



**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KOMPOZİT SANDVIÇ KİRİŞLERİN EĞİLME DARBE
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**Hazırlayan
Umut ÇALIŞKAN**

**Danışman
Prof. Dr. Mustafa Kemal APALAK**

Doktora Tezi

**Mart 2018
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KOMPOZİT SANDVIÇ KİRİŞLERİN EĞİLME DARBE
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ
(Doktora Tezi)**

**Hazırlayan
Umut ÇALIŞKAN**

**Danışman
Prof. Dr. Mustafa Kemal APALAK**

**Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
tarafından FDK-2016-6573 kodlu proje ile desteklenmiştir**

**Mart 2018
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

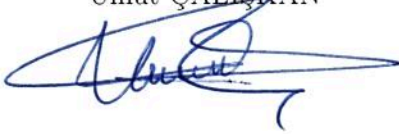
Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Umut ÇALIŞKAN



“Kompozit Sandviç Kirişlerin Eğilme Darbe Davranışının İncelenmesi”
adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma
Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan
Umut ÇALIŞKAN



Danışman
Prof. Dr. Mustafa Kemal APALAK



Makina Mühendisliği ABD Başkanı
Prof. Dr. Necdet ALTUNTOP

Prof. Dr. Mustafa Kemal APALAK danışmanlığında Umut ÇALIŞKAN tarafından hazırlanan “Kompozit Sandviç Kirişlerin Eğilme Darbe Davranışının İncelenmesi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

16. / 03 / 2018

JÜRİ :

Danışman : Prof. Dr. Mustafa Kemal APALAK

Üye : Prof. Dr. Ahmet AVCI

Üye : Prof. Dr. Ömer EYERCİOĞLU

Üye : Prof. Dr. Recep GÜNEŞ

Üye : Doç. Dr. Fehmi NAİR

ONAY :

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 20/03/2018 tarih ve 2018/13-01 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Mehmet Akkurt
Prof.Dr. Mehmet AKKURT
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR

"Kompozit sandviç kirişlerin eğilme darbe davranışının incelenmesi" başlıklı tez çalışmasının seçiminde, yürütülmesinde, sonuçlandırılmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde maddi ve manevi destek ve yardımlarını esirgemeyen, akademik hayatımın bu en önemli adımlarının bir tanesinde tecrübelerini benimle paylaşan, ahlaki değerleri öğreten çok değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Mustafa Kemal APALAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca yardımlarını maddi manevi esirgemeyen, bilgilerini paylaşan, yol gösteren değerli hocalarım Prof. Dr. Recep GÜNEŞ ve Doç. Dr. Fehmi NAİR'e çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında ve akademik hayatımın ilerlemesinde yardımlarını esirgemeyen, bilgilerini benimle paylaşan, sabır ve anlayış gösteren çok değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Doğan ERDEMİR'e, Arş. Gör. Orhan KEKLİKÇİOĞLU'na, Arş. Gör. Toygun DAĞDEVİR'e ve Arş. Gör. Mevlüt HAKAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatım boyunca her türlü maddi ve manevi destek, göstermiş olduğu hoş görüden dolayı teyzem Gülcan ALAY'a, her attığım adımda yanımda olan, destek olan ve varlığı ile bana güç veren kardeşim ve eşi, Onur ve Ayla Hilal ÇALIŞKAN'a, her daim yanımda olan, bugüne kadar bana verdikleri maddi ve manevi destekleri asla eksik olmayan, bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan aileme, annem, Semiha ÇALIŞKAN'a, babam, Bülent ÇALIŞKAN'a ve kardeşim, Çağlagül ÇALIŞKAN'a, göstermiş olduğu sabır ve anlayış, bana verdiği destek, iyi ve kötü günde yanımda olan çok değerli eşim, hayat arkadaşım, Özge ÇALIŞKAN'a ve varlığı ile ailemize güç veren, dünyaya gelecek olan oğlum, Ege ÇALIŞKAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım."

Umut ÇALIŞKAN
Mart 2018, KAYSERİ

KOMPOZİT SANDVIÇ KİRİŞLERİN EĞİLME DARBE DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Umut ÇALIŞKAN

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi, Mart 2018

Tez Danışman : Prof. Dr. Mustafa Kemal APALAK

ÖZET

Kullanım amacına ve uygulama yerine göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir ve mühendislikte mekanik uygulamalarda, dışarıdan gelecek bir darbeye karşı istenmeyen sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin gösterebileceği en uygun davranışı göstermesi istenir. Metallerin darbe davranışı elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir. Metallerde darbe hasarı genellikle çarpma yüzeyinde gelişir ve başladığı anda kolay bir şekilde tespit edilebilir. Kompozit malzemelerde ise bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpma türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir, iç yapıda oluşan tabakalar arası ayrılma şeklinde başlayabilir. Bir kompozit plakanın darbe sonrası nasıl bir deformasyona maruz kaldığı ve bu deformasyon sonucu plakada oluşabilecek hasarların bilinmesi önem arz etmektedir. Eğer darbe sonrası plaka üzerinde oluşabilecek hasarlar biliniyorsa toplam bağlantının tamamen hasara uğramadan gerekli önlemler alınabilir. Parça üzerine yama gerektiriyorsa yama yapılabilir, değiştirilmesi gerekiyorsa değişim talep edilebilir. Bu tez çalışmasının amacı, kompozit sandviç kirişlerin farklı darbe enerjileri altındaki davranışını incelemek, kompozit sandviç kirişleri oluşturan elemanların bireysel davranışlarını ayrı ayrı irdelemektir. Sandviç yapılar birden fazla malzemenin bir araya gelmesi ile oluştuğu için darbe davranışına her bir malzemenin etkisinin araştırılması gerekmektedir. Sandviç yapılarda istenilen en uygun tasarım düşük maliyet ve yüksek eğilme rijitliğinin elde edilmesidir.

Bu tez çalışmasında, kompozit sandviç kirişlerin düşük hızlı darbe davranışı üç boyutlu sonlu elemanlar metodu kullanılarak modellenmiş ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Öncelikli olarak kompozit sandviç kirişlerin darbe davranışlarının incelenmesinde kullanılan yöntemler araştırılmış ve açıklanmıştır. Yapılan ön

çalışmalarda kullanılan yöntemler doğrulanmıştır. Kompozit sandviç kirişlerin düşük hızlı eğilme darbe davranışı, farklı yüzey plakası malzemesi, kompozit yüzey plakasının farklı fiber açıları, farklı yüzey plakası kalınlıkları, köpük çekirdeğin farklı yoğunluk ve kalınlıkları, farklı darbe enerjileri ve sanki-statik eğilme testi dikkate alınarak incelenmiştir. Fiber takviyeli kompozitler kullanılan üç boyutlu sonlu elemanlar yazılımına uygun kullanıcı tanımlı malzeme modeli (VUMAT) kullanılarak modellenmiştir. Üç boyutlu hasar kriterleri dikkate alınmış ve hasarlar, altı farklı hasar kriteri, çekme altında fiber ve matris, basma altında fiber ve matris, kayma ve delaminasyon hasarı, ile kontrol edilmiştir. Plakalar ve köpük malzemesi arasındaki yapıştırıcı katmanı dikkate alınmış ve kohezif bölge modeli kullanılarak modellenmiştir. Ceast marka Fractovis Plus test cihazında darbe testleri yapılmış ve sayısal sonuçlar ile deneysel veriler mukayese edilmiştir. Darbe testleri sonrasında sandviç kirişlerin statik yükler altındaki davranışı da araştırılmıştır.

Kompozit sandviç kirişlerin düşük hızlı darbe davranışları, temas kuvveti, kinetik enerji ve temas kuvveti-yer değiştirme değişimi açısından incelenmiştir. Sandviç kirişlerin darbe sonrası görüntüleri, kompozit tabakalarda meydana gelen hasar bölgeleri ve alanları, dabre sonrası numunelerin Mikro-Ct tarama ile üç eksendeki kesit görüntüleri, element analizi ile her bir malzemedeki iç hasarlar araştırılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasında iyi bir uyum yakalanmıştır. En yüksek temas kuvvetleri, yüzey malzemesi karbon fiber takviyeli kompozit kirişlerde, yüksek plaka kalınlığına sahip sandviç kirişlerde, yüksek köpük yoğunluğuna ve kalınlığına sahip sandviç kirişlerde meydana gelmiştir. Köpük yoğunluğunun ve kalınlığının artışı hasar alanları azalmıştır. Fiber açısı değişimi darbe davranışına etki eden birincil parametredir. 45° ve 90° fiber açısına sahip kirişlerde hasarlar ve kırılmalar meydana gelmiştir. Darbe sonrası numunelerin Mikro-Ct analizleri, kompozit sandviç kirişlerin darbe bölgelerinin üç eksendeki kesit görüntülerini vermiştir. Kompozitlerin hasar gelişimi incelenmiştir. Artan darbe enerjileri daha fazla hasara neden olmuştur. Düşük şekil değiştirme hızı altında kompozit sandviç kirişlere eğilme testi yapılmıştır. Hasar mekanizmasının ve eğilme davranışının tamamen değiştiği görölmüştür. Bu sayede darbe davranışına etki eden tüm tesirler incelenmiştir. Statik yük altında eğilme maruz kalan sandviç kiriş daha büyük temas kuvveti vermiştir. En

yüksek ve en düşük dayanıma sahip sandviç kiriş geometrileri oluşturularak kirişlerin statik yük altındaki taşıyabileceği yükün sınırları belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit sandviç kirişler, fiber takviyeli tabakalı kompozit plakalar, yapıştırıcı, polimer esaslı köpük malzemesi, düşük hızlı darbe, Mikro-Ct tarama, lineer olmayan sonlu elemanlar metodu, üç boyutlu hasar kriterleri, kohezif bölge modeli.



BENDING IMPACT BEHAVIOR OF COMPOSITE SANDWICH BEAMS

Umut ÇALIŞKAN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Ph.D. Thesis, March 2018

Thesis Supervisor: Prof.Dr. Mustafa Kemal APALAK

ABSTRACT

Impact response of material may depend on its application area and use-purpose. In order to avoid the unstable responses of material due to any external effect, an optimal response from the material is requested. Materials deform elastically and plastically under an impact load in a short period. Impact mechanism develops strongly with surface conditions, and becomes more apparent on impacted surface whereas damage may initiate inside composite materials, such as along interfaces between layers rather than on the impacted surfaces of composite material. It is important to know how a composite plate undergoes a deformation mechanism after impact and the damage mechanism that may occur in deformed composite plate. If the damage is known in the plate after the impact, necessary measurements can be taken such that the all joint can not be damaged. After damage a patch or a replacement can be required out the joint. This thesis aims to investigate the damage behavior of composite sandwich beams under different impact energies. Since sandwich structures are formed by a combination of more than one material, the effect of each material on impact behavior should be investigated individually. The most optimum design desired in sandwich constructions is such that a low cost and high bending stiffness can be achieved.

In this thesis, the low speed impact behavior of composite sandwich beams is modeled using three dimensional dynamic finite element method and the predicted results are proved by experimental results. Firstly, the methods used to investigate the impact behavior of composite sandwich beams were discussed. The methods used in the preliminary studies were also verified. The low-speed bending impact behaviors of composite sandwich beams were investigated for different skin-plate materials, different fiber angles of the composite skin plate, different skin plate

thicknesses, different density and thicknesses of the foam core, different impact energies and different deformation rates. The fiber reinforced composite plates were modeled using the user-defined material model (VUMAT) embedded into the three-dimensional finite element software (ABAQUS®). Three dimensional damage criteria were implemented and the damage at each integration point was monitored based on six different damage criteria, fiber and matrix under tension, fiber and matrix under compression, shear and delamination damage. An adhesive layer between two skin plates and a foam-core was considered and modeled using the cohesive zone model. The quasi-static behavior of sandwich beams was also investigated in order to show the inertial effects.

The low-speed impact behaviors of composite sandwich beams were investigated in terms of contact force, kinetic energy and contact force-displacement change. The after-impact images of the sandwich beams, damage zones and areas in the composite laminates, the cross-sectional views of the deformed samples via Micro-Ct scanning with three axes, and elemental analysis of the internal damage of each material were investigated. A good agreement was obtained between experimental and predicted results. The higher contact forces appeared in the sandwich beams with high foam density and thickness, as well as in sandwich beams with thicker skin plates. Increasing foam density and thickness reduced the damage areas. The fiber angle was a primary parameter affecting impact behavior. The beams with fiber angles of 45° and 90° were damaged and broken. The detailed Micro-Ct analyses of after-impact samples allowed us to analyze three axial cross-sectional views of impacted zones of composite sandwich beams. The damage propagation in composite beams was investigated. A higher impact energy caused damage areas to increase. The composite sandwich beams were subjected to a bending static test under a very low strain rate. The damage mechanism and bending behavior were completely changed. The effects of all parameters on impact behavior were examined. The sandwich beams subjected to a static bending load resulted in higher contact force. The sandwich beams having considering lowest and highest strength were determined based on both static and dynamic bending loads.

Keywords: Composite sandwich beams, fiber reinforced laminated composite skin

plates, adhesive, polymer foams, low velocity impact, Micro-Ct test, non-linear finite element method, 3D damage criterion, cohesive zone model.



İÇİNDEKİLER

KOMPOZİT SANDVIÇ KİRİŞLERİN EĞİLME DARBE DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK SAYFASI	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI	ii
KABUL VE ONAY	iii
TEŞEKKÜR	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	viii
İÇİNDEKİLER	xi
TABLolar LİSTESİ	xiv
ŞEKİLLER LİSTESİ	xv

GİRİŞ	1
------------------------	----------

1. BÖLÜM GENEL BİLGİLER

1.1. Tezin Konusu ve İçeriği	12
1.2. Literatür Araştırması	13

2. BÖLÜM DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEM

2.1. Deneysel Yöntem	31
2.1.1. Kompozit Plakaların Üretilmesi ve Numune Hazırlama	32
2.1.1.1. Vakum İnfüzyon Yöntemi ve Plaka Üretimi	33
2.1.1.2. Numune Hazırlama	37
2.1.2. Düşük Hızlı Darbe Testleri	40
2.1.3. Düşük Hızlı Darbe Testleri Sonrası Mikro-Ct Analizleri	41

2.2. Sayısal Yöntem	43
2.2.1. Kompozit Plakaların Modellenmesi	44
2.2.1.1. Bir Tabakanın Mikro Mekanik Analizi	44
2.2.1.2. Bir Tabakanın Makro Mekanik Analizi	51
2.2.1.3. Hasar Kriterleri	59
2.2.2. PVC Köpük Malzemesinin Modellenmesi	64
2.2.3. Yapıştırıcı Bölgesinin Modellenmesi	67
2.2.4. Teorik Model	70
2.2.4.1. Hasar Kriterlerinin Modele Aktarılması	74
2.2.4.2. Bozunum Kuralı (Degredation Rule)	76
2.2.5. Düşük Hızlı Darbe Analizleri	77

3. BÖLÜM ÖN ÇALIŞMALAR

3.1. Giriş	79
3.2. Sonuçlar	79

4. BÖLÜM YÜZEY PLAKA MALZEMESİNİN ETKİSİ

4.1. Giriş	99
4.2. Yüzey Plakası Malzemesi Etkisi	99
4.3. Yüzey Plakası Kalınlığı Etkisi	113

5. BÖLÜM FİBER AÇISININ ETKİSİ

5.1. Giriş	132
5.2. Sonuçlar	132

6. BÖLÜM ÇEKİRDEK MALZEMESİNİN ETKİSİ

6.1. Giriş	156
6.2. Köpük Yoğunluğu Etkisi	156
6.3. Köpük Kalınlığı Etkisi	179

7. BÖLÜM SANKİ-STATİK YÜK ALTINDA EĞİLME DAVRANIŞI

7.1. Giriş 194

7.2. Sonuçlar 194

8. BÖLÜM

TARTIŞMA SONUÇ ve ÖNERİLER

8.1. Sonuç ve Yorumlar 202

KAYNAKÇA 211

ÖZGEÇMİŞ 219



TABLULAR LİSTESİ

Tablo 1.	Sandviç yapıların verimliliği	3
Tablo 2.1.	Seçilen fiber malzemesinin teknik özellikleri	36
Tablo 2.2.	Kompozit sandviç kirişlerin darbe enerji seviyeleri	41
Tablo 2.3.	PVC köpük malzemelerinin mekanik özellikleri.	71
Tablo 2.4.	Araldite® 2015'in kohezif parametreleri ve mekanik özellikleri . .	72
Tablo 2.5.	Karbon fiber/epoksi kompozit tabakanın mekanik özellikleri . . .	74
Tablo 2.6.	Kompozit plakalar için hasar kriterleri [64]	75
Tablo 2.7.	Karbon fiber/epoksi kompozit plaka için mikro-mekanik özellikler	75
Tablo 2.8.	Hasara uğrayan malzeme özellikleri için bozunum kuralı	76

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil G.1.	Sandviç kiriş ve geometrik tasarım parametreleri	1
Şekil G.2.	Sandviç paneller (a) kıvrımlı, (b) köpük (c) bal peteği	2
Şekil G.3.	Çekirdek malzemeleri için maliyet-performans grafiği (PS:polisitren, PU:poliüretan, PP:polipropilen, PMI:Polimetakrilimid)	3
Şekil G.4.	Uygulamalarda kullanılan yapıştırıcı bağlantı tipleri	4
Şekil G.5.	Metal matrisli kompozitlerin sınıflandırılması	6
Şekil G.6.	Fiber takviyeli kompozit malzemedeki laminalar	8
Şekil G.7.	Darbeden dolayı oluşan ayrılmalar ve matris hasarı	9
Şekil 2.1.	Ceast marka Fractovis Plus düşük hızlı darbe test cihazı	32
Şekil 2.2.	MTS üniversal test cihazı	33
Şekil 2.3.	Bruker Skyscan marka mikro-Ct test cihazı	33
Şekil 2.4.	Vakum infüzyon yönteminde kullanılan elemanlar ve sistemin şematik görünümü.	35
Şekil 2.5.	Kompozit plakaların numune boyutlarına getirilmesi ve çalışmada kullanılan yüzey malzemeleri	36
Şekil 2.6.	Çalışmada kullanılan köpük malzemeleri	38
Şekil 2.7.	Deney numunesi üretim aşamaları	39
Şekil 2.8.	(a) Numunelerin düşük hızlı darbe test cihazı ve (b) çekme-basma test cihazına bağlanması	41
Şekil 2.9.	Sandviç kirişin Mikro-Ct analizleri yapılan bölgesi ve analiz eksenleri	42
Şekil 2.10.	Numunenin Bruker Skyscan Mikro-Ct cihazına bağlanması ve analizi	42

Şekil 2.11.	Bruker Skyscan Mikro-Ct yazılımları ile kesit görüntülerinin alınması, üç boyutlu modelin oluşturulması ve element analizi ile yapıştırıcı katmanlarının görüntülenmesi	43
Şekil 2.12.	Fiber doğrultusu yönünde gerilme durumu	45
Şekil 2.13.	Fiber doğrultusuna dik yöndeki gerilme durumu	48
Şekil 2.14.	Kompozit parçanın kayma gerilmesi altındaki durumu	50
Şekil 2.15.	Tek eksenli gerilme hali	54
Şekil 2.16.	Tam kayma hali	55
Şekil 2.17.	Tek eksenli gerilme hali (yandan görünüş)	58
Şekil 2.18.	Lineer Kohezif Bölge Modeli kuralı, üçgensel şekil	68
Şekil 2.19.	Çekme altındaki d_n hasar değişkeninin tanımı	69
Şekil 2.20.	Teorik model ve geometrik boyutları	70
Şekil 2.21.	Sandviç yapıyı oluşturan metal, yapıştırıcı ve köpük malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme diyagramları.	71
Şekil 2.22.	Sandviç kirişin ağ yapısı	73
Şekil 2.23.	Bozunum kuralının sonlu elemanlar modeline uygulanması	77
Şekil 2.24.	Deney numunelerinin isim kısaltmalarının açıklanması	78
Şekil 3.1.	Sayısal modelin doğrulanması için kullanılan tek yönlü (fiber açısı= 0°), 8 tabaka, 2 mm karbon fiber takviyeli kompozit plaka modeli.	80
Şekil 3.2.	Fiber takviyeli kompozit plakaların (tek yönlü, 8 tabaka, 2 mm) temas kuvveti ve kinetik enerji değişimlerinde kabuk ve katı elemanların başarımı.	81
Şekil 3.3.	Hasar indeksi seviye çubuğu.	82
Şekil 3.4.	Çekme kriterlerine göre hasar bölgelerinin tahmininde eleman tipinin tesiri (kabuk, katı eleman, $E=5 \text{ J}$, $\theta= 0^\circ$).	83

Şekil 3.5.	Basma kriterlerine göre hasar bölgelerinin tahmininde eleman tipinin tesiri (kabuk, katı eleman, $E=5 \text{ J}$, $\theta=0^\circ$)	85
Şekil 3.6.	Çekme kriterlerine göre hasar bölgelerinin tahmininde eleman tipinin tesiri (kabuk, katı eleman, $E=20 \text{ J}$, $\theta=0^\circ$)	86
Şekil 3.7.	Basma kriterlerine göre hasar bölgelerinin tahmininde eleman tipinin tesiri (kabuk, katı eleman, $E=20 \text{ J}$, $\theta=0^\circ$).	87
Şekil 3.8.	Fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjileri altındaki temas kuvveti ve kinetik enerji değişiminde kabuk eleman, katı eleman ve bozunum modelinin etkisi.	88
Şekil 3.9.	Sandviç kirişlerin kompozit tabakalarında kabuk ve katı elemanlar ile fiber ve matris çekme hasar kriterlerine göre oluşan hasar bölgeleri ve alanları ($E=5 \text{ J}$, $\theta=0^\circ$).	92
Şekil 3.10.	Sandviç kirişlerin kompozit tabakalarında kabuk ve katı elemanlar ile fiber ve matris basma hasar kriterlerine göre oluşan hasar bölgeleri ve alanları ($E=5 \text{ J}$, $\theta=0^\circ$).	93
Şekil 3.11.	Sandviç kirişlerin kompozit tabakalarında kabuk ve katı elemanlar ile fiber ve matris çekme hasar kriterlerine göre oluşan hasar bölgeleri ve alanları ($E=20 \text{ J}$, $\theta=0^\circ$).	94
Şekil 3.12.	Sandviç kirişlerin kompozit tabakalarında kabuk ve katı elemanlar ile fiber ve matris basma hasar kriterine göre oluşan hasar bölgeleri ve alanları ($E=20 \text{ J}$, $\theta=0^\circ$).	95
Şekil 3.13.	Sandviç kirişlerin kompozit tabakalarında katı elemanlar ile delaminasyon ve kayma hasar kriterine göre oluşan hasar bölgeleri ve alanları ($E=5$ ve 20 J , $\theta=0^\circ$).	96
Şekil 3.14.	Yapıştırıcı tabakasında hasar bölgeleri ($E=5$ ve 20 J).	97
Şekil 4.1.	Yüzey malzemeleri tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber/epoksi ve alüminyum olan kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerji seviyelerinde temas kuvveti-zaman değişimleri.	100
Şekil 4.2.	Yüzey malzemeleri tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber/epoksi ve alüminyum olan kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde kinetik enerji-zaman değişimleri.	101

- Şekil 4.3. Yüzey malzemeleri tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber/epoksi ve alüminyum olan kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde temas kuvveti-yer değiştirme değişimleri. 102
- Şekil 4.4. Yüzey malzemesi tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber/epoksi kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde darbe sonrası deneysel ve hesaplanmış görüntüleri(PVC80T10CF0). . . . 104
- Şekil 4.5. Yüzey malzemesi alüminyum olan sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde darbe sonrası deneysel ve hesaplanmış görüntüleri(PVC80T10AL). 105
- Şekil 4.6. Tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber/epoksi kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında oluşan fiber ve matris çekme hasar bölgeleri(E= 5 J). 106
- Şekil 4.7. Tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber/epoksi kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında oluşan fiber ve matris çekme hasar bölgeleri(E= 20 J). 107
- Şekil 4.8. Tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber/epoksi kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) hasar bölgeleri(E=5 ve 20 J). 108
- Şekil 4.9. Tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber/epoksi kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası fiber çekme, matris çekme ve delaminasyon hasar alanlarının tabaka kalınlıkları boyunca değişimi (E= 5 ve 20 J). 109
- Şekil 4.10. Tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber/epoksi kompozit ve metal plaka olan kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası yapıştırıcı tabakalarında oluşan hasar bölgeleri (E= 5 ve 20 J). 110
- Şekil 4.11. Tek yönlü karbon fiber/epoksi ($\theta=0^\circ$) kompozit sandviç kirişin darbe sonrası Mikro-Ct analizi, alt ve üst yapıştırıcı tabakalarının ve orta bölge kesit görüntüleri (E= 20 J). 112
- Şekil 4.12. 1 ve 2 mm kalınlıklı tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde temas kuvveti-zaman değişimleri. 113

- Şekil 4.13. 1 ve 2 mm kalınlıklı tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde kinetik enerjisi-zaman değişimleri. 114
- Şekil 4.14. 1 ve 2 mm kalınlıklı tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde temas kuvveti-yer değiştirme değişimleri. 115
- Şekil 4.15. 1 mm kalınlıklı tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde sayısal ve deneysel darbe testi sonrası görüntüleri. 117
- Şekil 4.16. 2 mm kalınlıklı tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde sayısal ve deneysel darbe testi sonrası görüntüleri. 118
- Şekil 4.17. Plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5 J'lük darbe enerjisinde kompozit tabakalarda fiber çekme hasar kriterine göre tespit edilen hasar bölgeleri ve alanları. 120
- Şekil 4.18. Plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5 J'lük darbe enerjisinde kompozit tabakalarda matris çekme hasar kriterine göre tespit edilen hasar bölgeleri ve alanları. 121
- Şekil 4.19. Plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5 J'lük darbe enerjisinde kompozit tabakalarda delaminasyon hasar kriterine göre tespit edilen hasar bölgeleri ve alanları. 122
- Şekil 4.20. Plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 20 J'lük darbe enerjisinde kompozit tabakalarda fiber çekme hasar kriterine göre tespit edilen hasar bölgeleri ve alanları. 124
- Şekil 4.21. Plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 20 J'lük darbe enerjisinde kompozit tabakalarında matris çekme hasar kriterine göretespit edilen hasar bölgeleri ve alanları. 125

- Şekil 4.22. Plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 20 J'lük darbe enerjisinde kompozit tabakalarında delaminasyon hasar kriterine göre tespit edilen hasar bölgeleri ve alanları. 126
- Şekil 4.23. Plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5 ve 20 J darbe enerjilerinde fiber çekme, matris çekme ve delaminasyon hasarı alanlarının kalınlık boyunca değişimi. 127
- Şekil 4.24. Plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5 ve 20 J darbe enerjilerinde yapıştırıcı tabakalarında oluşan hasar bölgeleri. . . . 128
- Şekil 4.25. Plaka kalınlığı 1 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber/epoksi kompozit sandviç kirişin darbe sonrası Mikro-Ct analizi, alt ve üst yapıştırıcı tabakalarının ve orta bölge kesit görüntüleri (E=20 J). 129
- Şekil 4.26. Plaka kalınlığı 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber/epoksi kompozit sandviç kirişin darbe sonrası Mikro-Ct analizi, alt ve üst yapıştırıcı tabakaları ve orta bölge kesit görüntüleri (E=20 J). 130
- Şekil 5.1. Fiber açısı 0°, 45°ve 90°olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J'lük darbe enerjilerinde temas kuvveti-zaman değişimleri. 133
- Şekil 5.2. Fiber açısı 0°, 45°ve 90°olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J'lük darbe enerjilerinde kinetik enerji-zaman değişimleri. 135
- Şekil 5.3. Fiber açısı 0°, 45°ve 90°olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J'lük darbe enerjilerinde temas kuvveti-yer değiştirme değişimleri. 136
- Şekil 5.4. Fiber açısı 0°olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde darbe sonrası sayısal ve deneysel görüntüleri. 138

- Şekil 5.5. Fiber açısı 45° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde darbe sonrası sayısal ve deneysel görüntüleri. 139
- Şekil 5.6. Fiber açısı 90° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde darbe sonrası sayısal ve deneysel görüntüleri. 140
- Şekil 5.7. 5 J darbe enerjisinde fiber açısı 0° , 45° ve 90° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında fiber çekme hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları. 142
- Şekil 5.8. 5 J darbe enerjisinde fiber açısı 0° , 45° ve 90° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında matris çekme hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları. 143
- Şekil 5.9. 5 J darbe enerjisinde fiber açısı 0° , 45° ve 90° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında delaminasyon hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları. 144
- Şekil 5.10. 20 J darbe enerjisinde 0° , 45° ve 90° fiber açılı karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında fiber çekme hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları. 146
- Şekil 5.11. 20 J darbe enerjisinde 0° , 45° ve 90° fiber açılı karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında matris çekme hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları. 147
- Şekil 5.12. 20 J darbe enerjisinde 0° , 45° ve 90° fiber açılı karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında delaminasyon hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları. 148

- Şekil 5.13. 5 ve 20 J darbe enerjilerinde 0°, 45° ve 90° fiber açılı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası fiber çekme, matris çekme ve delaminasyon hasar kriterine göre belirlenen hasar alanlarının kalınlık boyunca değişimi. 149
- Şekil 5.14. 5 ve 20 J'lük darbe enerjilerinde 0°, 45° ve 90° fiber açılı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası yapıştırıcı tabakalarında oluşan hasar bölgeleri. 150
- Şekil 5.15. Fiber açısı 0° olan karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişin 20 J darbe enerjisinde darbe sonrası Mikro-Ct analizi, yapıştırıcı tabakaların ve orta bölgede kesitlerin görüntüleri. 152
- Şekil 5.16. Fiber açısı 45° olan karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişin 20 J darbe enerjisinde darbe sonrası Mikro-Ct analizi, yapıştırıcı tabakaların ve orta bölgede kesitlerin görüntüleri. 153
- Şekil 5.17. Fiber açısı 90° olan karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişin 20 J darbe enerjisinde darbe sonrası Mikro-Ct analizi, yapıştırıcı tabakaların ve orta bölgede kesitlerin görüntüleri. 154
- Şekil 6.1. 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m³ olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin deneysel ve sayısal temas kuvveti-zaman değişimleri. . . 157
- Şekil 6.2. 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m³ olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin sayısal ve deneysel kinetik enerji-zaman değişimleri. . . . 158
- Şekil 6.3. 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m³ olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin sayısal ve deneysel temas kuvveti-yer değiştirme değişimleri. 159
- Şekil 6.4. Köpük yoğunluğu 60 kg/m³ olan fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde deneysel ve sayısal darbe sonrası görüntüleri. 162
- Şekil 6.5. Köpük yoğunluğu 80 kg/m³ olan fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde deneysel ve sayısal darbe sonrası görüntüleri. 163

- Şekil 6.6. Köpük yoğunluğu 130 kg/m^3 olan fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde deneysel ve sayısal darbe sonrası görüntüleri. 164
- Şekil 6.7. Köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m^3 olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında fiber çekme hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları($E=5 \text{ J}$). 166
- Şekil 6.8. Köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m^3 olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında matris çekme hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları($E=5 \text{ J}$). 167
- Şekil 6.9. Köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m^3 olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında delaminasyon hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları($E= 5\text{J}$). 168
- Şekil 6.10. Köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m^3 olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında fiber çekme hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları($E=20 \text{ J}$). 170
- Şekil 6.11. Köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m^3 olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında matris çekme hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları($E=20 \text{ J}$). 171
- Şekil 6.12. Köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m^3 olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında delaminasyon hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları($E= 20 \text{ J}$). 172
- Şekil 6.13. Köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m^3 olan kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası fiber çekme, matris çekme ve delaminasyon hasar kriterlerine göre hasar alanlarının kalınlık boyunca değişimleri($E=5$ ve 20 J). 173

- Şekil 6.14. Köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m³ olan kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası alt ve üst yapıştırıcı tabakalarında hasar bölgeleri (E=5 ve 20 J). 174
- Şekil 6.15. Köpük yoğunluğu 60 kg/m³ olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişin darbe sonrası Mikro-Ct analizi, alt ve üst yapıştırıcı tabakaları ve orta bölge kesit görüntüleri. 176
- Şekil 6.16. Köpük yoğunluğu 80 kg/m³ olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişin darbe sonrası Mikro-Ct analizi, alt ve üst yapıştırıcı tabakaları ve orta bölge kesit görüntüleri(E= 20 J). 177
- Şekil 6.17. Köpük yoğunluğu 80 kg/m³ olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişin darbe sonrası Mikro-Ct analizi,alt ve üst yapıştırıcı tabakaları ve orta bölge kesit görüntüleri(E= 20 J). . . 178
- Şekil 6.18. Köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde sayısal ve deneysel temas kuvveti-zaman değişimleri. 179
- Şekil 6.19. Köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde sayısal ve deneysel kinetik enerji-zaman değişimleri. 180
- Şekil 6.20. Köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde sayısal ve deneysel temas kuvveti-yer değiştirmesi değişimleri. 181
- Şekil 6.21. Köpük kalınlığı 10 mm olan fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde deneysel ve sayısal darbe sonrası görüntüleri. 182
- Şekil 6.22. Köpük kalınlığı 20 mm olan fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde deneysel ve sayısal darbe sonrası görüntüleri. 183
- Şekil 6.23. Köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası alt ve üst kompozit plakalarının tabakalarında fiber ve matris çekme hasar kriterlerine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları (E=5 J). 186

- Şekil 6.24. Köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası alt ve üst kompozit plakalarının tabakalarında fiber ve matris çekme hasar kriterlerine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları (E=5 J). 187
- Şekil 6.25. Köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası alt ve üst kompozit plakalarının tabakalarında delaminasyon hasar kriterlerine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları (E=5 J). 188
- Şekil 6.26. 5 ve 20 J darbe enerjilerinde köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası fiber çekme, matris çekme ve delaminasyon hasar kriterlerine göre belirlenen hasar alanlarının kalınlık boyunca değişimleri. 189
- Şekil 6.27. Köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası alt ve üst yapıştırıcı tabakalarında 5 ve 20 J darbe enerjilerinde oluşan hasar bölgeleri. 190
- Şekil 6.28. Köpük kalınlığı 10 mm olan kompozit sandviç kirişin 20 J darbe enerjisinde darbe sonrası Mikro-Ct analizi, alt ve üst yapıştırıcı tabakaları ve orta bölge kesit görüntüleri. 191
- Şekil 6.29. Köpük kalınlığı 20 mm olan kompozit sandviç kirişin 20 J darbe enerjisinde darbe sonrası Mikro-Ct analizi, alt ve üst yapıştırıcı tabakaları ve orta bölge kesit görüntüleri. 192
- Şekil 7.1. Dayanımı düşük ve yüksek olan fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin sanki-statik yük altındaki kuvvet-yer değiştirme değişimleri ve test sonrası görüntüleri. 195
- Şekil 7.2. Plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin sanki-statik yük altında kuvvet-yer değiştirme değişimleri ve test sonrası görüntüleri. 196
- Şekil 7.3. Fiber açısı 0°, 45° ve 90° olan fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin sanki-statik yük altındaki kuvvet-yer değiştirme değişimleri ve test sonrası görüntüleri. 197

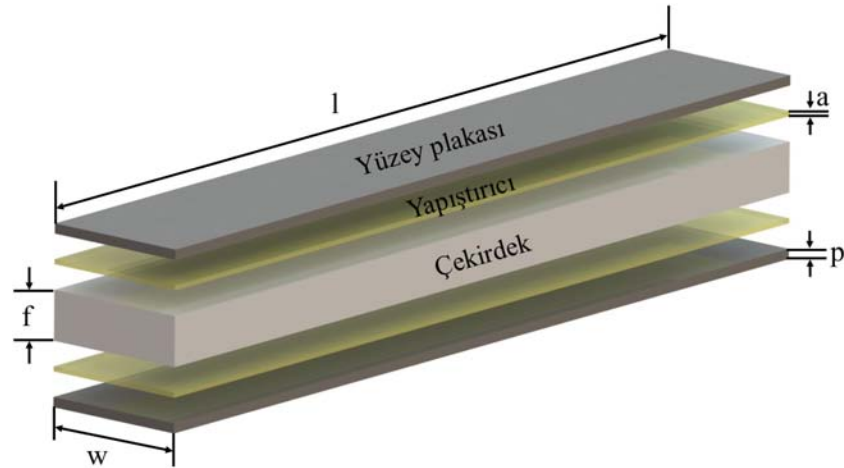
- Şekil 7.4. Fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin sanki-statik ve dinamik yük altındaki kuvvet-yer değiştirme değişimleri ve test sonrası görüntüleri. 198
- Şekil 7.5. Fiber takviyeli kompozit sandviç kirişin 20 J darbe enerjisinde darbe sonrası Mikro-Ct analizi, alt ve üst yapıştırıcı katmanları ve orta bölge kesit görüntüleri. 199
- Şekil 7.6. Fiber takviyeli kompozit sandviç kirişin sanki-statik yük altındaki test sonrası Mikro-Ct analizi, alt ve üst yapıştırıcı tabakaları ve orta bölge kesit görüntüleri. 200



GİRİŞ

Sandviç yapılar, farklı özelliklerinden dolayı (düşük ağırlık, yüksek enerji sönümleme kapasitesi, ağırlık oranlarına karşı yüksek sağlamlık ve mukavemet, mükemmel ısı yalıtımı, akustik sönümleme, yangın geciktirme, üretim kolaylığı ve onarım) ulaşım mühendisliğinde (havacılık, denizcilik, otomobil, gemi inşa endüstrisi) kullanım için büyük potansiyel sunmaktadır [1]. Hafif yapılar ailesindeki bir üye olan sandviç kirişler ve kiriş elemanları mühendislik uygulamalarında ilgi görmektedirler. Sandviç yapılar, uçak, uzay aracı, taşıt vb. gibi bir çok kritik mühendislik uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Sandviç yapıların mekanik davranışı, çekirdeğin ve yüzey plakalarının geometrisine ve malzemenin özelliklerine bağlıdır [2].

Son zamanlardaki mühendislik uygulamalarında kompozit malzemelerin artan kullanımı, en verimli ürünlerin üretimini mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte, kompozit malzemelerdeki hasar hassasiyeti sorunları, kritik havacılık uygulamalarında güvenilirlik endişeleri yaratmaktadır. Havacılık yapılarının düzlem dışı yüklenmesi genellikle dış bölgelerinde yabancı cisimlerin dinamik çarpması şeklinde gerçekleşir. Kompozit malzemelere dinamik çarpma sonucu oluşan yüklemelerin etkisi, hasar mekanizmasının anlaşılması, geometrinin etkileri ve



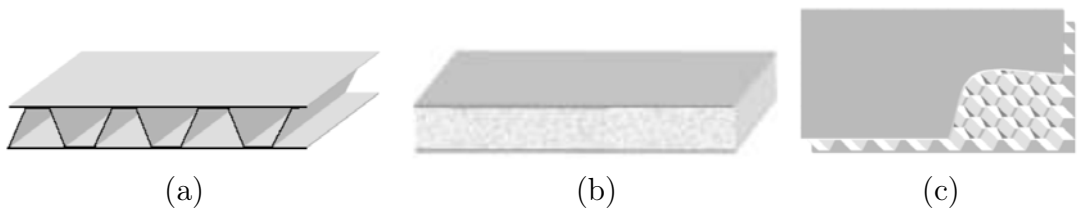
Şekil G.1. Sandviç kiriş ve geometrik tasarım parametreleri

yapıların hasar direncini arttırmak için etkileyen parametrelerinin anlaşılması açısından bir çok araştırmacı tarafından incelenmiştir [3].

Kompozit malzemeler kavramı halihazırda, doğadaki homojen olmayan malzemelerden esinlenir. Kemikler, deniz kabukları, bambu v.b. bu tip malzemelerin sayısız uygulamalarından sadece bir kaçıdır. Örneğin kemiğin yapısına dikkat edilirse dış kısmı sert ve yüksek mukavemetli, iç kısımlarda ise yumuşak ve dayanıklı süngerimsi bir yapıya sahiptir. Kemik hafif olmasına rağmen oldukça mukavemetlidir. Kompozit malzemeler sayesinde insanoğlu istenilen özellikte veya istenilen özelliğe yakın yapısal malzemeler elde etmiştir. Kompozit malzemeleri ön plana çıkartan diğer özellikler ise yüksek rijitlik, aşınma direnci, yalıtkanlık, ısıya dayanıklılık, yorulma ömrü hafiflik v.b. dir.


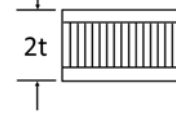
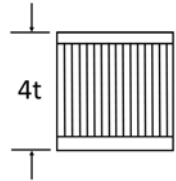
İçerideki çekirdek malzemenin temel görevi dış yüzeyler arasındaki mesafeyi muhafaza etmektir; çünkü bu mesafe sandviç malzemenin kesit alanına ait atalet momentinin ve de eğilme rijitliğinin yüksek olmasını sağlamaktadır. Şekil G.1'de yapıştırıcı ile birleştiren sandviç kiriş ve geometrik tasarım parametreleri gösterilirken, şekil G.2'de ise farklı çekirdek malzemelerine sahip sandviç yapılar gösterilmektedir. Uygun çekirdek ve yüzey plakaları seçerek katı malzemelere kıyasla daha verimli yapılar elde etmek mümkündür (Tablo 1) [4]. Çekirdek malzemeleri için maliyet-performans grafiği şekil G.3'de [4] gösterilmektedir.

Sandviç yapıların imalatında yapıştırıcı da önemli bir yere sahiptir. Yapıştırıcı (*adhesive*), ASTM tarafından "yüzey teması ile malzemeleri bir arada tutabilen madde" olarak tanımlanmaktadır [5]. Yapıştırıcılar havacılık, uzay, denizcilik ve otomotiv gibi endüstriyel bir çok alanda kullanılmaktadır. Yapıştırıcının bir başka tanımı ise, "yüzelelere uygulandığında onları bir arada tutabilen ve ayrılmayı önleyen polimerik malzemedir" şeklindedir. Endüstriyel birçok uygulamada yapıştırma

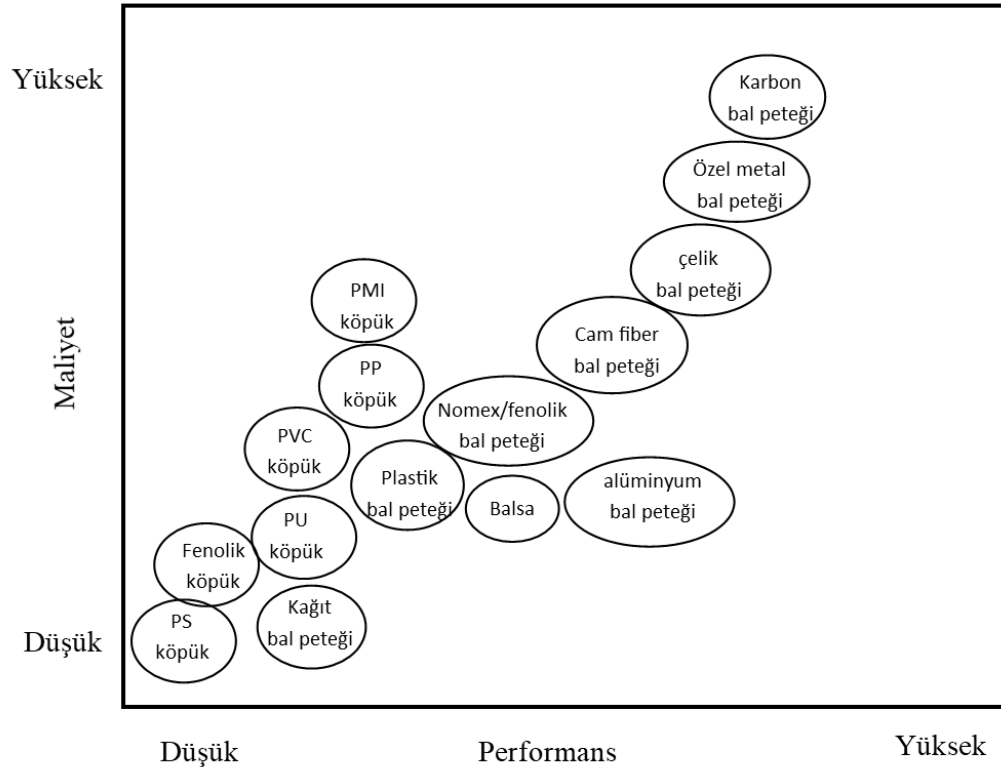


Şekil G.2. Sandviç paneller (a) kıvrımlı, (b) köpük (c) bal peteği

Tablo 1. Sandviç yapıların verimliliği

	katı malzeme	sandviç yapı	daha kalın sandviç yapı
			
Rijitlik	1.0	7.0	37.0
Eğilme mukavemeti	1.0	3.5	9.2
Ağırlık	1.0	1.03	1.06

ile gerçekleştirilmiş bağlantı görmek mümkündür. Uçak sanayi, otomotiv sanayi, marina, makine parçaları bunlara örnektir. Mekanik olarak birleştirilen bağlantılar ile karşılaştırıldıklarında yapıştırıcı ile birleştirmeli bağlantılar; yapıştırıcı bölgesi boyunca gerilmenin düzenli dağılımı, yapıştırıcı bölgesinde yük transferinin başarılı bir şekilde sağlanması, yorulmaya karşı mükemmel direnç, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yüksek sönüm kabiliyeti, geliştirilmiş hasar toleransı, korozyona karşı direnç, daha az gerilme yığılması kaynağı, daha üniform yük dağılımı, daha fazla tasarım esnekliği ve imalat kolaylığı, hafiflik, sızdırmazlık, korozyon direnci, ısı ve ses

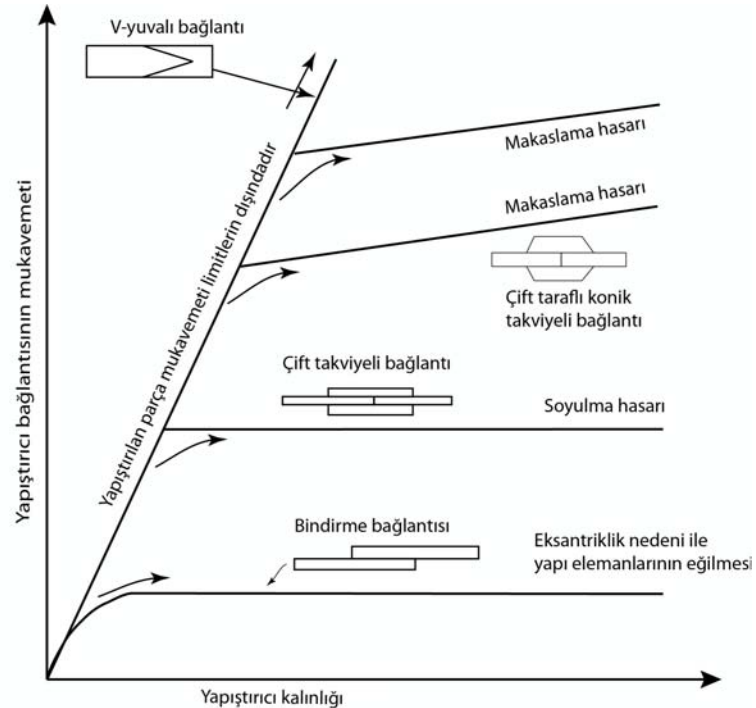


Şekil G.3. Çekirdek malzemeleri için maliyet-performans grafiği (PS:polisitren, PU:poliüretan, PP:polipropilen, PMI:Polimetakrilimid)

yalıtımı, sönümlenme ve mükemmel yorulma gibi özelliklere sahiptirler.

Yapıştırıcı ile birleştirme; mekanik bağlama, perçinleme ve kaynak gibi alışılmış metotlara tamamlayıcı olabilir ya da onların yerine kullanılabilir bir birleştirme tekniğidir. Uçak konstrüksiyonlarında ve ahşap yapılarda, yapıştırılmış yapıların mukavemeti ve gerilme değişimlerine olan dayanımı uzun yıllardan beri gösterilmiştir. Günümüzde polimerik ve kompozit malzemeler gibi farklı malzeme özelliklerine sahip yapısal bileşenler için de kullanılabilen tipik yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı çeşitleri ve yapıştırıcı kalınlığına göre mukavemet değişimi Şekil G.4'de gösterilmiştir. Kırılan ve kopan malzemeleri tekrar kullanabilmek için, mekanik birleştirme yöntemleri kullanılabilir. Ancak yapıştırıcılarla yapılan birleştirme daha kolay ve daha uzun ömürlüdür. Bu tip birleştirmelerde parçalar eski mukavemetine gelmese bile yine de uzun süre kullanılabilir. Yapıştırıcılarla sadece kırılan ve kopan malzemeler değil, endüstride yeni kullanıma sunulacak birçok malzemeyi daha kolay ve kısa sürede birleştirmek mümkündür.

Yapıştırıcının mekanik özelliklerinin belirlenmesi, güvenilirliği ve tekrarlanabilirliğinde yaşanan zorluklar, bu teknolojinin benimsenmesinde güçlüklerle karşılaşılmasına sebep olmaktadır. Bir yapıştırma bağlantısında



Şekil G.4. Uygulamalarda kullanılan yapıştırıcı bağlantı tipleri

karmaşık gerilmelerin analizi ve yapısal tasarımında yapıştırıcı tabakasının iki temel özelliğinden dolayı zorlukla karşılaşılır.

- Polimerik yapıştırıcının visko-elastoplastik davranışının bir yansıması olan lineer olmayan gerilme şekil değiştirme davranışı,
- Yapıştırıcı tabakasındaki üç boyutlu gerilme hali.

Yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin doğru olarak tespit edilmesine, yapıştırma bağlantısının hasar tavrını belirlemek ve yüklü bağlantıdaki gerilme dağılımlarını hesaplayabilmek için ihtiyaç duyulur. Genel olarak yapıştırıcı birleştirmeli bağlantıların mukavemeti; birleşen parçaların büyüklüğüne, kalınlığına, geometrisine, elastik modülüne, kayma modülüne, yapışma bölgesi alanına, yapışma yüzeylerinin ön işlemlerine, yapışma işlemine ve yapıştırıcı birleştirmeli bağlantının maruz kalacağı şartlara bağlıdır.

İstenen amaç için tek başlarına uygun olmayan farklı iki veya daha fazla malzemeyi istenen özellikleri sağlayacak şekilde belirli şartlar ve oranlarda fiziksel olarak, makro yapıda bir araya getirilerek elde edilen malzemeye, başka bir deyişle birbirlerinin zayıf yönünü düzelterek üstün özellikler elde etmek amacı ile bir araya getirilmiş değişik tür malzemelerden veya fazlardan oluşan malzemelere kompozit malzeme denir. İç yapıları çıplak gözle incelendiğinde (makroskobik muayene) yapı bileşenlerinin seçilip ayırt edilmesi mümkündür. Yapılarında birden fazla sayıda fazın yer aldığı klasik alaşımlar ise makro ölçüde homojen olmalarına rağmen mikro ölçüde (mikroskobik muayene ile seçilebilen) heterojen malzemelerdir.

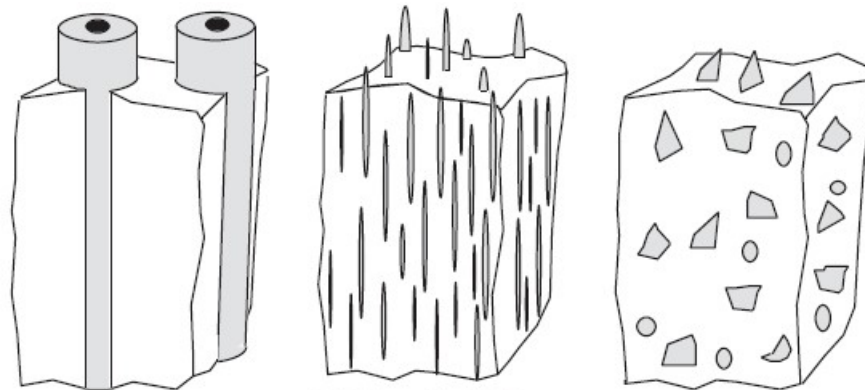
Kompozit malzemelerde yapıyı oluşturan bileşenler birbiri içinde çözünmezler, kimyasal olarak inert davranırlar. Ancak özellikle metalik sistemlerde düşük oranlarda bile olsa, bir miktar çözünme bileşenler arasında kompozit özelliklerini etkileyebilen ara yüzey reaksiyonları görülebilir. Kompozit malzemelerde çekirdek (takviye) olarak kullanılan bir fiber malzeme bulunmakta, bu malzemenin çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matris malzeme bulunmaktadır. Bu iki malzeme grubundan, fiber malzeme kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini, matris malzeme ise plastik deformasyona geçişte

oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matris olarak kullanılan malzemenin bir amacı da fiber malzemeleri yük altında bir arada tutabilmek ve yükü lifler arasında homojen olarak dağıtmaktır. Böylece fiber malzemelerde plastik deformasyon gerçekleştiğinde ortaya çıkan çatlak ilerlemesi olayının önüne geçilmiş olur.

Kompozit malzemeler genelde dört temel özellik sergiler:

- İnsan yapısı olması, dolayısıyla doğal bir malzeme olmaması,
- Kimyasal bileşimleri birbirinden farklı belirli ara yüzeylerle ayrılmış en az iki malzemenin bir araya getirilmiş olması,
- Farklı malzemenin üç boyutlu olarak bir araya getirilmiş olması,
- Bileşenlerin hiç birinin tek başına sahip olmadığı özellikleri taşıması. Buna göre malzeme, mikroskobik açıdan heterojen bir malzeme özelliği göstermekte, ancak makroskobik açıdan homojen bir malzeme gibi davranmaktadır.

Yapılarında çok sayıda farklı malzeme kullanılabilen kompozitlerin gruplandırılmasında kesin sınırlar çizmek mümkün olmamakla birlikte, yapıdaki malzemelerin formuna göre; elyafı kompozitler, parçacıklı kompozitler, tabakalı kompozitler ve karma (ileri) kompozitler şeklinde bir sınıflandırma yapmak mümkündür. Kompozit malzemelerin iki ana bileşeni bulunmaktadır. Bunlar; matris ve takviye malzemesidir. Yüksek performanslı kompozit malzeme üretimi için matris malzemesi elyaflar arasına emdirilebilmeli, elyafları ıslatabilmeli,



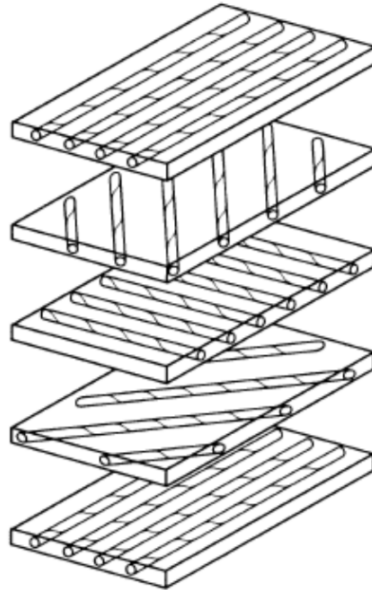
Şekil G.5. Metal matrisli kompozitlerin sınıflandırılması

kimyasal yada belli şartlarda yapışma için bağ oluşturmalı, mümkün olan düşük basınç ve sıcaklıkta hızlı şekilde katılaşma yapabilmelidir. Kompozit malzeme yapımında kullanılan matris malzemeleri; metaller, plastikler ve seramikler'dir. Şekil G.5'de metal matrisli kompozitlerin takviye elemanının matris içerisindeki durumuna göre sınıflanması gösterilmektedir. Polimerler; çok sayıda molekülün kimyasal bağlarla düzenli bir şekilde bağlanarak oluşturdukları yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir. "Poli" Latince bir sözcük olup çok sayıda anlamına gelir. Polimerler "monomer" denilen birimlerin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Buna basit bir örnek olarak "Polistren" verilebilir. Polistren birçok stren monomerinin bir araya gelmesi ile oluşmuştur. Polimer ve polimer kompozitlerden başlıca beklentiler en az çelik kadar sağlam, olabildiğince hafif, yüksek kullanım sıcaklıklarına dayanıklı ve ekonomik malzeme üretimidir. Çeşitli mühendislik uygulamalarında metallerin yerine tercihen polimer kompozitler de kullanılmaktadır. Polimer kompozitlerin hafiflik, mekanik dayanım, insan dokuları ile uyum sağlama ve sertlik derecesinin ayarlanabilmesi gibi özellikleri ön plana çıkmaktadır. Bunun yanında optik elyaf ve basınç ile elektrik üretebilen piezoelektrik özellikli özel sistemlerin yapımında da metal ve seramik malzemelerin yerlerine kullanılmaktadır. Polimer kompozitleri iki ana kategoride incelemek mümkündür. Bunlar parçacık dolgulu ve sürekli elyaf kompozitleridir (Şekil G.6). Seramikler, metal veya metal olmayan bileşiklerden meydana gelen inorganik bileşikler olup doğada kayaların dış etkilere karşı parçalanması sonucu oluşan kalsen, kil gibi maddelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesiyle elde edilen malzemelerdir. Bunlar farklı şekilde silikatlar, alüminatlar ile metal oksitlerden oluşurlar. Seramikler, gevrek olduklarından mikro yapısal kusurları çentikler ve mikro-çatlaklar gerilme yığılmasına yol açtıklarından çekme dayanımı düşüktür. Basma dayanımları ise çok yüksektir. Ancak mikro yapısal kusurları azaltacak şekilde çok ince yapıli elyafar üretilerek daha dayanıklı kompozit üretmek mümkün olmaktadır.

Kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak seramik elyafar veya parçacıklar kullanılmakta olup, bunlar plastik veya metal esaslı malzemelerle elde edilemeyen yüksek özgül dayanımlı malzemelere olan talep nedeniyle son yıllarda tercih edilmeye başlanmıştır. Matris malzeme içinde yer alan elyaf takviyeler kompozit yapının temel

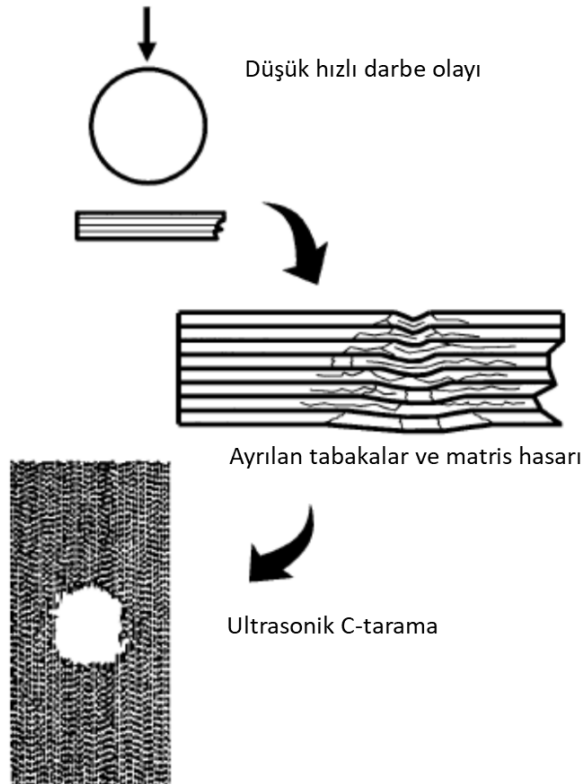
mukavemet elemanlarıdır. Düşük yoğunluklarının yanı sıra yüksek elastite modülüne ve sertliğe sahip olan elyafar kimyasal korozyona da dirençlidir. Günümüzde kompozit yapılarda kullanılan en önemli takviye malzemeleri sürekli elyafardır. Bu elyafar özellikle modern kompozitlerin oluşturulmasında önemli bir yer tutarlar. Cam elyafar teknolojiye kullanılan en eski elyaf tipleridir. Son yıllarda geliştirilmiş olan bor, karbon, silisyum karbür ve aramid elyafar ise gelişmiş kompozit yapılarda kullanılan elyaf tipleridir. Elyafarın ince çaplı olarak üretilmeleri ile, büyük kütsel yapılara oranla yapısal hata olasılıkları en aza indirilmiştir. Bu nedenle üstün mekanik özellikler gösterirler. Ayrıca elyafarın yüksek performanslı mühendislik malzemesi olmalarının nedenleri aşağıda verilen özelliklere de bağlıdır.

Kullanım amacına ve uygulama yerine göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir ve bunların daha önceden tespit edilmesi çok önemlidir. Mühendislikte mekanik uygulamalarda, dışarıdan gelecek bir darbeye karşı istenmeyen sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin en uygun davranışı göstermesi istenir. Metallerin darbe davranışı elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir. Metallerde darbe hasarı genellikle çarpma yüzeyinde gelişir ve başladığı anda kolay bir şekilde tespit edilebilir. Kompozit malzemelerde ise bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpma türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir, iç yapıda oluşan tabakalar arası



Şekil G.6. Fiber takviyeli kompozit malzemedeki laminalar

ayrılma şeklinde başlayabilir. Bu nedenle farklı tabakalardan oluşmuş bir kompozit malzemede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek önem arz eder. Şekil G.7’de düşük hızlı darbeye maruz kalan kompozit malzeme, kompozit malzemede darbe sonucu ortaya çıkan hasar ve C-tarama yöntemi ile bu bölgenin tespit edilmesi gösterilmektedir [4]. Sandviç malzemeler birden fazla malzeme içerdiği için bu etkilerin tespiti daha da önem arz etmektedir. Bu etkileri tespit etmek için de öncelikli olarak darbe mekaniği konusunun iyi bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. Darbe mekaniği, bir çarpışma esnasında ortaya çıkan tepki kuvvetleri ile yapıların bu tepki kuvvetlerine olan dinamik cevabıyla ilgilenmektedir. Bu konu, otomobillerin çarpışma dayanımının geliştirilmesinden spor aletlerinin tasarımına kadar geniş aralıktaki birçok mühendislik uygulamalarını kapsar. Çarpışan iki cismin yüzeyleri bir araya geldiğinde küçük bir temas alanında basınç yükselir. Temas süresince her an, temas alanındaki basınç değişir ve değişken yerel bir deformasyon ve bir nüfuziyet (indentation) doğurur. Darbe sırasında, arayüzey çarpışan iki cisimde zıt doğrultularda bir etki veya tepki kuvvetine sahiptir, böylece cisimlerin birbirine geçmesine karşı direnme oluşur. Başlangıçta nüfuziyetin artmasıyla kuvvet de artar



Şekil G.7. Darbeden dolayı oluşan ayrılmalar ve matris hasarı

ve bu kuvvet birbirine yaklaşan cisimlerin süratini azaltır. Darbe olayında belli bir anda temas kuvvetlerinin yaptığı iş her iki cismin süratının sıfır olmasını sağlar ve neticede sıkışma sırasında biriktirilen enerji iki cisim birbirinden ayrılmaya zorlar, sonunda bu cisimler birbirlerinden belli bir izafi hızla ayrılırlar. Katı cisimlerin arasındaki darbeye, çarpışma süresince etki eden temas kuvveti, iki cisim yüzeylerinin bir temas alanı oluşturması için gerekli yerel deformasyonların bir neticesidir. Darbe esnasında ortaya çıkan yerel deformasyonlar çarpışan cisimlerin sertliğine bağlı olduğu kadar temas başlangıcındaki izafi çarpma hızına bağlı olarak ta değişir. Düşük hızlı çarpışmalar sadece küçük deformasyonlara neden olan temas basınçlarını doğurur. Bunlar temas alanının yakınlarındaki küçük bir bölgede önemlidir. Yüksek hızlarda temas alanının yakınlarındaki malzeme bölgelerinde plastik akmadan kaynaklanan büyük deformasyonlar (şekil değiştirmeler) vardır. Bu büyük yerel deformasyonlar, krater oluşturma ve dalma şeklinde büyük belirginlikte olup kolaylıkla gözlenebilir. Her bir durumda deformasyonlar, çarpışan cisimlerde hız değişimine neden olan temas kuvvetlerinin bir parçasıdır.

Deformasyona neden olan ya da olmayan her iki tip darbe süresince temas basıncı, arayüzey bileşke kuvvetine ya da bileşke tepki kuvvetine sahiptir. Bu kuvvetler çarpışan cisimler üzerinde zıt yönde oluşurlar ve nüfuziyete karşı direnç gösterirler. Batmanın artması ile kuvvet artar ve cisimlerin birbirine girişim hızı azalır. Bazı darbe olaylarında temas kuvvetleri tarafından yapılan iş cisimlerin girişim hızlarını sıfırlamaya yeter ve oluşan sıkışmalar sonucu depolanan enerji temas sonrası cisimlerin birbirlerinden ayrılmasına ve belirli bir hıza ulaşmalarına sebep olur.

Darbe sırasında oluşan bölgesel deformasyonlar cisimlerin sertliklerine bağlı olduğu kadar temas sırasındaki hızlarına ve kütlelerine de bağlıdır. Hızları, kütleleri ve sertlikleri arttıkça oluşan bölgesel deformasyonlar artar. Düşük hızlı çarpışmalar sadece küçük deformasyonların oluşmasına sebep olur ve oluşan deformasyonlar temas yüzeyleri yanında ihmal edilebilir seviyededir. Yüksek hızlı çarpışmalarda oluşan deformasyonlar büyüktür ve rahatlıkla tespit edilebilirler. Bölgesel deformasyon, merminin hedef üzerinde yaptığı tahribat gibi temas yüzeyinden çok büyük olabilir.

Herbir darbe tipinin kendine özel analiz yöntemi ve çözüm adımları vardır. Dolayısıyla darbe analizlerinin yapılabilmesi için darbe tipinin sınıflandırılması gerekmektedir. Bu sınıflandırma yapılırken, çarpışma sırasında gelişen deformasyon, bu deformasyonun çarpışan cisimler üzerindeki dağılımı ve darbe süreci üzerine etkilerinin göz önüne alınması gerekmektedir. Bu kapsamda darbe tipleri genel olarak dört ana başlık altında toplanabilir [6]:

1. Parçacık (partikül) darbesi.
2. Rijit cisim darbesi.
3. Esnek cisimler üzerine düşey darbe (düşey dalga yayılımı veya titreşim).
4. Esnek cisimler üzerine eksenel darbe (boyuna dalga yayılımı).

Bu tez çalışması kompozit sandviç kirişlerin düşük hızlı darbe davranışlarını incelemektedir. Esnek cisimlerin üzerine düşey darbe sınıfına giren bu tez çalışmasında çekirdeği polimer köpük, yüzey malzemeleri tabakalı kompozit malzeme olan sandviç kirişler kullanılmıştır. Polimer çekirdek malzeme yüksek enerji sönmeme kabiliyetine sahiptir ve darbe bölgelerinde esnek davranış sergilemektedir. Kompozit yüzey malzemeleri ise çekirdek malzemesine göre oldukça mukavemetli olup eğilme gerilmesini arttırmaktadır ve çekirdek geometrisini muhafaza etmektedir.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

1.1. Tezin Konusu ve İçeriği

Bu tez çalışmasının amacı, kompozit sandviç kirişlerin farklı darbe enerjileri altındaki davranışını incelemek, kompozit sandviç kirişleri oluşturan elemanların bireysel davranışlarını ayrı ayrı irdelemektir. Sandviç yapılar birden fazla malzemenin bir araya gelmesi ile oluştuğu için darbe davranışına her bir malzemenin etkisinin araştırılması gerekmektedir. Sandviç yapılarda istenilen en uygun tasarım düşük maliyet ve yüksek eğilme rijitliğinin elde edilmesidir. Darbe dayanımı kabiliyetinin en iyi şekilde belirlenebilmesi için araştırılması gereken temel parametreler sandviç yapıyı oluşturan malzemelerin mekanik ve geometrik özellikleri olarak sınıflandırılmaktadır.

Kompozit sandviç kirişlerin düşük hızlı darbe davranışı üç boyutlu sonlu elemanlar metodu kullanılarak modellenmiş ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Tez çalışmasının özgünlüğünü oluşturan sayısal model Bölüm 2'de ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Sandviç yapının yüzey plakaları fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemeden imal edilmiştir. Bu tip kompozit malzemelerin mekanik davranışlarının ve hasar mekanizmalarının teorik modeli için bir çok çalışma mevcuttur, ancak köpük çekirdekli sandviç yapılarda kullanımları hala incelenmektedir. Çalışma bu tür yapılarda darbe hasar analizine yoğunlaşmaktadır. Yüzey plakası ile birlikte darbeyi sönmleme özelliği çok yüksek olan çekirdek köpük malzemesinin farklı köpük yoğunluklarına ve kalınlıklarına göre mekanik davranışının modellenmesi de tezde sunulan teorik modelin başarısı açısından önemli bir yere sahiptir. Çekirdek malzemesi darbe sönmleme açısından literatürde ve mühendislik uygulamalarında

büyük yeri olan PVC (Polivinil klörür) köpük malzemesi olarak seçilmiştir. Sandviç yapı elemanları, çekirdek ve yüzey takviye malzemesi, birbirine yapıştırıcı ile birleştirilmektedir. Yapıştırıcı yük taşıyamadığı anda birleştirme görevini yapamaz. Yapının istenmeyen sonuçlar doğurmaması için ayrılmanın oluşma ve ilerleme mekanizmasının önceden tahmin edilmesi oldukça önem arz eder. Bu çalışmada bu önemli husus dikkate alınarak tüm yapının yük taşıma kabiliyetinde yapıştırıcı tabakasının davranışının ne ölçüde etkin olduğu teorik ve deneysel olarak araştırılmıştır.

Kompozit sandviç kirişlerin darbe dayanımının araştırılması şu aşamalardan olmuştur: *i)* Sayısal modelin geçerliliğinin tespiti ve temel tasarım parametrelerine karar verilmesi için ön çalışmalar (Bölüm 3). *ii)* Yüzey plakasının kalınlığı ve yüzey malzemesinin fiber takviyeli kompozit malzemesi ve metal malzeme olması durumunda düşük hızlı darbe davranışına etkisi (Bölüm 4). *iii)* Kompozit sandviç kirişlerin fiber takviyeli tabakalı kompozit yüzey plakalarının tek yönlü fiber açısının darbe davranışına etkisi (Bölüm 5). *iv)* Kompozit sandviç kirişlerin çekirdek malzemesini oluşturan PVC köpük malzemesinin yoğunluk ve kalınlık değişiminin düşük hızlı darbe davranışına etkisi (Bölüm 6) araştırılmıştır. Ayrıca, Bölüm 7’de kompozit sandviç kirişlerin sanki-statik eğilme yükleri altındaki davranışları araştırılmıştır ve dinamik yük sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Teorik ve deneysel çalışmalara dayanarak kompozit sandviç kiriş yapının darbeyi daha iyi sönümleyebilmesi için mekanik ve geometrik özelliklerde ne gibi değişiklikler yapılması gerektiğine karar verilmiştir.

