



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÜZERİNDE YÜZEY ÇATLAĞI BULUNAN HİBRİD TABAKALANMIŞ
KOMPOZİT LEVHALARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

AYDIN GÜNEŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz– 2013

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Aydın GÜNEŞ, tarafından hazırlanan “Üzerinde Yüzey Çatlağı Bulunan Hibrid Tabakalanmış Kompozit Levhaların Dinamik Davranışlarının İncelenmesi” adlı tez çalışması 03.07.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / ~~oy~~ ~~çokluğu~~ ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Danışman

Doç. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

Üye

Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Aşır GENÇ

FBE Müdürü

Bu tez çalışması BAP tarafından 11101033 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Aydın GÜNEŞ

Makine Mühendisi

03.07.2013

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÜZERİNDE YÜZEY ÇATLAĞI BULUNAN HİBRİD TABAKALANMIŞ KOMPOZİT LEVHALARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Aydm GÜNEŞ

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

2013, 110 sayfa

Jüri:

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

Doç. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

Bu çalışmada; üzerinde yüzey çatlağı bulunan hibrid tabakalandırılmış kompozit levhaların dinamik ve hasar davranışları incelenmiştir. Kullanılan malzemeler hibrit kompozit olup E-camı/epoksi ve karbon/epoksi kompozit tabakalardan oluşmaktadır. Tabakalanmanın etkisinin incelenmesi için farklı dizilim sıralamalarıyla üretilmiştir. Malzemelere farklı parametrelerde yüzey çatlakları açılarak darbe davranışlarına etkisi gözlenmiştir. Düşük hızlı darbe deneyleri, geliştirilen ağırlık düşürme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Farklı darbe hızlarında ve farklı yüzey çatlağı geometrilerinde gerçekleştirilen deneyler sonrasında levhaların dinamik cevabı ve oluşan hasarlar incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit Kompozit, Düşük Hızlı Darbe, Yüzey Çatlağı, Hasar.

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF DYNAMIC BEHAVIORS OF HYBRID STACKED COMPOSITE LAMINATES WITH SURFACE CRACK

Aydın GÜNEŞ

Selçuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

2013, 110 Pages

Jury:

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Prof. Dr. Necmettin TARAÇCIOĞLU

Assoc. Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

In this study, dynamic response and damage characteristics of hybrid laminated composite plates with surface cracks subjected to low velocity impact were investigated. The utilized materials were hybrid composites that consist of glass/epoxy and carbon/epoxy composite layers produced in different stacking sequences in order to investigate the effect of stacking sequence. Surface cracks with different shape and depth parameters were formed on samples and their effects on dynamic responses were examined. Low velocity impact tests were conducted on drop weight test setup. Dynamic responses of the plates and damage formation under different impact velocities and different surface crack geometries have been investigated.

Keywords: Hybrid Composite, Low Velocity Impact, Surface Crack, Damage Formation.

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın tamamlanmasında her türlü desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN 'e minnet ve şükranlarımı sunarım.

Tabakalı kompozit malzemelerin üretimini gerçekleştiren İzoreel firmasına, numunelerime çatlak açılmasında ki yardımlarından dolayı Arş. Gör. Cihad NAZİK ve Selçuk Üniversitesi-Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu Teknisyeni Mustafa SAK 'a, düşük hızlı darbe deney cihazının geliştirilmesinde ki katkılarından dolayı Makine Mühendisi Mehmet TEMEL' e ve bu çalışmayı hazırlamamda büyük bir sabırla bana destek olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Aydın GÜNEŞ

KONYA - 2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET	IV
ABSTRACT	V
ÖNSÖZ	VI
İÇİNDEKİLER	VII
SİMGELER VE KISALTMALAR	IX
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. MATERYAL VE METOD	9
3.1. Materyal.....	9
3.1.1. Kompozit Malzeme.....	9
3.1.2. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları;	12
3.1.3. Tabakalı Kompozit Malzeme.....	13
3.1.4. Kırılma Mekanikliği.....	14
3.1.4.1. Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği	18
3.1.4.2. Elastik-Plastik Kırılma Mekanikliği	22
3.1.4.3. Düzlem Gerilme ve Düzlem Şekil Değişirme	22
3.1.4.4. Eliptik Yüzey Çatlağı.....	23
3.1.5. Düşük hızlı darbenin kinematik analizi	24
3.1.6. Kompozit Malzemelerin Hasar Mekanizmaları ve Kırılma Davranışları. 28	
3.2. Yöntem	29
3.2.1. Deney Setinin Kurulması.....	30
3.2.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması	33
3.2.3. Deney Numunelerine Yüzey Çatlaklarının Açılması	40
4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE ANALİZ	43

4.1. Malzeme Türünün Etkisi	44
4.1.1. Kuvvetin Yer Değiştirmeye Bağlı Olarak Değişimi	45
4.1.2. Kuvvetin Zamana Bağlı Olarak Değişimi	47
4.1.3. Enerji Absorbsiyon Kapasiteleri	48
4.2. Yüzey Çatlağı Geometrisinin Etkisi	49
4.2.1. Kuvvetin Yer Değiştirmeye Bağlı Olarak Değişimi	50
4.2.2. Kuvvetin Zamana Bağlı Olarak Değişimi	60
4.3. Zamana Bağlı Enerji Transferi	70
4.4. Düşük Hızlı Darbe Sonrası Oluşan Hasar Bölgelerinin İncelenmesi	80
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	93
6. KAYNAKLAR	95
7. EKLER	100
ÖZGEÇMİŞ	101

SİMGELER VE KISALTMALAR

F	: Kuvvet
V	: Hız
M	: Kütle
M'	: Hedefin kütlesi
m	: Kütle
W	: Darbe esnasında yapılan iş (numunede yutulan enerji)
E_p	: Potansiyel enerji (darbe enerjisi)
a_i	: İvme
V_y	: İzafi hız
g	: Yer çekimi ivmesi
s	: Yerdeğiştirme
k	: Sabit
E_1	: Fiber yönündeki elastisite modülü
E_2	: Fiber yönüne dik doğrultudaki elastisite modülü
ν_{12}	: Poisson oranı
G_{12}	: Kayma modülü
a	: yüzey çatlak derinliği parametresi
c	: yüzey çatlak genişliği parametresi
t	: numunenin kalınlığı
A	: 2 m/sn' de yapılan darbe deneyleri
B	: 2,5 m/sn' de yapılan darbe deneyleri
C	: 3 m/sn' de yapılan darbe deneyleri
N	: Tabaka sayısı
k	: Tabaka sırası
z	: Her bir tabakanın merkeze olan uzaklığı

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, ortam şartlarına bağılı olarak üretim esnasında ya da kullanılışları esnasında dinamik yüklere maruz kalabilirler. Bu nedenle darbeli yüklemeler altında malzemelerin, yapısal bütünlüğünü koruması ve tasarımda öngörülen mekanik davranışı göstermesi beklenir. Gerek üretim sırasında ve gerekse serviste malzemelerin üzerine etkiyen kimyasal ve mekanik etkiler sonucu malzeme yüzeyinde çizik, çentik veya çatlaklar oluşabilmekte ve ilerleyebilmektedir. Bu etkiler nedeniyle kompozitlerin faydalı ömürleri etkilenebilmektedir. Darbeden kaynaklanan hasar, üretim, bakım ve servis işlemleri sırasında ortaya çıkabilir. Darbe hızları küçük olmasına rağmen etkisi büyük olabilir.

Kompozit malzemelerde çıplak gözle görülemeyen iç hasarlar kompozit malzemenin genel karakteristiğidir. Malzemeler üzerinde ki hasarlar bu şekilde başlayarak kompozit malzemelerin mukavemetinde ve rijitliğinde azalmaya sebep olur ve yük altında bu etki daha da büyür.(Şahin, Y. 2000. Kompozit Malzemelere Giriş)

Ayrıca kompozit malzemelerde darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde de meydana gelebilir. Bu etki içyapıda delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde görülebilir. Metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma veya kırılma şeklinde olmasına rağmen, kompozit malzemeler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez.

Kompozit malzeme de yüzey çatlağının oluşumu ve ilerlemesi oldukça önemlidir. Yüzey çatlağı iki şekilde oluşabilmektedir. Birincisi üretim esnasında ki çevresel etkenler, ikincisi ise üretim esnasındaki fiziki etkenlerdir. Bu nedenle kompozit yapılar üzerine yabancı cisimlerden kaynaklanan darbelerin etkileri anlaşılmalı, kompozit malzemelerde oluşabilecek çatlaklar göz önünde bulundurulmalı ve tasarım aşamasında uygun önlemler dikkate alınmalıdır.

Bu çalışmada amacımız, üzerinde farklı boyut ve geometrilerde yüzey çatlağı bulunan hibrid kompozit levhaların, düşük hızlı darbeye verdikleri cevabın

belirlenmesi ve düşük hızlı darbe sonrası malzemenin mekanik özelliklerindeki değişimlerin tespit edilmesidir. Deneylerimizde S.Ü. Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan ağırlık düşürme cihazı kullanılmıştır. Vurucu ağırlık 5,6 kg olup yaklaşık 1 metre yükseklikten serbest düşmeye bırakılabilmekte ve farklı darbe hızlarında deneyler yapılabilmesi mümkündür. Hareketli vurucu kütlesi gövdede bulunan çelik cetvel ve pnömatik başlatma kolu yardımıyla mesafe ayarı yapılarak serbest düşmeye bırakılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan deney numuneleri 90 mm × 25 mm boyutlarında 18 tabakalı olup hibrit yapıda tasarlanmış E camı/epoksi ve karbon/epoksi kompozit malzemeden İZOREEL firması tarafından üretilerek hazırlanmıştır. Numunelerin her biri 4 mm kalınlığındadır. İki farklı konfüğürasyonda malzeme kullanıldı. İlkinde karbonlar ortada diğerinde ise karbonlar dış kısımdaki tabaka da konumlandırıldı. Eşit boyutlarda ve farklı konfüğürasyonlar da üretilen deney malzemelerine farklı geometrilerde yüzey çatlağı açılarak üç farklı hızda düşük hızlı darbeler uygulandığında kuvvetin zamana göre değişimi, kuvvetin yer değiştirmeye göre değişimi ve yutulan enerjinin zamana göre değişimi ile ilgili grafiklere ulaşılmış ve darbenin etkisi incelenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Hibrid kompozit malzemelerle ilgili olarak geçmişten günümüze birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda hibrid kompozit malzemelerin mekanik davranışları irdelenmiş ve elde edilen veriler neticesinde daha iyi özelliklerdeki malzemeler, daha kolay ve daha ekonomik bir şekilde üretilmeye çalışılmıştır. Kompozit malzemelerin darbe davranışı ile ilgili yapılan çalışmalarda genel olarak kompozit malzemenin parametreleri, konfigürasyonu ve kompozit malzemeye uygulanan darbe kuvveti ile ilgili konular irdelenmiştir. Bu konular ile ilgili yapılan çalışmalar genel olarak benzer içerikli olsalar da kompozit malzemelerin geliştirilmesine katkısı olmuştur. (Mili ve ark. 2001, Shyr ve ark. 2003, Hebert ve ark 2008, Sutherland ve ark 2007, Choi ve ark 2010, .Belingardi ve ark 2011)

Naik ve arkadaşları (2011) yapmış oldukları çalışmada, kompozit malzemeye düşük hızlı darbe deneyi yapmış, kompozit malzeme olarak E-camı/epoksi kullanmıştır. Çalışmalarında kompozit malzemenin darbe uygulanmayan yüzeyinden sabit basınç uygulanmıştır. Böylece kompozit malzemeye uygulanan tek taraflı darbe yüklemesinin basınç etkisi altında kompozit malzemedeki meydana getirdiği hasarlar tespit edilmeye çalışılmıştır.

Azouaoui ve arkadaşları (2010) yapmış oldukları çalışmada, tabakalandırılmış E-cam/epoksi kompozit malzemesine uygulamış oldukları düşük hızlı darbeler sonucu meydana gelen hasarın yorulma davranışı üzerine etkisini incelemiş ve yapıda oluşan delaminasyon ve çatlak gibi hasarları SEM görüntüleri ile göstermiştir.

Tiberkak ve arkadaşları (2008) yapmış oldukları çalışmada kompozit levhalarda darbe yüklemeleri neticesinde oluşabilecek olan hasarların tahmin edilmesi ile ilgili çalışma yapmıştır. Çalışmasında sonlu elemanlar yöntemi ve analitik yöntemler kullanarak konuyu incelemiş bu iki yöntemle elde edilen sonuçları birbiriyle kıyaslamıştır.

Evcı (2009) tarafından yapılan çalışmalardan elde edilen seramik kompozit zırh sistemleri gelişmiş zırhlı araçların balistik korumasında kullanılmaktadır. Ön yüzde kullanılan seramikler, sahip oldukları yüksek sertlik, basma mukavemeti ve aşınma dayanımlarından dolayı mermi üzerinde deforme edici bir gerilme dalgası

oluşturmaktadır. Yapısal entegrasyonu temin eden arka tabakadaki polimer kompozit ise yüksek enerji sönümlenme özelliğiyle mermi veya parçacıkları yakalayıp penetrasyonu engellemektedir. Bu çalışmada seramik kompozit zırh sistemi yapısındaki bileşenlerin ve zırh sisteminin darbe karakteristiği ve darbeye bağlı hasar şekilleri belirlenmiştir. Ağırlık düşürme testleri ile düşük enerjili darbe, tabanca testinde de yüksek enerjili darbe davranışı ve balistik özellikleri incelenmiştir. Burada darbe kuvveti, çarpma hızı ve darbe zamanına ait veriler yapıdaki kırılma oluşumu ve gelişimi darbe kuvvetine bağlı olarak belirlenmiştir. Ağırlık düşürme testlerinde E-Cam dokuma, tek yönlü ve aramid dokuma kumaştan üretilen kompozit malzemelerin düşük enerjili darbe hız limitleri bulunmuştur. Kompozit malzemenin penetrasyon ve perforasyon eşik enerjileri tespit edilmiştir. Seramik kompozit zırh sisteminin balistik hız limiti ve balistik koruma seviyesi standartlar doğrultusunda belirlenmiştir. Hacim ve kütle değeri RHA çeliği referans alınarak bulunmuştur. Balistik darbeye kompozit malzemede meydana gelen konik hasar yapısının darbe eksenine etrafında sınırlandırılmış olduğu, delaminasyon ve matris kırılma alanlarının düşük enerjili darbeye mukayese edildiğinde önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.

Mal yaptığı çalışmada (2002) tabakalı kompozit malzemelerin bünyesinde bulundurabileceği delaminasyon ve çatlak gibi olumsuzlukların tespit edilmesinde elastik dalgalardan faydalanmıştır. Deneylerinin yapılmasında tabakalı kompozit malzemeye gönderilen dalgaların geri yansıma durumlarına göre malzeme üzerindeki hasarları tespit etmeye çalışmıştır. Ayrıca çalışmalarında tabaka açılarının malzeme içerisindeki elastik dalga hareket hızına ve mevcut hasarların gözlenebilirliğine etkisini incelemiştir.

Bouvet ve arkadaşları (2009) yapmış oldukları çalışmada tabakalı kompozit malzemenin üzerine uygulanan düşük hızlı darbe yüklemeleri neticesinde kompozit malzemeyi oluşturan tabakalar arasındaki hasarı yapılarını incelemiştir. İncelemeleri neticesinde kompozit malzemenin tabakaları arasında meydana gelebilecek delaminasyonları mikrograflar yardımıyla göstererek kompozit malzemenin darbe davranışı ve darbe sonrası oluşan hasarların ilerleme biçimlerini incelemiştir.

Mathivanan ve arkadaşları (2010) yapmış oldukları çalışmada cam-epoksi tabakalı kompozit malzemesine uygulanan düşük hızlı darbe yüklemeleri neticesinde

kompozitin darbe davranışı karakteristiğini incelemiş ve çalışmalarında grafiksel ve SEM görüntülerine yer vermiştir.

Mitrevski ve arkadaşları (2004) yapmış oldukları çalışmada farklı vurucu uç geometrisinin kompozit malzeme üzerindeki darbe etkilerini araştırmışlardır. Karbon-Epoksi tabakalara yarı küresel, konik ve sivri vurucularla darbeler yapmışlardır. Kuvvet zaman değişimini ve numunelerin yuttuğu enerji miktarlarını deneysel olarak tespit ederek vurucu geometrilerinin etkilerini araştırmışlardır.

Belingardi ve Vadori (2002) yaptıkları çalışmada cam fiber ve epoksi kompozit plakalara ağırlık düşürme testi uygulamıştır. Kompozit malzemede darbe yüklemeleri neticesinde temas kuvvetinin ve absorbe edilen enerjinin değişimini incelemişlerdir. Kompozit malzemede ki fiberlerin malzeme içerisindeki açılma konumunun malzemenin absorbe edebileceği enerjiye etki ettiği yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir.

Taşkıran (2010), yaptığı çalışmalarda, düşük ve yüksek sıcaklıklarda düşük enerjili darbeye maruz kalan karbon tabakalı kompozit levhalarda darbe sonucu meydana gelen hasar ve burkulma yüklerinin değişimi incelenmiştir. Kullanılan kompozit levhalar tek yönlü takviyelendirilmiş tabakalardan oluşmakta olup darbe testleri yüksek sıcaklık için Instron Dynatup 9250 ağırlık düşürme test cihazında, düşük sıcaklıklar için ise özel olarak önceden imal edilmiş olan ağırlık düşürme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Darbe sonrası levhalarda meydana gelen hasar alanları C-Scan, oluşan çentik derinlikleri komparatör, gerçekleşen hasar tipleri mikroskop aracılığı ile incelenmiştir. Sıcaklığın etkisi ile oluşturulan düşük enerjili darbelerin, tabakalı kompozit levhalarda olan etkisi, iki tarafı ankastre olacak şekilde bağlanmış basma test cihazından sağlanan kritik burkulma yüklerinin elde edilmesiyle incelenmiştir.

Kompozit malzemeler ile ilgili olarak genel olarak levha türü malzemeler çalışılmakla beraber boru şeklindeki kompozit malzemelerle de yapılan çalışmalar bulunmaktadır. (Avcı ve ark., 2007) yapmış olduğu çalışmada filament sarım boruların korozif ortamda düşük hızlı darbeye maruz kalması neticesinde göstermiş

olduğu davranışı incelemiştir. alışmasında kompozit malzemesine açmış olduğu çatlak ile kompozit borunun üzerindeki çatlağın etkisini analiz etmiştir.

Kompozit malzemeleri oluşturan matris ve takviye malzemesi arasındaki ara yüzey bağlarının maruz kalınan darbe yüklemesi neticesinde ki mevcut durumu ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda tabakalar arası ayrılmanın kaynakları (Schoeppner ve ark., 2000), nasıl azaltılabileceği ve ara yüzey bağları üzerine analizlerde bulunulmuştur.(Tay ve ark., 2003) Deneysel çalışmaların yanı sıra kompozit malzemelerde meydana gelebilecek hasarlar üzerine analitik çalışmalarda yapılmıştır. (Mishra ve ark., 2010)

Cantwell ve arkadaşları (2010) yapmış oldukları çalışmada kompozit malzemelerin darbe yüklemeleri neticesinde göstermiş oldukları davranışları incelemiş ve kompozit malzemede oluşabilecek darbe hasarı ve bu darbe hasarının gelişimi üzerine çalışmışlardır. Li ve arkadaşları (2006) yapmış oldukları çalışmada tabakalı kompozit levhaların darbe yüklemelerine maruz kalması neticesinde tabakalar arası meydana gelebilecek modlar ve bu modların karakterizasyonları ile ilgili analizde bulunulmuştur.

Ataş ve arkadaşları (2010) yaptığı çalışmalarda, onarılmış cam/epoksi kompozit plakların darbe davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Denede kullanılan numuneler, vakum destekli reçine infüzyon sistemi kullanılarak Dokuz Eylül Üniversitesi Kompozit Araştırma Laboratuvarı'nda üretilmiştir. Numunelerin retiminde, farklı açılara sahip cam-fiber kumaşlar kullanılmıştır. Denede serbest düşme darbe cihazı kullanılmıştır. Bu çalışmada, çeşitli parametrelerin onarılmış kompozit plakların darbe davranışına etkileri incelemiştir. Onarım yönteminin (el yatırması, vakum destekli reçine infüzyonu), yama derinliğinin ve test sıcaklığının (-50°C, 20°C, 90°C) etkileri araştırılmıştır. Bulunan sonuçlar çeşitli grafikler halinde bir arada değerlendirilmiş ve hasarlı numuneler ile karşılaştırmalar yapılarak tartışılmış ve parametrelerin hasar mekanizmalarına katkısı değerlendirilmiş onarılmış numuneler ile hasarsız numunelerin darbeli yüklere karşı cevapları ve hasar mekanizmaları da karşılaştırılmıştır.

Wang ve arkadaşları (2010) yapmış oldukları çalışmada karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemesinin düşük hızlı darbe davranışını ve uygulanan yükleme sırasındaki gerilme dayanımını incelemişlerdir. Çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemi ile darbe hasarının gelişimini modelleme edilmesi amaçlanmış, bunun içinde ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Düşük hızlı darbe neticesinde elde edilen veriler nümerik analiz neticesinde elde edilen verilerle kıyaslanmıştır.

Gonzalez ve arkadaşları (2011) yapmış oldukları çalışmada düşük hızlı darbe yüklemelerine maruz kalan tabakalı kompozit malzemelerde tabaka açısının kompozit malzemenin dinamik davranışına etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında yapmış oldukları analitik analizin yanı sıra tabakalı kompozit malzemenin darbeye maruz kaldığı esnada meydana gelen titreşimin malzeme üzerindeki etkilerini de incelemiştir.

Hosur ve arkadaşları (2005) yapmış oldukları çalışmada farklı konfigürasyonlarda tabakalı hibrit kompozit malzemeleri düşük hızlı darbe yüklemelerine maruz bırakmışlardır. Deneysel çalışmalarda kullanılan kompozit malzemeler, epoksi reçinenin vakumlu kalıp yardımıyla çapraz örgü karbon kumaş ve düz örgü camın kullanılmasıyla elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde, tabakalı hibrit kompozit malzemelerin karbon/epoksi tabakalı kompozit malzemesine göre daha az rijitlik özelliği göstermesine rağmen yük taşıma kapasitesinin daha fazla olduğu görülmüştür.

Kompozit malzemelerin yüzey çatlakları ile birlikte darbe yüklemelerine maruz kalması neticesinde göstermiş oldukları dinamik cevap ile ilgili de çalışmalar yapılmış ve bu yapılan çalışmalarda üzerinde yüzey çatlakları bulunan kompozit malzemelerin göstermiş oldukları davranışlar (Ueda, 2002), üzerinde yüzey çatlakları bulunmadığı haldeki mekanik özelliklerle kıyaslanarak kompozit malzeme üzerinde ki yüzey çatlaklarının kompozit malzeme üzerine etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır.(Akdemir ve ark., 2001)

Aymerich ve arkadaşları (2008) yapmış oldukları çalışmada, düşük hızlı darbe yüklemesine maruz bırakılmış tabakalı kompozitler de çatlak oluşumu, tabakalar arası oluşabilecek kaymalar ve malzemedeki meydana gelebilecek kırılma

durumlarını incelemişlerdir. Grafit/epoksi tabakalı kompozit malzemesinin kullanıldığı çalışmalarında darbe sonrasında kompozit malzemeye uygulanan sabit basınç neticesinde tabakalar arası durumlar incelenmiştir. Deney esnasında kullanılan kompozit malzemelerin darbe neticesinde bünyesinde oluşan olumsuzluklar SEM görüntüleriyle beraber çalışma da belirtilmiştir.

Shin ve arkadaşları (2001) yapmış oldukları çalışmada, kompozit malzemelerin darbe yüklemeleri neticesinde bünyesinde oluşabilecek çatlakların malzemenin darbe davranışına etkisini incelemiştir. İncelemelerinde malzemelerin enerji yayılma oranı (J), gerilme şiddeti faktörü (K) ve malzemede oluşan çatlağın konumu gibi parametrelerden yararlanmışır. Çalışmalarında alüminyum ve polimer malzemelerden (PMMA) oluşan kompozit malzemelerin dinamik yüklemeler altında hem deneysel hem de nümerik olarak analizlerini yapılmıştır. Yapılan analizlerde integral metoduna nazaran enerji metodu ile yapılan analizlerde beklenen sonuçlara daha çok yaklaşmıştır. Ayrıca yapılan analizler neticesinde gerilme şiddeti faktörünün zamanla değiştiği gözlenmiştir. (Kill ve ark., 2001)

Itou (2010) yapmış olduğu çalışmada darbe yüklemelerine maruz kalan tabakalı kompozit malzeme de ara yüzeyin her iki tarafında da oluşan dinamik çatlakların gelişimini nümerik olarak analiz etmiştir. Çalışmasında tabakalar arasında oluşan hasar ve delaminasyonlar çatlağın etkisi göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Analizlerinde Laplace metodu ve Fourier dönüşümlerinden faydalanarak gerilme şiddet faktörü tespit edilmeye çalışılmışır.

Liu (2007) yapmış olduğu çalışmada beton bloklar üzerine çeşitli konfigürasyonlarda yüzey çatlakları açmış ve sıvı akışkan etkisi altında bu çatlaklarda ki gelişimi incelemiştir. Çalışmaları neticesinde beton blokların yüzeyindeki aşınmanın akışkan sıvının yüzeye teması esnasındaki açıl durumu ile alakalı olduğu, açının büyümesiyle daha fazla aşınmanın gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ayrıca malzeme yüzeyindeki çatlakların ilerlemesiyle beraber malzemenin yüzeyinde ki aşınma direncinin düştüğü de tespit edilmiştir.

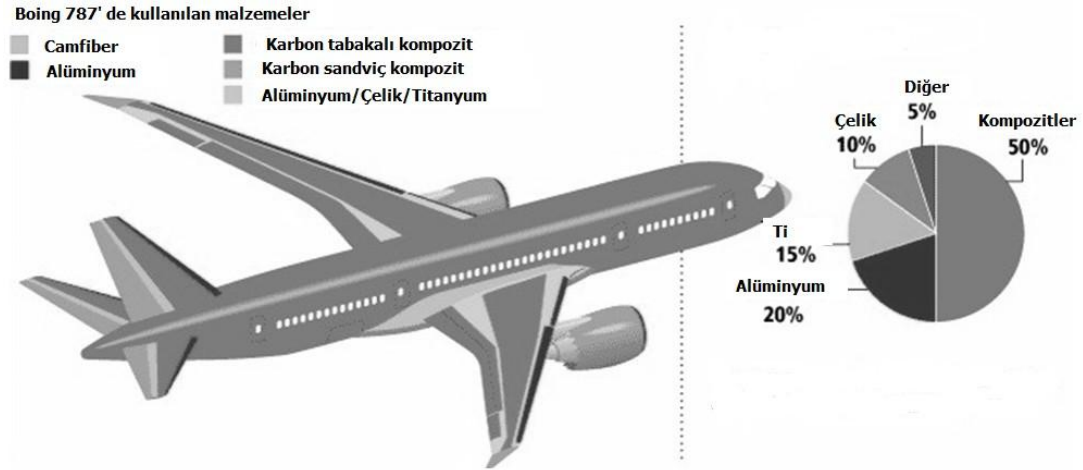
3. MATERYAL VE METOD

3.1. Materyal

3.1.1. Kompozit Malzeme

İstenen bir amaç için tek başlarına uygun olmayan, kimyasal bileşenleri farklı, birbiri içerisinde pratik olarak çözünmeyen iki veya daha fazla malzemeyi, kullanım yerindeki aranan özellikleri verebilecek duruma getirmek için belirli şartlar ve belirli oranlarda fiziksel olarak birleştirilerek oluşturulan malzemelere kompozit malzemeler denir.

Bir kompozit malzeme, genelde düşük dayanıma sahip reçine veya metalik matris ana fazı ile bunun içinde dağılmış daha az oran da kullanılan takviye elemanından oluşmaktadır. Fakat atomsal düzeyde birleştirilen malzemeler veya alaşımlar mikroskobik olarak homojen olduklarından kompozit malzeme olarak sınıflandırılmazlar. Örnek; çelikteki krom ve vanadyum bir karışım oluşturur dolayısıyla kompozit malzeme değildir. Çünkü yapı mikroskobik olarak homojendir. Bir kompozit malzemenin bünyesinde; çekirdek olarak adlandırılan takviye elemanı ve bunun etrafını çevreleyen matris malzemesinin bulunduğu bilinmektedir. Takviye elemanı olarak değişik morfolojiye sahip kısa ve uzun elyaflar, whiskerler (kılcal kristaller), kırılmış veya parçacıklı seramikler kullanılmaktadır. Bunların temel fonksiyonu, gelen yükü taşımak ve matrisin rijitlik ve dayanımını arttırmaktır. Matrisin fonksiyonu ise elyaflar arasında yük ve gerilim transferini sağlayabilmek için elyaf-matrisi bir arada tutmanın yanı sıra çoğu takviye elemanları çok gevrek ve kırılgan olduğundan onların yüzeylerini dış ve çevresel etkilere karşı korumaktır. Ayrıca plastiklik ve süneklik üstünlüğü ile elyaflarda kırılan çatlakların yayılmasını önler, plastik deformasyonlar ve çatlaklar varsa elyaflara paralel olarak yönlerini değiştirir. Bu iki malzeme grubundan fiber malzeme, kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini sağlamaktadır. Matris malzeme'nin ise iki ana rolü vardır. Plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemelerin kopmasını geciktirmektedir. Diğer kullanım amacı da, fiber malzemeleri yük altında bir arada tutabilmek ve kompozit malzemeye gelen yükün liflere homojen olarak dağılmasına olanak vermesidir.



Şekil 3.1 Boing 787 uçaklarında kompozit malzemelerin kullanımı

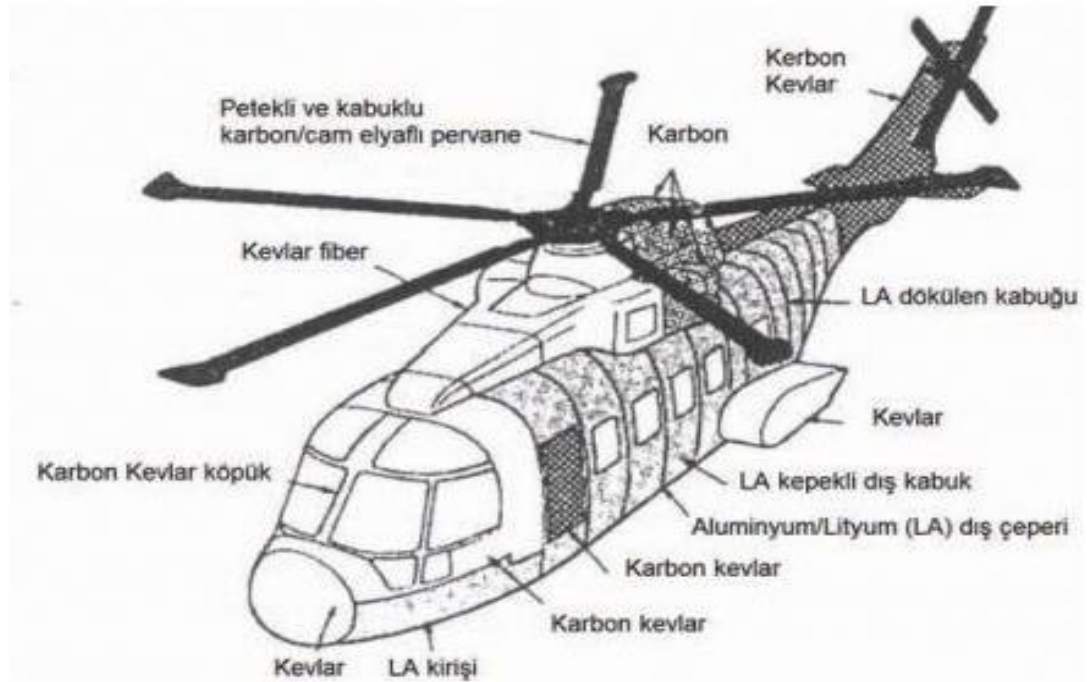
Kompozit malzemelerin oluşumu aşamasında doğa ve insanın yapısı örnek oluşturmuştur. İnsan vücudundaki çoğu dokular yüksek eğilme kabiliyeti gösteren liflerden meydana gelmiştir. Bu lifler zorlanma ve yüklenmelere karşı koyabilmek için düzene konmuş ve birbirlerinin üstünde kayarak dokunun dayanıklı olmasını sağlamaktadır. Bambu ve odun yapısı incelendiği takdirde liflerden oluştuğu görülmektedir. Buda aslında kompozit malzemelerin çok eski yıllardan beri kullanılmakta olduğunu ortaya çıkarıyor.

En basit olarak çam ağacı örnek olarak verilebilir. Çam ağacının gövdesi içindeki, yaz ve kış mevsimlerinde meydana gelen yaş halkaları iç içe bir görünümde ve kış halkaları sert fakat kırılğan, yaz halkaları ise daha yumuşak fakat esnektir. Bu özelliği çam ağacına bu yapıda olmayan diğer ağaçlara göre daha yüksek bir mukavemet sağlamıştır.

Kompozit malzemelerin kullanılmasında ki bir diğer önemli noktada ekonomikliktir. Kimya endüstrisinde çeşitli reaktif veya çözeltilerin depolanmasında, taşınmasında çözeltilere karşı inert davranan, reaksiyon vermeyen malzemelerin seçilmesi gerekir. Bu iş için en uygun malzemeler paslanmaz çelikler ve plastiklerdir. Tamamen plastik bir malzeme mukavemetsiz, tamamen paslanmaz çelikten yapı ise çok pahalıdır. Paslanmaz çeliğe göre çok daha ucuz olan düşük karbonlu çeliğin kimyasal madde ile temas yüzeyinin plastik malzeme kullanılarak kaplanması hem daha yüksek mukavemet hem de daha ucuz bir çözüm olacaktır. Zırhlı araçlar gibi

bazı uygulamalarda, malzemenin yüksek sertliğinin yanı sıra yüksek tokluk özelliğine de sahip olması ve darbe enerjilerini absorbe etmesi istenebilir. Klasik mühendislik malzemelerinde bu özelliklerin birlikte kazanılması oldukça zordur. Yüksek sertlikteki malzemelerle, yumuşak ve sünek malzemelerin kompozit şeklinde tasarımları bu tür uygulamalar için de bir çözüm yolu olabilir. Yüksek sertlik ve mukavemetteki çelik saçlarla yumuşak ve sünek özelliğe sahip saçlar kaynakla birleştirildiğinde, dıştaki sert tabaka zırhın delinmesini önlerken, içerideki yumuşak tabaka deforme olarak darbe enerjisini absorbe eder.

Mühendislik uygulamalarında kompozit malzemelerin yeri gün geçtikçe artmaktadır. Saçtan, tahtadan yapılan tekneler, yatlar, kotralar yerlerini polyester cam elyaftan yapılan benzerlerine bırakmaktadır. Bakım onarım yönünden daha avantajlı olan kompozit malzemedan yapılan tekneler aynı zamanda hafif, uzun ömürlü ve süratli olmaları nedeniyle de tercih edilmektedir.



Şekil 3.2 Kompozit malzemelerin helikopterlerde kullanımı

3.1.2. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları;

Kompozit malzemelerde genellikle bileşenlerinin en iyi özelliklerinin bir malzemede toplanması önemli avantaj meydana getirir. Kompozit malzeme üretilmesi malzemelerin mekanik özelliklerinde pek çok iyileşmeler sağlayabilir. Yüksek dayanım, yüksek rijitlik, yüksek yorulma dayanımı, yüksek aşınma direnci, yüksek sıcaklık kapasitesi, iyi korozyon direnci, iyi termal ve ısıl iletkenliği, düşük ağırlık, çekicilik ve estetik görünüm gibi özellikler buna örnek olarak gösterilebilir. Bütün bu mekanik özelliklerin tek bir malzemede bir araya getirilmesine gerek yoktur. Özellikleri bilinen bileşenlerden yararlanılarak bir kompozit malzemenin bazı özellikleri, örneğin, yoğunluk, elastiklik modülleri ve çekme dayanımları hesaplanabilir. Fakat uygun takviye elemanı ve matris malzemesi çifti, üretim tekniği, optimizasyonu, bileşenlerin mukavemet özellikleri ve diğer faktörler göz önüne alınarak üretim yapılırsa istenilen özelliği elde etmek mümkündür. Uygun matris-takviye elemanı seçiminin sistemin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine etkisi büyüktür. Çünkü kompozit malzeme içerisinde matris tarafından yükün takviye elemanına iletilmesinde matris ile takviye elemanı arasındaki ara yüzey bağ kuvvetinin de kuvvetli olması gerekmektedir. Ara yüzey bağının kuvvetli olması ise bileşenlerin uyumuna ve matrisin ıslatılabilirlik özelliğine bağlıdır. Bunun yanında, üretim tekniği seçimi dışında takviye elemanlarının matris içerisinde homojen dağılımının da matris alaşımı ve takviye elemanı çiftlerinin uygun seçimine bağlıdır.

Kompozitler, karma malzeme olduklarından bu şartları sağlamak ve elde etmek için en iyi matris ve elyaf malzemesi seçilmelidir. Bu avantajların yanında bazı dezavantajları da mevcuttur. Üretimin güçlüğü, pahalı olması, işlenmesinin güç olması yanında maliyetinin yüksek oluşu ve gerekli yüzey kalitesinin elde edilemeyişi ve kırılma uzamasının az oluşu gibi faktörler buna örnek olarak gösterilebilir.

Kompozit malzemeler matris malzemesine göre; plastik, metal ve seramik matrisli kompozitler olmak üzere üç ana gruba ayrılır. Kompozit malzeme, tek bir tabakadan oluşan matris malzemesi içine elyaflar, whiskerler, parçacıklardan veya değişik tabaka katmanlarından oluşan tabakalı yapılardan da meydana gelebilir.

