



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İLERİ TEKNOLOJİLER ANABİLİM DALI

**TEK TESİRLİ YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA EPOKSİ
YAPIŞTIRICI İÇERİSİNE CAM FİBER KUMAŞ VE NANO- Al_2O_3
TAKVİYESİNİN BAĞLANTI DAYANIMINA ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Ali ÇAVUŞOĞLU

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi İsmail SARAÇ

AKSARAY, 2025

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 212367417 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Mehmet Ali ÇAVUŞOĞLU tarafından hazırlanan “**TEK TESİRLİ YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA EPOKSİ YAPIŞTIRICI İÇERİSİNE CAM FİBER KUMAŞ VE NANO-AL₂O₃ TAKVİYESİNİN BAĞLANTI DAYANIMINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İleri Teknolojiler Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail SARAÇ

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Üye: Doç. Dr. Yusuf KAYGISIZ

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Erkin AKDOĞAN

Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Tez Savunma Tarihi: 02/01/2025

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Fazliye KARABÖRK

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinallliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

İmza

Mehmet Ali ÇAVUŞOĞLU

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı hazırlarken yanımda olan, beni destekleyen ve cesaretlendiren herkese teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Öncelikle, yaşamım boyunca bana maddi ve manevi her türlü desteği sağlayan aileme; başta babam Turgay ÇAVUŞOĞLU'na sonsuz teşekkür ederim. Onların sevgisi ve sabrı, bu süreçte en büyük motivasyon kaynağım olmuştur.

Tez çalışmam boyunca bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, her an yanımda olan, hiçbir desteğini esirgemeyen danışman hocam Sn. Dr. Öğr. Üyesi İsmail SARAÇ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Onun rehberliği, bu çalışmayı başarıyla tamamlamamda büyük bir rol oynamıştır.

Ayrıca, bana arkadaşlık eden ve her zaman bu zorlu süreçte yanımda olan değerli dostum Ahmet AKÇA'ya da desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışmayı, üzerimde emeği olan herkese duyduğum minnettarlığın bir nişanı olarak sunuyorum.

Mehmet Ali ÇAVUŞOĞLU
AKSARAY, 2025

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK TEMELLER	4
2.1 Yapıştırma İşleminin Tarihçesi	4
2.2 Yapıştırma Bağlantıları	4
2.2.1 Yapıştırma bağlantılarının avantaj ve deavantajları	5
2.2.2 Yapıştırma bağlantılarının diğer bağlantı yöntemleri ile karşılaştırılması ..	6
2.2.2.1 Perçin bağlantıları	6
2.2.2.2 Kaynak bağlantıları	6
2.2.2.3 Lehim bağlantıları	7
2.2.2.4 Cıvatalı bağlantılar	8
2.2.2.5 Pres bağlantıları.....	8
2.2.3 Yapıştırma bağlantılarında hasar mekanizması	8
3. LİTERATÜR ÖZETİ	11
3.1 Çalışmanın Literatürdeki Yeri.....	14
4. MALZEME VE YÖNTEM	16
4.1 Malzemeler.....	16
4.2 Yapıştırma Bağlantı Modelleri.....	17
4.3 Numunelerin Hazırlanması	18
4.3.1 Yüzey hazırlama işlemleri	18
4.3.2 Yapıştırıcıların hazırlanması.....	20
4.3.3 Cam fiber kumaşların hazırlanması	22
4.3.4 Tek tesirli yapıştırma bağlantılarının üretimi	22
4.4 Çekme Testi Cihazı ve Çekme Testleri.....	24
5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	26
5.1 Çekme Testi Verileri ve Grafikler.....	26
5.2 Kırılma yüzeylerinin incelenmesi	35
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	39
KAYNAKLAR	41
ÖZGEÇMİŞ.....	45

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEK TESİRLİ YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA EPOKSİ YAPIŞTIRICI İÇERİSİNE CAM FİBER KUMAŞ VE NANO- Al_2O_3 TAKVİYESİNİN BAĞLANTI DAYANIMINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Mehmet Ali ÇAVUŞOĞLU

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail SARAÇ

ÖZET

Bu çalışmada, tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, epoksi yapıştırıcı içerisinde takviye elemanı olarak nano- Al_2O_3 ve cam fiber kumaş kullanılmasının bağlantı dayanıma etkisi standart çekme deneyleri ile araştırılmıştır. Deneysel çalışmada, yapıştırıcı tabakasına göre 6 farklı şekilde modellenmiş yapıştırma bağlantıları üretilmiştir. 1. modelde, sadece saf yapıştırıcı kullanılmıştır, 2. modelde, %2 nano- Al_2O_3 takviyeli yapıştırıcı kullanılmıştır, 3. modelde saf yapıştırıcı $0^\circ/90^\circ$ oryantasyonunda cam fiber kumaş ile takviyelendirilmiştir, 4. modelde, saf yapıştırıcı, $+45^\circ/-45^\circ$ oryantasyonunda cam fiber kumaşla takviyelendirilmiştir, 5. modelde, %2 Al_2O_3 katkılı yapıştırıcı, $0^\circ/90^\circ$ oryantasyonunda cam fiber kumaş ile takviyelendirilmiştir, 6. modelde, %2 nano- Al_2O_3 katkılı yapıştırıcı, $+45^\circ/-45^\circ$ oryantasyonunda cam fiber kumaş ile takviyelendirilmiştir. Çekme deneyleri sonucunda, ortalama hasar yükü, saf yapıştırıcılı modele göre kıyaslandığında; %2 nano- Al_2O_3 katkılı yapıştırıcı kullanılan modelde % 8,9 artmıştır, saf yapıştırıcının $0^\circ/90^\circ$ oryantasyonunda cam fiber kumaş ile takviyelendirildiği modelde % 4 azalmıştır, saf yapıştırıcının $+45^\circ/-45^\circ$ oryantasyonunda cam fiber kumaş ile takviyelendirildiği modelde %6,6 artmıştır, nanopartikül katkılı yapıştırıcının $0^\circ/90^\circ$ oryantasyonunda cam fiber kumaş ile takviyelendirildiği modelde % 6,5 artmıştır, nanopartikül katkılı yapıştırıcının $+45^\circ/-45^\circ$ oryantasyonunda cam fiber kumaş ile takviyelendirildiği modelde % 4,2 artmıştır. Buna göre en yüksek hasar yükü, %2 nano- Al_2O_3 takviyeli yapıştırıcı kullanılan bağlantı modelinde elde edilmiştir. Fiber kumaş oryantasyonunun bağlantı dayanımına etkisi gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapıştırma Bağlantıları, Cam Fiber Kumaş, Nano- Al_2O_3 , Fiber Oryantasyonu.

Ocak, 2025; 45 sayfa

M.Sc. THESIS

AN INVESTIGATION OF THE EFFECT OF GLASS FIBER FABRIC AND NANO- Al_2O_3 REINFORCEMENT IN EPOXY ADHESIVE ON THE BOND STRENGTH IN SINGLE-LAP ADHESIVE JOINTS

Mehmet Ali ÇAVUŞOĞLU

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Advanced Technologies**

Supervisor: Assist Prof. İsmail SARAÇ

ABSTRACT

In this study, the effect of using nano- Al_2O_3 and glass fiber fabric as reinforcing elements in epoxy adhesive on the bond strength of single-lap adhesive joints was investigated by standard tensile tests. In the experimental study, 6 different types of adhesive joints modeled according to the adhesive layer were produced. In model 1, only pure adhesive was used. In the 2nd model, 2% nano- Al_2O_3 reinforced adhesive was used. In the 3rd model, pure adhesive was reinforced with glass fiber fabric at $0^\circ/90^\circ$ orientation. In model 4, the pure adhesive was reinforced with glass fiber fabric at $+45^\circ/-45^\circ$ orientation. In model 5, 2% Al_2O_3 added adhesive was reinforced with glass fiber fabric at $0^\circ/90^\circ$ orientation. In the 6th model, 2% nano- Al_2O_3 added adhesive was reinforced with glass fiber fabric at $+45^\circ/-45^\circ$ orientation. As a result of tensile tests, the average failure load increased by 8.9% in the model with 2% nano- Al_2O_3 added adhesive compared to the model with pure adhesive. In the model where the pure adhesive was reinforced with glass fiber fabric at $0^\circ/90^\circ$ orientation, the average failure load decreased by 4%. The average failure load increased by 6.6% in the model where the pure adhesive was reinforced with glass fiber fabric at $+45^\circ/-45^\circ$ orientation. For the model in which the nanoparticle added adhesive was reinforced with glass fiber fabric at $0^\circ/90^\circ$ orientation, the average failure load increased by 6.5%. It increased by 4.2% in the model where the nanoparticle added adhesive was reinforced with glass fiber fabric at $+45^\circ/-45^\circ$ orientation. Accordingly, the highest failure load was obtained in the joint model using 2% nano- Al_2O_3 reinforced adhesive. The effect of fiber fabric orientation on the bond strength is shown.

Keywords: Adhesive Joints, Glass Fiber Fabric, Nano- Al_2O_3 , Fiber Orientation.

January, 2025; 45 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kaynak bağlantısında gerilme dağılımı	7
Şekil 2.2. Yapıştırma bağlantılarında hasar modeli; a) adhezyon hasarı, b) kohezyon hasarı, c) yapıştırılan malzemenin kohezyon hasarı	9
Şekil 2.3. Temel hasar tipleri.	10
Şekil 4.1. Loctite 9466 epoksi yapıştırıcı.....	16
Şekil 4.2. Tek tesirli yapıştırma bağlantısı.....	16
Şekil 4.3. Yapıştırma bağlantı modelleri	18
Şekil 4.4. Zımpara aşaması	19
Şekil 4.5. Temizlik işlemi	19
Şekil 4.6. Asetonda bekletme işlemi.....	20
Şekil 4.7. Sterilizasyonlu kurutma fırını	20
Şekil 4.8. Saf yapıştırıcı hazırlama aşaması.....	21
Şekil 4.9. Hassas terazi ile nano- Al_2O_3 takviyeli yapıştırıcı karışımı hazırlaması	21
Şekil 4.10. Cam fiber kumaş $0^\circ/90^\circ$ ve $+45^\circ/-45^\circ$ kesme işlemi.....	22
Şekil 4.11. Tek tesirli yapıştırma bağlantılarının üretimi	23
Şekil 4.12. Tek tesirli yapıştırma bağlantı numuneleri.	23
Şekil 4.13. Yapıştırıcı bölgesine cam fiber kumaş takviyesi	24
Şekil 4.14. Çekme deneylerinin uygulanması.....	25
Şekil 5.1. SY çekme testi grafiği	27
Şekil 5.2. NPTY çekme testi grafiği	27
Şekil 5.3. SY+CFK ($0^\circ/90^\circ$) çekme testi grafiği	28
Şekil 5.4. SY+CFK ($+45^\circ/-45^\circ$) çekme testi grafiği.....	28
Şekil 5.5. NPTY+CFK ($0^\circ/90^\circ$) çekme testi grafiği	29
Şekil 5.6. NPTY+CFK ($+45^\circ/-45^\circ$) çekme testi grafiği	29
Şekil 5.7. Bağlantı modellerinin her birinin ortalamaya en yakın numunelerinin karşılaştırılma grafiği	30
Şekil 5.8. SY modeli çekme deneyleri sonucu oluşan hasar yüzeyleri.....	31
Şekil 5.9. NPTY modeli çekme deneyleri sonucu oluşan hasar yüzeyleri	32
Şekil 5.10. SY +CFK ($0^\circ/90^\circ$) modeli çekme deneyleri sonucu oluşan hasar yüzeyleri	32
Şekil 5.11. SY +CFK ($+45^\circ/-45^\circ$) modeli çekme deneyleri sonucu oluşan hasar yüzeyleri	32
Şekil 5.12. NPTY +CFK ($0^\circ/90^\circ$) modeli çekme deneyleri sonucu oluşan hasar yüzeyleri	33
Şekil 5.13. NPTY +CFK ($+45^\circ/-45^\circ$) modeli çekme deneyleri sonucu oluşan hasar yüzeyleri	33
Şekil 5.14. SY modeli kırılma yüzeyi.....	36
Şekil 5.15. NPTY modeli kırılma yüzeyi.....	36
Şekil 5.16. SY +CFK ($0^\circ/90^\circ$) modeli kırılma yüzeyleri.....	37
Şekil 5.17. SY +CFK ($+45^\circ/-45^\circ$) modeli kırılma yüzeyleri	37
Şekil 5.18. NPTY +CFK ($0^\circ/90^\circ$) modeli kırılma yüzeyleri	38
Şekil 5.19. NPTY +CFK ($+45^\circ/-45^\circ$) modeli kırılma yüzeyleri.....	38

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. AISI 304 ve Loctite 9466 mekanik özellikleri	17
Çizelge 4.2. Nano-Al ₂ O ₃ fiziksel özellikleri.....	17
Çizelge 4.3. Yapıştırma bağlantı modelleri	17
Çizelge 5.1. Çekme testi sonuçları.....	26



SİMGELER VE KISALTMALAR

ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
Al₂O₃	Alüminyum Oksit
ASTM	Amerikan Malzeme ve Testler Derneği
CFK	Cam Fiber Kumaş
CFK (0°/90°)	90 Derece Kesilmiş Cam Fiber kumaş
CFK (45°/-45°)	45 Derece Kesilmiş Cam Fiber kumaş
CNT	Karbon Nanotüp
DCB	Çift Konsol Giriş
MPa	Megapaskal
MWCNT	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
nm	Nanometre
NPTY	Nano Partikül Takviyeli Yapıştırıcı
PLA	Polilaktik Asit
SiC	Silisyum Karbür
SiO₂	Silikon Dioksit
SY	Saf Yapıştırıcı
TiO₂	Titanyum Dioksit
°C	Santigrat Derece

1. GİRİŞ

Yapısal malzemelerin birleştirilmesinde cıvata, perçin, kaynak ve yapıştırıcı kullanılabilir. Sıklıkla tercih edilen bağlantı yöntemlerinden cıvata ve perçin ile birleştirme işlemlerinde, malzemeler üzerinde delikler açılması nedeniyle montaj sonrasında deliklerin çevresinde meydana gelen gerilme yığılmaları oluşabilmektedir. Kaynak ile birleştirme yönteminde ise malzemeler ısıl deformasyonlara maruz kalabilir. Bahsedilen olumsuzlukları önlemek ve daha hafif yapılar elde edebilmek amacıyla alternatif bir bağlantı yöntemi olan yapıştırıcı ile birleştirme yöntemine olan ilgi giderek artmaktadır.

Yapıştırıcı ile malzemeleri birleştirme yöntemi ilk çağlardan itibaren kullanılmaya başlanmıştır. Yapıştırıcılar, malzemeleri bir arada tutan madde olarak tanımlanır. Yapışma, iki yüzeyin; kimyasal bağlar arası etkileşimden dolayı oluşan çekim kuvvetleriyle bir arada tutturulması olarak tanımlanır. Yapıştırıcı olarak kullanılan ilk malzemenin tarihi milattan önceye kadar uzanmaktadır. Arkeologların yaptığı çalışmalarda, ilkel kabilelerin kırılan çömlekleri, ağaç öz suyundan yaptıkları yapıştırıcı reçine ile birleştirdikleri görülmüştür. Ayrıca yapılan diğer arkeolojik araştırmalar, M.Ö 1500–1000 yıllarında, ahşap yapıştırma işlemlerinde yapıştırıcıların kullanıldığını ortaya koymuştur (Anonim, 2014).

Günümüzde enerji tüketimini azaltmak önemli bir araştırma konusudur. Örneğin, yakıtta tasarrufa gitmenin yollarından bir tanesi yapının ağırlığını azaltmaktır. Bir sistemin elemanlarını birleştirmek için kullanılan cıvata, perçin ve kaynak gibi bağlantı yöntemleri yerine daha hafif bir bağlantı şekli olan yapıştırıcıların kullanımı sistemleri daha hafif hale getirmiştir (Temiz, 2006). Endüstriyel uygulamalarda yapıştırıcıların kullanımı ise, II. dünya savaşından sonra, kimya sanayiindeki gelişmelerle birlikte artış göstermiştir. Yüksek mukavemetli yapısal yapıştırıcıların üretilmesi, otomotiv ve havacılık sanayii başta olmak üzere, endüstrinin birçok alanında yapıştırıcılara olan ilgiyi arttırmıştır. Yapıştırma bağlantılarının, cıvatalı, perçinli ve kaynaklı birleştirme yöntemleriyle karşılaştırıldığında, daha hafif yapılar elde edilmesi, yapılarda düzgün gerilme dağılımı meydana getirmesi, farklı türdeki malzemeleri birleştirebilme olanağı sunması, birleştirilecek malzemelerde delik açılmaması gibi önemli üstünlükleri vardır. Literatürde yer alan çok sayıda çalışmada, yapıştırıcıların avantajları ifade edilmiştir (Aydın, 2003) .