1.2. Literatür Araştırması

Kompozit sandviç kirişlerin statik ve dinamik yükler altındaki davranışları bir çok araştırmacı tarafından nümerik, analitik ve deneysel olarak araştırılmıştır.

Crupi ve diğerleri [1] cam fiber kompozit plaka ile takviyelendirilmiş çekirdeği alüminyum köpük olan sandviç yapıların darbe dayanımını araştırmışlardır. Yüzey plakası olan ve olmayan alüminyum köpükler için düşük hızlı darbe sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Düşük hızlı darbe altındaki en büyük kuvvetleri tahmin etmek

için analitik model geliştirmişlerdir. Analitik sonuçlar, deneysel sonuçlar ile oldukça uyumludur. Düşük ağırlıklı alüminyum köpük sandviç yapılar eğilme ve darbe testlerinde enerji sönümlenme kabiliyeti açısından oldukça iyi sonuç vermişlerdir.

Zhang ve diğerleri [2] geometrik olarak asimetric sandviç kirişlerin düşük hızlı darbe davranışlarını teorik olarak araştırmışlardır. Geometrik olarak asimetric sandviç kirişlerin dinamik cevabını tahmin etmek için analitik model geliştirmişlerdir. Yerel deformasyonların ve çekirdek mukavemetinin eğilme testi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Analitik ve sayısal sonuçlar arasında iyi bir uyum sağlanmıştır. Asimetric faktör $\alpha > 1$ olan asimetric sandviç kirişlerin asimetric faktör $0 < \alpha < 1$ olanlardan daha büyük enerji emilimine sahip olduklarını göstermişlerdir.

Topac ve diğerleri [3] düşük hızlı darbeye maruz bırakılan kompozitlerdeki hasar ilerlemesini hem deneysel hem de sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarını tek yönlü $[0_5/90_3]_s$ karbon fiber kiriş yapılarına silindirik uçlu vurucu düşürerek yapmışlardır. Matris çatlaklarından ve delaminasyondan oluşan hasarın başlamasını ve ilerlemesini saniyede 60.000 kare görüntü ile ultra yüksek hızlı kamera vasıtasıyla gerçek zamanlı olarak görselleştirmişler ve hasar sırasını yakalamışlardır. Laminadaki dinamik gerilme alanlarının gelişimini bir Dijital Görüntü Korelasyon (Digital Image Correlation) analizi ile tespit etmişlerdir ve nihai hasar modellerini dijital mikroskop ile karakterize etmişlerdir. Üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerini ABAQUS® kullanarak yapmışlardır. Kirişin ortasında yer alan 90° tabakalardaki matris hasarını Sürekli Ortam Hasar Mekanikine (Continuum Damage Mechanics) dayanan bileşik hasar teorisini kullanarak modellemişler ve bir VUMAT altyordamını ABAQUS® 'a uyarlamışlardır. Delaminasyonu, $0^\circ - 90^\circ$ tabakalarının ara yüzeylerini kohezif ara yüzey elemanlarını kullanarak modellenmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, havacılık ve rüzgar türbini endüstrilerinde kullanılan daha gerçekçi istifleme dizilerinin deneysel sonuçları ile ilişkilendirerek hesaplamalı hasar modelleri için daha gerçekçi model oluşturulabileceği yargısına varmışlardır.

Chen ve diğerleri [7] kompozit tabakaların hasar analizleri için tabaka içi ve tabakalar arası hasar etkilerini içeren sonlu elemanlar modelini geliştirmişlerdir. Kompozit tabakaların mekanik davranışını ortaya koymak için hem plastisite hem de

hasar etkilerini açıklayan birleşik bir elastoplastik hasar modelini kullanmışlardır ve kullanıcı tanımlı malzeme modeli UMAT kullanarak ABAQUS® 'un sonlu elemanlar koduna uyarlamışlardır. Yapışkan arayüzlerde delaminasyon davranışını göstermek için ABAQUS® 'da bulunan kohezif elemanlara dayanan bir yapışkan bölge modeli kullanmışlardır. Delaminasyon hasarına duyarlı kompozit tabakaların analizlerine başarıyla uygulanabileceğini göstermişlerdir.

Long ve diğerleri [8] düşük hızlı darbeye maruz bırakılmış kompozit plakaların hasar analizlerini çalışmışlardır. Arayüzlerdeki delaminasyon alanını araştırmak için Ultrasonik C-Tarama kullanılmışlardır. Sayısal modellerini, kohezif temas yönteminin uygulandığı hasar modeline dayanarak oluşturmuşlardır. Sonlu elemanlar sonuçları, deneysel sonuçlar ile iyi uyum göstermiştir. Çalışmaları sonucunda, delaminasyon bölgesinin darbe noktası etrafında simetrik olarak dağılmış olduğu bulmuşlardır.

Singh ve diğerleri [9] E-cam/epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe altındaki hasar gelişimini çalışmışlardır. E-cam/epoksi kompozit için düşük hızlı darbe analizlerini sürekli ortam hasar mekaniğine (Continuum Damage Mechanics) dayanan malzeme modeli kullanarak gerçekleştirmişler ve deneylerle karşılaştırmışlardır. Laminada oluşan hasarı, temas kuvvetlerini ve zamana bağlı yer değiştirme grafiklerini incelemişler ve modelin etkinliğini göstermek için sonlu elemanlar analiz sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Deney numunelerinin yüzeyindeki yer değiştirmeyi elde etmek için Dijital Görüntü Korelasyonu (Digital Image Correlation) tekniğini kullanmışlardır.

Chen ve diğerleri [10] kompozit malzemelerin ve yapıların hasar analizleri için bir elastoplastik hasar modelinin geliştirilmesi ve doğrulanması üzerine çalışmışlardır. Oluşturdukları model, hasar başlangıcı ve gelişimi nedeniyle plastisite etkileri ve malzeme özelliklerinde bozulma nedeniyle tersinmez şekil değiştirmeleri hesaplamaktadır. Malzeme modelini, merkezi delik içeren çeşitli kompozit plakaların aşamalı hasarlarının sayısal analizleri ile doğrulamışlardır. Çalışmalarında, karbon fiber takviyeli kompozit plakaların taşıyabileceği yükleri doğru tahmin etmek için geliştirdikleri modelin başarılı olduğu sonucuna varmışlardır.

Cousigné ve diğerleri [11] çarpışma analizleri için karbon fiber dokuma kompozitlerde lineer olmayan, esneklik ve hasarın sayısal modellenmesini çalışmışlardır. Plastisite tanımı ile birleştirilen lineer ve lineer olmayan davranış ile karakterize edilen kullanıcı tanımlı bileşik malzeme modeli (VUMAT) oluşturmuşlardır. Tabaka üzerindeki hasarı tespit etmek için en büyük gerilme kriterini kullanmışlardır. Kabuk elemanlarla yapılan analizlerde, deneylere kıyasla çok rijit bir davranış gösterdiği sonucuna varmışlardır. Kalın kabuk elemanlar ile yapılan analizlerde ise, deney sonuçları ile iyi bir uyum gösterdiği sonucuna varmışlardır.

Zhang ve Zhang [12] düşük hızlı darbeye maruz bırakılan kompozit tabakalardaki kritik darbe kuvveti ve ona karşılık gelen hasarın tahmini üzerine çalışmışlardır. Tabakanın üst, orta ve alt ara yüzeylerdeki hasarı analiz etmek ve her hasar modunun tabaka rijitliği üzerindeki etkisini araştırmak için üç boyutlu sonlu elemanlar modelini oluşturmuşlardır. Hem orta kalınlık düzlemine bitişik arayüzlerde delaminasyon hem de alt yüzeyde matris kırılması, kritik darbe kuvvetine karşılık gelen ilk yük düşüşüne neden olduğu sonucuna varmışlardır.

Liu ve diğerleri [13] karbon elyaf kompozit plakaların düşük hızlı darbe altındaki dinamik hasar ilerlemesini Puck, Hashin ve Chang-Chang kriterleri dahil olmak üzere farklı hasar kriterlerini kullanarak araştırmışlardır. Arayüzey süreksizliği ile başlangıç değer probleminin varyasyonel formuna dayanan kompozitlerin tabaka içi hasar ve ara tabakalar halinde delaminasyonu üzerine birleşik bir teorik yaklaşım sunmuşlardır. Tabakaların hasar analizi için bir parametrik modelleme ara yüzü ABAQUS® Python programlama dilini kullanarak oluşturmuşlardır. Üç hasar kriterini kullanan tabakalar içi hasar modellerini, ABAQUS® sonlu elemanlar yazılımına bir VUMAT altprogramı yardımıyla uyarlamışlardır ve delaminasyonu ABAQUS® 'daki bilinear kohezif modeli ile ele almışlardır. Çalışma sonuçları, matris kırılması ve delaminasyon hasarı için, üç kriter kullanılarak darbe cevabı ve enerji sönümlemesinin tutarlı olduğunu göstermişlerdir.

Chen ve diğerleri [14] düşük hızlı darbeye maruz bırakılmış bir bal peteği çekirdekli kompozit sandviç yapıların hasar davranışlarını tahmin etmek için, tabaka içi hasar, tabakalar arası delaminasyon ve şekil değiştirme hızı etkisi üzerine sayısal

bir model geliştirmişlerdir. Sayısal modeli, malzemeler üzerindeki şekil değiştirme oranı etkilerini göz önüne alarak toplam enerji sönümlemesi ve deneylerin darbe kuvveti-yer değiştirme tepkisini iyi tahmin eden, hasar modeli üzerine kurmuşlardır. Sayısal ve deneysel sonuçları kıyaslandığında, enerji sönümlemesi açısından hata %7.8 olurken en yüksek kuvvetler açısından %4.2 olduğu sonucuna varmışlardır.

Kim ve diğerleri [15] düşük hızlı darbe yükleri altında lineer olmayan mekanik davranışı tahmin etmek için cam elyaf takviyeli termoplastik kompozitleri için üç boyutlu (3B) hasar ilermesini ve malzeme modelini geliştirmişlerdir. İlerleyen hasar formülasyonu için, malzeme bozunum modelini (Material Degradation Model), üç boyutlu (3B) Hashin hasar kriterlerine dayanan bir sürekli ortam hasar mekaniği (Continuum Damage Model) modeli kullanarak oluşturmuşlardır. Önerilen hasar formülasyonlarını, lineer olmayan sonlu elemanlar analizi yazılımı LS-DYNA® 'da kullanıcı tanımlı malzeme VUMAT altyordamı ile birlikte kullanarak uygulamışlardır. Çalışmalarında, üç boyutlu ilerleyen hasar modelinin sadece hasarın ilerleme ve çarpma davranışını değil aynı zamanda tabakalar arası ayrılmayıda (delaminasyon) tahmin etmek için kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Zhou ve diğerleri [16] sandviç yapıların delinme direncini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Köpük plakaların ve bunlarla ilişkili sandviç panellerin darbe direncini, panelleri delmek için gereken enerjiyi belirlemişlerdir. Panellerin dinamik analizlerini ABAQUS® /Explicit sonlu elemanlar yazılımını kullanarak yapmışlardır. Yaptıkları testler, köpük plakaların ve sandviç panellerinin delinme direncinin, köpük çekirdeğin özelliklerine bağlı olduğunu göstermiştir. PVC köpüklerin yoğunluğunun 60 ile 200 kg/m³ arasında artması, sandviç panellerin delinme direncini sekiz kat arttırmıştır. Orta ve daha yüksek yoğunluklarda, PVC köpükler ve bunların ilişkili sandviç yapıları, daha iyi bir delinme direnci sunmuştur.

Cestino ve diğerleri [17] düşük hızlı darbe altındaki kompozit havacılık yapılarının burkulma ve çekme altındaki davranışını sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Hasar analizlerini geliştirmek için basitleştirilmiş bir analitik yöntem ve sonlu elemanlar analizinde ise bozunum modeli kullanmışlardır. Üç farklı darbe enerjisi için farklı bozunum katsayıları tanımlamışlardır. Düşük darbe enerjisi seviyelerinde

paneller için, en büyük çekme yükünde yaklaşık %20'lik ve daha yüksek enerji seviyeleri için %70'e yakın bir azalma gözlemlenmiştir.

Morada ve diğerleri [18] mevcut hidrolik türbinler için bir çözüm olarak yeni tip kompozit sandviçler üzerinde çalışmışlardır. ATH/epoksi (epoksi reçine doldurulmuş alumina trihidrat (ATH) parçacıkları) çekirdeği olan sandviçleri çeşitli enerji seviyelerinde düşük hızlı darbeye maruz bırakmışlardır. Çekirdekte doğrusal olmayan tepkiyi analiz etmek için viskoplastik bir hasar modeli ile birlikte yüzey plakalarındaki hasar karakteristiklerini tahmin etmek için üç boyutlu ilerlemeli hasar modeli geliştirmişlerdir. Etki bölgesi içindeki hasar ve arıza modlarını belirlemek için mikroskopik gözlemler gerçekleştirmişlerdir. Yüzey malzemesinin hasar toleransını arttırmak için çekirdek malzemenin önemli rolü olduğu sonucuna varmışlardır. Darbe testlerinden sonra, sandviç çekirdek darbe enerjisinin % 50'si sönümlenmiştir.

Lopes ve diğerleri [19] daha önceki yaptıkları deneysel çalışmalarını takiben kompozit plakaların düşük hızlı darbe altındaki hasar gelişimlerini sayısal olarak incelemişlerdir. Fiberler, matris ve tabakalar arasındaki arayüzeylerin fiziksel olarak ilerleyen hasar davranışını hesaba katan yapısal modelleri sonlu elemanlar metoduna, kompozit tabakalarda düşük hızlı darbe olaylarının analizlerini yapmak için uyarlamışlardır.

Mines ve Jones [20] üç noktalı eğilme altında polimer kompozit sandviç kirişlerin enerji sönümlenme davranışını tahmin etmek için elastik-plastik kiriş eğilme modelini geliştirmişlerdir. Kiriş için doğrusal olmayan kuvvet-yer değiştirme değişimlerini deneysel ölçümleri, modelin teorik sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır ve çekirdeğin kayma davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermişlerdir.

Kawashita ve Hallet [21] kompozit malzemelerde yorulma delaminasyon yayılımının kohezif arayüzey elemanları ile analizi üzerine çalışmışlardır. Delaminasyon yayılımı için Paris yasası rejimini kullanmışlardır. Havacılık uygulamalarındaki üç boyutlu yapıların analizlerine uygulamışlardır. Yöntemlerini LS-DYNA[®] sonlu elemanlar yazılımında kullanıcı tanımlı bir altyordam kullanarak oluşturmuşlardır. Eksenel simetrik VCCT (Virtual Crack Closure Technique) analizleri üç boyutlu modeller için üç farklı ağ yoğunlunu kullanarak yapmışlardır.

Ivañez ve diğerleri [22] kompozit sandviç kirişlerin düşük hızlı darbelere karşı cevabını analitik olarak araştırmışlardır ve teorik modeli doğrulamak için düşük hızlı darbe testlerini yapmışlardır. Tahmin edilen sonuçlar, en büyük temas kuvveti, temas süresi ve temas kuvveti-zaman eğrileri açısından deneysel verilerle iyi bir şekilde uyumludur. Darbe hızının, en büyük temas kuvveti ve temas süresine daha fazla etkisi olduğu sonucuna varmışlardır.

Harper ve diğerleri [23] kompozitlerdeki tabakalar arası ayrılmalar için arayüzey elemanı analizlerinde en büyük ara yüzey gerilmesinin etkisi üzerine ayrıntılı bir çalışma sunmuşlardır. Arayüzey elemanları tarafından sönmölen enerji, kırılma mekaniği analizlerinden çıkan çatlak ucu şekil değiştirme enerjisi hızı ile karşılaştırmışlardır. Sonuçların lineer elastik kırılma mekaniği çözümleri ile yakın bir uyuma sahip olduğunu gösterdiler. En büyük arayüzey gerilmesi, kohezif bölge uzunluğu, mod oranı ve sönmölen enerji üzerinde önemli etkilerinin olduğu sonucuna varmışlardır.

Lorenzis ve diğerleri [24] basit mesnetli kiriş plakalarda arayüzey ayrılmasının karışık tip kohezif bölge yaklaşımı ile modellenmesi üzerine çalışmışlardır. Model elastik bölgenin bitiminden sonra arayüzün gelişimini tanımlar ve başlangıçtaki ayrılma yükünün değerini öngörür. Çalışmalarında analitik teoriyi ayrıntılı bir şekilde sunmuşlardır ve oldukça uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Singh ve Mahajan [25] fiber takviyeli polimer esash kompozitler için üç boyutlu elasto plastik hasar modelini, düşük hızlı darbe durumunda artan hasar ve hasar görmüş elastik olmayan deformasyonu tahmin etmek için kullanmışlardır. Hasar tahmini için üstel zayıflama modeli ve plastik yüzey ilerlemesi için üç boyutlu bir plastik potansiyel kullanmışlardır. Açık kaynaklı kod olan VUMAT ABAQUS® /Explicit'de yazılmış ve modele uyarlanmıştır. Düşük hızlı darbe analizlerini grafit/epoksi kompozitler ile gerçekleştirmişlerdir. Delaminasyon davranışını iki tabaka arasındaki kohezif etkileşimlere dayalı yüzeyler kullanarak oluşturmuşlardır. Sonuçlar, tahmin edilen davranışın deneysel gözlemlerle iyi eşleştiğini göstermektedir. Kompozit plakanın merkezi yer değiştirmesini ve yüzeydeki kalıcı girintiyi başarıyla yakalamışlardır.

Liao ve Liu [26] plastik fiber takviyeli polimer matris kompozit plakaların düşük hızlı darbe altındaki dinamik analizlerini ve hasar mekanizmalarını incelemişlerdir. Fiber ve matris malzemesi için plastik hasar modelini Puck'un hasar kriterlerine ve şekil değiştirme temelli hasar geliştirme kanunlarına göre kullanmışlardır. Tabakalar arası ayrılmalar için bilinear kohezif bölge yaklaşımını kullanmışlardır. Önerilen algoritma ABAQUS® VUMAT kullanılarak zaman adım algoritması ile uygulanmıştır. Düşük hızlı darbe altındaki iki kompozit numunelerin, temas kuvveti-zaman eğrileri, yer değiştirme-zaman eğrileri, ve farklı darbe enerjilerinde sönmölenen enerjileri, deneyler ve sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırarak incelemişlerdir. Sayısal sonuçları, darbe enerjisi arttıkça plastik hasar modelinin, elastik hasar modelinden daha yüksek hassaslığa neden olduğunu göstermiştir.

Yu ve diğerleri [27] dinamik olarak yüklenen alüminyum köpük çekirdekli sandviç kirişlerin hasarını ve davranışlarını deneysel olarak çalışmışlardır. Açık hücreli alüminyum köpük çekirdek malzemesinin dinamik basma gerilme-şekil değiştirme eğrilerini Split Hopkinson çubuk test sistemini kullanarak elde etmişlerdir. Şekil değiştirme hızı duyarlılığını tespit edememişlerdir. Alüminyum yüzey malzemesinden ve alüminyum çekirdek malzemesinden yapılmış sandviç kirişleri statik ve dinamik eğilme testlerine maruz bırakmışlardır. Dinamik olarak yüklenen sandviç kirişlerin enerji sönmöleme kabiliyeti statik olarak yüklenenlerden daha düşük çıkmıştır.

Tan ve diğerleri [28] alüminyum alaşımlı açık hücreli köpük çekirdekli sandviç kirişlerin düşük hızlı darbeye karşı dinamik tepkilerini araştırmışlardır. Testlerini farklı kalınlıktaki yüzey malzemesi ve çekirdek malzemesi için yapmışlardır. Çekme bölgelerinde çatlak oluşumu ve çekirdek bölgesindeki kayma hasar modları üzerinde etkin olduğu sonucuna varmışlardır. Hasar modları ve darbe kuvvetleri üzerindeki diğer anlamlı parametreler ise darbe enerjisi ve sandviç kiriş yapıyı oluşturan malzemelerin kalınlıkları olarak ortaya çıkmıştır.

López-Aenlle ve Pelayo [29] dinamik yüklemelere karşı cam fiber takviyeli tabakalı kompozit kiriş ve levhalardaki etkin kalınlık tespiti üzerine çalışma yapmışlardır. Dinamik etkin kalınlık kavramını doğrulamak için deneysel çalışma yapmışlardır. Modellerini oluştururken doğal frekanslar, kayıp faktörleri ve mod şekilleri gibi modal

parametreleri kullanmışlardır. Çalışma sonuçlarında, doğal frekanslarda ve mod şekillerinde iyi bir doğruluk elde edildiğini bulmuşlardır ancak kayıp faktörlerinde yüksek dağılımla karşılaşıldığı sonucuna varmışlardır.

Wang ve diğerleri [30] farklı çekirdek malzemelerine sahip sandviç panellerin orta hızlardaki darbe davranışlarını incelemişlerdir. Sandviç paneller alüminyum yüzey plakaları ve 5 farklı çekirdek malzemesi kullanılarak oluşturulmuştur. 43, 85 ve 120 J'lük darbe enerjileri altında darbe testi yapılan numunelere 3 boyutlu tarama yapılarak ön ve arka yüzdeki deformasyonlar ölçülmüştür. Sonlu elemanlar metodunu kullanarak darbe analizlerini yapmışlardır. Darbe testleri, bir gaz tabancası kullanılarak beş farklı çekirdek malzemeli sandviç panellerde gerçekleştirilmiş ve sayısal modelleme, sonlu elemanlar yazılımı LS-DYNA® kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Flores-Johnson ve Li [31] karbon fiber takviyeli kompozit yüzey plakalarından ve polimerik köpük çekirdek malzemesinden oluşan sandviç panellerin deneysel olarak statik batma çalışmalarını yapmışlardır. Çalışmalarında, hem batıcı için şekli hemde çekirdek yoğunluğunun hasar alanı ve sönmölenen enerji açısından sandviç panellerin batmaya karşı tepkisinde bir etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır.

Manes ve diğerleri [32] NomexTM bal peteği çekirdekli ve alüminyum 2024-T3 yüzey malzemeli sandviç panellerin düşük hızlı darbe davranışlarını araştırmışlardır. ABAQUS® sonlu elemanlar yazılımını kullanarak oluşturdukları sayısal model ile deney sonuçlarını kıyaslamışlardır ve oldukça tutarlı sonuçlar elde etmişlerdir.

Wang ve diğerleri [33] tabakalı karbon fiber yüzey plakaları ve poliüretan köpük çekirdek malzemesinden oluşan sandviç panellerin düşük hızlı darbe davranışlarını, farklı yüzey plakası ve köpük kalınlıkları, farklı darbe enerjileri ve vurucu şekilleri açısından sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Dijital görüntü kolerasyonu tekniğini, gerçek zamanlı yer değiştirme ve vurucu hızını hesaplamak için kullanmışlardır. Genelleştirilmiş Schapery teorisine dayanarak, karbon fiber tabakaların darbe sırasında doğrusal olmayan davranışını tanımlamak için hasar modeli geliştirmişlerdir. Köpük malzemesinin sonlu elemanlar malzeme modeli için Crushable Foam kullanmışlardır.

Quaresimin ve diğeri [34] darbe yükleri altındaki kompozit tabakaların enerji sönümlenme kapasitelerini temas kuvveti değişimi, sönümlenen enerji miktarı ve delaminasyonlar açısından tabaka kalınlığı ve istifleme sırası etkileri üzerine çalışma yapmışlardır. Darbeye bağlı hasar gelişimini ayrıntılı bir şekilde analiz ettikten sonra, kompozit tabakaların enerji sönümlenme kapasitesinin değerlendirilmesi için yeni bir yol haritası önermişlerdir.

Mohammed ve diğeri [35] farklı fiber açılara sahip yüzey malzemeleri olan köpük sandviçlerin düşük hızlı darbe davranışlarını darbe hasarı açısından sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Sayısal analizlerinde ABAQUS® sonlu elemanlar yazılımını kullanmışlardır. Yüzey plakalarında hasarı hesaplamak için Hashin teorisini, çekirdek malzemesinin davranışını ise Crushable Foam malzeme modelini kullanarak tariflemişlerdir.

Ivañez ve diğeri [36] kompozit yüzey malzemeli ve köpük çekirdekli sandviç kirişlerin dinamik davranışlarını bir üç boyutlu sonlu elemanlar modeli geliştirerek analiz etmişlerdir. Köpük malzemesi için Crushable Foam malzeme modelini, yüzey malzemesinin hasar modeli için Hou kriterini kullanmışlardır. Temas kuvveti değişimi, en büyük temas kuvveti değerleri, sönümlenen enerji ve yer değiştirmeler esas alınarak yapılan sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılmasında oldukça başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.

Li ve Bataxi [37] köpük çekirdekli ve fiber takviyeli kompozit yüzey plakalı sandviç kirişlerin en uygun tasarımı ve sayısal analizlerini gerçekleştirdiler. Kompozit sandviç kirişlerin analizlerini MSC Patran/Nastran yazılımını kullanarak yapmışlardır. Karbon örgünün sık olduğu ve elle yatırma yöntemi için uygun olmadığı, ideal fiber malzemesinin cam fiber olduğu önerisinde bulunmuşlardır.

Mines ve Alias [38] yüksek başarılı deniz araçları için statik yükleme altındaki polimer kompozit sandviç kirişlerin sayısal analizlerine dayanan çalışmalar yapmışlardır. Yüzey plakası için düz örgüye sahip cam epoksi pre-preg kullanmışlardır. Sandviç kirişlerin iki boyutlu sayısal analizlerinde ABAQUS® sonlu elemanlar yazılımını kullanmışlardır. Üst plakadaki hasar, toplam şekil değiştirme ile kontrol edilmiştir.

Fard ve diğeri [39] rijit ucu küt olan silindirik bir vurucunun çarptığı kompozit sandviç panellerin düşük hızlı darbe davranışlarını analitik olarak incelemiştir. Önceki yapılan çalışmaların aksine yüzey plakalarında istif sırası kullanmadan yapıyı oluşturmuşlardır. Düzlem-içi yer değiştirme bileşenlerinin etkilerini ve sandviç plakanın sınır şartlarından etkilenen başlangıç düzlem-içi kuvvetlerini çalışmalarına dahil etmişlerdir. Toplam potansiyel enerjinin en aza indirgenmesi yaklaşımı kullanılarak statik batma problemi için kapalı form çözümleri türetilmiş ve temas yasası (temas kuvveti-batma ilişkisi) belirlenmiştir. Daha sonra, düşük hızlı darbe problemini incelemek için yay-kütle-sönüm modelleri geliştirilmiştir. Yüzey plakası istif sırasının hem darbe kuvveti hem de temas süresi üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Aktay ve diğeri [40] yüzey plakası aramid fiber takviyeli kompozit, çekirdek malzemesi NOMEX bal peteği ve polyetherimide (PEI) olan sandviç panellerin yüksek hızlı darbe altında maruz kaldığı hasarı tahmin etmek için çalışmışlardır. Sayısal modeli dinamik sonlu elemanlar analiz programı PAM-CRASH® kullanarak oluşturmuşlardır. Mevcut sayısal model genel olarak kompozit yapılarda hasar modlarının tahmininde iyi olmasına rağmen, daha iyi kantitatif korelasyonlar için daha fazla düzeltmeye ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir.

Dawood ve diğeri [41] sivil altyapı ve ulaşım uygulamaları için önerilen, yenilikçi üç boyutlu cam elyaf takviyeli polimer sandviç panelin statik ve yorulma davranışlarını araştırmışlardır. Çalışmaları analitik modelin deney sonuçları ile doğrulanmasını içermektedir. Panelin temel davranışına farklı parametrelerin etkisini değerlendirmek için toplam 730 sandviç panele test yapmışlardır. Panellerin toplam kalınlığı ve yüzey tabakasının sayısını dikkate almışlardır. Panellerin kesme davranışının panel çekirdeğinin tipine duyarlı olduğu sonucuna varmışlardır.

Yu ve diğeri [42] alüminyum köpüklü sandviç kirişlerin statik ve dinamik davranışlarını incelemiştir. Düzeltilmiş Gibson modeliyle öngörülen hata modu ve yük kapasitesi, statik deney verileri ile iyi bir uyum içerisinde olduğunu bulmuşlardır. Darbe yükü altındaki kirişlerin hasar modları, statik yükleme altındaki kirişlere benzer sonuç vermiştir, ancak kuvvet-yer değiştirme eğrileri çok farklılık

göstermiştir. Statik model ile darbe hızı 5 m/s'den düşük olduğunda sandviç kirişlerin başlangıçtaki dinamik hasar modlarının öngörebilir olduğu sonucuna varmışlardır.

Zenkert ve diğerleri [43] köpük çekirdekli sandviç kirişlerin statik yüklenmesi ve bu yükün boşaltılmasında tepkilerini araştırmışlardır. Analitik modelleri köpük çekirdeğin elastik-mükemmel plastik sıkıştırma davranışını esas alarak oluşturulmuştur. Batma tepkisinin elastik evresi, Winkler temel modeli kullanılarak açıklanmıştır. ABAQUS® sonlu elemanlar yazılımını kullanılarak sandviç kirişlerin statik batma ve batma yükünün boşaltılması gerçekleştirilmiştir. Köpük malzemesinin davranışı için Crushable Foam malzeme modeli kullanılmıştır. İki farklı köpük çekirdekli kompozit sandviç kirişlerin analitik ve sonlu elemanlar analizleri deneysel statik testler ile doğrulanmıştır.

Cai ve diğerleri [44] tek yönlü ve cam fiber takviyeli kompozitlerin eksenden kaçık çekme yükü altındaki mekanik özelliklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Kompozit tabakaların hasar mekanizmalarını incelemek için farklı fiber açıları dikkate alınarak bir dizi testler gerçekleştirmişlerdir. Tek yönlü kompozitlerinin hasar analizi için kullanılan Tsai-Wu kriterleri, özellikle farklı etkileşim katsayısı değerlerini dikkate alarak karşılaştırmışlardır. Seçilen çatlak yüzeylerini taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gözlemlemişlerdir ve kompozitlerin çekme yükü altındaki hasar mekanizmalarını belirlemişlerdir.

Tagarielli ve diğerleri [45] cam fiber tabakalı kompozit yüzey malzemeli, PVC köpük ve balsa ağaç çekirdekli sandviç kirişlerin darbeye karşı dinamik tepkilerini araştırmışlardır. Kirişlerin zamana bağlı yer değiştirmelerini, deformasyon ve hasar modlarını yüksek hızlı fotoğrafıma tekniği ile kayıt altına almışlardır. Monolitik ve sandviç kirişlerin en geniş hasar bölgelerinin çekmeye maruz kalan bölgelerdeki yırtılmalardan dolayı ortaya çıktığını belirlediler. Balsa çekirdeği olan sandviç kirişler, düşük momentumlu mermiler için PVC köpük çekirdeğe sahip kirişlerden daha iyi darbe dayanımı göstermişlerdir.

Jing ve diğerleri [46] dinamik yüklenen açık hücreli metal köpük çekirdekli alüminyum sandviç kirişlerin deformasyon ve hasar modlarını deneysel

çalışmışlardır. Açık hücreli alüminyum köpüğün çekirdek malzemelerinin dinamik gerilme-şekil değiştirme eğrileri, Split Hopkinson çubuk test sistemi kullanılarak elde edilmiştir. Test sonrası fotoğraflarda sandviç kirişlerin çarpma deformasyon modları, büyük elastik olmayan deformasyon, yüzey buruşukluğu ve ara yüz hasarı ile çekirdek kesilmesi gözlemlenmiştir.

Zhou ve diğerleri [47] farklı yoğunluklardaki köpük malzemelerinden oluşan sandviç yapıların düşük hızlı darbe davranışlarını araştırmışlardır. Çalışmalarında üç katmanlı çekirdek üretmek için doğrusal PVC, çapraz bağlanmış PVC ve PEI köpük malzemelerini birleştirmişlerdir ve yüzey malzemesi olarak karbon fiber kompozit plaka kullanmışlardır. Sandviç yapıların darbe davranışı, sonlu elemanlar analizi ile kuvvet-yer değiştirme davranışları ve hasar tipleri karşılaştırılarak belirlenmiştir. Yapılar birim maliyeti göz önüne alınarak tasarlandığında, yapıların delinme direncinde önemli farklılıklar ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.

Zhang ve diğerleri [48] asimetrik metal köpük çekirdekli sandviç kirişlerin plastik hasar başlangıcını analitik ve deneysel olarak araştırmışlardır. Başlangıç hasar yükleri için analitik formülleri geliştirmişler ve tamamen sıkıştırılmış geometrik asimetrik sandviç kirişler için başlangıç hasar mekanizması haritalarını oluşturmuşlardır. Sandviç kirişlerin başlangıçtaki hasar modlarının sandviç kirişlerin geometrisi ve malzeme özelliklerine bağlı olduğu gösterilmiştir.

Sisi ve diğerleri [49] farklı ağırlıklıların düşürülmesi ile tekrarlı düşük hızlı darbeye maruz kalan tabakalı kompozit kirişlerin dinamik davranışı için teorik bir model sunmuşlardır. Analizlerinde yüksek mertebeden kayma deformasyon kiriş teorisini kullanmışlardır ve tabakalı kompozit kiriş ile darbe kuvvetleri arasındaki etkileşimi modellemek için değiştirilmiş Hertz temas yasasını kullanmışlardır. Hareketin lineer olmayan ikinci derece kısmi diferensiyel denklemlerini, ikinci tür Lagrangian denklemlerini kullanarak türetmişlerdir. Formülasyonun geçerliliğini mevcut çözümleri literatürde bulunan sonuçlarla karşılaştırarak doğrulamışlardır. Sayısal sonuçlar, temas kuvvetleri, kiriş deplasmanları, kiriş tarafından sönmülenen enerjiler ile normal ve kayma gerilmeleri üzerinde çarpma zamanının önemli bir rol oynadığını göstermişlerdir.

Jiang ve diğeri [50] üç nokta eğilmeye maruz sandviç kirişlerin hasar mekanizmasını incelemişlerdir. Alüminyum yüzey malzemesi ve kapalı hücreli alüminyum köpük çekirdeklerle sandviç kirişlerin statik olarak üç nokta eğilme üzerine deneysel araştırmalarını yapmışlardır. Hasar tipinin ve yük taşıma kapasitelerinin analitik tahminleri, deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum göstermiştir. Yüzey malzemesinin akması, çekirdek kayması ve batması olmak üzere üç farklı hasar tipi analiz edilmiştir. Hasar tiplerinin ve yük taşıma kapasitesinin teorik tahminlerinin, statik yüklemdeki deneysel sonuçlar ile iyi uyum içinde olduğunu gösterdiler. Mevcut modele göre hasar tahminleri, değiştirilmiş Gibson modeli ile elde edilenden daha doğru sonuçlar vermiştir.

Xu ve diğeri [51] otomatik kesme ve kalıp presleme işlemine dayanan kademeli oluklu kafes göbekli sandviç yapıların oluşturulması için yeni bir yöntem sunmuşlardır. Oluşturulan sandviç kirişlerin eğilme direncini, mukavemetini ve hasar mekanizmasını analitik model ile de incelemişlerdir. Çapraz göbekli sandviç kirişlerin eğilme davranışı üzerindeki geometrik parametrelerin hassasiyetini göstermek için, iki tür oluklu kafes sandviç panelleri imal etmiş ve farklı hasar tiplerini incelemek için test yapmışlardır. Sonuçları kiriş çekirdeği değişiminin sandviç kirişlerin eğilme davranışları üzerinde etkin olduğunu göstermiştir.

Bernard ve diğeri [52] karbon fiber kompozit sandviç kirişlerin birleşik eğilme-burulma hallerinin statik ve dinamik davranışlarını araştırmışlardır. Kiriş teorisi uygulanarak statik açıdan sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca doğal frekanslar ve mod şekilleri incelenmiştir. Tüm etmenler dikkate alınarak yapılan sonlu eleman analizi sonuçları ile deneysel sonuçlar mukayese edilmiştir.

Qin ve diğeri [53] düşük hızlı darbe altındaki metal köpük çekirdekli sandviç kirişlerin dinamik tepkisini incelemek için birleşik yerel kırılmaları ve küresel deformasyonları dikkate alarak teorik bir modeli geliştirmişlerdir. Analizleri, yapının küresel deformasyonuna ve atalet etkisine odaklanmıştır. Büyük deformasyon etkileri membran faktörü yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Model tahminlerini doğrulamak için bir dizi sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Model tahminleri sonlu eleman analizi sonuçları ile iyi uyum sergilemiştir. Sandviç

kirişlerin, deformasyon arttıkça güçlendiği sonucuna varılmıştır.

Morada ve diğerleri [54] epoksi reçine ve alümina trihidrattan (ATH) oluşan hibrit çekirdekli yeni bir sandviç kirişin mekanik davranışlarını araştırmışlardır. Batma modu ile çekirdek kayması hasar modu arasındaki etkileşimler, yüzey/çekirdek arasındaki hasar mekanizmasının bir parçası olarak değerlendirilmiştir. Dijital görüntü korelasyon tekniği (Digital Image Correlation), statik yükleme esnasında hasar ve gerilme alanını belirlemek için kullanılmıştır. Sandviç yüzey malzemesi ve çekirdekteki hasar gelişimini tahmin etmek için açık lineer olmayan sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Model, çekirdek malzemenin şekil değiştirme oranına bağlı davranışını tahmin etmek için bir viskoplastik hasar modeli içermektedir. Sandviç kirişlerin hasarında çekirdekteki kayma hasarının ana rolü oynadığı bulunmuştur. 60 J altı bir darbe enerjisi için, batmanın baskın hasar tipi ve bu hasar tipinin kirişin eğilme tepkisi üzerindeki etkisi gösterilmiştir.

Ji and Waas [55] düzlem içi aksenal darbe yüklenmesine maruz bırakılan sandviç yapıların dinamik tepkilerini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Deneysel yöntemde, tüm yapıların testinden önce sandviç sütunların ayrıntılı zamansal tepkilerini yakından incelemek için yüksek hızlı kameralar kullanmışlardır. Hasar modunun, çekirdek kalınlığından önemli ölçüde etkilendiği bulunmuştur. Sonlu eleman analizleri hasar mekanizmasını daha iyi anlamak için gerçekleştirilmiştir. Kohezif bölge modeli (CZM), yüzey malzemesi ile çekirdek arasındaki arayüzde delaminasyon hasarını modellemek için kullanılmıştır. Arayüz hasarı, yüzeyin dinamik olarak burkulmasıyla sağlanmıştır.

Chen ve diğerleri [56] sandviç kirişleri, iki cam elyaf/epoksi kompozit yüzeyli bir PVC köpük çekirdek içerecek şekilde vakum infüzyon yöntemi ile hazırlayarak, mekanik özelliklerini tespit etmek için düşük hızlı darbe testi ve üç nokta eğme testlerini yapmışlardır. PVC köpük ve yüzey malzemesi arasındaki yapışmanın geliştirilmesi için mekanik özellikleri farklı, aynı uzunluk ve yoğunlukta aramid, karbon ve cam fiber gibi farklı yüzey malzemeleri kullanılmıştır. Bu yapılar ile ara yüzey takviye elemanı kullanılmayan kirişler karşılaştırıldığında eğilme mukavemeti %100 'e kadar artmış üç nokta eğme altında ise %161 'e kadar artmıştır. Farklı fiber

arayüz dağılım özellikleri taramalı elektron mikroskopu kullanılarak test edilmiştir.

Sabah ve diğerleri [57] düşük hızlı darbe davranışının iyileştirilmesi için, kauçuk ve alüminyum bal peteği çekirdekli karbon fiber kompozit yüzey malzemeleri içeren, ağaçkakan kafasından esinlenerek sandviç kiriş geliştirmişlerdir. Geleneksel sandviç kirişlere kıyasla, deney ve sayısal yöntemlerle üç darbe enerjisi seviyesinde karşılaştırmalı bir çalışma yapılmıştır. Her durumda, kirişler daha yüksek darbe kuvveti taşıırken, düşük gerilme, deformasyon ve hasar alanı ile alışılmış sandviç yapılarda daha üstün özellik sergilemişlerdir.

Schneider ve diğerleri [58] tamamen kendinden güçlendirilmiş polietilen tereftalat'dan yapılmış oluklu sandviç kirişleri üretmiş ve düşük hızlı darbe testine maruz bırakarak dinamik davranışlarını araştırmışlardır. Ayrıca kendinden güçlendirilmiş polietilen tereftalat'ın şekil değiştirme hassasiyetlerini araştırmışlardır. Düşük hızlı darbe davranışını tahmin etmek için üç boyutlu bir sonlu eleman modeli geliştirilmiş ve deney sonuçları ile iyi bir uyum bulunmuştur. Kendinden güçlendirilmiş poli etilen tereftalat'dan yapılan oluklu sandviç kirişlerin, havacılık sınıfı alüminyum ve karbon elyaf/yüksek performanslı köpük sandviç içerisindeki eşit kütle ve geometriye sahip benzer sandviç kirişlere kıyasla daha etkili dayanıma sahip oldukları bulunmuştur.

Airol di ve diğerleri [59] bileşik yapıların delaminasyon analizi için sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplamalı olarak etkin bir teknik önermişlerdir. Yaklaşımında, düzlem içi ve dışı kompozit tabakanın rijitliği, farklı malzeme fazları ile temsil edilmiştir. Tabakalar, düzlem içi gerilme bileşenlerini taşıyan iki boyutlu elemanlar tarafından modellenmiştir. Tabakalar, düzlem dışı gerilme bileşenlerini taşıyan üç boyutlu elemanlarla birbirine bağlanmış ve enine kayma rijitliği hesaba katılmıştır. Kohesif bölge modelleri, bağlantı elemanları içindeki tabakalar arası hasarı temsil edecek şekilde uyarlanmıştır. Yapılan sayısal analizlerin ve deneysel sonuçların tümü, kompozit tabakaların delaminasyon başlangıcından önce tepkisinin, önerilen teknikle yeterince arttırıldığını göstermiştir.

Al-Shamary ve diğerleri [60] farklı köpük çekirdek türlerinden oluşan sandviç kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır.

Darbe enerjisi seviyeleri için sönümlenen enerjiler, en büyük temas kuvvetleri ve en büyük sandviç panel deformasyonu belirlenmiştir. Darbe enerjisi arttıkça, yüzey tabakalarında fiber kırıkları, cam-epoksi tabakaları arasındaki delaminasyonlar, çekirdek kırıkları ve batma hasarları görsel muayene ile gözlemlenmiştir. İki iç yüzey malzemesi ile önerilen yeni köpük çekirdek tasarımı ile sandviç kompozit, cam fiber yüzey plakaları arasında bir polivinil klorid (PVC) köpük çekirdeğinden oluşan sandviç panellere kıyasla yüksek enerji sönümleme kapasitesi sergilemiştir. Çekirdek malzeme çeşitliliğinin artmasıyla en büyük temas kuvveti değerleri azalmıştır.

El-Sisi ve diğerleri [61] delik içeren kompozit malzemelerin üç boyutlu aşamalı basit hasar modelini ANSYS® yazılımına kullanıcı altprogramı (USERMAT) ile uyarlamışlardır. Katman azaltma modeli (ply discount model, PDM), basit hasar ilerleme modeli (simple progressive damage model, SPDM) ve sürekli ortam hasar mekaniği modeli (continuum damage mechanics model, CDMM) olmak üzere üç farklı model kullanmışlardır. Sürekli ortam hasar mekaniği modeli sonlu eleman büyüklüğüne en az bağımlılığı göstermiştir. Doğrusal (lineer), ikinci dereceden (quadratic) ve bozunum (degradation) olmak üzere üç farklı hasar ilerleme modeli kullanmışlardır ve hasar yükü tespiti açısından bu üç kural arasında anlamlı bir fark oluşmamıştır.

Literatür araştırması, sandviç paneller ve kirişler, yüzey malzemeleri, çekirdek malzemeleri, kompozit malzemeler, statik ve dinamik yükler altındaki mekanik davranışlar ve bu davranışların önceden tahmini açısından ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Sandviç yapıların davranışlarının sayısal ve deneysel yöntemlerle tespit edilmesi güvenilir yapıların imali için çok önemlidir. Yapılan bir çok araştırmada kompozit malzemelerin sayısal modelinin ve hasar tespitinin önemine ve zorluğuna dikkat çekilmiştir. Literatür araştırmasında sandviç yapılarda kullanılan çekirdek malzemelerinin tümü ayrıntılı açıklanmıştır. Bir çok araştırma yapıştırıcı katmanını dikkate almış ve modellemiştir. Kompozit sandviç yapılarda kalınlık boyunca gerilmeler oldukça etkilidir, bu nedenle ve kompozit malzemelerin iki boyutlu modeli, dinamik davranışları tahmin etmekte yetersiz kalmaktadır. Üç boyutlu malzeme ve hasar modelleri kompozit tabakaların davranışını çalışırken dikkate almıştır. Bu tez çalışmasında 3 boyutlu malzeme ve hasar modeli kompozit tabakalara uygulanmış,

PVC köpüklü sandviç kirişleri eğilme darbe davranışları incelenmiştir. Kırılma mekaniği temelli kohezif bölge modeli, hem kompozit malzemenin tabakalar arasında hemde kompozit malzeme ve köpük çekirdek malzemesi arasında tariflenerek tabakalar arası ayrılmalar dikkate alınmıştır. Sandviç kiriş yapıların düşük hızlı darbe altında dinamik davranışları sayısal ve deneysel olarak incelendikten sonra, sanki-statik yükleme altındaki davranışı ile mukayese edilmiştir.



2. BÖLÜM

DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEM

Bölüm 1’de sandviç kirişlerin statik ve dinamik yükler altındaki davranışları hakkında ayrıntılı bir literatür araştırması yapılmıştır. Bu bölümde ise sandviç kirişlerin eğilme darbe davranışlarının incelenmesindeki deneysel ve sayısal yöntemler irdelenmiştir.

2.1. Deneysel Yöntem

Çekirdeği köpük, yüzey plakaları metal ve tabakalı kompozit olan sandviç kirişlerin dinamik ve sanki-statik yükler altındaki eğilme davranışının deneysel olarak incelenmesinde şu adımlar takip edilmiştir:

- Metal plakaların temini ve uygun boyutlara getirilmesi,
- Fiber takviyeli tabakalı kompozit plakaların üretimi için gerekli olan sarf malzemelerin temini,
- Vakum infüzyon yöntemi ile kompozit plakaların üretimi ve uygun boyutlara getirilmesi,
- Köpük malzemesinin temini ve uygun boyutlara getirilmesi,
- Yapıştırıcı malzemesinin temini,
- Yapıştırma işlemi için malzemelerin hazırlanması ve yapıştırma işlemi,
- Üretilen sandviç kirişlere darbe testleri için uygun sınır şartlarının oluşturulması,



Şekil 2.1. Ceast marka Fractovis Plus düşük hızlı darbe test cihazı

- Fractovis Plus düşük hızlı darbe test cihazı (Şekil 2.1) ile deneylerin yapılması ve deneysel verilerin toplanması,
- MTS üniversal test cihazında statik olarak eğilme testinin yapılması (Şekil 2.2),
- Kompozit kirişlerde meydana gelen iç hasarların tespiti için Mikro-Ct analizlerinin (X-ray Radyografi, Şekil 2.3) yapılması,
- Bilgisayar ortamında deneysel verilerin işlenmesi ve yorumlanması,

2.1.1. Kompozit Plakaların Üretilmesi ve Numune Hazırlama

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin vakum infüzyon yöntemi ile üretilmesi, sandviç yapının diğer malzemelerinin temini ve deney numunelerinin hazırlanması bu konu başlığı altında anlatılmıştır.



Şekil 2.2. MTS üniversal test cihazı



Şekil 2.3. Bruker Skyscan marka mikro-Ct test cihazı

2.1.1.1. Vakum İnfüzyon Yöntemi ve Plaka Üretimi

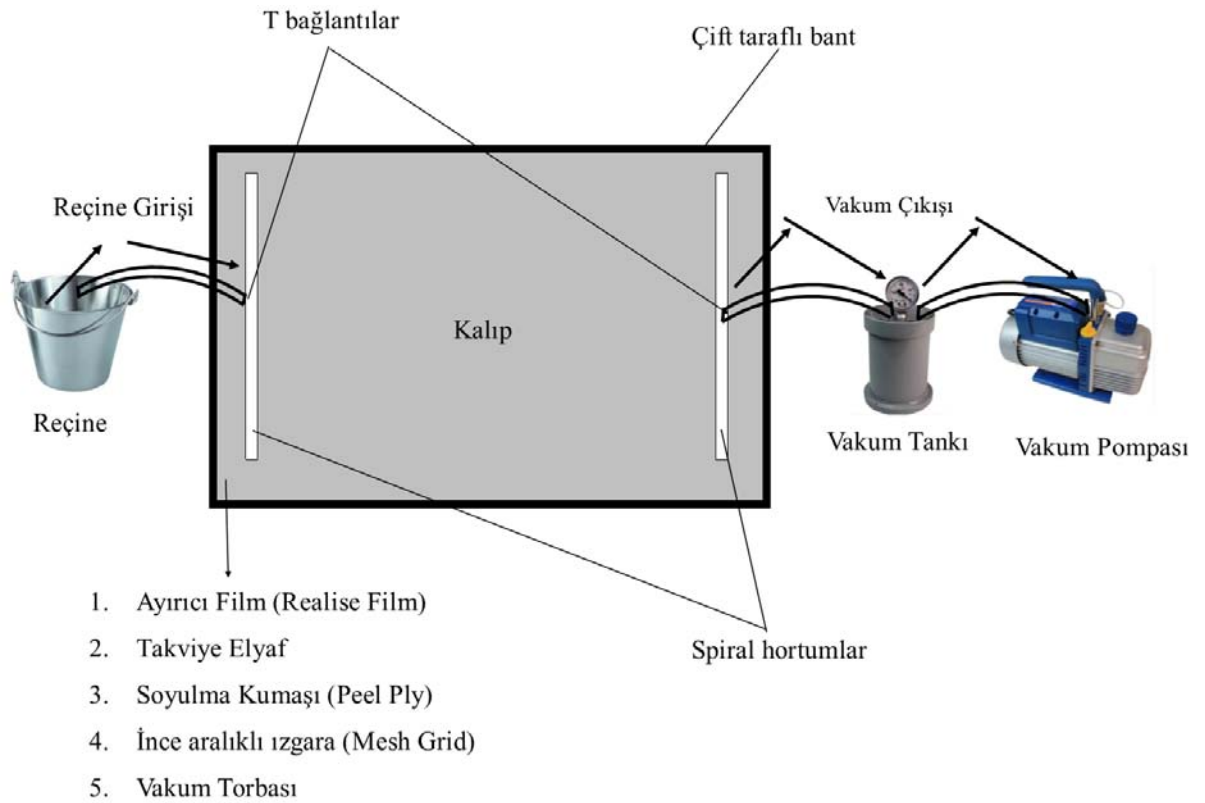
Vakum infüzyon yöntemi 1980'li yıllardan beri başta A.B.D. olmak üzere tüm dünyada, farklı sanayi dallarında uygulanmakta olan bir kompozit imalat yöntemidir. Vakumlanmış ortam içerisinde reçinenin ilerlemesi prensibiyle çalışan bu yöntemde, imalat hazırlıkları tamamlanmış ürünün el değmeden üretimi

amaçlanmaktadır. Çoğu zaman karmaşık yapılara sahip kompozit elemanların üretimi için kullanılan bu yenilikçi metotta, malzemelere emdirilen reçinenin uygun viskoziteli olması önemlidir. Dar aralık ölçülerinin ve uzun akış yollarının söz konusu olduğu yerlerde reçinenin mümkün olduğu kadar kısa sürede güçlendirme elyaflarına emdirilmesi gerekmektedir.

İnfüzyon yönteminin genel sistemi aynı olmakla beraber uygulama yolları farklılıklar gösterebilmektedir. Sistemin en genel tanımıyla; kapalı ortam içinde reçinenin vakum deliğine doğru ilerlemesidir. İnfüzyon yöntemi dört bölümden oluşur: Vakum pompası, vakum tankı (reçine toplama tankı), kalıp ve reçine kovası (Şekil 2.4). Bu dört bölümün bağlantıları ve şekilleri değişebilir ancak genel sistem mantığı hep aynıdır.

Vakum infüzyon yöntemi ile malzeme üretim aşamaları şu şekildedir:

- Kalıp yüzeyinde çizik, toz ya da yağ türü yabancı maddeler bulunmamalı ve kalıp daha önce kullanılmışsa üzerindeki kalıp ayırıcı kalıntılarından da arındırılmalıdır.
- Temizlenen kalıp yüzeyine kalıp ayırıcı uygulanır. Kalıp ayırıcı özel bir film tabaka ise (Realise Film) ise çift taraflı bant ile kalıba yapıştırılır.
- Üst üste takviye malzemeleri (karbon elyaf) konulur, aralarına kaymamaları için yapıştırıcı püskürtülür. Takviye malzemelerin kenarları kalıba uygun olarak kesilir.
- Yüzey pürüzlülüğünü sağlayan katman (Peel Ply) tüm kalıp üzerine serilir ve yapıştırıcı ile takviye malzemelerinin üzerine yapıştırılır.
- Peel ply üzerine reçinenin kolay bir şekilde ilerleyebilmesi için ince aralıklı ızgara katmanı (Mesh Grid) serilir.



Şekil 2.4. Vakum infüzyon yönteminde kullanılan elemanlar ve sistemin şematik görünümü.

- Kalıbın çevresine göre reçine hatları ve vakum hatları ayarlanır.
- Vakum torbası kalıp üzerine yeterli derecede baskı yapabilmesi için kalıba göre kesilir, özellikle derin kalıplarda elyaf yüzeyine tam olarak basması gerektiğinden derinlik hesaba katılarak kesilmelidir. Kesildikten sonra infüzyon macunu veya çift taraflı bant ile kalıp etrafına sızdırmaz şekilde yapıştırılır.
- Vakum infüzyon düzeneğine vakum göstergesi bağlanır ve vakum pompası açılır. Vakum torbasında kaçak olup olmadığı vakum göstergesi ve kaçak detektörü ile kontrol edilir.
- Reçine geçişini sağlayacak bağlantı aparatları düzener üzerine bağlanır.
- Gerekli reçine miktarı hazırlanır, bu miktar hazırlanırken hortum içinde kalacak reçine de hesap edilmelidir. Reçineye gerekli katkı maddeleri eklenir ve karıştırılır.
- Hortumlar bağlantı aparatları takılarak reçine akışına başlanır. Kalıbın her noktası reçine ile ıslanana kadar işleme devam edilir. En son kalıbın köşe noktaları

ıslanır. Tüm noktalar ıslandıktan sonra tüm reçine besleme hatları kelepçe ile kapatılır.

- Parça, vakum altında tamamen sertleşene kadar tutulur. Sızdırmaz bant ayrılarak, önce torba kalıptan sökülür ve reçine akış hatları temizlenir. Daha sonra parça kalıptan çıkarılır.

Vakum infüzyon yöntemi, karmaşık şekilli parça üretiminde, yat imalatında, tren ve kamyon gövdelerinin imalatında, rüzgar türbin kanatlarının yapımında gibi bir çok alanda kullanılır.

Tez çalışmasında karbon fiber kumaşlar kullanılmıştır. Karbon fiber kumaş İtalya'nın Saati şirketinde Toray ipinden tek yönlü olarak (Uni-directional,UD) üretilmiş ve 300 kg/m^3 yoğunluğa (T700s) sahiptir. Üretici firma tarafından paylaşılan teknik bilgiler Tablo 2.1'de gösterilmektedir. Sandviç kirişin yüzey plakalarını oluşturan kompozit plakalar yaklaşık olarak 1 mm (4 katman) ve 2 mm (8 katman) kalınlığında üretilmiştir. Tek yönlü olarak üretilen plakalar, istenilen fiber açısı, 0° , 45° ve 90° olmak üzere, yüksek hızlı dairesel testere kullanılarak, 30×200 mm kiriş boyutlarında kesilmiştir (Şekil 2.5).

Tablo 2.1. Seçilen fiber malzemesinin teknik özellikleri

Malzeme	Toray T700S 12 K karbon fiber
Çekme elastisite modülü(GPa)	230
Çekme mukavemeti (MPa)	4900
Yoğunluk (kg/m^3)	1.8



Şekil 2.5. Kompozit plakaların numune boyutlarına getirilmesi ve çalışmada kullanılan yüzey malzemeleri

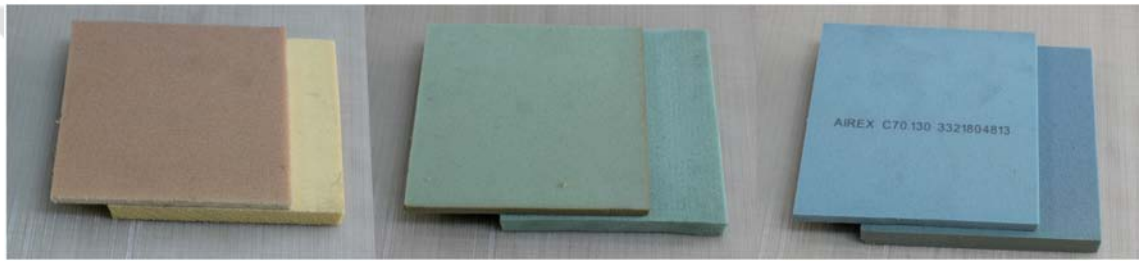
2.1.1.2. Numune Hazırlama

Sandviç kiriş malzemelerinin temininden ve kompozit üretiminden sonra numune hazırlama işlemine geçilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan diğer bir yüzey malzemesi alüminyum alaşımı (Al-5754-H111) metal plakalar, 1 mm kalınlığında temin edilmiş ve kiriş boyutlarına 30x200 mm olarak gyotin tezgahında kesilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan çekirdek malzemesi ayrıntılı bir literatür araştırması sonucunda darbe sönümleyici olarak mühendislik yapılarında kullanılan uluslar arası piyasada önemli bir yere sahip olan AIREX[®] C70 serisi düz, plaka yapısal PVC köpük seçilmiştir. AIREX[®] C70, mükemmel bir rijitlik ve ağırlık oranına karşı büyük bir sertlik ile kapalı hücreli, çapraz bağlı sert köpüktür. Oldukça dayanıklı ve düşük bir su emme hızı ve mükemmel kimyasal dirence sahiptir. Tüm yaygın reçine sistemleri ve işlemleri ile işlenebilir. İnce hücreli yapı, yüzey malzemeleri ile mükemmel yapışmasına olanak sağlar. AIREX[®] C70, dinamik veya statik yüklere maruz kalan birçok hafif sandviç yapı için ideal çekirdek malzemesidir. AIREX[®] C70 çekirdek malzemesinin bazı uygulama alanları şu şekildedir:

- Gemi ve tekne yapıları (gövde, güverte, bölme, üst yapılar, iç teçhizat)
- Demiryolu ve kara taşıtları (zemin ve tavan parçaları, kapılar, iç teçhizat, bölme duvarları, yan etekler)
- Rüzgar enerji santralleri (rotor kanatları, kapaklar, jeneratör kasaları)
- Havacılık (spor uçakları için gövde ve kanat parçaları, mutfak arabaları)
- Eğlence (sörf tahtaları, snowboardlar)
- Endüstriyel bileşenler (aletler, tanklar, borular, kaplar, kapaklar)

Çekirdek malzemesi sandviç kirişlerin düşük hızlı darbe performansına etki eden önemli bir etken olduğu için, bu performansı etkileyen tüm parametreler irdelenmiştir. AIREX[®] C70.55 ($\sim 60 \text{ kg/m}^3$), C70.75 ($\sim 80 \text{ kg/m}^3$) ve C70.130 ($\sim 130 \text{ kg/m}^3$) yoğunluklara sahip PVC köpükler tercih edilmiştir ve seçilen her bir yoğunluk için 10 ve 20 mm olmak üzere iki farklı kalınlık kullanılmıştır (Şekil

2.6). PVC köpük malzemeler yurt dışından temin edilmiştir. Büyük boyutlarda temin edilen köpük malzemeleri 30x200 mm sandviç kiriş boyutlarında yüksek hızlı masa üstü tezgah tipi testere ile kesilmiştir. Doğrama işlemlerinden sonra yapıştırma öncesi 30x200 mm boyutlarında, 1 ve 2 mm kalınlığında kesilmiş yüzey plakalarının yapıştırıcı arayüzeyi olacak şekilde yüzeyleri etanol (C_2H_6O) ile yeterince temizlenmiştir. Etanol, plakalar üzerinde bulunan yapıştırma kalitesini olumsuz etkileyecek yağ artığı, kir ve toz kalıntılarının giderilmesinde oldukça başarılı sonuç vermiştir. Temizleme işlemlerinden sonra plakalar yapıştırılmaya hazır hale gelmiştir.



Şekil 2.6. Çalışmada kullanılan köpük malzemeleri

Yapıştırılması düşünülen malzemelerin boyutlarının büyük olması nedeniyle malzemelerin yapıştırılmasında düzgün kalınlıklı bir yapıştırıcı tabakasının elde edilmesi fazladan özen gösterilmesi gereken bir adım olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapıştırma işleminin başarılı olması, düzgün dağılmış bir yapıştırıcı tabakasının elde edilmesi amacı ile plakalara baskı uygulayacak, yapıştırıcı tabakasının kalınlığını kontrol altına almaya yarayacak yapıştırma aparatı tasarımına ihtiyaç duyulmuştur. Gerekli ön incelemeler ve çalışmalardan sonra yapıştırma aparatı imalatı yapılmıştır. Yapıştırma aparatı 5 mm kalınlığında alt ve üst olmak üzere iki çelik plakadan oluşan bir alettir (Şekil 2.7). Yapıştırılacak plakalar ile temas eden yüzeyler hassas bir şekilde talaşlı imalat ile işlenmiştir. Aparat plakalarını birbirine bağlayacak alt plakada altı adet M6 civata deliği, üst plakada ise yine altı adet $\phi 6.3$ mm'lik delik bulunmaktadır. Aparatın alt ve üst plakaları arasına yerleştirilecek yapıştırılması düşünülen malzemelere civatalar sayesinde baskı uygulanması mümkün olmaktadır. Yapıştırma kalınlığını kontrol altında tutma görevini aparatların alt ve üst plakaları arasına kalınlığı üretilecek numunenin yapıştırıcı kalınlığında dahil olduğu kalınlıkta olan altı adet pim yerleştirilmiştir. Bu sayede yapıştırıcı kalınlığı



Şekil 2.7. Deney numunesi üretim aşamaları

kontrol altına alınmıştır. Yapıştırma işleminde kullanılan ayardan yirmi takım imal edilmiştir. Bu sayede aynı anda yirmi adet numune yapıştırılabilmektedir.

Yapıştırılacak malzemeler arasında sürülen Araldite® 2015 çift fazlı endüstriyel yapıştırıcının oda sıcaklığında en iyi mukavemete sahip tabaka oluşturma süresi ortalama 48 ile 72 saat arasındadır. Yapıştırılan plakalar 72 saat süre zarfında aparat içinde baskı altında tutulmuştur. Plakaların etanol ile temizlenmiş yapıştırıcı arayüzlerine sürülen Araldite® 2015, bir mala kullanılarak düzgün bir şekilde plaka yüzeyine dağıtılmaktadır. Mümkün olduğunca hava boşlukları ve kabarcıklar giderilmiştir. Fakat yapıştırıcı miktarı el ile ayarlandığı için kütle kontrolü hassas bir şekilde sağlanamamaktadır. Aparat plakaları arasında baskıya uğrayan yapıştırılmış malzemelerin arasından fazla gelen yapıştırıcı dışarı doğru sızmaktadır. Sızma yapan fazlalık yapıştırıcı numuneler açısından bir problem teşkil etmemesine rağmen, yapıştırılmış malzemeler ile aparat arasında bağ oluşturmaktadır. Baskı aparatını yapıştırılmış malzemelerden kolayca ayırmak ve artan yapıştırıcının aparat üzerinden temizlenmesini kolaylaştırmak amacıyla aparatın plakalar ile temas eden iç yüzeylerine her yapıştırma işleminden önce sıvı parafin sürülmüştür. Sıvı parafin sayesinde artan yapıştırıcı aparat üzerinde artık oluşturmamakta, baskı civataları

açıldıktan sonra yapıştırılmış plakalar kolayca aparat üzerinden alınmaktadır. Bununla birlikte, artan yapıştırıcı miktarı gereğinden fazla olması durumunda oluşan artık yapıştırıcı tabakasının yüzey alanı geniş olmaktadır. Bu durumda aparat üzerinde parafin olmasına rağmen artık yapıştırıcıyı ve yapıştırılmış malzemeleri aparat üzerinden ayırmak sıkıntılı olabilmektedir. 72 saat aparat arasında kalan yapıştırma işlemi tamamlanmış numuneler, aparatlardan ayrıldıktan sonra, yan yüzeylerindeki artık yapıştırıcılardan pense yardımı ile temizlenmiştir. Plakaların üzerinde kalan başka bir artık malzeme ise sıvı parafindir. Sıvı parafin havlu, kağıt peçete yardımı ile temizlenmiştir. Temizleme işlemi biten numuneler düşük hızlı darbe testi için hazırdırlar. Numuneler test cihazına vida ile bağlanmaktadır. Bu açıdan numunelerde vida deliklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Numuneler üretildikten sonra üç eksen CNC router tezgahında ve matkap tezgahında numunelere $\phi 6$ mm vida delikleri açılmıştır. Numune hazırlama adımlarının resimleri Şekil 2.7 de sunulmuştur. Sandviç yapı için yapıştırma işlemleri yeteri miktarda numune üretilene kadar tekrarlanmıştır.

2.1.2. Düşük Hızlı Darbe Testleri

Numune üretimleri bittikten sonra düşük hızlı darbe testlerine geçilmiştir. Darbe testlerinin Fractovis Plus test cihazında gerçekleştirilebilmesi için numunelerin cihaza bağlanması gerekmektedir. Cihaz ile birlikte standartlara uygun bağlama aparatı gelmediği için bağlama aparatına ihtiyaç duyulmuştur. Bağlama aparatının nasıl bir işleve sahip olacağına karar verilmiş ve aparat imalatı yapılmıştır. Aparatlar hakkında ayrıntılı resimler ileriki bölümlerde ifade edilmektedir.

Bağlama aparatı yardımıyla deney numuneleri düşük hızlı darbe test cihazına bağlanmıştır (Şekil 2.8 a). İstenilen kalitede yapıştırma işlemi gerçekleşmeyen numuneler ön testlerde kullanılmış, oluşan temas kuvvetlerine göre tercih edilmesi gereken cihaz ayarları bu safhada gerçekleştirilmiştir. Ön denemeler yapıp cihazın ayarları yapıldıktan sonra bütün parametreler için testler yapılmıştır.

Tablo 2.2'de verilen enerji seviyeleri kullanılmıştır. Herbir parametre ve enerji seviyesi için testler en az iki defa tekrarlanmıştır. Ön iki testten elde edilen temas

kuvveti grafikleri birbiri ile benzerlik gösterdikleri takdirde diğer teste geçilmiştir. Yapılan tekrarlı testlerden elde edilen sonuçların birbirine büyük oranda benzemesi hem yapıştırmanın hemde yapılan deneyin sağlıklı olduğunu göstermiştir.

Deneylemlerden sonra Fractovis Plus düşük hızlı darbe test cihazından elde edilen temas kuvvetinin ve çökmenin zamana göre değişim grafikleri bilgisayar ortamına taşınmıştır. Cihazdan elde edilen temas kuvveti grafikleri doğrudan gerinim ölçerden (strain-gauge) elde edilen verilerdir. Fakat çökme miktarları cihazın hareket sensörlerinden hesaplanmaktadır.

Tablo 2.2. Kompozit sandviç kirişlerin darbe enerji seviyeleri

Enerji Seviyesi (J)	Kütle (kg)	Vurucu hızı (m/s)
5	5.302	1.37
10	5.302	1.95
20	5.302	2.75

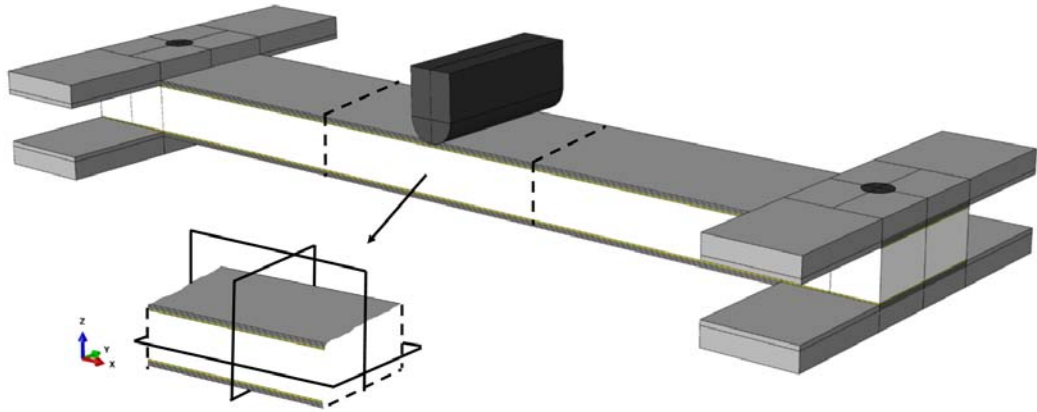
Düşük hızlı darbe testleri yapıldıktan sonra, sandviç kirişlerin statik yükler altındaki davranışında incelemek için, MTS marka çekme-basma test cihazı sandviç kirişlerin sanki-statik eğilmeye karşı gösterdiği tepkiler araştırılmıştır. Düşük hızlı darbe ile karşılaştırabilmek için aynı sınır şartları ve vurucu geometrisi altında testler yapılmıştır (Şekil 2.8 b).



Şekil 2.8. (a) Numunelerin düşük hızlı darbe test cihazı ve (b) çekme-basma test cihazına bağlanması

2.1.3. Düşük Hızlı Darbe Testleri Sonrası Mikro-Ct Analizleri

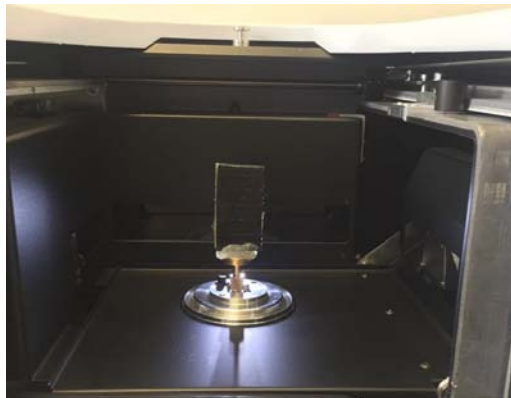
Düşük hızlı darbe testleri ve statik eğilme testleri yapıldıktan sonra deney sonrası işlemlere geçilmiştir. Testler sırasında deney numunelerinin fotoğrafları çekilmiştir.



