



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**Nano Parçacık Katkılı Epoksi Yapıştırıcı ile
Birleştirilmiş T Bağlantılı Kompozit Levhalarda
Enine Darbe Hasarının İncelenmesi**

Zeki TÜRKMEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nano Parçacık Katkılı Epoksi Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş T Bağlantılı Kompozit Levhalarda Enine Darbe Hasarının İncelenmesi

Zeki TÜRKMEN

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Necati ATABERK

2022, 52 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU

Prof. Dr. Necati ATABERK

Doç. Dr. Mürsel EKREM

Kompozit malzemeler sahip oldukları üstün mühendislik özellikleri sebebiyle havacılık ve uzay sanayisi gibi önemli kullanım alanlarına sahiptirler. Kompozit malzemeler yüksek mekanik dayanım, sertlik, hafiflik, düşük termal genleşme ve yüksek sönümlenme gibi birçok özellikleri ile mühendislik uygulamalarında kullanılan metallere üstünlük sağlamaktadır.

Bu çalışmada farklı kalınlıklardaki destek elemanlarının daha önce yapılmış çalışmalar incelenerek belirlenmiş oranlarda nano parçacık katkı yapıştırıcılar ile T birleştirmelerinin darbe dayanımları teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Kullanılan kompozit levhanın matris malzemesi epoksi reçine olup takviye malzemesi ise karbonfiber kumaştır. Çalışmalarda 6, 8, 10 mm kalınlığında levhalar kullanılmıştır. Ayrıca plakaları birleştirmek için saf epoksi, ağırlıkça %0.3 grafen, %0.3 karbon nanotüp (CNT) katkı epoksi ve ağırlıkça %0.15 grafen ile %0.15 karbon nanotüp katkı epoksi (hibrit) olmak üzere dört farklı yapıştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan yapıştırıcıların çekme deneyi yapılarak kopma gerilmeleri ve % birim şekil değiştirmeleri elde edilip yapıştırılan T bağlantılı levhaların darbe deneyi sonucunda kuvvet-zaman grafikleri elde edilmiştir.

Çekme deneyi sonuçlarına göre saf epoksi yapıştırıcı için kopma gerilmesi 41 MPa, ağırlıkça %0,3 grafen katkı yapıştırıcı kopma gerilmesi 56 MPa, ağırlıkça %0,3 CNT katkı yapıştırıcı kopma gerilmesi 50 MPa ve ağırlıkça %0,15 grafen ile %0,15 CNT katkı yapıştırıcının kopma gerilmesi 58 MPa olarak bulunmuştur. Aynı şekilde kopmadaki en küçük birim şekil değiştirme %3 mm/mm saf epoksi yapıştırıcı için görülürken ağırlıkça %0,3 grafen katkı yapıştırıcı ve ağırlıkça %0,3 CNT katkı yapıştırıcı için kopmadaki birim şekil değiştirme %4,3 mm/mm olmuştur. Kopmadaki en büyük birim şekil değiştirme değeri %4,5 mm/mm ile ağırlıkça %0,15 grafen ile %0,15 karbon nanotüp nano parçacık katkı yapıştırıcı da görülmüştür. Buna göre hibrit nano kompozit malzeme saf epoksi malzeme ile karşılaştırıldığında çekme dayanımında %41 en büyük birim şekil değiştirmede ise %50 artış elde edilmiştir. Bu çalışmadan beklenen bir diğer önemli sonuç ise yapıştırıcıların tokluk değerleridir. Tokluk malzeme kırılınca kadar harcadığı enerjiyi ifade eder ve gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alana eşittir. Çekme deneyi sonucunda elde edilen grafiklere göre yapılan hesaplamalarda en büyük tokluk değeri $139,43 \times 10^4 \text{ J/m}^3$ olarak hibrit yapıştırıcıda görülmüştür.

Darbe deneyi sonucunda yapıştırıcı ile birleştirilmiş T bağlantılı kompozit levhalarda en küçük darbe kuvveti değeri saf epoksi yapıştırıcı ile birleştirilmiş 6 mm kalınlıklı levha için görülürken en büyük kuvvet değeri hibrit yapıştırıcı ile birleştirilmiş 10 mm kalınlıklı levhada görülmüştür.

Darbe deneyi sonucunda elde edilen kuvvet-zaman grafiği kullanılarak çarpma sonrası hızlar hesaplandığında en düşük hız değeri hibrit yapıştırıcı ile birleştirilmiş 10 mm kalınlıklı levhada görülürken en yüksek hız hibrit yapıştırıcı ile birleştirilmiş 6 mm kalınlıklı levhada görülmüştür. İlk hız tüm testler için aynı olduğundan bu sonuç daha fazla enerji yutulması anlamına gelmektedir. Bu sonuç çekme deneyinden elde edilen tokluk verileri ile uyumludur.

Çalışmada ayrıca çekme deney parçaları ile darbe deney parçalarının kırık yüzey SEM görüntüleri incelenmiştir. Saf epoksi ile birleştirilmiş deney parçalarına göre hibrit deney parçalarının kırık yüzeyleri daha pürüzlü görülmektedir. Bunun anlamı kırılma için harcanan enerjinin hibrit deney parçalarında daha fazla olduğudur. Bu sonuç çekme deneyi sonuçları ile uyumludur.

Anahtar Kelimeler: Düşük hızlı darbe, Epoksi matrisli kompozitler, Karbon nanotüp, Grafen, T yapıştırma

ABSTRACT

MS THESIS

Investigation of Transverse Impact Damage in T-Jointed Composite Plates Bonded with Nanoparticle Added Epoxy Adhesive

Zeki TÜRKMEN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE / DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Necati ATABERK

2022, 52 Pages

Jury

**Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
Prof. Dr. Necati ATABERK
Assoc. Prof. Mürsel EKREM**

Composite materials have important usage areas such as aerospace industry due to their superior engineering properties. Composite materials are superior to metals used in engineering applications with many properties such as high mechanical strength, hardness, lightness, low thermal expansion and high damping.

In this study, the impact strengths of nanoparticle added adhesives and T joints at determined ratios were determined theoretically and experimentally by examining previous studies of support elements of different thicknesses. The matrix material of the composite plate used is epoxy resin and the additive material is woven carbon fibers. In the studies; 6, 8, 10 mm thick plates were used. In addition, four different adhesives were used to join the plates: pure epoxy, 0.3% by weight graphene nanoparticle added epoxy, 0.3% carbon nanotube (CNT) nanoparticle added epoxy and 0.15% by weight graphene and 0.15% CNT added epoxy (Hybrid). Tensile test of the adhesives used, breaking stresses and strains in percent were obtained, and force-time graphs were obtained as a result of the impact test of the adhered T-joint plates.

According to the tensile test results, tensile stress for pure epoxy adhesive is 41 MPa, 0.3% by weight graphene-doped adhesive tensile stress is 56 MPa, 0.3% by weight CNT added adhesive breaking stress is 50 MPa and 0.15% by weight graphene and 0.15% CNT the breaking stress of the doped adhesive was found to be 58 MPa. Likewise, the smallest strain was observed for 3% mm/mm pure epoxy adhesive, while the strain was 4.3 mm/mm for 0.3% w/w graphene added adhesive and 0.3% wt CNT added adhesive. The biggest strain value of 4.5% mm/mm was observed in the adhesive with 0.15% graphene and 0.15% CNT by weight. Accordingly, when the hybrid nano-composite material is compared with the pure epoxy material, 41% increase in tensile strength and 50% increase in strain was obtained. Another important result expected from this study is the toughness values of the adhesives. Toughness refers to the energy consumed by the material until it breaks. It is equal to the area under the stress-strain curve. In the calculations made according to the graphics obtained as a result of the tensile test, the highest toughness value was seen as $139.43 \times 10^4 \text{ J/m}^3$ in the hybrid adhesive.

As a result of the impact test, the smallest force value was observed for the 6 mm thick plates bonded with pure epoxy adhesive, while the highest force value was observed for the 10 mm thick sheet joined with the hybrid adhesive in the T-jointed composite sheets bonded with adhesive.

When the post-impact velocities were calculated using the force-time graph obtained as a result of the impact experiments, the lowest velocity value was seen in the 10 mm thick plate bonded with hybrid adhesive, while the highest velocity was observed in the 6 mm thick plate bonded with hybrid adhesive. Since the initial velocity is the same for all tests, this result means more energy is absorbed. This result is compatible with the toughness data obtained from the tensile test.

Fractured surface SEM images of tensile test specimens and impact test specimens were also examined in the study. Fractured surfaces of hybrid test pieces appear to be more rough compared to test pieces combined with pure epoxy. This means that the energy spent for fracture is higher in hybrid test pieces. This result is in agreement with the tensile test results.

When the post-impact velocities were calculated using the force-time graph obtained as a result of the impact test, the lowest velocity value was seen in the 10 mm thick plate bonded with hybrid adhesive, while the highest velocity was observed in the 6 mm thick plate bonded with hybrid adhesive. Since the initial velocity is the same for all tests, this result means more energy is absorbed. This result is compatible with the toughness data obtained from the tensile test.

Fractured surface SEM images of tensile test pieces and impact test pieces were also examined in the study. Fractured surfaces of hybrid test pieces appear to be more rough compared to test pieces combined with pure epoxy. This means that the energy spent for fracture is higher in hybrid test pieces. This result is in agreement with the tensile test results.

Keywords: Carbon nanotube, Epoxy matrix composites, Graphene, Low-velocity impact, rigid, T Bonded

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın tamamlanmasında desteğini esirgemeyen olumlu tavrıyla beni cesaretlendiren, bilgi ve birikimiyle çalışmama farklı açılardan bakmamı sağlayan beraber çalışmaktan ve öğrencisi olmaktan gurur duyduğum değerli hocam Prof. Dr. Necati ATABEK'e teşekkür ederim. Ayrıca değerli fikirlerinden dolayı Doç. Dr. Mürsel EKREM'e teşekkür ederim.

Bir ihtiyaca cevap verebilmek adına başladığım bu çalışmada tez konusuna ilham olan ve desteklerini esirgemeyen MVD Makine A.Ş' ne, akademik ve mühendislik alanda bilgi ve birikimleri ile çalışma sürecimde bana destek olan Makine Yüksek Müh. Hakan ŞAHMAN ve Arş. Görevlisi Abdullah ÖZKAN'a ayrıca teşekkür ederim.

Son olarak çalışma süresince beni cesaretlendiren ve moral veren eşim Melike TÜRKMEN'e, anneme ve babama sonsuz teşekkür ederim.

Zeki TÜRKMEN
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	7
3.1. Kompozit Malzemelerin Tanıtımı	7
3.2. Matris Malzemeleri.....	7
3.2.1. Plastik matrisler	8
3.3. Elyaf Malzemeleri.....	9
3.4. Tabakalı Kompozitler	9
4. YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARI	11
4.1. Adezyon	11
4.2. Kohezyon	11
4.3. Yapıştırıcı Çeşitleri	12
4.3.1. Doğal yapıştırıcılar	12
4.3.2. Sentetik yapıştırıcılar	12
4.4. Yapıştırma Bağlantılarına Uygulanan Yüzey İşlemler	13
4.4.1. Genel yüzey hazırlama yöntemleri	14
4.4.2. Yüzeylerin yağdan arındırılması.....	14
4.4.3. Yüzeylerin mekanik olarak aşındırılması	14
4.5. Yapıştırma Bağlantılarının Mukavemetini Etkileyen Faktörler	15
4.5.1. Sıcaklığın etkisi.....	15
4.5.2. Yüzey pürüzlülüğünün etkisi	16
4.6. Birleştirmede Kullanılan Yapıştırıcıların Avantaj ve Dezavantajları.....	16
4.7. Yapışma Bağlantılarında Oluşan Gerilmeler	17
5. DÜŞÜK HIZLI DARBE VE HASAR ANALİZİ	18
5.1. Düşük Hızlı Darbenin Mekanikliği.....	18
5.1.1. Çarpışmanın sıkışma ve geri bırakma aşamaları	19
5.1.2. Normal temas kuvvetinin işi	20
5.2. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı	20
5.3. Darbe Testleri	21

5.3.1. Sarkaç testleri.....	22
5.3.2. Ağırlık düşürme darbe testi.....	22
6. MATERYAL VE YÖNTEM.....	24
6.1.Yapıştırıcının Hazırlanması	24
6.2.Çekme Testleri.....	27
6.3.Darbe Deneyi	28
6.3.1.Darbe deney parçalarının hazırlanması.....	28
6.3.2.Darbe deney parçalarının yapıştırılması	29
6.3.3. Darbe deneyi düzeneği.....	31
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	34
7.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Teorik Sonuçlar	34
7.2. Çekme Testi Sonuçları.....	38
7.3. Darbe Deneyi Sonuçları.....	39
7.4. SEM Analizi Sonuçları	42
7.4.1. Çekme deney parçaları SEM görüntüleri.....	43
7.4.2. Darbe deney parçaları SEM görüntüleri	45
8. KAYNAKLAR	49

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

σ	:	MPa	Gerilme
ε	:	mm/mm	Birim şekil değiştirme
R_a	:	μm	Yüzey pürüzlülüğü
F	:	N	Kuvvet
Δt	:	s	Zaman değişimi
m	:	kg	Kütle
ΔV	:	m/s	Hız değişimi
Δh	:	cm	Düşey mesafe
V	:	m/s	Çarpma öncesindeki hız
g	:	m/sn^2	Yerçekimi ivmesi

Kısaltmalar

CNT	:	Karbon nanotüp
SEM	:	Taramalı elektron mikroskobu
PVA	:	Polivinil Asetat
ANSYS	:	Sonlu elemanlar analiz programı
GFRP	:	Glass fiber reinforced plastics
CFRP	:	Carbon fiber reinforced plastics
CNC	:	Bilgisayarlı sayısal kontrol

1. GİRİŞ

Kompozit malzeme kullanımı uzay, havacılık, otomotiv gibi bir çok sektörde yaygınlaşmaktadır. Metal alaşımları ve polimer karışımları yapısal durumları açısından kompozit olarak sınıflandırılmazlar.

Kompozit malzeme kullanımını etkileyen faktörlerin başında malzemelerin birleştirme problemi gelmektedir. Kompozit malzemelerin yaygın kullanım alanı bulması ile yapıştırırmalı birleştirme kullanımı da yaygınlaşmıştır. Yapıştırırmalı bağlantılar konusunda başarılı çalışmalar yapılmış ve verimli sonuçlar alınmıştır. Yapıştırırmalı bağlantılarda ise kompozitin kullanıldığı yerde yapıştırma mukavemetinin istenilen değerleri sağlaması gerekmektedir.

Mühendislik uygulamalarında, özellikle mekanik uygulamalarda, herhangi bir dış etkiden önce istenmeyen sonuçların önüne geçmek için malzemenin en uygun tepkiyi vermesi istenir. Bir malzemenin maruz kalabileceği etkiler, uygulama yerine ve kullanım amacına bağlı olarak çeşitli şekillerde olabilir. Öte yandan, darbe tepkisi malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Yani çarpma sonucunda temas eden yüzeyde metal ve metal alaşımlarında hasar meydana gelir. Kompozitlerde darbe tipine bağlı olarak darbeye maruz kalmayan yüzeylerde de darbe hasarı oluşabilmektedir. Bu, iç yapıda bir ayrım (tabakalar arası ayrım) olarak düşünülebilir. Metallerin plastik deformasyon sonucu kırılma şeklindeki darbe tepkisine rağmen, kompozitlerde çeşitli modlarda parçanın yapısal bütünlüğünde önemli bir değişiklik olmaksızın hasar görebilir.

Darbe üretmek için çeşitli test tekniği kullanılır. Bununla yanında, kompozit malzemelerin darbe karakterizasyonu için farklı ülkeler, kuruluşlar ve araştırmacılar arasında standart bir test tekniği veya yaygın olarak kabul edilen bir tekniğe rastlanamamıştır. Bu, farklı kaynaklardan elde edilen sonuçları karşılaştırırken bir sorun teşkil eder. Bu nedenle kompozit malzemelerin darbe tepkisi için uygun bir model geliştirme çabaları zordur. Bu sınırlamalara rağmen, kompozit malzemelerin darbe dayanımını belirlemek için çeşitli şekillerde geliştirilen test cihazları günümüzde hala yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada yüksek ivme ile hareket eden kompozit bir kirişin güçlendirilmesi için kullanılacak epoksi matrisli kompozit levhanın yapıştırma bağlantısının darbe dayanımı incelenmiştir. Bunun için öncelikle sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizler yapılmış ve uygun levha kalınlıkları tespit edilmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapmak amacıyla metal malzeme için aynı analizlerin sonuçları incelenmiştir.

Analiz sonucunda belirlenen levhaların uygun yapıştırıcı kalınlığında yapıştırılabilmesi için özel bir aparat tasarlanmış ve imal edilmiştir. Yapıştırma bağlantıları bu özel aparat sayesinde yapılmıştır. Burada farklı levha kalınlığının darbe dayanımının yanında yapıştırıcı içerisine nano parçacıklar eklenerek yapıştırıcı etkisi de incelenmiştir. Yapıştırma işlemi tamamlanan parçaların darbe dayanımlarının incelenmesi için mevcut olan charpy darbe test cihazı üzerinde bazı düzenlemeler yapılmış ve deneyler bu test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bir veri toplama cihazı ile kuvvet sensörü kullanılarak parçaya çekicinin vurma anındaki kuvvet değeri ölçülerek grafikler oluşturulmuştur. Darbe enerjisinin ne kadarının malzeme tarafından absorbe edildiği ve malzemedeki hasar alanları gözlemlenmiş ve oluşan hasar tipleri tespit edilmiştir. Sonuç olarak teoride belirlenen değerler ile deneysel çalışma sonunda elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Ghasemnejad, Furquan, ve Mason (2010) tek ve çok delamine hibrit kompozit kiriş yapılarının charpy darbe hasarı davranışlarını incelemişlerdir. Katmanların ara yüzeyleri boyunca ayrılması nedeniyle katmanlı kompozitlerin başarısızlık prensibi olarak bilinen kat delaminasyonu, kompozit malzemenin tasarımındaki ana endişelerden biridir. Bu çalışmada, kompozit kirişte farklı delaminasyon konumlarına sahip hibrid laminant yerleşiminin etkisini araştırmışlardır. Enerji emilimini incelemek için Charpy darbe testini seçmişlerdir. Sonuç olarak etkilenen yüzeye daha yakın delaminasyon pozisyonuna sahip kompozit kirişlerin, hibrit ve hibrit olmayan yüzeylerdeki diğer delaminasyon pozisyonlarına kıyasla daha fazla enerji emebildiği gösterilmiştir.

