

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**JELKOT KAPLAMALARIN POLİMER
KOMPOZİTLERDEKİ HİDROTERMAL VE
ULTRAVİYOLE IŞIN YAŞLANMASINA ETKİSİ**

Akar DOĞAN

Haziran, 2019
İZMİR

JELKOT KAPLAMALARIN POLİMER KOMPOZİTLERDEKİ HİDROTERMAL VE ULTRAVİYOLE IŞIN YAŞLANMASINA ETKİSİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı

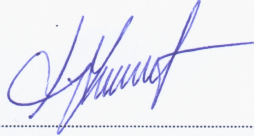
Akar DOĞAN

Haziran, 2019

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

AKAR DOĞAN, tarafından DOÇ. DR. YUSUF ARMAN yönetiminde hazırlanan “JELKOT KAPLAMALARIN POLİMER KOMPOZİTLERDEKİ HİDROTERMAL VE ULTRAVİYOLE IŞIN YAŞLANMASINA ETKİSİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

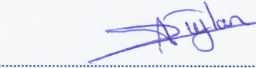


Doç. Dr. Yusuf ARMAN

Yönetici



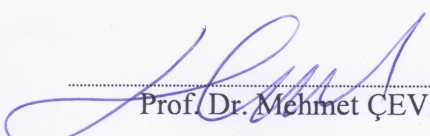
Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU



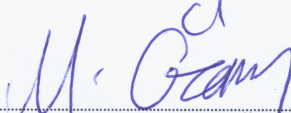
Doç. Dr. Aylin ZİYLAN

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Tez İzleme Komitesi Üyesi



Prof. Dr. Mehmet ÇEVİK



Doç. Dr. Mustafa ÖZEN

Jüri Üyesi

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması sürecinde engin bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, teşvik eden, imkân veren ve her koşulda desteğini esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. Yusuf ARMAN hocama sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmama katkılarından dolayı Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU ve Doç. Dr. Aylin ZİYLAN hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte beni destekleyen, desteğini daima arkamda hissettiğim eşime, kızıma ve aileme teşekkür ederim.

2211-Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında sağladığı destekten ötürü TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı birimine teşekkür ederim.

Akar DOĞAN

JELKOT KAPLAMALARIN POLİMER KOMPOZİTLERDEKİ HİDROTERMAL VE ULTRAVİYOLE IŞIN YAŞLANMASINA ETKİSİ

ÖZ

Elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin çevresel koşullara maruz kaldıkları dış mekânlarda kullanımı gittikçe artmaktadır. Özellikle, sıcaklığa, neme ve ultraviyole (UV) ışına maruz kalan polimer temelli kompozit malzemelerin dayanıklılığı ile ilgili sorular gündeme gelmiştir. Bu tez çalışmasında, cam ve karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerde elyaf türünün ve elyaf diziliminin, hidrotermal ve ultraviyole ışın içeren bir yaşlandırma koşulundaki sıcaklık değerinin ve jelkot kaplamanın ve bu jelkot renginin malzemenin yaşlanması üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda, karbon elyaf malzemesinin cam elyaf malzemesine göre çevresel ortamlara daha dayanıklı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, ortam sıcaklığının ve ultraviyole ışının malzemenin yaşlanması üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve jelkot ile kaplanan malzemelerde, malzemenin mekanik, camsı geçiş sıcaklığı, düşük hızlı darbe delinme eşiği gibi özellikleri aynı çevresel koşullardan kaplanmadan yaşlandırılan malzemeye oranla daha az etkilendiği görülmüştür. Bununla birlikte, jelkot renginin de malzemenin yaşlanması üzerinde önemli bir etkisi olduğu gözlenmiştir.

Çekme, dinamik mekanik analiz, düşük hızlı darbe, üç nokta eğilme, tabakalar arası kayma testleri ile kompozit malzemelerin yaşlanma ortamı ve süresi ile çeşitli özelliklerindeki değişimler belirlenmiştir. Bu değişimler tablo ve grafikler şeklinde sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Cam elyaf, karbon elyaf, epoksi, düşük hızlı darbe testi, jelkot kaplama, yaşlandırma

THE EFFECT OF GELCOATS ON HYDROTHERMAL AND ULTRAVIOLET LIGHT INDUCED AGING OF POLYMER COMPOSITES

ABSTRACT

Fiber reinforced polymer composite materials are increasingly being used in outdoor environments where they are exposed to environmental conditions. In particular, questions concerning the durability of polymer-based composite materials exposed to temperature, humidity and ultraviolet (UV) radiation have been raised. In this thesis, the effects of fiber type and stacking sequence of the glass fiber and carbon fiber reinforced epoxy composite materials, the value of temperature in the environment of hydrothermal and ultraviolet radiation and gelcoat coating and the color of this gelcoat on the aging of the material were experimentally investigated.

As a result of the tests, it has been observed that carbon fiber material is more resistant to environmental conditions than glass fiber material. In addition, the ambient temperature and the ultraviolet light have a significant effect on the aging of the material and in the materials coated with gelcoat, the properties of the material such as mechanical, glass transition temperature, low velocity impact perforation threshold was less affected by the same environmental conditions than the uncoated material. However, gelcoat color has been observed to have a significant effect on the aging of the material.

The variation of various properties of the composite materials with aging environment and duration were determined with tensile, dynamic mechanical analysis, low-velocity impact, three-point bending, interlaminar shear tests. These variations are presented in tables and graphs.

Keywords: Glass fiber, carbon fiber, epoxy, low velocity impact test, gelcoat coating, aging

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
1.1 Giriş.....	1
1.2 Polimer Matris Kompozitlerde Hidrotermal Yaşlanma ve Ultraviyole Işın Etkisi	3
1.3 Tezin Amacı	11
BÖLÜM İKİ - MALZEME VE YÖNTEM	13
2.1 Kompozit Malzeme Üretimi.....	13
2.2 Çekme Testi.....	14
2.3 Düşük Hızlı Darbe Testi.....	15
2.4 Darbe Sonrası Bası Testi	17
2.5 Tabakalar Arası Kayma Testi.....	18
2.6 X-Işını Fotoelektron Spektrometresi (XPS)	19
2.7 Üç Nokta Eğilme Testi	19
2.8 Dinamik Mekanik Analiz (DMA)	20
BÖLÜM ÜÇ - DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME.....	21
3.1 Hidrotermal Yaşlanma Koşulunun Cam ve Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzeme Üzerindeki Etkisi	21
3.1.1 Giriş	21
3.1.2 Kütle Değişimi.....	22

3.1.3 Çekme Testi Sonuçları.....	23
3.1.4 Üç Nokta Eğilme Testi Sonuçları	27
3.1.5 X-Işını Fotoelektron Spektrometresi (XPS) analiz sonuçları	29
3.2 Farklı Sıcaklık Değerine Sahip Hidrotermal Yaşlanma Koşullarının Ve Uv Işının Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzeme Üzerindeki Etkisi...	31
3.2.1 Giriş	31
3.2.2 Çekme Testi Sonuçları.....	32
3.2.3 Düşük Hızlı Darbe Testi Sonuçları.....	35
3.2.4 Tabakalar Arası Kayma Testi Sonuçları.....	45
3.2.5 Düşük Hızlı Darbe Sonrası Bası Testi	46
3.3 Çevresel Koşulların Farklı Jelkot Renkleri İle Kaplanmış Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzeme Üzerindeki Etkisi	52
3.3.1 Giriş	52
3.3.2 Kompozitlerin Yüzey Analizi.....	55
3.3.3 Çekme Testi Sonuçları.....	56
3.3.4 Dinamik Mekanik Analiz (DMA) Testi Sonuçları	59
3.3.5 Düşük Hızlı Darbe Testi Sonuçları.....	62
3.4 Çevresel Koşulların Farklı Jelkot Kalınlığı İle Kaplanmış Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzeme Üzerindeki Etkisi	71
3.4.1 Giriş	71
3.4.2 Kütle Değişimi.....	72
3.4.3 Çekme Testi Sonuçları.....	74
BÖLÜM DÖRT - SONUÇLAR	77
KAYNAKLAR	80

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Epoksi ve su molekülleri arasında meydana gelebilecek olası bağlar (a) Tip 1 (b) Tip 2	5
Şekil 1.2 Direkt güneş ışığına maruz bir yapıda yüzey sıcaklığının yüzey rengi ile değişimi	10
Şekil 2.1 Vakum destekli reçine infüzyon yönteminin şematik gösterimi	13
Şekil 2.2 Kompozit malzeme üretim aşamaları	14
Şekil 2.3 Shimadzu evrensel çekme test cihazı	15
Şekil 2.4 CEAST Fractovis Plus düşük hızlı darbe test cihazı	16
Şekil 2.5 Üç farklı hasar türü için temas kuvveti-çökme eğrileri a) Geri sekme, b) Penetrasyon, c) Delinme	17
Şekil 2.6 Darbe sonrası bası test aparatı	18
Şekil 3.1 Dört farklı kompozit malzemenin istifleme diziliminin şematik görünümü..	21
Şekil 3.2 Kompozit malzemelerin zamana bağlı kütle değişimi	23
Şekil 3.3 Dört farklı tip kompozit malzemenin elyaf doğrultusundaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.....	24
Şekil 3.4 Elyaf doğrultusundaki çekme mukavemetinin yaşlandırma süresi ile değişimi	25
Şekil 3.5 Elyafa dik doğrultudaki çekme mukavemetinin yaşlandırma süresi ile değişimi	26
Şekil 3.6 Farklı yaşlandırma süreleri sonunda elyafa dik doğrultuda çekme testi yapılmış dört farklı malzeme tipi numuneleri	27
Şekil 3.7 Farklı yaşlandırma süreleri için eğilme gerilmesi- çökme eğrileri.....	28
Şekil 3.8 Eğilme mukavemetinin yaşlandırma süresi ile değişimi	29
Şekil 3.9 Farklı yaşlandırma koşullarına maruz kalmış E-cam takviyeli epoksi kompozitlerin elyaf doğrultusundaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	33
Şekil 3.10 Farklı yaşlandırma koşullarına maruz kalmış E-cam takviyeli epoksi kompozitlerin elyafa dik doğrultudaki gerilme- birim şekil değiştirme eğrileri	33
Şekil 3.11 20 Joule darbe enerjisi için elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri ...	36

Şekil 3.12 30 Joule darbe enerjisi için elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri...	37
Şekil 3.13 40 Joule darbe enerjisi için elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri ...	37
Şekil 3.14 50 Joule darbe enerjisi için elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri...	38
Şekil 3.15 60 Joule darbe enerjisi için elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri ...	38
Şekil 3.16 80 Joule darbe enerjisi için elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri ...	39
Şekil 3.17 K1 koşuluna maruz kalmış kompozit malzemelerin farklı darbe enerjileri için hasar görüntüleri.....	40
Şekil 3.18 Çeşitli yaşlandırma koşullarına maruz kalmış kompozit malzemenin enerji profil diyagramları	42
Şekil 3.19 Orijinal ve K2 koşuluna maruz kalmış kompozit malzemelerin farklı darbe enerjileri için hasar görüntüleri	43
Şekil 3.20 Farklı yaşlandırma koşulları için darbe eğilme rijitliği	44
Şekil 3.21 20 ve 30 Joule darbe enerjisi için maksimum çökme değerleri	45
Şekil 3.22 Farklı çevresel koşullar için tabakalar arası kayma mukavemeti değerleri	46
Şekil 3.23 Farklı çevresel ve darbe enerjilerine maruz kalmış kompozit malzemelerin darbe sonrası bası mukavemetinin değişimi	47
Şekil 3.24 Yaşlandırılmamış malzemelerin CAI mukavemeti ve absorbe edilen enerji değerlerinin darbe enerjisi ile değişimi	48
Şekil 3.25 K1 ortamına maruz malzemelerin CAI mukavemeti ve absorbe edilen enerji değerlerinin darbe enerjisi ile değişimi	49
Şekil 3.26 K2 ortamına maruz malzemelerin CAI mukavemeti ve absorbe edilen enerji değerlerinin darbe enerjisi ile değişimi	49
Şekil 3.27 K3 ortamına maruz malzemelerin CAI mukavemeti ve absorbe edilen enerji değerlerinin darbe enerjisi ile değişimi	50
Şekil 3.28 K4 ortamına maruz malzemelerin CAI mukavemeti ve absorbe edilen enerji değerlerinin darbe enerjisi ile değişimi	50
Şekil 3.29 CAI testi sonrası kompozit malzemede meydana gelen hasarlar	51
Şekil 3.30 Jelkot kaplanmış kompozit malzemelerin kesit fotoğrafları.....	53
Şekil 3.31 Yaşlanma koşulundaki sıcaklık ve nem değişimi.....	54
Şekil 3.32 Yaşlandırılmamış, kaplanmamış ve farklı renk jelkot ile kaplanmış çekme test numuneleri	55

Şekil 3.33 Siyah ve sarı jelkot ile kaplanmış yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış numunelerin yüzeylerinin mikro fotoğrafları	56
Şekil 3.34 Kompozit malzemelerin elyaf doğrultusundaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	57
Şekil 3.35 Kompozit malzemelerin elyafa dik doğrultudaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	58
Şekil 3.36 Dört farklı kompozit malzemeye ait depolama modülü-sıcaklık eğrileri..	60
Şekil 3.37 Dört farklı kompozit malzemeye ait $\tan \delta$ -sıcaklık eğrileri	61
Şekil 3.38 Orijinal ve kaplanmamış malzemelere ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları.....	62
Şekil 3.39 Dört farklı malzeme için 20 Joule darbe enerjisi esnasında elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri.....	63
Şekil 3.40 Dört farklı malzeme için 30 Joule darbe enerjisi esnasında elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri.....	63
Şekil 3.41 Dört farklı malzeme için 40 Joule darbe enerjisi esnasında elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri.....	64
Şekil 3.42 Dört farklı malzeme için 50 Joule darbe enerjisi esnasında elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri.....	64
Şekil 3.43 Dört farklı malzeme için 60 Joule darbe enerjisi esnasında elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri.....	65
Şekil 3.44 Dört farklı malzeme için 80 Joule darbe enerjisi esnasında elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri.....	65
Şekil 3.45 Dört farklı kompozit malzemeye ait enerji profil diyagramları.....	67
Şekil 3.46 30, 50 ve 80 Joule darbe enerjileri sonrasında orijinal ve kaplanmamış malzemelerin fotoğrafları.....	70
Şekil 3.47 30, 50 ve 80 Joule darbe enerjileri sonrasında sarı ve siyah jelkot kaplanmış malzemelerin fotoğrafları	71
Şekil 3.48 Farklı kalınlıkta jelkot ile kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin kütlelerinin yaşlandırma koşulu altında zamanla değişimi	74
Şekil 3.49 Elyaf doğrultusundaki çekme mukavemetinin zamanla değişimi	75
Şekil 3.50 Elyafa dik doğrultudaki çekme mukavemetinin zamanla değişimi.....	76

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1 Farklı yaşlandırma süreleri sonrası Tip B ve Tip A malzemenin XPS sonuçları	30
Tablo 3.2 Farklı yaşlandırma koşullarına maruz kompozit malzemenin çekme mukavemeti, elastisite modülü ve birim şekil değiştirme değerleri.....	35
Tablo 3.3 Farklı darbe enerjilerine ve malzemelere ait veriler	69



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Giriş

Kompozit malzeme, tek başına kullanılan bileşenlerinden daha iyi özelliklere sahip olan iki veya daha fazla malzemenin makroskobik ölçülerde bir araya gelerek oluşturdukları yeni malzeme olarak tanımlanabilir. Metalik alaşımların aksine, kompozit malzemeyi oluşturan her bir malzeme kendi kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini korur. Kompozit malzemeler, matris ve takviye elemanı olarak adlandırılan fazlardan oluşmaktadır. Matris sürekli ve ana fazdır. Takviye elemanını bir arada tutar ve yükün paylaşılmasını sağlar. Takviye elemanı ise yükü taşıyan ve rijitliği artıran bileşendir. Ayrıca takviye elemanı ile matris malzemesi arasında yükün iletilmesini sağlayan ara-yüzey fazı mevcuttur. Kompozit malzemelerin, geleneksel metallere karşı en büyük üstünlüğü düşük yoğunluğa rağmen sağladıkları yüksek mukavemet ve rijitliktir. Kompozit malzemeler genellikle kullanılan takviye ve matris malzemesinin türüne göre iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Kompozit malzemeler matris malzemesine göre;

- Polimer matris kompozitler
- Metal matris kompozitler
- Seramik matris kompozitler

olmak üzere üç grupta sınıflandırılmaktadır. Takviye malzemesine göre ise;

- Elyaf takviyeli kompozitler,
- Parçacık takviyeli kompozitler,
- Tabakalı kompozitler.

şeklinde sınıflandırılmaktadır (Campbell, 2010).

Günümüzde, elyaf takviyeli polimer matris kompozitler otomotiv, uçak endüstrisi, rüzgâr tribünü ve deniz taşıtları gibi birçok alanda sahip oldukları yüksek mukavemet, yüksek elastisite modülü ve düşük ağırlık gibi avantajları sayesinde geleneksel metallerin yerine almışlardır. Polimer matris malzemeler termoplastik ve termoset olmak üzere iki grupta sınıflandırılmaktadır. Başlıca termoset matrisler,

epoksi, polyester ve vinilester reçinelerdir. Bu matris malzemeleri ile kullanılan en yaygın takviye malzemeleri ise cam, aramid, kevlar ve karbon elyaflardır (Gay, Hoa ve Tsai, 2003). Polimer matris kompozitlerin, geleneksel metallere göre yukarıda belirtildiği gibi birçok avantajının olmasının yanında, özellikle, uzun süreler boyunca dış mekânda minimum muayene ve bakım ile çalışmalarını sağlamak en büyük sorun olarak görülmektedir. Örneğin, izlenmesi ve bakımı zor olan rüzgâr tribünü kanadı veya açık deniz yapılarının uzun süre neme, çevrimsel sıcaklığa ve yüklere karşı dirençli olması gerekmektedir (Hu, Lang, Li ve Nutt, 2014). Polimer kompozit malzemelerin gittikçe artan bir şekilde kullanımı ile çevresel hizmet koşullarının dayanıklılıkları üzerindeki etkisi, birçok uygulama alanı için devam eden bir endişe haline gelmiştir. Bu tür yapılar, yapısal bileşenin ömrü boyunca uygulanan çalışma koşullara dayanacak şekilde tasarlanmalıdır. Bundan dolayı, nem, sıcaklık ve ultraviyole ışın gibi çevresel etkilerin bu yapıların dayanımı üzerindeki etkisi araştırmacılar ve polimer endüstrisi için önemli bir durum haline gelmiştir (Barbosa ve diğer., 2017). Araştırmacılar, uzun süre çevresel koşullara maruz kalan polimer kompozit malzemelerin özelliklerinde değişimler olduğunu gözlemlemiştir. Malzemenin özelliklerindeki bu değişim yaşlanma süreci olarak tanımlanmaktadır.

Yaşlanma genel olarak fiziksel ve kimyasal olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. Fiziksel yaşlanma, genel olarak, bir malzemenin camsı geçiş sıcaklığının altındaki sıcaklıklara uzun süreler boyunca maruz kaldığında, kütle yoğunluğundaki artış ve amorf veya yarı kristalli malzemelerin molekülerinin konfigürasyonel enerjisinde bir azalma olarak ifade edilir. Fiziksel yaşlanma geri döndürülebilir bir yaşlanma tipidir. Kimyasal yaşlanma durumunda ise zincir kesilmesi, çapraz bağlanma yoğunluğundaki değişiklikler ve oksidasyon veya hidroliz gibi mekanizmaların neden olduğu moleküler yapının geri döndürülemez bir değişimi söz konusudur. Çoğu uygulamada, fiziksel ve kimyasal yaşlanma aynı anda meydana gelmektedir. Bir diğer önemli yaşlanma türü ise hidrotermal yaşlanmadır. Bu yaşlanma türünde, nem ve yüksek sıcaklık altında moleküller yapıda meydana gelen bozulmalar olduğu için kimyasal yaşlanma olarak ifade edilmektedir (Martin, 2008; Odegard ve Bandyopadhyay, 2011).

Yaşlanma sürecindeki en önemli iki ölçüt, malzeme özellikleri ve çevresel koşullardır. Sıcaklık, nem, ultraviyole ışın (UV), tuzlu su, dış yükler gibi çevresel etkiler bir polimer matris kompozit yapıyı etkileyen en kritik çevresel etkiler olarak nitelenmektedir. Bu çevresel etkiler sonucunda polimer kompozit malzemelerden meydana gelen yapılarda geri dönüşü olmayan hasarlar meydana gelebilmektedir (Martin, 2008). Kompozit malzemelerin uzun süreler boyunca güvenilirliği ve performansı, bu malzemeler birçok uygulamada kritik unsurlar olduğundan ele alınması gereken bir husustur. Polimer kompozit malzemeler etkileyici bir dizi özellik sunsa da, iklim koşullarının bu malzemelerin dayanıklılığı ve performansı üzerindeki etkisi tam olarak anlaşılmamıştır (Shokrieh ve Bayat, 2007). Beklenmeyen hasarların önüne geçmek için, polimer kompozitlerin uzun süre çevresel koşullar altındaki performansının, özellikle de hidrotermal ortamlara ve UV radyasyonuna maruz kaldıklarında iyi anlaşılması gerekmektedir (Zafar, Bertocco, Schjødt-Thomsen ve Rauhe, 2012). Bu nedenle bilim insanları, polimer malzemelerin moleküler yapısındaki değişimlere neden olan nem, sıcaklık ve ultraviyole ışınım gibi çevresel etkileri sıklıkla araştırmışlardır ve araştırmaya devam etmektedirler.

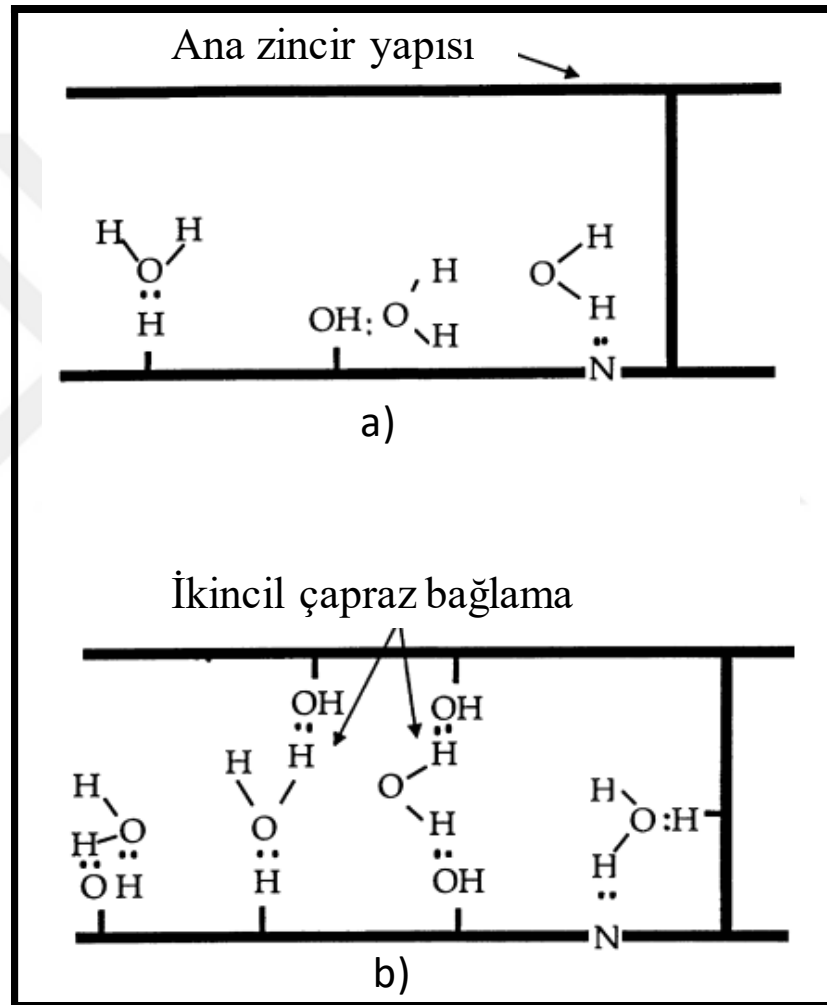
1.2 Polimer Matris Kompozitlerde Hidrotermal Yaşlanma ve Ultraviyole Işın Etkisi

Bazı uygulamalarda kompozit malzemeler yüksek sıcaklık ile birlikte yüksek nem oranına sahip çevresel koşullara maruz kalabilmektedir. Bu çevresel koşullar polimer kompozitlerin özelliklerinde bozulmaya neden olmaktadır. Elyaf takviyeli polimer malzemelerin servis ömrünü ve dayanıklılığını tahmin etmek büyük önem arz etmektedir. Elyaf takviyeli polimer kompozitler suda çözünür olmasa bile su emme yeteneğine sahiptirler. Su emilimi sadece polimerlerin kimyasal yapılarına değil aynı zamanda maruz kaldıkları hidrotermal ortama da bağlıdır (Pavlidou ve Papaspyrides, 2003). Sıcaklık ve su emiliminden dolayı polimerik malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde bir takım değişimler olacaktır. Hidrotermal ortam, polimerlerin camı geçiş sıcaklığını (T_g) azaltabilir, polimer matrisinin plastikleşmesine ve elyaf-matris ara yüzey yapışma kabiliyetinin azalmasına neden

olabilir, bu da malzemenin mukavemetinin düşmesine neden olur. Genellikle, düşük sıcaklıklarda nemin polimer üzerindeki etkisi, nem kaldırıldıktan sonra geri dönüşümü olan bir değişimdir. Ancak, su emilimi yüksek sıcaklık ile birlikte gerçekleşiyorsa, bu durumda matristeki kimyasal bozulmadan dolayı bu yaşlanma geri çevrilemezdir (Jiang, Kolstein, Bijlaard ve Qiang, 2014; Yu ve Yang, 2017; Fang ve diğer., 2018). Polimer temelli kompozitlerde, matris ve elyaf-matris ara yüzey fazları nemden en çok etkilenen fazlardır. Su emiliminin matris üzerinde hem kimyasal hem de fiziksel etkileri olduğu yaygın olarak kabul edilir (Khan, Mahmood, Syed, Khan ve Day, 2013).

Su ve epoksi arasında oluşabilecek muhtemel iki bağ Şekil 1.1’de verilmiştir. Şekil 1.1 a su ve epoksi ağı arasında tek hidrojen bağı göstermektedir (Tip 1). Tip 1 bağında, su molekülleri, reçine ağı ile bir hidrojen bağı oluşturur ve düşük aktivasyon enerjisine sahiptir. Bu bağ, aktivasyon enerjisi düşük olduğundan kaldırılması kolay olan bir bağıdır. Şekil 1.1 b ise çok bölgeli ara bağlantılı hidrojen bağ modelini göstermektedir. Çok bölgeli ve ara bağlantılı bağlanma, daha yüksek bir aktivasyon enerjisine sahip olan ve kaldırılması daha zor olan Tip 2 bağı suya karşılık gelir. Tip 2 bağında su molekülleri, reçine ağı ile birden fazla hidrojen bağı oluşturur ve daha yüksek aktivasyon enerjisine sahiptir. Tip 1 bağı su molekülleri, epoksi ağına yayılır ve zincir segmentinde hareketliliğe ve şişmeye neden olan ilk zincir içi Van der Waals kuvvetini kırar. Tip 1 bağı miktarı, su emilim işleminde baskın olduğu için, epoksi reçinelerini kolayca plastikleştirir. Çok bölgeli ara bağlantılı su molekülleri (Tip 2), reçinenin plastikleştirilmesinde önemli bir katkı yapmaz. Ayrıca, bu bağ bileşikleri, ikincil çapraz bağlanma ile sonuçlanan zincir parçaları arasında köprü oluşturur. Tip 1 bağı oluşumu, nem emme işleminde, özellikle düşük sıcaklıktaki hidrotermal ortamda kolayca meydana gelir. Ancak, Tip 2 bağlanmasını oluşturmak için gerekli enerji daha fazla olmalıdır. Daha uzun süre ve daha yüksek sıcaklıklarda hidrotermal ortama maruz kalma, Tip 2 bağının oluşması için uygun ortam sağlar. Sonuç olarak, Tip 2 bağı su molekülü miktarı, maruz kalma süresi ve sıcaklıkla artmaktadır (Zhou ve Lucas, 1999; Z. Wang, Xian ve Zhao, 2018).

Bir polimerdeki fiziksel yaşlanma, genellikle plastikleşme ve polimerlerin şişmesini içerir. Bu yaşlanma yukarıda da bahsedildiği gibi geri çevrilebilir ve moleküler hareketliliğin artması ile sonuçlanır. Küçük su molekülleri büyük polimer zincirleri arasındaki pozisyonları işgal eder ve böylelikle moleküller arası yapışma kuvvetlerini azaltır (Helbling ve Karbhari, 2008). Bununla birlikte polimer malzeme, serbest hacminin artması ile şişmeye ve uzamaya başlar. Böylece polimer daha yumuşak ve sünek hale gelir.

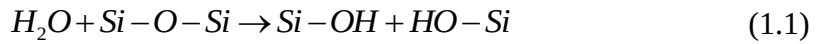


Şekil 1.1 Epoksi ve su molekülleri arasında meydana gelebilecek olası bağlar (a) Tip 1 (b) Tip 2 (Zhou ve Lucas, 1999)

Kimyasal yaşlanma, kısmen bağlanmış bileşenlerin reçineden ayrışması ve fonksiyonel grupların polimer zincirlerinden hidrolizinden oluşur (Helbling ve Karbhari, 2008). Hidroliz, su difüzyonunun zincir ayrışmasına ve segmentasyona yol

açmasından kaynaklanmaktadır. Su, polimer tarafından emilir ve polimerin moleköl ağırlığını ve dolayısıyla polimerin mekanik özelliklerini düşüren hidroliz olayı meydana gelir. Hidroliz olayı yüksek sıcaklık ile birlikte artmaktadır. Bazı durumlarda hidroliz, polimerlerin çatlaması, tebeşirlenmesi ve dökölmesi gibi hasarlara neden olabilir. Tabakalı kompozitlerde en yaygın hasar, kompozitin mekanik özelliklerinin bozulmasına neden olan matris mikro çatlamasıdır (Yu ve Yang, 2017).

Takviye elemanları da polimer malzemeler gibi sıcaklık ve nemden etkilenebilir. Takviye elemanı, bir kompozit yapıda yükü taşıyan ve kompozit malzemenin yük taşıma kapasitesini belirleyen ana elamandır. Karbon elyafların, sahip oldukları yüksek korozyon direncinden dolayı nemden etkilenmesi kolay değildir. Bununla birlikte, cam elyaflar, hidrotermal ortamlardan zarar görme potansiyeline sahiptir (Saadatmanesh, Tavakkolizadeh ve Mostofinejad, 2010). Yu ve Yang (2017), yüksek oranda su emilimi, su moleküllerinin cam elyaflın yüzeyinde hareket etmesine neden olacağını ve bununla birlikte, silikon oksit ve su molekülleri arasında aşağıdaki şekilde bir reaksiyon meydana geleceğini belirtmişlerdir. Denklem (1.1) cam elyafların sudaki hidrolizini belirtir.



Bu reaksiyonun artması ile cam elyafların zayıflamasına neden olan çatlamalar meydana gelmektedir. Ayrıca, hidrotermal yaşlanma işlemi sırasında cam elyaflın yüzeyinde, yüzey aşınması ve nano ölçekli boşluklar meydana gelmektedir (Bunker, 1994).

Polimer matrisli kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin bozulması, malzemeyi oluşturan bileşenlerinkinden daha hızlı olabilir. Bunun nedeni, elyaflın ve matrisin yanı sıra, ara-yüzey özelliğinin de kompozitlerin nihai performansını belirlemede oldukça önemli bir rol oynamasıdır (Ellyin ve Rohrbacher, 2003). Su molekülleri reaksiyona girerek ara-yüzde mevcut kimyasal bağı zayıflatma potansiyeline sahiptir. Sonuç olarak, elyaf ve matris arasındaki yapışma bozulur ve

kılcal hareket ile daha fazla su emilir. Kompozit malzeme tarafından emilen su molekülleri matrisin şişmesine neden olur. Kürleme işlemi sırasında takviye elemanı ve matris arasındaki ara yüzde bir tür bası ısı gerilmesi mevcuttur. Su moleküllerinin emiliminden dolayı oluşan şekil değişimi, bu termal gerilmeyi azaltabilir ve hatta bu bası gerilmesini çekme gerilmesi olarak değiştirebilir. Oluşturulan bu çekme gerilmesi, hem takviye elemanın mukavemetine hem de kompozitlerin ara yüzey mukavemetine zarar verecektir. Buna ek olarak, kompozit tarafından emilen su, ara-yüzey boyunca takviye elemanı ve matrisin arasındaki yapışmanın kopmasına neden olan yeteri kadar büyük ozmotik basınç üretebilir (Liao ve Tan, 2001; Yu ve Yang, 2017).

Literatür taramasından, polimer kompozitlerin termal ve mekanik özelliklerinin hidrotermal yaşlanmadan etkilenebileceği doğrulanmıştır. Örneğin, Vaddadi, Nakamura ve Singh (2003), hidrotermal ortama maruz elyaf takviyeli epoksi kompozitin ana özelliklerinde bir düşüş meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Zhong ve Joshi (2015), nem emiliminin matrisi yumuşattığını, kuvvet transfer işlevini zayıflattığını ve camsı geçiş sıcaklığının azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Garcia, Hayes, Verghese ve Lesko (1998), emilen suyun neden olduğu matris çatlamasının, elyaf-matris ara yüzey bozulmasının ve cam elyafların aşınmasının, elyaf takviyeli kompozit malzemenin mukavemetinde ve sertliğinde azalmaya yol açtığını gözlemlemişlerdir.

Fitriah ve diğer. (2017), iplik sarım yöntemi ile üretilen üç farklı sarım açısına sahip cam elyaf takviyeli epoksi boruların ezilme davranışına hidrotermal yaşlanmanın etkisini incelemişlerdir. 80 °C sıcaklığa sahip musluk suyunda 500, 1000, 1500 saat bekletilen numunelere 25, 45 ve 65 °C sıcaklıkta bası testleri yapılmıştır. Yapılan testler sonunda boruların mukavemetinin sıcaklık ve bekleme süresi ile düştüğü gözlenmiştir.

Santhosh, Muniraju, Shivakumar ve Raguraman (2012) hidrotermal koşullar altında karbon ve cam elyaf takviyeli polyester kompozitlerin mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Test numuneleri, maksimum 100 saatlik bir süre boyunca % 95

nemde 60 °C ve 70 °C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Numuneler periyodik olarak alınarak, çekme gerilmesi, eğilme gerilmesi, tabakalar arası kayma gerilmesi ve elastisite modülü gibi mekanik özellikleri incelenmiştir. Karbon elyaf takviyeli numunelerin, mekanik özelliklerinde ki değişim cam elyaf takviyeli numunelere kıyasla daha stabil kalmıştır.

Ray (2006), hidrotermal yaşlanmaya maruz kalmış karbon elyaf ve cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma mukavemetini karşılaştırmıştır. Yapılan testler sonucunda, yüksek sıcaklığın, su moleküllerinin kompozit içerisinde difüzyonunu arttırdığı gözlenmiştir. Oda sıcaklığı ve 70 °C sıcaklıkta aynı nem oranı değeri için, yüksek sıcaklık ortamına maruz bırakılmış numune daha düşük kayma mukavemetine sahiptir. Bu da sıcaklığın bozucu bir etkisi olduğunu anlamı gelmektedir. Kompozit malzemelerin ara yüzey yapışmasının daha yüksek sıcaklık şartlarında ve daha fazla maruz kalma süreleri ile hidrotermal yaşlanmadan daha fazla etkilendiği sonucuna varılmıştır.

Rocha, Raijmaekers, Nijssen, van der Meer ve Sluys (2017), rüzgâr türbini kanatlarında kullanılan cam/epoksi kompozit malzemenin hidrotermal bir ortamdaki yaşlanma sürecini değerlendirmişlerdir. Kompozit ve saf epoksi örnekleri, 4800 saat boyunca 50 °C'de su içinde bekletildikten sonra, statik ve yorulma testleri yapılmıştır. Kompozit örneklerde yapılan mekanik testlerden elde edilen sonuçların karşılaştırmasında, yaşlandırılmış numunelerde yüzde 36 oranında daha düşük statik kayma mukavemeti ve üç kat daha kısa yorulma ömrü ile önemli bir yaşlanma gözlenmiştir.

