



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**GRAFEN NANO PARTİKÜL TAKVİYELİ YAPISAL YAPIŞTIRICI İLE
BİRLEŞTİRİLMİŞ TEK BİNDİRMELİ BAĞLANTILARIN YORULMA
YÜKLEMESİ SONRASI ÇEKME DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI**

Günta BALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliğı Anabilim Dalı

**Ağustos – 2021
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAY SAYFASI

Günta BALİ tarafından hazırlanan “Grafen nano partikül takviyeli yapısal yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek bindirmeli bağlantıların yorulma yüklemesi sonrası çekme davranışının araştırılması” adlı tez çalışması 13/08/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Do. Dr. Mehmet Emin DENİZ

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Tolga TOPKAYA

.....

Üye

Prof. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Do. Dr. Ömer Faruk ERTUĞRUL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Günta BALİ
13.08.2021

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GRAFEN NANO PARTİKÜL TAKVİYELİ YAPISAL YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ TEK BİNDİRMELİ BAĞLANTILARIN YORULMA YÜKLEMESİ SONRASI ÇEKME DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI

Güntaş BALİ

BATMAN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Tolga TOPKAYA

2021, 63 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Tolga TOPKAYA

Doç. Dr. Mehmet Emin DENİZ

Prof. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ

Gerçekleştirilen çalışmada GNP takviye oranının tek bindirmeli yapıştırıcı bağlantıların çekme, yorulma ve yorulma sonrası çekme davranışına etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada yapıştırıcı malzeme olarak 3M DP460 yapışan malzeme olarak karbon fiber takviyeli kompozit malzeme kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan yapıştırıcı malzemeyi takviye etmek amacıyla grafen nano partikül kullanılmıştır. Yapıştırıcı malzemenin içerisine ağırlıkça %0.25, %0.5 ve %1 GNP katılmıştır. Takviye edilmiş ve takviye edilmemiş yapıştırıcılar kullanılarak tek bindirmeli bağlantılar oluşturulmuştur. Elde edilen tek bindirme numuneleri çekme testine tabi tutularak çekme mukavemetleri belirlenmiştir. Çekme mukavemetlerinin belirlenmesinden sonra çekme mukavemetinin %60, %50, %40, %30 ve %20 değerlerinde yorulma testleri yapılarak yorulma davranışları belirlenmiştir. Yorulma yüklemesi sonrası çekme davranışında meydana gelen değişimin tespiti amacıyla çekme hasar yükünün %30 değerinde yorulma yüklemeleri yapılmış ve yorulma testleri 50.000, 100.000 ve 200.000 çevrim sayılarında durdurulmuştur. Yorulma ön yüklemesine maruz bırakılan numuneler çekme testine tabi tutularak GNP oranının ve yorulma yüklemesinin çekme davranışına etkisi incelenmiştir.

Çalışma sonuçları GNP takviyesinin bağlantı mukavemetini arttırdığını göstermiştir. Ancak en yüksek bağlantı mukavemeti ağırlıkça %1 GNP içeren numunelerde görülmüştür. En yüksek yorulma mukavemeti ağırlıkça %0,50 GNP içeren numunelerde görülmüştür. %1 GNP içeren numunelerin yorulma mukavemeti takviyesiz numunelerden yüksek çıkarken %0,50 GNP içeren numunelerden düşük çıkmıştır. Yorulma yüklemesi sonrası çekme davranışları incelendiğinde takviyesiz numunelerin ve takviyeli numunelerin tamamında yorulma çevrim sayısı arttıkça bağlantı mukavemeti düşmüştür.

Anahtar Kelimeler: Grafen; Tek bindirmeli bağlantı; Yorulma; Enerji absorpsiyonu; Rijitlik

ABSTRACT

MS THESIS

EFFECT OF GRAPHENE NANO-PARTICLE REINFORCEMENT ON THE FATIGUE BEHAVIOR OF ADHESIVELY BONDED SINGLE LAP JOINTS

Günta BALI

**INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES OF BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Tolga TOPKAYA

2021, 63 Pages

Jury

**Assist Prof. Dr. Tolga TOPKAYA
Assoc. Prof. Dr. Mehmet Emin DENİZ
Prof. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ**

In this study, the effect of GNP reinforcement ratio on the tensile, fatigue and post-fatigue tensile behavior of single-lap adhesive joints was experimentally investigated. In the study carried out, 3M DP460 was used as adhesive material and carbon fiber reinforced composite material was used as the adherend material. Graphene nanoparticles were used to reinforce the adhesive material used in the study. 0.25%, 0.5% and 1% GNP by weight were added to the adhesive material. Single lap joints were created using reinforced and non-reinforced adhesives. The tensile strengths of the obtained single overlap specimens were determined by subjecting them to the tensile test. After determining the tensile strengths, fatigue behaviors were determined by performing fatigue tests at 60%, 50%, 40%, 30% and 20% of tensile strength. In order to determine the change in tensile behavior after fatigue loading, fatigue loads at 30% of the tensile damage load were performed and fatigue tests were stopped at 50,000, 100,000 and 200,000 cycles. The effects of GNP ratio and fatigue loading on the tensile behavior were investigated by subjecting the specimens subjected to fatigue preload to the tensile test.

The study results showed that GNP reinforcement increased the bond strength. However, the highest bond strength was observed in samples containing 1% by weight GNP. The highest fatigue strength was observed in the samples containing 0.50 wt% GNP. While the fatigue strength of the samples containing 1% GNP was higher than the unreinforced samples, it was lower than the samples containing 0.50% GNP. When the tensile behavior after fatigue loading was examined, the joint strength decreased as the number of fatigue cycles increased in all of the unreinforced and reinforced samples.

Keywords: Graphene; Single Lap Joint; Fatigue; Energy Absortion; Stiffness

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmasının her aşamasında değerli tecrübelerini benimle paylaşan, Yüksek lisans tez çalışmasının her aşamasında eleştirileri ve yönlendirmeleri ile değerli tecrübelerini benimle paylaşan, çalışmanın yürütülmesi ve yazıya dökümünde çalışmaya yol gösteren, katkılarda bulunan saygı değer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Tolga TOPKAYA'ya şükranlarımı sunarım.

Günta BALI
BATMAN- 2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRILMASI	4
2.1. Metal Yapıştırma Bağlantıları	5
2.1.1. Yapıştırıcıların Sınıflandırılması	7
2.1.1.1 Yapıştırılacak Malzeme Türüne Göre Sınıflandırma	8
2.1.1.2 Fiziksel Özelliklerine Göre Sınıflandırma	9
2.1.1.3 Sertleşme Durumuna Göre Sınıflandırma	9
2.1.1.4 Yapıştırma Sıcaklığına Göre Sınıflandırma	9
2.1.1.5 Kimyasal Türüne Göre Sınıflandırma	10
2.1.2. Yapıştırma Bağlantılarının Avantajları	12
2.1.3. Yapıştırma Bağlantılarının Dezavantajları	12
2.1.4. Yapıştırma İşlemi	13
2.1.4.1. Yapıştırma Yüzeyinin Hazırlanması	13
2.1.4.2. Ön Hazırlık Çalışmaları	14
2.1.4.3. Yapıştırma Bağlantılarına Etki Eden Kuvvetler	15
2.1.5. Yapıştırma Bağlantı Çeşitleri	16
2.2. Grafen nanopartiküller	17
2.3. Yorulma Olayı ve Tarihçesi	18
2.3.1. Yorulma Hasar Çeşitleri	21
2.3.2. Yorulma Testi ve Teknik Terimleri	21
2.3.3. Yorulma Olayının Gelişimi	25
2.3.4. Yapıştırma Bağlantılarında Yorulma	26
3. MATERYAL VE YÖNTEM	29
3.1. Deneyde Kullanılan Materyaller	31

3.1.1. Karbon Fiber Takviyeli Plastik (CFRP)	31
3.1.2. 3M DP460 Epoksi Yapıştırıcı	31
3.1.3. Grafen Nano Parçacık	31
3.1.4. Shimadzu Üniversal Test Cihazı	31
3.1.5. Yorulma Test Cihazı	32
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	33
4.1. Statik Test Sonuçları	33
4.2. Yorulma Testi Sonuçları	34
4.3. Rijitlik Hesabı	38
4.4. Yorulma Sonrası Çekme Davranışı	39
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	44
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ	50

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Yapıştırma bağlantısında “adhezyon” ve “kohezyon” (Rende 2000)	6
Şekil 2.2. Yüzey pürüz formları (a) pirizmatik, (b) konik, (c) silindirik, (d) V, (e) küresel (Anık vd.1997)	14
Şekil 2.3. Yapıştırma bağlantılarında farklı kuvvet uygulamaları (Rende 2000)	16
Şekil 2.4. Yapıştırma bağlantı tipleri, (a) tek tesirli bindirme, (b) çift tesirli bindirme (c)boyun bindirme, (d) açılı bindirme, (e) teraslama, (f) tek takviyeli bindirme, (g) çift takviyeli bindirme, (h) alın bağlantı, (i) silindirik bindirme, (j) soyulma (Adin, 2007)	17
Şekil 2.5. Yorulma çatlak başlangıcı ve hasar eğrisi (Karcı, 2002)	20
Şekil 2.6. Yorulma testi için sinüzoidal yükleme (Günaydın, 2003)	22
Şekil 2.7. Yorulma yükleme biçimleri (Kurbanoğlu,2009)	24
Şekil 2.8. Tek bindirmeli birleştirmede gerilme dağılımı	26
Şekil 2.9. Tek tesirli yapıştırma bağlantısında tipik bir çatlak ilerlemesi	27
Şekil 2.10. Yorulma deneyinde yapıştırma bölge çatlak ilerlemesi (Casas-Rodriguez ve ark.,2008)	27
Şekil 3.1. Yapılan Deney Adımlarını Gösteren Yapım şeması	30
Şekil 3.2. Tek Bindirmeli Bağlantı Boyutları	31
Şekil 3.3. Shimadzu Üniversal Test Cihazı	32
Şekil 3.4. Yorulma test cihazı	32
Şekil 4.1. GNP oranı ile nihai çekme yükü değişimi	33
Şekil 4.2. Çekme Testleri Sonrası Bağlantıların Yıpranma Yüzeyleri	34
Şekil 4.3. Farklı GNP oranları ile modifiye edilmiş SLJ'lerin S-N eğrileri	35
Şekil 4.4. Yorulma Testleri Sonrası Saf DP460 Kullanılmış Birleştirmelerin Hasar Yüzeyleri	37
Şekil 4.5. Yorulma Testleri Sonrası %0,25 GNP-DP460 Kullanılmış Birleştirmelerin Hasar Yüzeyleri	37
Şekil 4.6. Yorulma Testleri Sonrası %0,5 GNP-DP460 Kullanılmış Birleştirmelerin Hasar Yüzeyleri	38
Şekil 4.7. Yorulma Testleri Sonrası %1 GNP-DP460 Kullanılmış Birleştirmelerin Hasar Yüzeyleri	38
Şekil 4.8. Yorulma Döngüsü ile Normalleştirilmiş Sertlik Değişimi (a. Saf Yapıştırıcı b. %0,25 GNP Yapıştırıcısı c. %0,50 GNP Yapıştırıcısı d. %1 GNP Yapıştırıcısı)	39

Şekil 4.9. Takviyesiz yapıştırıcı ile birleştirilen numunelerin yorulma sonrası çekme davranışı	40
Şekil 4.10. % 0.25 GNP içeren yapıştırıcı ile birleştirilen numunelerin yorulma sonrası çekme davranışı	41
Şekil 4.11. %0.50 GNP içeren yapıştırıcı ile birleştirilen numunelerin yorulma sonrası çekme davranışı	42
Şekil 4.12. %1 GNP içeren yapıştırıcı ile birleştirilen numunelerin yorulma sonrası çekme davranışı	43

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Önemli Yapıştırıcılar (Gediktaş 1995)	7
Tablo 2.2. Bazı Yapıştırıcıların Özellikleri (Gediktaş 1995)	8
Tablo 2.3. R değerlerine göre yorulma yük biçimleri	23
Tablo 3.1. Yapıştırılan CFRP'nin mekanik özellikleri	31
Tablo 3.2. 3M DP460 yapıştırıcının mekanik özellikleri (Akpınar ve ark., 2017)	31
Tablo 4.1. Farklı GNP oranları ile modifiye edilen SLJ'lerin yorulma sonuçları	36

SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

MYVCNT	: çok duvarlı karbon nanotüp
DWCNT	: çift duvarlı karbon nanotüp
SWCNT	: tek duvarlı karbon nanotüp
GNP	: Grafen Nano partikül
FTF	: fiber yırtılma hasarı
CSF	: yapıştırıcı ayrılma hasarı
AF	: adhezyon hasarı
CF	: kohezyon hasarı
SLJ	: Tek bindirmeli bağlantı

Simgeler

σ_{maks}	: Maksimum(Tepe) Gerilme
N	: Çevrim
σ_{min}	: Minimum(çukur) gerilme
σ_m	: Ortalama gerilme
$\Delta\sigma$	: Gerilme aralığı
σ_a	: Gerilme genliği
R	: Gerilme oranı
$^{\circ}C$	: Santigrat Derece
MPa	: Mega paskal
Hz	: Hertz
N	: Newton
kHz	: Kilohertz
da/dN	: Çatlağın ilerleme hızı,
ΔK	: gerilme şiddet faktör değişimi

1. GİRİŞ

Benzer veya farklı niteliklerdeki malzemelerin birleştirilerek kullanma gereksinimi türlü avantajları nedeniyle geçmişten günümüze kadar var olagelmıştır. Cıvatalı, perçinli, lehimli, kaynaklı ve de sıkı geçmeli gibi birleştirme metotları ile beraber, özellikle II. Dünya Savaşı sonrasında plastik-yapıştırıcı teknolojisinin ilerlemesi ile yapıştırma bağlantıları da sanayide yoğun olarak yer etmeyi başarmıştır. Yapıştırıcılar, önceleri genelde ev ve mutfak gereçleri gibi günlük yaşam malzemelerinin imalatında kullanılırken günümüzde artık güvenliğin çok önemli olduğu mühendislik alanlarında dahi yoğun olarak kullanılabilmektedir. Bu hali ile yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışlarının her açıdan incelenmesi nihai derecede önemlidir. Yapıştırma bağlantılarının makine, gemi, uçak ve inşaat gibi bir çok mühendislik alanında kullanımı, sanayinin ilk zamanlarına dayanır. Teknolojik büyüme ile enerji gereksinimi artmış ve elverişli enerji çeşitlerinin doğada tükenmeye başlamasıyla, teknolojiye olası minimum enerji sarfiyatını doğurabilecek seçenekler araştırılmaya başlanmıştır. 1960'lara gelindiğinde özellikle alüminyum birleştirme öğeleri nice işkolundan farksız olarak bilhassa havacılık işkolunun da temel ögesi olma durumuna gelmiştir. (Çalık, 2008)

Yapıştırıcılar, benzer yada farklı materyallerden oluşturulmuş yüzeylerin arasında bir tür köprü gibi davranır. Yapışmanın işleyişi malzemeler arasındaki adhezyon ve kohezyon kuvvetlerine bağlıdır. Temel olarak adhezyon kuvveti, yapıştırıcının yapıştırılan yüzey alanına tutunma kuvvetidir. Kohezyon kuvveti ise yapıştırıcının kendi molekülleri arasındaki moleküller arası bağı ve dolayısıyla yapıştırıcıyı birleşik tutmaya çalışan iç kuvvettir. (Bishopp, 2013).

Sanayi yapıştırıcılarının fiziki ve kimyevi niteliklerindeki gelişmeler sebebiyle yapıştırıcı temelli bağlantı metodu mühendislik alanlarının birçoğunda başarıyla uygulanmaktadır. Geleneksel yöntemlere (kaynak perçin bağlantıları vs.) kıyasla avantajlı konumundan ötürü, yapıştırıcı temelli bağlantı uygulamaları çoğu araştırmacı tarafından sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal analiz ve de deneysel olarak araştırılmış, bu seyrinde araştırmalar sürdürülmektedir. Yapıştırıcı temelli bağlantıların dinamik hareket kabiliyetleri ayrıca araştırılmaktadır. Bilhassa uçak, uzay ve makine konstrüksiyonlarında dinamik kuvvetlere maruz kalarak kullanılmaları önemlidir. (Aydın, 2012).

Yapıştırıcı temelli metal birleştirme, iki veya daha fazla metal malzemenin, sentetik esaslı yapıştırıcı ile yapıştırma işlemini yerine getiren bağlantının çözülemeyecek biçimde birleştirilmesi işlemidir. Yapıştırıcı, kimyasal tepkimelerin sebep olduğu makro moleküllerin meydana gelmesi ile sertleşir ve hem kendi iç dreci hem de malzeme yüzeyine

yapışmasından dolayı (adhezyon ve kohezyon kuvvetleri) harici kuvvetlerin dengelenmesini sağlar. Yapıştırıcılar, bağlantı işlemi nihayetinde istenilen mekanik niteliklerin yanında sıcaklık ve ısı nitelikleri de sağlayabilmeleri amacıyla bir ya da birden fazla bileşenli imal edilmektedir. Günümüzde yapıştırıcılara belirli oranlarda nano parçacıkların eklenmesi sonucu oluşan özellik değişimleri incelenmeye başlanmıştır (Hsiao, Alms, Advani, 2003).

Yapıştırıcı temelli birleştirmeler bir hayli alanda geleneksel birleştirme metotlarının yerine kullanılmaktadır. Bundan ötürü yapıştırıcı temelli bağlantıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi mevzusu hatırı sayılır bir inceleme alanı olarak baş göstermektedir. Makine elemanları fonksiyonlarını gerçekleştirirken çoğunlukla periyodik ve dinamik kuvvetlerle karşılaşmaktadır. Periyodik kuvvetlere altında işleyen makine elemanları giderek statik dayanımlarından hayli düşük gerilme değerlerinde yorulma hasarına maruz kalmaktadır. Bu sebeple materyallerin yorulma dayanımlarının saptanması meselesi dikkate değerdir. Literatürde yapıştırıcı temelli bağlantıların statik dayanımlarının incelenmesi ile alakalı bir hayli araştırma çalışması bulunmaktadır. Bununla birlikte, türlü metotlarla yapıştırıcı temelli bağlantıların yorulma dayanımı değerini yükseltme çalışmaları güncelliğini muhafaza etmektedir. (Kang ve ark., 2014).

Yapıştırıcı temelli birleştirmelerin yorulma ve statik dayanımlarını konu alan çalışmaların tetkikinde; bağlantının bindirme mesafesi, bağlantı boyutları (kalınlığı, geometrisi), yapıştırılmış materyalin kalınlığı, yükleme şekli (yükleme frekansı, yükleme oranı, sabit genlik, değişken genlik vb...), çeşitli yüzey uygulamaları, dış koşullar (nem, sıcaklık), köşe geometrisi, hibrid bağlantı, kompozit yamalar ve yapıştırıcı materyal yoğunluğu gibi konular araştırma konusu olmuştur. Günümüzde ise bilhassa yapıştırıcı epoksi içerisine karıştırılan farklı niteliklerdeki nano parçacıkların, birleştirmelerin mekanik özelliklerinde oluşturduğu etki ile alakalı çalışmalar literatürde bulunmaktadır. Nano parçacık takviyeli yapıştırıcıları konu alan bu çalışmaların genellikle statik yükler altında incelendiği görülmektedir. Buna rağmen, incelenen literatür alanında periyodik yüke maruz bırakılmış birleştirmeler ile alakalı üretilen çalışmalar hayli sınırlıdır. Söz konusu çalışmaların tetkikinde; nano parçacıkların, yapıştırıcı maddeye az miktarda katılması bile yapıştırıcının özelliklerini kayda değer ölçüde etkilediği anlaşılmıştır. Nano parçacıklar; yapıştırıcıların elektriksel, termal ve termomekanik, özelliklerini pozitif yönde etkilerken aynı zamanda yüksek seviyede su tutma kapasiteleri ve iyileştirilmiş yorulma ömürleri sayesinde yapıştırıcıların çevresel şartlara karşı dayanıklılığını arttırmaktadır. (Gültekin ve ark, 2016).

