KARŞILAŞTIRMA

5.1. GELENEKSEL MALZEMELERE GÖRE AVANTAJ ve DEZAVANTAJLARI

Otomotiv sanayisinden havacılık sanayisine, gemi imalatı üretiminden elektronik araçlara kadar kullanım alanın genişliği bilinmektedir. Buna bağlı olarak;

Yapı sektöründe kullanılan CTP profillerin avantajları:

- Kompozit profiller, kullanım alanı yaygın olan iç yapı kombinasyonuna göre korozyona karşı mukaveti, kimyasal dayanımı, elektrik izolasyonu ve hafiflik özelliklerinden dolayı avantajlıdır;
- Hafif yükte olduklarından; ağır çelik yapılara göre taşınma nakliyesi ve maliyet açısından uygunluğu ve montaj esnasında devreye alma süreci.
- Darbe dayanım direnci, eğme ve basma yükü altındaki gösterdiği mukavet göz önüne alınırsa çelik yapıdan daha dayanımlı ve taşıma kapasitelerinin daha fazla olduğu görülmektedir.
- Pas ve çürüme olmadığı için korozyon dayanımı güçlüdür.
- Saha iş güvenliği açısından iletkenliği olmadığı için güvenilirdir.
- İletkenlikleri düşük olduğundan yalıtım malzemesi olarak da kullanılır.
- Korunabilen boyut stabilitesi çok iyidir, uzama ve kısalma davranışları yoktur.
- Deformasyon gerçekleşmez.
- Marangoz aleti ile kesilebilen ve basitçe şekil alabilen özelliktedir.
- Üretici firma açısından güvenilirdir. Hurda sınıfına girmediğinden çalınma durumu yoktur.
- Su jeti ile temizlikleri sağlanabilmekte, boya veya bakım gerektirmezler.

Dezavantajları:

- Dayanıklılığın kararsızlığı
- Sünekliğin yetersizliği
- Yanma direncinin düşük olması
- Şekillendirme özelliğinin yetersiz olması
- Bağlantılarda bilgi kesintileri
- Matris yapısı termoset kullanılarak üretilen CTP malzemelerin geri dönüşümü olmadığı için bünyedeki karbon atılır. Dolgu maddesi ile cam kalır. Kalan atıklar ayrıştırılır. Kullanılabilen organic olmayan madde olduklarından doğa üzerinde gömme işlemi yapılmaktadır. Yakma işlemi sırasında karbondan dolayı CO_2 emisyon değerinin yükselmesine sebep olur.

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada S355JR profillerin mekanik özellikleri ve yorulma davranişlarinin CTP kompozit profillerin mekanik ve yorulma özellikleri ile karşılaştırılması incelenmiştir. Bu çalışmada 3.00'er mm et kalınlıklarına sahip S355JR kalite çelik numuneler ile CTP kompozitler kullanılmıştır. Hazırlanan bu numuneler eğmeli plaka yorulma deney makinesinde yorulma testlerine tabi tutulmuştur. Kırılan veya sonsuz çevrim sayısına sahip numuneler elde edilmiştir. Sonrasında kırılan numunelere mikro ve makro görüntüleri ve SEM cihazıyla detaylı görünümler alınmıştır. Ayrıca çekme-eğme deneyi için optimum test koşullarında besmark model cihaz ile yapılmıştır. Eğme test sonuçları maksimum eğilme mukavemeti, akma ve % uzama değerleri olarak alınmıştır.

6.1. MİKRO YAPI ÇALIŞMALARI

Metalografik işlemler için 1 mm kalınlığında ve 10 mm genişliğinde S355JR kalite profil malzemeler soğuk bakalite alınmış ve zımparalama işlemine hazır hale getirilmiştir. Zımparalama işlemi kalından ince zımpraya doğru sırasıyla 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2500 mesh zımpara kağıtları kullanılarak yapılmıştır. Parlatılma işlemi 3 μ Elmas solüsyon ile tamamlanmış ve hemen akabinde numunelerin %3 Nital ile dağlama işlemi yapıldı. Metalografik işlemi tamamlanan numuneler Carl Zeiss Microscopy 3154000184 Primotech MAT 12 V DC 30 W optic mikroskop kullanılarak 10X, 20X, 50X ve 100X yaklaştırma (Şekil 6.2.) kullanılarak mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.