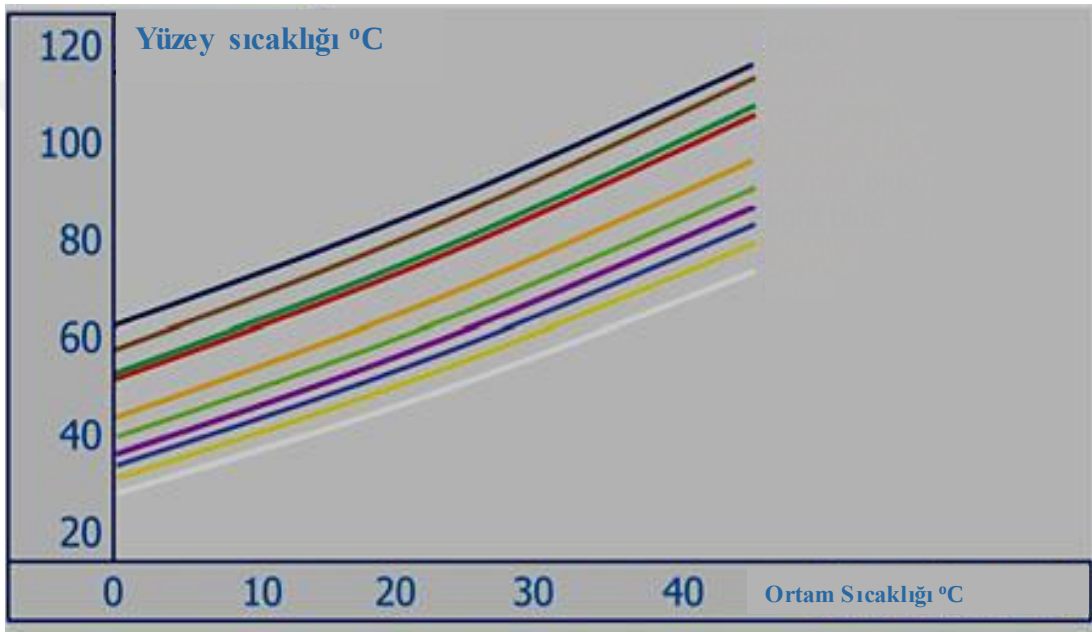
Koruyucu bir malzeme ile kaplanmayan kompozitler için, ultraviyole (UV) ışın kompozitin polimerik yüzeyini bozabilir, böylece su emilimini daha da arttırırken lifleri açığa çıkarabilir. Hem neme hem de ultraviyole ışına maruz kalan bir kompozit malzemenin, mekanik özellikleri, özellikle elastisite modülü ve tabakalar arası kayma mukavemetinde önemli değişimler meydana gelebilir (Barbosa ve diğer., 2017). UV ışını, polimer zincirlerinin kopmasından ve polimerlerin moleküler ağırlığının azalmasından dolayı meydana gelen, yüzey parlaklığı kaybına ve zamanla

birçok malzeme özelliklerinin belirgin şekilde bozulmasına neden olan fotooksidatif yaşlanmaya neden olur (Lu, Solis-Ramos, Yi ve Kumosa, 2018). Oksijen varlığında UV radyasyonu, polimer kompozitler için güçlü bir termal ve oksidatif bozulma ortamı oluşturur. Kompozit malzemenin yüzeyinde oluşan oksidatif termal bozulma, termal-mekanik stres ve oksidasyon etkileri sonucu kompozit malzemede yapısal hasar meydana gelir. Termal gerilme, yüzeyde ve kütlede mekanik basınç oluşturur ve çatlak başlangıcı ve yayılmasına neden olur. Çatlaklar, polimer kompozit malzemelerde oluşacak hasarın ana nedenlerinden biridir. (Lafarie-Frenot, Rouquie, Ho ve Bellenger, 2006; Olivier, Baudet, Bertheau, Grandidier ve Lafarie-Frenot, 2009). Bu mikro çatlaklar yalnızca polimer kompozit performansını düşürmekle kalmaz, aynı zamanda makro çatlaklar oluşması, şişmesi ve ara yüzey kopması gibi daha fazla hasar için katalizör görevi görür (Awaja ve Pigram, 2009). Ultraviyole ışın, C-C, C-O ve fonksiyonel grup gibi polimer içindeki moleküler bağları koparmaya yetecek enerjiyi üretebilir ve zincir kesilmesi ya da çapraz bağlanma yoluyla polimerin malzeme özelliklerini değiştirmeye neden olabilmektedir (Han ve Kim, 2006).

Ayrıca, polimerler birkaç önemli geçiş sıcaklığına sahiptirler. Bunlardan en önemlisi camsı geçiş sıcaklığıdır (T_g). Camsı geçiş sıcaklığının altında polimerler genellikle sert ve gevreklerdir. Fakat bu sıcaklığın üstünde polimerler viskoelastik ve elastiktir. Gerilmeye maruz polimerler için, sürekli yükler altında sürünmeyi önlemek için malzemenin kullanıldığı sıcaklık T_g'nin altında olmalıdır. Bir malzeme direkt güneş ışığına maruz kaldığında, malzemenin yüzey rengi yüzey sıcaklığını etkilemektedir, Eğer yüzey rengi koyu ise bu durumda yüzey sıcaklığı Şekil 1.2'de görüldüğü üzere T_g'nin üstüne çıkacaktır ve su emilimini arttırarak malzemenin dayanımını etkileyecektir (Davies ve Rajapakse, 2014).

Yan, Chouw ve Jayaraman (2015), ultraviyole (UV) ışının ve su emiliminin, keten kumaşı ile güçlendirilmiş epoksi kompozitin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelenmişlerdir. El yatırma yöntemi ile üretilen kompozit malzemeler 1500 saat boyunca hızlandırılmış bir ultraviyole ışın ve hidrotermal ortam içeren bir yaşlandırma koşuluna maruz bırakılmıştır. Mekanik özellikleri değerlendirmek

amacıyla çekme ve üç nokta eğilme testleri yapılmıştır. Kompozitlerin mikro yapılarını analiz etmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Ek olarak, keten / epoksi kompozitin dayanıklılık performansı sentetik (cam ve karbon) ve hibrit elyaf takviyeli kompozitlerle karşılaştırılmıştır. Test sonuçları, yaşlandırılmış kompozitlerin çekme mukavemetinin ve modülünün sırasıyla %30 ve %35 azaldığını belirtmişlerdir. Eğilme mukavemeti ve modülü ise, sırasıyla %10,0 ve %10,2 azalmıştır. Ayrıca SEM görüntüleri, fiber/matris ara yüzey yapışmasındaki bozulmayı doğrulamıştır.



Şekil 1.2 Direkt güneş ışığına maruz bir yapıda yüzey sıcaklığının yüzey rengi ile değişimi (Davies ve Rajapakse, 2014)

Carra ve Carvelli (2014), cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin dayanıklılığı ile ilgili deneysel bir araştırma sunmaktadır. E-cam elyaflarından, izoftalik polyester, ortohtalik polyester ve vinilester olmak üzere üç farklı matris kullanılarak kompozit malzemeler üretilmiştir. Kompozitlerin mekanik ve estetik performanslarının bozulması, yüksek sıcaklık, nem ve ultraviyole (UV) radyasyonunun kombine etkisini simüle eden iklimsel bir odada hızlandırılmış yapay yaşlanma işlemi ile izlenmiştir. Altı ay boyunca bu ortama maruz kalan numunelerin bazı mekanik özelliklerin değişimini ölçmek için çekme, eğilme ve tabakalar arası kayma

mukavemeti testleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda mekanik performansta tutarlı bir azalma gözlemlenmiştir.

Kumar, Singh ve Nakamura (2002), ultraviyole radyasyona ve hidrotermal ortama maruz kalan karbon elyaf ile güçlendirilmiş epoksinin yaşlanmasını karakterize etmişlerdir. Fiziksel ve kimyasal yaşlanma gözlemlerine dayanarak, bu ortamın, epoksi matrisin önemli bir şekilde aşınmasına ve mekanik özelliklerde bir azalmaya yol açtığı gözlenmiştir. Matrisin baskın olduğu özelliklerdeki düşüş takviye elemanın baskın olduğu özelliklere nazaran daha fazla olmuştur. Enine çekme dayanımı sadece 1000 saatlik bir yaşlanma döngüsü sonunda %29 oranında azalmıştır. Takviye elemanı yönündeki mekanik özelliklerin değişmediği, ancak, yüksek matris erozyonu nedeniyle takviye elemanı ve matris ara yüzey yapışma mukavemetinin düşmesi neticesinde oluşan yük transferi sınırlaması, takviye elemanın baskın olduğu yönündeki mekanik özelliklerinde azalmasına yol açmıştır.

1.3 Tezin Amacı

Daha önce bahsedildiği gibi polimer kompozitler, uzun servis ömürleri boyunca termodinamik dengelerinden kaynaklanan genel özelliklerinin bozulmasına neden olabilecek çevresel etkilere maruz kalmaktadır (Startsev ve Nikishin, 1994). Bununla birlikte, polimer kompozitlerin doğal ortamdaki yaşlanma süreçleri yavaş bir işlemdir, bu nedenle laboratuvar ortamındaki yaşlanma sürecinin hızlandırılmış yaşlanma testleri veya farklı tipte modelleme metotları kullanarak hızlandırılması gerekmektedir (Raji, Zari, Bouhfid ve el kacem Qaiss, 2019). Genel olarak, hızlandırılmış yaşlanma karakterizasyonları farklı amaçlar için ve farklı konularla gerçekleştirilir. Hızlandırılmış yaşlanma, kısa bir zaman aralığında farklı polimer kompozit malzemelerin kimyasal kararlılığını veya fiziksel dayanıklılıklarını karşılaştırmak, beklenen kullanım koşulları altında malzemenin potansiyel servis süresini tahmin etmek, yaşlandırma koşulları altında gerçekleşen kimyasal reaksiyonları ve bunların fiziksel sonuçlarını belirmemek için kullanılmaktadır (Mensitieri ve Iannone, 2008).

Sert çevresel ortamlara maruz bir polimer kompozit malzemenin karakterizasyonu belirlemek için kullanılan birçok hızlandırılmış yaşlanma testi kullanılmaktadır. Hızlandırılmış yaşlanma yöntemleri yaşlanma mekanizmalarına ve çevresel değişkenlere bağlıdır (Maxwell, Broughton, Dean ve Sims, 2005). Yaşlanma sürecini hızlandırmak, su difüzyonunu hızlandırmak için ortam sıcaklığını arttırmak, yüksek nem oranı, çatlama ve delaminasyona neden olan aşırı sıcaklık döngüsü ile mümkün olabilmektedir. Hızlandırılmış yaşlanma test yöntemleri, tanımlanmış laboratuvar koşullarında bir malzemenin özelliklerini tahmin etmek için oldukça yararlı bir araçtır.

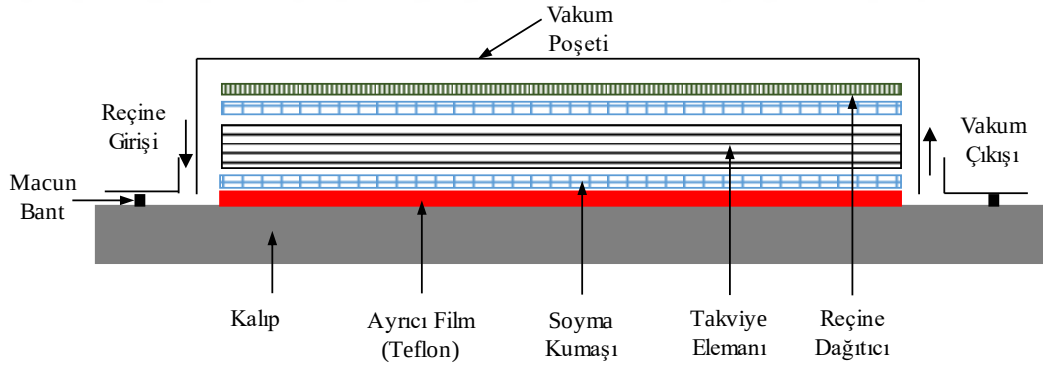
Bu tezin amacı, nem, sıcaklık ve ultraviyole gibi çevresel koşulların polimer temelli kompozit malzemeler üzerindeki etkisini incelemektir. Ayrıca, jelkot renginin ve kalınlığının bu çevresel koşullara maruz polimer temelli kompozit malzemenin yaşlanma davranışı üzerindeki etkisini araştırmaktır. Bu tez ana hatları ile düşünüldüğünde üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde cam ve karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemede elyaf türünün ve istifleme diziliminin hızlandırılmış yaşlandırma koşulları altında malzemenin mekanik ve kimyasal özelliklerindeki değişime etkisi incelenmiştir. İkinci bölümde, yaşlandırma koşulundaki sıcaklık değerinin cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemenin çekme, düşük hızlı darbe altındaki davranışı, tabakalar arası kayma mukavemeti ve düşük hızlı darbe sonra sonrası bası mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bununla birlikte, aynı sıcaklık ve nem oranına sahip ortamlarda ultraviyole ışının etkisi de belirlenmiştir. Üçüncü bölümde ise, jelkot kaplamaların, cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemenin hidrotermal ve ultraviyole ışın yaşlanmasına etkisi incelenmiştir. Siyah ve sarı renk olmak üzere iki farklı jelkot kaplaması kullanılarak jelkot renginin yaşlanma mekanizması üzerinde etkisi araştırılmıştır.

BÖLÜM İKİ

MALZEME VE YÖNTEM

2.1 Kompozit Malzeme Üretimi

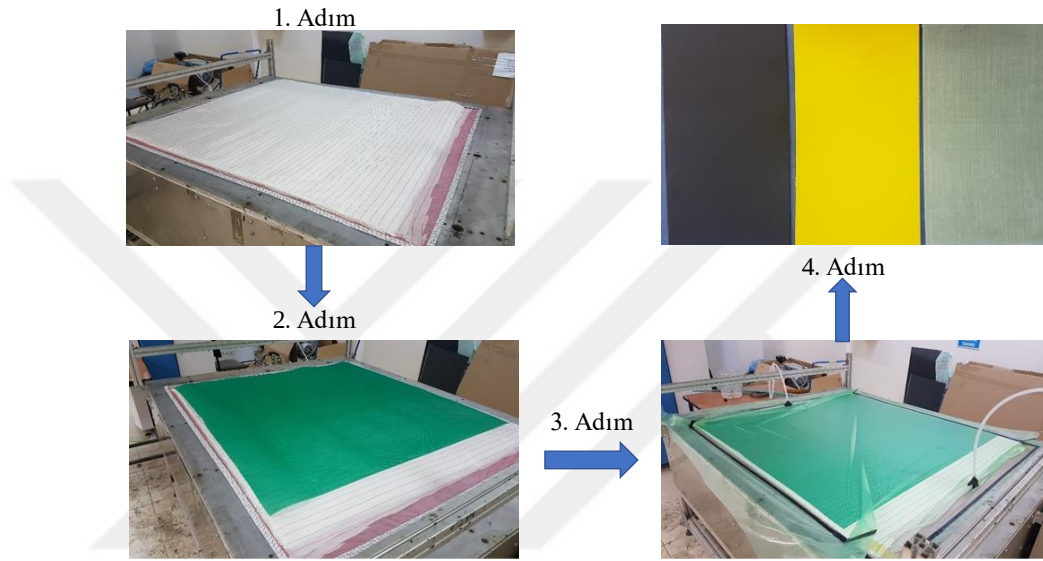
Bu çalışmada kullanılan kompozit malzemeler vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Takviye malzemesi olarak 300 gr/m² alansal yoğunluğa sahip tek yönlü E-cam ve karbon elyaf kumaşlar ve matris malzemesi olarak Huntsman Araldite Ly 1564 epoksi ile Aradur 3486 sertleştirici kullanılmıştır. Epoksi ve sertleştirici karışımının ağırlıkça oranı üçe birdir. Üretimler sıcaklık ve basınç kontrolü sağlayan özel bir üretim masasında yapılmıştır. Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi Şekil 2.1’de şematik olarak gösterilmiştir. Kompozit malzemeler hızlandırıcılı Poliya polijel P-211 püskürtme tipi jelkot kullanılarak kaplanmıştır. 100 gram jelkot için 10 gram pigment, 1 gram parafin ve 1 gr sertleştirici katılarak uygun renkte karışım elde edilmiştir. Daha sonra hava basınçlı boya tabancası ile püskürtme işlemi yapılarak kompozit malzemeler kaplanmıştır.



Şekil 2.1 Vakum destekli reçine infüzyon yönteminin şematik gösterimi

Bir kompozit malzemenin üretim aşamaları adım adım Şekil 2.2’de gösterilmiştir. İlk adımda üretim masası, ürünün masaya yapışmasını engelleyen teflon ile kaplanmıştır. Yarısı teflonun, yarısı masanın üzerinde olacak şekilde tüm kenarlara macun bant çekilmiştir. Daha sonra sırası ile soyma kumaşı, istenilen oryantasyonda takviye elemanı ve tekrar soyma kumaşı teflon malzemenin üzerine serilmiştir. İkinci adımda reçine dağıtıcı konularak vakum esnasında reçinenin dağılması sağlayan

boşluklar elde edilmiştir. Üçüncü adımda vakum poşeti kullanılarak üretilmek istenen malzeme vakum altına alınıp, bir süre hava kaçağı olup olmadığını kontrol etmek için beklenmiştir. Herhangi bir kaçağın olmadığı anlaşıldığında, hazırlanan epoksi ve sertleştirici karışımı vakum yardımı ile kumaşlara emdirilmiştir ve daha sonra vakum vanaları kapatılıp istenilen sıcaklık ve sürede kürlemeye bırakılmıştır. Üretilen kompozitler daha sonra jelkot malzeme yardımı ile kaplanmıştır (4. Adım).

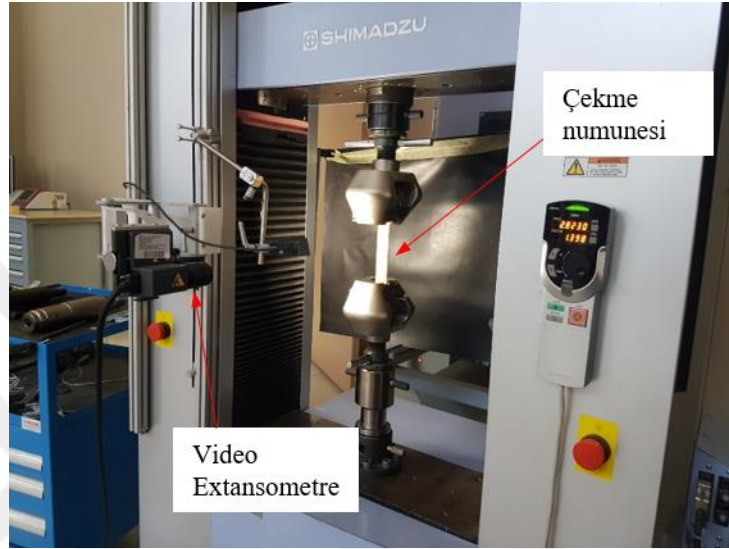


Şekil 2.2 Kompozit malzeme üretim aşamaları (Kişisel arşiv, 2017)

2.2 Çekme Testi

Üretilen kompozit malzemelerin elastisite modülü, çekme mukavemeti ve maksimum çekme birim şekil değiştirmesi değerleri ASTM D3039/3039M standardına göre bulunmuştur. İlgili standarda belirtilen şekilde kompozit plakadan uygun boyutlarda çekme numuneleri çıkarılmıştır. Bir kompozit malzeme için elyaf ve enine (elyafa dik) doğrultuları, iki temel malzeme yönüdür. Takviye elemanı doğrultusundaki mekanik özelliklerini bulmak için (elyaf yönünde) uzunluğu 250 mm ve genişliği 15 mm, enine yöndeki (elyaf doğrultusuna dik) malzeme özelliklerini bulmak içinde 175 mm uzunluğa ve 25 mm genişliğe sahip numuneler hazırlanmıştır. Çekme testi sırasında tutma çenelerinin neden olacağı gerilme yığılmasını önlemek için elyaf yönünde ve elyafa dik yönde hazırlanan malzemelerin uçlarına sırasıyla 50 mm ve 25 mm uzunluğa sahip kompozit malzemeler

yapıştırılmıştır. Çekme testleri Şekil 2.3’de gösterilen 100 kN yük kapasitesine sahip Shimadzu AG-X test cihazında yapılmıştır. Çekme test hızı 1mm/dak seçilmiş ve aynı anda video extansometre kullanılarak malzemenin uzama miktarı ölçülmüştür. Her bir koşul ve test için en az beş numune ile çekme testi yapılmış ve ortalama değer alınmıştır.

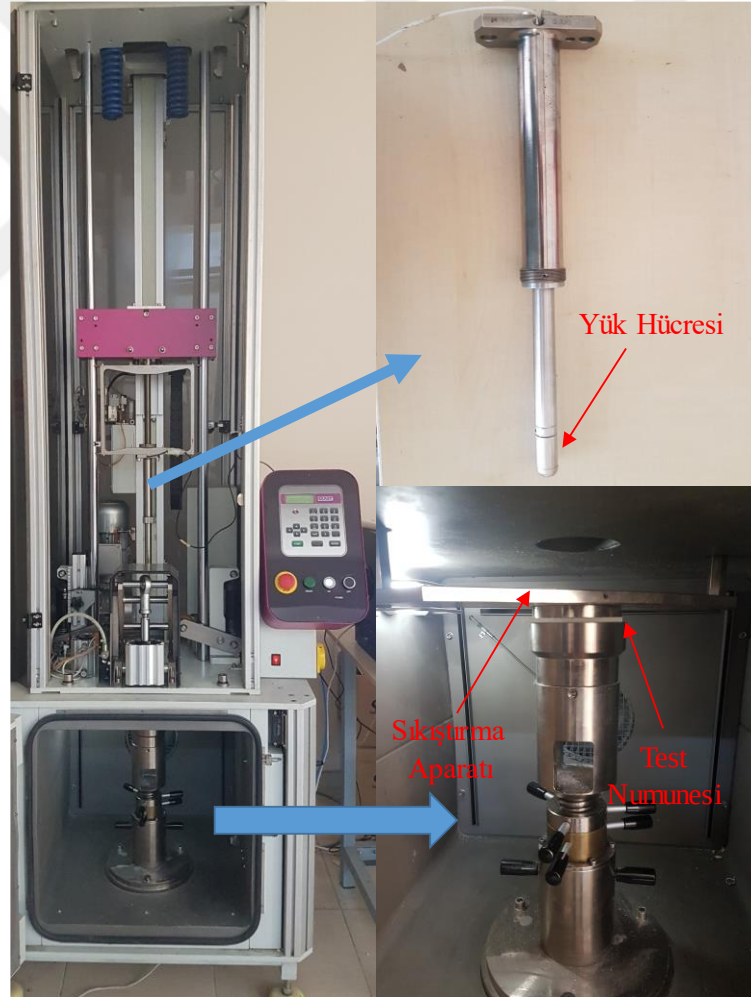


Şekil 2.3 Shimadzu evrensel çekme test cihazı (Kişisel arşiv, 2018)

2.3 Düşük Hızlı Darbe Testi

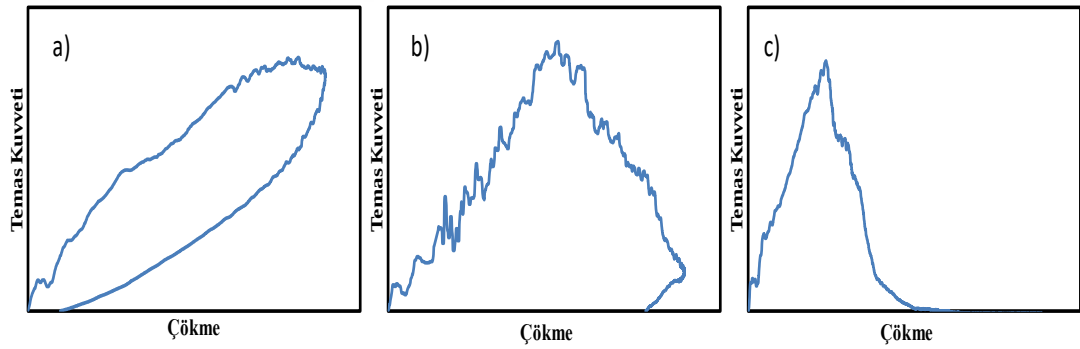
Elyaf takviyeli lamine kompozitler, özellikle havacılık ve denizcilik endüstrisi alanında, yüksek mukavemet-ağırlık oranı gibi avantajları sayesinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu malzemeler lokal kalıcı deformasyon, elyaf kırılması, delaminasyon ve matris kırılması gibi çeşitli hasar modlarına yol açan enine darbe yüklerine karşı hassastır. Yapısal sağlamlıkta önemli bir azalmaya neden olduklarından, lamine kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışı uzun zamandır önemli bir araştırma alanı olmuştur. Ancak, farklı çevresel koşullara maruz kalmış polimer malzemelerin düşük hızlı darbe davranışı hakkında bilgi oldukça kısıtlıdır. Bu nedenle, bu çalışmada araştırılan elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe davranışının çevresel koşullar ile değişimi önemli bir husus teşkil etmektedir.

Kompozit malzemelerin darbe davranışını incelemek için Şekil 2.4’de gösterilen CEAST Fractovis Plus düşük hızlı darbe test cihazı kullanılmıştır. Darbe test cihazı tarafından kullanılan Visual IMPACT yazılımı, kuvvet sensörü tarafından verilen ve 16000 veri toplama kapasitesine sahip veri toplama sistemi yardımı ile kuvvet geçmişinden zamana bağlı hız, çökme ve absorbe edilen enerji değerlerini hesaplama yeteneğine sahiptir. Darbe testlerinde, 12,7 mm çaptaki yarı küresel darbe ucu ve bu darbe ucunun takıldığı 22,4 kN yük kapasitesine sahip piezoelektrik yük hücresi kullanılmıştır. Numuneler, 76,2 mm delik çapına sahip pnömomatik bir aparat ile sabitlenmiştir. Darbe testleri çeşitli darbe enerjileri için yapılmıştır. Her bir koşul ve darbe enerjisi için en az üç numune test edilmiştir.



Şekil 2.4 CEAST Fractovis Plus düşük hızlı darbe test cihazı (Kişisel arşiv, 2018)

Düşük hızlı darbe testleri sonucunda Şekil 2.5'te gösterildiği gibi üç farklı temas kuvveti-çökme eğrisi elde edilmiştir. Şekil 2.5 a'daki eğri tipi geri sekme durumunu göstermektedir. Temas kuvveti, temasın başlaması ile artmaya başlar ve maksimum bir kuvvet değerine ulaşır. Darbe enerjisi yeteri kadar büyük olmadığı için kompozit malzeme delinmeyecek ve çarpma aygıtı geri sekerek ilk durumuna geri gelecektir. Ancak, kompozit malzemenin yüzeyinde matris kırıkları ve ezilmeden dolayı girinti oluşacağından çarpma aygıtı çökme değeri sıfıra ulaşmadan numuneyi terk edecektir. Buradaki eğrinin içinde kalan alan absorbe edilen enerji değerini verir. Darbe enerjisi absorbe edilen enerjiden büyük olacaktır. İkinci eğri (Şekil 2.5b) penetrasyon durumunu gösterir. Kompozit plaka çarpma enerjisinin tümünü emer ve darbe aygıtı numuneden geri sekmez ancak tam anlamı ile bir delinmede meydana gelmez. Sonuncu eğri (Şekil 2.5c) delinme durumunu gösterir. Darbe aygıtı numuneyi delip geçtikten sonra, test numunesi ile arasında oluşan sürtünmeden dolayı temas kuvveti bir süre yatay eksene paralel olarak devam eder. Temas kuvveti-çökme eğrisi ile yatay eksenler arasındaki alan absorbe edilen enerjiyi verir ve bu delinme eşiği olarak adlandırılır (İçten ve Karakuzu, 2008).



Şekil 2.5 Üç farklı hasar türü için temas kuvveti-çökme eğrileri a) Geri sekme, b) Penetrasyon, c) Delinme

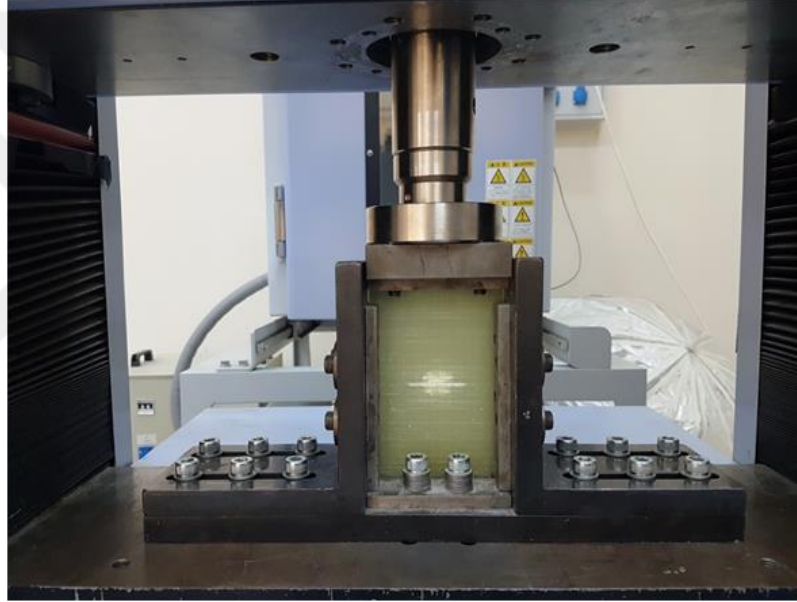
2.4 Darbe Sonrası Bası Testi

Polimer kompozit malzemelerde düşük hızlı darbe sonra meydana gelen hasarın, malzemenin mukavemeti üzerindeki etkisini belirlemek için Boeing CAI test aparatı kullanılarak malzemenin bası kuvvetindeki değişimi belirlemek etkili bir yöntemdir. Malzemelerde burkulmayı engellemek için Şekil 2.6'da görüldüğü gibi alttan, üstten

ve yanlardan sabitlenmiştir. Darbe sonrası bası testleri oda sıcaklığında ve Shimadzu AG-X test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihazın basma hızı 1 mm/dak seçilmiş ve bası mukavemeti (σ_c) Denklem 2.1 yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\sigma_c = \frac{F_m}{b \times t} \quad (2.1)$$

Burada, F_m maksimum kuvvet, b numunenin genişliği, t ise numunenin kalınlığıdır.



Şekil 2.6 Darbe sonrası bası test aparatı (Kişisel arşiv, 2018)

2.5 Tabakalar Arası Kayma Testi

Malzemelerin tabakalar arası kayma mukavemetinin değişimini belirlemek için ASTM D2344 standardı ile belirlenmiş kısa kiriş kayma testi yapılmıştır. Destek silindirlerinin çapı, basma silindirinin çapı ve destekler arası mesafe sırasıyla 3, 6 ve 8 mm'dir. Standartta belirtilen şekilde, 2,1 mm kalınlığa, 4 mm genişliğe ve 12 mm uzunluğa sahip numuneler hazırlanmıştır. Kısa kiriş kayma testi için Shimadzu AG-X test cihazı kullanılmış ve test hızı 1mm/dak olarak seçilmiştir. Her bir numune tipi

için test 5 kez tekrarlanmıştır. Tabakalar arası kayma mukavemeti değerleri Denklem 2.2 yardımı ile bulunmuştur.

$$\tau = 0,75 \frac{F_m}{b \times t} \quad (2.2)$$

Burada, F_m maksimum kuvvet, b numunenin genişliği, t ise numune kalınlığıdır.

2.6 X-Işını Fotoelektron Spektrometresi (XPS)

Kompozit malzemelerin yüzey kimyasal elementlerini yaşlanma sürecinden önce ve sonra analiz etmek için 400 nm çapında bir ışın boyutu olan monokromatik Al-K α ışın kaynağına sahip Thermo Scientific X-Işını Fotoelektron Spektrometre (XPS) cihazı kullanılmıştır. Veriler, -10 eV'den 1350 eV'ye kadar 150 eV geçiş enerjisi ve 1 eV çözünürlükle elde edilmiştir. Daha sonra yazılım kullanılarak bağlanma enerjileri ve atom konsantrasyon oranları elde edilmiştir.

2.7 Üç Nokta Eğilme Testi

Üç nokta eğilme testleri, basma hızı 1 mm/dak olacak şekilde Shimadzu AG-X cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Eğilme deneyi test numunesinin boyutları, uzunluğu 80 mm, genişliği 12,7 mm ve destek aralığı 64 mm olacak şekilde standarda göre belirlenmiştir. Her test beş kez tekrar edilmiştir. Kompozit malzemelerin eğilme mukavemeti Denklem 2.3 yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{bt^2} \quad (2.3)$$

Burada; L , b , t ve P sırasıyla sırası ile destek aralığı, numune genişliği, numune kalınlığı ve maksimum eğilme kuvvetidir.

2.8 Dinamik Mekanik Analiz (DMA)

Numunelerin DMA analizleri, TA Instrument Q800 dinamik mekanik analiz cihazı kullanılarak yapılmıştır. Testler, boyutları 35 mm x 12,7 mm x 2,1 mm olan numuneler ile çift ankastre kiriş modunda, 1 Hz frekansta gerçekleştirilmiştir. Test sıcaklığı, 4 °C/dak'lık bir artış hızında 30 ila 145 °C arasında yapılmıştır. Her bir koşul için en az üç test yapılmıştır. Depolama modülü, kayıp modül ve sönümleme faktörü ($Tan\delta$) değerlerinin sıcaklık ile değişim elde edilmiştir.



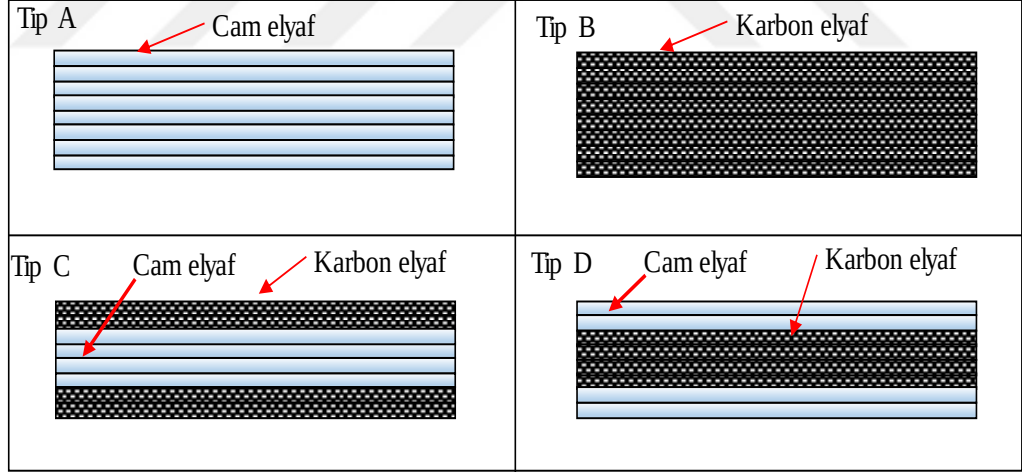
BÖLÜM ÜÇ

DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

3.1 Hidrotermal Yaşlanma Koşulunun Cam ve Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzeme Üzerindeki Etkisi

3.1.1 Giriş

Bu bölümde tek yönlü E-cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemenin hidrotermal yaşlanma koşulu altındaki mekanik ve XPS özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Kompozit malzemeleri üretmek için vakum destekli reçine infüzyon yöntemi kullanılmıştır. E-cam, karbon ve iki adet hibrit takviyeli kompozit malzeme üretilmiştir. Bütün malzemelerin istif dizilimi $[0]_8$ olacak şekilde üretim yapılmıştır. Üretilen kompozitlerin istifleme sırası Şekil 3.1’de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.1 Dört farklı kompozit malzemenin istifleme diziliminin şematik görünümü

Tip A ve B malzemeleri sırasıyla sadece cam ve karbon elyaf kullanılarak üretilirken, Tip C ve D malzemeleri ise hibrit olarak üretilmiştir. Tip A, B, C ve D malzemelerinin kalınlıkları sırası ile 2,10; 2,30; 2,25 ve 2,25 mm olarak ölçülmüştür. Her bir kompozit malzeme için sekiz tabaka takviye kumaşı kullanılmıştır. Reçine infüzyonu yapıldıktan sonra malzemeler iki saat boyunca 100 °C sıcaklık altında

kürlenmiştir ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra, üretilen kompozit malzemelerden standartlara uygun şekilde test numuneleri hazırlanmıştır.