Söz konusu bu çalışma, grafen nano partikül takviyesinin 3M DP460 marka yapısal yapıştırıcıların yorulma ön yüklemesi sonrasında mekanik özelliklerine etkisi deneysel olarak belirlenerek daha mukavemetli yapıştırma bağlantılarının elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Çalışmada yapışan malzeme olarak 0/90 düzlem dokuma karbon fiber takviyeli kompozit malzeme kullanılacaktır. Yorulma yüklemesi sırasında frekans 10 Hz. Ve $R=0.1$ seçilecektir.

2. KAYNAK ARAŞTIRILMASI

Neto, da Cruz and Avila (2013) nanopartikül eklenmiş yapıştırıcı malzemelerin verimini incelemişler. 10 katman karbon elyaf ile güçlendirilmiş epoksi kompozit yapıştırılan materyal olarak kullanılmış, yapıştırıcı materyal olarak ise AR300 epoksi seçilmiştir. Yapıştırıcı epoksiye, nanopartikül olarak ağırlıkça %1 ve %2 grafen eklenmiştir. Neticede ağırlıkça %1 grafen eklenmiş yapıştırıcı epoksinin dayanım yükünü %21 artırmış, %2 grafen eklenmiş yapıştırıcı epoksde ise dayanım yükünü %57 oranında arttırdığı görülmüş.

Kuang-Ting ve arkadaşları (2003), Grafit fiber-epoksi kompozitleri yapıştırmak amacıyla çok duvarlı karbon nanotüplerin çeşitli ağırlıktaki miktarları kullanmış ve kompozit plakalara kayma dayanımı testi yapmışlardır. Çıkan netice ise nanotüp miktarı artırıldıkça kayma dayanımının ortalamasının da arttığı olmuştur. Maksimum kayma dayanımı ağırlıkça %5 oranında karbon nanotüp kullanılmasıyla elde edilmiş, bunun karbon nanotüp eklenmiş yapıştırıcı bağlantılarında kompozit fiber grafit yüzeylerinde oluşan hasarlardan kaynaklandığını tespit ve ifade etmişler.

Panta ve arkadaşları (2016), Çeşitli türlerde nano parçacık eklenmiş epoksi yapıştırıcılarından oluşturulmuş tek tesirli bağlantılarda kayma direncini ve akma özelliklerini araştırmışlar. Nano parçacık eklenmesinin epoksinin termal stabilizasyonunu arttığını ve kayma direncinin nano parçacık türüne göre %46, %49 ve %53 oranlarında arttığını tespit etmişlerdir.

Florian ve arkadaşları (2005), çok duvarlı karbon nanotüp (MYVCNT), çift duvarlı karbon nanotüp (DWCNT) ve tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNT) kullanarak oluşturdukları epoksi bazlı nano kompozitleri mekanik özellikleri ve yüzey fonksiyonları açısından değerlendirmişler. Ulaştıkları neticede ise ağırlıkça %0.5 oranlı çift duvarlı karbon nanotüp (DWCNT) kullanımında sertliğin artması ile beraber kırılma tokluğunda da %43 oranında artış olduğunu gözlemişler.

Saeed ve Zhan (2007), çok duvarlı karbon nanotüp takviyeli (MWCNT) kompozit poliimid filmlerde yapıştırıcı dayanımı ile ilgili gerçekleştirdikleri araştırma çalışmalarında elastikiyet modülü ve kopma mukavemetinin ağırlıkça yüzde oranı ile birlikte arttığını fakat belli bir hassas değerden sonra azaldığını belirtmişler. Hassas değeri poliimid çeşidine bağlı olarak %1 ve %0.5 olarak belirlemişlerdir.

Gültekin ve arkadaşları (2016), Grafen eklenmiş belli bir epoksi yapıştırıcıda eklenen nanopartikül miktarının bağlantılardaki hasar yüküne etkilerini incelemek amacıyla araştırma yapmışlar. Araştırmalarında ağırlıkça % 2, % 1 ve % 0.5 olmak üzere çeşitli partikül oranı ve çeşitli karışım metotları ile elde ettikleri tek tesirli bağlantılarda (single lap joint) bazı

deneyler yapmışlar. Maksimum hasar yükü dayanımının %1 parçacık oranında belirlemişler ve parçacık oranının artmasıyla hasar yükünün azaldığını tespit etmişler.

Akpınar ve arkadaşları (2017), nanopartikül eklenerek oluşturulmuş yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bağlantılarda eğilme momenti ve çekme mukavemeti hasar yüklerini deneylerle araştırmışlar. Uygulamalarında yapıştırılan materyal olarak kullandıktan karbon fiber kumaş takviyeli kompozit ve AA2024-T3 alüminyum alaşımı sert, esnek yapıştırıcı kullanarak ve içerisine ağırlıkça %1 oranında grafen, karbon nanotüp ve fullerene C60 ekleyerek birleştirmişlerdir. Sonuç olarak yapıştırıcı türü ve nano partikül türüne göre hasar yükünün arttığını belirlemişlerdir.

May ve arkadaşları (2010), güçlendirilmiş epoksi/hibrid solüsyon yapışkan içerisine eklenen nano dolguların yapıştırma bağlantısına etkisini incelemek amacıyla A1203 ve çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) kullanarak kayma ve çekme testlerini yapmışlar. Nano dolgular eklendiğinde bağlantıların direncinin salt epoksiye oranla kayda değer bir şekilde arttığını belirtmişlerdir.

Wernik ve Meguid (2014), karbon nanotüple takviye edilmiş epoksi yapıştırıcıyı mekanik özellik yönünden deneylerle incelemişler. Çalışmaları ile çeşitli test metotlarını kullanarak çeşitli miktarlarda nanotüp oranlarında elde edilen bağlantıları özellikleri açısından çözümlemişlerdir. Ulaştıkları neticeler hakkında, yapıştırma bağlantılarında nanotüp miktarının kritik eşiğinin %1.5 oranında olduğunu saptamışlar ve söz konusu eşiğin geçilmesi durumunda özelliklerin düştüğünü belirtmişlerdir.

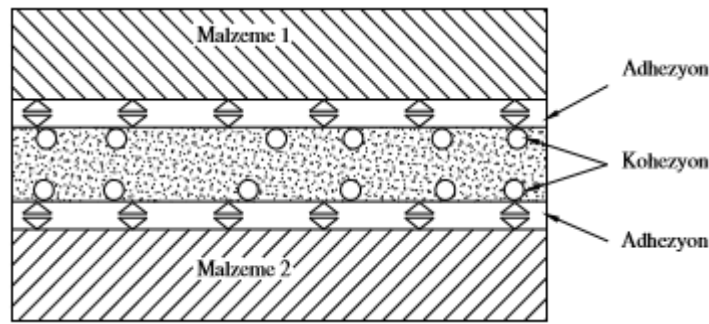
Razavi ve arkadaşları (2018), çok duvarlı karbon nanotüpler ve silika nanopartiküllerin harmanlanmasıyla takviye edilmiş epoksi yapıştırıcıyı mekanik özellikler açısından incelemişler. Deneylerinde ağırlıkça %0,8 %0,5 ve %0,2 olacak şekilde 3 çeşit parçacık oranı kullanmışlar. Nanopartikül ilavesiyle mekanik özelliklerin iyileştiğini ve bilhassa %0,8 oranı ile maksimum değerlere ulaşmışlardır.

2.1. Metal Yapıştırma Bağlantıları

Metallerin yapıştırıcı ile birleştirilmesi yöntemi; genellikle sac levhaların güçlendirilmesi, hafif metal konstrüksiyonları, boru, mil ve göbek bağlantıların sağlıklı işleminde tercih edilmektedir. Yalıtım yetenekleri sayesinde elektronik sanayide de yaygın olarak kullanılmaktadır. Optik araçların imalatı ve hassas cihaz tekniğinde de metal yapıştırma ağırlıklı kullanılmaktadır. Metal-organik benzeri çeşitli materyal çiftlerini uygun bir yapıştırıcıyla elverişli biçimde birleştirmek olanaklıdır. Fren balatalarının pabuçlarına tespiti kullanışlı bir model olarak verilebilir. (Anık 1989).

Lehim ve kaynak; ısı kullanılarak elde edilen ve genelde metal malzemelere uygulanan çözülemeyen birleştirme metotlarıdır. Isı birleştirilen parçalarda hayli biçim değiştirmelerine sebep olmaktadır; bu konu bilhassa ebatları küçük hassas aygıtlarda istenilmemektedir. Çağdaş yöntemde metal olmayan materyaller zamanla daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Materyaller için macunlama, gömme ve yapıştırma metotları kullanılmaktadır. Bu metotlar bilhassa yapıştırma metalik malzemeler için de uygulanmaktadır. (Akkurt 1997).

Birleştirmenin mukavemetine iki esas olay etki eder. Biri, yapıştırıcının kendi molekülleriyle bağlanmak istenen malzemelerin yüzleri arasında oluşan kimyasal ve fiziksel bir özellik taşıyan "adhezyon" olayıdır. Bir diğeri ise yapıştırıcının iç mukavemetini belirleyen moleküllerinin birbiri arasındaki bağımlılığı olan "kohezyon" olayıdır. Şekil 2.1'de yapıştırıcılı birleştirmelerde kohezyon ve adhezyon olayları görülmektedir. (Rende 2000).



Şekil 2.1. Yapıştırıcılı birleştirmelerde “kohezyon” ve “adhezyon” (Rende 2000)

Yapıştırıcılı birleştirmeler, iki materyalin, yapıştırma işlevini yerine getiren ve sıklıkla sentetik esaslı olan bir tür yapıştırıcı desteğiyle ayrılamayacak biçimde birleştirilmesiyle oluşur. Kimyasal tepkimeler sonucunda makro moleküllerin meydana gelmesiyle sertleşen yapıştırıcı, gerek materyal yüzeylerine yapışması gerek kendi iç mukavemeti ile (kohezyon ve adhezyon kuvvetleri) harici kuvvetleri karşılar. (Tin 2006).

Buna ilaveten cıvata, perçin ve kaynak ile yapıştırıcı kombini korozyon tehdidi olmayan, sızdırmaz ve mukavemeti arttırılmış birleştirmeler yapılabilir. Buna otomotiv sanayinde nokta kaynağı-yapıştırma kombini örnek olarak verilebilir. (Anık vd., 1997).

Yapıştırıcı temelli birleştirmeler, perçin, kaynak ve benzerleri gibi ergime neticesinde kristallerde değişikliklere neden olmadığı, gerilme yığılmaları oluşturmadağı ve uygulama genelde birleştirilen malzemelerin ergime değerlerinin çok altında uygulanabildiği (enerji tasarrufu, iş güvenliği vb. avantajlar) tercih sebebi olabilmektedir. Bunun dışında masraf ve

ağırlık açısından dikkate değer tasarruf sağlanabilir, temiz ve daha biçimli yüzeyler elde edilebilir.

2.1.1. Yapıştırıcıların Sınıflandırılması

Tek bileşenli yapıştırıcılarda sertleşme ve bağlanma vazifesini yerine getiren maddeler karışmış vaziyette(birlikte) bulunurlar. Bu tip yapıştırıcı malzemeler genellikle sıcaklık veya basınç etkisiyle sertleşirler. Nasıl bir yapıştırıcı kullanılacak ise öncelikle özellikleri bilinmeli ve üreticilerin önerileri dikkate alınmalıdır. Türlü amaçlar için kullanılan türlü yapıştırıcıların temeli genellikle yapay reçinelerden müteşekkildir. Bu yapıştırıcıların içeriğinde kimyasal olarak akril, epoksit, fenol reçineleri sıklıkla kullanılır. Bu yapıştırıcılar piyasada genellikle üretici şirketlerin isimlendirmeleri ile bilinirler. Tablo 2.1 ve 2.2' de bir kısım önemli yapıştırıcılar ve kullanım sahaları gösterilmiştir. Yapıştırıcılar katı, sıvı, pasta ve de toz halinde olurlar. Yapıştırıcının nüfuz etmesi normal oda sıcaklığı değerinde veya daha yüksek sıcaklık değerlerinde gerçekleşebilir. Reçinenin sertleşme zamanında yapıştırılacak malzemeleri birbirine bastırmak gerekebilir. Bu gibi nitelikler bakımından yapıştırıcıları aşağıdaki şekilde sınıflandırabiliriz. (Gediktaş 1995).

Tablo 2.1. Önemli Yapıştırıcılar (Gediktaş 1995).

Kimyasal Yapı	Ticari Ad	Genel Özellikler ve Kullanıldığı Yerler
Epoksit Reçinesi	Epilox, Araldit, Epoxy	İki bileşenli, uzun sertleşme süresi. Madenlerin, duroplastların, keramaiklerin yapıştırılması için.
Poliester Reçinesi	Akemi, Mökodur, Vestopal	İki bileşenli, uzun sertleşme süresi. Madenlerin, duroplastların, keramaiklerin yapıştırılması için.
Fenol Reçinesi	Redux, Plastaphenal	Bir veya iki bileşenli, tatbiki zor. Madenlerin yapıştırılması için.
Akril Reçinesi	Agomet	Çabuk sertleşir, kullanılması kolay. Madenlerin ve plastiklerin yapıştırılması için.
Polisosiyyamat	Desmadur, Desmocoll	İki bileşenli. Madenlerin ve plastiklerin yapıştırılması için.
Siyonokrilat, Monomer	Eastman 910, Tiox K 1	Tek bileşen, çabuk sertleşir. Madenlerin, plastiklerin ve elastomerlerin yapıştırılması için.
Epoksit + Thiokol	Polisulfid-Likit-polimer	İki bileşenli. Çeşitli malzemelerin yapıştırılması ve sızdırmazlık için.
Epoksit + Poliamid	Versamid, Lefia-Met	İki bileşenli. Madenlerin ve plastiklerin yapıştırılması için.
Keramik Karışımları	Ceramic UJ 1067	Yüksek uygulama sıcaklığı. Madenlerin yapıştırılması için.

Yapıştırıcılar yaygın biçimde oda sıcaklık değerinde sertleşen soğuk yapıştırıcılar ve 80°-200°C arasında bir değerde sertleşen sıcak yapıştırıcılar olacak şekilde iki temel gruba ayrılabilir. Sıcak yapıştırıcılarla gerçekleşen birleşmeler basınç ile veya basınç uygulanmadan

birleştirilebilirler. Soğuk yapıştırıcılar ise genel olarak katılaştırıcı malzeme ve yapıştırıcı malzeme olarak iki bileşenden oluşurlar. Oysa ki sıcak yapıştırıcılar, katı halde bulunur ve de tek bileşenlidirler. (Akkurt 1996).

Tablo 2.2. Bazı Yapıştırıcıların Özellikleri (Gediktaş 1995).

Yapıştırıcının Adı	Karıştırma Oranı (yapıştırıcı sertleştirici)	Sertleşme			Mukavemet		Kullanma Sıcaklığı °C
		Sıcaklık °C	Zaman Saat	Basınç (MPa)	Makaslama (MPa)	Kalkma (MPa)	
Epilox EK10	Tek bileşenli	180	2	0,1- 0,3	26	0,1	100
Epilox EK26	100:0	180	2	0,1- 0,3	24	0,4	100
Epilox EGK19	100:9	20	24	0 - 0,1	18	0,05	60
Epilox EKS11	100:3	20	24	0 - 0,1	16	0,05	70
Mökoder L5001	1:1	20	48	0 - 0,1	16	0,05	60
Plastephenal	Tek bileşenli	135-165	0,7 0,5	1 - 2	30	0,5	80
Hartgummi beyaz (sert kauçuk esaslı)	Tek bileşenli	140	1	0,01-0,3	13	0,25	100

Yapıştırıcı malzemeler bileşen sayıları ve sertleşme sıcaklıkları referans alınarak da gruplandırılırlar. Normal oda sıcaklığı değerinde katılaşırlar soğuk yapıştırıcılar (Örnek; tutkal), 200°C değere kadar her hangi bir sıcaklıkta katılaşırlar sıcak yapıştırıcılar olarak isimlendirilmektedirler. Çift bileşenli yapıştırıcı ekipmanlarında esas yapışmaya neden olan reçine ile sertleşmeye neden olan ikinci bileşen birbirlerinden ayrı olarak ayrı kaplardadırlar. Bu yapıştırıcıların, yapıştırma işinden biraz önce, uygun biçimde ve uygun oranda karıştırılmaları gereklidir. Tersisi durumda yapıştırıcı sertleşmez. Bu yapıştırıcı türleri için genelde basınç uygulanması gerekmez. (Tin 2006).

2.1.1.1. Yapıştırılacak Malzeme Türüne Göre Sınıflandırma

Yapıştırıcılar genel olarak gruplandırılmıştır. Yapıştırılacak parçalara göre gruplandırılması kauçuklar, plastikler ve metaller açısından yeterli düzeyde değildir, zira yapıştırılacak parçaların her bir grubunda yapışma gereksinimleri yönünden büyük çeşitlilikler bulunabilir. Örneğin çelik için uygun görülen her hangi bir yapıştırıcı, bakır için uygun görülmeyebilir.

2.1.1.2. Fiziksel Özelliklerine Göre Sınıflandırma

Yapıştırıcı malzemeler farklı fiziksel formlarda bulunabilirler ve her hangi bir pratik için hangi fiziksel formun uygulanacağı montaj, tasarım, imalat ve maliyet gibi değişkenlere bağlıdır. Yapısal birleştirmelerde son dönemlerde tek bileşenli yapıştırıcı filmlerin kullanımı artmıştır. Bu gibi pratiklerde sertleşme için sıcaklık/basınç kombinasyonuna veya sadece sıcaklığa gereksinim vardır. Genellikle yapıştırıcı filmler bağlantı alanı boyunca aynı kalınlığı sağlarlar. Bununla birlikte kısıtlı bir alanda bile yapılabilme, basit ve de temiz bir pratik sağlar. (Bozacı, 2000).

2.1.1.3. Sertleşme Durumuna Göre Sınıflandırma

Yapıştırıcı malzemeleri, sertleşme durumu açısından üç temel sınıfta gruplandırabiliriz.

1. Çözücü temelli yapıştırıcı malzemeler: Natürel yapıştırıcılar, selüloz, vinil, akrilik gibi yapay reçineleri; nitril kauçuk esaslı polimerler, polikloropren, poliüretan ve stiren polimerleri içerir.

2. Termoplastik yapıştırıcı malzemeler: Isı uygulanınca sıvılaşır soğuk uygulama ile sertleşirler. Polietilen, polikrilik, doymuş polyester poliamid içerirler. Bu tip yapıştırıcı malzemelerin çoğunluğu çözücü temelli yapıştırıcı gibi de davranabilirler. Bu gruba ilaveten termoset reçineler ve de inorganik sementler de örnek olabilirler.

3. Kimyasal etkilerle sertleşen yapıştırıcı malzemeler: Genellikle fazlasıyla dayanıklılık gereksinimi ve ağır işleme koşullarına maruz kalınan pratiklerde uygulanırlar. Her hangi bir yapıştırıcı malzemenin kimyasal olarak nitelendirilebilmesi için çekme dayanım değerinin oda sıcaklığı koşullarında 10 MPa değeri aşması beklenir. Bu değer keyfidir. Kimyasal tepkime neticesinde sertleşen termosetleri ve de elastomerleri içerirler. Oda sıcaklık değerinde katılaştıran yani soğuk yapıştırıcılar ve sıcak yapıştırıcılardan amino, poliaromatik, polyester, fenolik, epoksi vb. sentetik temelli yapıştırıcı malzemelerde bu gruba dahildirler. Bu tip yapıştırıcı malzemeler eritilemez ve de çözülmez özelliklerdedirler. (Tin 2006).