6.2. ÇEKME EĞME TESTLERİ

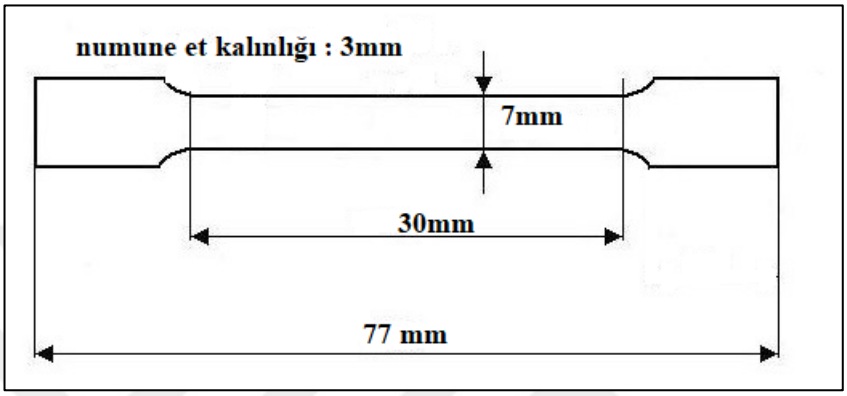
S355JR Kalite çelik ile cam elyaf takviyeli izofitalik polyester kompozitlerin çekme ve eğme testleri 20-ton kapasiteli elektro mekanik besmark model çekme basma cihazında gerçekleştirlmiştir.

6.3. YORULMA DENEYİ ÇALIŞMALARI

Yorulma test analiz cihazı olarak, Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nün bünyesinde varolan (Şekil 6.1.) ve yorulma ömrünün hesaplamalarında gerilme analizlerinin yapıldığı ANSYS ve Simufact sonlu elemanlar programlarından yararlanılan yorulma cihazı kullanılmıştır. Yorulma testi için S355JR kalite profil numuneleri, kalınlığı 3 mm ve ince kesitin genişliği 7 mm olarak yorulma testi için hazırlanmış olup 0.2, 0.6, 3, 5.50 gibi değişen genlik değerlerinde, 10 Hz frekansta ve oda sıcaklığında (25°C) gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar kontrollü yorulma cihazında belirlenen genlik, optic kuvvet, sıcaklık ve frekans değerleri girilen cihazın numunenin sabitlenmesi ve numuneyi tutan kollarda kuvvetin yoğunluğunun önüne geçmek adına cihaz çenesi ile numune arasına üst ve alt olmak üzere aynı kalınlığa sahip sac malzeme konulmuştur ve yorulma cihazı çalıştırılmıştır. Her numunenin genlik değerlerine karşılık gelen yorulma ömürleri karşılaştırılmıştır.

Şekil 6.1. Yorulma test düzeneği.

S355JR kalite çelik profillerin ve cam elyaf takviyeli polimer malzemelerin yorulma testi sonrası numunelerin macro kırık yüzey görüntüleri alınmıştır. Karabük Üniversitesi Demir Çelik Ensititüsü labratuvarında electron microskopu (SEM) yardımıyla yorulma mekanizmalarının belirlenmesi için farklı büyütmelerde daha detaylı kırık yüzey görüntüleri alınmıştır.



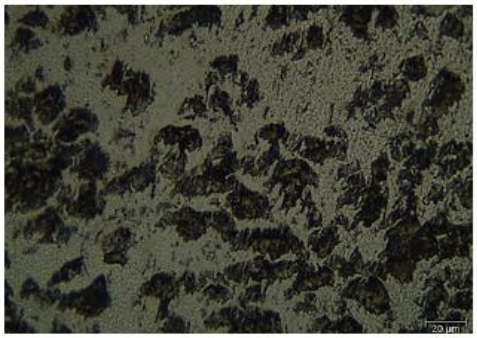
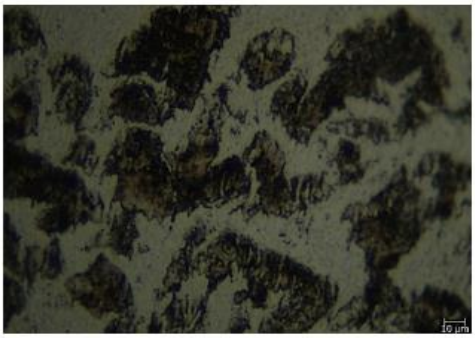
Şekil 6.2. Yorulma Deney Numunesi (CTP).