Yaşlandırma süreci için -70 °C ile 180 °C arasında koşullandırmaya olanak sağlayan ve 100 °C'nin altındaki pozitif sıcaklıklarda nem kontrolüne izin veren ATT Discovery DY110C iklimik test kabini kullanılmıştır. Yaşlandırma koşulu için 90 °C sıcaklık ve %90 nem oranı seçilmiştir. Yaşlandırma süresi 840 saate kadar yapılmış ve her 168 saatte kabinden her test için en az 5 numune çıkarılarak testler yapılmıştır. Yaşlandırma sıcaklığının yüksek seçilmesi, elyaf takviyeli polimerlerin özellikle laboratuvar ortamındaki yaşlanmasını hızlandırmak için literatürde sıkça kullanılmaktadır.

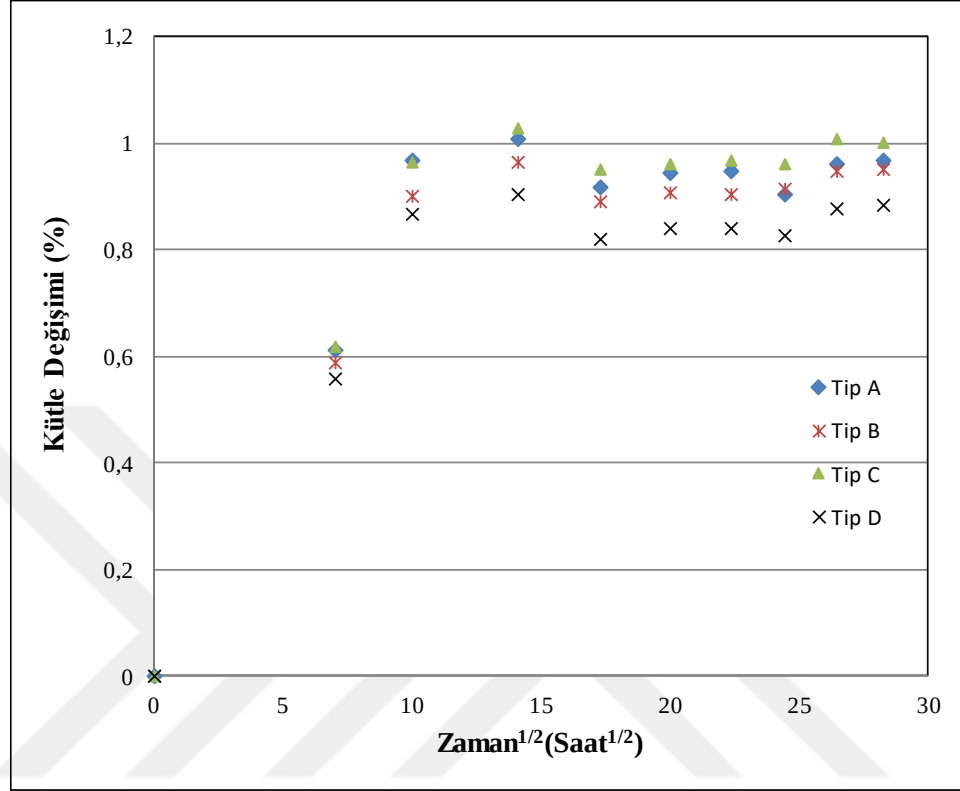
3.1.2 Kütle Değişimi

Yaşlandırma işlemi öncesi her bir tip malzeme için 5 adet 40 mm x 40 mm boyutlara sahip numunelerin ağırlıkları (w_0) ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Numuneler, çeşitli yaşlanma sürelerinden sonra iklimlendirme kabininden çıkarılıp elektronik bir terazi ile ağırlıkları ölçülmüştür. Malzemenin kütlelerindeki değişim (M_t) Denklem 3.1 yardımı ile hesaplanmıştır. Burada, w_t ve w_0 sırası ile t zamanındaki ve başlangıçtaki numune ağırlıklarıdır.

$$M_t = \frac{w_t - w_0}{w_0} \times 100 \quad (3.1)$$

Kompozit malzemelerin kütlelerindeki yüzde değişim zamana bağlı olarak Şekil 3.2'de verilmiştir. Şekilde görüleceği üzere, ilk 100 saatte, su emiliminde doğrusal ve hızlı bir artış olmuştur. Daha sonra su emilim oranı azalarak bir süre sonra doyma noktasına ulaşılmıştır. A, B, C ve D numunelerinin doymuş nem içeriği sırasıyla % 0.97, % 0.95, % 1.01 ve % 0.88'dir. En yüksek su emilimi Tip C'de, en düşük ise Tip D gözlenmiştir. Cam ve karbon elyaf ihmal edilebilir miktarda su emilimine sahiptir, su emilimi esasen matris ve elyaf arasındaki mikro boşluklara su difüzyonundan kaynaklanmaktadır (Li, Li, Huang, Wang ve Huang, 2016). Yu ve Yang (2017),

özellikle ara yüzeydeki yüksek matris içeriği ve mikro boşlukların, polimer temelli kompozitlerin su emilimini belirlemede önemli bir faktör olduğunu belirtmiştir.

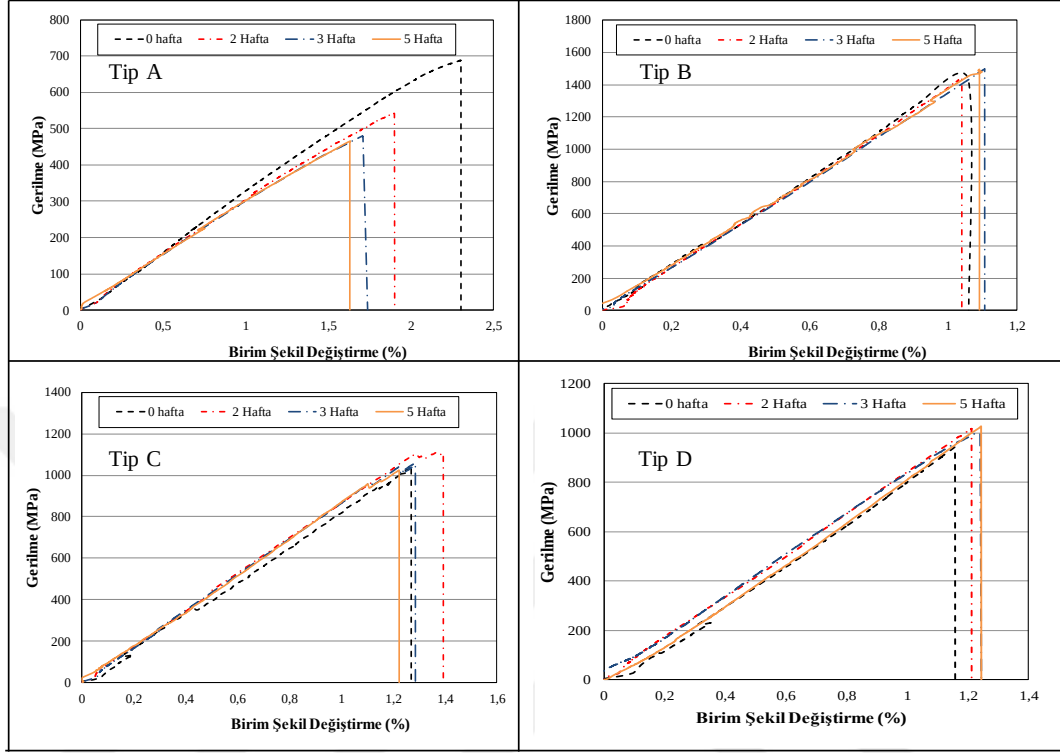


Şekil 3.2 Kompozit malzemelerin zamana bağlı kütle değişimi (Doğan ve Arman, 2018)

3.1.3 Çekme Testi Sonuçları

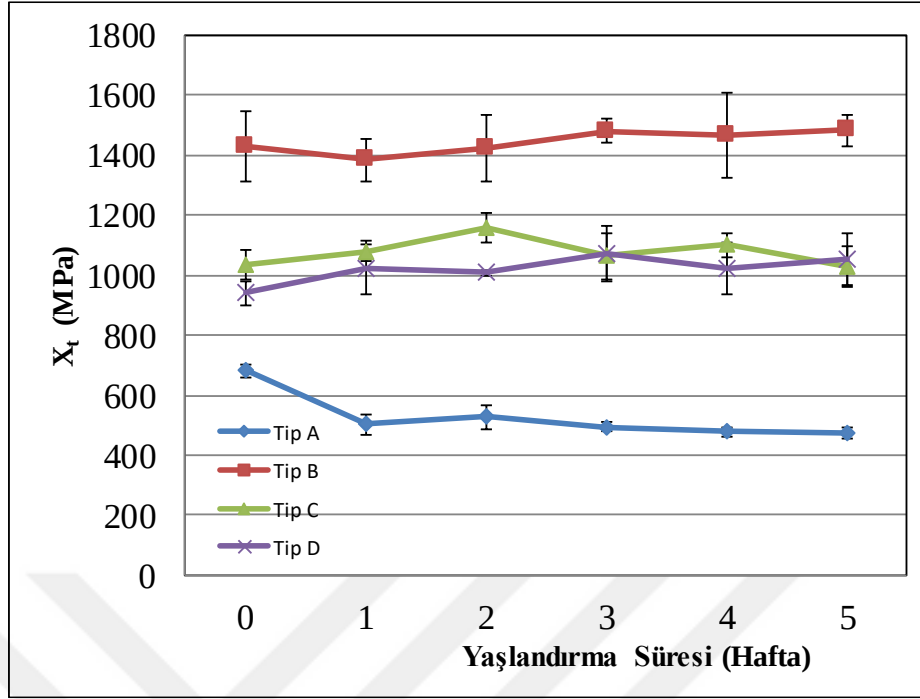
Farklı tip kompozit malzemelerin çekme testi sonucu elde edilen elyaf doğrultusundaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.3’de verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi, eğriler maksimum değere kadar doğrusal bir şekilde uzamaktadır, çünkü takviye malzemesi, yani cam elyaf ve karbon elyaf gevrek malzemelerdir ve elyaf yönündeki mekanik özelliklerde baskındırlar. Sadece, cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerde yaşlanma zamanının artmasıyla kopma uzamasında ve kopma mukavemetinde azalma meydana gelmiştir. Tip A kompozitte, kopma birim şekil değiştirmesi 5 haftalık yaşlanma süresi sonunda yaşlandırılmamış numuneye göre % 30 oranında azalmıştır. Ancak, karbon ve hibrit takviyeli epoksi kompozitlerde çekme mukavemetinde ve kopma birim şekil değiştirmesinde önemli bir değişim gözlenmemiştir. Eğrilerin eğimi, malzemelerin elastisite modülünü

vermektedir. Eğrilerin eğimine bakıldığında, kopma uzaması ve gerilme ile aynı davranış gözlenmiştir.



Şekil 3.3 Dört farklı tip kompozit malzemenin elyaf doğrultusundaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri (Doğan ve Arman, 2018)

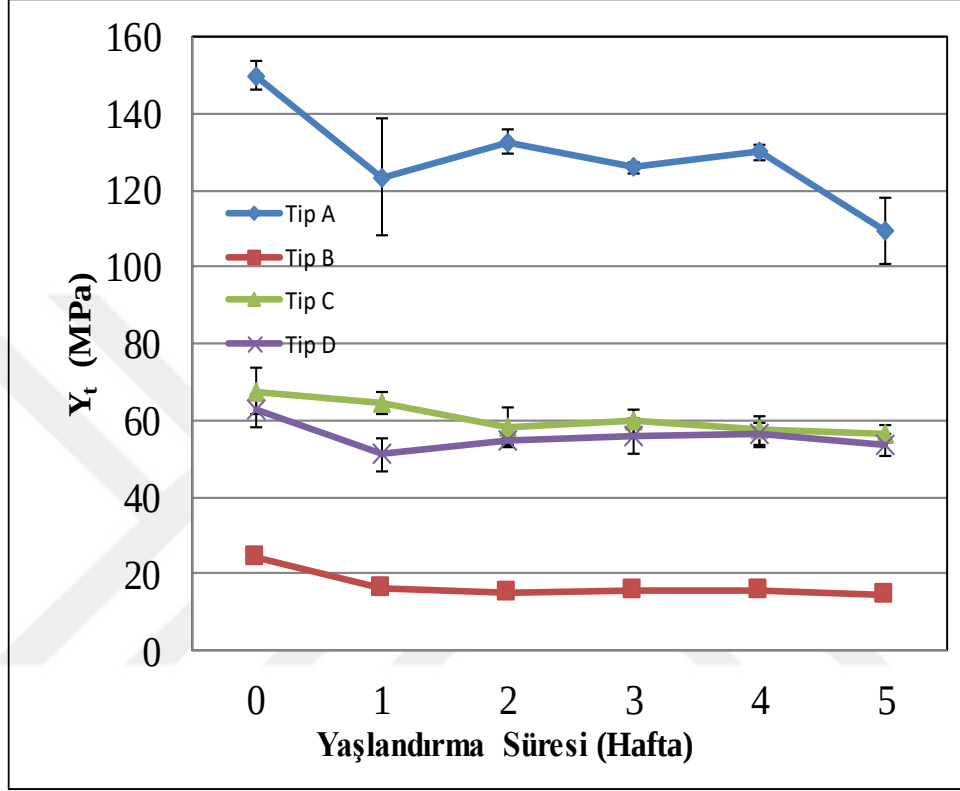
Elyaf doğrultusundaki çekme mukavemetinin (X_t) ve standart sapmaların yaşlandırma süresi ile değişimi Şekil 3.4'te verilmiştir. En büyük çekme mukavemeti 1428 MPa ile karbon elyaf takviyeli malzeme sahipken, en düşük çekme mukavemetine 688 MPa ile cam elyaf takviyeli malzeme sahiptir. Tip C ve Tip D hibrit elyaf takviyeli malzemenin çekme mukavemetleri ise sırası ile 1037 ve 940 MPa'dır. Cam elyaf takviyeli malzemelerin (Tip A) çekme mukavemetinde ilk hafta sonunda büyük bir düşüş meydana gelmiştir. Daha sonraki haftalarda ise çekme mukavemeti düşmesine rağmen bu düşüşün büyüklüğü azalmıştır. Cam elyaf takviyeli malzemenin çekme mukavemetindeki düşüş ilk hafta sonunda yaklaşık olarak %26 iken beş hafta sonunda %30 oranında olmuştur. Karbon elyaf ve hibrit elyaf takviyeli malzemelerde ise önemli değişim gözlenmemiştir.



Şekil 3.4 Elyaf doğrultusundaki çekme mukavemetinin yaşlandırma süresi ile değişimi (Doğan ve Arman, 2018)

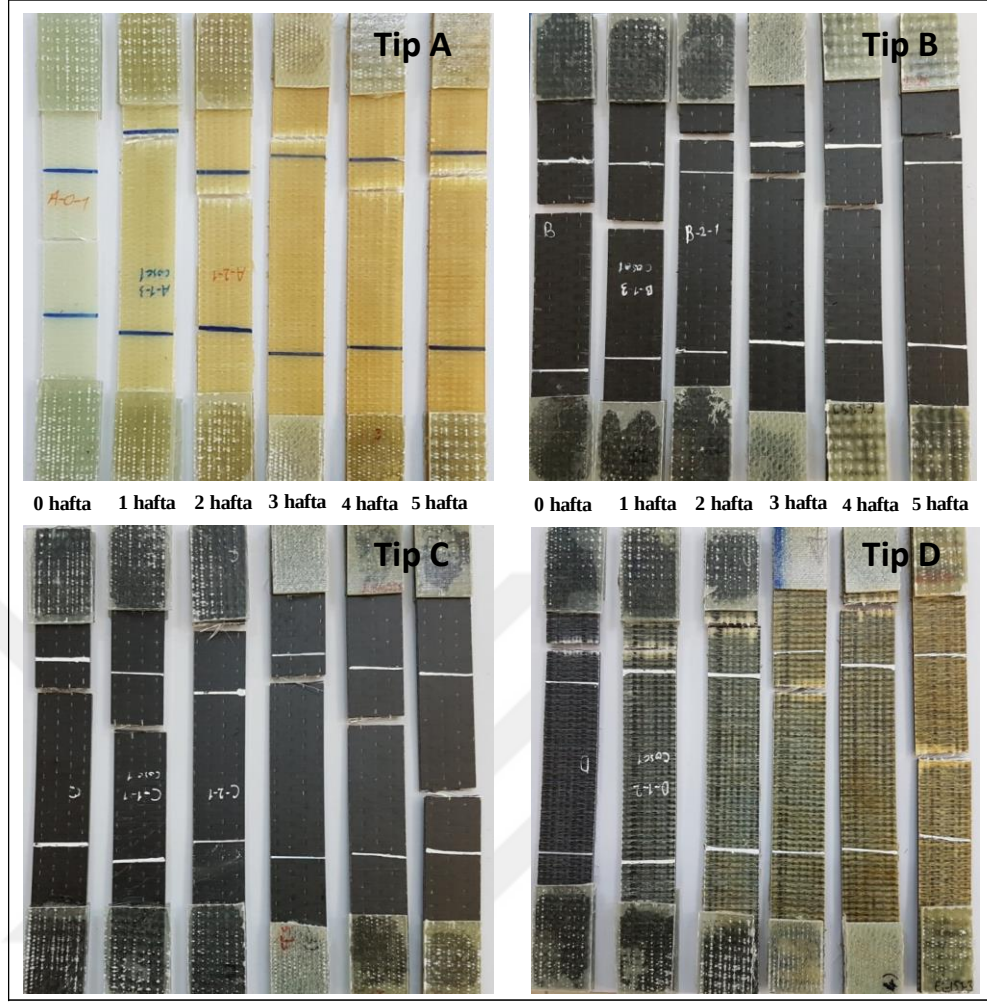
Elyafa dik doğrultudaki çekme mukavemetlerinin (Y_t) yaşlandırma süresi ile değişimi Şekil 3.5'te verilmiştir. Elyaf yönündeki çekme mukavemetinin aksine burada en büyük çekme mukavemetine 150 MPa ile cam elyaf takviyeli malzeme sahipken, en düşüğüne 24 MPa ile karbon elyaf takviyeli malzeme sahiptir. Tip C ve Tip D hibrit elyaf takviyeli malzemelerin çekme mukavemetleri ise sırası ile 67 ve 62 MPa'dır. Şekilde de görüleceği üzere bütün malzemelerin elyaf yönüne dik doğrultudaki çekme mukavemetleri yaşlandırma süresi ile düşmektedir. Bu yöndeki mekanik özellikler üzerinde matris malzemesi daha baskındır ve polimer matrisli kompozitlerde, çevresel koşullardan en çok etkilenen fazlardan biridir (Khan, Mahmood, Syed, Khan ve Day, 2013). Beş hafta sonunda çekme mukavemetindeki en büyük düşüş yaklaşık %40 ile karbon elyaf takviyeli numunede gerçekleşmiştir. Tip A, C ve D malzemelerindeki düşüş ise sırası ile %27, %17, %14 olarak gerçekleşmiştir. Çekme mukavemeti ilk hafta sonunda hızlı bir şekilde düşerken daha sonraki haftalarda bu düşüş azalmıştır. Reçine tarafından emilen su moleküllerinin hidrolizi ile birlikte reçinede meydana gelen çatlaklar, zincir kesilmesi ve segmentasyon olayları neticesinde malzeme mukavemeti düşmektedir (Wang ve

diğer., 2016) . Şekil 3.2'ye bakıldığında ilk bir haftalık su emiliminin fazla olması malzeme mukavemetinde daha keskin düşüşlerin görülmesine sebep olmaktadır. Daha sonraki haftalarda su emiliminin azalması ile birlikte düşüş eğiliminde azalma görülmektedir.



Şekil 3.5 Elyafa dik doğrultudaki çekme mukavemetinin yaşlandırma süresi ile değişimi (Doğan ve Arman, 2018)

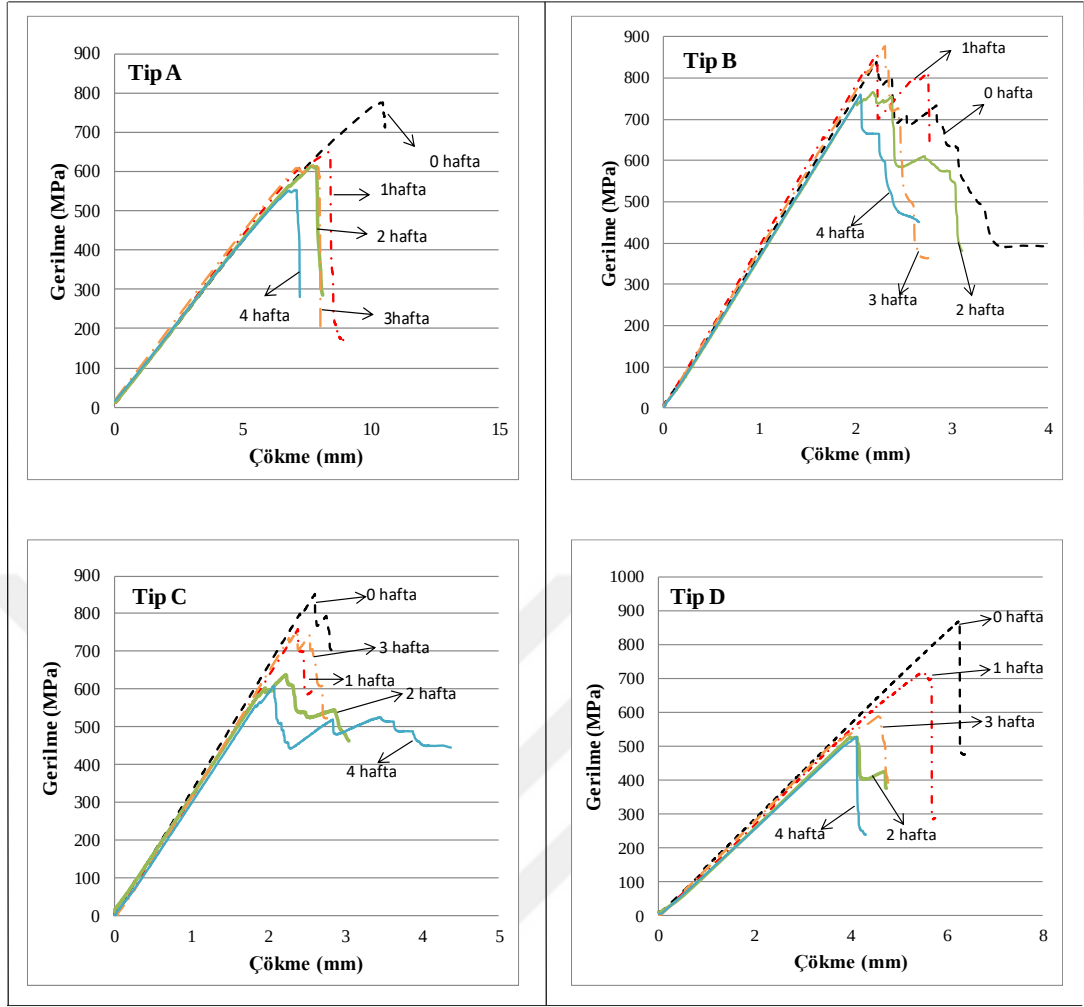
Farklı yaşlandırma süreleri sonunda elyafa dik doğrultuda çekme testi yapılmış dört farklı malzemeye ait numunelerin resimleri Şekil 3.6' da görülmektedir. Tip A numunelerine bakıldığında yaşlandırma süresi ile birlikte numunelerin renkleri açık yeşilden kahverengine dönmüştür. Tip D'de ise siyah olan numuneler yaşlandırma süresinin artması ile birlikte kahverengine dönüşmüştür. Ancak, Tip B ve C malzemelerinde ise herhangi bir renk değişimi gözlenmemiştir. Cam elyaf takviyeli malzemelerdeki bu optik değişim, hidrotermal yaşlandırma koşulun cam elyaf üzerindeki etkisini göstermektedir. Ayrıca, bütün malzemelerde kopma hasarı çekme yönüne dik doğrultuda gerçekleşmiştir.



Şekil 3.6 Farklı yaşlandırma süreleri sonunda elyafa dik doğrultuda çekme testi yapılmış dört farklı malzeme tipi numuneleri (Kişisel arşiv, 2017)

3.1.4 Üç Nokta Eğilme Testi Sonuçları

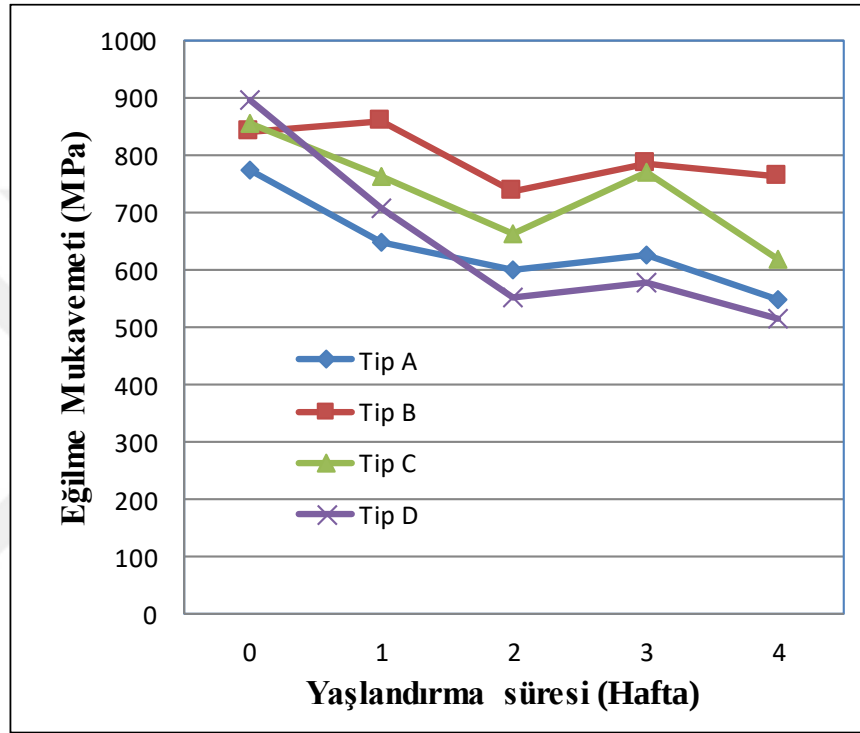
Dört farklı kompozit malzemenin gerilme-çökme eğrileri farklı yaşlandırma süreleri için Şekil 3.7’de verilmiştir. Gerilme değerlerinin maksimum değeri eğilme mukavemeti olarak adlandırılmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi tüm malzemelerin eğilme mukavemetleri yaşlandırmaya maruz kalmaları ile birlikte düşmüştür. Çökme değerlerine bakıldığında en büyük çökme değeri cam elyaf takviyeli malzemede gerçekleşirken en küçük çökme değeri karbon elyaf takviyeli ve Tip C hibrid malzemede meydana gelmiştir. Yaşlandırılmamış malzemeler için, Tip A, Tip B, Tip C ve Tip D malzemelerin maksimum gerilme değerindeki çökme değerleri sırası ile 10,5 mm, 2,2 mm, 2,6 ve 6,2 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.7 Farklı yaşlandırma süreleri için eğilme gerilmesi- çökme eğrileri (Doğan ve Arman, 2018)

Dört farklı kompozit malzemenin eğilme mukavemetlerinin yaşlandırma süresi ile değişimi Şekil 3.8’de verilmiştir. Yaşlandırılmamış numunelerde en yüksek eğilme mukavemetine 898 MPa ile Tip D malzemesi, en küçük eğilme mukavemetine ise 775 MPa ile Tip A sahiptir. Tip B ve Tip C malzemelerin eğilme mukavemetleri ise sırası ile 841 ve 856 MPa’dır. Eğilme deneyi sırasında maksimum gerilme ve uzama malzemenin en dışında meydana gelirken, simetri ekseninde bu değerler sıfırdır. Karbon elyaf cam elyafa göre daha gevrek bir malzemedir. Bu nedenle en dış tabakada karbon elyaf olan Tip B ve Tip C kompozit malzemelerde çökme değeri düşüktür. Tip D malzemeye bakıldığında en dışta cam elyaf vardır ve daha fazla uzayacaktır, iç kısımda bulunan karbon elyaf daha az uzayacaktır. Böylece, uzama kabiliyeti yüksek olan elyaf daha fazla, uzama kabiliyeti düşük olan elyaf ise daha az uzayacaktır ve yük daha dengeli bir şekilde taşındığından en yüksek eğilme

mukavemeti Tip D malzemede sağlanmıştır. Ancak, beş haftalık yaşlandırma süreci sonunda eğilme mukavemetindeki en büyük düşüş Tip D malzemede meydana gelmiştir. Cam elyaf nemden etkilenirken, karbon elyaf neme karşı dirençlidir. Tip D malzemede en dış tabakada bulunan cam elyafın nemden etkilenmesi Tip C'ye göre daha fazla olacaktır. Beş hafta sonunda Tip A, B, C ve D malzemelerin eğilme mukavemetlerindeki düşüş sırası ile %29, %9, 27 ve %42 olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.8 Eğilme mukavemetinin yaşlandırma süresi ile değişimi (Doğan ve Arman, 2018)

3.1.5 X-Işını Fotoelektron Spektrometresi (XPS) analiz sonuçları

Kompozit malzemelerin hidrotermal yaşlanma ile yüzeylerindeki atomların değişimini incelemek için XPS analizi yapılmıştır. Cam ve karbon takviyeli numuneler için yüzeydeki elementlerin atomik yoğunlukları Tablo 3.1'de verilmiştir. XPS analizleri yaşlandırılmamış, 2 ve 4 hafta yaşlandırılmış malzemeler için yapılmıştır. Hem cam hem de karbon takviyeli epoksi kompozitlerin yüzeyindeki oksijen içeriği yaşlandırma işlemi sonunda artmıştır. Yaşlandırılmamış Tip B malzemede oksijen içeriği %12,01 iken iki hafta sonunda %13,03'e ve dört hafta sonunda %15,36'ya yükselmiştir. Tip A malzemede ise %13,58 olan oksijen içeriği,

iki hafta sonunda %18,06 ve dört hafta sonunda ise %18,59 olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte, malzeme yüzeyindeki karbon içeriği oranı düşmüştür. Tip B malzeme için yaşlandırılmamış numunedeki karbon içeriği %83,40 iken, iki hafta sonunda 81,07'ye ve dört hafta sonunda %78,69'a düşmüştür. Tip A malzemedeki karbon içeriği ise yaşlandırılmamış, iki ve dört hafta yaşlandırılmış numunelerde sırası ile %79,30 , %73,58 ve %72,70 olarak ölçülmüştür.

Tablo 3.1 Farklı yaşlandırma süreleri sonrası Tip B ve Tip A malzemenin XPS sonuçları (Doğan ve Arman, 2018)

	Tip B malzeme			Tip A malzeme		
	Yaşlandırma süresi (Hafta)			Yaşlandırma süresi (Hafta)		
	0	2	4	0	2	4
C (%)	83,40	81,07	78,69	79,30	73,58	72,70
O (%)	12,01	13,03	15,36	13,58	18,06	18,59
N (%)	1,90	2,64	3,13	2,61	2,98	3,52
Si (%)	2,27	1,53	1,88	2,21	2,45	2,57
Ca (%)	1,34	1,01	0,68	0,50	1,21	1,44
O/C (%)	0,144	0,160	0,195	0,171	0,245	0,255

Bu değişimin nedeni, karbon işlevsel grupların bir bölümünün oksijen ile oksitlenmesi veya karbonil türlerinin oksidasyonu ile oluşan karbondioksit sonucunda oksijen içeriğinde artma ve karbon içeriğinde azalma meydana gelmesindedir (Fan ve diğer., 2016). Ayrıca, oksijen-karbon oranının artması, epoksi reçinesinin su molekülü ile etkileşimi sonucunda meydana gelen hidroliz ile oksijen kazandığını gösterebilir (Xiao, Delamar ve Shanahan, 1997). Bununla birlikte, Si varlığı elyaf yüzeyindeki bağlayıcı ajanlardan, Ca varlığı ise cam elyafın bileşenleri arasında olan CaO'den dolayı elde edilmiş olabilir.

3.2 Farklı Sıcaklık Değerine Sahip Hidrotermal Yaşlanma Koşullarının Ve Uv Işının Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzeme Üzerindeki Etkisi

3.2.1 Giriş

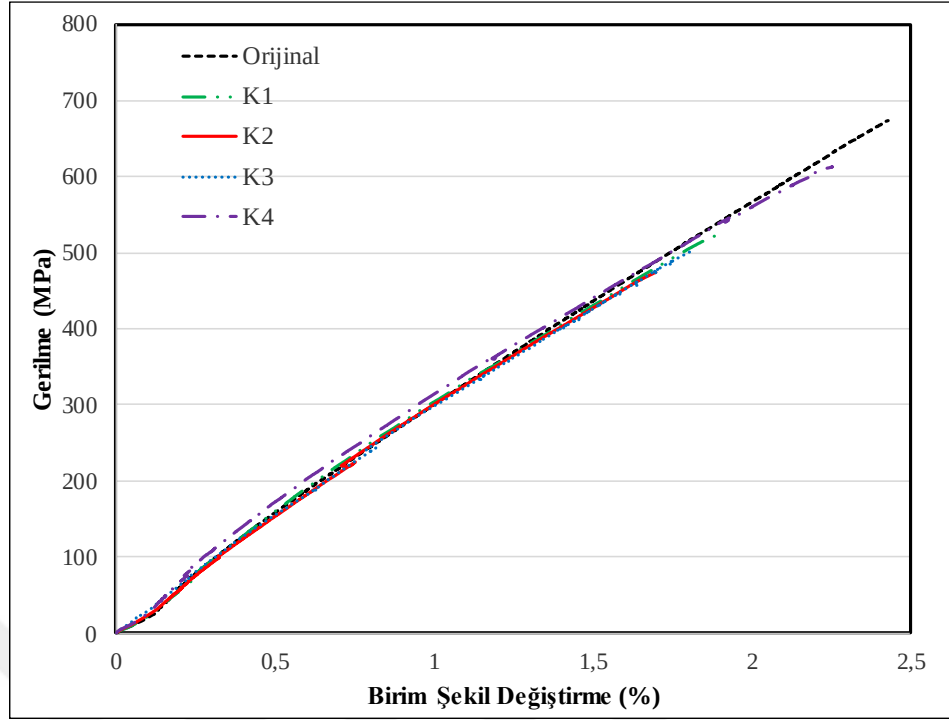
Her ne kadar literatürde polimer kompozit malzemelerin yaşlanması ile ilgili birçok çalışma olsa da yaşlanma mekanizmasını anlamak oldukça güçtür (Vieille, Aucher ve Taleb, 2012; Fiore, Scalici, Sarasini, Tirilló ve Calabrese, 2017; Akderya, Çevik ve Sayman, 2018). Ortam sıcaklığının, nem miktarının, malzemenin ultraviyole ışına maruz kalıp kalmaması, maruz kalınan sıvıdaki tuz gibi mineral miktarları ve bu koşullar altında bir yükleme durumuna maruz kalması gibi durumlar servis ömrü boyunca polimer kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin tahmin edilmesini zorlaştıracaktır. Bu bölümde, farklı sıcaklıklardaki hidrotermal ortamın ve UV ışının E-cam / epoksi kompozitlerin mekanik ve düşük hızlı darbe davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kompozit malzemeler tek yönlü E-cam elyaf ve epoksi reçine kullanılarak üretilmiştir. Çekme ve tabaklar arası kayma testi için kompozit malzeme, 8 kat kumaştan $[0]_8$ oryantasyonu ile üretilmiştir. Düşük hızlı darbe ve darbe sonrası bası testleri için üretilen kompozit malzeme ise $[0/90]_{4S}$ oryantasyonuna sahiptir. Reçine emdirildikten sonra vakum altındaki malzemeler iki saat boyunca $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık altında kürlendirildikten sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Sekiz ve on altı kat tabakaya sahip malzemelerin kalınlıkları sırası ile $2,1\pm0,5\text{ mm}$ ve $4,15\pm0,6\text{ mm}$ olarak ölçülmüştür. Çekme testi için ASTM D3039 standardına, tabakalar arası kayma testi için ise ASTM D2344 standardına uygun olarak sekiz kat tabakaya sahip kompozit plakadan test numuneleri hazırlanmıştır. Düşük hızlı darbe testleri ve darbe sonrası bası testleri için ise on altı kat tabaka sayısına sahip kompozit malzemedan genişliği 100 mm ve uzunluğu 150mm boyutlarında olan test numuneleri hazırlanmıştır. UV ışınının, sıcaklığın ve su emiliminin kompozit malzeme üzerindeki etkisini incelemek için test numuneleri, -70 ve $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında test yapılmasına izin veren ATT Discovery DY110C iklimlendirme kabiniinde dört farklı yaşlandırma koşuluna tabi tutulmuştur. Dört farklı yaşlandırma koşulu aşağıdaki şekildedir;

- **Koşul bir (K1):** İki adımdan oluşan bir çevrimden meydana gelmektedir. İlk adımda malzemeler, 40 °C' sıcaklık ve %70 nem oranı ile birlikte 4 saat boyunca 295-400nm bandında UV ışınına maruz kalmaktadır. İkinci adımda ise numuneler 8 saat süresince 70 °C sıcaklığa ve %70 nem oranına sahip bir ortama maruz bırakılmıştır. Bu çevrim 125 kez tekrarlanarak, 1500 saat sürmektedir.
- **Koşul iki-(K2):** Kompozit malzemeler 90°C sıcaklığa ve %70 nem oranına sahip ortama toplam 1000 saat maruz bırakılmıştır.
- **Koşul iki-(K3):** Kompozit malzemeler 80°C sıcaklığa ve %70 nem oranına sahip ortama toplam 1000 saat maruz bırakılmıştır.
- **Koşul iki-(K4):** Kompozit malzemeler 70°C sıcaklığa ve %70 nem oranına sahip ortama toplam 1000 saat maruz bırakılmıştır.