2.1.1.4. Yapıştırma Sıcaklığına Göre Sınıflandırma

Yapışma sıcaklığı, yapışmanın gerçekleşmesi için yapıştırıcı malzemenin gerekli sıcaklığıdır. Bu yönüyle yapıştırıcı malzemeler şu şekilde gruplandırılabilir.

a) Soğuk yapıştırıcı malzemeler: 20° C değerinin düşüğünde katılaştıran yapıştırıcı malzemelerdir.

b) Oda sıcaklık değerinde katılan yapıştırıcı malzemeler: 20-30° C bir ara değerde katılan yapıştırıcı malzemeler.

c) Ara sıcaklık yapıştırıcı malzemeleri: 31-100°C bir ara değerde katılan yapıştırıcı malzemeler,

d) Sıcak yapıştırıcı malzemeler: 100°C veya daha yüksek sıcaklık değerinde katılan yapıştırıcı malzemelerdir. (Tin 2006).

2.1.1.5. Kimyasal Türüne Göre Sınıflandırma

Kimyasal çeşidine göre genel olarak kullanılan yapıştırıcı malzemeler aşağıdaki gibi belirtilmiştir.

a) Natürel Mamuller: Yapıştırıcı malzemeler kemik veya deriden meydana getirilen hayvansal yapıştırıcılar bitkisel olanlara nazaran daha iyi bağlanma direncine ve de nem direncine haizdirler. Bu yapıştırıcılar el ile uygulanırlar ve genelde orman ürünlerinde kullanılırlar. Dayanıklı kontrplak imalatında uzun zamandır kazein tutkal uygulamaları kullanılmaktadır. Uzun süreli hava değişim koşullarına karşı dayanıksızdırlar, fakat iyi derecede gözenekleri doldurma yetenekleri vardır ve yapıştırıcı katmanın kalın olması durumunda bile kayda değer biçimde dayanıklıdırlar.

b) Termoplastik yapıştırıcı malzemeler: Termoplastik yapıştırıcılar sıcaklığın artmasıyla yumuşayarak erirler ve de gerilmelerin tesiriyle akmaya meyillidirler. Bağlantı tasarımlarının değiştirilmesiyle zayıf akma dayanımlarının yeri doldurulur. Bu sebeple bu yapıştırıcı malzemeler, pratik işleme koşulları zorlayıcı olmayan; plastik, ağaç, metal veya gözenekli malzemelerden müteşekkil; düşük yük değerine maruz bağlantılarla sınırlıdırlar. Bu tip yapıştırıcı malzemelerin natürel mamullerden ayrıcalığı daha yüksek bağlanma dayanımı, deformasyona ve neme gösterebildikleri dirençleridir.

c) Elastomerik yapıştırıcı malzemeler: Elastomerik yapıştırıcı malzemeler sentetik kauçuk esaslı ve natürel kauçuk esaslı olarak iki gruba ayrılırlar. Genellikle elastomerik yapıştırıcıların dayanım değerleri çok düşük fakat iyi esneklik kabiliyetleri vardır. İşleme anında yüksek gerilimlere maruz bırakılmayan kauçuk, kum, kağıt gibi materyallerin birleştirilmesinde kullanılırlar. Bunlar da termoplastik gibi ısı etkisiyle yumuşarlar ancak tamamen erimezler. Kauçuklar; dayanım, dayanıklılık, yapışkanlık ve yapışkan direnci gibi özelliklerde diğerlerinden büyük farklar gösterirler. Natürel kauçuk esaslı yapıştırıcı malzemelerin üstün yapışkan özellikleri vardır. Stirenbutadien yapıştırıcılar; natürel kauçuk türleriyle bağlantı dayanım değerleri benzer olmakla beraber çoğunlukla daha iyi yaşlanma özellikleri bulunur. Neopren yapıştırıcıların, dayanım, sıcaklık direnci ve hızlı yapışma

özellikleri diğer tip kauçuk yapıştırıcı malzemelere kıyasla daha üstündür. Bu yapıştırıcı türleri ayakkabı ve otomotiv sanayisinde natürel kauçuğun uygulanamadığı hallerde; metallerin, derinin ve plastiklerin birleştirilmesi amacıyla yaygın biçimde kullanılırlar. Bunlar genellikle sıcaklık veya çözücü aracılığıyla yeniden uygulama yapılmaya müsait değildir. Sentetik yapıştırıcıların en önemlileri olarak neoprel ve nitril yapıştırıcılar kabul görürken diğer elastomerikler de belli bazı özellikleri saklanması açısından önem kazanmaktadır. Bu sebeple silikon kauçuklar ve polibutilenler basınç duyarlılığı yüksek şeritlerin üretiminde kullanılırlar. (Tin 2006).

d) Termoset reçine yapıştırıcı malzemeler: Termoset reçineler kimyasal tepkime veya sıcaklık etkisi sonucunda polimerizasyon yoluyla sertleşirler. Bu sınıftakilerin çoğunluğu, bazı türleri 60°C değerinin altında yararlı olsa dahi 200°C değerinin altında çözülmezler. Farklı kimyasal çeşitleri, farklı katılma faaliyetlerine gereksinim duyarlar. Termoset yapıştırıcıları diğer kimyasal sınıftakilere kıyasla daha dirençli birleştirme sağlarlar. Bundan dolayı; bazı yapısal pratiklerde tercih sebebidirler. (Tin 2006).

e) Çifte Polimer yapıştırıcı malzemeler: Termoset reçineler ile elastomeriklerin veya termoplastiklerin karıştırılmaları yoluyla elde edilirler. Bu şekilde, karışımın her bir ögesinde ayrı ayrı bulunan sınırlayan nitelikleri iyileştirilmiş olur. Reçineler ile elastomerikler, sıcaklık dayanımını arttırmak amacıyla karıştırılırken; kauçuk ve termoplastikler ise, termosetler ile esnekliği iyileştirmek amacıyla karıştırılırlar, tersi durumda kırılgan olurlar. Metal-metal yapısal birleştirmeler için en önemli bileşimler, nitril kauçuklar ile takviye edilmiş fenolik reçinelerdir. Toz, film veya sıvı halde bulunabilirler. Elastomeriklerin olması yapışkan katmanına kısmen elastikiyet sağlar. Bundan dolayı daha iyi yorulma dayanımı ve daha düşük gerilim dağılımı sağlanmış olur. Fenolik bileşiminde yer alan bileşenlerin polimerizasyonu neticesinde ortaya çıkan su bazlı yan mamullerin etkilerini kırmak amacıyla 0,7 MPa değerinde yapışkan basınçlarına gereksinim vardır. (Tin 2006).

Uygun yapıştırıcı malzemenin tercihi için; yapıştırılacak elemanların malzemesi, biçimi ve ebatları, yükleme tipi (statik, dinamik), maruz kalınan gerilmeler (basma, çekme, kesme, sıyırma), kullanma sıcak değeri ve kimyasal tesirlere maruz kalma veya kalmama durumları gibi değişkenlerin dikkate alınması gereklidir. (Minez 2000).

2.1.2. Yapıştırma Bağlantılarının Avantajları

Yapıştırmanın, çözülemeyen diğer birleştirme çeşitlerinin tamamlayıcısı olarak:

a) Geleneksel birleştirme metotlarında (lehim, kaynak benzeri) ısı etkisiyle ortaya çıkan hatalar (gerilme birikimleri, moleküler deformasyon veya değişim, mukavemet kaybı, çarpılmalar ve çekmeler vb.) bu yöntemde görülmez.

b) Yapıştırma dışında kalan, bağlantı malzemeleri ile birleştirmenin imkansız olduğu ince materyallerin bu yöntemle birleştirilmesi gerçekleşir.

c) Birleştirme esnasında yüksek basınç ve ısı etkisine gereksinim duyulmaz. Doğal olarak birleştirilen malzemeler spesifik yapılarını korurlar.

d) Bir birinden farklı türde malzemelerin bilhassa metaller ile metal olmayan malzemeleri, birleştirmede elverişli bir birleştirme yöntemidir. (Cürgül 1990)

Bunların dışında sızdırmazlık, elverişli olmayan diğer birleştirmelerin alternatifi olması, tamamıyla farklı konstrüksiyonlar oluşturabilmek amacıyla kullanılırlar. Yapıştırma birleştirmeleri ince sac konstrüksiyonlarına ihtiyaç duyulan alanlar için elverişlidirler. Mekanik ve termik zorlanmalar karşısında dayanımı düşük malzemeler (hafif madenler, sertleştirilmiş ve iyileştirilmiş çelikler) yapıştırıcı bağlantı yöntemi ile iyi bir biçimde birleştirilebilirler. Aşınmaya maruz elemanları (debriyaj balataları, fren benzeri) birçok durumlarda yapıştırma yöntemiyle sağlıklı ve ekonomik bir birleştirme sağlanabilir. (Tin 2006). Yapıştırıcı ile birleştirme yönteminin seri imalatta kullanımı daha elverişlidir. (Gediktaş 1995).

2.1.3. Yapıştırma Bağlantılarının Dezavantajları

Yukarıdaki avantajlarına ilaveten yapıştırma bağlantılarının dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar;

- Dezavantajlarından beklide en önemlisi sıcaklık etkisidir. Yapıştırma bağlantılarının kullanıldıkları yerlerde işletme sıcaklığı sınırlıdır. Lehim ve kaynak bağlantılarına göre daha azdır.

- Yapıştırılacak yüzeylerin hazırlanması zaman alır.

- Uygulama anında yapıştırılacak yüzeylerin tamamında yapıştırıcı eksik kaplanabilir, böyle bir yapıştırma alanının azalması durumunda mukavemet değeri de düşer.

- Yapıştırıcıların bazıları kimyasal alanlara ve neme karşı duyarlıdırlar. Böylesi alanlarda olmaları halinde zaman içerisinde mukavemetleri azalır.

- Yapıştırma bağlantıları uzun zaman sonra ancak kullanılabilirler. Uygulamadan hemen sonra kullanılamazlar.

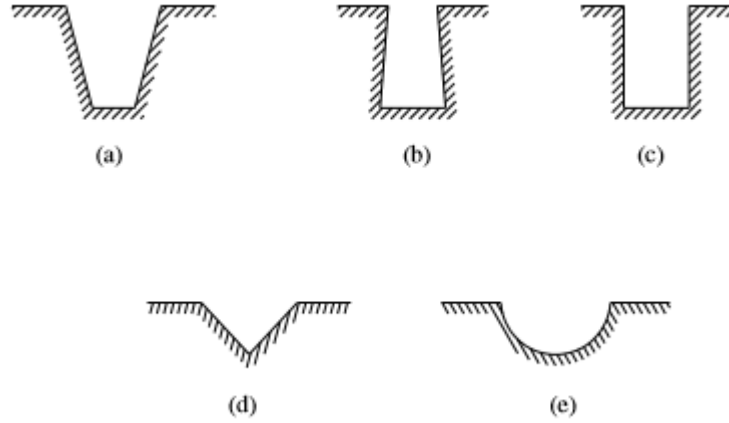
- Çeşitli ısı genleşmeler sebebiyle gerçekleşen çekme-makaslama dayanımı ve sıyrılmaları minimize etmek amacıyla bağlantı tasarımı özenli yapılmalıdır.
- Yanlış bir yapıştırma bazen düzeltilemez.
- Ön hazırlıklar bazı pratiklerde ekstra emek ve maliyet oluşturabilir.
- Genellikle zor işleme koşullarında uzun zaman dayanım gösterip gösteremeyeceği bilinemez. Üstelik yapıştırma birleştirmelerinin onarım amacıyla ayrılması zor olur.
- Çözücü tabanlı yapıştırıcıların kullanımı halinde yanma, zehirlenme gibi bazı tehlikeli durumlar oluşabilir. (Minez 2000).

2.1.4. Yapıştırma İşlemi

2.1.4.1. Yapıştırma Yüzeyinin Hazırlanması

Yapıştırıcı ile birleştirmelerde bağlantı mukavemetinin artırılması için yapıştırıcı uygulanacak yüzeylere çentik atılmalı veya yeterince pürüzlendirme yapılmalıdır. Böylece bağlantıda yüzey pürüzleri ve adhezyon kuvvetleri kuvvetin aktarılmasında en önemli etken olmaktadır. Ayrıca çoğu kez yapıştırıcının kendi mukavemet değerinden daha yüksek sonuç vermektedir. Bir yapıştırma bağlantısının iyi hazırlanıp hazırlanmadığı kopmanın yapıştırıcı ile parça arasında değil de yapıştırıcı maddenin kendisinde meydana gelmesinden anlaşılır. Molekül bağlarının kuvvetinin şiddeti, yapıştırılan yüzey alanlarının temiz olması ve de yabancı unsurlardan arındırılmış olmasına bağlıdır. Genelde parçaların yüzeylerinde adsorbe edilen gazlar ve kimyasal buhar molekülleri bulunur. Metallerde ise çoğu zaman ince bir oksit katmanı bulunur. Bunların dışında transfer koşulları, depolama ve üretim metotlarından kaynaklı da kir ve yağ gibi unsurlar yüzeyleri kaplayabilir. (Nemes, Lachaud ve Mojtabi, 2005).

Yüzeylerin pürüzlü olması yapıştırılmış bağlantılarının mukavemetini hatırı sayılır ölçüde etkiler. Parçaların pürüzlerinin aralarına girerek sertleşen yapıştırıcı bir şekil bağı oluşturur. Bundan dolayı yapıştırılan parçaların yüzeyleri fazla parlak olmamalıdır, (yalnız pürüzler mukavemeti ne seviyede etkiler, bunun tespiti güçtür.)



Şekil 2.2. Yüzey pürüz formları (a) pirizmatik, (b) konik, (c) silindirik, (d) V, (e) küresel (Anık vd.1997).

Kaliteli bir yapıştırma bağlantısı için önerilen pürüz derinlikleri 3 ile 10 μm ' dur. Yapıştırıcının çeşidi boşlukları doldurması ve tutunması bakımından pürüz formu ile birlikte değerlendirilmelidir. (Şekil 2.2). Genellikle en fazla kullanılan ve tutunma bakımından en kullanışlı V tipi pürüz formudur. Daha sağlıklı bir tutunma mukavemeti için yüzeyleri kir ve pislikten arındırmak ve elverişli bir pürüz formu uygulaması lüzumludur. Bunu sağlamak içinde birleştirilmesi istenen parçaları yüzey ön işlemine tabi tutmak gerekir. Çoğu zaman yapıştırılması istenen parça yüzeylerinin yağdan iyi bir şekilde arındırılması kafi olur. Yalnız eğer yüzeyler oksitlenmiş ise ve bu oksit tabakası Al alaşımlarındaki gibi asıl malzemeye kuvvetli bir biçimde bağlanmamış ise bu tabakanın da giderilmesi gereklidir. Galvaniz uygulanmış veya kadmiyum kaplama yüzeyler bulunuyorsa lak ve boya katmanlarının da giderilmesi gereklidir. Eloksal uygulanmış alüminyum parçalarının yüzeylerindeki (anodik oksidasyon) oksit katmanının giderilmesine gerek yoktur. (Gediktaş 1995).

2.1.4.2. Ön Hazırlık Çalışmaları

Molekül bağ kuvvetlerinin şiddeti yapıştırılacak parça yüzeylerinin temiz olmasına bağlıdır. Bunun için sıralı bir şekilde öncelikle yağların temizlenmesi, yapışma yüzey alanının pürüzlendirilmesi (diş açma, zımpara vb.), yüzeylerin yıkanıp kurutulması işleri yapılmalıdır. Yağı çözmek için genellikle mazot, benzin, tetraklorür, benzol, karbon, triklor etilen, aseton, perkloretilen ve alkali özlü temizlik malzemelerinin suda eriyenleri kullanılmaktadır. Yapıştırılacak parçalardaki yağlar ve kirler giderildikten sonra ise soğuk suyla yıkanmalı ve sıcak havayla kurutulmalıdır. Kurutulan parçalar beklenmeden yapıştırma işlemine geçilmelidir. (Bozacı 2000).

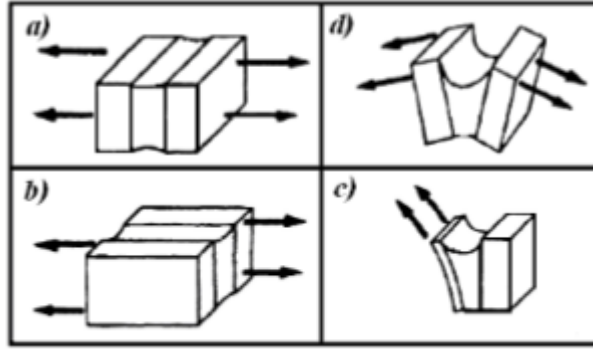
Ön hazırlığın aşamaları:

- Yağların ve kirlerin temizlenmesi
- Yapıştırma yüzey alanının pürüzlendirme işlemi (zımpara vb.)
- Pürüzlendirme sonrası yapıştırma yüzey alanın yıkanması
- Yapıştırma yüzeyinin kurutulma işlemi.

Yağ veya diğer pisliklerin giderilmesi amacıyla öncelikle yapıştırma yüzeyinin kabası temizlenmeli sonrasında farklı bir yerde (temiz veya az kirlenmiş eriyikle) bir kez daha yıkanma işlemi yapılmalı. Yapıştırma yüzeylerinin pürüzlendirilme işlemi zımpara veya kum püskürtmekle yapılabilir. Zımpara kağıdı tane iriliği 100 (2-0 aralığı da olabilir) belki kısmen daha ince bir kağıt kullanılmalıdır. Yapıştırma yüzeyi, zımparalama hatları farklı yönlerde doğru olacak biçimlerde işleme hazır hale getirilmelidir. Eğer kum püskürtme işlemi yapılacaksa ince taneli kum seçilmelidir. Pürüzlendirme işleminden hemen sonra mümkünse bekletilmeden yapıştırma işlemi yapılmalıdır. Böyle hazırlanan yüzeylerde yağların vb. giderilmesi için tekrar yıkanmasının mukavemete bir etkisi yoktur. Bilakis çoğu zaman, dikkatli olunmazsa bekletilme sırasında yüzeyin tekrar kirlenmesi olasıdır. Yüzeylerinde farklı bir metal katman bulunan malzemelerin (Al alaşımlarında olduğu gibi) kaplamasının hasara uğramaması, yüksek mukavemete sahip hafif metal alaşımlarının da zaten çentik atılmasından dolayı kum püskürtme veya zımpara işlemleri uygulanmaz. Böylesi durumlarda yüzeylerin alüminyum veya çelik yünü ile ovularak temizlenmesi yeterlidir. Yüzeydeki yağın kimyasal bir maddeyle temizlenmesinden sonra malzemeler genelde soğuk suyla güzelce çalkalanıp yıkanır ve yüzey alanlarındaki fazlalıklar giderilmiş olur, daha sonra farklı kimyasal maddeler ile (su ile seyreltilmiş asit, alkali banyoları benzeri) ikinci bir işlem uygulanır. Sonra da bol su ile yeniden iyi bir şekilde yıkanır. Böylelikle yapışma yüzeylerinde temizleyicilerin bir takım kalıntıları da giderilmiş olur. Son olarak böylece hazırlanan yapışma yüzeyleri temiz bir alanda ekseriyetle sıcak havayla kurutulup yapıştırılarak birleştirilme işlemi tamamlanır. Temizlenen ve kurutulan parçalar uzun bir zaman bilhassa nemli yerlerde bırakılmamalı çünkü oluşabilecek oksitlenmelerden dolayı bağlantının mukavemeti negatif yönde etkilenir. (Gediktaş 1995).

2.1.4.3. Yapıştırma Bağlantılarına Etki Eden Kuvvetler

Yapıştırıcı bağlantılarını tasarlarken olabildiğince kayma gerilmeleri dikkate alınarak tasarım yapılmalıdır. Bu çeşit bağlantı şekilleri için çekme gerilmeleri elverişli bir zorlama olmaz. Şekil 2.3’de yapıştırma bağlantılarının maruz kaldığı kuvvetler gösterilmiştir.