Hufenbach vd. (2008) kompozit yapılar üzerinde Charpy darbe testinin sayısal ve deneysel olarak incelemesini yapmışlardır. Bu çalışmada düşük hız etkisi altındaki karbon takviyeli kompozitleri sayısal LSDYNA-3D'de ortotropik sürekli hasara dayalı malzeme yaklaşımı ile modellemeye çalışmışlardır. Parametreleri tanımlamak için Charpy test cihazında deneysel araştırmalar yapmışlardır. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen kuvvetler ve başarısızlık modları arasında pozitif bir korelasyon elde etmişlerdir.

Kalıp işlemede verimliliği en üst düzeye çıkarmak için, tezgahlar yüksek hızlarda çalışmalıdır. Kalıp işlemlerinde buna engel olan temel neden CNC freze tezgâhlarının başlangıçta yüksek hızlanmaya ve yavaşlamaya izin vermeyen devasa kızaklara sahip olmalarıdır. Suh, Lee, ve Kegg (2002) yaptıkları çalışmada bu problemin üstesinden gelmek için kızakların kompozit malzemeden yapılması üzerine çalışmışlardır. Büyük bir CNC makinesinin dikey ve yatay kızaklarını yapıştırıcılar kullanılarak kaynaklı çelik yapılara yapıştırmışlardır. Sonuç olarak çok fazla ayarlama yapılmadan, bu makinede 300 mm kızak yer değiştirmesi için $\pm 5 \mu\text{m}$ konum hassasiyetine sahip olduğunu görmüşlerdir.

Takım tezgâhlarının yüksek aktarım hızı ve yüksek kesme hızı, kalıpların imalatındaki verimlilik artışı için önemlidir. Çünkü hava kesme süresi olarak adlandırılan işleme süresi, toplam işleme süresinin % 70'ine eşittir. Düşük üretkenliğin başlıca nedenlerinden biri, makine aletlerinin hareketli parçalarının büyük kütleli olup, çalışma sırasında karşılaşılan yüksek hızlanma ve yavaşlamayı sağlayamamasıdır. Lee vd. (2004) bu sebepten dolayı makinelerin kızaklarını fiber takviyeli kompozit malzemelerle tasarlamışlardır. Bu kompozit yapıların, dikey ve yatay kızakların ağırlığını sırasıyla %34 ve %26 oranında azalttığını ve dayanım değişmeden sönümlemeyi 1.5-5.7 kat artırdığını ortaya koymuşlardır.

Turan, K. Kaman ve M.O. (2010) arkadaşları, karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit levhaları yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek taraflı bindirmeli bağlantıların hasar analizlerini hem sayısal yöntem hem de deneysel olarak araştırmışlardır. Karbon elyaf 0° den oluşan tek yönlü dokuma tipinde, ağırlığı 200 g/cm^2 12 k 800tex ipinden 4 tabakalı olarak üretilmiştir. Sayısal analiz için hem sonlu elemanlar metodunu kullanarak çözüm yapan ANSYS 11.0 programı yardımıyla hem de kompozit malzemeler için ilerlemeli hasar analizi olan Hashin Hasar Teorisi kullanılmıştır. Üst üste bindirme uzunluğu, yapıştırıcı kalınlığı ve genişliğinin kayma dayanımına etkisini sayısal olarak incelemişlerdir.

L.Kırkayak (2008) yaptığı çalışmada 8 tabakalı tek yönlü dokumalı karbon elyaf takviyeli tek taraflı bindirmeli yapıştırma bağlantılı kompozitlerde yapıştırma geometrisinin gerilme dağılımına etkisini araştırmıştır. Yapıştırılmalı bağlantılarında, farklı yapıştırıcı ve geometrilerde bağlantı yerlerinde oluşan gerilme dağılımını (kayma ve soyulma), sonlu elemanlar yöntemi kullanarak incelemiştir. Çalışma sonucunda, iki farklı rijitliğe sahip yapıştırıcının bir arada kullanıldığı ve farklı yapıştırma geometrilerine sahip hibrit modellerde, tek tip ve sürekli yapıştırıcının kullanıldığı modele göre, soyulma ve kayma gerilmeleri açısından önemli azalma olduğunu, ayrıca yapıştırma geometrisinin gerilme dağılımını etkilediğini göstermiştir.

Sayer (2009) çalışmasında, cam elyaf takviyeli kompozit plaka, aramid/cam elyaf, aramid/karbon elyaf ve karbon/cam elyaf takviyeli hibrit kompozit plakaların -20°C , 0°C , 40°C ve 60°C sıcaklıklarında artan darbe enerjilerindeki darbe hasarlarını deneysel olarak araştırmıştır. Enerji Profil Metodu (EPM), kompozit plaklara saplanma ve delinme sınırlarının belirlenmesinde kullanılmıştır

Murat Özenç (2007) çalışmasında; tek taraflı bindirme bağlantılarının, değişik yüzey pürüzlülüklerinde ($R_a=0.5-1.5-2.5\mu\text{m}$), farklı yapıştırma kalınlıklarında ($s=0,1-0,3-0,5\text{mm}$) ve farklı malzemeler kullanarak (çelik, alüminyum, bakır) darbe dirençlerinin nasıl değiştiğini incelemiştir. Sonuç olarak her bir parametrenin darbe direncini etkilediğini görmüş ve her parametre için optimum darbe dayanımını veren değerleri belirlemiştir.

Durmuş Ali (2018) yaptığı çalışmada sac işleme ve kesim üretim sanayiinde kullanılan lazer kesim tezgâhlarındaki Y-kseninin kompozit-alüminyum hibrit yapı kullanılarak üretilmesiyle mevcut duruma göre ağırlığının azaltılmasının parametrelere etkisini araştırmıştır. Sonuç olarak mevcut kafes yapıdaki Y-ksen ile prototip üretilen kompozit-alüminyum hibrit yapıdaki Yksen sistemlerini sehim, kritik frekanslar,

ivmelenme, hız, talaşlı imalat hassasiyeti ve kesim performansları açısından karşılaştırmıştır.

Ongun A. (2015) epoksi reçineye CNT ve nanokil eklemiş ve bu matris malzemeyi vakum infüzyon metoduyla karbon elyafa emdirerek tabakalı kompozit levhalar oluşturmuştur. CNT oranının daha önceki çalışmalarda optimum özellikleri ağırlıkça epoksiye katılan % 0.3 oranı bilindiğinden dolayı bu değeri sabit tutup, nanokili reçineye ağırlıkça %1 , %3 ve %5 oranlarında olacak şekilde eklemiştir. Tabakalı kompozit levhaların mekanik özelliklerini görebilmek için çekme, üç nokta eğme, düşük hız darbe testleri yaparak sonuçları yorumlamıştır.

Öndürücü, Ayşe Karacan (2018) çalışmada, artan darbe enerji değerleri için farklı oryantasyon açılarına sahip cam elyaf/epoksi kompozit numunelerin darbe davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Darbe deneyleri için 50cm x 50cm boyutlarında 8 ve 12 tabakalı cam elyaf/epoksi kompozit plaka üretimi yaparak 150mm x 100 mm boyutlarında numune kesimi yapmışlardır. Bu numuneleri 4 ayrı gruba ayırmışlardır. Her grup numuneler için 10J, 20J ve 30J'lük artan darbe enerjisi değerleri altında darbe testi uygulayarak fiber takviye açılarının ve tabaka kalınlıklarının darbe davranışı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak numunelerde darbe uygulanan üst yüzeyde ezilme izi, fiber uzamaları ve matris kırılmalarını görürken, darbe uygulanmayan alt yüzeyde fiber ayrılmaları, fiber kırılmaları ve delinme hasarlarının meydana geldiği görmüşlerdir.

Razmi A. (2011) çalışmasında kompozit malzemelerde yapıştırıcı ile birleştirme yöntemlerinden olan bindirme bağlantısı, köşe bağlantısı ve T bağlantısının sonlu elemanlar analiz programı ANSYS yardımı ile analizini ortaya koymuştur. Eşit kuvvetlere maruz bırakılmaları durumunda bu bağlantı tasarımlarında oluşacak gerilme değerlerinin karşılaştırmasını yaparak aralarından en uygun tasarımları seçmiştir.

Tüzemen, Salamcı, ve Avcı (2017) çalışmada farklı oranlardaki nanopartikül takviyesinin fiber, matris ve boşluk hacim oranlarına etkisini incelemişlerdir. Matris elemanı olan epoksi içerisine farklı oranlarda nanopartikül katarak vakum infüzyon yöntemi ile karbon fiber/epoksi nanokompozit plakalar üretmişlerdir. Üretilen nanokompozitleri standartlarda verilen ölçülerde hazırlandıktan sonra yakma testine tabi tutmuşlardır. Yakma testi sonucunda %5 nanopartikül katkısının boşluk hacim oranını %221 arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır.

Seifoori vd. (2021) çalışmalarında termografi yönteminin etkinliği ile ultrasonik vibrotermografi, kızılötesi termografi dahil olmak üzere üç farklı termal uyarma kaynağı CFRP ve GFRP'de hasar değerlendirmesi için ısıtma elemanı ve sıcak hava akışına sahip

kızılötesi termografi ile düşük hızlı darbelere maruz kalan kompozit plakaları incelenmiştir. Ultrasonik vibrotermografi yöntemi, CFRP ve GFRP kompozit plakalarda hasar değerlendirmesi için en umut verici teknik olarak belirlenmiş ve düşük hızlı darbelere ve uyarma gücünün ve uyarma frekansının etkinliğine etkisi bu yöntem ile incelenmiştir. Ayrıca deneysel sonuçlarla karşılaştırmak için sonlu elemanlar simülasyonu gerçekleştirmiştir. Deneysel sonuçlara kıyasla simülasyon sonuçlarının kabul edilebilir olduğunu görmüşlerdir.

Ekrem (2015) yapmış olduğu doktora tezi çalışmasında (PVA) nano elyaf ve karbon nanotüp ilave edilmiş PVA nano elyaflar üretmiştir. Ayrıca epoksi reçineye ağırlıkça % 1 oranında nano parçacık eklenmiş epoksi yapıştırıcı üretmiştir. Üretilen yapıştırıcıların tek taraflı bindirmeli ve çift konsol kiriş (ÇKK) testleri yapılmıştır. Al 2024-T3 levha yapıştırılan malzeme olarak kullanılmış ve elde edilen bağlantıların kayma dayanımları ve kırılma toklukları incelenmiştir. Test sonucunda elyaf köprülenmesi ve sıyrılması, kırılma adımları, mekanik kilitleme gibi mekanizmalar ile nano elyaf takviyeli yapıştırıcıların kırılma tokluğu değerlerinde büyük artışlar sağladığını görmüştür.

Kara (2012) yapmış olduğu doktora tezi çalışmasında ön gerilmeli cam takviyeli plastik borulara yapılan farklı enerji seviyelerindeki düşük hızlı darbeye oluşan hasarları incelemiş ve elyaf kopmaları gözlemlemiştir. Buna bağlı olarak darbe hasarlı ve darbe hasarsız boruların iç basınca karşılık çap değişimlerinin aynı olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca 6 katlı yama uygulamasının bu boruların hasar bölgelerine uygun olduğunu belirlemiştir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Kompozit Malzemelerin Tanıtımı

Kompozit malzeme, iki veya daha fazla malzemenin makroskopik düzeyde birleştirilmesi sonucu elde edilen yeni bir malzemedir. Aşağıda listelenen özelliklerden bazıları kompozit malzemeler üretilerek elde edilebilir:

- a) Özgül dayanım (dayanım/yoğunluk)
- b) Mükemmel aşınma direnci
- c) Yüksek yorulma dayanımı
- d) Yüksek rijitlik
- e) Düşük ağırlık
- f) İyi termal ve ısı iletkenliği
- g) İyi korozyon direnci

Bütün bu özellikler aynı yapı içerisinde bulunmayabilir ve herhangi bir uygulama için bunların tamamına de ihtiyaç duyulmaz. Bileşenlerin özelliklerinden yararlanılarak bazı mekanik özellikleri, hesaplanabilir.

Üretim, yukarıda belirtilen özellikler için gerekli koşullar, uygun matris ve takviye eleman çiftleri, imalat tekniği, dayanım bileşenleri ve diğer faktörler dikkate alınarak yapılırsa istenilen performans elde edilebilir.

Kompozit malzemeler, mukavemetleri, rijitlik ve hafiflikleri sebebiyle metallerin yerini almaktadır. Günümüzde uçak, uzay aracı, su altı araçları ve önemli malzeme özelliklerine sahip birçok makine parçası kompozit malzemelerden yapılmaktadır.

Kompozit malzemeler, matris ve takviye adı verilen (lifler, parçacıklar vb.) yapı elemanlarından oluşur. Fiberleri bir arada tutan matris, kompozitlerde bağlayıcı elemandır, yani bağlayıcı görevi görürler. Matrisin amacı; destek, koruma ve gerilme aktarımıdır. Matrisin yoğunluğu, sertliği ve mukavemeti fiberinkinden daha düşüktür.

3.2. Matris Malzemeleri

Kompozit malzemelerde matrisin üç temel görevi vardır. Bunlar, elyafların bir arada tutulması, yükün elyaflara eşit dağıtılması ve elyafları dış etkilerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi ilk etapta düşük viskoziteli bir yapıda iken sonrasında elyafları sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyerek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir.

Matrisin mekanik özellikleri, kompozit yapılarda yük taşıyan liflerin performansında önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, matris malzemesi olmayan bir iplik demeti göz önüne alındığında, yük bir veya daha fazla iplik tarafından taşınacaktır. Bir matrisin varlığı, yükün tüm lifler üzerindeki eşit dağılımını sağlayacaktır. Kesme yükleri altında çekme mukavemeti, elyaflar ve alt tabaka arasında iyi yapışma ve alt tabakanın yüksek kesme mukavemeti özellikleri sergiler.

Elyaf yönüne dik doğrultuda, altlığın mekanik özellikleri ve elyaf ile altlık arasındaki bağ kuvveti kompozit yapının mukavemetini belirleyen önemli faktörlerdir. Matris, fiberden daha zayıf ve daha esnektir. Bu özellik, kompozit yapılar tasarlanırken dikkate alınması gereken bir konudur.

3.2.1. Plastik matrisler

Plastiklerin hafifliği ve işlenme kolaylığı nedeniyle birçok uygulaması vardır. Kompozitlerde plastik bazlı matrisler iki şekilde bulunur: termoset ve termoplastik matrisler.

3.2.1.1. Termoset matrisler

Termosetler en yaygın kullanılan matris malzemelerindendir. Termoset plastikler sıvı halde bulunur, ısı etkisi ve kimyasal tepkimelerle sertleşirler. Termosetler geri dönüşümü olmayan matris malzemeleridir. Yüksek sıcaklıklarda bile yumuşamazlar. Çoğu termoset matris malzemesi sertleşmemeleri için dondurulmuş olarak depolanmak zorundadır. Dondurucudan çıkarılıp oda sıcaklığında bir müddet bekletildiğinde sertleşmeye başlar ve biçim verilmesi zor bir hâl alır ve kullanılamaz duruma gelir. Dondurucuda bekletildiğinde ise raf ömürleri 6 ila 18 ay arasındadır.

Polyester, epoksi reçineler, fenolik reçineler ve silikonlar gibi ısıyla sertleşen polimerler, elyaf takviyeli kompozitlerde kullanılan yaygın matris malzemeleridir.

Epoksi reçineler, ağırlığın önemli olduğu ve yüksek mukavemetin gerekli olduğu yerlerde sıklıkla tercih edilir. Polyester gibi daha ucuz bir reçinenin tercih edilmesinin nedenleri daha iyi mekanik özellikler, yorulma direnci, ısı direnci, takviye malzemesine iyi yapışma ve kürlenme sırasında düşük büzülmedir.

Epoksi reçinesi, epoksi grubunun polimerizasyonu ile elde edilir. Özellikleri, farklı formüller kullanılarak önemli ölçüde değiştirilebilir. Pek çok farklı epoksi türü

geliştirilmiştir ve doğru seçim yapmak oldukça önemlidir. Kullanılan sertleştiricinin türü, oluşan kompozit malzemenin özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Reçinenin homojen bir şekilde vulkanize olmaması, reçinenin özellikle gerilme korozyonu durumunda çok farklı tepkiler üretmesine sebep olur. Kürleme yaklaşık 1 saat sürer ve 127°C ve 177°C'de ve genellikle basınç altında yapılır. Ayrıca 250°C'ye kadar ısıya dayanıklı olabilen epoksi reçineleri geliştirilmiştir. Kürleme sırasında büzülme sorunu yoktur. Yüksek mukavemete sahiptirler, birçok lifle iyi bağlar kurarlar ve ayrıca kimyasallara karşı oldukça dirençlidirler.

Epoksi reçineler altı kategoriye ayrılır: bisfenol A reçineleri, glisidil esterler, glisidil aminler, novolaklar, bromlu reçineler, sikloalifatikler ve diğerleri.

3.3. Elyaf Malzemeleri

Elyafların kompozit malzemelerdeki en önemli görevi yükü taşımaktır. Elyaflar, kompozit malzemeye dayanımın yanında rijitlik te sağlar. Kompozit malzemelerde sürekli elyaf filaman, metalik filamanlarda tel olarak adlandırılır. Eğer elyafların kesit alanı kenarlarından biri diğerinin 4 katından fazla bir dikdörtgense bu tür elyaflara şerit adı verilir.

3.4. Tabakalı Kompozitler

En az iki farklı levha malzemenin tabakalar şeklinde dizilerek meydana getirdiği malzemelere tabakalı kompozit malzemeler denir. Diğer kompozitlere göre tabakalı kompozitlerin üretim, tasarım, standartlaştırma ve kontrolü daha kolay olmaktadır. Özel gereksinimleri karşılamak amacıyla bu kompozitlerde birden çok tabaka birlikte kullanılabilir. Bunlar sandviç malzeme olarak da adlandırılır.

Çok katmanlı kompozit malzemeler en az iki katmandan oluşur. Bununla birlikte, mukavemet ve mekanik özelliklerin önemli olduğu durumlarda, malzemenin bu özelliklere sahip olması için en az üç veya daha fazla katman kullanılır. Bu katmanları oluşturan malzemeler farklı olabileceği gibi aynı malzemedен yapılmış da olabilir.

Tabakalı kompozitlerin üretiminde genel olarak katmanlı formdaki her türlü malzeme kullanılabilir. Buradaki ilke, diğerinin özelliklerini olumlu yönde artıracak bir bileşen oluşturmaktır.

Tabakalı kompozitlerin imalatında farklı türden malzeme kullanılabilceği gibi tek bir türden malzeme de kullanılabilmektedir. Üretiminde kullanılan malzemelere göre:

- Farklı malzemelerden veya
- Tek tür malzemedden oluşan tabakalı kompozit malzemeler, olarak iki grupta toplamak mümkündür.

4. YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARI

Yapışma olayı, yapıştırıcı ile birleştirilen malzeme arasında oluşan adezyon ve yapıştırıcının kendi içinde meydana gelen kohezyon kuvvetleri neticesinde oluşan fiziksel ve kimyasal bir olaydır.

İyi bir yapıştırmanın temel gereksinimleri

- Yapıştırılacak yüzeylerin iyi ıslanabilmesi
- Bağlantı tasarımının iyi seçilmesi,
- Yüzeylerin temizliği,
- Uygun bir yapıştırıcının seçilmesi,
- Uygun yapıştırma süreçleri (katılma ve kurluşme)

Olarak sayılabilir

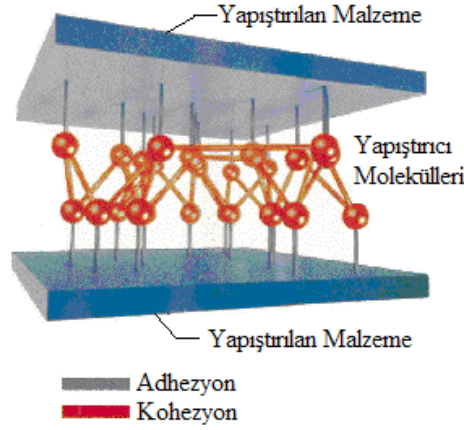
Yapışmanın doğasını daha iyi anlayabilmek için adezyon ve kohezyon kuvvetlerini daha iyi anlamak gerekir.

4.1.Adezyon

Yapıştırıcı ve yapıştırılan yüzey arasında meydana gelen bu olay, iki yüzeyin ara yüzey kuvvetleri (valans kuvvetleri) tarafından bir arada tutulması olayıdır. Adezyon mekanizmasını tanımlayabilmek için tarihsel olarak mekanik kilitlenme, elektrostatik, difüzyon, fiziksel adsorbsiyon teorileri ileri sürülmüştür(Houwink, R. and Salomon 1965). Daha yakın zamanlarda olayın anlaşılabilmesi için farklı teoriler de tartışılmıştır.

4.2.Kohezyon

Yapıştırıcıyı oluşturan kütle bileşenlerinin, yapıştırıcının polimerizasyonu esnasında meydana gelen kimyasal ve fiziksel kuvvetler tarafından bir arada tutulması kohezyon olarak adlandırılır. Kohezyon, yapıştırıcı molekülleri arasında bulunan ve yapıştırıcıyı bir arada tutan kuvvettir. Adezyon ve kohezyon olayları Şekil 4.1’de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.1. Adezyon ve kohezyon olaylarının şematik gösterimi

4.3.Yapıştırıcı Çeşitleri

Yapıştırıcılar: Doğal yapıştırıcılar ve sentetik yapıştırıcılar olarak iki grup altında incelenebilir.

4.3.1. Doğal yapıştırıcılar

Hayvan dokusu ve kemikleri, bitki özleri ve minerallerden çıkarılan yapıştırıcılardır. Hayvansal yapıştırıcılar, genellikle katı halde saklanır ve sıvı hale getirmek için ısıtılmalıdırlar. Çoğunlukla ahşap birleştirme işlemlerinde kullanılır. Bitkisel yapıştırıcılar genellikle toz haline getirilir ve macun haline getirmek için kullanımdan önce su ile karıştırılmalıdır. Kâğıt sanayinde kullanılmaktadır. Mineral yapıştırıcılar, örneğin sodyum silikat 850°C'ye kadar yüksek sıcaklıklara dirençlidir.

4.3.2. Sentetik yapıştırıcılar

Bunlar yüzeye nasıl etki ettiklerine göre sınıflandırılmışlardır:

- Anaerobikler: Bağlantı alanına hapsedildiğinde bir reçine içinde katılaştır.
- Syanoakrilatlar: Atmosferik nemin etkisi altında kısa surede katılaştır. Örneğin; cam, kauçuk, metaller, plastikler için uygundur. Genellikle 'süper zambak' olarak adlandırılırlar.
- Epoksiler: İki bileşenli yapıştırıcılardır (epoksi reçine ve bir sertleştirici). Bir çok mühendislik malzemesinin yapıştırılmasında kullanılabilir. Yüksek yapışma, iyi

çekme ve kayma mukavemeti, yüksek rijitlik, sürtünme direnci, küçük büzülme miktarıyla kolay sertleşme ve yüksek sıcaklıklara iyi tolerans sunmak üzere tasarlanabilen dayanıklı yapıştırıcılardır.

- Değiştirilmiş fenolikler: Uygun bir şekilde kullanmak için ısı ve basınç uygulanması gerekir. Metal ayaklardaki fren astarlarını birleştirmek için kullanılır.
- Sıcak eriyikler: Akışkan hale gelinceye kadar ısıtılıp, bağlantı yüzeyleri üzerine koyulurlar ve oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilirler.
- Çözücü temelli yapıştırıcılar: Çözücü, kauçuk ya da plastiği taşır. Çözücü buharlaştığında yapışkanın kalitesi düşer ve katılaştır. Bu durum yük taşımak için uygun değildir.

4.4. Yapıştırma Bağlantılarına Uygulanan Yüzey İşlemler

Yüzey hazırlığı, yapıştırıcı kullanarak yapılan birleştirme yönteminin en önemli aşamasıdır. Buradaki amaç, çevresel şartlara (nem, sıcaklık vb.) dayanıklı, sürekli ve yüksek dayanımlı bir yapıştırma bağlantısı sağlayacak malzeme yüzeylerinin meydana getirebilmesidir. Yapıştırılacak malzemelerin, oksit, boya, kimyasal kalıntılar, yağ vb. tabakaların araya girmeden yapıştırıcıyla direkt temas etmesi istenir. “Zayıf Sınır Tabakalar” olarak adlandırılan bu tabakalar arada olduğu durumlarda yapıştırıcı, yapıştırılacak malzeme yüzeyleri ile tam temas içinde olmayacaktır.

Yüksek bağlantı dayanımının, sürekliliğin ve verimliliğin istendiği yerlerde, dikkatli ve kontrollü bir yüzey hazırlama süreci gereklidir. Yüzey hazırlama yöntemlerinin seçiminde aşağıdaki kriterler dikkate alınmalıdır;

- Yapıştırılacak malzeme yüzeyindeki kirletici unsurların türü ve miktarı,
- Yapıştırılacak malzeme,
- Bağlantı dayanımı,
- Hizmet süresi ve hizmet verilen ortam.

4.4.1. Genel yüzey hazırlama yöntemleri

Yapıştırıcı eklemler, yapıştırıcı ile yüzeyler arasında tam temasın olmamasından etkilenir. Başarılı bir yapıştırma için tasarımda uygun yüzey hazırlama yöntemi ve uygun yapıştırıcı belirlenmelidir.

4.4.2. Yüzeylerin yağdan arındırılması

Mümkün olan en iyi yapışmayı sağlamak için yapıştırılacak yüzeydeki yağ, gres, toz ve diğer kalıntılar tamamen temizlenmelidir. Kalıntı bırakmadan buharlaşan çözücüler buna uygundur. Tablo 4.1’de yüzeyleri yağlardan arındırmak için kullanılan çözücüler verilmiştir

Tablo 4.1. Yağ almada kullanılan çözücü örnekleri.

Solvent türü	Temizleme kapasitesi	Yanıcı veya parlayıcı
Hidrokarbonlar (izoparafinler)	İyi	Evet
Ketonlar (aseton)	İyi	Evet
Alkoller (izopropanol)	Orta	Evet
Su bazlı	İyi	Hayır

Yüksek hacimli üretim için özel yağ giderme tankları kullanılıyorsa, lavabonun kirlenmemesi için çok kirli yüzeylerin önceden temizlenmesi tavsiye edilir.

4.4.3. Yüzeylerin mekanik olarak aşındırılması

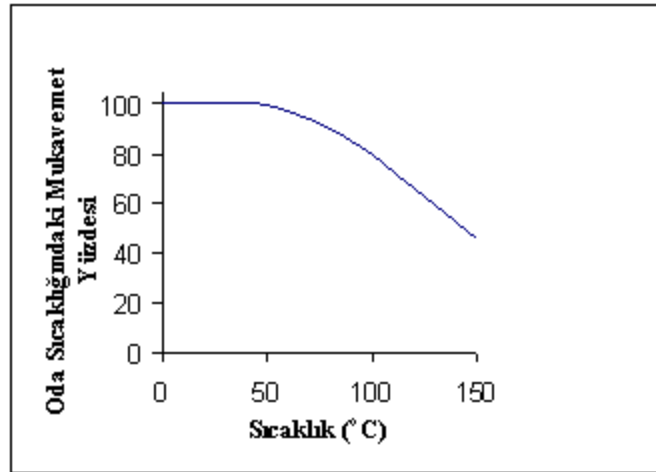
Kirli metal yüzeyler çoğunlukla bir oksit tabakasıyla kaplıdır ve bu tabaka yağ alma işlemi ile temizlenmez. Böyle durumlarda, çok aşamalı programların bir ön hazırlık aşaması olan mekanik aşındırma işlemi (kumlama, zımparalama, taşlama veya tel fırça ile fırçalama vb.) ile istenmeyen oksit tabakası kaldırılır ve aynı zamanda belli bir pürüzlülük değerinde yüzeyler elde edilir.

Mekanik aşındırmayla malzeme yüzeyinde girintiler ve çıkıntılar oluşacağından bu girintilerde oluşan organik kirlenmenin yüzeyden tamamen kaldırılması zorlaşmaktadır. Dolayısıyla yüzeyleri tekrar kimyasal çözücülerle temizlemekte fayda vardır.

4.5. Yapıştırma Bağlantılarının Mukavemetini Etkileyen Faktörler

4.5.1. Sıcaklığın etkisi

Sıcaklık, molekül zincirlerini oluşturan birimlerin dönme hareketlerini etkiler. Artan sıcaklıkla molekül zincirleri arasındaki bağ kuvvetleri zayıflar ve zincirler birbirlerine göre daha bağımsız hale gelir. Sıcaklığın azalması ile birimlerin dönme hareketi yavaşlar ve belirli bir sıcaklıkta durur, sadece atomların kendi konumları etrafındaki titreşim hareketi kalır. Bu sıcaklığa *camsı duruma geçiş sıcaklığı* (T_g) denir. Yapıştırıcılar polimer esaslı malzeme oldukları için belirli bir geçiş sıcaklığına sahiptirler. Bu sıcaklık değerleri üzerinde mukavemet değerleri düşer (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Loctite 638 anaerobik yapıştırıcıda sıcaklığın mukavemete etkisi

Camsı geçiş sıcaklığının altında, yapıştırıcı camsı hal denilen rijit, sert ve gevrek durumda bulunur. Yapıştırıcıların esnekliği, genellikle ısıl genişleme farklılıklarını giderir ve titreşim yorulması direncini iyileştirir. Yapıştırıcılar daha düzgün bir gerilme dağılımı sağlar ve vidalamak için açılan delikler veya diğer mekanik bağlama elemanları nedeniyle oluşan gerilme yoğunluğunun giderilmesine izin verir. İlaveten yapıştırma bağlantısı adımları, kolaylıkla otomatik hale getirilebilir ve diğer üretim aşamalarıyla birleştirilebilir. İstenilmeyen çevre koşullarında yapıştırıcıların mukavemeti potansiyel bir dezavantajdır. Yapıştırıcılar, düşük sıcaklık profili ile sınırlıdır, özellikle limitlerine yakın sıcaklıklarda kullanıldıklarında zamanla etkileri düşer. Bağlantının bütünlüğüne karar vermek ve kopmanın ne zaman meydana geleceğini tahmin etmek için sınırlı sayıda teknik bulunmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda termoset yapıştırıcılarda (epoksi, anaerobik

vs.), yapı rijitliğini kaybederek esnek hale geçmekte, elastisite modülünde düşme ve tamamen parçalanma söz konusu olmaktadır. Termoplastik yapıştırıcılarda ise elastik hale geçme ve ergime meydana gelebilir.

4.5.2. Yüzey pürüzlülüğünün etkisi

Yapıştırıcıların bağlantı mukavemeti, birleştirilen parçaların yüzey pürüzlülüğünden etkilenir. Birleştirilen parçaların yüzey bitirme veya yüzey alıştırma işlemleri, iyi bir yapıştırma sağlanması için çok önemlidir. Bağlantı mukavemetinin yüzey bitirme işleminden etkilendiği belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü, yapıştırmanın durumunu kontrol eden önemli parametrelerden biridir. Bununla birlikte, durumun karmaşıklığı nedeniyle bu etkinin önemi henüz tam olarak açıklanamamıştır. Çok iyi bir şekilde cilalanmış yüzeylerde dahi, çok farklı uzunluk doğrultuları üzerinde yüzey pürüzlülüğü vardır. İki parça tamamen düz yüzeylerinden birleştirildiğinde, görünen temas alanı gerçek temas alanı yanında çok küçüktür. Gerçek temas alanı, katı parçaların birbirini üzerine bastırılması ve yüzeyler arasındaki yapıştırma etkileşimine bağlıdır.

4.6. Birleştirmede Kullanılan Yapıştırıcıların Avantaj ve Dezavantajları

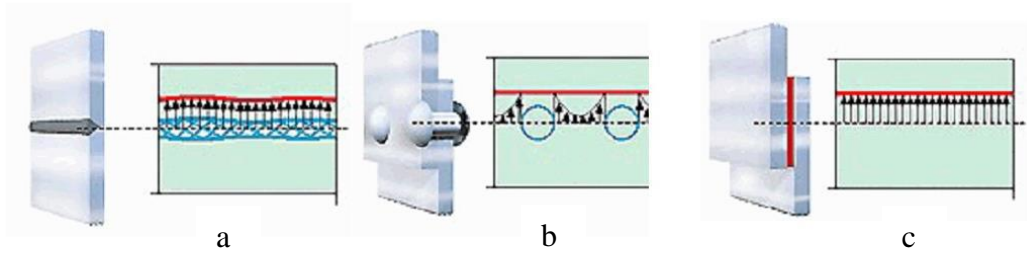
Yapıştırma bağlantılarının üstün ve olumsuz yanları üzerine yoğun bir şekilde çalışılmıştır. Bu çalışmalardan birinde yapıştırma bağlantılarının üstün ve olumsuz yanları aşağıdaki gibi ifade edilmiştir (Ebnesajjad 2010).

Yapıştırma bağlantılarının üstünlükleri:

- Herhangi bir şekle sahip ince ve kalın malzemeler birleştirilebilir,
- Perçin ve cıvata gibi Mekanik veya kaynak ve lehim gibi termal birleştirmelerde ortaya çıkan gerilme yığılmalarının azaltılması sonucunda tüm yapışma alanı boyunca daha düzenli gerilme dağılımı elde edilmesi (Şekil 4.6),
- Daha büyük yük taşıma alanı temin edilmesi (Sharpe L. H. 1966)
- Aynı veya farklı malzemeleri birleştirir,
- Farklı malzemeler arasındaki elektrokimyasal (galvanik) korozyonu engeller veya en aza indirir,
- Yorulma ve tekrarlı yük dayanımı,

Yapıştırma bağlantılarının olumsuz yanları:

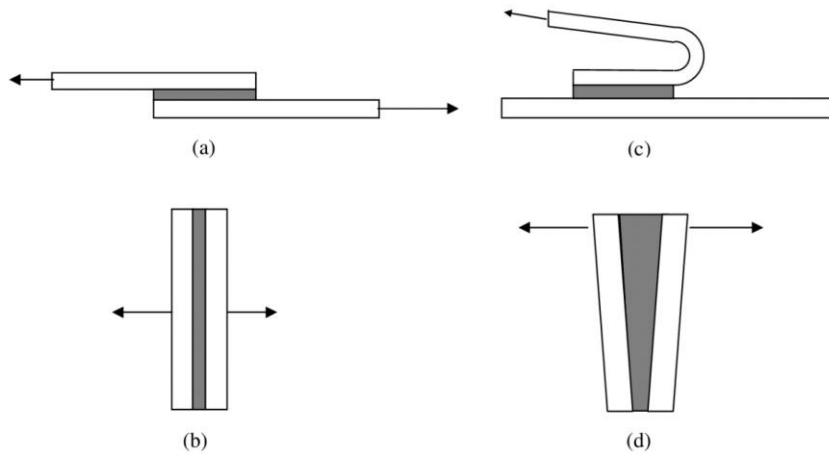
- Yapışma, yapıştırma alanını görsel olarak incelenmesine izin vermez (yapıştırılan malzeme şeffaf olmadıkça) (DeLollis N. J. 1970),
- Dikkatli yüzey hazırlama, genellikle korozif ortamlarda yüksek yapıştırma dayanımı elde etmek için gereklidir,
- Uzun kürleşme süreleri gerekli olabilir, özellikle yüksek kürleşme sıcaklıklarında kullanılmazlar,



Şekil 4.6. a) kaynaklı, b) perçinli ve c) yapıştırma bağlantılarında gerilme dağılımları

4.7. Yapışma Bağlantılarında Oluşan Gerilmeler

Yapıştırma bağlantılarında dört önemli gerilme etkili olur (Şekil 4.7.). Bunlar; kayma (shear), çekme (butt), soyulma (peel) ve çekme-makaslama (cleavage) dır.