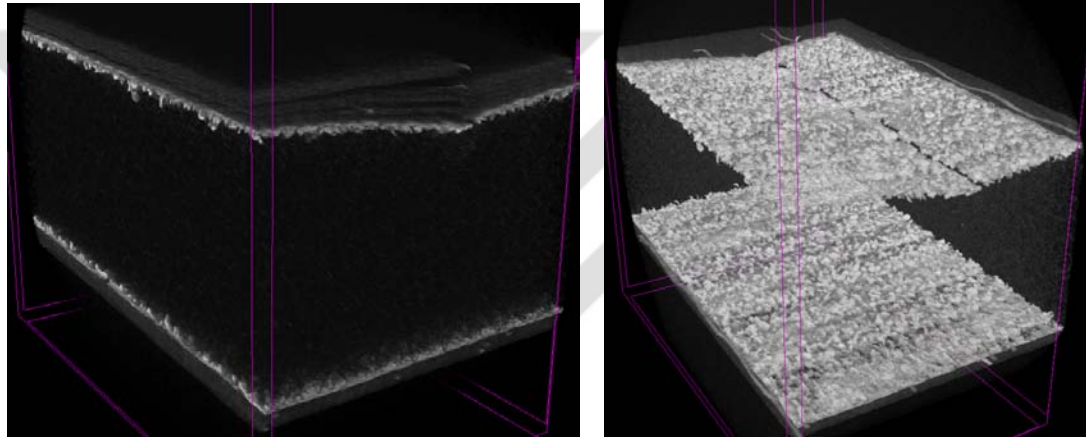
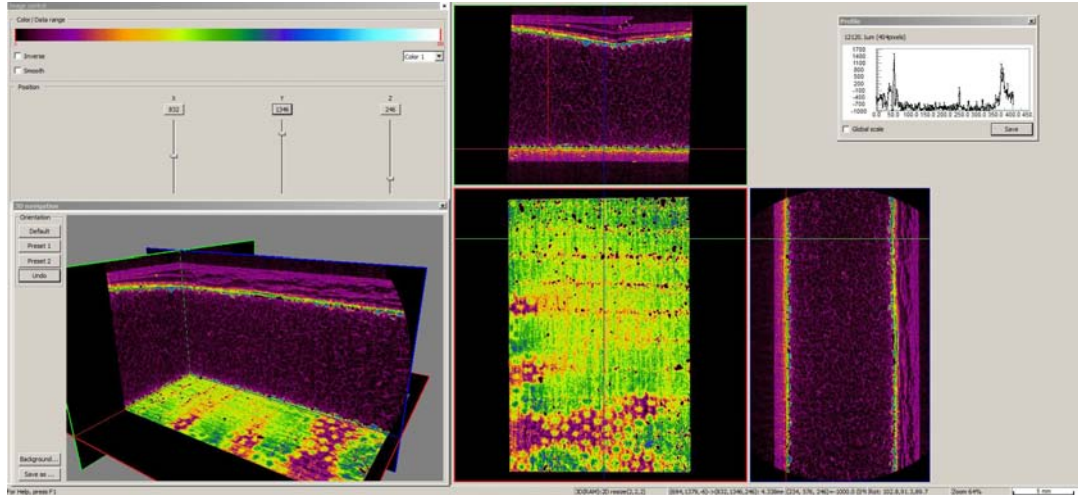
Şekil 2.9. Sandviç kirişin Mikro-Ct analizleri yapılan bölgesi ve analiz eksenleri

Kompozit malzemelerde ve birleşme yüzeylerindeki hasarların tespiti için Mikro-Ct (radyografik) muayeneler yapılmıştır. Mikro-Ct analizleri ise Erciyes Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Araştırma Laboratuvarında yapılmıştır. Analizler, tüm parametreler için en yüksek darbe enerjisi altındaki numuneler için yapılmıştır. Mikro-Ct analizi ile X-ray radyografi tekniği kullanarak üç eksende tarama yapılabilmektedir. Bu sayede numunenin üç boyutlu katı modelini, tarama yapılan piksel hassasiyetine göre eksenler boyunca numunenin piksel piksel kesit görüntülerini, görüntü işleme ve element analizleri yapılabilmektedir. Cihaz tarafından yaşanan tek problem numune boyutlarıdır. Cihazın kapasitesi, 3x6 cm boyutlarındaki numuneler içindir. Bunun için deneyleri yapılan sandviç kirişlerin darbe bölgeleri (sandviç kirişin orta bölgesi) kesilerek Mikro-Ct analizleri için hazırlanmıştır. Kesilen bölgenin tarifi ve eksenlere göre tarama yönleri Şekil 2.9'da gösterilmiştir.

Şekil 2.10'de Bruker Skyscan Mikro-Ct test cihazına numunelerin bağlanması



Şekil 2.10. Numunenin Bruker Skyscan Mikro-Ct cihazına bağlanması ve analizi



Şekil 2.11. Bruker Skyscan Mikro-Ct yazılımları ile kesit görüntülerinin alınması, üç boyutlu modelin oluşturulması ve element analizi ile yapıştırıcı katmanlarının görüntülenmesi

gösterilmektedir. Üç boyutlu tarama, numunenin şekildeki durduğu pozisyonda eksenini etrafında döndürülmesi ile oluşmaktadır. Taramalar yapıldıktan sonra farklı yazılımlar ile üç boyutlu katı model oluşturmak mümkündür. Oluşturulan katı model daha sonra tarama yapılan piksel boyutlarında kesit görüntülerine dönüştürülebilmektedir. Üç ekseninde aynı anda kesit görüntüleri almak mümkündür. Tarama sonuçlarına element analizi yapılarak (X ışınına soğurma kat sayısına göre) farklı malzemelerdeki hasar alanları görüntülenebilmektedir. Bu sayede yapıştırıcı katmanı görüntülenerek hasara uğrayan bölge incelenebilmiştir (Şekil 2.11).

2.2. Sayısal Yöntem

Çekirdeği PVC köpük, yüzey malzemeleri tabakalı kompozit ve metal plakalar olan sandviç kirişlerin düşük hızlı eğilme darbe davranışları üç boyutlu (3B) lineer

olmayan dinamik sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Kompozit sandviç kirişlerin darbe davranışına etki eden parametreler öncelikle belirlenmiştir. Kompozit sandviç kirişin çekirdek ve yüzey malzemeleri ayrıntılı bir şekilde 'Deneysel Yöntem' başlığı altında anlatılmıştır. Kompozit sandviç kirişlerin sayısal analizinde kullanılan yöntemler ise bu bölümde anlatılmıştır. Sandviç kiriş yapıyı oluşturan malzemelerin sayısal modelleri ayrı ayrı irdelenmiştir.

2.2.1. Kompozit Plakaların Modellenmesi

Kompozit sandviç kirişlerin yüzey malzemesini oluşturan fiber takviyeli tabakalı kompozit plakaların sonlu elemanlar modeli üzerine literatürde oldukça fazla çalışma bulunmaktadır. Ancak bu alandaki açıklık tam olarak giderilememiştir. Bu tez çalışmasında bir çok farklı modelleme seçenekleri çalışılmış ve en başarılı modele karar verilmiştir.

Fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerin sonlu elemanlar modelinde karar verilmesi gereken husus öncelikle eleman tipidir. Kompozit tabakalar, doğası gereği çok ince oldukları için kalınlık boyunca yük taşıyamazlar ve düzlem gerilme hali kabul edilebilir. Kompozit malzemelerin elastik özelliklerinin tespitinde lamina teorisi kullanılır. Kompozit malzemelerin modellenmesinde öncelikli tercih kabuk (shell) elemanlardır. Kabuk elemanlar modelleme kolaylığı ve çözüm kolaylığı sağlamaktadır. Kompozit sandviç yapılarda yüzey plakaları çok ince tercih edilmektedir, ancak sandviç yapılarda kalınlık boyunca yük transferi yapıldığı için kabuk elemanlar yetersiz kalmaktadır. İlerleyen bölümlerde kabuk elemanlar ile yapılan çözümlere de yer verilerek bu durum gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında katı (hacim) elemanlar kullanılarak fiber takviyeli tabakalı kompozit plakalar modellenmiştir. Kompozit malzemelerin elastik davranışı için üç boyutlu 'ortotropik' malzeme modeli seçilmiştir. Fiber takviyeli kompozit tabakayı modellemek için bir tabakanın mikro ve makro mekanik analizinin yapılması gerekmektedir.

2.2.1.1. Bir Tabakanın Mikro Mekanik Analizi

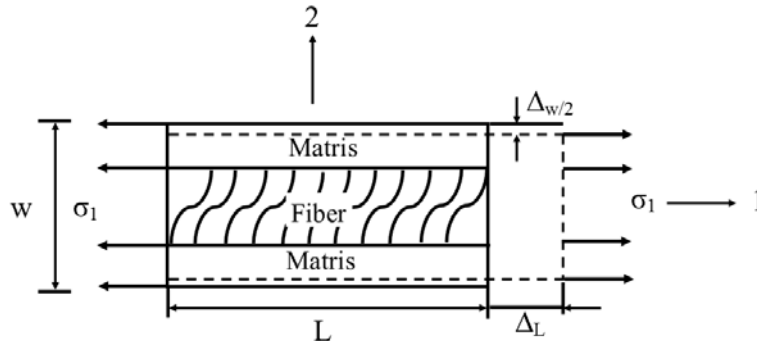
Tabakalı kompozitlerin mikro mekanik analizinde, fiber ve matris malzemeleri temel unsurları oluşturur. Bu iki temel bileşen sayesinde kompozit malzemenin davranışı tahmin edilir. Fiber takviyeli kompozitlerin mikro mekanik analizinde şu varsayımlar kullanılır [62];

- Matris homojen, izotropik yapıda olup lineer elastik davranış gösterir.
- Fiberler homojen, izotropik yapıda olup lineer elastik davranış gösterirler, yapı içerisinde düzenli bir dağılım ve kusursuz bir yönlenmeye sahiptirler.
- Kompozit malzeme ortotropik karakterli olup lineer elastik davranış gösterir.
- Kompozit bileşenlerinde iç gerilmeler bulunmamakta ve bileşenler arasında kusursuz ara yüzey bağları bulunmaktadır.

i) Tek yönlü bir katmanın fiber yönündeki elastiklik modülünün (E_1) hesaplanması

Şekil 2.12’de görüldüğü gibi kompozit malzemeye fiber doğrultusunda σ_1 gerilmesi etki etmesi durumunda, hem fiberin hemde matrisin aynı miktarda ε_1 kadar uzadığı kabul edilir.

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.1)$$



Şekil 2.12. Fiber doğrultusu yönünde gerilme durumu

Kompozit malzemeye P kuvveti tesir etmesi durumunda;

$$P = \sigma_1 A \quad (2.2)$$

$$A = A_f + A_m , \quad \sigma_1 = \sigma_f + \sigma_m \quad (2.3)$$

$$P = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (2.4)$$

Burada A , kompozit malzemenin kesit alanı, A_f , fiberin kesit alanı, A_m , matrisin kesit alanı olup, fiberin ve matrisin uzama miktarları genişlik boyunca (3 yönünde) birbirine eşit alınır. Kompozit malzemedeki fiber ve matrisin normal gerilmeleri,

$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 , \quad \sigma_f = E_f \varepsilon_1 , \quad \sigma_m = E_m \varepsilon_1 \quad (2.5)$$

$$E_1 \varepsilon_1 A = E_f \varepsilon_1 A_f + E_m \varepsilon_1 A_m \quad (2.6)$$

(1) yönündeki elastisite modülü,

$$E_1 = \frac{A_f}{A} E_f + \frac{A_m}{A} E_m \quad (2.7)$$

bulunur. Hacim oranı ise;

$$V_f = \frac{A_f L}{AL} = \frac{A_f}{A} \quad (2.8)$$

şeklinde olurken, benzer şekilde matris için ise,

$$V_m = \frac{A_m}{A} \quad (2.9)$$

olur.

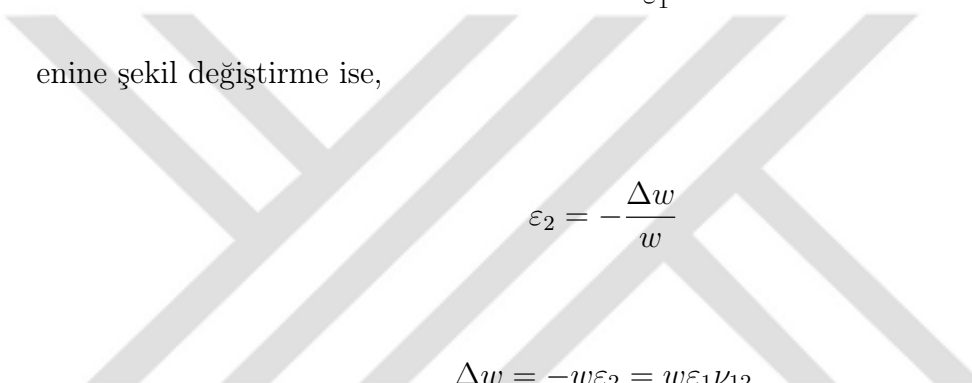
$$V_m + V_f = 1 \quad (2.10)$$

yukarıdaki ifadeler 2.10 denkleminde yerine yazılırsa aşağıdaki E_1 denklemi elde edilir [62].

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.11)$$

ii) Poisson oranının (ν_{12}) hesaplanması

Kompozit malzemenin Poisson oranını bulmak için Şekil 2.12'de gösterilen durum göz önüne alınır, Poisson oranı, enine deformasyonun boyuna deformasyonuna oranı olarak tanımlanır:



$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (2.12)$$

enine şekil değiştirme ise,

$$\varepsilon_2 = -\frac{\Delta w}{w} \quad (2.13)$$

$$\Delta w = -w\varepsilon_2 = w\varepsilon_1\nu_{12} \quad (2.14)$$

Δw , fiber ve matrisin toplam kısılması olup,

$$\Delta w = \Delta w_f + \Delta w_m \quad (2.15)$$

şeklinde yazılabilir.

$$\Delta w_m = wV_m\varepsilon_1\nu_m \quad (2.16)$$

$$\Delta w_f = wV_f\varepsilon_1\nu_f \quad (2.17)$$

2.14, 2.16 ve 2.17 eşitliklerinden,

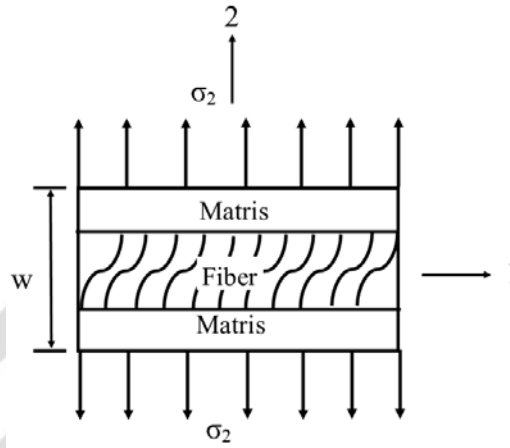
$$w\varepsilon_1\nu_{12} = wV_f\varepsilon_1\nu_f + wV_m\varepsilon_1\nu_m \quad (2.18)$$

elde edilir ve gerekli düzenlemeler yapılırsa Poisson oranı şu şekilde bulunur [62];

$$\nu_{12} = V_f \nu_f + V_m \nu_m \quad (2.19)$$

iii) Fiber eksenine dik yöndeki elastiklik modülünün (E_2) hesaplanması

Fiber eksenine dik yönde katmana σ_2 gerilmesi altında iken, σ gerilmesinin matris ve fiberde eşit olarak taşındığı kabul edilir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Fiber doğrultusuna dik yöndeki gerilme durumu

$$\sigma_m = \sigma_f = \sigma_{kompozit} \quad (2.20)$$

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_m \quad (2.21)$$

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \quad (2.22)$$

$$\sigma_{komp} = E_2 \varepsilon_2 \quad (2.23)$$

P yükü uygulandığında w kalınlıklı kompozit malzeme Δw kadar uzadağında, bu uzaman fiber (Δw_f) ve matrisin (Δw_m) uzamalarının toplamına eşit olur.

$$\Delta w = \Delta w_f + \Delta w_m \quad (2.24)$$

Burada,

$$\Delta w = w\varepsilon_2 \quad , \quad \Delta w_f = w_f\varepsilon_f \quad , \quad \Delta w_m = w_m\varepsilon_m \quad (2.25)$$

şeklinde yazılabilir. Dik yöndeki kompozitin fiber ve matrisinin şekil değiştirmeleri,

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta w}{w} \quad , \quad \varepsilon_f = \frac{\Delta w_f}{w_f} \quad , \quad \varepsilon_m = \frac{\Delta w_m}{w_m} \quad (2.26)$$

şeklinde yazılır ve hacim oranları,

$$V_m = \frac{w_m}{w} \quad , \quad V_f = \frac{w_f}{w} \quad (2.27)$$

2.24 eşitliğinde yerine yazılırsa,

$$\varepsilon_2 w = \varepsilon_m w V_m + \varepsilon_f w V_f \quad (2.28)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_m V_m + \varepsilon_f V_f \quad (2.29)$$

bulunur. 2.21, 2.22 ve 2.23 eşitlikleri 2.29 eşitliğinde yerine yazılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa fiber eksenine dik yöndeki elastiklik modülü bulunur [62].

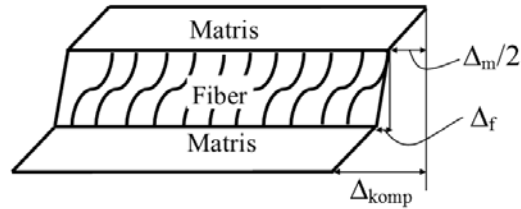
$$\frac{\sigma_{komp}}{E_2} = \frac{\sigma_f}{E_f} V_f + \frac{\sigma_m}{E_m} V_m \quad (2.30)$$

$$\frac{1}{E_2} = \frac{1}{E_f} V_f + \frac{1}{E_m} V_m \quad (2.31)$$

$E_1 > E_2$ 'dir ve genellikle $E_f > E_m$ 'dir.

iv) Kayma modülünün (G_{12}) hesaplanması

Kompozit malzemeden w kalınlığında ve ℓ boyunda alınan deney parçalarına kayma gerilmeleri uygulandığında, parçalar Şekil 2.14’de görüldüğü gibi bir şekil değişimine uğrar.



Şekil 2.14. Kompozit parçanın kayma gerilmesi altındaki durumu

Şekil 2.14’de büyütülerek çizilen şekil değişimi gerçekte çok küçüktür. Bu sebepten dolayı şekil değişiminden sonra parça kalınlığının (w) sabit kaldığı kabul edilir. γ_m matrisin ve γ_f fiberin τ kayma gerilmesi altındaki dönme açılarıdır. Kompozit malzemeden alınan w kalınlığındaki parçalarda dönmeler çok küçük olduğundan dönme açılarının tanjantları radyan olarak açının kendisine eşit alınabilir.

$$\Delta_{komp} = w\gamma_{12} \quad , \quad \Delta_{komp} = \Delta_m + \Delta_f \quad (2.32)$$

Hooke kanunu gereği kayma açıları

$$\gamma_m = \frac{\tau}{G_m} \quad , \quad \gamma_f = \frac{\tau}{G_f} \quad , \quad \gamma_{12} = \frac{\tau}{G_{12}} \quad (2.33)$$

karşı yatay yer değiştirmeler (fiber ve matris)

$$\Delta_f = wV_f\gamma_f \quad , \quad \Delta_m = wV_m\gamma_m \quad (2.34)$$

kompozitte oluşan yatay yer değiştirme

$$\Delta_{komp} = w\gamma_{12} = wV_m\gamma_m = wV_f\gamma_f \quad (2.35)$$

kompozit malzemenin kayma açısı

$$\gamma_{12} = V_m\gamma_m + V_f\gamma_f \quad (2.36)$$

bulunur. 2.36 eşitliğinde 2.33 eşitliği yerine yazılırsa;

$$\frac{\tau}{G_{12}} = \frac{\tau}{G_m} V_m + \frac{\tau}{G_f} V_f \quad (2.37)$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{G_m} V_m + \frac{1}{G_f} V_f \quad (2.38)$$

kompozitin kayma modülü elde edilir [62].

2.2.1.2. Bir Tabakanın Makro Mekanik Analizi

Tabakalı kompozitlerin makro mekanik analizi, tek tek katmanların yapısal davranışları ile alakalıdır. Bu bölümde, gerilme-şekil değiştirme bağıntıları ile katmanların davranışlarını içeren analizler verilmiştir. Yani, bir noktadaki gerilme hali ile şekil değiştirmelerin nasıl belirlendiği izah edilecektir. Gerilme şekil değiştirme bağıntılarına katmanın rijitlik analizi denir. Katmanların rijitlik analizlerinde dikkate alınması gereken kriterler;

- Küçük deformasyonlar teorisi dikkate alınır. Problemler büyük deformasyonlar ile bağlantılı olsa bile lineer olmayan geometri yok sayılır.
- Ayrıca lineer elastisite teorisi dikkate alınır. Yani, Hooke kanunu uygulanır.
- Düzlem gerilme hali mevcuttur. Bu nedenle gerilme hali iki boyutludur, normal veya kayma gerilmesi düzlem dışında mevcut değildir.
- Makroskobik ölçekte katman homojen kabul edilir, yani özellikler partiküller boyunca bir noktadan diğer noktaya değişmez.

i) Tabakalar için Gerilme-Şekil Değiştirme Bağıntıları

Fiber/matris takviyeli kompozit üretimi esnasında, istenilen kompozit kalınlığını sağlamak için fiberlerin çok katlı, düz veya değişik yönlü ve doğrultulu düzenlenmesi gerekir. Bu düzenleme üretilecek parçaya bağlıdır ve eğer izotropik özellik isteniyorsa fiberler rastgele, ortotropik özellik isteniyorsa ortogonal (dik) yönlü veya tek yönlü olarak yönlendirilir. Bir kompozit malzemede; fiber tek yönlü sürekli veya iki yönlü takviyeli olarak düzenlenirse fiber doğrultusunda yüksek dayanım ve rijitlik elde

edilebilir. Tek yönlü doğrultuda yapılan fiber düzenlemesinde yüksek dayanım ve elastik modülü değeri fibere dik doğrultudaki düzenleme ile karşılaştırıldığında fiber eksenine paralel doğrultuda elde edilecektir. İki yönlü doğrultuda ise; yani fiber hem eksene paralel hem de dik yönde takviyelendirilen kompozitte ise iki ortogonal yönde dayanım ve elastiklik modülü eşit olur. Böyle kompozitler, birbirine dik doğrultuda iki eksende simetrik malzeme özelliği gösterir ve "ortotropik" olarak adlandırılır. Bu kompozitlerin özellikleri daha karmaşıktır.

Gerilme-şekil değiştirme ilişkileri indis notasyonunda;

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \quad (2.39)$$

şeklindedir ve burada σ_i gerilme tensörü, ε_j şekil değiştirme tensörü ve C_{ij} rijitlik tensörüdür. Matris formunda yazılacak olursa;

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{21} \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{32} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{21} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

veya

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1132} & C_{1113} & C_{1131} & C_{1112} & C_{1121} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2232} & C_{2213} & C_{2231} & C_{2212} & C_{2221} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3332} & C_{3313} & C_{3331} & C_{3312} & C_{3321} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2332} & C_{2313} & C_{2331} & C_{2312} & C_{2321} \\ C_{3211} & C_{3222} & C_{3233} & C_{3223} & C_{3232} & C_{3213} & C_{3231} & C_{3212} & C_{3221} \\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1323} & C_{1332} & C_{1313} & C_{1331} & C_{1312} & C_{1321} \\ C_{3111} & C_{3122} & C_{3133} & C_{3123} & C_{3132} & C_{3113} & C_{3131} & C_{3112} & C_{3121} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1232} & C_{1213} & C_{1231} & C_{1212} & C_{1221} \\ C_{2111} & C_{2122} & C_{2133} & C_{2123} & C_{2132} & C_{2113} & C_{2131} & C_{2112} & C_{2121} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{32} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{21} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

şeklinde yazılır. Rijitlik tensörü elemanları ortotropik malzemeler için aşağıdaki

eşitlikte görüldüğü gibi 9 bağımsız sabite sahiptir;

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{1212} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{2323} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Şekil değiştirme cinsinden ifade edecek olursak;

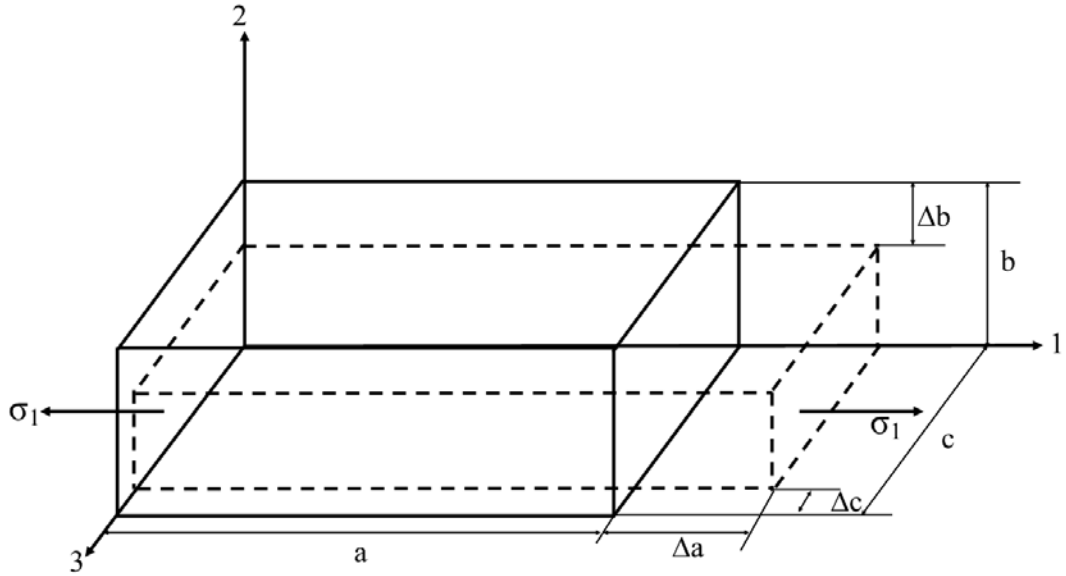
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

veya

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1111} & S_{1122} & S_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ S_{2211} & S_{2222} & S_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ S_{3311} & S_{3322} & S_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{1212} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{2323} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

şeklinde yazılır. Burada $[S_{ijkl}]$ elastiklik tensörüdür. Rijitlik tensörü ve elastiklik tensörü elemanlarını, matematiksel olarak ifade edebilme özelliklerinden kurtarıp daha açık ve fiziksel anlama sahip mühendislik sabitleri ile tanımlamak gerekir. Bunun içinde mühendislik sabitlerinin bilinmesi gereklidir. Bilinen bir yük veya gerilme yardımı ile gerçekleştirilen basit çekme veya kayma deneyleri ile bir malzemenin mühendislik sabitleri bulunur. Ayrıca deneyler $[S_{ijkl}]$ elastiklik matrisi ve $[C_{ijkl}]$ rijitlik matrisinin elemanlarının elastisite modülü (E) ve kayma modülü (G) cinsinden tanımlanmasını da sağlar.

Herhangi bir elastik cisme x_1 eksenine doğrultusunda σ_1 çekme gerilmesi uygulandığında, malzeme gerilmenin uygulandığı ekseninde boyuna elastisite modülüne bağlı olarak uzar. Bu uzama esnasında malzemenin hacmi değişmeyeceğine göre x_2 ve x_3 eksenleri boyunca olan malzeme boyutları kısalmır.



Şekil 2.15. Tek eksenli gerilme hali

Şekil 2.15'deki gerilme durumuna özgü gerilme ve şekil değiştirme bağıntıları,

$$V = abc \quad (V : \text{cismin hacmi}) \quad (2.45)$$

Hacim, V değişmez olduğundan şekil değiştirdikten sonra

$$V = (a + \Delta a)(b - \Delta b)(c - \Delta c) \quad (2.46)$$

olur. Bu durumda, gerilme ve şekil değiştirmeler

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\nu_{12}\varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & -\nu_{13}\varepsilon_1 \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

olur. Genel durumda;

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (2.49)$$

$$\varepsilon_i = S_{ij}\sigma_j \quad (2.50)$$

Elastik cisim x_1 ekseninde çekmeye zorlandığında ($i = 1$);

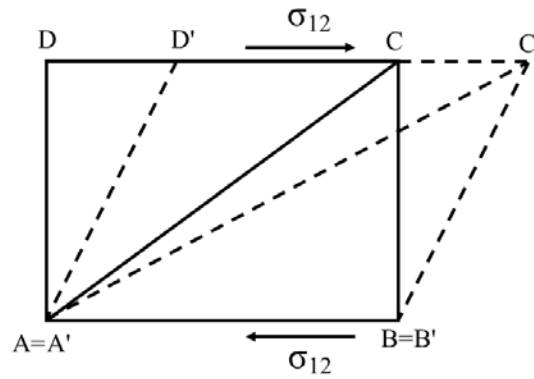
$$S_{11} = \frac{1}{E_1}, \quad S_{21} = \frac{-\nu_{12}}{E_1}, \quad S_{31} = \frac{-\nu_{13}}{E_1} \quad (2.51)$$

Elastik cisim x_2 ekseninde çekmeye zorlandığında ($i = 2$);

$$S_{12} = \frac{-\nu_{21}}{E_2}, \quad S_{22} = \frac{1}{E_2}, \quad S_{32} = \frac{-\nu_{23}}{E_2} \quad (2.52)$$

Elastik cisim x_3 ekseninde çekmeye zorlandığında ($i = 3$);

$$S_{13} = \frac{-\nu_{31}}{E_3}, \quad S_{23} = \frac{-\nu_{32}}{E_3}, \quad S_{33} = \frac{1}{E_3} \quad (2.53)$$



Şekil 2.16. Tam kayma hali

Böylece 2.51, 2.52 ve 2.53 eşitliklerine göre elastiklik matrisinin elemanları malzemenin mühendislik sabitleri cinsinden ifade edilmiş olur. Bilindiği üzere

$$S_{ij} = S_{ji} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (2.54)$$

eşitliği yazılabilir.

Eğer elastik cisim yalnızca kayma gerilmesinin etkisinde kalır ise $G_{ij} = x_i - x_j$ düzlemindeki kayma modülü olmak üzere Şekil 2.16'daki durum ortaya çıkar.

$$S_{12} = S_{66} \quad (2.55)$$

$$\gamma_{12} = \frac{\sigma_{12}}{G_{12}} \quad (2.56)$$

$$S_{66} = \frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{G_{21}}, \quad S_{44} = \frac{1}{G_{23}}, \quad S_{55} = \frac{1}{G_{13}} \quad (2.57)$$

2.51 eşitliğinden 2.57 eşitliğine kadar olan denklemler görüldüğü üzere anizotropik malzemelerde bağımsız matematiksel ifadeye sahip olan rijitlik ve elastik matrisleri;

$$\begin{array}{cccc} E_1 & G_1 & \nu_{12} & \nu_{21} \\ E_2 & G_2 & \nu_{13} & \nu_{31} \\ E_3 & G_3 & \nu_{23} & \nu_{32} \end{array} \quad (2.58)$$

olmak üzere 12 adet fiziksel mühendislik sabitleri ile ifade edilir. Buna göre elastiklik matrisi bu sabitler cinsinden yazılacak olursa [62];

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{21}}{E_2} & \frac{-\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_1} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

Ortotropik bir malzeme için rijitlik matrisi elemanları ise mühendislik sabitleri cinsinden;

$$\begin{aligned}
C_{1111} &= \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} \\
C_{1122} &= \frac{\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13}}{E_2 E_3 \Delta} \\
C_{1133} &= \frac{\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23}}{E_2 E_3 \Delta} \\
C_{2222} &= \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} \\
C_{2233} &= \frac{\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13}}{E_1 E_3 \Delta} \\
C_{3333} &= \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{E_1 E_2 \Delta} \\
C_{1212} &= G_{12} \\
C_{1313} &= G_{13} \\
C_{2323} &= G_{23}
\end{aligned} \tag{2.60}$$

burada;

$$\Delta = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_2 E_3} \tag{2.61}$$

şeklindedir.

Söz konusu elastik malzemenin E_1 , E_2 ve E_3 sırasıyla 1, 2 ve 3 eksenleri doğrultusundaki elastisite modüllerini ve G_{12} , G_{23} ve G_{31} is aynı eksenin ilgili düzlemindeki kayma modüllerini belirtmektedir.

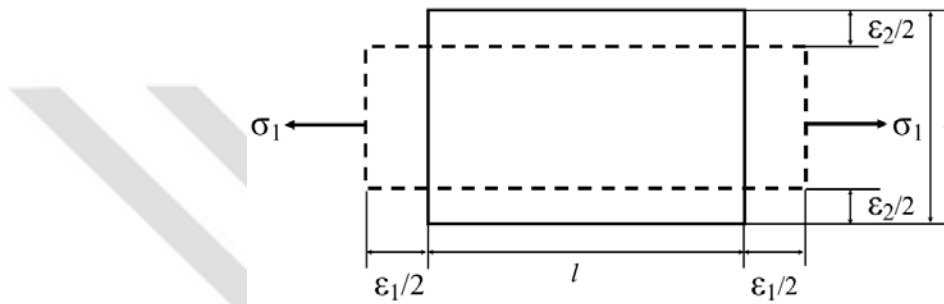
Poisson oranı, " ν_{ij} " ise elastik malzemenin j doğrultusundaki şekil değiştirmesinin i doğrultusundaki şekil değiştirmesine oranını gösterir. Elastik malzemeye her hangi bir σ_i çekme gerilmesi altında i eksen boyunca ε_i kadar şekil değiştirdiğinde, aynı zamanda j eksen doğrultusunda da ε_j kadar (kısılma) şekil değiştirmeye maruz kalır. İşte bu şekil değiştirmelerin birbirine olan oranları;

$$\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} \quad (2.62)$$

"*Poisson oranı*" olarak tanımlanır. O halde tüm düzlemlerde

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}, \quad \nu_{13} = -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1}, \quad \nu_{23} = -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_2} \quad (2.63)$$

olarak ifade edilir. Şekil 2.17'da verilen tek eksenli gerilme haline yandan bakılırsa;



Şekil 2.17. Tek eksenli gerilme hali (yandan görünüş)

Ortotropik bir malzemede 1 ve 2 düzlemine göre simetrinin mevcut olması halinde fiziksel sabitler;

$$E_1 = E_2, E_3 \quad (2.64)$$

$$\nu_{12} = \nu_{21}, \quad \nu_{13} = \nu_{31}, \quad \nu_{32} = \nu_{23} \quad (2.65)$$

$$G_{12} = \frac{E_1}{2(1 + \nu_{12})}, \quad G_{23} = G_{13} \quad (2.66)$$

olarak yazılabileceğinden mühendislik sabitleri sadece elastisite modülleri ve Poisson oranlarından olmak üzere beş bağımsız değişkenle ifade edilir.

2.2.1.3. Hasar Kriterleri

Sandviç kiriş yapılarda kullanılan fiber takviyeli kompozit plakaların düşük hızlı darbe davranışları teorik olarak incelenirken kompozit plakaların uğrayabileceği hasarların tespiti için hasar kriterleri göz önüne alınmıştır. Bir kompozit plakanın darbe sürecinde nasıl bir deformasyona maruz kaldığı ve bu deformasyon sonucu plakada oluşabilecek hasarların biçiminin tespiti önem arz etmektedir. Eğer darbe sonrası plaka üzerinde oluşabilecek hasarlar biliniyorsa toplam bağlantının tamamen hasara uğramadan gerekli önlemler alınabilir. Parça üzerine yama gerektiriyorsa yama yapılabilir, değiştirilmesi gerekiyorsa değişim talep edilebilir. Kompozit malzemelerin hasar modellerinin geliştirilmesi 30 yıllık bir geçmişe sahiptir ve ilgili literatürde kullanılabilecek bir çok teori mevcuttur. Bu kriterleri, kırılma mekaniği temelli teoriler, genel ya da özel hasar tiplerinin belirlenmesi üzerine kurulan teoriler ve düzlem içi ya da tabakalar arası hasarların tespiti temelli teoriler gibi sınıflandırmak mümkündür. Bu tez çalışmasında sandviç kirişlerin düşük hızlı darbe davranışları incelenirken, fiber takviyeli kompozit yüzey plakalarında meydana gelebilecek hasar tiplerinden düzlem içi ve tabakalar arası hasar tipleri dikkate alınmıştır. Bu hasar tipleri daha çok tek bir tabakanın gerilme bileşenleri üzerine kurulmuş modellerdir. Tez çalışmasında iki ve üç boyutlu hasar kriterleri kullanılmıştır.

i) İki boyutlu hasar kriterleri

Hasar başlangıcı malzemede bir noktada mekanik özelliklerin bozunumuna işaret eder. Fiber takviyeli kompozitler için kullanılan hasar başlama kriterleri Hashin teorisine dayanmaktadır. Bu kriterler dört farklı hasar başlama mekanizmasını göz önüne alır: fiber çekme hasarı, fiber basma hasarı, matris çekme hasarı ve matris basma hasarı gibi.

a) Fiber çekme hasarı ($\hat{\sigma}_{11} \geq 0$):

$$F_f^t = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^T} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2 \quad (2.67)$$

b) Fiber basma hasarı ($\hat{\sigma}_{11} < 0$):

$$F_f^c = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^C} \right)^2 \quad (2.68)$$

c) Matris çekme hasarı ($\hat{\sigma}_{22} \geq 0$):

$$F_m^t = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^T} \right)^2 + \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2 \quad (2.69)$$

d) Matris basma hasarı ($\hat{\sigma}_{22} < 0$):

$$F_m^c = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{2S^T} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T} \right)^2 - 1 \right] \frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^C} + \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2 \quad (2.70)$$

Burada; X^T fiber boyunca çekme mukavemeti, X^C fiber boyunca basma mukavemeti, Y^T fibere dik eksendeki çekme mukavemeti, Y^C fibere dik eksendeki basma mukavemeti, S^L fiber boyunca kayma gerilmesi, S^T fibere dik eksendeki kayma gerilmesi, α kayma gerilmesinin fiber çekme hasarı başlama kriterine katkısını belirleyen bir katsayı ve $\hat{\sigma}_{11}, \hat{\sigma}_{22}, \hat{\tau}_{12}$ efektif gerilme tensörü bileşenleridir ve $\hat{\sigma}$ hasar başlama kriterini hesaplamada kullanılır.

$$\hat{\sigma} = M\sigma \quad (2.71)$$

Burada σ gerçek gerilme ve M hasar operatörüdür.

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-d_f)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-d_m)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_s)} \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

$d_f^t, d_f^c, d_m^t, d_m^c$ yukarıda bahsedilen dört hasar başlangıç kriterine karşılık gelen hasar parametrelerinden türetilen d_f, d_m ve d_s fiber, matris ve kayma hasarına karşılık gelen hasar indeksleridir.

$$d_f = \begin{cases} d_f^t & \hat{\sigma}_{11} \geq 0 \text{ ise,} \\ d_f^c & \hat{\sigma}_{11} < 0 \text{ ise,} \end{cases} \quad (2.73)$$

$$d_m = \begin{cases} d_m^t & \hat{\sigma}_{22} \geq 0 \text{ ise,} \\ d_m^c & \hat{\sigma}_{22} < 0 \text{ ise,} \end{cases} \quad (2.74)$$

$$d_s = 1 - (1 - d_f^t) (1 - d_f^c) (1 - d_m^t) (1 - d_m^c) \quad (2.75)$$

Herhangi bir hasar başlangıcı ve gelişiminde önce hasar operatörü M , birim matrise eşittir. Bu sayede $\hat{\sigma} = \sigma$ 'dir. En az bir mod için hasar başlaması ve gelişimi gerçekleştikten sonra hasar operatörü, diğer modların hasar başlatma kriterlerinde önem kazanır. Hasar başlama kriteri Hashin ve Rotem'in (1973) çalışmasında $\alpha = 0.0$ ve $S^T = Y^C/2$ olarak sunulmuştur ve daha sonraki çalışmalarında ise (1980) $\alpha = 1.0$ olarak sunulmuştur [63].

i) Üç boyutlu hasar kriterleri

a) Fiber çekme ve basma hasar kriteri

Fiber takviyeli polimer esaslı kompozit plakalarda meydana gelebilecek hasar tiplerinden olan fiber hasarları çekme ve basma olarak ikiye ayrılabilir. Her bir kompozit tabakada fiberlerde çekmeden kaynaklanan hasarların sebebi fiberin yük taşıma yetersizliğidir. Eğer gereken yükü taşıyacak kadar sağlam fiber tabaka içinde kalmaz ise, o zaman çekme altında fiber kritik durumdadır. Çekme altında fiber hasarları ile çalışan birçok araştırmacı kritik durumu tespit etmekte çekme deneylerinden elde edilen en büyük gerilme ya da en büyük şekil değiştirme değerlerini esas almışlardır. Bunlardan en çok bilinen ve literatürde en iyi sonuç veren teorilerden birisini Hashin 1980 yılında yaptığı çalışma ile bilim dünyasına sunmuştur [64]. Hashin çekme altında fiber hasar kriterinde,

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \frac{1}{S_{12}^2} (\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2) \geq 1, \quad (\sigma_{11} \geq 0) \quad (2.76)$$

1, 2 ve 3 yönleri sırasıyla fiber, düşey ve kalınlık boyunca yönü tarif etmektedir. X_T fiber yönünde en büyük normal gerilme, S_{12} laminanın kayma gerilmesi değeri

olup deneysel olarak tespit edilen sabit değerlerdir. σ_1 , τ_{12} ve τ_{13} analizler sırasında çözüm adımlarından elde edilen gerilmeler olup sırasıyla fiber yönündeki normal gerilme değerini, 1-2 ve 1-3 düzlemlerindeki kayma gerilmelerini temsil etmektedir. Bu hasar kriterinin uygulanabilmesi için $\sigma_1 > 0$ olması gerekmektedir. Aksi takdirde fiber basma altında olacaktır ve uygulanacak kriter değiştirecektir.

Fiberin maruz kalabileceği diğer bir hasar tipi ise basma altındadır. Basma altında fiberde meydana gelebilecek hasarın sebebi mikro-burkulma (microbuckling) ve kıvrılma (kinking) bandının oluşmasıdır. Aslında bu iki sebep birbirinden farklı hasar tiplerini ifade ederler. Mikro-burkulma genel bir hasar tipi iken, kıvrılma daha lokal mikroyapı kusurlardan oluşan hasar tipi olarak ortaya çıkar. Analizlerde kullandığımız model, Hashin'in 1980 yılında yaptığı çalışma ile ortaya koyduğu Hashin Fiber Basma hasar kriteridir [64].

$$\left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X_C}\right)^2 \geq 1, \quad (\sigma_{11} < 0) \quad (2.77)$$

Burada X_C fiber boyunca basma mukavemetini, σ_{11} analizler sırasında çözüm adımlarından elde edilen gerilmeler olup fiber yönündeki normal gerilme değerini temsil etmektedir.

b) Matris çekme ve basma hasar kriteri

Tabakalı kompozit plakalarda matris hasarları karmaşık bir yapıya sahiptir. Matrisdeki çatlak genel olarak kusurlu bölgede ya da matris fiber arayüzeyinde başlar, tabaka boyunca yığılır ve kritik çatlak bölgesi boyunca hasar oluşmasına öncülük eder. Polimer matrisli fiber takviyeli kompozit malzemelerde matris malzemesi lineer olmayan mekanik davranışa sahiptir, ancak bu lineer olmayan davranışı matematiksel olarak ifade etmek oldukça karmaşık bir çalışmadır ve günümüzde araştırmacılar bu konu üzerinde çalışmalarını yürütmektedirler.

Fiber takviyeli kompozit plakalardaki matrislerin çekme ve basma altında maruz kalabileceği hasar kriterlerinden yine Hashin tarafından 1980 yılından ortaya atılmış ve günümüze kadar bir çok testten başarı ile geçen Hashin Matris Çekme ve Hashin Matris Basma hasar kriterleri sayısal analizlerde yaygın kullanılmıştır [64]. Hashin

Matris Çekme Hasar kriteri

$$\left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{Y_T^2}\right)^2 + \frac{(\tau_{23}^2 - \sigma_2\sigma_3)}{S_{23}^2} + \frac{(\tau_{12}^2 - \tau_{13}^2)}{S_{12}^2} \geq 1, \quad (\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0) \quad (2.78)$$

ve Hashin Matris Basma Hasar kriteri

$$\frac{\sigma_2}{Y_C} \left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}}\right)^2 - 1 \right] + \left(\frac{\sigma_2}{2S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1, \quad (\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0) \quad (2.79)$$

ile tanımlanmıştır. Burada $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{23}$ her bir noktadaki gerilme bileşenleri, Y_T, S_{12}, S_{23} deneysel olarak tespit edilen sabit üst dayanım değerleri olup sırasıyla matrisin çekme altındaki en büyük gerilme değeri, 1-2 ve 2-3 düzlemlerindeki laminanın kayma gerilmesi değerlerini temsil etmektedirler. Y_C matrisin basma altındaki en büyük gerilme değerini temsil etmektedir.

c) Kayma hasar kriteri

Fiber ve matris için çekme ve basma altında toplam 4 adet hasar kriteri gerçekleştirilen analizlerde kullanılmıştır. Bu kriterlere ek olarak düzlem içi hasar kriterlerinden fiber matris kayma kriterlerinden biri olan 1980 yılında Hashin tarafından teorisi ortaya konan hasar kriteri

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1 \quad (2.80)$$

kullanılmıştır [64].

d) Ayrılma (delaminasyon) hasar kriteri

Her bir katmanın, ya da katmanlar arası arayüzey elemanlarının gerilme değerlerine bağlı olarak ayrılma başlamasını belirleyebilmek üzere yapılmış bir çok çalışma literatürde mevcuttur. Yapılan çalışmaların bir çoğunda kalınlık boyunca gerilme ve kayma parametreleri, bir kısmında ise fiber yönündeki gerilme değerleri kullanılmıştır. Yaptığımız analizlerde Hashin tarafından önerilen

$$\left(\frac{\sigma_3}{Z_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{31}}{S_{31}}\right)^2 \geq 1 \quad (2.81)$$

ayrılma kriteri kullanılmıştır [64]. Burada diğer hasar kriterlerinden farklı olan Z_T parametresi kalınlık boyunca matrisin çekme altında en büyük gerilme değerini temsil etmektedir. $Z_T=Y_T$ olarak analizlerde kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında kompozit malzemelerin elastik davranışı ortotropik malzeme olarak modellenirken, 2 ve 3 boyutlu hasar kriterleri kullanılmıştır. Bu yaklaşımların sonlu elemanlar modeline nasıl aktarıldığı ileriki bölümlerde anlatılmıştır.

2.2.2. PVC Köpük Malzemesinin Modellenmesi

Günümüzde polimerik köpük malzemeleri oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Köpük malzemelerinin en belirgin karakteristik özellikleri; elastikiyet, hafiflik, rijitlik, yüksek gözeneklilik, yüksek çarpışma ve iyi enerji sönmleme yeteneğidir. Malzemelerin mekanik özellikleri köpük yapısına, köpük yoğunluğu ve geometrik özelliklerine göre değişir. Kullanılacak olan yapının amacına yönelik adım adım oluşturulması zorunludur. Düşük yoğunluklu köpük kolay şekil değiştirebildiğinden dolayı geniş deformasyonlara imkan sağlar. Tersine yüksek yoğunluklu köpük malzemesi ise aynı enerjide düşük deformasyonlara neden olur. Bu nedenle köpük yoğunluğu yüksek önem arz etmektedir. Sandviç yapılarda kullanılan polimerik köpük malzemeleri üzerine elastik ve plastik olarak farklı sonlu elemanlar malzeme modelleri mevcuttur.

Bu tez çalışmasında kapalı hücreli PVC köpük malzemesi ABAQUS® 'ta modellemek için, 'Hyperelastic' malzeme modeli elastik davranış için, 'Crushable Foam' modeli plastik davranış için ve hasar kriteri olarak 'Shear and Ductile Damage Criterion' kullanılmıştır.

Bir kapalı hücreli köpük malzemesinin akma yüzeyi şu şekilde tariflenmiştir [16];

$$\varphi \equiv \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\alpha}{3}\right)^2\right]} \left[q^2 + \alpha^2 \sigma_m^2 \right] - \sigma_y^2 \leq 0 \quad (2.82)$$

$$\alpha = \frac{3k}{\sqrt{(3k_t + k)(3 - k)}} \quad (2.83)$$

$$k = \frac{\sigma_c^0}{P_c^0}, \quad k_t = \frac{P_t}{P_c^0} \quad (2.84)$$

Burada σ_y köpüğün tek eksenli gerilmesi veya basma altındaki akma gerilmesidir, q , Von Mises gerilmesi, σ_m ise ortalama gerilmedir. α parametresi, sırasıyla p_c^0 , basma altında hidrostatik akma gerilmesi, p_t , çekme altında hidrostatik çekme gerilmesi ve σ_c^0 , tek eksenli başlangıç akma gerilmesi oranları ile ilgili akma yüzeyinin şeklini tarif etmektedir. Akma yüzeyi sabit α değerine bağlı gelişirken, şekil faktörü tek eksenli basmada başlangıç akma gerilmesi kullanılarak hesaplanır. Geçerli bir akma yüzeyi seçeneği için mukavemet oranları $0 < k < 3$ ve $k_t \geq 0$ şeklinde olmalıdır. Hidrostatik basmada p_c , akma yüzeyinin boyutu belirler ve şu şekilde hesaplanır;

$$p_c(\varepsilon_{pl}^{vol}) = \frac{\sigma_c(\varepsilon_{pl}^{vol}) \left[\sigma_c(\varepsilon_{pl}^{vol}) \left(\frac{1}{\alpha^2} + \frac{1}{9} \right) + \frac{p_t}{3} \right]}{p_t + \frac{\sigma_c(\varepsilon_{pl}^{vol})}{3}} \quad (2.85)$$

Burada (ε_{pl}^{vol}) , hacimsel sertleşme modeli için plastik hacimsel şekil değiştirme ve $(\varepsilon_{pl}^{axial})$, basma altında tek eksenli plastik şekil değiştirmedir. Bunun için p_c köpüğün tek eksenli basma testinden hesaplanmalıdır.

Şekil değiştirme hızı arttıkça bazı malzemelerin akma gerilmesinde artış gözlemlenmektedir. Birçok köpük malzemesi için, şekil değiştirme hızları saniyede 0.1-1 aralığında olduğunda akma gerilmesindeki bu artış önem kazanır ve şekil değiştirme hızları saniyede 10-100 arttığında bu önem çok daha fazla artar. Şekil değiştirme hızı kuralı olarak 'Cowper-Symonds Power Law' kuralı tanımlanmıştır ve şu formdadır [63];

$$\dot{\varepsilon}^{pl} = D(R - 1)^n \quad R \geq 1 \quad (2.86)$$

$$R \equiv \frac{\bar{B}}{B} \quad (2.87)$$

Burada B , statik akma yüzeyinin boyutudur ve \bar{B} , sıfır olamayan şekil değiştirme hızında akma yüzeyinin büyüklüğüdür. R oranı şu şekilde ifade edilir [63];

$$R - 1 = (r - 1) \frac{3k_t + r [k + k_t (3 - k)]}{(1 + k_t) (3k_t + rk)} \quad (2.88)$$

Burada r , basma altındaki tek eksenli akma gerilmesi oranıdır.

$$r \equiv \frac{\bar{\sigma}_c}{\sigma_c} \quad (2.89)$$

σ_c basma altındaki tek eksenli plastik şekil değiştirmeye karşılık gelen akma gerilmesidir. Bu değer düşük şekil değiştirme hızıyla tespit edilir ve sıcaklık ve önceden tariflenmiş (Eşitlik 2.86), D ve n malzeme sabitlerine bağlıdır.

PVC köpükteki hasar başlatma kriteri olarak sünek ve kayma hasar kriterleri kullanılmıştır. Sünek malzeme ve kayma hasarı ile ilgili hasar gelişimi hasar enerjisi ile kontrol edilmektedir. Elasto-plastik malzemenin hasar başladıktan sonra zayıflayan gerilme ve yer değiştirme arasındaki ilişki lineer yumuşama kuralı (Linear softening law) kullanılarak tariflenmiştir.

Tez çalışmasında kullanılan AIREX[®] C70 PVC köpük malzemesi maruz kaldığı deformasyonun büyük bir kısmını geri vermektedir. Literatürde geniş bir kullanım olan AIREX[®] C70 PVC modelleme yöntemleri araştırılmış ve en doğru sonucu veren modeller tez çalışmasında kullanılmıştır. Geri verilen deformasyonları modelleyebilmek için darbeye maruz kalmayan bölgeler hiperelastik olarak modellenmiştir. Deney sonuçlarına göre darbeden etkilenmeyen bölgeler tespit edilmiş ve bu ölçüde vurucu çapının iki katı kadar darbeye maruz kalan bölge 'Crushable Foam' kullanılarak modellenmiştir. Diğer bölgeler hiperelastik modellenmiştir. Hiperelastik model için şekil değişime enerjisinin depolandığı birim hacimler için şekil değiştirme potansiyel enerjisini tariflemek gerekmektedir. Bunun için 'Mooney-Rivlin' modeli kullanılmıştır ve şekil değiştirme potansiyel enerjisi şu şekilde tariflenmiştir [16];

$$U = C_{10} (\bar{I}_1 - 3) + C_{01} (\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1} (J^{el} - 1)^2 \quad (2.90)$$

Burada U , her bir birim hacimdeki şekil değiştirme enerjisidir. C_{10} , C_{01} ve D_1 sıcaklığa bağlı malzeme parametreleridir. J^{el} , elastik hacim oranı, \bar{I}_1 ve \bar{I}_2 birinci ve ikinci deviatorik şekil değiştirme invariantlarıdır ve şu şekildedir [63];

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2, \quad \bar{I}_2 = \bar{\lambda}_1^{-2} + \bar{\lambda}_2^{-2} + \bar{\lambda}_3^{-2} \quad (2.91)$$

Başlangıç kayma ve bulk modülü sırasıyla;

$$\mu_0 = 2(C_{10} + C_{01}) \quad K_0 = \frac{2}{D_1} \quad (2.92)$$

şeklinde.

Üretici firmadan ve kendi yaptığımız testler sonucunda malzeme modeli için gerekli sayısal değerler tespit edilmiştir.

2.2.3. Yapıştırıcı Bölgesinin Modellenmesi

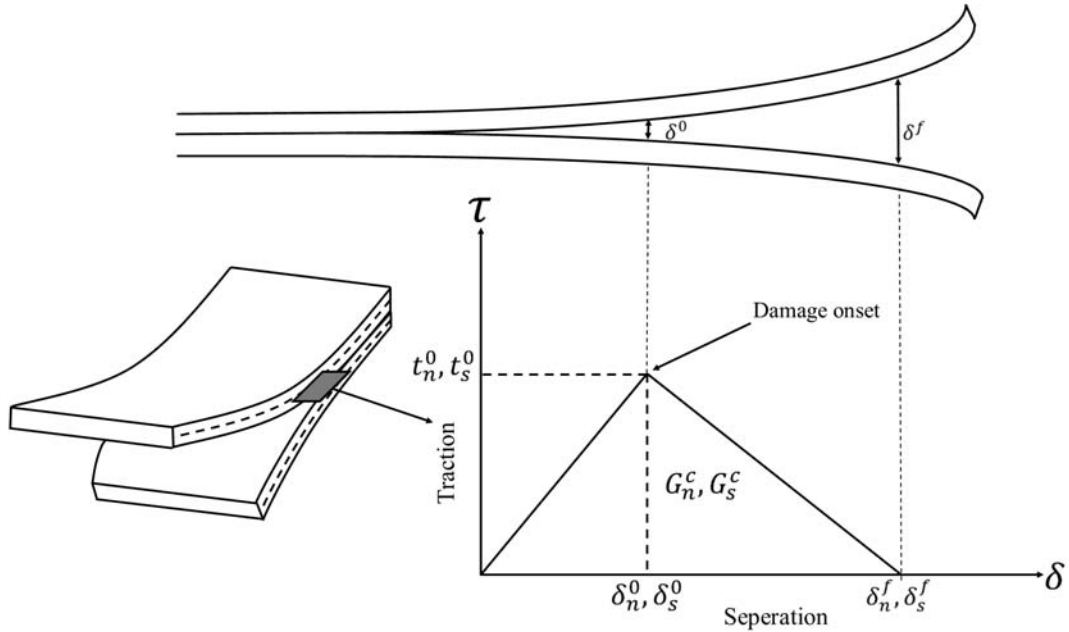
Ayrılma hasarı, fiber takviyeli malzemelerden oluşan yapılarda farklı iki ve üç boyutlu teorik hasar kriterleri kullanılarak tahmin edilmektedir. Ayrılma hasarı kriterleri ayrıca çatlak ayrılması ve ilerlemesini tahmin etmeye de imkan sağlamaktadır. Bu maksatla hasar mekaniği kullanılmaktadır. Bu yöntem kırılma mekaniğini esas alan 'Kohezif Bölge Modeli' (Cohesive Zone Modelling, CZM) olmaktadır. Bu yöntem ayrılma yüzeyinin komşu tabakaları arasında arayüzey elemanları kullanılarak uyarlanmaktadır. Ara yüzey elemanları ise, yapıştırıcı malzemesinin yaklaşık mukavemet değerleri dikkate alınarak modellenir.

Kohezif Bölge modeli (CZM), kohezif elemanların ilgili düğüm noktalarını birbirine bağlamasıyla yer değiştirmeler ve gerilmeler arasındaki ilişkiye dayanır. Bu davranış en büyük gerilme değerine ulaşınca kadar elastik davranır ve yumuşama (softening) başlar, malzeme özelliklerine göre hasar tamamlanana kadar bir bozunum (degradation) kuralı ile modellenir. Tez çalışmasında kullanılan çift fazlı endüstriyel

yapıştırıcı Araldite® 2015'in gerilme şekil değiştirme testi, çekme numunesi kalıbında dondurulup çekme testi yapılarak elde edilmiştir. Tez çalışmasında lineer yumuşama ve bozunum kuralı uygulanmıştır.

Şekil 2.18'de [65] t_n^0 veya t_s^0 'a kadar lineer yüklemeyi ve daha sonra kopmaya kadar lineer yumuşamayı temsil etmektedir. G_n ve G_s çekme veya kaymadaki eğrilerin altında kalan alandır. Normal ve kayma yönündeki en büyük bağıl yer değiştirmeler (δ_n^f ve δ_s^f) çekme için tokluk değerini $G_n = G_n^c$ haline getirirken, kayma için $G_s = G_s^c$ haline getirmektedir. Kohezif bölge modelinde lineer elastik davranış, normal ve kayma yönündeki gerilme ve şekil değiştirme değerleri ile birlikte temel elastik matris ilişkileri ile tanımlanır (n , normal doğrultu, s , kayma doğrultusu, eşitlik 2.93) [63].

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}\varepsilon \quad (2.93)$$



Şekil 2.18. Linear Kohezif Bölge Modeli kuralı, üçgenel şekil

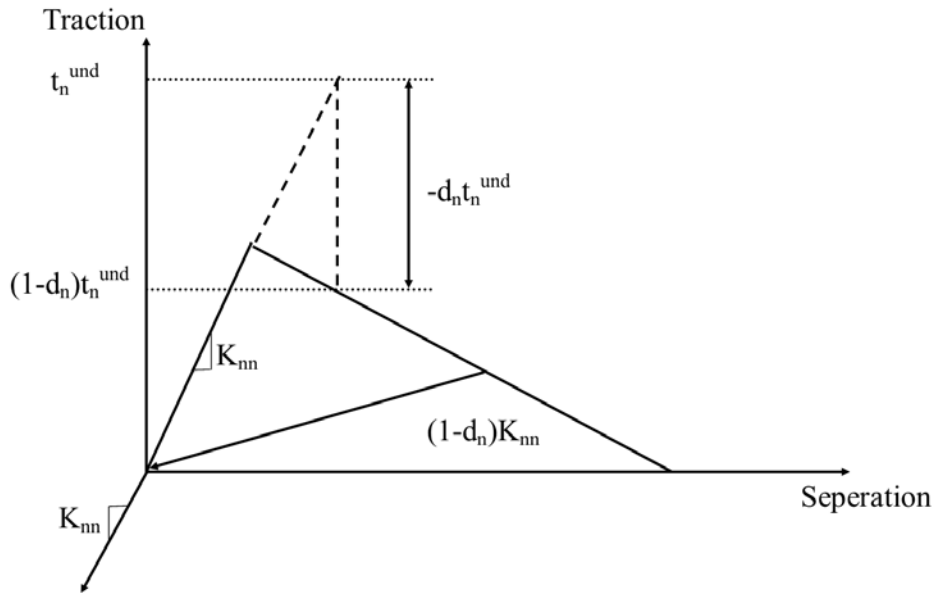
t_n ve t_s , sırasıyla normal ve kayma yönündeki kohezif yüzey gerilmelerini tarif etmektedir. ε_n ve ε_s , normal ve kayma yönündeki şekil değiştirmeleri tarifler. Rijitlik matrisi \mathbf{K} ise, yapıştırıcının rijitlik parametrelerini içerir. Hasar mekanizması ise hasar başlama kriterini ve hasar gelişim kriterini içerir. Kohezif bölge modeli hasar başladıktan sonra lineer veya lineer olmayan bir hasar gelişimi kuralının

tariflenmesini gerektirir. Tez çalışmasında 'Quadratic Maximum Nominal Stress' hasar başlama kriteri kullanılmıştır [63].

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\langle t_s \rangle}{t_s^0} \right\}^2 = 1 \quad (2.94)$$

$\langle \rangle$ sembolleri Macaulay braketleridir. Bu braketler hasar başlamadan sadece basma altındaki deformasyon veya gerilme durumunu tarifler. Bunun için, hasarın başlaması çekme ve kayma arasındaki çift etkinin bir sonucudur. Eşitlik 2.94 sağlandığında, malzeme rijitliğindeki bozunum başlamaktadır. Kohezif bölge modelindeki yumuşama bölgeleri, $\delta_n - \delta_n^0$ (çekme) ve $\delta_s - \delta_s^0$ (kayma) yer değiştirmelerinin bir fonksiyonu olarak özel bir hasar değişkeni ile (d_n , çekme için, d_s , kayma için) ABAQUS® 'da tariflenmiştir. Şekil 2.19 üçgen kuralı için d_n değişkenini tariflemektedir. Bu değişkenler şu şekilde ifade edilir:

$$t_n = (1 - d_n) t_n^{und}, \quad t_s = (1 - d_s) t_s^{und} \quad (2.95)$$



Şekil 2.19. Çekme altındaki d_n hasar değişkeninin tanımı

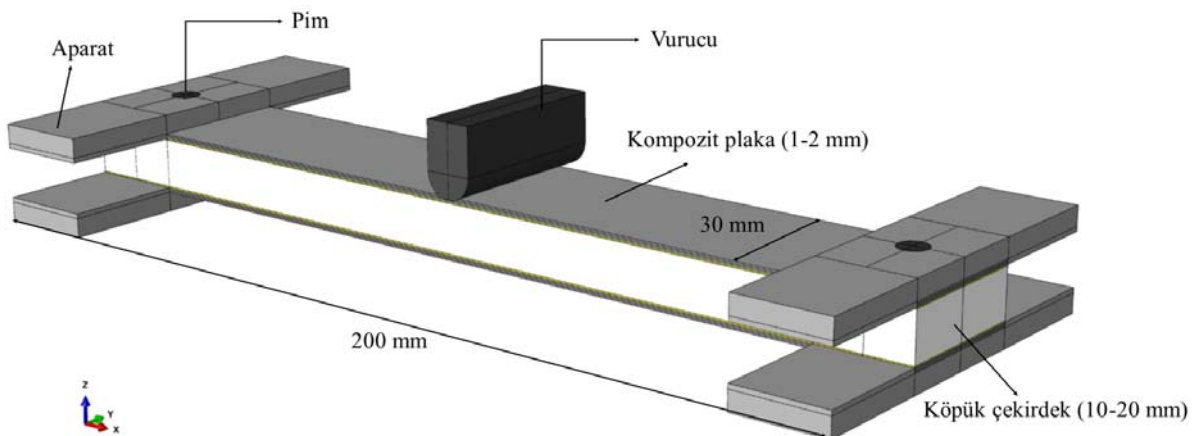
Burada t_n^{und} ve t_s^{und} sırasıyla çekme ve kaymadaki hasar ve bozunum kuralı başlamadan, elastik bölgedeki ($d_{n,s} = 0$) anlık kohezif yüzey gerilmeleridir (tractions) ve tamamen hasar oluştuğunda ise $d_{n,s} = 1$ halini alır. Bu açıdan, üçgensel kural için $d_{n,s}$ yazılmak istenirse [66];

$$d_{n,s} = \frac{\delta_{n,s}^f (\delta_{n,s} - \delta_{n,s}^0)}{\delta_{n,s} (\delta_{n,s}^f - \delta_{n,s}^0)} \quad (2.96)$$

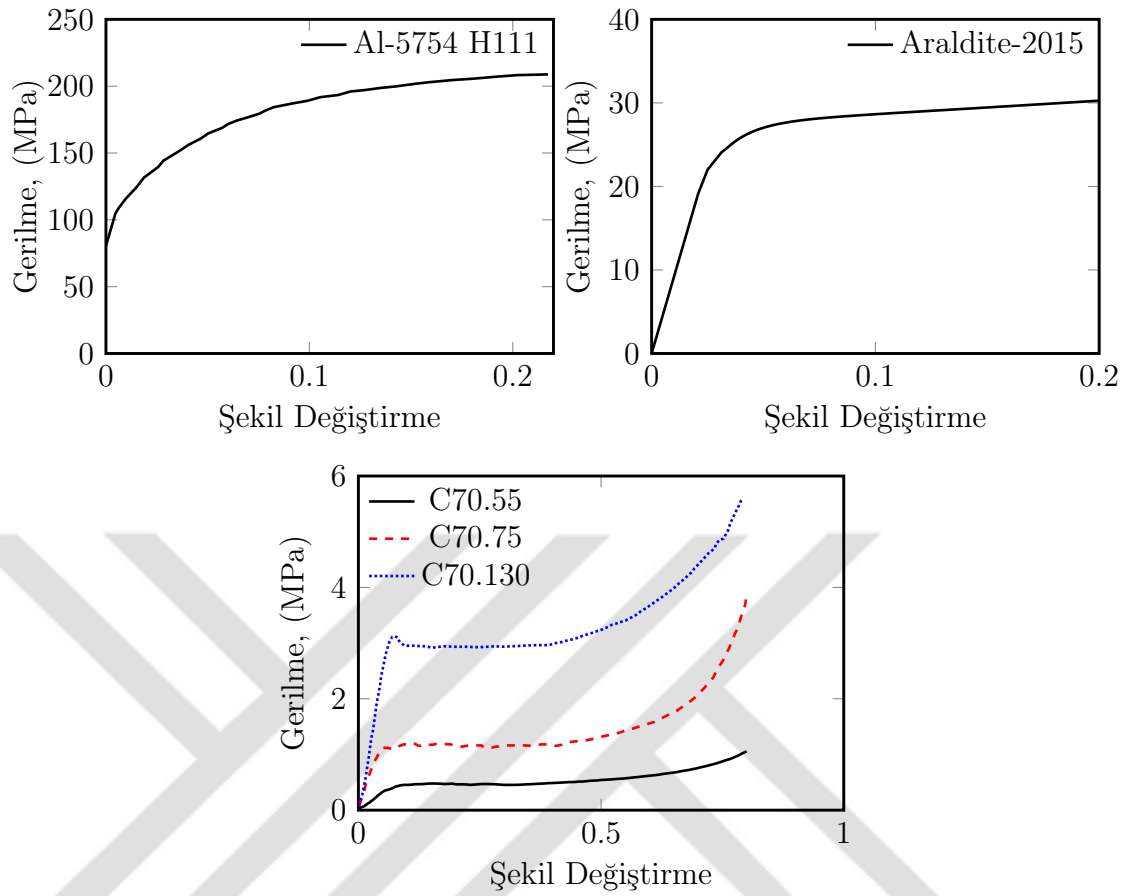
şeklinde yazılabilir.

2.2.4. Teorik Model

Çekirdeği, farklı yoğunluk ve kalınlıklara sahip PVC köpük, yüzey plakaları metal ve fiber takviyeli kompozit plakalardan imal edilmiş sandviç kirişlerin eğilme darbe davranışları üç boyutlu dinamik sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Analizler üç farklı enerji seviyesinde, 5, 10 ve 20 J (1.37, 1.94 ve 2.75 m/s), gerçekleştirilmiştir. AIREX[®] C70 serisi PVC köpük malzemesi kompozit yüzey malzemelerine Araldite[®] 2015 yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmıştır. Sandviç kirişin boyutları 30x200 mm ebatlarındadır. Köpük malzemesi 10 ve 20 mm kalınlıklarında, 3 boyutlu katı elemanlar kullanılarak (C3D8R), yukarıda ayrıntılı anlatılan malzeme modelleri ile modellenmiştir. Yüzey plakaları 1 ve 2 mm kalınlıklarında, 3 boyutlu katı elemanlar kullanılarak (C3D8R), ortotropik elastik malzeme modeli kullanıcı tanımlı 'user defined' kullanılarak uyarlanmıştır. Yapıştırıcı kalınlığı 0.25 mm olacak şekilde, 3 boyutlu kohezif elemanlar kullanılarak (COH3D8), yapıştırıcı tabakası kohezif bölge modeli 'cohesive zone model' ile modellenmiştir. Analizler farklı yüzey malzemeleri, yüzey malzemesi kalınlıkları, köpük yoğunlukları, köpük kalınlıkları ve kullanılan fiber takviyeli kompozitlerin farklı fiber açıları için tekrarlanmıştır. Teorik modelin, geometrik boyutları Şekil 2.20'de gösterilmiştir. Üç boyutlu sonlu elemanlar



Şekil 2.20. Teorik model ve geometrik boyutları



Şekil 2.21. Sandviç yapıyı oluşturan metal, yapıştırıcı ve köpük malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme diyagramları.

paket programı olarak ABAQUS® /Explicit 6.14 kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında kullanılan malzemelere ait gerilme ve şekil değiştirme eğrileri Şekil 2.21'de verilmiştir. Alüminyum malzemesine ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi, ASTM standartlarına göre çekme numunesi üretilip çekme testi yapılarak

Tablo 2.3. PVC köpük malzemelerinin mekanik özellikleri.