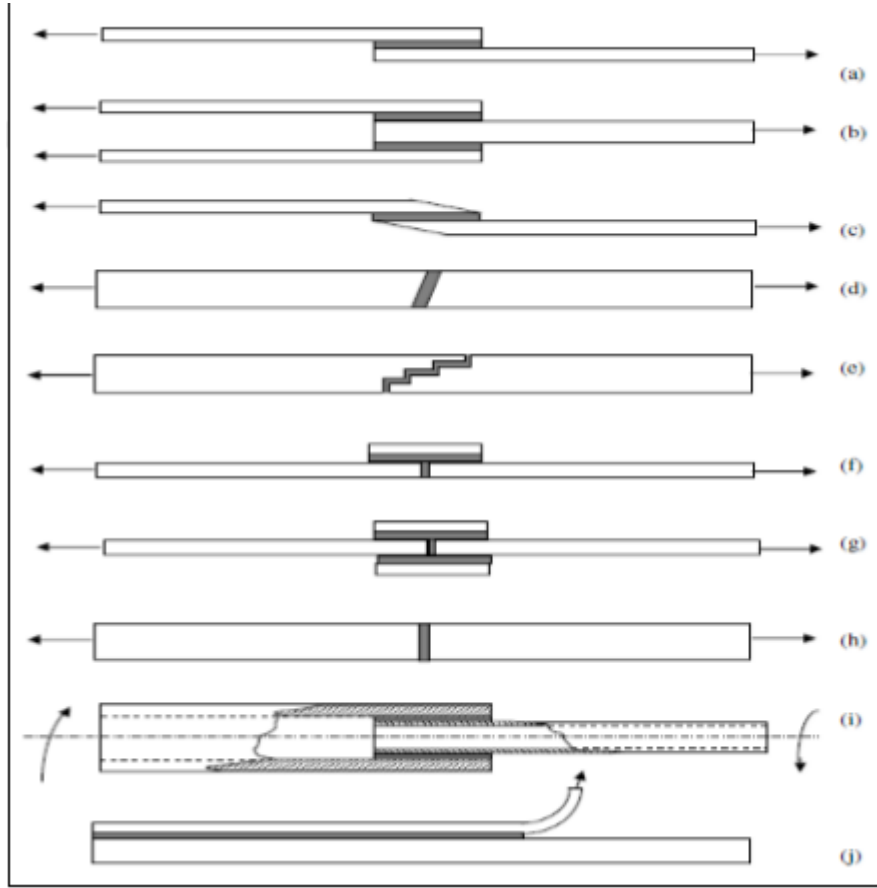


Şekil 2.3. Yapıştırma bağlantılarında farklı kuvvet uygulamaları (Rende 2000).

- a) Çekme gerilmeleri; yapıştırıcıların çekme mukavemetleri az olduğundan, olabildiğince engellenmelidir.
- b) Kesme gerilmeleri; yapıştırıcı bağlantılarına uyumludur.
- c) Ayrılma; tek yönlü kuvvet etkisi olduğundan engellenmelidir.
- d) Ayırma; bu yüklemeye de toleransı az olduğundan engellenmelidir (Rende 2000).

2.1.5. Yapıştırma Bağlantı Çeşitleri

Yapıştırılmalı bağlantıların türleri Şekil 2.4’ de gösterilmiştir. Bu bağlantıların ekseriyetle tercih edileni Şekil 2.4.a’ da görülen tek tesirli bindirme bağlantısıdır. Tek tesirli bağlantı tipi yapıştırılmalı bağlantıların mekanik yeteneklerinin saptanmasında öteki bağlantı tiplerine kıyasla imalatının kolay olması nedeniyle araştırmacıların tercih sebebidir. (Adin, Altun, Yaşar, 2011).



Şekil 2.4. Yapıştırma bağlantı tipleri, (a) tek tesirli bindirme, (b) çift tesirli bindirme, (c) boyun bindirme, (d) açılı bindirme, (e) teraslama, (f) tek takviyeli bindirme, (g) çift takviyeli bindirme, (h) alın bağlantı, (i) silindirik bindirme, (j) soyulma (Adın, 2007)

2.2. Grafen Nanopartiküller

Grafenler, her bir atom parçacığının kendisine komşu üç atom parçacığına bağlı, altıgen (bal peteği şeklinde) karbondan oluşmuş atom dizilerine sahip iki boyutlu tek bir grafit tabakalarından müteşekkildirler. (Li ve Chou, 2003). Cılız Vander Walls kuvvetlerinin etkisi ile birlikte bulunan birkaç grafen levha parçası olan grafit form olarak doğada doğal olarak vardır. Yalnız bu tabakaların tek bir tabaka olması durumunda hayli eşsiz yeteneklere de malik olurlar. Bu tabakaların oldukça geniş yüzeyleri ve yüzeylerinin güçlü enerjileri vardır. En etkili tutunma çeşidi olan grafenli (sp² karbon-karbon) yapıştırma şekli teorik bakımdan grafene mükemmel yapısal yetenekler kazandırır. (Kut ve Güneşoğlu, 2005).

Çok iyi seviyede elektrik iletimi, eşsiz termal ve mekanik yetenekleri sebebiyle grafen; malzeme fiziği ve yoğun madde fiziği açısından gayet umut vadeden bir madde olarak görülmektedir. (Lee ve ark., 2008). Sensörlerde, enerjide, elektronik ve fotonik aygıtlarda ve daha çoğu alanlarda olası pratikleri bulunmaktadır. (Stoller ve ark., 2008). İlk defa 2004 yılında, tabakalı malzemeyi kuvvetli bir biçimde atomik seviyedeki kalınlıkta tabakalara

ayrıştırıran yapışkan bant kullanılarak mikromekanik ayrışma sebebiyle imal edilmiştir. (Novoselov ve ark., 2005).

2.3. Yorulma Olayı ve Tarihçesi

Mekanik malzemeler çoğu zaman yalnız statik yüklere maruz kalmazlar. Mekanik malzemelerin çoğunluğu ekseriyetle kararsız veya tutarsız yinelenen yüklere maruz bir şekilde işlerler. Bundan dolayı mühendislerin dikkati; darbeli, değişken ve tekrarlı yükler sonucu malzemelerde oluşan çeşitli kırılma şekillerinde olmalıdır. Değişebilir yüklemeler ile işleyen parçalar, yük şekline göre kararsız veya tutarsız yinelenen gerilmeler oluştururlar ve bunun gibi gerilmeler genelde malzemeleri yorulma nedeni kırılmaya maruz bırakırlar. (Karcı, 2002).

Mühendislikte yapısal elemanların yorulma nedeniyle deformasyonu ve kopmanın gerçekleşmesi günümüzde bile mühendisler adına zorlayıcı bir sorun olmaktadır. Bu sorun bilhassa, tutarsız yinelenen yükler ile çalışılan ve yapı malzemesinin yüzey biçimsizliği içerdiği hallerde önemlidir. Yorulma, yinelenen gerilmeler ve uzamalara karşı malzemenin gösterdiği davranıştır. Yorulmanın en karakteristik niteliği; malzemelerdeki süreksizlikler, hasarlar, çatlaklar gibi olguların, yüklenen tekrarlı gerilmenin de etkisi ile aralıksız ilerlemesi ve nihayet malzemeyi koparmasıdır. (Günaydın, 2003).

Tasarım mühendislerinin ekseriyetle karşılarına çıkan sorun, mekanik malzemelerin performansının iyi, ağırlığının düşük ve ömrünün uzun olması benzeri özelliklerini az bir maliyet ile ve mümkün mertebe kısa imalat sürelerinde tasarlanması beklentisidir. Çelişkili bu tip beklentileri karşılayabilmenin tek bir yolu vardır, o da çok daha iyi yorulma dayanımında malzemelerin modellenmesidir. Ancak yorulma tahlili ve ömür hesabı ile ilgili karşılaşılan bazı sorunlar vardır. Bunlar şu şekilde derlenebilir. (Ünal, 2006).

- Ömür hesaplamaları, dayanım hesaplamalarına nazaran doğru sonuçları daha kısıtlı vermektedir.
- Yorulma yetenekleri mekanik hesaplamalar doğru sonuçlar vermezler. Direkt ölçümlerinin yapılması gereklidir.
- Ömür sayımının doğru ölçülebilmesi gerçek ebatlardaki bir prototipi test ederek sağlanabilir.
- Laboratuvarlarda daha uygun koşullarda yapılan deneyler, reel işleme ortamındaki gözlemlenen ömürden farklı olabilir.

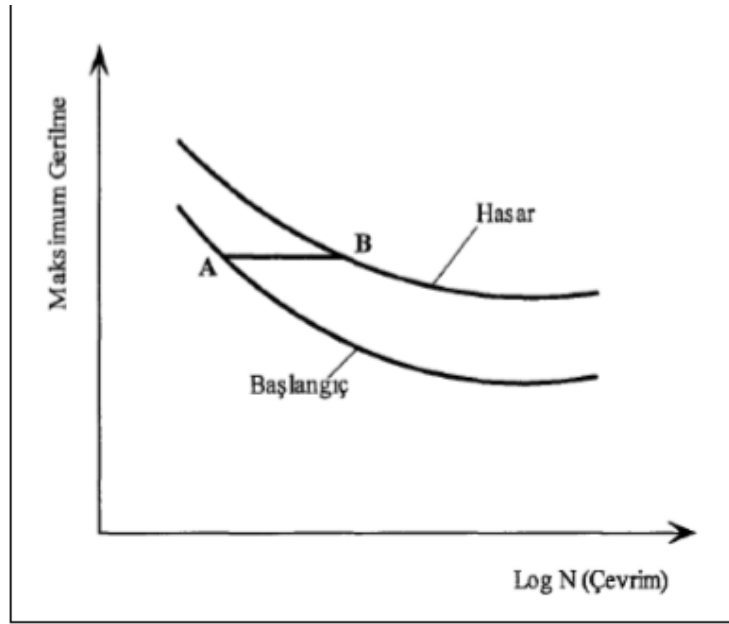
Bu gibi sorunların tamamı, ilerlemiş yazılım tabanlı analizler, tamamlanan çok sayıda laboratuvar sonuçları ile oluşturulan veri tabanları ve bu verilerin yardımıyla elde edilen amprik formüller aracılığıyla giderilmeye çalışılmaktadır.

İkinci Cihan Harbi sonrasında yapıştırmanın teknolojik gelişimiyle beraber yapıştırıcı birleştirmeleri kümülâtif olarak kullanılma girmiştir. Bu durum ise yapıştırıcı bağlantılarında yorulma konusunu araştırılması elzem olan değerli bir araştırma alanı yapmaktadır. Bilhassa 1970'lerin sonrasında yapıştırma bağlantılarının havacılık ve uzay endüstrisindeki uygulamalarının artması, dinamik ve değişken yükler altında yapıştırma bağlantılarında yorulma analizleri çalışmalarının değerini hayli arttırmıştır. Yorulma hadisesinin malzemelerde bulunan bir kısım noksanlar ve süreksizlikler sonucunda ortaya çıktığı ve malzemelerde tahribata sebep olduğu bilinen bir durumdur. Bu yönüyle incelendiğinde bilhassa yapıştırma bağlantılarının ister parçayla yapıştırıcı arasında kalan yapışma alanında isterse de yapıştırıcının kendi içerisindeki mikron seviyesinde kopmaların ve süreksizliklerin gerçekleşmesi olasılığı daima vardır. Göz ile fark edilemeyen bu hatalar değişken yükleme durumlarında giderek gelişip yorulma tahribatına sebebiyet vermektedir. Bundan dolayı statik yüklere maruz yapıştırma bağlantılarında mekanik özellik tespiti ile beraber kararsız/değişken yüklere maruz yorulma hareketlerinin de tespiti her koşulda güvenli alanda araştırma yapmak isteyen araştırmacılar gözüyle hayati önemdedir (Günaydın, 2010).

Yorulma hadisesinin oluşum, gelişim ve yorulma tahribatlarının engellenmesi alanlarında zaman içerisinde hatırı sayılır miktarda çalışmalar üretilmiş ve bu çalışmaların nihayetinde önemli ilerlemeler elde edilmiştir. Bir mühendislik sorunu olarak yorulma hadisesinin ortaya çıkışı ve üretilen ilk çalışmaları tarihsel olarak araştırmak olasıdır. Buhar ile çalışan makinelerin gelişimi ile mekanik işleyen ve hareket halinde çalışan parçaları çok olan araçların da ekseriyetle kullanımının artmasıyla tekrarlı değişken yükler altında işleyen parçalarda tahribatların olduğu anlaşılmıştır. İri makine parçalarında kesit değişikliği olan bölgelerde tekrarlı değişken yük uygulamaları ile kırılmalar gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Raporlanan ilk yorulma araştırma çalışması, Bir maden mühendisinin (Alman W.A.S. Albert) 1829 senesinde demir zincir ile yaptığı tekrarlı yükleme testleri olarak kayıtlara geçmiştir. 1840'lerde ise Rankine, malzemelerde tekrarlı değişken yüklerin etkisini gevrek olarak kırılmasıyla analiz etmiştir. Sonuç olarak 1840 ve 1850 yılları arasında tekrarlı değişken yüklerin etkisine maruz bırakılan bir malzemede dayanımın düştüğü ve yorulmanın gerçekleştiği neticesine varılmıştır (Günaydın, 2003 ve Ünal, 2006)

Yorulma hadisesi ile ilgili ilk sistemli çalışmayı, Agust-Wöhler 1850 ve 1860 arası yıllarda kendisinin geliştirmiş olduğu yorulma test aygıtı ile demiryolları vagonlarının akslarını inceleyerek tamamlamıştır. Bu çalışmayla yorulma hadisesinde tepe geriliminden öte gerilim aralığının daha kritik olduğunu tespit etmiştir. Gerilim-çevrim sayısı (S-N) diyagramını ilk Wöhler çizerek kullanmıştır. Bu diyagramı kullanarak sınır gerilim aralığı altında kalan gerilimlerde numunelerin kırılmadığını göstermiştir. 1900'lerde yorulma hadisesinin gözlemlenmesi amacıyla optik mikroskop kullanılmaya başlanmıştır. İlerleyen zamanlarda ise elektron mikroskobu geliştirilmiş ve Irwin, Lineer Elastik Kırılma Mekaniği'nde temel olarak kullanılan K (Gerilme Şiddet Faktörü) değerini belirlemiştir (Günaydın, 2003).

1950'lerin sonlarına gelindiğinde ise yorulmanın ömür tespiti için iki yöntem geliştirilmişti. İlki Manson-Coffin bölgesel şekil değişimi bakışı olarak bildiğimiz gayesi çatlağın oluşumunun kestirilmesi ve açıklanması olan yöntem. Diğeri ise "Lineer Elastik Kırılma Mekaniği" (LEFM) olarak da bildiğimiz ve çatlağın ilerlemesinin açıklanmasına yönelik olduğu metottur. (Ünal, 2006).



Şekil 2.5. Yorulma çatlak başlangıcı ve hasar eğrisi (Karcı, 2002)

Metallerde yorulma olayı, Şekil 2.5' de görüldüğü üzere tahribat gerçekleşinceye kadar logaritmik çevrim-gerilme aralığı diyagramının kullanılması ile karakterizedir. Bu diyagramda gerilme aralığının en yüksek gerilmeye eşit olabilmesi amacıyla en düşük gerilme sıfır olarak kabul edilmiştir. Verilen en yüksek gerilme değeri için alttaki eğri çatlağın

başlangıcını, üstteki eğri ise tahribatın oluşumunu belirtmektedir. A-B arasında kalan hat ise yorulma çatlağının oluşumunu, ilerlemesini ve son olarak kırılması kademelerini göstermektedir. Bunun dışında A' dan başlayarak ilerleyen yatay hat belirtilen en yüksek gerilme için hasar eğrisiyle kesişmezse başlamış olan çatlak ilerlemiyor yada durdurulmuş demektir (Karcı, 2002).

2.3.1. Yorulma Hasar Çeşitleri

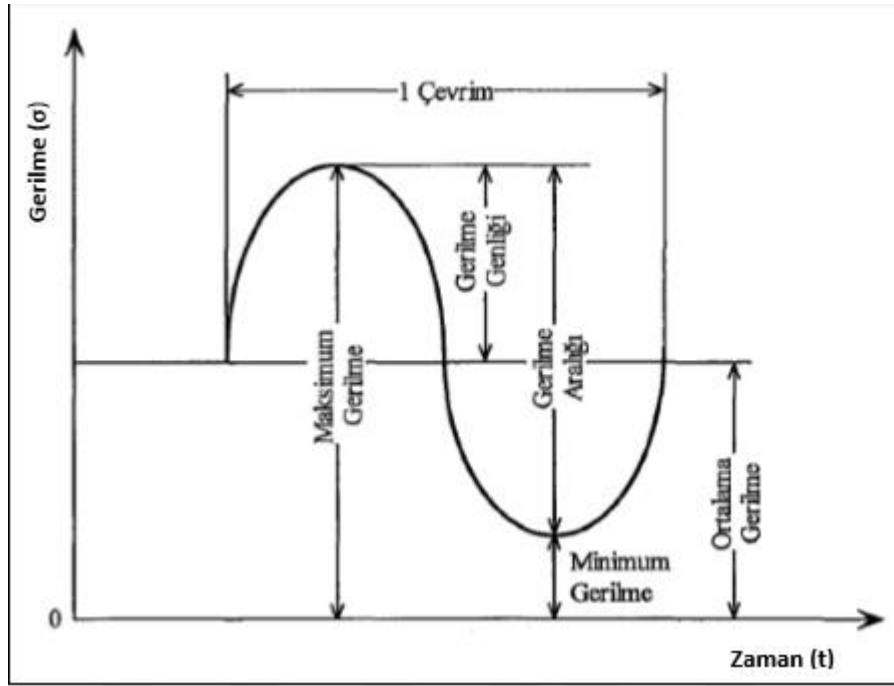
Malzemelerde yorulma sonucu tahribatlar çeşitli biçimlerde gerçekleşmektedir. Yalnızca çevrimsel (yükselip düşen) gerilme ya da deformasyon uygulaması sonucunda mekanik olarak yorulma gerçekleşmektedir. Tekrarlanan gerilmelerin aşırı sıcaklık ile meydana getirdiği yorulma tipine sürünme yorulması, çevrimsel yüklenen malzemeye yükselip düşen ısı işlem uygulanması olayına ısı-mekanik yorulma denmektedir. Korozyona sebep olabilecek veya kimyasal ortamlarda malzemeye uygulanan tekrarlı yükler korozyon yorulmasına neden olmaktadır. Genellikle korozyona sebep olabilecek ortam koşulları pasif ortam koşullarına göre yorulma ömrüne azaltıcı etki yapar. Birleştirilen malzemelere tekrarlı gerilmeler uygulandığında malzemeler arasında gerçekleşen yorulma temas yorulmasıdır, bu gerilmeler darbeler olarak malzemelere etki ederse malzemelerde sürtünen yüzeylerin arasında gerçekleşen yorulma aşınma yorulmasıdır. Mekanik malzemelerde görülen tahribatlar ekseriyetle, bahsi geçen yorulma tahribatlarından herhangi biri şeklinde gerçekleşebilmektedir (Günaydın, 2003).

2.3.2. Yorulma Testi ve Teknik Terimleri

Malzemelerde yorulma ölçümü, yorulma deneylerinin yapılması amacıyla özellikle dizayn edilmiş cihazlar ile gerçekleştirilir. Bu cihazlar ile malzemelere zamansal açıdan değişken olunan sinüs eğrisi şeklinde gerilmeler uygulanır. Bu sinüs eğrisi şeklindeki dalgalarda gerilme yükselerek en yüksek ve düşerek en az değerlere ulaştırılır. Bu şekilde gerilmenin en yüksek ve en az değeri arasında sürekli bir yüklenme yapılmıştır (Günaydın, 2003).