Şekil 4.7. Gerilme tipleri (a) kesme (b) çekme (c) soyulma (d) çekme-makaslama

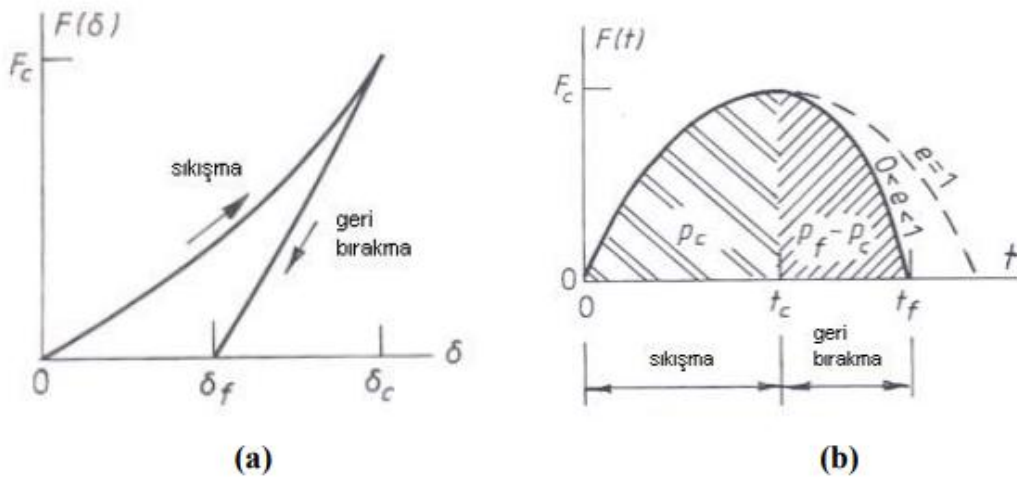
5. DÜŞÜK HIZLI DARBE VE HASAR ANALİZİ

5.1. Düşük Hızlı Darbenin Mekanîği

İki nesnenin yüzeyleri çarpıştığında, küçük bir temas alanı üzerindeki basınç artar. Temasın her anında, temas alanındaki basınç yerel bir bozulma ve devamında bir nüfuziyet oluşturur. Darbenin her bir anında, temas basıncı çarpışan iki cisimde zıt doğrultularda etki eden bir etki veya tepki bileşke kuvvetine sahiptir. Bu sayede cisimlerin birbirine geçmesine karşı direnç oluşur. Başlangıçta iç içe geçmenin artmasıyla kuvvet de artar ve bunun neticesinde birbirine yaklaşan cisimlerin hızı azalır. Darbede belli bir zamandan sonra temas kuvvetlerinden dolayı her iki cismin sürati sıfır olur ve sonuç olarak sıkışma sırasında depolanan enerji iki cismin birbirinden ayrılmasını ister, sonunda bu cisimler birbirlerinden belli bir izafi hızla ayrılırlar. Katı cisimler arasındaki çarpışmalar sırasında, çarpışma üzerine uygulanan temas kuvveti, iki cismin yüzeylerinin bir temas bölgesi oluşturması için gereken yerel deformasyonların sonucudur. Darbe esnasında ortaya çıkan yerel deformasyonlar çarpışan cisimlerin sertliğine bağlı olduğu gibi temas başlangıcındaki izafi çarpma hızına bağlı olarak ta değişir. Küçük deformasyonlara neden olan temas basınçlarını düşük hızlı çarpışmalar doğurur. Bunlar temas alanının yakınlarındaki küçük bir bölgede önemlidir. Yüksek hızlarda temas alanının yakınlarında plastik akmadan kaynaklanan büyük birim şekil değiştirmeler vardır. Bu büyük yerel deformasyonlar, krater oluşturma ve dalma şeklinde büyük belirginlikte olup kolaylıkla gözlenebilir. Deformasyonlar, her iki durumda da çarpışan cisimlerde hız değişimine neden olan temas kuvvetlerinin bir parçasıdır. Çarpma hızı $10^2 \times V_y$ ile $10^3 \times V_y$ arasındaki hızlar büyük plastik deformasyonlara neden olacaktır. V_y olarak bahsedilen hız yumuşak bir cisimde plastik akmayı başlatmak için gerekli en düşük izafi hız olup metaller için akmadaki normal çarpma hızı 0,1 m/s civarındadır. (Stronge 2000).

5.1.1. Çarpışmanın sıkışma ve geri bırakma aşamaları

Temas kuvveti olan $F(t)$ çarpışan cisimlerin ilk temasından sonra şekil değiştirebilen parçacık sıkıştırıldıkça yükselir. δ olarak şekil değiştirebilen parçacığın batması veya sıkışması tanımlansın. Çarpışan cisimlerin basınç değişiminden kaynaklı hacim değişikliği hakkında ayrıntılı bilgiye girmeden, δ yı doğrudan elde etmenin bir yolu yoktur. Eğer kompliyans hız ile ilişkili ise en büyük batma ve en büyük kuvvet izafi hızın normal bileşeninin sıfır olduğu zamanda meydana gelir. Şekil 5.1a da normal temas kuvveti batmanın bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Şekil 5.1b ise bu kuvveti zamanın bir fonksiyonu olarak gösterirken sonraki grafik temas süresinin yaklaşımın başlangıç aşaması veya sıkışma aşaması ile takip eden geri bırakma aşamasına ayrılmasını göstermektedir. Sıkışma anında, kinetik enerji temas kuvvetleri sayesinde deformasyon iç enerjisine dönüştürülür. Eşit ve zıt temas kuvvetleri, deforme olmuş parçacığın iç gerilme enerjisini artırma etkisine sahipken, temas kuvveti çarpışan cisimlerin başlangıçtaki normal bağlı hızlarını azaltır. Temas noktasının normal izafi hızı sıfır olduğunda sıkışma aşaması sona erer ve geri bırakma başlar. Devam eden geri bırakma aşaması esnasında, iç enerjisinin elastik kısmı bırakılır. Sıkışma anında biriktirilen elastik zorlanma enerjisi geri bırakma sırasında cisimleri birbirinden ayırmaya zorlayan bir kuvvet meydana getirir. Bu kuvvetin yaptığı iş, kinetik enerjinin bir miktarını yerine koyar.



Şekil 5.1. (a) izafi yer değiştirme δ nın (b) zaman t nin bir fonksiyonu olarak normal temas kuvveti F (Stronge 2000)

Geri bırakma esnasında deforme olabilen bölgenin şekli, sıkıştırma sırasındakinden daha küçüktür, bu nedenle temas bittiği anda deforme olabilen tanenin bir kalıcı bir sıkışması δf bulunur.

Çarpmadan sonra herhangi bir t anında temas kuvveti F nin normal bileşeninin Şekil 4.1b deki eğrinin altında kalan alana eşit olan bir impulsu vardır(Stronge 2000).

5.1.2. Normal temas kuvvetinin işi

Sıkışma ve geri bırakma aşamalarında normal temas kuvvetinin yaptığı iş, sıkışma esnasında uygulanan impuls p_c ile ayrılmadaki son impuls p_f arasında bir bağıntı verir. Sıkışma zamanında normal temas kuvveti şekil değiştirebilen parçacık üzerinde bir iş yapar. Bu iş parçacıkta bozulmaya neden olur ve iç enerjisini artırır. Muhtemeldir ki, parçacığı sıkıştıran kuvvetin bir eşi olan fakat zıt yöndeki kuvvet sıkışma esnasında normal izafi hareketin kinetik enerjisini düşürür. Parçacığın sıkışmasında emilen enerjinin bir kısmı, geri bırakma esnasında eski haline gelebilir. Elastik zorlanma enerjisi olarak bilinen enerjinin eski haline gelebilen bu kısmıdır(Stronge 2000). Kuvvetin impuls'un türevi $dp = F dt$ ile bağıntılı olduğu anımsanarak F kuvvetinin normal bileşeninin sıkışabilir parça üzerinde yaptığı iş W_d hesaplanabilir:

$$W_d = \int_0^t F v dt' = \int_0^p v dp' \quad (5.1)$$

5.2. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı

Darbe, bir malzemeye veya yapıya düşük, orta ve yüksek hızlarda çok kısa bir süre için uygulanan anlık dış kuvvet olarak tanımlanır. Bir malzemenin maruz kalabileceği darbeler, uygulama yerine ve kullanım amacına bağlı olarak çeşitli şekillerde olabilir. Genel olarak darbeler düşük hızlı ve yüksek hızlı olarak sınıflandırılır ancak bu kategoriler arasında net bir geçiş yoktur. Şimdiye kadar yapılan araştırmalar bu geçişin belirlenmesinde henüz net bir sonucun elde edilemediğini göstermektedir. Bu konuda yapılan çalışmalardan bir kaçında düşük hızlı darbeyi, hedefin ve çarpan cismin rijitliğine, malzeme özelliklerine ve çarpan cismin kütlesine bağlı olarak 1 ila 10 m/s arasında değişen hızlar olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır (Mili, F., Necib, B. 2001). Kompozit malzeme üzerine herhangi bir nedenle bir parçanın düşmesi

düşük hızlı darbeye örnek verilebilir. Düşük hızlı darbelerde çarpışma temas anında malzeme içyapısında deformasyon oluşur. Düşük hızlı darbede, malzemenin içyapısında darbeye karşı tepki verebilmek için gerekli olan temas süresi yeterlidir. Bu yüzden hedefin dinamik yapısal cevabı çok büyük bir öneme sahiptir (Ceyhun, V., Turan, M. 2003).

Darbe tepkisi malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Spesifik olarak metaller ve metal alaşımları söz konusu olduğunda, malzemenin darbeye tepkisi; elastik esneme ve plastik deformasyon ile oluşur ve darbe hasarı genellikle darbe yüzeyinde başlar başlamaz kolayca tespit edilebilir. Metal malzemelerde darbe hasarı çoğunlukla bir tehlike olarak görülmez, çünkü metaller plastik şekil değiştirebilme kabiliyetleri sebebiyle, büyük miktarda enerjiyi yutabilirler. Metaller, yapı sürekli stres durumunda sertleşmeden çok büyük uzamalarla akabilir, böylece oluşacak arızalar ani ve beklenmedik olmaz. Darbe sonrası kompozitlerde hasar, darbenin tipine bağlı olarak darbeli yüzeyde veya darbeye maruz kalmayan yüzeyde oluşabilmekte ve iç yapıda delaminasyon (sınıflar arası ayrılma) ile başlayabilmektedir. Bundan dolayı kompozit malzeme veya yapı üzerine gelebilecek düşük veya yüksek hızlı darbelerin, malzeme veya yapıda oluşturacağı hasarı önceden tahmin etmek, simülasyonunu yapmak ve bunlara ait dinamik özelliklerin tespit edilmesi gerekmektedir.

5.3. Darbe Testleri

Kompozit malzemelerin darbe karakterizasyonu için farklı ülkeler, kuruluşlar ve araştırmacılar arasında evrensel olarak kabul edilmiş veya standartlaştırılmış bir test tekniği yoktur. Bu sebepten dolayı, farklı kaynaklardan alınan sonuçlar karşılaştırılarak, kompozit malzemelerin darbe cevabına uygun bir model geliştirmek istendiğinde problem yaratmaktadır. Bu sınırlamalara rağmen, kompozit malzemelerin darbe davranışını belirlemek için çeşitli test yöntemleri ve cihazları artık yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar:

- Sarkaç testleri (Izod, Charpy ve Pendulum)
- Ağırlık düşürme testleri

5.3.1. Sarkaç testleri

Charpy ve Izod darbe deneylerinde çentik açılmış bir deney parçası, belirlenmiş bir yükseklikten bırakılan bir sarkaç yardımı ile darbeye maruz bırakılır. Deney parçasına darbe uygulandıktan sonra sarkacın tepki sonucunda çıktığı yükseklik belirlenerek sarkacın ilk ve son konumdaki enerji farkı deney parçası tarafından yutulan darbe enerjisi olarak ölçülür. Malzemenin darbe direnci veya tokluğu yüksek ise darbe sonrası sarkacın yüksekliği azdır. Charpy ve Izod test metodları küçük farklılıklar haricinde benzer özelliktedirler. En önemli farklılıkları, numunenin desteklenme şekli ile çentiğin destek ve darbe noktalarına göre konumudur. (Ceyhun, V., Turan, M. 2003).

Sarkaç darbe testi ağırlık düşürme darbe testine göre bazı üstünlükleri olan bir test sistemidir. Bu sistem, aynı ağırlık sınıfı için küçük darbe enerjilerinden veri toplamının yanı sıra darbe ve geri tepme hızlarını ölçmede güvenilir olma avantajına sahiptir.

5.3.2. Ağırlık düşürme darbe testi

Ağırlık düşürme darbe testi yöntemi, İzod ve Charpy test yöntemlerinin yerine malzemelerin dinamik özelliklerini belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Izod ve Charpy test metodlarında darbenin sınırı bellidir. Ağırlık düşürmeli darbe test metodunda deney parçasına çarpma hızı ve darbe enerjisi istenildiği gibi ayarlanabilir. Buda ağırlığın ve yüksekliğin istenildiği gibi değiştirilerek numune üzerine düşürülmesi ile sağlanabilir. Ayrıca bu yöntem ile deney parçasına saplanma, delinme ve tekrarlı darbe testleri de yapılabilir.

Bu test cihazlarının bazıları yer değiştirmeyi veya ivmeyi ölçmektedirler. Bu şekilde çarpma anındaki yükün, yer değiştirmenin ve ivmenin değişimi kaydedilir. Elde edilen sonuçlar, darbe yükü-zaman ve darbe enerjisi-zaman değişimlerine dönüştürülebilir. Bu dönüşümler sayesinde, tepe noktadaki yük ve soğurulan enerji gibi özellikler malzemede oluşan kırılma işlemiyle ilişkilendirilebilirler. Böyle bir cihaz platformlarla desteklenen numune, tüp içerisine yerleştirilen yük ölçme sensörü, çarpışmadan hemen önceki tüp hızını ölçmeye yarayan fotoelektrik hücreler ve darbeyi görüntülemek için kullanılan yüksek hız kamerasından oluşmaktadır (Ceyhun, V., Turan, M. 2003).

Kompozit malzemelerin darbe özelliklerini darbe test cihazı, çarpan cismin karakteristiği, çarpan cismin hızı ve kütlesi, numunenin yapılandırması etkilemektedir.

Bu sebeple kompozit malzemelerin darbe özelliklerinden bahsettiğimiz zaman tüm bu kriterlerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Ceyhun, V., Turan, M. 2003).

6. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada epoksi matrisli karbon kumaş takviyeli üç farklı kalınlıkta (6,8,10 mm) kompozit levhalar yapıştırılan malzeme olarak seçilmiştir. Seçilen kumaşlar 90° açılarla dokunmuş elyaf demetlerinden üretilmiştir. 24 kat kumaştan 6 mm, 32 kat kumaştan 8 mm ve 40 kat kumaştan 10 mm kalınlıklarda üretilmiştir. Katmanda kumaş 250 gr/m² özgül ağırlıkta ve kumaşları oluşturan lifler 5µm çaptadır. Kompozitsan marka kompozit levhalar kullanılmıştır.

6.1.Yapıştırıcının Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan kompozit levhalardaki matris malzemesinin aynısı olana Fibermak F-1564 reçine ve F-3486 sertleştirici kullanılmıştır. Kullanılan reçine Şekil 6.1 de görülmektedir. Üretici tarafından sertleştirici karışım oranı ağırlıkça %34 olarak belirtilmiştir. Önerilen yapıştırıcı kürlenme süreleri ise Tablo 6.1 de verilmiştir.

Tablo 6.1. Reçine kürlenme süresi

KÜRLENME	SICAKLIK °C	SÜRE
	23	2 GÜN
	80	4 SAAT
	100	2 SAAT

Bu çalışmada kullanılan nano parçacık takviyeli yapıştırıcılar ve ağırlıkça içerikleri Tablo 6.2 de verilmiştir.

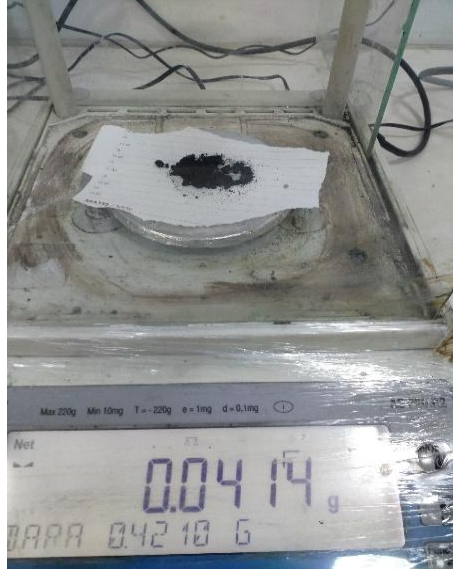
Tablo 6.2. Yapıştırıcı içerikleri

DENEY PARÇASI	İÇERİĞİ (Ağırlıkça)
E	%100 EPOKSİ
GR	%0,3 GRAFEN+%99,7 EPOKSİ
CNT	%0,3 KARBON NANOTÜP+%99,7 EPOKSİ
HİBRİT	%0,15 KARBON NANOTÜP+%0,15 GRAFEN+%99,7 EPOKSİ



Şekil 6. 1. Çalışmada kullanılan reçine

Öncelikle çekme deney parçalarını dökmek için gerekli miktardaki yapıştırıcı hazırlığı yapılmıştır. Çekme deney parçalarını dökeceğimiz kalıbın hacmine uygun miktarda reçine behere alınmıştır. Saf epoksi için herhangi bir işlem yapılmamıştır. Reçineye üretici firma tarafından belirtilen ağırlıkça %34 oranında sertleştirici hassas terazi yardımıyla ilave edilmiş ve karıştırıcı yardımıyla karıştırılarak deney parçaları hazırlanmıştır. Nano parçacık takviyeli üç yapıştırıcı içinde reçineler uygun miktarda ayrı ayrı beherlere alınmıştır. Hassas terazi yardımı ile Tablo 6.2. de ağırlıkça oranları belirtilen nano parçacıklar reçinelere ilave edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6. 2. (a) Nano parçacıkların oranlarının hassas terazi ile belirlenmesi (b) sertleştirici oranlarının hassas terazi ile belirlenmesi

Nano parçacık ilave edilen reçineler Şekil 6.3. te görülen ultrasonik karıştırıcı yardımıyla 15 dakika buz ilave edilmiş kap içerisinde karıştırılmıştır. En son beherlere ağırlıkça %34 oranında sertleştirici eklenmiş ve karıştırıcı yardımı ile karıştırılarak deney parçaları dökülmüştür.

Çekme deney parçaları Şekil 6.4 te görülen kalıp yardımı ile dökülmüştür. Her bir yapıştırıcı için üç adet çekme deney parçası hazırlanmıştır. Reçinenin imalatçı firma tarafından belirtilen kürlenme süresi için 23 °C sıcaklıkta 2 gün olacak şekilde parçalar bekletilmiştir. Parçalar kalıptan çıkarılıp temizliği yapılarak deneye hazır hale getirilmiştir.



Şekil 6. 3. Ultrasonik karıştırma işlemi



Şekil 6.4. Çekme deney parçası kalıbı

6.2.Çekme Testleri

Çekme deney parçaları hazırlanmış olan yapıştırıcıların mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme testi yapılmıştır. Dört farklı yapıştırıcı için 12 adet deney parçasına Şekil 6.5 te görülen Shimadzu marka çekme test cihazı kullanılarak 2mm/dk hızında ve oda sıcaklığında çekme testleri uygulanmıştır.



Şekil 6.5. Çekme test cihazı

Gerilme ve birim şekil değiştirme değerleri sayısal olarak elde edilmiş ve sonuçlar kısmında grafik olarak sunulmuştur.