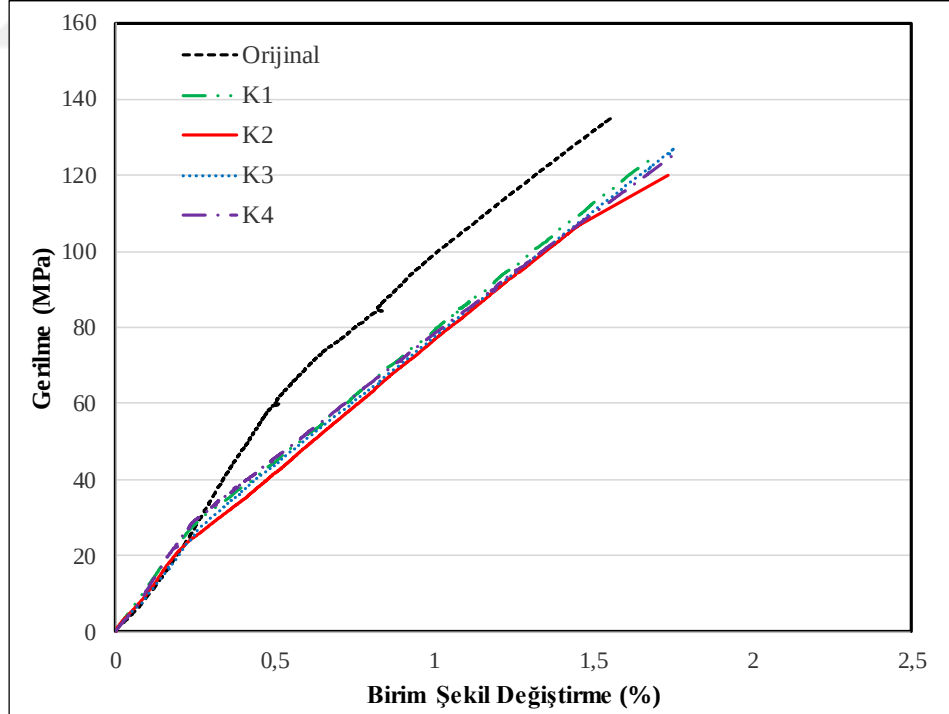
Her bir yaşlandırma koşulu için kompozit malzemelerin çekme mukavemeti, çekme modülü, tabakalar arası kayma mukavemeti, farklı darbe enerjileri için absorbe edilen enerji, delinme eşiği ve darbe sonra bası mukavemeti değerlerindeki değişimler incelenmiştir.

3.2.2 Çekme Testi Sonuçları

Farklı yaşlandırma koşullarına maruz bırakılmış E-cam takviyeli epoksi kompozit malzemelerin elyaf ve elyafa dik doğrultudaki çekme gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri sırası ile Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da verilmiştir. Burada gösterilen eğriler her bir koşul için yapılan beş ayrı test sonucunda elde edilen ortalama değerlere en yakın olan eğridir. Fiber yönündeki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri kopmaya kadar lineer bir şekilde hareket ederken, elyafa dik yönde ise bilineer bir davranış sergilemiştir. Tek yönlü kumaşlarda elyafları bir arada tutmak için fibere dik yönde ince iplikler mevcuttur. Elyafa dik doğrultudaki çekme testinde eğrilerin ilk kısmında bu ipliklerde bir miktar yük taşıyacaklardır. Ancak belirli bir yük değerinden sonra, yükü sadece matris malzemesi taşıyacağı için bilineer bir davranış gözlenmiştir. Ayrıca, bu eğrilerin eğimi malzemenin elastisite modülünü vermektedir.



Şekil 3.9 Farklı yaşlandırma koşullarına maruz kalmış E-cam takviyeli epoksi kompozitlerin elyaf doğrultusundaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri (Dogan ve Arman, 2019)



Şekil 3.10 Farklı yaşlandırma koşullarına maruz kalmış E-cam takviyeli epoksi kompozitlerin elyafa dik doğrultudaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri (Dogan ve Arman, 2019)

Çekme mukavemeti, elastisite modülü ve birim şekil değiştirmelerin ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Dört farklı yaşlandırma koşulu sonunda elyaf doğrultusundaki çekme mukavemetindeki düşüş $K4 < K1 < K3 < K2$ şeklindedir. Elyaf doğrultusundaki çekme mukavemetindeki düşüşler K1, K2, K3 ve K4 koşulları için sırası ile %24, %30, %27 ve %10 olarak gerçekleşmiştir. Yaşlandırılmamış numunenin çekme mukavemeti 679 MPa iken K2 ortamına maruz kompozit malzemenin fiber yönündeki çekme mukavemeti 473 MPa olarak bulunmuştur. Aynı sıcaklık ve nem değerine sahip K1 ve K4 koşullarına göz önünde bulundurulduğunda ultraviyole ışının etkisi açıkça görülmektedir. K1 ve K4 koşullarına maruz bırakılmış malzemelerin elyaf yönündeki çekme mukavemetleri sırasıyla 612 ve 516 MPa bulunmuştur. Elyafa dik doğrultudaki çekme mukavemetlerinde en büyük düşüş elyaf yönündeki çekme mukavemetine benzer şekilde K2 koşuluna maruz malzemelerde meydana gelmiştir. K1, K2, K3 ve K4 koşullarına maruz malzemelerin elyafa dik doğrultudaki çekme mukavemetlerinde ki düşüş miktarları yaklaşık olarak %7, %10, %5 ve %4 olarak gerçekleşmiştir. Elyaf doğrultusundaki elastisite modülü için bütün koşullarda hafif bir azalma meydana gelmiştir. Bununla birlikte, elyafa dik doğrultuda nispeten daha yüksek düşüşler gözlenmiştir. Benzer sonuçlar literatürde yayınlanmıştır (Carra ve Carvelli, 2014). Elyaf doğrultusundaki birim şekil değiştirme, çekme mukavemeti ve elastisite modülüne benzer şekilde bütün yaşlandırma koşulları için düşmüştür. Ancak, elyafa dik doğrultuda artış meydana gelmiştir. Kopma anındaki yüzde birim şekil değiştirme, elyaf yönünde azalırken, elyafa dik yönde artmıştır. Çekme mukavemetinin bozulması, su moleküllerinin reçine yapısına nüfuz etmesiyle reçinenin şişmesi, hidrolizi, çatlaması, plastikleşmesi ve bozulması ile ilişkilendirilebilir (Wang ve diğer., 2016). Matris malzemesinin plastikleşmesi sonucunda elyafa dik doğrultudaki özellikler üzerinde baskın malzemenin matris olmasından dolayı yüzde birim şekil değiştirmenin artmasına neden olmuş olabilir.

Tablo 3.2 Farklı yaşlandırma koşullarına maruz kompozit malzemenin çekme mukavemeti, elastisite modülü ve birim şekil değiştirme değerleri

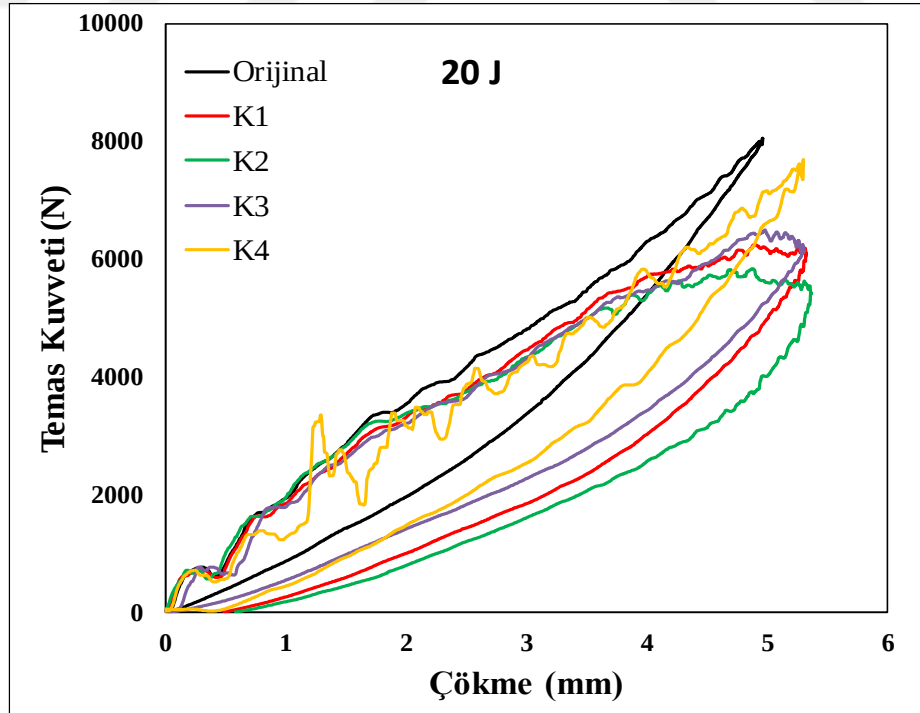
	Çekme Mukavemeti (MPa)		Elastisite Modülü (GPa)		Birim Şekil Değiştirme (%)	
	Elyaf Yönü	Elyafa Dik Yön	Elyaf Yönü	Elyafa Dik Yön	Elyaf Yönü	Elyafa Dik Yön
Orijinal	679±12	133±9	28,06±0,10	12,70±1,01	2,456±0,166	1,656±0,183
K1	516±18	123±8	27,15±0,08	11,66±1,41	1,853±0,145	1,745±0,251
K2	473±9	119±12	27,46±0,06	10,05±1,17	1,706±0,034	1,693±0,147
K3	495±9	126±5	27,70±0,09	10,35±0,87	1,724±0,071	1,761±0,084
K4	612±8	127±6	27,93±0,11	11,50±0,57	2,315±0,055	1,713±0,257

3.2.3 Düşük Hızlı Darbe Testi Sonuçları

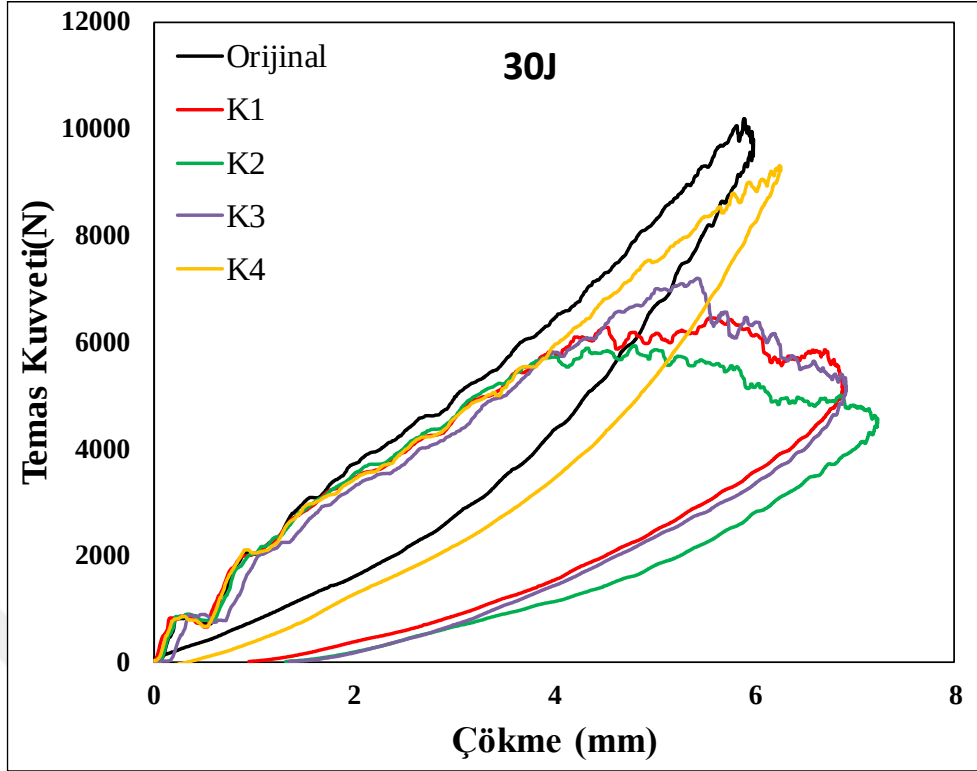
Farklı yaşlandırma koşulları ve farklı darbe enerjileri için temas kuvveti- çökme eğrileri Şekil 3.11 ile Şekil 3.16 arasında verilmiştir. Bütün darbe enerjileri için en yüksek temas kuvveti yaşlandırılmamış (orijinal) malzemelerde meydana gelirken, en düşük temas kuvveti K2 ortamına maruz kalmış malzemelerde meydana gelmiştir. Çökme değerlerine bakıldığında ise en büyük temas kuvvetinin tam tersi bir eğilim meydana gelmiştir. Şekil 3.11 ve 3.12’de, 20 ve 30 Joule darbe enerjileri için temas kuvveti- çökme eğrileri verilmiştir. Her iki darbe enerjisi için bütün eğriler kapalı formdadır. Bu da darbe ucunun malzemelere temas ettikten sonra geri sekme olayının meydana geldiğini göstermektedir. Şekil 3.13’te verilen 40 Joule darbe enerjisinde ise, yaşlandırılmamış, K1, K3 ve K4 ortamına maruz malzemelerde eğriler başlangıç noktasına dönerken, K2 ortamına maruz malzemede penetrasyon durumu meydana geldiği için eğri kapanmamıştır. Darbe enerjisi 50 Joule’e yükseltildiğinde, Şekil 3.14’de görüldüğü gibi yaşlandırılmamış ve K4 ortamına maruz malzemelerde geri sekme, K1 ve K3 ortamına maruz malzemelerde penetrasyon durumu, K2 ortamına maruz kalmış malzemede ise delinme durumu meydana gelmiştir. Şekil 3.15’de verilen 60 Joule darbe enerjisinde ise, K1, K2 ve

K3 ortamına maruz malzemeler delinmiş ancak yaşlandırılmamış ve K4 ortamına maruz malzemelerde ise darbe ucu hala malzemeyle temas ettikten sonra geri sekmiştir. 80 Joule darbe enerjisinde yaşlandırılmış bütün malzemeler delinirken, yaşlandırılmamış malzemede penetrasyon olayı meydana gelmiştir.

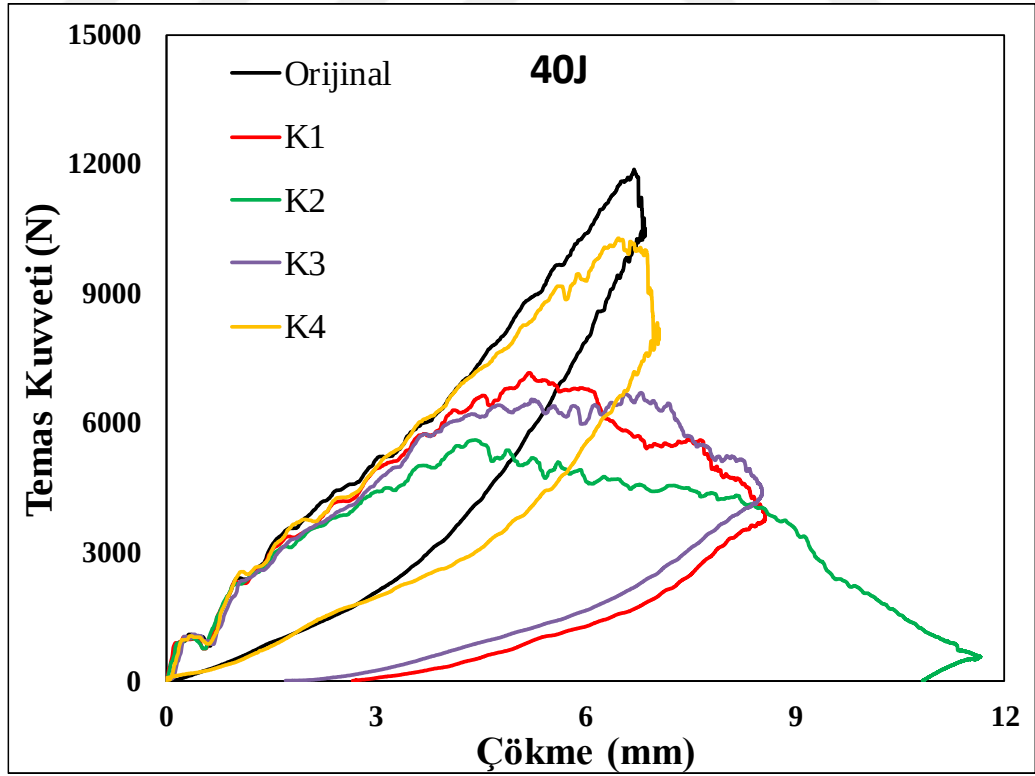
Şekil 3.11 ile 3.16 arasındaki şekillere bakıldığında, darbe enerjisi 20 Joule'dan 40 Joule'a kadar yükseltildiğinde maksimum temas kuvveti artmıştır. Bununla birlikte, maksimum temas kuvveti, 40 Joule darbe enerjisinden sonra nispeten sabit kalmıştır. Bu kuvvet, kompozit malzemelerin darbe dayanıklılığının kritik limitine karşılık gelen temas kuvvetini temsil eder. Darbe enerjinin artması ile birlikte temas kuvveti belli bir değerden sonra sabit kalırken çökme değeri artmaktadır. Maksimum temas kuvvetinden sonra malzemede en üst tabakadan başlayarak, delaminasyon, matris kırılması ve fiber kopması gibi hasarlar meydana geldiği için temas kuvveti düşmeye ve çökme değeri artmaya başlar. Bundan dolayı, darbe enerjisinin artırılması, temas kuvvetini arttırmayacaktır. Sadece malzemede oluşan hasarlar büyüyecektir.



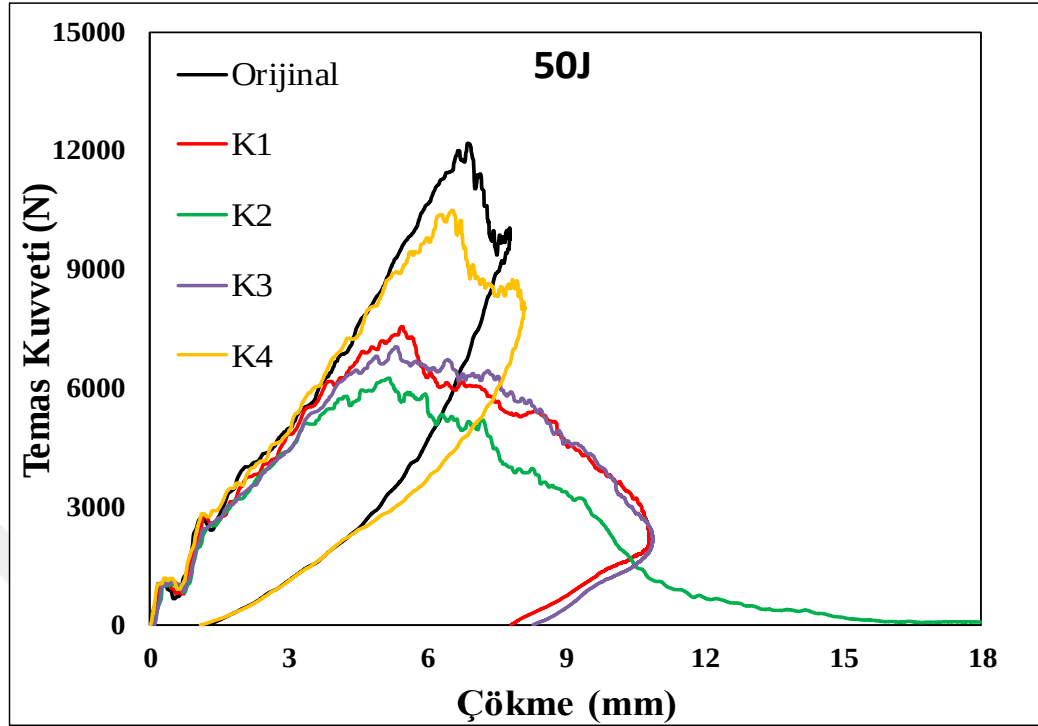
Şekil 3.11 20 Joule darbe enerjisi için elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri (Dogan ve Arman, 2019)



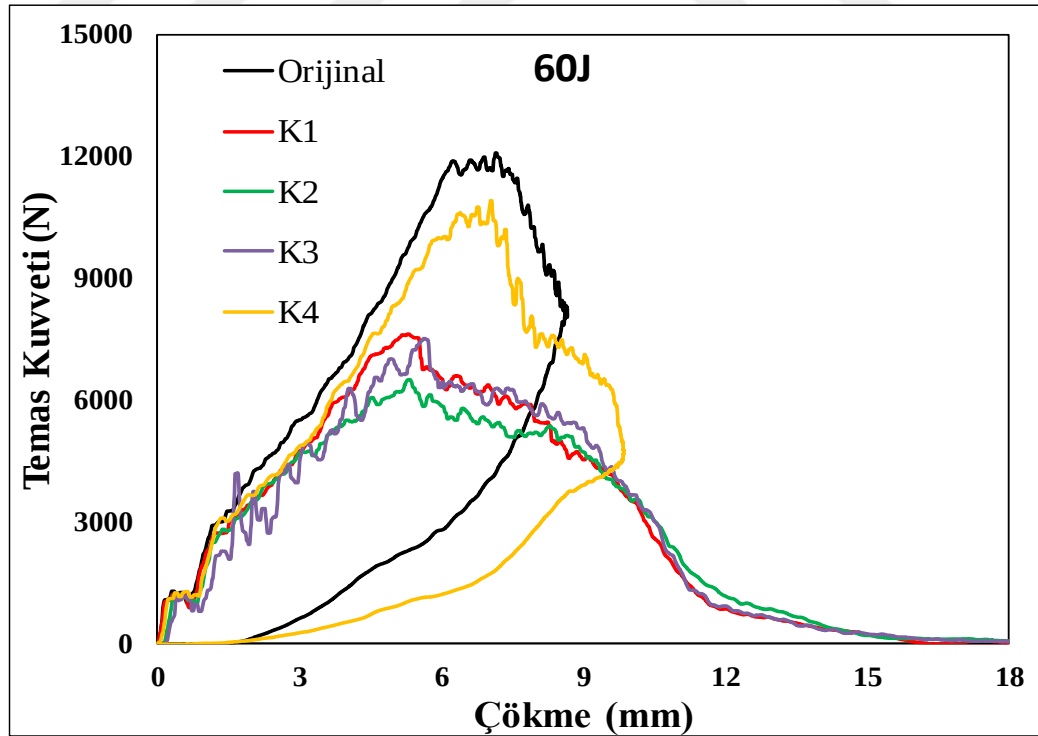
Şekil 3.12 30 Joule darbe enerjisi için elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri



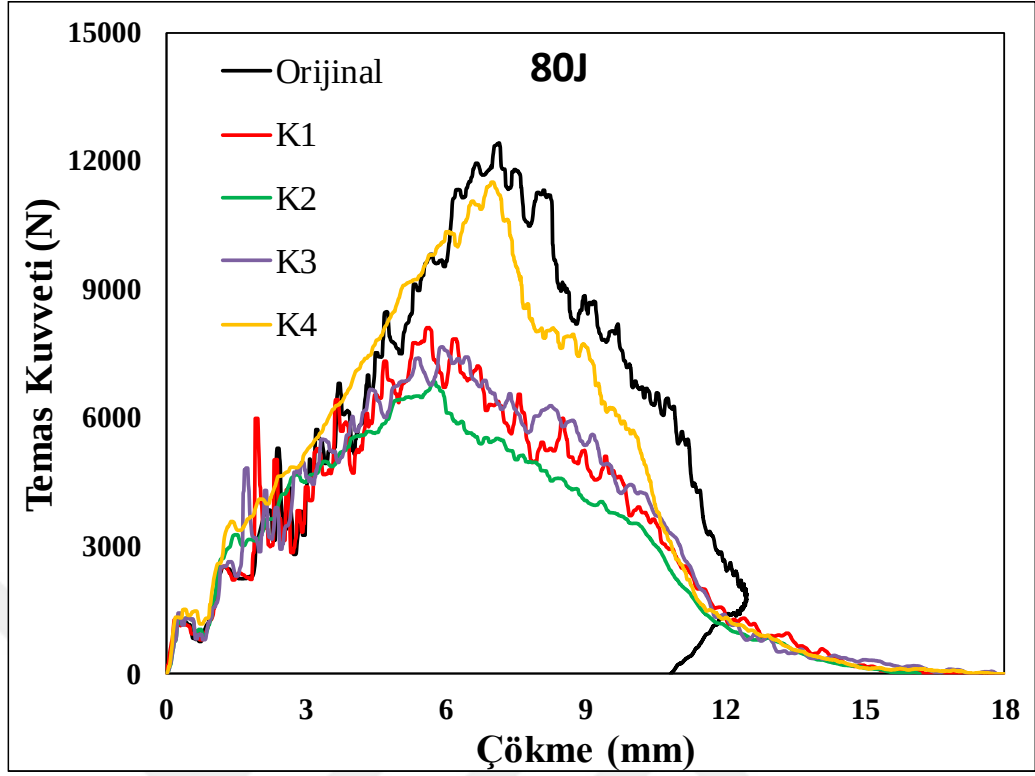
Şekil 3.13 40 Joule darbe enerjisi için elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri (Dogan ve Arman, 2019)



Şekil 3.14 50 Joule darbe enerjisi için elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri

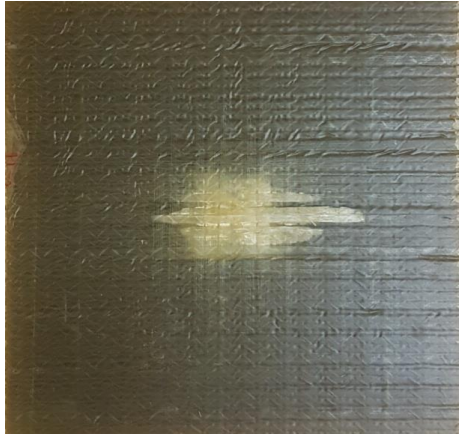
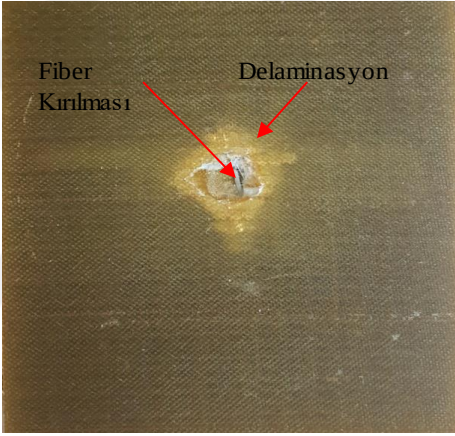
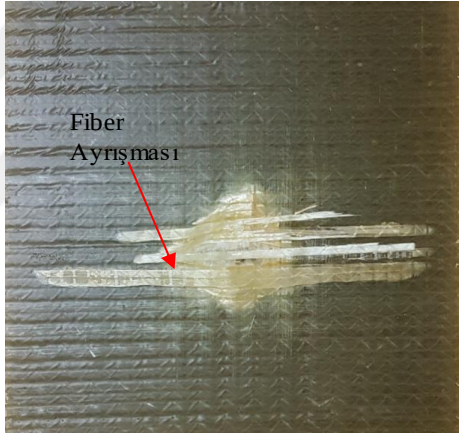
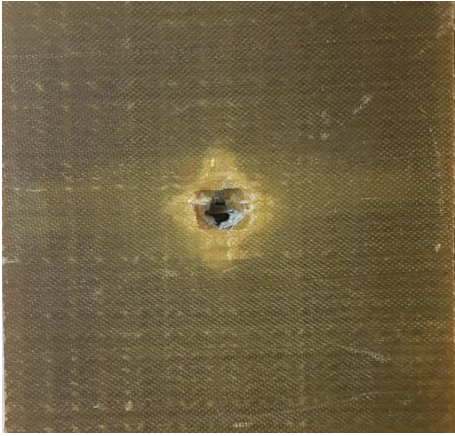
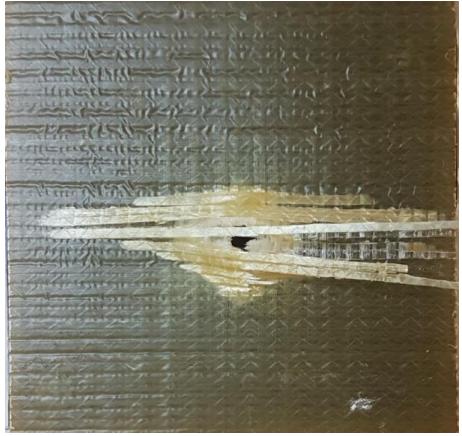


Şekil 3.15 60 Joule darbe enerjisi için elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri (Dogan ve Arman, 2019)



Şekil 3.16 80 Joule darbe enerjisi için elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri (Dogan ve Arman, 2019)

Yabancı bir nesne kompozit bir malzemeye çarptığında, kompozit malzemede delaminasyon, elyaf ayrılması, elyaf kırılması ve matris çatlaması gibi çeşitli hasar türleri oluşabilir. Bu hasar tipleri, çarpan cismin şekline ve kütlesine, darbe enerjisine ve kompozit malzemenin boyutuna bağlı olarak değişmektedir (Aktaş, Aktaş ve Turan, 2013). Şekil 3.17 de K1 koşuluna maruz kalmış malzemede 20, 50 ve 80 Joule darbe testi sonunda oluşan hasarları gösteren resimler verilmiştir. Burada ön yüzey darbe aparatının çarptığı yüzeyi ve E_D darbe enerjisini belirtmektedir. Şekilde de açıkça görüldüğü gibi, 20 Joule geri sekme, 50 Joule penetrasyon ve 80 Joule delinme durumlarını göstermektedir. Delaminasyon ve matris çatlağı hasarlarının, geri sekmenin olduğu enerji düzeyinde baskın hasar mekanizması olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, elyaf kırılması ile birlikte elyaf ayrılması, daha yüksek darbe enerjilerinde meydana gelen penetrasyon ve delinme durumlarındaki ana hasar tipleridir.

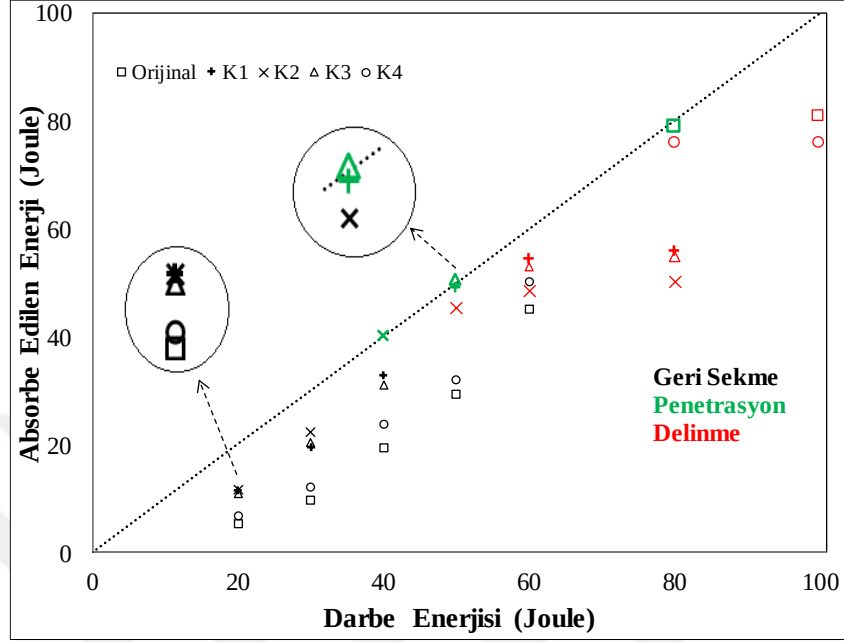
E_D	Ön Yüzey	Arka Yüzey
20 J		
50 J		
80 J		

Şekil 3.17. K1 koşuluna maruz kalmış kompozit malzemelerin farklı darbe enerjileri için hasar görüntüleri (Kişisel arşiv, 2018)

Enerji profil diyagramı olarak adlandırılan, absorbe edilen enerjinin darbe enerjisine göre değişimi, farklı yaşlandırma koşulları için Şekil 3.18'te verilmiştir. Kesikli çizgi ile gösterilen diyagonal eğri, eş enerji eğrisi olarak adlandırılmaktadır (İcten, Kıral ve Deniz, 2013). Saf elastik limit, penetrasyon ve delinme eşiği bu yöntem kullanılarak tanımlanabilir. Geri sekme durumu siyah, penetrasyon (saplanma) durumu yeşil ve delinme durumu kırmızı renkli işaretlerle gösterilmiştir. Absorbe edilen enerjinin eş enerji eğrisi ile buluştuğu ilk nokta penetrasyon eşiği olarak adlandırılır. Ancak bazı durumlarda penetrasyon eşiğini bulmak çok zordur. Bu durumda, penetrasyon eşiği ve delinme eşiği aynı değer olarak alınabilir. Şekilde görüleceği üzere en küçük delinme eşiği 48 Joule ile K2 ortamına maruz kalmış malzemede meydana gelirken en büyük delinme eşiği 81 Joule ile yaşlandırılmamış malzemede elde edilmiştir. Aynı sıcaklık ve nem oranına sahip K1 ve K4 koşullarına maruz kalmış malzemelerin delinme eşikleri ise sırasıyla 54 ve 76 Joule olarak ölçülmüştür. Bu da gösteriyor ki aynı sıcaklık ve nem oranına sahip olan ortamda var olan ultraviyole ışın etkisi oldukça fazladır. K3 koşuluna maruz bırakılan malzemenin delinme eşiği 53 Joule'dür. Ortam sıcaklığının artması polimer kompozit malzemenin su absorpsiyonunu arttırması ile birlikte özellikle matris-elyaf ara yüzeyindeki yapışma kabiliyetini azalmaktadır. Bu nedenle, düşük hızlı darbe deneyi sırasında oluşan tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) hasarı kuvveti ve malzemenin absorbe edebileceği enerjiyi düşürmektedir.