Yapıştırma bağlantılarında, genellikle yapıştırılan malzemelerin dayanımı yapıştırıcıya göre oldukça yüksektir. Bağlantı hasarı büyük oranda, yapıştırıcı tabakasında meydana gelmektedir. Dolayısıyla bağlantı dayanımı yapıştırıcı tabakasının tasarımıyla doğrudan ilişkilidir.

Yapıştırma bağlantılarının yapısal uygulamalarda kullanılmaya başlanmasıyla birlikte, bağlantı dayanımlarını artırmak amacıyla çalışmalar yapılmaya başlanmış ve farklı dayanım artırma teknikleri önerilmiştir. Tek tesirli yapıştırma bağlantısı geometrisi kullanılarak yapılan birçok çalışmada bindirme bölgesi uç kısımlarındaki gerilme yığılmalarının etkisi azaltılarak bağlantı dayanımının artırılabilceği gösterilmiştir. Yapılan bu çalışmalarda kullanılan optimizasyon teknikleri incelendiğinde; yapıştırılan malzemelerin uç kısımlarını açılı işleme (tapering adherends), bindirme uç kısımlarını yapıştırıcı kullanarak radyüslü hale getirme (fillet), yapıştırılan malzemelerin uç kısımlarının içten veya dıştan basamaklı şekilde tasarlama gibi yöntemler kullanılmıştır (Saraç, 2020, 2021). Yapıştırıcı hattında çift yapıştırıcı kullanma tekniği yapıştırma bağlantılarının dayanımını artırmak için kullanılmıştır. Bu yöntemde yapıştırıcı hattı boyunca gerilme yığılmalarının fazla olduğu uç kısımlarda sünek yapıştırıcılar, orta kısımlarda ise gevrek yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Böylece elastisite modülü açısından derecelendirilmiş bir yapıştırıcı hattı elde edilmektedir (Safar vd., 2022). Çift yapıştırıcılı bağlantılarda, bindirme uçlarında kayma ve soyulma gerilme konsantrasyonlarında azalma olduğu literatürde çok sayıda çalışmada gösterilmiştir (Kumar ve Pandey, 2010).

Yapıştırma bağlantılarında, başka bir dayanım artırma yöntemi ise, yapıştırıcı içerisine organik veya inorganik partikül/nano-partikül takviyesi yaparak kompozit yapıştırıcı kullanma tekniğidir. İdeal koşullarda yapılan partikül takviyesi yapıştırıcıların mekanik davranışını geliştirdiği için araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Bu konuda literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Adin vd., 2018; Akpınar, 2016; Bali, 2021; Oğuzhan, 2021).

Son yıllarda ise yapıştırıcı tabakasında takviye elemanı olarak çeşitli özelliklerde fiber kumaş kullanmanın dayanıma etkisi ile ilgili sınırlı sayıda araştırmalar dikkat çekmektedir (Akpınar ve Akpınar, 2023; Turan ve Barut, 2021).

Bu tez çalışmasında, yapıştırıcı bölgesi nano- Al_2O_3 ve cam fiber kumaş takviyesine göre altı farklı şekilde modellenerek ASTM D-1002 standardına göre tek tesirli yapıştırma bağlantı numuneleri üretilmiştir. Yapıştırıcı, Loctite 9466 epoksi yapıştırıcı, yapıştırılan malzeme AISI 304 paslanmaz çelik plaka alınmıştır. Üretilen tek tesirli yapıştırma bağlantı numunelerine çekme deneyleri uygulanarak hasar yükleri ve hasar oluşum mekanizmaları araştırılmıştır. Çalışmanın amacı tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcı içerisine nano- Al_2O_3 ve cam fiber kumaş takviyesinin bağlantı dayanımına ve hasar mekanizmasına etkisini karşılaştırmaktır.



2. TEORİK TEMELLER

2.1 Yapıştırma İşleminin Tarihçesi

Yapıştırma, insanlık tarihinin çok eski bağlantı yöntemlerindendir binlerce yıldır yapıştırıcı malzemeler insanlar tarafından kullanılmaktadır. Huş ağacı kabuğunun ziftleri, bitüm yapıştırıcılar ve hayvan kolajenlerinden yapılmış malzemeler yapıştırıcı olarak kullanılmıştır. Taş devri döneminde insanlar taş ve balta yapımında ve diğer el aletlerini üretebilmek için birleştirme elemanı olarak zift ve reçine benzeri organik esaslı doğal yapıştırıcılar kullanmışlardır. Tarih öncesi mezarları inceleyen arkeologlar, ölümler ile birlikte gömülmüş olan kırık çömlek kaplarının ağaç öz suyundan elde edilen yapışkan reçineler ile tamir edildiğini görmüşlerdir. Yapıştırıcı malzemeler Eski Mısırlılar, Yunanlılar ve Romalılar tarafından da yaygın olarak kullanılmıştır. King Tut'un mezarından çıkarılan bir tabut incelendiğinde tabutun yapımında yapıştırıcı kullanıldığı görülmüştür. Orta Çağ Döneminde, ilk tutkal tesisi kurulmuş olup, deri, kemik, kan albümini gibi hayvansal hammaddeler kullanılarak hayvansal yapıştırıcılar, bitkilerden ise nişasta macunu gibi bitkisel yapıştırıcılar üretilmiştir. İngiltere'de 1750 yılı civarında balık tutkalı ile ilk tutkal patenti verilmiştir (Becker, 2022).

20. yüzyılın başlarında sentetik polimer bazlı yapıştırıcılar üretildi. Bu yeni gelişmeyle birlikte yapıştırıcı malzemelerinin performansı iyileştirilirken buna bağlı olarak yapısal uygulamalarda kullanımı artmıştır. Klasik doğal yapıştırıcılar yerini epoksi reçineleri, fenolik reçineler, siyanoakrilatlar gibi polimerik yapıştırıcılara bırakmıştır. Böylece modern yapıştırıcı teknolojisinin temelleri atılmıştır (Ebnesajjad, 2014; Pizzi ve Kumar, 2019).

2.2 Yapıştırma Bağlantıları

Yapıştırma bağlantısı, aynı veya farklı iki malzemenin metalik olmayan bir ara malzeme (yapıştırıcı) ile çözülemeyecek şekilde birleştirilmesi işlemidir. Yapıştırma bağlantısının mukavemeti, yapıştırıcı ile yüzeyler arasındaki adhezyon bağına ve yapıştırıcının kendi molekülleri arasında oluşan kohezyon kuvvetine bağlıdır. Yapıştırma işlemi, yapıştırılacak elemanların yüzeylerinin temizlenmesinden sonra yüzeylerine çok ince bir yapıştırıcı tabakası sürülerek, oda sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıklarda yapılır.

Yapıştırma işleminin performansı ve dayanıklılığı, malzeme ve yapıştırıcı özelliklerine, malzeme ve yapıştırıcı arasındaki fiziksel-kimyasal etkileşime, bağlantı şartlarına, bağlantı şekline (geometri), bağlantıdaki artık gerilmelere ve yapıştırma yapılacak olan yüzeydeki kusurlara bağlıdır (Parvatareddy, 1997).

Yapıştırma işleminden iyi bir sonuç alabilmek için; uygun bir yapıştırıcının seçilmesi, bağlantı tasarımının uygun olması, yüzeylerin temizliği, yapıştırılacak yüzeylerin yapıştırıcıyla tamamen ıslanabilmesi ve uygun kürleşme şartlarının sağlanması son derece önemlidir (Petrie, 1975).

2.2.1 Yapıştırma bağlantılarının avantaj ve deavantajları

Yapıştırma bağlantıları geleneksel bağlantı yöntemleriyle karşılaştırıldığında aşağıda sıralanan avantajlara ve bazı deavantajlara sahiptirler (Campbell, 2003; Çalık, 2008).

Avantajlar:

- Uygulanması kolay ve ucuzdur,
- Delik, çentik vb. olmadığı için gerilme yığılması oluşumu daha azdır,
- Isıl bir işlem içermediği için ısıl işlemde kaynaklı gerilmeler ve gevrekleşmeler oluşmaz,
- Yüksek darbe ve titreşim sönümleme kabiliyetine sahiptirler,
- Hemen hemen her malzemeye uygulanabilirler,
- Diğer bağlantılara göre çok ince veya kalın parçalara kolaylıkla uygulanabilirler,
- Gerilmeler her noktada hemen hemen aynı olduğundan, sürekli mukavemette yorulma hasarı riski düşüktür,
- Sızdırmazlık sağlarlar,
- Boşluklar kolayca doldurulduğundan aralık ve galvanik korozyon riski yoktur,
- Yüzeyler arası yapıştırıcı dolacağı için hassas tolerans vermeye gerek kalmaz,
- İyi sönüm ve yalıtım özellikleri vardır,
- Mukavemet/ağırlık oranı yönünden son derece iyidirler.

Dezavantajlar:

- Bazı yapıştırıcılarda sertleşme (kür) süresi uzundur,

- Yüzeyin temizlenmesi özen ve dikkat gerektirir ve bağlantı dayanımını keskin bir şekilde etkiler,
- Çekme ve eğilme tipi zorlanmalara karşı mukavemeti iyi değildir,
- Tahribatsız muayene ile kontrolü kolay değildir,
- Çalışma sıcaklığı artarsa (80°C - 120°C) mukavemetleri düşer. Fakat yeni özel bazı yapıştırıcılar ile bu sınırın 450°C gibi yüksek değerlere çıkartılabilir,
- Bazı solventlere karşı dayanıksızdır.

2.2.2 Yapıştırma bağlantılarının diğer bağlantı yöntemleri ile karşılaştırılması

Yapıştırma bağlantısı tekniğini, kaynak, perçinleme ve diğer mekanik bağlantılardan her koşulda daha avantajlı demek doğru olmayacaktır. Bu birbirinden farklı birleştirme tekniklerinin her birinin farklı koşullar altında kendilerine göre avantajları veya dezavantajları olacaktır.

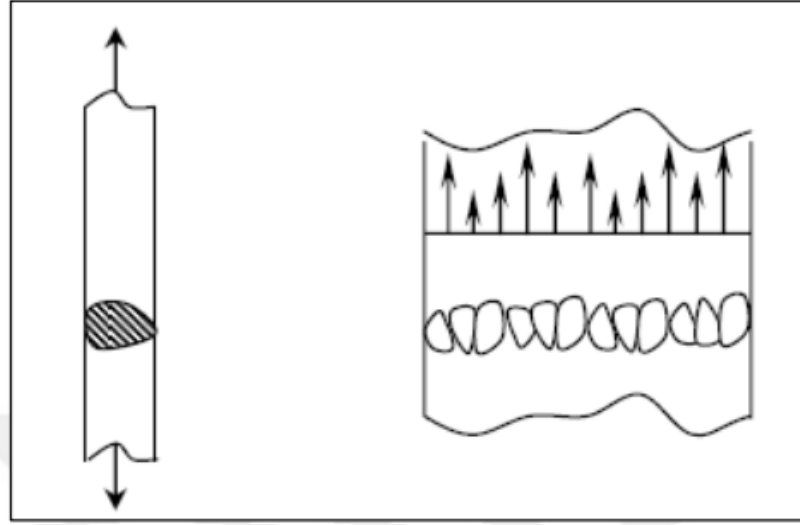
2.2.2.1 Perçin bağlantıları

Perçin delikleri, kesiti küçülttüğü ve çentik etkisi oluşturduğu için, delik kenarlarında gerilme tepeleri meydana gelir. Bindirme perçin bağlantılarında; kuvvetin, parçaların tam ortasına etkimemesi sebebiyle, bir eğilme momenti oluşur. Bu nedenle, hesaplarda perçin diziliş şekline göre, ana malzeme mukavemetinde %15 ile %50 arasında bir azalma meydana gelir. Tasarımcı; bağlantıyı daha büyük ve daha ağır yapmak zorunda kalır. Bunun dışında, perçin bağlantılarında; sürekli mukavemet değerleri, düzgün olmayan gerilme dağılımından ötürü düşüktür ve perçinle birleştirme işlemi, hem yavaş hem de fazla işgücü gerektiren bir yöntemdir (Çalık, 2008).

2.2.2.2 Kaynak bağlantıları

Kaynaklı bağlantılar sayesinde, yapılarda meydana gelecek yük durumuna ve yapılarda oluşturulmak istenilen şekle göre tasarım yapmak mümkündür. Çok iyi yapılmış kaynak işlemleri ana malzemenin mukavemet değerlerine yakın dayanım değerlerine sahip olabilmektedir. Kaynaklı tasarımlar büyük yapıların imalatında ve otomotiv endüstrisinde güvenli bir şekilde kullanılmaktadır. Kaynak yapma sırasında malzemenin ergimesi ve hızlı soğuması bölgesel gerilmelere ve ana malzemelerin içyapısında değişmelere neden olur. Soğuma sırasında meydana gelen iç gerilmeler ve yapıda bulunabilecek kaynak hataları dayanım değerlerinde bir azalmaya ve

bağlantıda, Şekil 2.1’ de görüldüğü gibi, düzgün olmayan bir gerilme dağılımına neden olur.



Şekil 2.1. Kaynak bağlantısında gerilme dağılımı (Çalık, 2008).

Kaynak dikişlerinin kontrolü zordur ve emniyet gerilmesi, kaynak kalitesine bağlı olarak çok farklı değerlerde olur. Kaynak bağlantılarının kullanılmasını sınırlayan en önemli faktörlerden biri yalnız aynı cins malzemenin birbiriyle kaynak edilebilmesidir. Ayrıca bazı malzemeler kaynak için elverişli değildir. Bunlara örnek, yüksek-mukavemet çelikleri ve hafif metal alaşımlarıdır (Çalık, 2008).

Kaynaklı bağlantıların imalatında kaynak yapan kişilerin el becerileri, kaynak makinelerinin kaliteleri, kullanılan kaynak elektrodlarının yapılmak istenen kaynağa uygunluğu gibi birçok faktör standart bir kaynak kalitesi oluşturmanın zorluğunu göstermekle birlikte özellikle endüstride yaygın bir şekilde kullanılan kaynak robotları sayesinde belirli bir kaynak kalitesini yakalamak mümkündür (Saraç, 2018).

2.2.2.3 Lehim bağlantıları

Lehimleme ile farklı malzemeleri birleştirmek mümkündür. Lehimleme sıcaklığı, birleştirilen malzemenin ergime derecesinden daha düşüktür. Bununla birlikte sert lehimlemede içyapı değişimleri ortaya çıkabilir. Lehimlemede dekapan kullanıldığı için yüzeyler iyi temizlenmezse korozyon tehlikesi doğar. Benzer olmayan metallerin birleştirilmesinde, örneğin çelik ve alüminyumun birleştirilmesinde olduğu gibi galvanik korozyon oluşabilir. Hafif metallerin lehimlenmesi de oldukça sorunludur.

Lehimleme değişik tip pahalı malzemeleri gerektirir. Örneğin lehim en pahalı epoksi yapıştırıcıdan %30 daha pahalıdır (Solmaz, 2008).

2.2.2.4 Cıvatalı bağlantılar

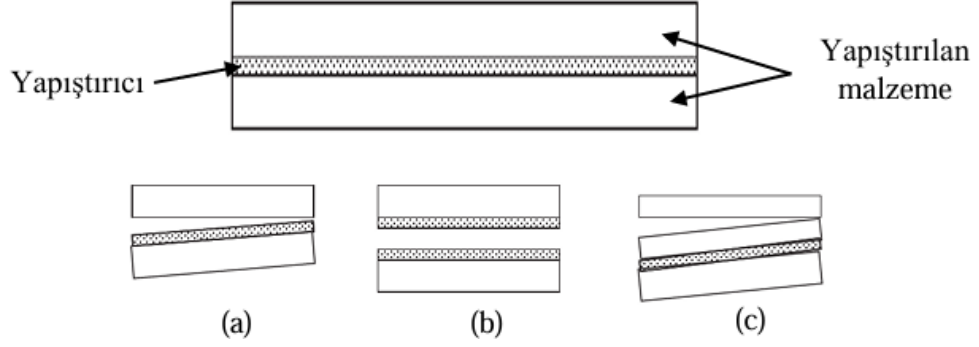
Cıvataların tespiti için uygun deliklerin matkapla açılması veya darbe ile delinmesi gereklidir. Bu işlemler, birleştirilecek parçaların zayıflamasına neden olur. Ayrıca bağlantılar yüklendiği zaman düzgün olmayan gerilme dağılımı ortaya çıkar. Bundan dolayı delik civarındaki gerilme değerleri diğer bölgelerdeki gerilmelerin oldukça üstünde değerlere çıkar. Artan bu gerilme değerlerine dayanabilecek yapıların oluşturulması için yapıların ağırlığının artmasına neden olan daha kalın malzemelerin kullanılması zorunluluğu ortaya çıkar. Yapıların ağırlığının artması sonucu ise enerji girdileri artarak maliyetlerin artması kaçınılmaz olmaktadır. Düzgün olmayan gerilme dağılımları malzemelerin yorulma dayanımlarını da düşürmektedir. Ayrıca, cıvatalar ile birleştirme genellikle fazla zaman ve işçilik gerektiren bir işlemdir. Bunun yanında malzemeleri birleştirmek için kullanılan her cıvatanın yapıların ağırlığını arttırdığı bir gerçektir (Saraç, 2018).