6.3.Darbe Deneyi

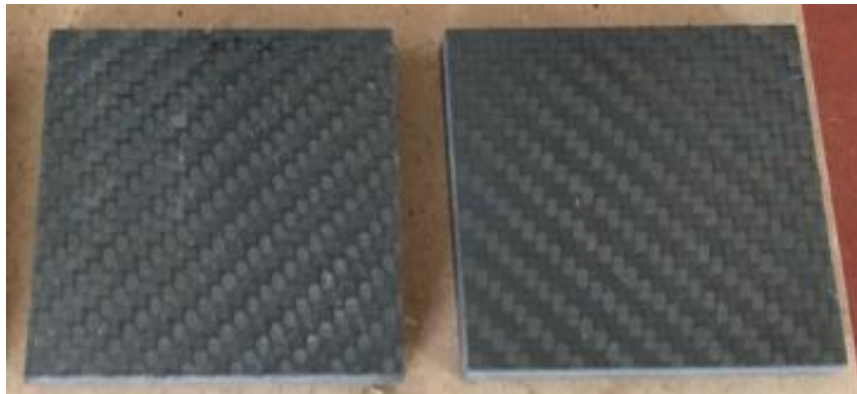
Bu çalışmada yapıştırma bağlantısının tokluğuna kompozit malzeme kalınlığının ve yapıştırıcıya eklenen nano parçacıkların etkisi incelenmek hedeflenmiştir. Çalışmada 6, 8 ve 10 mm olarak 3 farklı kalınlıkta levha 50x50 mm boyutlarda kesilerek T birleştirme olacak şekilde yapıştırılmıştır. Deney çalışmalarında karbon fiber elyaf takviyeli epoksi kompozit parçalar hazır üretilmiş levhalardan kullanılmıştır.

Yapıştırıcıya ilave edilen nano parçacıklar ise daha önceki çalışmalar incelenerek ağırlıkça karbon %0.3 karbon nanotüp ve %0.3 grafen olarak eklenmiştir. Tablo 6.2. de ağırlıkça oranları verilmiş olan nano parçacıkların yapıştırıcı tokluğuna etkisi sonuçlarda görülmüştür.

Darbe testlerine uygun modellenen birleştirme parçaları sonlu elemanlar yöntemi ile Ansys analiz programında analiz edilmiştir.

6.3.1.Darbe deney parçalarının hazırlanması

Deney parçaları kompozit levhalardan her kalınlık için 5 adet olacak şekilde alt parça ve üst parça 50x50 mm ölçüsünde dairesel testerede kesilmiştir. 4 yapıştırıcı için toplam 60 takım deney parçası kesilmiştir Yapıştırılacak yüzeylere istenilen yüzey pürüzlülüğünü verebilmek için 200 grid zımpara kâğıdı ile zımparalama işlemi yapılmıştır. Yapıştırma yüzeylerinden karbon siyahlığı gidene kadar parçalar aseton ile temizlenip parça hazırlıkları tamamlanmıştır.



Şekil 6.6. 50x50 mm kesilmiş kompozit levha

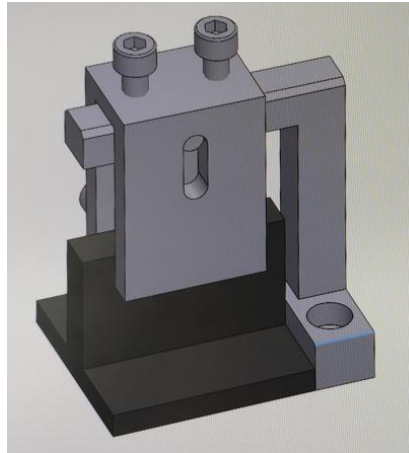


Şekil 6.7. Kompozit levha yüzey temizleme işlemi

6.3.2. Darbe deney parçalarının yapıştırılması

Darbe deney parçalarının yapıştırılması için yapıştırıcı hazırlığı başlık 6.1 kısmında anlatılan işlemler aynı şekilde tekrar edilmiştir. Tablo 6.2 de belirtilen dört yapıştırıcı çeşidi uygun oranlarda tekrar hazırlanmıştır.

Yapıştırıcı kalınlığının ayarlanabilmesi için de parçaların bağlanabildiği özel bir aparat tasarlanıp imal edilmiştir. Şekil 6.8’ de bu aparatın 3D tasarımı görülmektedir. Bu aparattan 15 adet üretilmiştir. Her bir yapıştırıcı çeşidi için üç kalınlıkta 15 deney parçası yapıştırılıp kürlenme süresi beklenmiştir. Bu işlem 4 yapıştırıcı için tekrarlanmıştır. Toplamda 60 adet deney parçası yapıştırılmıştır.



Şekil 6. 8. Yapıştırıcı kalınlığı ayarı için tasarlanan aparat

Deney parçaları Şekil 6.9.da görüldüğü gibi alt ve üst parça arasında boşluk oluşacak şekilde kontrol edilerek bağlanmıştır. Üst parça bağlantı aparatına vida ile sabitlenirken alt parça serbest hareket edebilecek şekildedir.



Şekil 6. 9. Parçalar arası boşluk kontrolü

Şekil 6.10 da görüldüğü gibi komparatör saati ile bağlantı aparatının işlenmiş üst yüzeyinden sıfırlama ölçümü yapılmıştır. Daha sonra yükseklik ayar vidaları yardımı ile üst parça ve alt parça arasında 0,2 mm boşluk oluşturulmuştur. Boşluk komparatör saati ile kontrol edilmiştir. Böylece tüm yapıştırma işlemleri için yapıştırıcı kalınlığı 0.2mm olmuştur.

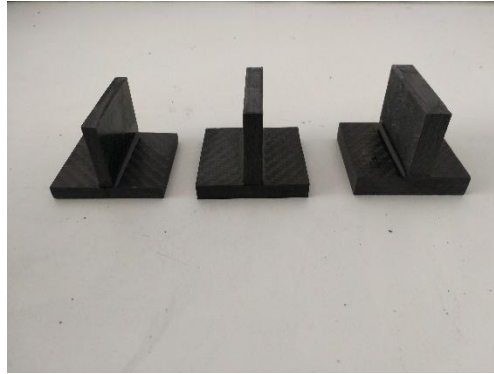


Şekil 6. 10. Plakalar arasındaki boşluğun ayarlanması

Daha sonra serbest olan alt parça dışarı alınıp üst parçanın denk geldiği hizaya yapıştırıcı sürülerek üst parçanın altına yerleştirilmiştir. Bu sayede yapıştırıcı kalınlığının her deney parçasında aynı olması hedeflenmiştir.



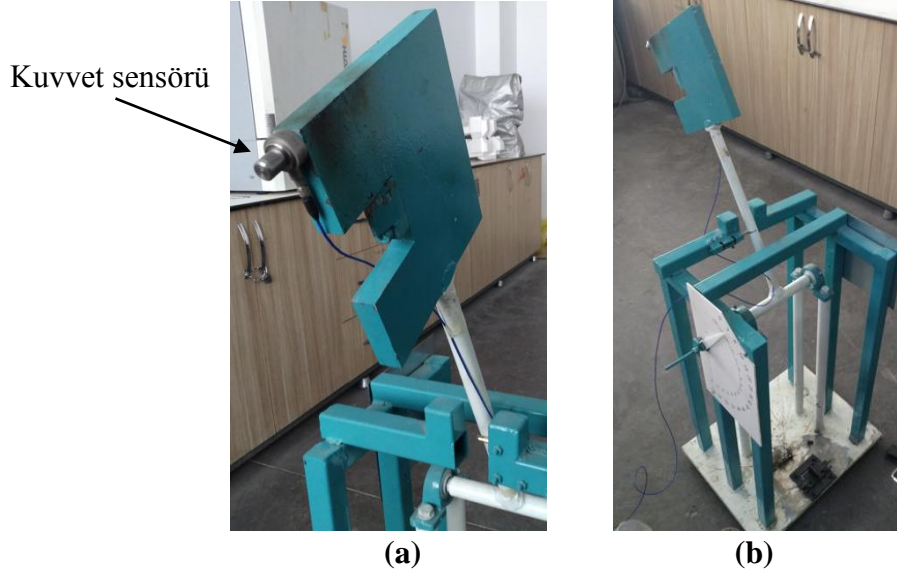
Şekil 6. 11. Yapıştırıcının plakalar arasına sürülmesi



Şekil 6. 12. Yapıştırılmış darbe deney parçaları

6.3.3. Darbe deneyi düzeneği

Hazırlanan numunelerin darbe deneyi için bir Charpy test cihazı üzerinde revizyonlar yapılmıştır. Parça kalınlıkları göz önüne alınarak kuvvet sensörünün bağlantısına uygun vurucu uç imal edilmiştir. Kuvvet sensörü olarak PCB PIEZOTRONICS marka M202B model kullanılmıştır. Kuvvet sensörünün bağlantısı için test cihazı çekiç kısmına delik delinip kılavuz çekilerek kuvvet sensörü çekiç ve vurucu uç arasına bağlanmıştır.



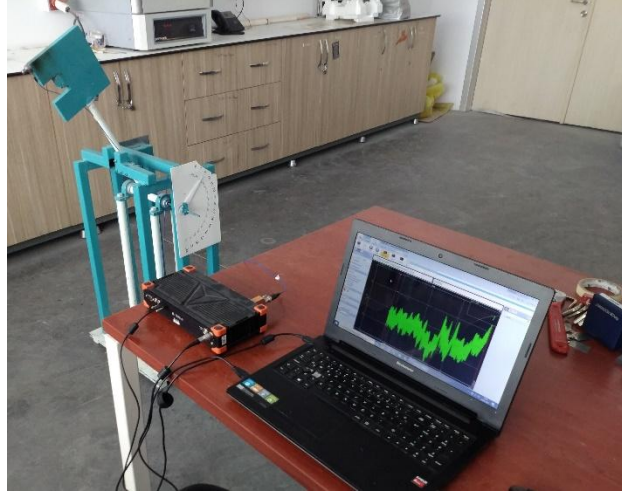
Şekil 6. 13. (a) Kuvvet sensörü (b)Darbe test cihazı

ASTM D0950-03 standardında yapıştırma bağlantılarının darbe dayanımının testiyle ilgili bazı kurallardan söz edilmektedir. Bu standartta yer alan deney düzeneği Charpy test cihazına uyarlanarak darbe testleri yapılmıştır.

Deney parçalarının test cihazına bağlantısı Şekil 6.14 de görüldüğü gibi yapılmıştır. Deney parçasının alt parçası ortası boş olan bir plakanın ön yüzüne bastırılmıştır. Alt parça kenar boşluklarından test cihazının zeminine vidalı ayarlanabilir mengenerler ile sabitlenmiştir. Hazırlanmış 60 adet deney parçası için tek tek bağlantı yapıp darbe uygulanmıştır. Darbe deneylerinin kuvvet-zaman grafiği kuvvet sensörü ve DEWESOFT veri toplama cihazı sayesinde elde edilmiştir.

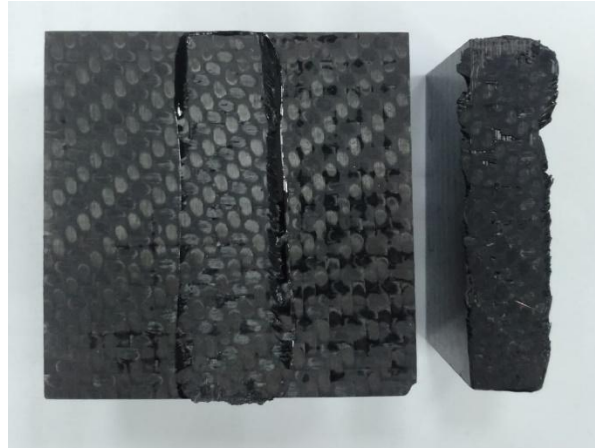


Şekil 6. 14. Parçaların test cihazına bağlantısı



Şekil 6. 15. Test cihazı ve veri toplama sistemi

Darbe sonrası alt ve üst parçanın yapıştırılmış yüzeylerinin görüntüsü Şekil 6.16 da görülmektedir. Kopmuş yüzeyin SEM görüntüsü sonuçlar kısmında sunulmuştur. Ayrıca dört yapıştırıcı için elde edilen kuvvet-zaman grafikleri de sonuçlar kısmında sunulmuştur.

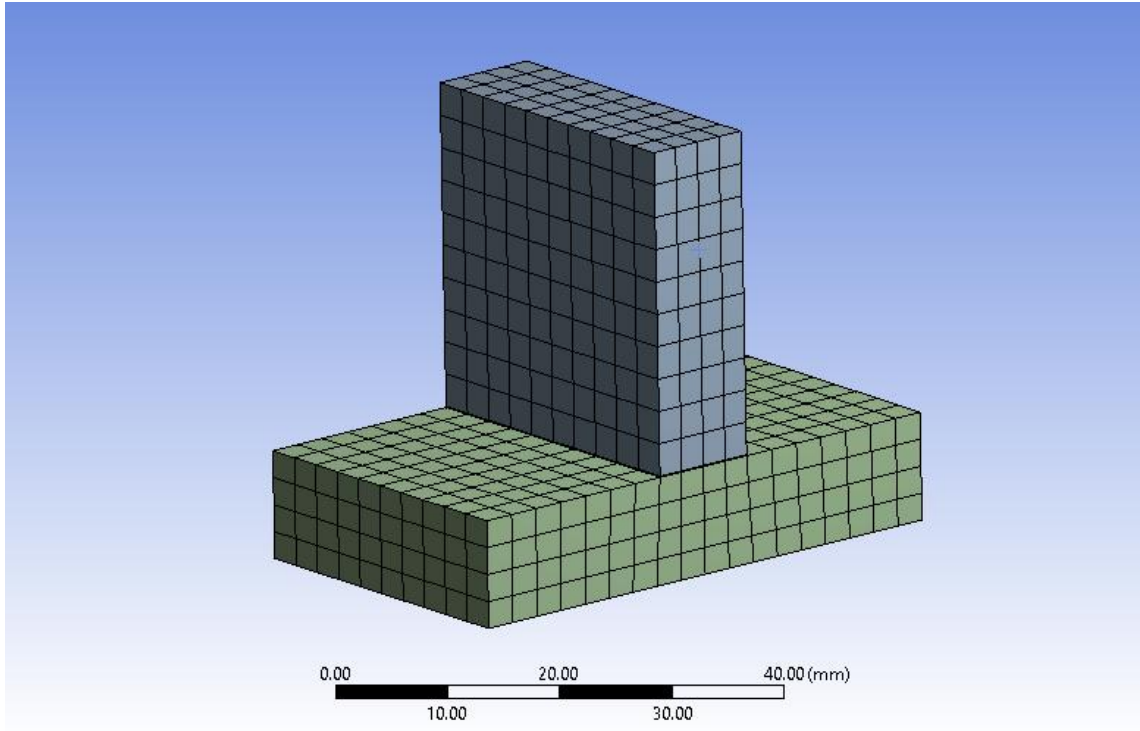


Şekil 6. 16. Darbe sonrası yapıştırma yüzeylerinin görüntüsü

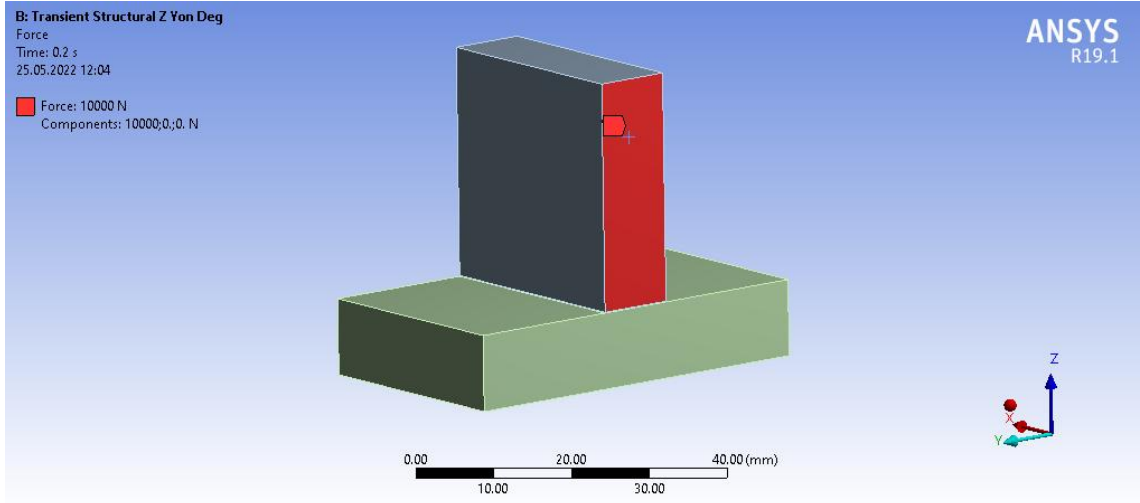
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Teorik Sonuçlar

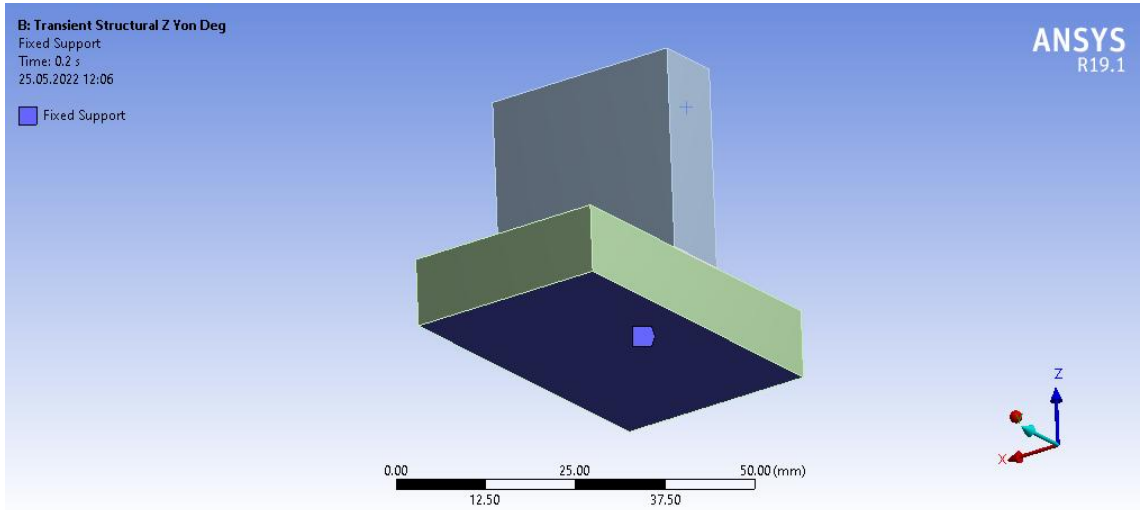
Deneysel çalışmada kullanılacak kompozit malzeme kalınlıklarının belirlenmesi için teorik çalışmalar Ansys analiz programı ile yapılmıştır. Alt ve üst plakalar karbon kumaş ile güçlendirilmiş epoksi kompozit levha birleşme yeri ise epoksi olarak seçilmiştir. Tüm çözümlerde eleman boyutu (mesh size) 3 mm olarak seçilmiştir. Alt plakanın alt yüzeyi yer değiştirmesiz, üst plakanın yan yüzeyine ise yayılı yük etki edecek şekilde çözüm yapılmıştır. Farklı plaka kalınlıklarına göre çözüm sonucunda oluşan büyük yer değiştirme ve gerilmelere ait analiz sonuçları Şekil 7.4-9 da sunulmuştur.