3.1.3. Tabakalı Kompozit Malzeme

Esas malzeme eksenleri doğrultusunda değişik yönlerdeki tabaka ve katmanların üst üste konularak bir araya getirilmesi ile tabakalı kompozitlerin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Tabakalı kompozit malzeme, matris içerisine rastgele yönlendirilmiş elyaflar, tek yönlü elyaflar veya farklı elyaf takviyeli tabakalardan oluşabilir. Örneğin; silindirik bir halka ilk önce halka eksenine paralel şekilde mil üzerine reçineye batırılmış elyaflarla helisel sarma metodu ile sonra belli açıda diğer bir elyaf demeti onu takip ederek gerekli kalınlık elde edilinceye kadar bu işlem sürdürülür. Tabakalı kompozit için asıl sebep, bu kompozitin maruz kalacağı yüklerle uyum sağlaması için dayanım ve rijitliğin doğrusal bağımlılığından avantaj sağlamaktır. Bu nedenle, tabakalı kompozit malzeme sadece bu amaç için uygundur. Çünkü her tabakanın esas malzeme yönleri istenilen doğrultuda yapılabilir. Örneğin, 20 tabakadan 12 tanesi bir doğrultuda ve diğer 8 tanesi bu yöne dik 90°'lik doğrultuda yönlenebilir. Sonuçta bir doğrultuda yönlendirilmiş tabakalı kompozitin dayanım ve rijitliği yaklaşık %40-%50 değerinde artmış olacaktır. Her bir tabakanın bitişindeki tabakadan bağımsız olarak deforme olma eğilimi olduğu için tabakalı kompozit malzemedeki kayma gerilmeleri oluşabilmektedir. Bu bütün tabakalarda temel malzeme doğrultularındaki farklı yönlendirme kadar farklı özelliklerden de kaynaklanabilir. Bu kayma gerilmeleri, tabakalı kompozit malzemenin kenarlarının yakınında en büyük olur ve orada delaminasyon başlama sebebi olabilir. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler, geniş özelliklerine bağlı olarak tek veya çok katlı tabakalı malzemeler olarak da sınıflandırılabilir. Tek katlı kompozitler birkaç farklı tabakadan yapılabilir, her tabaka aynı yönelme ve özelliklere sahip olduğundan sonuçta tüm yapı tek katlı kompozit olarak düşünülebilir. Kesikli elyaf takviye içeren kalıpla üretilen kompozitlerde de elyaf dağılımı, kalınlık boyunca uniform olmamasına rağmen farklı tabakalı yapılar mevcut olmaz. Bu nedenle malzeme tek katlı kompozitler olarak sınıflandırılabilir. Yapısal uygulamalarda kullanılan çoğu kompozitler çok katlıdır.

Her tabaka tasarım amaçlarına bağlı olarak değişen elyaf doğrultuları ile tek katlı kompozitten oluşabilir. Genellikle her katman çok ince olup yaklaşık 0,05-0,1 mm kalınlığında olduğundan dolayı bu şekilde kullanılmaz. Her kattaki kompoziti

oluşturan elemanlar aynı ise izotropik, birçok katlı kompoziti oluşturan malzemeler farklı malzemelerden oluşuyorsa bunlar ortotropik olarak adlandırılır.

Tabakalı kompozit malzemede, eğer kalınlık boyunca bir takviye söz konusu değil ise, en büyük darbe hasarı enine doğrultuda oluşacaktır. Bunun en önemli nedenlerinden birisi enine doğrultudaki malzeme elastik özelliğinin düşük olmasıdır. Bu nedenle bir kompozit malzemenin enine hasar direnci nispeten zayıftır. Ancak darbe gören malzeme rijit bir cisim üzerinde olduğu zaman durum değişecektir. Darbe esnasında kompozit malzemeye aktarılacak enerjinin miktarı, malzemenin bu enerjiyi sönmüleyebilmesi için oluşacak hasar türlerini belirleyecektir. Bu nedenle tabakalı bir kompozit malzemede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek için darbe hızının belirlenmesi çok büyük bir öneme sahiptir.

3.1.4. Kırılma Mekanığı

İki fazın birbiri arasında ara yüzey bağı oluşturmaları, genellikle, ara yüzeyin uyumluluğuna, takviye ve matris elemanlarının uygun seçimi ve özelliklerine bağlıdır. Dolayısıyla da ara yüzey dayanımının, kompozit malzemelerin fiziksel ve mekaniksel özellikleri üzerine rolünün büyük olduğu bilinmektedir. Takviye elemanı ve matrisin elastik özellikleri arasındaki büyük farklar bazen ara yüzeyde yeterli derecede kuvvetli bağ oluşmasını önlemektedir. Bu nedenle takviye elemanı, matris türü, üretim metodu ve konsolidasyon şartlarının optimize edilmesi gerekmektedir. Diğer bir ifadeyle, matris üzerine etkiyen kuvvetler ara yüzey aracılığı ile takviye elemanına nakledilir.

Darbelerin, kompozit yapıların performansına etkileri kompozit malzemelerin kullanımında kısıtlayıcı bir etkidir. Bu nedenle kompozit malzemelerin düşük hızlardaki darbe problemi önemli pratik ve teorik uygulamaları temsil eder. Kompozit malzemelerde düşük hızlı darbe hasarlarının fark edilmesi ve araştırılması kompozit yapılar için düzenli bakım işlemlerine dâhil edilmelidir. Hasara yatkın olan alanlarda özel dikkat sarf edilmelidir. Gerek statik gerekse darbe şeklindeki yüklemelerde hasar oluşumunu etkileyen en önemli etken, yapı içerisinde farklı türlerde ve farklı büyüklüklerde oluşan gerilmelerdir. Kompozit malzemeler, yapıları

itibariyle anizotropik olduklarından dolayı hasar başlangıcı ve hasar gelişimi homojen olmadığı gibi tek bir tür hasar gelişimi değil, aynı anda gelişen birden fazla hasar mekanizmasının oluşturduğu karmaşık bir gerilme dağılımı ve hasar gelişimi gösterirler. Bu bakımdan kompozit bir malzeme içerisinde oluşan farklı türdeki gerilmelerin maksimum değerlerine ulaştığı noktaların özellikle incelenmesi ve bu bölgelerin daha yüksek mukavemet ve rijitlik gösteren bir başka malzeme ile takviye edilmesi günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılan bir uygulamadır. Bu uygulamalara örnek olarak uçak kanatlarının kayma mukavemetlerinin artırılması için ikincil malzemelerde takviye edilmesi gösterilebilir. İkincil takviye elemanları genellikle karbon elyaf ve/veya kevlar kumaşı ile yapılmasına rağmen bu uygulama maliyeti arttırıcı bir etkidir.

Mühendislik uygulamalarında özellikle de mekanik uygulamalarda, dışarıdan gelecek herhangi bir darbeye karşı beklenmedik sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemelerin gerekli en uygun cevabı verebilmesi istenir. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir. Buna karşın darbeye karşı olan cevapta malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Şöyle ki, metal ve metal alaşımları durumunda darbeye karşı malzemenin cevabı; elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir ve darbe hasarı, çoğunlukla çarpma yüzeyinde başladığı anda kolay bir şekilde tespit edilebilir. Darbe hasarı metal malzemelerde genellikle bir tehlike işareti olarak kabul edilmez, çünkü metaller plastik şekil değiştirme kabiliyetlerinden dolayı, büyük miktarda enerjiyi soğurabilirler. Metaller sabit bir gerilme durumunda yapı sertleşmeden önce çok büyük uzamalarda akabilirler, bu nedenle oluşacak kopmalar ani ve beklenmedik olmaz. Kompozit malzemelerde bir darbe sonucunda oluşacak hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde de meydana gelebilir, içyapıda tabakalar arasında ayrılma şeklinde de meydana gelebilir.

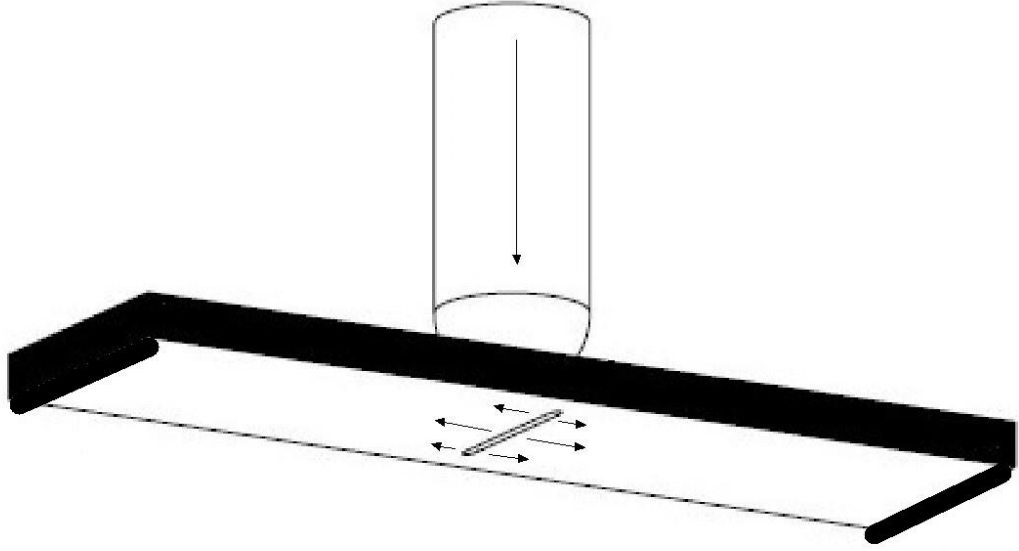
Kırılma, gerilme altında bir maddenin iki veya daha fazla parçaya ayrılması veya parçalanmasıdır. Kırılma olayı, bir çatlakın başlaması ve ilerlemesi olarak iki kısımda incelenir. Yük taşıyan yapılarda hasar, en genel anlamda akma veya kırılmayla olur. Bir malzemenin yapısındaki hatalar iki tip hasar için de çok önemlidir, fakat aralarında önemli farklar vardır. Akmayla oluşan hasarda önemli

olan hatalar, kristal kafesi düzlemlerinin sürekliliğini bozan ve dislokasyon hareketini engelleyen hatalardır. Bu da metallerdeki mukavemet artışı için gerekli bir olaydır. Kırılmayla oluşan hasarda önemli olan hatalar ise makroskobik boyuttadır, çünkü genel bir plastik deformasyon değil, hatalarla bağıntılı olan yerel gerilme şekil değiştirme alanları söz konusudur. Örneğin malzeme yapısındaki boşluklar, kaynak hataları ve yorulma çatlakları gibi.

İdeal kusursuz bir kristalin bağ mukavemeti, teorik olarak onun kırılma mukavemetine eşittir. Kırılma mekaniğinin amacı ise, çatlaklar, çentikler ve delikler gibi gerilme yoğunluğunu artıran hataları inceleyerek gerçek problemlere çözüm aramaktır. Kırılma mekaniği genel olarak kırılmayla belirlenen hasarları inceler.

Kırılma genel anlamda iki şekilde oluşur; sünek kırılma ve gevrek kırılma. Sünek kırılma, çatlak ilerlemesi öncesinde ve sırasında önemli ölçüde plastik deformasyonla karakterize edilir. Kırılma yüzeylerinde de bu plastik deformasyon gözlenir. Gevrek kırılma, hızlı bir çatlak ilerlemesi ve mikro-deformasyonla karakterize edilir. Gevrek kırılmaya eğilim, azalan sıcaklık hızı, artan deformasyon hızı ve genellikle bir çentiğin yol açtığı üç eksenli gerilme durumlarında artar. Gevrek kırılma önceden uyardıktan oluştuğundan ve genellikle büyük felaketlerle sonuçlandığından istenmeyen ve mutlaka önlenmesi gereken bir kırılma türüdür.

Kırılmayla ilgili bir problemin ilk analizi Griffith tarafından camlardaki gevrek çatlakların ilerleyişinin izlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Griffith basit bir enerji dengesi öngörmüştür, gerilme altındaki bir sistemde çatlak ilerledikçe elastik gerilme enerjisinde bir azalma olur ki bu enerji de yeni çatlak yüzeylerinin oluşması için gerekli olan enerjidir.



Şekil 3.3 Darbe numunesinde meydana gelen gerilmeler

Yüzey çatlağı iki şekilde oluşabilmektedir. Birincisi üretim esnasında ki çevresel etkenler, ikincisi ise üretim esnasındaki fiziki etkenlerdir. Kompozit malzemeler de yüzey çatlağının oluşumu ve ilerlemesi oldukça önemlidir.

Şekil 3.3' de üzerinde yüzey çatlağı bulunan malzemeye uygulanan darbe yüklemesi neticesinde malzeme üzerinde oluşabilecek gerilmeler gösterilmiştir. Dik doğrultuda uygulanan darbe kuvveti neticesinde malzeme üzerinde ki yüzey çatlağında açılma yönünde gerilmeler söz konusu olacaktır.

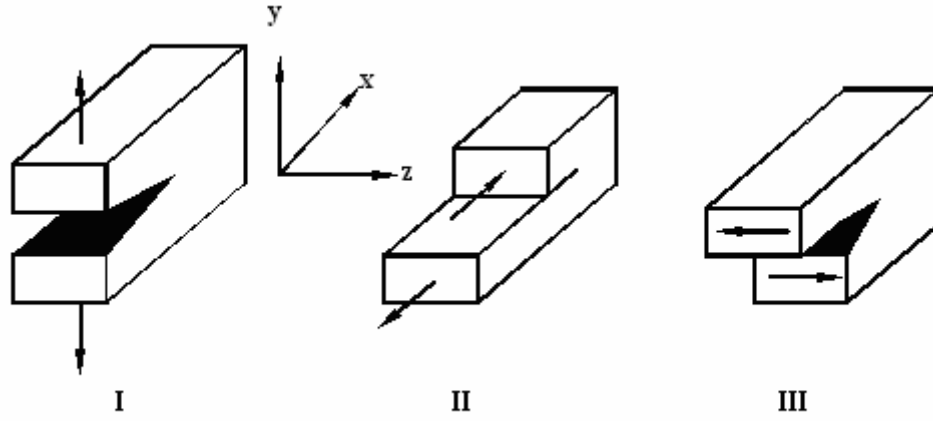
Genel olarak, malzemenin genişliği ve çatlak civarındaki düzlem ölçüleri plastik bölgeye göre yeterince büyükse, büyüme başlangıcındaki K değeri sabittir ve bu onun minimum değeridir. Bu tanım düzlem şekil değiştirme tokluk faktörü olarak adlandırılır ve malzemenin K_1 değeridir. K_1 özellikle malzeme seçiminde önemli bir faktördür çünkü tokluğun diğer ölçülerinden farklı olarak malzemenin şeklinden bağımsızdır. Daha sonra Irwin G ile sembolize edilen bir malzeme özelliği tanımlamıştır. G birim kalınlık başına çatlak uzunluğundaki birim artış için yutulan toplam enerjidir. G , şekil değiştirme enerji boşalma miktarı olarak adlandırılır. Ayrıca çatlak ağzında şekil değiştirme enerji boşalma miktarı dağılımı kritik bir değere ulaştığında kırılma oluşur. Buna da kritik şekil değiştirme enerji boşalma miktarı G_c denir.

Yine Irwin sonraki çalışmalarında kırılma mekaniğinde çığır açmış, enerji yaklaşımının gerilme yoğunluğu ile eş değer olduğunu bulmuştur. Buradan gerilme şiddet faktörü (GŞF) diye tanımlanan K diye yeni bir malzeme özelliği tanımlamıştır. Gerilme şiddet faktörü K , çatlak civarında gerilme alanını belirleyen bir parametre olup, bu faktör malzemenin geometrik hali, yükleme şekli, çatlağın yeri ve oryantasyonuna bağlıdır. Buna göre çatlak ağzında gerilme dağılımı kritik bir değere ulaştığında kırılma oluşur. Böylece kritik gerilme şiddet faktörü veya yoğunluğu, K_c ortaya çıkmıştır. G ve K ' nin eşdeğerliliği Lineer Elastik Kırılma Mekaniğine (LEKM) temel oluşturmuştur. Çünkü tüm malzemeler için, bir çatlak ağzının etrafındaki ve yakınındaki gerilme dağılımı durumu her zaman aynıdır. Dolayısıyla K_c ' nin bilinmesiyle gerçek yapılarda ve belirli şartlar altında malzemede hangi hatalara izin verilebileceği saptanabilir. Ayrıca bu yaklaşımla yapılan deneyler sonucunda malzemelerin yorulma çatlak ilerleyişi veya gerilmeli korozyon çatlama gibi hassasiyetleri de bir dereceye kadar tahmin edilebilir.

LEKM, çatlak ağzında sınırlı plastik deformasyonun olduğu durumlarda geçerli olduğundan, çatlak ağzında önemli ölçüde plastik deformasyon söz konusu olduğunda Elastik Plastik Kırılma Mekaniği (EPKM) devreye girer. Elastik-Plastik kırılma mekaniği yaklaşımında ise tokluk; J-integrali, R-eğrisi veya çatlak ağzı açılma miktarı (crack tip opening displacement, CTOD) cinsinden ifade edilir.

3.1.4.1. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği

Elastik cisimlerde çatlağın gerilme analizini yapabilmek için çatlak yüzeyinin bağıl hareketinin bilinmesi gerekir. Çatlak ilerleme davranışı üç tipte görülür. Bu üç tipten birini, ikisini veya üçünü de içerebilir. Şekil 3.5' de üç tip davranış görülmektedir. Tip I, en çok görülen ve diğerlerine göre daha kritik olan açılma modudur. İki kırılma yüzeyi birbirine zıt yönde ve birbirine dik olarak ayrılır. II. tip kayma modunda, çatlak yüzeyleri x-z düzlemi üzerinde zıt yönde hareket ederler. III. Tip yırtılma modunda ise çatlak x-y ve x-z düzlemlerine göre ters simetrik olarak ilerler. İki kırılma yüzeyi birbirine göre çatlak önündeki bir doğru ile paralel yönde kayarlar.



Şekil 3.5 Çatlak ilerleme modları: (I): Açılma modu, (II): Kayma modu, (III): Yırtılma modu

İzotropik malzemelerde çatlak ucu civarında oluşan gerilme deformasyonları Irwin tarafından bulunmuştur (Irwin 1957). Daha önce de anlatıldığı gibi K , elastik gerilme alanının büyüklüğünü gösteren bir sabittir ve GŞF (Gerilme Şiddet Faktörü) olarak adlandırılır. Boyutsal analizler, K 'nin gerilmeyle doğrusal olarak, karakteristik bir uzunluğun da kareköküyle ilişkili olduğunu göstermiştir. Söz konusu karakteristik uzunluk, çatlak boyudur ve gerilme yoğunluk faktörü;

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} f(a/W) \quad (3.14)$$

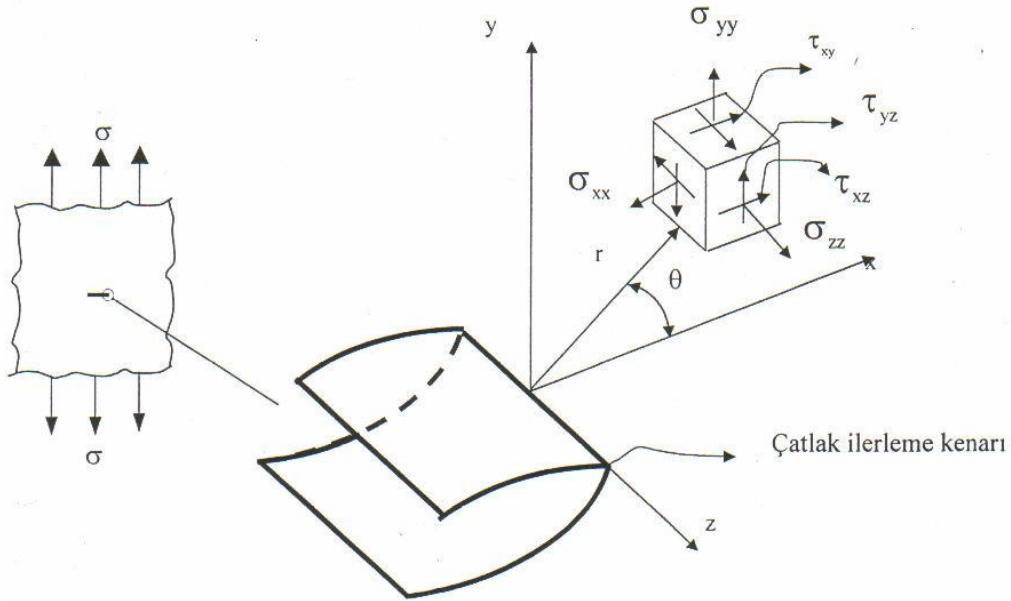
şeklinde verilir. Burada $f(a/W)$, numunenin ve çatlağın geometrilerine bağlı boyutsuz bir parametredir. Çatlak ucundaki GŞF, sonsuz genişlikteki bir numunede, her üç mod için aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$K_I = \sigma_I \sqrt{\pi a}, \quad K_{II} = \tau_{II} \sqrt{\pi a}, \quad K_{III} = \tau_{III} \sqrt{\pi a} \quad (3.15)$$

Burada, K_I , K_{II} ve K_{III} sırasıyla Mod I, Mod II ve Mod III' e göre GŞF dir. Mod I çatlak ağzı gerilme bölgeleri dağılımı ve koordinat sistemi gösterimi şekil 3.6' deki gibidir. Çatlak ağzındaki gerilmeler denklem 3.3' deki gibidir;

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\
\sigma_y &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\
\tau_{xy} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \left(\cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \right) \\
\sigma_z &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \left(2\nu^* \cos \frac{\theta}{2} \right) \\
\tau_{yz} &= \tau_{zx} = 0
\end{aligned}
\tag{3.16}$$

Şekil 3.6' deki gibi açılan çatlakın, r mesafesindeki noktadaki şekil değiştirmeleri aşağıdaki gibidir. Burada n: poisson oranı, σ_{xx} : x eksenindeki gerilme değeri, σ_{yy} : y eksenindeki gerilme değeri ve σ_{zz} : z eksenindeki gerilme değeridir. K_I : Mod I için gerilme şiddet faktörü, E: elastisite modülü ve θ : r' nin x eksenine yaptığı açıdır. u, v, w ise sırası ile x, y, z eksenlerindeki deplasmanlarıdır.



Şekil 3.6 Kompozit malzemelerde çatlak ağzı gerilme dağılımı

$$u = \frac{K_I}{E} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} (1+\nu) \left[(2\kappa-1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$v = \frac{K_I}{E} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} (1+\nu) \left[(2\kappa+1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right]$$
(3.17)

$$w = -\nu^* \frac{K_I}{E}$$

$$\nu^* = \nu, \quad \kappa = \frac{(3-\nu)}{(1+\nu)} \quad (\text{Düzlem gerilme hali için})$$

$$\nu^* = 0, \quad \kappa = 3-4\nu \quad (\text{Düzlem şekil değiştirme hali için})$$

Mod II durumu için gerilmeler;

$$\sigma_{xx} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$$

(3.18)

Deplasmanlar denklem de ki gibi bulunur;

$$u = \frac{K_{II}}{E} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 - 2\nu \cos^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

$$v = \frac{K_{II}}{E} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \cos \frac{\theta}{2} \left[-1 + 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

$$w = 0$$

(3.19)

Mod III durumu için gerilmeler ve deplasmanlar;

$$\begin{aligned}
\tau_{xz} &= \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2} \\
\sigma_{yz} &= \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \\
\sigma_{xx} &= \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \tau_{xy} = 0 \\
u &= v = 0 \\
w &= \frac{K_{III}}{E} \left[\frac{2r}{\pi} \right]^{1/2} \sin \frac{\theta}{2}
\end{aligned} \tag{3.20}$$

olarak bulunur.

3.1.4.2. Elastik-Plastik Kırılma Mekanikği

Çalışmalarımızda kullanmış olduğumuz malzemeler plastik özellik göstermemesine rağmen günümüz şartlarında kullanılmakta olan birçok malzemede, LEKM ile malzemelerin kırılma davranışlarını izah etmek çok güç olup, alternatif bir kırılma modeli gerekmektedir. EPKM, lineer olmayan davranış (plastik deformasyon gibi) gösteren malzemeler için uygulanır. Elastik-plastik davranışı karakterize eden parametrelerden biri çatlak ağzı açılma miktarı (crack tip opening displacement, CTOD), diğeri ise J-integraldir. CTOD ve J-integralin kritik değeri, boyuttan bağımsız kırılma tokluğu ölçümü ve büyük miktardaki çatlak ağzı plastik davranışı verir (Anderson 1991).

3.1.4.3. Düzlem Gerilme ve Düzlem Şekil Değıştirme

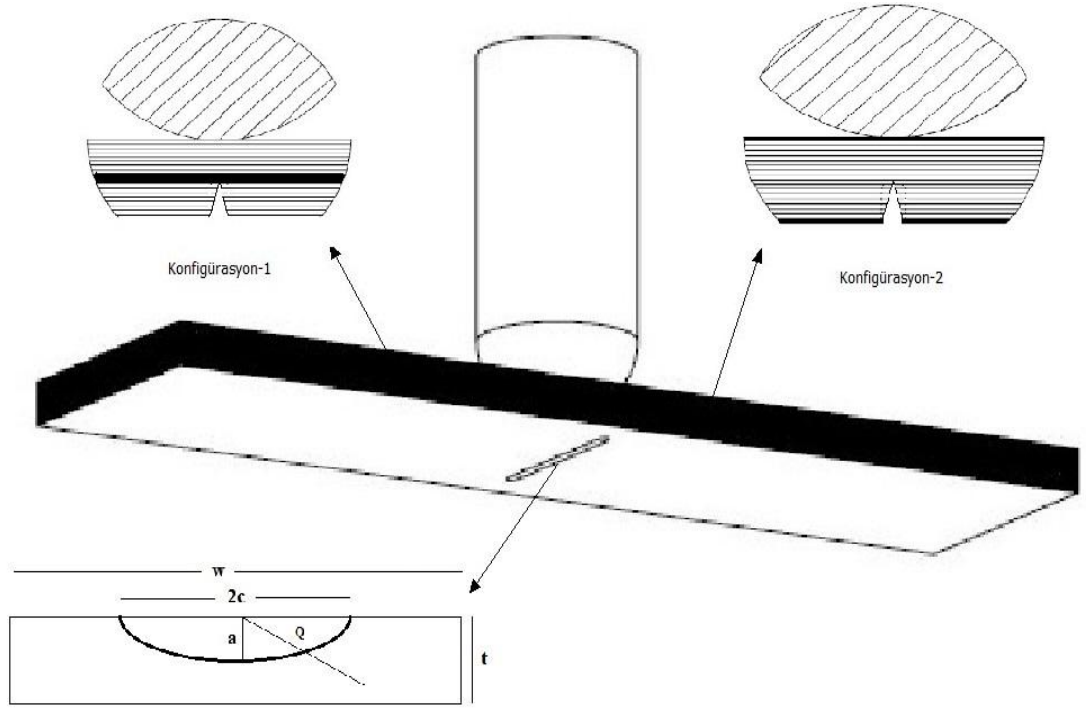
Çatlak içeren bir numune gerilmeye maruz kaldığında çatlak geometrisi nedeniyle üç eksenli gerilmeler oluşur. Ancak çok ince numunede (levha şeklinde) x ve y yönlerinde gerilmeler mevcutken z, yani kalınlık yönünde gerilme yoktur ($\sigma_z=0$) çünkü bu yön serbesttir. Böyle bir geometride gerilmeler iki eksenli (düzlemsel) olduğundan düzlem gerilme hali söz konusudur. Kalın numunelerde numune yüzeylerinde yine düzlem gerilme hali söz konusudur ve numune üç boyutta deformasyona uğrar. Z yönünde numune içine ilerledikçe üç eksenli gerilmeler

ortaya çıkar. Ancak bu defa şekil değiştirme iki boyutludur; numune x-y düzleminde şekil değiştirir. Bunun da nedeni, numune içine ilerledikçe malzeme, z eksenini boyunca kendini çevreleyen malzeme tarafından tutulur ve z yönünde deformasyonu engellenir ($\epsilon_z=0$). Bu durumda da düzlem gerilme hali söz konusudur.

Bu çalışmada kullanmış olduğumuz malzemelerin belirli bir kalınlığı söz konusu olduğu için x ve y eksenlerinde ki gerilmelerden kaynaklanan düzlem gerime halinden söz edemeyiz. Malzemelerimizin 4 mm' lik kalınlığından dolayı z ekseninde de gerilmeler söz konusudur. Malzeme üzerine açmış olduğumuz farklı geometrilerdeki yüzey çatlakları darbe yüklemesi neticesinde hasara uğrayacaktır. Bu gelişim esnasında x ve y eksenlerindeki gerilmelerin z eksenindeki bu hasar gelişimini kontrol etmesi güçleşecektir. Bu nedenle düzlem şekil değiştirme, çalışmalarını gerçekleştirdiğimiz yüzey çatlaklı hibrid kompozit malzemelerde yoktur. Düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme halinin yerine malzemelerimizde normal gerilmeler söz konusudur.

3.1.4.4. Eliptik Yüzey Çatlakları

Bir levhada yüzey çatlaklarından dolayı oluşan gerilme şiddet faktörü, levhanın kalınlığına, levhanın genişliğine, çatlakların derinliğine ve çatlakların uzunluğuna bağlı olduğu gibi, çatlakların kenarını süpüren merkez açısına da bağlıdır. Çatlak ilerlemesi, hem çatlak boyunca, hem de çatlak derinliği boyunca olmaktadır. Çekme yükü altında izotropik malzemelerde yarı eliptik bir çatlakların, ilerlemesi de yarı eliptik olarak kabul edilmektedir. Şekil 3.7' de eliptik yüzey çatlakları geometrisi görülmektedir. Burada, σ normal gerilme, a ve 2c çatlak boyları, t levha kalınlığı, w ise levha genişliğidir. Şekil 3.7 üzerinde gösterilen ϕ yüzey çatlakları parametrik açısı olup, çatlak merkezinden alınan bir doğrunun, çatlak yüzeyinde süpürdüğü açı değeridir.



Şekil 3.7 Yüzey çatlağı geometrisi

3.1.5. Düşük hızlı darbenin kinematik analizi

Darbeler düşük hızlı veya yüksek hızlı olarak ayrılır, fakat bu kategoriler arasında açık bir ilişki yoktur. Yapılan araştırmalar bu ilişkinin belirlenmesinde henüz net bir sonucun elde edilemediğini göstermektedir. Hedefin rijitliğine, malzeme özelliklerine ve çarpan cismin kütle ve rijitliğine bağlı olarak 1 ila 10 m/s arasında değişen hızlar düşük hızlıdır denir. Düşük hızlı darbeye en basit örnek kompozit malzeme üzerine imalat veya bakım sırasında kaza sonucu bir parçanın düşmesi verilebilir. Düşük hızlı darbeler normal olarak çarpışma temas anında malzeme iç yapısında deformasyon oluşturan darbelerdir. Bazı tanımlarda düşük hızlı darbe düşük enerjili darbe olarak ta adlandırılmaktadır. Düşük hızlı darbeye malzemenin iç yapısında da darbeye karşı cevap verebilmek için gerekli olan temas süresi yeterlidir ve daha fazla enerji elastik olarak absorbe edilir. Yüksek hızlı darbeye malzeme darbeye karşı cevap verebilme zamanına sahip olamaz ve çok küçük bir bölgede hasar oluşur. Kompozit malzemenin darbe davranışını belirlemek için Charpy ve Izod gibi darbe deneyleri kullanılmış ve düşük hızlı 10 m/s'ye kadar

olan hızlar olarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte (Abrate,1998) tabakalı kompozit malzemelerde darbe ile ilgili yapmış olduğu çalışmalarda düşük hızlı darbeleri 100 m/s' den düşük hızlarda oluşan darbeler olarak göstermiştir. Bu çalışmaların yanı sıra sınıflandırmanın darbe sonucunda meydana gelen hasara göre yapılması gerektiği görüşü de savunulmaktadır. Bu nedenle yüksek hız, delinme şeklinde meydana gelmiş fiber kopması, düşük hız ise tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) ve matris kırılması ile belirlenir. Davies ve Robinson,(1992) düşük hızlı darbeyi kalınlık boyunca gerilme dalgasının gerilme dağılımında önemli bir rolü olmadığı bir darbe türü olduğunu belirtmekte ve yüksek hıza geçişi veren bir model önermektedir. İki cismin çarpışması sonucunda temas yüzeyinde oluşan basınç nedeniyle deformasyon ve/veya nüfuziyet meydana gelebilir. Çarpışmanın etkisiyle oluşan enerji iki cismi birbirinden ayırmaya zorlar. Darbe sonrasında oluşan deformasyonlar cisimlerin sertliğine olduğu kadar, izafi çarpma hızına da bağlıdır. Yüksek hızlı çarpışmada plastik akma oluşabileceği için büyük şekil değiştirmeler olabilir. Örnek olarak krater oluşumu ve dalma verilebilir. Plastik deformasyonun oluşabilmesi için gerekli hız aralığı $10^2 \times V_y$ ile $10^3 \times V_y$ arası hızlardır. V_y plastik akmayı başlatmak için gereken en küçük izafi hızdır. Bu değer metallerde 0,1 m/s dir. (Bozkurt L., 2011, Yüksek Lisans Tezi)

Newton'un II. Kanununa göre bir parçacığın momentumundaki değişim ona etki eden kuvvetle orantılıdır ve doğrultusu etki eden kuvvetle aynı doğrultudadır.

$$\frac{d(M\mathbf{V})}{dt} = \mathbf{F} \quad (3.1)$$

Burada kütle sabit olduğundan

$$\mathbf{V}(t) - \mathbf{V}(0) = M^{-1} \int_0^t \mathbf{F}(t') . dt' \equiv M^{-1} \mathbf{P}(t) \quad (3.2)$$

Denklemleri elde edilir. Burada düşük hızlı darbe için başlangıç şartları $t=0$ iken $F_i=0$ ve buradan

$$v = \sqrt{2gh} \quad (3.3)$$

elde edilir. Darbe sırasındaki temas kuvvetleri F_i

Newton'un II. kanununa göre aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$a_i = F_i / m \quad (3.4)$$

Burada F_i ölçüm sisteminden alınan 4×10^{-5} sn aralıklarla alınan kuvvet değerleridir.

a_i ise bu zaman aralığı için gerekli olan ivme değeridir. (Kara, M., 2006) yaptıkları çalışmada düşük hızlı darbe için ivmenin zamanın lineer fonksiyonu olarak kabul edilebileceğini göstermişlerdir. Bu durumda

$$a(t) = kt + c \quad (3.5)$$

Burada k ve c birer katsayı olup her zaman artışı için $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ değeri yeniden hesaplanmalıdır burada k ve c değerleri aşağıdaki şekilde bulunabilir. (Kara, M., 2006)

$$k = (a_i - a_{i-1}) / (t_i - t_{i-1}) \quad (3.6)$$

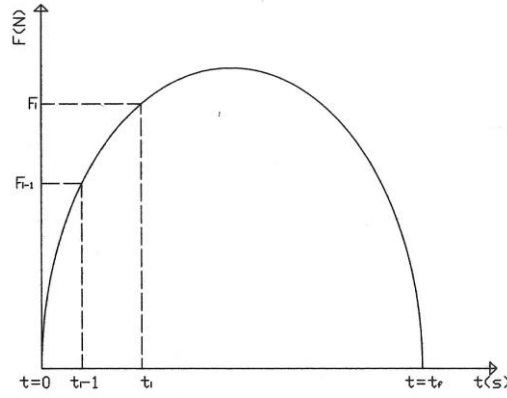
$$c = (t_i a_{i-1} - t_{i-1} a_i) / (t_i - t_{i-1}) \quad (3.7)$$

Bu durumda

$$dV(t) = a(t)dt; \int_{V_{i-1}}^V dV(t) = \int_{t_{i-1}}^t a(t)dt \quad (3.8)$$

$$dS(t) = V(t)dt; \int_{S_{i-1}}^{S_i} dS(t) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} V(t)dt \quad (3.9)$$

Denklemleri yazılabilir.



Şekil 3.4 Tipik kuvvet-zaman değişimi

Darbe sırasında meydana gelen impuls aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$J = \int_0^{t_f} F(t)dt \quad (3.10)$$

Absorbe edilen enerji ise

$$W = \int_0^{s_f} F(s)ds \quad (3.11)$$

Serbest düşmeye bırakılan ağırlığın ilk hız sıfırdır;

$$v = \sqrt{2gh} \quad (3.12)$$

h yüksekliğinde vurucu kütesinin sahip olduğu potansiyel enerji ise;

$$E_p = m.g.h \quad (3.13)$$

Deneyler sırasında elde edilen $F(t)$ değerleri bir miktar gürültü içermektedir. Bu durum $F-t$ diyagramlarının şekillerinin bozulmasına ve analizinin zorlaşmasına sebep olmaktadır. Bu istenmeyen durumun ortadan kaldırılabilmesi için matlab yazılımından faydalanılarak eğriler islah edilmiştir. Deney sırasında oluşan temas kuvvetleri zamana bağlı olup deney cihazından elde edilmiştir. Daha sonra hız-zaman, yerdeğiştirme-zaman, yerdeğiştirme – hız eğrileri elde edilmiştir. Darbe sonrasında malzemede oluşan hasar modları stereo mikroskop yardımıyla

incelenmiştir. Devamında malzemelerin hasar sonrası kalan rijitliklerinin belirlenmesi amacıyla sabit yük altında üç noktadan eğme testi uygulanmıştır.

3.1.6. Kompozit Malzemelerin Hasar Mekanizmaları ve Kırılma Davranışları

Kompozit malzemelerin hasar davranışları, mühendislik açısından çözülmesi gereken bir problemdir. Kompozit malzemeler genel olarak statik ya da dinamik yük altında imalattan kaynaklanan hatalara karşı oldukça duyarlıdır. Bu sebeple tabakalı kompozit malzemelerde çatlak ilerlemesiyle ilgili geniş araştırmalar yapılmıştır.