2.2.2.5 Pres bağlantıları

Soğuk ve sıcak pres yoluyla birleştirmenin sınırlı bir uygulama alanı vardır. En çok silindirik bağlantılarda kullanılır. Dar tolerans aralıklı bağlantılar elde etmek için birleştirilecek parçaların hassas işlenmesi ve uygun montaj aletleri kullanılarak birleştirmenin yapılması maliyetli ve fazla işçilik gerektirmektedir (Saraç, 2018).

2.2.3 Yapıştırma bağlantılarında hasar mekanizması

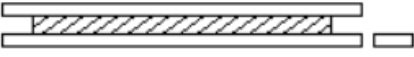
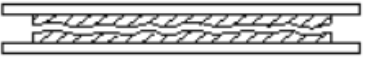
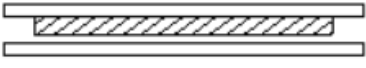
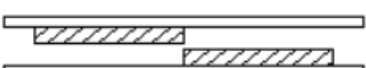
Temel hasar modelinin oluşturulması, bir yapıştırma bağlantısına uygulanan herhangi bir mekanik testin sonuçlarının daha iyi anlaşılmasını ve hasar çeşitlerinin sınıflandırılmasını sağlar. Birden fazla malzemenin yapıştırıcı ile bir araya getirildiği yapıştırma bağlantılarında genel olarak üç tip hasar modeli ile karşılaşılır Şekil 2.2’de hasar modelleri gösterilmiştir (Ekrem, 2015).



Şekil 2.2. Yapıştırma bağlantılarında hasar modeli; a) adhezyon hasarı, b) kohezyon hasarı, c) yapıştırılan malzemenin kohezyon hasarı

Adhezyon hasarı, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde gözle görülen bir ayrılmanın olduğu hasar çeşitidir. Yapışmanın en zayıf olduğu bölge temas yüzeyidir. Eğer yapıştırıcı, yüzeyleri tam olarak ıslatmazsa, moleküller arası kuvvetler oldukça zayıflar. Bu nedenle yapıştırıcının yüzey pürüzlerine tam olarak nüfuz etmesi ve bütün yüzeyi ıslatması gerekir. Adhezyon hasarını önlemek için yapıştırılacak yüzeylere uygun ön işlem yapılmalıdır. Kohezyon hasarı ise yapıştırıcının kendi içerisinde oluşan bir hasardır. Kohezyon kuvveti, yapıştırıcıyı oluşturan bileşenlerin molekülleri arasında oluşan ve tüm yapıştırıcı malzemesini bir arada tutan kuvvete denir. Kohezyon hasarı, bağlantıda yapıştırıcının malzemesinde veya yapıştırılan materyalde görülebilir bir hasarın olduğu kopma tipidir.

Farklı şekillerde yükleme durumlarında yapıştırma bağlantılarının veya yapıştırıcının mekanik özelliklerinin bütünüyle anlaşılabilmesi için, hasar tiplerinin ayırıcı özelliğini ortaya koymak gerekir. Birden fazla materyalin yapıştırıcı ile bir araya getirildiği yapıştırma bağlantılarında genel olarak iki çeşit hasar modeline (adhezyon ve kohezyon hasarları) rastlanır (TS EN ISO 10365, 2001). Temel hasarın ne olduğunu değerlendirmesinin anlaşılması demek, bir yapıştırma bağlantısına uygulanan mekanik testlerin sonuçlarının anlaşılmasına ve hasar çeşitlerinin bulunmasını sağlamak demektir. Temel hasar tipleri Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

Yapıştırılan malzemede meydana gelen hasarlar	Hasar Tipleri	
		Yapıştırılan malzemelerin birinde veya ikisinde de hasarın olması
		Kohesiv yapıştırılan malzeme hasarı
		Kalkma (Deleminasyon) yoluyla hasar
Yapıştırıcıda meydana gelen hasarlar		Kohezyon hasarı
		Özel kohezyon hasarı
		
		Adhezyon hasarı
		

Şekil 2.3. Temel hasar tipleri (TS EN ISO 10365, 2001).

3. LİTERATÜR ÖZETİ

Yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcı içerisine nanopartikül ve fiber kumaş takviyesi yaparak bağlantı dayanımının artırılmasına yönelik olarak literatürde çalışmalar bulunmaktadır. Özellikle son 20 yıl içerisinde yapılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Gilbert vd. (2003) tarafından yapılan bir çalışmada, film yapıştırıcılar içerisine nanopartikül katılarak kompozit yapıştırıcılı bağlantılar elde edilmiştir. Sunulan çalışmada; farklı özelliklerdeki yapısal yapıştırıcılar içerisine alüminyum oksit (Al_2O_3) ve titanyum dioksit (TiO_2) katılarak elde edilen tek tesirli bindirme bağlantılarının mekanik özellikleri çeki yükü altında deneysel olarak incelenmiştir. Yapıştırıcı içerisine nano- Al_2O_3 eklenmesiyle yapıştırıcının soyulma ve kayma mukavemetinin arttığı saptanmıştır.

Zhai vd. (2008) , bir epoksi yapıştırıcıya farklı oranlarda nano- Al_2O_3 eklemenin, yapıştırıcı mukavemetine etkisini çekme-yapışma (pull-adhesion) testleriyle araştırmışlardır. Yapıştırıcı içerisinde % 2 nano- Al_2O_3 takviyesinde maksimum dayanıma ulaşılmıştır.

Khashaba vd. (2015), epoksi yapıştırıcı içerisine, farklı oranlarda, Al_2O_3 , SiC ve çok duvarlı karbon nanotüp takviyeleri yaparak nano-kompozit test numuneleri üretmişlerdir. Deneyler sonucunda, takviyeli yapıştırıcıların mekanik özelliklerinde gelişme gözlemlenmiştir.

Nassar vd. (2015), yapıştırıcı içerisine nano- SiO_2 ve nano- Al_2O_3 takviyesinin bağlantı dayanımını % 2.5 takviye oranında maksimum olarak arttırdığını belirtmişlerdir.

Gültekin vd. (2016), tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, DP460 epoksi yapıştırıcı içerisine %0.5, %1 ve %2 oranlarında nano-grafen takviyesi yaparak kompozit yapıştırıcılar kullanmışlardır. Deneyler sonucunda en iyi sonuçlar %1 karışım oranında bulunmuştur.

Akpınar vd. (2017a), tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, rijit (DP270), tok (DP460) ve sünek (DP125) yapıdaki yapıştırıcılara, graphene, carbon nanotube (CNT) ve fullerene takviyesinin, dayanımına etkisini incelemişlerdir. Rijit yapıştırıcıda,

maksimum dayanım %2 graphene takviyesinde bulunmuştur. Rijit yapıştırıcıya fullerene takviyesinin bağlantı dayanımına önemli bir etkisi olmamıştır. Sünek yapıştırıcıda maksimum dayanım %1 fullerene takviyesinde elde edilmiştir. Tok yapıştırıcıda en iyi dayanım değerleri %1 takviye oranlarında bulunmuştur.

Kanar (2018), nano-kompozit yapıştırıcıların kırılma davranışlarını çift konsol kiriş (DCB) testleri ile incelemişlerdir. Nano-kompozit yapıştırıcıların kullanıldığı durumlarda kırılma enerjisinde artış gözlemlenmiştir. Çalışmada yapıştırıcı olarak DP125 ve DP460, takviye elemanı olarak graphene, carbon nanotube ve fullerene C60 nanopartikülleri kullanılmıştır.

Razavi vd. (2018), epoksi yapıştırıcı içerisine aynı anda nano-SiO₂ ve çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) takviyesi yaparak ürettikleri çift partiküllü (hibrit) yapıştırıcıların bağlantı performansına etkilerini tek tesirli yapıştırma bağlantılarında araştırmışlardır. Hibrit yapıştırıcıların tek partiküllü yapıştırıcılara göre bağlantı performansında artış gözlemlenmiştir.

Saraç vd. (2018), DP460 epoksi yapıştırıcı içerisine farklı oranlarda nano-Al₂O₃, nano-SiO₂ ve nano-TiO₂ takviyeleri yaparak partikül takviyesinin bağlantı performansına etkilerini tek tesirli yapıştırma bağlantılarında araştırmışlardır. Yapıştırma bağlantılarında yapıştırılan malzeme olarak AISI 304 paslanmaz çelik kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, partikül takviyesinin ideal bir oran için bağlantı performansını arttırdığı tespit edilmiştir.

Aydın (2019), Çalışmada, epoksi yapıştırıcıların içerisine karbon nanopartikül eklenerek oluşturulan yapıştırma bağlantılarında nanopartikül oranının pürüzlü yüzeylerdeki yapışma dayanımına etkileri araştırılmıştır. Nanopartiküllerin belirli bir orana kadar yapışma dayanımına olumlu etki gösterdiği sonrasında ise bu etkilerinin azaldığı görülmüştür.

Çınar ve Ekrem (2021), Bu çalışmada, ağırlıkça %0,25 Çok Cidarlı Karbon Nanotüpler (ÇCKNT) ve farklı oranlarda SiO₂ nanoparçacıkları ile güçlendirilmiş epoksi kompozit malzemelerin eğilme dayanımları incelenmiştir. Sonuçlar, belirli oranlarda CNT ve SiO₂ ilavesinin epoksi reçinesinin mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir.

Bali (2021), epoksi yapıştırıcı içerisine %0.25, %0.5 ve %1 oranlarında nano-grafen takviyesinin, tek tesirli bindirme bağlantılarında çekme ve yorulma dayanımına etkisini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda, nano-grafen takviyesinin bağlantının çekme dayanımını arttırdığını tespit edilmiştir.

Akpınar ve Akpınar (2023), karbon fiber kumaş ve cam fiber kumaş takviyeli epoksi yapıştırıcı kullanarak oluşturdukları tek tesirli yapıştırma bağlantılarının dayanımının takviyesiz bağlantılara göre %5 ile %41 arasında arttığını belirtmişlerdir. Tek tesirli yapıştırma bağlantılarının üretiminde, yapıştırılan malzeme olarak AA2024-T3 alüminyum alaşımı ve DP460 epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır.

Çalık ve Akpınar (2023), 25 mm bindirme mesafesinde üretilen tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcı tabakasına eklenen fiber kumaşların bağlantı dayanımına etkisini araştırmışlardır. Bindirme tabakasına yerleştirilen fiber kumaş uzunluğunun bağlantı dayanımını etkilediği anlaşılmıştır. Maksimum dayanım, bindirme tabakasının ortasında, 10 mm uzunluğunda karbon fiber kumaş kullanılan bağlantılarda elde edilmiştir.

Thirunavukarasu ve Sikarwar (2024), tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, bindirme bölgesinde, tek doğrultulu (unidirectional) ve çift doğrultulu (bidirectional) fiber kumaş takviyesinin bağlantı dayanımına etkisini araştırmışlardır. En yüksek dayanım değeri çift doğrultulu karbon fiber kumaş takviyesinde elde edilmiştir.

Paygozar ve Görgülüarslan (2023), tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, epoksi yapıştırıcıya %1, %2 ve %3 oranlarında nano-SiO₂ takviyesinin hasar yüküne etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonunda, %2 nano-SiO₂ takviye oranında maksimum hasar yükü elde edilmiştir.

Kamer ve Temiz (2024), Bu çalışmada, 3B yazıcı ile ABS ve PLA filamentler kullanılarak 3,2 mm kalınlığında, 100x25 mm boyutlarında polimer levhalar üretilmiştir. Üretilen levhaların 25x25 mm'lik kısımları üst üste gelecek şekilde yerleştirilmiş olup, aralarına iki farklı yapıştırıcı (Araldite 2011, Araldite 2015-1) uygulanarak tek tesirli yapıştırma bağlantıları oluşturulmuştur. Bu şekilde hazırlanan tek tesirli yapıştırma bağlantılı test numunelerinin kütle, sertlik ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür. Test numunelerine 1 mm/dk hızla çekme testi uygulanmıştır.

3B yazdırılmış ABS ve PLA levhaların farklı epoksi yapıştırıcılar kullanılarak yapıştırılmasıyla oluşturulan tek tesirli yapıştırma bağlantılarının çekme testi davranışları araştırılmıştır. Çalışma sonucunda PLA malzeme ile üretilen test numunelerinde fırınlama işlemi sırasında polimer test levhasının kalınlığında yaklaşık olarak % 1,8'lik bir artış olduğu belirlenmiştir. Araldite 2011 epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılan ABS test numunelerinde adeziv tip kopmanın meydana geldiği tespit edilmiştir. Araldite 2011 epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılan ABS test numunelerinin en düşük çekme dayanımına sahip numune olduğu, Araldite 2015-1 epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılan ABS test numunelerinin ise en yüksek kopma uzamasına sahip numune olduğu belirlenmiştir. Tüm parametreler arasında en yüksek çekme dayanımının PLA test numunelerinde olduğu tespit edilmiştir.

3.1 Çalışmanın Literatürdeki Yeri

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, yapıştırıcı içerisine çeşitli özelliklerde nanopartikül takviyesi yaparak bağlantı dayanımının arttırılmasına yönelik çalışmalar oldukça fazladır. Bu çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, yapıştırıcı içerisine eklenen nanopartiküllerin kritik bir takviye oranına kadar bağlantı dayanımını artırıcı yönde etki ettiği görülmektedir. Nanopartiküllerin yapıştırıcı içerisinde homojen olarak dağılmasının sağlanması ve nanopartikül topaklaşmasının önlenmesi en önemli problemlerdendir. Son zamanlarda karşılaşılan sınırlı sayıdaki çalışmalarda ise yapıştırıcı bölgesine fiber kumaş takviyesiyle bağlantı dayanımının arttırılabileceği gösterilmiştir. Uygulama kolaylığı yönünden yapıştırıcı tabakasında fiber kumaş kullanılmasının daha kolay olduğu düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasında, tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcı tabakasında nanopartikül ve fiber kumaş kullanılmasının dayanıma etkisi karşılaştırılmıştır. Nanopartikül olarak literatürde birçok çalışmada kullanılan ve dayanıma etkisi kanıtlanmış olan nano Al_2O_3 kullanılmıştır. Literatürde bulunan çalışmalarda genellikle ideal nanopartikül takviye oranları %1-2 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada ise takviye oranı %2 alınmıştır. Fiber kumaş olarak düşük yoğunluklu (25 g/m²) cam fiber kumaş kullanılmıştır.

Literatürde bulunan sınırlı sayıdaki çalışmada yapıştırıcı tabakasında kullanılan fiber kumaşların 0°/90° oryantasyon açısında kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada ise

fiber kumaşlar çekme yönüne göre iki farklı oryantasyon açısında ($0^{\circ}/90^{\circ}$, $+45^{\circ}/-45^{\circ}$) kesilerek yapıştırıcı içerisine eklenmiştir. Böylece, $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ oryantasyonundaki şekil değıştirme özelliğinin bağlantı dayanımına etkisi araştırılmak istenmiştir. Bunun yanında, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak nano Al_2O_3 ve cam fiber kumaş takviyelerinin birlikte kullanıldığı bağlantı modelleri de oluşturularak takviye elemanlarının bağlantı dayanımına etkileri kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır.



4. MALZEME VE YÖNTEM

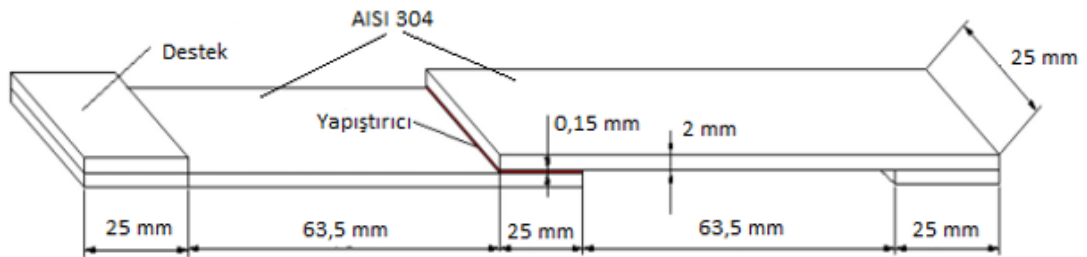
Tez çalışmasının bu bölümünde, tek tesirli yapıştırma bağlantı modellerinin üretilmesinde kullanılan malzemeler ve üretim yöntemi tanıtılmıştır.