BÖLÜM 7

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1. MİKROYAPI SONUÇLARI

Şekil 7.1'den görüldüğü gibi, S355JR kalite çelik düşük karbonlu ferrit+perlit mikro yapısına sahiptir. Haddeleme sonrası çizgi yönlenmesinden dolayı bantlaşma görülmüştür.

10X	20X
50X	**100 X**
	

Şekil 7.1. S355JR kalite çeliğin 10X, 20X, 50X ve 100X büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.

7.2. ÇEKME-EGME DENEYİ SONUÇLARI

S355JR kalite çelik ve CTP numunelerin dayanımları birbirleriyle karşılaştırılmış olup Çizelge 2.2. de verilmiştir. CTP kompozitin çekme mukavemeti daha yüksek olduğu görülmüştür. CTP kompozitler bariz akma göstermezken çelik numune üst-alt akma sergilemiştir. S355JR kalite çelikğin üst akma mukavemeti yaklaşık 322 Mpa ve alt akma mukavemeti 303 MPa değerinde ölçülmüştür. CTP kompozitin çekme mukavemeti yaklaşık olarak 700 MPa iken eğme mukavemet değeri ortalama 484 MPa'dır. S355JR kalite çeliğe kıyasla CTP kompozitlerin % uzama değerleri % 8'in altındadır. S355JR kalite çeliğin çekme maksimum mukavemeti CTP kompozitin çekme maksimum mukavemetinden büyük iken eğme deney sonuçları ters davranış göstermiştir. Eğme testi sonrası elde edilen maksimum mukavemet değerleri karşılaştırıldığında CTP kompozitlerin biraz düşük olduğu görülmüştür.

Çizelge 2.2. Malzemelerin mukavemet ve % uzama değerleri.

Test Tipi	Numune	Akma Mukavemeti (MPa)		Maksimum Mukavemet (MPa)	Uzama (%)
		Üst Akma	Alt Akma		
Çekme Testi	S355 JR	321.78	303.52	451.20	22,81
	CTP	-		697.11	3,58
Eğme Testi	S355 JR	306.90	305.11	552.12	25,58
	CTP	-		483.75	7