Yapı ve makine elemanlarında muhtelif şekillerde çatlaklar bulunabilir. Bunlar kenar çatlağı, boydan boya çatlak ve yüzey çatlağı olarak sayılabilir. Kırılma mekaniği açısından her biri farklı davranış göstermesine rağmen yüzey çatlağı diğer çatlaklara kıyasla daha farklı bir davranış gösterir. Çünkü gerek eliptik, gerek dairesel şekilli olan yüzey çatlağının ilerlemesi, merkeze göre alınan bir açıyla değişim gösterir. Diğer çatlaklarda böyle bir değişim söz konusu değildir. Yüzey çatlağı genellikle basınçlı kaplarda, korozif ortama maruz yüzeylerde, boru hatlarında ve roket gövdelerinde bulunabilir.

Elyaf takviyeli tabakalar, anizotropik ve heterojen yapılarından dolayı dört değişik önemli darbe hasar modunun ortaya çıkmasına müsaittirler.(bunların dışında daha birçok hasar modundan bahsetmek mümkündür) Bu modların tabakalı bir kompozit üzerindeki modeli Şekil’de görüldüğü gibidir. (Kara, M., 2012, Doktora Tezi).

1. Matris kırılması: Çatlama liflere paralel meydana gelir. Bunun nedeni basma gerilmesi ve kesme gerilmeleridir.

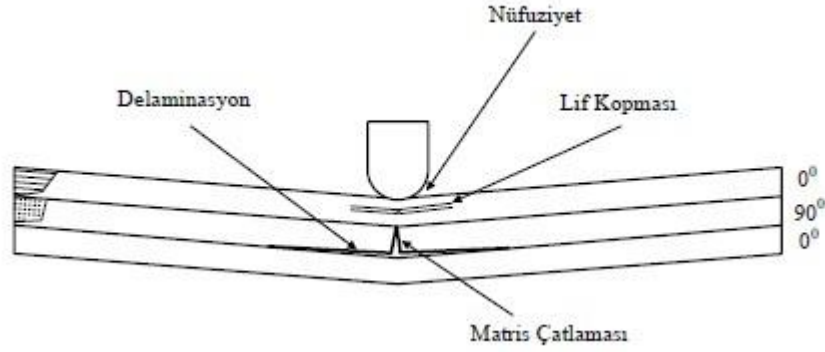
2. Delaminasyon modu: Tabakalar arası eğilme cevabı uyumsuzluğundan ortaya çıkar.

3. Elyaf kırılması: Gerilme altındaki lif kopar, sıkıştırma altındaki lif eğilir.

4. Nüfuziyet: Çarpan cisim kompozit malzemeye tamamıyla nüfuz eder.

Malzemedeki hasar modlarının belirlenmesi sadece darbe olayı hakkında bilgi edinmek için değil, ayrıca yapının kalıcı mukavemeti hakkında fikir edinmeyi

sağlaması açısından da çok önemlidir. Hasar modları arasındaki etkileşmeyi anlamak, hasar modunun başlaması ve ilerlemesini anlamak açısından da çok önemlidir.



Şekil 3.8 Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar çeşitleri

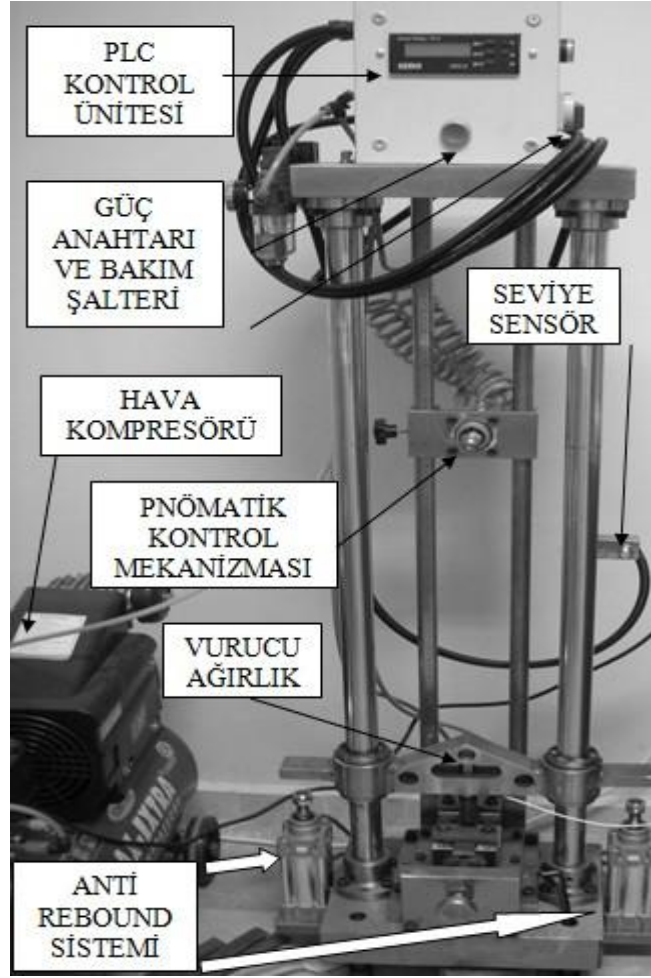
Kompozit malzemelerin kırılma tokluğuna veya gerilme şiddet faktörüne etki eden sebeplerden biriside takviyenin geometrisidir (Harel ve ark. 1980, Sayer, M., 2009, Doktora Tezi). Bu takviye geometrisi tek yönde veya açılı olabilir. Kompozit malzeme tabakalardan meydana gelmişse kırılma tokluğunda değişimler olabilir.

3.2. Yöntem

Üzerinde yüzey çatlakları bulunan hibrit kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe davranışlarını incelemek için önce malzeme konfigürasyonları belirlenerek malzemeler üretildi. Malzemeler, mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yakma ve çekme testlerine tabi tutuldu. Daha sonrasında malzemelerin bir yüzeyine farklı geometrilerde (derinlik ve genişliklerde) çatlaklar açıldı. Bir yüzeyine çatlak açılan malzemelerin diğer yüzeyine farklı hızlarda darbe yüklemeleri uygulandı. Böylece uygulanan darbenin hızının, açılmış olan çatlakların derinliğinin, genişliğinin ve kompozit malzemenin konfigürasyonunun malzemenin mekanik davranışındaki etkisi görülmüş oldu.

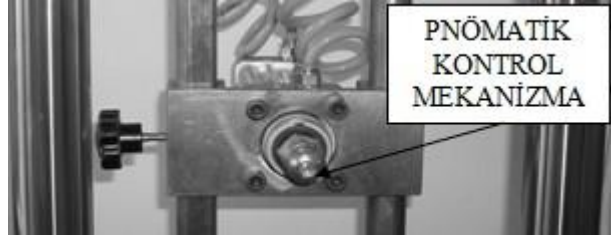
3.2.1. Deney Setinin Kurulması

Şekil 3.9’ de görülen ağırlık düşürme deneyi cihazı S.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunmaktadır. Vurucu ağırlık 5,6 kg olup düşme yüksekliği 1 metreye kadar çıkarılabilmektedir. Ağırlığın istenilen mesafeden bırakılabilmesi için pnömatrik mekanizma vardır. Böylece değişik darbe hızlarında deneylerin yapılması mümkündür. Hareketli vurucu kütlesi, gövdede bulunan çelik cetvel ve pnömatrik başlatma kolu yardımıyla mesafe ayarı yapılabilmektedir.



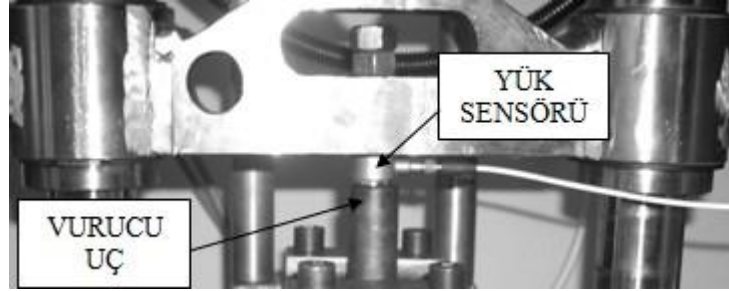
Şekil 3.9 Ağırlık düşürme deneyi cihazı

Şekil 3.10’de sistem hava ile dolduktan hemen sonra vurucu ağırlığı serbest bırakacak hareketli pnömatrik kontrol mekanizması görülmektedir.



Şekil 3.10 Pnömatik kontrol mekanizması

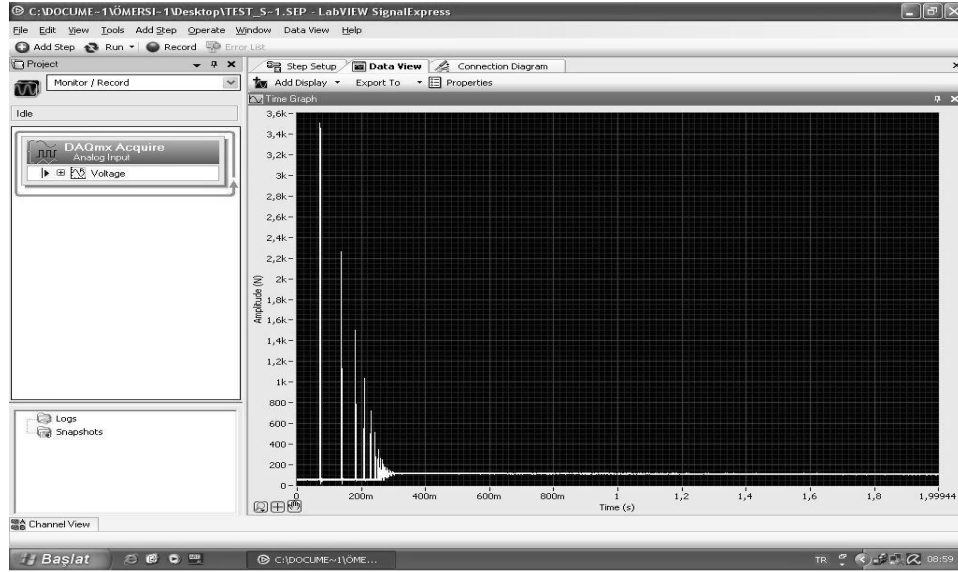
Şekil 3.11’ da vurucu ile kuvvet algılayıcı bağlantısı görülmektedir. Deneyde kullanılan vurucu 12 mm çapında, yarı küresel uçlu bir geometriye sahiptir. Kuvvet algılayıcı vurucu kütlesi ile vurucu arasına monte edilmiştir. Kuvvet algılayıcıya bağlanan teflon kablo yardımı ile elde edilen sinyal Labview sinyal expres yazılımı kullanılarak elektronik kontrol ünitesine iletilmektedir.



Şekil 3.11 Vurucu-Kuvvet algılayıcı bağlantısı

Elektronik aksamda kuvvet algılayıcıdan gelen sinyali algılayıp yükselten bir sinyal şartlandırıcı bulunmaktadır. Kuvvet algılayıcı ile sinyal şartlandırıcı arasındaki bağlantıda teflon kablo kullanılmıştır. Teflon kablo kuvvet algılayıcıdan gelen sinyalin özelliğini kaybetmeden iletilmesini sağlamaktadır. Sinyal şartlandırıcıda yükseltilecek sinyalin data kartına iletilmesi için bağlayıcı blok kullanılmıştır. Sinyalin doğrudan karta verilmesi risk taşımaktadır. Kartın yanmasına veya işlevini yitirmesine sebep olabilir. Bu yüzden yükseltilecek sinyal bir bağlayıcı blok üzerinden iletilmektedir. Sistemle uyumlu çalışabilmesi için bağlayıcı blok kullanılmıştır. Bağlayıcı blok farklı verilerinde aktarılmasında kullanılabilir. Örneğin hız sensöründen alınan bir veri kolaylıkla data kartına iletilmektedir. Ayrıca mevcut sistemle beraber çalıştırılacak cihazlar için data kart tarafında üretilen gerilim bu bağlayıcı blok üzerinden alınabilmektedir. Ana kart üzerine yerleştirilen data kart ise

gelen sinyali algılayıp işleyen karttır. Data kart aynı anda birbirinden farklı birçok sinyali alıp işleyebilmektedir. Şekil 3.12’ de örnek bir sinyal görülmektedir.



Şekil 3.12 Örnek sinyal görüntüsü

Yazılım ile zamana göre kuvvetin değişim grafiği elde edilmiştir. Bu yazılım sinyalin özelliklerini belirlemekte büyük kolaylık sağlamaktadır. Örneğin; kaç saniye boyunca sinyal alınacağı, saniyede kaç veri alınacağı ayarlanabilmektedir. Ayrıca hesaplanan bir katsayı ile alınan verileri çarparak kuvvet Newton olarak alınabilmektedir.



Şekil 3.13 Elektronik kontrol ünitesi

3.2.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan deney numuneleri 90 mm × 25 mm boyutlarındadır. Numuneler 18 tabakadan oluşturulmuş ve aşağıdaki konfigürasyonlar da üretilmiştir. Bir kompozit malzemede iki yönde yük taşıma kabiliyeti ve özellikle de düzlem içi kayma gerilmelerini taşıyabilecek bir konfigürasyon olarak aşağıda belirtilen konfigürasyonlar kullanılmıştır.

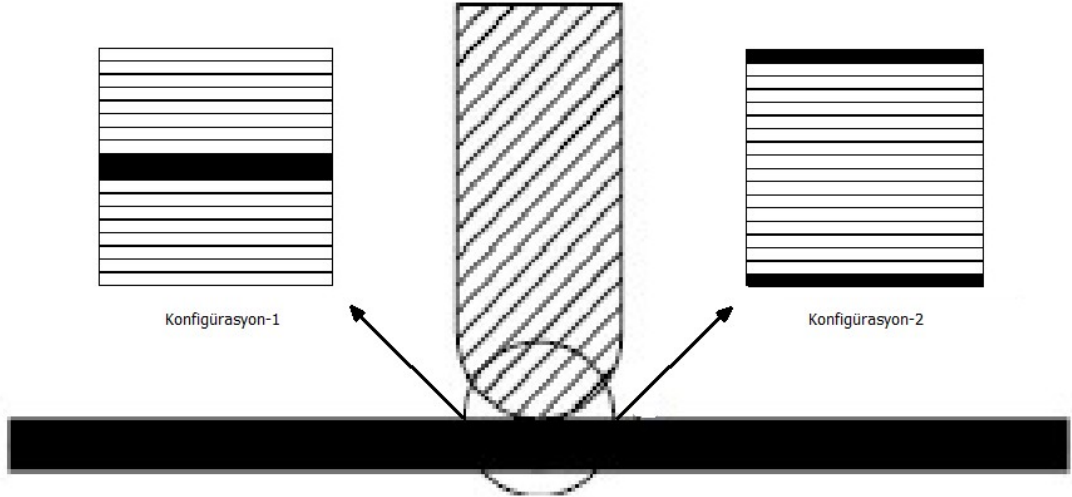
Konfigürasyon-1

[0G°,-45G°,+45G°,0G°,90G°,0G°,+45G°,-45G°,0C°,0C°,-45G°, +45G°,0G°,90G°,0G°,+45G°,-45G°,0G°]

Konfigürasyon-2

[0C°,-45G°,+45G°,0G°,90G°,0G°,+45G°,-45G°,0G°,0G°,-45G°, +45G°,0G°,90G°,0G°,+45G°,-45G°,0C°]

Şeklinde tasarlanmış tabakalı hibrid kompozit malzemeler İZOREEL firması tarafından üretilmiştir. Numunelerin üretiminde kullanılan farklı iki konfigürasyonlarda birincisinde karbon iç kısımdayken ikincisinde karbon dış kısımda konumlandırılmıştır. Ayrıca üretilen bu numunelerin her biri 4 mm kalınlığındadır.



Şekil 3.14 Tabaka dizilimlerinin gösterimi

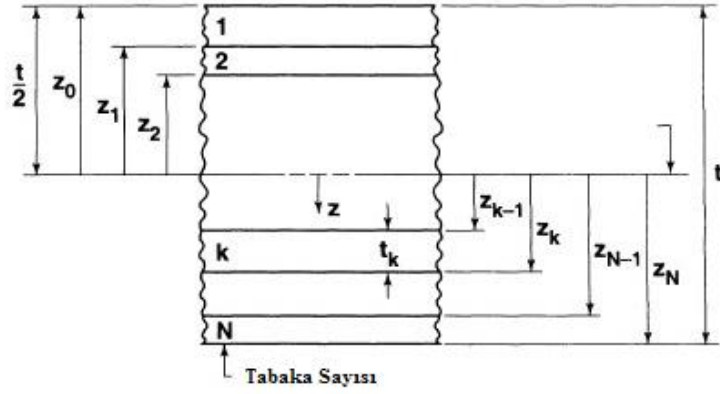
Konfigürasyon-1 ve Konfigürasyon-2 şeklinde iki farklı tabaka dizilimine sahip numunelere darbe deneyleri yapılmıştır.

Çizelge 3.1 Hibrit kompozit malzeme bileşenlerinin özellikleri (Bozkurt, L., 2011)

Tek yönlü karbon	Tek yönlü cam elyaf
Karbon elastisite modülü= 230 GPa	E camın elastisite modülü= 72 GPa
$E_1=136,93$ GPa	$E_1=47,16$ GPa
$E_2=7,18$ GPa	$E_2=7,76$ GPa
Karbonun çekme mukavemeti=40GPa	E camın çekme mukavemeti=2,4 GPa
Poisson oranı $\nu_{12}=0,30$	Poisson oranı $\nu_{12}=0,27$
Yoğunluk=360 gr/m ²	Yoğunluk=250gr/m ²
Kayma modülü $G_{12}=0,052$ GPa	Kayma modülü $G_{12}=0,024$ GPa
10 cm genişlikte 22 adet roving	10 cm genişlikte 40 adet roving
Reçine Hexion EPR840-EPH875	Reçine Hexion EPR840-EPH875
Curing şartları 120°C 4 saat	Curing şartları 120°C 4 saat

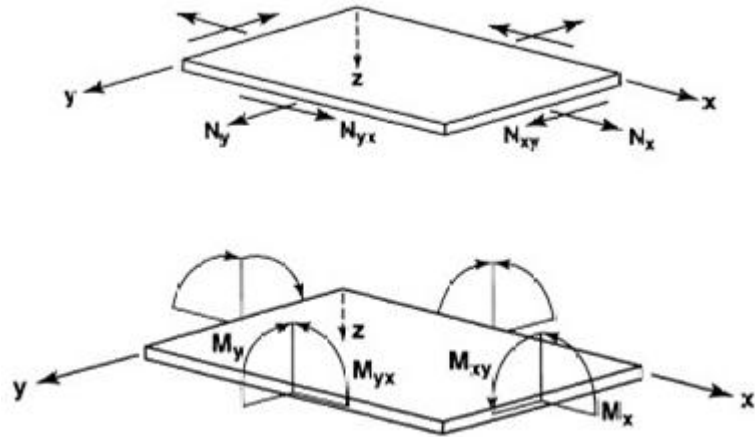
Çizelge 3.1’ de tabakalı kompozit malzemelerde kullanılan elyafların mekanik özellikleri bulunmaktadır. Tabakalı kompozit malzemelerin konfigürasyonlarının belirlenmesinde üretim hızları ve maliyetlerinin aynı olduğu benzer iki malzemenin hangisinin daha dirençli olduğunun belirlenmesi amaçlandı. Tabakalı kompozit malzemedeki kullanılan karbon elyaflar, dışta olması durumunda eğilmeye daha dirençli bir davranış gösterir ama karbon elyaflar darbeye dirençli değildir. Karbon elyafların iç kısımda olduğu konfigürasyonlarda ise darbe yüklemesi esnasında karbon tabakalar kayma gerilmesine maruz kalacaktır.

Karbon tabakaların dışta veya içte olması durumunda eğilme rijitliğindeki değişim teorik olarak hesaplanarak tabakalı kompozit malzemelerin tabaka dizilimlerinde ki karbonun yerinin bize sağlayacağı avantaj belirlenmiştir. (Jones, R.M.) Şekil 3.15’ de tabakalı kompozit malzemelerin tabaka dizilimleri gösterilmiştir.



Şekil 3.15 Tabakalı kompozit malzemelerde tabakaların gösterimi

Şekil 3.16’ de ise tek bir tabaka üzerine uygulanan yüklemeler neticesinde meydana gelen kuvvet ve bu kuvvetler neticesinde meydana gelen momentler şematik olarak gösterilmiştir. Her bir tabaka için kuvvet ve moment değerleri toplanarak tabakalı kompozit malzemenin tamamı için kuvvet ve moment değerleri elde edilebilir. Kuvvet ve moment ifadelerini matris şeklinde de elde edebiliriz. (Jones, R.M.)



Şekil 3.16 Bir tabakada meydana gelen kuvvet (N) ve moment (M) (Jones, R.M.)

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k dz \quad (3.21)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} z dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k z dz \quad (3.22)$$

Tabakalı kompozit malzemelerde kuvvetle yer değiştirmeler arasındaki ilişki denklem 3.21-3.22' de verilmiştir. Formülasyonlarda görüldüğü üzere (3.21-3.22) kuvvet ve moment ifadeleri rijidlik matrisleri şeklinde ifade edilmektedir. (Jones, R.M.) Burada Q_{ij} rijitlik matrisidir.

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \\ B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\ D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} (\bar{Q}_{11})_k &= \frac{E_1^k}{1 - \nu_{12}^k \nu_{21}^k} & (\bar{Q}_{12})_k &= \frac{\nu_{12}^k E_1^k}{1 - \nu_{12}^k \nu_{21}^k} & (\bar{Q}_{22})_k &= \frac{E_2^k}{1 - \nu_{12}^k \nu_{21}^k} \\ (\bar{Q}_{16})_k &= 0 & (\bar{Q}_{26})_k &= 0 & (\bar{Q}_{66})_k &= G_{12}^k \end{aligned} \quad (3.27)$$

Ayrıca A_{ij} uzama rijitliğini, B_{ij} uzama-eğilme rijitliğini ve D_{ij} eğilme rijidliğini temsil etmektedir. Çalışmalarımızı gerçekleştirdiğimiz tabakalı kompozit malzemelerin simetrik malzemeler olması nedeniyle B_{ij} bu matris çözümünde sıfır olarak değerlendirildi.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Dolayısıyla denklem 3.23 ve 3.24' deki $[B_{ij}]$ matrisi silinerek denklem 3.25 ve 3.26 elde edilir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Çizelge 3.1' deki E_1 ve E_2 değerlerinden faydalanılarak yukarıdaki ifadelerin her bir tabakalı kompozit malzeme için hesaplanması neticesinde tabakalı kompozit malzemenin tamamı için tek bir rijitlik matrisleri elde edilmiştir. Çizelge 3.2' de görüldüğü üzere D_{11} matris değeri tabakalı kompozit malzemenin eğilme rijitliğini ifade etmektedir. (Jones, R.M.) Konfigürasyon-2 dizilimine sahip tabakalı kompozit malzemenin konfigürasyon-1 dizilimine sahip tabakalı kompozit malzemeye nazaran eğilme rijitliği daha fazla olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.2 Tabakalı kompozit malzemenin toplam rijitlik değerleri

	Konfigürasyon-1 (Gpa)	Konfigürasyon-2 (Gpa)
A11	695,9	695,9
A12	118,2	118,2
A22	273,0	273,0
A16	81,1	81,1
A26	81,0	81,0
A66	101,9	101,9
B11	0	0
B12	0	0
B22	0	0
B16	0	0
B26	0	0
B66	0	0
D11	14530,5	27457,4
D12	3133,4	3133,4
D22	6802,0	6792,6
D16	2170,8	2170,8
D26	2168,2	2168,2
D66	2726,5	2726,5

Yakma testi S.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği laboratuvarında matris ve takviye malzemesinin hacimsel oranını hesaplamak amacıyla ASTM-D2584 kurallarına uygun olarak yapıldı. Malzemelerimiz konfigürasyon-1 ve konfigürasyon-2 şeklinde üretilmiş olup 2,5 cm genişliğinde, 4,5 cm uzunluğunda, 0,4 cm kalınlığındadır. Malzemelerin hacmi dikdörtgenler prizması şeklinde olduğundan en, boy, yükseklik değerleri çarpılarak $4,5\text{cm}^3$ olarak hesaplandı. Daha sonra malzemeler hassas terazide tartılarak ağırlıkları tespit edildi. Başlangıçta $A_1=8,04$ gr ve $A_2=8,46$ gr olarak tartıldı.

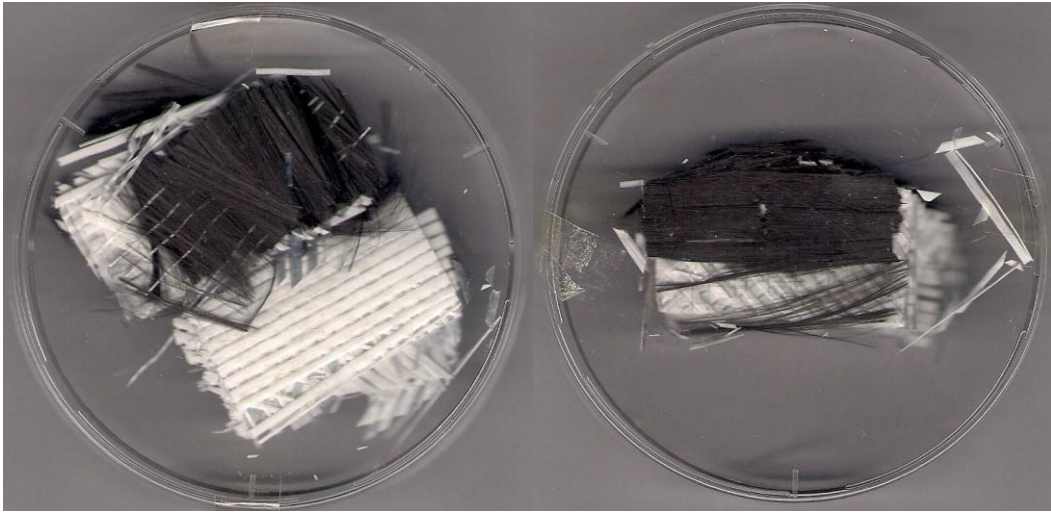


Şekil 3.17 Yakma testi öncesi kompozit malzemeler

Malzemeler daha sonra 600°C' ye ayarlanmış olan fırına konuldu ve bu sıcaklıkta 180 dakika yakma işlemine tabi tutuldu. Soğumanın ardından malzemeler hassas terazide yeniden tartıldığında;

$A_1=5,3310$ gr (4,8208 gr cam+0,5102 gr karbon)

$A_2=5,7142$ gr (4,9968 gr cam+0,7174 gr karbon) kaldığı tespit edildi.



Şekil 3.18 Yakma testi sonrası A_1 ve A_2 kompozit malzemeleri

Elde edilen hacim ve ağırlık değerlerini kullanarak, hibrit kompozit malzemelerin yoğunluğu tespit edilerek $A_1=1,79$ gr/cm³ ve $A_2=1,88$ gr/cm³ değerleri bulundu.

$$V_f = \frac{W_f / \rho_f}{W_c / \rho_c} \quad (3.12)$$

Burada W_f ve W_c elyaf ve hibrit kompozit malzemenin ağırlıkları, ρ_f ve ρ_c ise elyaf ve hibrit kompozit malzemenin yoğunluklarıdır. Burada cam yoğunluğu $\rho=2.0$ g/cm³ alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan malzemelerin yakma deneyi sonucunda elyaf hacimsel oranları (V_f) $A_1=0,59$ (%59 elyaf) $A_2=0,64$ (%64 elyaf) olarak hesaplanmıştır.

3.2.3. Deney Numunelerine Yüzey Çatlaklarının Açılması

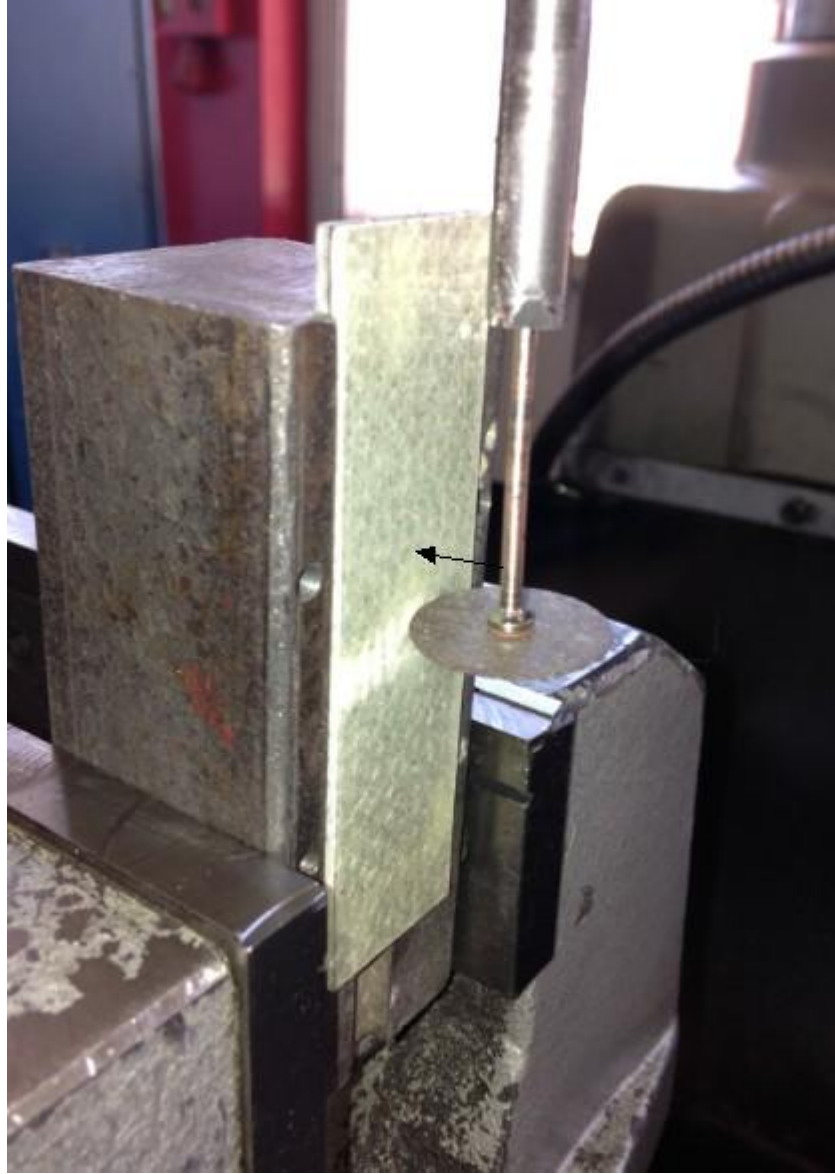
Yukarıda belirtilen konfigürasyonlarda üretilen kompozit malzemelere açılacak olan yüzey çatlakları için Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu' nun imalat atölyesindeki ekipmanlar kullanıldı. 90 mm x 25 mm ebatlarında ve 4 mm kalınlığındaki kompozit malzemelerin bir yüzeyine ilk hali 22,8 mm çapındaki karbon disklerin yardımıyla disk çapı değiştirilerek farklı parametrelerde yüzey çatlakları açıldı. Yüzey çatlaklarının açılmasında malzeme kalınlığının 4 mm olduğu göz önünde bulundurularak açılan yüzey çatlağında derinlik yani a değeri $2 \text{ mm} > a > 1 \text{ mm}$ aralıklarında alınarak yapılacak olan yüklemeler neticesinde açmış olduğumuz yüzey çatlağının etkisinin daha net görülmesi amaçlandı.

Elde edilmek istenen a (çatlak derinliği) ve c (çatlağın genişliği) değerlerine ulaşmak için, diskin çapını belirlenen değere küçültmek amacıyla şekil. 3.19' da ki alet bileme tezgâhı kullanıldı.



Şekil 3.19 Alet Bileme Tezgâhı

Alet bileme tezgâhı şekildeki gibidir. Karbon disk alet bileme tezgahına bağlanarak istenilen çapa kadar düşürüldükten sonra freze tezgâhının yardımıyla numunelere çatlaklar açıldı. Freze tezgâhına şekil 3.20’ de gösterildiği gibi imal edilen aparat yardımıyla numune bağlandı. Daha sonrasında üst tarafa bağlanan karbon disk tam numunenin ortasına getirilerek sıfırlandı. Sıfırlama işlemi sonrasında karbon disk numune içerisine kaç mm’ lik bir çatlak derinliği açmak istiyorsak o kadarlık derinlik doğrultusunda hareket ettirilerek numune içerisine istenen a (çatlak derinliği) değeri açıldı.



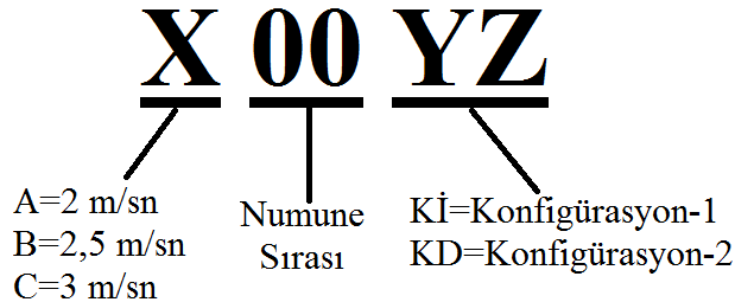
Şekil 3.20 Freze Tezgâhı

Daha sonrasında bu işlemler disk çaplarının değiştirilmesiyle istenen geometride yüzey çatlaklarının açıldığı numunelerin elde edilmesiyle devam etti. Hazırlanan numuneler yukarıda belirtildiği gibi farklı iki konfigürasyonda ve aynı özelliklerde üç grup halinde olmak üzere toplamda 90 numune elde edildi. Üç grup olarak elde edilen numunelere daha sonrasında 2 m/s, 2,5 m/s ve 3 m/s olmak üzere farklı üç hızda darbe uygulanmıştır. Böylece farklı konfigürasyon ve çatlak parametrelerinin yanı sıra darbe hızındaki değişimde malzeme üzerinde ki etkisi gözlenmiş oldu.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE ANALİZ

Bu bölümde, yapmış olduğumuz deneysel çalışmaların neticesinde elde edilen veriler değerlendirilecektir. Üç farklı hızda ve iki farklı konfigürasyonda olmak üzere farklı a/t ve a/c oranlarında toplam 90 adet numuneye yapılan darbe deneyleri neticesinde elde edilen veriler oluşturulan grafiklerle gösterilmektedir. Grafiklerin analizinde, üzerinde yüzey çatlakları bulunan numunelerin darbe davranışı iki kategoride incelenmiştir. Bunlardan birincisi tabaka diziliminin etkisi diğeri ise açılmış olan yüzey çatlakları geometrisinin (a/t ve a/c) etkisidir. Ayrıca düşük hızlı darbe deneyleri neticesinde deney numunelerinin mevcut enerji birikimleri grafikler halinde gösterilerek değerlendirilmesi yapılmıştır.

Şekil 4.1' de deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği malzemelerin isimlendirilmesinde kullanılan kodlamalar şematik olarak gösterilmiştir. A=2 m/sn, B=2,5 m/sn, C=3 m/sn darbe hızlarının gösterirken ortadaki rakamlar 1-15 arası numunelerin sıralamasını göstermektedir. Son kısımdaki KD ve Kİ ise numunenin konfigürasyonunu göstermektedir. KD ifadesi karbonun dış kısımda olduğu konfigürasyon-2' yi gösterirken Kİ ise karbon tabakanın ortada olduğu konfigürasyon-1' e ait olduğunu göstermektedir.

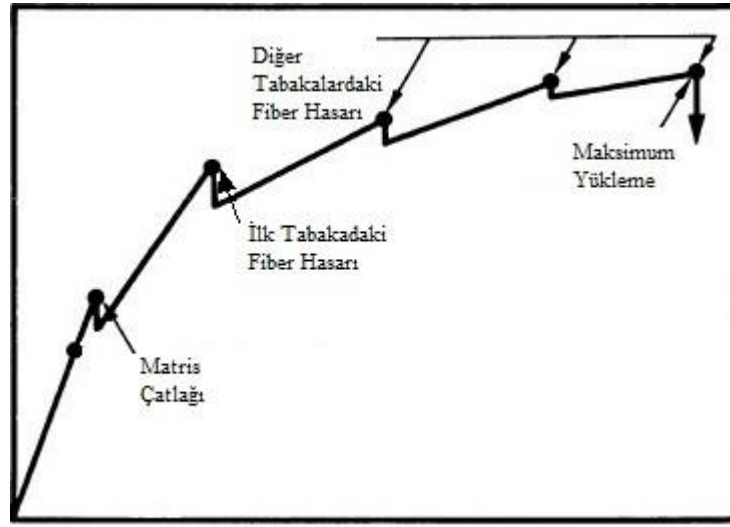


Şekil 4.1 Numunelerin isimlendirilmesi

Ek 1' de deneysel çalışmaların yapıldığı numunelere açılan yüzey çatlaklarının geometrileri verilmektedir. Belirtilen 15 farklı çatlak geometrisi, iki farklı konfigürasyonda ve üç farklı hızda gruplandırılarak 90 adet deney numunesi belirlenmiştir. Bu geometrilere sahip yüzey çatlaklı numunelere yapılan deneyler neticesinde elde edilen veriler üç kategoride incelendi. Analizler, malzeme türünün yani üretilmiş olan hibrid tabakalı kompozit levhaların konfigürasyonu, açılmış olan

yüzey çatlağı geometrileri ve deneylerin yapılmış olduğu malzemelerin birikimli enerji absorpsiyon kapasitelerine göre yapılmıştır.