4.1 Malzemeler

Yapıştırma bağlantılarında, yapıştırılan malzeme AISI 304 çelik plaka, yapıştırıcı iki bileşenli Loctite 9466 kullanılmıştır. Loctite 9466 uzun çalışma ömrüne sahip, oda sıcaklığında kürleşebilen ve metallerle uyumlu epoksi tipi bir yapıştırıcıdır (Şekil 4.1.). Yapıştırıcı içerisine eklenen takviye malzemeleri ise nano Al_2O_3 ve düşük yoğunluklu (25 g/m^2) cam fiber kumaş seçilmiştir. Tek tesirli yapıştırma bağlantıları ASTM D-1002 standardına göre üretilmiştir (Şekil 4.2.). AISI 304 çelik ve Loctite 9466 malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 4.1.'de verilmiştir (Saraç vd., 2018; Koçar vd., 2023). Nano- Al_2O_3 fiziksel özellikleri Çizelge 4.2.'de gösterilmiştir (Saraç vd., 2018).



Şekil 4.1. Loctite 9466 epoksi yapıştırıcı.



Şekil 4.2. Tek tesirli yapıştırma bağlantısı.

Çizelge 4.1. AISI 304 ve Loctite 9466 mekanik özellikleri.

	AISI 304	Loctite 9466
Elastisite modülü (MPa)	190000	1718
Çekme dayanımı (MPa)	515-720	32
Akma dayanımı (MPa)	210	-
Poisson oranı	0,33	0,33
Kopma uzaması (%)	≥50	3

Çizelge 4.2. Nano- Al_2O_3 fiziksel özellikleri.

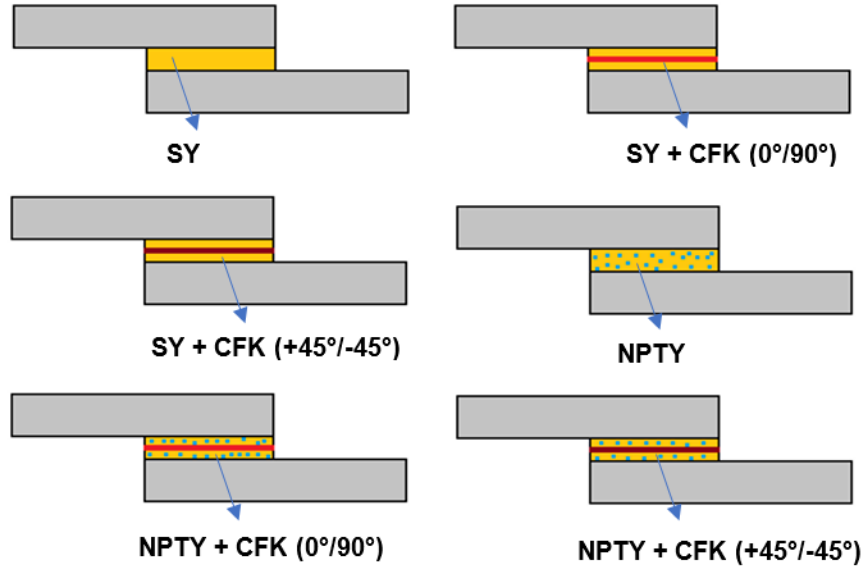
Ortalama partikül boyutu (nm)	20
Yüzey alanı (m^2/g)	140
Yoğunluk (m^3/kg)	3900
Saflık (%)	99

4.2 Yapıştırma Bağlantı Modelleri

Çalışmada, yapıştırıcı tabakasına göre, 6 farklı kombinasyonda yapıştırma bağlantıları üretilmiştir. Çizelge 4.3. 'de ve Şekil 4.3.'de çalışmada kullanılan tek tesirli yapıştırma bağlantı modelleri gösterilmiştir. Birinci modelde, yapıştırıcı tabakasında sadece saf yapıştırıcı kullanılmıştır. İkinci modelde, yapıştırıcı tabakasında saf yapıştırıcı içerisine, $0^\circ/90^\circ$ oryantasyon açısında cam fiber kumaş takviyesi yapılmıştır. Üçüncü modelde yapıştırıcı tabakasında saf yapıştırıcı içerisine, $+45^\circ/-45^\circ$ oryantasyon açısında cam fiber kumaş takviyesi yapılmıştır. Dördüncü modelde saf yapıştırıcı içerisine % 2 Al_2O_3 takviyesi yapılmıştır. Beşinci modelde, %2 Al_2O_3 takviyeli yapıştırıcı içerisine $0^\circ/90^\circ$ oryantasyon açısında cam fiber kumaş takviyesi yapılmıştır. Altıncı modelde, %2 Al_2O_3 takviyeli yapıştırıcı içerisine $+45^\circ/-45^\circ$ oryantasyon açısında cam fiber kumaş takviyesi yapılmıştır.

Çizelge 4.3. Yapıştırma bağlantı modelleri.

Model	Yapıştırıcı tabakası
1	Saf yapıştırıcı - (SY)
2	Saf yapıştırıcı + $0^\circ/90^\circ$ Cam fiber kumaş - (SY + CFK ($0^\circ/90^\circ$))
3	Saf yapıştırıcı + $45^\circ/-45^\circ$ Cam fiber kumaş - (SY + CFK ($+45^\circ/-45^\circ$))
4	%2 Nano- Al_2O_3 takviyeli yapıştırıcı - (NPTY)
5	%2 Nano- Al_2O_3 takviyeli yapıştırıcı + $0^\circ/90^\circ$ Cam fiber kumaş - (NPTY + CFK ($0^\circ/90^\circ$))
6	%2 Nano- Al_2O_3 takviyeli yapıştırıcı + $45^\circ/-45^\circ$ Cam fiber kumaş - (NPTY + CFK ($+45^\circ/-45^\circ$))



Şekil 4.3. Yapıştırma bağlantı modelleri.

4.3 Numunelerin Hazırlanması

4.3.1 Yüzey hazırlama işlemleri

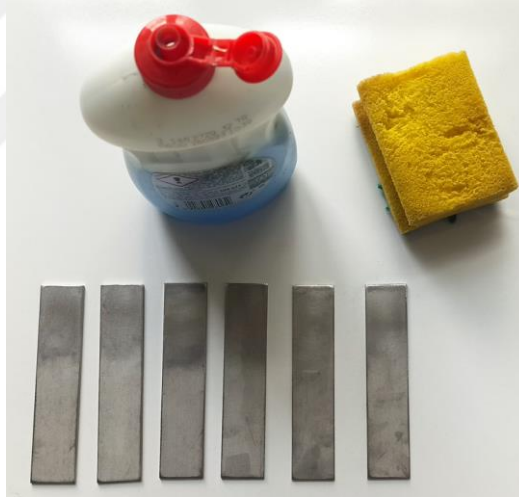
Tek tesirli yapıştırma bağlantılarının üretilmesi için ilk olarak yapıştırılacak olan AISI 304 plakaların kesim işmeninde kaynaklanan kenarlarındaki çapaklar eğe kullanılarak alınmıştır. Daha sonra, iyi bir yapışma işlemi için çok önemli olan yüzey hazırlama aşamasına geçilmiştir. Yapıştırıcı ile metal malzemenin arada herhangi bir kirlenici veya tabaka olmadan doğrudan temas halinde olması yapışma performansını doğrudan etkilemektedir. Bundan dolayı hazırlanan bütün test numunlerinde aynı yüzey hazırlama yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada uygulanan yüzey hazırlama işlemleri aşağıda sıralanmıştır.

- 1) AISI 304 çelik plakaların kenarlarını eğelerek keskinlikleri giderilmiştir.
- 2) AISI 304 çelik plakaların deterjanla yıkanması ve kurutulması yapılmıştır.
- 3) Yapıştırılacak yüzeyler, yüzeyi mekanik olarak temizlemek için P180 numara zımpara kağıdı ile zımparalanmıştır (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. Zımpara aşaması.

- 4) Zımparalama işlemi sonucu oluşan artıkları temizlemek için AISI 304 çelik plakalar tekrar deterjanla yıkanmış ve kurutulmuştur (Şekil 4.5.).



Şekil 4.5. Temizlik işlemi.

- 5) AISI 304 çelik plakalar 20 dk. asetonla bekletilmiştir, bu aşamaya çözücü ile yüzey temizliği de denilmektedir. Böylece yüzeydeki muhtemel yağ kalıntıları giderilmiştir (Şekil 4.6.).



Şekil 4.6. Asetonda bekletme işlemi.

- 6) AISI 304 çelik plakalar asetondan alındıktan hemen sonra, yüzeylerindeki asetonun buharlaştırılması için 60 °C'ye ayarlanmış fırında 30 dk. kurutulmuştur (Şekil 4.7). Fırın kullanılarak daha etkili bir kurutma işlemi yapılır ve yüzeydeki çözücü el değmeden giderilmiş olur. Bu şekilde yüzeyi bez ile kurutma işleminden kaynaklanan bezden, yapıştırılacak malzemeye toz ve kir gelme riski ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 4.7. Sterilizasyonlu kurutma fırını.

Çelik plakalar fırından alındıktan hemen sonra yapıştırma işlemine geçilmiştir.

4.3.2 Yapıştırıcıların hazırlanması

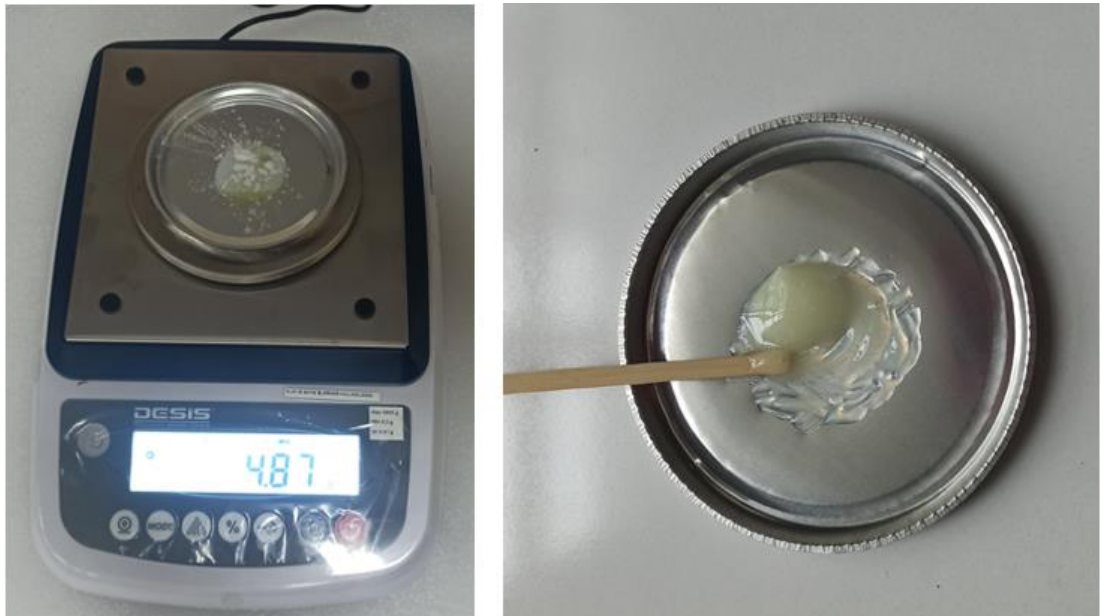
Şekilde 4.3'te gösterilen bağlantı modellerini üretmek amacıyla, ilk olarak yapıştırıcı karışımı hazırlanmaya başlamıştır. Çalışmada iki farklı yapıştırıcı karışımı hazırlanmıştır, model 1, model 2 ve model 3'ü üretmek için saf yapıştırıcı kullanılmıştır. Buna göre, bir karıştırma kabına, uygulama tabancası yardımıyla bir

miktar Loctite 9466 epoksi yapıştırıcı boşaltılıp tahta bir çubukla birkaç dakika karıştırılmıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Saf yapıştırıcı hazırlama aşaması.

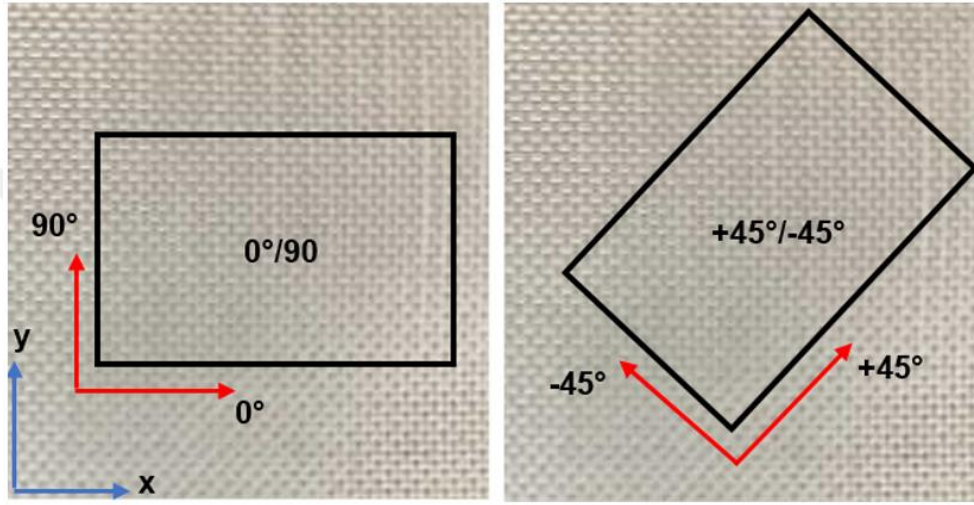
Model 4, model-5 ve model-6'yı üretmek amacıyla da %2 nano- Al_2O_3 takviyeli yapıştırıcı hazırlanmıştır. %2 Nano Al_2O_3 takviyeli yapıştırıcıyı üretmek için boş bir kaba Loctite 9466 yapıştırıcı boşaltılmış ve hassas terazi ile tartılmıştır. Daha sonra ölçülen yapıştırıcı miktarının %2'si kadar ağırlıkta nano- Al_2O_3 hassas terazi ile tartılarak yapıştırıcı içerisine eklenmiştir. Daha sonra, tahta çubuk yardımıyla 3-4 dk. karıştırma işlemi yapılarak nanopartikül takviyeli yapıştırıcı hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.9.).



Şekil 4.9. Hassas terazi ile nano- Al_2O_3 takviyeli yapıştırıcı karışımı hazırlaması.

4.3.3 Cam fiber kumaşların hazırlanması

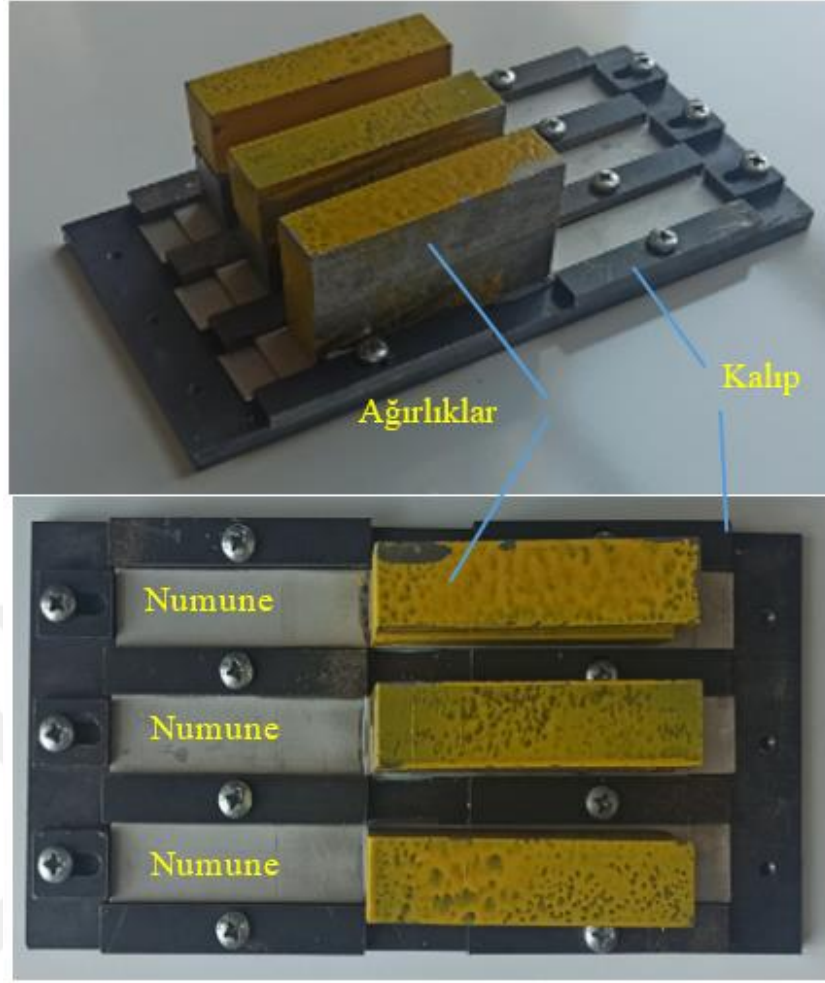
Model-2, model-3, model-5 ve model-6'nın üretilmesi için cam fiber kumaşların uygun boyutlarda ve oryantasyon açısında hazırlanması gerekmektedir. Tek katman halinde yapıştırıcı tabakasına yerleştirilecek kumaşlar tek tesirli yapıştırma bağlantıları bindirme bölgesi geometrisine uygun olarak 25x25 mm boyutlarında kesildi. Cam fiber kumaşlardan kesme işlemi yapılırken çalışmada kullanılan $0^\circ/90^\circ$ ve $+45^\circ/-45^\circ$ oryantasyon açılarına uygun olarak kesim yapıldı (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Cam fiber kumaş $0^\circ/90^\circ$ ve $+45^\circ/-45^\circ$ kesme işlemi.