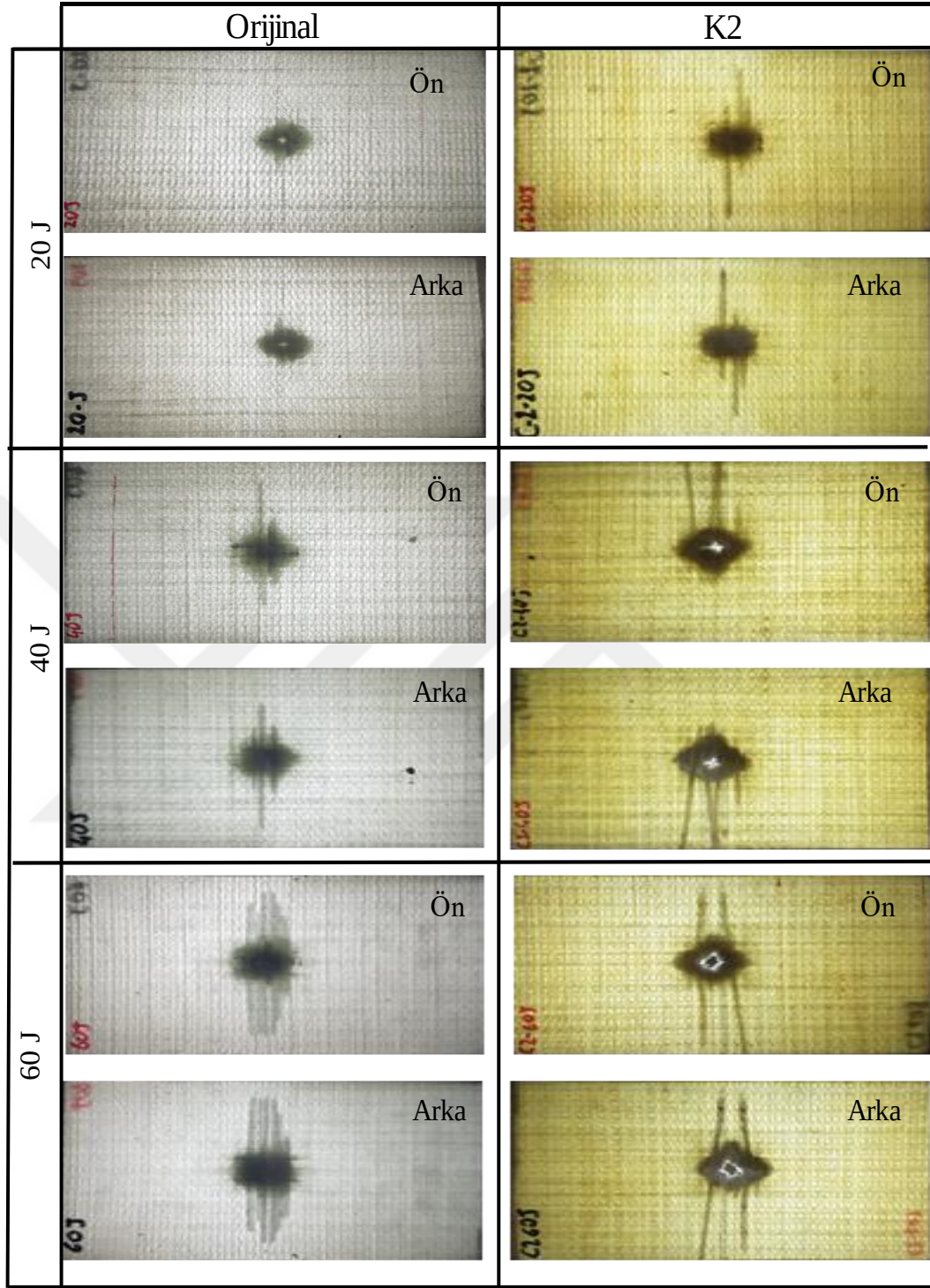
Orijinal ve K2 ortamına maruz kalmış kompozit malzemelerin 20, 40 ve 60 Joule darbe enerjileri ile yapılmış darbe testleri sonunda meydana gelen hasarları gösteren resimler Şekil 3.19'da verilmiştir. 20 Joule darbe enerjisi ile yapılan deneylere bakıldığında her iki malzemede de ana hasar delaminasyon olarak görülmektedir. Ancak K2 koşuluna maruz kalmış malzemenin arka yüzeyinde ek olarak fiber ayrılması görülmektedir. Buna ek olarak, K2 ortamına maruz kalmış malzemedeki hasar alanı orijinal (yaşlandırılmamış) malzemeye göre daha büyüktür. Delaminasyon hasarını belirleyen ana unsur tabakalar arasındaki yapışma kabiliyetidir. Bu da gösteriyor ki yaşlandırma koşulu ile malzemenin ara yüzey yapışma kabiliyeti zayıflamıştır. Ayrıca eş enerji eğrisinde, absorbe edilen enerji

değeri eş enerji eğrisine ne kadar uzak ise malzemede oluşan hasar o kadar az olduğu anlamına gelir.

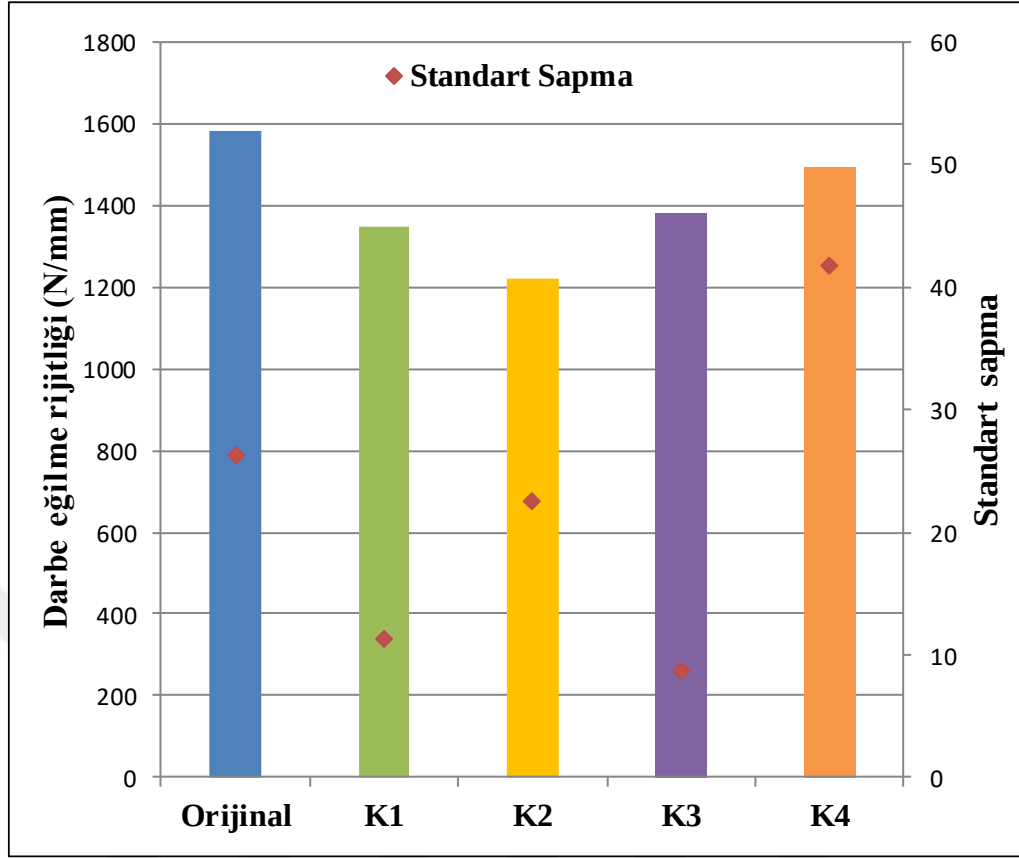


Şekil 3.18 Çeşitli yaşlandırma koşullarına maruz kalmış kompozit malzemenin enerji profil diyagramları (Dogan ve Arman, 2019)

Temas kuvveti-çökme eğrilerinin yükselen kısımlarının eğimi darbe eğilme rijitliği olarak adlandırılmaktadır. Aynı yaşlandırma koşullarına maruz kalmış numunelerin kuvvet-çökme eğrilerinin yükselen kısımlarının eğimi farklı darbe enerjileri için hemen hemen aynı eğime sahiptirler. Temas kuvveti-çökme eğrilerinin yükselen kısımlarının eğimini bulmak için doğrusal regresyon yöntemi kullanılmıştır ve aynı zamanda R-kare değerleri bulunmuştur. Tüm eğriler için R-kare değeri 0,95'den büyüktür. Şekil 3.20'de, ortalama eğilme rijitliği değerleri ve standart sapmaları gösterilmiştir. Yaşlandırılmamış numunenin darbe eğilme rijitliği değeri 1584 N/mm ile en yüksek değere sahipken, K2 koşuluna maruz kalan numuneninki 1220 N/mm ile en düşük değere sahiptir. Ayrıca, K1 K3 ve K4 koşullarına maruz kalmış malzemelerin darbe eğilme rijitliği sırası ile 1345, 1381 ve 1492 N/mm olarak bulunmuştur. Bunun anlamı, aynı çökme değeri K2 koşuluna maruz kalmış numunelerde daha düşük kuvvet altında olmaktadır. Aynı sıcaklık ortamında yaşlandırılan K1 ve K4 koşullarına bakıldığında, UV ışının darbe eğilme rijitliği üzerinde önemli bir etkisi olduğu gözlenmiştir.

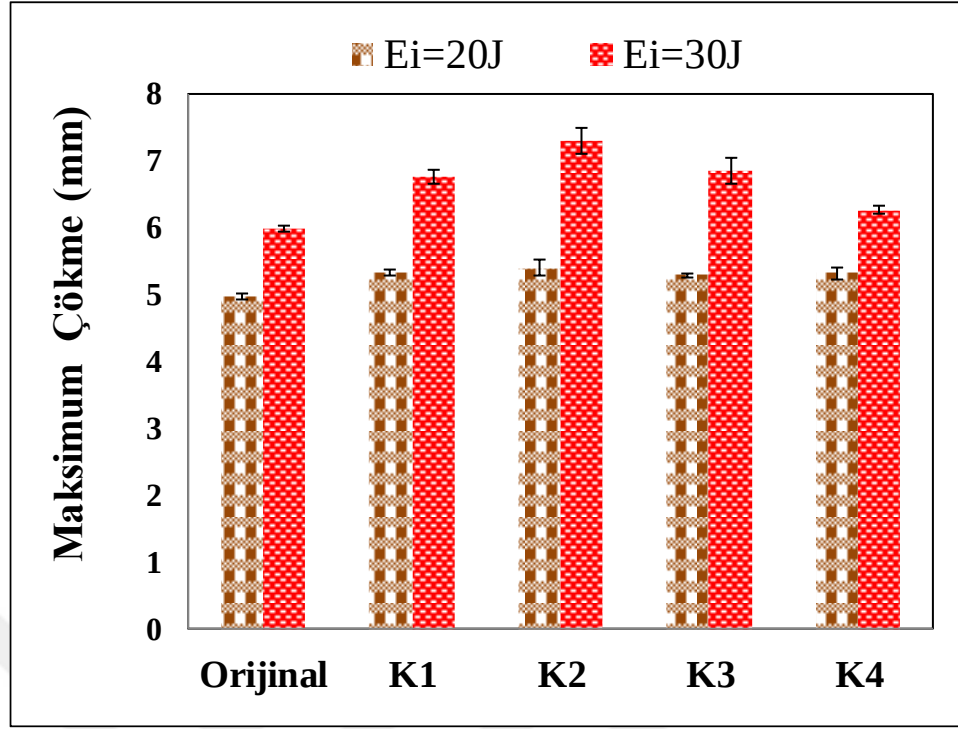


Şekil 3.19 Orijinal ve K2 koşuluna maruz kalmış kompozit malzemelerin farklı darbe enerjileri için hasar görüntüleri (Kişisel arşiv, 2018)



Şekil 3.20 Farklı yaşlandırma koşulları için darbe eğilme rijitliği (Dogan ve Arman, 2019)

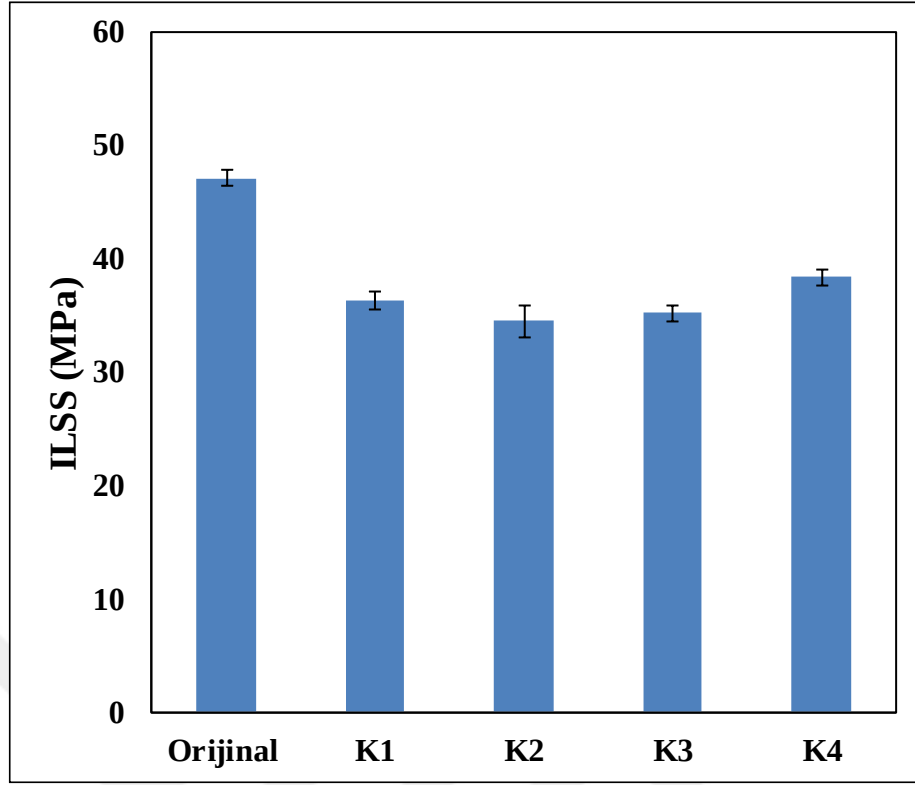
Maksimum çökme değerleri, 20 ve 30 Joule darbe enerjileri ve her bir koşul için Şekil 3.21’de verilmiştir. Maksimum çökme değerleri 20 joule darbe enerjisi için bakıldığında birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Darbe enerjisi 30 Joule’e yükseltildiğinde K2 koşuluna maruz numunenin çökme değeri yaşlandırılmamış numuneye göre yaklaşık olarak %22 oranında artmıştır. Daha öncede bahsedildiği gibi düşük darbe yüklerinde hasar türü matris kırılması ve delaminasyondur. 20 joule darbe enerjisinde tabakalar arası ayrılma için gerekli kuvvet değerine ulaşılmadığı için çökme değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Darbe enerjisi 20 Joule’den 30 Joule’e yükseltildiğinde yaşlandırılmamış K1, K2, K3 ve K4 koşullarına maruz malzemelerin maksimum çökme değerleri sırası ile %20, %26, %35, %29 ve %18 oranında yükselmiştir. K1 ve K3 koşuluna maruz kalan numunelerin çökme değerleri darbe eğilme rijitliğinde olduğu gibi birbirine oldukça yakındır. Her iki koşul arasında 10 °C sıcaklık farkı olmasına rağmen UV ışın etkisi ile mekanik özellikler üzerindeki aynı yaşlanma etkileri meydana gelmiştir.



Şekil 3.21 20 ve 30 Joule darbe enerjisi için maksimum çökme değerleri (Dogan ve Arman, 2019)

3.2.4 Tabakalar Arası Kayma Testi Sonuçları

Farklı çevresel koşullara maruz bırakılmış kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma gerilme (ILSS) değerleri Şekil 3.22’de verilmiştir. Şekilde görüleceği üzere uzun süreli yaşlandırma sonucunda elyaf ve matris arasındaki yapışma kuvveti zayıflamıştır. Nem emilimindeki uyumsuzluk, elyaflar ve matris arasındaki üniform olmayan hacimsel genleşme nedeniyle lokal gerilme ve uzamalara neden olur. Ayrıca, elyaf ve matris arasındaki yapışma kuvveti sıcaklık artışının yol açtığı termal stres nedeni ile zayıflamıştır (Shaoquan, Shangli, Yu ve Yungang, 2017). Diğer özelliklerde olduğu gibi en büyük düşüş K2 koşuluna maruz kompozit malzemelerde meydana gelmiştir. Tabakalar arası kayma mukavemeti orijinal numuneye göre yaklaşık olarak yüzde 27 oranında düşmüştür. Tabakalar arası kayma mukavemetindeki düşüş oranları $K4 < K1 < K3 < K2$ sırası ile gerçekleşmiştir.



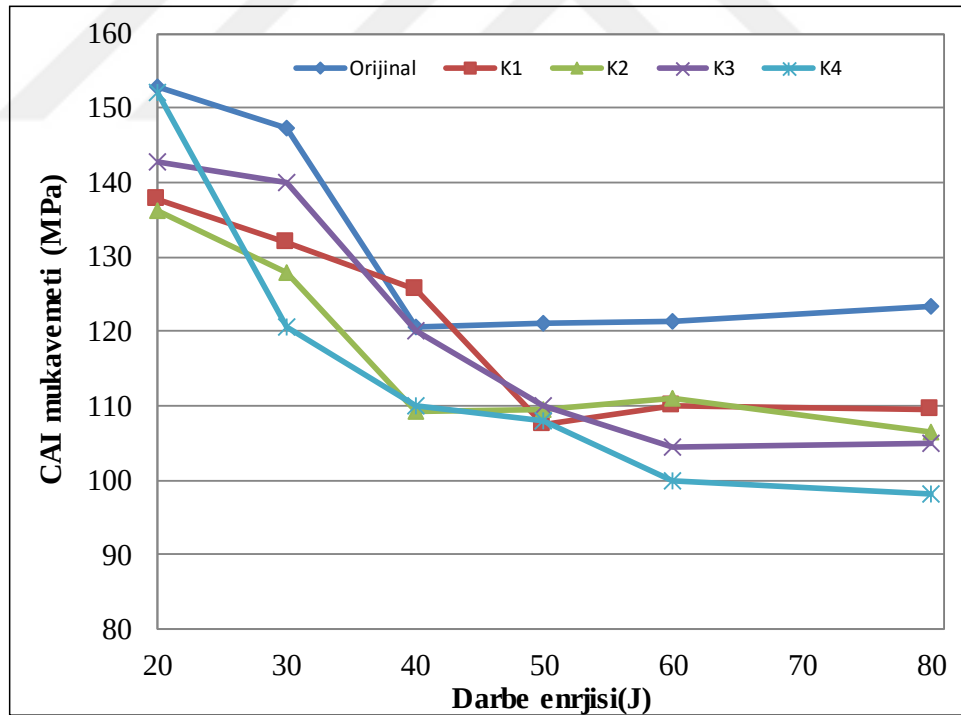
Şekil 3.22 Farklı çevresel koşullar için tabakalar arası kayma mukavemeti değerleri (Dogan ve Arman, 2019)

3.2.5 Düşük Hızlı Darbe Sonrası Bası Testi

Darbe sonrası bası (CAI) testi, kompozit bir malzemenin bası dayanımının darbe yüklenmesinden sonra ki davranışını tahmin etmeyi sağlayan deneysel bir yöntemdir. Darbe nedeniyle kompozitlerdeki hasar, bası mukavemetinde önemli bir düşüşe neden olabilir. Bu nedenle, darbe sonrası bası mukavemeti kompozit yapıların tasarımında en önemli konulardan biri olduğu düşünülmektedir (Abir, Tay, Ridha ve Lee, 2017). Bununla birlikte, kompozit malzemeler çeşitli çevresel koşullara maruz kalmaktadır. Bir kompozit malzemenin hem darbe yükü hem de çevresel koşullara maruz kalması nedeniyle dayanımında oluşacak değişimi ön görmek için farklı darbe enerjilerine ve çevresel koşullara maruz kalmış kompozit bir plakanın darbe sonrası bası testleri yapılmıştır.

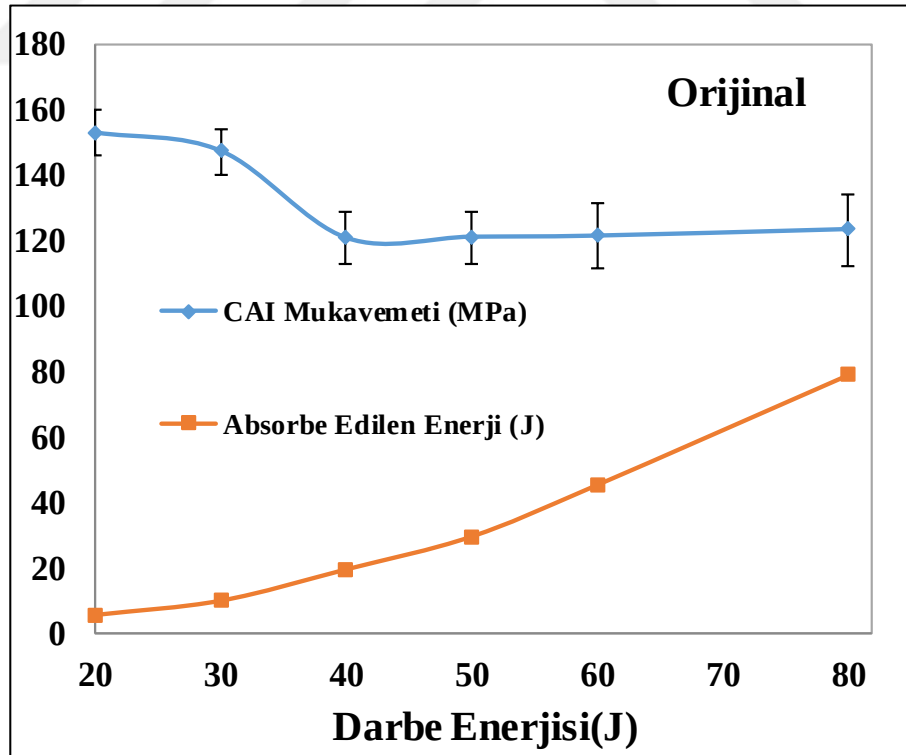
Farklı çevresel koşullara ve darbe enerjilerine maruz kalmış kompozit malzemelerin darbe sonrası bası mukavemetinin değişimi Şekil 3.23'te verilmiştir.

Bütün çevresel koşullar için darbesiz numunelerin bası mukavemetleri, 20 Joule darbe enerjisine maruz kalmış malzemelerin bası mukavemetlerine oldukça yakındır. Örneğin, yaşlandırılmamış malzemenin darbesiz ve 20 Joule darbe enerjisi sonrasında bası mukavemetleri sırası ile 155 ve 153 MPa'dır. Yaşlandırılmamış ve K4 ortamına maruz kalmış malzemelerin 20 Joule darbe enerjisi sonrasındaki bası mukavemetleri birbirine çok yakındır. Ancak, darbe enerjisinin artması ile K4 ortamına maruz kalan malzemenin bası mukavemetinde yaşlandırılmamış ve diğer ortamlara maruz kalan malzemelere göre dramatik bir düşüş meydana gelmiştir. K1, K2 ve K3 ortamına maruz kalan malzemelerde delinme hasarı daha düşük enerjilerde meydana gelmektedir. Böylece düşük enerjilerde meydana gelen delaminasyon hasarı daha fazla büyümeden malzemeler delinecektir. Yaşlandırılmamış, K1, K2, K3 ve K4 ortamına maruz kalmış malzemeler için 20 Joule ve 80 Joule darbe enerjileri için CAI mukavemetindeki değişim miktarı sırasıyla % 19, % 20, % 21, % 26 ve % 35'tir.

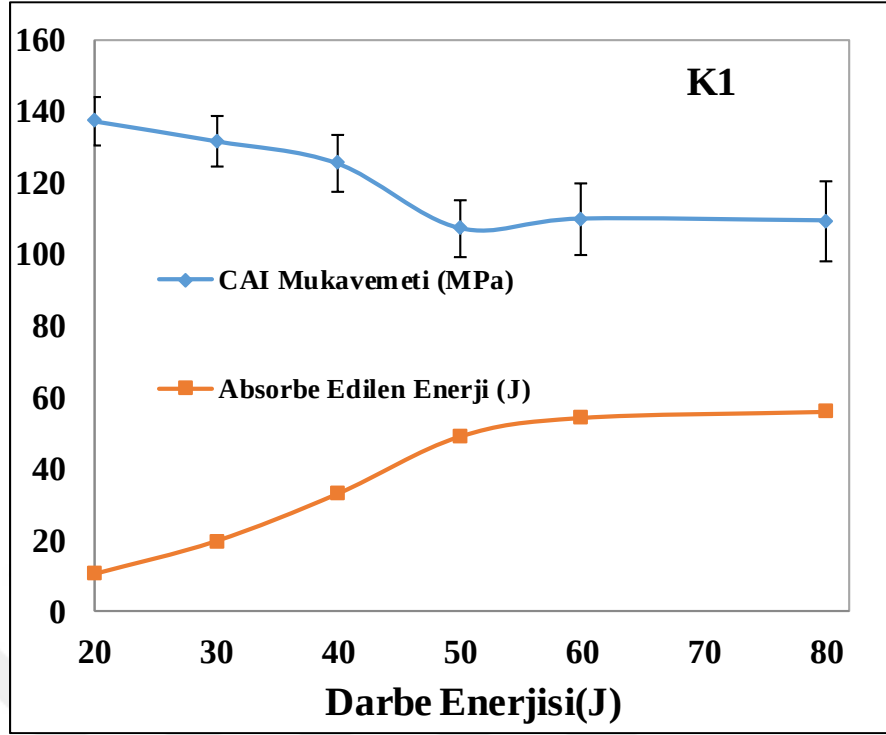


Şekil 3.23 Farklı çevresel ve darbe enerjilerine maruz kalmış kompozit malzemelerin darbe sonrası bası mukavemetinin değişimi (Dogan ve Arman, 2019)

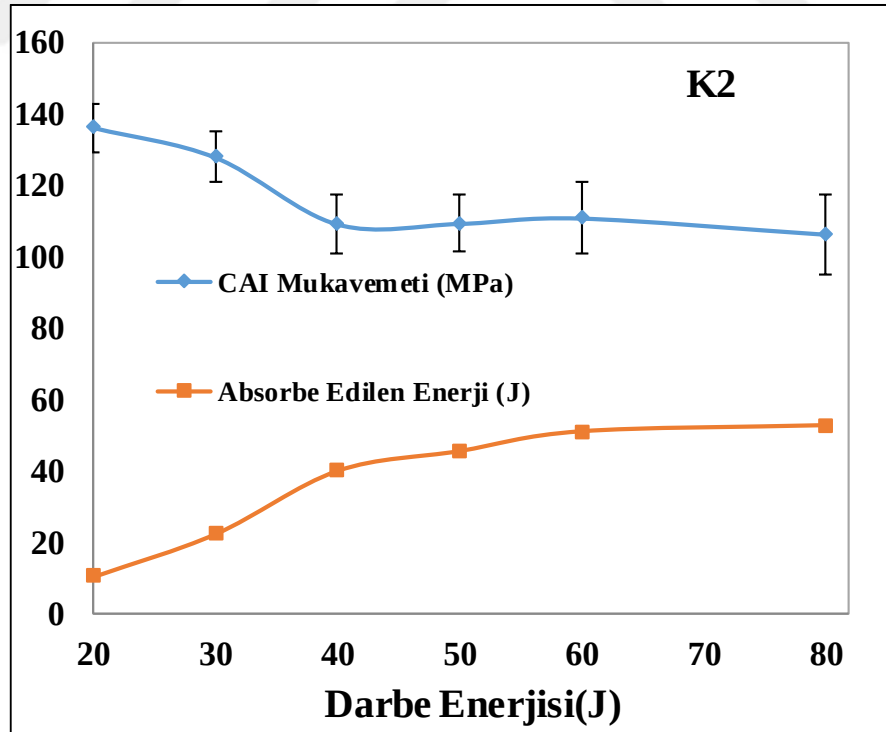
Yaşlandırılmamış (Orijinal), K1, K2, K3 ve K4 ortamlarına maruz kalmış malzemelerin CAI mukavemeti ve absorbe edilen enerji değerlerinin darbe enerjisi ile değişimleri Şekil 3.24-3.28 arasında verilmiştir. Yaşlandırılmamış malzemede absorbe edilen enerji 80 Joule darbe enerjisine kadar artarken, CAI mukavemeti 40 Joule darbe enerjisine kadar düşüş trendi gösterdikten sonra sabit kalmıştır. Çevresel koşullara maruz kalmış malzemelerde ise CAI mukavemeti absorbe edilen enerjinin artması ile birlikte düşmüştür. Ancak absorbe edilen enerjinin sabit kaldığı yani delinme eşiğine kadar düştükten sonra sabit kalmıştır. Malzemede delinme olayı meydana geldiği enerjiden itibaren, enerjinin arttırılması malzemede ki darbe hasarının artmasına neden olmayacağı için CAI mukavemeti bu darbe enerjisinden sonra sabit kalmıştır. Örneğin, K1 ortamına maruz kalmış malzemelerin delinme eşiği 54 Joule'dür. 60 Joule ile 80 Joule darbe enerjisine maruz malzemenin CAI mukavemetleri hemen hemen aynıdır. Ancak K4 malzemesinin delinme eşiği 76 Joule olarak bulunmuştur ve CAI mukavemeti 80 Joule darbe enerjisine kadar düşmektedir.



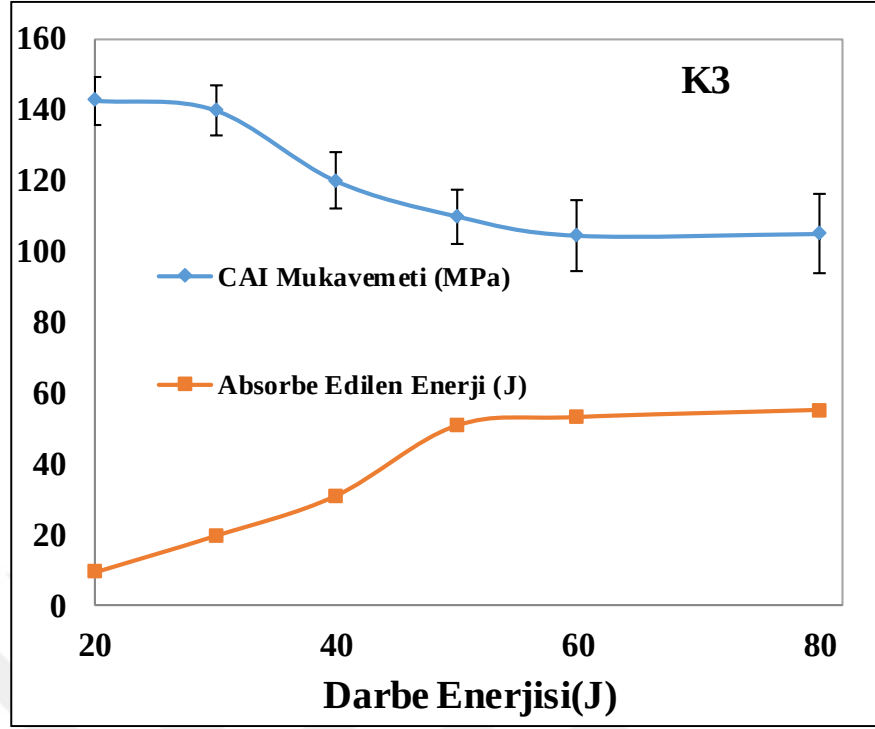
Şekil 3.24 Yaşlandırılmamış malzemelerin CAI mukavemeti ve absorbe edilen enerji değerlerinin darbe enerjisi ile değişimi



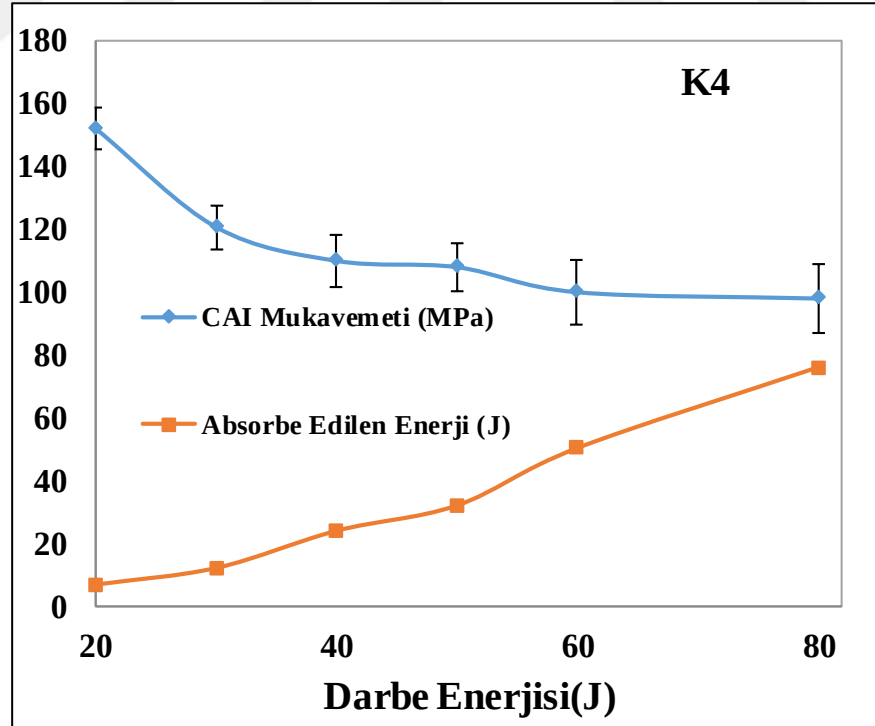
Şekil 3.25 K1 ortamına maruz malzemelerin CAI mukavemeti ve absorbe edilen enerji değerlerinin darbe enerjisi ile değişimi (Dogan ve Arman, 2019)



Şekil 3.26 K2 ortamına maruz malzemelerin CAI mukavemeti ve absorbe edilen enerji değerlerinin darbe enerjisi ile değişimi

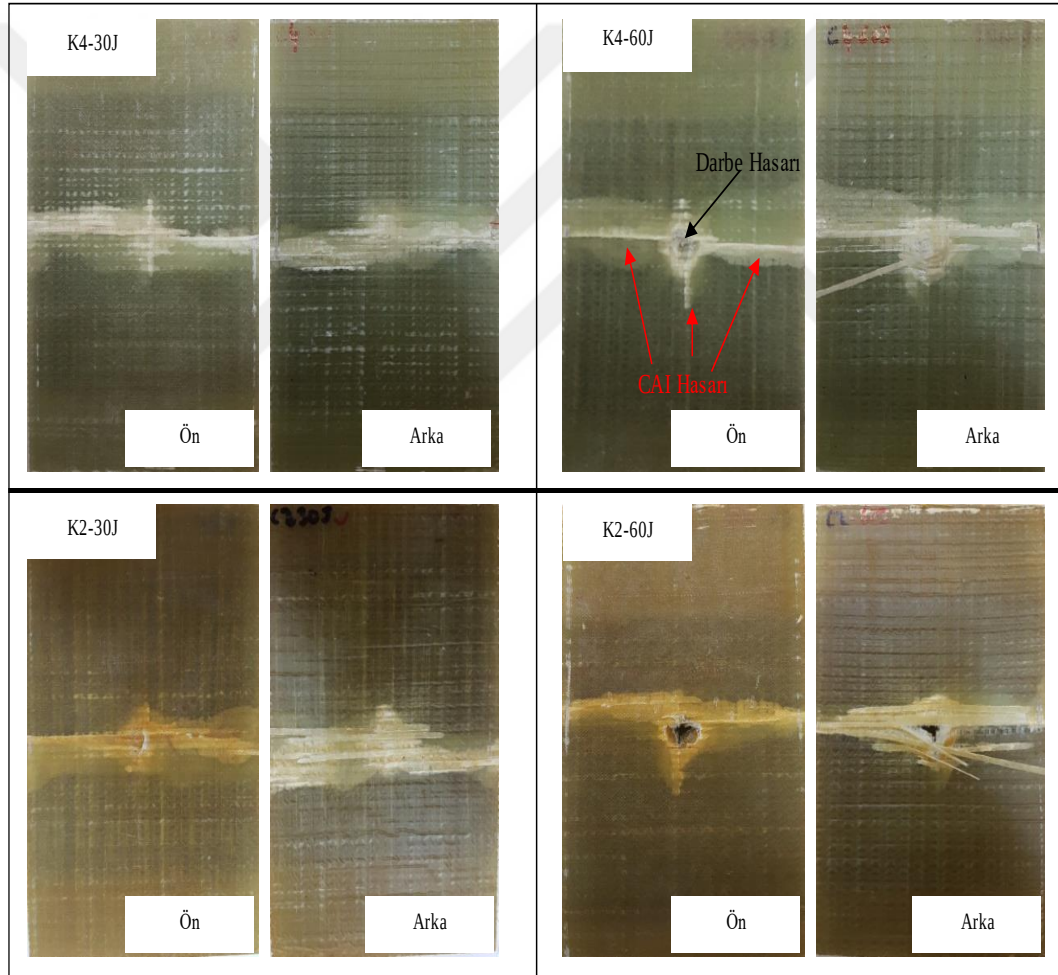


Şekil 3.27 K3 ortamına maruz malzemelerin CAI mukavemeti ve absorbe edilen enerji değerlerinin darbe enerjisi ile değişimi



Şekil 3.28 K4 ortamına maruz malzemelerin CAI mukavemeti ve absorbe edilen enerji değerlerinin darbe enerjisi ile değişimi (Dogan ve Arman, 2019)

Şekil 3.29’da 30 ve 60 Joule darbe enerjileri sonrası CAI testi yapılan K2 ve K4 ortamlarına maruz kalmış malzemelerin hasar tiplerini gösteren resimler verilmiştir. Burada ön yüzey darbe yüzeyini temsil etmektedir. CAI testi sonrası oluşan ana hasar, darbeli bölgeden başlayarak yatay olarak numune kenarlarına doğru ilerlemektedir. Bazı numunelerde ayrıca dikey hasarlarda meydana gelmiştir. Ayrıca, CAI hasarı yükleme yönüne dik olduğu gözlemlenmiştir. Elyaf hasarı, matris hasarı ve delaminasyon hasarı tüm kompozit malzeme genişliği boyunca meydana gelmiş ve her durumda merkezi darbe bölgesi ile aynı hizadadır. Malzemenin ön yüzeyinde elyaf bası hasarı oluşurken, arka yüzeyde lokal burkulma hasarı meydana gelmiştir.