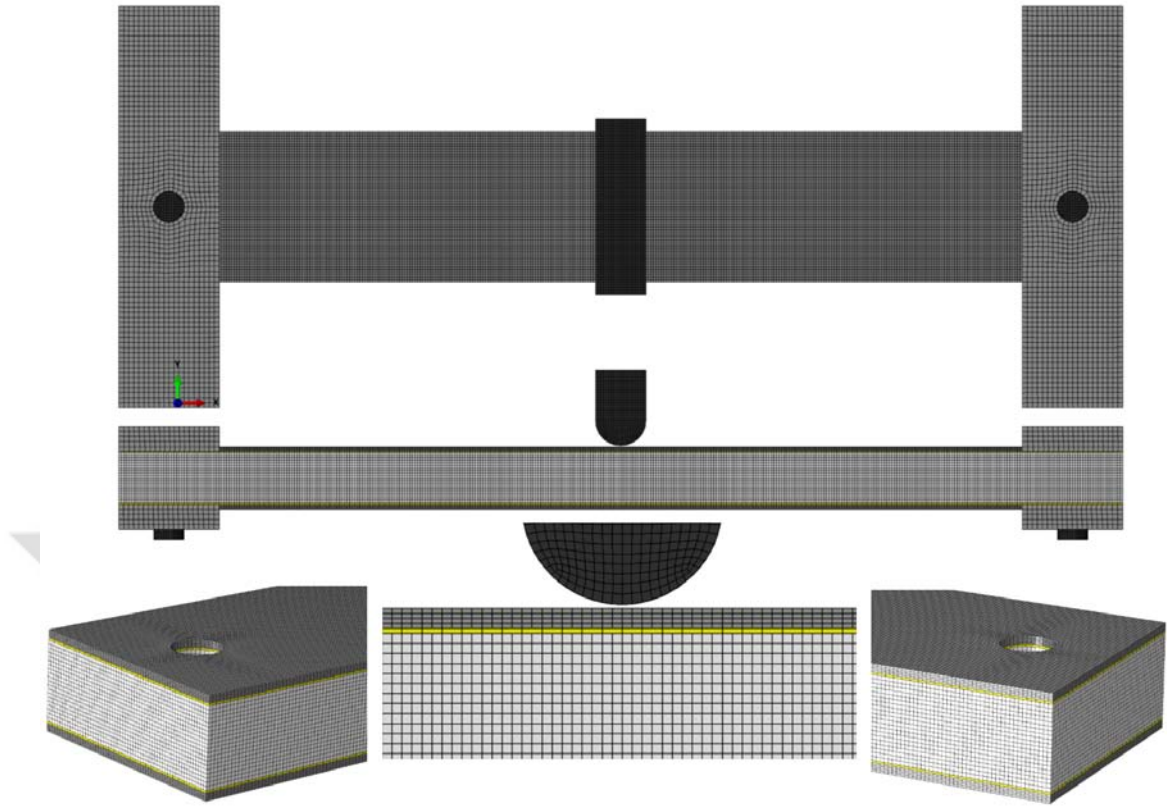
Özellik	C70.55	C70.75	C70.130
Yoğunluk (kg/m^3)	60	80	130
Poisson oranı	0.32	0.32	0.32
Basma modülü (MPa)	69	97	160
Basma mukavemeti (MPa)	0.9	1.3	2.6
Basma kopma şekil değiştirmesi	0.7	0.7	0.7
Çekme modülü (MPa)	45	66	110
Çekme mukavemeti (MPa)	1.3	2	3.8
Kayma modlülü(MPa)	22	30	47
Kayma mukavemti (MPa)	0.8	1.2	2.3
Kayma kopma şekil değiştirmesi	0.16	0.23	0.3

elde edilmiştir [67]. Yapıştırıcı malzemesinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi üretici firmadan temin edilmiştir. Köpük malzemesinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri ise ASTM standartlarına göre basma numunesi üretilip, basma testine maruz bırakılarak elde edilmiştir [68]. Köpük malzemesinin mekanik özellikleri Tablo 2.3’de gösterilmiştir [16]. Kohezif bölge modelinde kullanılan Araldite® 2015 yapıştırıcı malzemesinin mekanik özellikleri Table 2.4’ de verilmiştir [69].

Tablo 2.4. Araldite® 2015’in kohezif parametreleri ve mekanik özellikleri

Özellik		
Elastiklik modülü	E [GPa]	1.85
Poisson oranı	ν	0.33
Çekme akma gerilmesi	σ_y [MPa]	12.63
Çekme kopma şekil değiştirmesi	ε_f [%]	4.77
Kayma modülü	G [GPa]	0.56
Kayma akma gerilmesi	τ_y [MPa]	14.6
Kayma kopma şekil değiştirmesi	γ_f [%]	43.9
Çekme ayrılma gerilmesi	t_n^0 [MPa]	21.63
Kayma ayrılma gerilmesi	t_s^0 [MPa]	17.9
Çekme toklukluğu	G_n^c [N/mm]	0.43
Kayma tokluğu	G_s^c [N/mm]	4.70

Vurucu, geometrik bir süreksizliğe sebebiyet vermemesi ve düzgün bir eğilme durumu oluşturması için yarı silindirik uçlu seçilmiştir. Rijit malzeme davranışı ve 3 boyutlu rijit elemanlar (R3D4) ile modellenmiştir. Vurucu sadece darbe yönünde harekete serbest bırakılmış, bu yönde ilk hız verilmiş ve diğer yönlerde hareketi engellenmiştir. Sandviç kirişler pimli bağlantı kullanılarak darbe cihazına bağlanmıştır ve aynı sınır şartlarında analizler gerçekleştirilmiştir. Pimler ve sıkıştırma aparatları rijit malzeme modeli ve 3 boyutlu rijit elemanlar (R3D4) kullanılarak modellenmiştir. Analizlerde, köpük çekirdeğin deforme olmuş ağ geometrisinde, düğüm noktalarında sayısal hatalara neden olabilecek eleman bozulmaları olduğu için, 'adaptive meshing algorithm' (Arbitrary Lagrangian and Eulerian Algorithm) modele dahil edilmiştir. Ayrıca 'hourglass control', aşırı eleman bozulmalarını önlemek ve sayısal integralleri doğru bir şekilde hesaplamak için köpük çekirdeğin sonlu elemanları modeline uygulanmıştır. Sandviç kiriş, vurucu, sıkıştırma aparatları ve pimler arasındaki mekanik bağlantı 'General Contact Algorithm' temas algoritması sürtünmeli temas davranışı (sürtünme kat sayısı, 0.5) kullanılarak modellenmiştir. Sandviç kiriş malzemeleri arasındaki, kompozit



Şekil 2.22. Sandviç kirişin ağ yapısı

plakalar, yapıştırıcı ve köpük çekirdek, temas algoritması 'Surface to surface with Tie constraints' kullanılarak modellenmiştir. Fiber takviyeli tabakalı kompozit plakayı oluşturan tabakalar arasında delaminasyonları takip edebilmek için tabakalar arası 2 boyutlu kohezif bölge modeli ile modellenmiştir.

Yapıştırıcı tabaka, kohezif bölge modeline (CZM) uygun modellenmiş ve kalınlık boyunca bir eleman kullanılmıştır. Kompozit plakalar ortotropik elastik malzeme modeline sahiptir ve fiber malzemesinin mekanik özellikleri Tablo 2.5' de gösterilmiştir. Deneysel olarak üretimi yapılan kompozit plakaların 1 mm kalınlıkta dört tabakaya sahip olmasından dolayı sonlu elemalar modeli oluşturulurken plakalar 1 mm kalınlığında dört katmanlı modellenmiştir. ABAQUS® sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak modellenen sistemin ağ yapısı, kompozit plakaların, yapıştırıcının ve pim deliklerinin ayrıntılı görüntüleri Şekil 2.22'de verilmiştir. ABAQUS® yazılımında modellemesi Python programlama dili kullanılarak parametrik olarak gerçekleştirilmiştir. Kompozit plakaların her biri 95520, yapıştırıcı tabaka 5976, köpük çekirdek 477600 elemana sahip iken modelin tamamı 719780 eleman 964798 düğüm noktasından oluşmaktadır.

Tablo 2.5. Karbon fiber/epoksi kompozit tabakanın mekanik özellikleri

Özellik	Karbon fiber [70] (T700S/Epoksi)
Fiber hacim oranı (V_f)	%64
Yoğunluk, ρ (kg/m^3)	1.71
Boyuna elastisite modülü, E_1 (GPa)	150.9
Enine elastisite modülü, E_2 (GPa)	11.2
Düzlem içi kayma modülü, G_{12} (GPa)	5.3
Düzlem dışı kayma modülü, G_{13} (GPa)	5.3
Düzlem dışı kayma modülü, G_{23} (GPa)	1.4
Poison oranı, ν_{12}	0.29
Poison oranı, ν_{23}	0.33

Kompozit plakaların sadece elastik davranışı dikkate alınmıştır. Matris malzemesinde plastik davranış olması beklensede mekanik özelliklerinin fibere göre daha zayıf olmasından dolayı dikkate alınmamıştır. Kompozit malzemenin yük taşıma kabiliyetini sonlu elemanlar yöntemine aktarmak için hasar teorileri geliştirilmiştir ancak bu hasar teorileri (hasar başlama kriterleri) malzemede meydana gelen muhtemel hasar bölgelerini tespit için geliştirilmiştir. Kompozit malzemede oluşan hasardan dolayı malzemenin yük taşıma kabiliyetinin azalması sonlu elemanlar yöntemine farklı yöntemlerle aktarılmaktadır. Bu tez çalışmasında fiber ve matris malzemesinin mekanik özelliklerine, meydana gelen hasarlara bağlı olarak bozunum (degredation) kuralları uygulanmış ve yük taşıma kabiliyetindeki azalma dikkate alınmıştır.

2.2.4.1. Hasar Kriterlerinin Modele Aktarılması

Yüzey malzemeleri, plastik esaslı kompozit plakalar, çekirdeği polimer esaslı PVC köpük olan sandviç kirişlerin düşük hızlı eğilme darbesi analizlerinde kompozit plakalarda, fiber için basma ve çekme altındaki, matris için basma ve çekme altındaki, ayrılma ve kayma hasar kriterleri kullanılmıştır (Tablo 2.6). Hasar kriterlerinde kullanılan fiberin ve matrisin mekanik özellikleri ise Tablo 2.7' de verilmiştir.

Tablo 2.6. Kompozit plakalar için hasar kriterleri [64]

Hasar kriteri	Eşitlik
Hashin fiber çekme	$\left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \frac{1}{S_{12}^2} (\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2) \geq 1$
Hashin fiber basma	$\left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X_C}\right)^2 \geq 1$
Hashin matris çekme	$\left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{Y_T^2}\right)^2 + \frac{(\tau_{23}^2 - \sigma_2 \sigma_3)}{S_{23}^2} + \frac{(\tau_{12}^2 - \tau_{13}^2)}{S_{12}^2} \geq 1$
Hashin matris basma	$\frac{\sigma_2}{Y_C} \left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}}\right)^2 - 1 \right] + \left(\frac{\sigma_2}{2S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1$
Hashin kayma	$\left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1$
Hasma delaminasyon	$\left(\frac{\sigma_3}{Z_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{31}}{S_{31}}\right)^2 \geq 1$

Tablo 2.7. Karbon fiber/epoksi kompozit plaka için mikro-mekanik özellikler

Özellik	Karbon fiber [70] (T700S/Epoksi)
Boyuna çekme mukavemeti, X_T (MPa)	1858.3
Enine çekme mukavemeti, Y_T (MPa)	25.4
Boyuna basma mukavemeti, X_C (MPa)	576.8
Enine basma mukavemeti, Y_C (MPa)	107.3
Düzlem için kayma mukavemeti, S_{12} (MPa)	79.5
İnterlaminar kayma mukavemeti, S_{13} (MPa)	22.9

Hasar kriterleri ABAQUS[®] yazılımına uygun kullanıcı tanımlı malzeme modeli FORTRAN dilinde, VUMAT altkodu yazılarak uygulanmıştır. ABAQUS[®] ilk yük iterasyonunu yapar, iterasyon sonunda hasar kriterlerinde kullanılacak parametreleri hesaplar. Malzemeye ait deneysel sabitler FORTRAN alt programında kullanılmıştır (Tablo 2.7). Hasar kriterleri her bir yük iterasyonu sonunda ABAQUS[®] tarafından her bir integrasyon noktasında hesaplanır ve yorumlanır. Hasar kriterine göre her bir integrasyon noktasında gerekli parametreler kullanılarak hesaplamalar yapılır. ABAQUS[®] tarafında SDV olarak tariflenen hasar kriterleri [0 – 1] arasında indeks değişkenine göre hesaplanır. SDV'nin 1 olması demek artık o integrasyon noktası ile ilgili hasar kriterinde hasara uğradığı (fail) anlamına gelir. SDV'lere yazılan indekslere göre bir bozunum kuralı oluşturulmuş ve kompozit malzemenin mekanik

özelliklerine aktarılmıştır.

2.2.4.2. Bozunum Kuralı (Degredation Rule)

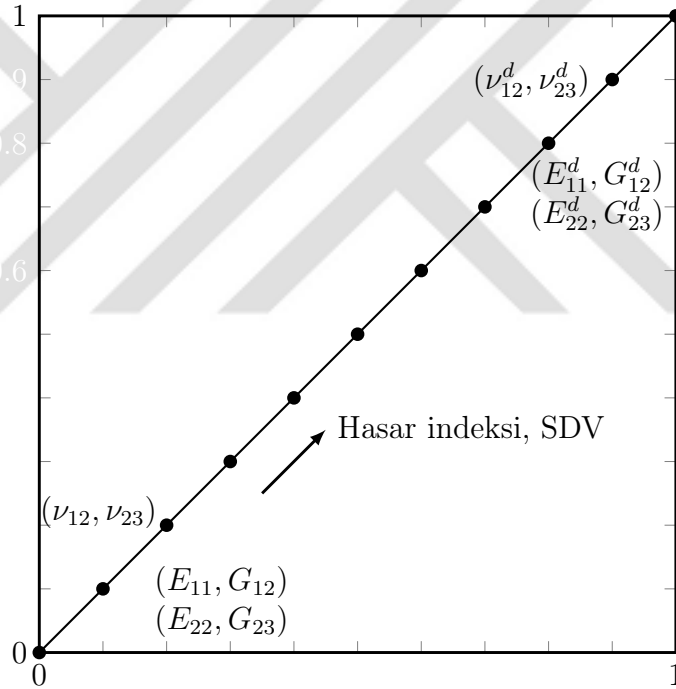
Kompozit malzemelerin sonlu elemanlar modeli ve hasar kriterleri önceki bölümlerde ayrıntılı anlatılmıştır. Kompozit malzemedeki yük taşıma kapasitenin oluşan hasarlar sonucu azalması, oluşturulan bir bozunum (degradation) kuralı ile sonlu elemanlar modeline aktarılmıştır. Bozunum kuralları, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin seçilen kriterlere göre lineer veya lineer olmayacak şekilde azaltılması ile oluşturulmaktadır. Kompozit malzemeler için uyarlanan hasar kriterlerinin değerlendirme sonuçlarına göre malzeme mekanik özellikleri güncellenir ve bu ilgili noktada malzeme davranışını belirler. Her iterasyonda güncelleme gerçekleşir ve malzemenin davranışı sürekli değişir. Çalışmalarda bozunum kurallarının sınırları deneysel şartlara göre doğruluk kazanmıştır.

Bu çalışmada bozunum kuralı, iki farklı hasar kriterinin hasar indekslerine göre bir arada uygulanmıştır. Kompozit malzemedeki fiber basma ve çekme hasar kriterine göre malzemenin mekanik özellikleri azaltılarak modele uygulanmıştır. Elastik özelliklerdeki bu azalış, deneysel sonuçlara göre düzenlenmiştir. Kural uygulanırken şu yollar izlenmiştir: Kompozit malzemenin çekme altında yükü fiberin, basma altında ise yükü matris malzemesinin taşıdığı hükmünden yola çıkılarak, fiber çekme hasarına göre malzemenin fiber yönündeki mekanik özellikleri, E_{11} , G_{12} ve ν_{12} , deneysel sonuçlara göre karar verilen indirgeme parametrelerine göre lineer olarak azaltılmıştır. Fiber basma hasarına göre, fiber eksenine dik yöndeki mekanik özellikler, E_{22} , G_{23} ve ν_{23} , lineer olarak azaltılmıştır (Tablo 2.8).

Tablo 2.8. Hasara uğrayan malzeme özellikleri için bozunum kuralı

Hasar tipi	Bozunum kuralı
Fiber çekme hasarı	$E_{11}^d = 0.05E_{11}$ $G_{12}^d = 0.05G_{12}$ $\nu_{12}^d = 0.5\nu_{12}$
Fiber basma hasarı	$E_{22}^d = 0.05E_{22}$ $G_{23}^d = 0.05G_{23}$ $\nu_{23}^d = 0.5\nu_{23}$

Kompozit malzeme için tariflenen hasar kriterinde belirtildiği gibi hasar indeksi (SDV) değerleri her bir integrasyon noktası için gerekli parametreler kullanılarak hesaplanır, tüm integrasyon noktalarını içerecek şekilde matris formunda kaydedilir. Her bir hasar tipine göre $[0 - 1]$ arasında hasar düzeyini göstermek üzere hesaplanan bir değer atanır. Malzemenin mekanik özelliklerinin azalışı, artan hasar indekslerine göre değişmektedir. Bunun için lineer bir doğru tariflenmiş (Şekil 2.23), bu doğru deneysel sonuçlara göre sonuç vermesi için 10 eşit parçaya bölünmüştür (Ara değerler interpolasyon ile hesaplanır). Malzemenin mekanik özelliklerinin bu doğruya göre yeni değerleri için Python programlama dilinde bir tablo oluşturulmuştur ve ortotropik elastik malzeme modeline aktarılmıştır.



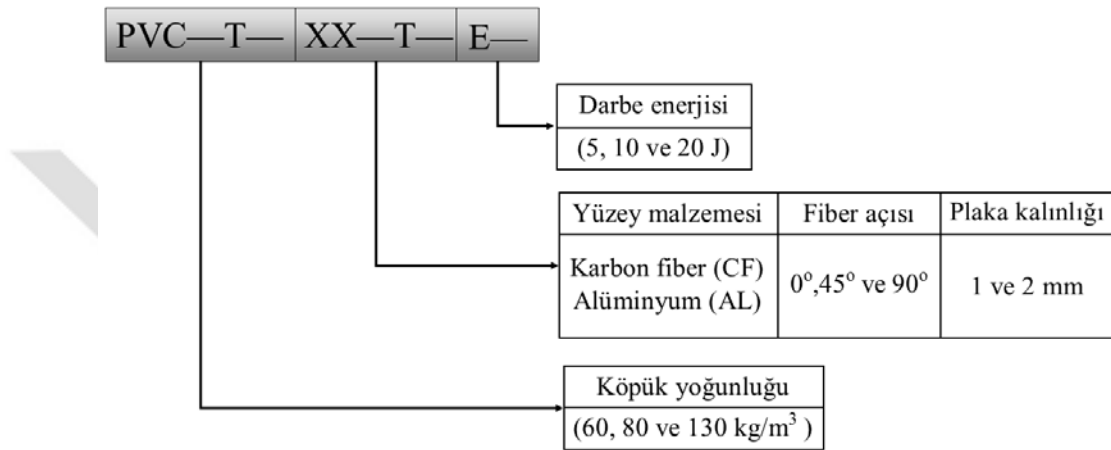
Şekil 2.23. Bozunum kuralının sonlu elemanlar modeline uygulanması

2.2.5. Düşük Hızlı Darbe Analizleri

Sandviç kiriş yapıyı oluşturan malzemelerin mekanik özellikleri dikkate alınarak, farklı yüzey malzemeleri, yüzey malzemesi kalınlıkları ve kompozit fiber açıları, köpük kalınlığı ve yoğunluğu, farklı darbe enerjileri için kirişlerin davranışları incelenmiştir. Darbe analizleri farklı hızlarda yapılmış olup, temas kuvveti, yer değiştirme ve kinetik enerji değişimleri incelenmiştir. Kompozit malzemelerin hasar tipleri ve gelişimleri ayrı ayrı irdelenmiş tabakalar arası ve tabakalar içi hasar tipleri

ve gelişimleri ayrıntılı incelenmiştir. Analizler ABAQUS® yazılımı ile 40 ve 24 çekirdekli 64 GB RAM kapasiteli bilgisayarlarda gerçekleştirilmiştir. Her bir analiz yaklaşık 12-24 duvar saati süresinde tamamlanmıştır.

Testleri ve analizleri yapılacak olan numuneler oldukça fazla ve farklı özelliklere sahip olduğu için, numuneleri sınıflandırmak için şekil 2.24'de gösterildiği gibi bir isimlendirme tarzına ihtiyaç duyulmuştur:



Şekil 2.24. Deney numunelerinin isim kısaltmalarının açıklanması

3. BÖLÜM

ÖN ÇALIŞMALAR

3.1. Giriş

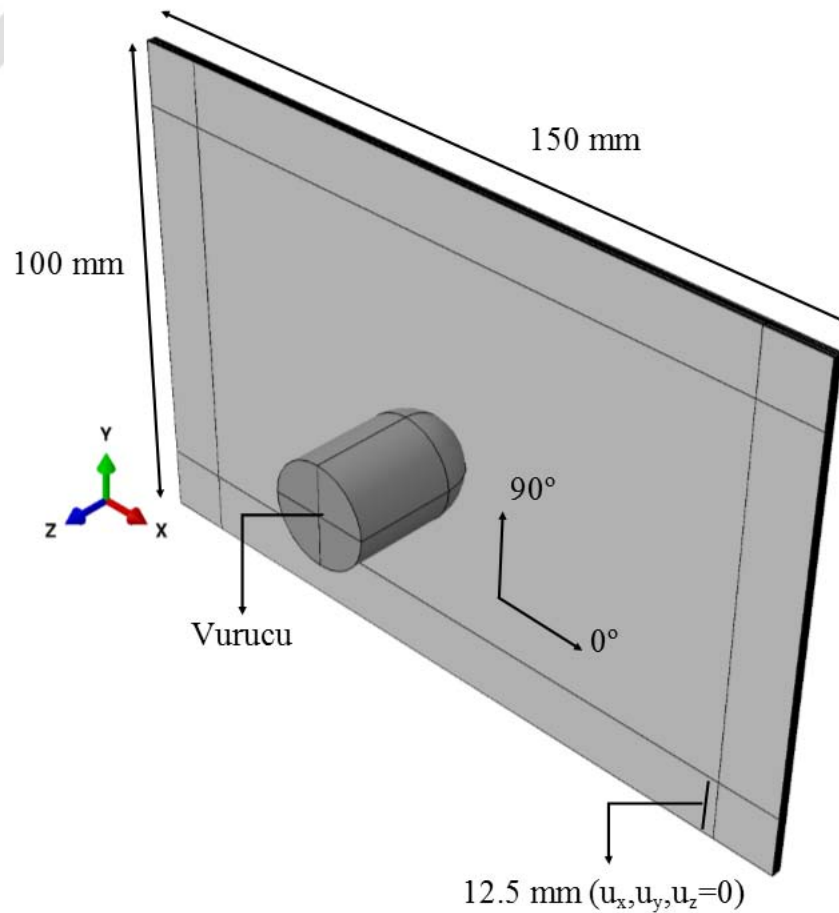
Bu bölümde, fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin düşük hızlı darbe davranışlarının tespit edilmesinde kullanılan yöntemler, karşılaşılan zorluklar, çalışılan farklı parametreler açıklanmıştır. Bu çalışmaların büyük bölümünü sayısal çalışmalar oluşturmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan yöntemlere karar verilme aşamalarının ayrıntılı açıklanmasının, ileriki çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir. Deneysel çalışma aşamasında öncelikli gereken hususlar malzeme seçimleri ve numune geometrik boyutlarıdır. Sayısal çalışmalarda ise karar verilmesi gereken hususların tümüne deneysel çalışmanın sonuçlarına göre karar verilmiştir.

3.2. Sonuçlar

Şekil 3.1'de fiber takviyeli tabakalı kompozit plakanın sayısal modelinin doğrulanması için kullanılan ve ASTM standartlarına göre üretilen, 8 tabakadan oluşan tek yönlü fiber açısına sahip model, geometrik boyutlar ve sınır şartı gösterilmektedir. Vurucu küresel uç geometrisine sahiptir, çapı 20 mm ve kütlesi 5.045 kg'dır. Deneysel testler ve analizler 5, 10 ve 20 J darbe enerjileri için gerçekleştirilmiştir. Analizler için sonlu eleman tiplerinin hesaplama başarımı önemlidir. Analizler aynı enerji seviyelerinde katı (solid) ve kabuk (shell) elemanlar için yapılmıştır. Katı elemanda bozunum modeli uygulanmış ve elastik sabitlerin bozunum katsayılarına karar verilmiştir. Deneysel ve teorik sonuçlar, temas kuvveti değişimi, kinetik enerji değişimi ve hasar tipleri bakımından irdelenmiştir. Kompozit malzeme modeli ve bozunum kuralı katı ve kabuk elemanlar için kullanılarak

kompozit sandviç kirişlerin eğilme darbe davranışına etkisi araştırılmıştır. Bu analizler yardımıyla köpük malzemesinin ve yapıştırıcı tabakasına ait olan kohezif bölge modelinin başarımının doğrulanması yapılmıştır. Kompozit sandviç kirişin analizlerine dayanarak temas kuvveti değişimi, kinetik enerji değişimi ve hasar tipleri değerlendirilmiştir.

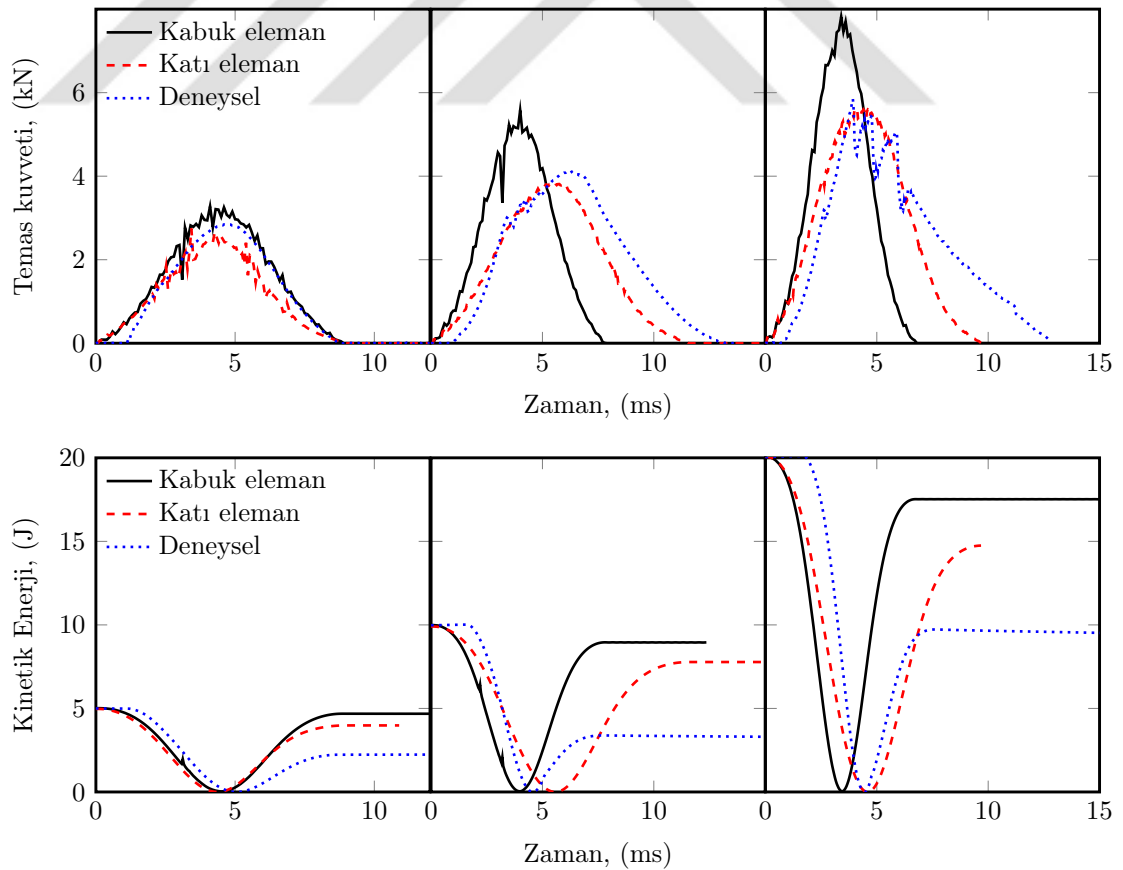
Şekil 3.2’de fiber tekviyeli kompozit plakaların 5, 10 ve 20 J darbe enerjileri altında temas kuvveti ve kinetik enerji değişimlerinin hesaplanmasında katı ve kabuk elemanın başarısı gösterilmektedir. Kabuk eleman ile modellenen kompozit plakada 5, 10 ve 20 J darbe altında en büyük temas kuvvetleri sırası ile 3.2, 5.5 ve 7.8 kN olurken, temas süreleri sırası ile 8.8, 7.8 ve 6.7 ms hesaplanmaktadır. Katı eleman ile modellenen kompozit plakada aynı darbe enerji seviyelerinde en büyük temas kuvvetleri sırası ile 2.7, 3.8 ve 5.6 kN olurken, temas süreleri ise sırası ile 9.0, 11.5 ve 9.6 ms hesaplanmaktadır. Karbon fiber takviyeli kompozit plakanın



Şekil 3.1. Sayısal modelin doğrulanması için kullanılan tek yönlü (fiber açısı=0°), 8 tabaka, 2 mm karbon fiber takviyeli kompozit plaka modeli.

5, 10 ve 20 J darbe enerjileri altında deneysel en büyük temas kuvvetleri sırası ile 2.8, 4.1 ve 5.8 kN, temas süreleri sırası ile 8.8, 13.4 ve 12.7 ms ölçülmektedir. Grafiklerden görülmektedir ki, darbe enerjisi arttıkça en büyük temas kuvvetleri ve temas süreleri artmaktadır. Temas süresinin artması kompozit plakalarda hasar oluştuğunu göstermektedir. Deneysel sonuçlara katı eleman kullanılarak oluşturulan modelin daha çok yaklaştığı görülmektedir. Kabuk elemanlı model daha rijit davranmıştır. Uygulanan bozunum kuralı, deneysel en büyük temas kuvveti seviyelerine hesaplanan kuvvet seviyelerinin yaklaşmasını sağlamaktadır.

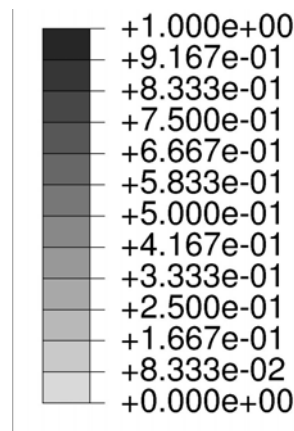
Kinetik enerji-zaman grafikleri, düşük enerji seviyelerinde elastik davranışın daha belirgin olduğunu göstermektedir. Kompozit malzemelerde enerjinin sönümlenmesi fiber ve matriste meydana gelen hasarlar ile ilgilidir. Kabuk eleman ile modellenen plakalar enerji seviyesi arttıkça elastik davranışını sürdürmüştür. Deneysel enerji sönümleme kabiliyeti sayısal modellerden tahmin edilenden daha yüksek çıkmıştır.



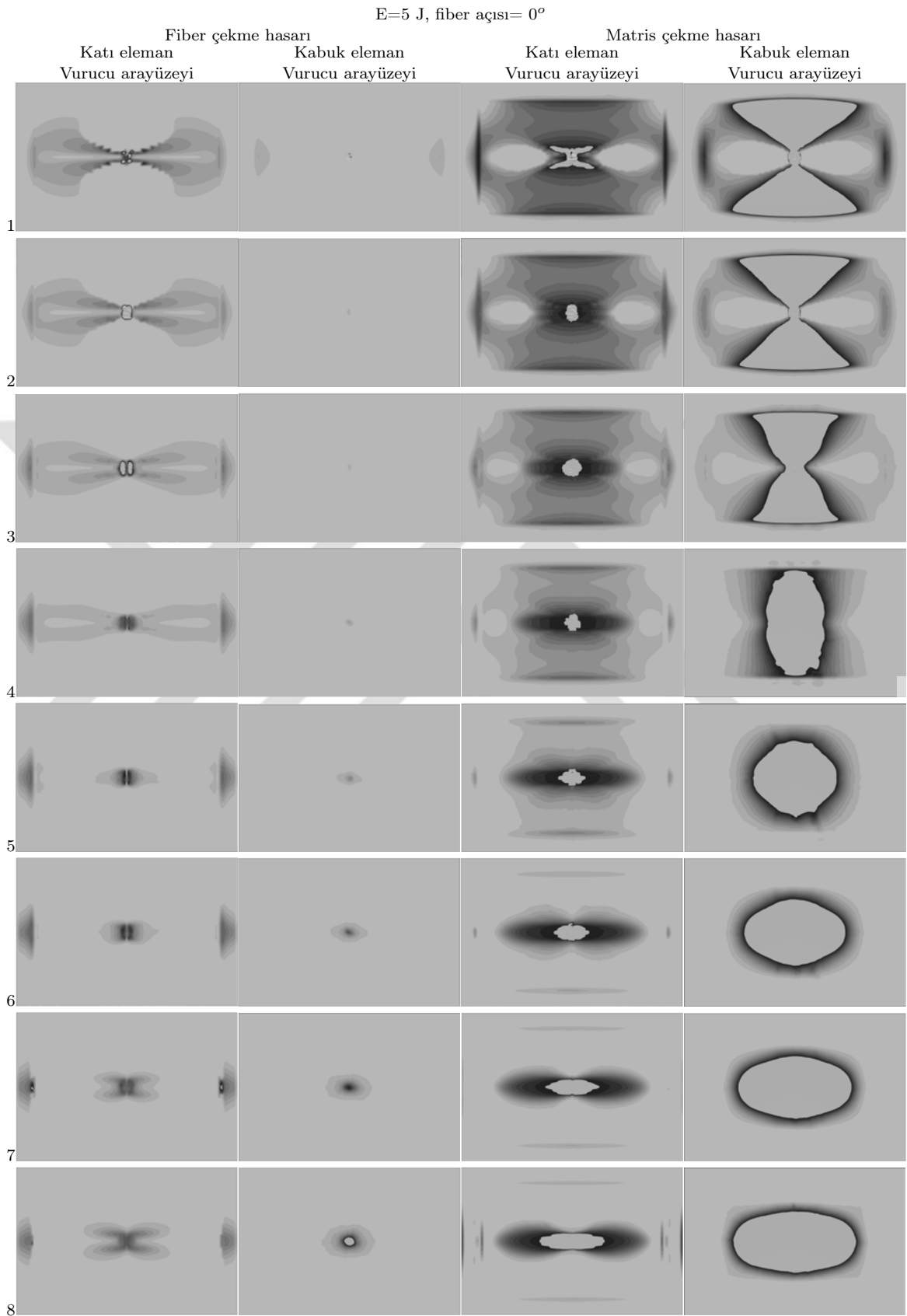
Şekil 3.2. Fiber takviyeli kompozit plakaların (tek yönlü, 8 tabaka, 2 mm) temas kuvveti ve kinetik enerji değişimlerinde kabuk ve katı elemanların başarımı.

Kullanılan katı elemanlı sayısal model ve bozunum kuralı deneysel grafiklere daha çok yaklaşmaktadır.

Şekil 3.4'de 5J'lük bir darbe enerjisi için fiber ve matris çekme hasar kriterleri uygulanarak herbir kompozit plaka tabakalarında elde edilen hasar dağılımlarında kabuk ve katı elemanların başarımı karşılaştırılmaktadır. Kompozit plakanın katmanları üstten alta 1, 2, ...,8 şeklinde sıralanmıştır. Vurucu üst plakanın 1 nolu katmanı ile temas etmektedir. Şekil 3.3'de tez çalışmasında kullanılan hasar indeksi seviye çubuğu görülmektedir. Tüm hasar sonuçları gösterine hasar çubuğuna göre düzenlenmiştir ve bu sayede hasar bölgeleri aynı aralıkta karşılaştırılmasına olanak sağlanmıştır. 5 J darbe enerjisi için kabuk eleman ile modellenen plakanın ilk üç katmanında hasar oluşmaz iken, katı eleman ile modellenen plakada hasar oluşmuştur. Fiber çekme hasarında, katı elemanlar için plakanın 8. katmanına doğru inildikçe hasarın darbe bölgesinde belirginleştiği görülmektedir. Kabuk elemanlarda ise hasarın 5., 6., 7. ve 8. katmanda oluştuğu görülmektedir. Matris çekme hasarı 8. katmana doğru gidildikçe fiber yönünde azalmaktadır. Kabuk elemanlarda hasar daha fazla oluşmaktadır. Hasarın en fazla olduğu bölgeler (hasar indeksi=1) siyah renk ile gösterilmektedir ve bu bölgeler içerisinde kalan elemanlar yük taşımamaktadır. Bu durum kabuk elemanlarda daha fazla görülmektedir. Matris çekme ve basma hasar kriterlerine göre analizler katı ve kabuk eleman için farklı sonuçlar vermiştir.



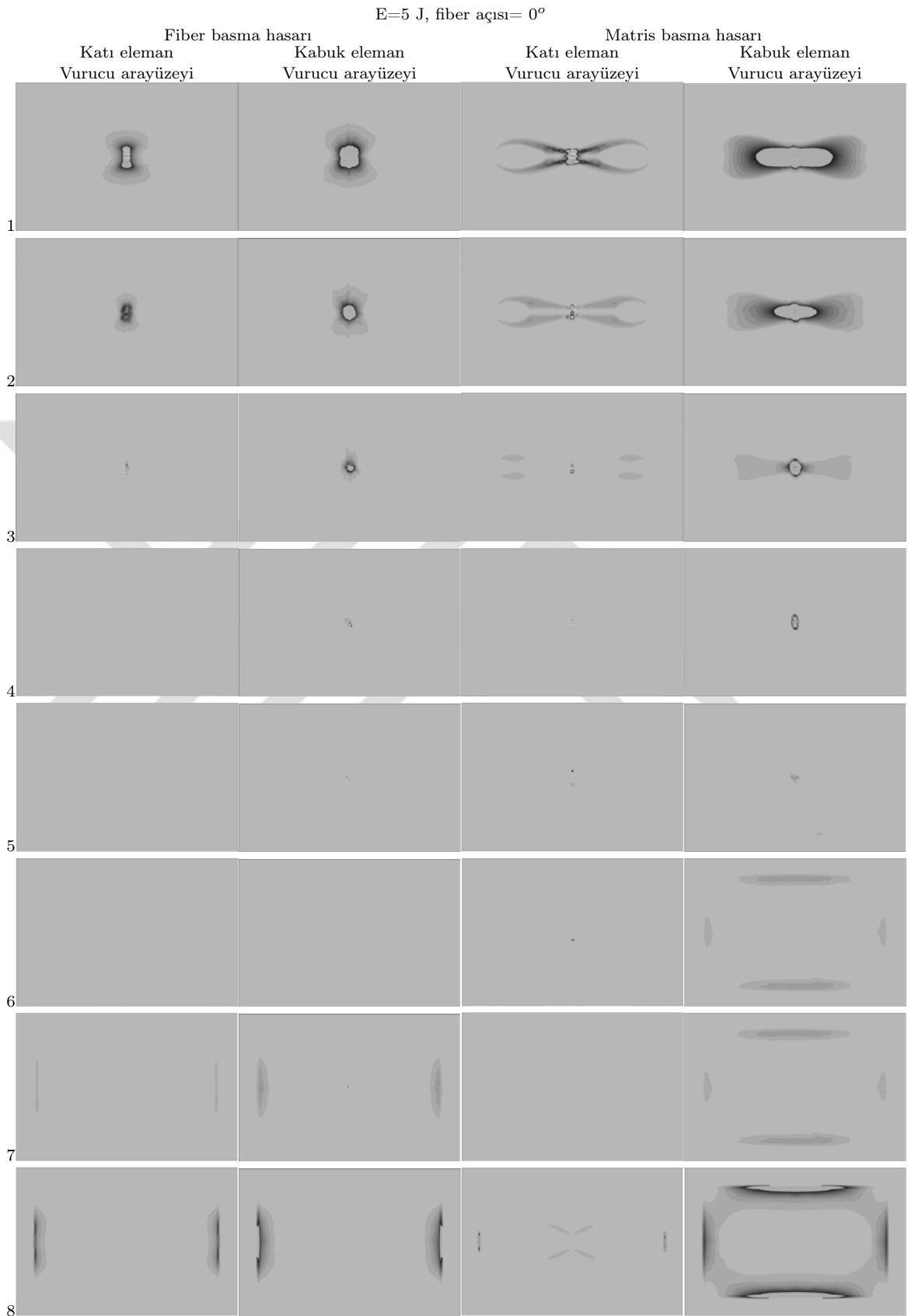
Şekil 3.3. Hasar indeksi seviye çubuğu.



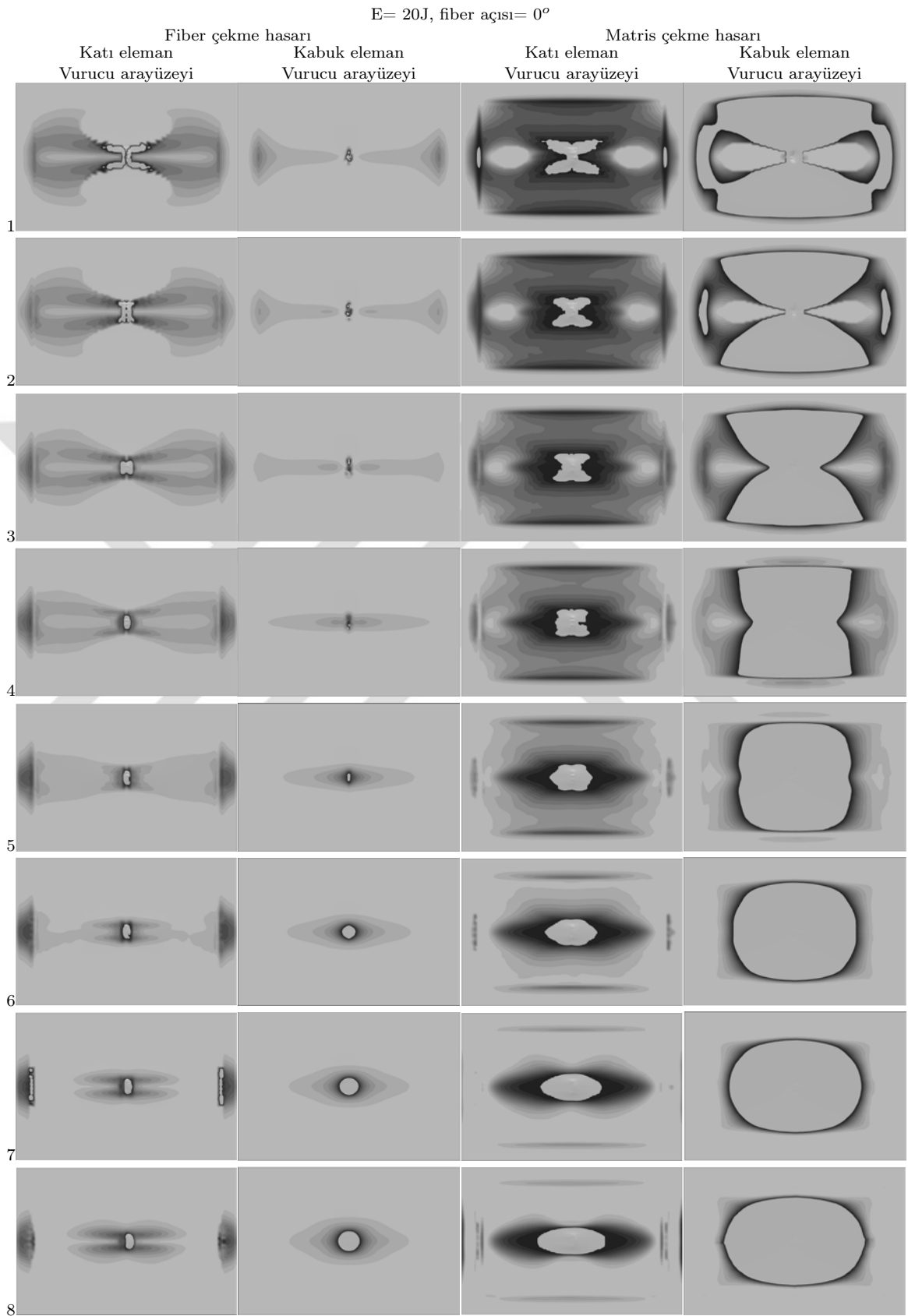
Şekil 3.4. Çekme kriterlerine göre hasar bölgelerinin tahmininde eleman tipinin tesiri (kabuk, katı eleman, $E=5 J$, $\theta= 0^\circ$).

Şekil 3.5’de 5 J darbe enerjisinde darbe sürecinde kompozit plakaların tabakalarında kabuk ve katı elemanlar ile fiber ve matris basma kriterlerine göre hesaplanan hasar bölgeleri gösterilmiştir. Kabuk ve katı elemanlar ile modellenen plakalarda fiber basma hasarı küçük farklılıklar sergilemektedir. 3., 4., 5. ve 6. tabakalarda fiber basma hasarı oluşmamaktadır. Fiberin en fazla basma yüküne maruz kaldığı katmanın 1. katman olduğu görülmektedir ve hasar fibere dik yönde ilerlemektedir. 8. katmana doğru fiber basma hasarında sınır şartlarının belirgin olduğu görülmektedir. Matris basma hasarı ise fiber doğrultusu yönünde görülmektedir. Kabuk elemanlar ile modellenen plakada matris basma hasarı daha belirgindir. 8. katmana doğru benzer sınır şartı etkisini göstermektedir ve matris basma hasarı sınır şartı bölgesinde oluşmaktadır.

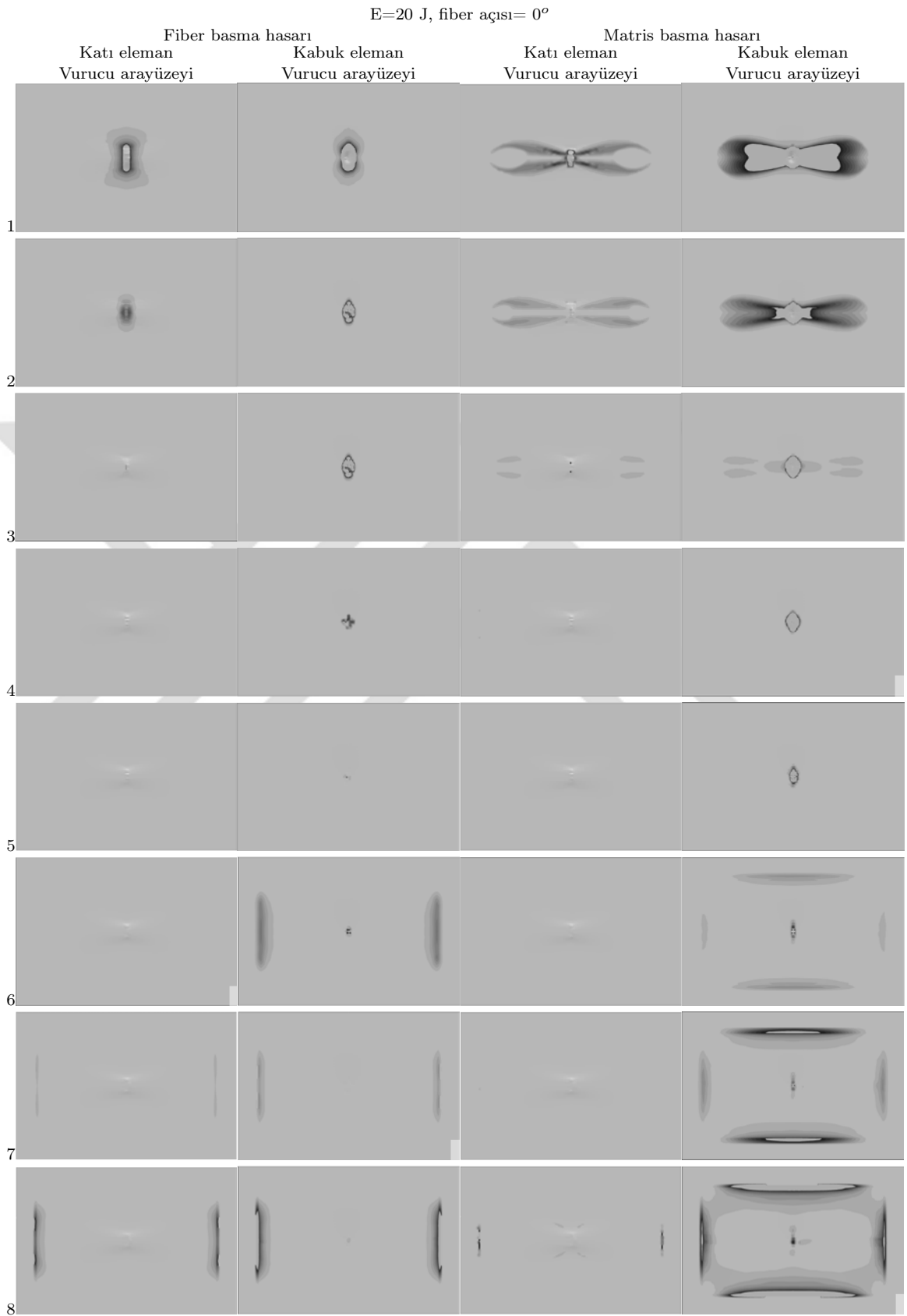
Şekil 3.6’da 20 J darbe enerjisinde darbe sürecinde kompozit plakaların tabakalarında kabuk ve katı elemanlar ile fiber ve matris çekme kriterlerine göre hesaplanan hasar bölgeleri gösterilmiştir. Yüksek enerji seviyesinde üst ve alt plakanın tüm katmanlarında fiber ve matrisin hasara uğradığı, oluşan hasar alanlarının düşük enerji seviyesine göre oldukça fazla olduğu görülmektedir. Katı elemanlı katmanlarda kabuk elemanlı katmanlara göre daha fazla fiber çekme hasarı olduğu görülmektedir. Hasar en fazla 1. katmanda olurken, 8. katmana doğru düzenli olarak azalmaktadır. Alt katmanlarda sınır şartı etkisi daha açık ön plana çıkmaktadır. En büyük hasar alanı vurucu ile temas eden ilk katmanda ortaya çıkmıştır. Matrisin çekme altında uğradığı hasarın alanları fiber hasar alanlarına göre oldukça büyüktür. Kabuk elemanlı modelde daha fazla eleman hasara maruz kalmıştır. Hasar alanları 8. plakaya doğru azalmaktadır. Kabuk ve katı elemanlar matrisin çekme altında hasarını oldukça farklı tahmin etmektedir. Kabuk elemanlar tüm katmanlar boyunca geniş hasar bölgeleri tahmin eder iken katı elemanlar fiber doğrultusunda giderek azalan hasar bölgeleri belirlemiştir. Darbe sonrası kompozit plakaların tabakalarında kabuk ve katı elemanlar ile fiber ve matris basma kriterine göre tahmin edilen 20 J darbe enerjisi altındaki hasar bölgeleri Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Düşük enerji seviyesi ($E=5$ J) altında oluşan hasar bölgelerinin biraz daha genişlediği görülmektedir. Genel davranış ise aynı kalmaktadır.



Şekil 3.5. Basma kriterlerine göre hasar bölgelerinin tahmininde eleman tipinin tesiri (kabuk, katı eleman, E=5 J, $\theta= 0^\circ$)

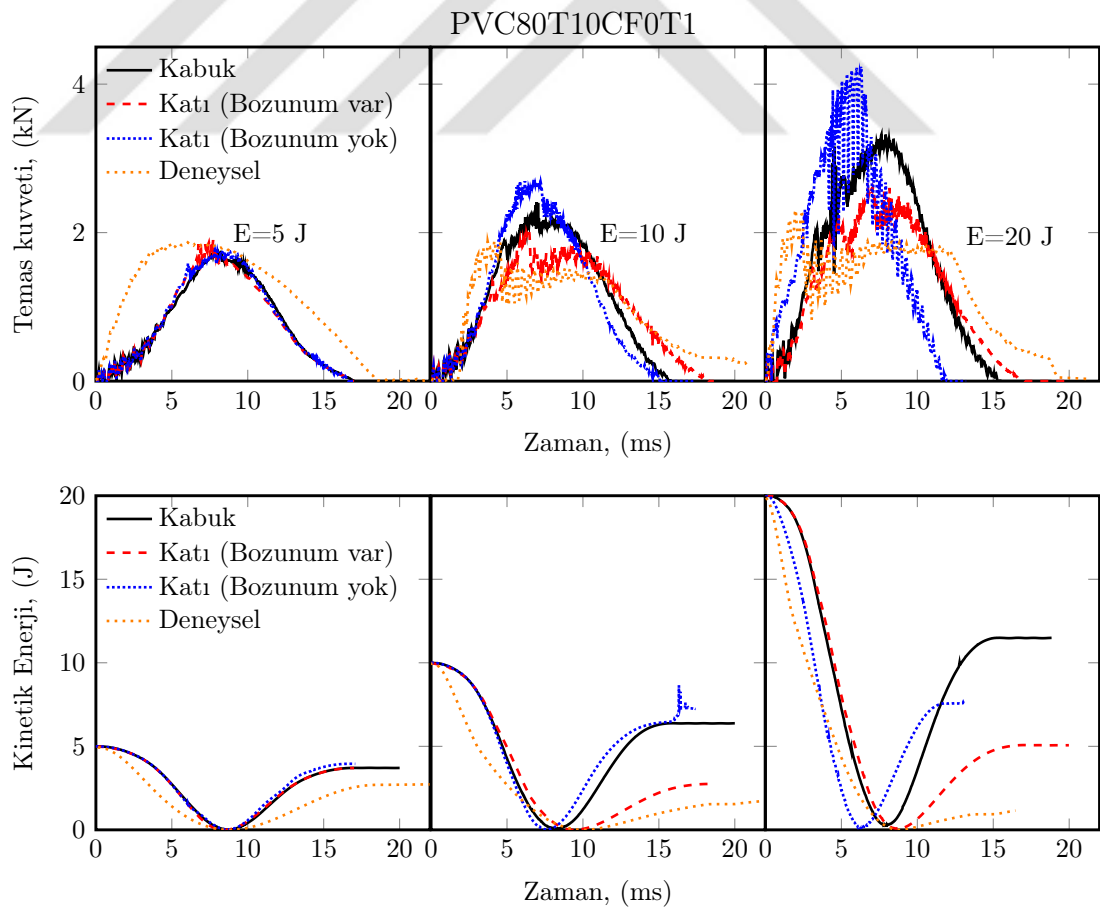


Şekil 3.6. Çekme kriterlerine göre hasar bölgelerinin tahmininde eleman tipinin tesiri (kabuk, katı eleman, E=20 J, $\theta= 0^\circ$)



Şekil 3.7. Basma kriterlerine göre hasar bölgelerinin tahmininde eleman tipinin tesiri (kabuk, katı eleman, E=20 J, $\theta=0^\circ$).

Şekil 3.8'de fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin (köpük yoğunlu 80 kg/m^3 , köpük kalınlığı 10 mm , fiber açısı 0° , 4 tabaka, 1 mm karbon fiber/epoksi, PVC80T10CF0T1) 5, 10 ve 20 J darbe enerjileri altındaki temas kuvveti ve kinetik enerji-zaman değişimlerinde kabuk eleman, katı eleman ve bozunum modelinin etkisi gösterilmiştir. Yüzey malzemesi kabuk eleman ile modellenen sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjisi altındaki en büyük temas kuvvetleri sırası ile 1.7 , 2.4 ve 3.3 kN , temas süreleri 17.1 , 15.8 ve 15.2 ms hesaplanmıştır. Katı elemanlar ve bozunum modeli dikkate alınarak yapı modellenmiş ve bozunum modeli uygulanmayan analizlerin sonucu ile mukayese edilmiştir. Bozunum modelisiz elde edilen en büyük temas kuvvetleri sırası ile 1.8 , 2.7 ve 4.2 kN , temas süreleri ise 16.8 , 15.5 ve 11.9 ms hesaplanmıştır. Bozunum modelinin dikkate alındığı analizleri en büyük temas kuvvetleri sırası ile 1.8 , 2.05 ve 2.6 kN , temas süreleri 16.9 , 18.3 ve 17.1 ms tahmin etmiştir. Kompozit sandviç kirişleri deneysel eğme darbe testi sonucunda



Şekil 3.8. Fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjileri altındaki temas kuvveti ve kinetik enerji değişiminde kabuk eleman, katı eleman ve bozunum modelinin etkisi.

ortaya çıkan en büyük temas kuvvetleri sırası ile 1.8, 1.9 ve 2.1 kN ve temas süreleri 18.5, 21.0 ve 21.3 ms ölçülmüştür. Darbe enerjisi arttıkça temas kuvvetleri artmıştır. Ancak temas süreleri aynı kalmıştır. Deneysel sonuçlar esas alındığında katı elemanlar ile bozunum modelinin uygulanması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Kabuk elemanlar ise deneysel sonuçlara yaklaşımda başarılı olamamıştır. Sandviç kirişlerin en büyük özelliğinin darbe enerjilerini sönmölemek olduğu düşünölmöirse, kinetik enerji değişiminin doğru bir şekilde modellenmesi önem arz etmektedir. Hesaplanmış ve ölçölmüş kinetik enerji değişimleri dikkate alındığında, bozunum modeli uygulanmayan kabuk elemanlı model, deneysel sonuçlara göre çok daha az enerji sönmölenmesine işaret etmiştir. Bozunumlu katı eleman modeli ise deneysel sonuçlara oldukça yaklaşmıştır.

Şekil 3.9'da 5 J darbe enerjisi altında kabuk ve katı elemanlar ile modellenen sandviç kirişlerin kompozit tabakalarında fiber ve matris çekme kriterlerine göre oluşan hasar bölgeleri gösterilmiştir. Kompozit yüzey malzemesinin katmanları üst ve alt plaka arasında 1, 2, 3 ve 4 ile tariflenmektedir. Alt plakanın 1. katmanı, yapıştırıcı arayüzeyi ile temas etmektedir. Sandviç kirişlerin eğilme darbesi sonucu vurucu ile temas eden bölgeler basmaya maruz kalırken, alt bölgeler çekmeye maruz kalmaktadır. Kompozit plakaların katmanlarının hasar alanları Matlab [71] yazılımının görüntü işleme paket ile incelenmiştir. Şöyle ki, hasarlı katman fotoğrafları 2 boyutlu uzaya aktarılarak piksel indeksine dönöştürölmüş, oluşan indeks matrislerinden renk indeksine göre tarama yapılarak hasarlı bölgelerin alanı hesaplanmıştır. Kompozit sandviç kirişlerde fiber çekme hasarı dikkate alındığında, alt plakalarda katı ve kabuk elemanlar hasara işaret etmemiştir. Üst plakalarda ise katı ve kabuk elemanlar hasar bölgelerinde farklılık göstermemiştir. Kabuk eleman 4. katmana doğru artan ve 4. katmanda en büyük hasar alanı 366 mm² 'ye ulaşan hasar gelişimine işaret etmiştir. Katı elemanlı model ise en büyük hasar alanını 516 mm² ve olarak üst plakanın 3. katmanında tahmin etmiştir. Sınır şartlarından dolayı pim delikleri civarında hasarlar oluşmaktadır. Matris çekme hasarı dikkate alındığında ise, kabuk ve katı elemanlı modeller hasar bölgelerinde benzerlik göstermektedir. Katı elemanlar için en büyük hasar alanı 752 mm² ile alt plakanın 4. katmanında, kabuk elemanlar için ise 923 mm² ile yine alt

plakanın 4. katmanında oluşmaktadır. Üst plakanın kabuk elemanlı modelinde orta bölgede oluşan hasarda elemanların tümü yük taşıyamamaktadır. Ancak bu durum katı elemanlı modellerde gözlemlenmemiştir. Çekme hasar bölgeleri, 4. katmana doğru artış göstermektedir. Kabuk elemanlı modellerde daha fazla hasarın olduğu görülmektedir.

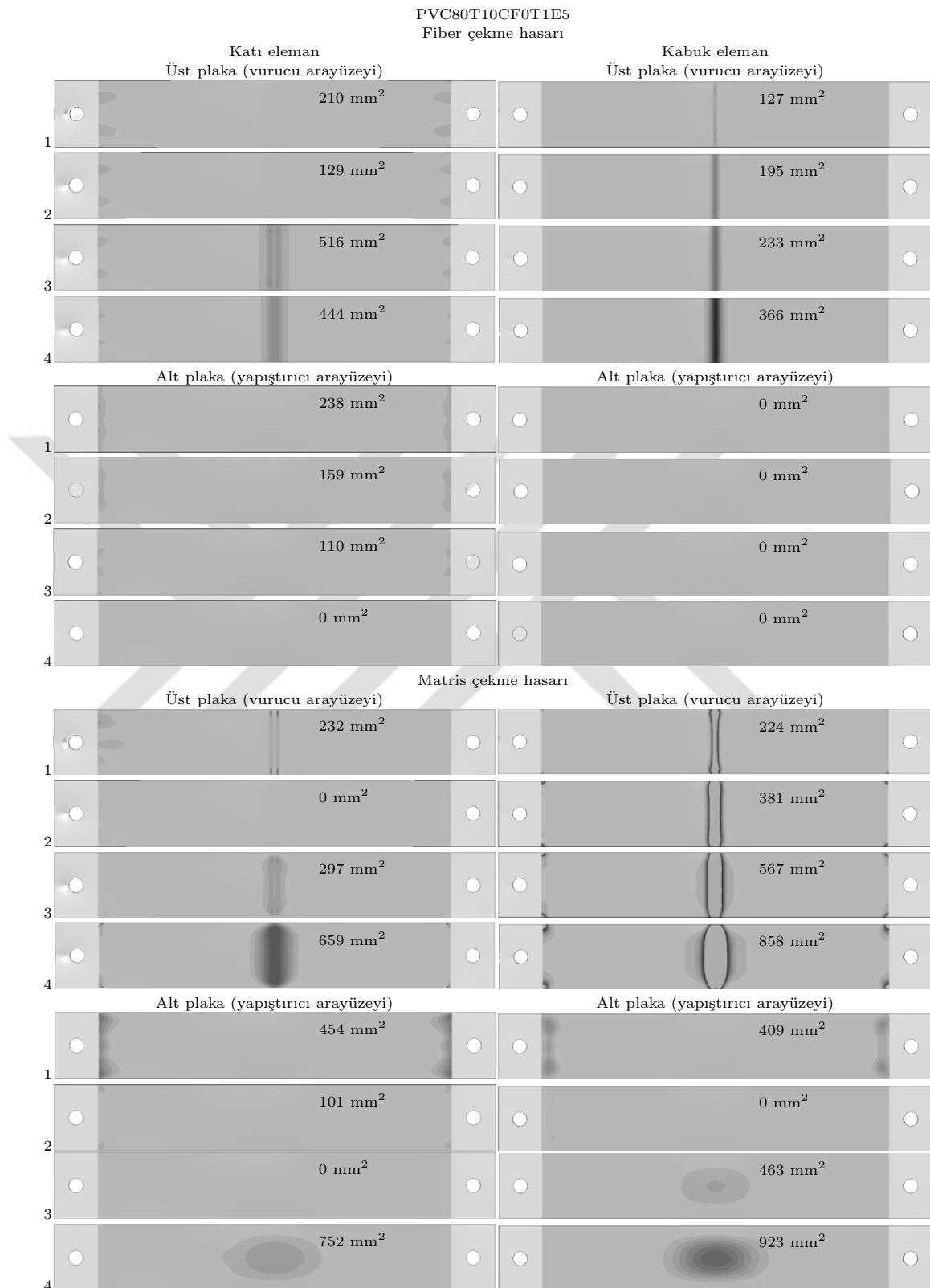
Şekil 3.10'da 5 J darbe enerjisi altında kabuk ve katı elemanlar ile modellenen sandviç kirişlerin kompozit tabakalarında fiber ve matris basma kriterlerine göre oluşan hasar bölgeleri gösterilmiştir. Sandviç kirişlerin vurucu ile temas eden bölgeleri basmaya maruz kaldığı için fiber ve matris basma hasarları üst plakanın 1. ve 2. katmanlarında, katı elemanlar için 622 ve 139 mm² olurken, kabuk elemanlar için 829 ve 424 mm² olmaktadır. Alt plakanın kabuk ve katı elemanlı modelleri için 1. ve 2. katmanlarında fiber basma hasarı oluşmazken 4. katmanda sınır şartından dolayı hasar bölgeleri meydana gelmiştir. Matris basma hasarı irdelendiğinde ise yine kabuk elemanlı modelin daha fazla matris basma hasarı ortaya çıkardığı görülmüştür. Katı elemanlar için en büyük hasar alanı 128 mm² ile üst plakanın 1. katmanında olurken, kabuk elemanlar için 1211 mm² ile üst plakanın 1. katmanında yer almaktadır. Alt plakalardaki durum ise katı elemanlar için hasar alanı oluşmamaktadır. Kabuk elemanlar da ise hasar alanları oluştuğu görülmektedir.

Şekil 3.11'de kompozit sandviç kirişlerin 20 J darbe enerjisi altındaki fiber ve matris çekme hasar kriterine göre oluşan hasar bölgeleri ve alanları katı ve kabuk elemanlı modeller için gösterilmektedir. En fazla fiber çekme hasarı alanı, katı elemanlı model için alt plakanın 4. katmanında 743 mm² ile en fazla hasar alanı oluşurken, kabuk elemanlı model için 4. katmanlara doğru artarak, alt plakanın 4. katmanında 1013 mm² 'lik en büyük hasar alanına erişmektedir. Matris çekme hasarında ise en fazla hasarlı bölgeler alt ve üst plakanın 4. katmanlarında, katı elemanlar ile 1498 mm² ve kabuk elemanlar ile 2291 mm² hesaplanmıştır. Genelde üst plakadaki hasarlar fibere dik yönde oluşurken, alt plakadaki hasarlar fiber doğrultusunda 4. katmana doğru artmaktadır.

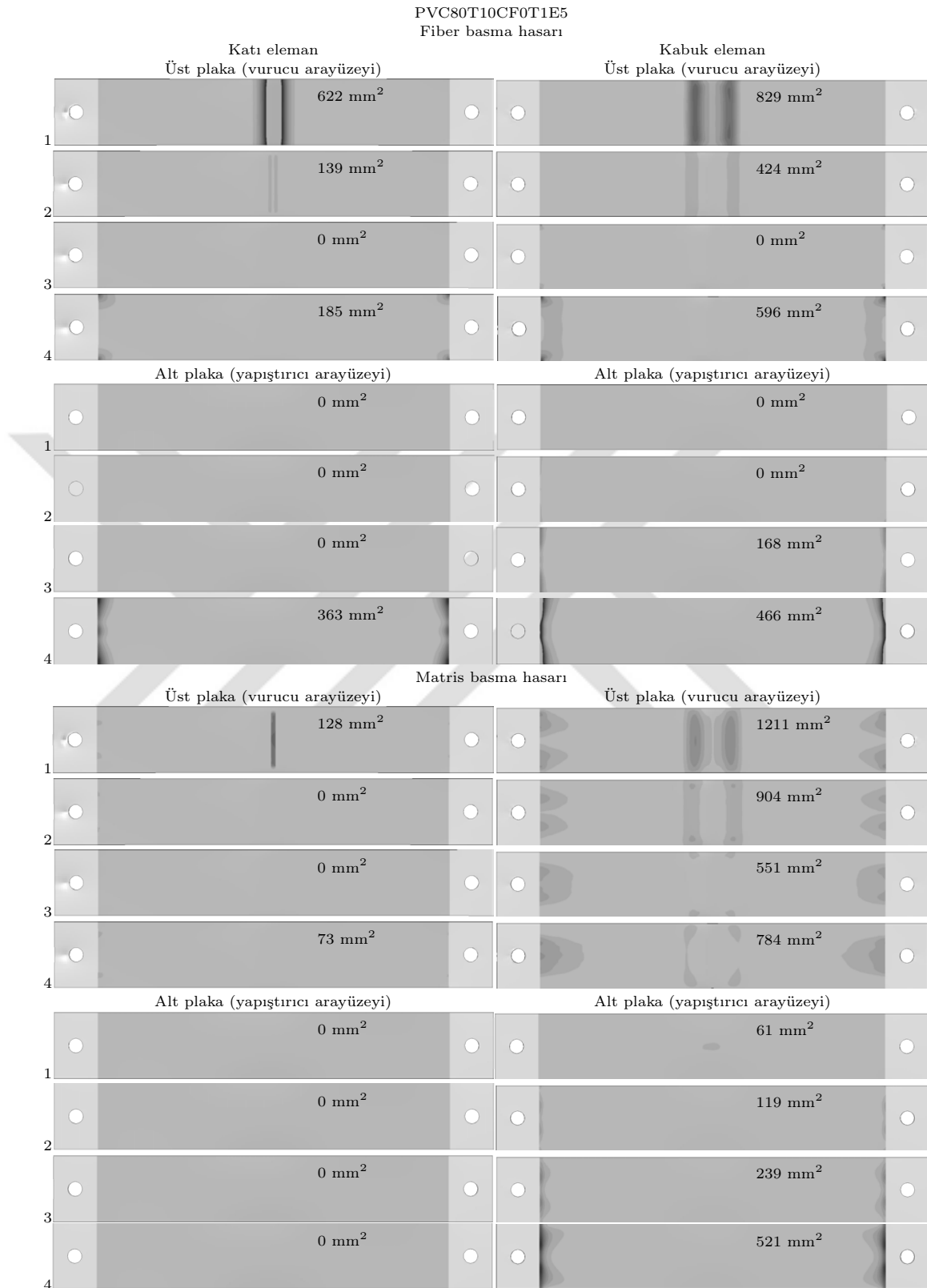
Şekil 3.12 20 J darbe enerjisi altında kompozit sandviç kirişlerin kabuk ve katı eleman kullanılan modelleri için fiber ve matris basma kriterine göre oluşan hasar

bölgelerini ve alanlarını göstermektedir. Kabuk ve katı elemanlı modeller arasında oldukça farklı hasar bölgeleri oluşumuna işaret eder. Kabuk elemanlı modelin en büyük fiber basma hasarı 1698 mm^2 ile üst plakanın 4. katmanında katı elemanlı modelde için alt plakanın 1. katmanında 971 mm^2 ile ortaya çıkmaktadır. Matris basma hasarında ise kabuk elemanlı modelde daha fazla hasarlı bölge tahmin ve en büyük hasar alanı 3979 mm^2 ile üst plakanın 4. katmanında belirirken, katı elemanlı modelde hasar alanları birbirine çok yakın olup birlikte en büyük hasar alanı 407 mm^2 ile alt plakanın 4. katmanında oluşmaktadır.