Matris çatlaklarının oluşumu şekil 4.2' de görüldüğü gibi kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-zaman eğrilerinde küçük salınımlar şeklinde karakterize edilebilir.(Jones, R.) Kuvvetteki ani düşüşlerse çoğunlukla tabakalar arası delaminasyon ve/veya elyaf kopması gibi ağır hasarlarla ilişkilendirilir. Delaminasyon aynı zamanda tabakalı kompozit malzemelerin eğilme rijidliğini düşürdüğünden kuvvet-yer değiştirme eğrisinde eğim değişikliği olarak karakterize edilebilir.



Şekil 4.2 Tabakaların Deformasyonu (Jones, R.M.)

4.1. Malzeme Türünün Etkisi

Yapmış olduğumuz çalışmada kullanılan kompozit malzemeler iki farklı konfigürasyona sahiptir. Hibrid tabakalı kompozit malzemelerin tabaka dizilimleri ile ilgili konfigürasyonlar daha önce verilmişti. Bu bölümde, yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen kuvvet-zaman, kuvvet-yer değiştirme ve Enerji Absorpsiyon kapasiteleri söz konusu iki farklı konfigürasyon durumuna göre değerlendirilecektir. Değerlendirmelerimizde sabit a/t (0,4) ve a/c (0,4) oranları sahip darbe deney numunesi göz önünde bulundurularak sadece malzemenin tabaka dizilimindeki farklılıkların malzemenin darbe davranışına etkisi incelenmeye çalışılmıştır.

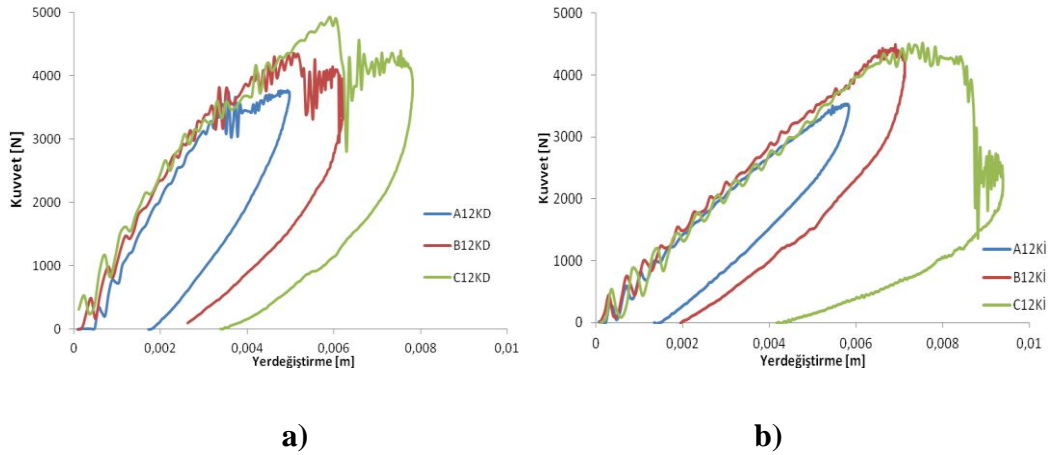
Grafikler incelendiğinde temasın başlamasıyla birlikte malzemeye enerji aktarımı da başlamış, bunun neticesinde malzemede pozitif yönde bir deplasman görülmüştür. Enerji aktarımı süresince kuvvet artışı ve bunun neticesinde deplasman artışı yaşanmış ve kuvvet maksimum noktaya kadar ulaşmaktadır. Bu aşamada vurucunun sahip olduğu kinetik enerji tamamen malzemeye aktarılmış olup, bu noktada vurucunun hızı sıfıra düşmüştür. Malzemeye transfer edilen enerji, elastik enerji ve yutulan enerji olarak iki farklı türde incelenebilir. Vurucu hızının sıfıra düşmesiyle malzemede depo edilen elastik enerji iade edilmeye başlamış ve bunun neticesinde malzemede bir kısım negatif deplasman gözlemlenmiştir. Şekillerde de görüldüğü üzere kuvvetin sıfıra indiği bu noktada malzemenin gösterdiği deplasmanın malzemede oluşan kalıcı hasarlar sebebiyle olduğu kabul edilmektedir.

4.1.1. Kuvvetin Yer Değiştirmeye Bağlı Olarak Değişimi

Şekil 4.3' de sabit a/t ve a/c oranlarında malzemenin darbe yüklemesine maruz kalması neticesinde göstermiş olduğu kuvvet-yer değiştirme davranışı farklı hızlarda gösterilmiştir. Konfigürasyon-2 de karbon dış kısımlarda yer alırken, konfigürasyon-1 de karbon iç kısımda yer almaktadır. Grafikler incelendiğinde karbonun dış kısımda olması durumunda hem malzemelerin darbe yüklemesine karşı vermiş olduğu cevabın daha uzun sürmesi hem de malzemelerde daha az kalıcı hasarın olduğu gözlemlenmektedir. Bunun nedeni olarak karbonun daha rijid bir yapıya sahip olması ve bu doğrultuda daha fazla yükü taşıyabilmesi gösterilebilir. Şekil 4.3' de görüldüğü gibi dinamik cevap her iki konfigürasyonda da küçük salınımlarla başlamıştır.(Matris hasarının belirtisi olarak) Proses ilerlerken kuvvetin belli bir noktaya ulaşmasıyla kuvvette elyaf hasarının belirtisi olan yaklaşık 600-800 N' luk bir dalgalanmaları görülmüştür.(KD) özellikle 3 m/sn hızla yapılan darbeye kuvvetin maksimum noktaya ulaşmasıyla birlikte kuvvette ani bir düşüş ve bunu takip eden kuvvet dalgalanmaları yaşanmıştır. bu durum 3 m/sn' de yapılan darbeye kuvvetin 5000 N'a ulaşmasıyla birlikte delaminasyonun olduğu şeklinde yorumlanabilir. Grafikleri incelediğimizde dikkat çeken diğer bir husus ise karbonun iç kısımda olması durumunda hibrid tabakalı kompozit malzemenin kuvvet yer

değiştirme grafiğinin daha lineer olmasıdır. Karbonun dış kısımda olduğu malzemelerde ise bu tek lineerliğin yerini nonlineer (çift eğimli) bir eğri almıştır. Karbonun daha rijid olması nedeniyle belirli bir yükleme değerine kadar karbon tabaka taşıyabileceği yükü taşımış, 3000-3500 N değerlerinden sonraki yüklemelerde daha az eğimli bir davranış sergilenmiştir.

Şekil 4.3’ deki grafiklerin incelenmesi neticesinde dikkat çeken diğer bir hususta ilk yüklemeler esnasında karbonun iç kısımda olduğu grafikte karbonun dış kısımda olmasına kıyasla daha fazla titreşim söz konusudur. Bu titreşimin nedeni olarak karbonun iç kısımda olduğu malzemelere yapılan darbe deneyleri esnasında matris malzemesi olarak kullanılan epoksinin ve cam elyaf yapının daha fazla titreşime sebep olması gösterilebilir.



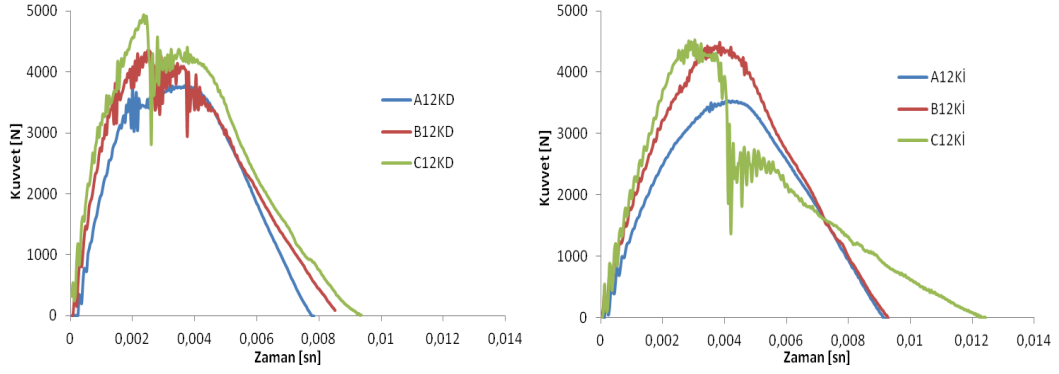
Şekil 4.3 $a/t=0,4$ ve $a/c=0,4$ için farklı hızlarda ki kuvvet-yer değişimi grafikleri a)konfigürasyon-2
b)konfigürasyon-1

Farklı hızlarda yapılan deneylerde yukarıda anlatılan davranışların benzer olduğu görülmektedir. ancak vurucu hızı artışıyla birlikte malzemede gerçekleşen hasarların boyutunun artması kendisini kuvvet-yer değiştirme eğrisi üzerinde farklı oluşumlar olarak göstermektedir. Önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi tabakalı kompozit malzemelerde genel hasarlar delaminasyonlar, matris hasarı yada fiber hasarı şeklinde olabilmektedir. Bu hasarların oluşumu ve gelişimi kendilerine has karakteristik özellikler ve kendilerine has dinamik davranışlardan da anlaşılabilir.

Konfigürasyon-1 için matris hasarı oluşumu genel anlamda geçerli olmakla birlikte elyaf hasarının belirtisi olan salınımlar da beraberinde gözlenmiştir. Buna karşılık kuvvetin 4500N' a ulaşmasıyla birlikte kuvvette yaklaşık 3000N' a varan bir düşüş görülmekte bunun sonucunda daha düşük şiddette kuvvet salınımları yaşanmıştır. Bu durumun konfigürasyon-1'e sahip numunelerde ciddi bir delaminasyon oluşumu olarak yorumlanmasıyla beraber karbonun içte olması halinde ulaşılan maksimum kuvvetler daha düşük olmakla birlikte hasar gelişiminin ağırlıklı delaminasyon oluşumu şeklinde olduğu söylenebilir. Tabakalı kompozit malzemelerde delaminasyon oluşumu tabakalar arasındaki kayma gerilmesiyle ilişkilendirilir.(Jones, R.M.) Yükleme koşulları itibariyle deneysel çalışmada yapılmış olan yüklemeler kesmeli eğilme durumunu doğurur. Karbon tabakanın ortada olması karbon-karbon ve cam-karbon tabakalarının kesmeli eğilme yüklemesi durumunda maksimum kayma gerilmesinin maksimum olduğu durumla örtüşmektedir. Konfigürasyon-2' ye sahip numunelerde kuvvet-yer değiştirme eğrilerinde iki farklı eğimli bölge görülmektedir. Bu durum vurucunun ilk temas ettiği noktada karbon elyaflarının bulunması ve bu elyafların kolaylıkla deforme olarak sürecin ilerleyen safhalarında vurucunun darbe direnci daha düşük olan cam elyafla etkileşmesi ile açıklanabilir.

4.1.2. Kuvvetin Zamana Bağlı Olarak Değişimi

Şekil 4.4' de sabit a/t ve a/c oranlarında malzemenin darbe yüklemesine maruz kalması neticesinde göstermiş olduğu kuvvetin zamana bağlı olarak değişimi farklı hızlarda gösterilmiştir. Konfigürasyon-2 de karbon dış kısımlarda yer alırken, konfigürasyon-1 de karbon iç kısımda yer almaktadır.



a)Konfigürasyon-2

b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.4 $a/t=0,4$ ve $a/c=0,4$ için farklı hızlarda ki kuvvet-zaman grafikleri a)konfigürasyon-2 b)konfigürasyon-1 ($A=2$ m/sn, $B=2,5$ m/sn, $C=3$ m/sn)

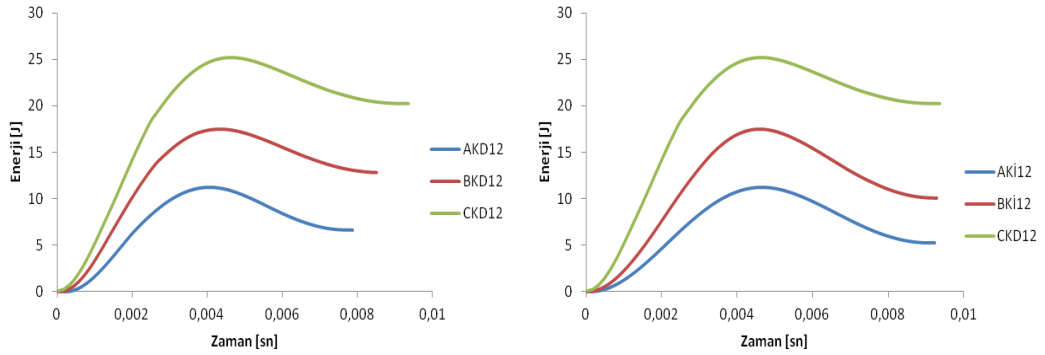
Grafikleri incelediğimizde darbe deneylerinin yapıldığı hibrid tabakalı kompozit malzemelerin karbonun dış kısımda yer alması durumunda uygulanan kuvvete karşı cevabının daha uzun sürdüğü görülmektedir. Yine benzer şekilde karbon tabakanın iç kısımda yer alması durumunda başlangıç yüklemeye değerlerinde, tabakalı hibrid kompozit malzemede belirgin bir titreşim söz konusudur. Karbon tabakanın dış kısımda olması durumunda uygulanan kuvvet değerinin maksimuma ulaştığı noktalarda ciddi bir titreşim söz konusudur. Bu zorlama sonrasında söz konusu tabakalı hibrid kompozit malzeme maksimum kuvvet değerine ulaşması sonrasında ani kuvvet düşmeleri görülmektedir. Bu ani düşüşleri matris hasarı olarak değerlendirebiliriz. Darbe yüklemesi sonrasında söz konusu tabakalı kompozit malzemede maksimum kuvvet sonrasında meydana gelen bu matris hasarları malzeme özelliklerine bağlı olarak fiber hasarıyla birlikte de değerlendirilebilir.

4.1.3. Enerji Absorbsiyon Kapasiteleri

Şekil 4.5' de tabakalı hibrid kompozit malzemelerin farklı hızlarda yapılan darbe deneyleri neticesinde maruz kaldığı enerji miktarları görülmektedir. Grafiklerin elde edilmesinde birikimli enerji metodu kullanılmıştır. Eğrilerin maksimum olduğu nokta toplam enerji miktarını göstermektedir. Grafiklere dikkatli bir şekilde bakıldığında

karbon tabakanın dış kısımda olduğu malzemelerde darbe yüklemesine verilen cevabın daha kısa sürede olduğu görülmektedir.

Grafiklerin incelenmesi neticesinde görülmektedir ki karbon tabakanın yeri malzemelerin enerji absorpsiyon kapasitelerini ciddi bir şekilde etkilemektedir. Karbon tabakanın iç kısımda olması durumunda daha fazla enerji absorbe edilerek daha az enerji iade edilmektedir. Buna karşın karbon tabakanın dış kısımda olması durumunda darbe yüklemeleri neticesinde maksimum noktadan itibaren karbonun iç kısımda olmasına nazaran daha fazla enerji iade edilmektedir. Darbe yüklemeleri neticesinde absorbe edilen bu enerjiler malzemelerde iç hasara yol açabileceğinden mümkün olduğunca daha az enerji absorpsiyonu istenmektedir.(S.Abrate)



a)Konfigürasyon-2

b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.5 $a/t=0,4$ ve $a/c=0,4$ için farklı hızlarda ki enerji absorpsiyon kapasiteleri a)konfigürasyon-2
b)konfigürasyon-1 (A=2 m/sn, B=2,5 m/sn, C=3 m/sn)

4.2. Yüzey Çatlağı Geometrisinin Etkisi

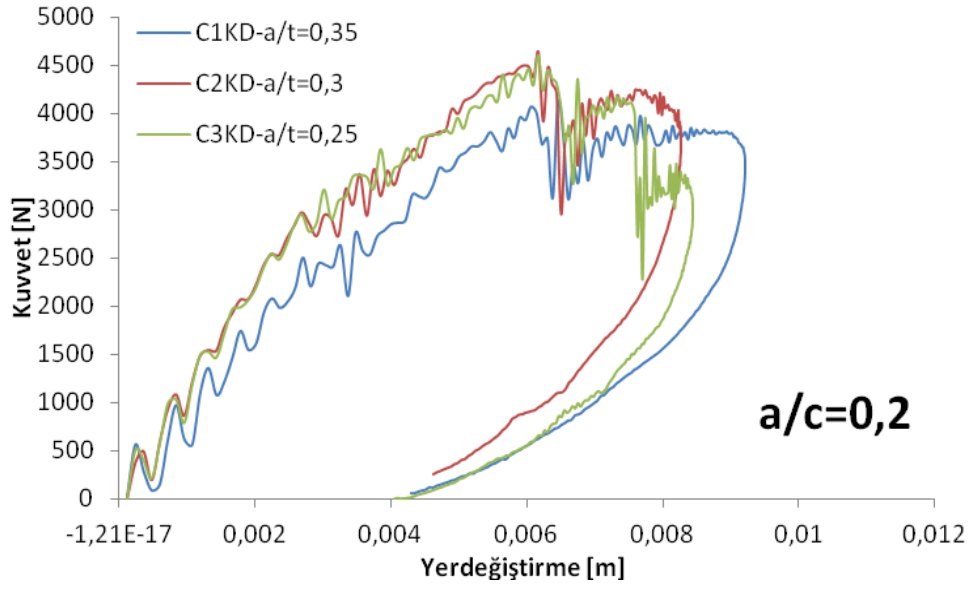
Bu bölümde, düşük hızlı darbe deneylerinin yapıldığı tabakalı hibrid kompozit malzemelerin üzerine açılmış olan farklı geometrilere ki yüzey çatlaklarının malzeme davranışına etkisi incelenecektir. Yapmış olduğumuz çalışmada kullanılan kompozit malzemeler iki farklı konfigürasyona sahiptir. Elde etmiş olduğumuz kuvvetin zamana ve yer değiştirmeye göre değişimleri 3 m/sn hızda yapılan darbe deneyleri göz önünde bulundurularak değerlendirilecektir.

4.2.1. Kuvvetin Yer Değiştirmeye Bağlı Olarak Değişimi

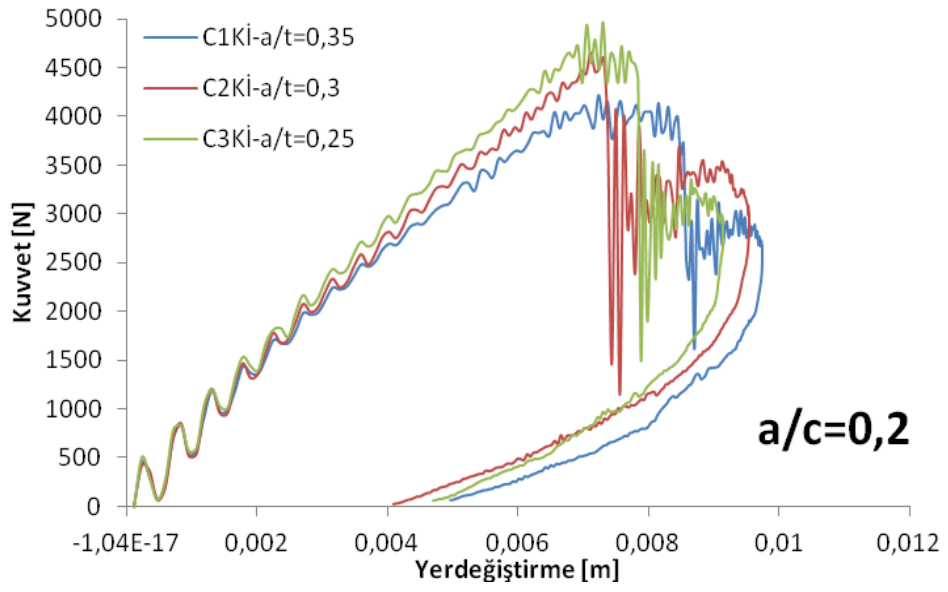
Şekil 4.6-4.8' de 3 m/sn hızda yapılan düşük hızlı darbe deneyi neticesinde a/c' nin sabit olması durumunda (0,2, 0,3 ve 0,4) değişen a/t değerlerinin malzemenin kuvvet-yer değiştirme davranışa etki ettiği görülmektedir. Karbon tabakanın dış kısımda olması durumunda kompozit malzeme daha fazla kuvvete dayanabiliyorken karbon tabakanın iç kısımda olduğunda dış kısımdakine nazaran daha az kuvvete dayabilmektedir. Karbon tabakanın dış kısımda olması durumunda sağlamış olduğu avantaj nedeniyle kompozit malzemede daha az sehim oluşmaktadır. Sabit a/c' de a/t' nin artmasıyla malzemenin direnci azalmaktadır. Şekil 4.6-4.8' da a/t' nin artması nedeniyle karbon tabakanın iç kısımda olduğu durumlarda daha fazla sehim oluşurken sözkonusu tabakalı hibrid kompozit malzemelerin daha az kuvvete dayabildikleri görülmektedir.

Önceki bölümlerde belirtildiği üzere benzer şekilde karbon tabakanın dış kısımda olması durumunda nonlineerlik (çift eğim) ve karbon tabakanın iç kısımda olduğu malzemelerde başlangıç yüklemelerinde belirgin titreşimler sözkonusudur. Karbon tabakanın dış kısımda olduğu kompozit malzemelerde kuvvetin maksimuma yaklaştığı noktalarda yine titreşim sözkonusudur.

Genel olarak benzer şekil parametresine sahip numunelerde derinlik parametresi yüksek olanda max kuvvet değeri daha yüksektir. her iki malzeme konfigürasyonu içinde bu durum geçerlidir.

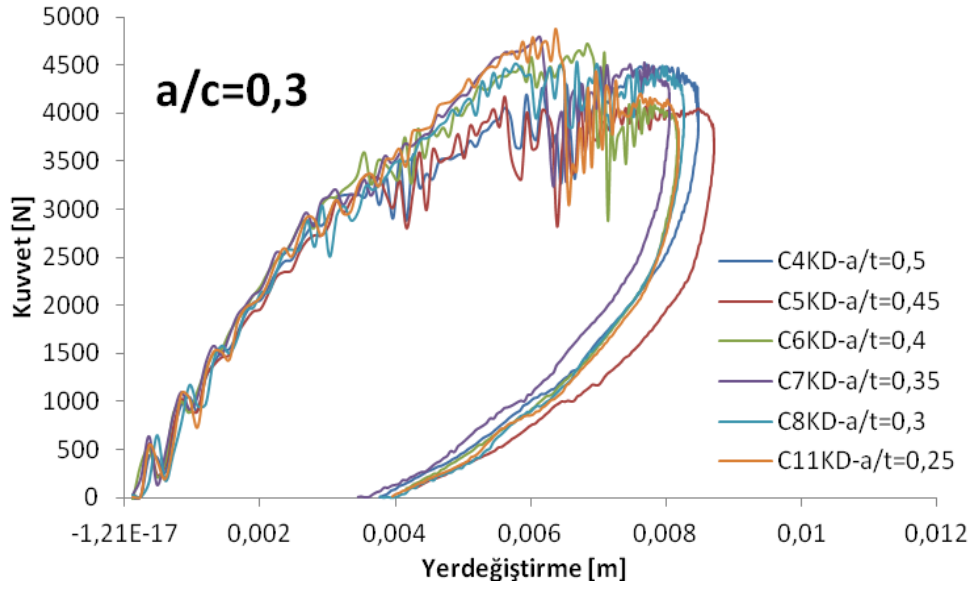


a)Konfigürasyon-2

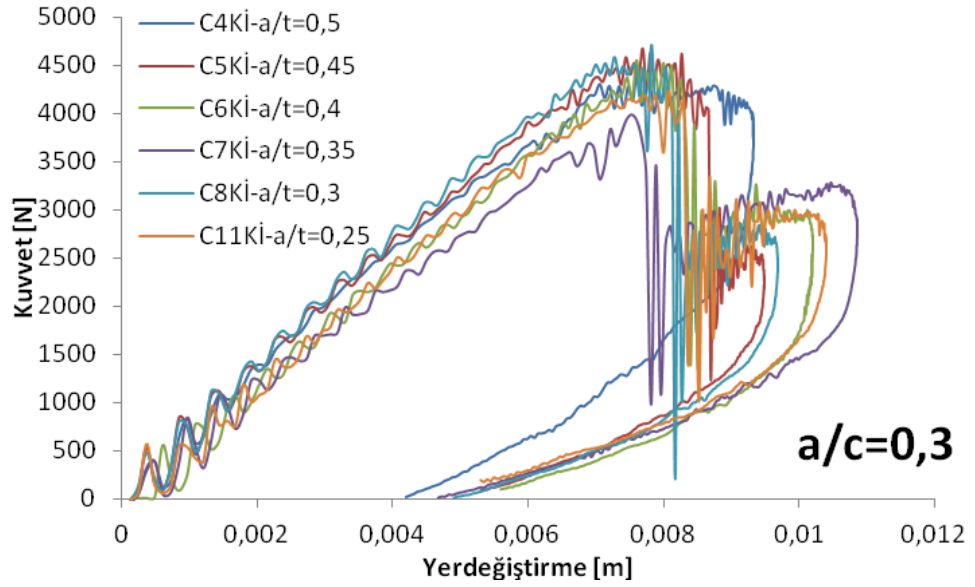


b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.6 Sabit a/c ' de değişen a/t 'nin malzemenin F-s davranışına etkisi a)konfigürasyon-2
b)konfigürasyon-1 ($C=3$ m/sn, $a/c=0,2$)

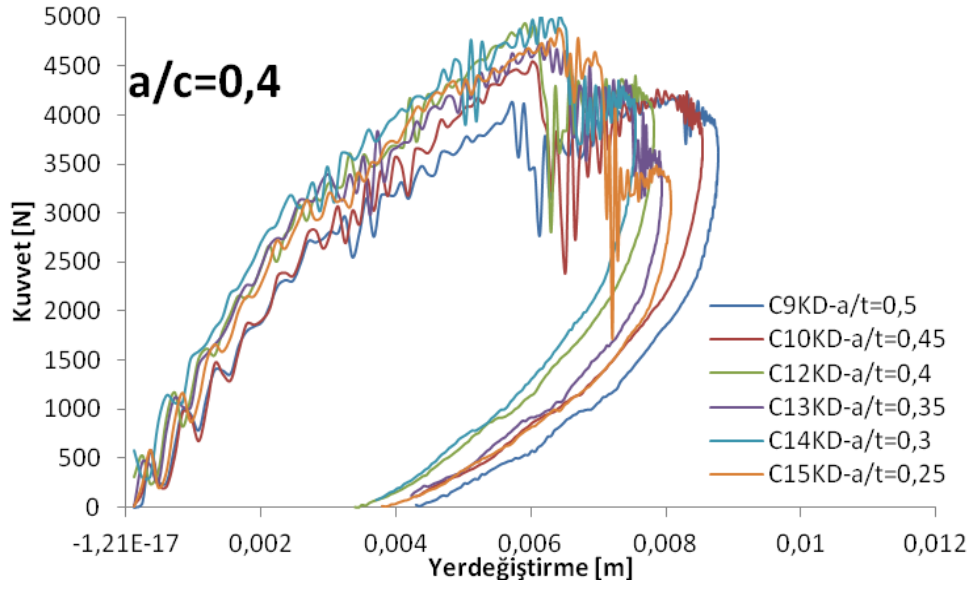


a) Konfigürasyon-2

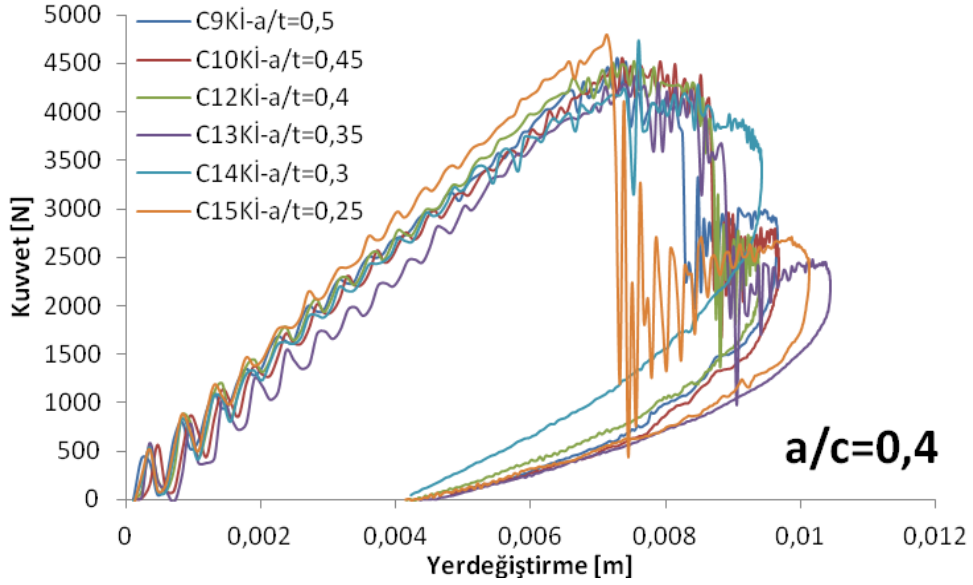


b) Konfigürasyon-1

Şekil 4.7 Sabit a/c ' de değişen a/t 'nin malzemenin F-s davranışına etkisi a) konfigürasyon-2
b) konfigürasyon-1 ($C=3$ m/sn, $a/c=0,3$)



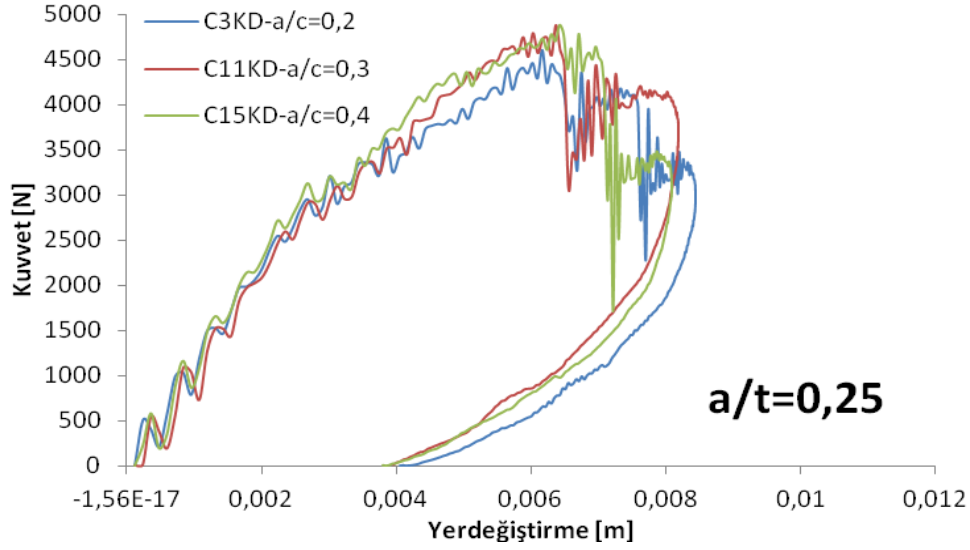
a)Konfigürasyon-2



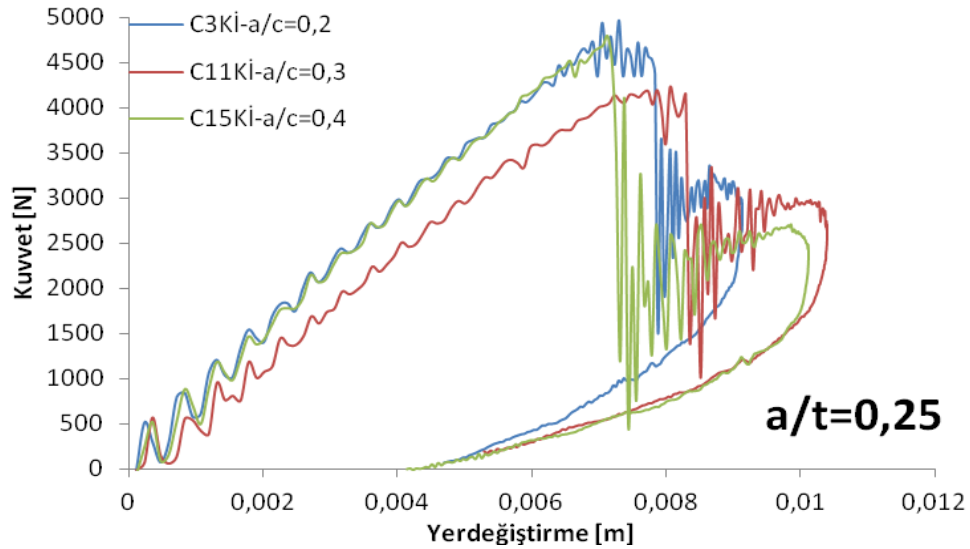
b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.8 Sabit a/c ' de değişen a/t 'nin malzemenin F-s davranışına etkisi a)konfigürasyon-2
b)konfigürasyon-1 ($C=3$ m/sn, $a/c=0,4$)

Şekil 4.9-4.14' de ise 3 m/sn hızda yapılan düşük hızlı darbe deneyi neticesinde a/t ' nin sabit olması durumunda değişen a/c oranlarının tabakalı hibrid kompozit malzemenin kuvvet-yer değiştirme davranışına etkisi görülmektedir. Grafiklere dikkatli bir şekilde bakıldığında sabit a/t (0,25, 0,3, 0,35, 0,4, 0,45, 0,5) değerlerinde a/c ' nin artmasıyla malzemenin dayandığı kuvvet miktarı artmakta buna karşın malzemede oluşan sehim miktarında kısmi azalmalar görülmektedir.