Şekil 3.29 CAI testi sonrası kompozit malzemede meydana gelen hasarlar (Kişisel arşiv, 2018)

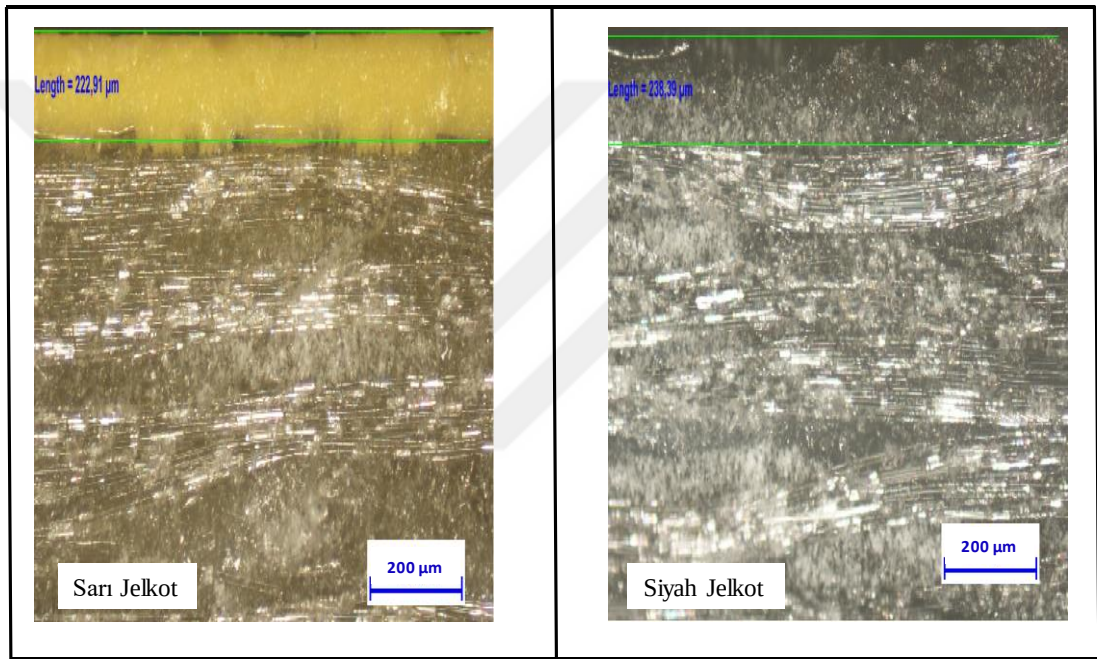
3.3 Çevresel Koşulların Farklı Jelkot Renkleri İle Kaplanmış Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzeme Üzerindeki Etkisi

3.3.1 Giriş

Polimer matris temelli kompozit malzeme kullanılarak oluşturulmuş bir yapı çalışma ortamına alınmadan önce çevresel koşullardan korumak amacıyla jelkot ve boya gibi koruyucu maddeler ile kaplanmaktadır. Ancak, literatürde çevresel koşulların kompozit malzemeler üzerindeki etkisi inceleyen çalışmaların tamamına yakınında, kompozit malzemelerin yüzeyinde koruyucu herhangi bir malzeme kullanılmamıştır. Bu bölümde gerçekleştirilen çalışmanın amacı, farklı renkte jelkot ile kaplanmış kompozit malzemenin UV ışını içeren hidrotermal bir ortama maruz bırakıldıktan sonra çekme özellikleri, termodinamik özellikleri ve düşük hızlı darbe davranışının değişimi incelemektir.

Kompozit malzemeler vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Takviye malzemesi olarak 300 gr/m² alansal yoğunluğa sahip tek yönlü E-cam elyaf kumaş ve matris malzemesi olarak Huntsman Araldite Ly 1564 epoksi ile Aradur 3486 sertleştirici kullanılmıştır. Epoksi ve sertleştirici karışımının ağırlıkça oranı üçe birdir. Bütün malzemeler vakum altına alındıktan sonra 1 bar basınç altında reçine emdirilmiştir. Kompozit malzemeler 80°C sıcaklıkta 8 saat boyunca kürlendirildikten sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Mekanik özellikler için tek yönlü 8 tabaka ([0]₈) dizilimi ile kompozit malzeme üretilirken, düşük hızlı darbe testleri için kompozit malzeme [+45/-45/0/90]_{2s} dizilimine sahip 16 kat tabakadan oluşan kompozit malzeme üretilmiştir. Kompozit malzemelerin ortalama kalınlıkları sırasıyla 2,1±0,3 mm ve 4,1±0,5 mm olarak ölçülmüştür. Üretilen kompozit malzemeler hızlandırıcılı Poliya polijel P-211 püskürtme tipi jelkot kullanılarak kaplanmıştır. 100 gram jelkot için 10 gram pigment, 1 gram parafin ve 1 gr sertleştirici katılarak uygun renkte karışım elde edilmiştir. Daha sonra hava basınçlı boya tabancası ile püskürtme işlemi yapılarak kompozit malzemeler sarı ve siyah olmak üzere iki farklı renkte kaplanmıştır.

Kaplama işlemi sırasında jelkot kalınlığı bu süreçteki en önemli noktadır. Farklı kalınlıktaki jelkot filmler yaşlanma süreci esnasında farklı davranışlar gösterebilir. Bu nedenle jelkot ile kaplanan kompozitlerin aynı jelkot kalınlığında olduğunu onaylamak için, numunelerin kesit fotoğrafları Nikon optik mikroskobu kullanılarak çekilmiştir. Jelkot ile kaplanan malzemelerin kesit alanlarından çekilen mikro fotoğraflar ve jel kaplamanın kalınlığı, Şekil 3.30'da verilmiştir. Bu işlem, ortalama değeri elde etmek için her bir renk için beş farklı kesitte tekrarlanmıştır. Sarı ve siyah kaplama için ortalama kaplama kalınlığı 224 ± 7 ve 233 ± 6 μm olarak ölçülmüştür.

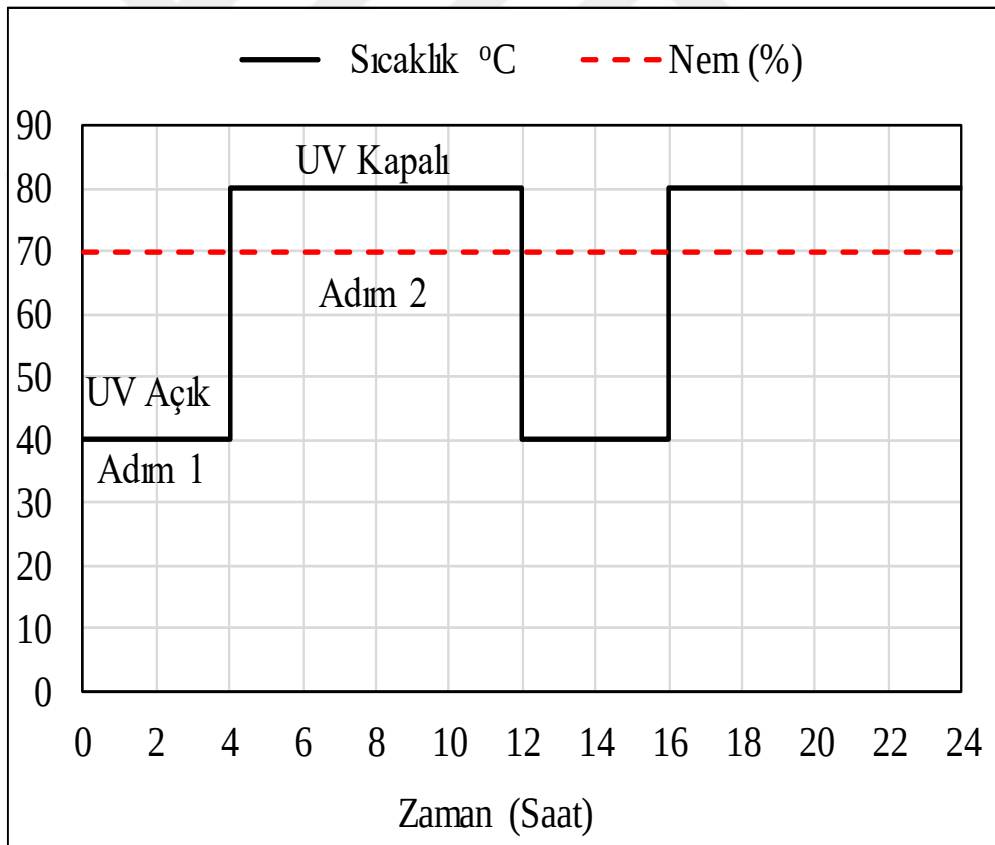


Şekil 3.30 Jelkot kaplanmış kompozit malzemelerin kesit fotoğrafları (Dogan, Arman ve Ozdemir, 2018)

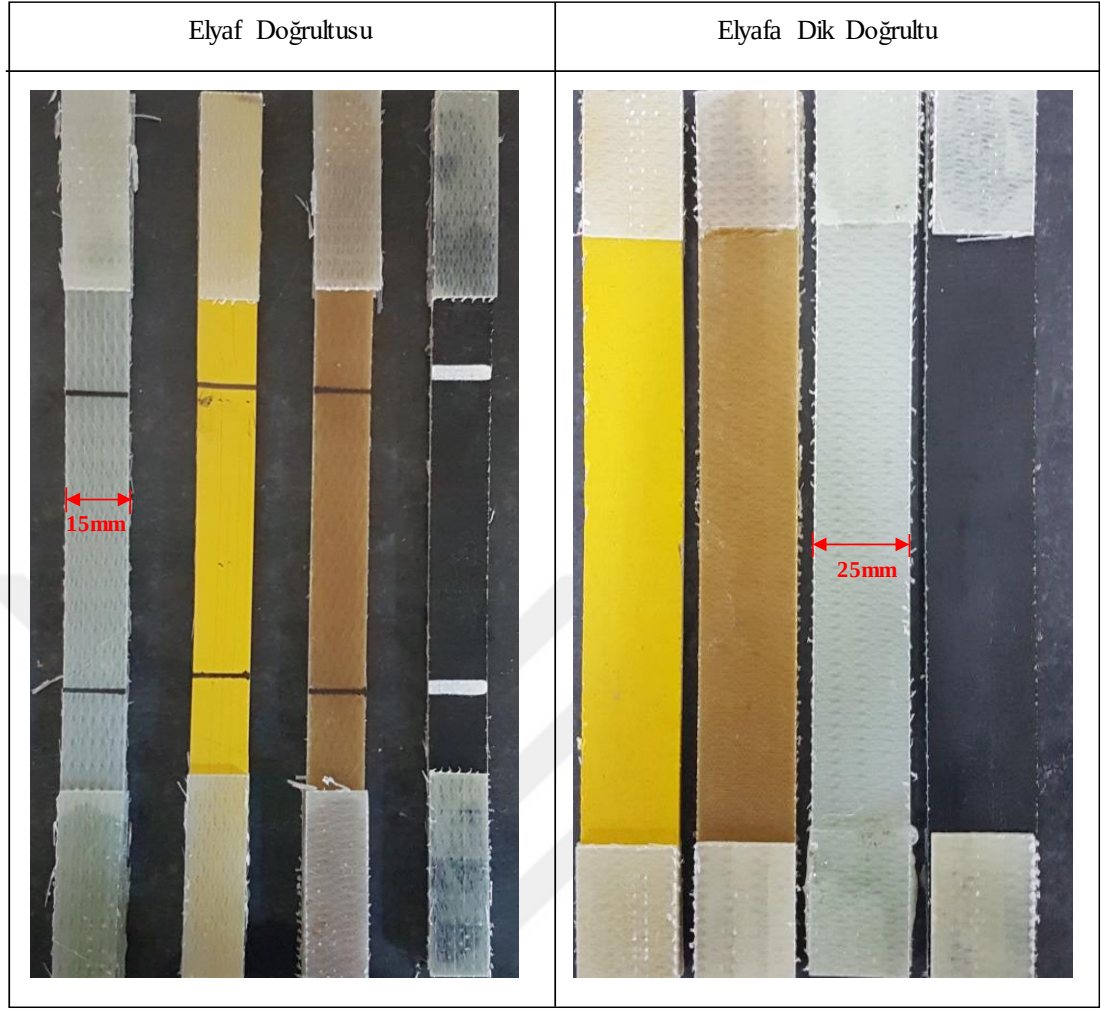
Hazırlanan kompozit plakalar daha önceden belirlenen bir çevrimsel yaşlandırma koşuluna maruz bırakılmak için ATT Discovery DY110C iklimlendirme kabineye koyulmuştur. İklimlendirme koşulu iki adımdan oluşmaktadır. İlk adımda 40 sıcaklık ve %70 nem oranı altında malzemeler 295-365nm bandında UV ışınına dört saat süresince maruz bırakılmıştır. İkinci adımda ise UV lambası kapatılarak sıcaklık 80°C'ye yükseltilirken nem oranı %70 oranında sabit tutulmuştur ve bu adım sekiz saat sürmüştür. Şekil 3.31'de bu çevrim şematik olarak verilmiştir. Bu çevrim toplamda 175 kez tekrarlanmıştır ve 2100 saat (yaklaşık 3 ay) sürmüştür. Şekillerde

yer alan orijinal ifadesi, yaşlandırılmamış malzemeyi, kaplanmamış ifadesi yaşlandırılmış ancak herhangi bir kaplama işlemi yapılmamış malzemeyi, sarı ve siyah jelkot kaplanmış ise sarı ve siyah jelkot ile kaplanıp yaşlandırılan malzeme temsil etmektedir.

Kompozit malzemeler yaşlandırma süreci sonunda iklimlendirme kabininden çıkarılarak çekme ve dinamik mekanik analiz (DMA) testleri için standartta uygun boyutlarda kesilmiştir. Düşük hızlı darbe testleri için ise 100 mm ×100 mm boyutlarında malzemeler hazırlanmıştır. Çekme testleri için hazırlanan elyaf ve elyafa dik doğrultudaki test numuneleri Şekil 3.32’de verilmiştir. Çekme testi sırasında malzemelerin uç kısımlarına malzemeleri tutan çenelerde meydana gelen gerilme yığılması önlemek için 2 mm kalınlığında kompozit malzemeler yapıştırılmıştır.



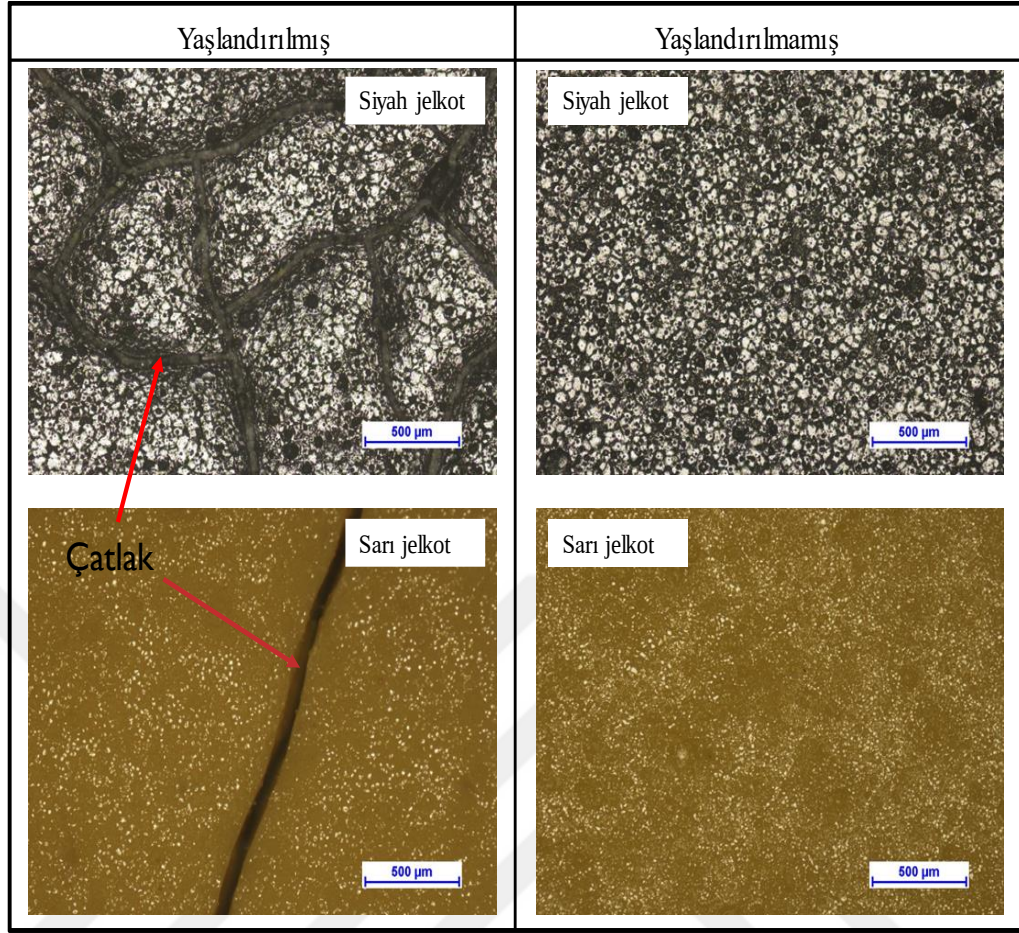
Şekil 3.31 Yaşlanma koşullarındaki sıcaklık ve nem değişimi



Şekil 3.32 Yaşlandırılmamış, kaplanmamış ve farklı renk jelkot ile kaplanmış çekme test numuneleri (Kişisel arşiv, 2018)

3.3.2 Kompozitlerin Yüzey Analizi

Şekil 3.33’te siyah ve sarı jelkot ile kaplanmış malzemelerin yüzey mikro fotoğrafları verilmiştir. Siyah ve sarı renk jelkot ile kaplanmış, yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış malzemelerin mikro fotoğraflarına bakıldığında, yaşlandırma süreci sonunda jelkotlarda oluşan çatlaklar belirgin şekilde görülmektedir. Her iki renk jelkot ile kaplanmış malzemede de çatlaklar meydana gelmiştir. Ancak, siyah renk jelkot ile kaplanmış numunelerdeki çatlak yoğunluğu sarı renk jelkot ile kaplanmış malzemeye göre daha fazladır.



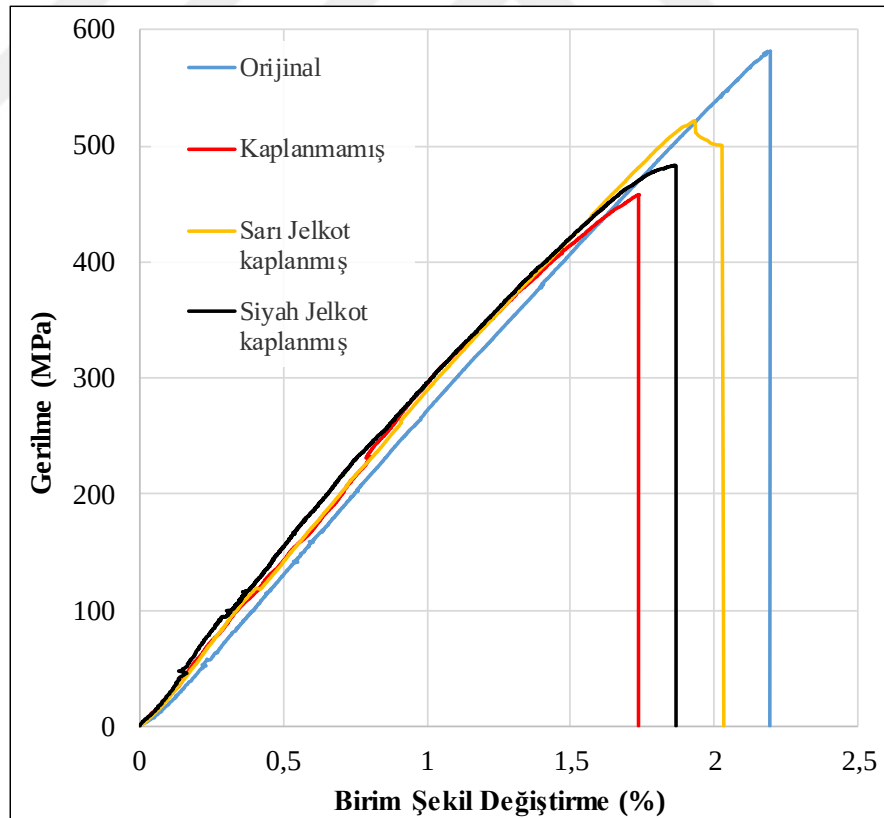
Şekil 3.33 Siyah ve sarı jelkot ile kaplanmış yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış numunelerin yüzeylerinin mikro fotoğrafları (Kişisel arşiv, 2018)

3.3.3 Çekme Testi Sonuçları

Orijinal, kaplanmamış, sarı ve siyah renk jelkot ile kaplanıp yaşlandırılmış kompozit malzemelere ait çekme testi sonununda elde edilmiş elyaf doğrultusundaki ve elyafa dik doğrultudaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.34 ve Şekil 3.35’de verilmiştir. Her numune ve malzeme yönü için beş test numunesinden ortalama değere en yakın olan eğri seçilmiştir. Fiber doğrultusunda elde edilen eğrilere bakıldığında, gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri kopma noktasına kadar doğrusal elastik davranış sergilerler ve malzeme elastik sınırına ulaştığında hemen kopmaktadır. Öte yandan, elyaf yönüne dik doğrultuda ise bilineer bir şekilde değişmektedir. Daha önceden de bahsedildiği gibi bu doğrultuda lifleri bir arada tutmaya yarayan ince iplikler mevcuttur. Bu iplikler bir noktaya kadar yük taşıdıktan

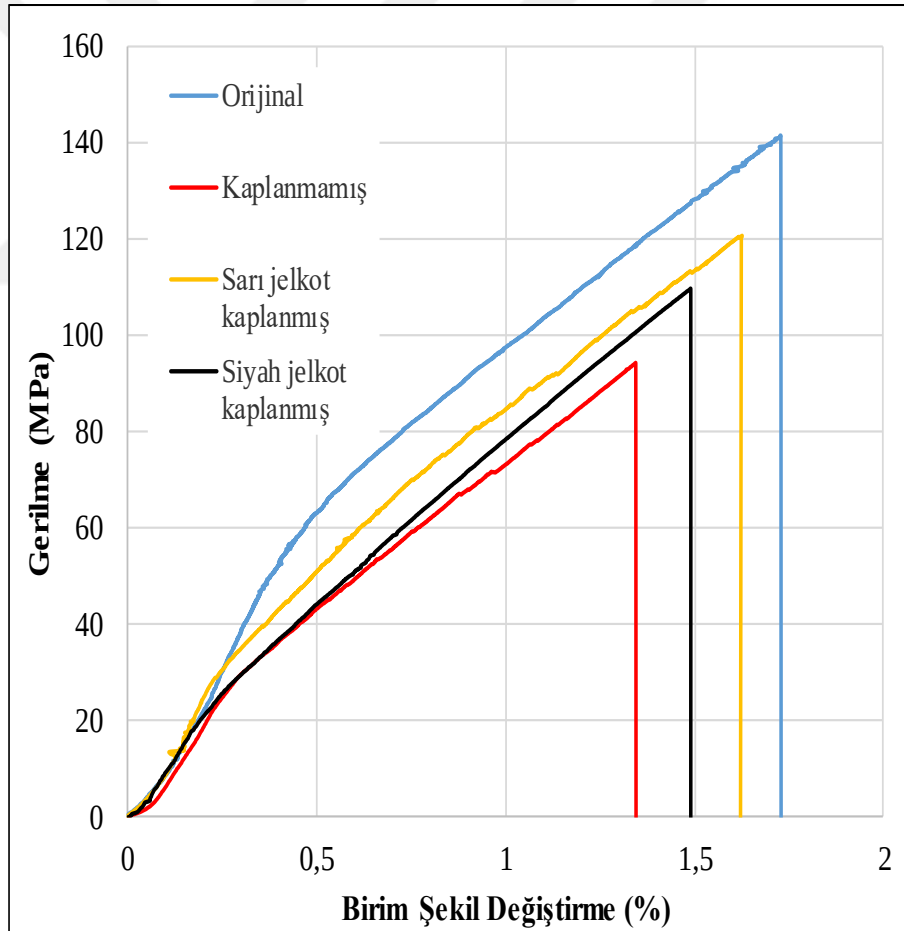
sonra geri kalan bütün yükü matris malzemesi taşımaktadır. Bu eğrilerin en maksimum noktadaki gerilme değerleri malzemenin çekme mukavemeti olarak adlandırılmaktadır.

Elyaf doğrultusundaki çekme mukavemetindeki en büyük düşüş şekilde açıkça görüleceği üzere kaplanmamış malzemede meydana gelmektedir. Jelkot ile kaplanmış malzemere bakıldığında ise siyah jelkot ile kaplanmış malzemenin çekme mukavemetindeki düşüş sarı jelkot ile kaplanmış malzemeye göre daha yüksektir. Orijinal, kaplanmamış, sarı ve siyah jelkot ile kaplanmış malzemelerin elyaf doğrultusundaki çekme mukavemetleri sırasıyla 580, 458, 520 ve 470 MPa olarak bulunmuştur. Sarı jelkot ile kaplanmış, siyahjelkot ile kaplanmış ve kaplanmamış numunelerde elyaf doğrultusundaki çekme mukavemeti yaşlandırma süreci sonunda orijinal malzeme göre yaklaşık olarak sırasıyla yaklaşık %10, %18 ve %21 oranında azalmıştır.



Şekil 3.34 Kompozit malzemelerin elyaf doğrultusundaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri (Dogan, Arman ve Ozdemir, 2018)

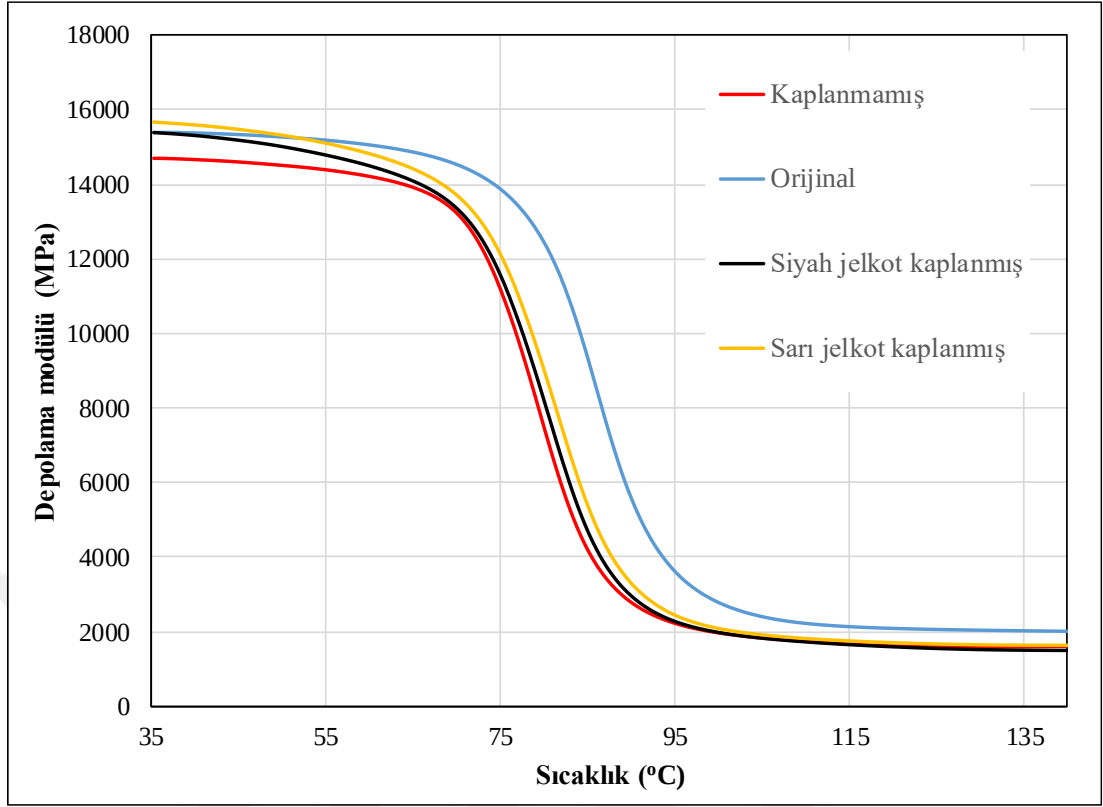
Elyafa dik doğrultudaki çekme mukavemeti değerlerine bakıldığında, elyaf yönündeki düşüş trendine benzer bir durum vardır. Orijinal, kaplanmamış, sarı ve siyah jelkot malzemelerin elyaf doğrultusundaki çekme mukavemetleri sırasıyla 141, 93, 120 ve 109 MPa olarak elde edilmiştir. Sarı jelkot ile kaplanmış, siyah jelkot ile kaplanmış ve kaplanmamış malzemelerin elyafa dik doğrultudaki çekme mukavemetlerinde düşüş sırasıyla yaklaşık olarak %15, %22 ve %36 oranında gerçekleşmiştir. Malzemelerin maksimum birim şekil değiştirme değerlerine bakıldığında çekme mukavemetlerine paralel olarak bir düşüş meydana geldiği görülmektedir. Bütün malzemeler göz önüne alındığında elyaf doğrultusundaki maksimum birim şekil değiştirme değerleri elyafa dik doğrultudaki maksimum birim şekil değiştirme değerlerinden daha büyüktür.



Şekil 3.35 Kompozit malzemelerin elyafa dik doğrultudaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri (Dogan, Arman ve Ozdemir, 2018)

3.3.4 Dinamik Mekanik Analiz (DMA) Testi Sonuçları

Bir malzemenin deformasyon altında depolayabildiği ve harcadığı mekanik enerji Dinamik Mekanik Analiz (DMA) yöntemi ile ölçülmektedir. DMA testinin amacı, polimerler için camsı-kauçuk rejimi arasındaki geçişi karşılaştırmaktır. Ayrıca polimer malzemelerin bağları arasındaki hareketlilik DMA testi ile belirlenmektedir (Guermazı, Tarjem, Ksouri ve Ayedi, 2016). Orijinal, kaplanmamış, sarı ve siyah jelkot kaplanmış dört farklı malzeme için DMA testi sonunda elde edilen depolama modülünün sıcaklık ile değişim grafiği Şekil 3.36’da verilmiştir. Başlangıçta, orijinal, sarı ve siyah jelkot kaplanmış malzemelerin depolama modülü değerleri birbirlerine çok yakın iken, kaplanmamış malzemeninki bunlara kıyasla daha düşüktür. Orijinal, kaplanmamış, sarı ve siyah jelkot kaplanmış malzemelerin 35 °C’deki depolama modülü ortalama değerleri sırasıyla 15382, 14692, 15403 ve 15305 MPa olarak ölçülmüştür. Depolama modülü değerlerinde 35 ila 70 °C arasında hafif bir düşüş meydana gelmektedir. Bu rejime camsı rejim denir. Daha sonra sıcaklığın artması ile depolama modülü değerinde sert bir düşüş meydana gelmiştir. Bu bölge camsı rejimden kauçuk rejime geçiş bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Sıcaklık 95 °C’nin üstüne arttırıldığında, depolama modülü çok küçük bir değere gelerek, yeniden yatay bir şekle gelmiştir. Bu üçüncü bölge, malzemenin kauçuk rejime geçtiği bölgeyi gösterir. Orijinal malzemenin depolama modülü değeri yaşlandırılmış malzemelere kıyasla daha büyüktür. Ayrıca, camsı rejimden kauçuk rejime geçiş ilk olarak kaplanmamış malzemede meydana gelirken daha sonra sarı ile siyah jelkot ile kaplanmış, sarı jelkot kaplanmış ve orijinal malzemede meydana gelmiştir. Bu sonuç, orijinal malzemenin sıcaklığı arttırılırken kolay moleküler zincir hareketini durdurabilen daha stabil bir karakter gösterdiğini ortaya koymaktadır. Saba, Jawaide, Alothman ve Paridah (2016), yüksek çapraz bağ yoğunluğuna sahip termoset polimerinin çok daha büyük bir depolama modülüne sahip olduğunu, düşük çapraz bağ yoğunluğuna sahip polimerin ise daha küçük bir depolama modülüne sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, bağlar arasındaki zincir kesilmesinin yüksek sıcaklık ve neme maruz bir polimerde en önemli yaşlanma olaylarından biri olduğu bilinmektedir (Martin, 2008).