4.3.4 Tek tesirli yapıştırma bağlantılarının üretimi

İlk olarak saf yapıştırıcılı (Model-1) ve nanopartikül takviyeli (Model-4) numuneler üretilmiştir. Buna göre hazırlanan yapıştırıcılar çelik plakaların 25 mm boyundaki bindirme bölgelerine ince bir tabaka halinde uygulanmıştır. Çelik plakaların kaymaması ve bağlantıların uygun geometride üretilebilmesi için destek parçaları ve kalıp kullanılmıştır. Çelik plakalar kalıba yerleştirildikten sonra yapıştırıcının tüm yüzeye düzgün olarak yayılabilmesi ve bindirme hattı boyunca eşit yapıştırıcı kalınlığı elde edebilmek için bindirme bölgesine ağırlık yerleştirilmiştir (Şekil 4.11). Yapıştırıcıların kürleşmesi için kalıplar oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir. 24 saat sonra kalıptan çıkartılan numuneler, uç kısımlarına destek parçaları yapıştırıldıktan sonra kapalı bir kaptaki oda sıcaklığında deneylerin yapılacağı zamana kadar bekletilmiştir (Şekil. 4.12).

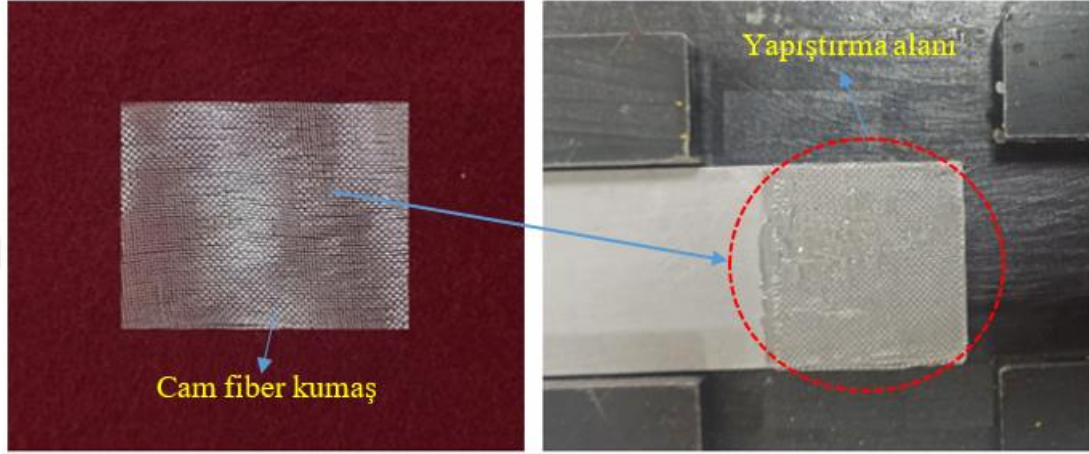


Şekil 4.11. Tek tesirli yapıştırma bağlantılarının üretimi.



Şekil 4.12. Tek tesirli yapıştırma bağlantı numuneleri.

Saf yapıştırıcılı ve nanopartikül takviyeli numunelerin üretiminden sonra cam fiber kumaş takviyeli bağlantıların üretimi yapılmıştır. Cam fiber kumaş takviyeli numunelerin (Model-2, Model-3, Model-5 ve Model-6) üretiminde saf yapıştırıcı ve nanopartikül takviyeli numunelerin üretiminde kullanılan yöntem kullanılmıştır. Sadece, uygun ölçülerde ve oryantasyon açılarında kesilen fiber kumaşlar yapıştırıcı bölgesine serilmiştir (Şekil 4.13.).

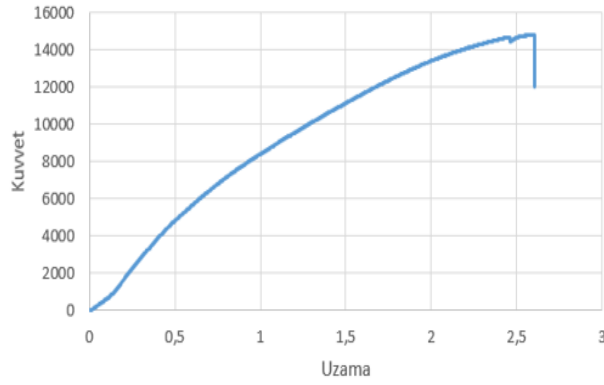


Şekil 4.13. Yapıştırıcı bölgesine cam fiber kumaş takviyesi.

Her numune tipinden 5 adet üretilmiştir, buna göre toplamda 30 adet tek tesirli yapıştırma bağlantı numunesi üretimi yapılmıştır.

4.4 Çekme Testi Cihazı ve Çekme Testleri

Çekme testleri, 50 kN yük hücreğine sahip Shimadzu marka test cihazı kullanılarak laboratuvar şartlarında yapılmıştır (Şekil 4.14.). Çekme testleri 1 mm/dak. çekme hızında uygulanmıştır. Çekme deneyleri sonucunda kuvvet-uzama grafikleri elde edilerek hasar yükleri ve maksimum uzama miktarları belirlenmiştir (Şekil 4.14.).



Şekil 4.14. Çekme deneylerinin uygulanması.

Shimadzu çekme test makinesinin teknik özellikleri;

- 1- Yük kapasitesi 50 kN
- 2- Yük doğruluğu: Görüntülenen değerin $\pm\%0,5$ 'i
- 3- Test hızı: 0,0005 ~ 1000 mm/dak
- 4- Çaprazkafa hızı doğruluğu: $\%0,1$

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

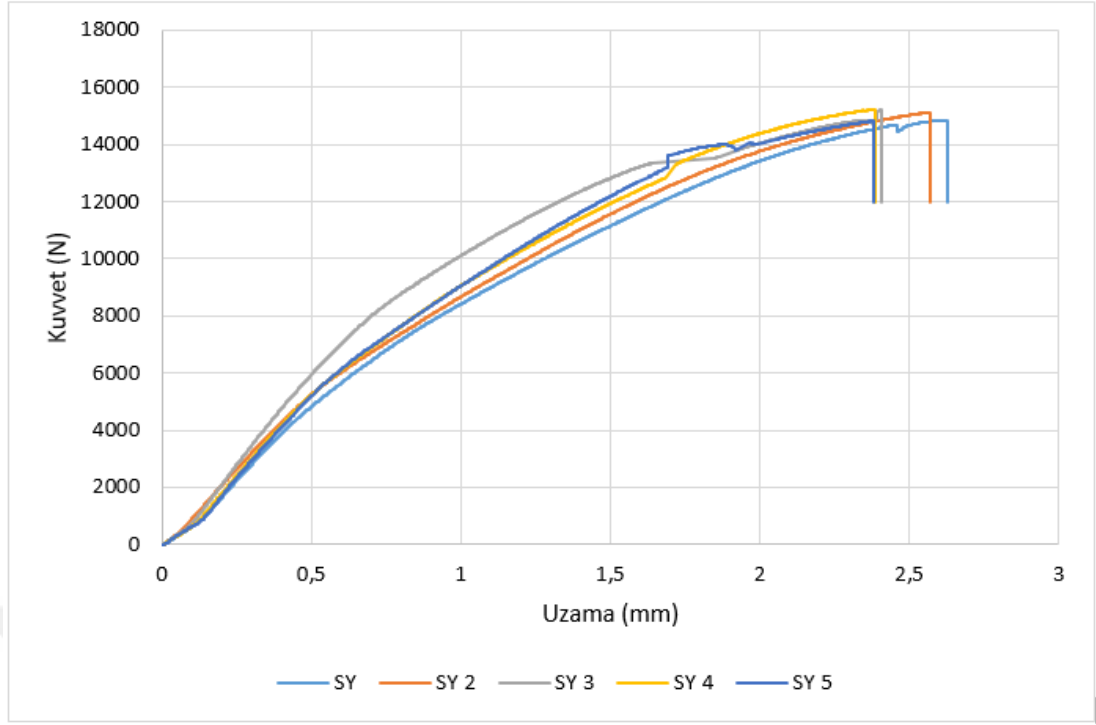
5.1 Çekme Testi Verileri ve Grafikler

Çekme deneyleri sonucunda elde edilen hasar yükleri, maksimum uzama ve standart sapmalar Çizelge 5.1.'de verilmiştir.

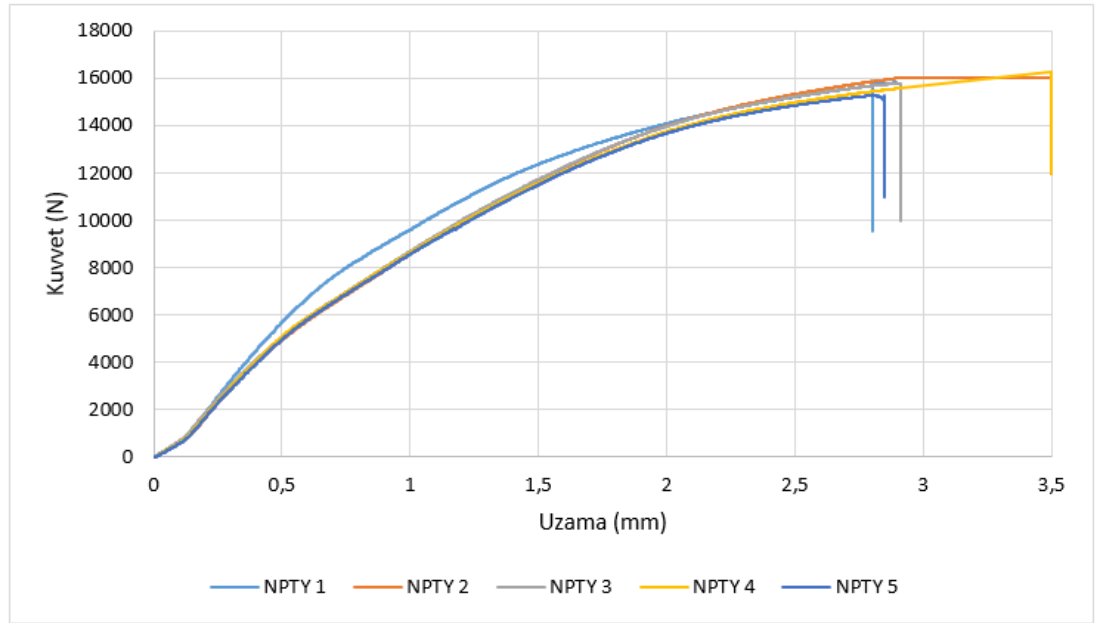
Çizelge 5.1. Çekme testi sonuçları.

Hasar Yüğü (N)							
Model	1	2	3	4	5	Ortalama	Standart Sapma
SY	14843,8	15110,9	13373,4	14837,5	15229,7	14679,1	749,4
NPTY	15812,5	16757,8	15850	16259,4	15262,5	15988,4	557,3
SY+CFK (0°/90°)	13990,6	13726,6	13843,8	14054,7	14837,5	14090,6	436,6
SY+CFK (45°/-45°)	15779,7	15078,1	15196,9	16267,2	15926,6	15649,7	501,7
NPTY+CFK (0°/90°)	15271,9	15337,5	16071,9	16243,8	15260,9	15637,2	480,1
NPTY+CFK (45°/-45°)	16001,6	14759,4	15315,6	15120,3	15301,6	15299,7	451,9
Uzama (mm)							
Model	1	2	3	4	5	Ortalama	Standart Sapma
SY	2,6	2,5	1,6	2,3	2,3	2,3	0,4
NPTY	2,8	3,5	2,9	3,5	2,8	3,1	0,4
SY+CFK (0°/90°)	1,8	1,6	1,8	1,9	2,4	1,9	0,3
SY+CFK (45°/-45°)	2,7	2,4	2,4	3,3	3,2	2,8	0,4
NPTY+CFK (0°/90°)	2,6	2,7	3,2	3,1	2,3	2,8	0,4
NPTY+CFK (45°/-45°)	3,1	2,1	2,6	2,4	2,6	2,6	0,4

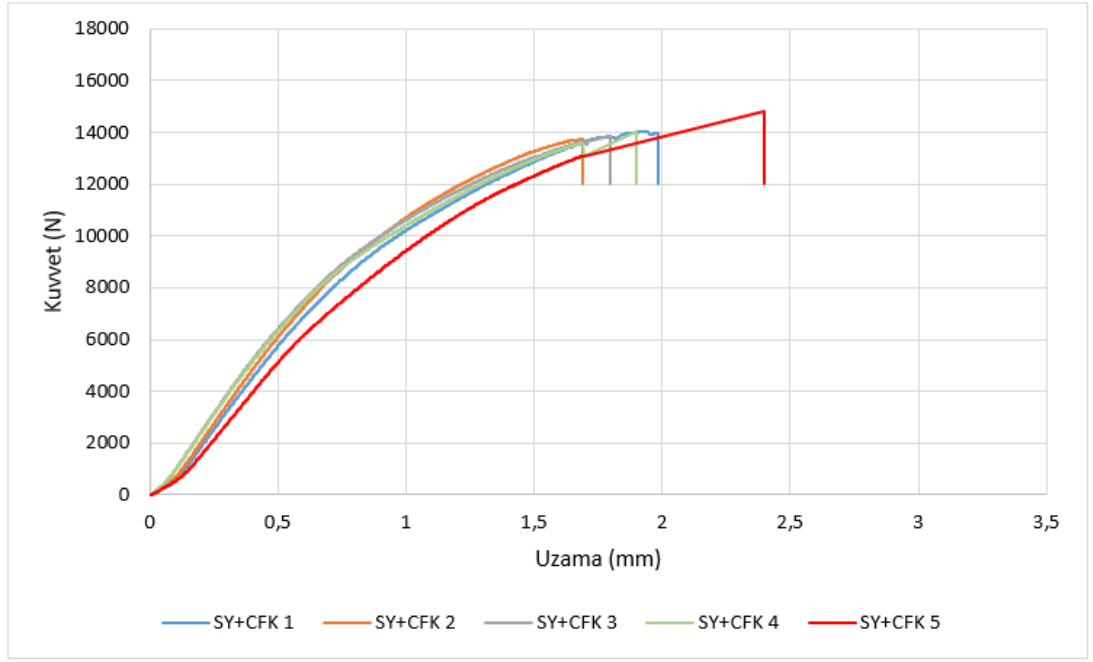
Aşağıda her bağlantı modeli için 5 tekrarlı olarak gerçekleştirilen çekme testleri sonuçları sırasıyla Şekil 5.1-Şekil 5.6 aralığında verilmiştir.



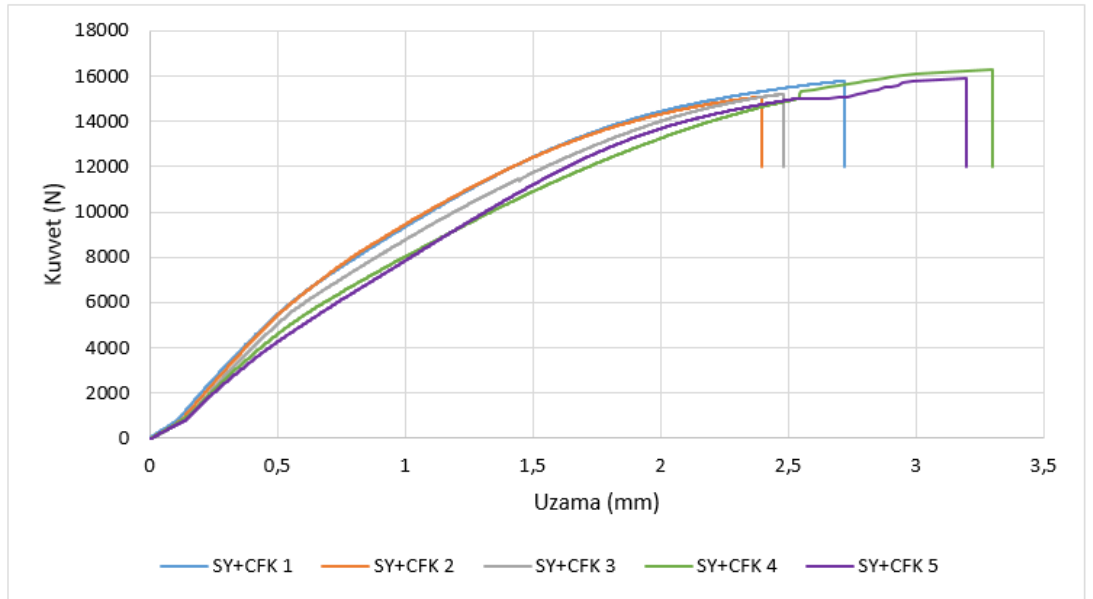
Şekil 5.1. SY çekme testi grafiği.