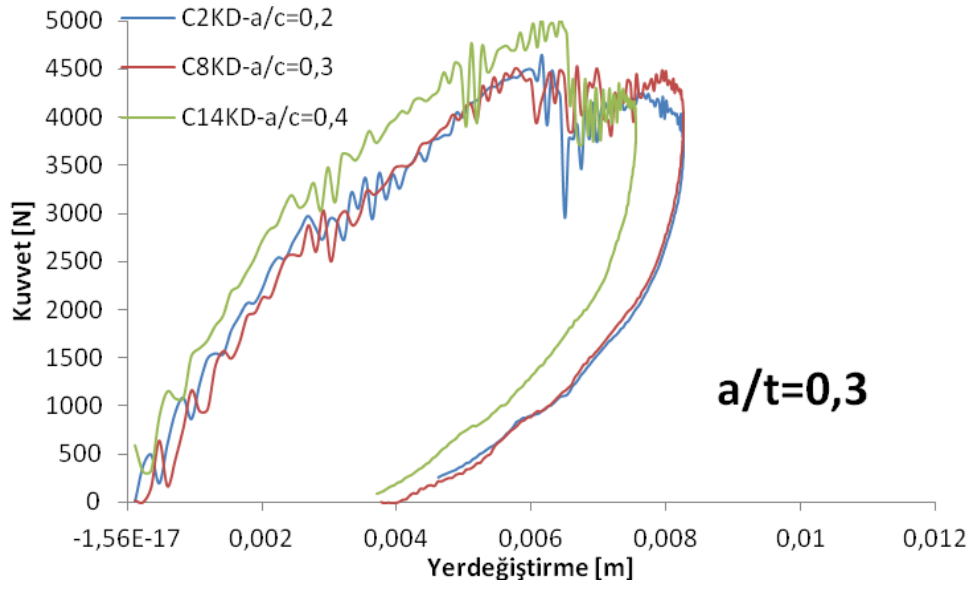


a)Konfigürasyon-2

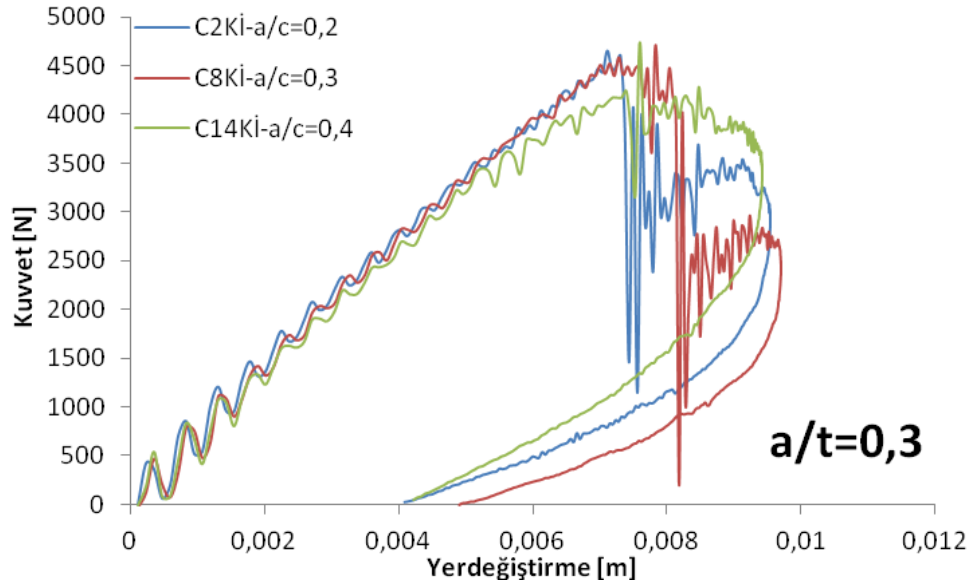


b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.9 Sabit a/t ' de değişen a/c ' nin malzemenin F-t davranışına etkisi a)konfigürasyon-2
b)konfigürasyon-1 (C=3 m/sn, $a/t=0,25$)

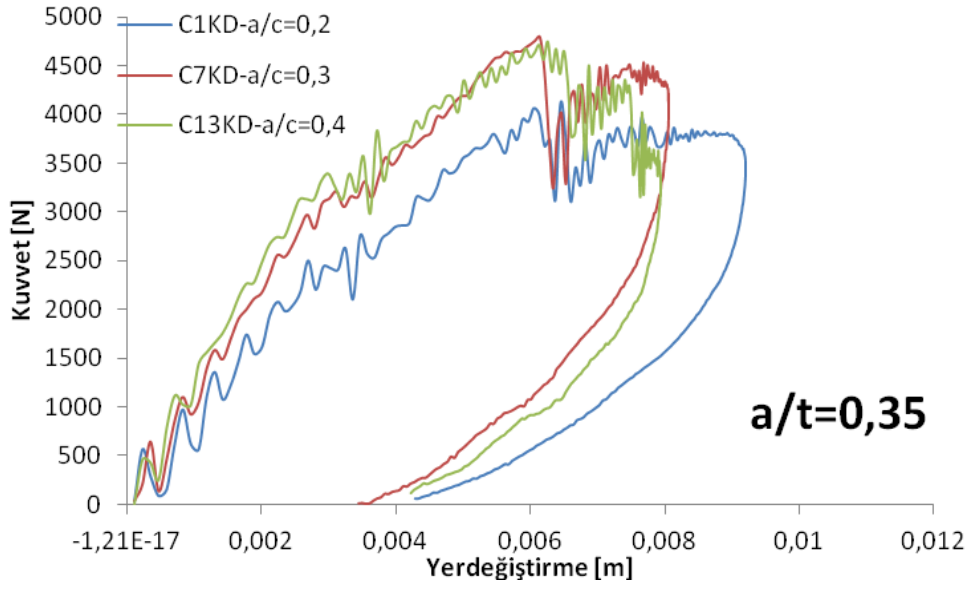


a)Konfigürasyon-2

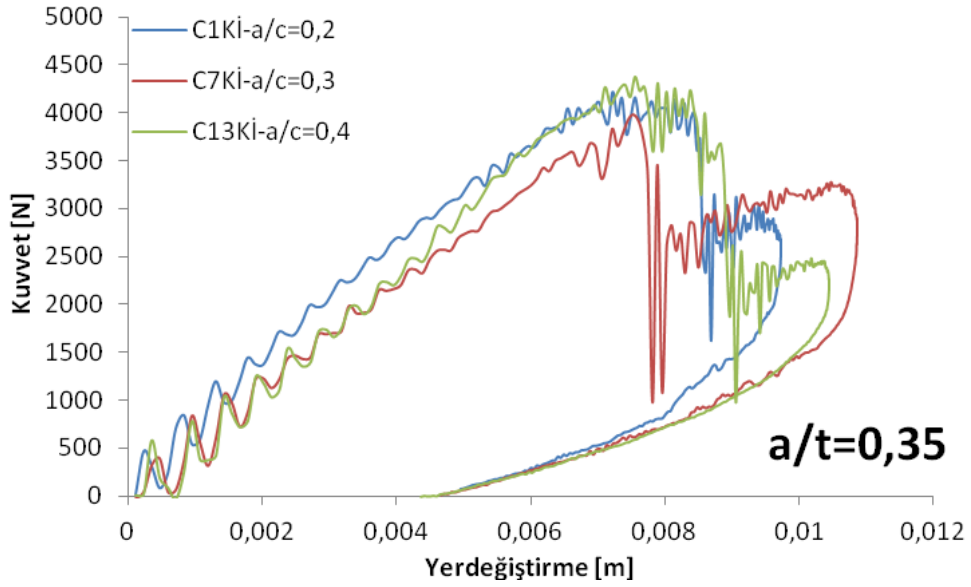


b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.10 Sabit a/t ' de değişen a/c ' nin malzemenin F-t davranışına etkisi a)konfigürasyon-2
b)konfigürasyon-1 ($C=3$ m/sn, $a/t=0,3$)

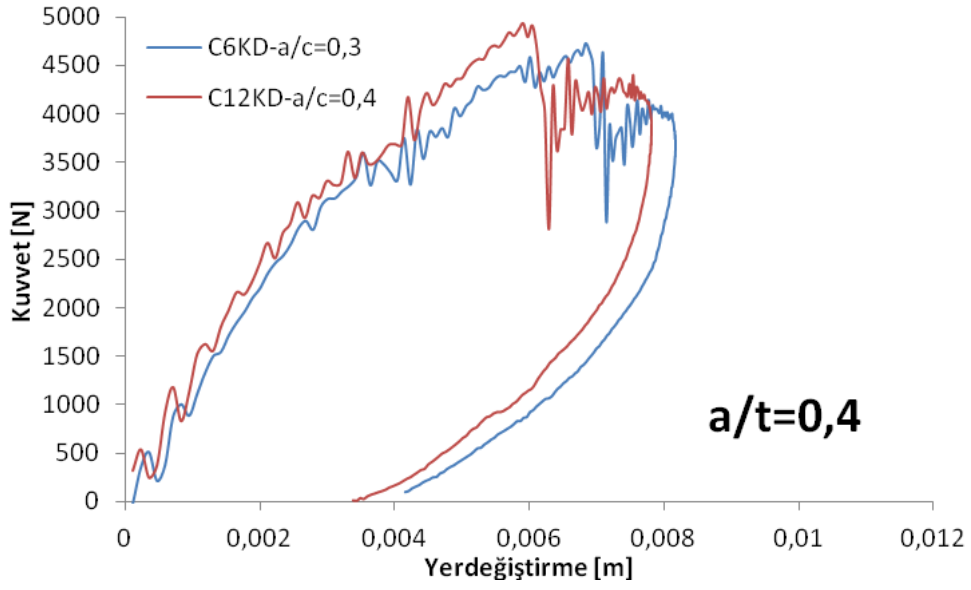


a)Konfigürasyon-2

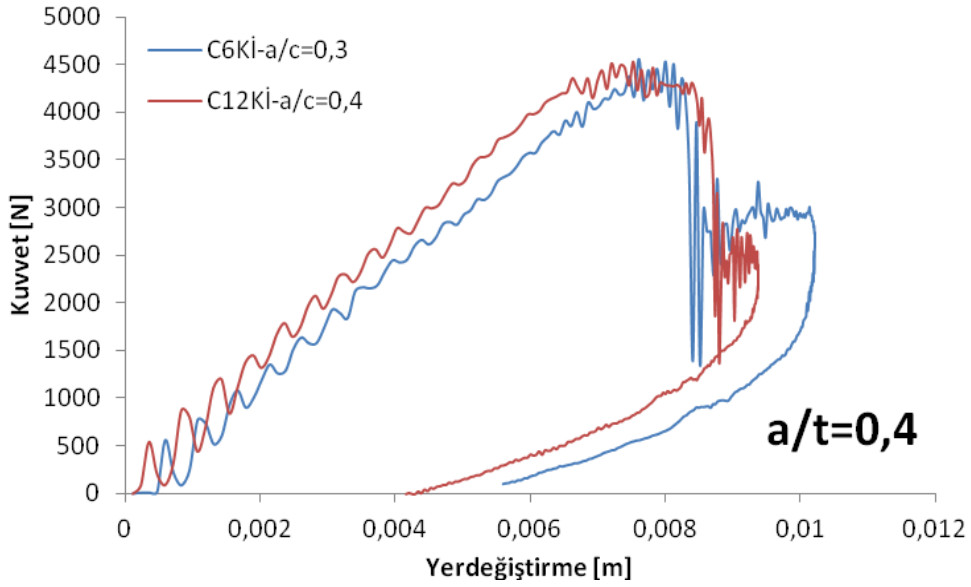


b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.11 Sabit a/t ' de değişen a/c ' nin malzemenin F-t davranışına etkisi a)konfigürasyon-2
b)konfigürasyon-1 ($C=3$ m/sn, $a/t=0,35$)

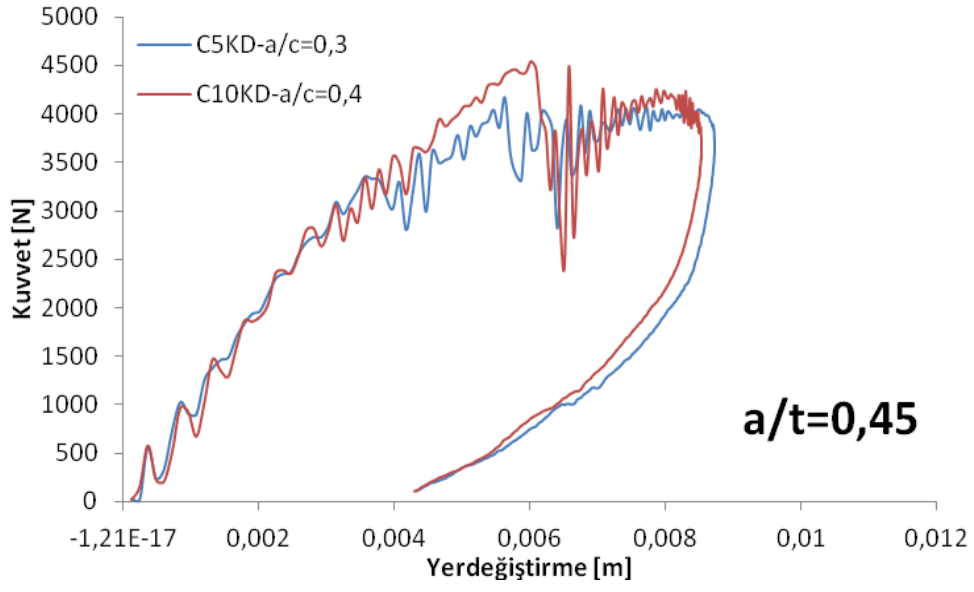


a)Konfigürasyon-2

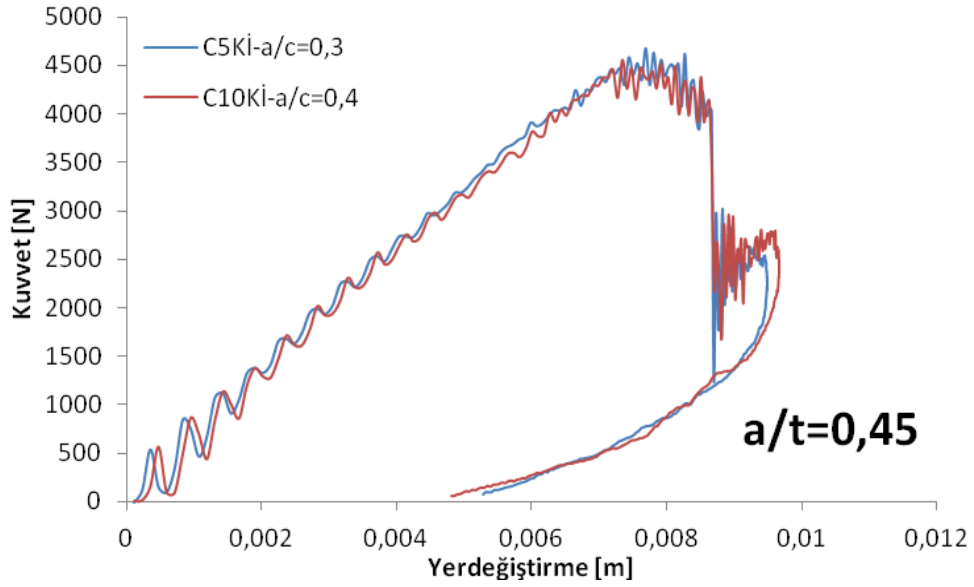


b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.12 Sabit a/t ' de değişen a/c ' nin malzemenin F-t davranışına etkisi a)konfigürasyon-2
b)konfigürasyon-1 ($C=3$ m/sn, $a/t=0,4$)

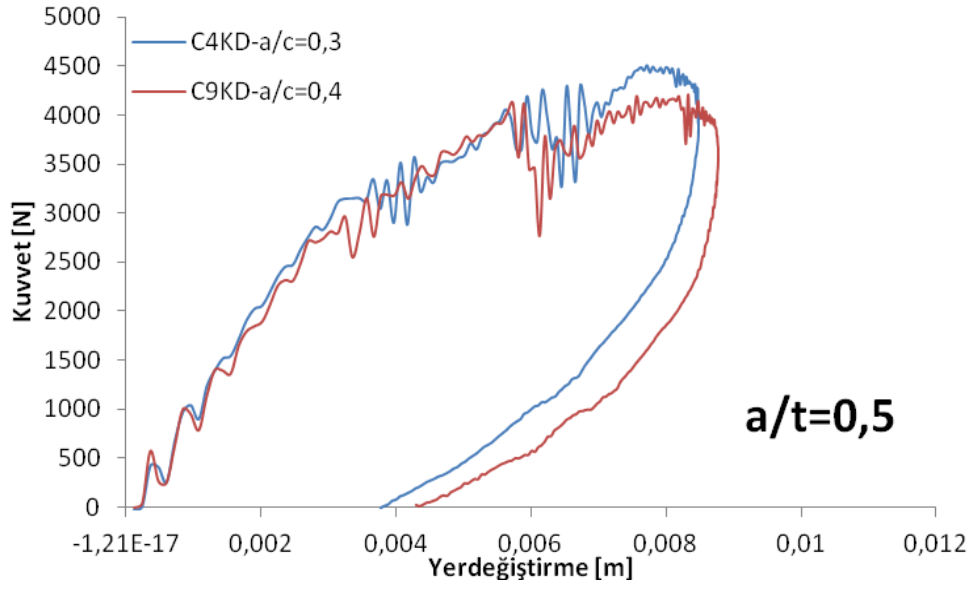


a)Konfigürasyon-2

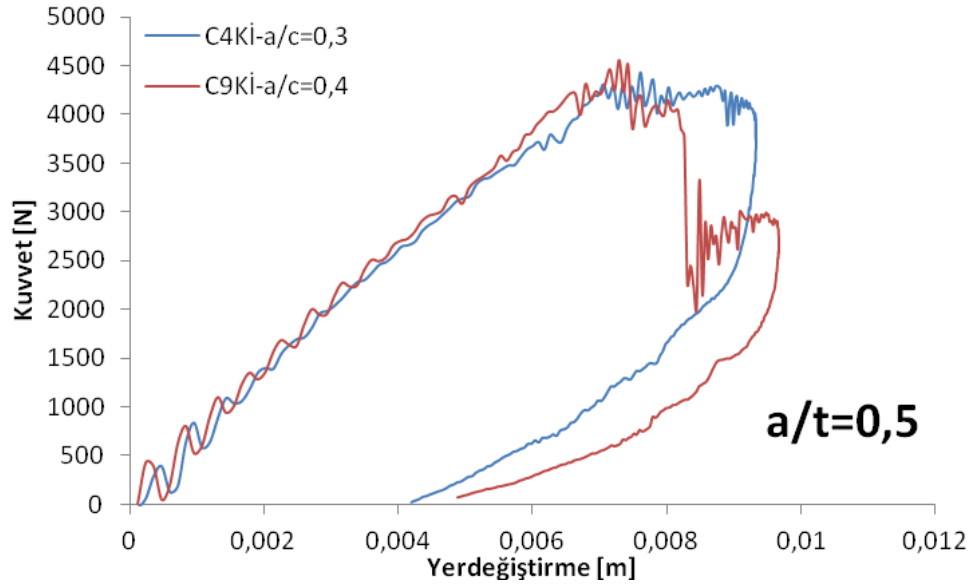


b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.13 Sabit a/t ' de değişen a/c ' nin malzemenin F-t davranışına etkisi a)konfigürasyon-2
b)konfigürasyon-1 ($C=3$ m/sn, $a/t=0,45$)



a)Konfigürasyon-2

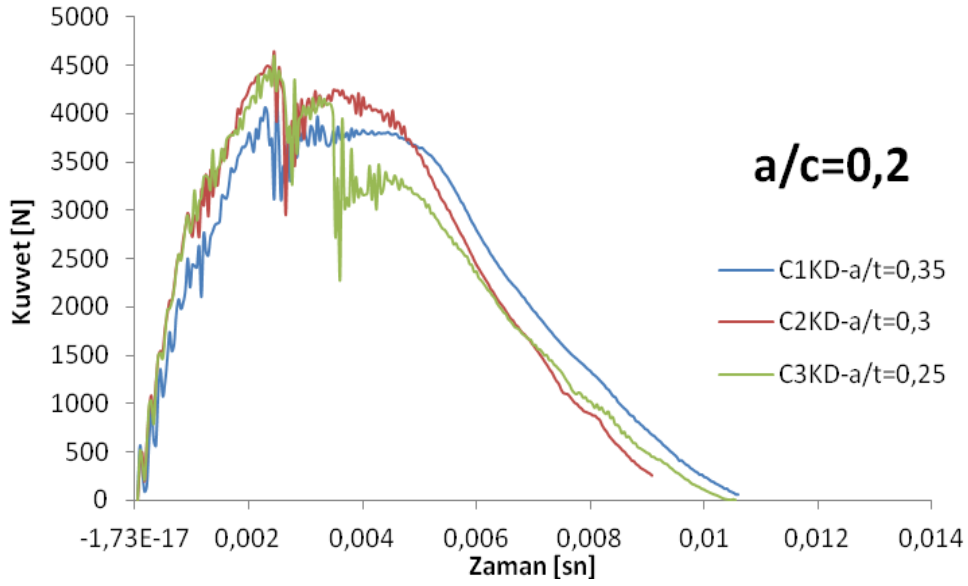


b)Konfigürasyon-1

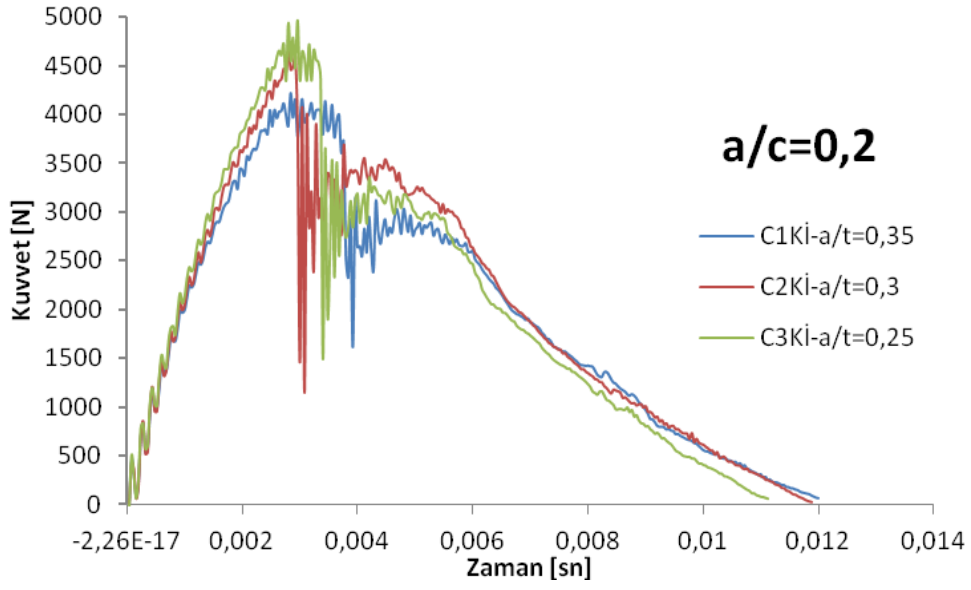
Şekil 4.14 Sabit a/t ' de değişen a/c ' nin malzemenin F-t davranışına etkisi a)konfigürasyon-2
b)konfigürasyon-1 ($C=3$ m/sn, $a/t=0,5$)

4.2.2. Kuvvetin Zamana Bağlı Olarak Değişimi

Şekil 4.15-4.17' de 3 m/sn hızda yapılan düşük hızlı darbe deneyi neticesinde a/c ' nin sabit olması durumunda (0,2, 0,3 ve 0,4) değişen a/t değerlerinin malzemenin kuvvet-zaman davranışa etkisi görülmektedir. Karbon tabakanın dış kısımda olması durumunda kompozit malzeme daha fazla kuvvete dayanabiliyorken karbon tabakanın iç kısımda olduğunda dış kısımdakine nazaran daha az kuvvete dayabilmektedir. Karbon tabakanın dış kısımda olması durumunda daha yüksek rijitliğe sahip olması nedeniyle kompozit malzeme daha az sürede darbe yüklemesine cevap verebilmektedir. Sabit a/c ' de a/t ' nin artmasıyla malzemenin darbe direnci azalmaktadır. Darbe direncinin azalması nedeniyle dayanabildiği kuvvet değeri azalmaktadır. Karbonun dış kısımda olduğu durumda ise malzemenin dayanabildiği kuvvet değeri artmaktadır. Buna karşın, kısmen daha az süre içerisinde malzeme davranışının gerçekleştiği görülmektedir.



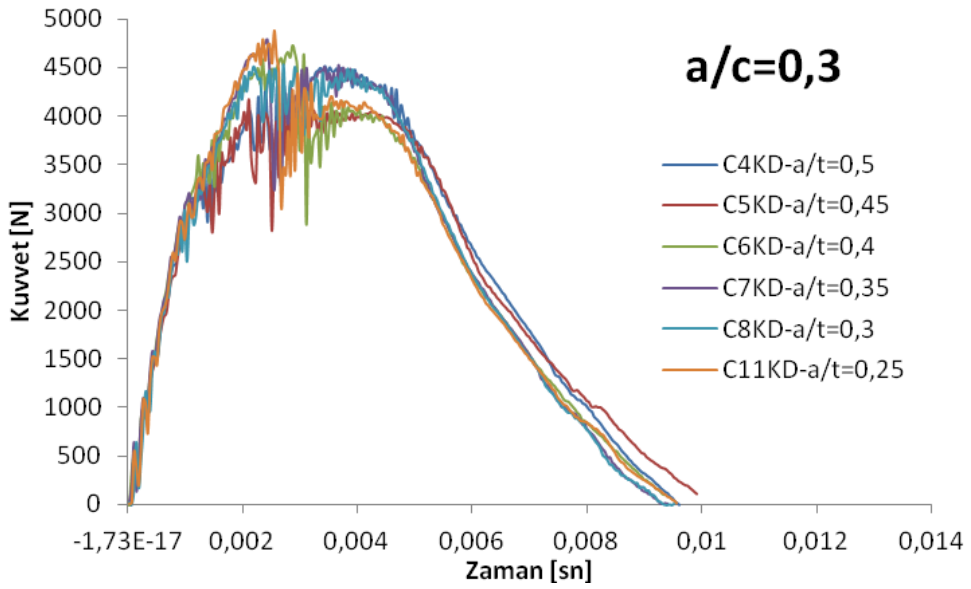
a)Konfigürasyon-2



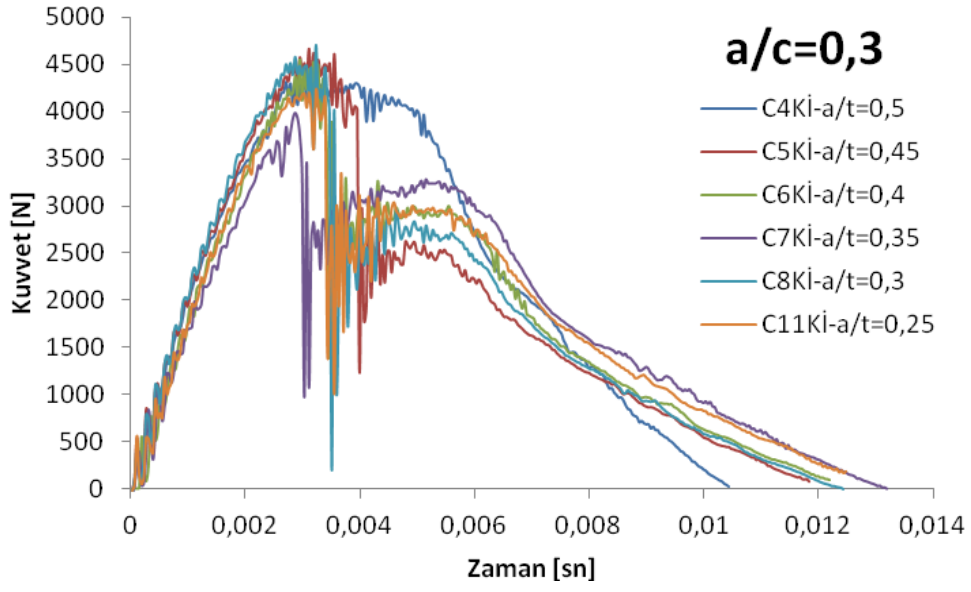
b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.15 Sabit a/c' de değişen a/t' nin malzemenin F-t davranışına etkisi a)konfigürasyon-2

b)konfigürasyon-1 (C=3 m/sn, a/c=0,2)



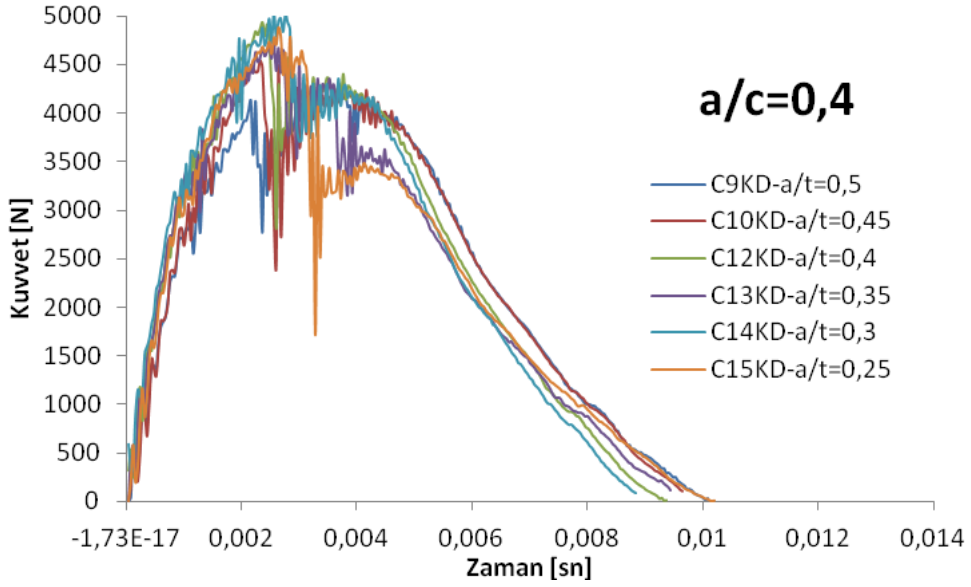
a)Konfigürasyon-2



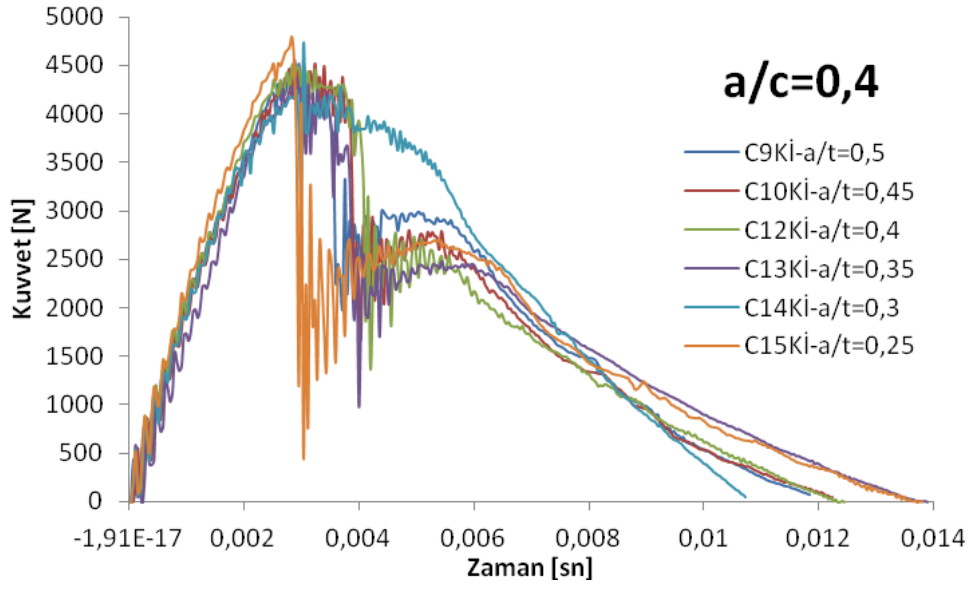
b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.16 Sabit a/c' de değişen a/t' nin malzemenin F-t davranışına etkisi a)konfigürasyon-2

b)konfigürasyon-1 (C=3 m/sn, a/c=0,3)



a)Konfigürasyon-2

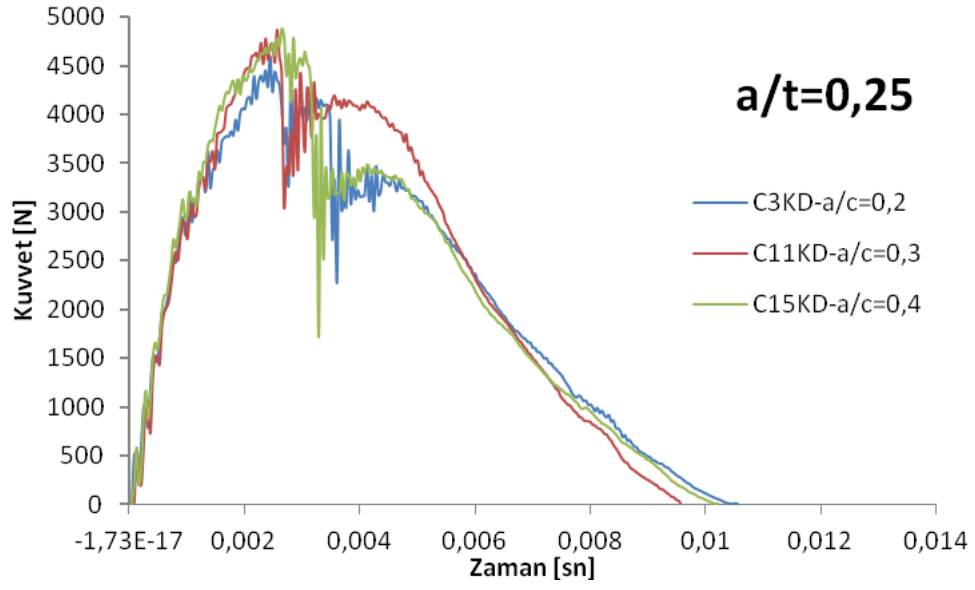


b)Konfigürasyon-1

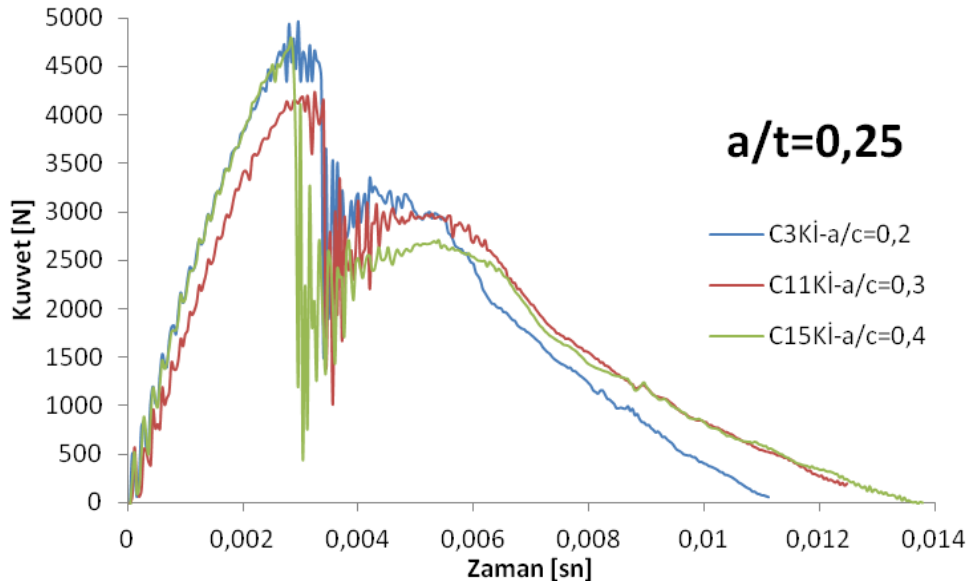
Şekil 4.17 Sabit a/c' de değişen a/t' nin malzemenin F-t davranışına etkisi a)konfigürasyon-2

b)konfigürasyon-1 (C=3 m/sn, a/c=0,4)

Şekil 4.18-4.23' de ise 3 m/sn hızda yapılan düşük hızlı darbe deneyi neticesinde a/t' nin sabit olması durumunda değişen a/c oranlarının tabakalı hibrid kompozit malzemenin kuvvet-zaman grafiklerine etkisi görülmektedir. Grafiklere dikkatli bir şekilde bakıldığında sabit a/t (0,25, 0,3, 0,35, 0,4, 0,45, 0,5) değerlerinde a/c' nin artmasıyla malzemenin dayandığı kuvvet miktarı artmakta buna karşın malzemenin maruz kaldığı kuvvete karşı vermiş olduğu cevabın süresi azalmaktadır.