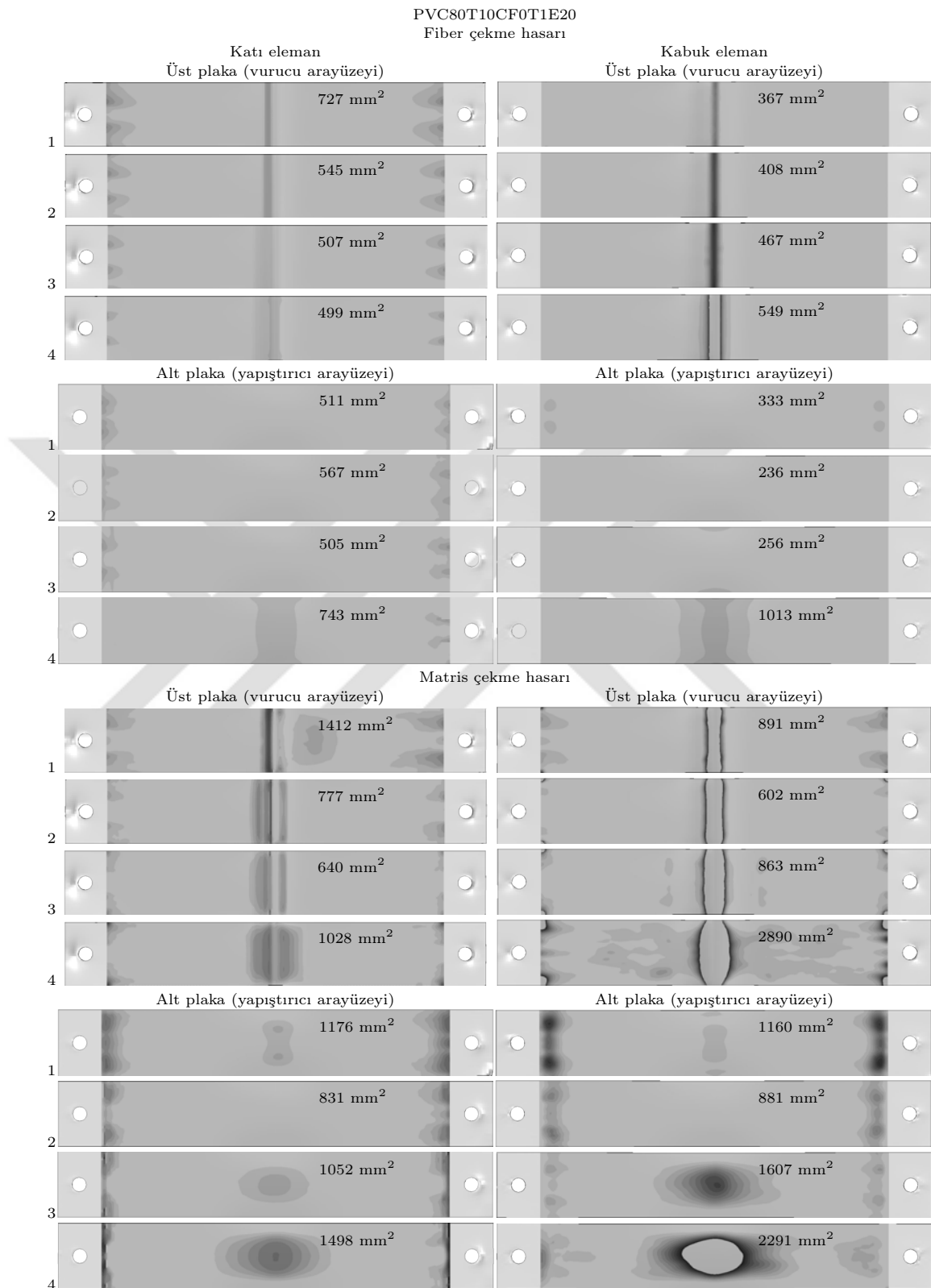




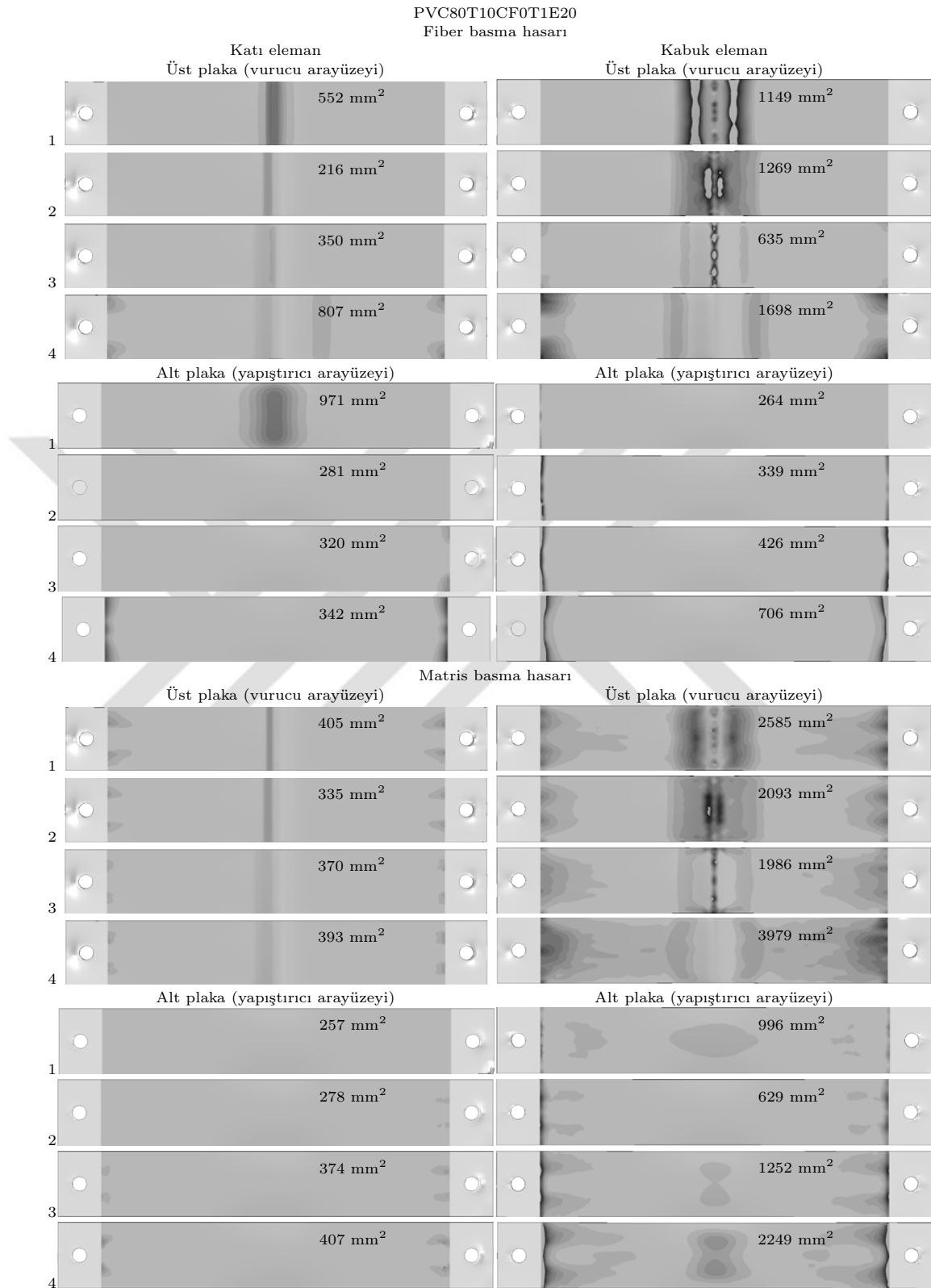
Şekil 3.9. Sandviç kirişlerin kompozit tabakalarında kabuk ve katkı elemanlar ile fiber ve matris çekme hasarı kriterlerine göre oluşan hasar bölgeleri ve alanları ($E= 5 \text{ J}$, $\theta=0^\circ$).



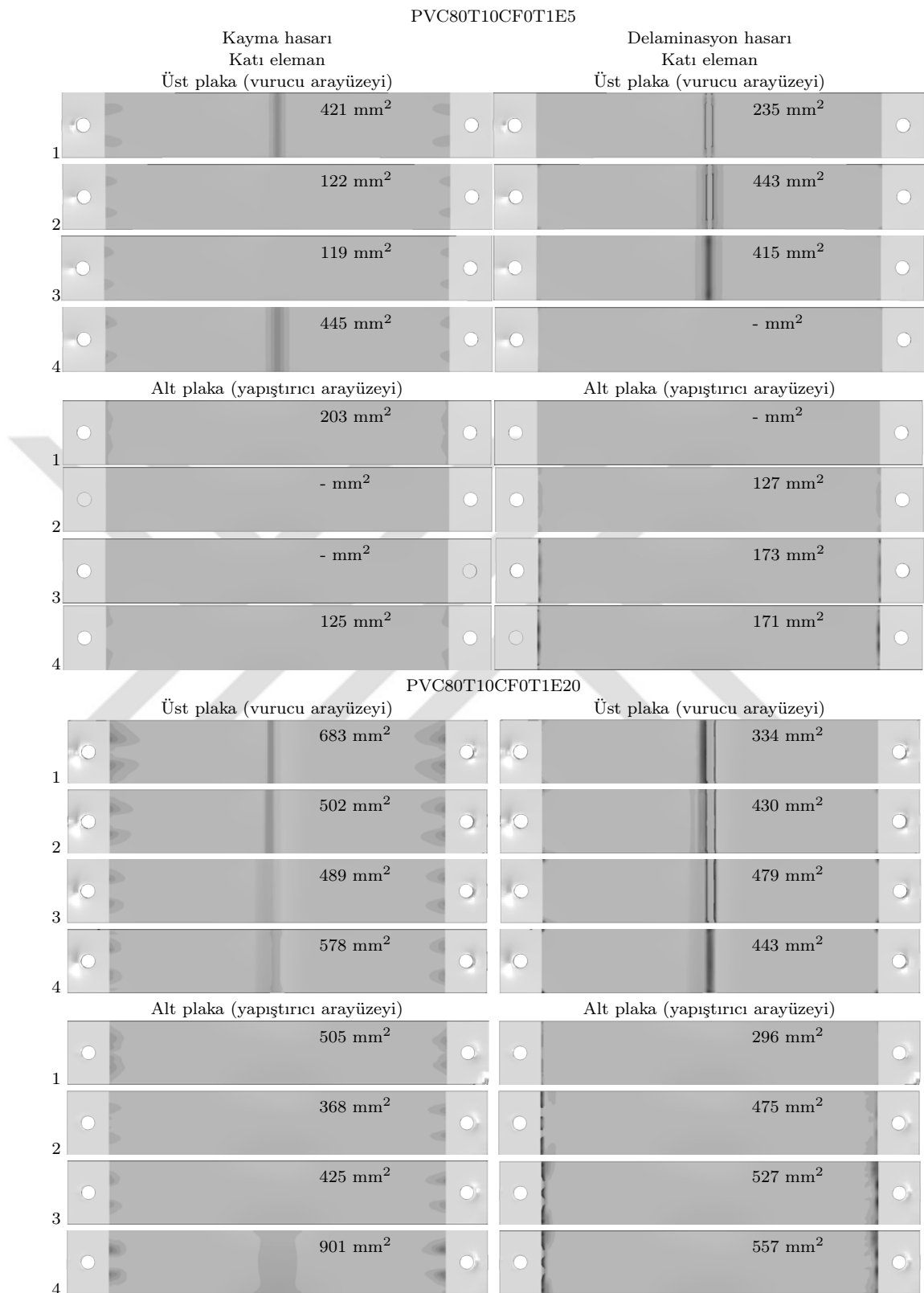
Şekil 3.10. Sandviç kirişlerin kompozit tabakalarında kabuk ve kırtı elemanlar ile fiber ve matris basma hasarı kriterlerine göre oluşan hasar bölgeleri ve alanları ($E=5 J$, $\theta=0^\circ$).



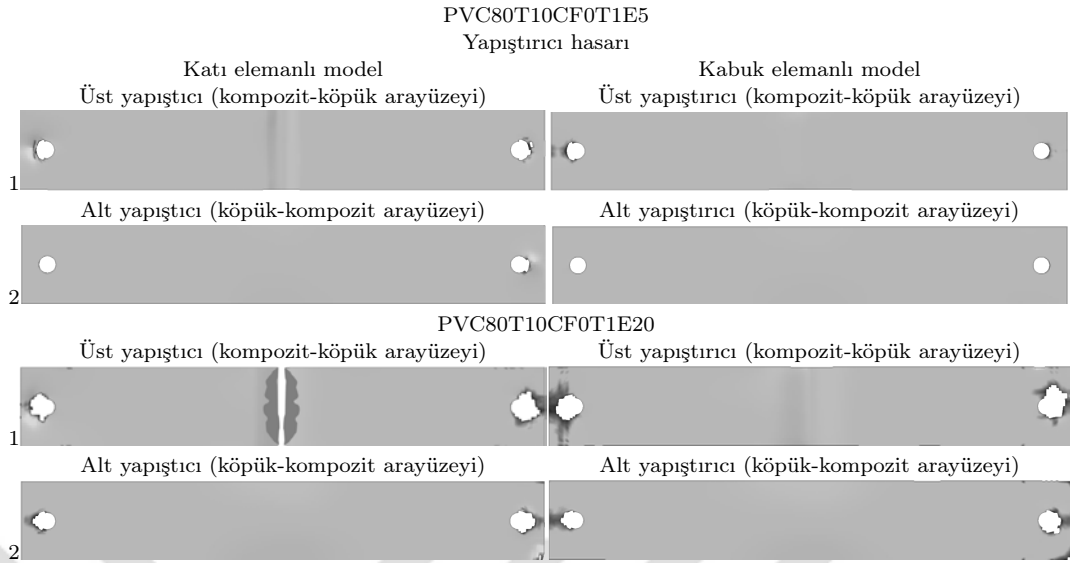
Şekil 3.11. Sandviç kirişlerin kompozit tabakalarında kabuk ve kıta elemanlar ile fiber ve matris çekme hasarı kriterlerine göre oluşan hasar bölgeleri ve alanları ($E= 20 \text{ J}$, $\theta=0^\circ$).



Şekil 3.12. Sandviç kirişlerin kompozit tabakalarında kabuk ve kıta elemanlar ile fiber ve matris basma hasarı kriterine göre oluşan hasar bölgeleri ve alanları ($E=20 \text{ J}$, $\theta=0^\circ$).



Şekil 3.13. Sandviç kirişlerin kompozit tabakalarında katı elemanlar ile delaminasyon ve kayma hasar kriterine göre oluşan hasar bölgeleri ve alanları ($E= 5$ ve 20 J, $\theta=0^\circ$).



Şekil 3.14. Yapıştırıcı tabakasında hasar bölgeleri (E= 5 ve 20 J).

Şekil 3.13'de sandviç kompozit kirişlerin katı elemanlı modeli için 5 ve 20 J darbe enerjileri altındaki delaminasyon ve kayma hasar bölgeleri ve alanları gösterilmektedir. Kabuk eleman modelinde delaminasyon ve kayma hasar kriterleri uyarlanamadığından yalnızca katı elemanlar için irdelenmiştir. Bu iki kriterin değerlendirilmesi etkin hasar tiplerinin ve uygun hasar modellerine karar verme bakımından önemlidir. Fiber takviyeli kompozit plakalarda darbe hasarında tabakalar arası ayrılmalar ve bu ayrılmaların modellenmesi büyük öneme sahiptir. 5 J darbe enerjisi altında delaminasyon hasarı üst plaka 4. katmanında en büyük delaminasyon hasar alanı 445 mm^2 ile ortaya çıkmıştır. En büyük kayma hasar alanı 415 mm^2 ile üst plakanın 3. katmanında belirmiştir. 20 J darbe enerjisi altında ise en büyük delaminasyon hasar alanı 901 mm^2 ile alt plakanın 4. tabakasında oluşmuştur. En büyük kayma hasar alanı ise 557 mm^2 ile alt plakanın 4. katmanında oluşmuştur.

Şekil 3.14'de 5 ve 20 J darbe enerjileri altında sandviç kirişlerin yapıştırıcı tabakasında oluşan hasar bölgeleri gösterilmektedir. Yüzey malzemeleri katı ve kabuk elemanlar ile modellenen sandviç kirişlerin yapıştırıcı tabakalarında oluşan hasar bölgeleri karşılaştırılmaktadır. 5 J darbe enerjisi için analizlerde orta bölgede hasar oluşmamış, ancak pim delikleri etrafında hasarlar meydana gelmiştir. 20 J darbe enerjisi altındaki yapıştırıcı tabakasında hasar irdelendiğinde, katı elemanlı model orta bölgede hasar oluşumuna, ancak kabuk elemanlı model hasarsızlığa işaret etmiştir.

Tez çalışmasının yol haritanın belirlenmesi için yapılan ön çalışmalar neticesinde sayısal modele karar verilmiş ve doğrulanmıştır. Kompozit malzemelerin modellenmesinde kullanılan katı ve kabuk elemanların başarımları belirlenmiş ve üç boyutlu formülasyonun kompozit malzemelerdeki etkisi gösterilmiştir. Kullanılan köpük için sayısal malzeme modeli ayrıca doğrulanmıştır. Yapıştırıcı malzemesi için kullanılan kohezif bölge modelinin başarımları tespit edilmiştir. Deneysel gözlenen hasar bölgeleri esas alındığında katı elemanların kabuk elemanlara göre hasar bölgelerini daha başarılı tahmin ettiği görülmüştür. Tez çalışmasında katı sonlu eleman ile kompozit (ortotropik) malzeme modeline karar verilmiştir. Bozunum modeli yaklaşımı için farklı kurallar çalışılmıştır. Herbir hasar kriterine göre hangi elastik sabitlerin azaltılması gerektiği belirlenmiştir. Deneysel sonuçlara göre fiber çekme ve basma hasar indekslerine göre çekme altında fiber yönündeki elastik sabitlere ve basma altında ise fibere dik yönde elastik sabitlere bozunum uygulanmıştır. Elastik sabitlerin bozunumu iki farklı indeksin aynı anda kombinasyonları ile ortaya çıkan yeni elastik sabitler her adımda güncellenerek modele uygulanmıştır.

4. BÖLÜM

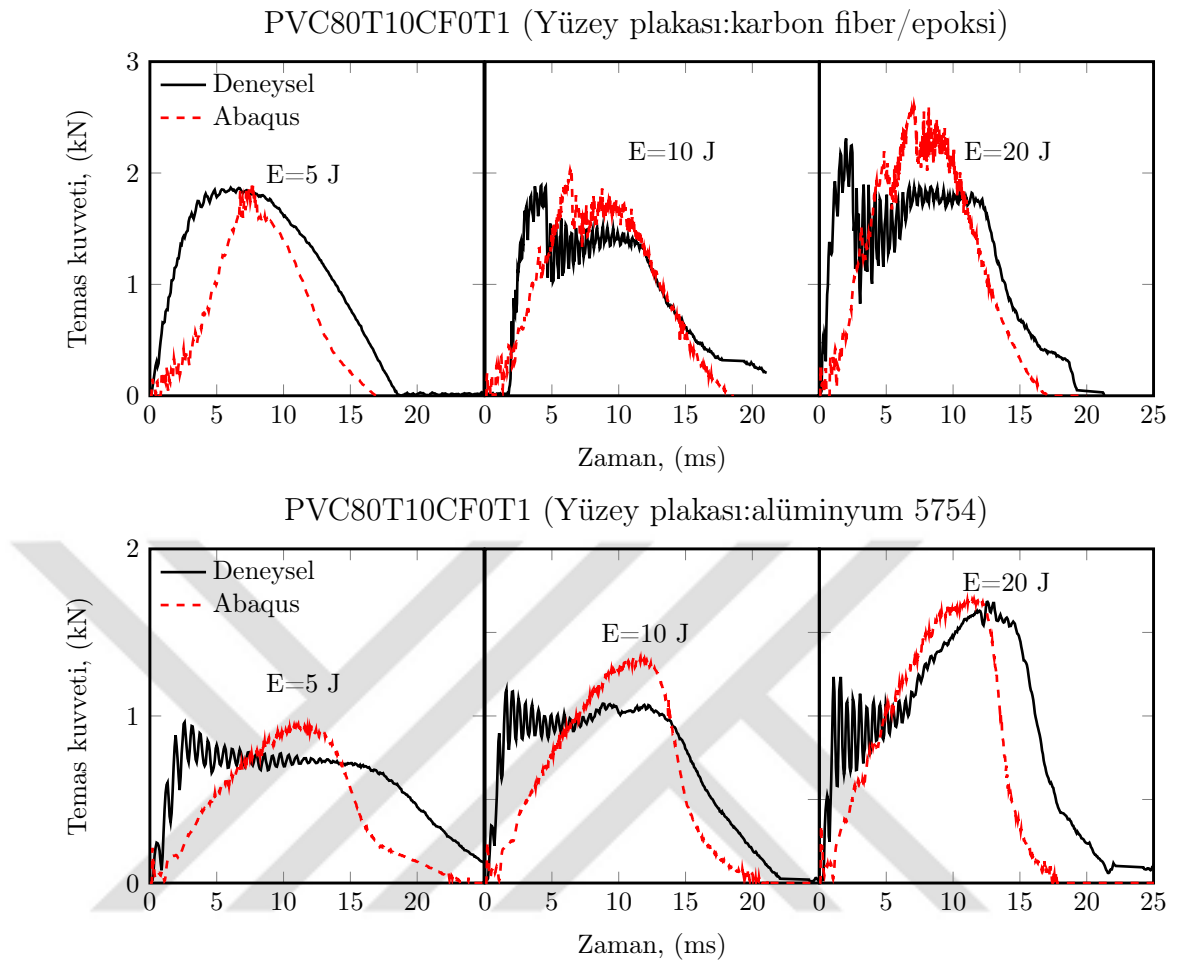
YÜZEY PLAKA MALZEMESİNİN ETKİSİ

4.1. Giriş

Kompozit malzemeler, son yıllarda teknolojinin gelişmesiyle birlikte otomotiv, uzay ve denizcilik gibi endüstriyel alanlarda aranan malzemeler olmuşlardır. Bu bölümde kompozit sandviç kirişlerin farklı yüzey malzemeleri, metal ve fiber takviyeli kompozit malzeme gibi, yüzey malzeme kalınlığı için eğilme darbe davranışları incelenmiştir. Kompozit sandviç kirişlerin düşük hızlı eğilme darbe davranışları analizi, fiber ve matris malzemelerinin çekme altında hasara uğradığını, tabakalar arası ayrılmanın ayrıca önem arz ettiğine işaret etmiştir. Delaminasyon hasarı ile fiber ve matris malzemesinde basma yükleri altında meydana gelen hasar bölgelerinin benzerliği gözlemlenmiştir. Darbe sonrası numunelere yapılan Mikro-Ct tarama sonuçları ile sayısal analizlerde kompozit sandviç kirişlerin darbeye maruz kalan bölgesi karşılaştırılmıştır. Üç eksende kesit görüntüleri ve hasar gelişimi irdelenmiştir. Element analizi ile yapıştırıcı bölgesinde oluşan hasarlar ayrıca incelenmiştir.

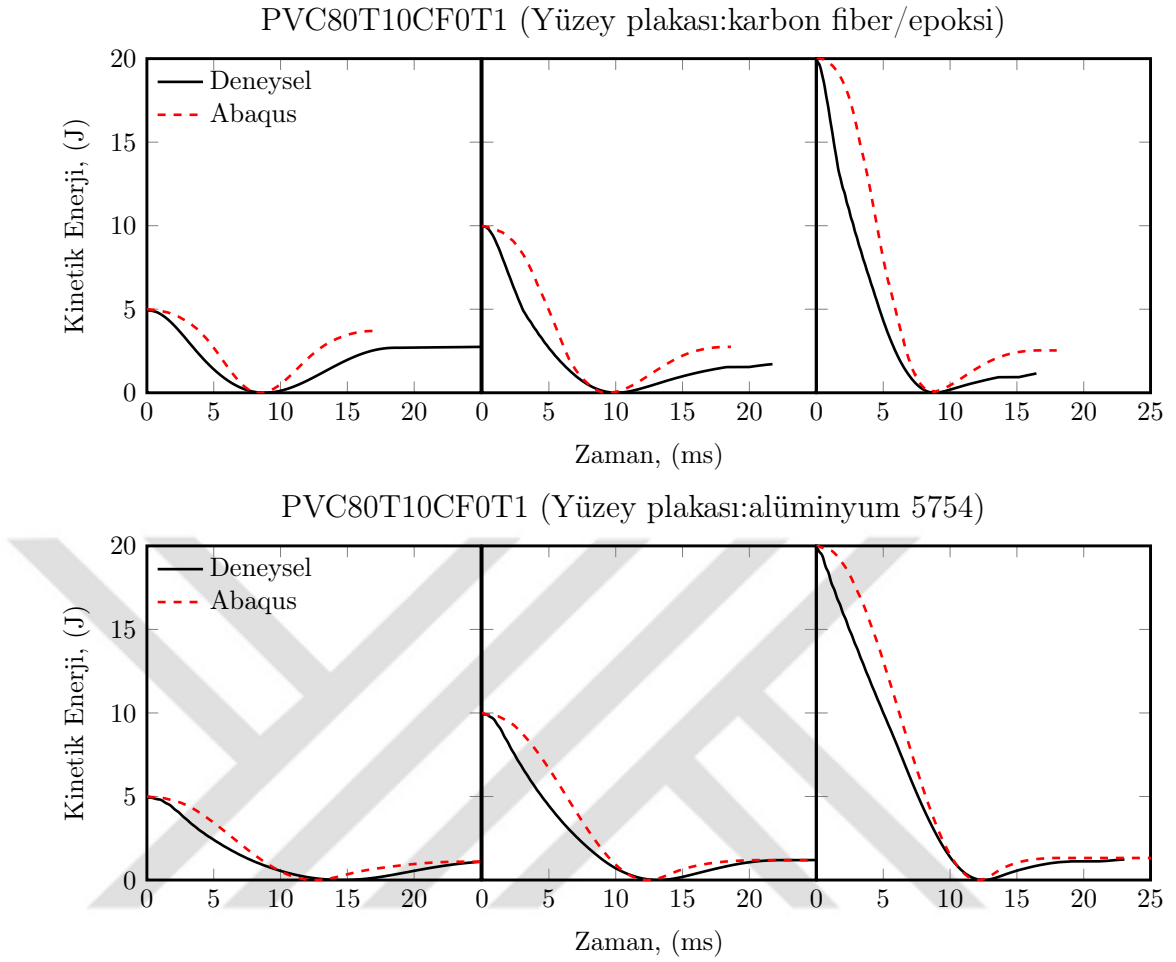
4.2. Yüzey Plakası Malzemesi Etkisi

Fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin düşük hızlı eğilme darbe davranışı, karbon fiber/epoksi ve alüminyum yüzey plakaları için, 5, 10 ve 20 J darbe enerji seviyelerinde araştırılmıştır. Yüzey plakalarının kalınlığı 1 mm'dir. Kompozit sandviç kirişin çekirdek köpük kalınlığı 10 mm, yoğunluğu ise 80 kg/m^3 'tür. Şekil 4.1'de yüzey malzemeleri karbon fiber/epoksi ve alüminyum olan sandviç kirişlerin sayısal ve deneysel temas kuvveti-zaman değişimi 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde



Şekil 4.1. Yüzey malzemeleri tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber/epoksi ve alüminyum olan kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerji seviyelerinde temas kuvveti-zaman değişimleri.

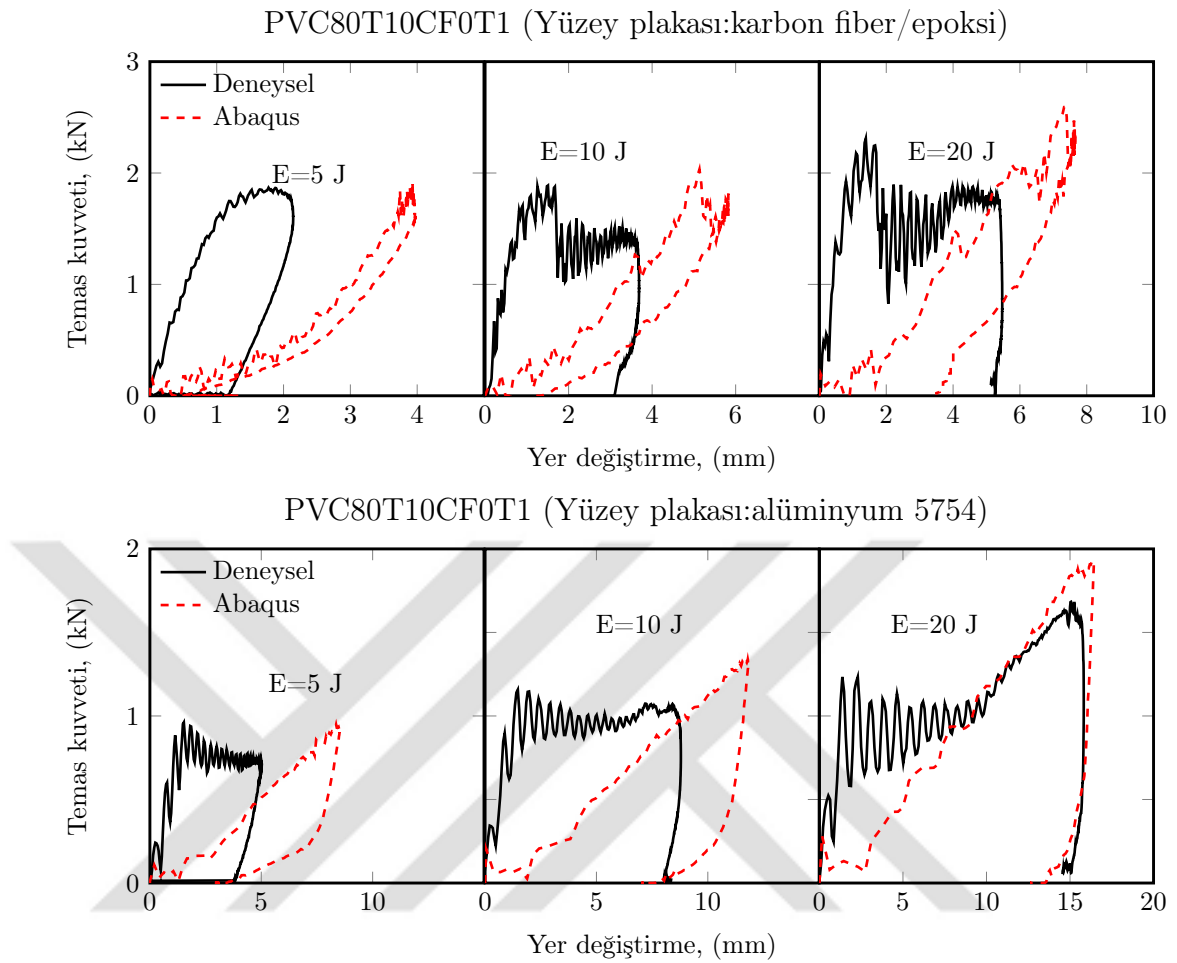
sunulmuştur. Yüzey malzemesi karbon fiber/epoksi olan kompozit sandviç kirişlerde, 5, 10 ve 20 J darbe enerji seviyelerinde deneysel en büyük temas kuvvetleri sırası ile 1.8, 1.9 ve 2.3 kN, temas süreleri 18.5, 21.7 ve 21.3 ms ölçülmüştür. Tahmin edilen en büyük temas kuvvetleri ise 1.8, 2.0 ve 2.6 kN, temas süreleri 17.0, 18.3 ve 17.0 ms'dir. Deneysel ve sayısal en büyük temas kuvvetleri ve temas sürelerinin uyumluluğu açıktır. Temas kuvveti-zaman eğrilerindeki ani düşümlere ve dalgalanmalara kompozit malzemelerdeki oluşan hasarlar neden olmaktadır. Darbe enerjisi 4 katına çıkmasına rağmen en büyük temas kuvvetlerinde aşırı bir artış olmamıştır. Yüzey malzemesi alüminyum 5754 olan sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde deneysel en büyük temas kuvvetleri sırası ile 0.9, 1.2 ve 1.7 kN, temas süreleri 26.1, 21.4 ve 21.6 ms ölçülmüştür. 0.9, 1.3 ve 1.7 kN hesaplanan en büyük temas kuvvetleri ve temas süreleri 23.5, 20.8 ve 17.4 ms'dir. Yüzey



Şekil 4.2. Yüzey malzemeleri tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber/epoksi ve alüminyum olan kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde kinetik enerji-zaman değişimleri.

plakası metal olan kirişlerde en büyük temas kuvvetleri daha düşüktür. Sayısal ve deneysel sonuçlar uyumludur. Darbe enerjisi arttıkça, sayısal temas kuvveti değişimi deneysel temas kuvveti değişimi ile tutarlıdır. En büyük temas kuvvetleri karbon fiber/epoksi yüzey malzemeli sandviç kirişlerde ortaya çıkmaktadır. Temas süreleri irdelendiğinde, metal yüzey malzemeli sandviç kirişlerin daha uzun temas süreleri verdiği görülmektedir. Metal plastisitesi ve plastik deformasyon kabiliyeti enerji sönmleme açısından etkilidir.

Şekil 4.2'de yüzey malzemeleri karbon fiber/epoksi ve alüminyum olan kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde sayısal ve deneysel kinetik enerji-zaman değişimleri verilmiştir. Deneysel ve sayısal kinetik enerji değişimleri benzerdir. Alüminyum yüzey malzemeli sandviç kirişler darbe enerjisinin büyük bir kısmını sönmlemiştir. Alüminyum malzeme plastik şekil değiştirme kabiliyeti



Şekil 4.3. Yüzey malzemeleri tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber/epoksi ve alüminyum olan kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde temas kuvveti-yer değiştirme değişimleri.

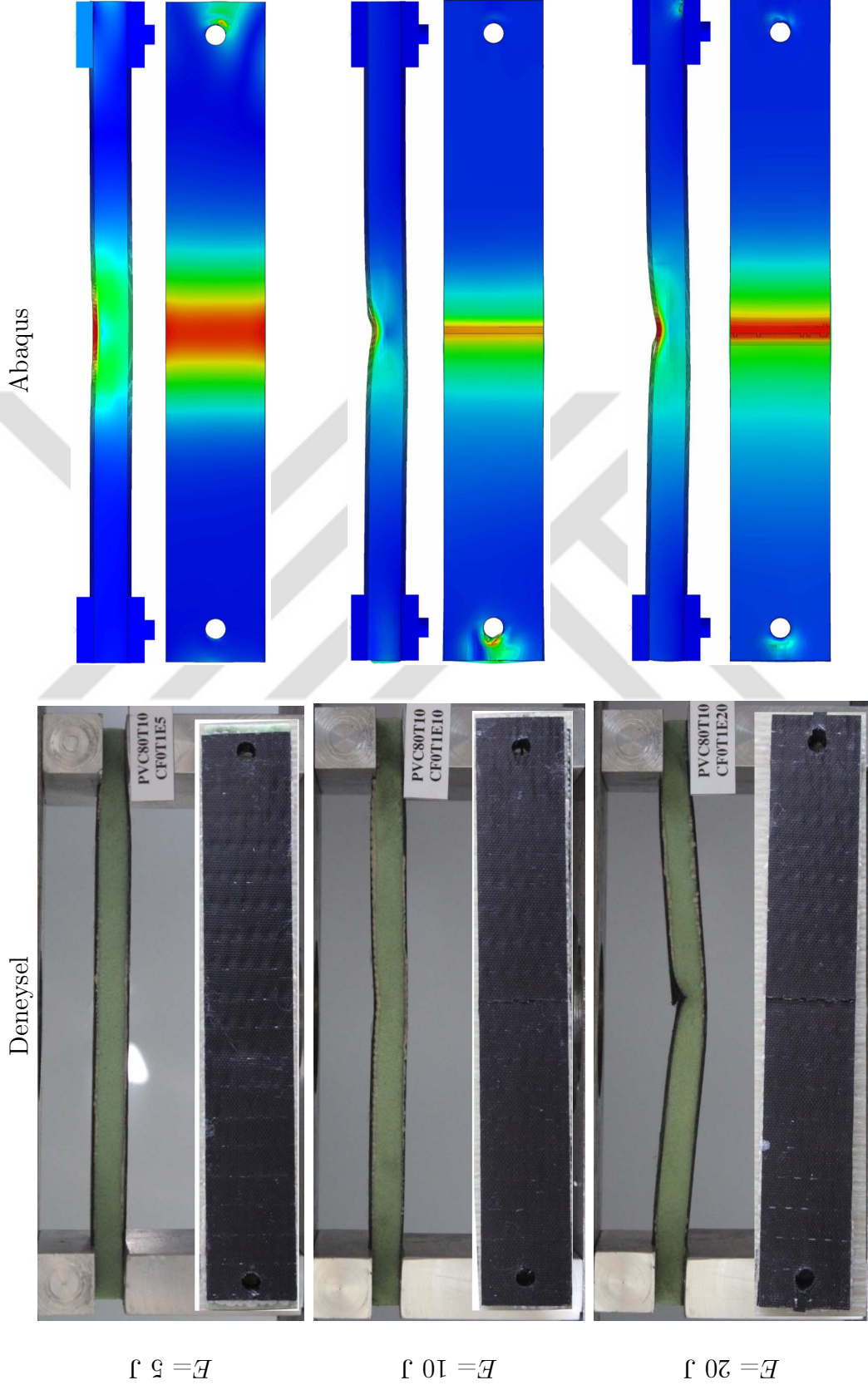
olduğu için, sönmülenen enerji plastik şekil değiştirmeye harcanmıştır.

Şekil 4.3'de yüzey malzemeleri karbon fiber/epoksi ve alüminyum olan kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde sayısal ve deneysel temas kuvveti-yer değiştirme değişimleri gösterilmiştir. Temas kuvveti-çökme grafiği ise eğriler tarafından sınırlanan kapalı alana tekabül eden numuneler üzerine yapılan işi ifade eder. Sayısal ve deneysel temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri arasında farklar bulunmaktadır. Kompozit kirişlerin sayısal sonuçlarında elastik yer değiştirmeler daha fazladır ve bu durum sandviç kirişlerin analizlerde daha elastik davrandığını göstermektedir. Deneysel sonuçlarda ise sandviç kirişlerin daha fazla kalıcı yer değiştirmeye sahip olduğu görülmektedir. Kompozit kirişlerin matris malzemesinin plastik davranışının dikkate alınması gerekmektedir. Metal yüzey plakalı sandviç kirişlerde ise deneysel ve sayısal sonuçlar daha uyumludur. Metal malzemenin

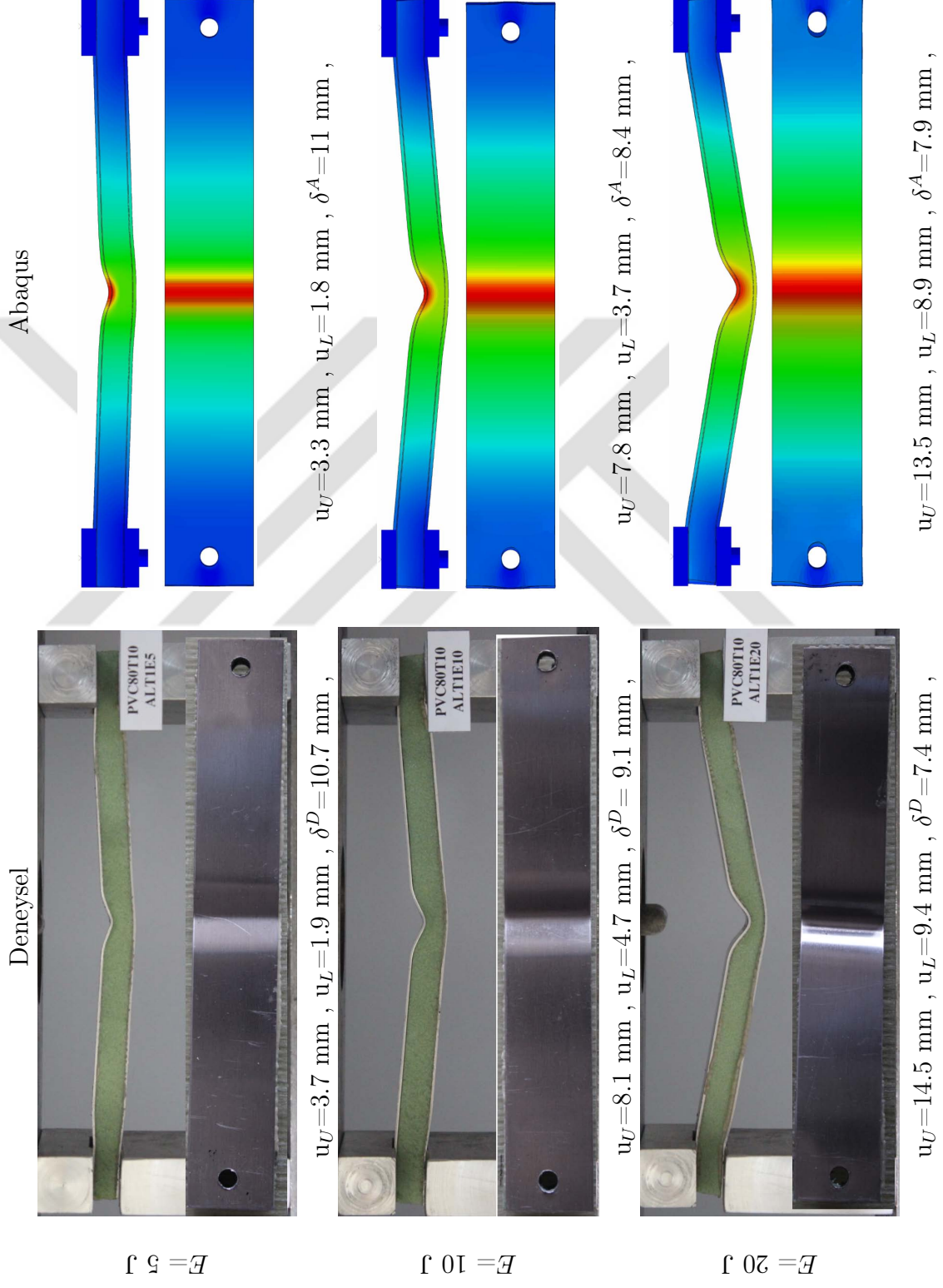
kompozit malzemelere göre daha fazla plastik deformasyona sergilemesi, deneysel ve malzeme plastisitesinin dikkate alındığı sayısal sonuçları daha uyumlu hale getirmiştir.

Yüzey malzemesi karbon fiber/epoksi olan kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde sayısal ve deneysel darbe sonrası görüntüleri Şekil 4.4'de karşılaştırılmaktadır. Fiber takviyeli kompozit malzemeler daha elastik doğası gereği kalıcı yer değiştirmeleri önlemiştir. Sayısal sonuçlardaki renk değişimi yer değiştirme düzeylerini ifade eder. 5 J darbe enerjisi altında kompozit plakalarda kırılma oluşmamıştır. Darbe enerjisi arttıkça kompozit plakalarda kırılmalar meydana gelmiştir ve köpük malzemesinden dolayı gözle görülebilen kalıcı deformasyonlar mevcuttur. Darbe enerjisi arttıkça meydana gelen hasarlar ve çökmeler irdelendiğinde, kompozit sandviç yapının darbe enerjisini sönümleme kabiliyeti belirgindir.

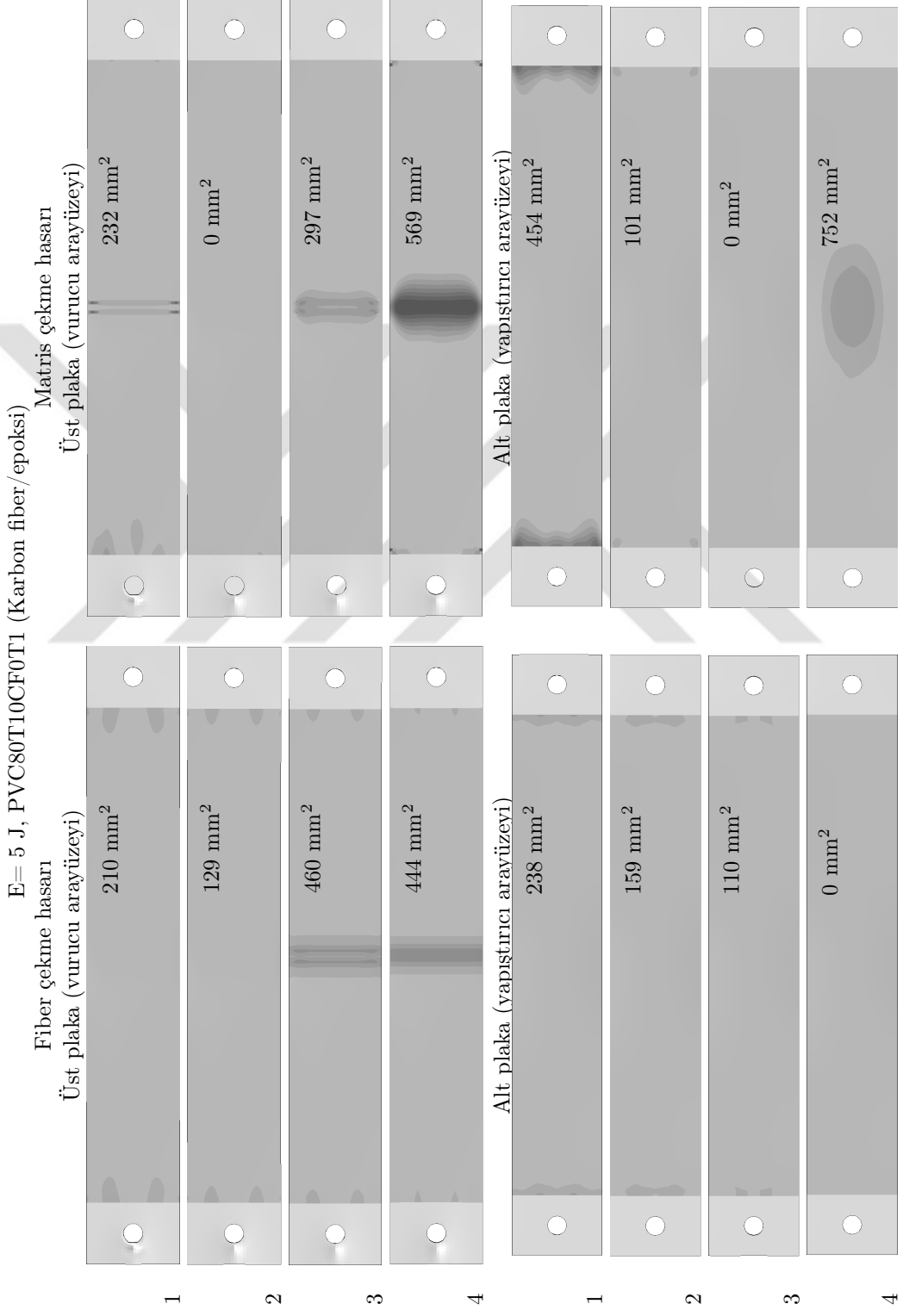
Şekil 4.5'da yüzey malzemesi alüminyum olan sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde sayısal ve deneysel darbe testi sonrası görüntüleri verilmiştir. Sayısal ve deneysel darbe sonrası görüntüleri oldukça uyumludur. Sandviç kirişlerin darbe sonrası görüntülerinde, üst plakanın orta bölgesindeki kalıcı çökme (u_U), alt plakanın orta bölgesindeki kalıcı çökme (u_L) ve darbe sonrası orta bölgenin kalınlıkları (δ) verilmiştir. Sandviç kirişlerin kalınlıkları 12.5 mm'dir. Alt ve üst plakanın yer değiştirmesinden darbe sonrası kalınlıkları hesaplanmıştır. 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde sandviç kirişlerin deney sonrası üst plakasındaki kalıcı yer değiştirmeler sırası ile 3.7, 8.1 ve 14.5 mm olurken alt plakalarındaki yer değiştirmeler 1.9, 4.7 ve 9.4 mm olmaktadır. Darbe sonrası nihai kalınlıkları ise 10.7, 9.1 ve 7.4 mm olmaktadır. Darbe enerjisi arttıkça, darbe bölgesindeki kalıcı yer değiştirmeler artmaktadır. Sandviç kirişin orta bölgesindeki hesaplanan (ABAQUS®) yer değiştirmeler ise üst plakada, 3.3, 7.8 ve 13.5 mm, alt plakada, 1.8, 3.7 ve 8.9 mm olmuştur. Darbe sonrası kalınlıkları ise 11.0, 8.4 ve 7.9 mm olmuştur. Sayısal sonuçlarda da darbe enerjisinin artışı ile kalıcı yer değiştirmeler artmaktadır. Darbe enerjisinin artışına rağmen darbe sonrası nihai kalınlıklar önemli ölçüde korunmuştur.



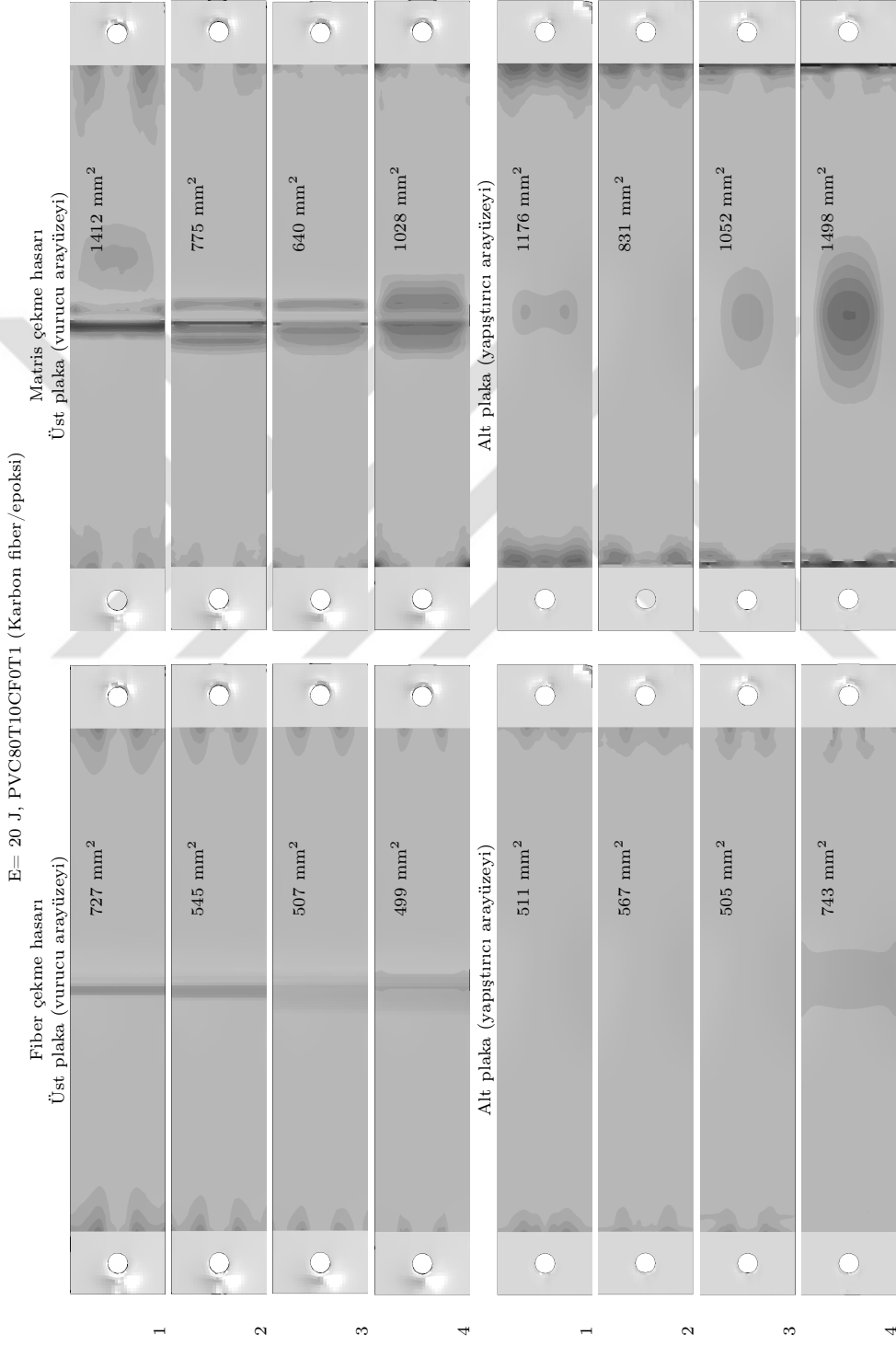
Şekil 4.4. Yüzey malzemesi tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber/epoksi kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde darbe sonrası deneysel ve hesaplanmış görüntüleri(PVC80T10CF0).



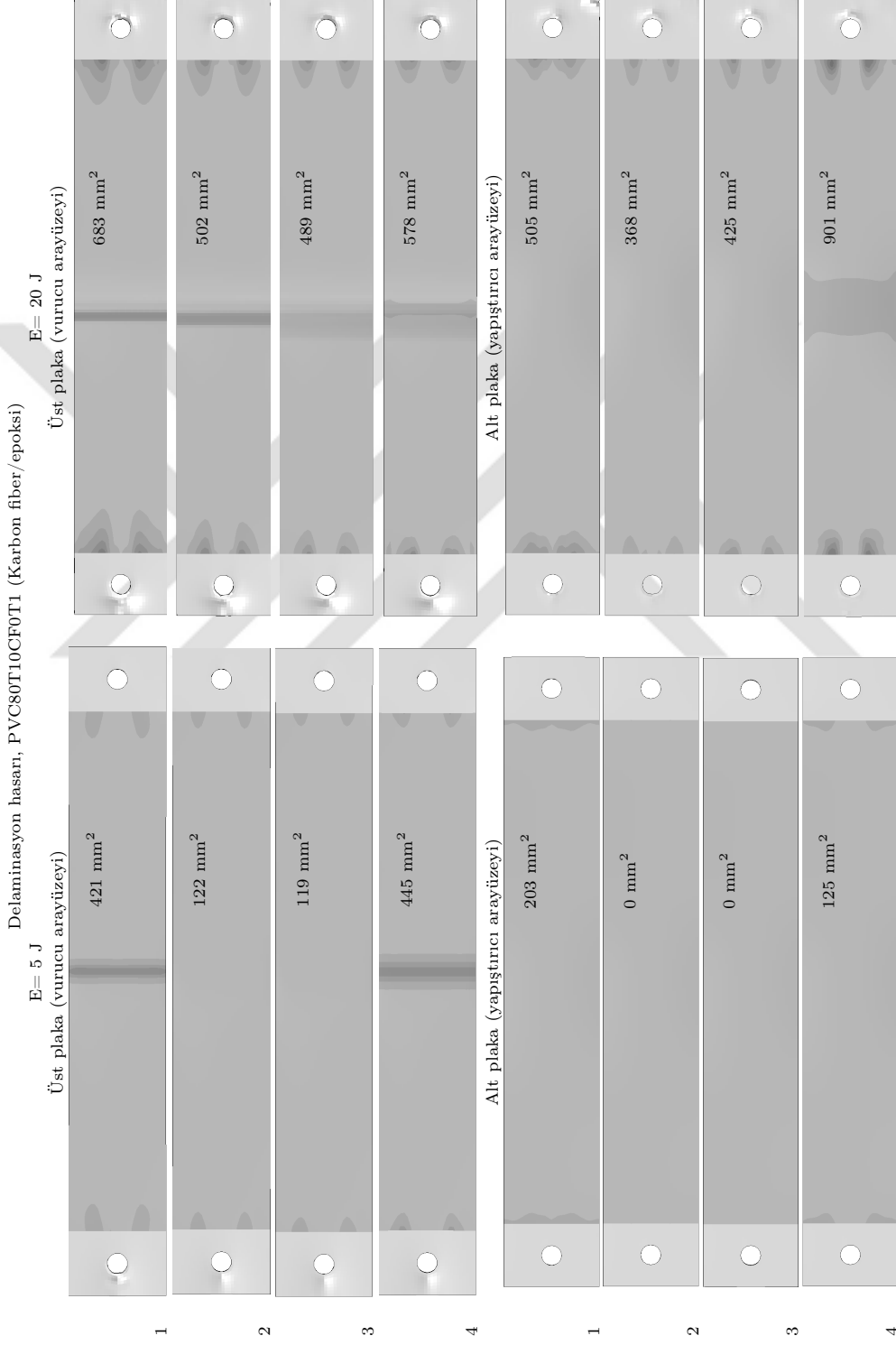
Şekil 4.5. Yüzey malzemesi alüminyum olan sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde darbe sonrası deneysel ve hesaplanmış görüntüleri(PVC80T10AL).



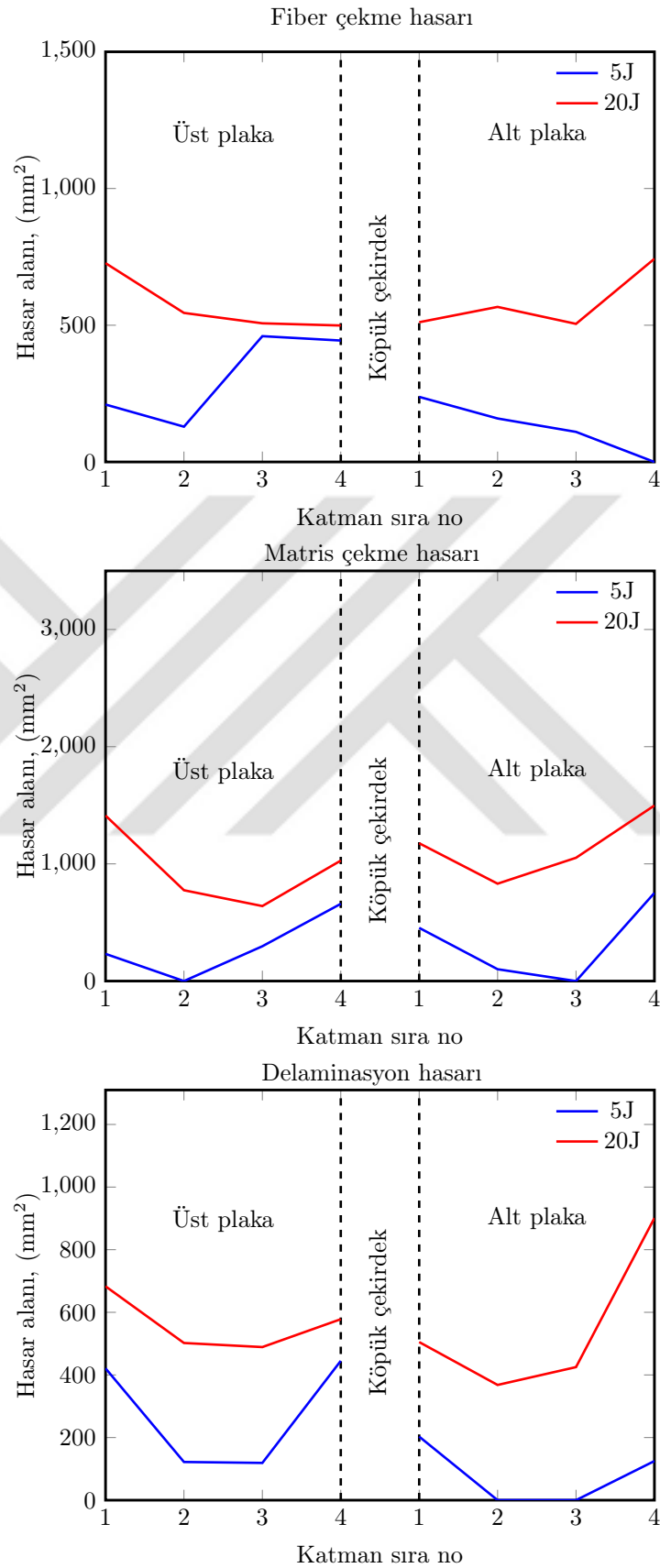
Şekil 4.6. Tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber/epoksi kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında oluşan fiber ve matris çekme hasar bölgeleri (E= 5 J).



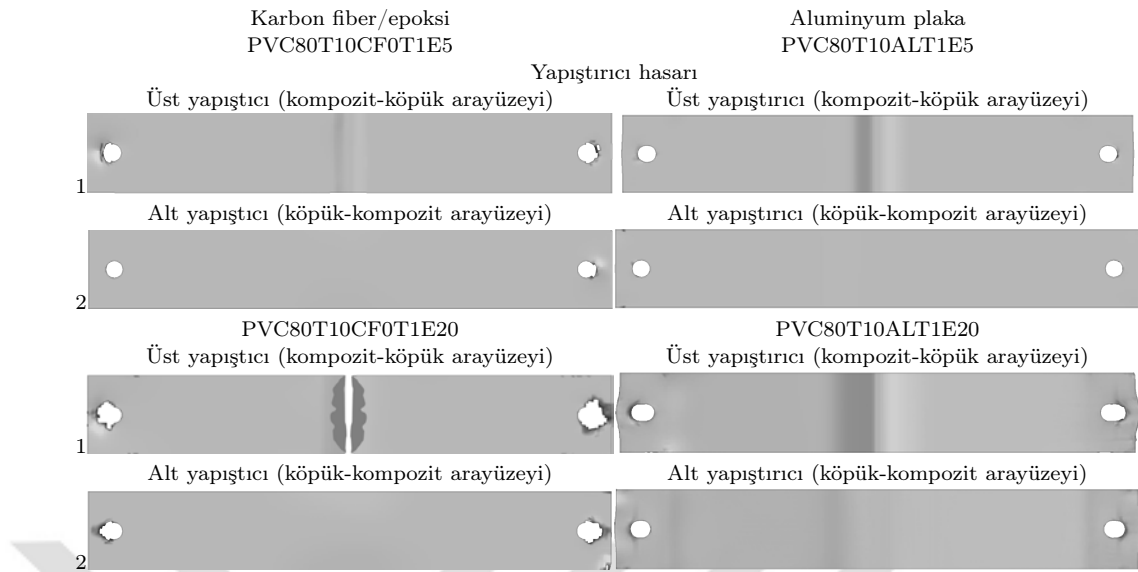
Şekil 4.7. Tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber/epoksi kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında oluşan fiber ve matris çekme hasar bölgeleri(E= 20 J).



Şekil 4.8. Tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber/epoksi kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) hasar bölgeleri (E=5 ve 20 J).



Şekil 4.9. Tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber/epoksi kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası fiber çekme, matris çekme ve delaminasyon hasar alanlarının tabaka kalınlıkları boyunca değişimi (E= 5 ve 20 J).



Şekil 4.10. Tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber/epoksi kompozit ve metal plaka olan kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası yapıştırıcı tabakalarında oluşan hasar bölgeleri ($E= 5$ ve 20 J).

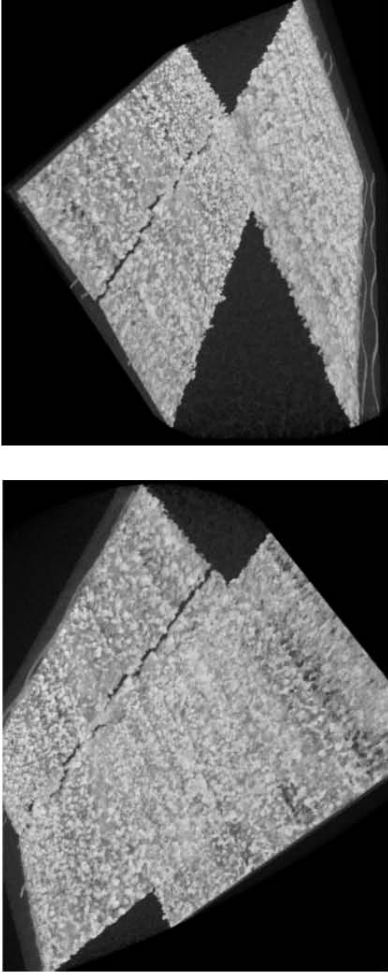
Şekil 4.6'de 5 J'lük darbe enerjisinde tek yönlü ($\theta=0^\circ$) karbon fiber/epoksi olan kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında fiber ve matris çekme hasar kriterine göre hesaplanan hasar bölgeleri ve alanları gösterilmektedir. Fiber çekme hasarı üst plakalarda daha etkili olmuştur. Alt plakaya doğru hasar giderek azalmıştır. En büyük hasar alanı 516 mm^2 ile karbon fiber/epoksi kompozit üst plakanın 3. katmanında oluşmuştur. Yüzey malzemesi karbon fiber/epoksi olan sandviç kiriş için en büyük matris çekme hasarı 752 mm^2 ile alt plakanın 4. katmanında oluşmuştur. Darbe ucu ile karşılanan üst plakalarda hasarlar fiber doğrultusuna dik yönde oluşurken alt plakalarda fiber yönünde hasarlar meydana gelmiştir.

Şekil 4.7'de 20 J darbe enerjisinde tek yönlü ($\theta=0^\circ$) karbon fiber/epoksi kompozit sandviç kirişlerin kompozit tabakalarında fiber ve matris çekme hasar kriterine göre oluşan hasar bölgeleri ve alanları gösterilmektedir. Darbe enerjisi arttıkça hasar alanları artmaktadır. Fiber basma hasarı üst plakalarda daha çok meydana gelmektedir. En büyük fiber çekme hasar alanı 743 mm^2 ile alt plakanın 4. katmanında meydana gelmiştir. Üst plakada fibere dik yönde hasar meydana gelirken, alt plakada fiber doğrultusunda hasarlar meydana gelmiştir. Matrisin çekme altında maruz kaldığı en büyük hasar alanı 1498 mm^2 ile alt plakanın 4. katmanında meydana gelmiştir.

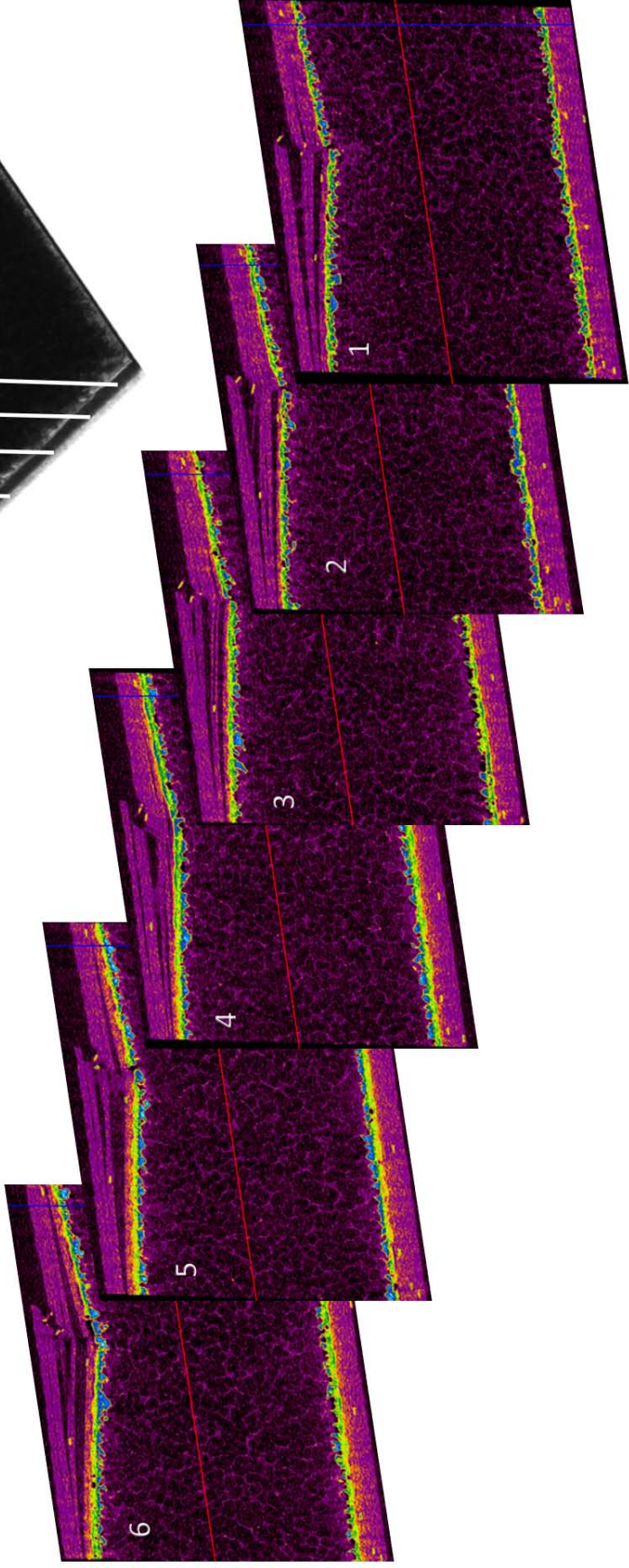
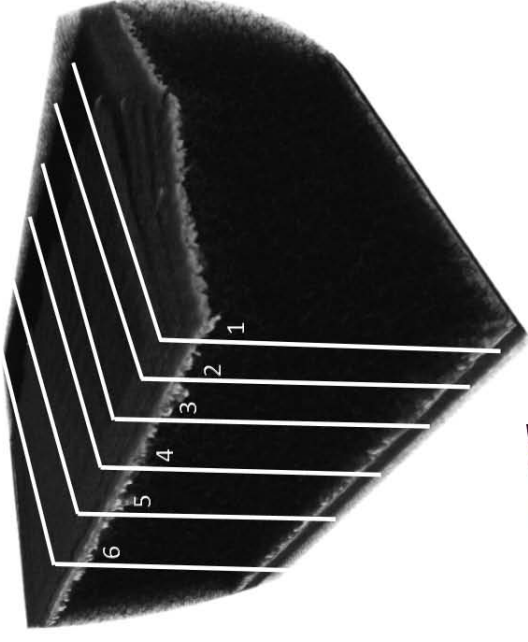
Şekil 4.8'de 5 ve 20 J darbe enerjilerinde karbon fiber/epoksi kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında delaminasyon hasar kriterine göre hesaplanan hasar bölgeleri ve alanları verilmektedir. 5 J darbe enerjisinde alt plakalarda delaminasyon meydana gelmezken, üst plakalarda yönde delaminasyon hasarı meydana gelmiştir. En büyük delaminasyon hasarı 5 J darbe enerjisi için üst plakanın 4. katmanında 445 mm² 'lik alanda ve 20 J darbe enerjisi için 901 mm² 'lik alanda alt plakanın 4. katmanında meydana gelmiştir. Şekil 4.9'de 5 ve 20 J darbe enerjilerinde tek yönlü ($\theta=0^\circ$) karbon/epoksi kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası fiber çekme, matris çekme ve delaminasyon hasarı alanlarının tabaka kalınlığı boyunca değişimleri gösterilmiştir. Kompozit plakaların kalınlığı boyunca, vurucu ile temas eden üst plakanın 1. katmanı ve yapıştırıcı tabakası ile temas eden alt plakanın 1. katmanı olacak şekilde hasar alanlarının değişimleri belirlenmiştir.