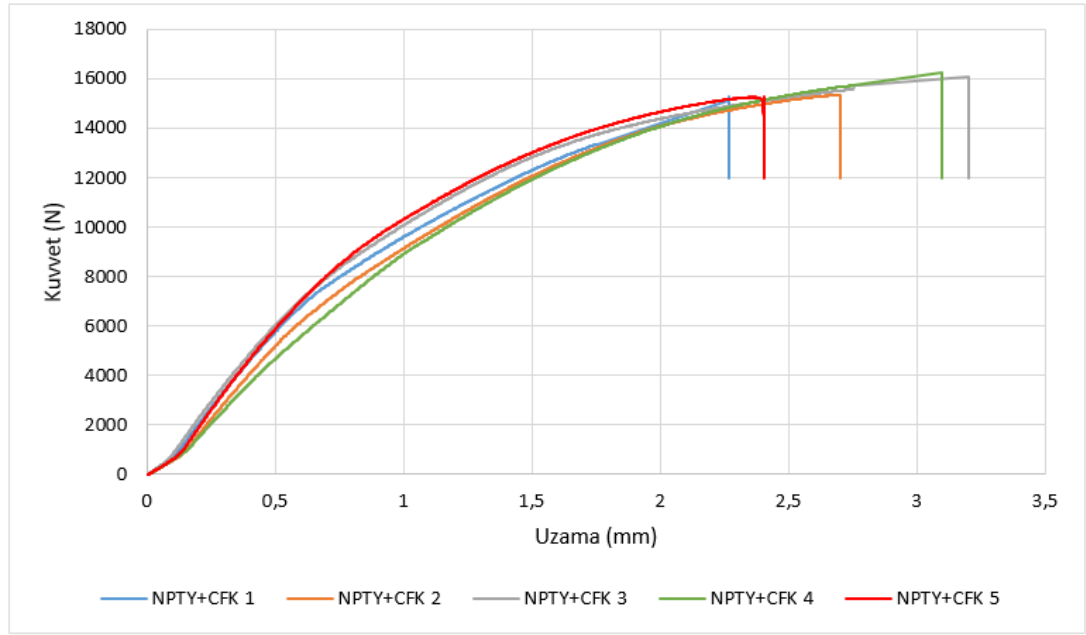
Şekil 5.2. NPTY çekme testi grafiği.



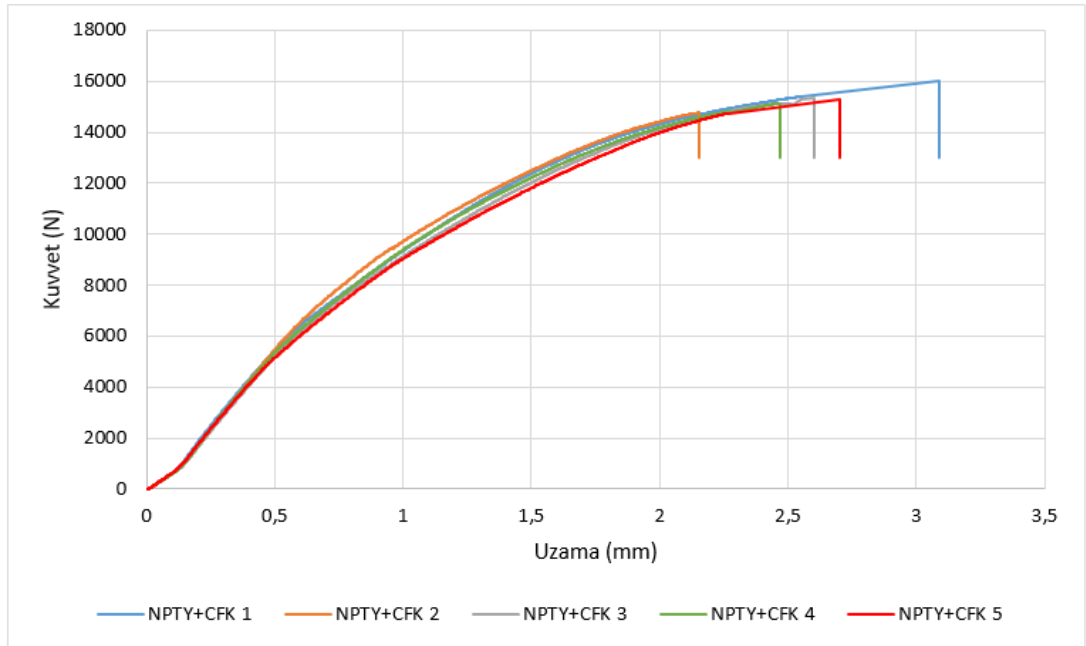
Şekil 5.3. SY+CFK (0°/90°) çekme testi grafiği.



Şekil 5.4. SY+CFK (+45°/-45°) çekme testi grafiği.

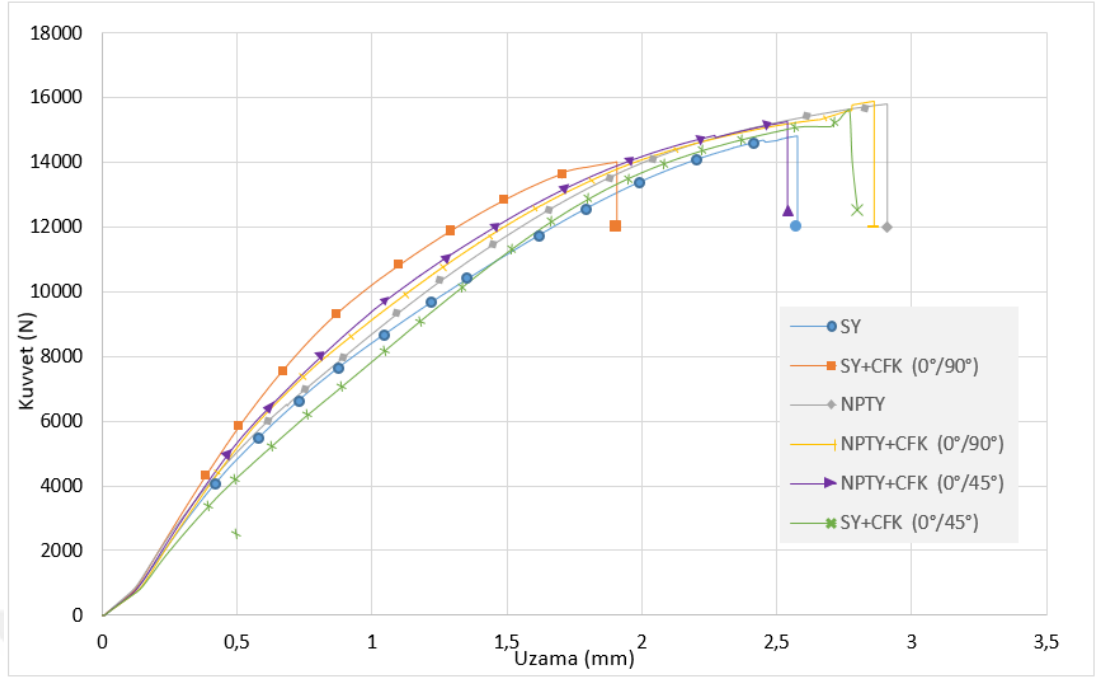


Şekil 5.5. NPTY+CFK ($0^{\circ}/90^{\circ}$) çekme testi grafiği.



Şekil 5.6. NPTY+CFK ($+45^{\circ}/-45^{\circ}$) çekme testi grafiği.

Şekil 5.7’de bağlantı modellerinin çekme-uzama grafikleri birlikte gösterilmiştir. Her model için ortalama değerlere yakın olan grafik kullanılmıştır.



Şekil 5.7. Bağlantı modellerinin her birinin ortalamaya en yakın numunelerinin karşılaştırılma grafiği.

Şekil 5.7’de gösterilen grafikte açık bir şekilde görüldüğü gibi, saf yapıştırıcılı (SY) yapıştırma bağlantılarına göre takviyeli yapıştırıcı kullanılan yapıştırma bağlantılarının çekme-uzama davranışlarında belirgin değişiklikler meydana gelmiştir.

Ortalama hasar yükü SY modele göre kıyaslandığında; NPTY modelinde % 8,9 artmıştır, SY + CFK (0°/90°) modelinde % 4 azalmıştır, SY + CFK (+45°/-45°) modelinde %6,6 artmıştır, NPTY + CFK (0°/90°) modelinde % 6,5 artmıştır, NPTY + CFK (+45°/-45°) modelinde % 4,2 artmıştır. Buna göre en yüksek hasar yükü, %2 nano- Al_2O_3 takviyeli yapıştırıcı kullanılan bağlantı modelinde elde edilmiştir.

Bağlantıların şekil değiştirme özellikleri incelendiğinde, SY modelinde ortalama maksimum uzama 2,3 mm olarak hesaplanırken, hasar yükünün SY modeline göre azaldığı, SY + CFK (0°/90°) modelinde ortalama maksimum uzama değeri 1,9 mm bulunmuştur. Maksimum hasar yükünün elde edildiği NPTY modelinde ise ortalama maksimum uzama değeri 3,1 mm bulunmuştur. Diğer bağlantı modellerinde Çizelge 5.1.’de görüldüğü gibi ortalama maksimum uzama değeri SY modeline göre daha yüksek çıkmıştır. Hasar yükleri ve maksimum uzama değerleri birlikte değerlendirildiğinde, genel olarak, SY modeline göre maksimum uzama miktarı daha yüksek olan bağlantı modellerinde hasar yükünün daha yüksek olduğu, maksimum

uzama miktarı daha düşük olan modelde ise hasar yükünün daha düşük olduğu görülmüştür.

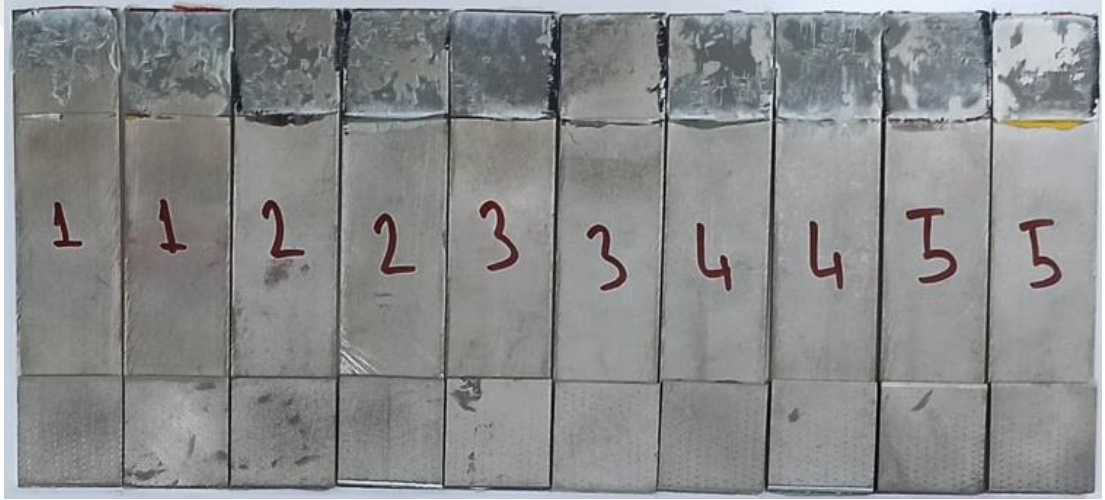
Çizelge 4.1’de gösterildiği gibi, tek tesirli yapıştırma bağlantılarının üretilmesinde kullanılan çelik AISI 304 çelik malzemenin kopma uzaması değeri %50’nin üzerinde ve Loctite 9466 epoksi yapıştırıcının kopma uzaması ise %3’tür. Dolayısıyla, yük altında, AISI 304 malzemenin sünek davranış sergilediği, Loctite 9466 yapıştırıcının ise gevrek karakterde olduğu açıktır. Yapılan çalışmada, çekme deneyleri sonucunda bağlantı modellerindeki maksimum uzama değerlerinin yaklaşık olarak % 2-3 olduğu düşünüldüğünde, bütün bağlantı modellerinde hasar beklendiği gibi yapıştırıcı tabakasında oluşmuştur (Şekil 5.8.-5.13.). Bu durumda, SY modeline göre kıyaslandığında, hasar yükünün daha yüksek çıktığı bağlantı modellerinde kullanılan takviye elemanlarının yapıştırıcı tabakasının dayanımını arttırması sonucu yapıştırma bağlantılarının şekil değiştirme miktarı artmıştır. Yapıştırıcı tabakasında, saf yapıştırıcı ve $0^{\circ}/90^{\circ}$ oryantasyonunda cam fiber kumaş kullanılan modelde (SY +CFK ($0^{\circ}/90^{\circ}$)) ise kullanılan takviye elemanı yapıştırma bölgesinin katılığını arttırmasına rağmen yapıştırıcı tabakası erken hasara uğramıştır ve yapıştırma bağlantısının şekil değiştirme miktarı SY modele göre azalmıştır.



Şekil 5.8. SY modeli çekme deneyleri sonucu oluşan hasar yüzeyleri.



Şekil 5.9. NPTY modeli çekme deneyleri sonucu oluşan hasar yüzeyleri.



Şekil 5.10. SY +CFK (0°/90°) modeli çekme deneyleri sonucu oluşan hasar yüzeyleri.



Şekil 5.11. SY +CFK (+45°/-45°) modeli çekme deneyleri sonucu oluşan hasar yüzeyleri.



Şekil 5.12. NPTY +CFK ($0^\circ/90^\circ$) modeli çekme deneyleri sonucu oluşan hasar yüzeyleri.



Şekil 5.13. NPTY +CFK ($+45^\circ/-45^\circ$) modeli çekme deneyleri sonucu oluşan hasar yüzeyleri.

Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar genel olarak literatürde bulunan çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür. Literatürde yapıştırıcı içerisine farklı tiplerde nanopartikül takviyesinin, takviye oranına bağlı olarak yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerini geliştirdiği çok sayıda çalışmada belirtilmiştir (Akpınar vd., 2017a,b; Bali, 2021; Gilbert vd., 2003; Khashaba vd., 2015; Nassar vd., 2015; Paygozar ve Görgülüarslan, 2023; Saraç vd., 2018). Yapıştırıcı içerisine takviye edilen nanopartiküllerin matriks yapı içerisinde dağılımı bağlantı dayanımını etkilemektedir. Yapıştırıcı içerisinde homojen bir nanopartikül dağılımı elde edilen durumlarda genellikle hasar yükü artmaktadır. Ancak, belirli bir takviye oranından sonra, partikül

topaklaşması meydana gelmesi bağlantı dayanımını düşürmektedir. Polimer matriks (yapıştırıcı) içinde homojen bir şekilde dağılmış olan nanopartiküller, nanopartikül ve matriks yapı arayüzeyindeki matriks yapı hareketini kısıtlar ve takviye elemanlarına gerilme iletimi artar. Bunun sonucunda bağlantı dayanımı artar (Ghabezi ve Farahani, 2016).

Yapıştırıcı içerisine fiber kumaş takviyesi yapılarak yapıştırma bağlantılarının mekanik performansının incelendiği çalışmalar ise oldukça sınırlı sayıdadır. Çalık ve Akpınar (2023), tarafından yapılan benzer bir çalışmada tek tesirli yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcı bölgesine $0^{\circ}/90^{\circ}$ oryantasyon açısında cam fiber kumaş takviyesi yapılmasının bağlantıların mekanik özelliklerine etkisi çekme testleriyle araştırılmıştır. $0^{\circ}/90^{\circ}$ oryantasyon açısında cam fiber kumaş takviyesinin bağlantının şekil değiştirme kabiliyetini düşürdüğü belirtilmiştir. Aynı çalışmada, bağlantının şekil değiştirme özelliği azalmasına rağmen hasar yükünün %17 oranında arttığı belirtilmiştir. Bu durumda kullanılan cam fiber kumaşların fiziksel özellikleri, yapıştırıcı özellikleri, yapıştırma öncesi uygulanan ön işlemlerin de fiber oryantasyonunun yanında hasar yükünü etkilediği düşünülmektedir. Thirunavukarasu ve Sikarwar (2024), kompozit tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, yapıştırma bölgesinde tek yönlü ve çift yönlü fiber kumaş kullanılmasının bağlantı dayanımına etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonunda yapıştırıcı tabakasında fiber kumaş takviyesinin bağlantıların yük taşıma kapasitesini geliştirdiği ve ani hasar oluşumunu geciktirdiği vurgulanmıştır.