İstikrarsız gerilmeye maruz kalan mekanik parçalarda gerilmelerin en yüksek değerleriyle bunların periyodik değişimleri ehemmiyetlidir. Tekrarlı bir biçimde değişikliğe uğrayan bu gerilmeler parçanın içyapılarında çatlak ve ayrılmalara neden olduğundan, kopma olayı statik sınırların çok altında bir değerde gerçekleşir. İstikrarsız gerilmelerin etkisi ile parçaların içyapılarında ki değişimlere yorulma, parçaların koptuğu kadar ki dayanma

süresine ise yorulma ömrü adı verilir. Yorulma zorlanması ise, malzemeler yön ve büyüklüğün düzenli veya düzensiz sıklıkla değiştiği kuvvet ve momentlerin etkisindedir. Zorlamanın gerçekleştiği sırada yükler istenilen ölçülerde tekrarlanabilir ve zorlamanın uygulandığı zaman aralıkları hazır bulunabilir. Kuvvetin en düşük ve de en yüksek olduğu değerler sıfır konumu referans alındığında aynı veya tersi işarette olabilir. Kuvvet yada moment aynı değerlerde biri pozitif diğeri negatif iki sınır değer arasında değişiyorsa, dalgalı yorulmadan bahsedilir. Yorulma ölçümü genelde sinüs eğrisi şeklinde yükleme ile gerçekleştirilir. Böylelikle yorulma yükündeki vaziyete bağlı olarak Şekil 2.6' da gösterilen bir takım parametreler tanımlanır. En yüksek ve en düşük gerilme belirlenerek öteki gerilme parametreleri, gerilme genliği (σ_a), yorulma yük oranı (R), gerilme aralığı (σ_r) ve de ortalama gerilme (σ_m) gibi parametreler de kolay bir biçimde belirlenebilirler. (Günaydın, 2003).



Şekil 2.6. Yorulma testi için sinüs eğrisi şeklindeki yükleme (Günaydın, 2003)

Yorulmayla alakalı olarak yapılan çalışmalarda tatbik edilen gerilmeler ve de ulaşılan sonuçlar ile ilgili tanımlanan bir takım teknik terimler aşağıda açıklanmaya çalışılmıştır. (Karcı, 2002).

Çevrim (N): Şekil 2.6' da görünen gerilme zaman diyagramının periyodik biçimde tekrarlandığı en küçük bölgesine çevrim adı verilmektedir.

Maksimum(Tepe) Gerilme (σ_{maks}): Tatbik edilen gerilmelerden rakamsal açıdan en yüksek değerdeki gerilmedir. Bu değer pozitif, sıfır ya da negatif olabilir.

Minimum(çukur) gerilme (σ_{min}): Tatbik edilen gerilmelerden rakamsal açıdan en düşük değerdeki gerilmedir. Bu değer de pozitif, sıfır ya da negatif olabilir.

Ortalama gerilme(σ_m): Tepe ve çukur gerilmelerinin aritmetik ortalama değeridir.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{maks.} - \sigma_{min.}}{2} \quad (2.1)$$

Gerilme aralığı ($\Delta\sigma$): Tepe ve çukur gerilmelerinin arasındaki fark değeridir.

$$\Delta\sigma = \sigma_{maks.} - \sigma_{min} \quad (2.2)$$

Gerilme genişliği (σ_a): Gerilme aralığının yarısı değeridir.

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (2.3)$$

Gerilme oranı (R): En düşük (çukur) gerilme değerinin en yüksek (tepe) gerilme değerine oranı olarak tarif edilir.

$$R = \frac{\sigma_{min.}}{\sigma_{maks.}} \quad (2.4)$$

R gerilme oranı değeri yorulmanın yükleme biçimini belirtmektedir. Aşağıdaki Tablo 2.3' de önemli yükleme şekilleri gösterilmiştir.

Tablo 2.3. R değerlerine göre yorulma yük biçimleri

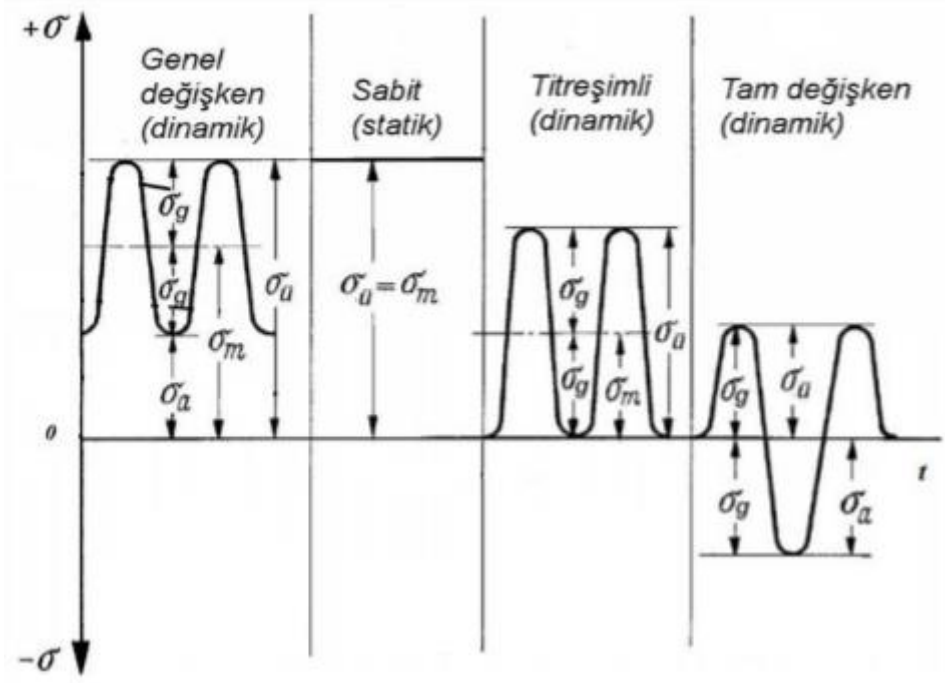
Yorulma Yük Oranı	Yorulma Yük Biçimi
R=0	Çekme-Yükünü Boşaltma
0<R<1	Çekme-Çekme
R=-1	Çekme-Basma
-1<R<0	Çekme-Basma
1<R<∞	Basma-Basma

Yorulma dayanımı (N sayıda çevrim için): Malzemenin belirlenen bir N sayısında çevrim sonrasında çatlama ya da kopma ile sonuçlandığı gerilme değeridir.

Yorulma ömrü: Bir birine benzeyen numunelerin sabit şartlarda belirlenen herhangi bir gerilme değeri altında çatlaması ya da kopması ile sonuçlandığı N çevrim sayı değerlerinin

ortalaması, yorulma ömrünü tanımlar.

Yorulmanın incelendiği deneylerde yorulma yeteneklerinin belirlenilmesi istenen malzemenin işleme koşullarında karşı karşıya kalabileceği yüklemelere benzer biçimde, yükleme dağılımı tipleri tatbik edilebilmektedir. Genliği sabit olan yorulmaların araştırılmasında Şekil 2.7’ de gösterildiği şekli ile bu yüklemeler çekme-çekme, çekme-basma ve de çekme-boşaltma şekillerinde gerçekleştirilebilmektedir. Tatbik edilen yükler bakımından yorulma deneyleri, eksenel gerilmeli, eğme gerilmeli, burma gerilmeli ve birleşik gerilmeli yorulma deneyleri biçiminde gruplandırılmaktadırlar. Eksenel gerilmeli yorulma deneylerinde parçaya uzunluk eksenine doğrultusunda farklı değerlerde basma ve çekme gerilmeleri tatbik edilir. Eğme gerilmeli yorulma deneylerinde parçaya, bir düzlem doğrultusunda tekrar edilen eğme gerilmeleri tatbik edilebileceği gibi, dönerek hareket eden bir parçaya da tekrar edilen eğme gerilmeleri tatbik edilebilir. Burma gerilmeli yorulma deneylerinde parçaya sabit bir eksen doğrultusunda tekrar edilen burulma gerilmeleri tatbik edilmektedir. Sıralanan çeşitli gerilme tiplerinden iki veya daha çoğunun tatbik edildiği yorulma deneylerine birleşik gerilmeli yorulma deneyleri denilmektedir (Karcı, 2002).



Şekil 2.7. Yorulma yükleme biçimleri (Kurbanoglu, 2009)

2.3.3. Yorulma Olayının Gelişimi

Yorulma hadisesi genellikle üç kademede izlenmektedir.

- a) Malzemede çatlağın meydana gelişi
- b) Çatlağın ilerlemesi
- c) Malzemenin kesitinden kırılması

Yorulma hadisesinin ortaya çıkması için malzemenin çekme gerilmesine maruz bırakılması, oluşan bu gerilmede değişimler veya dalgalanmalar gerçekleşmesi ve bu sırada plastik şekil değişimi oluşması gerekmektedir. İşte bu üç değişkenden herhangi bir tanesi bulunmazsa yorulma çatlağı başlamayacak ve de ilerlemeyecektir. Çekme gerilmesindeki değişim ve dalgalanma çatlağı başlatacaktır. Çatlaktaki ilerlemeyse çekme gerilmesi etkisi ile oluşacaktır. (Karcı, 2002).

Malzemenin içyapısında var olan ya da malzemenin yüzeyinde bulunan çentik etrafında gerçekleşen lokal bozulmaların fazla görüldüğü alanlardan yorulma çatlakları başlayıp ilerlemektedir. Malzemenin kendi bünyesinde var olan boşluk, çentik, çatlak, sert cisimlerin ve de ani kesit değişimlerinin etraflarındaki gerilmeler malzemeye yüklenen harici gerilmelere nazaran daha yüksek bir değerlerdedir. Bu gerilmelerin etkisiyle yapının kendi içinde plastik şekil değişimleri ortaya çıkar. Herhangi bir metal malzemede karşılaşılan elastik sınırın altındaki yüklemeler sebebiyle mikro yapının içerisinde mevcut bulunan hatalar (dislokasyon) lokal hareket ederek kayma bantlarını meydana getirirler. Kayma bantları oluşmasıyla yüzeydeki taraklanmalar gerilim yığılmalarına neden olurlar. Gerilme yığılmasının etkisi ile yüzey mikro çatlakları meydana gelir. Bu mikro çatlaklar zaman içerisinde gelişerek ilerleyip yapının içinde yayılırlar (Karcı, 2002).

Daha önce de belirtildiği gibi yorulmada çatlağın ilerlemesi üç aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşama çatlak oluşum aşamasıdır. Bu aşama bölgede gerilmenin şiddet değişkeni kritik bir değeri buluncaya kadar ilerler. İkinci aşama çatlağın ilerlediği aşamadır. Son aşama ise kırılma olayının ortaya çıktığı aşamadır. Yorulma kırılmaları genellikle malzeme kusurlarından kaynaklanmaz. Yorulma kırılmaları genellikle, çentik gibi etkiye sebep olan biçim ve yüzeyler, aşırı yüklemeler, birleştirme hataları, yeterli olmayan bakımlar vb. sebeplerden meydana gelmektedir. Çatlak ilerlemesi, çatlağın uzunluğu karşısında çatlağın büyümesindeki hız veya gerilme şiddeti karşısında çatlağın büyümesindeki hız olarak tanımlanmıştır. Çatlağın ilerlemesindeki hızı hesaplayabilmek için Lineer Elastik Kırılma Mekaniği'ne başvurularak hazırlanmış farklı denklemler kullanılabilmektedir. Bu

denklemlerden bir tanesi de Paris-Erdoğan denklemidir. Aşağıda bu denklem açıklanmıştır. (Paris ve Erdoğan, 1963)

$$da/dN = A(\Delta K)^n \quad (2.5)$$

Denklemdaki değişkenler;

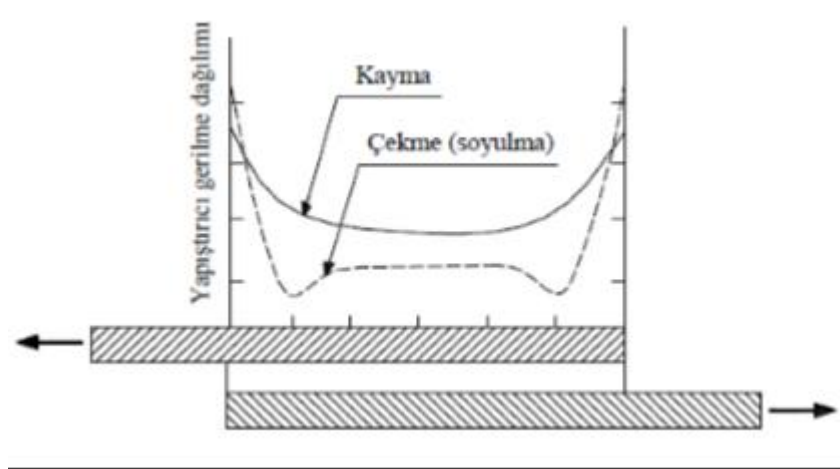
da/dN : Çatlağın ilerleme hızı,

ΔK : gerilme şiddet faktör değişimi,

n ve A ise malzeme sabitleridir.

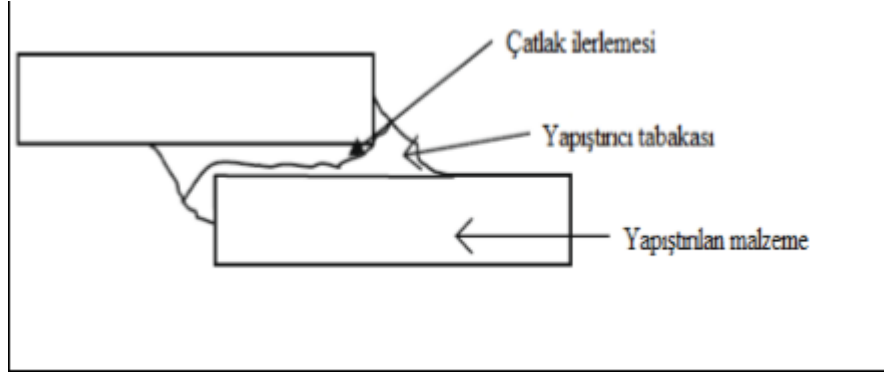
2.3.4. Yapıştırma Bağlantılarında Yorulma

Yapıştırma bağlantısına dinamik ya da statik biçimlerde yüklenildiğinde, birleştirilen parça ve yapıştırıcının birbirinden farklı elastik özelliklerinden, muhtemel simetrik olmayan geometriden ve bağlantıda oluşabilecek süreksizliklerden ötürü düzenli bir gerilme bölgesi ortaya çıkmaz. Şekil 2.8’ de tek bindirmeli birleştirme bağlantılarındaki çekme ve kayma gerilmesi dağılımları görülmektedir. Yorulma sonucu çatlak şeklinde oluşan bir tahribat ya yapıştırıcı katmanında ve ya yapıştırılmış parça ile yapıştırıcının ara yüzeylerinde ortaya çıkar. Çift bindirmeli birleştirmelerde yorulma sonucu oluşan çatlak her iki yapıştırma bölgesinde de ortaya çıkabilir. Yapıştırma bölgelerinin birisinde ortaya çıkan çatlak, gerilmenin etkisiyle diğer yapıştırma bölgesindeki çatlakların başlamasına sebebiyet verebilir. (Günaydın, 2010).

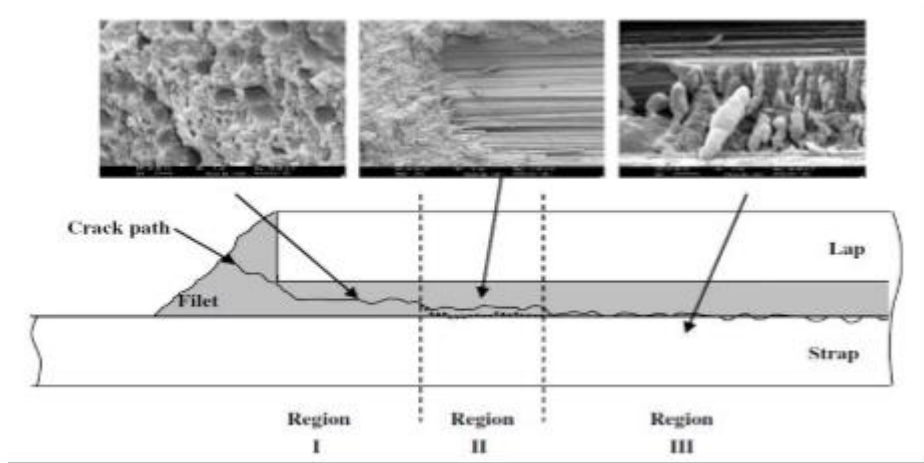


Şekil 2.8. Tek bindirmeli birleştirmede gerilme dağılımı

Çevrim yükünün etkisi ile yorulma çatlakları, gerilme yığılmalarının biriktiği bindirme kenarlarından başlamaktadır. Bindirmeli birleştirme bağlantılarında, yapıştırıcının içerde ve de dışarıda kavis yaptığı bölgelerde, gerilme ve şekil değiştirme yığılmalarının ortaya çıktığı gözlemlenmektedir. Şekil 2.9 ve 2.10’ da tek bindirmeli birleştirme bağlantılarında görülen tipik bir çatlak oluşumu ve ilerlemesi görülmektedir.



Şekil 2.9. Tek tesirli yapıştırma bağlantısında tipik bir çatlak ilerlemesi



Şekil 2.10. Yorulma deneyinde yapıştırma bölge çatlak ilerlemesi (Casas-Rodriguez ve ark.,2008)

Yapıştırma birleştirme bağlantılarının, yapıştırma alanında gerçekleşen tahribat iki tarzda incelenmektedir. Yapıştırıcı ile yapıştırılarak birleştirilecek olan parçanın temas yüzeyleri arasındaki ayrılmaya adhezyon tahribatı adı verilmektedir. Adhezyon tahribatı genellikle iyi bir yapışmanın oluşmadığının belirtisidir. Bunun gibi tahribatları önleyebilmek için yapıştırılacak olan malzemelere ön işlem yapılması çok önemlidir. Uygulama esnasında

yapılacak olan ön işlem birleştirmelerin yorulma ömürlerini nispeten etkiler. İkinci tahribat türü de yapıştırıcı katmanının kendisinde ayrılma olayının gerçekleşmesidir. Bu olay literatüre kohezyon tahribatı olarak eklenmiştir. Yapıştırma bağlantılarının kohezyon tahribatının önüne geçebilmek için, tercih edilen yapıştırıcının türü, kürleşme sıcaklığı ve kürleşme basıncı benzeri hususların iyileştirilmesi gerekmektedir. Elbette ki yapıştırma birleştirmeleri istenildiği kadar iyi tasarlansa bile nihayetinde bağlantının taşıyabileceği bir yük kabiliyeti vardır, bu kritik yükleme eşiği geçildiğinde bağlantı tahribata uğramaktadır. Bundan dolayı bağlantıların güvenli taşıyabileceği yük değerlerinin saptanabilmesi amacıyla kayda değer sayısal ve deneysel çalışmaların ortaya konmasının ehemmiyeti anlaşılmaktadır. (Günaydın, 2003).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada grafen nano partikül takviyeli yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek bindirmeli bağlantıların çekme yorulma ve yorulma sonrası çekme davranışları incelenmiştir. Yapışan malzeme olarak Karbon Fiber Takviyeli kompozit malzeme ve yapıştırıcı olarak 3M DP460 yapıştırıcı kullanılmıştır. Grafen nano partikülün kullanılan yapıştırıcı malzemenin mukavemeti üzerindeki etkisini incelemek amacıyla ağırlıkça %0.25, ağırlıkça %0.5 ve ağırlıkça %1 GNP (Grafen Nano partikül) kullanılmıştır. Grafen nano partikül ile yapıştırıcı malzemenin karıştırılması için Gültekin ve ark. (2016), kullandıkları yöntem uygulanmıştır. Karıştırma işlemi sırasında uygulanan işlem basamakları aşağıda verilmiştir.