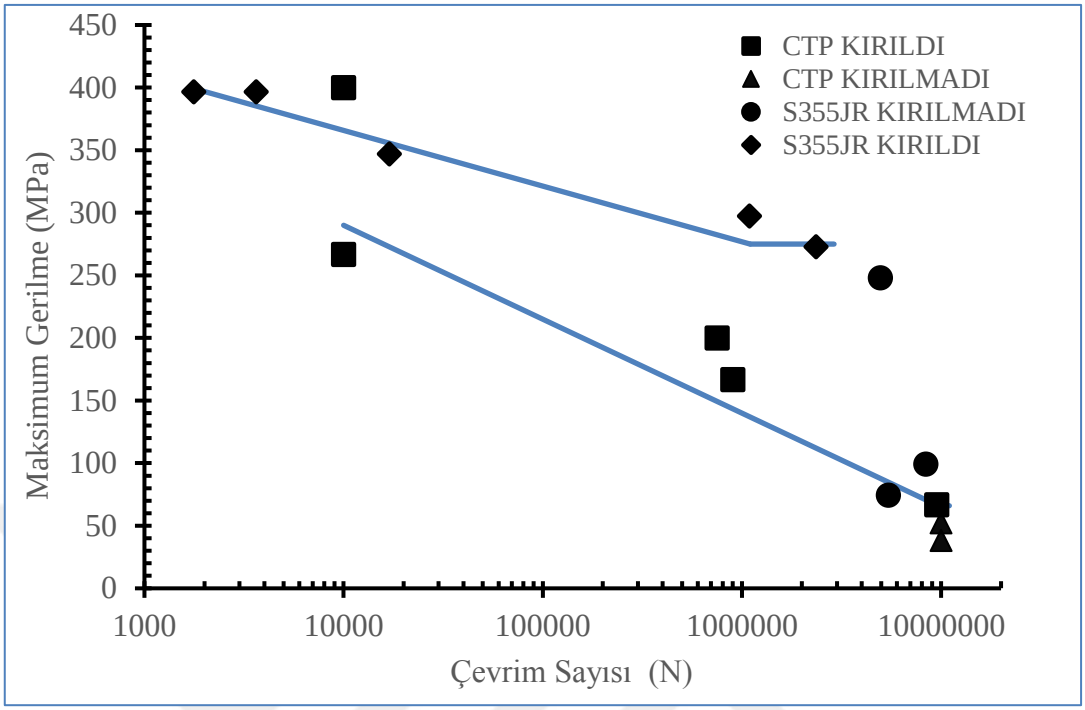
7.3. YORULMA DENEYİ

Eğmeli plaka yorulma deneyinde belirlenmiş yerdeğiştirme değerleri, denklem 7.1 yardımı ile uygulanan deformasyon değerlerine dönüştürülür. Uzun ömürlü yorulma deneyi gerçekleştirildiğinden dolayı elastik bölge içinde yer alındığından Hooke kanunu denklem 7.2 yardımı ile uygulanan deformasyon değerleri kullanılarak gerilme değerleri hesaplanmıştır.

$$\varepsilon = \frac{3.d.h}{2.L^2} \tag{7.1}$$

$$\sigma = E\,\varepsilon \tag{7.2}$$

Denklemde verilen d maksimum yerdeğiştirme miktarı (mm), L çeneler arasındaki mesafe (mm) ve h numunelerin et kalınlığıdır. Burada hesaplanan gerilme değerleri yorulma testi sırasında numuneye etki eden +/- tekrarlı gerilmelerdir. Yorulma parametresi olrak ortalama gerilme sıfır olup Denklem 7.2 yardımı ile hesaplanan gerilme değeri maksimum gerilme olarak adlandırılıp S-N eğrisinde yatay eksene karşılık gelmektedir. Şekil 7.2'den görüldüğü üzere belirli gerilme değerleri ve belirli bir çevrim sayısına ulaşmış numunlerden kırılan ve kırılmayan numunelerin yorulma ömürleri gösterilmiştir. Çelik numunesi yaklaşık 272 MPa gerilmede $2x10^6$ çevrim sayısında, CTP numunesi yaklaşık 67 MPa gerilmede $1x10^7$ çevrim sayısında kırılmıştır.



Şekil 7.2. S-N eğrisi (Maksimum Gerilme-Çevrim Sayısı)

S355JR kalite çeliğin yorulma dayanım sınırının (272 MPa), maksimum eğme mukavetine (552 MPa) oranı 0,49, CTP profil numunesinin yorulma dayanım sınırının (67 MPa), maksimum eğme mukavetine (484 MPa) oranı ise 0,14 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçla yorulma dayanım sınır değerleri bu çalışmada CTP profil numunesinin S355JR kalite çeliğe göre daha düşük olduğu gözlemlenmiş. Literatürde çeliğin yorulma dayanım sınırı-eğme mukaveti arasındaki oranın 0,35-0,50 aralığında olduğu bilinmektedir. Fakat CTP profiler için bu oran tez çalışması kapsamında 0,14 (1/7) oranında hesaplanmıştır.

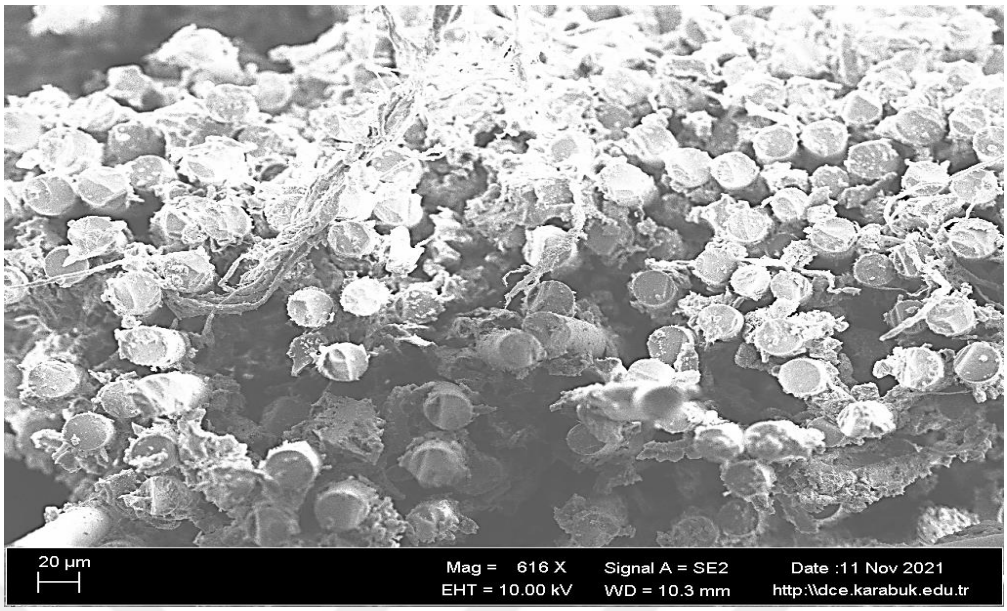
Şekil 7.3'de düşük (2000 çevrim) ve yüksek ($2x10^6$ çevrim) yorulma ömründe kırılmış S355JR kalite çelik numunelerin makro kırık yüzeyleri verilmektedir. Makro görüntüler incelendiğinde yüksek gerilmelerde düz yüzeyle kırılma gözlenirken yorulma dayanım sınırına karşılık gelen düşük gerilmelerde karakteristik kumsal izine benzer görüntüler meydana çıkmıştır.