Bu çalışmanın, literatürde bulunan benzer nitelikteki çalışmalardan temel olarak iki farkı bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, yapıştırıcı bölgesinde takviye elemanı olarak kullanılan cam fiber kumaşın iki farklı oryantasyonda ($0^{\circ}/90^{\circ}$ ve $+45^{\circ}/-45^{\circ}$) yapıştırıcı bölgesine takviye edilmesidir. İkinci fark ise, fiber kumaş takviyesinin sadece saf yapıştırıcı ile değil, nanopartikül takviyeli yapıştırıcı ile uygulanarak, fiber kumaş ve nanopartikül takviyesinin etkisini birlikte gözlemlemektir. Yapılan çalışma sonunda, bu belirtilen iki farklılığın etkileri açık bir şekilde gözlemlenmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapabilmek amacıyla sadece nanopartikül takviyeli yapıştırma bağlantıları da üretilmiştir.

Buna göre, saf yapıştırıcı içerisine $0^{\circ}/90^{\circ}$ oryantasyonunda cam fiber kumaş takviyesi yapıldığında saf yapıştırıcı kullanılan bağlantıya göre rijitlik artmasına rağmen

bağlantı dayanımı %4 civarında azalmıştır. Saf yapıştırıcı içerisine $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ -oryantasyonunda cam fiber kumaş takviyesi yapıldığında ise hem bağlantı rijitliği artmış hem de bağlantı dayanımı % 6,6 oranında artmıştır. Ayrıca bağlantı rijitliği artarken bağlantının şekil değiştirme kabiliyeti azalmamıştır. Böylece ani hasar oluşumlarına karşı yapıştırma bağlantısının enerji sönümleme özelliği gelişmiştir. Yapıştırıcı tabakası içerisinde bulunan cam fiber kumaşın, $0^{\circ}/90^{\circ}$ oryantasyonunda zorlandığı durumda bağlantıya uygulanan çekme yükü ile aynı doğrultuda olan fiberler yük taşımaktadır. Yapıştırıcı tabakası içerisinde bulunan cam fiber kumaşın, $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ oryantasyonunda zorlandığı durumda ise cam fiber kumaşın deformasyon özelliği örgü yapısından dolayı artmaktadır. Yük ise her iki doğrultudaki ($+45^{\circ}/-45^{\circ}$) fiberlere etki etmektedir. Sonuç olarak, yükün iki doğrultudaki fiberler tarafından taşınması ve kumaş yapısının deformasyon özelliğinden dolayı bağlantıların hasar yükü ve şekil değiştirme özelliği gelişmiştir.

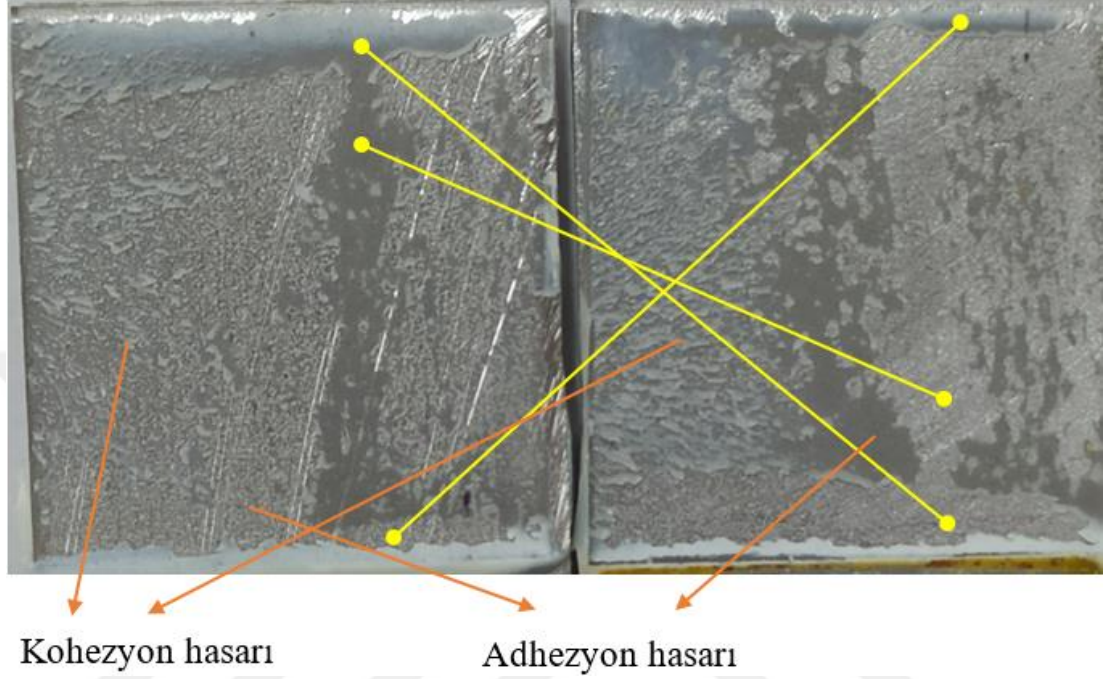
Saf yapıştırıcı içerisine $0^{\circ}/90^{\circ}$ oryantasyonunda cam fiber kumaş takviye edildiğinde hasar yükü %4 azalmasına rağmen, aynı oryantasyonda cam fiber kumaşın nano- Al_2O_3 takviyeli yapıştırıcıyla uygulandığı durumda hasar yükü % 6,5 oranında artmıştır. Bu durumda, nanopartikül takviyesinin bağlantı dayanımına etkisi açık bir şekilde görülmüştür.

5.2 Kırılma yüzeylerinin incelenmesi

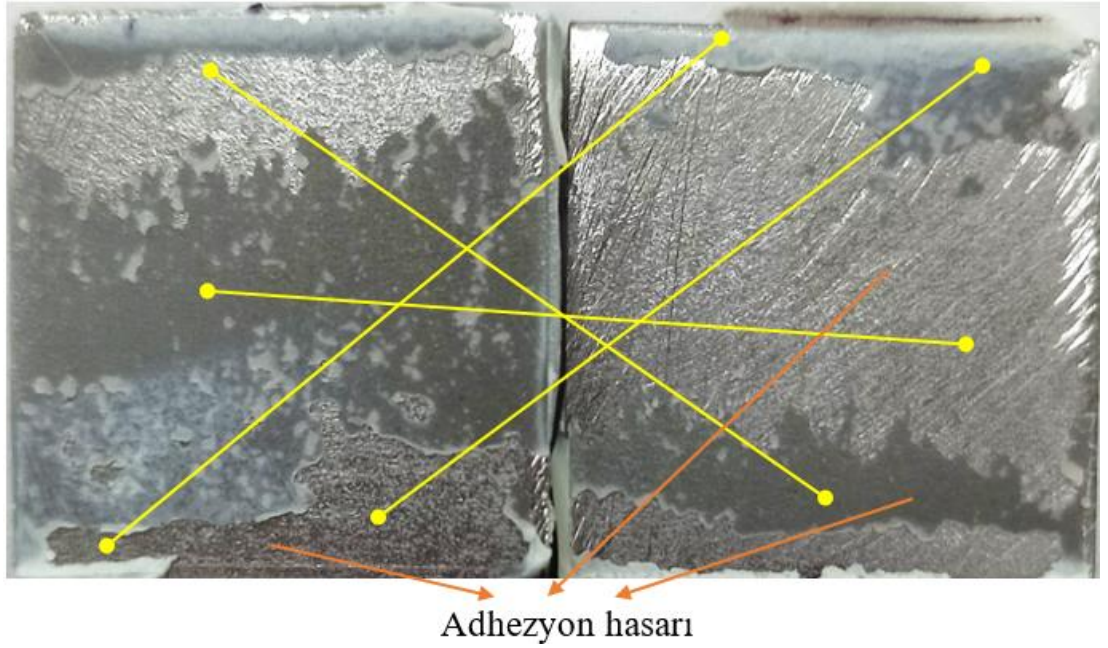
Şekil 5.14 –Şekil 5.19 aralığında yapıştırma bağlantılarının kırılma yüzeyleri gösterilmiştir. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde adhezyon hasarı, kohezyon hasarı ve fiber/yapıştırıcı hasarlarıyla karşılaşmıştır. Adhezyon hasarı yapıştırıcı tabaka ile metal yüzey arasındaki ayrılma olarak tanımlanmaktadır. Kohezyon hasarı yapıştırıcının kendi içerisinde oluşan hasardır. Fiber/yapıştırıcı hasarı ise, cam fiber kumaş takviyeli bağlantılarda yapıştırıcı tabakası ile cam fiber kumaş arasında oluşan hasar olarak tanımlanmıştır.

Şekil 5.14.'te gösterilen SY modelinde, karışık hasar tipi (Adhezyon ve kohezyon hasarı) görülmektedir. Şekil 5.15.'te gösterilen NPTY modelinde, adhezyon hasarı oluşmuştur. Şekil 5.16.'da gösterilen SY +CFK ($0^{\circ}/90^{\circ}$) modelinde, adhezyon hasarının yanında, cam fiber/yapıştırıcı ara bölgesi ayrılmaları dikkat çekmektedir. Şekil 5.17.'de gösterilen SY + CFK ($+45^{\circ}/-45^{\circ}$) modelinde adhezyon ve cam fiber/yapıştırıcı

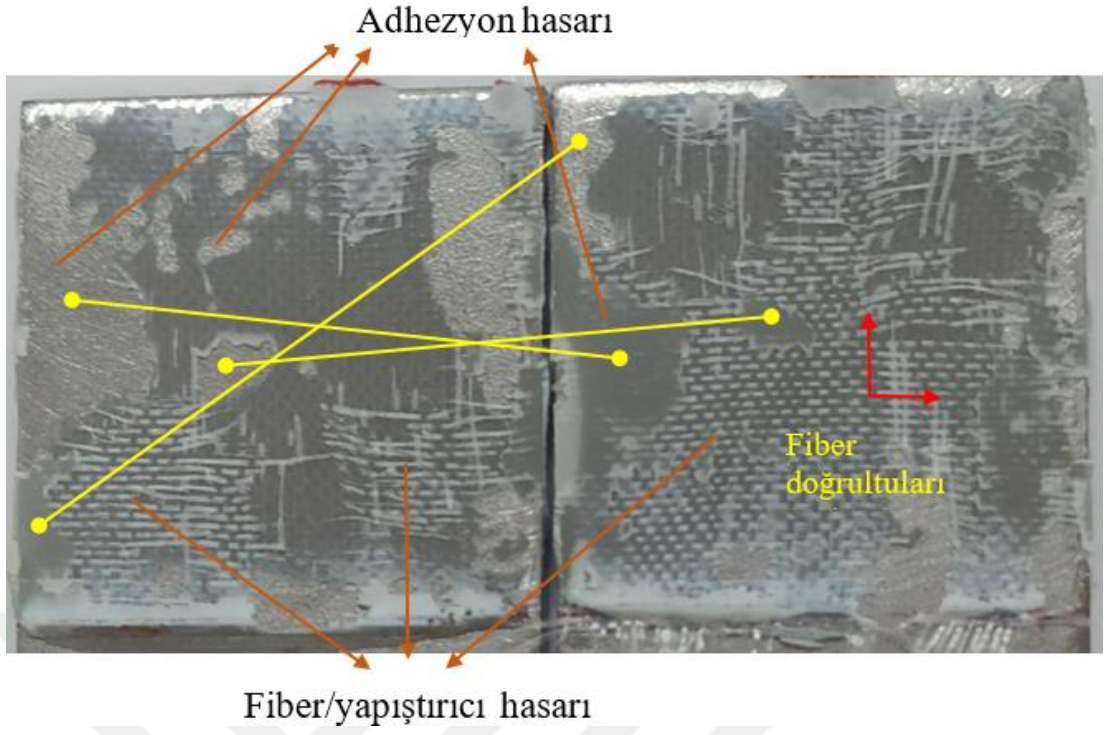
hasarları oluşmuştur. Şekil 5.18.'de gösterilen, NPTY +CFK ($0^{\circ}/90^{\circ}$) modelinde adhezyon ve fiber/yapıştırıcı hasarları görülmektedir. Şekil 5.19.'da gösterilen NPTY +CFK ($+45^{\circ}/-45^{\circ}$) modelinde ise diğer fiber kumaş takviyeli modellere benzer şekilde adhezyon ve fiber/yapıştırıcı hasarları görülmüştür.



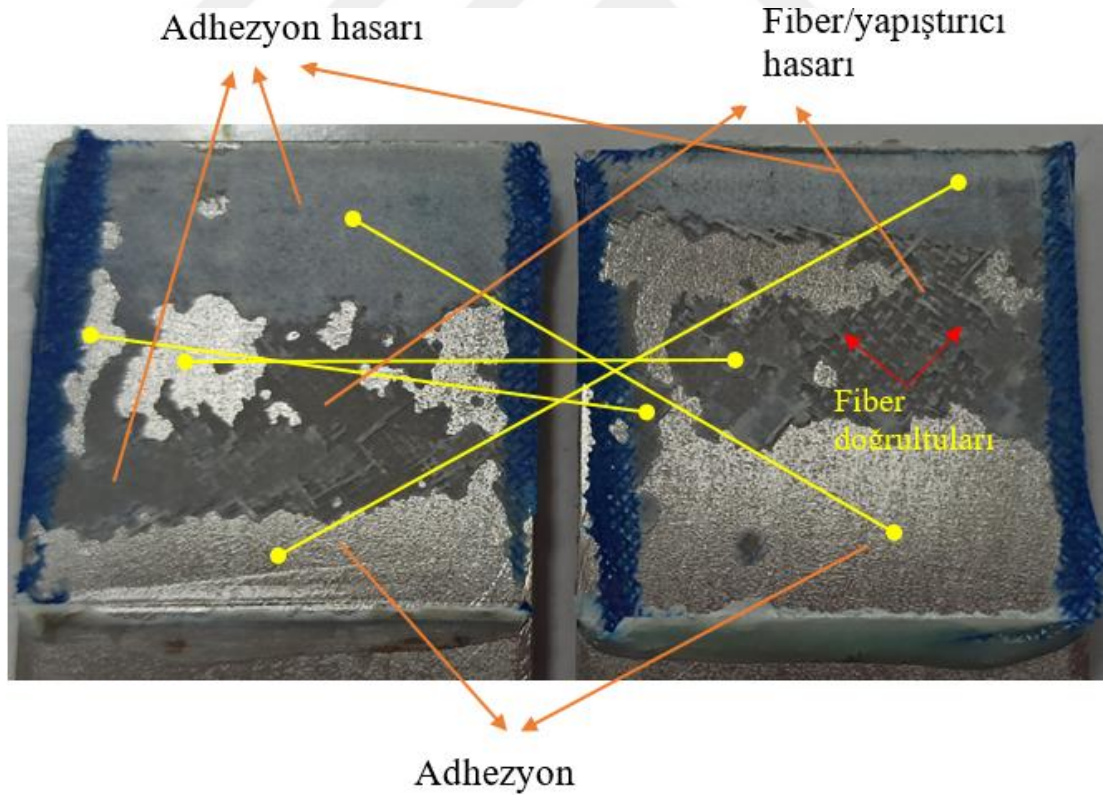
Şekil 5.14. SY modeli kırılma yüzeyi.



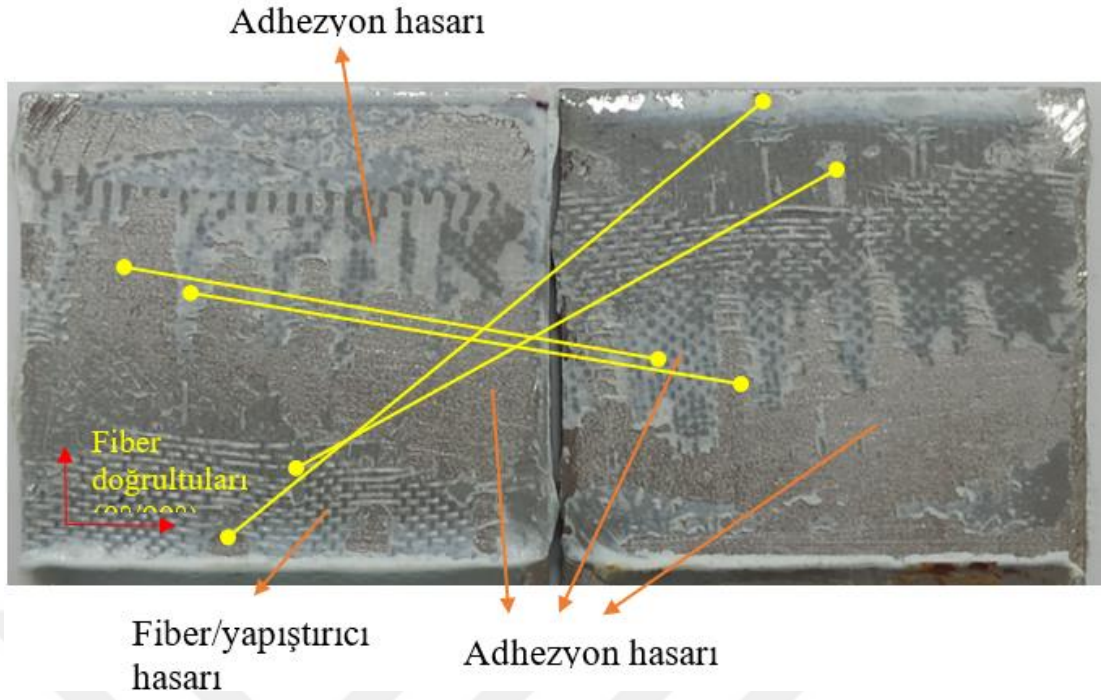
Şekil 5.15. NPTY modeli kırılma yüzeyi.