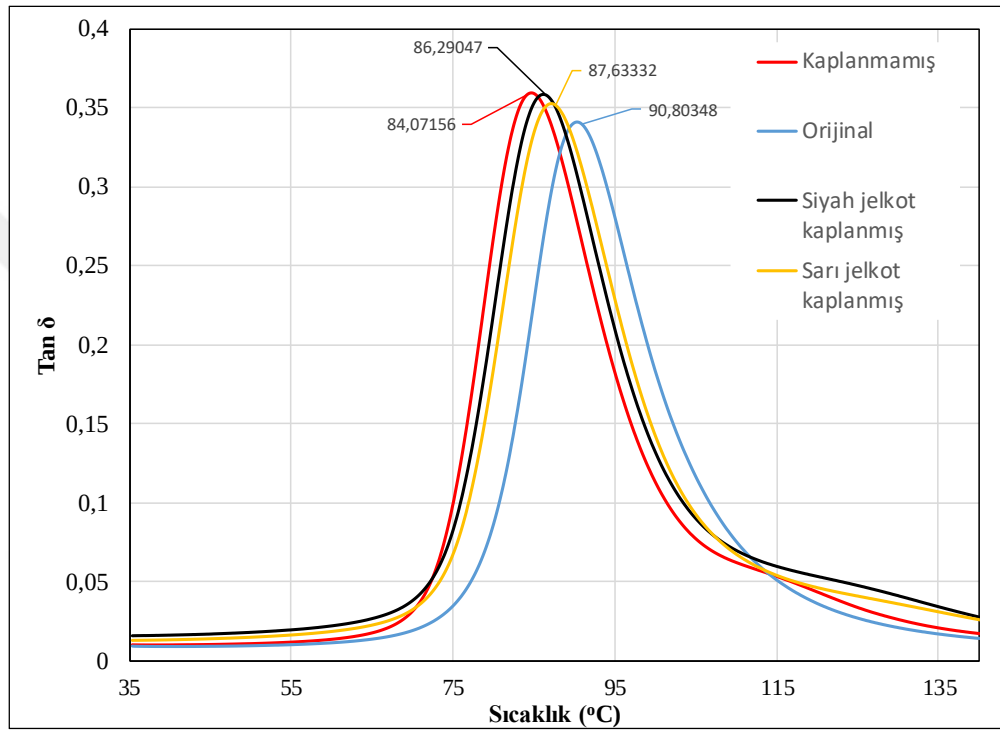


Şekil 3.36 Dört farklı kompozit malzemeye ait depolama modülü-sıcaklık eğrileri (Dogan, Arman ve Ozdemir, 2018)

Tan δ 'ın sıcaklık ile değişimi Şekil 3.37'de verilmiştir. Tan δ boyutsuz bir sayı olup kayıp modülün depolama modülüne oranıdır. Mekanik sönümleme faktörü olarak ifade edilir. Yüksek bir Tan δ değeri elastik olmayan gerinim bileşenine sahip bir malzemenin göstergesidir. Düşük Tan δ değeri ise yüksek elastik bir yapının olduğuna işaret eder. Elyaf ve matris ara yüzeyindeki yapışma kabiliyetinin artması, elyaf ve matris ara yüzündeki moleküler zincirlerin hareketliliği azalttığı için sönümleme faktöründe azalmasını sağlayacaktır. Böylece, kayıp modülün değeri düşüp, depolama modülünün değeri artacaktır (Zhang, Wang ve Wu, 2012). Şekilde görüleceği üzere yaşlandırılmış malzemelerin Tan δ değeri artmıştır. Bu da elyaf ve matris arayüzeyindeki yapışma kabiliyetinin düştüğünü gösterir.

DMA analizi sonucunda elde edilen Tan δ 'nın tepe noktasındaki sıcaklık değeri camsı geçiş sıcaklığı (T_g) olarak ifade edilmektedir (Geethamma, Kalaprasad, Groeninckx ve Thomas, 2005). Camsı geçiş sıcaklığı, termoset polimerin camsı, rijit

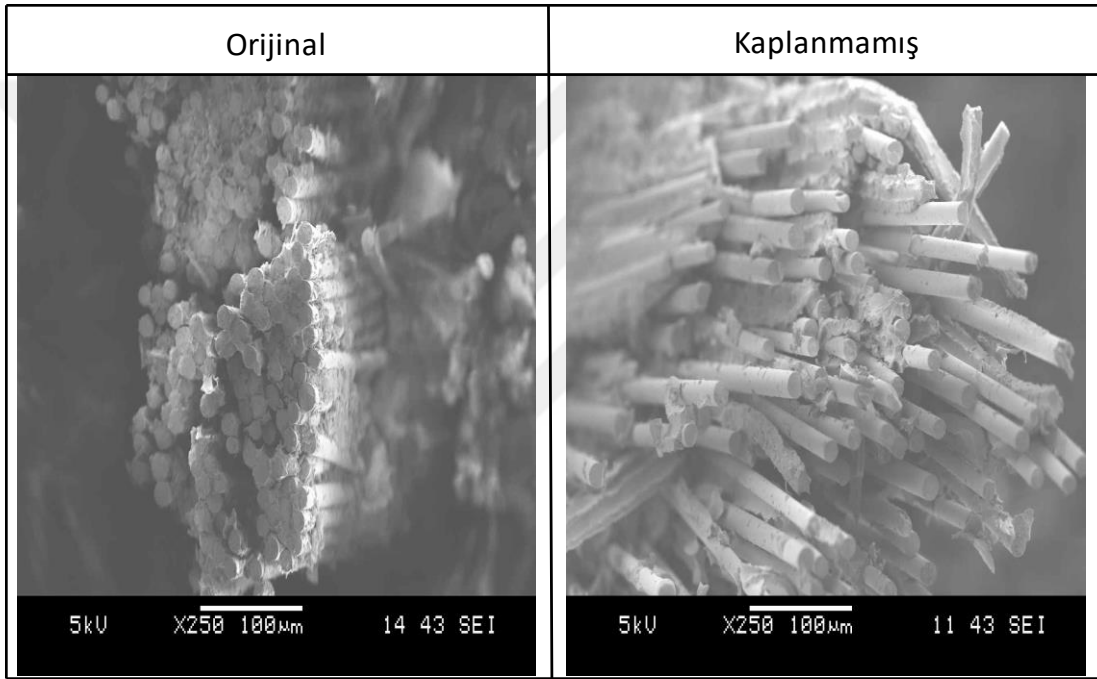
veya sert durumdan daha yumuşak, esnek veya kauçuksu bir hale dönüştüğü sıcaklık aralığıdır. Orijinal malzemenin camsı geçiş sıcaklığı yaklaşık olarak 90 °C iken sarı jelkot kaplanmış, siyah jelkot kaplanmış ve kaplanmamış malzemelerin camsı geçiş sıcaklıkları sırasıyla yaklaşık olarak 88, 86 ve 84 °C olarak elde edilmiştir. Kaplanmamış malzemenin camsı geçiş sıcaklığı orijinal malzemeye göre yaklaşık olarak %7 oranında düşmüştür.



Şekil 3.37 Dört farklı kompozit malzemeye ait tanδ-sıcaklık eğrileri (Dogan, Arman ve Ozdemir, 2018)

Şekil 3.38’de çekme testleri sonunda elde edilen hasarlı orijinal ve kaplanmamış malzemelerin taramalı elektron mikroskopik (SEM) görüntüleri gösterilmektedir. Orijinal malzemenin SEM fotoğrafına bakıldığında, yapısal bütünlüğün korunduğu açıkça görülmektedir. Öte yandan, kaplanmamış numunelerin kırılma yüzeylerinde, yaşlanmamış numuneye kıyasla çarpıcı bir değişiklik göstermektedir. Kaplanmamış numunede elyaf ve matris malzemesi arasında boşluklar oluşurken elyafları bir arada tutan matris malzemesi önemli ölçüde azalmıştır. Ayrıca, elyaf kırılmaları meydana gelmiştir. Bu yapısal değişiklik elyaf ve matris arayüzeyinde varolan yapışma kabiliyetinin düştüğünü açıkça göstermektedir. Matris, elyaflara kıyasla daha fazla

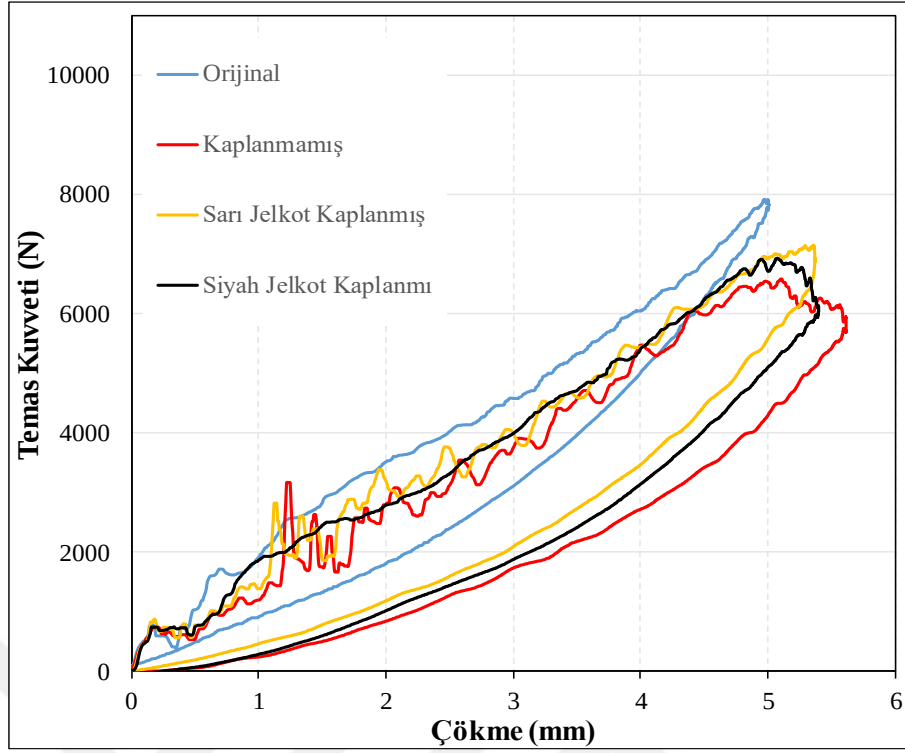
nem emer. Nem emilimindeki uyumsuzluk, elyaflar ve matris arasındaki üniform olmayan hacimsel genişmeden dolayı lokal gerilmelere neden olur (Shettar, Chaudhary, Hussain, Kini ve Sharma, 2018). Bu gerilme değerleri, arayüzey arasındaki yapışma mukavemetinin üzerine çıktığında ise arayüzey yapışmasında hasar meydana gelecektir. Elyaf ile matris arasındaki arayüzey yapışma kabiliyetinin azalması ile $\tan \delta$ değerinde artış meydana geldiği yukarıda bahsedilmişti. Kaplanmamış malzemenin $\tan \delta$ değerindeki artışın nedeni olan elyaf ve matris arayüzey yapışma kabiliyetindeki düşüş SEM fotoğraflarında açıkça gözükmemektedir.



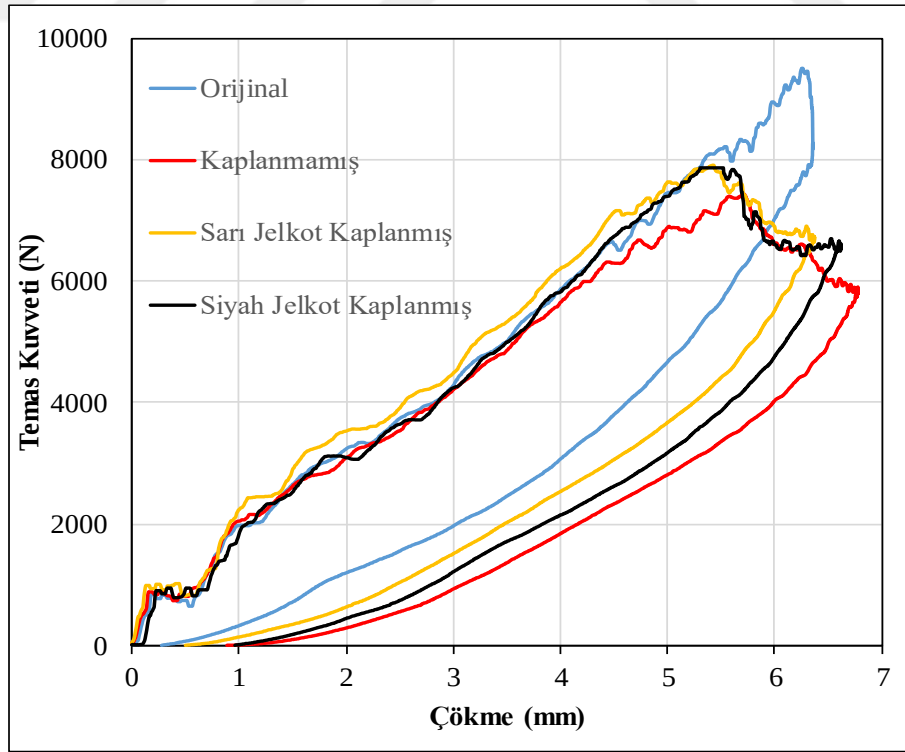
Şekil 3.38 Orijinal ve kaplanmamış malzemelere ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları (Dogan, Arman ve Ozdemir, 2018)

3.3.5 Düşük Hızlı Darbe Testi Sonuçları

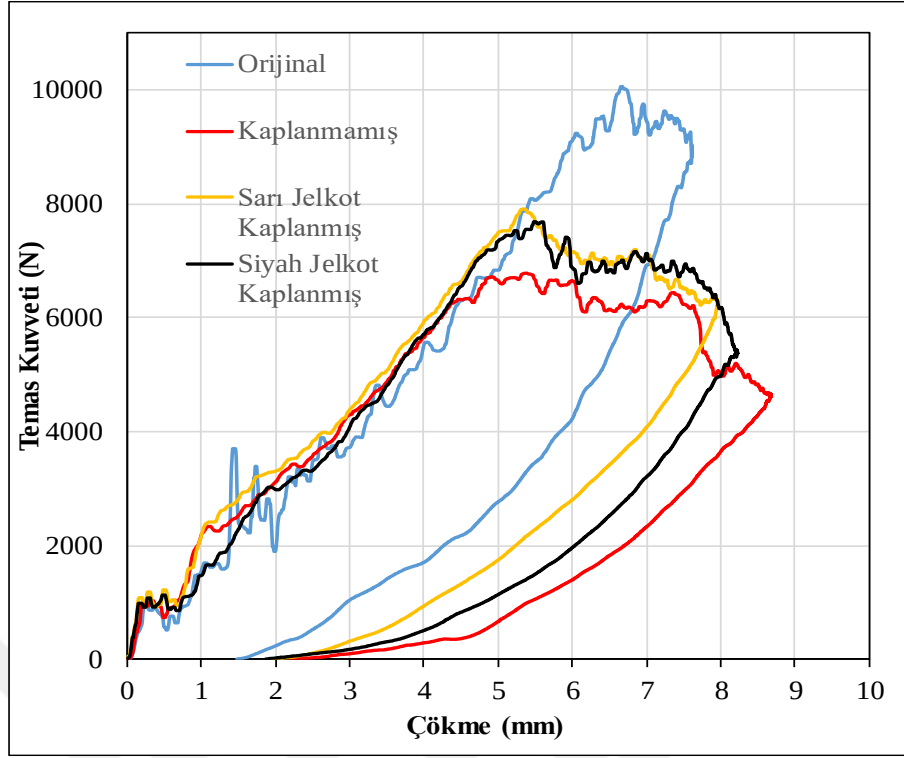
Kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe performansları genellikle temas kuvveti çökme eğrileri sayesinde belirlenir. Bu bağlamda, orjinal, kaplanmamış, sarı jelkot ve siyah jelkot kaplanmış örneklerin farklı darbe enerjileri için temas kuvveti-çökme eğrileri Şekil 3.39-3.44 arasında verilmiştir. Bu şekillerde yer alan orijinal, kaplanmamış, sarı ve siyah jelkot kaplanmış malzemelerin içeriği bölüm 3.3.1 de detaylı olarak verilmiştir.



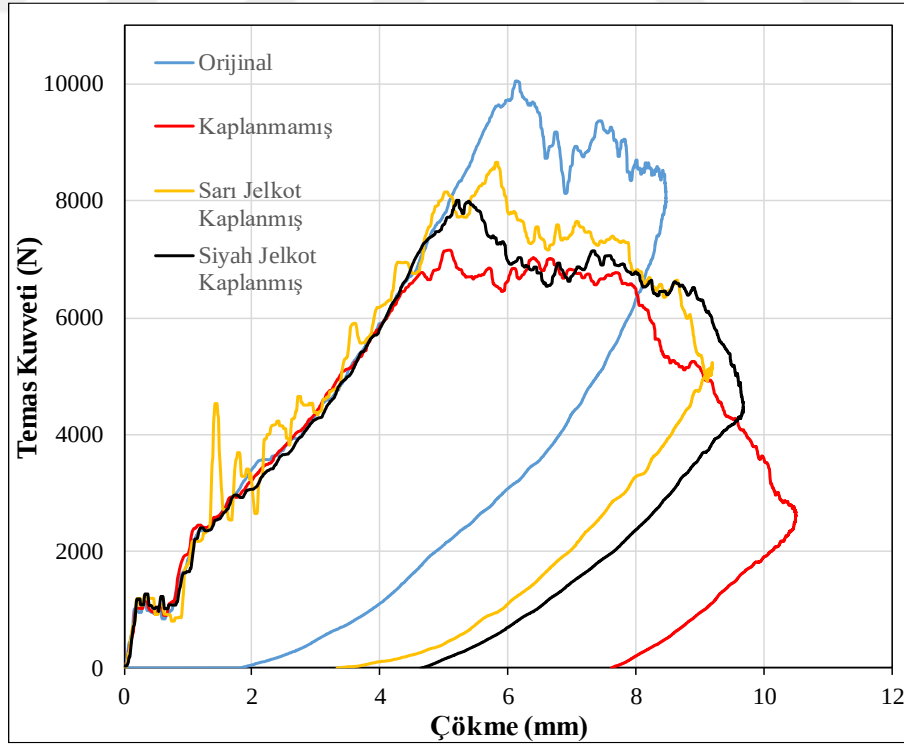
Şekil 3.39 Dört farklı malzeme için 20 Joule darbe enerjisi esnasında elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri (Dogan, Arman ve Ozdemir, 2018)



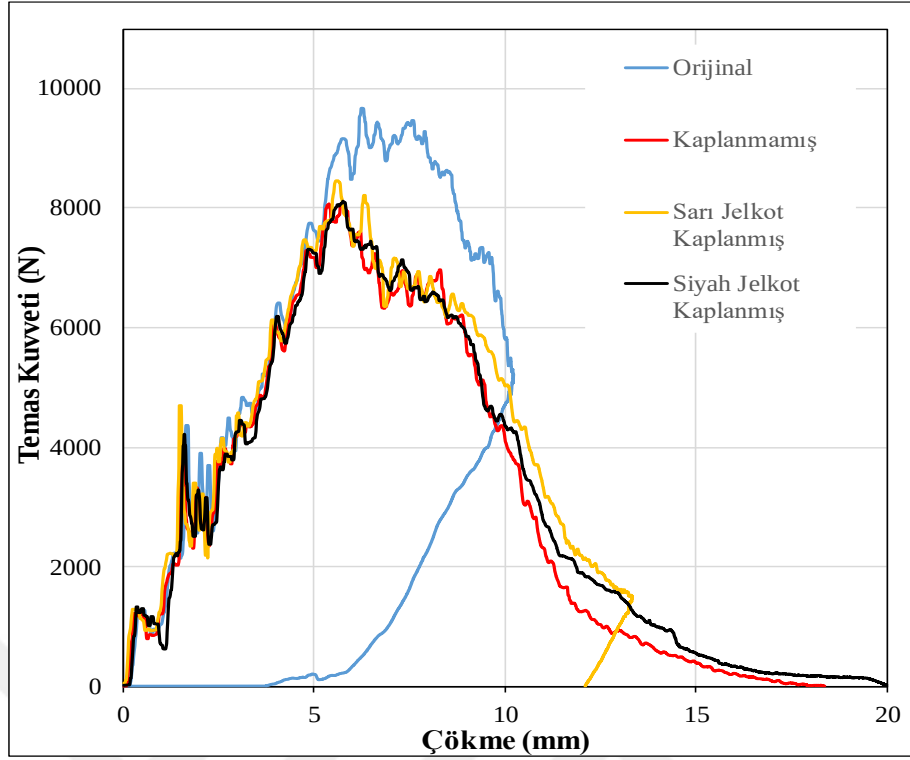
Şekil 3.40 Dört farklı malzeme için 30 Joule darbe enerjisi esnasında elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri



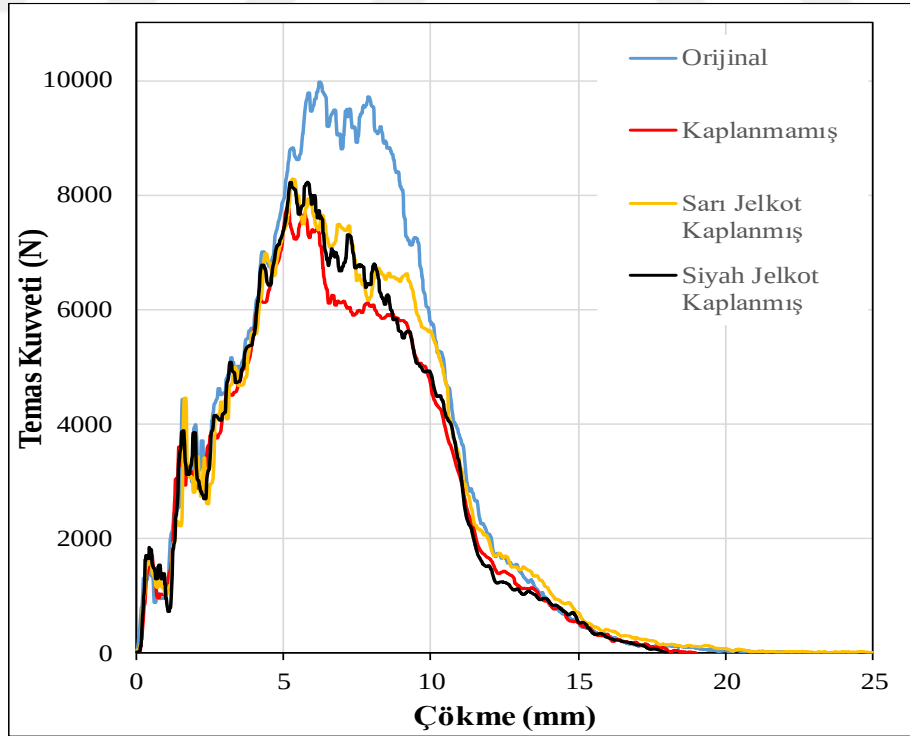
Şekil 3.41 Dört farklı malzeme için 40 Joule darbe enerjisi esnasında elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri



Şekil 3.42 Dört farklı malzeme için 50 Joule darbe enerjisi esnasında elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri



Şekil 3.43 Dört farklı malzeme için 60 Joule darbe enerjisi esnasında elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri (Dogan, Arman ve Ozdemir, 2018)



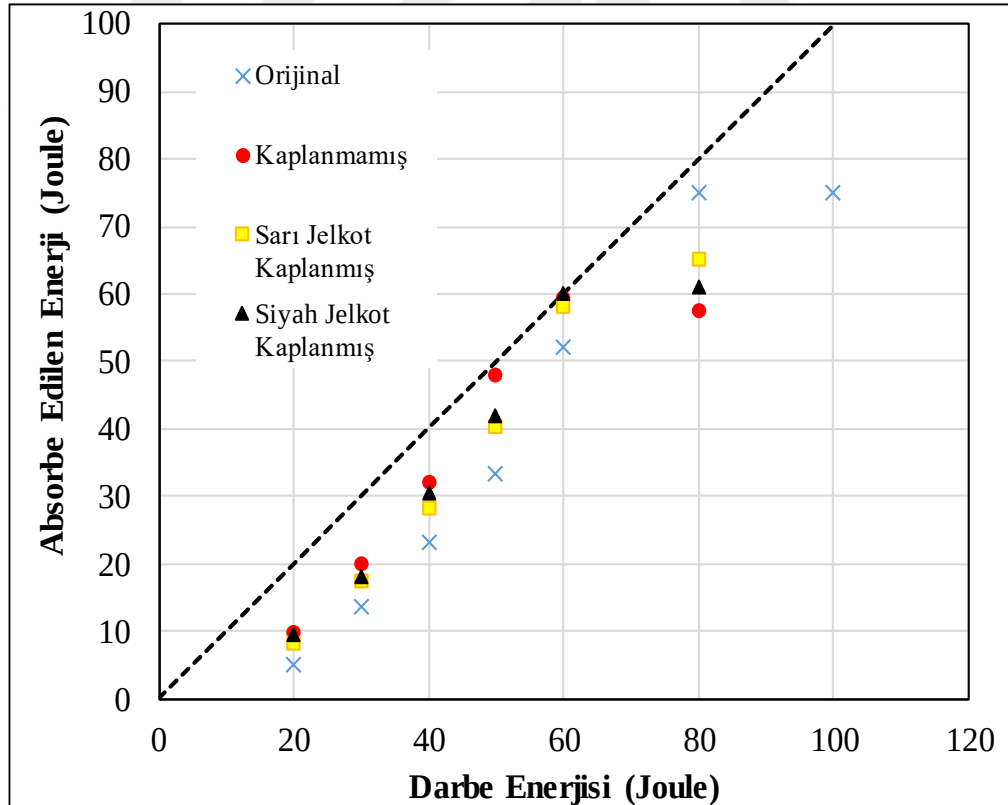
Şekil 3.44 Dört farklı malzeme için 80 Joule darbe enerjisi esnasında elde edilmiş temas kuvveti-çökme eğrileri (Dogan, Arman ve Ozdemir, 2018)

Şekil 3.39, 3.40 ve 3.41’da sırasıyla 20, 30 ve 40 Joule darbe enerjileri için dört farklı malzemeye ait temas kuvveti çökme eğrileri görülmektedir. Bu darbe enerjilerinde şekilde görüleceği üzere bütün eğriler kapalı formdadır. Bu durum geri sekme olayı olarak adlandırılmaktadır. Yani darbe tertibatı, kompozitin üst yüzeyine çarptıktan sonra ilk durumuna geri döner. Ayrıca, maksimum temas kuvveti göz önüne alındığında bütün darbe enerjileri için, orijinal malzemede meydana gelen maksimum temas kuvveti yaşlandırılmış malzemelere göre daha yüksektir. Bununla birlikte jelkot ile kaplanıp yaşlandırılan malzemelerin maksimum temas kuvvetleri kaplanmamış malzemeye göre daha büyüktür. Maksimum çökme miktarına bakıldığında ise, maksimum temas kuvvetinin tam tersi bir trend meydana gelmiştir.

Darbe enerjisi 50 Joule’e yükseltildiğinde, Şekil 3.42, kaplanmamış malzeme hariç diğer malzemelerde önceki enerjilerde olduğu gibi geri sekme olayı oluşurken, kaplanmamış malzemede penetrasyon (saplanma) durumu meydana gelmiştir. Şekil 3.43’de, 60 Joule darbe enerjisi için malzemelerin temas kuvveti çökme eğrileri verilmiştir. Temas kuvvetin arttığı kısmın eğimi darbe eğilmi rijitliği olarak adlandırılmaktadır. Eğrilerin darbe eğilme rijitliğine bakıldığında, dört malzeme türü içinde birbirine benzerdir. Bununla birlikte, eğrilerin yükün boşaldığı kısmı olarak nitelendirilen ikinci kısımlarında ise üç farklı farklı durum söz konusudur. Burada, orijinal malzemede geri sekme olayı gerçekleşmiştir. Sarı jelkot ile kaplanıp yaşlandırılan malzemede penetrasyon olayı gerçekleşmiştir. Penetrasyon olayında, çarpma tertibatı, kompozit malzemenin üst yüzeyini delip geçer ve kompozit malzemenin içerisinde kalır. Kaplanmamış ve siyah jelkot ile kaplanıp yaşlandırılan malzemede meydana gelen delinme olayında ise çarpma tertibatı malzemeyi tamamen delip geçmektedir. Darbe enerjisi 80 Joule’e çıkarıldığında ise, Şekil 3.44’te görüldüğü gibi bütün malzemelerde açık eğri, yani delinme meydana gelmiştir.

Enerji profil diyagramı, bir kompozit malzemenin enerji absorbe edebilme kapasitesi hakkında önemli ipuçları vermektedir. Bu sebeple, Şekil 3.45’de dört farklı malzemeye ait enerji profil diyagramı verilmiştir. Burada kesikli çizgi ile gösterilen eğri eş enerji eğrisi olarak adlandırılmaktadır. Birçok verinin eş enerji

eğrisinin altında olduğu görülmektedir. Absorbe edilen enerjinin bu eş enerji eğrisi ile ilk buluştuğu nokta penetrasyon eşiği olarak adlandırılmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi geri sekme olayının meydana geldiği darbe enerjisi seviyelerinde orijinal malzemenin absorbe ettiği enerji miktarı diğer malzemelere oranla daha düşüktür. Bu da orijinal malzemede daha az hasarın meydana geldiğini göstermektedir. Çünkü aynı darbe enerjisinde absorbe edilen enerji miktarı arttıkça hasarın arttığı anlaşılmaktadır. 20, 30 ve 40 Joule darbe enerjilerinde hiçbir malzemede penetrasyon veya delinme meydana gelmemiştir. Darbe enerjisi 50 Joule'e çıkarıldığında kaplanmamış malzemeye ait eğri eş enerji eğrisi ile buluşmuştur ve bu da kaplanmamış malzemenin penetrasyon eşiğidir. Bütün malzemelerin penetrasyon eşiği bulunamamıştır. Ancak, 80 joule darbe enerjisine bakıldığında bütün malzemelerde delinme olayı gerçekleşmiştir. Bu enerji seviyesinde malzemelerin absorbe ettikleri enerji değerleri, malzemenin delinme eşiğini verir.



Şekil 3.45 Dört farklı kompozit malzemeye ait enerji profil diyagramları.(Dogan, Arman ve Ozdemir, 2018)

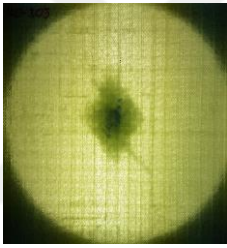
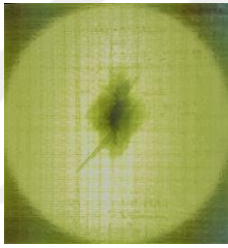
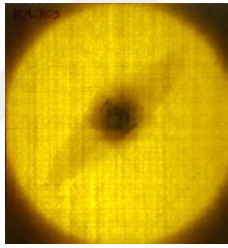
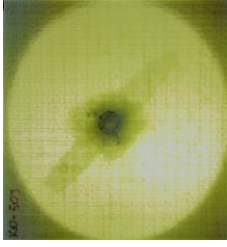
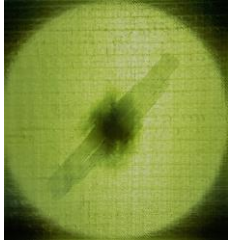
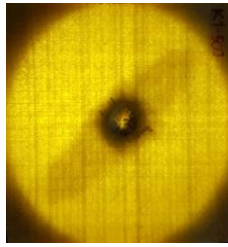
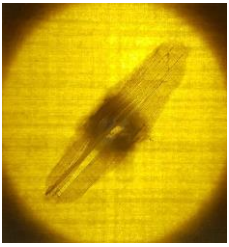
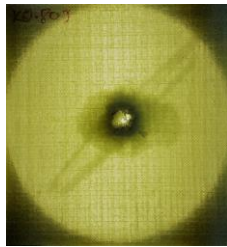
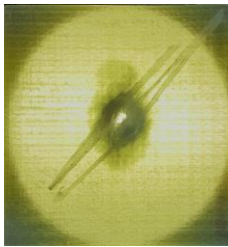
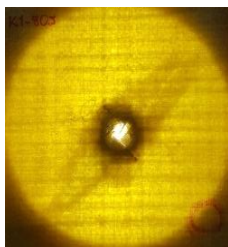
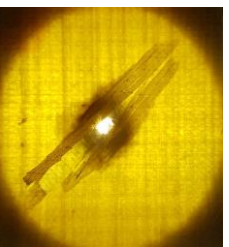
Dört farklı malzemeye uygulanan 20, 30, 40, 60 ve 80 Joule darbe enerjileri ile elde edilen maksimum temas kuvveti, maksimum çökme, temas süreleri ve absorbe edilen enerji miktarları Tablo 3.3’de verilmiştir. Maksimum temas kuvveti, bütün malzelerde bir darbe enerjisi değerine kadar arttıktan sonra sabit kalmış veya hafif bir miktar azalmıştır. Örneğin, orijinal malzemenin maksimum temas kuvveti 20 Joule darbe enerjisinde 7919 N iken, bu değer 30 Joule darbe enerjisinde 9513 N olmuştur ve 40 Joule darbe enerjisinde de 10060 N olarak elde edilmiştir. Daha sonraki darbe enerjilerinde büyük bir değişiklik sergilememiştir. Malzeme 40 Joule darbe enerjisinde taşıyabileceği maksimum yükü taşımaktadır ve bu kuvvet değerinden sonra malzemede kuvvet artışı yerine malzemede hasarlar oluşmaya başlayacaktır. Bu hasarlar ile birlikte darbe testi esnasında kuvvet sabit kalırken maksimum çökme değerleri artmaya devam edecektir. Orijinal malzemenin maksimum temas kuvveti değeri bütün darbe enerjilerinde diğer üç malzemeye göre yüksek elde edilmiştir. Ancak, maksimum çökme değerlerine bakıldığında bu davranışın tam tersi bir durum söz konusudur. 20, 30, 40, 50 Joule darbe enerjisi testlerinde kaplanmamış malzemede oluşan maksimum çökme değeri diğer üç malzemeye oranla daha yüksektir. Bu dört darbe enerjisindeki maksimum çökme değerleri büyükten küçüğe doğru sırasıyla, kaplanmamış, siyah jelkot kaplanmış, sarı jelkot kaplanmış ve orijinal malzemede meydana gelmiştir. Bu da gösteriyor ki, yaşlanma süreci ile malzemenin rijitliğinde düşüş meydana gelmiştir ve aynı hasarlar daha düşük darbe enerjisinde ve kuvvette oluşmuştur. Bununla birlikte, malzemelerde delinmeye neden olan darbe enerjilerinde maksimum çökme değerleri birbirine çok yakındır. 60 Joule darbe enerjisinde siyah jelkot kaplanmış ve kaplanmamış malzemelerin maksimum çökme değerleri birbirine çok yakındır. Bu enerji seviyesinde her iki malzemede de delinme meydana geldiği daha önce dile getirilmişti. Bütün malzemelerde delinmenin meydana geldiği 80 Joule darbe enerjisinde ise dört malzemenin maksimum çökme değerleri yaklaşık 18 mm olarak ölçülmüştür. Temas süreleride çökme değerlerine benzer şekilde elde edilmiştir. Malzeme ile darbe aparatı arasındaki en uzun temas süreleri penetrasyon veya delinme olayının gerçekleştiği darbe enerjilerinde meydana gelmiştir ve bu darbe enerjisinden sonra azalmıştır. Orijinal, kaplanmamış, sarı ve siyah jelkot kaplanmış,

numunelerin delinme eşik enerjileri sırası ile yaklaşık 75, 57, 65 ve 61 Joule olarak bulunmuştur.