(a)

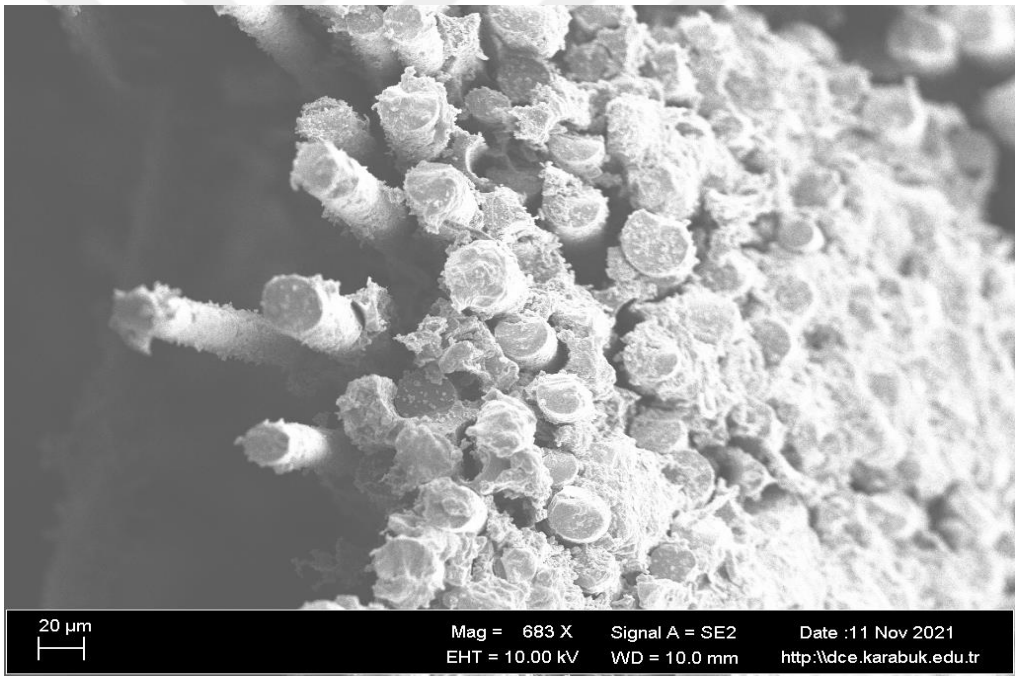
(b)

Şekil 7.3. S355JR (a) düşük (b) yüksek yorulma ömürlerine sahip numunelerin makro kırık yüzey görüntüleri.

Yorulma deneyleri sonrası cam elyaf takviyeli reçine matrisi numunelerin kırık yüzeylerin görünümü Şekil 7.4'de verilmiştir. Düşük yorulma dayanım sınırına sahip CTP numunesi takviye elemanı reçineye daha sıkı yapıda bağlandığı gözlemlenmiştir. Yüksek gerilmelerde kırılan CTP numunesi yüzeyi ise cam elyafların reçine matristen sıyrılarak kırıldığı bir yüzey görünümü sergilemiştir. Düşük büyütmede (a) düşük yorulma ömründe ve b yüksek yorulma ömründe kırılmış numunelerin yüzey SEM görünümleri ve Şekil 7.4'de ve Şekil 7.5'da yüksek büyütmede (a) düşük yorulma ömründe ve b yüksek yorulma ömründe kırılmış numunelerin yüzey SEM görünümleri verilmiştir.