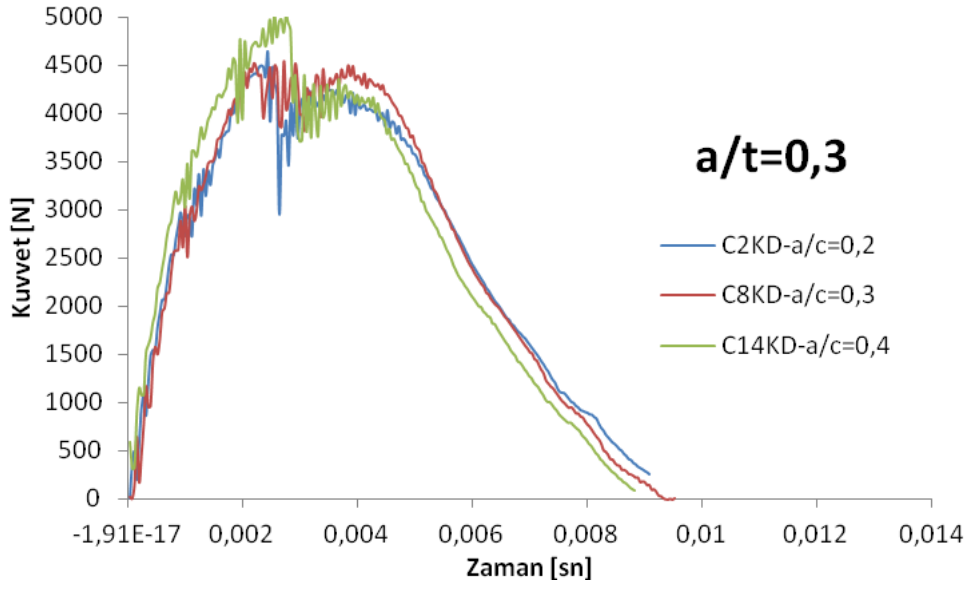


a)Konfigürasyon-2

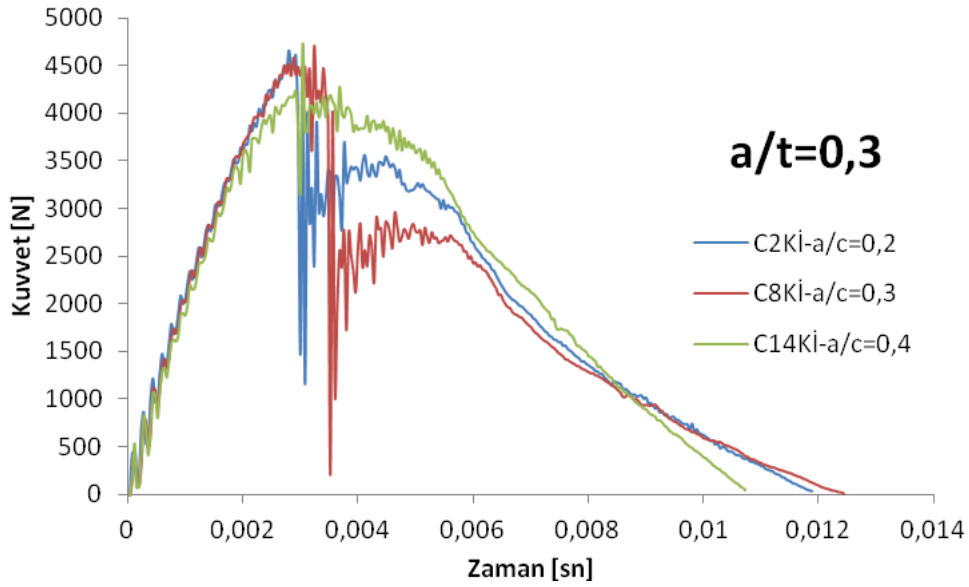


b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.18 Sabit a/t' de değişen a/c' nin malzemenin F-t davranışına etkisi a)konfigürasyon-2
b)konfigürasyon-1 ($C=3$ m/sn, $a/t=0,25$)

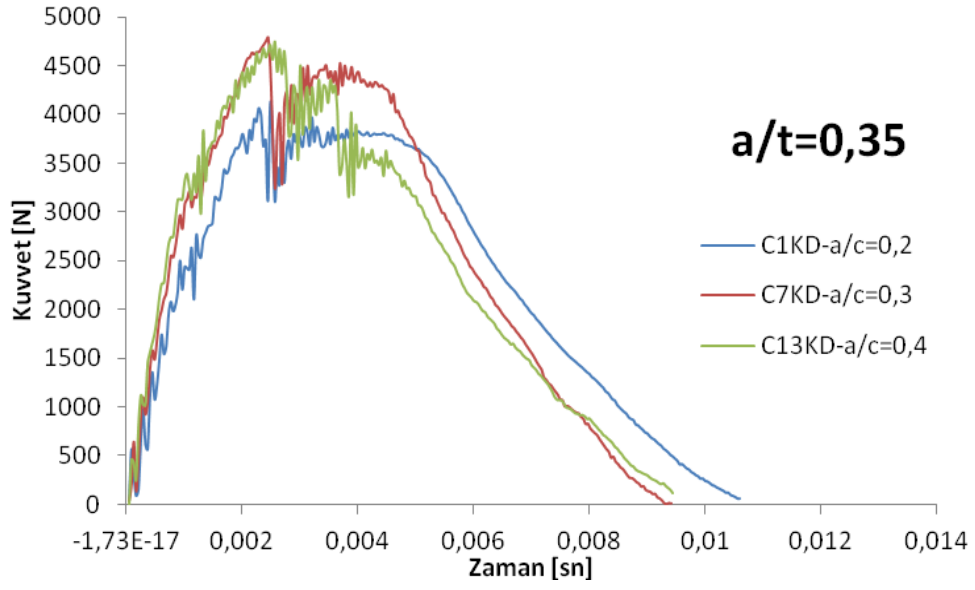


a)Konfigürasyon-2

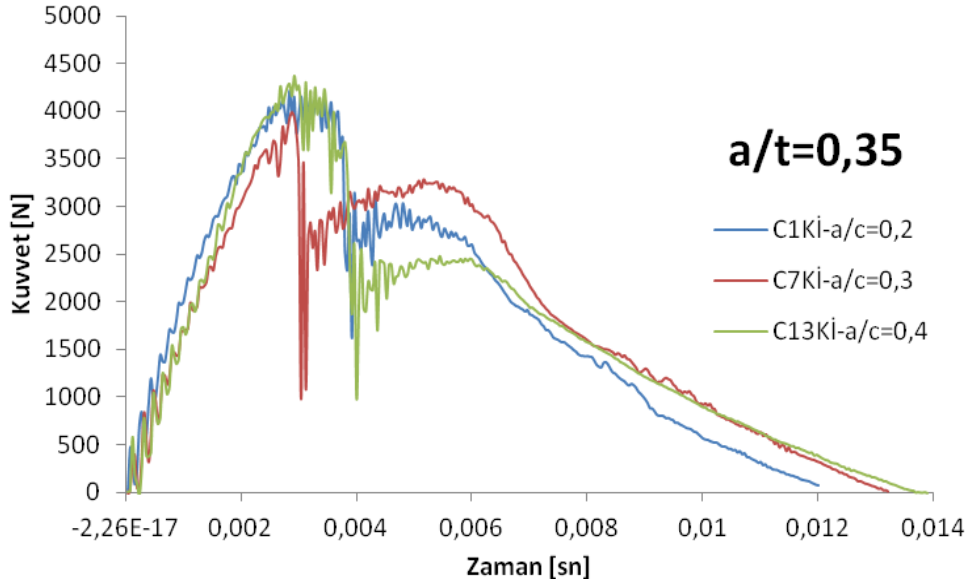


b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.19 Sabit a/t ' de değişen a/c ' nin malzemenin F-t davranışına etkisi a)konfigürasyon-2
b)konfigürasyon-1 ($C=3$ m/sn, $a/t=0,3$)

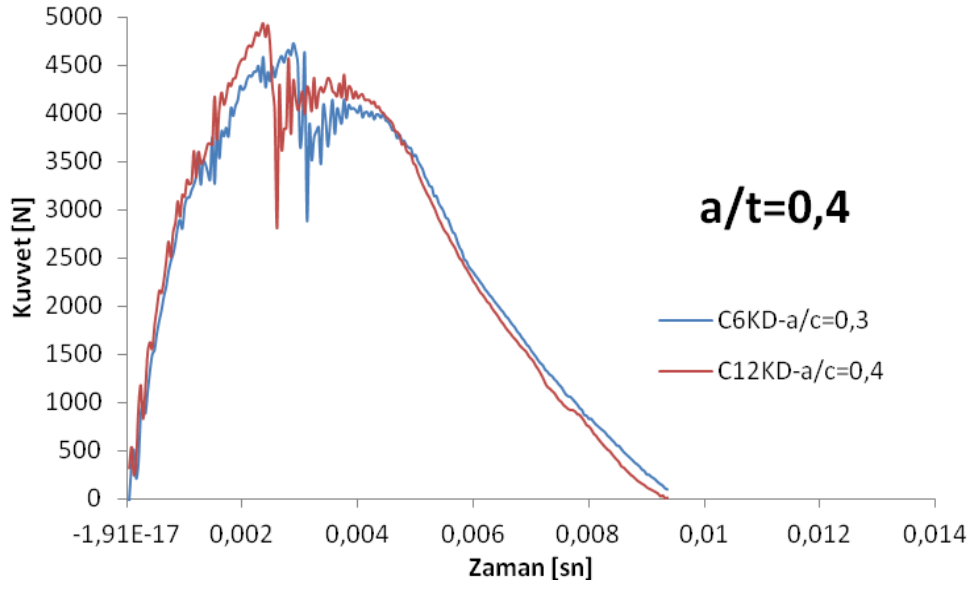


a)Konfigürasyon-2

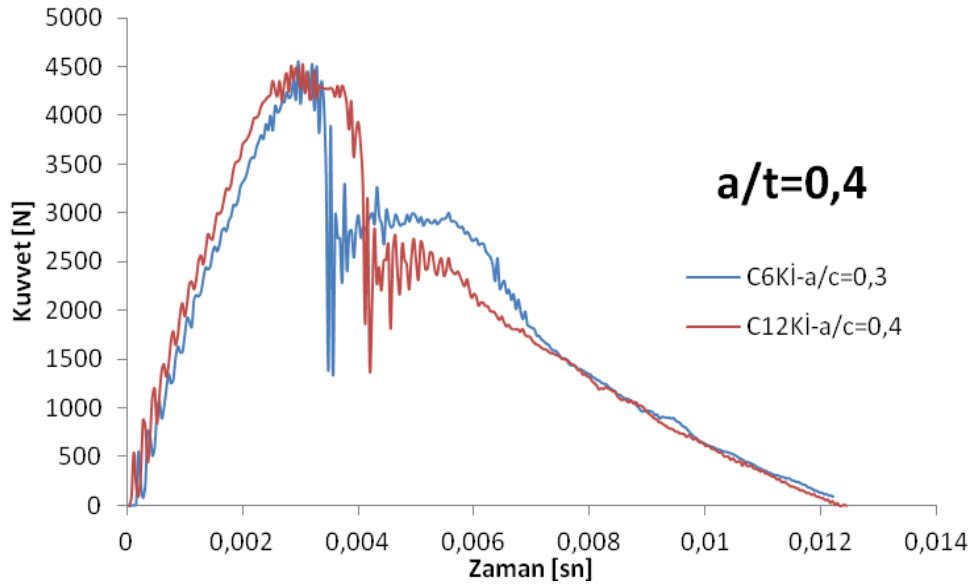


b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.20 Sabit a/t ' de değişen a/c ' nin malzemenin F-t davranışına etkisi a)konfigürasyon-2
b)konfigürasyon-1 ($C=3$ m/sn, $a/t=0,35$)

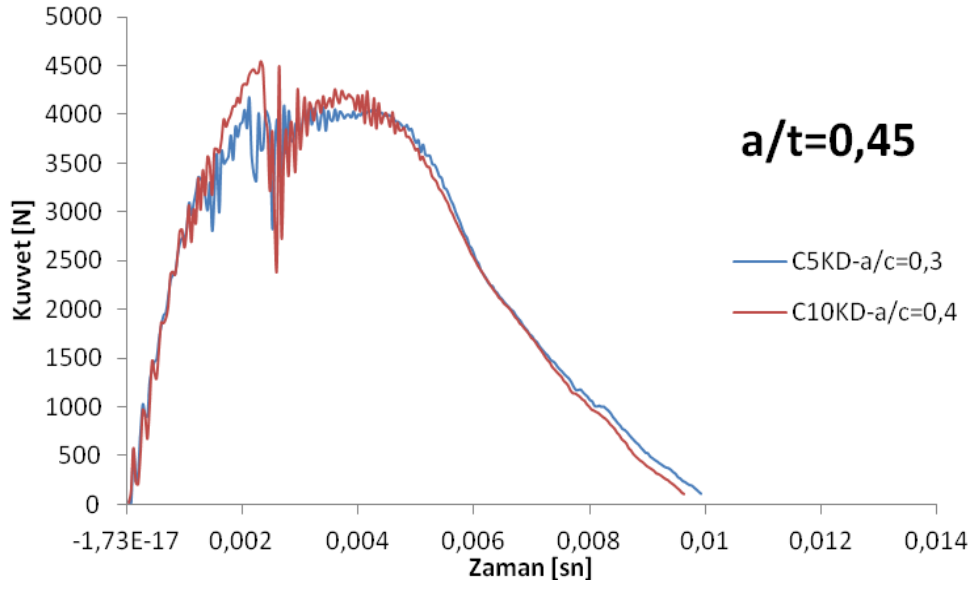


a)Konfigürasyon-2

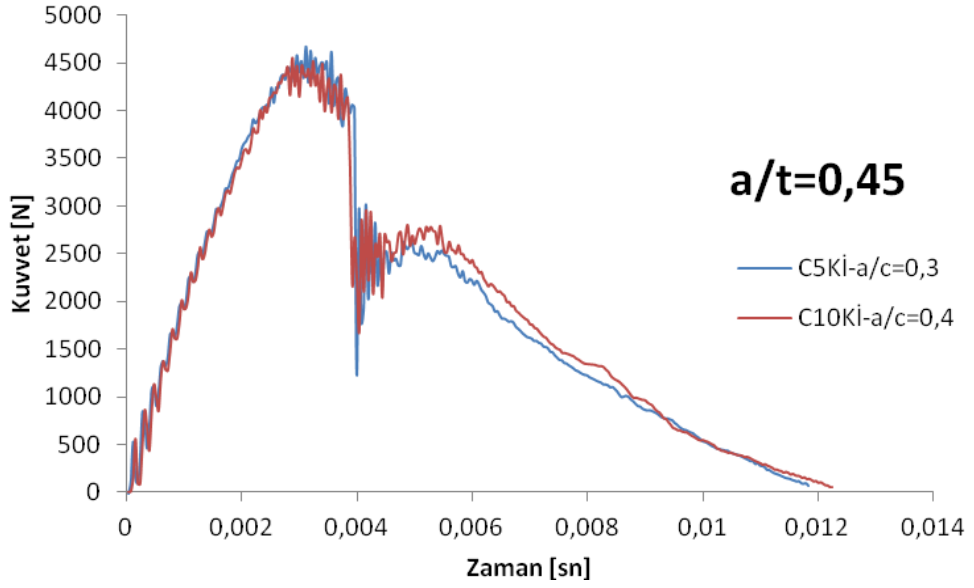


b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.21 Sabit a/t ' de değişen a/c ' nin malzemenin F-t davranışına etkisi a)konfigürasyon-2
b)konfigürasyon-1 ($C=3$ m/sn, $a/t=0,4$)

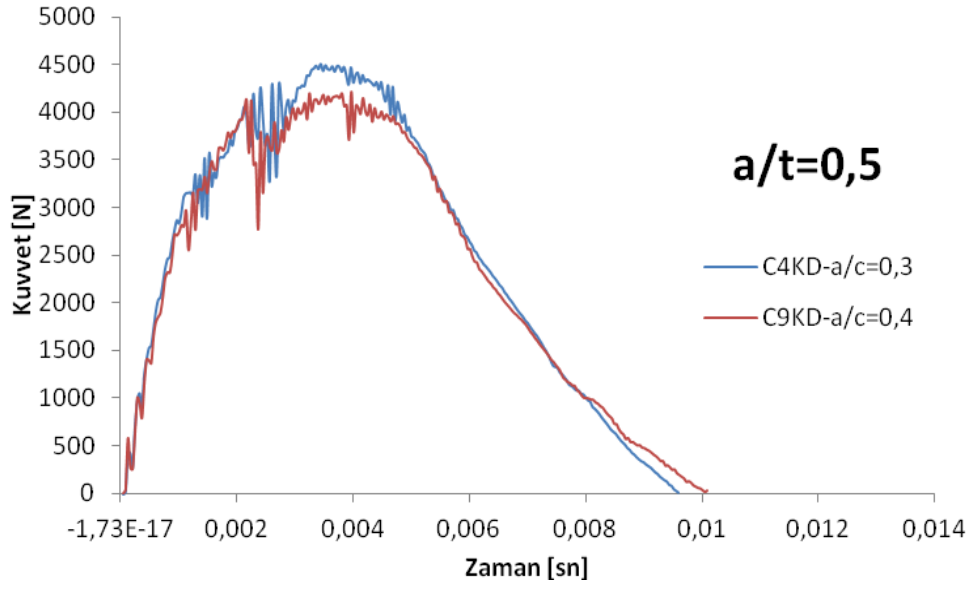


a)Konfigürasyon-2

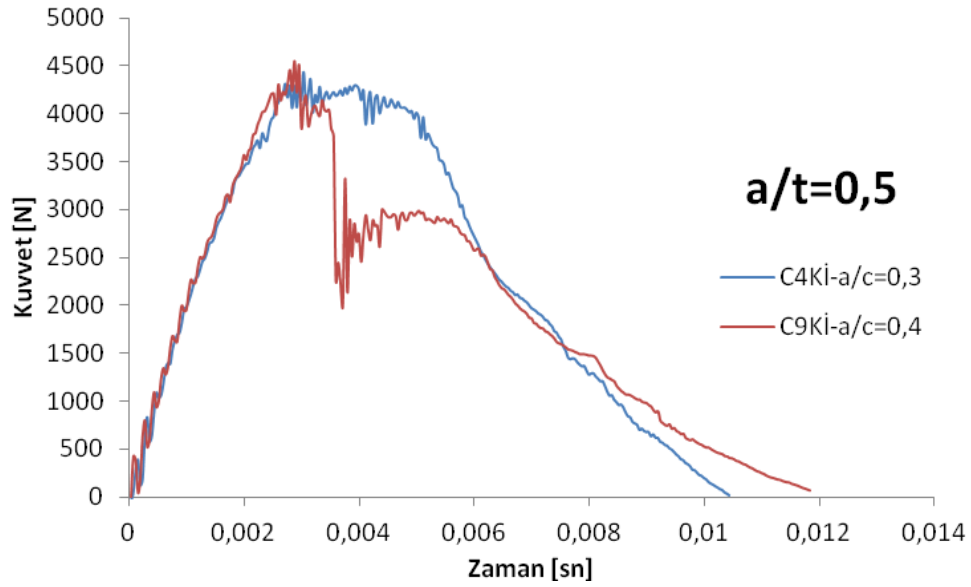


b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.22 Sabit a/t' de değişen a/c' nin malzemenin F-t davranışına etkisi a)konfigürasyon-2
b)konfigürasyon-1 (C=3 m/sn, a/t=0,45)



a)Konfigürasyon-2



b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.23 Sabit a/t' de değişen a/c' nin malzemenin F-t davranışına etkisi a)konfigürasyon-2
b)konfigürasyon-1 (C=3 m/sn, a/t=0,5)

4.3. Zamana Bağlı Enerji Transferi

Şekil 4.24-4.31 incelendiğinde tabakalı hibrid kompozit malzemelerin 3 m/sn hızda değişen a/t ve a/c geometrilerinde ki birikimli enerji absorpsiyon kapasiteleri görülmektedir. Grafiklerin elde edilmesinde daha öncede belirtildiği gibi birikimli enerji metodu kullanılmıştır.

Kompozit malzemelerin maruz kaldıkları darbe yüklemeleri karşısında yapısal bütünlüğünü koruması ve rijitliğinden fazla bir şeyin kaybetmemesi istenir. Bu bağlamda kompozit malzeme elastik olarak ne kadar enerji absorbe edebiliyorsa o kadar az hasara uğramaktadır.

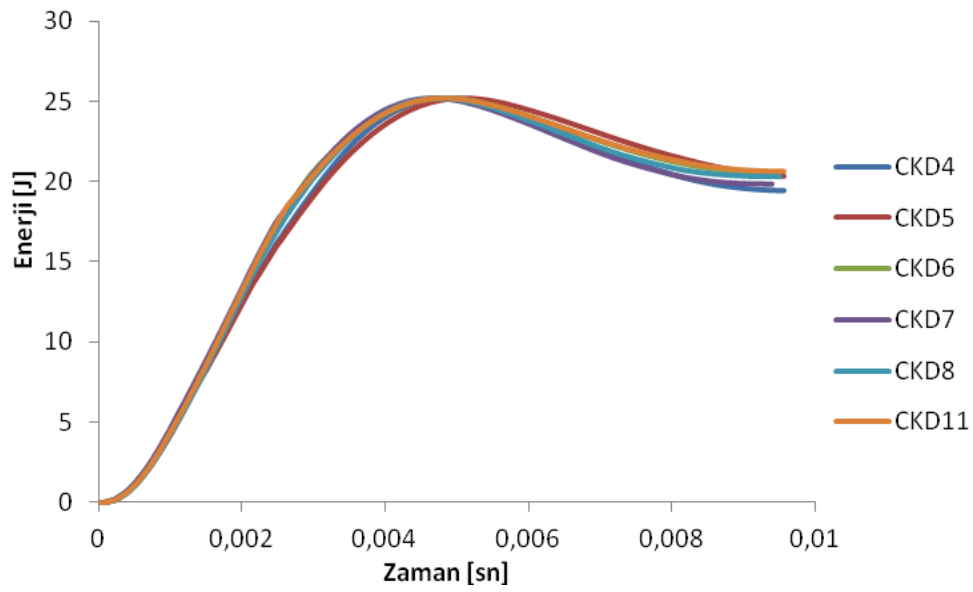
Eğrilerin maksimum olduğu nokta toplam enerji miktarını, eğrinin bittiği nokta ise absorbe edilen enerji miktarını göstermektedir. Bu iki nokta arasında kalan bölge ise uygulanan darbe sonrası geri yansıtılan enerji miktarını göstermektedir. Grafikler dikkatli bir şekilde incelendiğinde karbon tabakanın dış kısımda olduğu malzemelerde darbe yüklemesine verilen cevabın daha kısa sürede olduğu görülmektedir.

Enerji grafiklerindeki kırıklar, kuvvet-zaman eğrilerinde kuvvetteki ani düşüslere yani delaminasyon oluşumuna karşılık gelmektedir. Bu durum eğilme rijitliğini düşürmekle birlikte elastik enerji absorbe etme kapasitesini de düşürmektedir. Genellikle enerjinin %80' i absorbe edilirken %20' si ise rebound olarak geri iade edilmiştir. yüzey çatlağı, zamana bağlı olarak enerji değişimlerini çok fazla etkilememiştir.

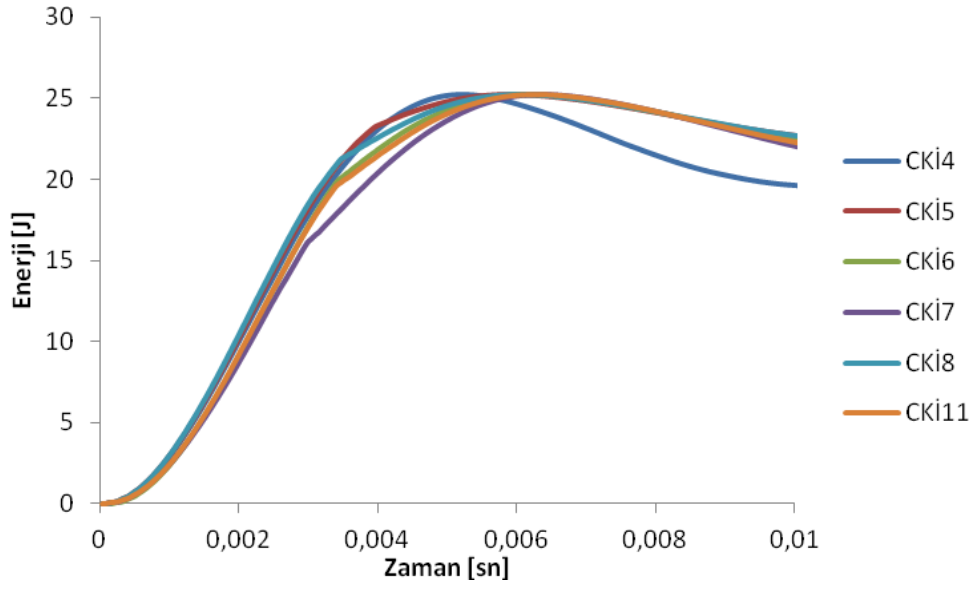
Şekil 4.24-4.25' de a/c' nin sabit olduğu grafiklere baktığımızda değişen a/t değerlerinin malzeme üzerine etkisi söz konusudur. a/t' nin artmasıyla beraber kompozit malzemenin taşımış olduğu yük miktarı rijidliğin azalması nedeniyle azalmaktadır. Şekil 4.24' de a/c=0,2 için değişen a/t oranlarında malzemelerin enerji absorpsiyon kapasiteleri görülmektedir. a/t 0,25 ile 0,5 arasında değişmektedir. a/t=0,5 olması durumunda kompozit malzeme darbe yüklemesi sonrasında daha fazla enerji absorbe etmektedir. Ayrıca bu enerji absorpsiyonun gerçekleşmesi için geçen süre diğer a/t oranlarındaki geçen süreden daha azdır. a/t=0,25 olan numunede

tabakalı hibrid kompozit malzemenin darbe yüklemesi neticesinde geri yansıttığı enerji diğerlerinden daha fazladır.

Karbon tabakanın iç kısımda olduğu konfigürasyon-1 numunelerini incelediğimizde sabit a/c ile beraber değişen a/t ' lerde farklı iki eğri söz konusudur. Başlangıçta herhangi bir farklılaşma söz konusu değilken ilerleyen zamanla beraber artan enerjiye bağlı olarak eğrilerde ani değişimler görülmektedir. Bunun nedeni olarak epoksi ve cam elyaftan oluşan dış kısmın karbona nazaran daha az miktarda yük taşıma kapasitesinin olması gösterilebilir.

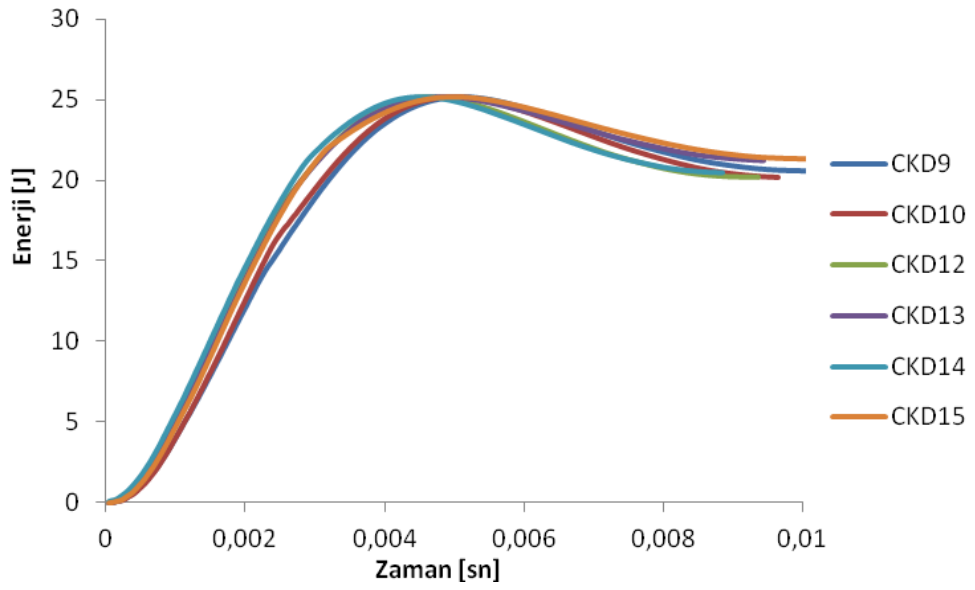


a)Konfigürasyon-2

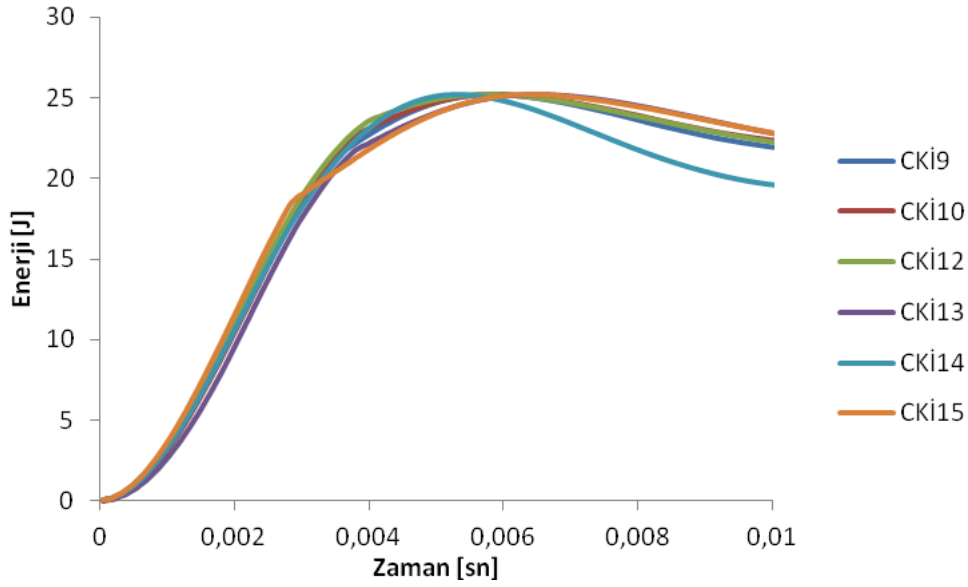


b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.24 $a/c=0,3$ ve değişen a/t için 3 m/sn hızda elde edilen birikimli enerji eğrileri
a)konfigürasyon-2 b)konfigürasyon-1 (C=3 m/sn)



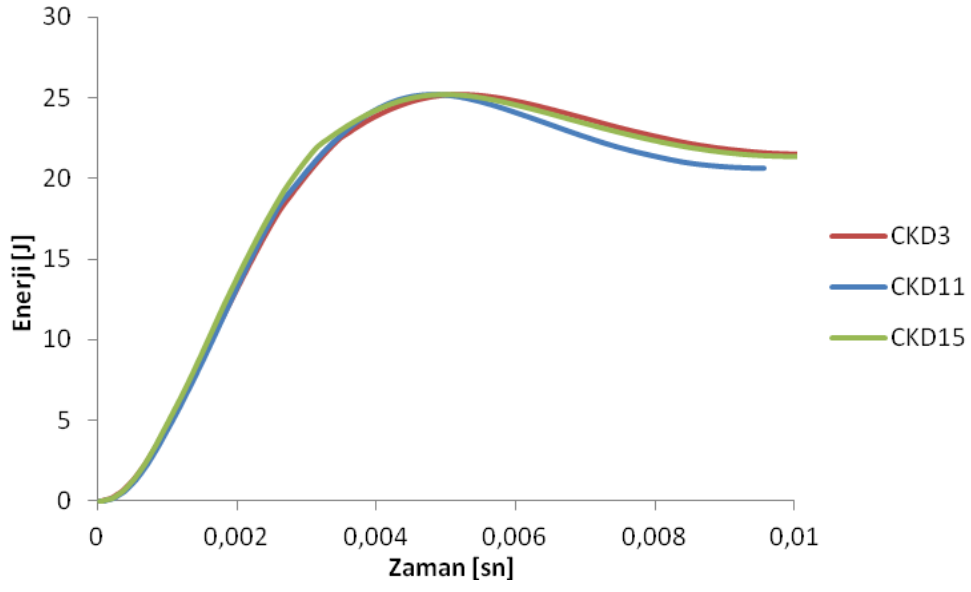
a)Konfigürasyon-2



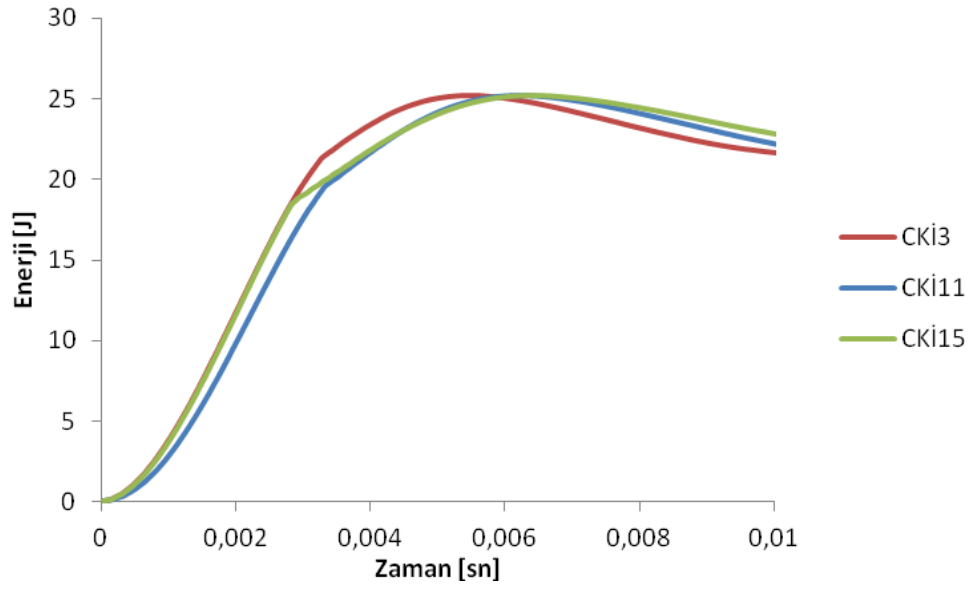
b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.25 $a/c=0,4$ ve değişen a/t için 3 m/sn hızda elde edilen birikimli enerji eğrileri
a)konfigürasyon-2 b)konfigürasyon-1 ($C=3$ m/sn)

Şekil 4.26-4.31' deki grafikleri incelediğimizde sabit a/t değerlerinde a/c ' nin değişimiyle tabakalı hibrid kompozit malzemede meydana gelen değişimler görülmektedir. a/c ' nin etkisi karbonun dış kısımda olduğu konfigürasyon-2 numunelerinde çok fazla belirgin olmamasına rağmen karbonun iç kısımda olduğu konfigürasyon-1 numunelerinde değişen a/c değerlerinde ki değişim açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.27' de $a/t=0,3$ olması durumunda değişen a/c değerlerinin (0,2, 0,3, 0,4) etkisi görülmektedir. Konfigürasyon-2 için eğriler birbirine benzerken konfigürasyon-1' e baktığımızda a/c ' nin artmasıyla beraber kompozit malzemenin darbe yüklemesi sonrasında yutmuş olduğu enerji miktarı artmaktadır. a/c değerinin düşük olduğu eğrilerde yükleme sonrası geri yansıtılan enerji miktarı daha fazladır.

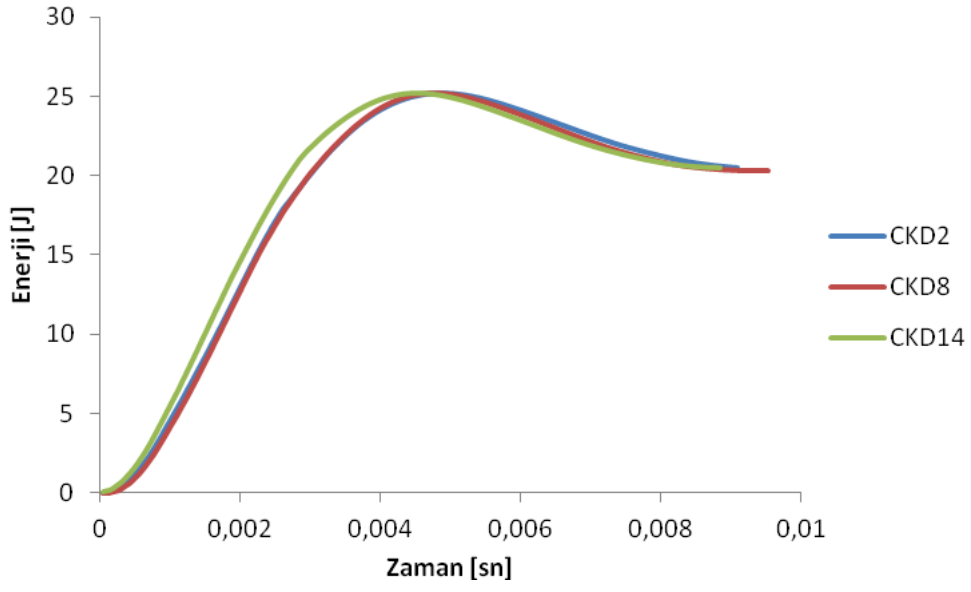


a)Konfigürasyon-2

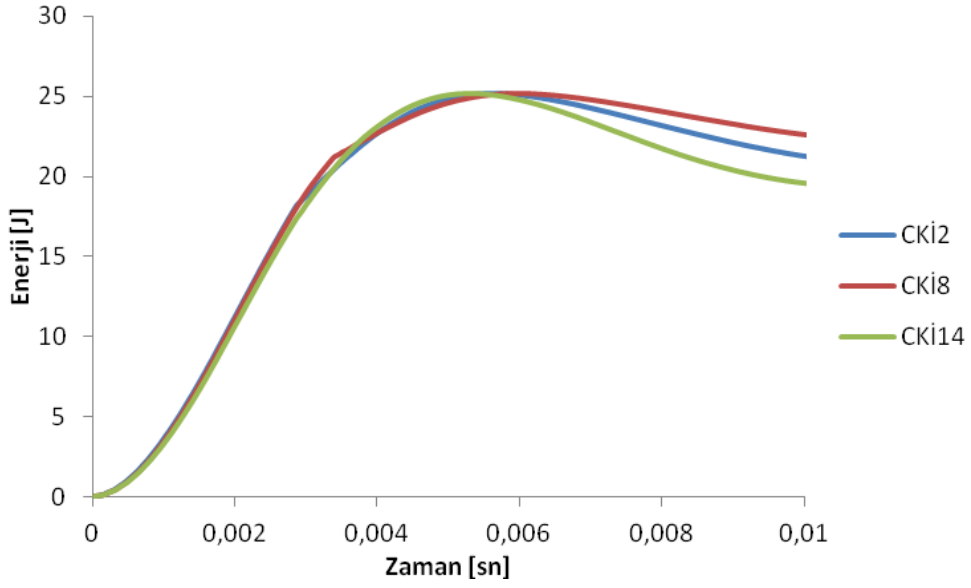


b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.26 $a/t=0,25$ ve değişen a/c için 3 m/sn hızda elde edilen birikimli enerji eğrileri
a)konfigürasyon-2 b)konfigürasyon-1 ($C=3$ m/sn)



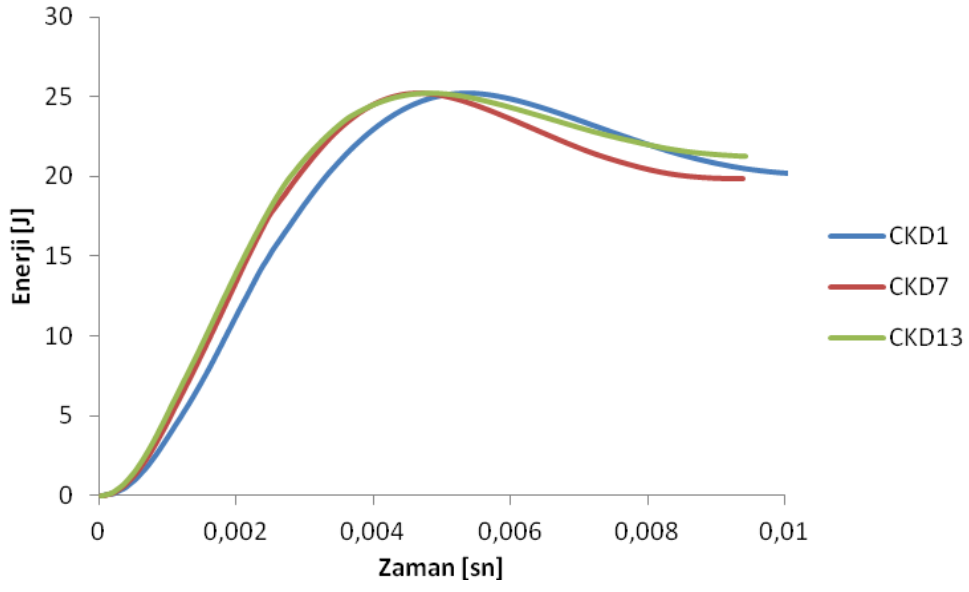
a)Konfigürasyon-2



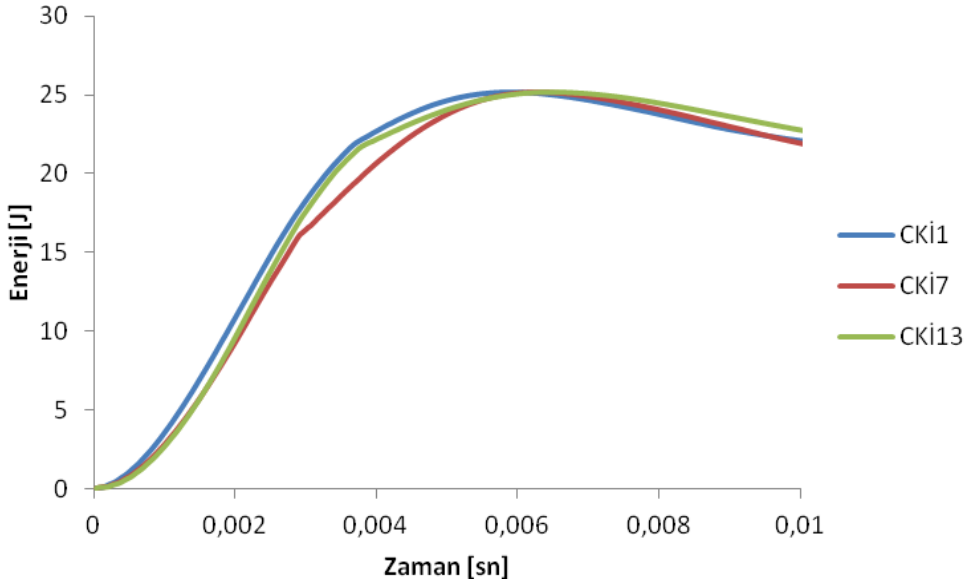
b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.27 $a/t=0,3$ ve değişen a/c için 3 m/sn hızda elde edilen birikimli enerji eğrileri

a)konfigürasyon-2 b)konfigürasyon-1 (C=3 m/sn)