Şekil 7. 1. Eleman boyutu (mesh size) belirleme

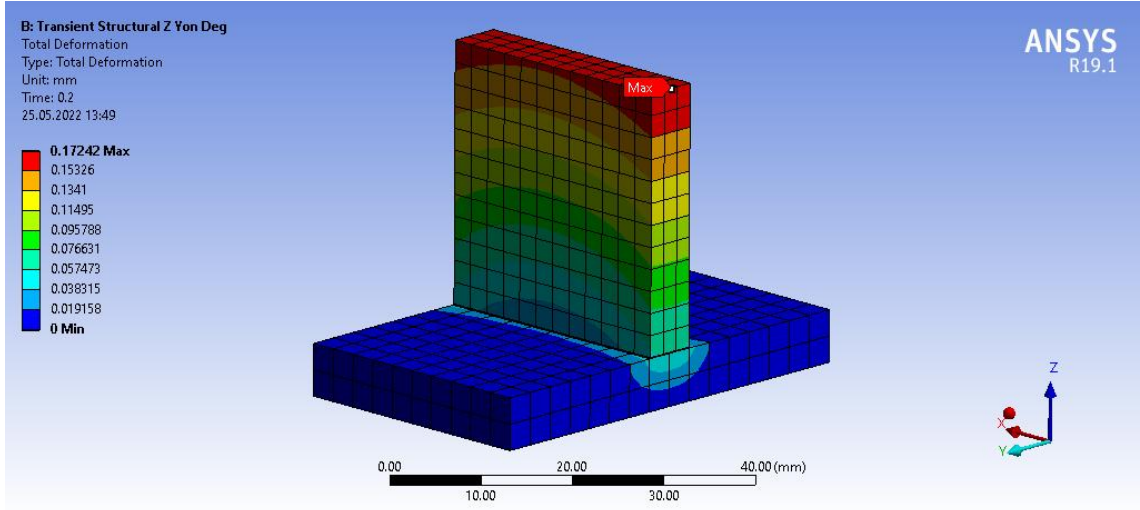


Şekil 7. 2. Üst plaka yan yüzeyine uygulanan yayılı yük

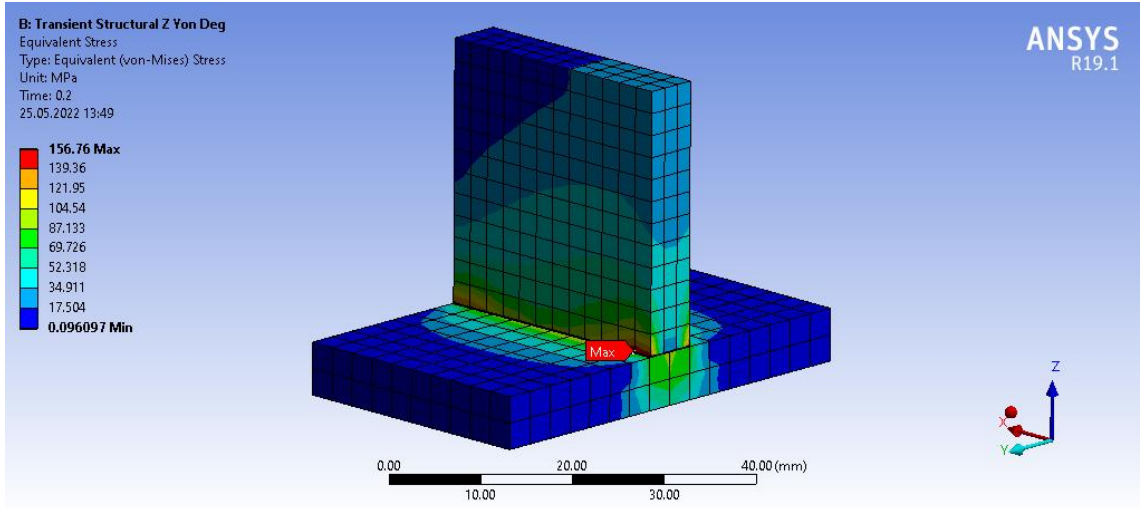


Şekil 7. 3. Alt plaka yer değiştirmesiz yüzey seçimi

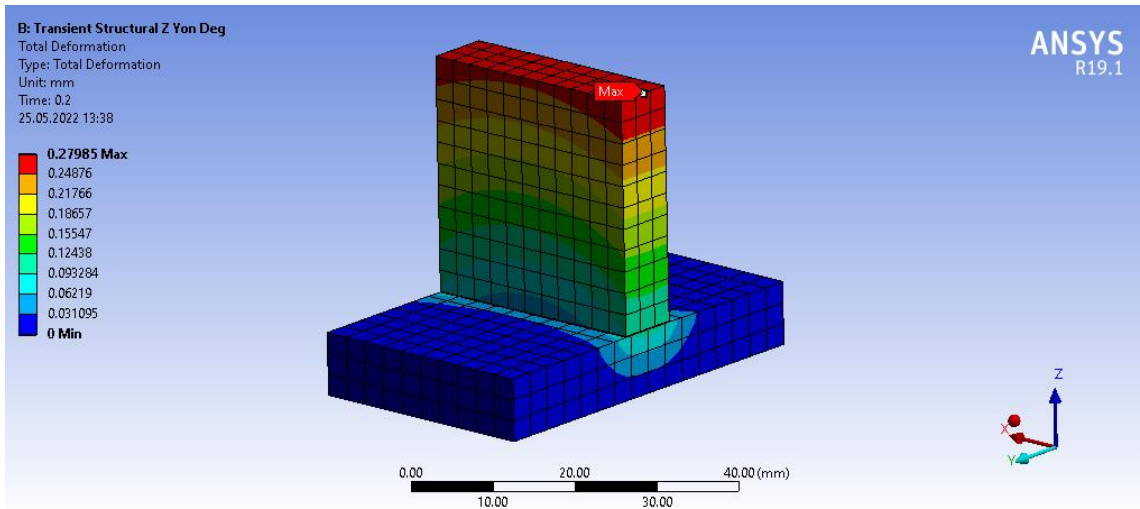
Analizlerde darbe testlerinde farklı plaka kalınlıkları için elde edilen en büyük kuvvet değerleri kullanılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen en büyük yer değiştirme ve en büyük gerilme değerleri bu kuvvetlere karşılık bulunmuştur.



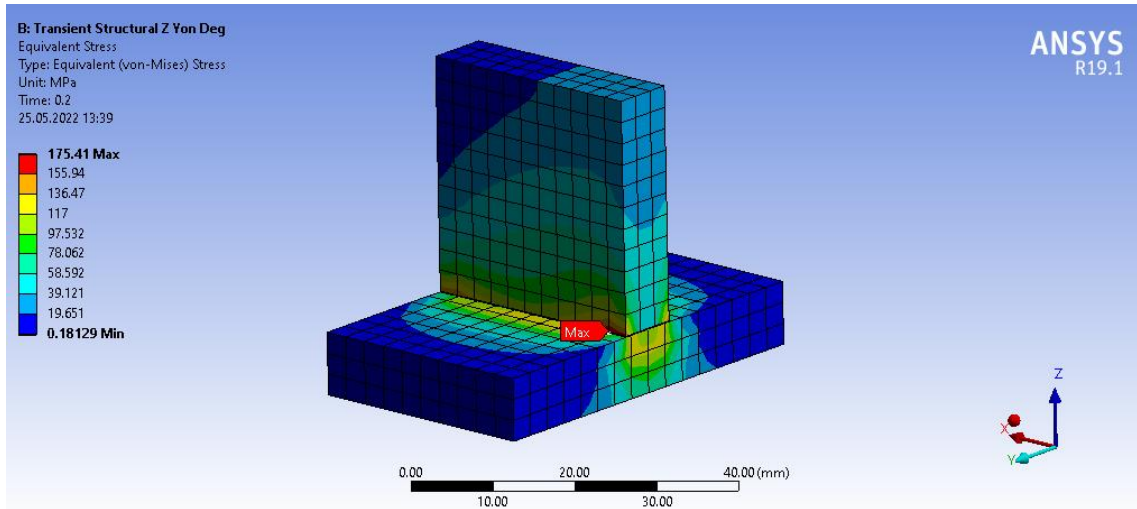
Şekil 7. 4. 6 mm kalınlıklı plakada oluşan toplam yer değiştirmeler



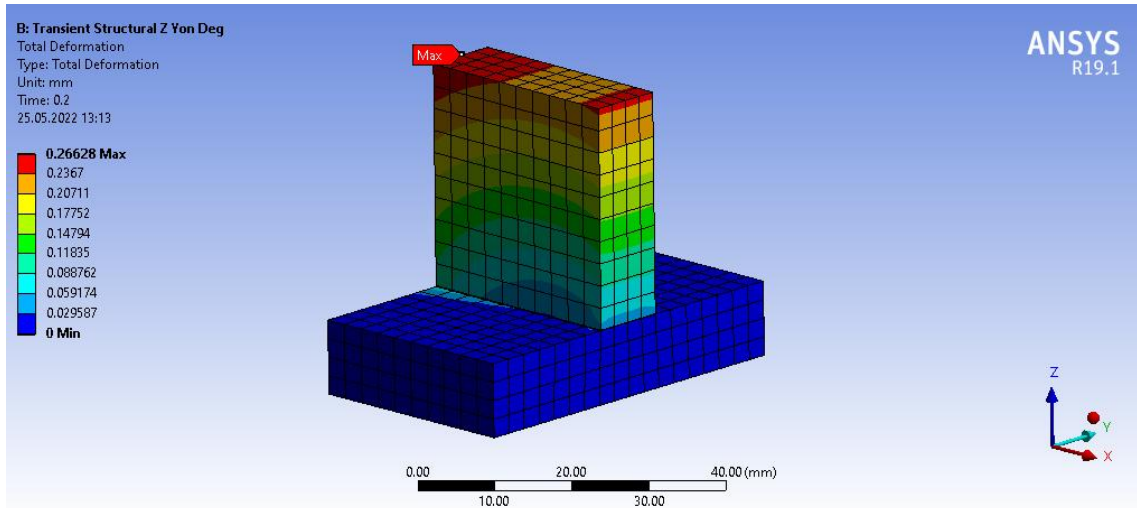
Şekil 7. 5. 6 mm kalınlıklı plakada oluşan en büyük gerilme



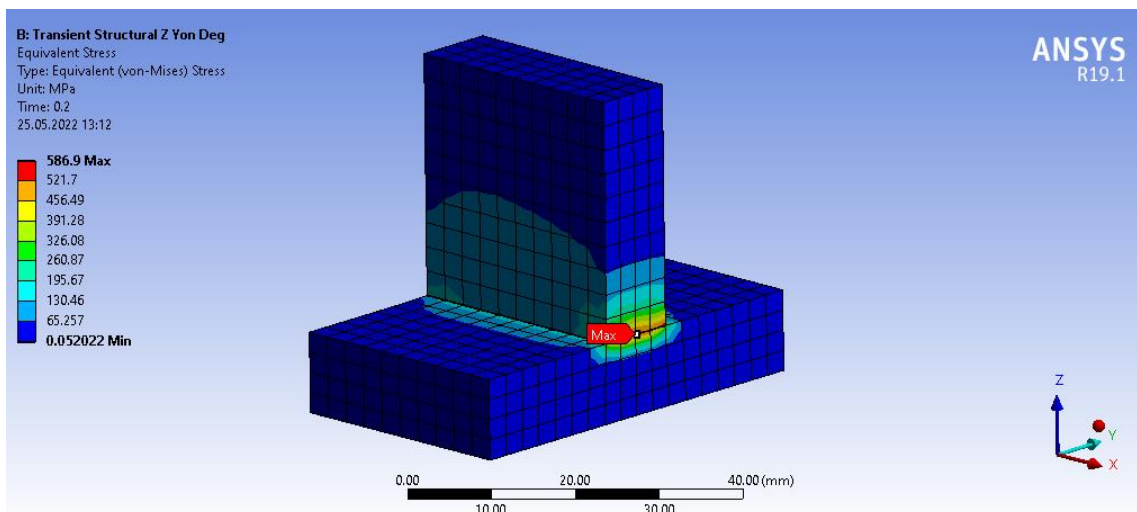
Şekil 7. 6. 8 mm kalınlıklı plakada oluşan toplam yer değiştirmeler



Şekil 7. 7. 8 mm kalınlıklı plakada oluşan en büyük gerilme



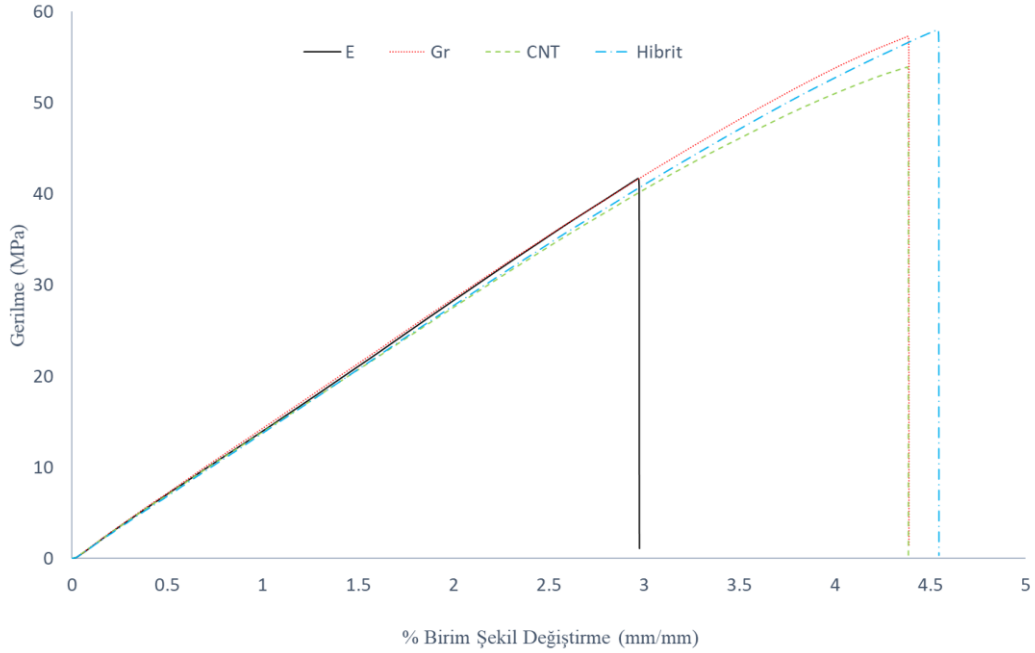
Şekil 7. 8. 10 mm kalınlıklı plakada oluşan toplam yer değiştirmeler



Şekil 7. 9. 10 mm kalınlıklı plakada oluşan en büyük gerilme

7.2. Çekme Testi Sonuçları

Yapıştırıcıların çekme testi sonucundaki gerilme ve birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 7.10 da görülmektedir.



Şekil 7.10. Çekme deneyi sonuç grafiği

Bu grafiği incelediğimizde epoksi yapıştırıcının çekme dayanımı 41 MPa iken ağırlıkça %0,3 grafen katkılı nanokompozit yapıştırıcının dayanımı 58 MPa kadar yükselmiştir. Ayrıca ağırlıkça %0,15 grafen ve %0,15 karbon nanotüp takviyeli nanokompozit yapıştırıcının (hibrit) çekme dayanımı 58 MPa olarak bulunmuştur. Şekilde görüldüğü gibi en büyük birim şekil değiştirme epoksi yapıştırıcıda %3 mm/mm olarak elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre en küçük kopma gerilmesi 41 MPa ile saf epoksi yapıştırıcı malzemeye aitken en büyük kopma gerilmesi 58 MPa ile hibrit nano kompozit malzemeye aittir. Aynı şekilde en küçük birim şekil değiştirme %3 mm/mm saf epoksi yapıştırıcı için görülürken en büyük birim şekil değiştirme %4,5 mm/mm hibrit nano kompozit malzemede görülmüştür. Buna göre hibrit nano kompozit malzeme epoksi ile karşılaştırıldığında çekme dayanımında %41 en büyük birim şekil değiştirmede ise %50 artış elde edilmiştir.

Bu çalışmadan beklenen bir diğer önemli sonuç ise yapıştırıcıların tokluk değerleridir. Tokluk malzeme kırılıncaya kadar harcadığı enerjiyi ifade eder. Gerilme-

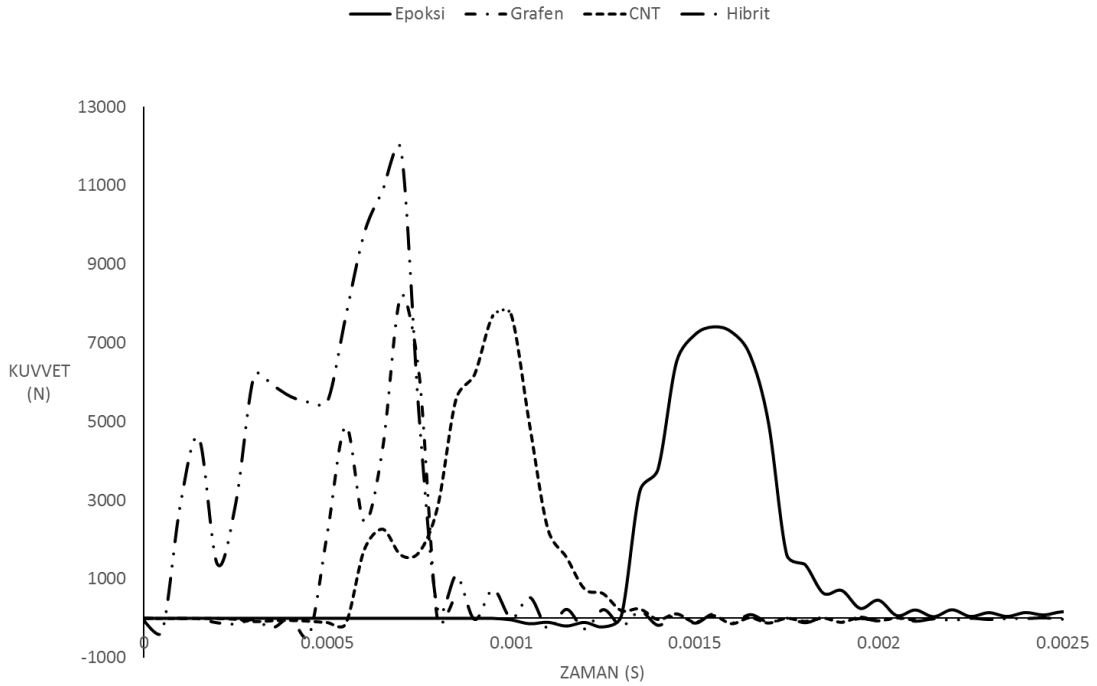
birim şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alandır. Deney parçalarının hesaplanan tokluk değerleri Tablo 7.2 de verilmiştir.