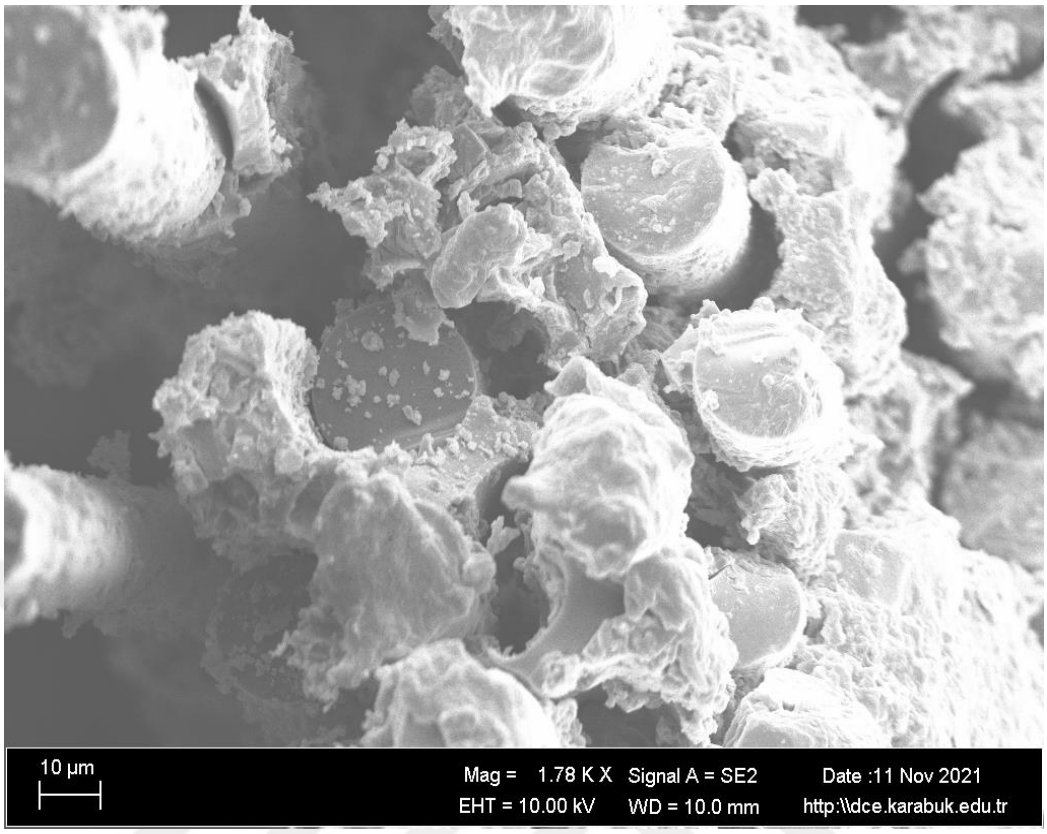


(a)