- Seçilen grafen oranına uygun olarak Grafen nano partikül tartılarak cam behere yerleştirilmiştir.
- Seçilen yapıştırıcı ağırlığı kadar aseton cam behere eklenmiştir.
- Elde edilen karışım ultrasonik karıştırıcı ile 30 kHz frekansta 10 dakika boyunca karıştırılmıştır.
- Karışım kurutma fırınına yerleştirilmiş ve 80°C sıcaklıkta asetonun uçması sağlanmıştır.
- Dağılmış grafen nano partikülün üstüne uygun ağırlıkta yapıştırıcı eklenerek 10 dakika elle karıştırılmıştır.
- Daha sonra buz banyosunun içinde 30 dakika boyunca ultrasonik karıştırıcıda 30 kHz frekansta karıştırılmıştır.
- Karışıma yapıştırıcı malzemenin hızlandırıcısı eklenmiş ve 10 dakika elle karıştırılarak karıştırma işlemi tamamlanmıştır.

Numuneler hazırlanırken numune genişliği ve bindirme uzunluğu olarak 25 mm ve yapıştırıcı kalınlığı 0,25 mm seçilmiştir. Bindirme uzunluğu ve yapıştırıcı malzeme kalınlığının sağlanabilmesi için 3 boyutlu yazıcı ile hazırlanmış kalıp kullanılmıştır. Yapışan ana malzeme olarak seçilen karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin yapışma yüzeyi 320 kum zımpara ile aşındırılmıştır. Aşındırılan yüzey yağ, kir ve pisliklerden arındırılmak amacıyla izopropil alkol ile yıkanmıştır. Yapıştırıcı modifikasyon işlemi ve yapıştırıcı uygulamasının şematik diyagramı Şekil 3.1'de verilmiştir.



Grafen nano partiküllerin tartılması



Aseton – grafen nano partikül karışımı



Grafen nano partikülün aseton içerisinde ultrasonik karıştırıcı ile çözülmesi



Asetonun fırında buharlaştırılması



Grafen ve epoksi yapıştırıcının tartılması



Grafen – epoksi karışımının buz banyosunda ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılması



Yapıştırıcı – grafen karışımına hızlandırıcının eklenmesi ve elle karıştırma



Tek bindirmeli bağlantıların hazırlanan kalıpta birleştirilmesi



Hazırlanan numuneler

Şekil 3.1. Tek bindirmeli bağlantıların oluşturulması

3.1. Deneyde Kullanılan Materyaller

3.1.1. Karbon Fiber Takviyeli Plastik (CFRP)

Yapıştırılan olarak karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) kullanılmıştır. CFRP kompozitler 8 katmana ve yaklaşık 2 mm kalınlığa sahiptir. Tablo 3.1’de CFRP’nin mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.1. Yapıştırılan CFRP’nin mekanik özellikleri

Özellik	Yapıştırılan CFRP
E1 (GPa)	83.4
E2 (GPa)	83.5
N12	0.05
G12 (GPa)	6.8

3.1.2. 3M DP460 Epoksi Yapıştırıcı

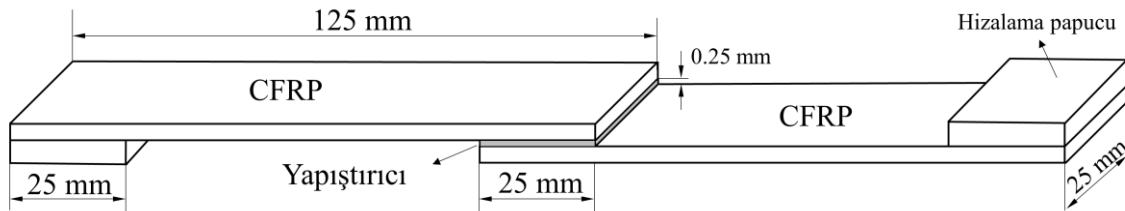
Yapıştırıcı olarak 3M DP460 epoksi esaslı iki bileşenli yapıştırıcı kullanılmıştır. Tablo 3.2’de katkısız yapıştırıcının mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.2. 3M DP460 yapıştırıcının mekanik özellikleri (Akpınar ve ark., 2017)

Özellik	DP 460 Yapıştırıcı
E (MPa)	1984
ν	0.37
Σt (MPa)	38.4
ϵt (%)	4.7

3.1.3. Grafen Nano Parçacık

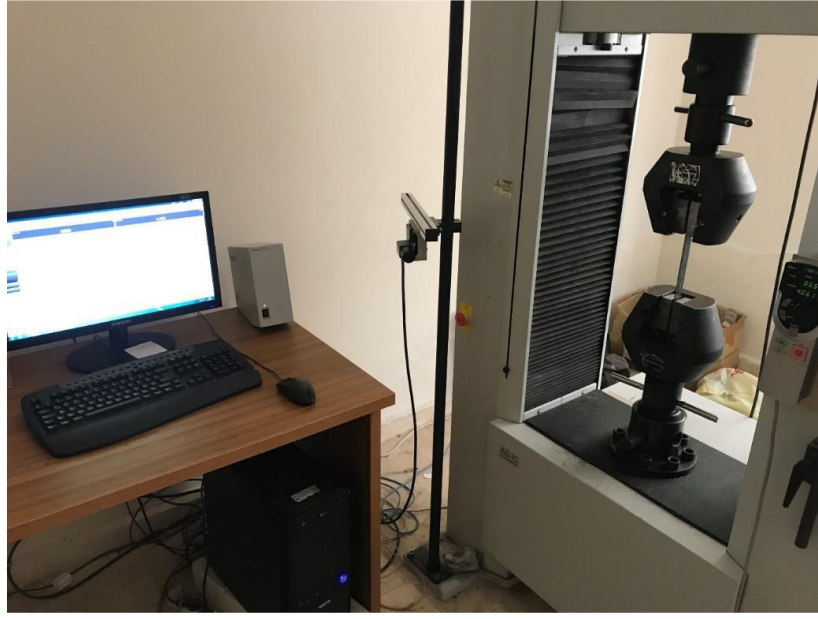
Yapıştırıcıyı modifiye etmek için 5 μ m çapında ve 5-8nm kalınlığında Grafen Nano Parçacık kullanılmıştır. Şekil 3.2’de verilen tek bindirmeli bağlantı geometrisi ve boyutları.



Şekil 3.2. Tek Bindirmeli Bağlantı Boyutları

3.1.4. Shimadzu Üniversal Test Cihazı

Çekme testleri için 250 kN yük hücreesine sahip Shimadzu marka universal test cihazı kullanılmıştır. Testler sırasında 1 mm/dk ilerleme hızı kullanılmıştır. Yapılan çekme testleri 5 er kez tekrarlanmıştır. Kullanılan universal test cihazı Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Shimadzu Üniversal Test Cihazı

3.1.5. Yorulma Test Cihazı

Yorulma testleri sırasında 100 kN yük hücreesine sahip servo hidrolik yorulma cihazı kullanılmıştır. Yorulma yükleri sinüzoidal dalga formunda 10 Hz frekansta uygulanmıştır. $R = F_{min}/F_{yorulma}=0.1$ olarak seçilmiştir. Yorulma testleri için maksimum yükler çekme hasar yükünün %60'ı, %50'si, %40'ı, %30'u ve %20'si olarak belirlenmiştir. Yorulma testleri tüm yük seviyeleri için üçer kez tekrarlanmıştır. Kullanılan Shimadzu yorulma test cihazı Şekil 3.4'te verilmiştir.

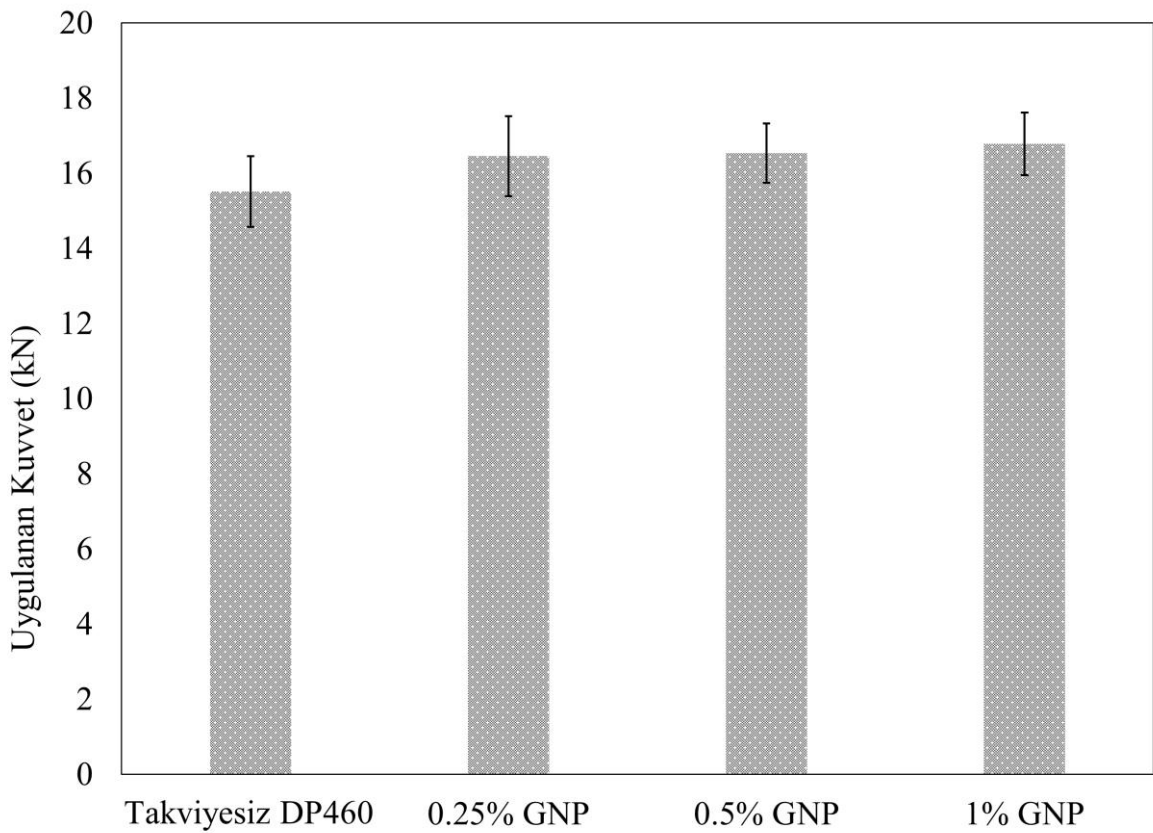


Şekil 3.4. Yorulma test cihazı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Statik Test Sonuçları

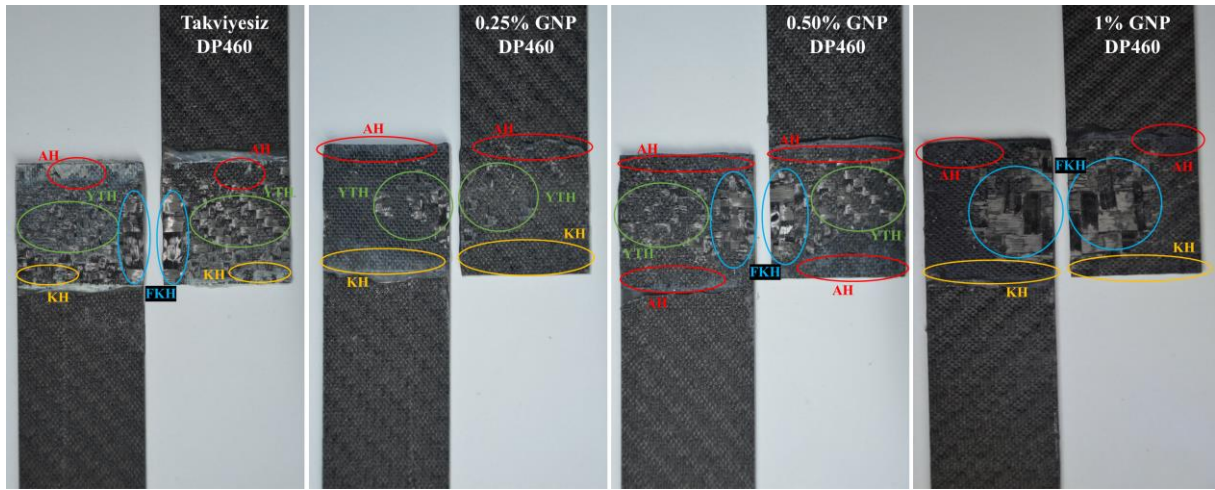
Şekil 4.1, farklı GNP içeriklerine sahip yapıştırma bağlantılarının çekme hasar yüklerini göstermektedir. Takviyesiz yapıştırıcı kullanılan birleştirmelerde en düşük çekme mukavemeti değeri tespit edilmiştir. GNP içeriğinin artmasıyla bağlantı mukavemeti artmıştır. (Gültekin ve ark. 2016; Saeimi-Sadigh ve Marami, 2016). %1 GNP ile güçlendirilmiş modelde maksimum çekme mukavemeti gözlenmiştir. Takviyesiz yapıştırıcı, %0,25, %0,5 ve %1 GNP takviyeli numuneler için ortalama çekme hasar yükü değerleri sırasıyla 15.516 kN, 16.461 kN, 16.540 kN ve 16.786 kN'dir.



Şekil 4.1. GNP oranı ile çekme hasar yükü değişimi

Çekme testleri sonrası bağlantıların hasar yüzeyleri şekil 4.2'de verilmiştir. Tüm numunelerde bağlantı uçlarında adezyon hasarı (AH) ve kohezyon hasarı (KH) gözlemlenmiştir. Test numunesinin çekme yükünün etkisiyle eğilmesi nedeniyle, yapıştırıcının ucundaki soyulma gerilmelerinin yoğunlaşması AH ve KH'ye neden olmuştur. Yapıştırıcı alan iç bölgelerinde fiber kopma hasarı (FKH) ve yapışan tabaka hasarı (YTH) yaygın olarak görülmüştür. Özellikle en yüksek bağlantı mukavemetine sahip %1 GNP içeren

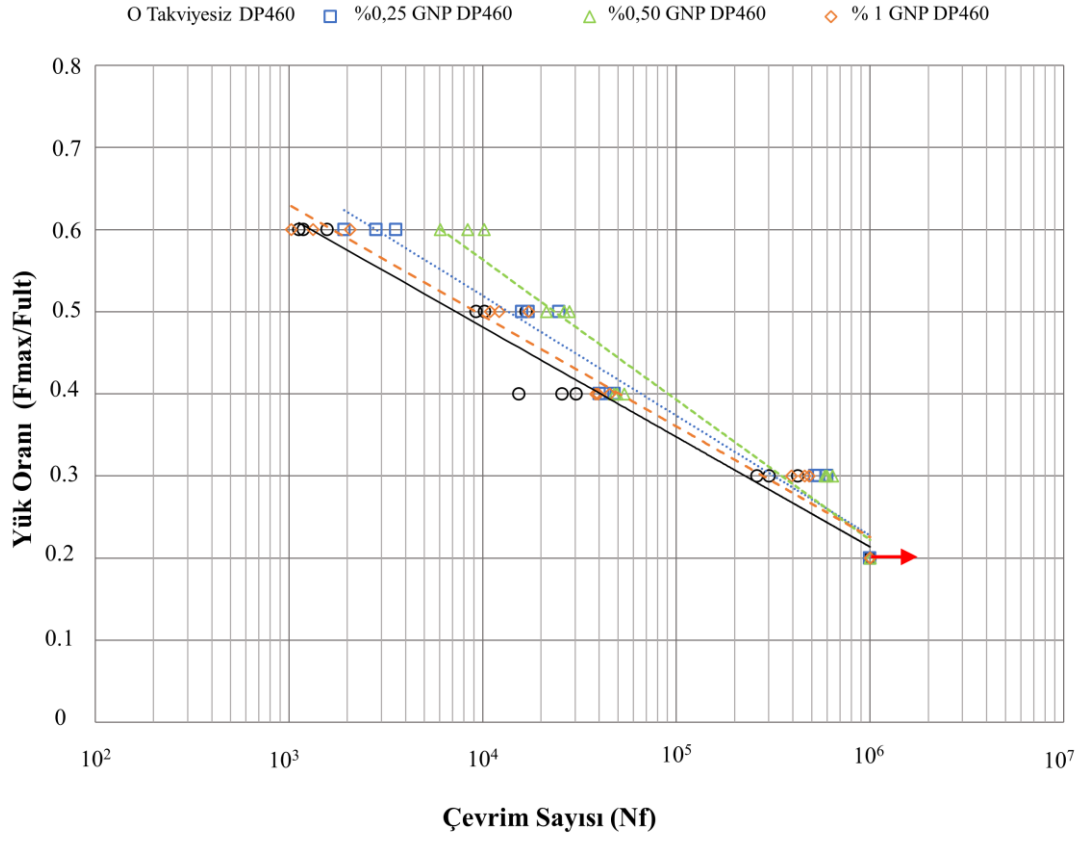
numunede, en büyük alanda FTF hasarı görülmektedir. Bu durumun nedeni, bağlanma bölgesinin önemli bir bölümünde meydana gelen lokal gerilmelerin karbon liflerinin mukavemetini aşmasıdır (Liu ve ark., 2019). Gholami ve ark. nano partikül takviyeli yapıştırıcı bağlantıların kırılma davranışını araştırmışlardır. Takviyesiz numunelerde en yaygın hasarın yapıştırıcı tabakada meydana geldiğini bildirmişlerdir (Gholami, Khoramishad and Silva, 2020). Mevcut çalışmada, saf yapıştırıcı kullanılan numunelerdeki hasarın ana nedeni, yapıştırma hatasıdır. Bu farklılığın yükleme tipinin farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.2. Çekme Testleri Sonrası Bağlantıların Hasar Yüzeyleri

4.2. Yorulma Testi Sonuçları

Farklı GNP güçlendirme oranları için uygulanan yük ile yorulma hasar çevrim sayısının değişimi şekil 4.3'te verilmiştir. Tüm yük seviyelerinde artan GNP güçlendirme oranı, %0,75 GNP' ye kadar artan yorulma ömrü ile sonuçlanmıştır. Ağırılıkça %1 GNP takviyesi kullanıldığında, yorulma ömrü takviyesiz numunelere göre daha yüksek ancak %0.25 ve %0.50 GNP takviye oranı ile üretilen numunelere göre daha düşük bulunmuştur. En yüksek maksimum statik hasar yüküne sahip numuneler, %1 GNP içeren numuneler iken, tüm yük seviyelerinde en yüksek yorulma döngülerine sahip numuneler, %0,50 GNP içeren numunelerdir. Elde edilen yorulma testi sonuçları literatürle uyumludur. Sadıgh ve Marami (2018), tek bindirmeli bağlantının yorulma ömrünün, azaltılmış grafen oksit modifiyeli yapıştırıcı kullanılan numunelerle, saf yapıştırıcı kullanılan numunelere kıyasla arttığını bildirmiştir. Tablo 4.1'de farklı GNP oranları ile modifiye edilen tek bindirmeli bağlantıların yorulma sonuçları verilmiştir.