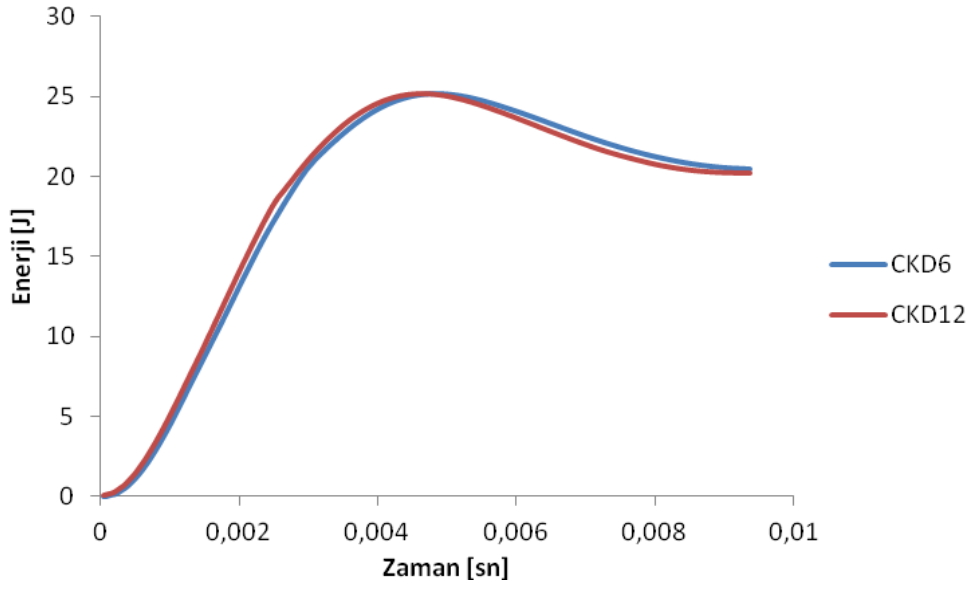


a)Konfigürasyon-2

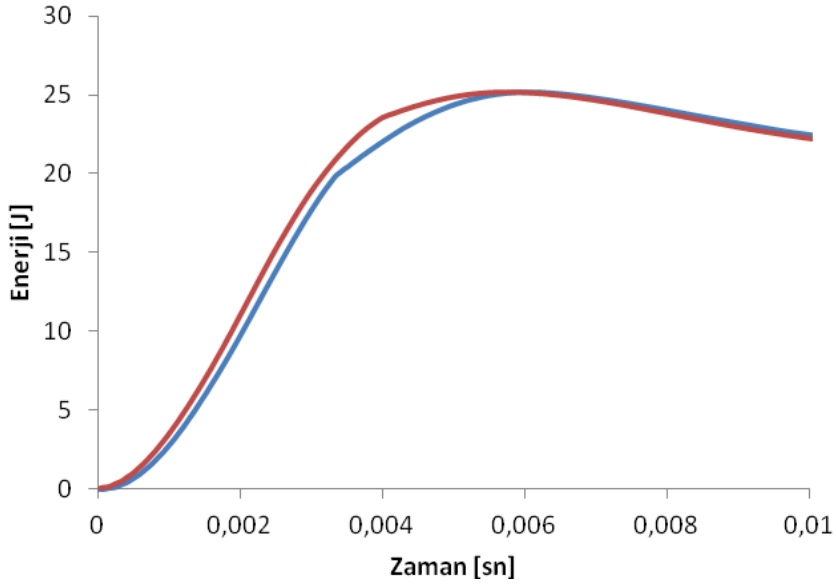


b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.28 $a/t=0,35$ ve değişen a/c için 3 m/sn hızda elde edilen birikimli enerji eğrileri
a)konfigürasyon-2 b)konfigürasyon-1 (C=3 m/sn)

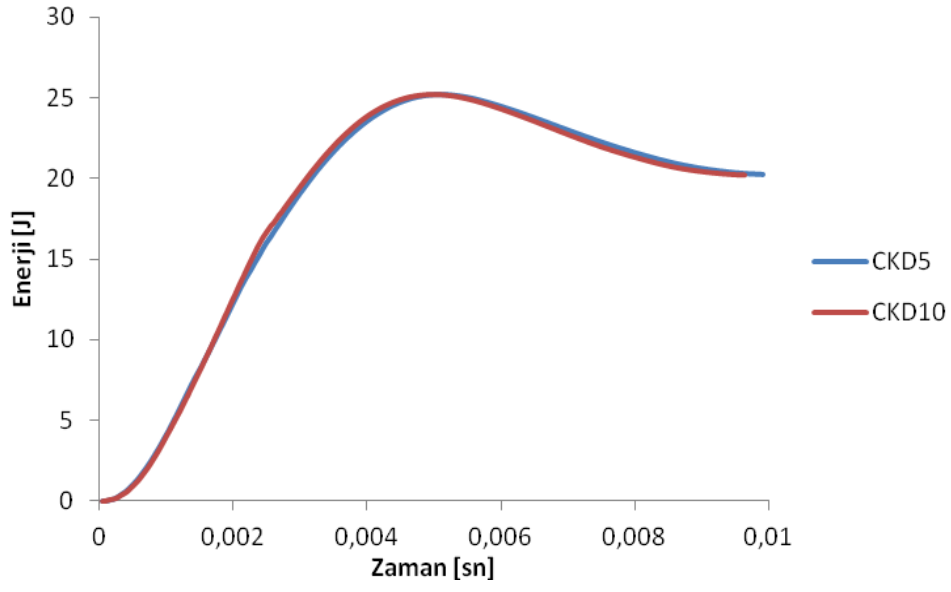


a)Konfigürasyon-2

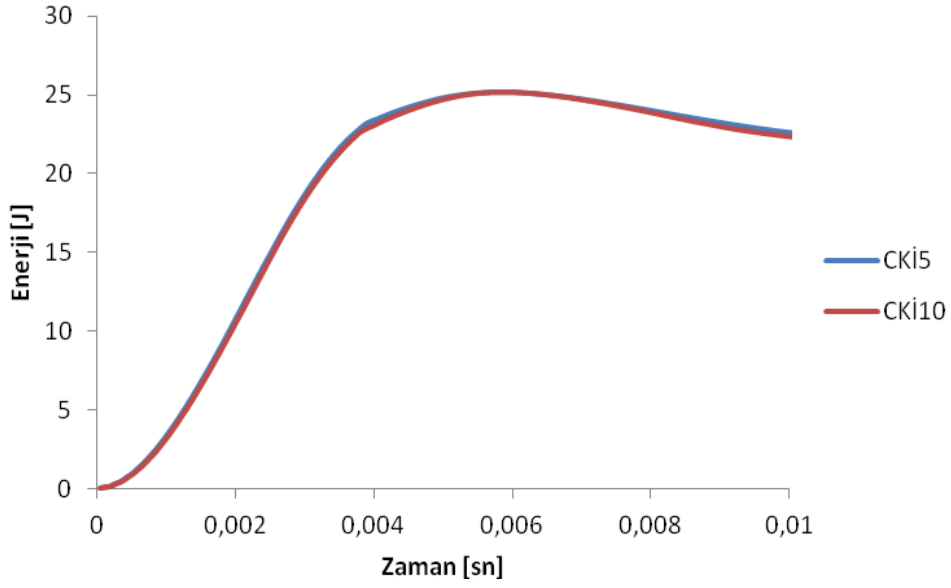


b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.29 $a/t=0,4$ ve değişen a/c için 3 m/sn hızda elde edilen birikimli enerji eğrileri
a)konfigürasyon-2 b)konfigürasyon-1 (C=3 m/sn)



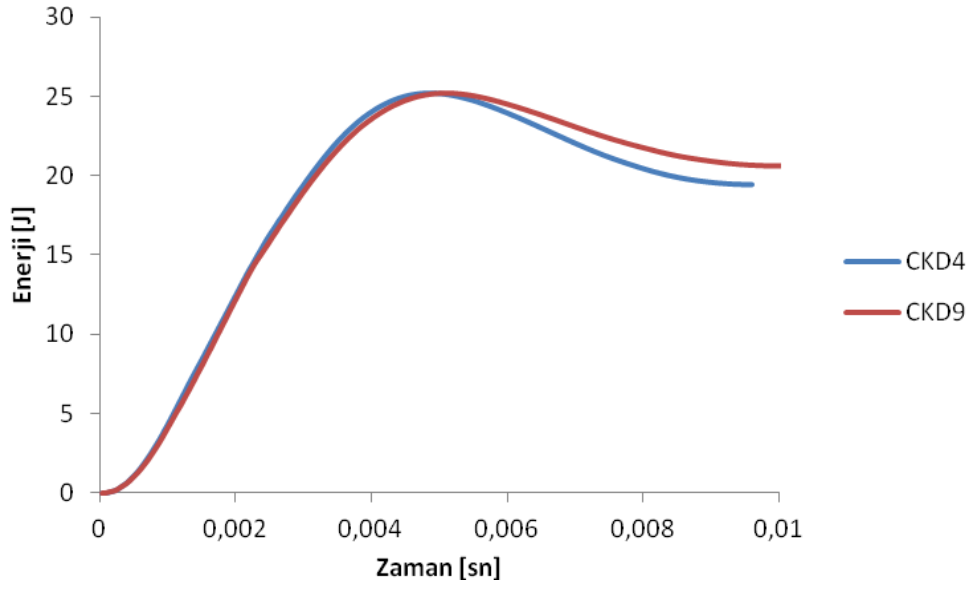
a)Konfigürasyon-2



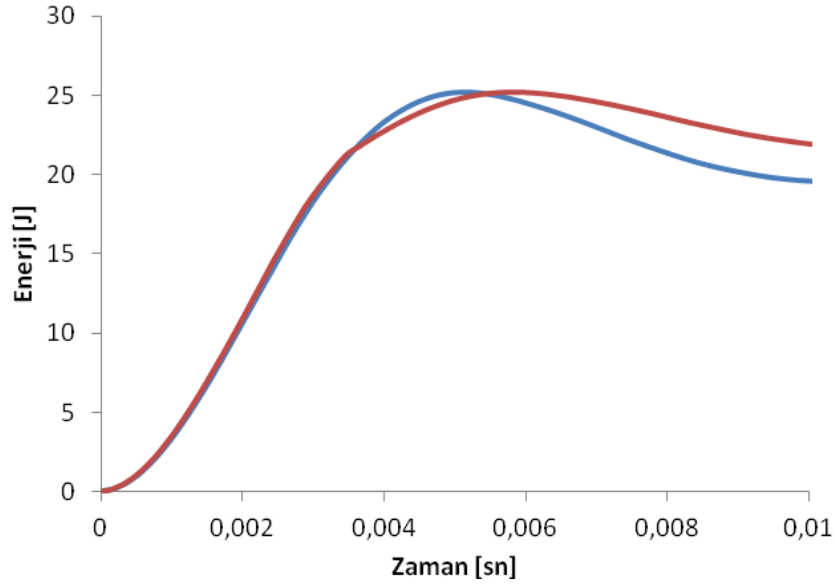
b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.30 $a/t=0,45$ ve değişen a/c için 3 m/sn hızda elde edilen birikimli enerji eğrileri

a)konfigürasyon-2 b)konfigürasyon-1 (C=3 m/sn)



a)Konfigürasyon-2



b)Konfigürasyon-1

Şekil 4.31 $a/t=0,5$ ve değişen a/c için 3 m/sn hızda elde edilen birikimli enerji eğrileri

a)konfigürasyon-2 b)konfigürasyon-1 (C=3 m/sn)

4.4. Düşük Hızlı Darbe Sonrası Oluşan Hasar Bölgelerinin İncelenmesi

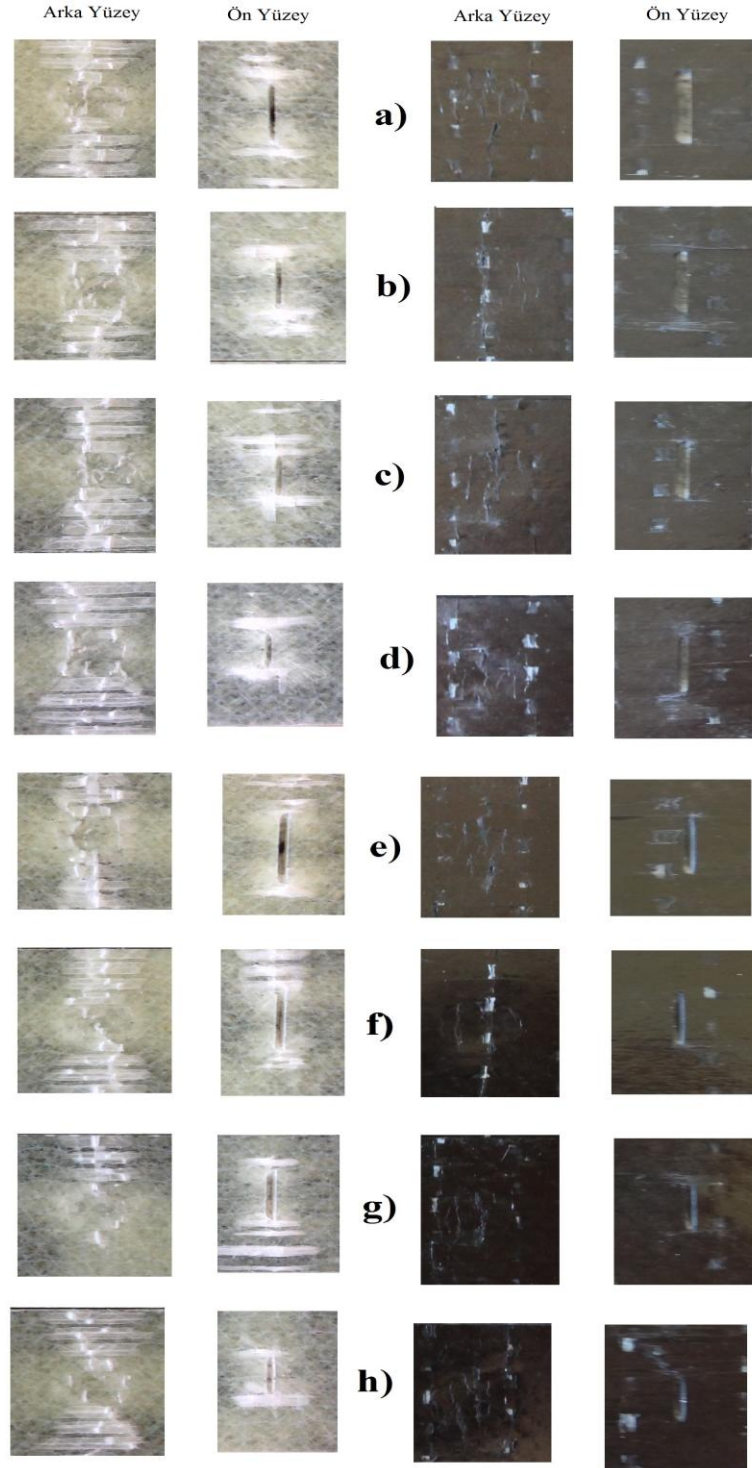
Bu bölümde düşük hızlı darbe yüklemelerine maruz bırakılmış hibrid tabakalı kompozit malzemeler de darbe sonrasında oluşan hasarlar mikroskop ve SEM görüntülerinden faydalanılarak değerlendirilecektir.

Şekil 4.32' de düşük hızlı darbe yüklemesine maruz bırakılmış tabakalı hibrid kompozit malzemelerin, darbenin uygulandığı yüzey ile yüzey çatlaklarının bulunduğu diğer kısmın darbe sonrası çekilmiş mikroskop resimleri bulunmaktadır. Malzemelere açılmış olan farklı geometrilerde ki yüzey çatlaklarına bağlı olarak uygulanmış olan 3 m/sn' lik darbe hızıyla beraber malzemelerde meydana gelen farklı hasarlar aşağıdaki şekillerde görülmektedir.

Karbonun iç kısımda bulunduğu konfigurasyon-1' de darbenin uygulandığı tarafta kompozit malzeme de meydana gelen elyaf kopmaları ve kalıcı hasarlar belirgin şekilde görülmektedir. Yüzey çatlaklarının açılmış olduğu diğer tarafa baktığımızda ise darbenin uygulanmasıyla beraber çatlak uçlarındaki çatlak gelişimi makro düzeyde görülmektedir.

Karbonun dış kısımda olduğu konfigurasyon-2' de ise darbe yüklemesi neticesinde tabakalı hibrid kompozit malzemenin her iki tarafında da karbonun iç kısımda olduğu malzemelere nazaran daha az hasar söz konusudur. Daha öncesinde de bahsettiğimiz üzere karbon tabakanın dış kısımda olmasının tabakalı hibrid kompozit malzemenin darbe dayanımına olan olumlu katkısı makro düzeyde ki resimlerde görülmektedir.

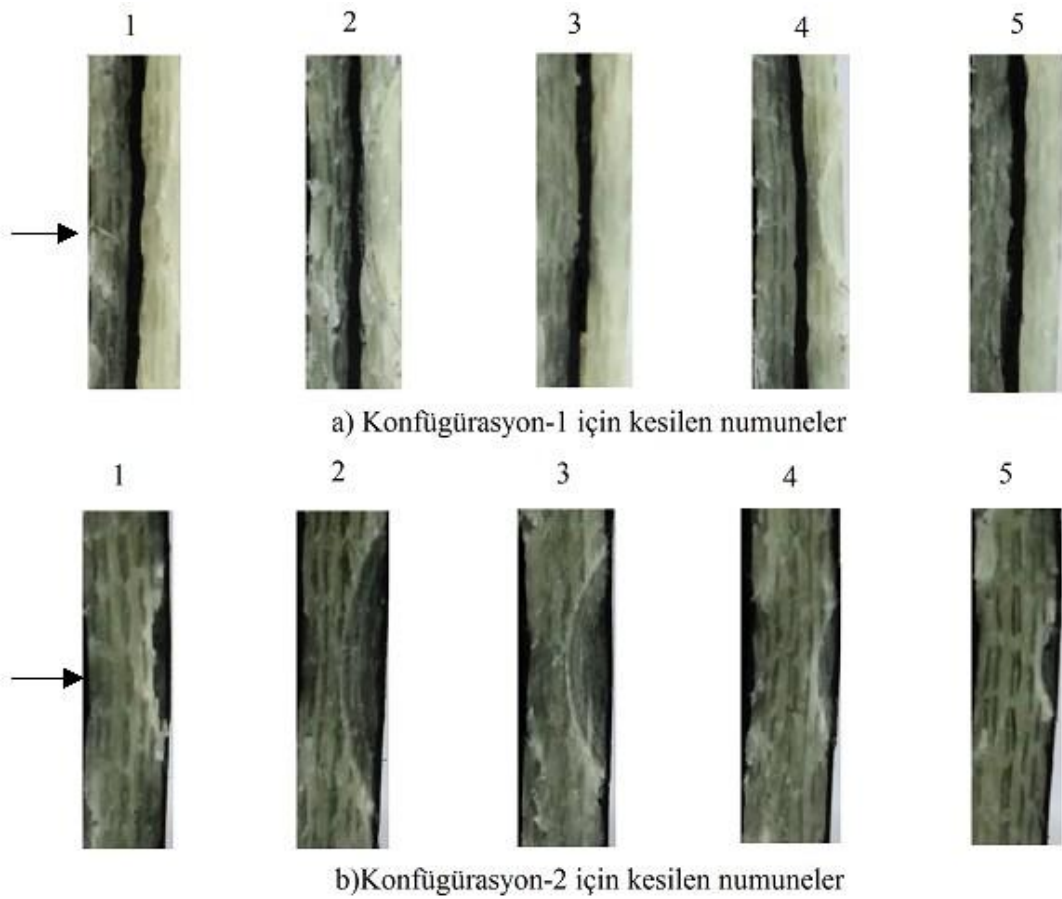
Farklı geometrilerde yüzey çatlaklarına sahip deney numunelerinin 3 m/sn' de yapılan deneyleri neticesinde elde edilen makro resimlerine baktığımızda a/c ve a/t parametrelerinin değişimiyle beraber oluşan hasarlarda değişmektedir. Çatlakın yüzey genişliğini belirten c parametresi büyüdükçe çatlaklı bölgedeki hasar miktarı dolayısıyla da çatlakın gelişimi daha belirgin olmaktadır, buna karşın çatlakın yüzey genişliği azaldıkça söz konusu malzemelerde daha az hasar gelişimi olmaktadır. Yüzey genişliğini belirten c parametresinin yanında diğer bir etken faktörde yüzey çatlaklarının derinliğini belirten a parametresidir. a' nın artmasıyla beraber deney numunelerinin hasar gelişimlerinde artış söz konusu olabilmektedir.



Şekil 4.32 3 m/sn hızda yapılan deneyler neticesinde hem konfigurasyon-1 hem de konfigurasyon-2 için kompozit malzemelerin ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen hasarlar a) $a/c=0,3$ ve $a/t=0,45$ b) $a/c=0,3$ ve $a/t=0,4$ c) $a/c=0,3$ ve $a/t=0,35$ d) $a/c=0,3$ ve $a/t=0,3$ e) $a/c=0,4$ ve $a/t=0,45$ f) $a/c=0,4$ ve $a/t=0,4$ g) $a/c=0,4$ ve $a/t=0,35$ h) $a/c=0,4$ ve $a/t=0,3$

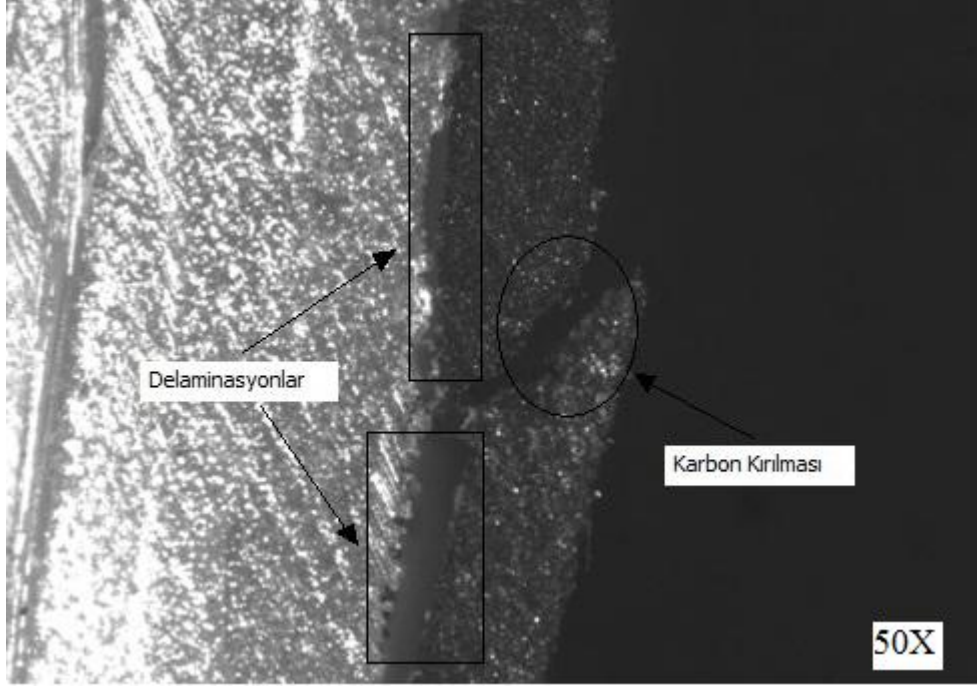
Şekil 4.33' e baktığımızda ise deneylerin gerçekleştirildiği malzemelerin kesitleri alınarak tabakalar arası durumlar ve açılmış olan yüzey çatlağının darbe sonrasındaki gelişimleri görülmektedir.

Darbe yüklemesinin yapıldığı yüzeylerde dikkat çekici düzeyde kalıcı hasarlar söz konusudur. Bu hasarların oluşmasının yanı sıra tabakalar arasında ki delaminasyonlar hem karbonun iç kısımda olduğu hem de karbonun dış kısımda olduğu her iki konfigürasyonda da belirgin bir şekilde görülmektedir. Meydana gelen delaminasyonları incelediğimizde dikkat çeken diğer bir hususta yüzey çatlağının kesit alanının büyük olduğu numuneler de kalıcı hasar ve delaminasyonların fazla olmasıdır. Bu da bize a/t ve a/c geometrilerinin deney numunesinin darbe dayanımı üzerindeki etkinliğini göstermektedir.



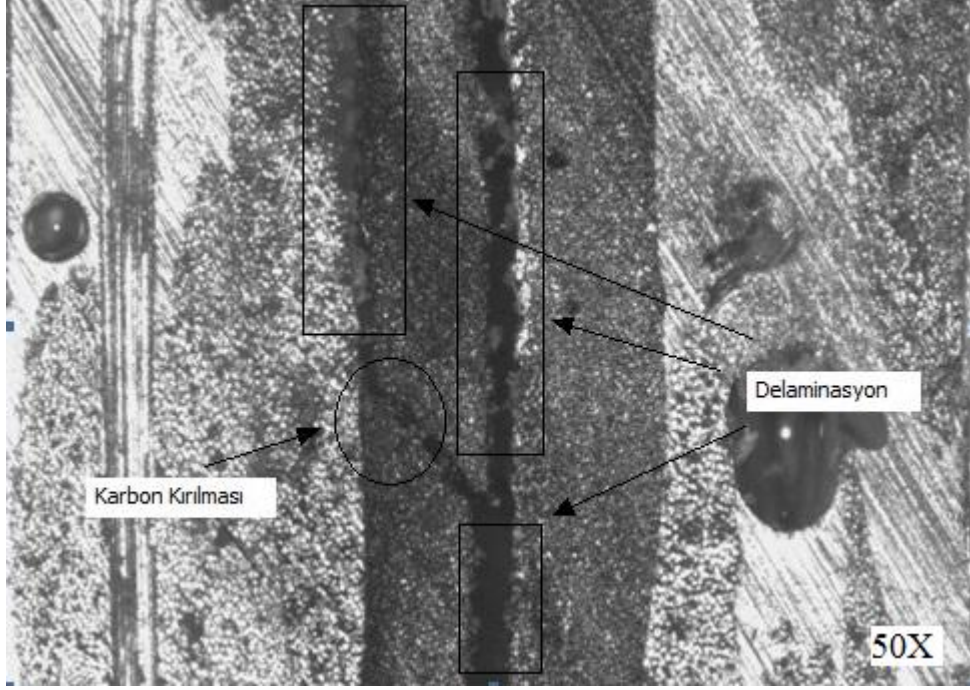
Şekil 4.33 3 m/sn de yapılan darbe yüklemeleri neticesinde kompozit malzemelerde oluşan hasarın kesilmiş haliyle gösterimi. 1) $a/c=0,2$ ve $a/t=0,25$ 2) $a/c=0,3$ ve $a/t=0,5$ 3) $a/c=0,4$ ve $a/t=0,5$ 4) $a/c=0,3$ ve $a/t=0,25$ 5) $a/c=0,4$ ve $a/t=0,25$ (Darbeler ok yönünde uygulanmıştır.)

Şekil 4.34’ de darbe deneyleri neticesinde karbonun dış kısımda bulunduğu konfigürasyon-2 dizilimine sahip deney numunesinde meydana gelen hasarlar görülmektedir. Dış kısımda bulunan karbonun yükleme neticesinde kırılması ve karbon tabaka ile iç kısımdaki matris malzemesi arasında meydana gelen tabakalar arası delaminasyon görülmektedir.



Şekil 4.34 3 m/sn’de yapılan konfigürasyon-2’ye ait deney numunesinde meydana gelen karbon tabaka kırılması.

Şekil 4.35’ de 3 m/sn’ de yapılan deneyler neticesinde tabakalı hibrid kompozit malzemenin maruz kaldığı bu yüklemeye neticesinde sahip olduğu enerjinin delaminasyonlar ve kırılmalarla boşalttığını görüyoruz. Bu enerji boşaltımı nedeniyle de malzemede meydana gelen hasar, malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde düşürmektedir.



Şekil 4.35 3 m/sn’ de yapılan deneyler neticesinde konfigurasyon-1’ e ait deney numunesinde meydana gelen iç yapı hasarları

Darbe deneylerinin yapıldığı numunelere, darbe sonrasında ASTM-D2584 standardına uygun şekilde yakma deneyleri yapılmıştır. Yapılan yakma deneyi neticesinde tabakalı kompozit malzemenin içerisinde bulunan elyafların darbe yüklemesiyle beraber hasara uğradığı tespit edilmiştir. Hasara uğrayan elyaflar incelendiğinde; hasara uğramasında açılmış olunan yüzey çatlaklarının geometrisinden ziyade darbenin yönü, şiddeti ve elyafların açılma konumunun etkili olduğu görülmüştür.

Gerek optik mikroskop gerekse elektron mikroskoptan (SEM) alınan resimlere bakıldığında hasarın ağırlıklı olarak delaminasyon oluşumu şeklinde olduğu görülmektedir. Şekil 4.36' da 3 m/sn' de yapılan darbe deneyleri neticesinde numuneye ait hasar sonrası mikro yapı görülmektedir. Şekilde hasarın, yüzey çatlaklarının dibinden başlayan ve açılmış olan çatlak formunu takip eden bir delaminasyon oluşumu ile başladığı görülmektedir. Bu oluşumun ardışık tabakalara doğru yayılmış olduğu ve yer yer tabakalar arası delaminasyon şekline dönüştüğü görülmektedir. Şekil 4.37' de ise darbe yüklemesi neticesinde meydana gelen çatlakların dallanması açıkça görülmekteyken şekil 4.38' de hasar oluşumu cam tabakalar arasında meydana gelen delaminasyonlar şeklinde görülmektedir.

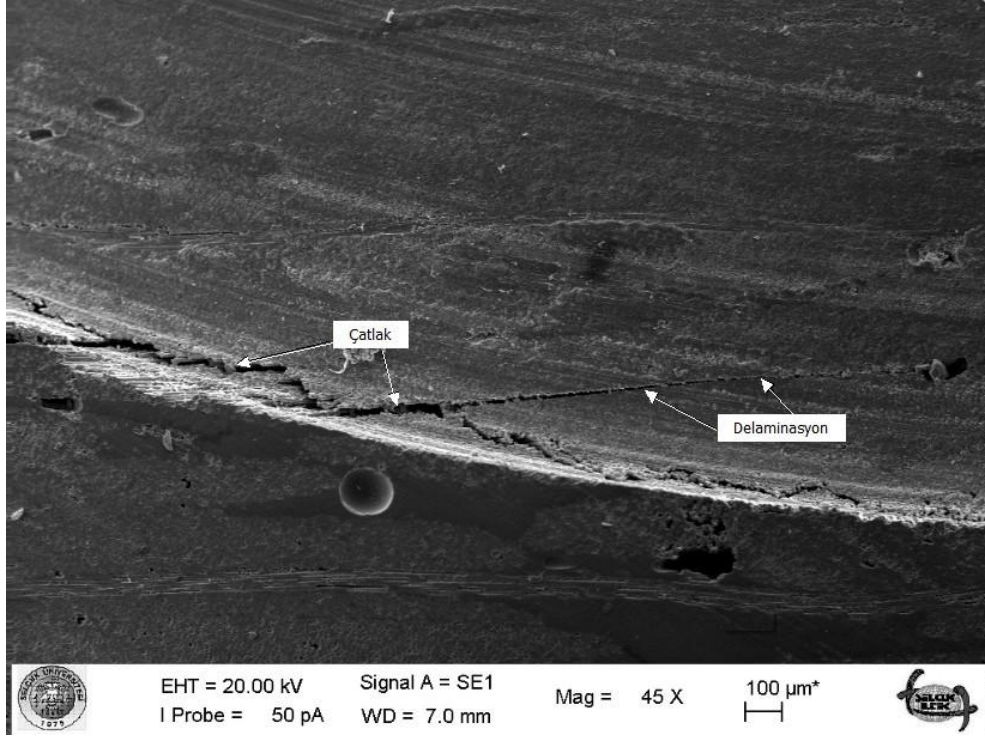
Şekil 4.39-4.44 incelendiğinde açılmış olan yüzey çatlaklarının hizasında birbirine paralel 2 adet çatlak görülmektedir. Bu çatlaklar temelde delaminasyonları göstermekle beraber oluşan çatlaklar açılmış olduğumuz yüzey çatlaklarının ucundan başlayan ve iç kısma doğru ilerleyen delaminasyonlar şeklindedir. Açılmış olan yüzey çatlaklarının uç kısımlarını takip eden ve esasında delaminasyon başlangıcı şeklinde derinlemesine çatlak oluşumu görülmüştür. Bu çatlakların oluşumu ve eliptik yüzey çatlaklarının şeklini takip etmesi çatlakların tabakadan tabakaya kolay bir şekilde geçtiğinin göstergesidir. Bu durum yüzey çatlaklarının her noktasında oluşan gerilme şiddetinin çatlakların ilerlemesindeki esas faktör olduğu ve çatlakların esasen kendi formunu koruma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Ancak SEM görüntüleri detaylı bir şekilde incelendiğinde delaminasyon şeklinde çatlak ilerlemelerinin daha kolay olduğu görülmektedir. Mikro yapısı incelenen bütün numunelerde genel eğilimin bu şekilde olduğu, darbe sonrasındaki hasar gelişiminin genellikle

delaminasyonlar şeklinde olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte yüzey çatlğından uzak bölgelerde de delaminasyon şeklinde hasar gelişimin olduğu görölmektedir.

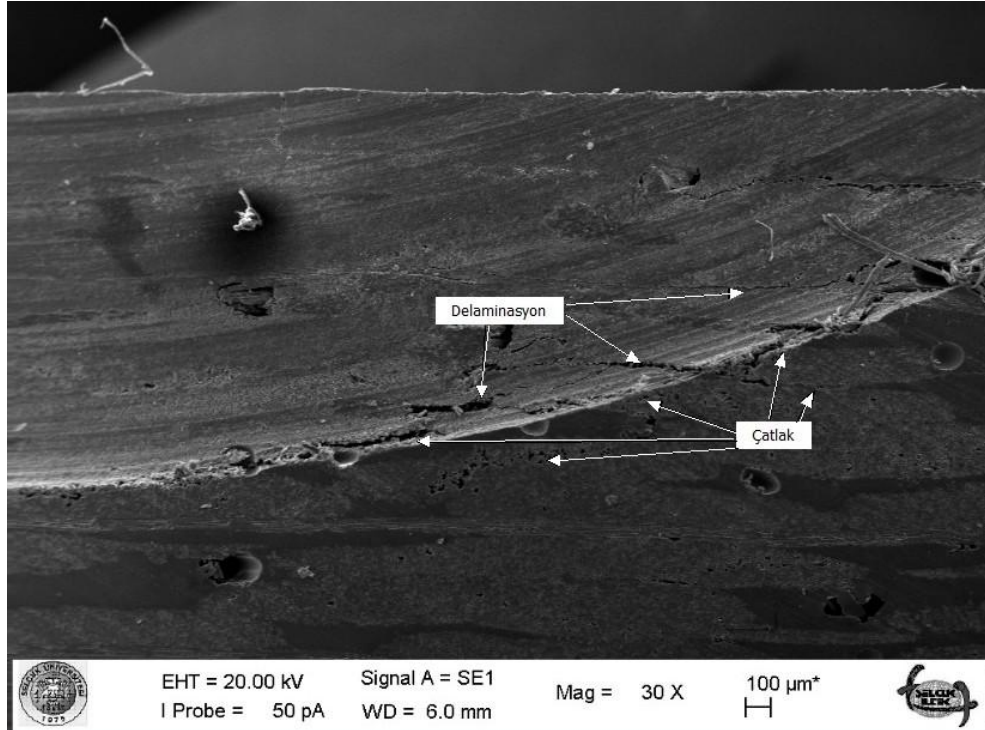
Şekil 4.45 da 3 m/sn hızda yapılan darbe deneyleri neticesinde $a/c=0,3$ ve $a/t=0,25$ yüzey çatlğı geometrisine sahip numunenin mikro yapısı görölmektedir. Şekilde karbon-karbon ve karbon-cam tabakalar arasında delaminasyonların oluştuğı görölmektedir. Bunun nedeni tabakalı kompozit malzemelerin elastik özelliklerinin ardışık tabakalarda birbirinden farklı olmasına bağlanabilir. Delaminasyon oluşmasında bir diğerk etken ise delaminasyona sebep olan kayma gerilmelerinin numunenin orta kısmında maksimum değerlerine ulaşmalarıdır.

Şekil 4.46-4.47' de benzer şekilde darbe yüklemesi neticesinde tabakalı kompozit malzemelerde meydana gelen çatlak ilerlemeleri ve delaminasyonlar belirgin şekilde görölmektedir.