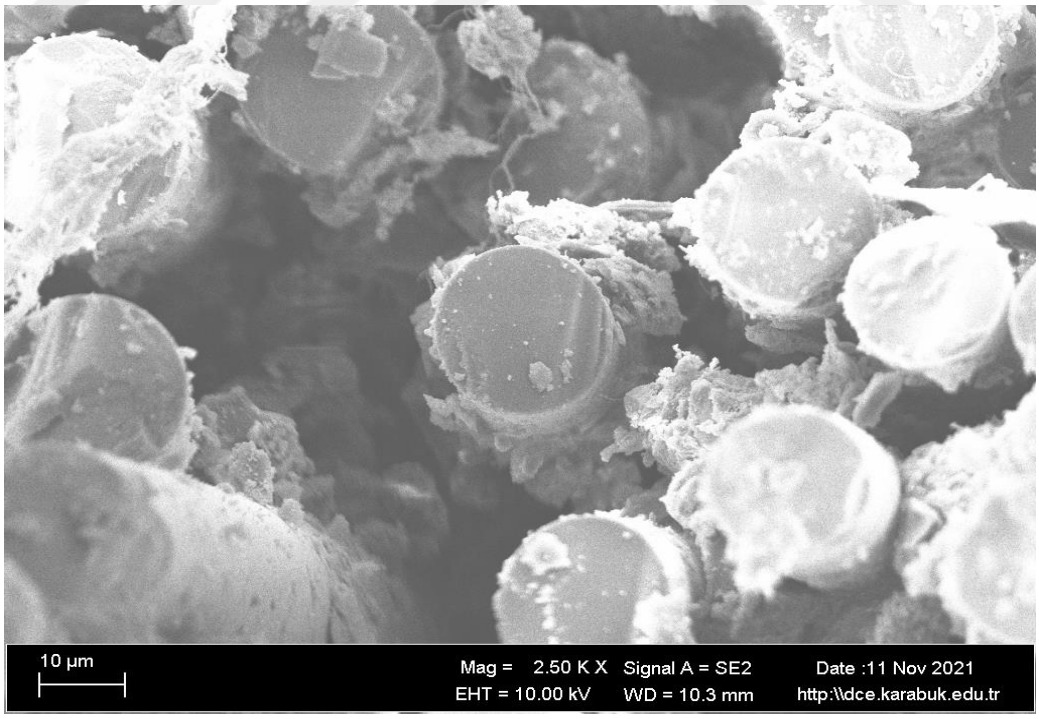


(b)

Şekil 7.4. Düşük büyütmede (a) yüksek gerilmedeki ve (b) düşük gerilmedeki yorulma ömürlerine karşılık gelen CTP malzemesinin kırık yüzey SEM görüntüsü.



(a)



(b)

Şekil 7.5. Yüksek büyütmede (a) yüksek gerilmedeki ve (b) düşük gerilmedeki yorulma ömürlerine karşılık gelen CTP malzemesinin kırık yüzey SEM görüntüsü.

BÖLÜM 8

GENEL SONUÇLAR

S355JR kalite çelik profiler ve CTP kompozit profilleri mekanik özellik ve yorulma davranışları incelendiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- S355JR kalite çelik profil numunelerinin mikro yapısı ferlit ve perlit fazından ibaret olup perlit fazlarında hadde yönünde bantlaşma görülmüştür. Ferrit+perlit yapısı dağılmıştır. CTP kompozit profilerin ise cam elyaf oranı % 15 olup homojen olarak matris içerisinde yer almaktadır.

- Çekme testi neticesinde S355JR kalite çelik profillerin maksimum mukaveti 451,20 MPa, CTP profillerin ise maksimum mukaveti 687,11 MPa olarak ölçülmüştür. Eğme testinde S355JR kalite çelik profillerin maksimum mukaveti 552,12 MPa iken CTP kalite profilleri maksimum mukaveti 483,75 MPa olarak ölçülmüştür.

- Yorulma deneyleri sonrasında S355JR kalite çelik profil numuneler 10^6 çevrime kadar yorulma ömrü sergilerken, CTP profil numuneler 10^7 çevrim ömrüne kadar yorulma göstermiştir. S355JR kalite çelik profiller ve kompozit CTP profil numunelerinin yorulma dayanım sınırları sırasıyla 272 MPa – 67 MPa olarak belirlenmiştir.

- S355JR kalite çelik numuneler yorulma dayanım karakteristiklerinde kumsal izleri sergilerken CTP profil numunesi ise fiberler matrisden sıyrılarak izofitalik polyester reçinenin fiberler arasındaki bölgeden dökülerek matrisden boşaltılmış olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Bank L. C.: "Composites for Construction – Structural Design with CFTP Materials", ***John Wiley & Sons***, Inc., (2006).

2. Tuakta C.: "Use of Fiber Reinforced Polymer Composite in Bridge Structures, Yüksek Lisans Tezi, ***Massachusetts Institute of Technology***", A.B.D. (2005).

3. Keller T.: "Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction", ***IABSE Structural Engineering Documents No 7*** (2003).

4. Şahin, Y., "Kompozit Malzemelere Giriş", ***Gazi Yayın Evi***, Ankara (2000).

5. Mallick, P.K., "Composite Engineering Handbook", ***Marcel Dekker***, New York, (1997).

6. Lopez-Anido R., Naik T.: "Emerging Materials for Civil Infrastructure. State of the Art", ***American Society of Civil Engineers***, (2000).

7. EUROCOMP, "Structural Design of Polymer Composites – EUROCOMP Design Code and Handbook", London, Edited by Clarke, J. L., ***Chapman and Hall***, (1996).

8. İnternet: Strongwell Corporation, **www.strongwell.com** (2020).

9. Tino SRL and Aquino EMF." Fracture characteristics and anisotropy in notched glass fiber reinforced plastics". ***Materials Research***, 17(6) :1610-1619 (2014).

10. Kumar MS, Raghavendra K, Venkataswamy MA and Ramachandra HV. "Fractographic analysis of tensile failures of aerospace gradec composites". ***Materials Research***, 15(6):990-997 (2012).