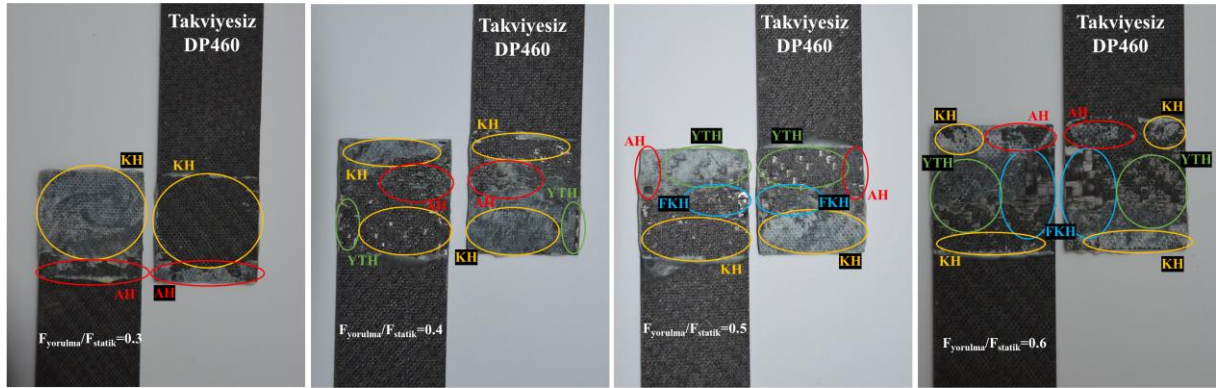
Şekil 4.3. Farklı GNP oranları ile modifiye edilmiş SLJ'lerin S-N eğrileri

Tablo 4.1. Farklı GNP oranları ile modifiye edilen tek bindirmeli bağlantıların yorulma sonuçları

Model	Statik Hasar Yükü (kN)	Yük Oranı	Maks Yük	Çevrim Sayısı			Ort. Ömür
				1. Uzm.	2. Uzm.	3. Uzm.	
Takviyesiz Yapıştırıcı	15.516	0.6	9.3	1185	1128	1572	1295
		0.5	7.8	16792	9234	10235	12087
		0.4	6.2	15399	30484	25697	23860
		0.3	4.7	261614	301927	423873	329138
		0.2	3.1	1000000	1000000	1000000	1000000
0.25 % GNP/ Yapıştırıcı	16.461	0.6	9.9	2819	3563	1928	2770
		0.5	8.2	17267	24845	15923	19345
		0.4	6.6	47972	40183	43029	43728
		0.3	4.9	544804	521245	601234	555761
		0.2	3.3	1000000	1000000	1000000	1000000
0.50 % GNP/ Yapıştırıcı	16.539	0.6	9.9	10207	8372	6039	8206
		0.5	8.3	28077	21283	26303	25221
		0.4	6.6	47692	53840	49374	50302
		0.3	5.0	584787	598395	640293	607825
		0.2	3.3	1000000	1000000	1000000	1000000
1 % GNP/ Yapıştırıcı	16.786	0.6	10.1	2068	1028	1329	1475
		0.5	8.4	12173	17293	10923	13463
		0.4	6.7	39393	38394	45282	41023
		0.3	5.0	459373	391834	485950	445719
		0.2	3.4	1000000	1000000	1000000	1000000

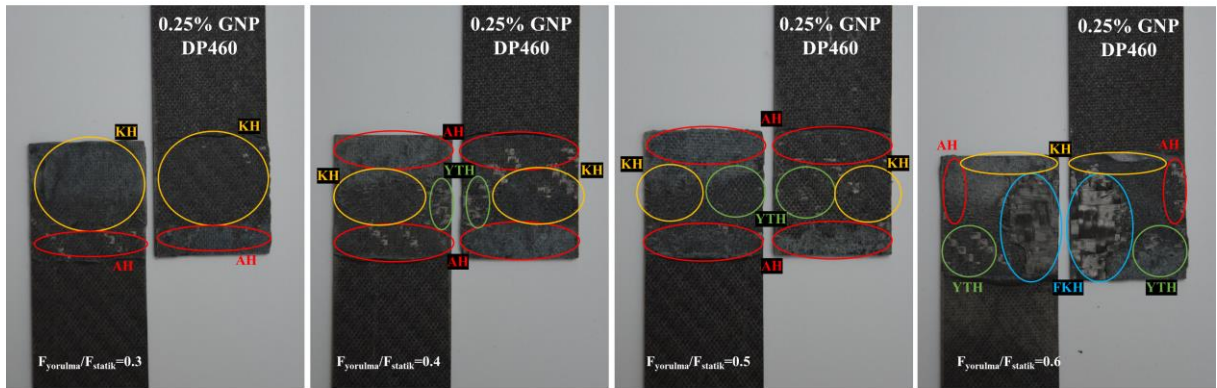
Yorulma testleri sonrası takviyesiz DP 460 kullanılan bağlantıların hasar yüzeyleri şekil 4.4'de verilmiştir. Tüm yük seviyelerinde bağlantı uçlarında AH ve KH gözlemlenmiştir. Daha düşük yük seviyelerinde ana hasar türleri AH ve KH'dir. Fyorulma/Fstatik=0.3 hariç tüm yük seviyelerinde YTH gözlemlendi. Fyorulma/Fstatik=0.5 ve Fyorulma/Fstatik=0.6 yüklerinde FKH gözlemlendi. Ana hasar türleri maksimum yük seviyesi için YTH ve FKH'dir

($F_{\text{yorulma}}/F_{\text{statik}}=0,6$). Şahin ve Akpınar (2021), yüksek yük seviyelerinde test edilen numunelerde arayüz/yapıştırıcı hasarı oluştuğunu bildirmiştir.



Şekil 4.4. Yorulma Testleri Sonrası Saf DP460 Kullanılmış Birleştirmelerin Hasar Yüzeyleri

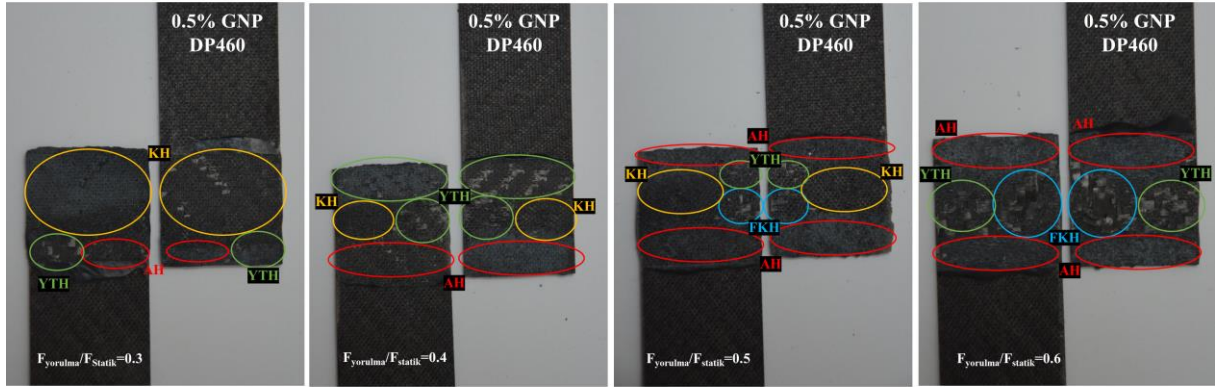
% 0,25 GNP-DP 460 kullanılan birleştirmelerin yorulma testleri sonrası hasar yüzeyleri şekil 4.5'te verilmiştir. Tüm yük seviyelerinde yapıştırıcı uçlarında AH ve KH gözlemlendi. Daha düşük yük seviyelerinde ana hasar türleri AH ve KH'dir. Artan yük seviyesi ile KH alanı artmıştır. FKH alanı, $F_{\text{yorulma}}/F_{\text{statik}}=0.6$ yük seviyesinde en yüksek değere sahiptir.



Şekil 4.5. Yorulma Testleri Sonrası %0,25 GNP-DP460 Kullanılmış Birleştirmelerin Hasar Yüzeyleri

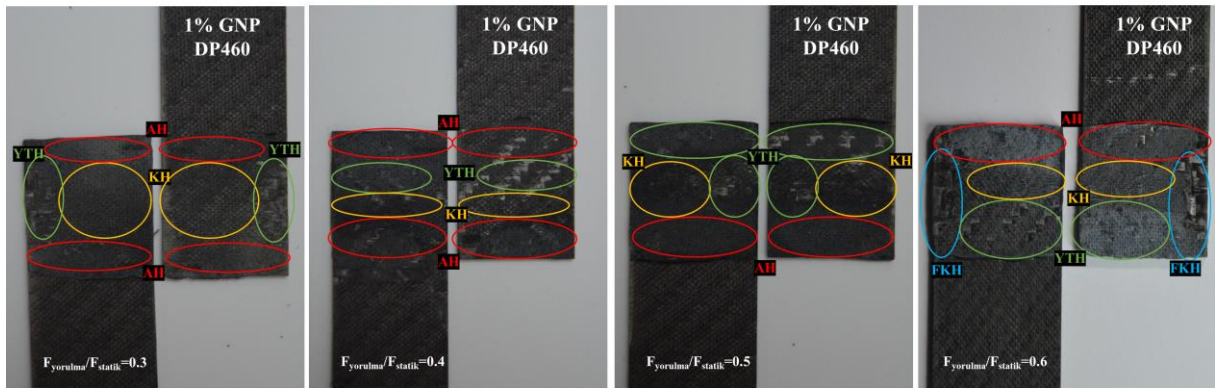
%0,5 GNP-DP 460 kullanılan birleştirmelerin yorulma testleri sonrası hasar yüzeyleri şekil 4.6' da verilmiştir. Tüm yük seviyelerinde eklem uçlarında AH ve KH gözlenmiştir.

Daha düşük yük seviyelerinde sadece AH ve KH değil, aynı zamanda YTH de gözlenmiştir. KH tipi, $F_{\text{yorulma}}/F_{\text{statik}}=0.4$ yük seviyesinde en geniş alana sahiptir.



Şekil 4.6. Yorulma Testleri Sonrası %0,5 GNP-DP460 Kullanılmış Birleştirmelerin Hasar Yüzeyleri

%1 GNP-DP 460 kullanılan birleştirmelerin yorulma testleri sonrası hasar yüzeyleri şekil 4.7' de verilmiştir. AH ve KH, tüm yük seviyelerinde birleşme uçlarında gözlemlenmiştir. Daha düşük yük seviyelerinde ana hasar türleri AH, KH ve YTH'dir. Tüm yük seviyelerinde YTH belirlenmiştir. FKH sadece $F_{\text{yorulma}}/F_{\text{statik}}=0.6$ yük seviyesinde tespit edilmiştir. Ana hasar türleri maksimum yük seviyesi için YTH ve FKH'dir ($F_{\text{yorulma}}/F_{\text{statik}}=0,6$).



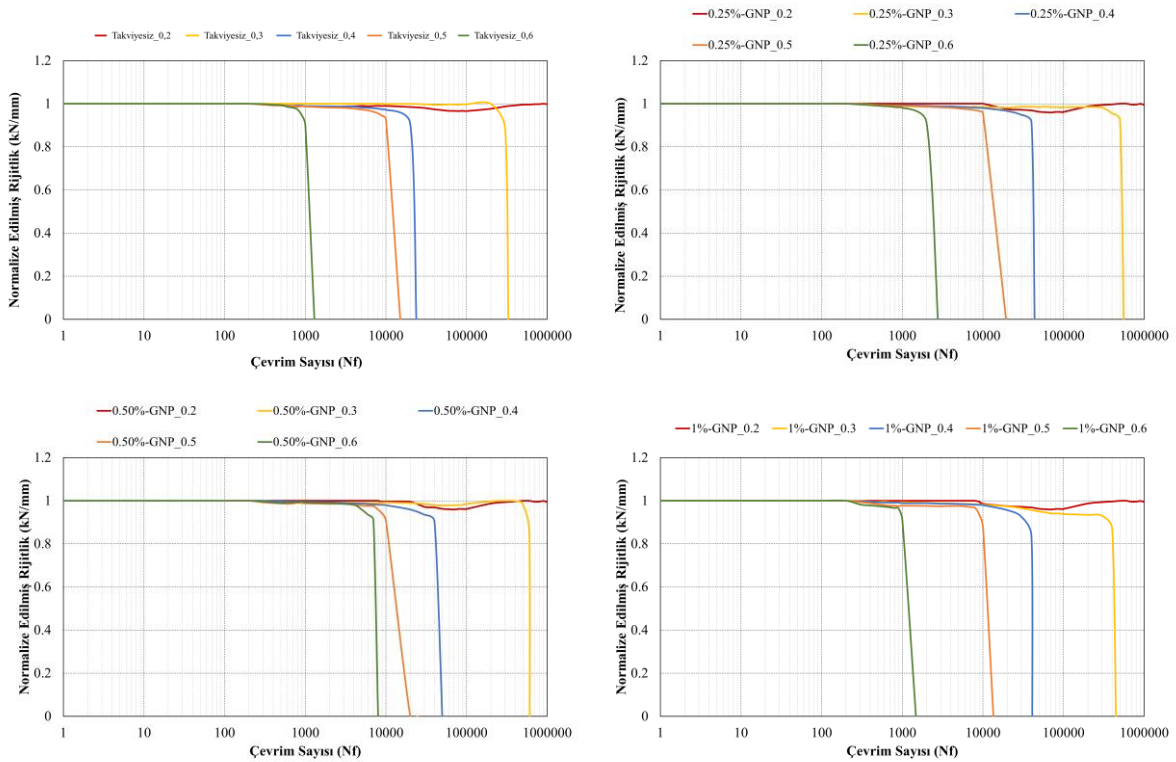
Şekil 4.7. Yorulma Testleri Sonrası %1 GNP-DP460 Kullanılmış Birleştirmelerin Hasar Yüzeyleri

4.3. Rijitlik Hesabı

Yorulma etkisi ile numunelerde meydana gelen rijitlik değişimi, uygulanan gerilmenin gerinime bölünmesiyle hesaplanabilir. Testler sırasında gerinim ölçerlerin testin sonuna kadar

hasara uğramadan kalamayacağı gerinim ölçerler kullanılmamıştır. Bu nedenle, rijitlik hesaplamaları için uygulanan kuvvet yer değiştirmeye bölünmüştür (Capela, Oliveira ve Ferreira, 2019; Suzuki, Mahfuz ve Takanashi, 2019; Solmaz ve Topkaya, 2020).

Normalize edilmiş rijitlik ve çevrim sayısı grafikleri şekil 4.8'de verilmiştir. Yorulma testleri sırasında, normalize edilmiş rijitlik değerleri yorulma ömrünün son aşamasına kadar 1'e çok yakın seyretmiştir. Fyorulma / Fstatik = 0,2 yük ile test edilen numunelerde rijitlik değerleri önce azalmış daha sonra 10.000 ile 100.000 devir arasında yükselmiştir. Fyorulma / Fstatik = 0,5 ve Fyorulma / Fstatik = 0,6 yük ile test edilen tüm numunelerde, yorulma döngüsü söz konusu olduğunda, dikey bir azalma yerine rijitlik değerlerinde açılı bir azalma gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, hasarın düşük çevrim sayısı değerlerinde meydana gelmesidir.



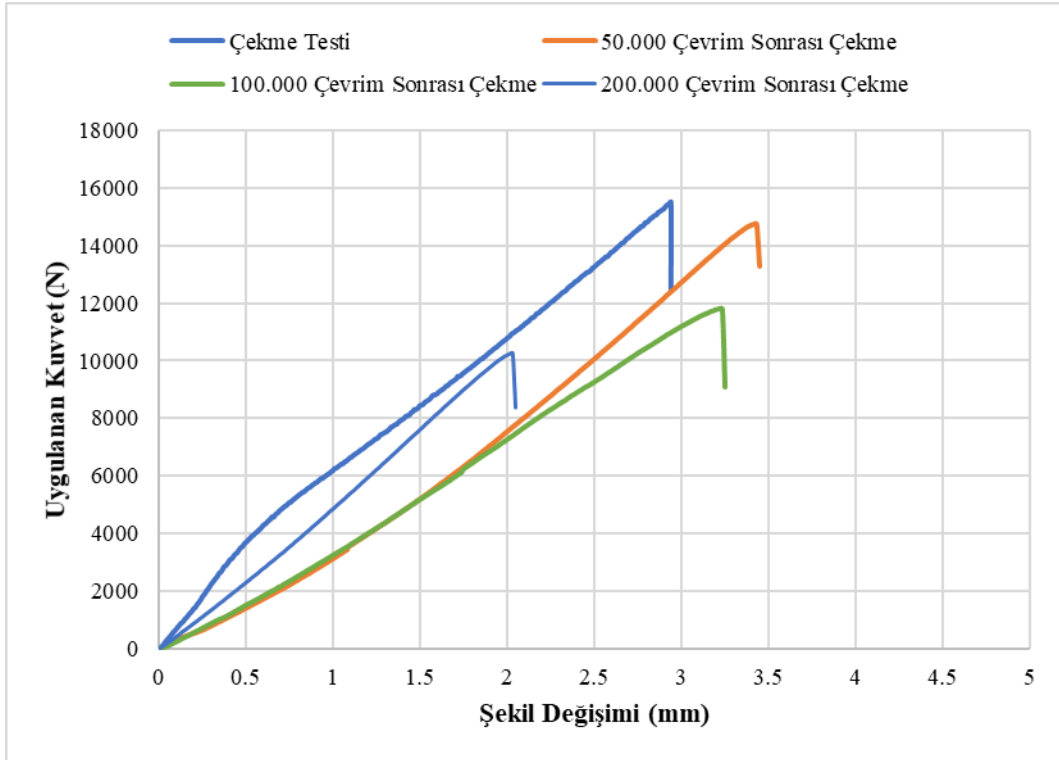
Şekil 4.8. Yorulma Döngüsü ile Normalleştirilmiş Sertlik Değişimi (a. Takviyesiz Yapıştırıcı b. %0,25 GNP Yapıştırıcısı c. %0,50 GNP Yapıştırıcısı d. %1 GNP Yapıştırıcısı)

4.4. Yorulma Sonrası Çekme Davranışı

Yorulma yüklemelerinin numuneler üzerinde sadece yorulma hasarına sebep olmadığı aynı zamanda statik hasar yüklerine de etkidiği bilinmektedir. Bu etkiyi grafen nano partikülle ilişkilendirebilmek amacıyla Fyorulma / Fstatik = 0,3 yükünde yorulma testleri gerçekleştirilmiş ve yoruma testleri 50.000, 100.000 ve 200.000 çevrim sayılarında

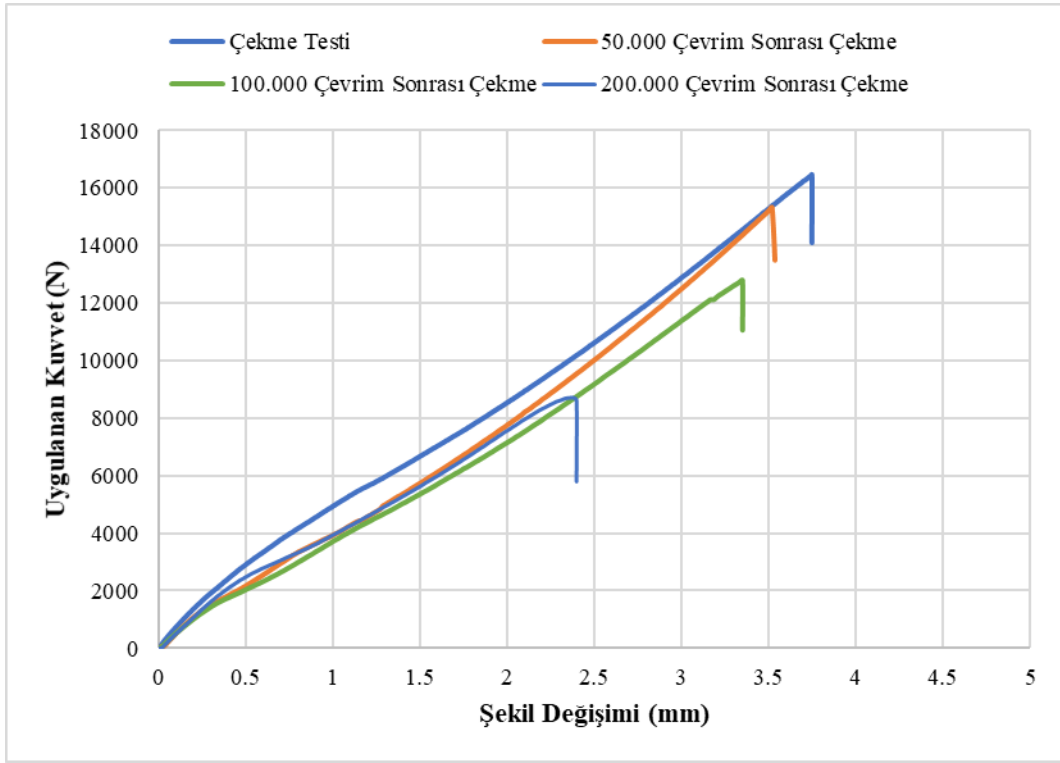
durdurulmuştur. Ön yorulma yüküne maruz bırakılan numuneler çekme testine tabi tutulmuş ve statik hasar yüklerindeki değişim incelenmiştir.