Şekil 4.10'da 5 ve 20 J darbe enerjilerinde karbon fiber/epoksi kompozit ve metal plaka destekli kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası yapıştırıcı tabakalarında oluşan hasar bölgeleri gösterilmiştir. Hasar bölgeleri genellikle pim bölgelerinde oluşmuştur. Darbe enerjisinin artışı hasarlı bölgelerini arttırmıştır. Yüzey malzemesi karbon fiber/epoksi ($\theta=0^\circ$) kompozit sandviç kirişin 20 J darbe enerjisinde üst yapıştırıcı tabakasının vurucu bölgesi civarında hasar oluşmuş ve ayrılmalar meydana gelmiştir. Şekil 4.11'de tek yönlü ($\theta=0^\circ$) karbon/epoksi kompozit sandviç kirişin 20 J darbe enerjisinde darbe sonrası mikro-ct analizi, alt ve üst yapıştırıcı tabakalarının ve orta bölgenin kesit görüntüleri verilmektedir. Sandviç kirişin darbeye maruz kalan orta bölgesi Mikro-Ct cihazı ile taranmış, üç boyutlu modeli oluşturulmuş, üç eksen de kesit görüntüleri alınmış ve element analizi yapılarak sandviç kirişi oluşturan malzemelere ayrıştırılarak incelenmiştir. Karbon fiber takviyeli kompozit üst plakalarda hasarlar ve ayrılmalar meydana gelmiştir. Fiberlerin kırılarak kalıcı deformasyonlara neden olduğu anlaşılmaktadır. Alt ve üst yapıştırıcı tabakaları incelendiğinde, karbon fiber takviyeli sandviç kirişin üst yapıştırıcı tabakasında daha fazla hasar ve çatlak olduğu görülmektedir.

Alt ve üst yapıştırıcı tabakaları

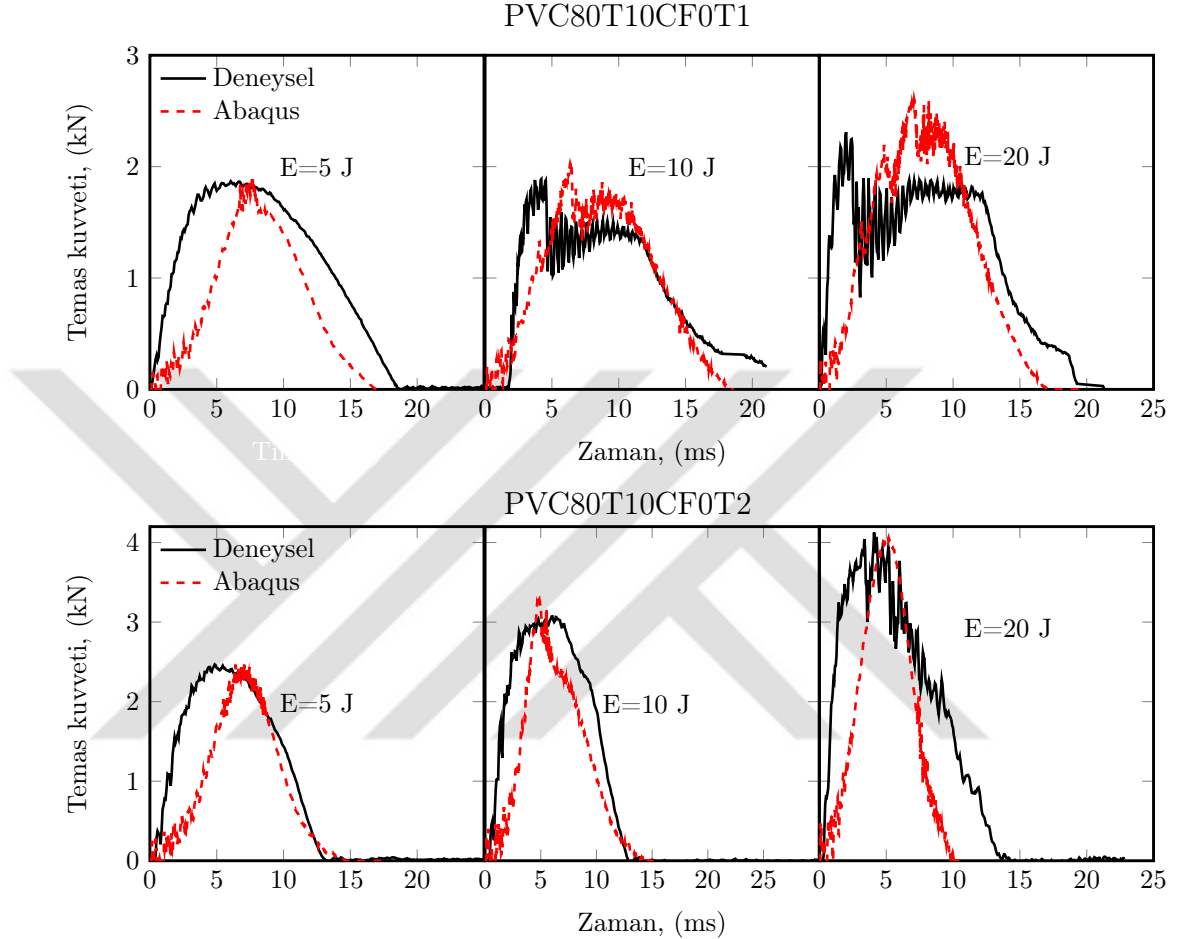


Sandviç kirişin orta bölgesi ve kesit sırası



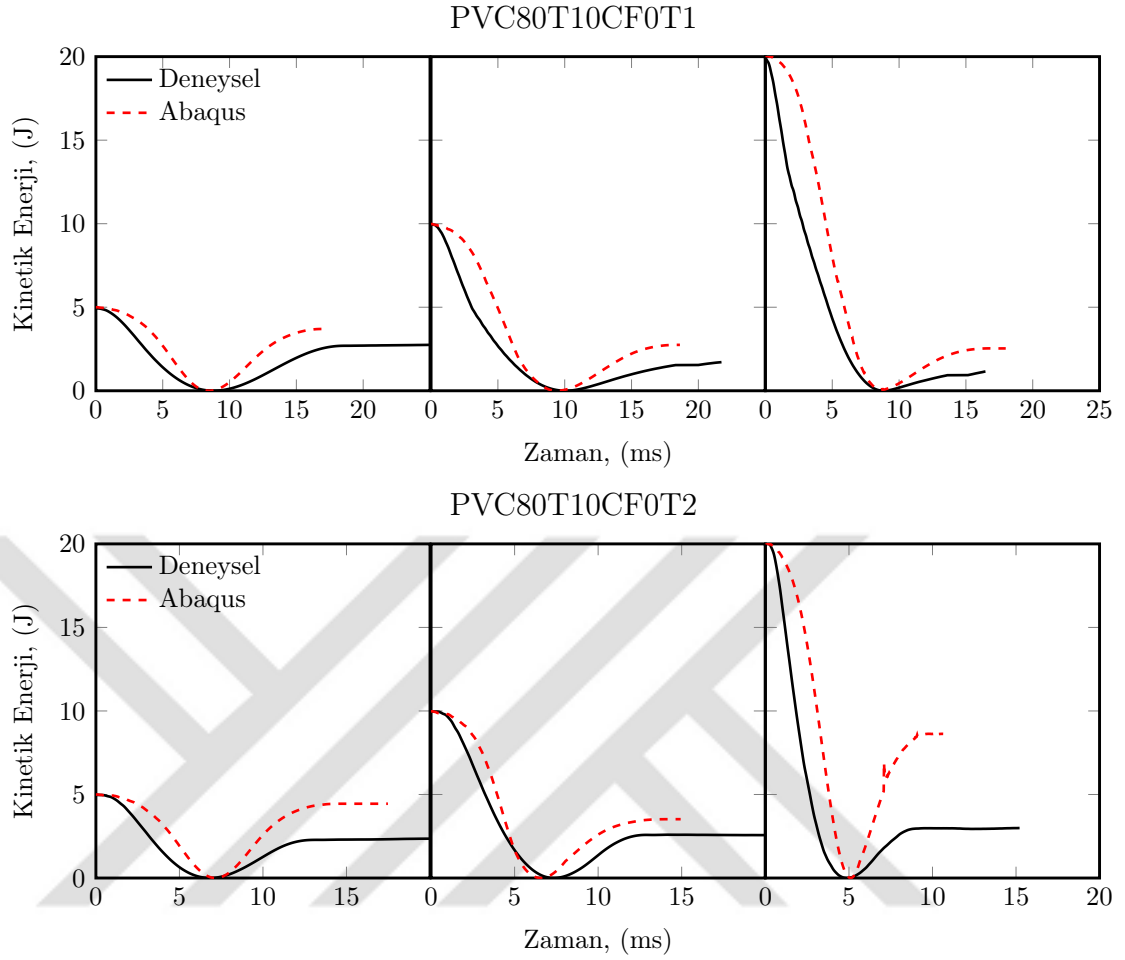
Şekil 4.1.1. Tek yönlü karbon fiber/epoksi ($\theta=0^\circ$) kompozit sandviç kirişin darbe sonrası Mikro-Ct analizi, alt ve üst yapıştırıcı tabakalarının ve orta bölge kesit görüntüleri ($E=20\text{ J}$).

4.3. Yüzey Plakası Kalınlığı Etkisi



Şekil 4.12. 1 ve 2 mm kalınlıklı tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde temas kuvveti-zaman değişimleri.

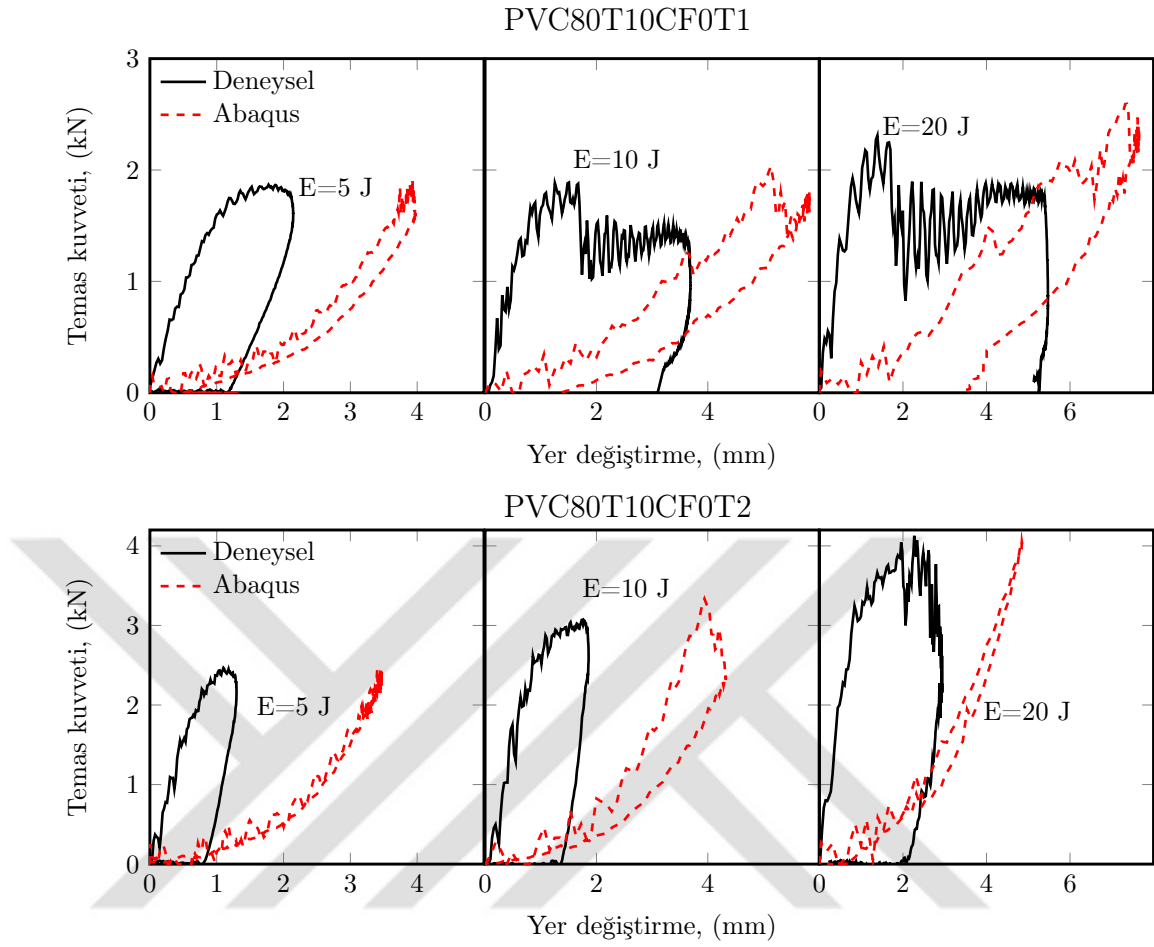
Şekil 4.12 1 ve 2 mm yüzey kalınlığında karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde temas kuvveti-zaman değişimlerini göstermektedir. 1 mm kalınlığa sahip karbon fiber takviyeli kompozit plakalar 4 katmanlı ve 2 mm kalınlığa sahip plakalar ise 8 katmanlı olarak üretilmiştir. Sandviç kirişler 80 kg/m^3 köpük yoğunluğa ve 10 mm köpük kalınlığa sahip çekirdek malzemesine ve tek yönlü 0° fiber açısına sahiptir. Yüzey malzemesi kalınlığı 1mm olan kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde deneysel en büyük temas kuvvetleri sırası ile 1.8, 1.9 ve 2.3 kN, temas süreleri 18.5, 21.7 ve 21.3 ms ölçülmüştür. Sayısal en büyük temas kuvvetleri ise sırası ile 1.8, 2.0 ve 2.6 kN, temas süreleri 17.0, 18.3 ve 17.0 ms hesaplanmıştır. Grafiklerdeki dalgalanmalar ve



Şekil 4.13. 1 ve 2 mm kalınlıklı tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde kinetik enerjisi-zaman değişimleri.

ani düşüşler fiber kırılmalarına işaret etmektedir.

Karbon fiber ($\theta=0^\circ$) takviyeli kompozit yüzey plakası kalınlığı 2 mm (8 tabaka) olan kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde deneysel en büyük temas kuvvetleri sırası ile 2.4, 3.1 ve 4.1 kN, temas süreleri ise 13.4 14.2 ve 14.1 ms ölçülmüştür. Aynı darbe enerjilerinde analizlerden en büyük temas kuvvetleri sırası ile 2.4, 3.2 ve 4.1 kN ve temas süreleri 14.5, 14.6 ve 10.1 ms hesaplanmıştır. Plaka kalınlığının artması daha eğilmeye direngenyapıya neden olmuştur, dolayısıyla en büyük temas kuvvetlerini arttırmıştır, temas sürelerini kısaltmıştır. 5 ve 10 J darbe enerjilerinde 2 mm yüzey plaka kalınlıklı sandviç kirişlerin temas kuvveti-zaman değişimleri 1 mm plaka kalınlığına göre daha pürüzsüz olduğu görülmektedir ki kompozit yapıda hasar oluşumu geciktirilmiştir. Şöyle ki, fiberlerde hasar meydana gelmemiştir. Ancak 20 J darbe enerjisinde için fiberlerde kırılmalar meydana



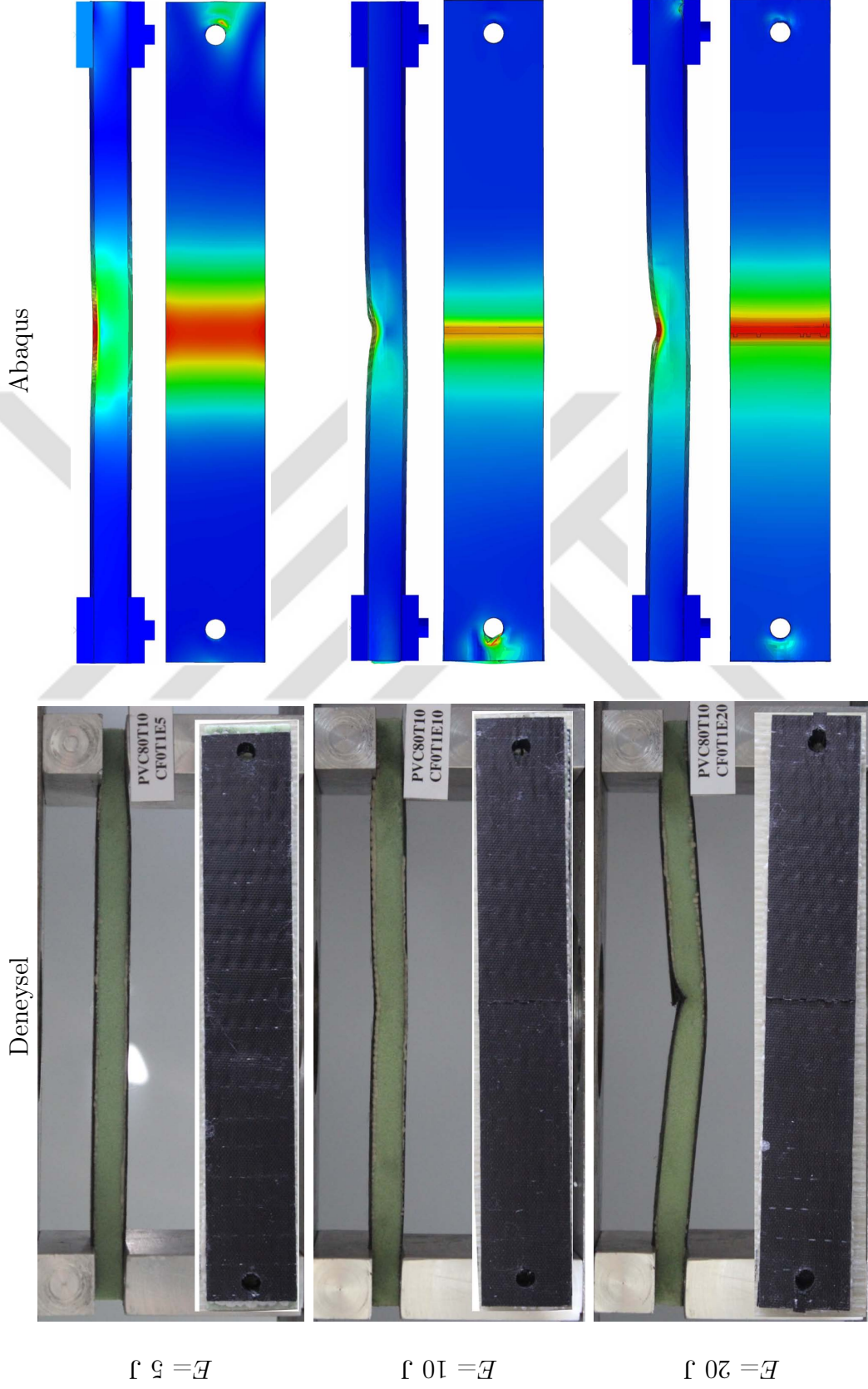
Şekil 4.14. 1 ve 2 mm kalınlıklı tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde temas kuvveti-yer değiştirme değişimleri.

gelmiştir. Sayısal ve deneysel temas kuvvetleri arasında uyumluluk kabul edilebilir olup, sunulan sayısal modelin başarılı olduğuna işaret etmektedir.

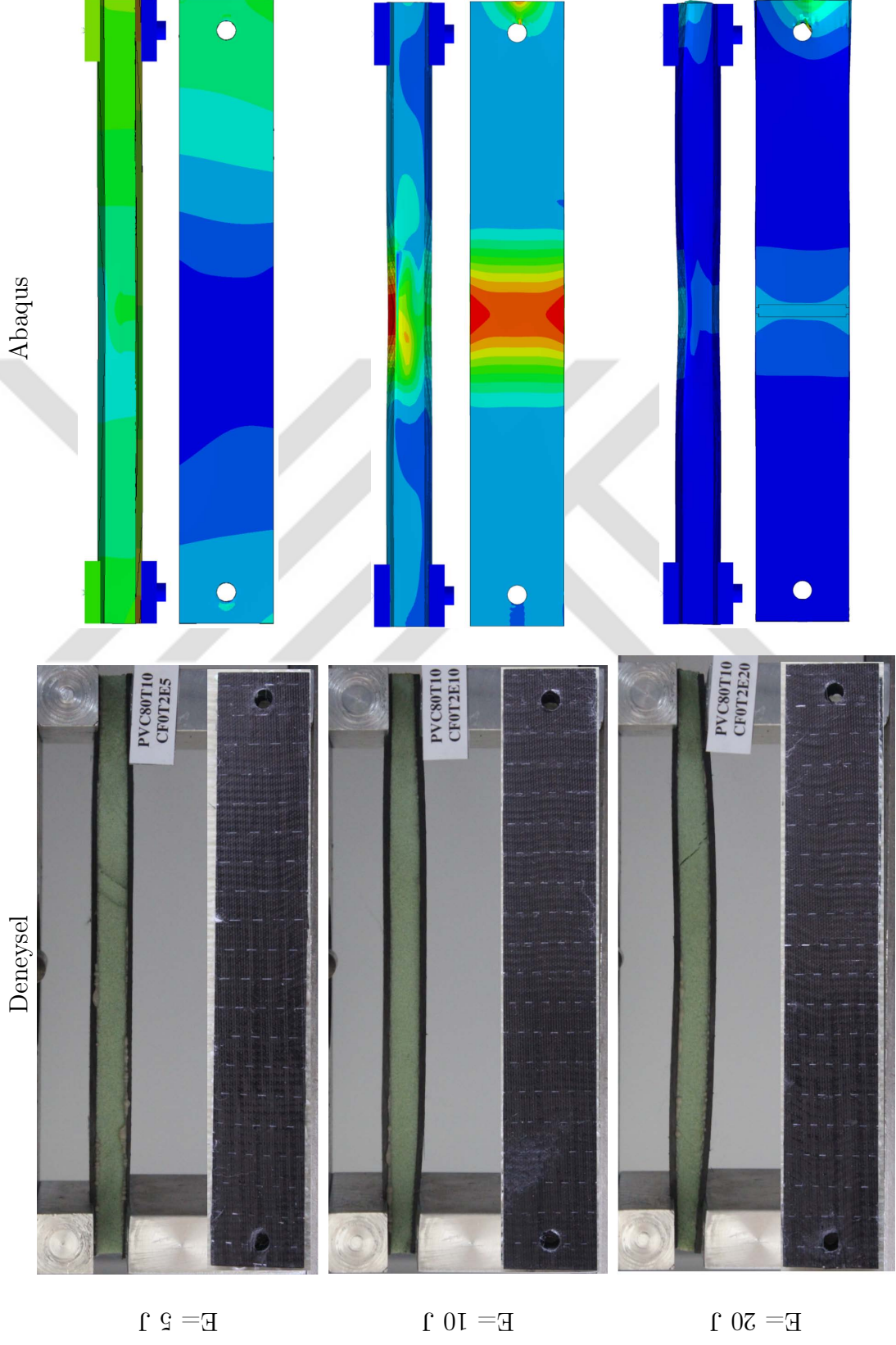
Şekil 4.13 1 ve 2 mm kalınlıklı karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde kinetik enerjisi değişimleri göstermektedir. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasında farklılıklar gözükmemektedir. Sayısal analizler daha elastik davranmıştır. Şekil 4.14'de 1 ve 2 mm kalınlıklı karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde deneysel ve hesaplanmış temas kuvveti-yer değiştirme değişimleri karşılaştırılmıştır. Plaka kalınlığının darbe davranışına etkisi kiriş üzerinde yapılan iş cinsinden irdelenmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasında farklar bulunmaktadır. Sayısal model daha elastik davranış tahmin etmektedir ve kalıcı deformasyon gözlemlenmemektedir. Deneysel sonuçlarda kalıcı yer değiştirmeler plaka kalınlığı arttıkça azalmaktadır,

plastik deformasyon ve sönümlenme açık görülmektedir. Deneysel sonuçlar, teorik modelde kompozit kirişin matrisinin lineer olmayan, plastik davranışının da dikkate alınması gerektiğine işaret etmektedir. Elastik model, özellikle kompozit dış plakalar için yeterli doğruluk sağlamamaktadır.

Şekil 4.15 ve 4.16 sırası ile yüzey malzemesi kalınlığı 1 ve 2 mm olan karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjileri altındaki darbe sonrası görüntülerini vermektedir. Yüzey malzemesinin artması kompozit plakalardaki hasarları ve çökmeleri engellemiştir. Yüzey malzemesi 2 mm olan sandviç kirişin 20 J darbe enerjisi altında çekirdek malzemesinde kırılmalar meydana gelmiştir. Bu durum sayısal modelde görülmemektedir. Deney numunesi sayısal modelden daha fazla rijit davranmıştır.



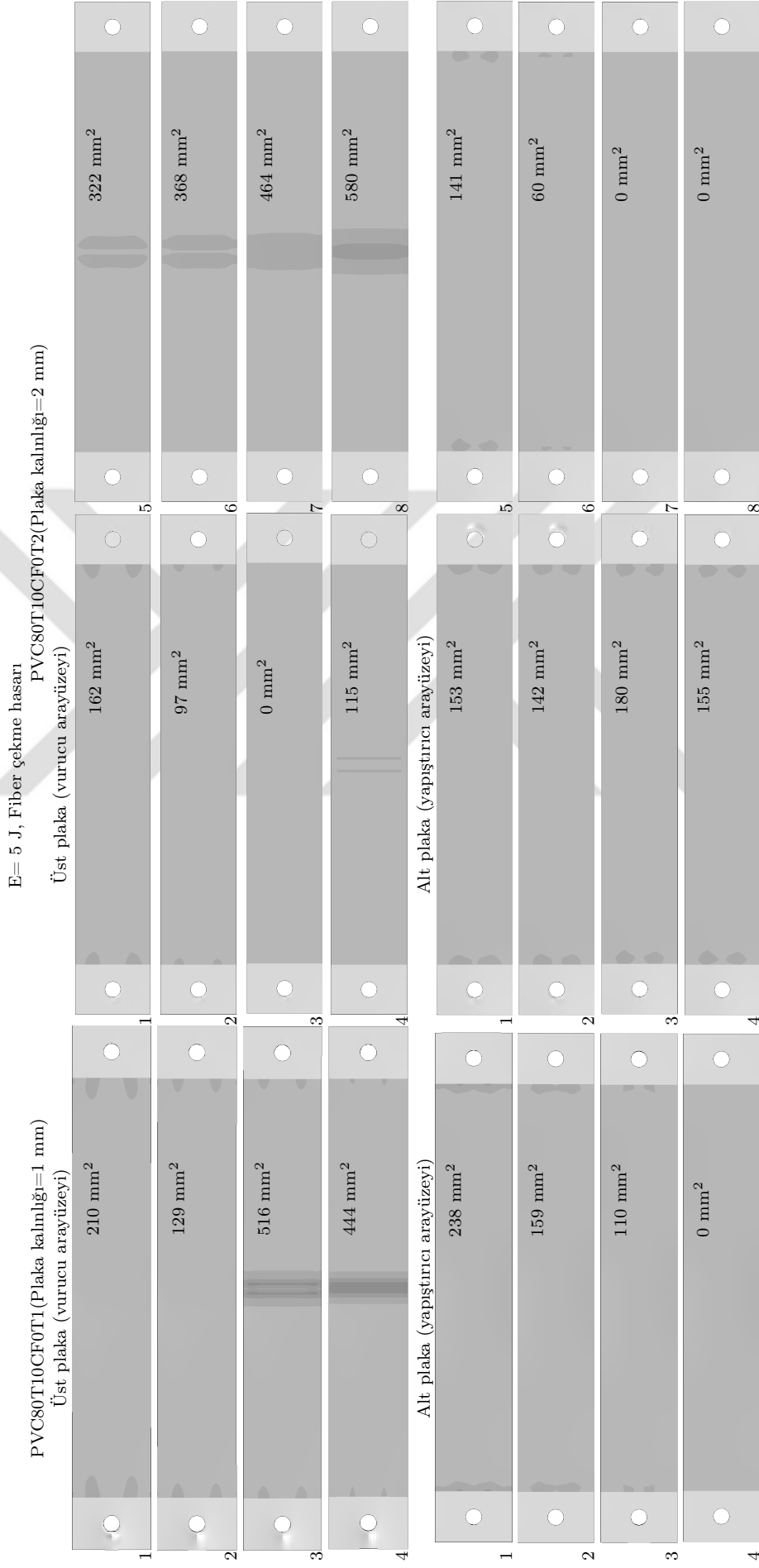
Şekil 4.15. 1 mm kalınlıklı tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde sayısal ve deneysel darbe testi sonuçları görüntüleri.



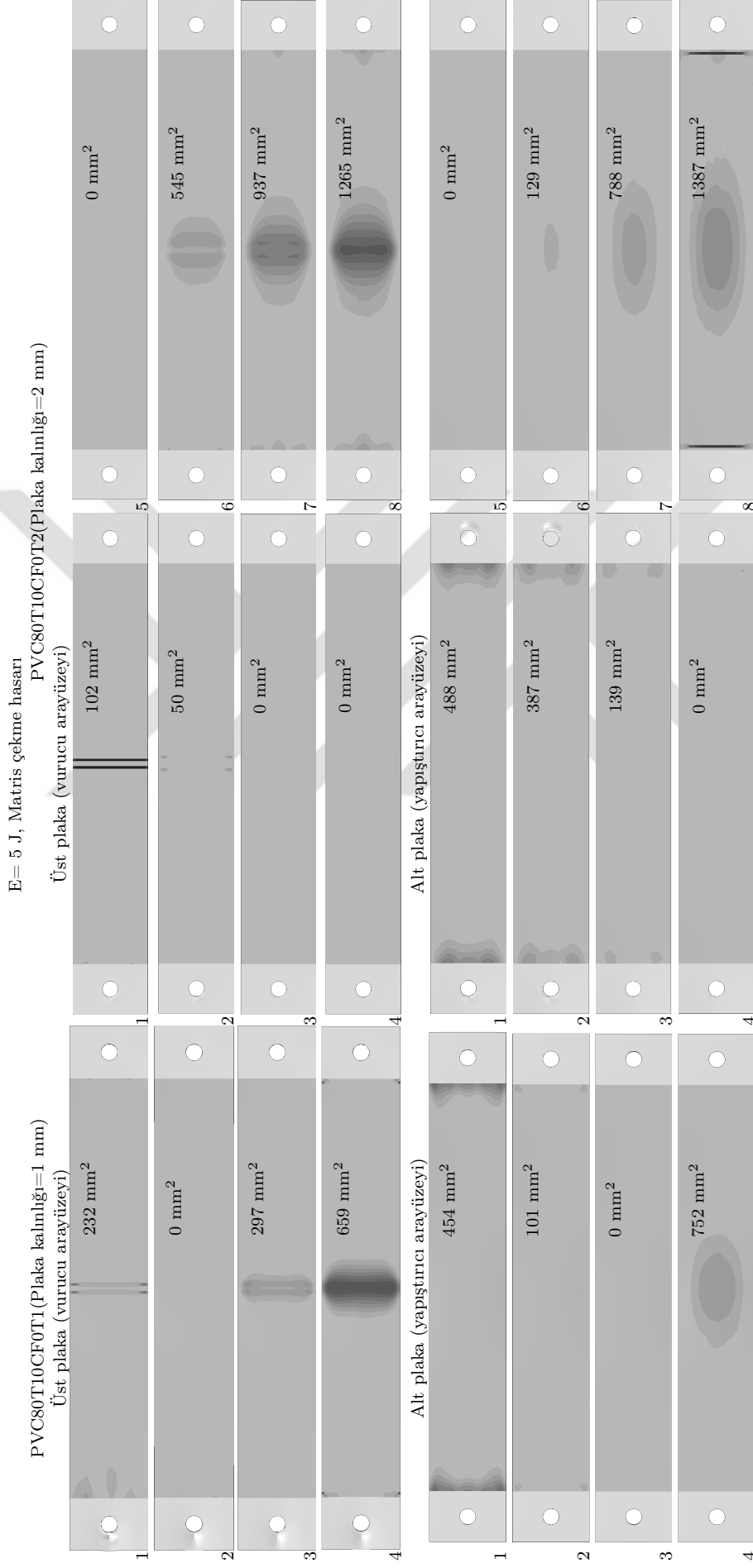
Şekil 4.16. 2 mm kalınlıklı tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde sayısal ve deneysel darbe testi sonuçları görüntüleri.

Şekil 4.17 dış plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5 J'lük darbe enerjisinde kompozit tabakalarında fiber çekme hasar kriterine göre tespit edilen hasar bölgeleri ve alanlarını göstermektedir. Plaka kalınlığı 2 mm olan kompozit plakalar 8 katmandan oluşmaktadır. Üst plakanın 1. katmanı vurucu ile temas eden katmanı temsil ederken 8. katman son alt katmanı temsil etmektedir. Plaka kalınlığı 1 mm olan sandviç kirişte hasar üst plakada daha fazladır. En büyük hasar alanı üst plakanın 3. ve 4. katmanında 516 ve 444 mm² ile orta bölgede meydana gelmiştir. Hasar alt plakanın 4. katmanına doğru azalmaktadır. Plaka kalınlığı arttığında hasar indeksi düşük, hasar alanları artmaktadır. 2 mm plaka kalınlıklı numunede hasar alt plakada 8. katmana doğru azalmaktadır. En büyük fiber çekme hasarı 580 mm² ile üst plakanın 8. katmanında meydana gelmektedir.

Şekil 4.18 plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5 J'lük darbe enerjisinde darbe sonrası kompozit tabakalarında matris çekme hasar kriterine göre tespit edilen hasar bölgeleri ve alanlarını göstermektedir. Matris çekme hasarı üst plakada orta bölgede meydana gelirken alt plakada fiber yönünde yayılmaktadır. 1 mm kalınlıklı kompozit plakada en büyük matris çekme hasarı 752 mm² ile alt plakanın 4. katmanında meydana gelmiştir. Ancak üst plakada meydana gelen hasarların indeksi daha yüksektir. Plaka kalınlığı arttığında hasar alanlarının arttığı görülmektedir. Daha kalın plaka kullanımı yapıyı rijitleştirmiştir ve yapı elastikiyetini kaybetmiştir. 2 mm kalınlıklı plakada en büyük hasar alanı 1387 mm² ile alt plakanın 8. katmanında meydana gelmiştir. Şekil 4.19'de plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan sandviç kirişlerin 5 J darbe enerjisinde delaminasyon hasar kriterine göre oluşan hasar bölgeleri ve alanları gösterilmektedir. 1 ve 2 mm kalınlıkta plakada en büyük hasar alanları üst plakanın 4. ve 8. son katmanlarında 445 ve 561 mm² ile meydana gelmiştir.

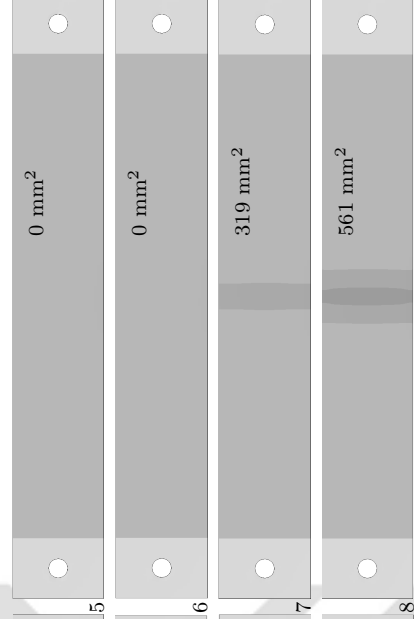
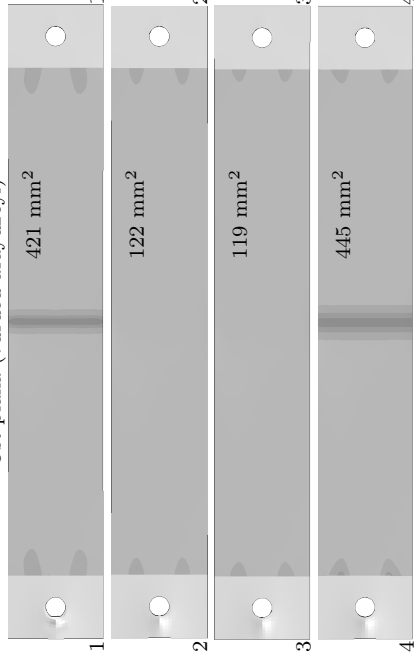


Şekil 4.17. Plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5 J'lük darbe enerjisinde kompozit tabakalarda fiber çekme hasar kriterine göre tespit edilen hasar bölgeleri ve alanları.

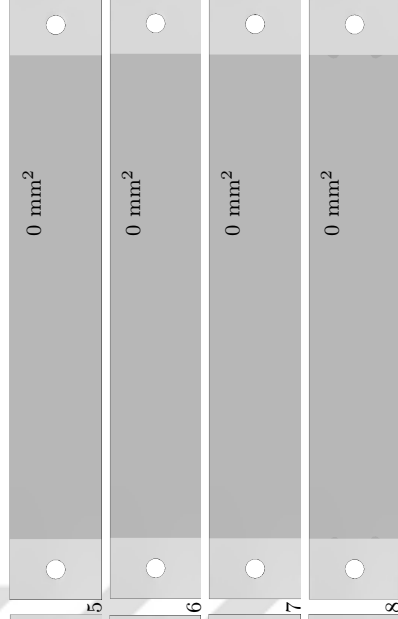
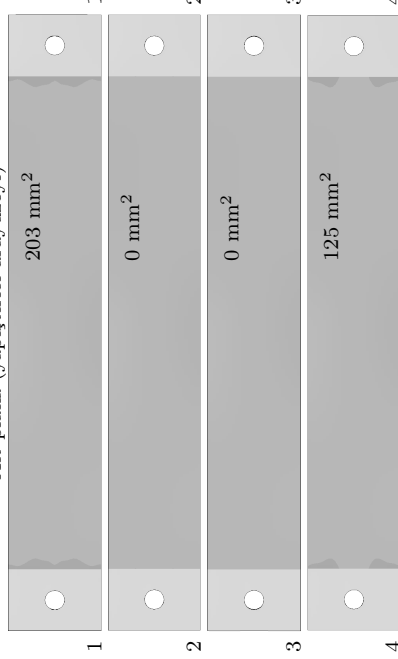


Şekil 4.18. Plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5 J'lık darbe enerjisinde kompozit tabakalarda matris çekme hasarı kriterine göre tespit edilen hasar bölgeleri ve alanları.

E= 5 J, Delaminasyon hasarı
PVC80T10CF0T1(Plaka kalınlığı=1 mm)
Üst plaka (vurucu arayüzeyi)



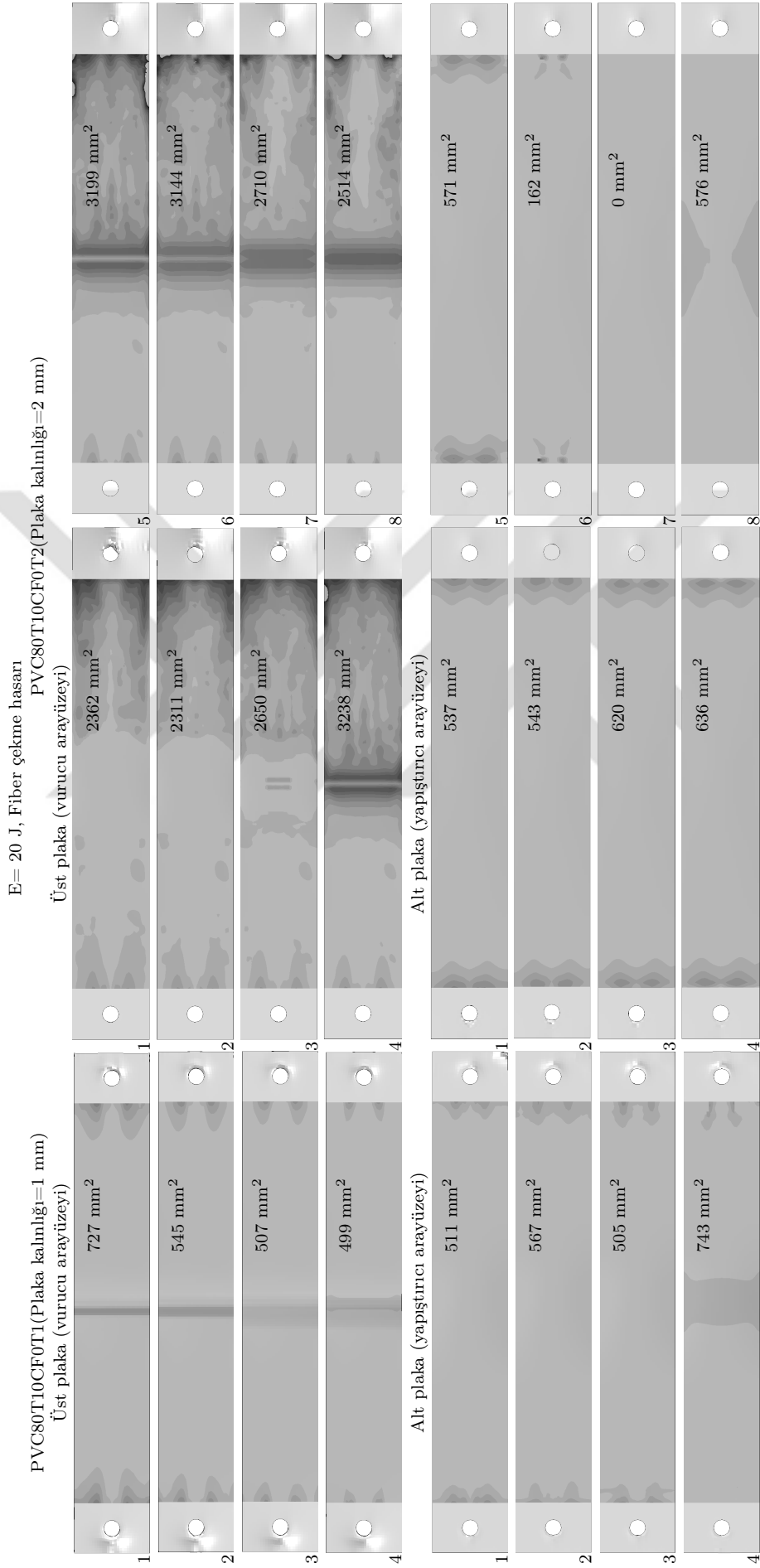
Alt plaka (yapıştırıcı arayüzeyi)



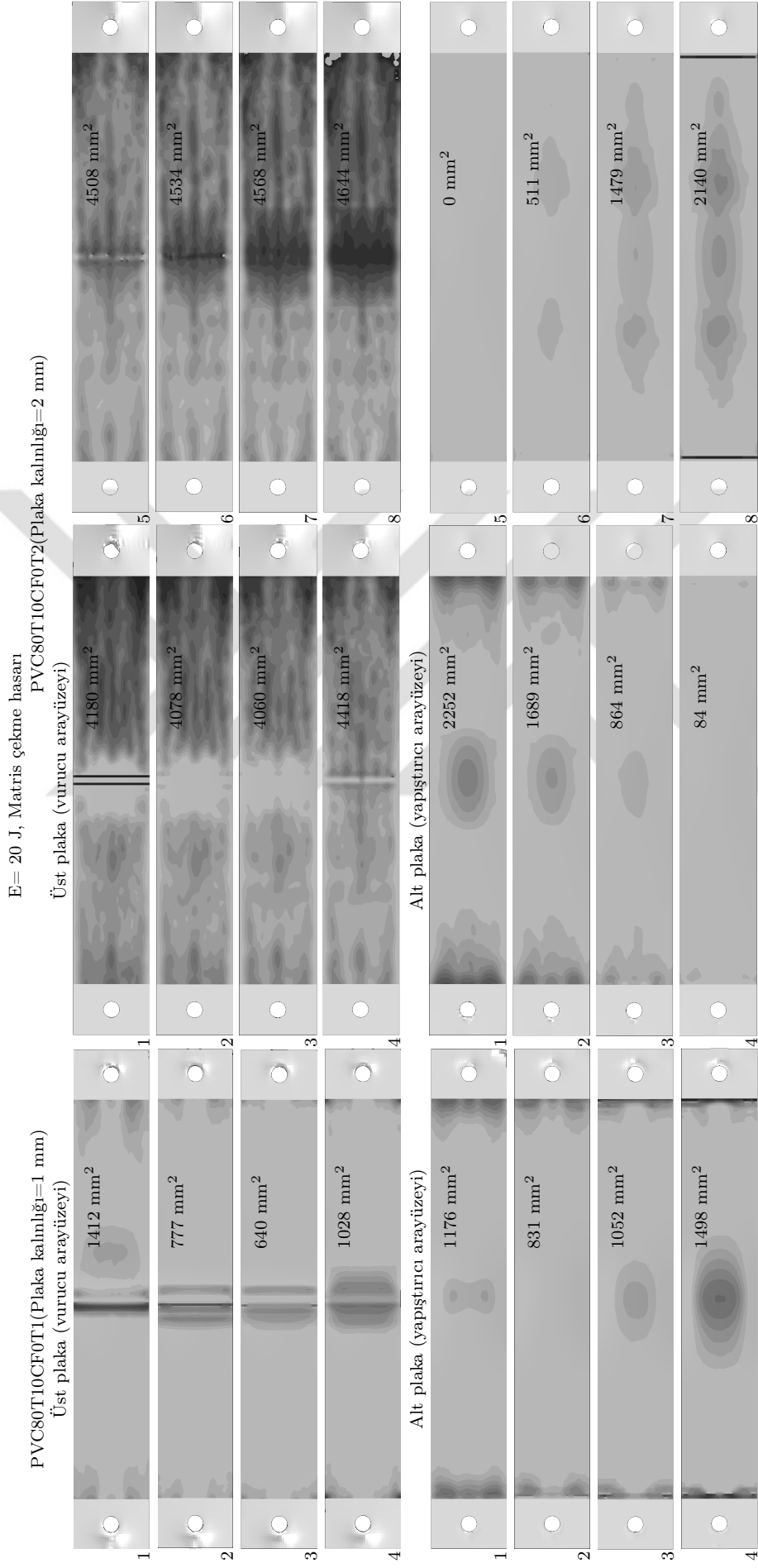
Şekil 4.19. Plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5 J'lük darbe enerjisinde kompozit tabakalarda delaminasyon hasar kriterine göre tespit edilen hasar bölgeleri ve alanları.

Şekil 4.20'de plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 20 J'lük darbe enerjisinde kompozit tabakalarda fiber çekme hasar kriterine göre tespit edilen hasar bölgeleri ve alanları gösterilmektedir. 5 ve 20 J darbe enerjilerine göre hasar alanları karşılaştırıldığında, 1 mm plaka kalınlığı için hasar alanlarının artışı, 2 mm plaka kalınlığına sahip kompozit plakalarda oluşan hasar alanlarının artışına göre daha düşüktür. 1 mm plaka kalınlığı için en büyük fiber çekme hasar alanı 743 mm² ile alt plakanın 4. katmanında meydana gelirken, 2 mm kalınlığındaki plakada oluşan fiber çekme hasar alanı 3238 mm² ile üst plakanın 4. katmanında meydana gelmektedir. 1 mm plaka kalınlığı için hasar alanları genellikle simetrik bir şekilde meydana gelirken, 2 mm kalınlığındaki plakada simetrik değil, pim deliklerinin bir tarafına göre yönelim söz konusudur. Alt plakada oluşan hasarlar ise üst plakaya göre oldukça düşüktür. Benzer sandviç kirişlerin matris çekme hasarı incelendiğinde, 1 mm plaka kalınlığı için en büyük hasar alanı alt plakanın 4. katmanında 1498 mm² ile meydana gelmektedir (Şekil 4.21). Plaka kalınlığı 2 mm olan sandviç kirişin yüzey plakalarında meydana gelen matris çekme hasarı üst plakada, alt plakadan daha fazladır ve 4644 mm² ile en büyük matris çekme hasarı üst plakanın 8. katmanında meydana gelmiştir. Üst plakanın katmanlarının hemen hemen tüm bölgelerini hasar kapsamaktadır. Alt plakanın 5. katmanında ise hasar oluşmamış, bir tarafsız yüzey gibi davranmıştır.

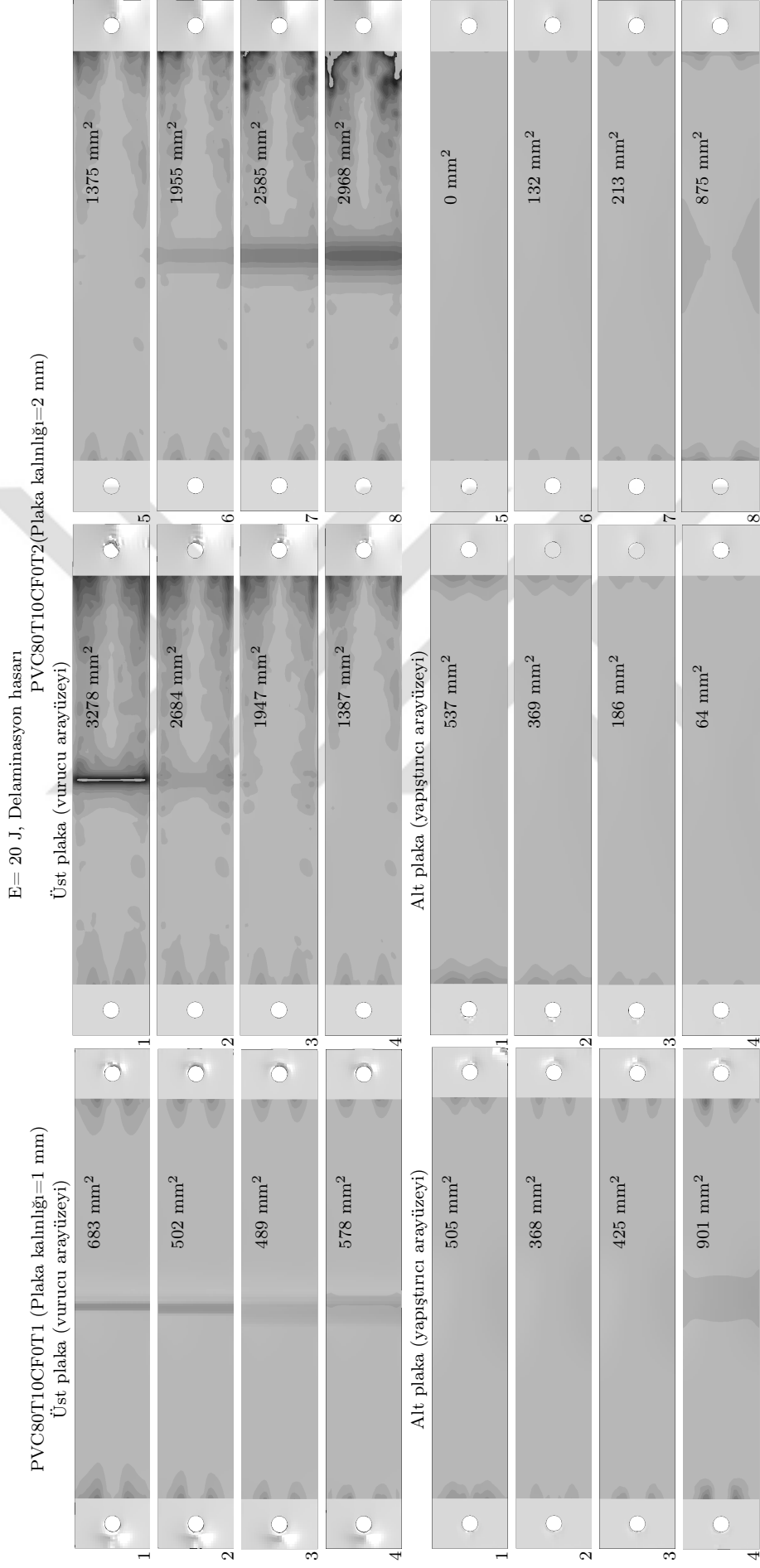
Şekil 4.22 tek yönlü (fiber açısı=0°) kompozit kirişlerde plakaların kalınlık değişiminin delaminasyon hasar kriterine göre tespit edilen hasar alanlarında tesiri irdelemektedir. Plaka kalınlığı 1 mm için delaminasyon hasarı en fazla alt plakanın 4. katmanında 901 mm² ile gözlemlenirken 2 mm plaka kalınlığında ise 3278 mm² ile üst plakanın 1. katmanında meydana gelmektedir. 2 mm plaka kalınlığına sahip sandviç kirişin üst plakasının katmanlarında daha fazla geniş alana hasar yayılmıştır.



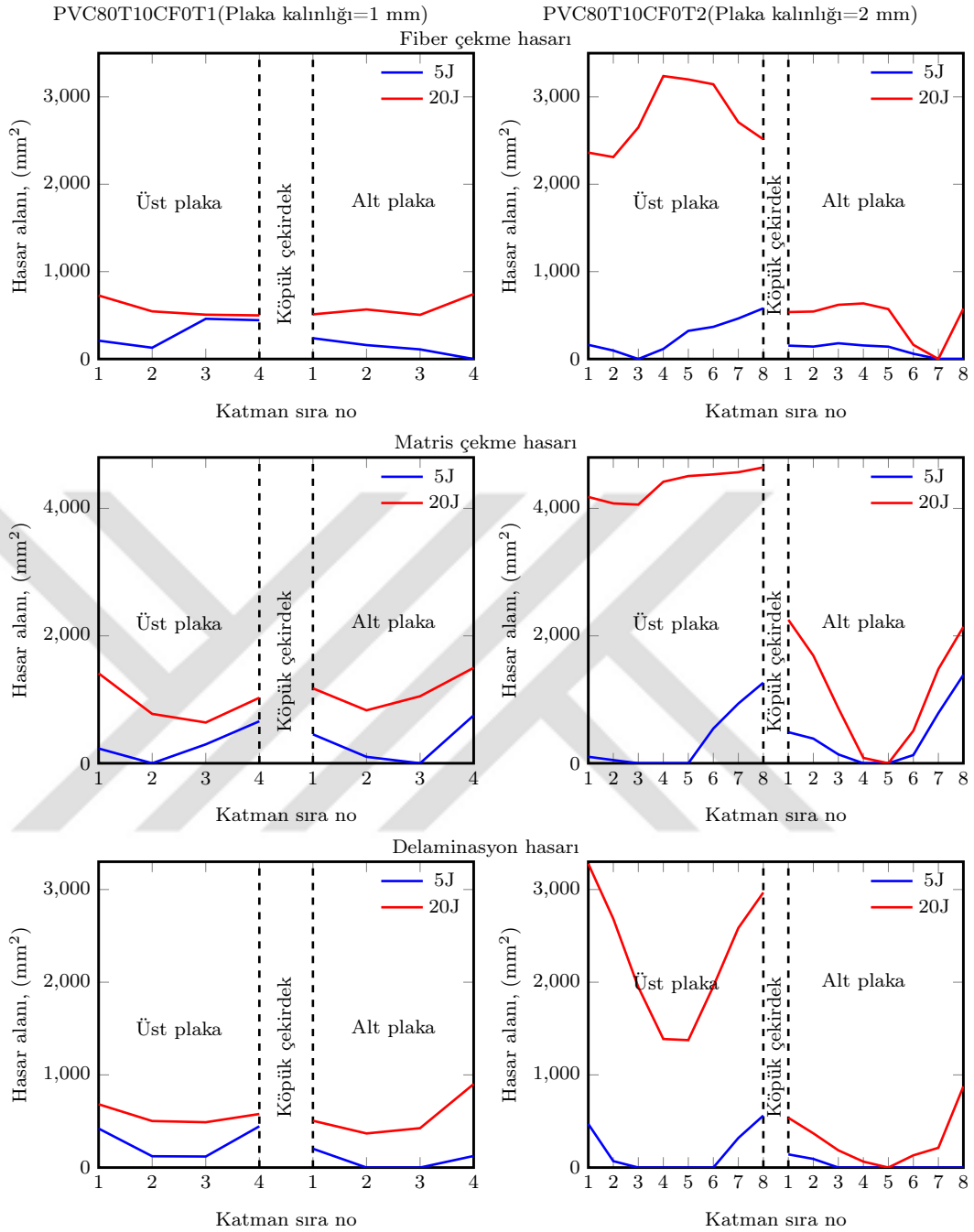
Şekil 4.20. Plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 20 J'lük darbe enerjisinde kompozit tabakalarda fiber çekme hasar kriterine göre tespit edilen hasar bölgeleri ve alanları.



Şekil 4.21. Plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 20 J'lük darbe enerjisinde kompozit tabakalarında matris çekme hasar kriterine göre tespit edilen hasar bölgeleri ve alanları.

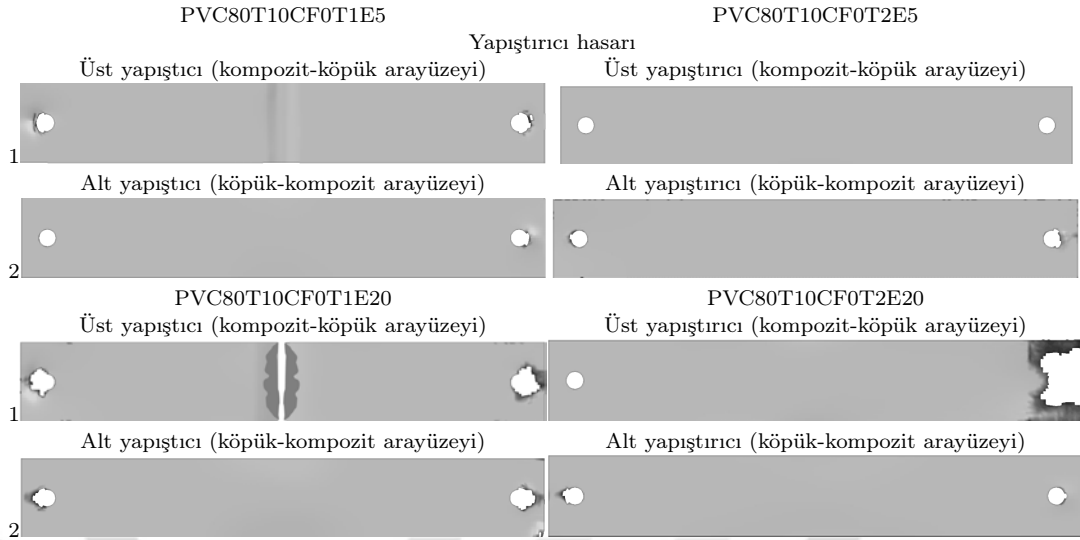


Şekil 4.22. Plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 20 J'lük darbe enerjisinde kompozit tabakalarında delaminasyon hasar kriterine göre tespit edilen hasar bölgeleri ve alanları.



Şekil 4.23. Plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5 ve 20 J darbe enerjilerinde fiber çekme, matris çekme ve delaminasyon hasarı alanlarının kalınlık boyunca değişimi.

Şekil 4.23 plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5 ve 20 J darbe enerjilerinde fiber çekme, matris çekme ve delaminasyon hasarı alanlarının kalınlık boyunca değişimini göstermektedir. 1 mm plaka kalınlığına sahip sandviç kirişlerde darbe enerjisinin

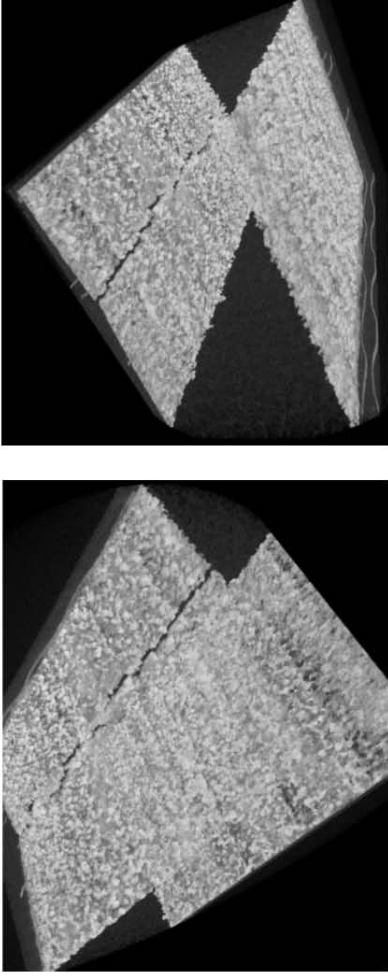


Şekil 4.24. Plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5 ve 20 J darbe enerjilerinde yapıştırıcı tabakalarında oluşan hasar bölgeleri.

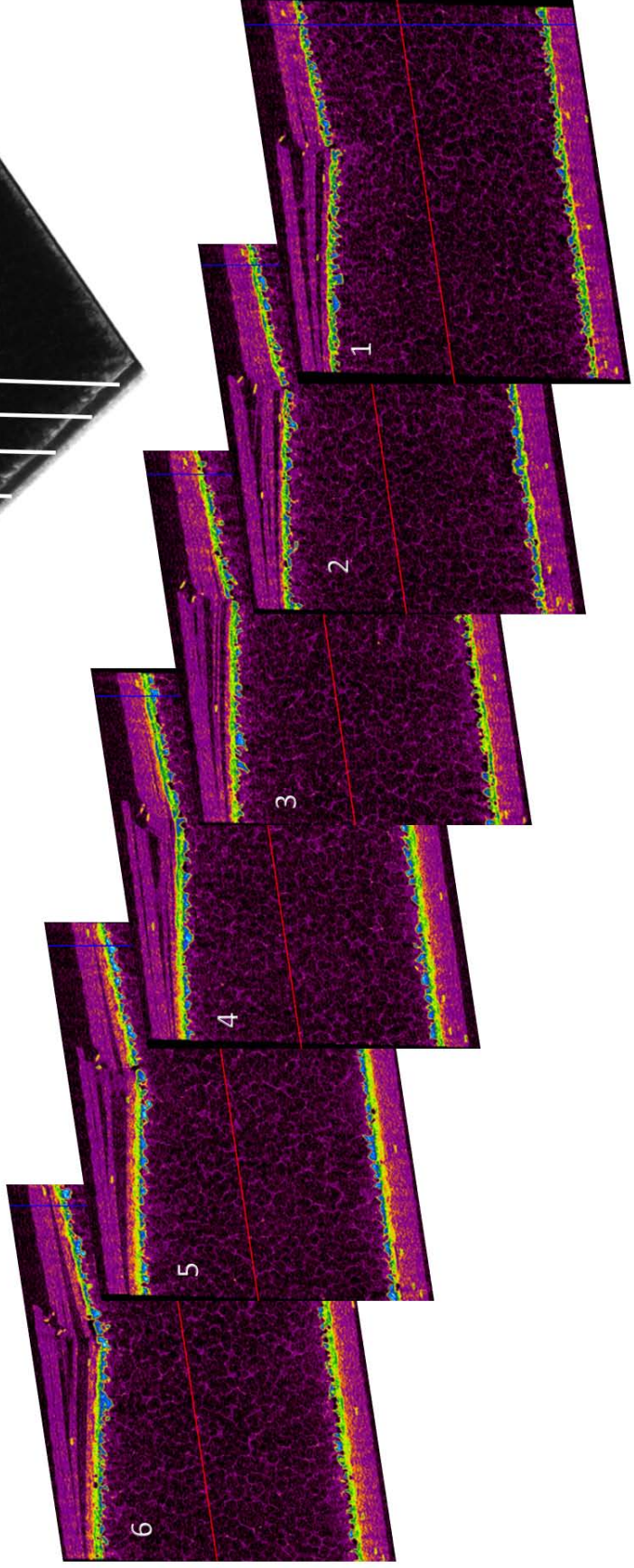
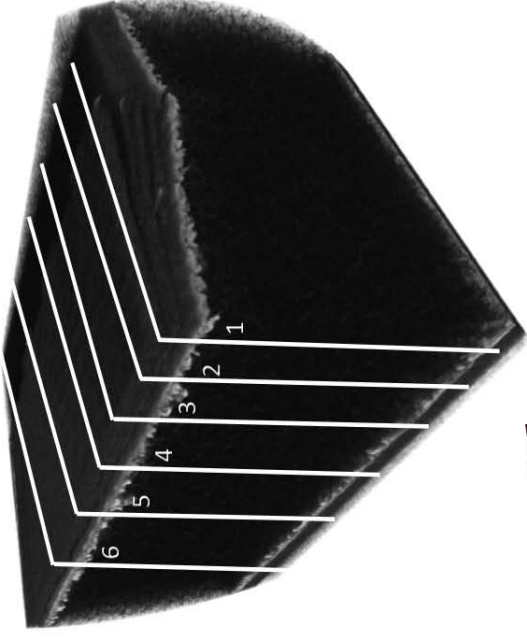
artışı hasar alanlarını yaklaşık 2 kat arttırmıştır. Plaka kalınlığı 2 mm olan sandviç kirişlerde ise hasar alanları darbe enerjisi arttığında yaklaşık 4 kat artmıştır. 1 mm kalınlıklı plaka yeterince elastik davranışa sahip olarak hasar oluşumunu önlemiştir. 2 mm plaka kalınlığına sahip sandviç kirişlerin analizlerinde yakınsama problemleri ile karşılaşmıştır. Yüzeye yakın elemanların geometri bozulmaları aşırı olduğu için sayısal integral işlemlerinde hatalara sebep vermiştir. Bu sorunu önleme için diğer analizlerde de kullanılan kademeli eleman geometrisini düzeltme algoritması ile yakınsama problemleri aşılmıştır, ancak bu tedbir analiz sürelerini oldukça uzatmıştır.

Şekil 4.24 plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı= 0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5 ve 20 J darbe enerjilerinde yapıştırıcı tabakalarında oluşan hasar bölgelerini göstermektedir. 5 J'lük darbe enerjisinde her iki kalınlıktaki kirişlerin yapıştırıcı katmanlarında hasar meydana gelmemiştir. 20 J'lük darbe enerjisinde kirişlerin üst yapıştırıcı tabakalarında hasar meydana gelmiştir. Plaka kalınlığı 1 mm olan kirişin yapıştırıcı hasarları orta bölgede ve pim etrafında yoğunlaşırken 2 mm plaka kalınlıklı kirişin üst yapıştırıcı tabakalarının pim etrafında oldukça fazla hasar görülmektedir.

Alt ve üst yapıştırıcı tabakaları

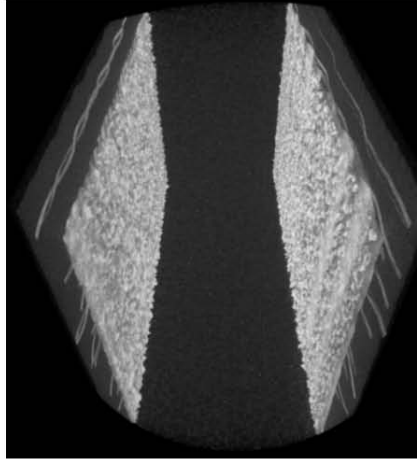
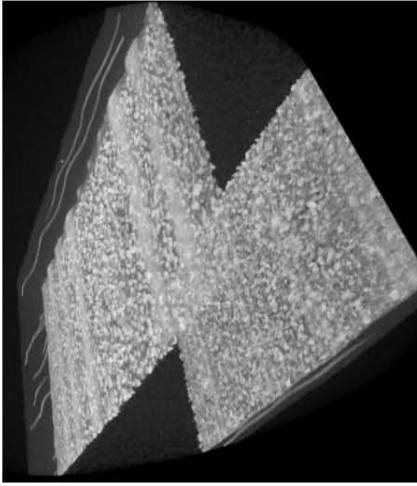


Sandviç kirişin orta bölgesi ve kesit sırası

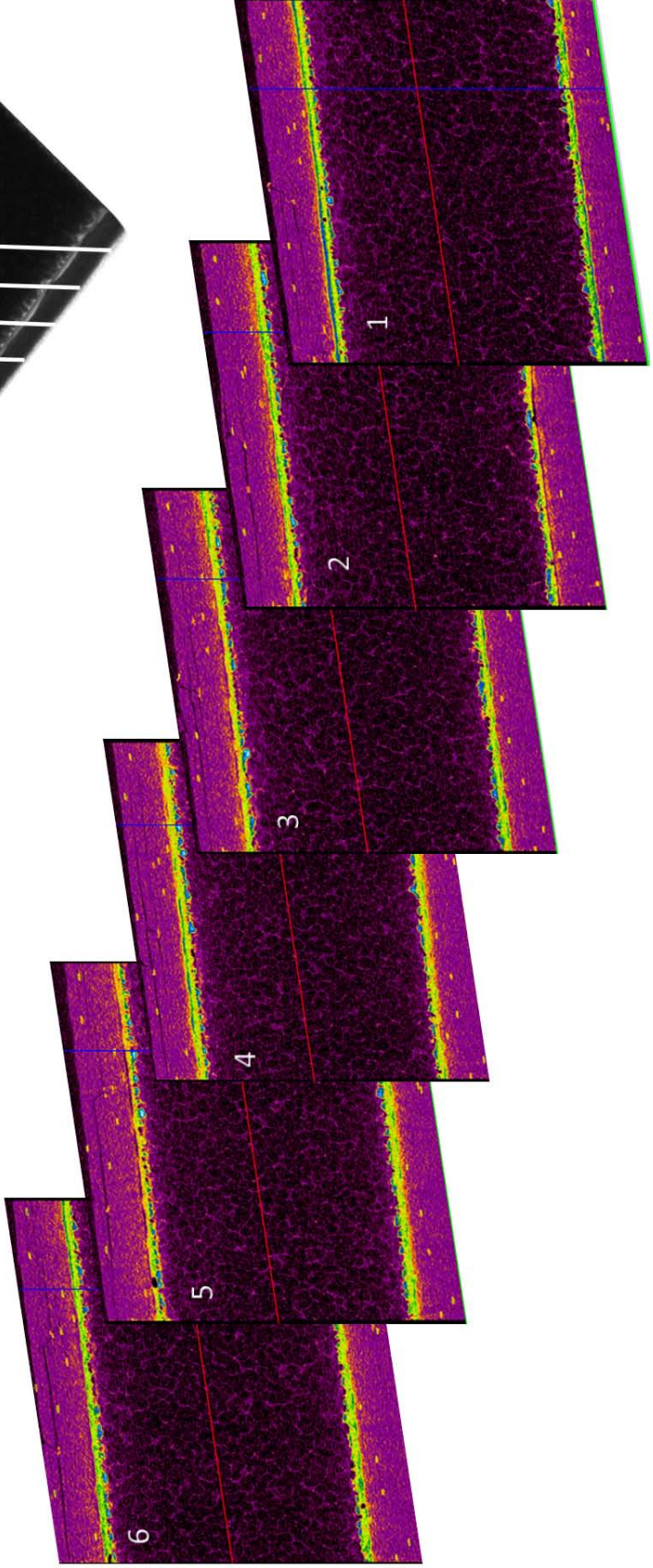
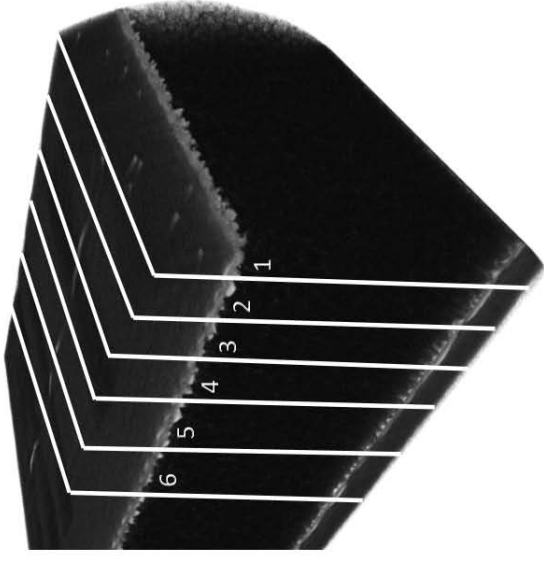


Şekil 4.25. Plaka kalınlığı 1 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber/epoksi kompozit sandviç kirişin darbe sonrası Mikro-Ct analizi, alt ve üst yapıştırıcı tabakalarının ve orta bölge kesit görüntüleri (E=20 J).