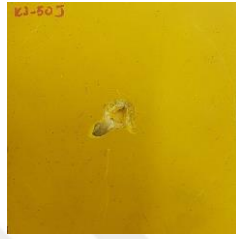
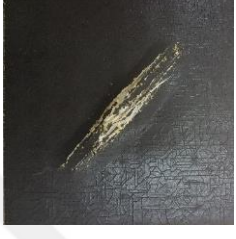
Tablo 3.3 Farklı darbe enerjilerine ve malzemelere ait veriler

20 Joule Darbe Enerjisi				
	Maksimum Temas Kuvveti (N)	Maksimum Çökme (mm)	Temas Süresi (ms)	Absorbe Edilen Enerji (Joule)
Orijinal	7919	5,01	5,94	5,05
Kaplanmamış	6584	5,61	6,59	9,74
Sarı jelkot kaplanmış	7154	5,37	6,67	8,21
Siyah jelkot kaplanmış	6933	5,40	6,92	9,40
30 Joule Darbe Enerjisi				
	Maksimum Temas Kuvveti (N)	Maksimum Çökme (mm)	Temas Süresi (ms)	Absorbe Edilen Enerji (Joule)
Orijinal	9513	6,35	6,20	13,63
Kaplanmamış	7438	6,70	7,26	19,92
Sarı jelkot kaplanmış	7914	6,37	6,73	17,37
Siyah jelkot kaplanmış	7871	6,61	6,80	18,13
40 Joule Darbe Enerjisi				
	Maksimum Temas Kuvveti (N)	Maksimum Çökme (mm)	Temas Süresi (ms)	Absorbe Edilen Enerji (Joule)
Orijinal	10060	7,62	6,26	23,13
Kaplanmamış	6780	8,68	8,68	32,11
Sarı jelkot kaplanmış	7911	7,96	7,32	28,31
Siyah jelkot kaplanmış	7685	8,23	7,91	30,35
50 Joule Darbe Enerjisi				
	Maksimum Temas Kuvveti (N)	Maksimum Çökme (mm)	Temas Süresi (ms)	Absorbe Edilen Enerji (Joule)
Orijinal	10054	8,47	6,79	33,40
Kaplanmamış	7157	10,51	8,97	48,03
Sarı jelkot kaplanmış	8663	9,20	7,95	40,40
Siyah jelkot kaplanmış	8011	9,68	7,98	42,15
60 Joule Darbe Enerjisi				
	Maksimum Temas Kuvveti (N)	Maksimum Çökme (mm)	Temas Süresi (ms)	Absorbe Edilen Enerji (Joule)
Orijinal	9669	10,22	8,22	52,08
Kaplanmamış	8107	15,35	6,85	59,22
Sarı jelkot kaplanmış	8456	13,33	10,31	58,00
Siyah jelkot kaplanmış	8113	15,46	7,26	60,58
80 Joule Darbe Enerjisi				
	Maksimum Temas Kuvveti (N)	Maksimum Çökme (mm)	Temas Süresi (ms)	Absorbe Edilen Enerji (Joule)
Orijinal	9972	18,02	4,69	75,07
Kaplanmamış	7770	17,99	3,71	57,31
Sarı jelkot kaplanmış	8283	18,25	4,33	65,21
Siyah jelkot kaplanmış	8220	18,01	3,85	61,03

Şekil 3.46 ve Şekil 3.47’de, orijinal, kaplanmamış, sarı ve siyah jelkot ile kaplanmış malzemelerin 30, 50 ve 80 Joule darbe enerjileri ile yapılan testler sonrasında elde edilmiş fotoğrafları verilmiştir. Burada ön yüzey, darbe aparatının kompozit malzemeye temas ettiği yüzeyi göstermektedir. Şekil 3.46’da verilen orijinal ve kaplanmamış malzemelere bakıldığında, 30 Joule darbe enerjisinde orijinal malzemenin arka yüzeyinde herhangi bir saçılma meydana gelmezken, kaplanmamış malzemenin arka yüzeyinde elyafların saçıldığı açıkça gözükmemektedir. Ayrıca, küçük darbe enerjisinde, matris çatlaklarıyla birlikte baskın hasar modları delaminasyon ve girinti iken, yüksek enerjilerde elyaf kırılması ve arka yüzeyde oluşan saçılma birinci derece hasar türleridir.

	Orijinal		Kapanmamış	
	Ön Yüzey	Arka Yüzey	Ön Yüzey	Arka Yüzey
30 Joule				
50 Joule				
80 Joule				

Şekil 3.46 30, 50 ve 80 Joule darbe enerjileri sonrasında orijinal ve kaplanmamış malzemelerin fotoğrafları (Kişisel arşiv, 2019)

	Sarı Jelkot Kaplanmış		Siyah Jelkot Kaplanmış	
	Ön Yüzey	Arka Yüzey	Ön Yüzey	Arka Yüzey
30 Joule				
50 Joule				
80 Joule				

Şekil 3.47 30, 50 ve 80 Joule darbe enerjileri sonrasında sarı ve siyah jelkot kaplanmış malzemelerin fotoğrafları (Kişisel arşiv, 2019)

3.4 Çevresel Koşuların Farklı Jelkot Kalınlığı İle Kaplanmış Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzeme Üzerindeki Etkisi

3.4.1 Giriş

Bu bölümde jelkot kalınlığının E-cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin hidrotermal yaşlanma sonrası çekme ve tabakalar arası kayma mukavemetindeki değişime etkisi incelenmiştir. Kompozit malzemeler farklı kalınlıkta jelkot malzeme ile püskürtme yöntemi ile kaplanmıştır. Malzemelerin çekme mukavemetindeki ve su absorpsiyonu değişimleri incelenmiştir. Kompozit malzemeler vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Takviye malzemesi olarak 300 gr/m² alansal yoğunluğa sahip tek yönlü cam elyaf kumaş ve matris malzemesi olarak Huntsman Araldite Ly 1564 epoksi ile Aradur 3486

sertleştirici kullanılmıştır. Epoksi ve sertleştirici karışımının ağırlıkça oranı üçe birdir. Bütün malzemeler pakettendikten sonra 1 bar basınç altında reçine emdirilmiştir. Kompozit malzemeler 80 °C sıcaklıkta 8 saat boyunca kürlendikten sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Kompozit malzeme 8 tabaka tek yönlü ([0]₈) olarak üretilmiştir. Kompozit malzemenin ortalama kalınlığı 2,1 mm'dir. Kompozit malzemeler hızlandırıcılı Poliya polijel P-211 püskürtme tipi jelkot kullanılarak kaplanmıştır. 100 gram jelkot için 10 gram pigment, 1 gram parafin ve 1 gr sertleştirici katılarak uygun renkte karışım elde edilmiştir. Daha sonra hava basınçlı boya tabancası ile püskürtme işlemi yapılarak kompozit malzemeler t₁=50±9, t₂=150±11 ve t₃=300±8 µm olmak üzere üç farklı kalınlıkla kaplanmıştır. Kaplanmamış ve kaplanan kompozit malzemeler 80 °C sıcaklık ve %70 nem oranı altında 300, 600, 900 ve 1200 saat bekletilmiştir. Kompozit malzemelerin kütledeki ve çekme mukavemetindeki değişimler elde edilmiştir.

3.4.2 Kütle Değişimi

Şekil 3.48'de epoksi, jelkot, kaplanmamış kompozit malzeme ve farklı jelkot kalınlıkları ile kaplanmış kompozit malzemelerin kütlelerinin 80 °C sıcaklık ve %70 nem altında zaman bağılı değişimi verilmiştir. İlk 60 saat sonunda bütün malzelerin kütlelerinde hızlı ve doğrusal bir artış meydana gelmiştir. Daha sonra epoksi, kaplanmamış ve t₁ kalınlıkta jelkot ile kaplanmış malzemelerin kütle artış hızı nispeten yavaşlamasına rağmen artmaya devam etmiştir. Jelkot, t₂ ve t₃ jelkot kalınlığına sahip malzemelerde ise 130 ile 350 saatlik yaşlandırma süresi arasında, kütle değişimi sabit kalmış, 350 saatten sonra azalmaya başlamıştır. Kütle değişimi 1200 saat sonunda yaklaşık %1,88 ile en fazla saf epoksida meydana gelmiştir. Kaplanmamış malzemenin kütle artışı saf epoksiye benzer olmakla birlikte, kaplanmamış malzemede bulunan fiber oranı nedeniyle nem tutma oranı daha azdır. Çünkü, cam elyaf epoksi malzemeye göre daha az nem tutmaktadır. Kaplanmamış ve t₁ ile kaplanan malzemelerin kütle değişim yaklaşık olarak aynıdır. Koşullandırma süresi sonunda jelkot, t₂ ve t₃ kalınlıkları ile kaplanan malzemelerde ise daha farklı bir davranış meydana gelmiştir. Bu davranış, bir su difüzyon prosesi ile ilişkili olarak başlangıçtaki hızlı bir kütle artışı ve ardından maksimum değere ulaşan ikinci bir

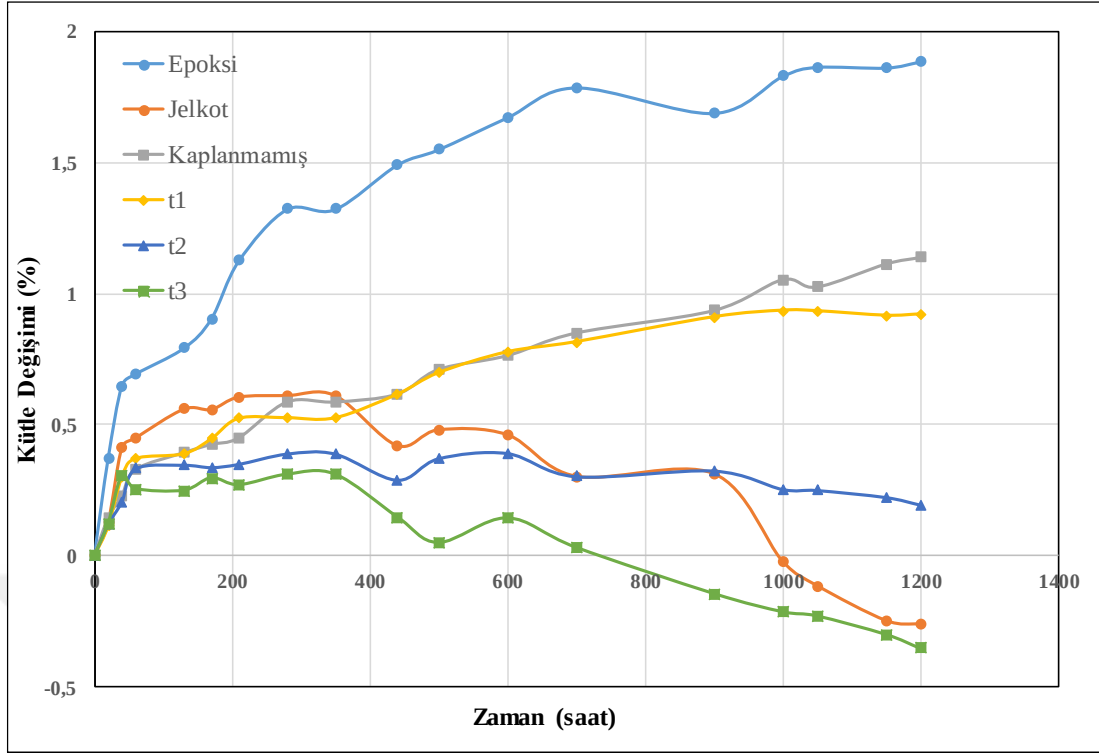
kütle artışı ve daha sonra bir kütle kaybı ile karakterize edilebilir. Jelkot, t2 ve t3 ile kaplanmış malzemelerin kütleleri ilk 60 saatte hızlı bir artış, 60 ile 400 saat arasında sabit kalmış ve daha sonra azalmaya başlamıştır. Tüm bu süreç üç aşamada açıklanabilir:

I. Başlangıçta, kütle değişimi, su moleküllerin boşluklara ilerlemesi ile belirli bir seviyeye ulaşana kadar hızlı olarak artmıştır (0-50 saat). Bu aşamada difüzyon ile hızlı bir kütle artışı olmaktadır.

II. İkinci aşamada, kütle değişimi neredeyse sabit kalmıştır (50-400 saat). Bu aşamada difüzyonun yavaşlamasının yanı sıra jelkotun çözünmesi ile birlikte bir düşüş meydana gelebilmektedir.

III. Son aşamada ise malzemelerin kütlelerinde düşüş meydana gelmiştir (400-1200 saat). Bu aşamada difüzyon olayları sonlanırken, malzemenin çözülmesi devam etmektedir ve böylece kütlede düşüş meydana gelmektedir.

Hidrolitik bozunma işlemi, çapraz bağlanma yoğunluğunun azalması ve düşük moleküler ağırlıklı ürünlerin çözünmesi ile karakterize edilmesidir (Gautier, Mortaigne, Bellenger ve Verdu, 2000; Capiel, Uicich, Fasce ve Montemartini, 2018). Kütle değişim sonuçları, polimerlerin su ile temas halindeki davranışını açıklamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Difüzyon, hidroliz ve çözünme aynı anda ve birleşik süreçlerdir. Su polimer ağına yayılırken, ester grupları ile reaksiyona girebilir. Bu reaksiyon hidrofilik gruplar üretir ve çapraz bağlama yoğunluğunu azaltır. Ayrıca, polimer kompozit malzemelerin yüksek sıcaklıklara maruz kalması ekstra bir kurlenme ile birlikte çapraz bağ yoğunluğunun artmasını sağlar. Ancak, kompozitlerin yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz kalması, zincir parçalanması ve ortaya çıkan küçük moleküllerin uçması nedeniyle reçinede ağırlık kaybına neden olabilir. Kütle kaybına neden olan bir başka durum ise oksijen varlığında, oksidasyon ürünlerinin oluşumudur (Akay ve Spratt, 2008).

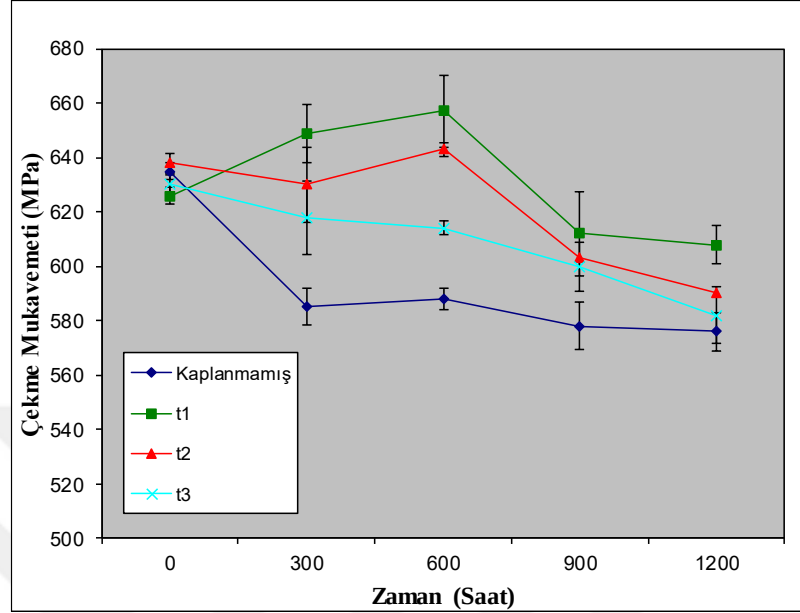


Şekil 3.48 Farklı kalınlıkta jelkot ile kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin kütlelerinin yaşlandırma koşulu altında zamanla değişimi

3.4.3 Çekme Testi Sonuçları

Şekil 3.49’da farklı kompozit malzemelerin elyaf doğrultusundaki çekme mukavemetlerinin zamanla değişimi verilmiştir. Yaşlandırılmadan önce bütün numunelerin beklendiği gibi çekme mukavemetleri hemen hemen eşittir ve ortalama 635 MPa’dır. İlk 300 saat sonunda kaplanmamış malzemenin çekme mukavemetinde %8’e yakın bir düşüş meydana gelmiştir. Daha sonraki yaşlandırma sürelerinde bu düşüşün miktarı azalsa da çekme mukavemeti düşmeye devam etmiştir ve 1200 saat sonunda çekme mukavemeti 576 MPa olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte t1 jelkot kalınlığı ile kaplanan malzemede 600 saat sonunda çekme mukavemetinde %3’e yakın artış meydana gelmiştir. Ancak, çekme mukavemeti 1200 saat sonunda yaklaşık % 3 oranında düşmüştür. İlk 600 saatte jelkot malzemeyi dış etkenlere karşı korurken aynı zamanda sıcaklık ile birlikte kürleşme meydana gelmiş olabilir. Böylece, çarpraz bağ yoğunluğundaki artış ile birlikte mekanik özellikler iyileşmiştir. Benzer davranış 150 μ m (t2) jelkot kalınlığına sahip kompozit

malzemede görülmektedir. 300 μm (t3) jelkot kalınlığına sahip malzemede ise 1200 saat sonunda %7 oranında bir düşüş meydana gelmiştir.



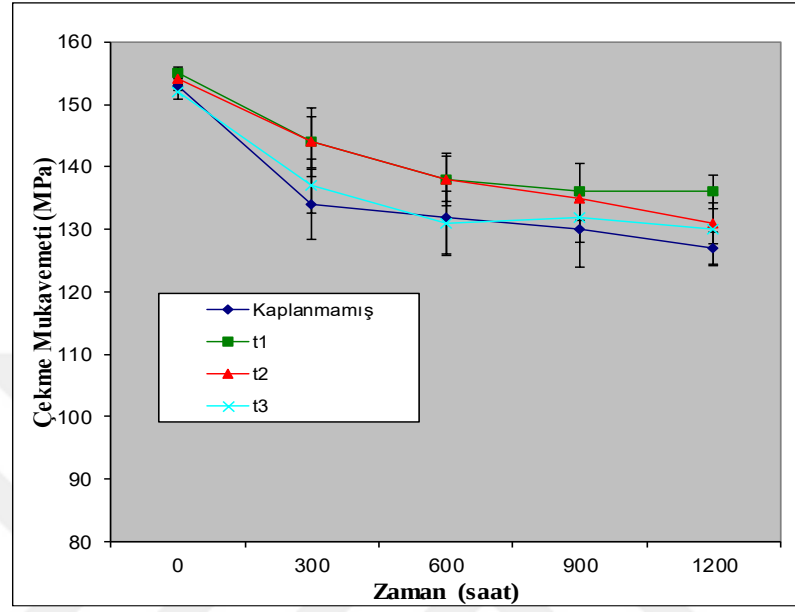
Şekil 3.49 Elyaf doğrultusundaki çekme mukavemetinin zamanla değişimi

Şekil 3.50’de dört farklı malzemeye ait elyafa dik doğrultudaki çekme mukavemetindeki değişim verilmiştir. Şekilde görüleceği üzere bütün malzemelerde düşüş meydana gelmiştir. En çok düşüş kaplanmamış ve 300 μm jelkot kalınlığına sahip malzemelerde meydana gelmiştir. 50 ve 150 μm jelkot kalınlığına sahip malzemelerin çekme mukavemetinin yaşlandırma süresi ile değişimi neredeyse aynıdır.

Yapılan deneyler sonunda jelkot kalınlığının hidrotermal yaşlanma üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Tüm jelkot kalınlıkları yaşlandırma işlemini yavaşlatırken, daha düşük kalınlığa sahip malzemenin çekme mukavemetindeki düşüş daha az olmuştur. Bu davranışın nedeni aşağıdaki gibi açıklanabilir;

- Daha ince jelkot ile kaplanan malzeme ısıyı daha iyi iletmediği için malzemede daha çok tabakada sonradan kürlenme işlemi meydana gelmesi
- Kaplama malzemesi ile kompozit malzemenin termal genleşme katsayıları farklıdır. Kaplama malzemesinin kalınlığının artması ile birlikte

bu uyuşmazlık sıcaklıkla artacaktır ve mikro çatlaklar daha hızlı oluşacaktır. Ayrıca meydana gelen termal gerilmeden dolayı kaplama malzemesi daha hızlı dökülecektir.



Şekil 3.50 Elyafa dik doğrultudaki çekme mukavemetinin zamanla değişimi

BÖLÜM DÖRT

SONUÇLAR

Bu tez kapsamında, öncelikle E-cam ve karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemede elyaf türünün ve elyaf istifleme diziliminin hidrotermal ortam yaşlanması üzerindeki etkisi, tezin ikinci aşamasında yaşlandırma ortamının sıcaklık değerinin ve ultraviyole ışının E-cam takviyeli epoksi kompozit malzemenin çekme özellikleri, düşük hızlı darbe davranışı, tabakalar arası kayma mukavemeti özellikleri üzerindeki etkisi, üçüncü aşamasında ise E-cam takviyeli epoksi kompozit malzemelerde jelkot kaplamasının ve jelkot renginin hidrotermal ve ultraviyole yaşlanmasına etkisi araştırılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen bulgular aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Hidrotermal yaşlanma koşuluna maruz karbon ve hibrid takviyeli epoksi malzemelerin elyaf yönündeki çekme mukavemetinde önemli bir değişim gözlenmezken, E-cam elyaf takviyeli epoksi malzemenin çekme mukavemeti beşinci haftanın sonunda yaklaşık olarak yüzde otuz civarında azalmıştır. Bununla birlikte, bütün malzemelerin elyaf yönüne dik doğrultudaki çekme mukavemetlerinde ve eğilme mukavemetlerinde önemli ölçüde azalma meydana gelmiştir.
- Cam ve karbon elyaf takviyeli epoksi malzemenin kimyasal yapılarında hidroliz ve oksidasyon neticesinde önemli değişimler meydana gelmiştir. Özellikle, XPS testi sonucunda yaşlandırma süresinin artması ile birlikte oksijen-karbon oranında önemli bir artış meydana gelmiştir.
- Ortam sıcaklığının kompozit malzemelerin çekme özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. 90 °C sıcaklık değerine sahip yaşlanma ortamına maruz kalan numunelerin elyaf ve elyafa dik doğrultuda sırasıyla %30 ve %10 azalmıştır. Bununla birlikte, bu değerler 70 °C sıcaklıktaki yaşlanma ortamına maruz kalan malzemeler için yaklaşık olarak %10 ve %5 azaldığı görülmüştür. Maksimum birim şekil

değiştirme elyaf yönünde çekme mukavemetine paralel olarak azalmıştır. Genel olarak, yaşlanma sıcaklığı arttığında malzemenin çekme özelliklerinde önemli düşüş meydana gelmiştir.

- Malzemelerin düşük hızlı darbe delinme eşiği yaşlandırma koşulundaki sıcaklık değerinden en çok etkilenen özelliği olmuştur. 90 °C sıcaklık ve %70 nem değerine sahip ortama 1000 saat maruz kalan malzemenin delinme eşiği %40 azalmıştır.
- Absorbe edilebilen maksimum enerji, maksimum temas kuvveti ve maksimum çökme gibi düşük hızlı darbe özelliklerinin yaşlanma koşullarından, özellikle camsı geçiş sıcaklığına yakın sıcaklıklara sahip ortamlarda ve UV radyasyonuna maruz kalınan ortamlarda önemli ölçüde etkilendiği görülmüştür.
- Malzemelerin darbe sonrası bası mukavemetleri (CAI), darbe enerjisi ve yaşlanma sıcaklığının artmasıyla azalmıştır. Bununla birlikte, darbe sonrası bası mukavemeti delinme eşiği darbe enerjisinden sonra sabit kalmıştır, çünkü bu enerji değerinden sonra, malzemedeki hasar yayılımı sabit kalmıştır.
- Hidrotermal ve ultraviyole ışına maruz kalan jelkot ile kaplanan malzemelerin çekme, düşük hızlı darbe, tabaklar arası kayma özelliklerinde kaplanmamış malzemeye oranla önemli bir iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca jelkot renginde ultraviyole ışın yaşlanması üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Siyah jelkot ile kaplanmış malzemenin yaşlandırma süreci sonunda mekanik özelliklerindeki azalma sarı jelkot ile kaplanmış malzemeye oranla daha yüksektir.
- Benzer şekilde malzemelerin depolama modülü ve camsı geçiş sıcaklıklarında yaşlanma süreci ile düşüş meydana gelmiştir. Ayrıca, SEM görüntüleri sayesinde matris-elyaf arayüzey yapışmasındaki zayıflık açıkça gözlenmiştir.

Bu tezden elde edilen sonuçlardan yola çıkarak:

- Çevresel ortamlara maruz elyaf takviyeli polimer kompozit malzemeler tasarlanırken, bu çevresel ortamların etkileri göz önünde bulundurulmalıdır. Çevresel ortamların etkilerini azaltmak için en dış tabakada sıcaklık, nem ve ultraviyole ışın gibi çevresel koşullardan daha az etkilenen karbon elyaf gibi takviye elemanları kullanılabilir.
- Ayrıca polimer kompozit malzemeler jelkot gibi bir kaplama elemanı ile kaplandıklarında çevresel etkilerden önemli ölçüde korunmaktadır. Ancak, yapı tasarlanırken kaplama malzemesinin renginin ve kalınlığının yaşlanma mekanizması üzerinde önemli bir etkisi olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

KAYNAKLAR

- Abir, M., Tay, T., Ridha, M. ve Lee, H. (2017). On the relationship between failure mechanism and compression after impact (cai) strength in composites. *Composite Structures*, 182, 242-250.
- Akay, M. ve Spratt, G. (2008). Evaluation of thermal ageing of a carbon fibre reinforced bismaleimide. *Composites Science and Technology*, 68(15-16), 3081-3086.
- Akderya, T., Çevik, M., ve Sayman, O. (2018). Influence of thermal ageing on tensile performance of E-glass fibre/epoxy composite joints bonded with a diverse set of adhesives. *The Journal of Adhesion*, Doi: 10.1080/00218464.2018.1480371.
- Aktaş, A., Aktaş, M. ve Turan, F. (2013). The effect of stacking sequence on the impact and post-impact behavior of woven/knit fabric glass/epoxy hybrid composites. *Composite Structures*, 103, 119-135.
- Awaja, F. ve Pigram, P.J. (2009). Surface molecular characterisation of different epoxy resin composites subjected to uv accelerated degradation using xps and tof-sims. *Polymer Degradation and Stability*, 94(4), 651-658.
- Barbosa, A.P.C., Fulco, A.P.P., Guerra, E.S., Arakaki, F.K., Tosatto, M., Costa, M.C.B. ve Melo, J.D.D. (2017). Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, 110, 298-306.
- Batista, N.L., Rezende, M.C. ve Botelho, E.C. (2018). Effect of crystallinity on cf/pps performance under weather exposure: Moisture, salt fog and uv radiation. *Polymer Degradation and Stability*, 153, 255-261.
- Bunker, B. (1994). Molecular mechanisms for corrosion of silica and silicate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 179, 300-308.

- Campbell, F.C. (2010). *Structural composite materials (1st ed.)*. US : ASM international.
- Capiel, G., Uicich, J., Fasce, D. ve Montemartini, P.E. (2018). Diffusion and hydrolysis effects during water aging on an epoxy-anhydride system. *Polymer Degradation and Stability*, 153, 165-171.
- Carra, G. ve Carvelli, V. (2014). Ageing of pultruded glass fibre reinforced polymer composites exposed to combined environmental agents. *Composite Structures*, 108, 1019-1026.
- Davies, P. ve Rajapakse, Y.D. (2014). *Durability of composites in a marine environment (1st ed.)*. New York: Springer.
- Dogan, A. ve Arman, Y. (2019). The effect of hygrothermal aging and uv radiation on the low-velocity impact behavior of the glass fiber-reinforced epoxy composites. *Iranian Polymer Journal*, 28,1-9.
- Dogan, A., Arman, Y. ve Ozdemir, O. (2018). Experimental investigation of transverse loading on composite panels coated with different gelcoat colors subjected to uv radiation and hygrothermal aging. *Materials Research Express*, 6(2), 025301.
- Doğan, A. ve Arman, Y. (2018). The effect of hygrothermal aging on the glass and carbon reinforced epoxy composites for different stacking sequences. *Mechanics*, 24(1), 19-25.
- Ellyin, F. ve Rohrbacher, C. (2003). The influence of aqueous environment, temperature and cyclic loading on glass-fibre/epoxy composite laminates. *Journal of Reinforced plastics and Composites*, 22(7), 615-636.

- Fan, W., Li, J.-l., Zheng, Y.-y., Liu, T.-j., Tian, X. ve Sun, R.-j. (2016). Influence of thermo-oxidative aging on the thermal conductivity of carbon fiber fabric reinforced epoxy composites. *Polymer Degradation and Stability*, 123, 162-169.
- Fang, Y., Chen, P., Huo, R., Liang, Y., Wang, L. ve Liu, W. (2018). Hygrothermal ageing of polymeric sandwich structures used in structural engineering. *Construction and Building Materials*, 165, 812-824.
- Fiore, V., Scalici, T., Sarasini, F., Tirilló, J. ve Calabrese, L. (2017). Salt-fog spray aging of jute-basalt reinforced hybrid structures: Flexural and low velocity impact response. *Composites Part B: Engineering*, 116, 99-112.
- Fitriah, S., Majid, M.A., Ridzuan, M., Daud, R., Gibson, A. ve Assaleh, T. (2017). Influence of hydrothermal ageing on the compressive behaviour of glass fibre/epoxy composite pipes. *Composite Structures*, 159, 350-360.
- Garcia, K., Hayes, M., Verghese, N. ve Lesko, J. (1998). The effects of cyclic moisture aging on a glass/vinyl ester composite system. *Progress in Durability Analysis of Composite Systems*, 173.
- Gautier, L., Mortaigne, B., Bellenger, V. ve Verdu, J. (2000). Osmotic cracking nucleation in hydrothermal-aged polyester matrix. *Polymer*, 41(7), 2481-2490.
- Gay, D., Hoa, S.V. ve Tsai, S. W. (2003). *Composite materials design and applications* (1st ed.). Boca Raton: CRC Press LLC.
- Geethamma, V., Kalaprasad, G., Groeninckx, G. ve Thomas, S. (2005). Dynamic mechanical behavior of short coir fiber reinforced natural rubber composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(11), 1499-1506.

- Guermazi, N., Tarjem, A.B., Ksouri, I. ve Ayedi, H.F. (2016). On the durability of frp composites for aircraft structures in hygrothermal conditioning. *Composites Part B: Engineering*, 85, 294-304.
- Han, J.-H. ve Kim, C.-G. (2006). Low earth orbit space environment simulation and its effects on graphite/epoxy composites. *Composite Structures*, 72(2), 218-226.
- Helbling, C. ve Karbhari, V. (2008). Investigation of the sorption and tensile response of pultruded e-glass/vinylester composites subjected to hygrothermal exposure and sustained strain. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27(6), 613-638.
- Hu, Y., Lang, A.W., Li, X. ve Nutt, S.R. (2014). Hygrothermal aging effects on fatigue of glass fiber/polydicyclopentadiene composites. *Polymer Degradation and Stability*, 110, 464-472.
- Içten, B.M., Kırıl, B.G. ve Deniz, M.E. (2013). Impactor diameter effect on low velocity impact response of woven glass epoxy composite plates. *Composites Part B: Engineering*, 50, 325-332.
- Içten, B.M. ve Karakuzu, R. (2008). Effects of weaving density and curing pressure on impact behavior of woven composite plates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27(10), 1083-1092.
- Jiang, X., Kolstein, H., Bijlaard, F. ve Qiang, X. (2014). Effects of hygrothermal aging on glass-fibre reinforced polymer laminates and adhesive of frp composite bridge: Moisture diffusion characteristics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 57, 49-58.

- Khan, L.A., Mahmood, A.H., Syed, A.S., Khan, Z.M. ve Day, R.J. (2013). Effect of hygrothermal conditioning on the fracture toughness of carbon/epoxy composites cured in autoclave/quickstep. *Journal of Reinforced plastics and Composites*, 32(16), 1165-1176.
- Kumar, B.G., Singh, R.P. ve Nakamura, T. (2002). Degradation of carbon fiber-reinforced epoxy composites by ultraviolet radiation and condensation. *Journal of Composite materials*, 36(24), 2713-2733.
- Lafarie-Frenot, M., Rouquie, S., Ho, N. ve Bellenger, V. (2006). Comparison of damage development in c/epoxy laminates during isothermal ageing or thermal cycling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(4), 662-671.
- Li, Y., Li, R., Huang, L., Wang, K. ve Huang, X. (2016). Effect of hygrothermal aging on the damage characteristics of carbon woven fabric/epoxy laminates subjected to simulated lightning strike. *Materials & Design*, 99, 477-489.
- Liao, K. ve Tan, Y.-M. (2001). Influence of moisture-induced stress on in situ fiber strength degradation of unidirectional polymer composite. *Composites Part B: Engineering*, 32(4), 365-370.
- Lu, T., Solis-Ramos, E., Yi, Y. ve Kumosa, M. (2018). Uv degradation model for polymers and polymer matrix composites. *Polymer degradation and stability*, 154, 203-210.
- Martin, R. (2008). *Ageing of composites* (1st ed.). Cambridge: Woodhead Publishing..
- Maxwell, A., Broughton, W., Dean, G. ve Sims, G. (2005). Review of accelerated ageing methods and lifetime prediction techniques for polymeric materials. *NPL Report DEPC MPR*, 16, 22.

- Mensitieri, G. ve Iannone, M. (2008). Modelling accelerated ageing in polymer composites. *Ageing of composites* (1st ed.) (224-281). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Odegard, G. ve Bandyopadhyay, A. (2011). Physical aging of epoxy polymers and their composites. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 49(24), 1695-1716.
- Olivier, L., Baudet, C., Bertheau, D., Grandidier, J. ve Lafarie-Frenot, M. (2009). Development of experimental, theoretical and numerical tools for studying thermo-oxidation of cfrp composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(8), 1008-1016.
- Pavlidou, S. ve Papaspyrides, C. (2003). The effect of hygrothermal history on water sorption and interlaminar shear strength of glass/polyester composites with different interfacial strength. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(11), 1117-1124.
- Raji, M., Zari, N., Bouhfid, R. ve el kacem Qaiss, A. (2019). Durability of composite materials during hydrothermal and environmental aging. *Durability and life prediction in biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites* (83-119). Amsterdam: Elsevier.
- Ray, B. (2006). Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites. *Journal of Colloid and Interface Science*, 298(1), 111-117.
- Rocha, I., Raijmaekers, S., Nijssen, R., van der Meer, F. ve Sluys, L. (2017). Hygrothermal ageing behaviour of a glass/epoxy composite used in wind turbine blades. *Composite Structures*, 174, 110-122.

- Saadatmanesh, H., Tavakkolizadeh, M. ve Mostofinejad, D. (2010). Environmental effects on mechanical properties of wet lay-up fiber-reinforced polymer. *ACI materials journal*, 107.
- Saba, N., Jawaidd, M., Alothman, O.Y. ve Paridah, M. (2016). A review on dynamic mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites. *Construction and Building Materials*, 106, 149-159.
- Santhosh, K., Muniraju, M., Shivakumar, N. ve Raguraman, M. (2012). Hygrothermal durability and failure modes of frp for marine applications. *Journal of Composite materials*, 46(15), 1889-1896.
- Shaoquan, W., Shangli, D., Yu, G. ve Yungang, S. (2017). Thermal ageing effects on mechanical properties and barely visible impact damage behavior of a carbon fiber reinforced bismaleimide composite. *Materials & Design*, 115, 213-223.
- Shettar, M., Chaudhary, A., Hussain, Z., Kini, U.A. ve Sharma, S. (2018). *Hygrothermal studies on gfrp composites: A review*. Paper presented at the MATEC web of conferences.
- Shokrieh, M.M. ve Bayat, A. (2007). Effects of ultraviolet radiation on mechanical properties of glass/polyester composites. *Journal of Composite Materials*, 41(20), 2443-2455.
- Startsev, O. ve Nikishin, E. (1994). Aging of polymer composite materials exposed to the conditions in outer space. *Mechanics of Composite Materials*, 29(4), 338-346.
- Vaddadi, P., Nakamura, T. ve Singh, R.P. (2003). Transient hygrothermal stresses in fiber reinforced composites: A heterogeneous characterization approach. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(8), 719-730.

- Vieille, B., Aucher, J. ve Taleb, L. (2012). Comparative study on the behavior of woven-ply reinforced thermoplastic or thermosetting laminates under severe environmental conditions. *Materials & Design*, 35, 707-719.
- Wang, M., Xu, X., Ji, J., Yang, Y., Shen, J. ve Ye, M. (2016). The hygrothermal aging process and mechanism of the novolac epoxy resin. *Composites Part B: Engineering*, 107, 1-8.
- Wang, Z., Xian, G. ve Zhao, X.-L. (2018). Effects of hydrothermal aging on carbon fibre/epoxy composites with different interfacial bonding strength. *Construction and Building Materials*, 161, 634-648.
- Xiao, G., Delamar, M. ve Shanahan, M. (1997). Irreversible interactions between water and dgeba/dda epoxy resin during hygrothermal aging. *Journal of Applied Polymer Science*, 65(3), 449-458.
- Yan, L., Chouw, N. ve Jayaraman, K. (2015). Effect of uv and water spraying on the mechanical properties of flax fabric reinforced polymer composites used for civil engineering applications. *Materials & Design*, 71, 17-25.
- Yu, B. ve Yang, J. (2017). Hygrothermal effects in composites. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* (502-519). Amsterdam: Elsevier.
- Zafar, A., Bertocco, F., Schjødt-Thomsen, J. ve Rauhe, J. (2012). Investigation of the long term effects of moisture on carbon fibre and epoxy matrix composites. *Composites Science and Technology*, 72(6), 656-666.
- Zhang, Z., Wang, P. ve Wu, J. (2012). Dynamic mechanical properties of eva polymer-modified cement paste at early age. *Physics Procedia*, 25, 305-310.

Zhong, Y. ve Joshi, S.C. (2015). Impact behavior and damage characteristics of hygrothermally conditioned carbon epoxy composite laminates. *Materials & Design*, 65, 254-264.

Zhou, J. ve Lucas, J.P. (1999). Hygrothermal effects of epoxy resin. Part i: The nature of water in epoxy. *Polymer*, 40(20), 5505-5512.