11. İnternet: Ceylan Kompozit **http:/www.ceylankompozit.com/tr/** (2020)

12. "Fiberline Design Manual", ***Fiberline Composites A/S***, Kolding, (2003).

13. İnternet: ETTechotnics **https://www.ettechtonics.com/** (2020)

14. İnternet: Wheels Of Italy **www.wheelsofitaly.com** (2020)

15. Zhou, A., Lesko, J.: "Introduction to CFTP Composites, Showcase on Virginia Fiber- Reinforced Polymer Composites: Materials", ***Design, and Construction***, Bristol, Virginia, (2006).

16. İnternet: ApATEK Uygulamalı İleri Teknolojileri www.apatech.ru (2020)

17. B. Etmanski and A. K. Blendzki "Glass Fiber Profiles as Reinforcing Material in HighlEy Filled Epoxy Polymer Concrete" ***Polymer-Plastics Technology and Engineering***, 32(4), 385-396, (1993).

18. Jara Mori G.A.," Estudio de la aplicabilidad de materiales compuestos al diseno de estructuras de contencion de tierras y su interaccion con el terreno, para su empleo en obras de infraestructura viaria" –Doktora Tezi, ***Universidad Politecnica de Madrid, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Departamento de Ingenieria y Morfologia del Terreno***, Madrid (2008).

19. İnternet: Quakewrap - The Infrastructure Innovators **www.quakewrap.com** (2020)

20. Piggott M., "Load bearing fibre composites", ***Kluwer Academic Publishers***, (2002).

21. Zum Gahr K.H., "Microstracture and Wear of Materials", ***Elsevier***, Amsterdam, (1987).

22. Bahadur, S. ve Zheng, Y., "Mechanical and Tribological Behaviour of Polyester Reinforced with Short Glass Fibers", ***Wear***, 137,251-266, (1990).
23. Eleiche, A.M. ve Amin, G.M., "The Effect of Unidirectional Cotton Fiber Reinforcement on The Friction and Wear Characteristics of Polyester", **Wear**, 112, 67-78, (1986).

24. Shim ve arkadaşları Shim, H.H., Kwon, O.K ve Youn, J.R., "Effects of Fiber Orientation and Humidity on Friction and Wear Properties of Graphite Fiber Composites", ***Wear***, 157, 141-149, (1992).

25. B.S. ve Furey M.J., "Tribological Behaviour of Unidirectional Graphite-Epoxy Carbon PEEK Composites", ***Wear***, 162-164, 385-396, (1993).

26. Ertan Kosedag, R. E., "Comparison Of The Low-Velocity Impact Behaviors Of Sic And Pumice Particle-Reinforced Metal Matrix Composites", ***İnternational Journal Of Mechanical And Production Engineering***, 10 (2320–2092): 101–105 (2017).

27. Diego Villalon A., Gutierrez Jimenez J.P., Arteaga Iriarte A., Lopez Hombrados C., Utilizacion de materiales compuestos en la construccion de nuevos puentes, ***Instituto de Ciencias de la Construccion Eduardo Torroja***, Madrid (2012).

28. Landesmann, A., Seruti, C. A., Batista, E. de M., Landesmann, A., Seruti, C. A., and Batista, E. de M., "Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymers Members for Structural Applications", ***Materials Research***, 18 (6): 1372–1383 (2015)

29. Keller, T. “Material tailored use of CFTP composites in bridge and building construction”, ***Swiss Federal Institute of Technology Lausanne***, Switzerland, 2006.

30. Zobel H., Karwowski W.: “Potqczenia kompozytowych elementow konstrukcji mostowych”, ***Archiwum Instytutu Inzynierii L^dowej Politechniki Poznanskiej***, 187-199 (2007)

31. Arıkan, T.A., CTP Malzemesinin Yapısal Strüktürde Kullanılmasına Yönelik Sorunlar Ve Strüktürel Davranışının İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, ***GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü***, (2004)

ÖZGEÇMİŞ

Ece Aydan AYDINLI ilk ve orta öğrenimini Çorlu'da tamamladı. Lise öğrenimini Ankara Kalaba Lisesinde 2003 yılında tamamladı ve Erzurum Atatürk Üniveristesi Makine Mühendiliği Bölümünden 2012 yılında mezun oldu. 2019 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programına devam etmektedir.