Yapıştırıcı katmanları



Sandviç kirişin orta bölgesi ve kesit sırası



Şekil 4.26. Plaka kalınlığı 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber/epoksi kompozit sandviç kirişin darbe sonrası Mikro-Ct analizi, alt ve üst yapıştırıcı tabakaları ve orta bölge kesit görüntüleri (E=20 J).

Şekil 4.25 20 J darbe enerjisinde plaka kalınlığı 1 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişin darbe sonrası Mikro-Ct analizi, yapıştırıcı ve kompozit plakaların tabakalarında hasar kesit görüntülerini göstermektedir. Sandviç kirişin darbeye maruz kalan ve muhtemel hasarlı orta bölgesi yüksek hızlı testere ile kesilerek Mikro-Ct taraması yapılmıştır. Tarama sonucunda üç eksenle kesit görüntülerini incelemek mümkündür. Sandviç kirişin darbeye maruz kalan bölgesi boyunca ve kesit görüntüleri verilmiştir. Darbe sonrası kompozit malzemedeki kırılmalar ve ayrılmalar ayrıntılı net görülmektedir. 4 tabakadan oluşan 1 mm kalınlıkta kompozit plakanın kesit boyunca tabakalar arası ayrılmalar mevcuttur. Alt plakada hasar oluşmamış ve köpük malzemesinde de kırılma görülmemiştir. Tarama sonuçları sonrasında element analizi yapılmış ve sandviç kirişin malzemeleri ayrıştırılmıştır. Bu sayede yapıştırıcı tabakası görüntülenebilmiştir. Üst yapıştırıcı tabakalarında hasar meydana geldiği görülmüştür. Orta bölgede çatlak oluşmuş ve ilerlemiştir. Alt yapıştırıcı tabakasında hasar oluşmamıştır. Tarama sonuçları, yapışma olayının ne kadar düzgün gerçekleştiği hakkında bilgi vermektedir.

Şekil 4.26'de 20 J darbe enerjisinde plaka kalınlığı 2 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişin darbe sonrası Mikro-Ct analizi, yapıştırıcı, kompozit plaka tabakalarının kesit görüntüleri gösterilmiştir. Plaka kalınlığının artışı darbe davranışı önemli derecede etkilemiştir. Bu durum kesit görüntülerinde de belirgin olarak ortaya çıkmıştır. Kompozit plakanın üst katmanlarında ayrılmalar daha belirgenleşirken kırılmalar olmamıştır. Sandviç kirişin ön kesitinden arkaya doğru, hasar davranışının değiştiği görülmektedir. Alt plakada ve köpük malzemesinde hasar ve kırılma meydana gelmemiştir. Yapıştırıcı tabakaları incelendiğinde, hasar oluşmadığı ve düzgün bir yapışma olayı gerçekleştiği görülmüştür. Mikro-Ct analizleri 1 mm'lik plaka kalınlıklı kirişe nazaran kirişin darbe enerjilerine daha mukavemetli olduğunu, eğilme direncinin arttığı, lakin üst plakanın diğer köpük ve alt plakaya nazaran daha fazla hasara darbe bölgesi civarında maruz kaldığını ortaya koymaktadır.

5. BÖLÜM

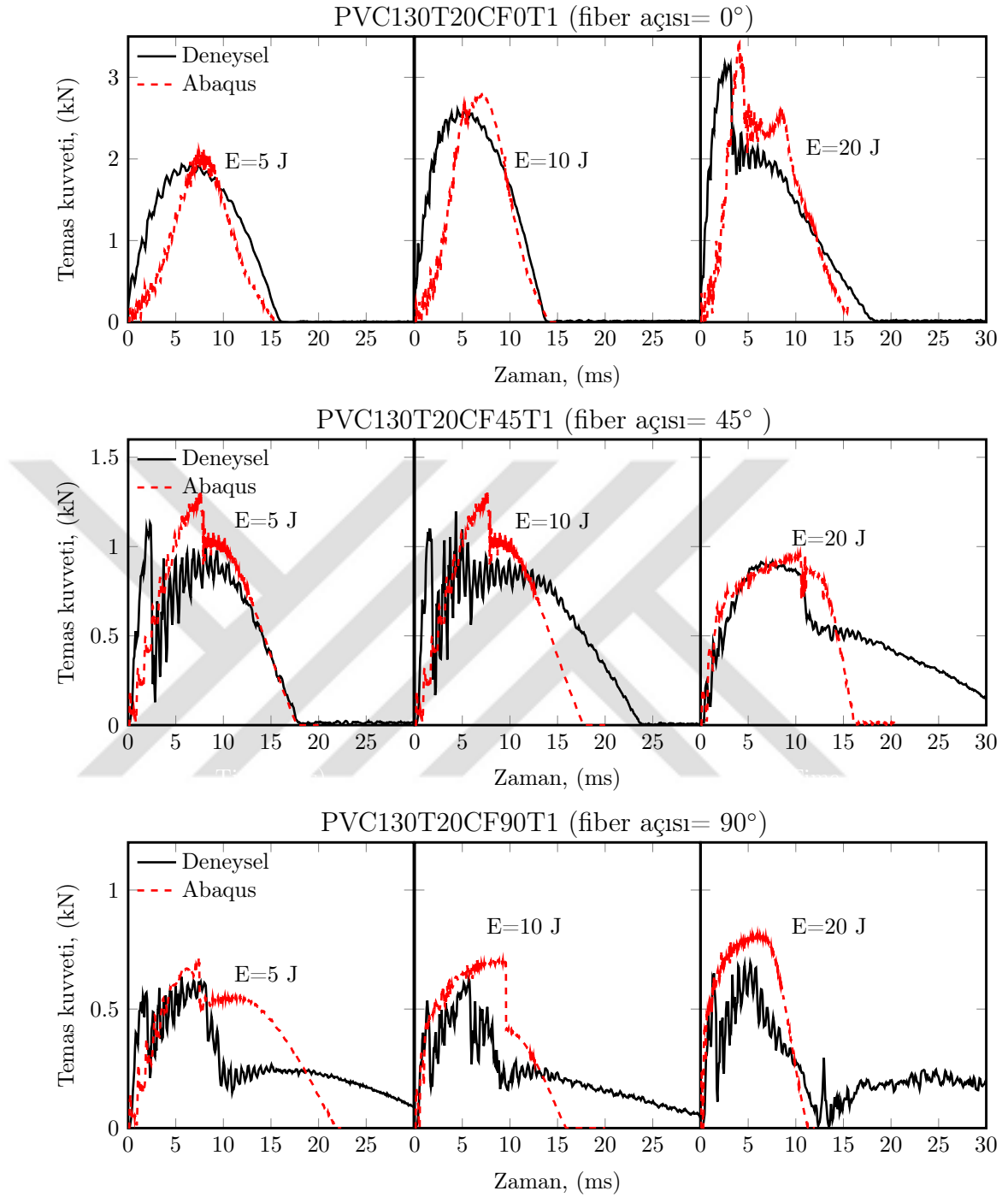
FİBER AÇISININ ETKİSİ

5.1. Giriş

Bu bölümde karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin düşük hızlı eğilme darbe davranışına kompozit yüzey plakalarının fiber açısının etkisi araştırılmıştır. Tek yönlü 0°, 45° ve 90° fiber açıları için 5, 10 ve 20 J darbe enerjileri altında temas kuvveti, kinetik enerji ve temas kuvveti-yer değiştirme değişimleri irdelenmiştir. Darbe testleri ve analizleri sonrası hasar görüntüleri, hasar bölgeleri ve alanları irdelenerek darbe davranışın fiber açısının tesiri belirlenmiştir. Kompozit sandviç kirişlerin darbe davranışı incelenirken numuneler 4 katmanlı, tek yönlü, karbon fiber/epoksi yüzey plakasına, 80 kg/m³ köpük yoğunluğuna ve 10 mm köpük kalınlığına sahip çekirdek köpük malzemesinden imal edilmiştir. Yapılan ön çalışmalarda, seçilen sandviç kiriş özelliklerinden dolayı 45° ve 90° fiber açılı kompozit plakalarda analizlerde sorunlar çıkmıştır. Köpük yoğunluğu dikkate alınan darbe enerji düzeylerinde darbe enerjisini karşılayabilmede yetersiz (düşük) kalmıştır. Bu nedenle kirişler eğilme direngenliğini düşük yüklerde kaybetmiştir. Bu nedenle 130 kg/m³ köpük yoğunluklu ve 20 mm kalınlıklı en mukavemetli çekirdek köpük malzemesi seçilmiş ve çalışmalara problemsiz devam edilmiştir.

5.2. Sonuçlar

Şekil 5.1'de tek yönlü fiber açısı 0°, 45° ve 90° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde hesaplanan ve deneysel temas kuvveti-zaman değişimleri karşılaştırılmaktadır. 0° fiber açısına sahip kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde en büyük deneysel temas kuvvetleri



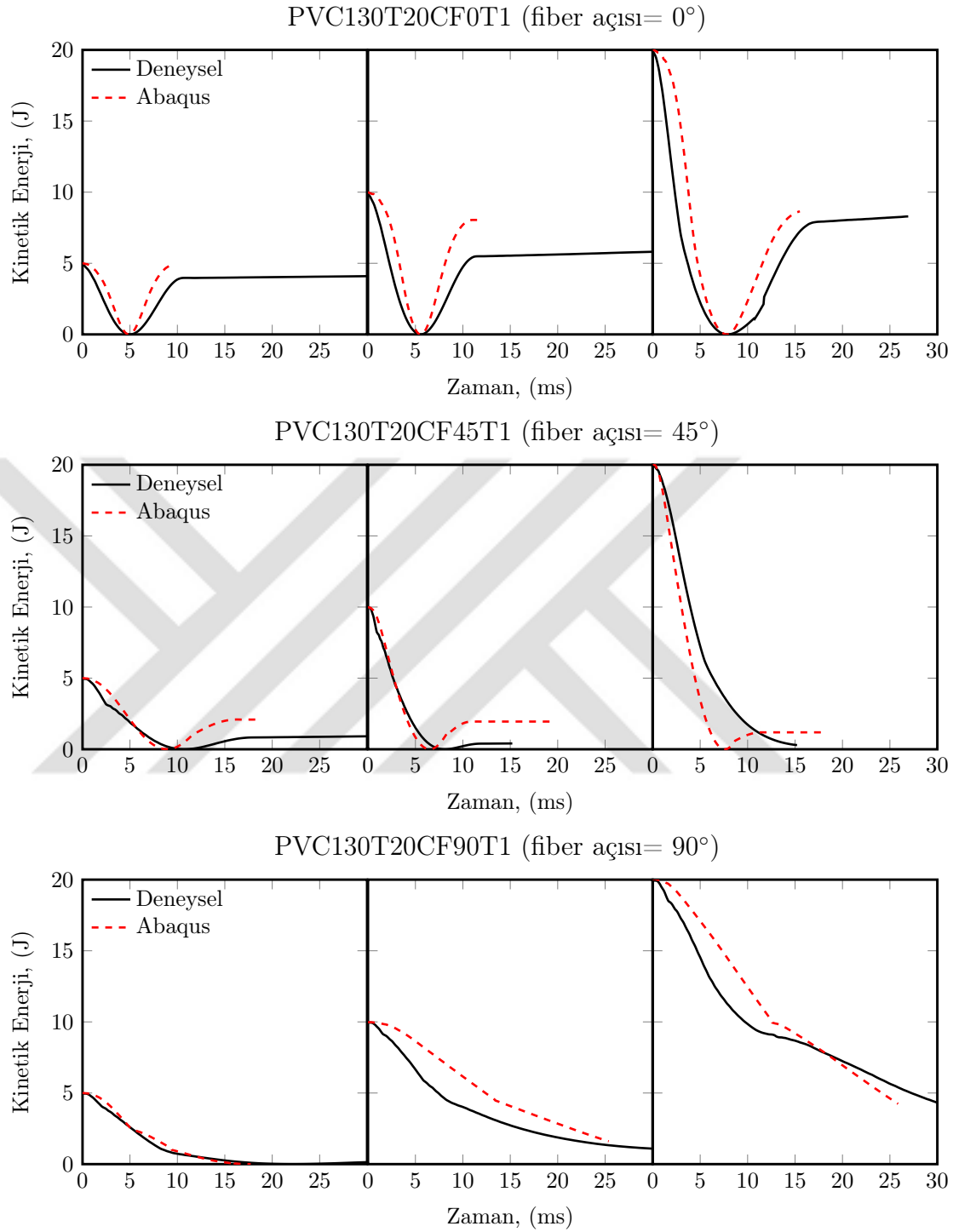
Şekil 5.1. Fiber açısı 0° , 45° ve 90° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J'lük darbe enerjilerinde temas kuvveti-zaman değişimleri.

sırası ile 1.9, 2.6 ve 3.1 kN, ve temas süreleri 16.4, 14.3 ve 18.6 ms ölçülmüştür. Sayısal en büyük temas kuvvetleri sırası ile 2.1, 2.7 ve 3.4 kN ve temas süreleri 15.4, 14.1 ve 15.5 ms hesaplanmıştır. 5 ve 10 J darbe enerjilerinde temas kuvveti-zaman eğrileri süreklilik sergilediği için fiber kırılmaları meydana gelmediği anlaşılmaktadır, ancak 20 J darbe enerjisinde ani kuvvet düşüşleri fiber kırılmalarına işaret etmektedir.

Darbe enerjisi arttıkça en büyük temas kuvvetleri artmıştır. Temas sürelerinde anlamlı bir fark yoktur. Sayısal ve deneysel temas kuvveti-zaman grafikleri arasında iyi bir uyum vardır. 20 J darbe enerjisi için tepe noktasındaki ani düşüş sayısal modelde de belirgindir. 45° fiber açısında sahip kompozit sandviç kirişlerinin ilgili darbe enerjilerinde deneysel en büyük temas kuvvetleri sırası ile 1.1, 1.2 ve 0.9 kN' ve en büyük temas süreleri 18.5, 24.2 ve 31.0 ms ölçülmüştür. Hesaplanan en büyük temas kuvvetleri 1.3, 1.2 ve 0.9 kN ve temas süreleri 17.7, 18 ve 16.2 ms belirlenmiştir.

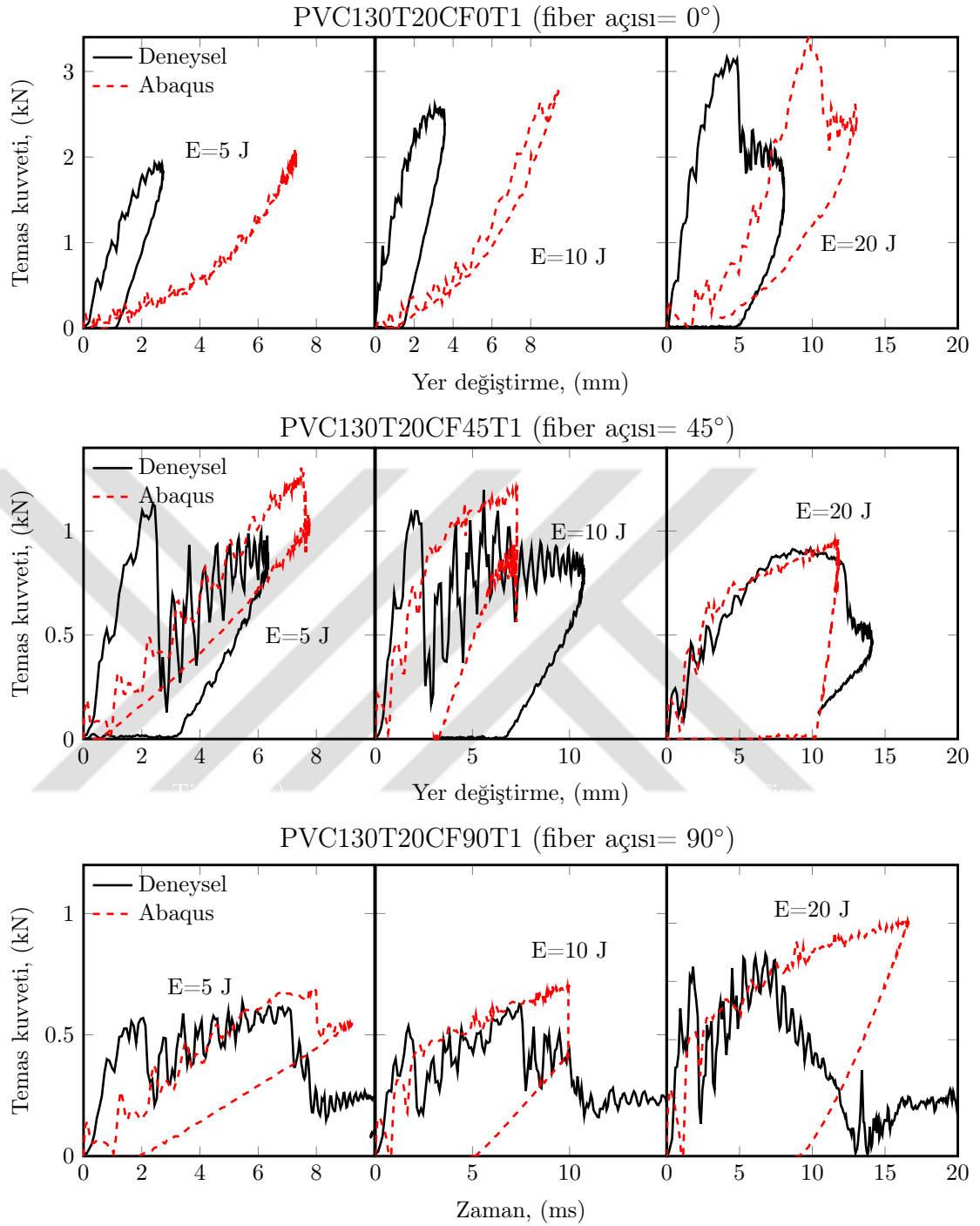
0° ile 45° karşılaştırıldığında en büyük temas kuvvetlerinin 45°'de yarı seviyeye düştüğü görülmektedir. Eğrilerden enerji seviyelerinin ilk aşamalarından itibaren kırılmaların başladığı anlaşılmaktadır ve temas süreleri uzamıştır. Sayısal ve deneysel eğriler arasında iyi bir uyum vardır. 90° fiber açısına sahip sandviç kirişlerin deneysel en büyük temas kuvvetleri sırası ile 0.7, 0.6 ve 0.7 kN ölçülürken darbe testi üç enerji seviyesi için de yaklaşık 35 ms'de tamamlanmıştır. Sayısal en büyük temas kuvvetleri ise 0.7, 0.7 ve 0.8 kN ve temas süreleri 21, 15.4 ve 11.3 ms belirlenmiştir. En büyük temas kuvvetleri karşılaştırıldığında sayısal ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum var iken temas sürelerinde geçerli değildir. 0° ve 90° fiber açısına sahip sandviç kirişler karşılaştırıldığında en büyük temas kuvvetlerinin yaklaşık 4 kat azaldığı görülmektedir. 90° fiber açısına sahip sandviç kirişin temas kuvveti-zaman grafikleri irdelendiğinde, kırılmaların darbe enerjisinin erken aşamalarında başladığı görülmektedir.

Şekil 5.2'de 0°, 45° ve 90° fiber açılı tek yönlü karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde kinetik enerji-zaman değişimlerini göstermektedir. 0° fiber açısı için sandviç yapı gelen darbe enerjisinin hemen hemen yarısını absorbe edebilmiştir. Sayısal ve deneysel enerji seviyelerinde arasında uyum vardır. 45° fiber açısına sahip kirişlerde ise gelen darbe enerjisinin tümüyle sönmülmüştür. 90° fiber açısında ise sandviç kirişlerin yaklaşık 10 J enerji seviyesinde kırılarak hasara uğradığı anlaşılmaktadır. Şekil 5.3'de fiber açısı 0°, 45° ve 90° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde temas kuvveti-yer değiştirme değişimlerini göstermektedir. 0° fiber açısına sahip sandviç kirişlerde sayısal model daha elastik davranan bir yapıya



Şekil 5.2. Fiber açısı 0° , 45° ve 90° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J'lük darbe enerjilerinde kinetik enerji-zaman değişimleri.

işaret etmiştir. 45° fiber açısına sahip kirişlerde numuneler kırılarak kalıcı hasara maruz kalmıştır. Aynı davranış sayısal model ile doğrulanmıştır. Eğrilerim altında kalan alanlardan hesaplanan kirişler üzerinde yapılan iş değerleri sayısal ve deneysel sonuçlarda kısmi benzerlik görülmektedir. Matris malzemesinin sayısal modelde



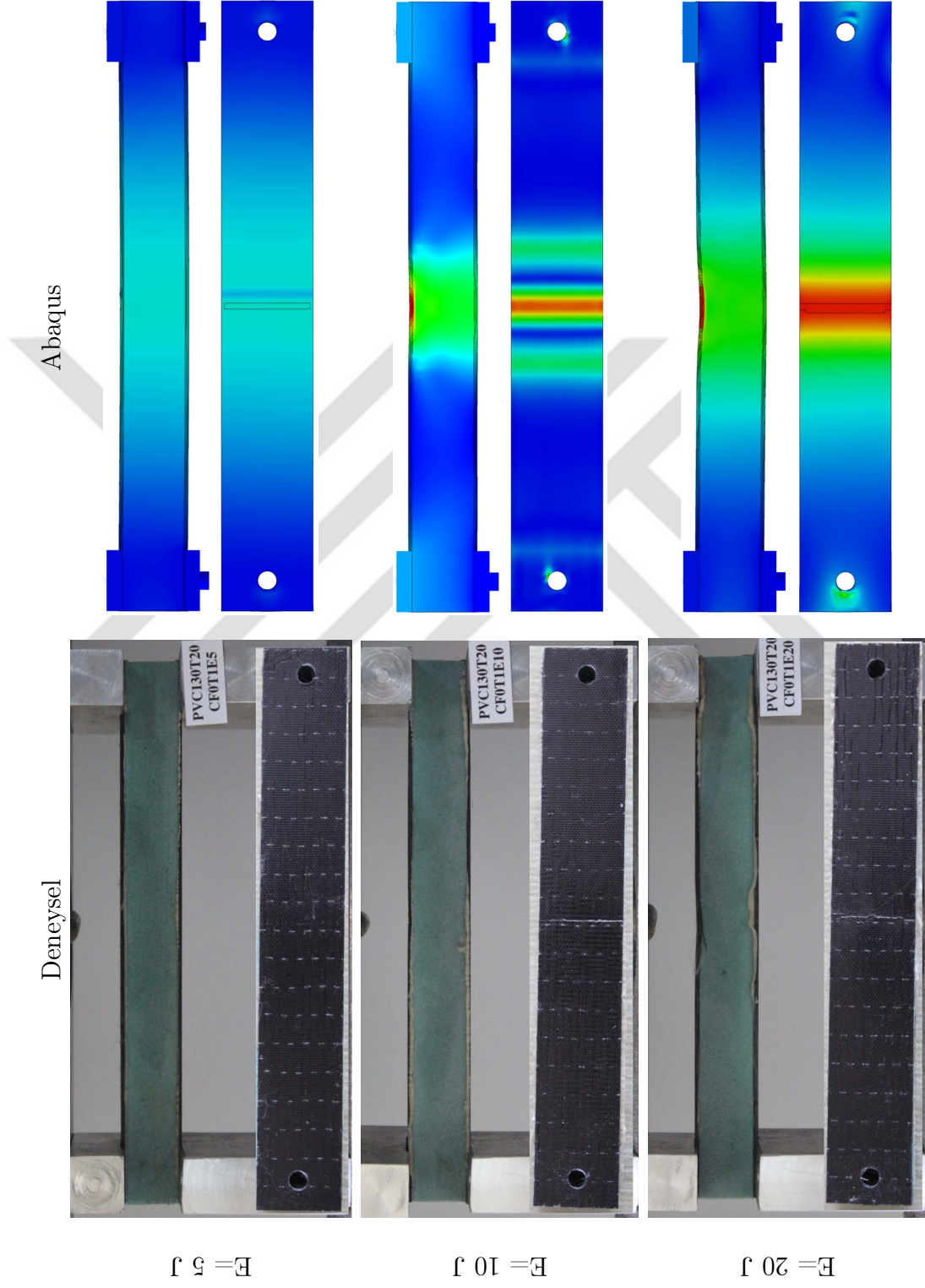
şekil 5.3. Fiber açısı 0° , 45° ve 90° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J'lük darbe enerjilerinde temas kuvveti-yer değiştirme değişimleri.

elastik değerlendirilmesi muhtemel nedendir. Kirişlerde matris malzemesi ilaveten plastik deformasyon sergileyerek enerjinin bir kısmını sönümlenmekte ve temas süresi uzamaktadır. Çünkü, fiber açısı arttıkça hasar fiberden matrise dönüşmektedir. Fiber açısının değişimi sandviç yapının tüm hasar mekanizmasını etkilemiştir. Bu durum darbe sonrası görüntülerde daha iyi anlaşılmaktadır.

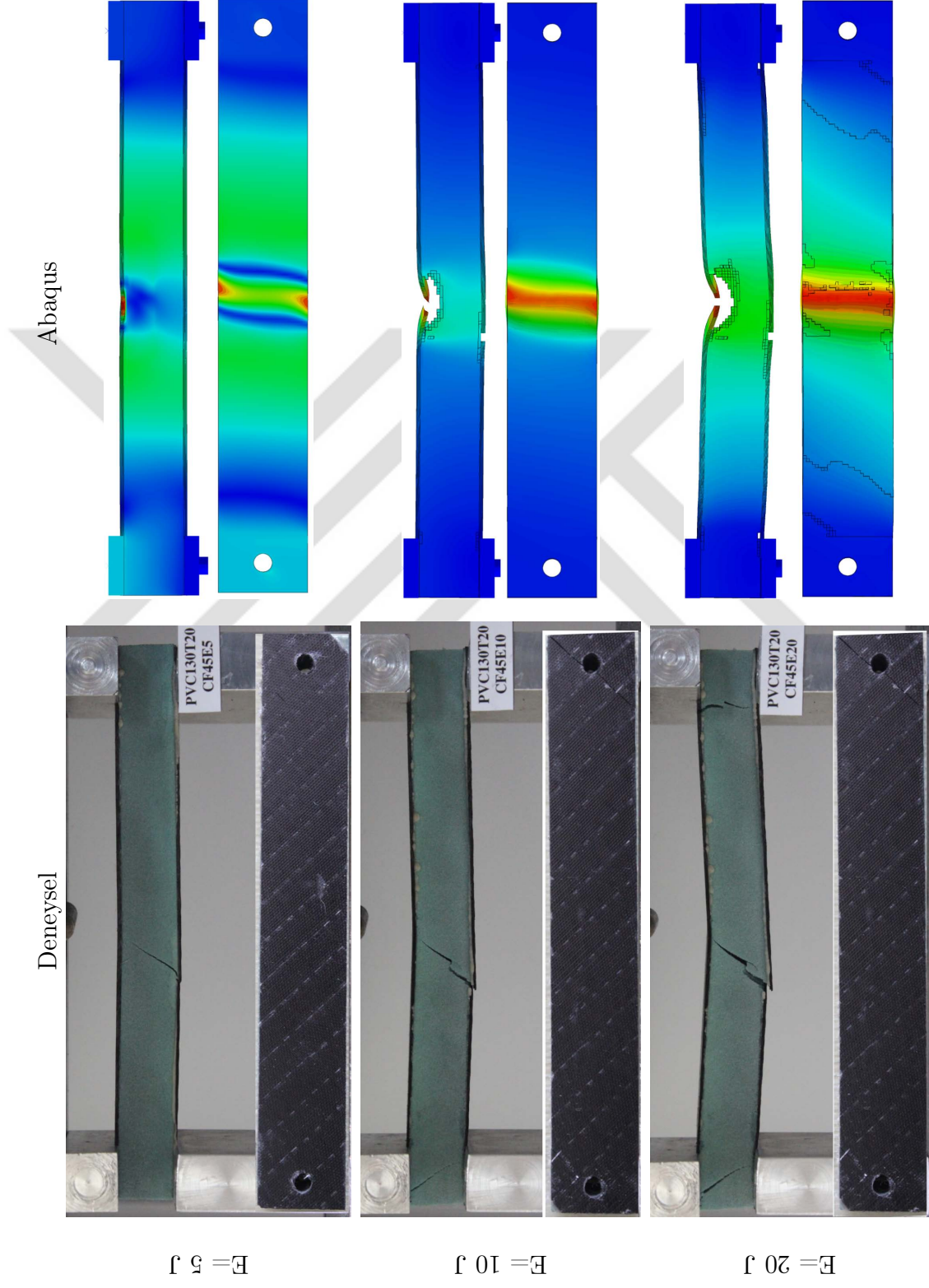
Şekil 5.4 fiber açısı 0° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J'lük darbe enerjilerinde darbe sonrası sayısal ve deneysel hasar görüntülerini vermektedir. 5 J darbe enerjisi için üst plakada kırılma olmazken, 10 ve 20 J darbe enerjileri için üst plakalarda kırılmalar mevcuttur. Köpük malzemesinde herhangi bir hasar meydana gelmezken, anlamlı bir kalıcı yer değiştirme de meydana gelmemiştir.

Şekil 5.5' fiber açısı 45° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde darbe sonrası sayısal ve deneysel hasar görüntüleri gösterilmektedir. Darbe sonrası numunelerde üst plakanın orta bölgelerinde hasar oluşmamıştır. Ancak alt plakalar kırılarak hasar köpük malzemesine nüfus etmiş ve fiber yönünde ilerleyen çatlaklar meydana gelmiştir. 5 J'lük darbe enerjisinde analizde hasar oluşumu belirlenmemiş, numunede alt plakada ve köpük malzemesinde çatlak başlangıcı ve hasar meydana gelmiştir. Darbe enerjisi arttıkça sayısal model çatlakları ve kırılmaları tespit etmiştir. Ancak sayısal modelde hasar üst plakadan ve köpük malzemesine nüfus ederek devam etmiştir. Köpük malzemesinin alt bölgelerde de hasara uğradığı görülmektedir. Hasarlar fiber doğrultularında meydana gelmiştir. Numunelerde kırılmaların alt plakada başlaması ve köpük malzemesinin içinde devam etmesi yapının eğilmeden dolayı meydana gelen çekme yüküne karşı bu bölgelerde zayıf olması ile ilgilidir. Darbe testlerinde hasarın pim civarlarında olduğu görülmektedir.

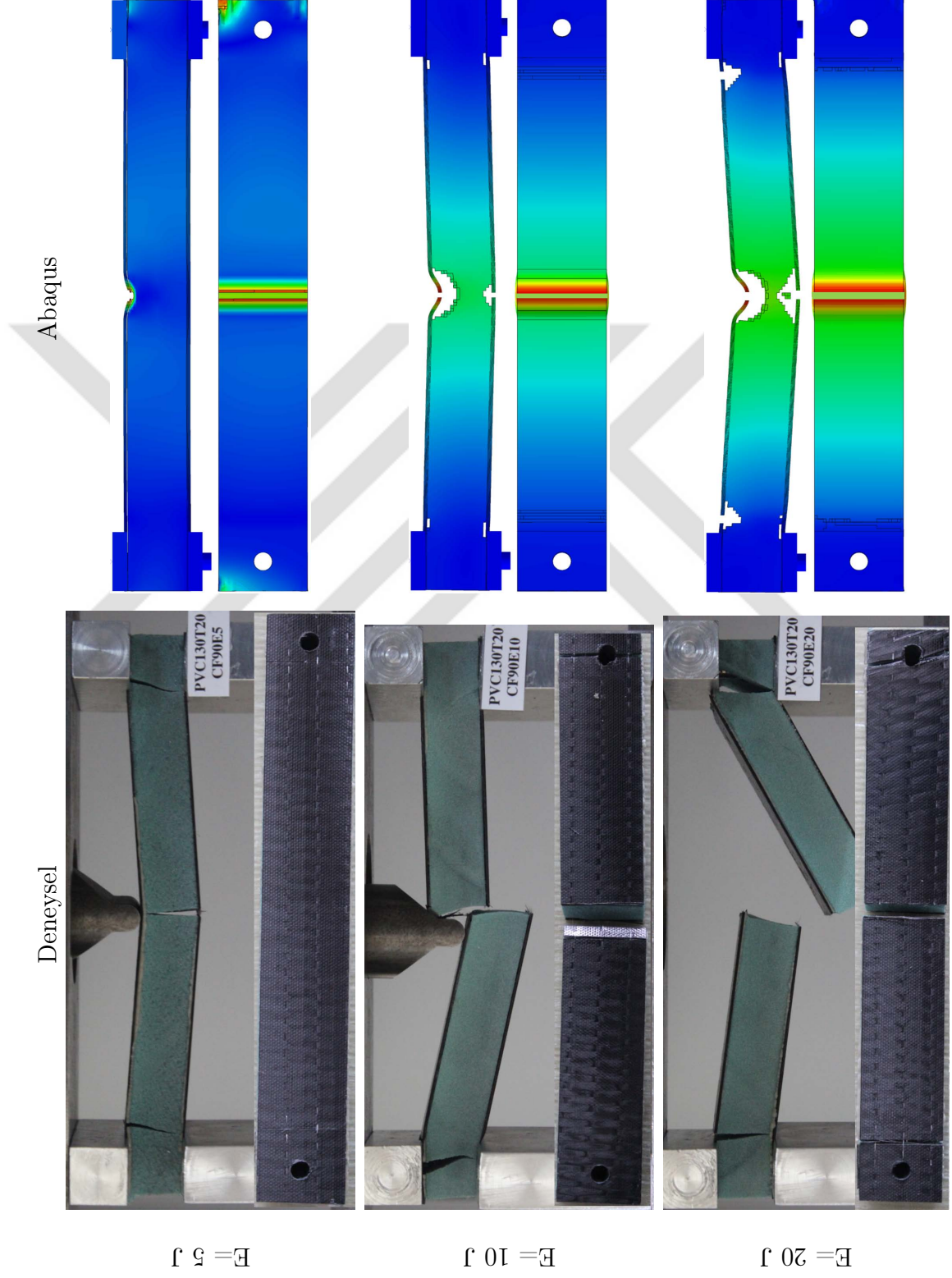
Şekil 5.6'da 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde 90° fiber açısına sahip kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası sayısal ve deneysel hasar görüntüleri verilmiştir. 5 J darbe enerjisinde numune hasar uğramış ancak tamamen kırılmamıştır. Üst plaka kırılmazken alt plaka ve köpük malzemesi tamamen kırılmıştır. Sayısal modelde ise hasar üst bölgede tahmin edilmiştir. Pim civarlarında hasarlar ve kırıklar meydana gelmiştir. 10 ve 20 J darbe enerjisinde sandviç kiriş numuneler tamamen kırılmıştır. Sayısal modelde de köpük hasara uğramaya başlamış, fiber doğrultusunda ilerlemiştir. Sınır şartı bölgelerinde hasar meydana gelmiştir. Köpük malzemesinin hasar kriterleri incelendiğinde kayma ve sünek hasar kriterinin daha etkili olduğu görülmektedir.



Şekil 5.4. Fiber açısı 0° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde darbe sonrası deneysel ve deneysel görüntüleri.



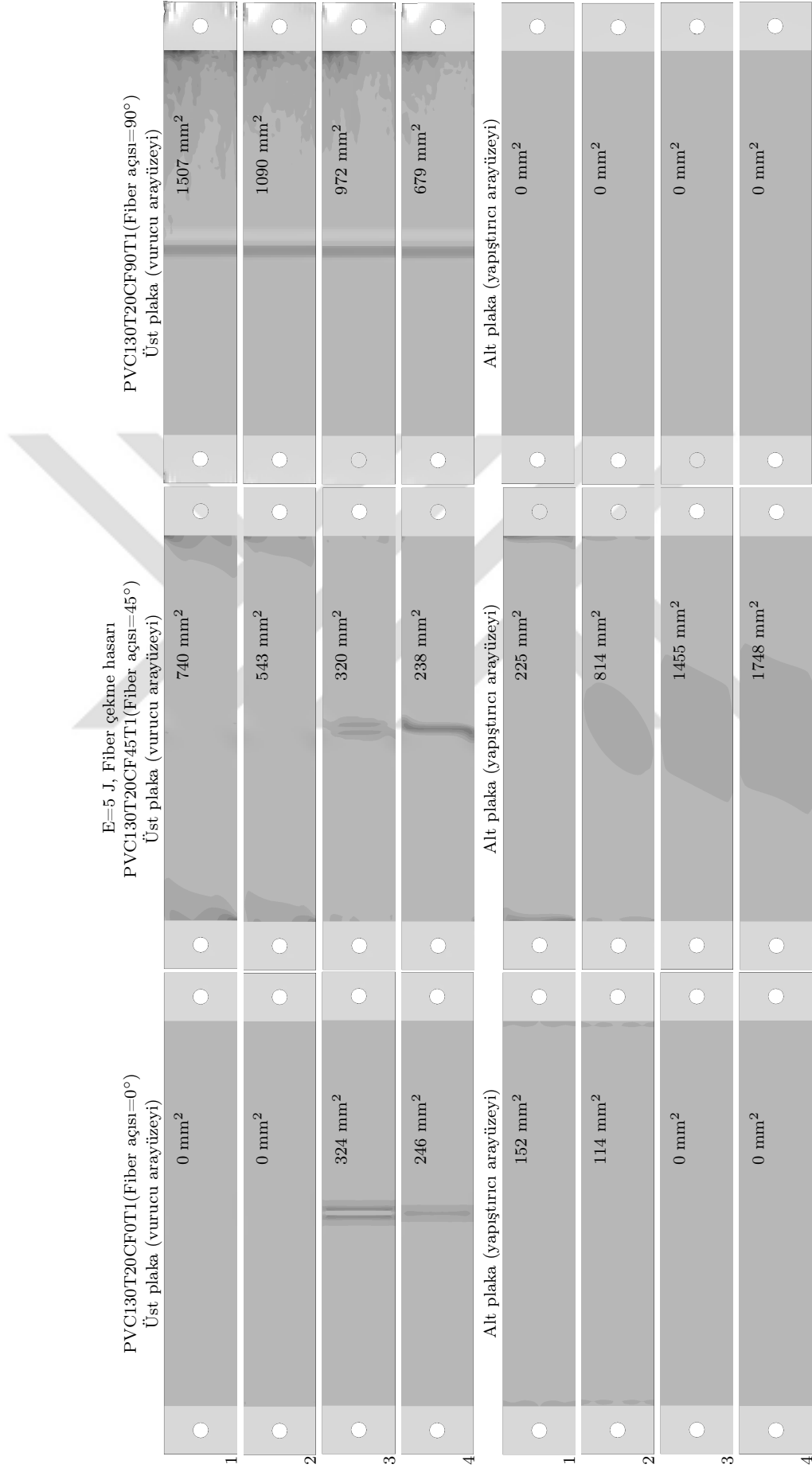
Şekil 5.5. Fiber açısı 45° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde darbe sonrası sayısal ve deneysel görüntüleri.



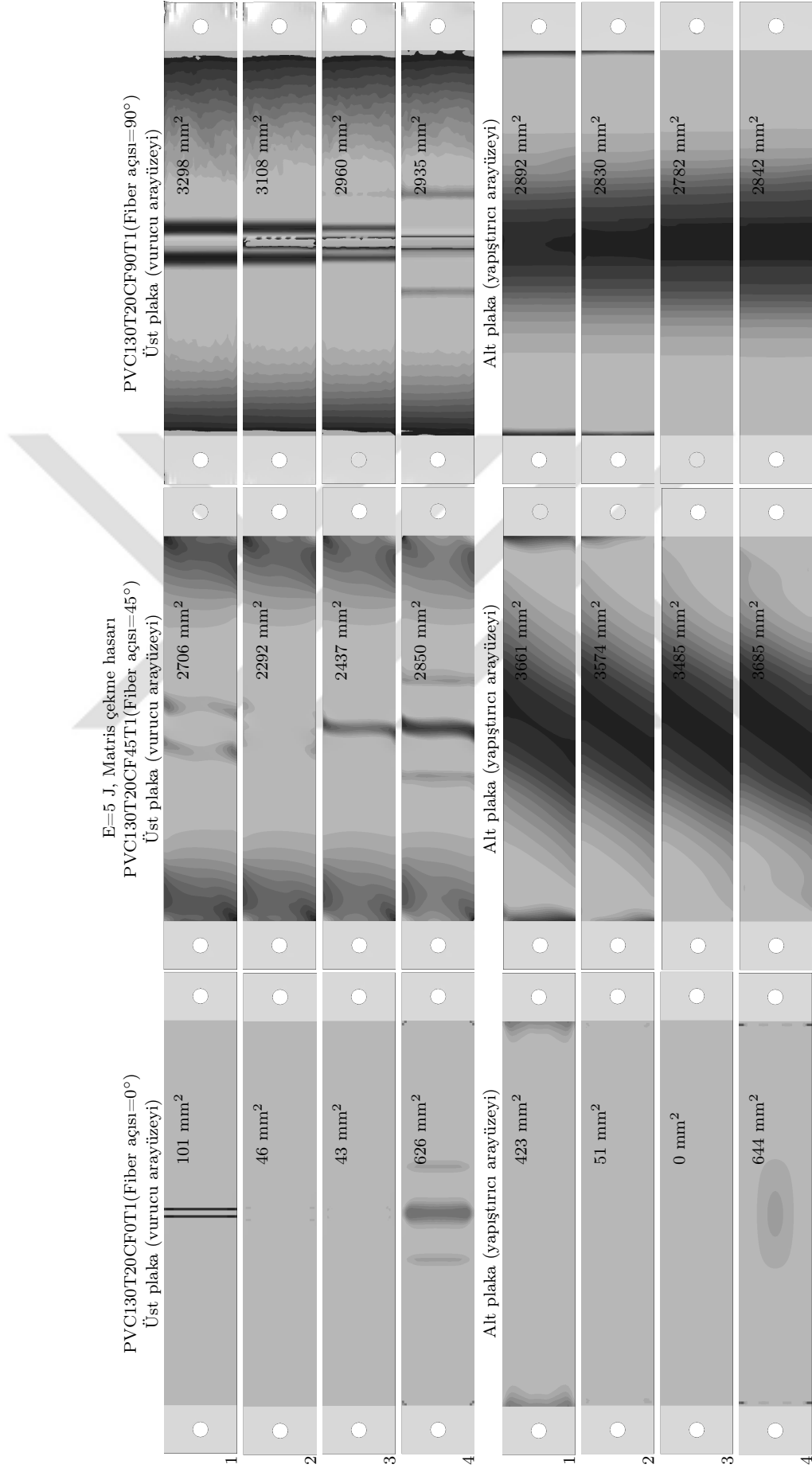
Şekil 5.6. Fiber açısı 90° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde darbe sonrası sayısal ve deneysel görüntüleri.

Şekil 5.7'de 5 J'lük darbe enerjisinde fiber açısı 0° , 45° ve 90° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında fiber çekme hasar kriterine göre hesaplanan hasar bölgeleri ve alanları verilmiştir. Üst plakalarda en büyük fiber çekme hasar bölgeleri 90° fiber açılı kompozit sandviç kirişlerde meydana gelmiştir. 0° , 45° ve 90° fiber açılı kompozit sandviç kirişlerin üst plakalarında meydana gelen en büyük hasar alanları sırası ile 324 mm^2 (3. katman), 320 mm^2 (3. katman) ve 1507 mm^2 (1. katman) olmaktadır. Alt plakalar dikkate alındığında ise 0° fiber açılı kirişte kısmen pim bölgelerinde olmak üzere 90° fiber açılı kirişlerde hasar oluşmamıştır. 45° fiber açılı kirişte ise fiber yönlerinde fiber çekme hasarları meydana gelmiştir. En büyük hasar alanı 4. katmanda 1748 mm^2 ile oluşmuştur. Şekil 5.8'de fiber açısı 0° , 45° ve 90° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında matris çekme hasar kriterine göre tahmin edilen 5 J darbe enerjisinde hasar bölgeleri ve alanları gösterilmektedir. Fiber açısının artışı matris çekme hasar alanlarını arttırmıştır. 90° fiber açılı kompozit plakalarda fiberden ziyade tüm yükü matris malzemesi taşımaktadır. 45° fiber açılı kompozit plakalarda hasar alanları artmaktadır. 0° fiber açılı kompozit plakalarda oluşan en büyük hasar alanı alt plakanın 4. katmanında 644 mm^2 olmaktadır. 45° dereceli kompozit plakalarda hasar alanları alt ve üst plakalar için 4. katmana doğru artmaktadır ve en büyük hasar alanı 3685 mm^2 ile alt plakanın 4. katmanında meydana gelmiştir. 90° fiber açısına sahip kompozit sandviç kirişlerin üst plakasında hasar daha çok pim civarında alt plakada orta bölgede yoğunlaşmıştır. En fazla hasar alanı üst plakanın 1. katmanında 3298 mm^2 ile meydana gelmiştir.

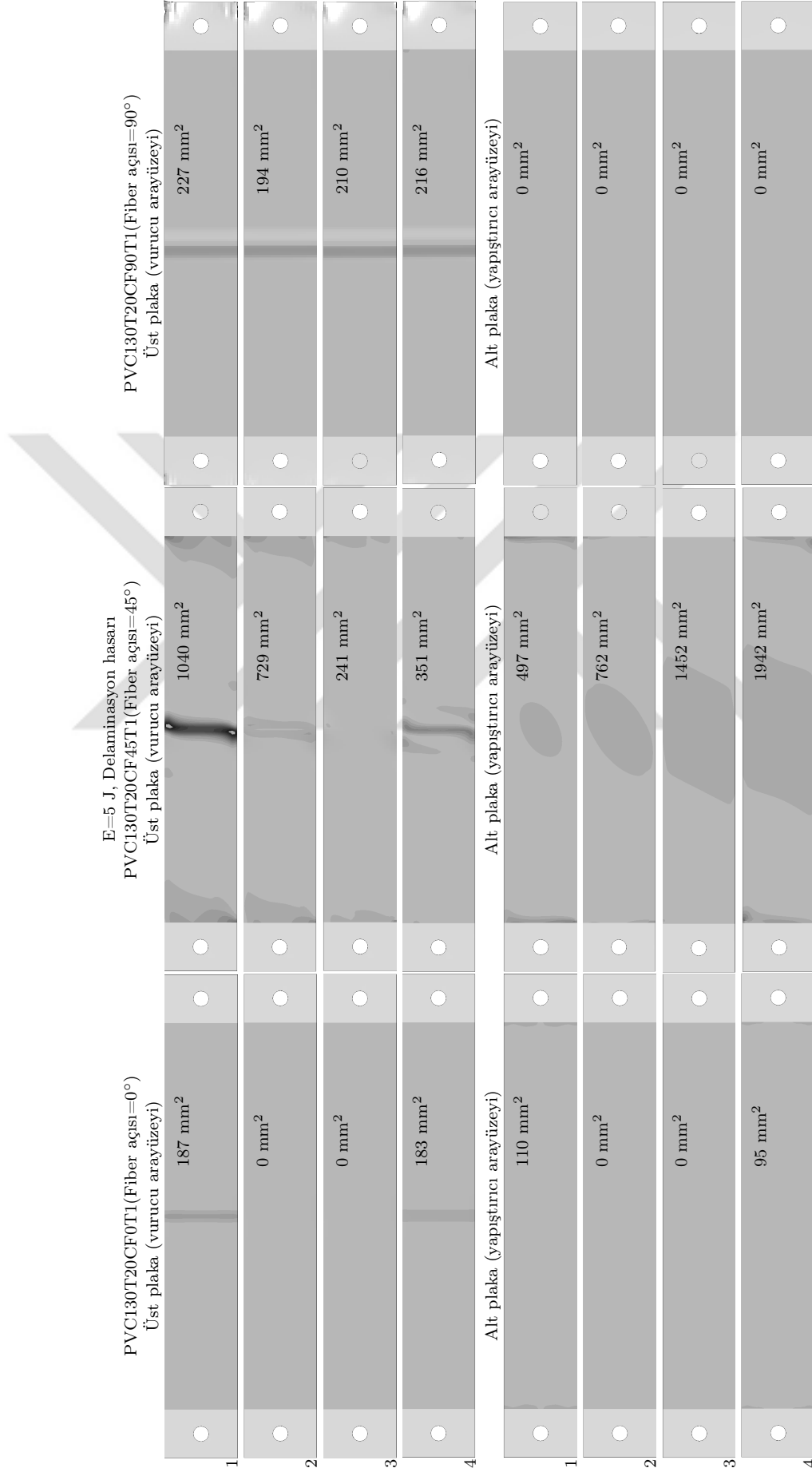
Şekil 5.9'da 5 J darbe enerjisinde sandviç kirişlerin fiber açısı değişiminin delaminasyon hasar gelişimine etkisine irdelenmiştir. 0° fiber açılı kirişte meydana gelen en büyük delaminasyon hasar alanı 187 mm^2 ile üst plakanın 1. katmanındadır. Fiber açısı 45° olan kirişte en büyük delaminasyon hasar alanı 1942 mm^2 ile alt plakanın 4. katmanında, iken 90° fiber açılı kirişte ise 227 mm^2 ile üst plakanın 1. katmanında ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.7. 5 J darbe enerjisinde fiber açısı 0°, 45° ve 90° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında fiber çekme hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları.



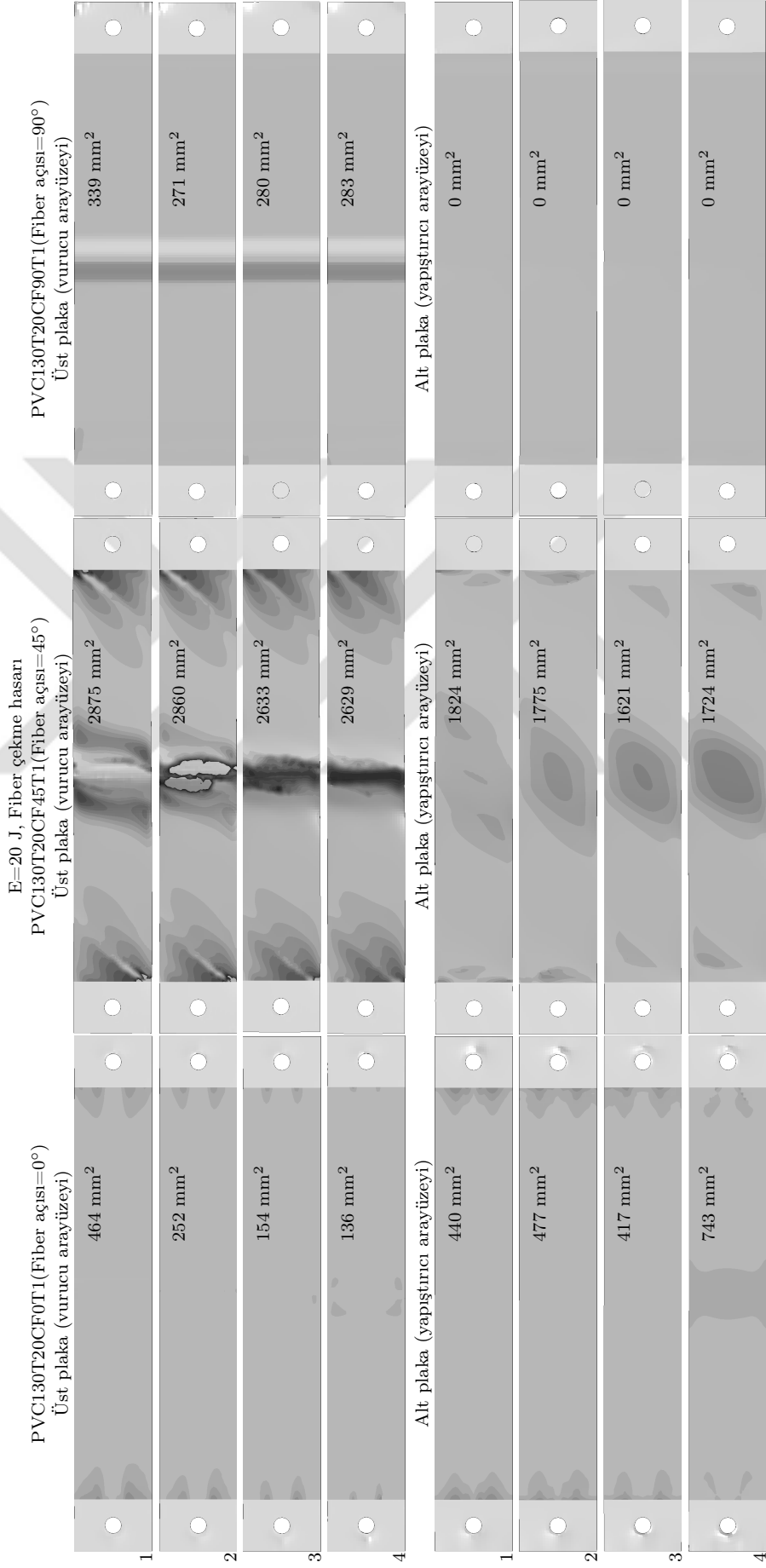
Şekil 5.8. 5 J darbe enerjisinde fiber açısı 0°, 45° ve 90° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında matris çekme hasarı kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları.



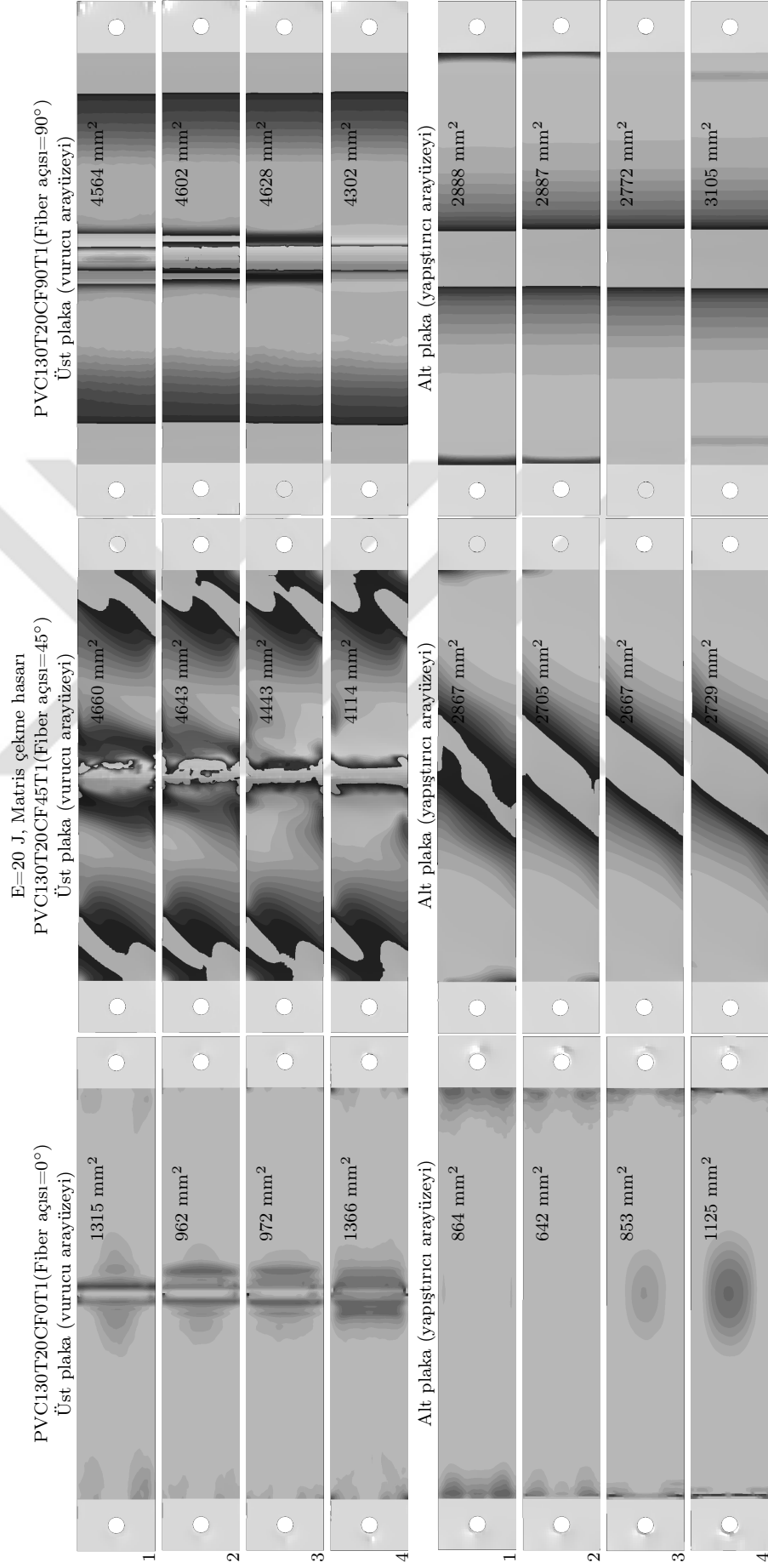
Şekil 5.9. 5 J darbe enerjisinde fiber açısı 0°, 45° ve 90° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında delaminasyon hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları.

Şekil 5.10 20 J'lük darbe enerjisinde farklı fiber açılı kompozit sandviç kirişlerin plakalarında fiber çekme hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgelerini ve alanlarını göstermektedir. 90° fiber açılı kirişte matris hasarı aniden oluşup kiriş plakasının matristen kırıldığı için fiber çekme hasarı oluşmamıştır. 0° fiber açılı kompozit kirişte fiberin çekme altında en büyük hasar alanı 743 mm² ile alt plakanın 4. katmanında meydana gelmiştir. 45° fiber açılı sandviç kirişte en büyük hasar alanı üst plakada 2875 mm² ile 1. katmanda meydana gelmiştir. 90° fiber açısına sahip kirişte ise en büyük hasar alanı 339 mm² ile üst plakanın 1. katmanında meydana gelmiştir. Şekil 5.11'de 5 J darbe enerjisinde 0°, 45° ve 90° fiber açılı karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında matris çekme hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları gösterilmiştir. 0° fiber açısına sahip kompozit sandviç kirişin dış plakalarında en büyük matris çekme hasarı 1366 mm² ile üst plakanın 4. katmanında meydana gelmiştir. Fiber açısı 0°'den 90°'ye arttıkça hasar alanları artmaktadır. 45° fiber açısına sahip kirişteki en büyük matris çekme hasar alanı 4660 mm² ile üst plakanın 1. katmanında, 90° fiber açılı kirişte ise 4628 mm² ile üst plakanın 3. katmanında meydana gelmiştir.

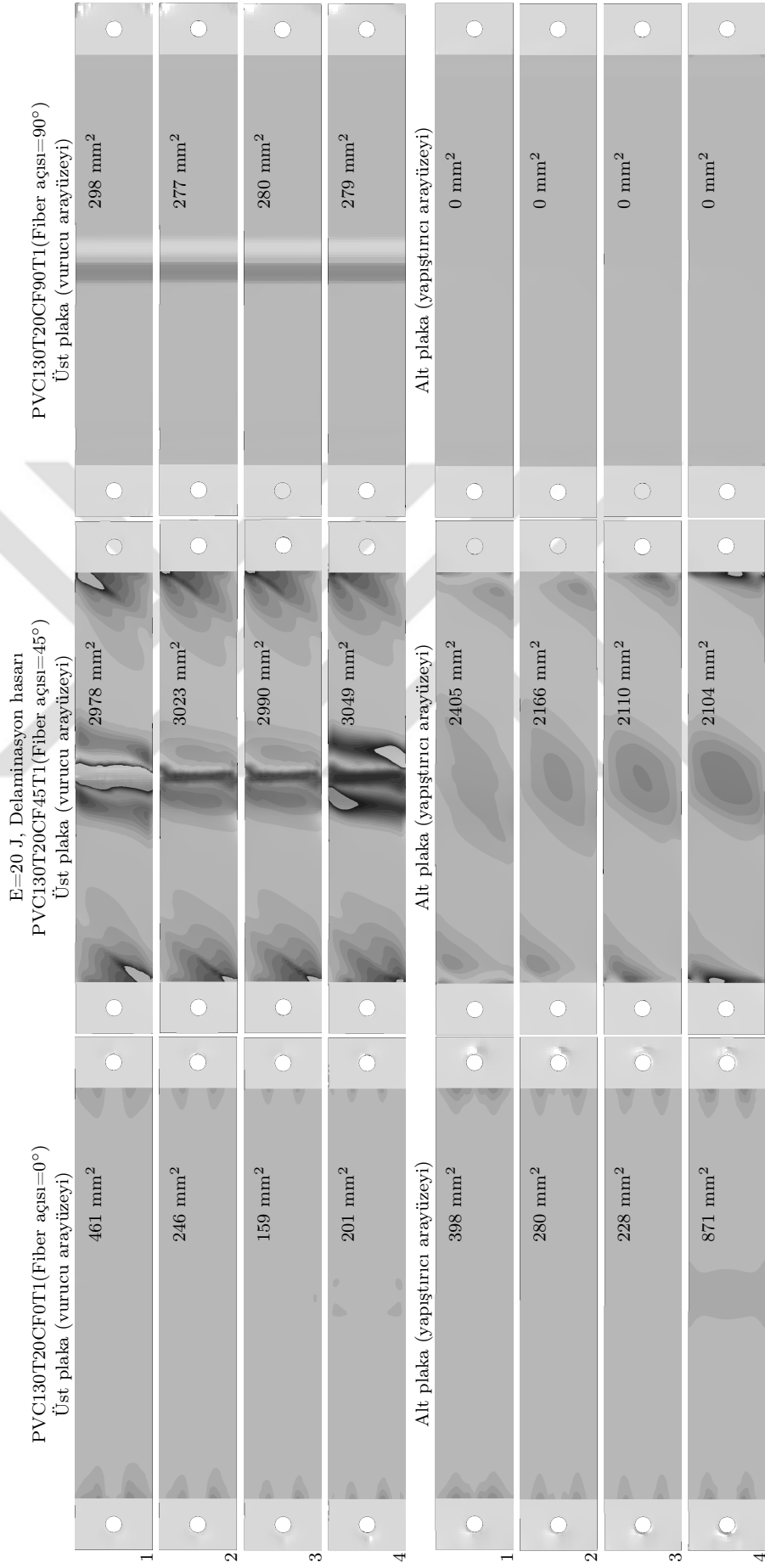
Şekil 5.12'de 20 J darbe enerjisinde dış plakaları 0°, 45° ve 90° olmak üzere üç farklı fiber açısına sahip kompozit sandviç kirişlerin delaminasyon hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları gösterilmektedir. En büyük delaminasyon hasar alanları, dış plakası 45° fiber açısına sahip kirişin üst plakasında meydana gelmiştir. 0° fiber açısına sahip kirişteki en büyük delaminasyon alanı 871 mm² ile alt plakanın 4. katmanında, dış plakası 45° fiber açısına sahip kirişte ise en büyük delaminasyon hasar alanı 3049 mm² ile üst plakanın 4. katmanında, ve 90° fiber açılı kirişte ise 298 mm² ile üst plakanın 1. katmanında meydana gelmiştir. Alt plakada delaminasyon hasarı ortaya çıkmamıştır. 90° fiber açılı kirişlerde yükü tamamen matris malzemesi taşımaktadır. Pim civarlarında hasar en fazla 45° fiber açılı kirişlerde oluşmuştur.



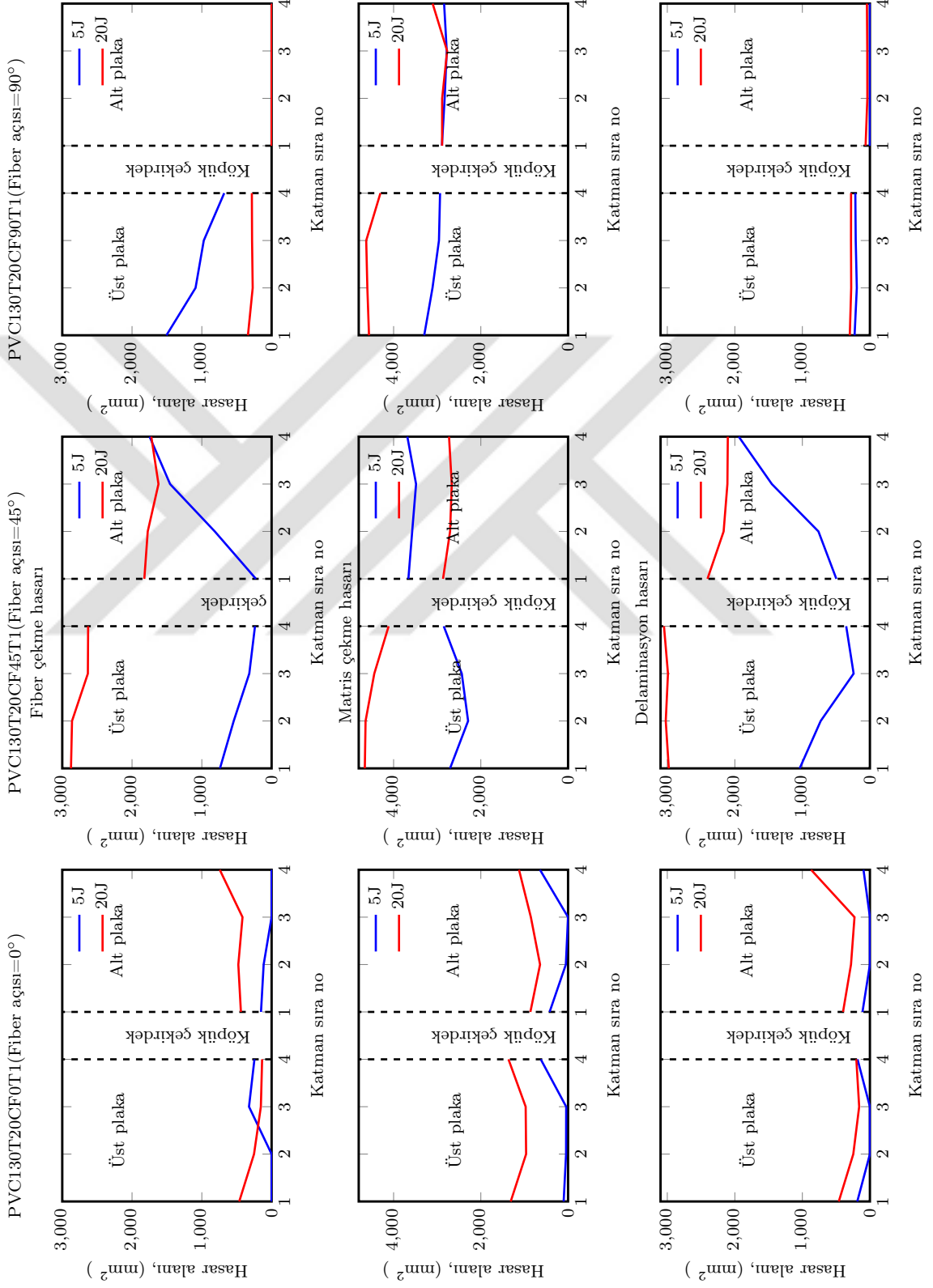
Şekil 5.10. 20 J darbe enerjisinde 0°, 45° ve 90° fiber açılı karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında fiber çekme hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları.



Şekil 5.11. 20 J darbe enerjisinde 0°, 45° ve 90° fiber açılı karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında matris çekme hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları.



Şekil 5.12. 20 J darbe enerjisinde 0°, 45° ve 90° fiber açılı karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirışlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında delaminasyon hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları.