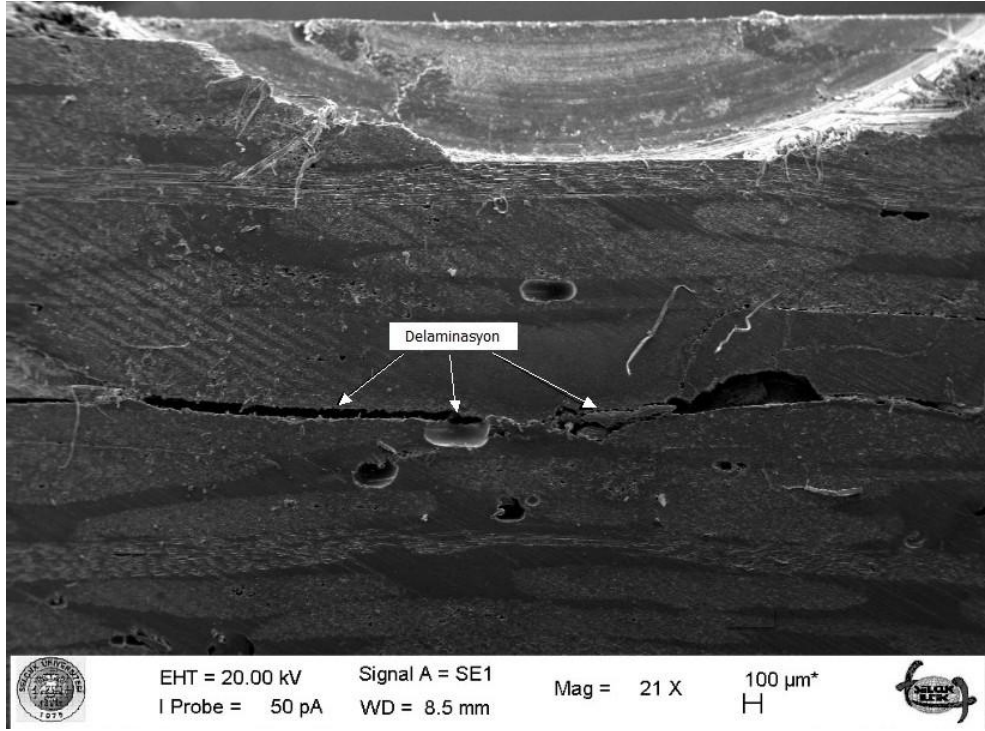
Farklı yüzey çatlğı geometrileri barındıran malzemeler incelendiğinde davranışın genellikle aynı olduğu, açılmış olan yüzey çatlğının genellikle çatlak ilerlemesinin başlangıcı olduğu ancak çatlğın self-similar (kendine benzer) biçimde ilerlemediğı ve çatlak civarında gelişen delaminasyonlar şeklinde kendini gösterdiği görölmektedir. Ancak $a/t=0,25$ olan numunelerde çatlaktan uzak bölgelerde de delaminasyonlar tespit edilmiştir. Oysa $a/t=0,5$ olan numunelerde gelişmiş olan delaminasyonların yüzey çatlğının ucundan itibaren başladığı görölmüştür. Bu durum yüzey çatlğının oluşturduğu gerilme şiddetinin tabakalar arasında delaminasyonlar başlatacak şiddette olduğunu ve malzemenin Mod-I kırılma tokluğunun Mod-II kırılma tokluğundan büyük olduğu olarak düşünülebilir.



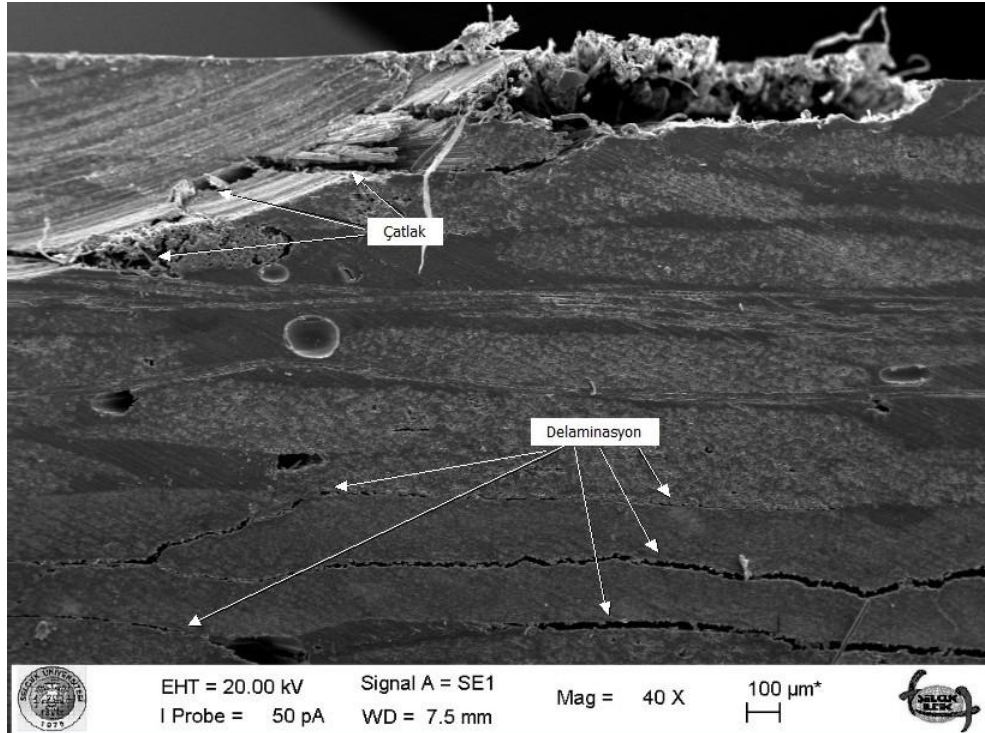
Şekil 4.36 3 m/sn'de yapılan darbe deneyi neticesinde numunede meydana gelen hasarın SEM görüntüsü (Konfigürasyon-2, $a/c=0,3$, $a/t=0,5$)



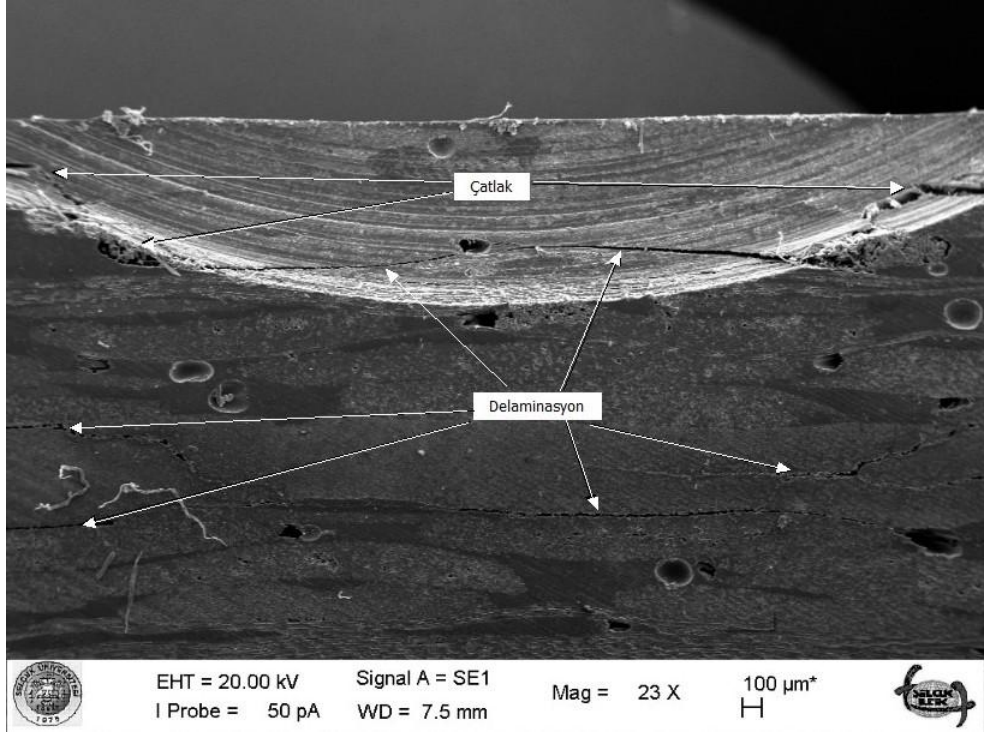
Şekil 4.37 3 m/sn'de yapılan darbe deneyi neticesinde numunede meydana gelen hasarın SEM görüntüsü (Konfigürasyon-2, $a/c=0,3$, $a/t=0,5$)



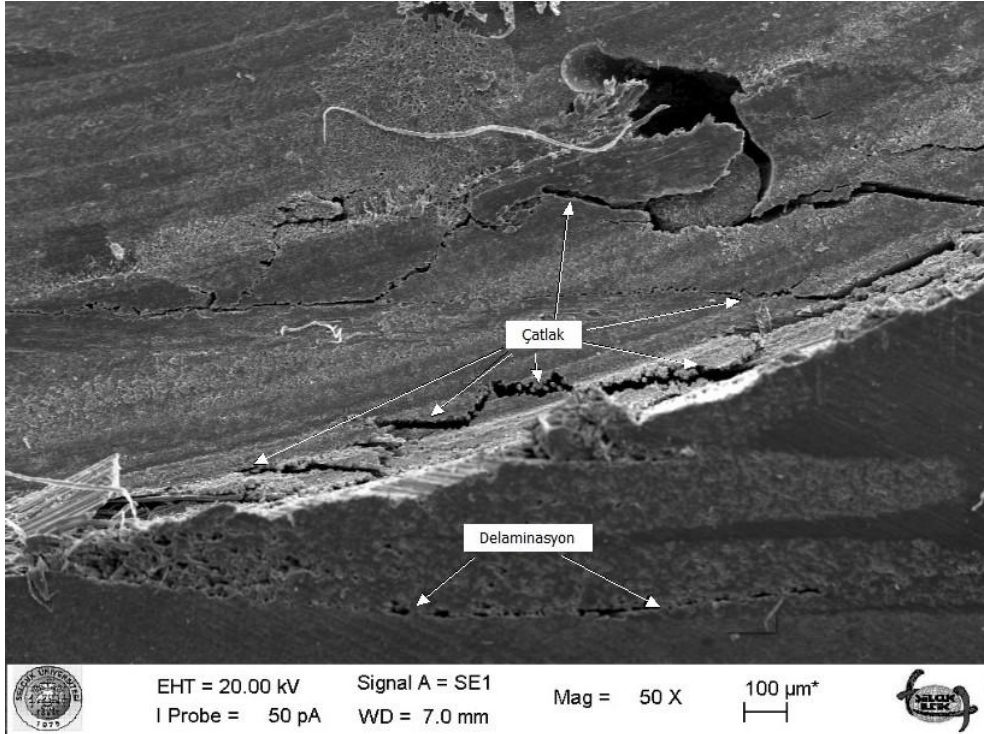
Şekil 4.38 3 m/sn’de yapılan darbe deneyi neticesinde numunede meydana gelen hasarın SEM görüntüsü (Konfigürasyon-2, $a/c=0,4$, $a/t =0,5$)



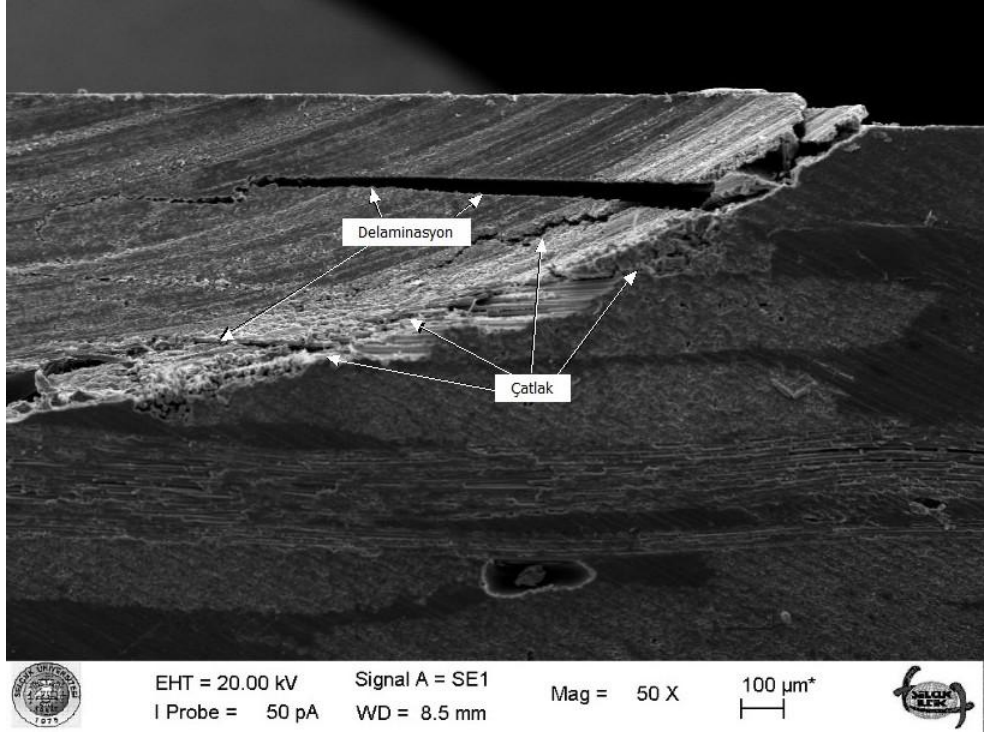
Şekil 4.39 3 m/sn’de yapılan darbe deneyi neticesinde numunede meydana gelen hasarın SEM görüntüsü (Konfigürasyon-2, $a/c=0,4$, $a/t =0,5$)



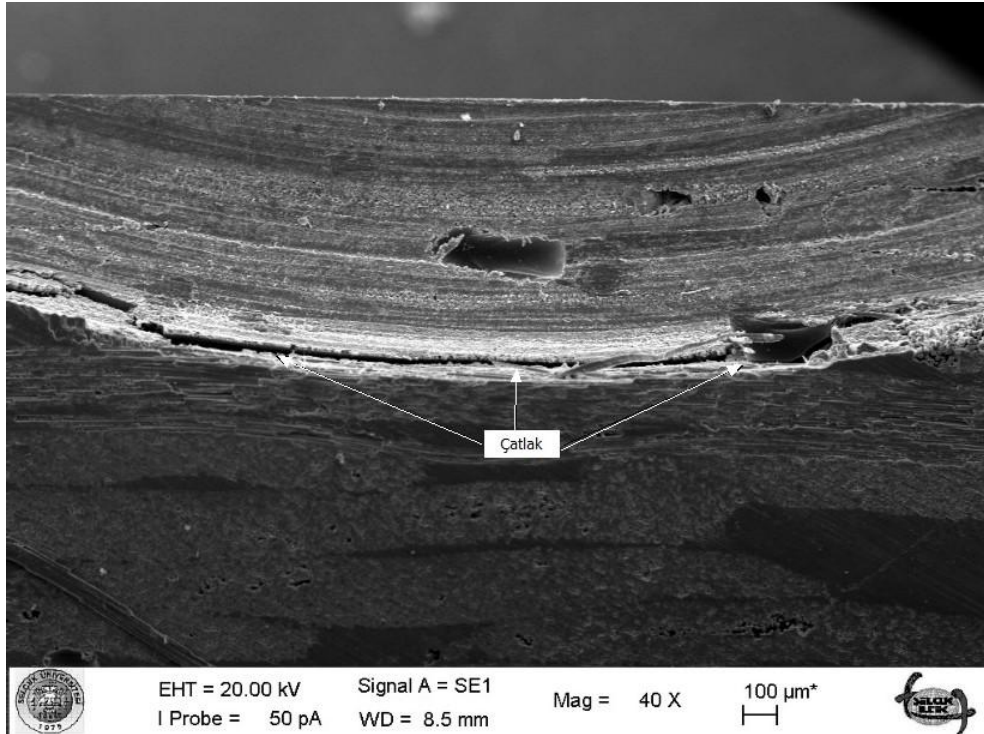
Şekil 4.40 3 m/sn’de yapılan darbe deneyi neticesinde numunede meydana gelen hasarın SEM görüntüsü (Konfigurasyon-2, $a/c=0,3$, $a/t=0,25$)



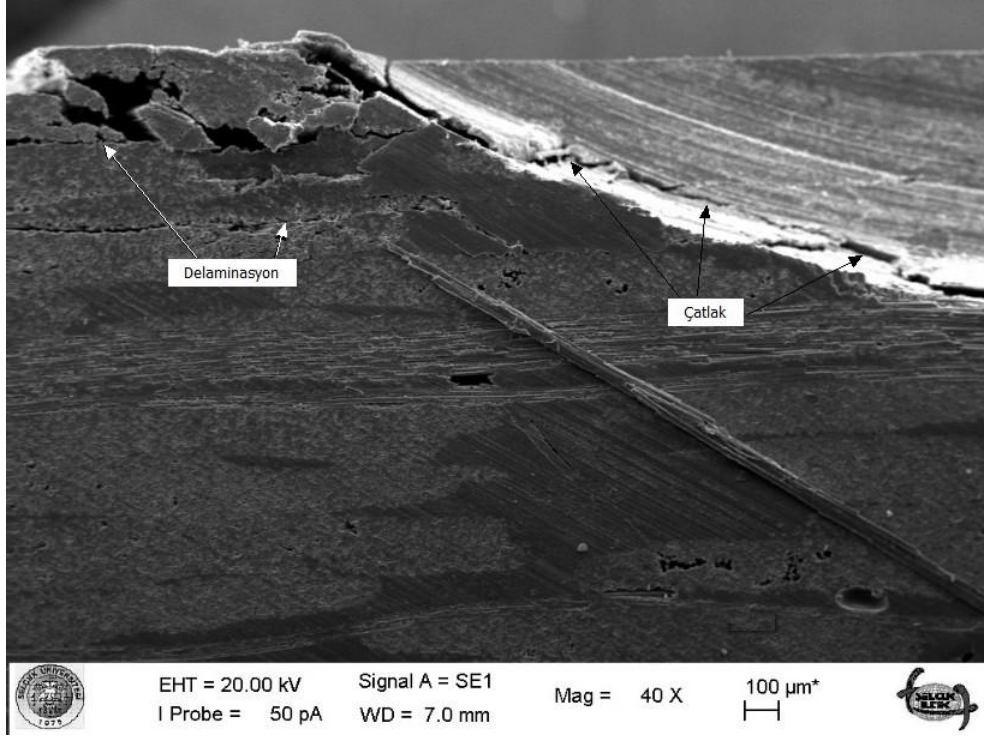
Şekil 4.41 3 m/sn’de yapılan darbe deneyi neticesinde numunede meydana gelen hasarın SEM görüntüsü (Konfigurasyon-2, $a/c=0,3$, $a/t=0,25$)



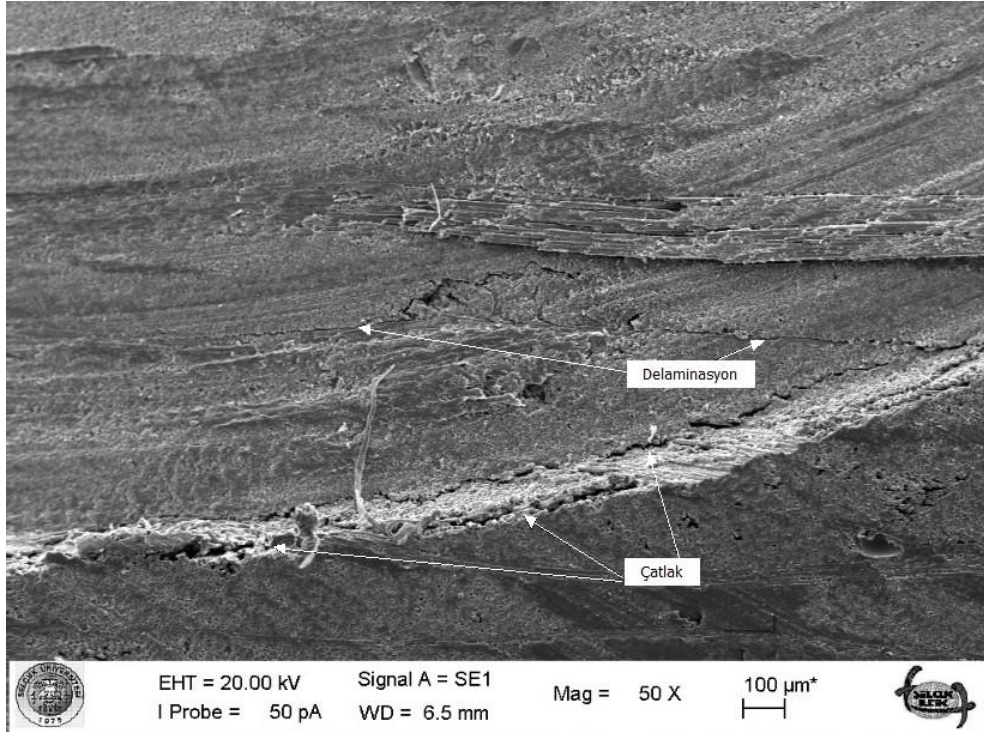
Şekil 4.42 3 m/sn'de yapılan darbe deneyi neticesinde numunede meydana gelen hasarın SEM görüntüsü (Konfigurasyon-2, $a/c=0,3$, $a/t=0,25$)



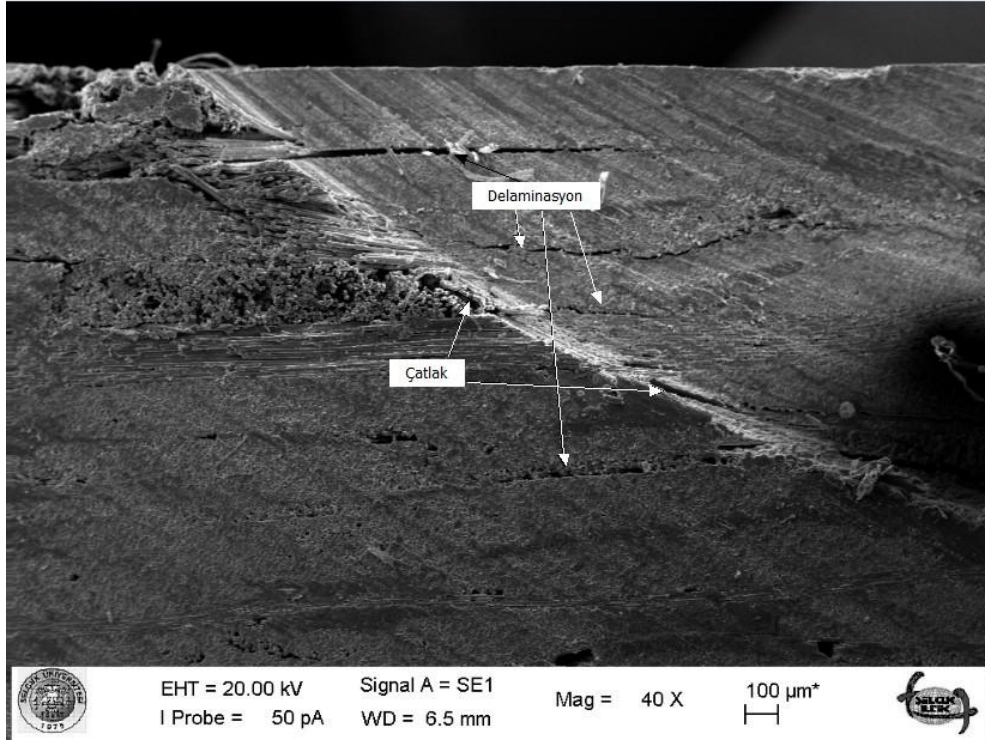
Şekil 4.43 3 m/sn'de yapılan darbe deneyi neticesinde numunede meydana gelen hasarın SEM görüntüsü (Konfigurasyon-1, $a/c=0,3$, $a/t=0,5$)



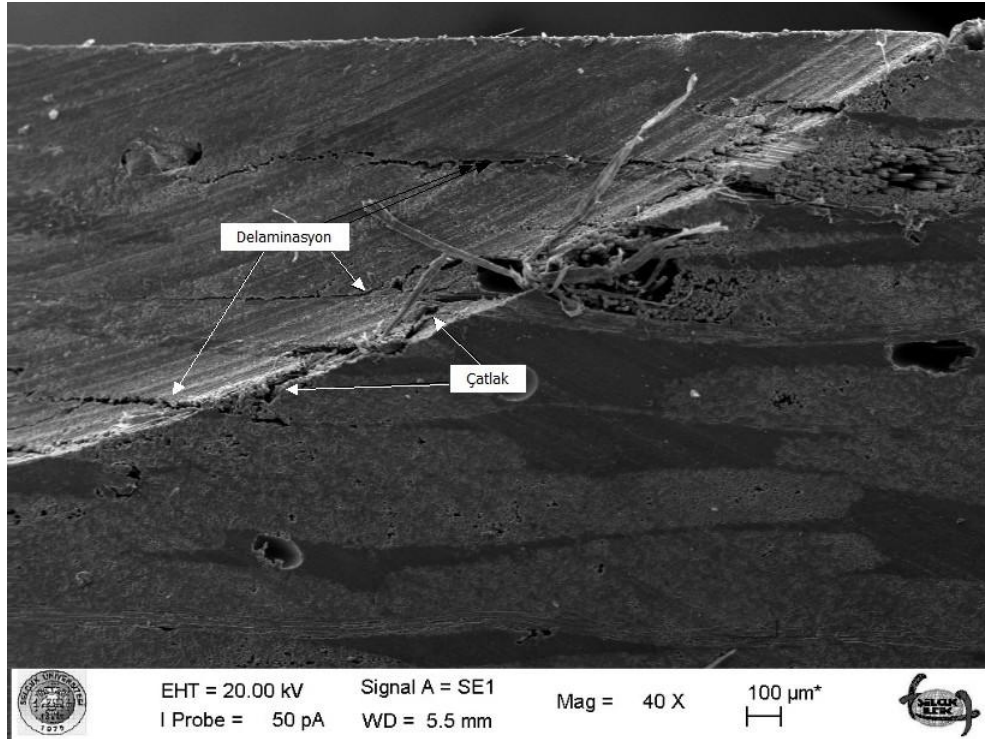
Şekil 4.44 3 m/sn'de yapılan darbe deneyi neticesinde numunede meydana gelen hasarın SEM görüntüsü (Konfigurasyon-1, $a/c=0,3$, $a/t=0,25$)



Şekil 4.45 3 m/sn'de yapılan darbe deneyi neticesinde numunede meydana gelen hasarın SEM görüntüsü (Konfigurasyon-1, $a/c=0,3$, $a/t=0,25$)



Şekil 4.46 3 m/sn'de yapılan darbe deneyi neticesinde numunede meydana gelen hasarın SEM görüntüsü (Konfigurasyon-1, $a/c=0,4$, $a/t=0,25$)



Şekil 4.47 3 m/sn'de yapılan darbe deneyi neticesinde numunede meydana gelen hasarın SEM görüntüsü (Konfigurasyon-1, $a/c=0,4$, $a/t=0,25$)

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada üzerinde yüzey çatlakları bulunan tabakalı hibrid kompozit malzemelerin darbe davranışları incelenmiş ve yapılan değerlendirmeler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Kuvvetin zamana göre değişim grafiklerinden de anlaşılmaktadır ki a/c nin sabit kabul edilip değişen a/t ler incelendiğinde a/t nin artmasıyla beraber malzemelerin dayanabildiği maksimum kuvvet değerlerinde azalmalar söz konusudur.
- Konfigürasyon-1 formundaki iç kısmı karbon tabakalı malzemelerin dayanabildiği kuvvet değeri, dışı karbon tabakalı konfigürasyon-2' ye sahip malzemenin dayanabildiği kuvvet değerinden düşüktür.
- Kuvvet-zaman eğrisi üzerinde küçük düşüşlerin meydana gelmesi malzemenin üzerinde matris çatlakları oluştuğunun habercisidir.
- Malzemedeki darbe hızı arttıkça ortalama etkileşim süresi de artmış ve meydana gelen hasarın belirtisi olan ani kuvvet düşüşlerinin şiddetinin arttığı gözlemlenmiştir.
- Düşük darbe hızlarında oluşan matris çatlakları şeklindeki hasar hızın artmasıyla birlikte tabakalar arası delaminasyon ve kırılma şeklinde kendini göstermektedir.
- Kuvvet uygulandığında konfigürasyon-2' dizilimine sahip malzemedeki konfigürasyon-1 dizilimine sahip malzemeye nazaran daha az çökme oluşmaktadır. Karbon tabakanın dış yüzeyde konumlandırılmış olması bu yönüyle avantajlı bir durumdur.
- Kuvvetin uygulanmasıyla birlikte tabakalı kompozit malzemedeki deformasyon oluşmaya başlamış ve kuvvet maksimum değerine ulaştığı zaman deplasmanda aynı şekilde maksimum değerine ulaşmıştır. Kuvvetin azalmasıyla deplasman değeri de azalmaya başlamış ancak ilk başta sahip olduğu değere ulaşmamıştır. Çünkü malzemedeki artık bir miktar kalıcı hasar oluşmuştur.

- Konfigürasyon-2 dizilimine sahip malzeme çok yüksek kuvvete dayanmakla birlikte daha az yer değiştirmeye maruz kalmıştır. Buna karşın içi karbon tabakalı konfigürasyon-1 dizilimine sahip malzemelerde düşük kuvvet değerlerine rağmen daha fazla yer değiştirmeye söz konusudur.
- Kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin eğimi eğilme rijitliklerinin ölçüsünü vermektedir. Burada konfigürasyon-2' ye sahip malzemelerin eğilme rijitliği konfigürasyon-1' e sahip malzemelere nazaran çok yüksektir. Ayrıca teorik olarak elde edilen eğilme rijitliği değerleri deneysel olarak elde edilmiş oldu.
- Darbe hızının yüksek olduğu testlerde yutulan enerjinin sıçrama enerjisinden daha yüksek olduğu gözlemlendi.
- Hasarlar öncelikli olarak matris çatlamasıyla başlamış ardından delaminasyon şeklinde devam etmiştir ve darbenin uygulandığı yöne zıt yönde yüksek çekme gerilmesiyle lif kopmaları oluşmuştur.
- Sonuç olarak konfigürasyon-1 dizilimine sahip malzemeler için kayma gerilmesinin, konfigürasyon-2 dizilimine sahip malzemeler içinde normal gerilmenin hasarda daha etkin olduğu kanaatine varılmıştır.

Hibrid tabakalı kompozit malzemelerin yüzey çatlaklı ve yüzey çatlaksız haldeki durumlarında yapılan darbe deneyleri neticesinde elde edilen verilerin kıyaslanmasıyla yüzey çatlağının malzemenin elastik özelliklerine etkisi değerlendirilebilir. Ayrıca yüzey çatlaklı ve yüzey çatlaksız numunelerin enerji absorbe etme özellikleri karşılaştırılarak malzemelerin dinamik kırılma tokluğunun belirlenmesi konusu da incelenebilir.

6. KAYNAKLAR

Abrate, S., (1998). *Impact on Composite Structures*. Cambridge, Cambridge University Press. 135-160.

Akceylan, V., 2010, Rijit Bir Zemin Üzerindeki Tabakalı Kompozit Levhanın Düşük Hızlı Darbe Hasarı, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.

Akdemir, A., Tarakcioglu, N., Avcı, A., 2001, Stress corrosion crack growth in glass/polyester composites with surface crack, *Composites Part B: Engineering*, 32:123-129.

Akgün, Y., 2010, Onarılmış Kompozit Plakların Darbe Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

ASTM Standards and Literature Referances for Composite Materials. (1990) D 2584. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, PA.

Atas, C., Akgun, Y., Dagdelen, O., Icten, Bulent M., Sarikanat, M., 2011, An experimental investigation on the low velocity impact response of composite plates repaired by VARİM and hand lay-up processes. *Composite Structures* 93:1178-1186.

Avcı, A., Sahin, Ö.S., Tarakcioglu, N., 2007, Fatigue behavior of surface cracked filament wound pipes with high tangential strength in corrosive environment, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38:1192-1199.

Aymerich, F., Priolo, P., 2008, Characterization of fracture modes in stitched and unstitched cross-ply laminates subjected to low-velocity impact and compression after impact loading., *International Journal of Impact Engineering* 35:591-608.

Azouaoui, K., Azari, Z., Pluvinage, G., 2010, Evaluation of impact fatigue damage in glass/epoxy composite laminates, *International Journal of Fatigue*, 32:443-452.

Belingardi, G., Paolino, D.S., Koricho, E.G., 2011, Investigation of influence of tab types on tensile strength of E-glass/epoxy fiber reinforced composite materials, *Engineering Procedia*, 10:3279-3284.

Belingardi, G., Vadori, R., 2002, Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates, *International Journal of Impact Engineering*, 27:213-229.

Bouvet, C., Castanie, B., Bizeul, M., Barrau, J., 2009, Low velocity impact modeling in laminate composite panels with discrete interface elements, *International Journal of Solids and Structures*, 46:2809-2821.

Bozkurt, L., Hibrit kompozit levhaların düşük hızlı darbe hasar davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya

Choi, N., Chang, J., Kwak, S., Gu, J., 2010, Impact surface fractures of glass-fiber/epoxy lamina-coated glass plates by small steel-ball, *Composites Science and Technology*, 70: 2056-2062.

Evcı, C., 2009, Seramik Kompozit Zırh Sistemlerinin Darbe ve Balistik Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Gonzalez, E.V., Maimi, P., Camanho, P.P., Lopes, C.S., Blanco, N., 2011, Effects of ply clustering in laminated composite plates under low-velocity impact loading, *Composite Science and Technology*, 71:805-817.

Harel, H., Marom, G., Fischer, S., Roman, I., 1980, Effect of Reinforcement Geometry on Stress Intensity factor Calibration in Composites, *Composites*. April: 69-72.

Hebert, M., Rousseau, C., Shukla, A., 2008, Shock loading and drop weight impact response of glass reinforced polymer composites, *Composite Structures*, 84:199-2008.

Hosur, M., V., Abdullah, M., Jeelani, S., 2005, Studies on the low velocity impact response of woven hybrid composites. *Composite Structures*, 67: 253-262.

Itou, S., 2010, Dynamic stress intensity factors for two parallel interface cracks between a nonhomogeneous bonding layer and two dissimilar elastic half-planes subject to an impact load., *International Journal of Solids and Structures*, 47:2155-2163.

Jones, Robert M., *Mechanics of Composite Materials*, Second Edition. 426-453.

Kara, M., 2006, Düşük Hızlı Darbeye Maruz Tabakalı Kompozitlerin Dinamik Cevabı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya

Karaca, D., 2010, Farklı Kalınlık ve Oryantasyon Yüzdelerindeki Tabakalı Kompozit Levhaların Düşük Hızlı Darbe Enerjileri Altında Davranışlarının Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü , Ankara.

Kill Shin, D., Lee, J.J., 2001, Fracture parameters of interfacial crack of bimaterial under the impact loading. *International Journal Of Solids and Structures*, 38:5303-5322.

Kulkardi, M.D., Goel, R., Naik, N.K., 2011, Effect of back pressure on impact and compression-after-impact characteristics of composites, *Composite Structures*, 93:944-951.

Li, S., Reid, S.R., Zou, Z., 2006, Modelling damage of multiple delaminations and transverse matrix cracking in laminated composites due to low velocity lateral impact., *Composites Science and Technology*, 66:827-836.

Liu Y.W., 2007, Improving the abrasion resistance of hydraulic-concrete containing surface crack by adding silica fume., *Construction and Building Materials*, 21:972-977.

Mal, A., 2002, Elastic waves from localized sources in composite laminates, *International Journal of Solids and Structures*, 39:5481-5494.

Mathivanan, N.R., Jerald, J., 2010, Experimental investigation of low velocity impact characteristics of woven glass fiber epoxy matrix composite laminates of EP3 grade, *Materials and Design*, 31:4553-4560.

Mili, F., Necib, B., 2001, Impact behavior of cross-ply laminated composite plates under low velocities, *Composite Structures*, 51:237-244.

Mishra, A., Naik, N.K., 2010, Failure initiation in composite structures under low-velocity impact: Analytical studies, *Composite Structures*, 92:436-444.

Mitrevski, T., Marshall, I.H., Thomson, R., Jones, R., Whittingham, B., 2005, The effect of impactor shape on the impact response of composite laminates, *Composite Structures*, 67:139-148.

Sayer, M., 2009, Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli

Schoeppner, G.A., Abrate, S., 2000, Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31:903-915

Shyr, T., Pan, Y., 2003, Impact damage resistance and damage characteristics of composite laminates, *Composite Structures*, 62:193-203.

Sutherland, L.S., Soares, C., 2007, Scaling of impact on low fibre-volume glass-polyester laminates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38:307-317

Şahin, Y. 2000. Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitabevi, Ankara.

Taşkıran, C., 2010, Tabakalı Kompozit Levhaların Sıcaklığa Bağlı Düşük Enerjili Darbe Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Tay, T.E., Tan, V.B.C., Deng, M., 2003, Element-failure concepts for dynamic fracture and delamination in low-velocity impact of composites, *International Journal of Solids and Structures*, 40:555-571.

Tiberkak, R., Bachene, M., Rechak, S., Necib, B., 2008, Damage prediction in composite plates subjected to low velocity impact. *Composite Structures* 83:73-82.

Ueda, S., 2002, Impact response of a piezoelectric layered composite plate with a crack, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 38:221-242.

Uyaner, M., Kara, M., Ataberk, N., 2007, E-camı / Epoksi Tabakalı Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe Davranışına Numune Boyutlarının Etkisi, 8.Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı, *Selçuk Üniversitesi Kadınhanı Faik İçil Meslek Yüksekokulu*, Konya.

Wang, S., Wu, L., Ma, L., 2010, Low velocity impact and residual tensile strength analysis to carbon fiber composite laminates, *Materials and Design*, 31:118-125.

Yang, F.J., Cantwell, W.J., 2010, Impact damage initiation in composite materials, *Composites Science and Technology*, 70:336-342.

Yeşildal, S., 2010, Darbe Yüklerine Maruz Denizel Kompozitlerde Hasar Mekanizmaları, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.

7.EKLER

EK 1 Yüzey Çatlağı Geometrileri

<i>t=4mm</i>	<i>a/c</i>	<i>a(mm)</i>	<i>c(mm)</i>	<i>R(mm)</i>	<i>a/t</i>
1	0,2	1,4	7	18,2	0,35
2	0,2	1,2	6	15,6	0,3
3	0,2	1	5	13	0,25
4	0,3	2	6,66	12,11	0,5
5	0,3	1,8	6	10,9	0,45
6	0,3	1,6	5,33	9,68	0,4
7	0,3	1,4	4,66	8,47	0,35
8	0,3	1,2	4	7,26	0,3
9	0,4	2	5	7,25	0,5
10	0,4	1,8	4,5	6,525	0,45
11	0,3	1	3,33	6,05	0,25
12	0,4	1,6	4	5,8	0,4
13	0,4	1,4	3,5	5,075	0,35
14	0,4	1,2	3	4,35	0,3
15	0,4	1	2,5	3,625	0,25

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Aydın GÜNEŞ
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri ve Tarihi : Kırşehir, 17.02.1987
Telefon : 0535 505 97 35
Faks : -
e-mail : aygunes@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Kocasinan Lisesi, Kocasinan, Kayseri	2005
Üniversite	: Erciyes Üni-Müh. Fak.-Makine Mühendisliği	2010
Yüksek Lisans	: -	-
Doktora	: -	-

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2011-Halen	Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİLLER

İngilizce, Almanca.