Deney Parçası	Tokluk ($\times 10^4 \text{ J/m}^3$)
E	62.36
Gr	133.70
CNT	128.13
Hibrit	139.43

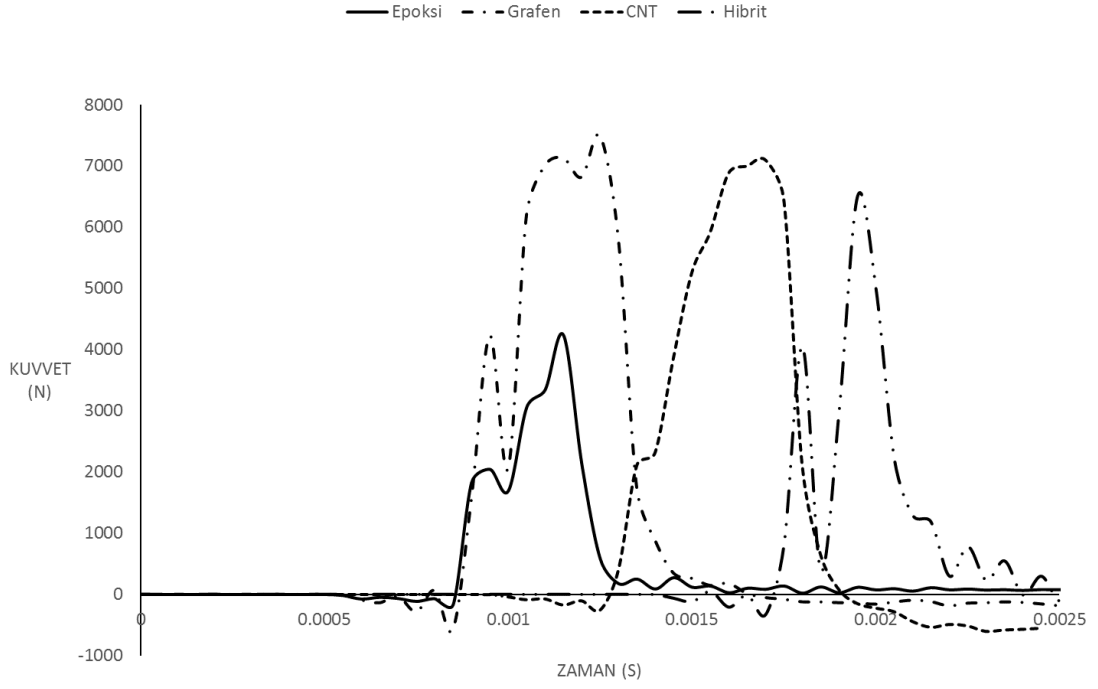
Tablo 7.2. Yapıştırıcıların tokluk değerleri

7.3. Darbe Deneyi Sonuçları

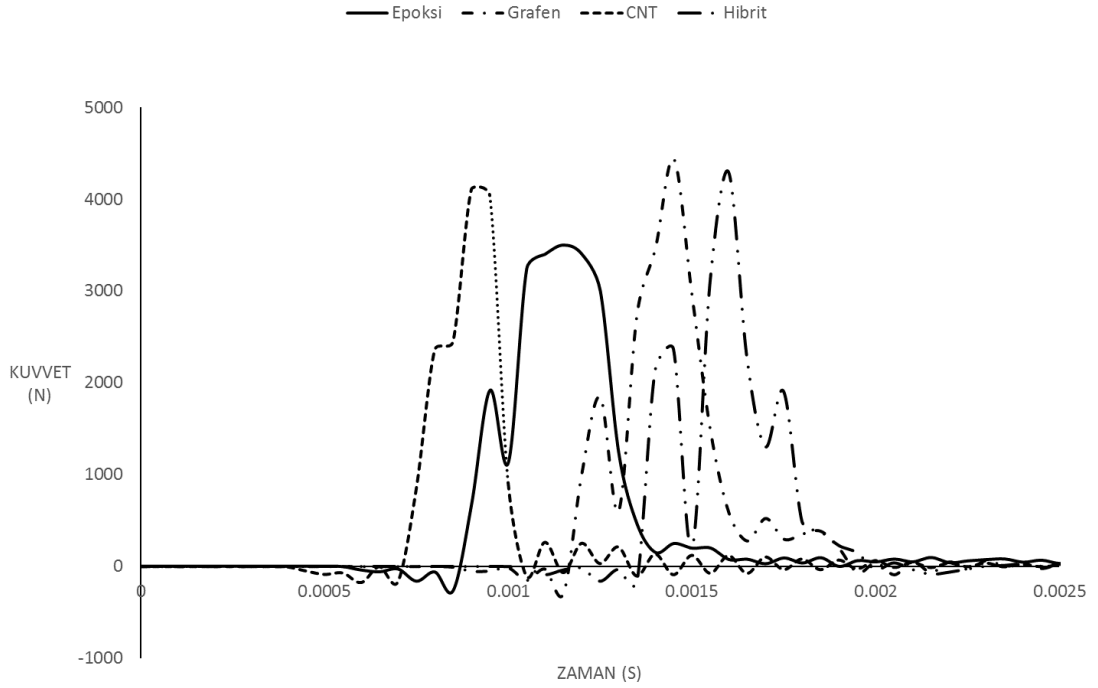
Yapıştırılmış deney parçalarının darbe sonrası elde edilmiş kuvvet zaman grafikleri dört yapıştırıcı için ayrı ayrı aşağıdaki grafiklerde görölmektedir.



şekil 7.11. Farklı yapıştırıcılar ile birleştirilmiş 10 mm kalınlıklı deney parçaları darbe sonrası kuvvet-zaman grafikleri



Şekil 7.12. Farklı yapıştırıcılar ile birleştirilmiş 8 mm kalınlıklı deney parçaları darbe sonrası kuvvet-zaman grafikleri



Şekil 7.13. Farklı yapıştırıcılar ile birleştirilmiş 6 mm kalınlıklı deney parçaları darbe sonrası kuvvet-zaman grafikleri

Elde edilen grafikler incelendiğinde kalınlık artışı yapıştırma yüzey alanını arttırdığından en yüksek kuvvet değeri dört yapıştırıcı için 10 mm deney parçalarında görülmüştür. Bununla birlikte epoksi yapıştırıcı ile birleştirilmiş deney parçalarında nano parçacık takviyeli deney parçalarına göre daha düşük kuvvetlerde ayrılma gerçekleştiği görülmektedir. En büyük kuvvet değeri ise hibrit nano kompozit deney parçalarından elde edilmiştir.

Çarpışma testlerinde impuls momentuma eşittir. Kuvvet-zaman grafiğinin altında kalan alan impuls değerlerini vermektedir.

$$F \cdot \Delta t = m \cdot \Delta V \quad (7.1)$$

Bu denklemde:

F:Kuvvet (N)

Δt :Zaman değişimi (s)

m:Vurucu kütlesi (kg)

ΔV :Hız değişimi (m/s)

$\Delta V = V_{ilk} - V_{son}$

V_{ilk} :Çekicinin ilk hızı

V_{son} :Çarpma sonrası çekicinin hızı

Farklı kalınlıklar ve farklı yapıştırıcılar için impuls değerleri Şekil 7.11-13 de verilen grafiklerden kolayca hesaplanır. Momentum değeri ise vurucu çekiç kütlesi ve hız değişiminden bulunur. Çekicinin ilk hızı enerjinin korunumu ilkesi gereğince hareket öncesi potansiyel enerjinin çarpma öncesi kinetik enerjiye eşit olmasından kolayca hesaplanabilir.

$$m \cdot g \cdot \Delta h = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (7.2)$$

7.2 denkleminde:

Δh :Deney sırasında çekicinin kat ettiği düşey mesafedir. (110 cm)

m:Vurucu kütlesi (kg)

V:Çarpma öncesindeki hız (m/s)

g: Yerçekimi ivmesi (9.81 m/s²)

7.2 denklemine göre tüm testler için çarpma öncesi hız 4.645 m/s olmaktadır. Kuvvet zaman grafiği altındaki alan değerleri kullanılarak çarpma sonrasındaki hız ve çarpışma anına ait ivme değerleri Tablo 7.3 de verilmektedir.

Tablo 7.3. Dinamik analiz sonuçları

Levha Kalınlığı mm	Yapıştırıcı	İmpuls N.s	Çarpma Sonrası Hız m/s	İvme m/s ²
10	Epoksi	2.805	3.242	519.455
10	Grafen	1.426	3.932	838.666
10	CNT	2.311	3.489	550.314
10	Hibrit	4.277	2.506	562.827
8	Epoksi	1.160	4.065	200.076
8	Grafen	2.361	3.465	462.851
8	CNT	1.903	3.693	388.455
8	Hibrit	1.529	3.880	209.458
6	Epoksi	1.266	4.012	200.878
6	Grafen	1.045	4.122	165.894
6	CNT	0.780	4.255	156.036
6	Hibrit	0.242	4.524	43.985

Tablo 7.3 incelendiğinde epoksi içerisine yapılan nano parçacık katkısının çekicinin ivmelenmesi üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Levha kalınlıkları arttıkça ivme değerleri de artmaktadır. En yüksek ivme değeri 10mm kalınlıklı levhadan yapılmış ve grafen katkılı yapıştırıcı ile birleştirilmiş deney parçasında 838,666 m/s², en küçük ivme değeri ise 6 mm kalınlıklı levhadan yapılmış ve hibrit yapıştırıcı ile birleştirilmiş deney parçasında 43,985 m/s² olarak elde edilmiştir.

Son hız değerleri incelendiğinde 10 mm kalınlıklı levhadan yapılmış ve hibrit yapıştırıcı ile birleştirilmiş deney parçasında en düşük son hız değeri elde edilmiştir. İlk hız tüm testler için aynı olduğundan bu sonuç daha fazla enerji yutulması anlamına gelmektedir. Bu sonuç Tablo 7.2'den elde edilen tokluk değerleri ile uyumludur.

7.4. SEM Analizi Sonuçları

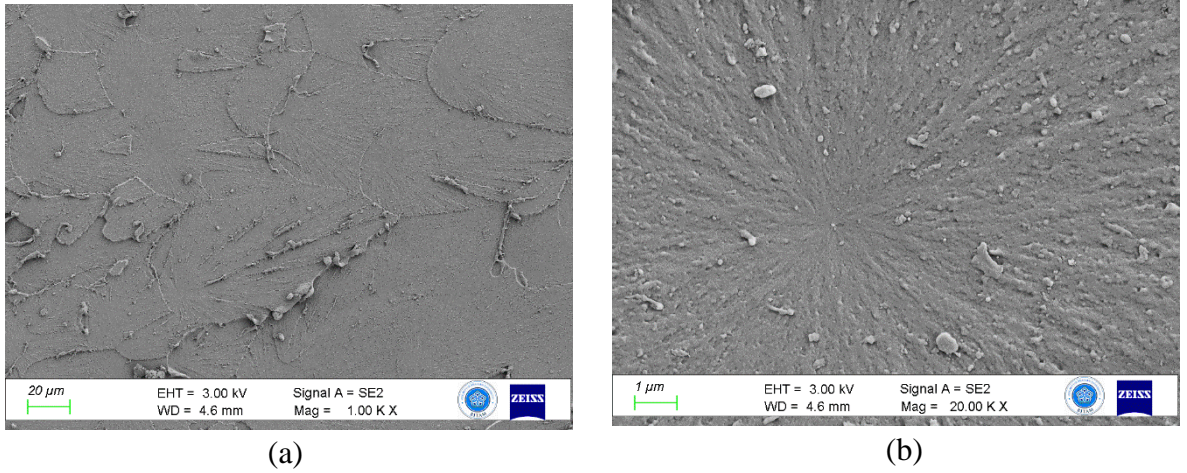
Çekme deney parçalarının ve darbe deney parçalarının kırık yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelenmiştir. İncelenecek yüzeylere 4.17 nm İridyum kaplama yapılmıştır. Şekil 7.14 de analizde kullanılan SEM cihazı görülmektedir.



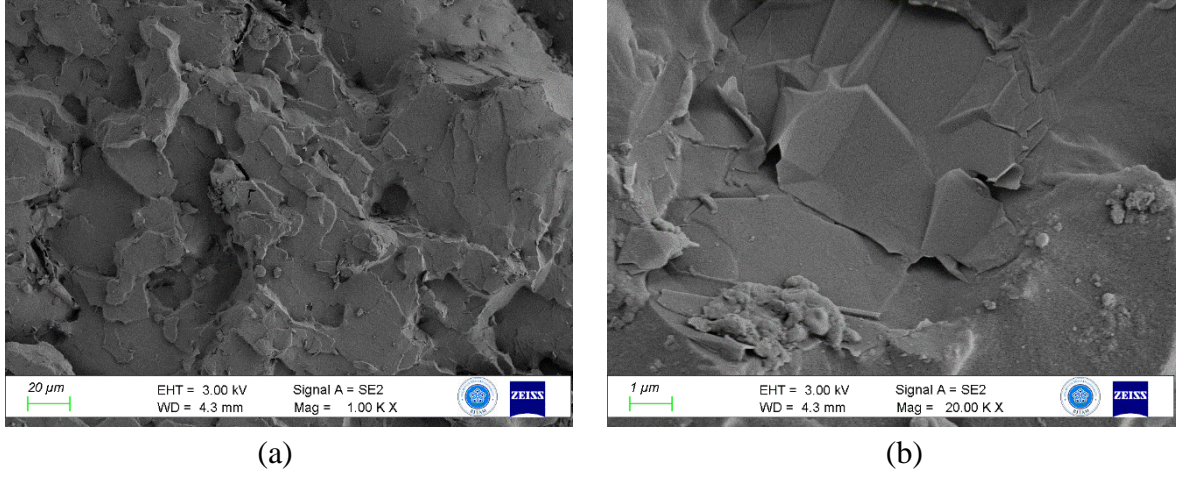
Şekil 7.14. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

7.4.1. Çekme deney parçaları SEM görüntüleri

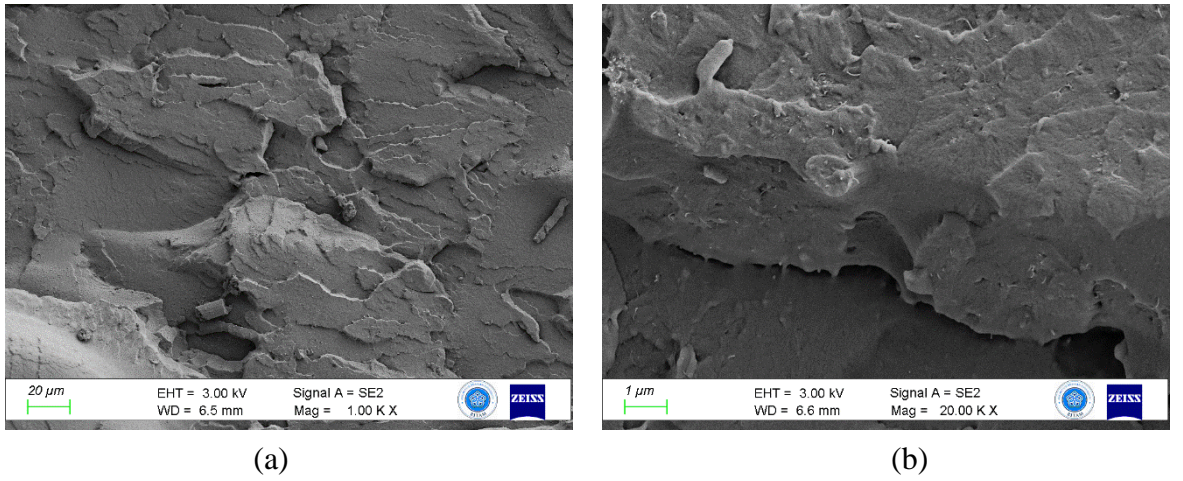
Deney parçalarının çekme testi sonrası hasarlı yüzeylerinin 1KX ve 20KX büyütme SEM görüntüleri aşağıdaki şekillerde görülmektedir.