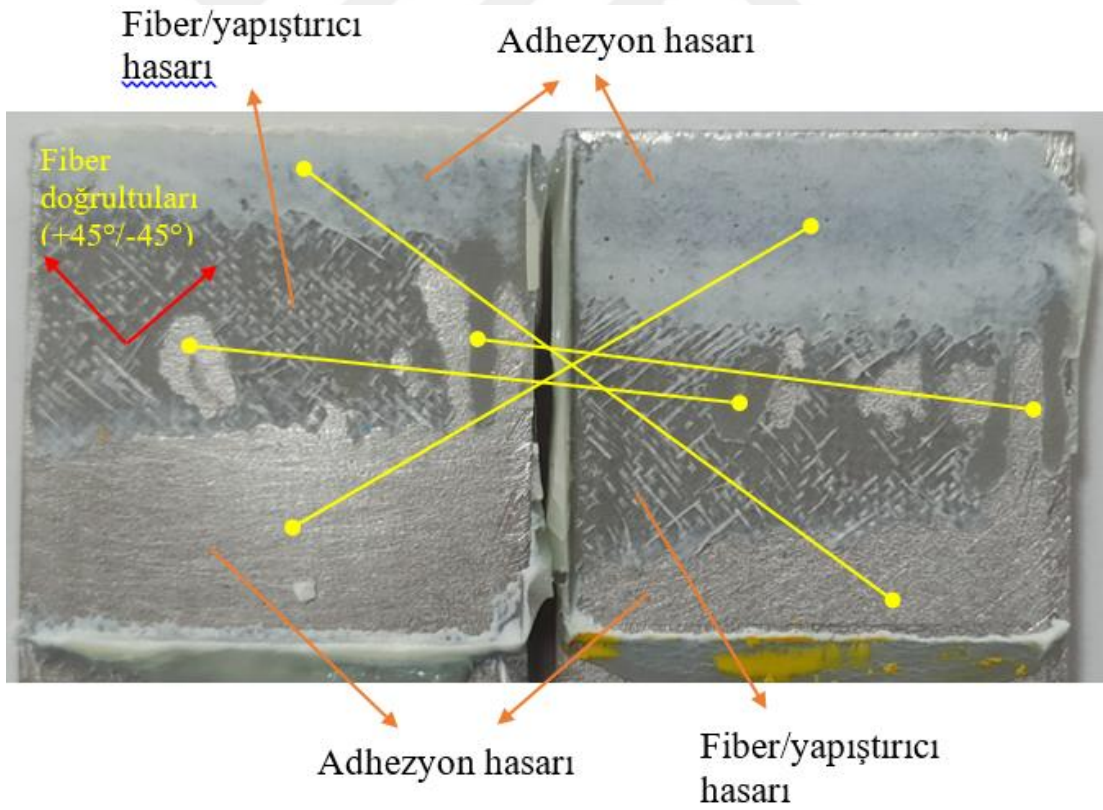
Şekil 5.16. SY +CFK (0°/90°) modeli kırılma yüzeyleri.



Şekil 5.17. SY +CFK (+45°/-45°) modeli kırılma yüzeyleri.



Şekil 5.18. NPTY +CFK (0°/90°) modeli kırılma yüzeyleri.



Şekil 5.19. NPTY +CFK (+45°/-45°) modeli kırılma yüzeyleri.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, epoksi yapıştırıcıyı nano- Al_2O_3 ve cam fiber kumaş ile takviyelendirmenin dayanıma etkisi çekme deneyleri ile araştırılmıştır. Deneysel çalışmada, yapıştırıcı tabakasına göre 6 farklı şekilde modellenmiş yapıştırma bağlantıları üretilmiştir. 1. modelde, sadece saf yapıştırıcı kullanılmıştır, 2. modelde, %2 nano- Al_2O_3 takviyeli yapıştırıcı kullanılmıştır, 3. modelde saf yapıştırıcı $0^\circ/90^\circ$ oryantasyonunda cam fiber kumaş ile takviyelendirilmiştir, 4. modelde, saf yapıştırıcı, $+45^\circ/-45^\circ$ oryantasyonunda cam fiber kumaşla takviyelendirilmiştir, 5. modelde, %2 Al_2O_3 katkılı yapıştırıcı, $0^\circ/90^\circ$ oryantasyonunda cam fiber kumaş ile takviyelendirilmiştir, 6. modelde, %2 nano- Al_2O_3 katkılı yapıştırıcı, $+45^\circ/-45^\circ$ oryantasyonunda cam fiber kumaş ile takviyelendirilmiştir. Yapılan çalışmaya göre elde edilen genel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Maksimum hasar yükü, yapıştırıcı tabakasında, %2 nano- Al_2O_3 katkılı yapıştırıcı kullanılan bağlantı modelinde (NPTY) elde edilmiştir. Buna göre, %2 nano- Al_2O_3 katkılı bağlantıda ortalama hasar yükü, saf yapıştırıcılı model göre yaklaşık % 9 oranında artmıştır.
- Saf yapıştırıcı içerisine $0^\circ/90^\circ$ oryantasyon açısında cam fiber kumaş takviyesi yapılan modelde (SY + CFK ($0^\circ/90^\circ$)) ortalama hasar yükü saf yapıştırıcı kullanılan modele göre %4 azalmıştır. Ancak bağlantı rijitliği artmıştır.
- Saf yapıştırıcı içerisine $+45^\circ/-45^\circ$ oryantasyon açısında cam fiber kumaş takviyesi yapılan modelde (SY + CFK ($+45^\circ/-45^\circ$)) ortalama hasar yükü saf yapıştırıcı kullanılan modele göre % 6,6 artmıştır.
- %2 nano- Al_2O_3 takviyeli yapıştırıcı içerisine $0^\circ/90^\circ$ oryantasyon açısında cam fiber kumaş takviyesi yapılan modelde (NPTY + CFK ($0^\circ/90^\circ$)) ortalama hasar saf yapıştırıcı kullanılan modele göre % 6,5 artmıştır.
- %2 nano- Al_2O_3 takviyeli yapıştırıcı içerisine $+45^\circ/-45^\circ$ oryantasyon açısında cam fiber kumaş takviyesi yapılan modelde (NPTY + CFK ($+45^\circ/-45^\circ$)) ortalama hasar yükü % 4,2 artmıştır.
- Yapıştırıcı tabakasında takviye elemanı olarak kullanılan cam fiber kumaşın oryantasyon açısı bağlantının mekanik davranışını etkilemiştir. Saf yapıştırıcı içerisine takviye edilene cam fiber kumaşın oryantasyon açısı çekme kuvveti

yönüne göre $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ olacak şekilde yerleştirildiğinde, $0^{\circ}/90^{\circ}$ oryantasyonuna göre bağlantı dayanımı ve şekil değiştirme özelliği artmıştır.

Bu çalışmada da gösterildiği gibi, yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcı içerisinde nanopartikül takviyesi bağlantı mukavemetini arttırmaktadır. Ancak, nanopartiküllerin yapıştırıcı içerisinde homojen olarak dağılmasının sağlanması ve uygun partikül oranının belirlenmesi uygulamada bazı zorluklar içermektedir. Bu çalışmada ve literatürde bulunan bazı çalışmalarda önerildiği gibi yapıştırıcı içerisine fiber kumaş takviyesiyle yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin geliştirilmesi uygulanabilirlik açısından daha pratik bir yöntem olarak düşünülmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlardan da görüldüğü gibi yapıştırıcı tabakasında fiber kumaş kullanılmasının bağlantı dayanımını artırma potansiyeli bulunmaktadır. İleride yapılacak çalışmalarda, farklı tip fiber kumaşların, farklı tip yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme kombinasyonlarında bağlantı performansına etkileri incelenebilir. Ayrıca, Ansys, Digimat gibi programlarla simulasyon çalışmaları yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Adin, M. Ş., Ergün, K. R. ve Adin, H., 2018. Partikül takviyeli yapıştırıcılarla üretilmiş jute kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi, 1st International Engineering and Technology Symposium, Batman, Batman Üniversitesi, Beşiri Organize Sanayi Bölgesi Meslek Yüksekokulu, Tekstil, Giyim, Ayakkabı ve Deri Bölümü, Bildiri Metinleri Koleksiyonu, 235-238.
- Akpınar, S., 2016. Alüminyum oksit ve titanyum dioksit partikül takviyeli yapıştırıcılarla birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5,2, 244-252.
- Akpınar S. ve Akpınar İ., 2023. Influence of carbon and glass fiber reinforced composite adhesive on the strength of adhesively bonded joints, Materials Testing, 65,5, 802-814.
- Akpınar I. A., Gültekin K., Akpınar S., Akbulut H. ve Özel A., 2017a. Experimental analysis on the single-lap joints bonded by a nanocomposite adhesives which obtained by adding nanostructures, Composites Part B: Engineering, 110, 420-428.
- Akpınar I. A., Gültekin K., Akpınar S., Akbulut H. ve Özel A., 2017b. Research on strength of nanocomposite adhesively bonded composite joint, Composites Part B: Engineering, 126, 143–152.
- Anonim, 2014. Orgalok Marine Ürün Bilgi Formu 1/11. Organik Kimya San. Tic. A.Ş.
- Astefanei, A., Núñez, O. ve Galceran, M. T., 2015. Characterisation and determination of fullerenes: a critical review, Analytica chimica acta, 882, 1-21
- Aydın, M. D., 2003. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik incelenmesi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Aydın, S., 2019. Karbon nanopartiküllerin epoksi yapıştırıcılarda etkilerinin incelenmesi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34,3, 143-154.
- Bali, G., 2021. Grafen nanopartikül takviyeli yapısal yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek bindirmeli bağlantıların yorulma yüklemesi sonrası çekme davranışının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.
- Becker, H., 2022. Pigment nomenclature in the ancient Near East, Greece, and Rome, Archaeological and Anthropological Sciences, 14,1, 1-25.
- Campbell, F. C., 2003. Manufacturing processes for advanced composites, First Edition, Elsevier Science, New York, USA.

- Çalık, A., 2008, Yapıştırıcılar ve köşeleri yuvarlatılmış basamaklı bindirme yapıştırıcı bağlantılarda gerilme analizi, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Çalık, A. ve Akpınar, S., 2023 .The effect of fiber length and structure on joint strength in bonded joints with fiber-reinforced composite adhesive, International Journal of Adhesion and Adhesives, 124, 103365.
- Çınar, K. T. ve Ekrem, M. 2021. Nanoparçacık takviyeli epoksi nanokompozitlerin eğilme davranışları, European Journal Of Science and Technology, 28, 1415-1418.
- Ebnesajjad S., 2014. Handbook of adhesives and surface preparation: Technology, applications and manufacturing, MA: Elsevier, Burlington, ABD.
- Ekrem, M., 2015. Karbon nanotüp ve polivinil alkol, nanoelyafla güçlendirilmiş epoksi yapıştırıcıların alüminyum bağlantılar üzerindeki kırılma davranışları. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Ghabezi, P. ve Farahani, M., 2016. Composite adhesive-bonded joint reinforcement by incorporation of nano-alumina particles, Journal of Computational Applied Mechanics, 231-239.
- Gilbert, E. N., Hayes, B. S. ve Seferis, J. C., 2003. Nano-Alumina modified epoxy based film adhesives, Polymer Engineering and Science, 43, 1096-1104.
- Gültekin K., Akpınar S., Gürses A., Eroglu Z., Cam S. ve Akbulut H., 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: Engineering, Volumes 98, 362-369.
- Kamer, M. S. ve Temiz, Ş., 2024. 3B yazıcıda abs ve pla malzeme ile üretilmiş levhalarla oluşturulan tek tesirli yapıştırma bağlantılarının araştırılması, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27,2, 579-588.
- Kanar, B., 2018. Nanoyapı katkılı yapıştırıcıların ortam sıcaklığı ve termal çevrim altında kırılma davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Khashaba U. A., Aljinaidi A. A. ve Hamed M. A., 2015. Development of CFRE composite scarf adhesive joints with SiC and Al₂O₃ nanoparticle, Composite Structures, 128, 415–427.
- Koçar, O., Anaç, N. ve Hazer, B. 2023. Yapıştırma bağlantılarında dolgu malzemelerinin bağlantı mukavemetine etkisi, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, vol. 7, no. 2, s. 220–232, Aug., doi: 10.46519/ij3dptdi.1275235

- Kumar ve P. C. Pandey, 2010. Behaviour of bi-adhesive joints, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24, 7, 1251–1281.
- Nassar, S., Wu, Z. Moustafa, K. ve Tzelepis, D., 2015. Effect of adhesive nanoparticle enrichment on static load transfer capacity and failure mode of bonded steel–magnesium single lap joints, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 127, 5, 051024.
- Oğuzhan, M., 2021. Mikropartikül takviyeli yapıştırıcıların dinamik davranışlarının deneysel olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Parvatareddy H., 1997. Durability of polyimide adhesives and their bonded joints for high temperature applications, Doktora Tezi, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, ABD.
- Paygozar, B. ve Görgülüarslan, R. M., 2023. On the fracture of nano-silica/epoxy bonded single-lap steel joints, *Recent Adv Sci Eng*, 3,1, 1-7.
- Petrie E. M., 1975. Plastics and adhesives as adhesives, pp.12-82, in: Comyn, J. (Editor), *Handbook of Plastics and Elastomers*, McGraw-Hill, New York, ABD.
- Pizzi, A. ve Kumar, R. N., 2019. Adhesives for wood and lignocellulosic materials. Beverly, MA: John Wiley ve Sons, 31–59.
- Razavi, S. M. J., Ayatollahi, M. R., Nematı, 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
- Safar, F., Ramezani, F., Delzendehrooy, F., Ayatollahi, M. R. ve Da Silva, L. F. M., 2022. A review on bi-adhesive joints: Benefits and challenges, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 114, 103098.
- Saraç, İ., 2018. Tek tesirli yapıştırma bağlantılarında epoksi yapıştırıcı içerisinde nanopartikül kullanılmasının bağlantının statik ve yorulma mukavemetine etkisinin araştırılması, Doktora Tezi, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.
- Saraç, İ., 2020. Çekme yükü uygulanmış boru yapıştırma bağlantılarında bindirme uç geometrisinin bağlantı dayanımına etkisinin araştırılması, *Konya Journal of Engineering Sciences*, 8,4, 733–744.
- Saraç, İ., 2021. Boru yapıştırma bağlantılarında farklı tasarım parametrelerinin yapıştırıcı tabakasında gerilme dağılımına etkisinin sayısal olarak araştırılması, *UUJFE*, 26, 1.
- Saraç, İ., Adin, H. ve Temiz, Ş., 2018. Experimental determination of the static and fatigue strength of the adhesive joints bonded by epoxy adhesive including different particles, *Composites Part B: Engineering*, 155,1, 92–103

- Solmaz, M.Y., 2008, Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mekanik analiz ve tasarımları, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Temiz, S., 2006. Application of bi-adhesive in double-strap joints subjected to bending moment. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 20, 1547-1560
- Thirunavukarasu, A. ve Sikarwar, R. S., 2024. Enhancing the strength of adhesively bonded single-lap composite joints using fiber fabrics, *Materials Letters*, 357, 135664.
- Turan, K. ve Barut, S., 2021. Fiber takviyeli yapıştırıcıların kullanıldığı tek tesirli yapışma bağlantılarında hasar analizi, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 12,2, 257-262.
- TS EN ISO 10365, 2001. Yapıştırıcılar-Başlıca kusurlarının gösterilmesi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Zhai, L. L., Ling, G. P. ve Wang, Y. W., 2008. Effect of Nano- Al_2O_3 on adhesion strength of epoxy adhesive and steel, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28, 23-28.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Mehmet Ali ÇAVUŞOĞLU

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Aksaray Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
2015 - 2020

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı,

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Obial Çelik Silo Sistemleri / Yaz Stajı
2. Ake Asansör / Yaz Stajı
3. Dizayn Asansör / Makine Mühendisi
4. Fatih Doğalgaz / Yetkili Mühendis

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. Çavuşoğlu, M. A., Saraç İ., 2024. Yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcı içerisine Nano- Al_2O_3 ve cam fiber kumaş takviyesinin dayanıma etkisinin araştırılması, 12. Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi, İstanbul, Bildiri Kitabı, 22, 137-144.