Takviyesiz yapıştırıcı ile birleştirilen numunelerin yorulma sonrası çekme test sonuçları Şekil 4.9 da verilmiştir. Yorulma yüklemesine maruz kalmayan numunenin çekme hasar yükü 15.516 N iken 50.000, 100.000 ve 200.000 çevrim sayılarında yorulma yüklemesine maruz bırakıldıktan sonra çekme hasar yükleri sırasıyla, 14.740 N, 11.792 N ve 10.254 N değerlerini almıştır.



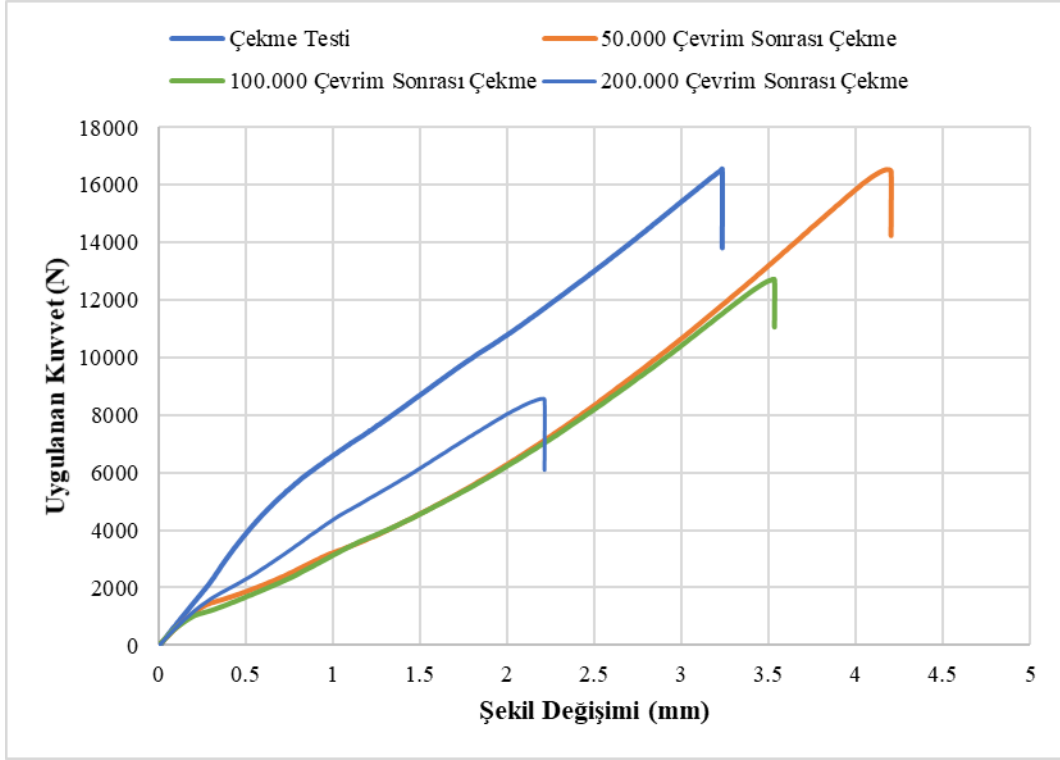
Şekil 4.9. Takviyesiz yapıştırıcı ile birleştirilen numunelerin yorulma sonrası çekme davranışı

% 0.25 GNP içeren yapıştırıcı ile birleştirilen numunelerin yorulma sonrası çekme test sonuçları Şekil 4.10 da verilmiştir. Yorulma yüklemesine maruz kalmayan numunenin çekme hasar yükü 16.461 N iken 50.000 çevrim sayısında yorulma yüklemesi sonrası çekme hasar yükü 15.333 N, 100.000 çevrim sayısında yorulma yüklemesi sonrası çekme hasar yükü 12.784 N ve 200.000 çevrim sayısında yorulma yüklemesine maruz bırakıldıktan sonra çekme hasar yükü 8.714 N değerlerini almıştır.



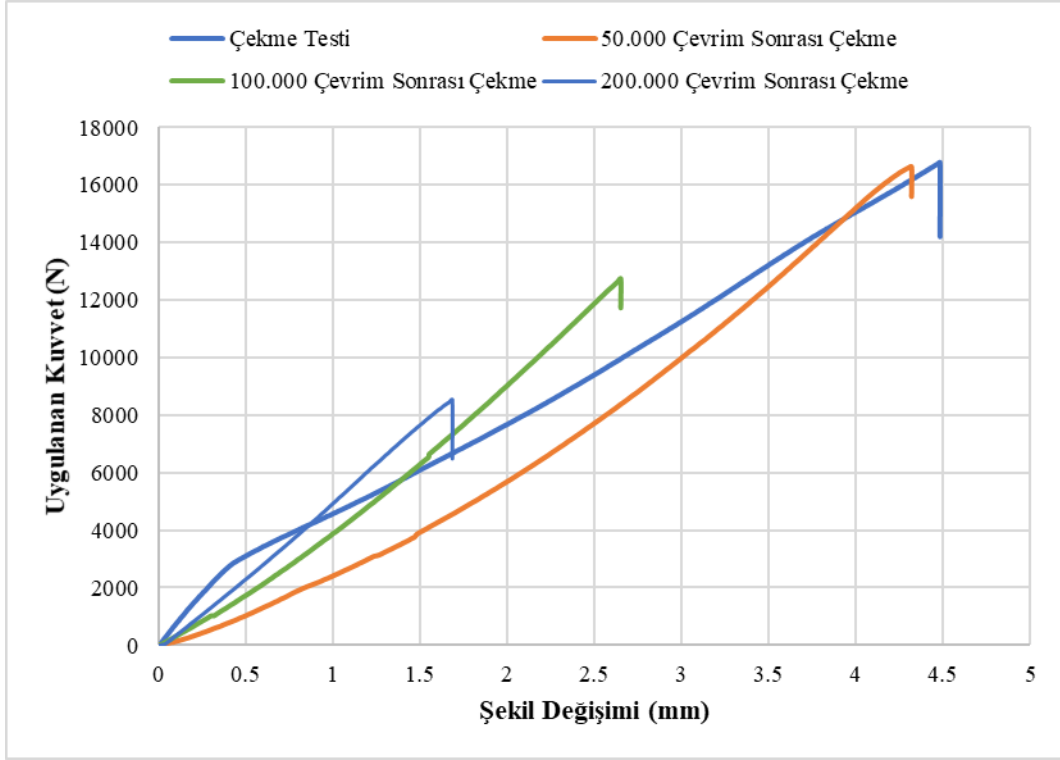
Şekil 4.10. % 0.25 GNP içeren yapıştırıcı ile birleştirilen numunelerin yorulma sonrası çekme davranışı

%0.50 GNP içeren yapıştırıcı ile birleştirilen numunelerin yorulma sonrası çekme test sonuçları Şekil 4.11 da verilmiştir. Yorulma yüklemesine maruz kalmayan numunenin çekme hasar yükü 16.540 N iken 50.000 çevrim sayısında yorulma yüklemesi sonrası çekme hasar yükü 16.527 N, 100.000 çevrim sayısında yorulma yüklemesi sonrası çekme hasar yükü 12.694 N ve 200.000 çevrim sayısında yorulma yüklemesine maruz bırakıldıktan sonra çekme hasar yükü 8.581 N değerlerini almıştır.



Şekil 4.11. %0.50 GNP içeren yapıştırıcı ile birleştirilen numunelerin yorulma sonrası çekme davranışı

%1 GNP içeren yapıştırıcı ile birleştirilen numunelerin yorulma sonrası çekme test sonuçları Şekil 4.12 da verilmiştir. Yorulma yüklemesine maruz kalmayan numunenin çekme hasar yükü 16.786 N iken 50.000, 100.000 ve 200.000 çevrim sayılarında yorulma yüklemesine maruz bırakıldıktan sonra çekme hasar yükleri sırasıyla, 16.609 N, 12.758 N ve 8548 N değerlerini almıştır.



Şekil 4.12. %1 GNP içeren yapıştırıcı ile birleştirilen numunelerin yorulma sonrası çekme davranışı

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen çalışmada yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek bindirmeli bağlantıların GNP ile modifiye edilmesinin çekme, yorulma ve yorulma sonrası çekme davranışlarına etkisi incelenmiştir. Elde edilen verilen ışığında varılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Tek bindirmeli bağlantıların mukavemeti yapıştırıcı malzeme içeriğindeki GNP miktarı arttıkça artmıştır.
- GNP oranındaki artış fiber çekme hasarı alanının artmasına sebep olmuştur.
- Tüm numunelerde bindirme uzunluğunun serbest kenarlarına yaklaştıkça adezyon hasarları ve kohezyon hasarları görülmüştür.
- Tüm numunelerde statik hasar yükünün %20'si yorulma sınırı olmuştur.
- Numunelerin yorulma mukavemeti % 0.5 GNP takviyeli numuneye kadar artmış %1 takviyeli numunede takviyesiz numuneden yüksek çıkmasına karşın diğer takviyeli numunelerden düşük çıkmıştır.
- Statik hasar yükünün %30 ve %40'ında gerçekleştirilen yorulma testlerinde başlıca hasar türü adezyon ve kohezyon hasarlarıdır.
- Tüm takviye oranlarında yorulma yükünün statik hasar yükünün %60'ı olan numunelerde fiber çekme hasarı önemli bir alanı kapsamaktadır.
- Normalize edilmiş rijitlik değerleri tüm testlerde yorulma ömrünün son aşamasına kadar 1 civarında seyretmiş ve yorulma ömrünün son aşamasında ani düşüler gözlenmiştir.
- Gelecek çalışmalarda rijitlik hesabının histeresis eğrileri ile hesaplanması elde edilen sonuçların doğrulanması için kullanılabilir.
- Sonsuz ömür değerlerinin gözlendiği %20 yükte yapılan yorulma testlerinden sonra da çekme mukavemetindeki değişimin incelenmesi sonraki araştırmalar için bir öneri olarak sunulabilir.

KAYNAKLAR

- Adin, H., 2007, Yapıştırıcı ile birleştirilmiş ters Z tipi kompozit malzeme bağlantılarının mekanik analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ
- Adin, H., Altun, S. ve Yaşar, F., 2011, Onarımda kullanılan darbe dayanımlı iki bileşenli yapıştırıcılar, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 1618 May, Elazığ, Turkey.
- Akkurt, M., 1996, "Makine Bilgisi", 5. Bölüm, Birsen Yayınevi, 227-229s, İstanbul.
- Akkurt, M., 1997, "Makine Elemanları I", 9. Bölüm, İTÜ Makine Fakültesi, Birsen Yayınevi, 269-272 s, İstanbul.
- Akpınar, İ.A., Gültekin K., Akpınar, S., Akbulut, H., Özel, A., 2017. Research on Strength of Nanocomposite Adhesively Bonded Composite Joints, Composites Part B, 126, 143-152
- Anık S., 1989, "II. Ulusal Kaynak Sempozyumu Bildiri Kitabı", s. 54-56.
- Anık S., Anık, S., Vural, M., 1997, "1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı", Birsen Yayınevi, Cilt 1 s. 291-300, İstanbul.
- Aydın, S., 2012. Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Prizmatik Geçmeli Bağlantıların Mekanik Analizleri, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Bishopp J., 13 - Adhesives for Aerospace Structures, Handbook of Adhesives and Surface Preparation, S. Ebnesajjad, ed., William Andrew Publishing, Oxford, pp. 301-344, 2011
- Bozacı, A., 2000, "Makine Elemanları Cilt I", YTÜ Makine Fakültesi Yayınları, 7.3.Bölüm, Çağaloğlu İstanbul, 7.36-42 s.
- Capela C, Oliveira SE, Ferreira JAM. Fatigue behavior of short carbon fiber reinforced epoxy composites. Compos Part B Eng 2019;164:191–7.

- Casas-Rodriguez, J.P., Ashcroft, I.A., Silberschmidt, V.V., 2008, Damage in adhesively bonded CFRP joints: Sinusoidal and impact-fatigue, *Composites Science and Technology*, 68 (2008) 2663–2670.
- Cürgül, İ., 1990, “Makine Elemanları I”, 3. Bölüm, YTÜ Yayınları, Kocaeli, 102-107s.
- Florian, G., Malte, W., Bodo, F., Schulte, K., 2005. Influence of Different Carbon Nanotubes on the Mechanical Properties of Epoxy Matrix Composites-A Comparative Study. *Composites Science and Technology*. 65, 2300-2313. 10.1016/j.compscitech.
- Gediktaş, M., 1995, “Makine Elemanları Bağlama Elemanları”, *Konstrüksiyon ve Hesap*, 4.Bölüm, Çağlayan Kitabevi, Beyoğlu İstanbul, 104-119.s.
- Gholami R, Khoramishad H, da Silva LFM. Glass fiber-reinforced polymer nanocomposite adhesive joints reinforced with aligned carbon nanofillers. *Compos Struct* 2020;253:112814.
- Gültekin K., Akpınar S., Gürses A., Eroğlu Z., Cam S., Akbulut, H., Keskin, Z., Özel, A., 2016. The Effects of Graphene Nanostructure Reinforcement on the Adhesive Method and the Graphene Reinforcement Ratio on the Failure Load in Adhesively Bonded Joints, *Composites Part B*, 98, 362-369
- Günaydın, B., 2010, Kompozit yama ile onarılmış yüzey çentikli filaman sarım borularda yorulma davranışları, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Günaydın, B., 2003, Yüzey çatlaklı cam/polyester kompozit malzemelerde yorulma çatlak ilerlemesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Hsiao, K.T., Alms, J., Advani, S.G., 2003. Use of Epoxy/multiwalled Carbon Nanotubes as Adhesives to Join Graphite Fibre Reinforced Polymer Composites. *Nanotechnology* 14, 791-793.

- Kang J. H., Siochi E. J., Penner R. K., Turner, T. L., Enhanced adhesive strength between shape memory polymer nanocomposite and titanium alloy, *Compos. Sci. Technol.*, 96, 23-30, 2014
- Karcı, A., 2002, 2024-T3 Al alaşımasının tek aşırı yük altında yorulma davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Kuang-Ting, H., Justin, A., Suresh, G. A. (2003). Use of epoxy/multiwalled carbon nanotubes as adhesives to join graphite fibre reinforced polymer composites. *Nanotechnology*, 14, 791–793.
- Kurbanoğlu, C., 2009, Makine Elemanları Teori Konstrüksiyon ve Problemler, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 6.
- Kut, D. ve Güneşoğlu, C., 2005, Nanoteknoloji ve tekstil sektöründeki uygulamaları, *Tekstil & Teknik Dergisi*, Şubat, 224-30.
- Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W. and Hone, J., 2008, Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene, *science*, 321, 5887, 385-8.
- Li, C. and Chou, T.W., 2003, A structural mechanics approach for the analysis of carbon nanotubes, *International Journal of Solids and Structures*, 40, 10, 248799.
- Liu X, Shao X, Li Q, Sun G. Experimental study on residual properties of carbon fibre reinforced plastic (CFRP) and aluminum single-lap adhesive joints at different strain rates after transverse pre-impact. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2019;124:105372.
- May, M., Wang, H.M., Akid, R., 2010. Effects of the Addition of Inorganic Nanoparticles on the Adhesive Strength of a Hybridsol-gel Epoxy System, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 30, 505–512.
- Minez B., 2000, “Metallerin Yapıştırma Yoluyla Birleştirilmesi ve Endüstriyel Uygulamaları”, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

- Nemes, O., Lachaud, F. and Mojtabi, A., 2005 “Contribution to the study of cylindrical adhesive joining”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26, 474-480.
- Neto A. S., da Cruz D. T. L., Avila A. F., Nano-modified adhesive by graphene: The single lap-joint case, *Mater Res-Ibero-Am J.*, 16 (3), 592-596, 2013.
- Novoselov, K., Geim, A. K., Morozov, S., Jiang, D., Katsnelson, M., Grigorieva, I., Dubonos, S. and Firsov, A., 2005, Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene, *Nature*, 438, 7065, 197-200.
- Özdoğan, E., Demir, A. G. A. and Seventekin, N., 2006, *Nanoteknoloji Ve Tekstil Uygulamaları*, Tekstil ve Konfeksiyon, 3, 2006.
- Panta, J., Jagannatham, M., Prathap, H., Ram, G.D.J., Deshpande, A.P., Bakshi, S.R., 2016. Effect of Different Carbon Nano-fillers on Rheological Properties and Lap Shear Strength of Epoxy Adhesive Joints Composites A, 82, 53–64.
- Paris, P.C., Erdoğan, F., 1963, A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, *Transactions of ASME, Journal of Basic Engineering*, D85, 528-534.
- Razavi, S.M.J., Ayatollahi, M.R., Nemati, G.A., Khoramishad, H., 2018. Single Lap Joints Bonded with Structural Adhesives Reinforced with a Mixture of Silica Nanoparticles and Multi Walled Carbon Nanotubes, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 80, 76–86.
- Rende, H., 2000, “Makine Elemanları Hesap ve Konstrüksiyon Cilt I”, 4. Bölüm, Seç Yayın ve Dağıtım, Çağaloğlu İstanbul, 4.1-1/9 s.
- Saeimi-Sadigh MA. and Marami G., 2016, Investigating the effects of reduced graphene oxide additive on the tensile strength of adhesively bonded joints at different extension rates. *Mater Des* 2016;92:36–43.

- Sadigh-Sadigh MA., Marami G., 2018, Enhancing fatigue life in adhesively bonded joints using reduced graphene oxide additive: Experimental and numerical evaluation, *Int. J. Adhes. Adhes* 2018;84:283–90.
- Saeed, M.B., Zhan, M.S., 2007. Adhesive Strength of Nano-size Particles Filled Thermoplastic Polyimides. Part-I: Multi-walled Carbon Nano-tubes (MWNT)-polyimide Composite Films, *Int. J. Adhes. Adhes.*, 27, 306–318.
- Solmaz MY. ve Topkaya T., 2020, The Flexural Fatigue Behavior of Honeycomb Sandwich Composites Following Low Velocity Impacts. *Applied Sciences*, 10, 20, 7262
- Stoller, M. D., Park, S., Zhu, Y., An, J. and Ruoff, R. S., 2008, Graphene-based ultracapacitors, *Nano letters*, 8, 10, 3498-502
- Suzuki T, Mahfuz H. and Takanashi M., 2019, Rastgele yükleme altında GFRP'lerin yorulma ömrü tahmini için yeni bir sertlik bozulma modeli. *Int J Yorgunluk* 2019;119:220–8
- Şahin R. ve Akpınar S., 2021. The Effects of Adherend Thickness on the Fatigue Strength of Adhesively Bonded Single-Lap Joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 102845.
- Tin, S., 2006, “Tek Bindirmeli Yapıştırma bağlantılarının Tasarım ve Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, A. Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Ünal, E., 2006, Cam elyafli kompozit malzemelerin atmosferik ortamda ve deniz ortamında yorulma simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir
- Wernik, J.M., Meguid, S.A., 2014. On the Mechanical Characterization of Carbon Nanotube Reinforced Epoxy Adhesives. *Materials & Design*, 59(0), 19-32.