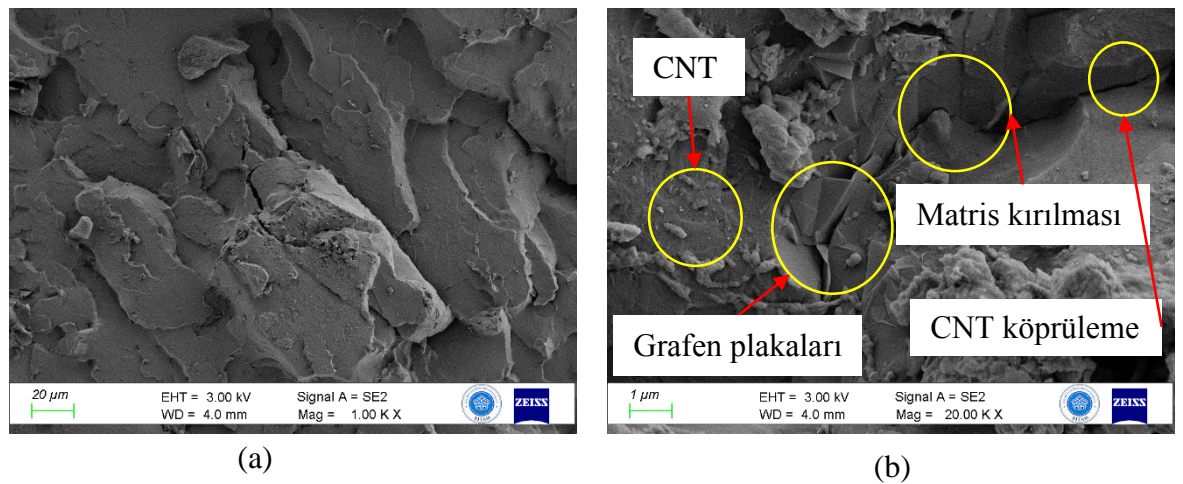
Şekil 7.15. Epoksi deney parçası çekme testi sonrası hasarlı yüzey SEM görüntüsü
(a) 1KX büyütme (b) 20KX büyütme



Şekil 7.16. Grafen içeren yapıştırıcı çekme testi sonrası hasarlı yüzey SEM görüntüsü
(a) 1KX büyütme (b) 20KX büyütme



Şekil 7.17. CNT içeren yapıştırıcı çekme testi sonrası hasarlı yüzey SEM görüntüsü
(a) 1KX büyütme (b) 20KX büyütme

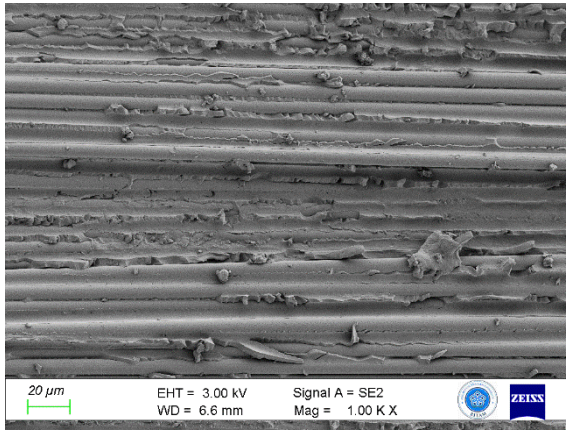


Şekil 7.18. Hibrit yapıştırıcı çekme testi sonrası hasarlı yüzey SEM görüntüsü
(a) 1KX büyütme (b) 20KX büyütme

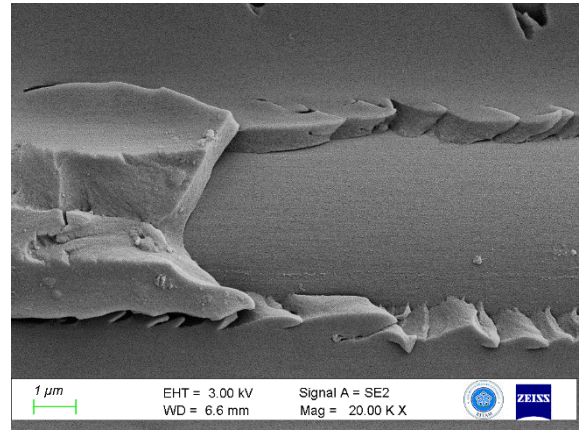
Şekil 7.18 de hibrit deney parçasının çekme testi sonrası kırık yüzeyine ait SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil incelendiğinde kırılmanın matris, CNT ve grafen plakalarda yaptığı etki görülmektedir. Karbon nanotüpler sıyrılma ve kopma şeklinde grafen plakalar ise iç çatlak etkisi yaparak hasar oluşturmuştur. Matris kırılması ise diğer yüzeylere göre daha düz yüzeyler oluşacak şekilde gerçekleşmiştir. Şekil 7.18 de görülen kırık yüzey genel anlamda pürüzlü bir yapıdadır. Saf epoksi ile birleştirilmiş deney parçasına göre hibrit deney parçasının kırık yüzeyi daha pürüzlü görülmektedir. Bunun anlamı kırılma için harcanan enerjinin hibrit deney parçasında daha fazla olmasıdır. Bu sonuç çekme deneyi sonuçları ile uyumludur.

7.4.2. Darbe deney parçaları SEM görüntüleri

Deney parçalarının darbe testi sonrası hasarlı yüzeylerinin 1KX ve 20KX yaklaştırma SEM görüntüleri aşağıdaki şekillerde görülmektedir.

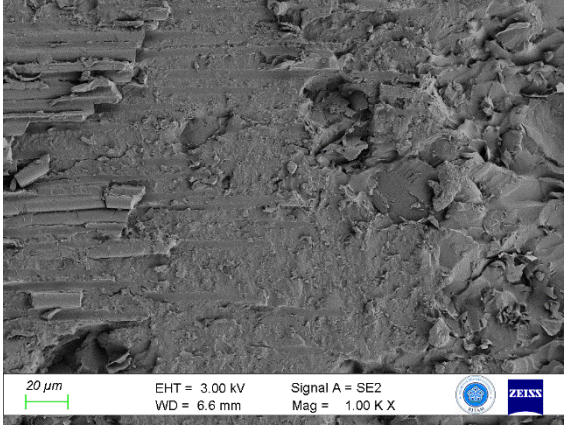


(a)

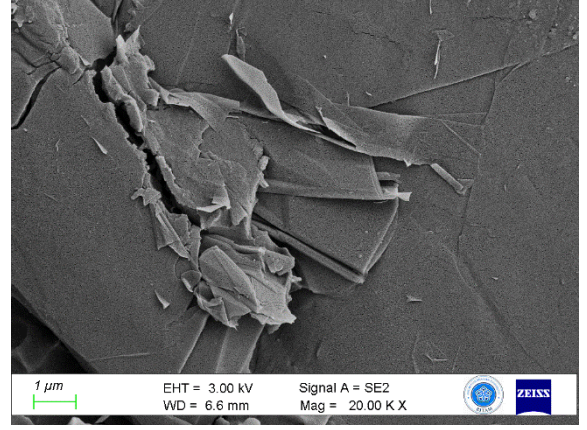


(b)

Şekil 7.19. Epoksi yapıştırıcı ile birleştirilmiş deney parçası darbe testi sonrası hasarlı yüzey sem görüntüsü (a) 1KX büyütme (b) 20KX büyütme

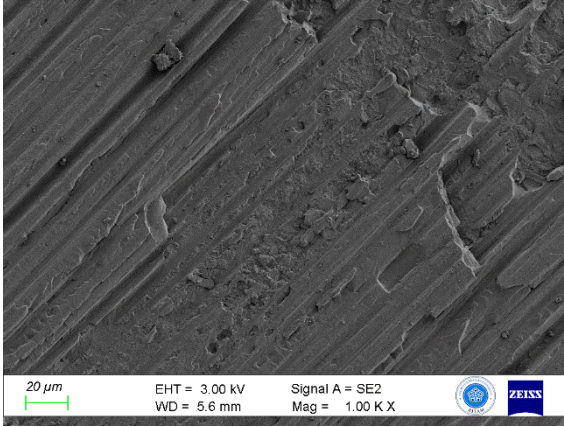


(a)

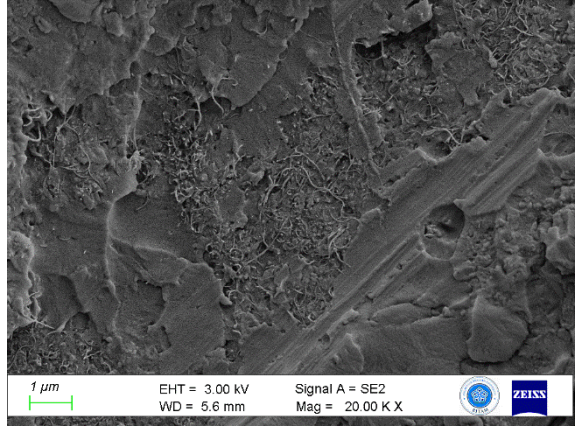


(b)

Şekil 7.20. Grafen içeren yapıştırıcı ile birleştirilmiş deney parçası darbe testi sonrası hasarlı yüzey sem görüntüsü (a) 1KX büyütme (b) 20KX büyütme

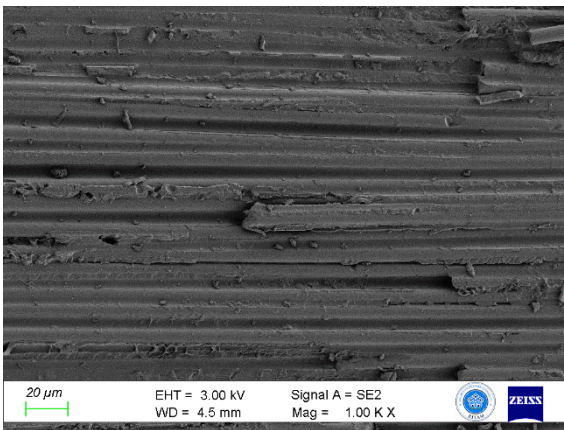


(a)

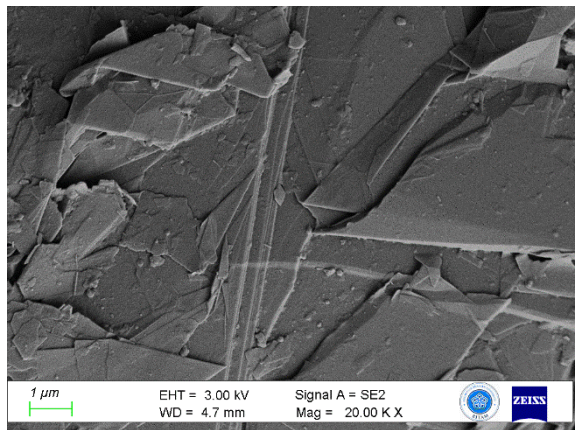


(b)

Şekil 7.21. CNT içeren yapıştırıcı ile birleştirilmiş deney parçası darbe testi sonrası hasarlı yüzey sem görüntüsü (a) 1KX büyütme (b) 20KX büyütme



(a)



(b)

Şekil 7.22. Hibrit yapıştırıcı ile birleştirilmiş deney parçası darbe testi sonrası hasarlı yüzey sem görüntüsü (a) 1KX büyütme (b) 20KX büyütme

Alınan SEM görüntüleri incelendiğinde çekme deney parçalarının kırık yüzeylerinde olduğu gibi saf epoksi ile birleştirilmiş deney parçasına göre nano parçacık

takviyeli yapıştırıcılar ile birleştirilen deney parçalarının kırık yüzeylerinin daha pürüzlü olduğu görülmektedir. Buna göre darbe deneyi sonuçları ile SEM görüntüleri uyumludur.

Sonuç olarak:

Bu çalışmada düşük hızlı ve yüksek ivme ile hareket eden T birleştirmeli deney parçaları darbe testlerine maruz bırakılmıştır. Deneylerde kullanılan 6,8,10 mm kalınlıklarda ve 50x50 mm en boy ölçülerinde kesilerek özel olarak hazırlanmış kalıplarda T birleştirme ile yapıştırılmıştır. Yapıştırımda saf epoksi ve literatürden yararlanılarak belirlenen ağırlıkça %0,3 grafen , %0,3 karbo nanotüp ve %0,15 grafen + %0,15 karbon nanotüp içeren yapıştırıcılar kullanılmıştır. Kullanılan yapıştırıcıların çekme deneyi yapılarak kopma gerilmeleri ve % birim şekil değiştirmeleri elde edilip yapıştırılan T bağlantılı levhaların darbe deneyi sonucunda kuvvet-zaman garfikleri elde edilmiştir.

Çekme deneyi sonuçlarına göre saf epoksi yapıştırıcı için kopma gerilemesi 41 MPa, ağırlıkça %0,3 grafen katkılı yapıştırıcı kopma gerilmesi 56 MPa, ağırlıkça % 0,3 CNT katkılı yapıştırıcı kopma gerilmesi 50 MPa ve ağırlıkça %0.15 grafen ile %0.15 karbon nanotüp nano parçacık katkılı yapıştırıcı kopma gerilmesi 58 Mpa olarak bulunmuştur. Aynı şekilde en küçük birim şekil değiştirme %3 mm/mm saf epoksi yapıştırıcı için görülürken ağırlıkça %0,3 grafen katkılı yapıştırıcı ve ağırlıkça % 0,3 CNT katkılı yapıştırıcı için birim şekil değiştirme %4,3 mm/mm olmuştur. En büyük birim şekil değiştirme değeri %4,5 mm/mm ile ağırlıkça %0.15 grafen ile %0.15 karbon nanotüp nano parçacık katkılı yapıştırıcı da görülmüştür. Buna göre hibrit nano kompozit malzeme saf epoksi malzeme ile karşılaştırıldığında çekme dayanımında %41 en büyük birim şekil değiştirmede ise %50 artış elde edilmiştir. Bu çalışmadan beklenen bir diğer önemli sonuç ise yapıştırıcıların tokluk değerleridir. Tokluk malzeme kırılıncaya kadar harcadığı enerjiyi ifade eder. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alana eşittir. Çekme deneyi sonucunda elde edilen grafiklere göre yapılan hesaplamalarda en büyük tokluk değeri hibrit yapıştırıcıda görülmüştür.

Darbe deneyi sonucunda yapıştırıcı ile birleştirilmiş T Bağlantılı kompozit levhalarda en küçük kuvvet değeri saf epoksi yapıştırıcı ile birleştirilmiş 6 mm kalınlıklı levha için görülürken en büyük kuvvet değeri hibrit yapıştırıcı ile birleştirilmiş 10 mm kalınlıklı levhada görülmüştür.

Darbe deneyi sonucunda elde edilen kuvvet-zaman grafiği kullanılarak çarpma sonrası hızlar hesaplandığında en düşük hız değeri hibrit yapıştırıcı ile birleştirilmiş 10 mm kalınlıklı levhada görülürken en yüksek hız hibrit yapıştırıcı ile birleştirilmiş 6 mm kalınlıklı levhada görülmüştür. İlk hız tüm testler için aynı olduğundan bu sonuç daha fazla enerji yutulması anlamına gelmektedir. Bu sonuç çekme deneyinden elde edilen tokluk verileri ile uyumludur.

Çalışmada ayrıca çekme deney parçaları ile darbe deney parçalarının kırık yüzey SEM görüntüleri incelenmiştir. Saf epoksi ile birleştirilmiş deney parçalarına göre hibrit deney parçalarının kırık yüzeyleri daha pürüzlü görülmektedir. Bunun anlamı kırılma için harcanan enerjinin hibrit deney parçalarında daha fazla olduğudur. Bu sonuç çekme deneyi sonuçları ile uyumludur.

Gelecekte farklı yapıştırıcılarla T birleştirmeli deney parçalarının darbe davranışları incelenebilir.

8. KAYNAKLAR

- Adin H. 2007. “Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Ters Z Tipi Kompozit Malzeme Bağlantılarının Mekanik Analizi”. Fırat Üniversitesi.
- Ceyhun, V., Turan, M. 2003. “Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı”. *Mühendis ve Makine*, 516: 35–41.
- DeLollis N. J. 1970. *Adhesives for metals: theory and technology*. Industrial Press New York.
- Durmuş Ali, Çelenk. 2018. “Kompozit-alüminyum hibrit yapının lazer kesim tezgâhı Y-eksenine uygulanması”. Bursa Uludağ Üniversitesi.
- Ebnesajjad, Sina. 2010. *Handbook of adhesives and surface preparation*. William Andrew.
- Ekrem, Mürsel. 2015. “Karbon Nanotüp ve Polivinil Alkol Nanoelyafla Güçlendirilmiş Epoksi Yapıştırıcıların Alüminyum Bağlantılar Üzerindeki Kırılma Davranışları”. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ghasemnejad, H., A. S.M. Furquan, ve P. J. Mason. 2010. “Charpy impact damage behaviour of single and multi-delaminated hybrid composite beam structures”. *Materials & Design* 31 (8): 3653–60.
<https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2010.02.045>.
- Houwink, R. and Salomon, G. 1965. *Adhesion and Adhesives, 2nd edition*. Amsterdam: Elsevier Publishing Company.
- Hufenbach, W., F. Marques Ibraim, A. Langkamp, R. Böhm, ve A. Hornig. 2008. “Charpy impact tests on composite structures – An experimental and numerical investigation”. *Composites Science and Technology* 68 (12): 2391–2400.
<https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2007.10.008>.
- Kara, Memduh. 2012. “Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yama ile Tamir Edilmiş Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı”. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- L.Kırkayak. 2008. “Yapıştırma bağlantılı kompozitlerde yapıştırma geometrisinin gerilme dağılımına etkisi”. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences* 68 (12): 27–33.
- Lee, Dai Gil, Jung Do Suh, Hak Sung Kim, ve Jong Min Kim. 2004. “Design and manufacture of composite high speed machine tool structures”. *Composites Science and Technology* 64 (10–11): 1523–30.

- <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2003.10.021>.
- Mili, F., Necib, B. 2001. *Impact behaviour of cross-ply laminated composite plates under low velocities*. Composite Structures,.
- Murat Özenç. 2007. “Yapıştırma bağlantılarının darbe yükleri altındaki davranışlarının incelenmesi”. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Öndürücü, Ayşe Karacan, Ali. 2018. “Tabakalı Cam Elyaf/Epoksi Kompozitlerin Darbe Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi”. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 6 (3): 435–47.
- Ongun A. 2015. “Karbon Nanotüp ve Nanokil Katkılı, Karbon Fiber / Epoksi Kompozitlerin Düşük Hız Darbe Testiyle Enerji Absorbsiyon Davranışlarının İncelenmesi”. Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özdemir, Yasin. 2018. “Nanoparçacık Katkılı Epoksi Esaslı Yapıştırıcıların Mekanik ve Termal Özelliklerinin Araştırılması”. *Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*.
- Petrie E.M. 1975. “Plastics and adhesives as adhesives”. 1975.
- Razmi A. 2011. “Kompozit Parçaların Çeşitli Yapıştırılmalı Bağlantı Tasarımlarının Karşılaştırılması”. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sayer, Metin. 2009. “Hibrit kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi”. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi.
- Seifoori, Sajjad, R. Izadi, G. H. Liaghat, ve Ahmad Mahdian Parrany. 2021. “An experimental study on damage intensity in composite plates subjected to low-velocity impacts”. *Polymer Testing* 93: 106887.
<https://doi.org/10.1016/J.POLYMERTESTING.2020.106887>.
- Sharpe L. H. 1966. “The Materials, Processes and Design Methods for Assembly with Adhesives”. *Machine Design* 38 (19): 179–200.
- Stronge, W.J. 2000. *Impact mechanics*. Cambridge,. Cambridge University Press.
- Suh, J. D., D. G. Lee, ve R. Kegg. 2002. “Composite Machine Tool Structures for High Speed Milling Machines”. *CIRP Annals* 51 (1): 285–88.
[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61518-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61518-2).
- Turan, K. Kaman, M.O. 2010. “Tek Tesirli Yapıştırma Bağlantılarında İlerlemeli Hasar Analizi”. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences* 16 (3): 315–23.
- Tüzemen, Mehmet Çağrı, Elmas Salamcı, ve Ahmet Avcı. 2017. “Karbon Fiber/Epoksi Nanokompozit Plakalarda Nanopartikül Katkısının Fiber, Matris Ve Boşluk Hacim Oranlarına Etkisi”. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and*

Technology 5 (1): 11–19.

Yıldırım, Fatih, Necati Ataberk, ve Mürsel Ekrem. 2020. “Mechanical and thermal properties of a nanocomposite material which epoxy based and reinforced with polyvinyl alcohol nano fibers contained multiwalled carbon nanotube”:

<https://doi.org/10.1177/0021998320969793> 55 (10): 1339–47.

<https://doi.org/10.1177/0021998320969793>.