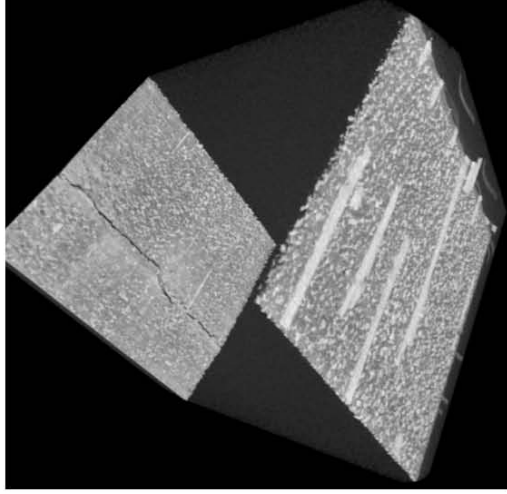
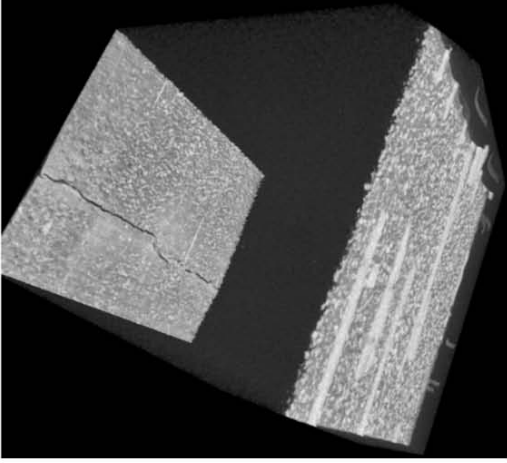


Şekil 5.13. 5 ve 20 J darbe enerjilerinde 0°, 45° ve 90° fiber açılı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası fiber çekme, matris çekme ve delaminasyon hasar kriterine göre belirlenen hasar alanlarının kalınlık boyunca değişimi.

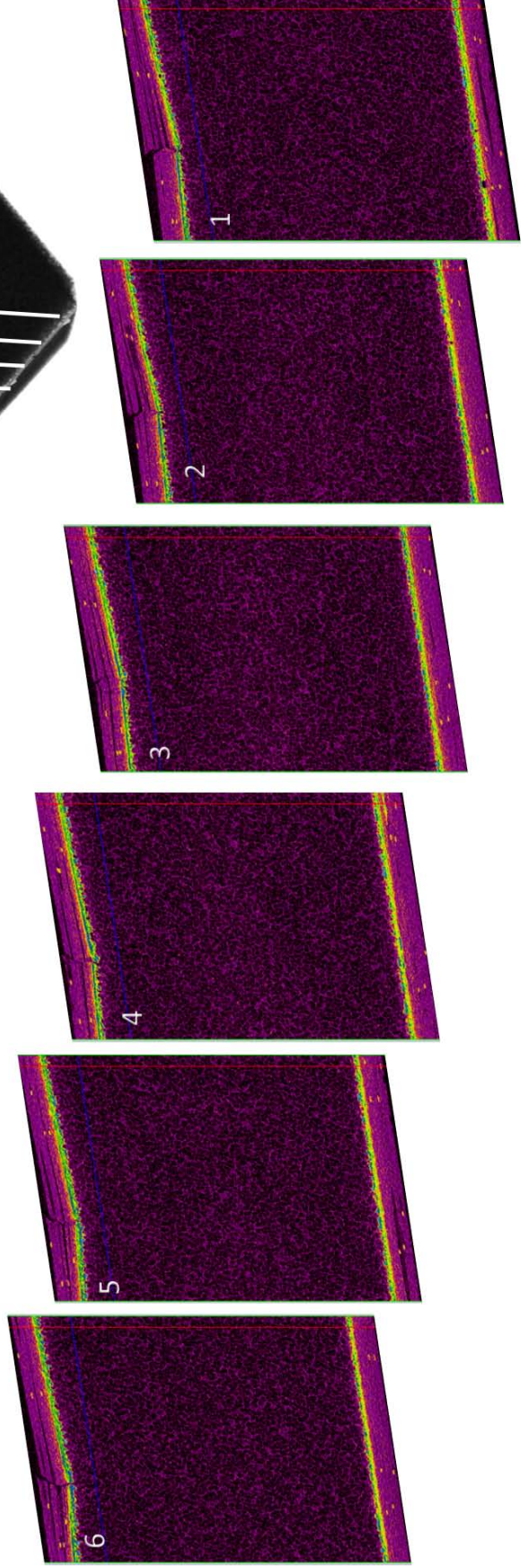
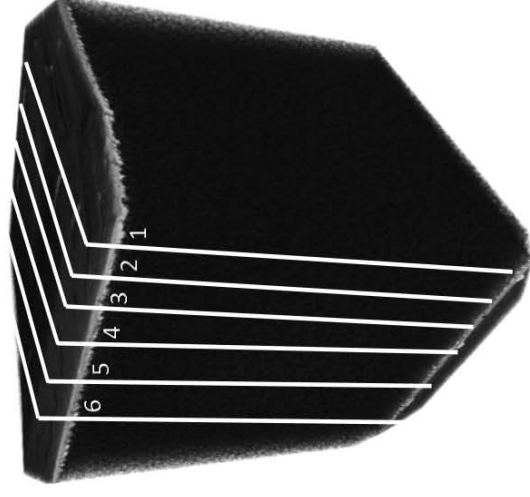
Şekil 5.13'de 5 ve 20 J'lük darbe enerjilerinde dış plakaları 0° , 45° ve 90° fiber açılı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası fiber çekme, matris çekme ve delaminasyon hasarı kriterlerine göre belirlenmiş hasar alanlarının kalınlık boyunca değişimi gösterilmiştir. Plaka fiber açısının değişimi ile hasar alanlarının oldukça etkilendiği açıktır. Fiber açısı 90° olan kirişlerde delaminasyon hasarı hemen hemen görülmüştür. En fazla hasar alanlarının çekme altında matris malzemesinde ortaya çıktığı görülmüştür. Hasar mekanizmasını kontrol eden en önemli parametre fiber açısıdır. Şekil 5.14 dış plakaları farklı fiber açılara sahip kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası yapıştırıcı katmanlarında 5 ve 20 J darbe enerjilerinde oluşan hasar bölgelerini göstermektedir. 5 J darbe enerjisinde tüm kirişlerin üst katmanında hasar meydana gelmemiştir. 0° fiber açısına sahip kirişin alt yapıştırıcı katmanında hasar meydana gelmez iken diğer fiber açılı kirişlerin alt yapıştırıcı tabakalarında hasar oluşmuştur. 20 J'lük darbe enerjisinde 0° fiber açılı kirişin alt ve üst plakalarında hasar meydana gelmemiştir. Diğer fiber açılı kirişlerde ise hasarlar belirgin bir şekilde gözükmemektedir. Üst plakalarda daha geniş hasar alanları ve alt plakada daha az hasar alanları oluşmuştur. 90° fiber açısına sahip kirişin alt ve üst yapıştırıcı tabakalarının pim civarı bölgelerinde de hasarlar meydana gelmiştir. Sayısal hasar alanları deneysel hasar gelişimine kısmi benzerlik göstermektedir. Köpük malzemesi deneylerde daha rijit davranmıştır ve kompozit malzeme matris malzemesinden hemen kırıldığı için köpük malzemesi yük taşıyamamıştır. Analizlerde ise kompozit malzemenin hasara uğrayıp elemanlar modelden çıkarılınca köpük malzemesi üst bölgelerden hasara uğramaya başlamış ve alt bölgede çekme gerilmeleri arttıkça alt bölgelerde de hasarlar meydana gelmiştir.

Kompozit sandviç kirişlerin dış plakalarının fiber açısının değişiminin düşük hızlı eğilme darbe davranışları ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır. Sandviç kirişlerin darbe davranışını etkileyen en önemli etmenlerden birisi kompozit sandviç kirişlerin dış plakalarının fiber açısıdır. Fiber açısı 0° olan kirişler 90° olan kirişlere göre yaklaşık dört kat daha fazla yük taşımaktadır. Fiber açısı 45° olan kirişlerde ise en fazla hasar alanları oluşmuştur.

Alt ve üst yapıstırıcı tabakaları

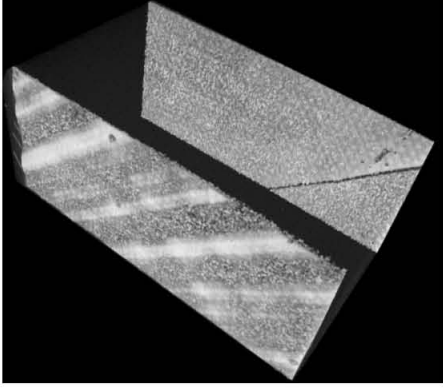
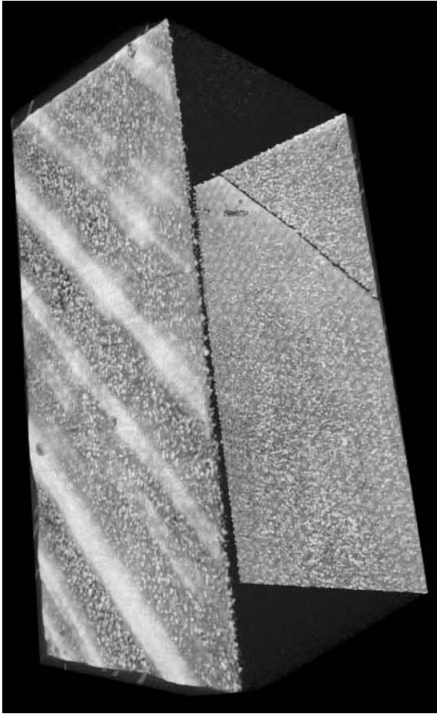


Sandviç kirişin orta bölgesi ve kesit sırası

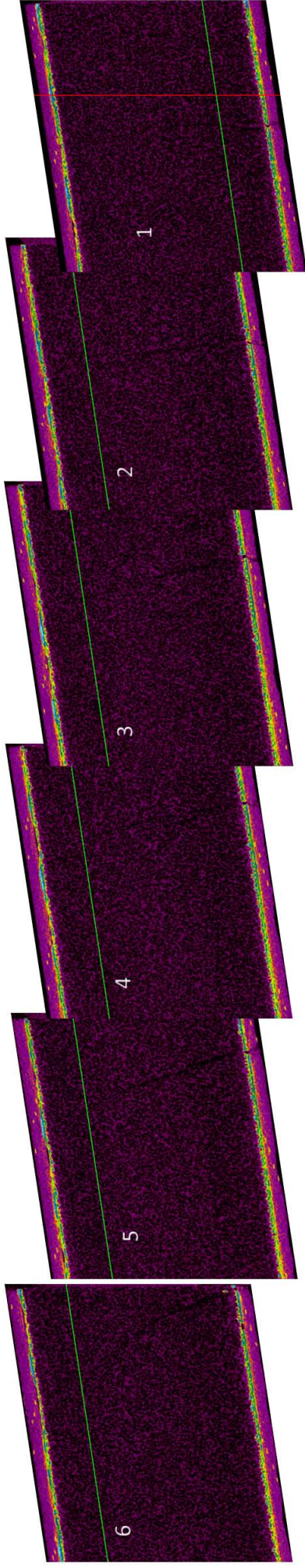
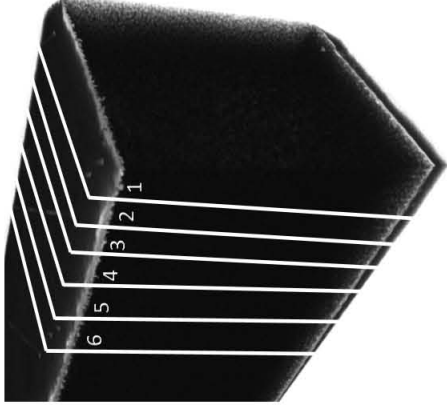


Şekil 5.15. Fiber açısı 0° olan karbon fiber takiyeli kompozit sandviç kirişin 20 J darbe enerjisinde darbe sonrası Mikro-Ct analizi, yapıstırıcı tabakaların ve orta bölgede kesitlerin görüntüleri.

Alt ve üst yapıştırıcı tabakaları

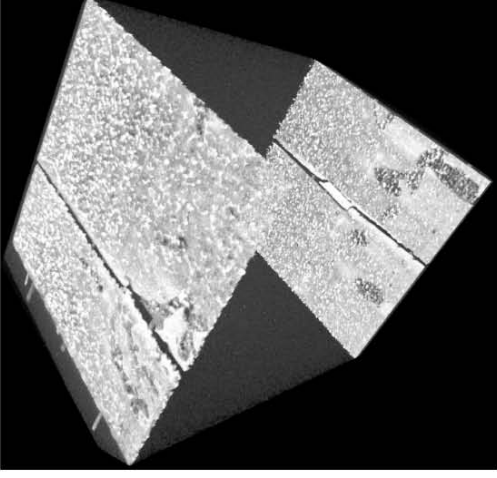
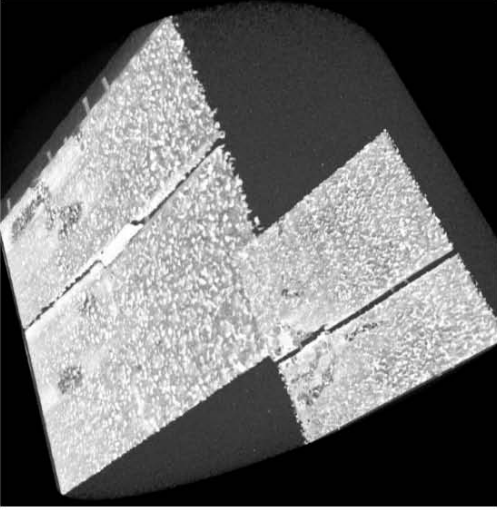


Sandviç kirişin orta bölgesi ve kesit sırası

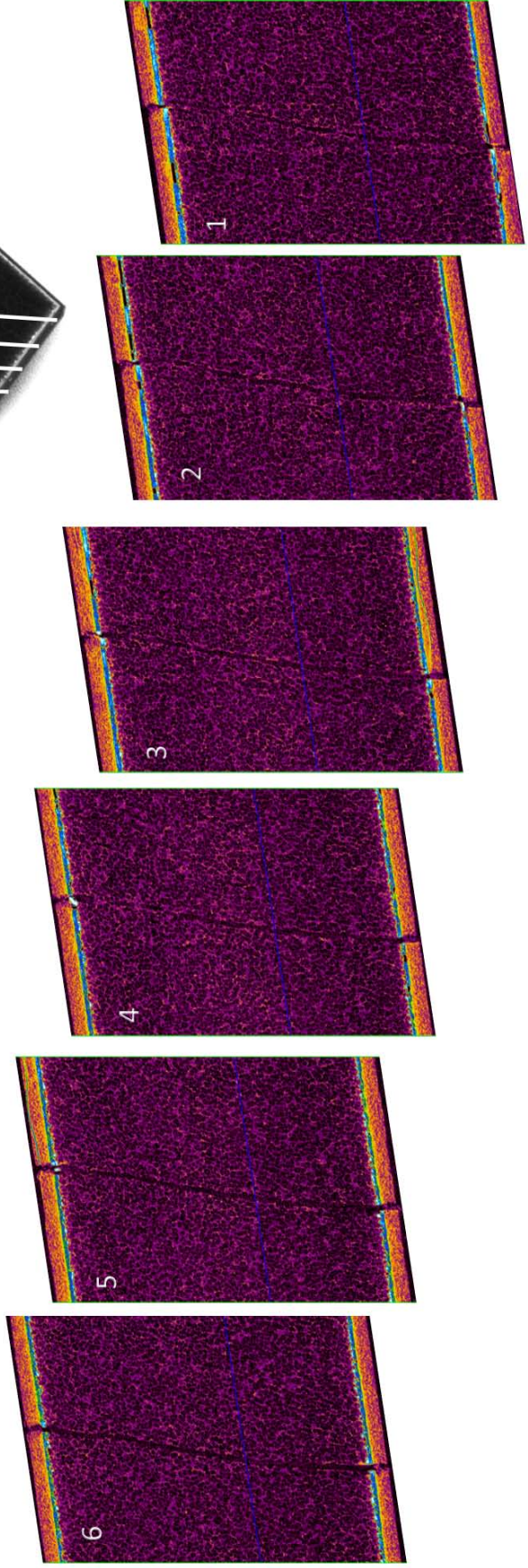
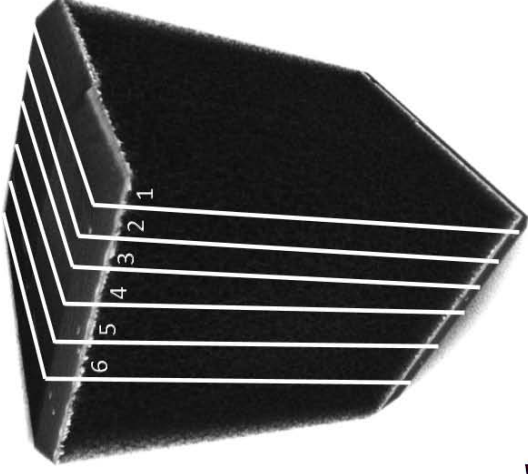


Şekil 5.16. Fiber açısı 45° olan karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişin 20 J darbe enerjisinde darbe sonrası Mikro-Ct analizi, yapıştırıcı tabakaların ve orta bölgede kesitlerin görüntüleri.

Alt ve üst yapıştırıcı tabakaları



Sandviç kirişin orta bölgesi ve kesit sırası



Şekil 5.17. Fiber açısı 90° olan karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişin 20 J darbe enerjisinde darbe sonrası Mikro-Ct analizi, yapıştırıcı tabakaların ve orta bölgede kesitlerin görüntüleri.

Şekil 5.15, 5.16 ve 5.17'de 0° , 45° ve 90° fiber açılı karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 20 J'lük darbe enerjisi altında darbe sonrası Mikro-Ct analizleri, yapıştırıcı tabakaları ve kesit görüntüleri verilmiştir. 0° fiber açısına sahip kompozit kirişlerin üst plakalarında fiberlerin kırıldığı ve ayrılmaların olduğu görülmektedir. Alt plakada ve köpük malzemesinde kırılmalar ve hasar olmamıştır (Şekil 5.15). Hasar gelişimi ön kesitten arka kesite doğru farklılık göstermiştir. Yapıştırıcı katmanları incelendiğinde, üst yapıştırıcı katmanı darbe eksenini boyunca kırılmış ve hasara uğramıştır. Fiber açısı 45° olan sandviç kirişlerde hasar mekanizması tamamen değişmiştir (Şekil 5.16). Üst plakada hasar oluşmazken, alt plakada fiber doğrultusunda kırılmıştır. Alt kompozit plaka matris malzemesinden kırılmıştır. Hasar, yapıştırıcı tabakası ve köpük malzemesine doğru ilerlemiştir. Bu durum yapıştırıcı tabakasında daha açık görülmektedir. Alt yapıştırıcı tabakasında hasar, fiber doğrultusunda kırılmış ve hasar oluşmuştur. Üst yapıştırıcı tabakasında ise hasar oluşmamıştır. Fiber açısı 90° olan sandviç kirişin hasar görüntüleri incelendiğinde, sandviç kirişlerin kırıldığı görülmektedir (Şekil 5.17). Kesit görüntülerinde, fiber doğrultusunda kompozit plakaların kırıldığı, yapıştırıcı tabakası ve köpük malzemesinin kırıldığı görülmektedir. Kompozit plakalar matris malzesinden hasara uğramıştır. Yapıştırıcı tabakası incelendiğinde alt ve üst yapıştırıcı tabakalarının kırıldığı ve hasara uğradığı anlaşılmaktadır.

6. BÖLÜM

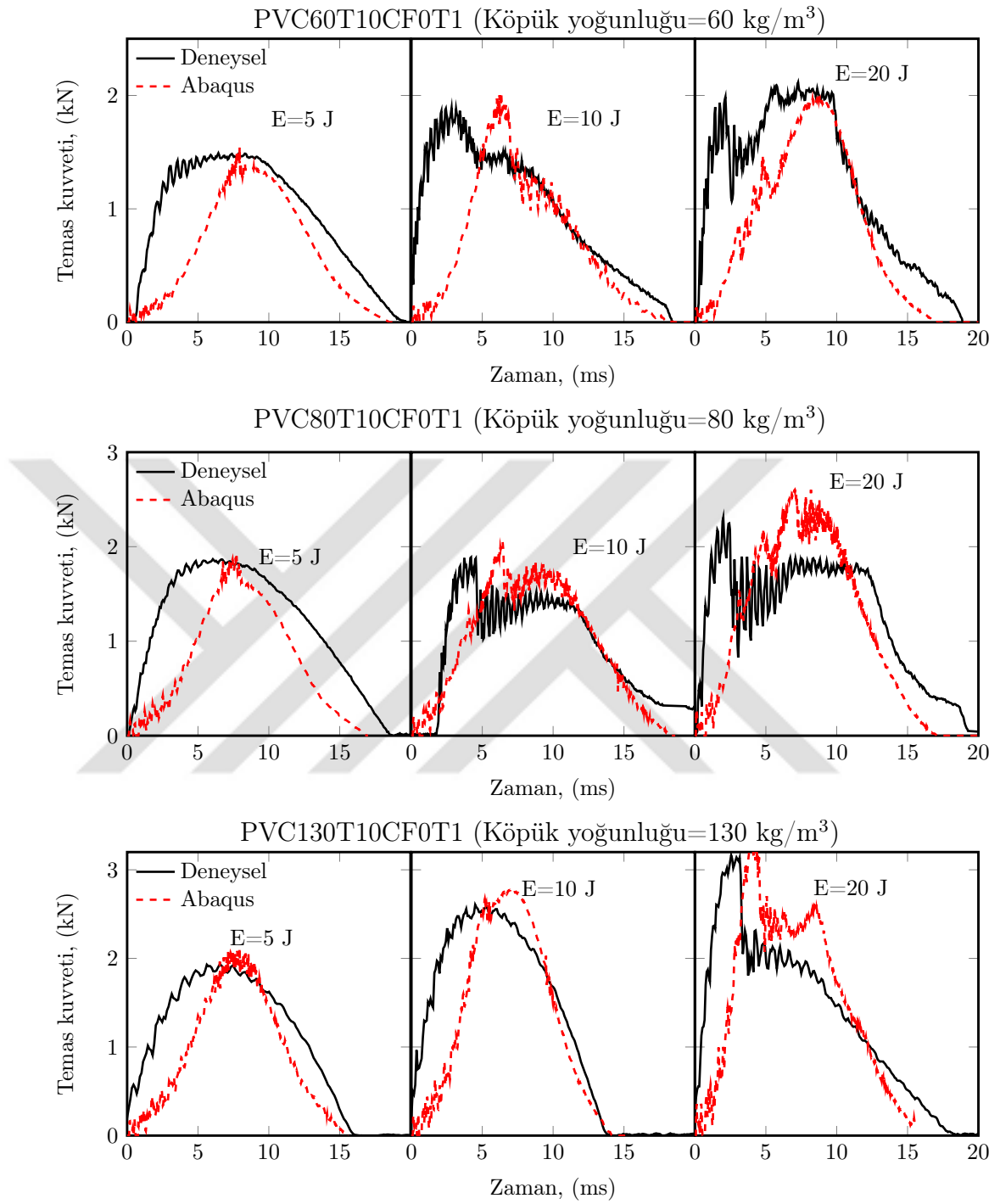
ÇEKİRDEK MALZEMESİNİN ETKİSİ

6.1. Giriş

Kompozit sandviç kirişlerin darbe davranışını etkileyen önemli parametrelerden bir diğeri çekirdek malzemenin boyutları, mekanik ve fiziksel özellikleridir. Darbe enerjisinin en iyi şekilde sönmülenebilmesi için çekirdek malzemesinin belirtilen özelliklerinin en iyileştirilebilmesi için çalışmalar yapılmıştır. Bu bölümde kompozit sandviç kirişlerin köpük malzemelerinin yoğunluk ve kalınlık değişimlerinin düşük hızlı darbe davranışına etkisi deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. 60, 80 ve 130 kg/m³ olarak üç farklı köpük yoğunluğunda, 10 ve 20 mm olarak köpük kalınlığında ve 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde temas kuvveti-zaman değişimleri, kinetik enerji-zaman değişimleri, temas kuvveti-yer değiştirme değişimleri, darbe sonrası hasar görüntüleri ve kompozit tabakalarda meydana gelen fiber ve matrisin çekme altında ve tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) hasarları ayrıntılı irdelenmiştir. Köpük yoğunlukları değiştirilen sandviç kirişlerin dış plakaları tek yönlü, fiber açısı 0° olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemeden imal edilmiştir.

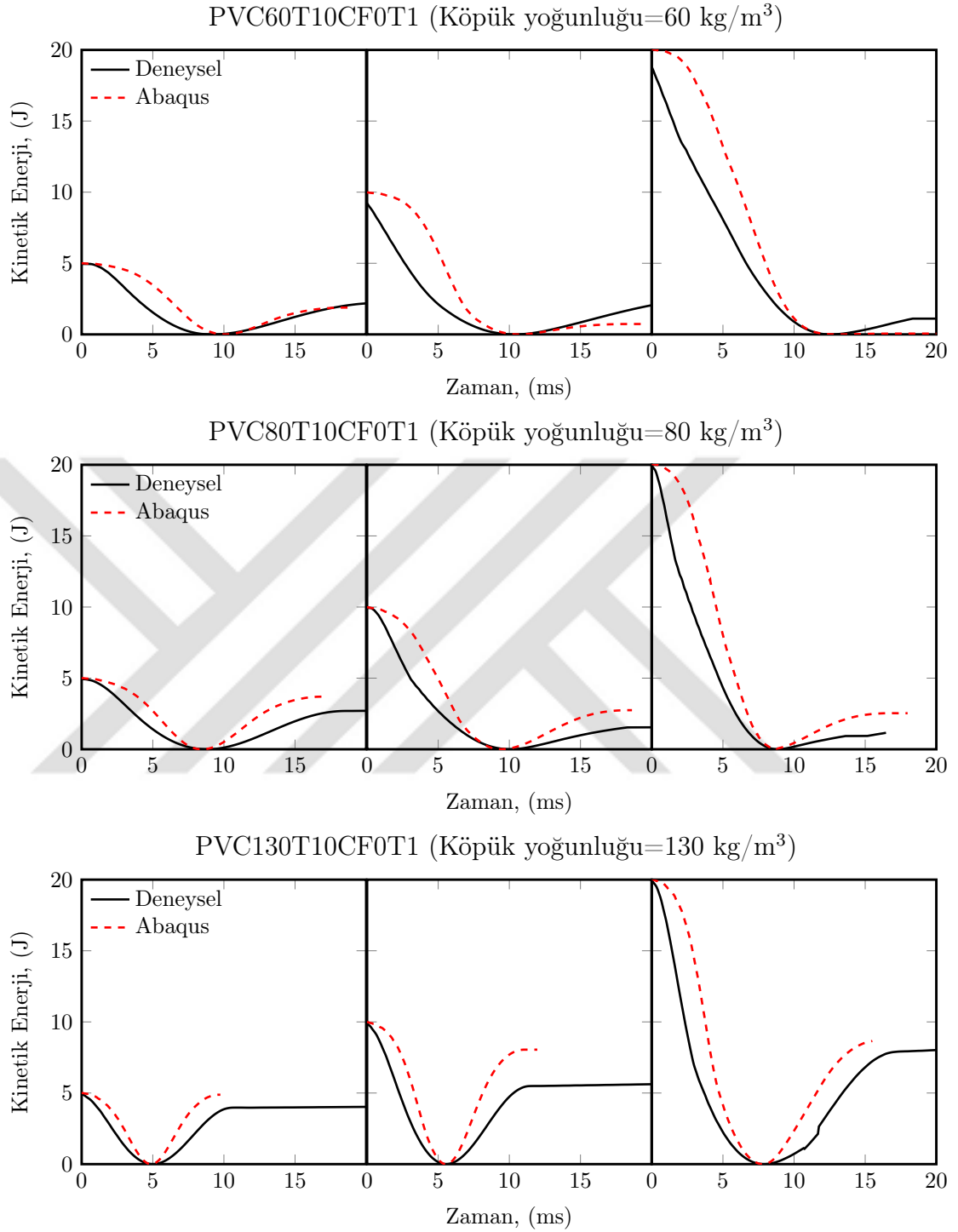
6.2. Köpük Yoğunluğu Etkisi

Şekil 6.1 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m³ olan kompozit sandviç kirişlerin sayısal ve deneysel temas kuvveti-zaman değişimlerini göstermektedir. Köpük yoğunluğu 60 kg/m³ olan sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjileri altında deneysel en büyük temas kuvvetleri sırası ile 1.4, 1.8 ve 2.1 kN ve temas süreleri 19.7, 18.5 ve 18.8 ms ölçülmüştür.



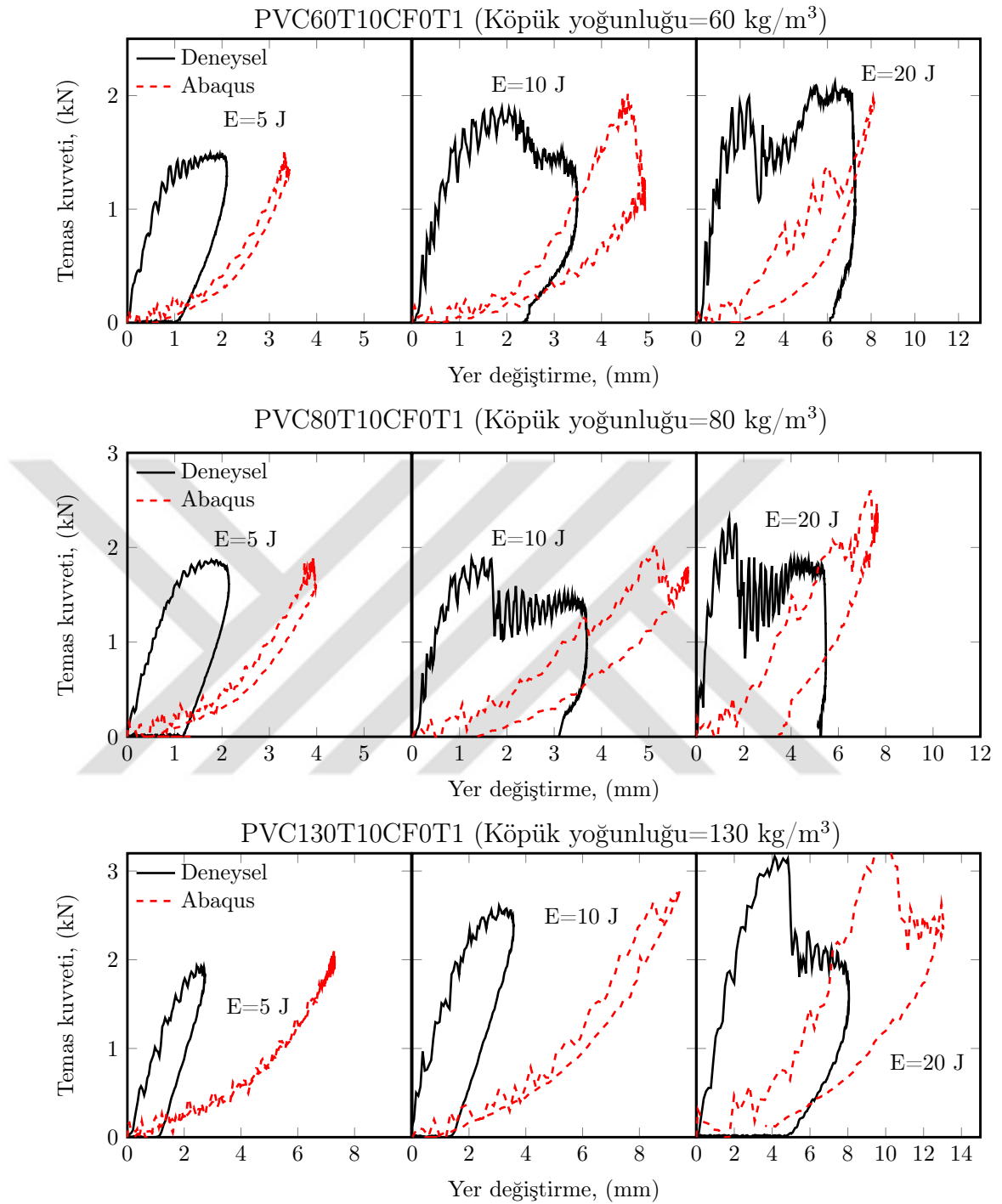
Şekil 6.1. 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m³ olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin deneysel ve sayısal temas kuvveti-zaman değişimleri.

Darbe enerjisinin 5 J'den 20 J'e artması ile en büyük temas kuvvetleri yaklaşık %20 oranında artmaktadır, ancak temas süreleri yaklaşık aynı kalmaktadır. Aynı darbe enerjinde için en büyük sayısal temas kuvvetleri sırası ile 1.5, 2.0 ve 2.1 kN ve temas süreleri ise 18.5, 18.5 ve 17.1 ms hesaplanmıştır.



Şekil 6.2. 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m³ olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin sayısal ve deneysel kinetik enerji-zaman değişimleri.

Sayısal ve deneysel en büyük temas kuvvetleri ve temas süreleri benzerdir. Temas kuvveti-zaman eğrilerinin genel davranışı dikkate alındığında sayısal ve deneysel sonuçlar arasında farklılıklar bulunmamaktadır.



Şekil 6.3. 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m³ olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin sayısal ve deneysel temas kuvveti-yer değiştirme değişimleri.

Köpük yoğunluğu 80 kg/m³ olan kirişlerin çalışmada kullanılan üç farklı enerji seviyesi için deneysel en büyük temas kuvvetleri sırası ile 1.8, 1.8 ve 2.3 kN ve temas süreleri ise 18.8, 21.1 ve 21.3 ms ölçülmüştür. 5 J'den büyük darbe enerjisinde fiberlerde kırılmalar olduğu için en büyük temas kuvvetleri ve temas süreleri aynı

seviyede kalmıştır. Sayısal en büyük temas kuvvetleri sırası ile 1.8, 2.0, 2.6 kN ve temas süreleri ise 16.0, 18.3 ve 16.3 ms hesaplanmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasında uyum olduğu görülmektedir. Deneysel kuvvetlerdeki ani düşüşler sayısal kuvvetlerde de görülmüştür. Bu düşüşler kompozit plakalarda oluşan hasarların gelişimine işaret etmektedir. Köpük yoğunluğu 130 kg/m^3 olan kirişlerin üç farklı enerji seviyesi için en büyük deneysel temas kuvvetleri sırası ile 1.9, 2.6 ve 3.1 kN ve temas süreleri 16.4, 14.3 ve 18.3 ms ölçülmüştür. Darbe enerjisinin artması, en büyük temas kuvvetlerini arttırmıştır. Eğrilerden hasarın sadece 20 J darbe enerjisinde için gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Bu enerji seviyesinde sayısal en büyük temas kuvvetleri ise sırası ile 2.1, 2.7 ve 3.4 kN ve temas süreleri 15.4, 14.1 ve 15.1 ms hesaplanmıştır. Sayısal ve deneysel en büyük temas kuvvetleri birbirine yakındır. Köpük yoğunluğunun artması en büyük temas kuvvetlerini arttırmıştır, ancak temas sürelerinde anlamlı bir değişiklik olmamıştır. 10 J darbe enerjisi için 130 kg/m^3 köpük yoğunluklu sandviç kirişin temas kuvveti-zaman eğrilerinde ani düşüşler görülmemiştir.

Şekil 6.2 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde üç farklı köpük yoğunluğu için kompozit sandviç kirişlerin kinetik enerji-zaman değişimlerini göstermektedir. Köpük yoğunluğu 60 kg/m^3 olan sandviç kirişlerin sayısal ve deneysel kinetik enerji değişimleri arasında uyum vardır. 5 J için kiriş aldığı enerjinin hemen hemen yarısını sönmülemiştir. 10 ve 20 J darbe enerjilerinde ise neredeyse aldığı enerjinin tümünü sönmülemiştir, hasara uğramıştır. Köpük yoğunluğu arttığında kirişlerin enerji sönmüleme kabiliyetinin azaldığı görülmektedir. Özellikle köpük yoğunluğu 130 kg/m^3 olan kirişin ancak aldığı enerjinin yarısını sönmüleyebildiği görülmektedir. Yüksek yoğunluklu köpük kirişin diğer elemanlarında belirgin hasarlara neden olmaktadır. İleride ayrıntılı tartışılacaktır.

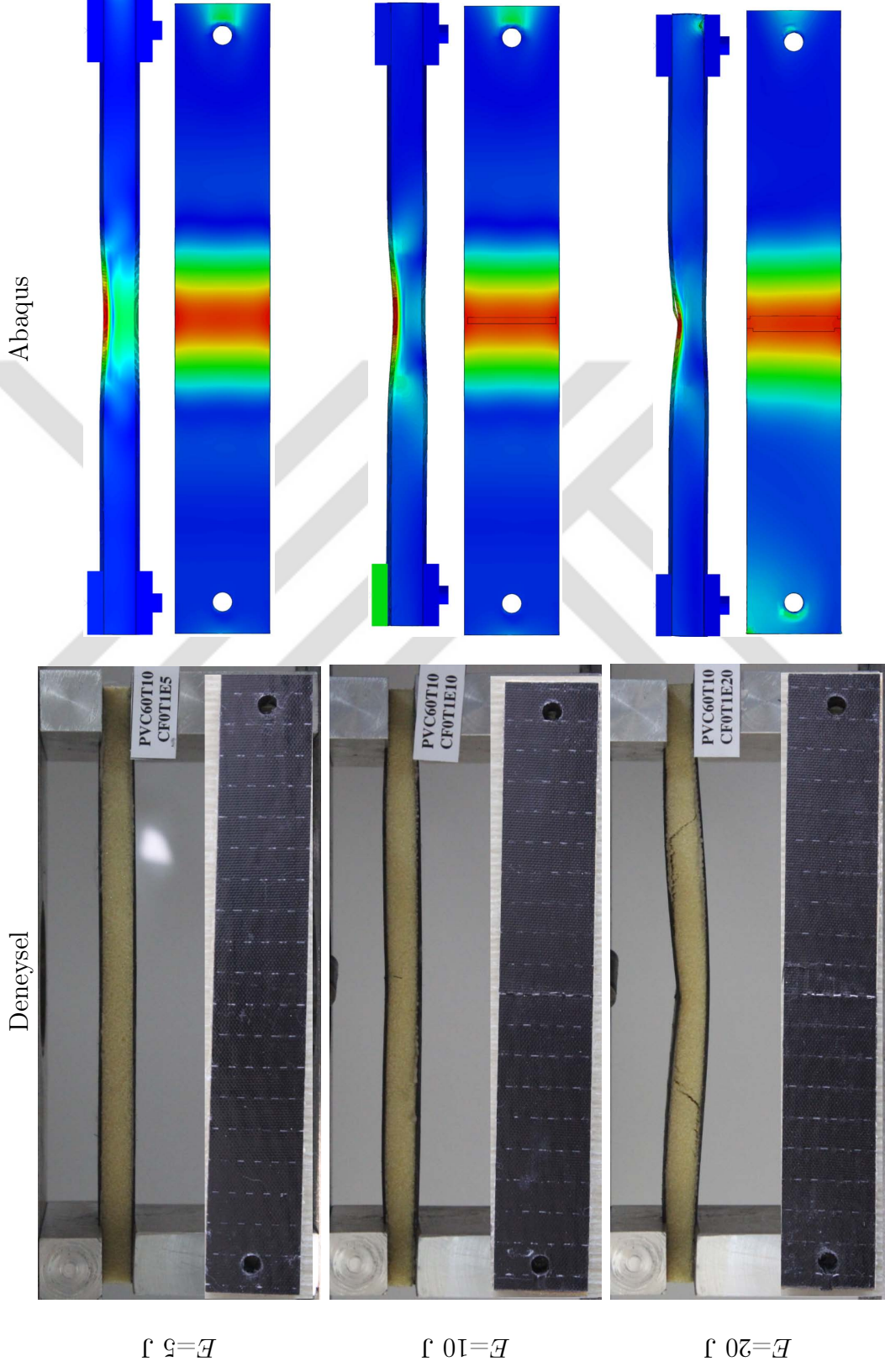
Şekil 6.3'de üç farklı köpük yoğunluğu, üç farklı darbe enerji seviyesi için sayısal ve deneysel temas kuvveti-yer değiştirme değişimleri karşılaştırılmıştır. Sayısal model deneydede daha elastik davranan bir yapı tahmin edebilmektedir. En düşük köpük yoğunluğunda temas kuvveti-yer değiştirme eğrilerinin altındaki alanlar daha belirgin olmaktadır. En yüksek köpük yoğunluğuna sahip kirişlerde ise bu alanlar daralmaktadır. Yapı daha direngen bir davranış sergilemektedir. Köpük

yoğunluğunun azalması kalıcı yer değiştirmelere sebebiyet vermektedir.

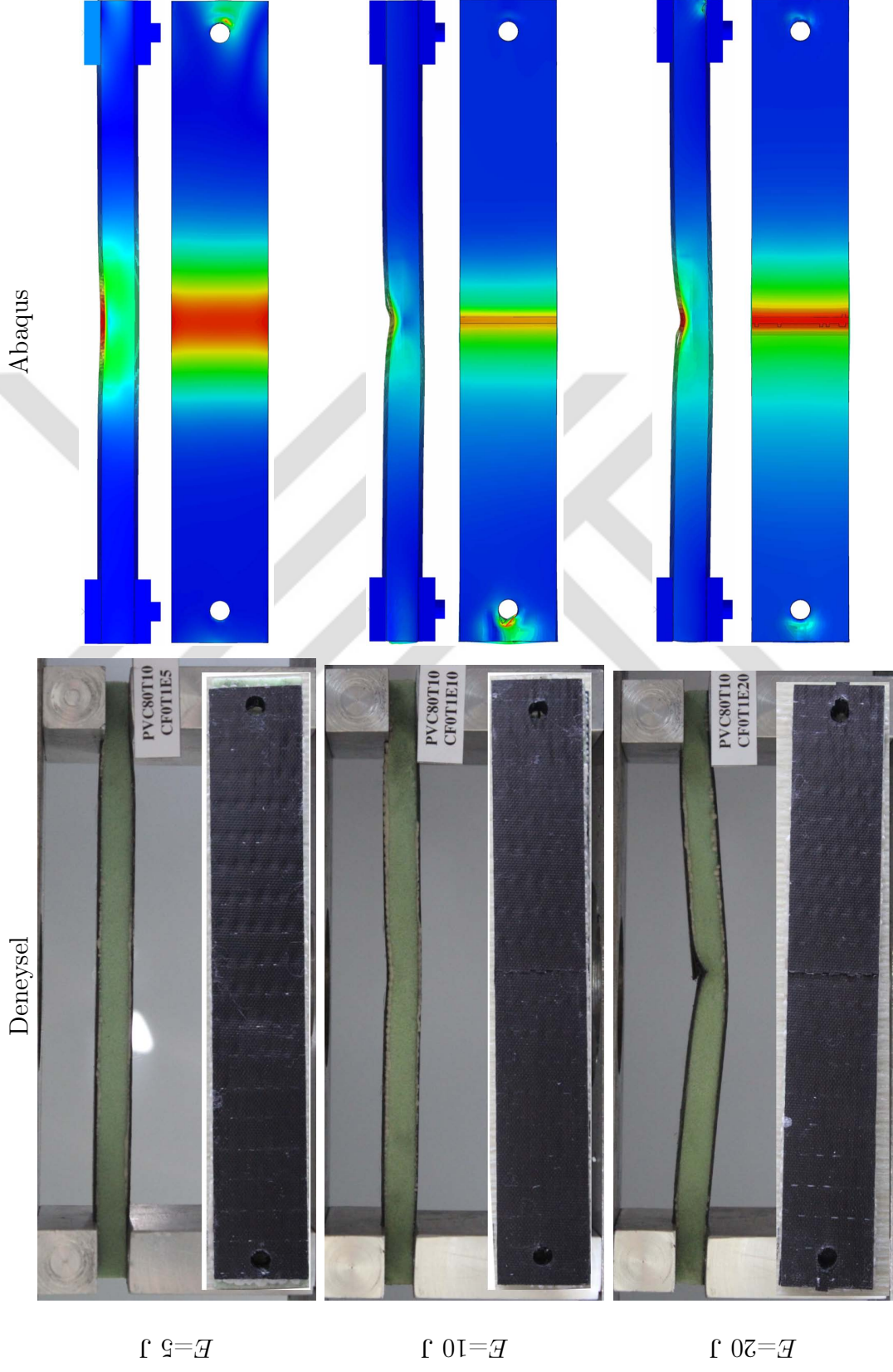
Şekil 6.4'de köpük yoğunluğu 60 kg/m^3 olan sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde sayısal ve deneysel darbe sonrası görüntüleri karşılaştırılmaktadır. 20 J darbe enerjisinde numunenin köpük malzemesinde çatlaklar oluşmuştur. Üst plakalarda kırılmalar olduğu görülmektedir. Sayısal modelde bu kırılmaları doğrulamaktadır. 5 ve 10 J darbe enerjilerinde kalıcı deformasyonlar tam oluşmasa da, 20 J darbe enerjisinde kalıcı deformasyon olduğu görülmektedir.

Şekil 6.5'de kullanılan enerji seviyeleri için çekirdek köpük yopunluğu 80 kg/m^3 olan kirişlerin darbe sonrası sayısal ve deneysel görüntüleri mukayese edilmiştir. 10 ve 20 J darbe enerjilerinde üst plakalarda kırılmalar görülmektedir. 20 J darbe enerjisinde kalıcı hasarlar meydana gelmiştir. Pim bağlantısı civarlarında 10 ve 20 J darbe enerjisi seviyelerinde sayısal ve deneysel görüntülerde belirginleşen hasarlar görülmektedir.

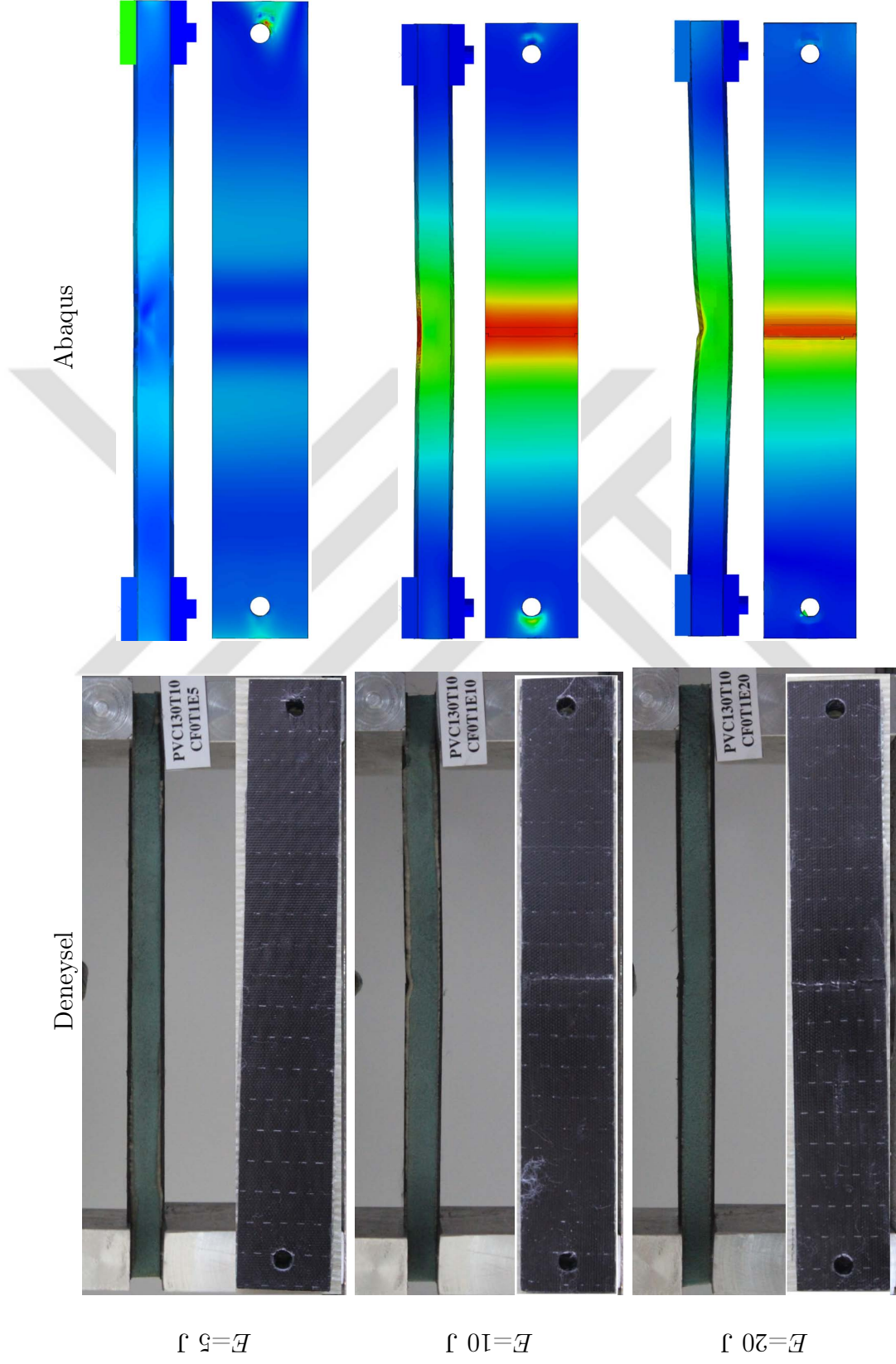
Şekil 6.6'da köpük yoğunluğu 130 kg/m^3 olan kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde darbe sonrası sayısal ve deneysel görüntüleri verilmiştir. Üç enerji seviyesinde içinde kalıcı hasarlar meydana gelmemiştir. 10 ve 20 J darbe enerjilerinde sandviç kirişlerin üst plakalarında kırılmalar oluşurken köpük malzemesinde herhangi bir hasar ortaya çıkmamıştır.



Şekil 6.4. Köpük yoğunluğu 60 kg/m^3 olan fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde deneysel ve sayısal darbe sonrası görüntüleri.



Şekil 6.5. Köpük yoğunluğu 80 kg/m^3 olan fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde deneysel ve sayısal darbe sonrası görüntüleri.

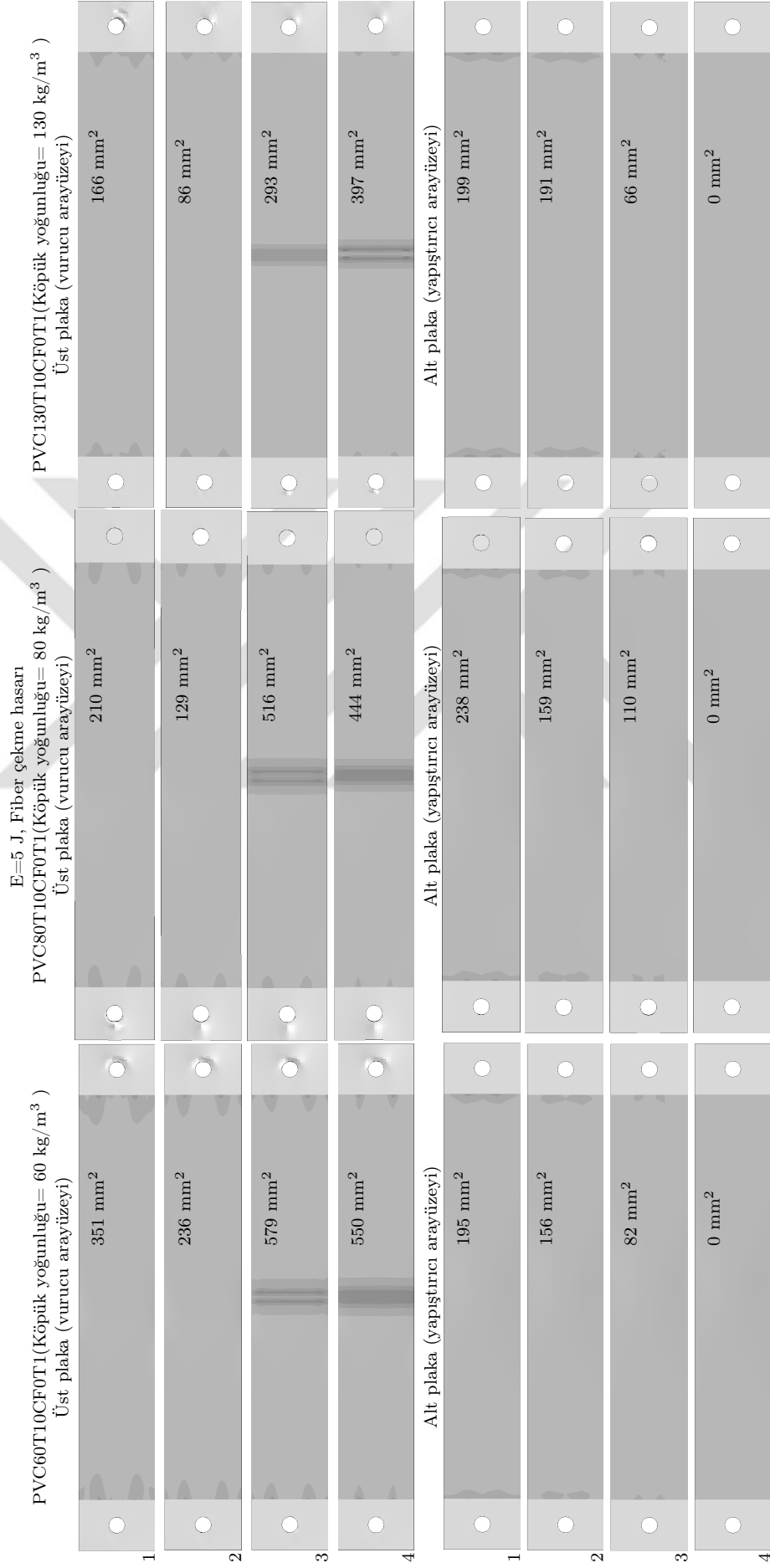


Şekil 6.6. Köpük yoğunluğu 130 kg/m^3 olan fiber takiyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde deneysel ve sayısal darbe sonrası görüntüleri.

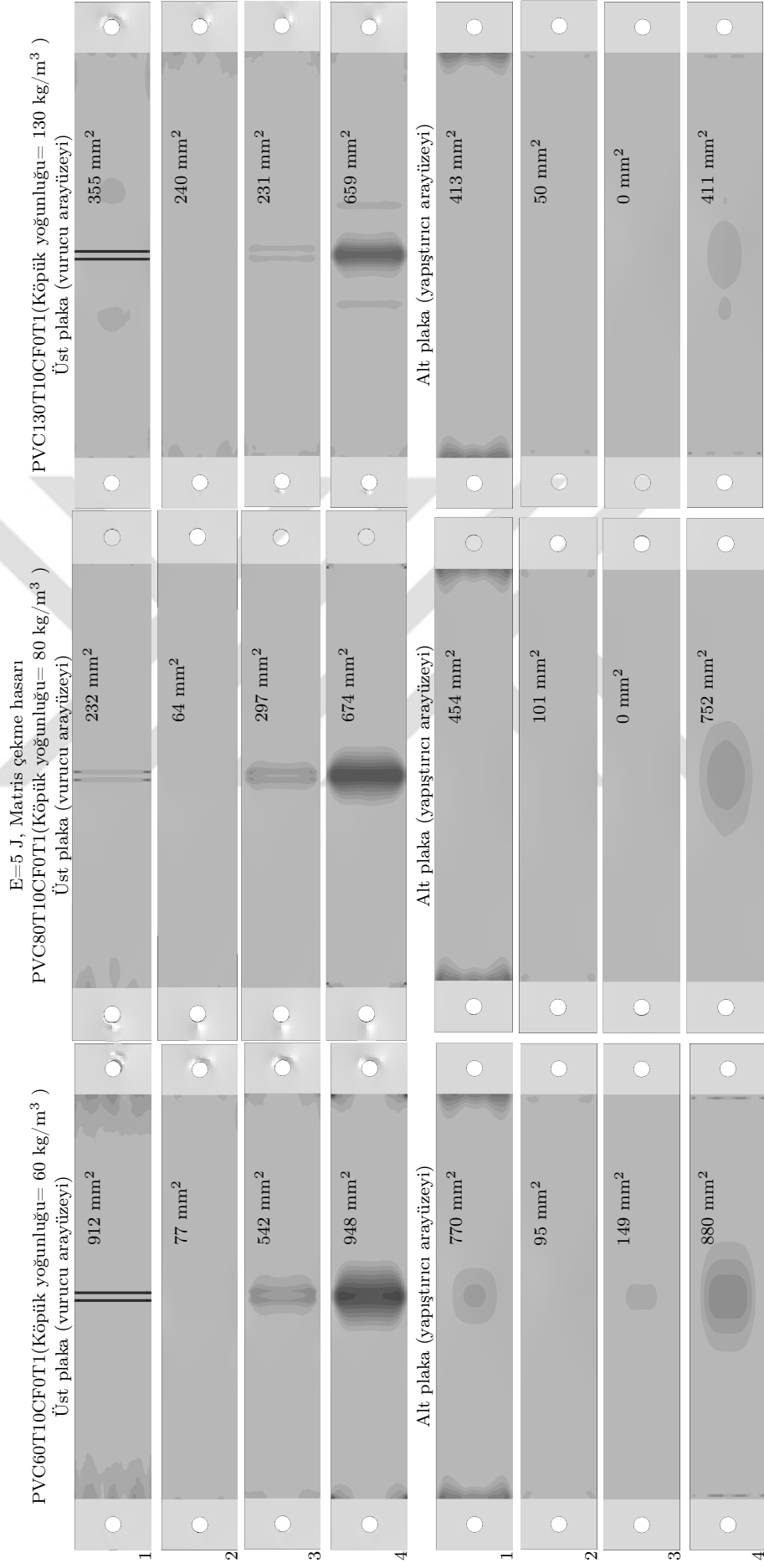
Şekil 6.7’de 5 J darbe enerjisinde köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m³ olan sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında fiber çekme hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları verilmektedir. 5 J darbe enerjisi için köpük yoğunluğu arttıkça fiber çekme hasar alanları daralmaktadır. Üst plakalarda daha geniş hasar alanları meydana gelmiştir. Köpük yoğunluğu 60 kg/m³ olan sandviç kirişin en büyük fiber çekme hasar kriterine göre oluşan hasar alanı 579 mm² ile üst plakanın 3. katmanındadır. Bu tip hasar alanları alt plakanın 4. katmanına doğru azalmaktadır. Köpük yoğunluğu 80 kg/m³ olan kirişte en büyük hasar alanı 516 mm² ile üst plakanın 3. katmanında meydana gelmiştir. 130 kg/m³ yoğunluklu köpük içeren kirişte ise üst plakanın 4. katmanında en büyük fiber çekme hasar alanı 397 mm² ’ye azalmıştır.

Şekil 6.8 5 J darbe enerjisinde farklı köpük yoğunluklarına sahip kompozit sandviç kirişlerin alt ve üst dış kompozit plakalarında çekme altında matris hasar kriterine göre belirlenen hasar alanlarını göstermektedir. Köpük yoğunluğu artışı ile çekme altında matriste oluşan hasar alanları azalmaktadır. En büyük hasar alanları kirişlerin en fazla çekmeye maruz kalan katmanlarında üst ve alt plakanın 4. katmanlarında meydana gelmektedir. Köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m³ olan kirişlerde meydana gelen en büyük hasar alanları sırası ile 948 mm² (üst plaka 4. katman), 752 mm² (alt plaka 4. katman) ve 659 mm² (üst plaka 4. katman) olmaktadır. Üst plakanın katmanlarında çekme altında matris malzemesinde oluşan hasarlar darbeye maruz kalan bölgede fiber çevresinde radyal yönde oluşmaktadır. Alt plakanın katmanlarında ise fiber eksen yönünde fiber çevresinde oluşmaktadır.

Şekil 6.9’de 5 J darbe enerjisinde farklı köpük yoğunluklarına sahip kompozit sandviç kirişlerin alt ve üst dış kompozit plakalarında delaminasyon hasar kriterine göre belirlenen hasar alanlarını göstermektedir. Köpük yoğunluğu arttıkça tabakalar arası ayrılma hasar alanları azalmaktadır. En büyük hasar alanları üst plakaların katmanlarında meydana gelmiştir. Üç farklı köpük yoğunluğuna (60, 80 ve 130 kg/m³) sahip kirişlerde meydana gelen en büyük hasar alanları sırası ile 648 mm² (üst plaka 1. katman), 453 mm² (üst plaka 4. katman) ve 297 mm² (üst plaka 1. katman) hesaplanmıştır.



Şekil 6.7. Köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m³ olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kırışların darbe sonrası kompozit tabakalarında fiber çekme hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları (E=5 J).



Şekil 6.8. Köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m³ olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında matris çekme hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları (E=5 J).

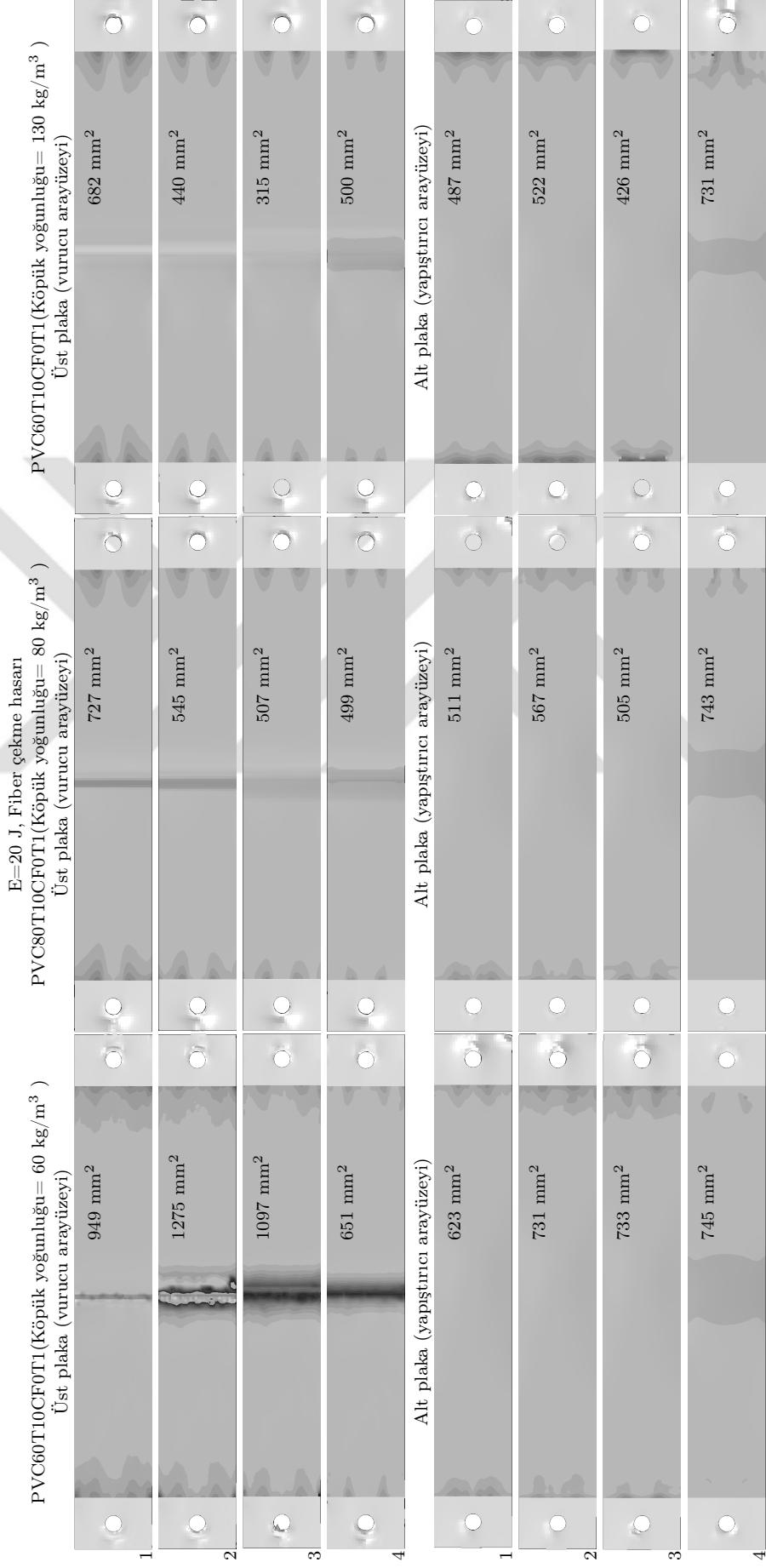
	PVC60T10CF0T1 (Köpük yoğunluğu= 60 kg/m ³) Üst plaka (vurucu arayüzeyi)	E=5 J, Delaminasyon hasarı PVC80T10CF0T1 (Köpük yoğunluğu= 80 kg/m ³) Üst plaka (vurucu arayüzeyi)	PVC130T10CF0T1 (Köpük yoğunluğu= 130 kg/m ³) Üst plaka (vurucu arayüzeyi)
1	648 mm ²	421 mm ²	297 mm ²
2	185 mm ²	122 mm ²	64 mm ²
3	187 mm ²	119 mm ²	54 mm ²
4	566 mm ²	453 mm ²	264 mm ²
	Alt plaka (yapıştırıcı arayüzeyi)	Alt plaka (yapıştırıcı arayüzeyi)	Alt plaka (yapıştırıcı arayüzeyi)
1	169 mm ²	203 mm ²	162 mm ²
2	0 mm ²	0 mm ²	0 mm ²
3	0 mm ²	0 mm ²	0 mm ²
4	118 mm ²	125 mm ²	107 mm ²

Şekil 6.9. Köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m³ olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında delaminasyon hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları (E= 5J).

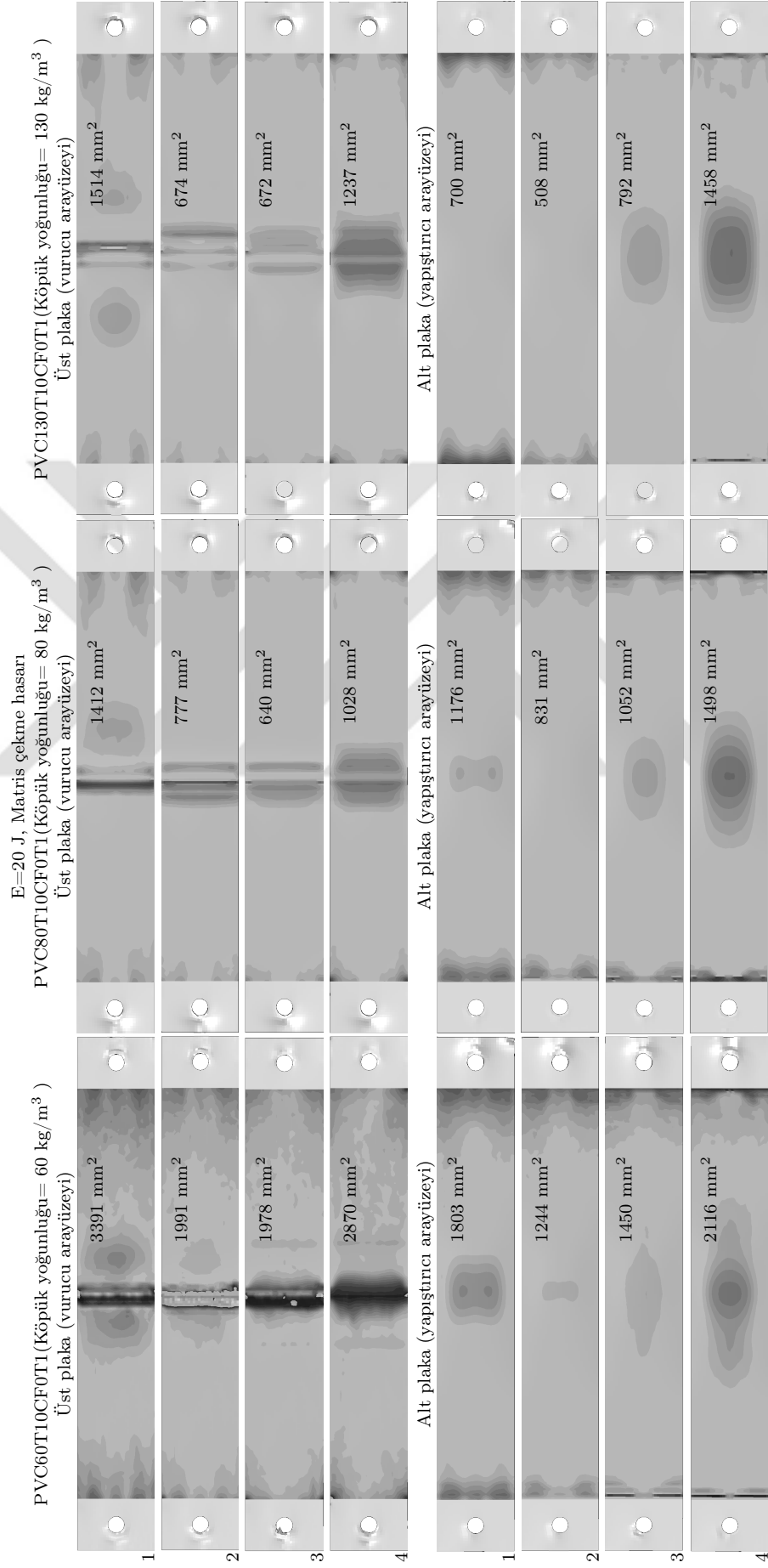
Şekil 6.10 farklı köpük yoğunlukları için 20 J darbe enerjisi altında sandviç kirişin kompozit katmanlarında meydana gelen çekme altındaki fiber hasarına göre belirlenmiş hasar alanlarını göstermektedir. En geniş hasar alanı 60 kg/m³ köpük yoğunluklu sandviç kirişte 1275 mm² ile üst plakanın 2. katmanında ortaya çıkmıştır. Alt plakada hasar alanları pim civarlarında ortaya çıkmıştır. 80 ve 130 kg/m³ köpük yoğunluklarına sahip kirişlerin çekme altında fiberde oluşan hasar alanları benzerdir. Köpük yoğunluğu 80 kg/m³ olan kirişte en büyük fiber çekme hasarı 743 mm² ile alt plakanın 4. katmanında meydana gelmiştir. Köpük yoğunluğu en büyük olan kirişlerde ise hasar bölgeleri genellikle pim civarlarında meydana gelmiştir. En büyük hasar alanı 731 mm² ile alt plakanın 4. katmanında oluşmuştur.

Şekil 6.11'de 20 J darbe enerjisinde 60, 80 ve 130 kg/m³ köpük yoğunluklu karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında matris çekme hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları gösterilmektedir. En düşük köpük yoğunluklu sandviç kirişte en büyük hasar alanları oluşmaktadır. Üst plakalarda hasarlar fiber doğrultusuna dik yönde fiber çevresinde ve alt plakalarda fiber doğrultusunda fiber çevresinde hasar bölgeleri ilerlemiştir. Köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m³ olan sandviç kirişlerde oluşan matris çekme hasar kriterine göre belirlenmiş hasar alanları sırası ile 3391 mm² (üst plaka 1. katman), 1498 mm² (alt plaka 4. katman) ve 1514 mm² (üst plaka 1. katman) hesaplanmıştır.

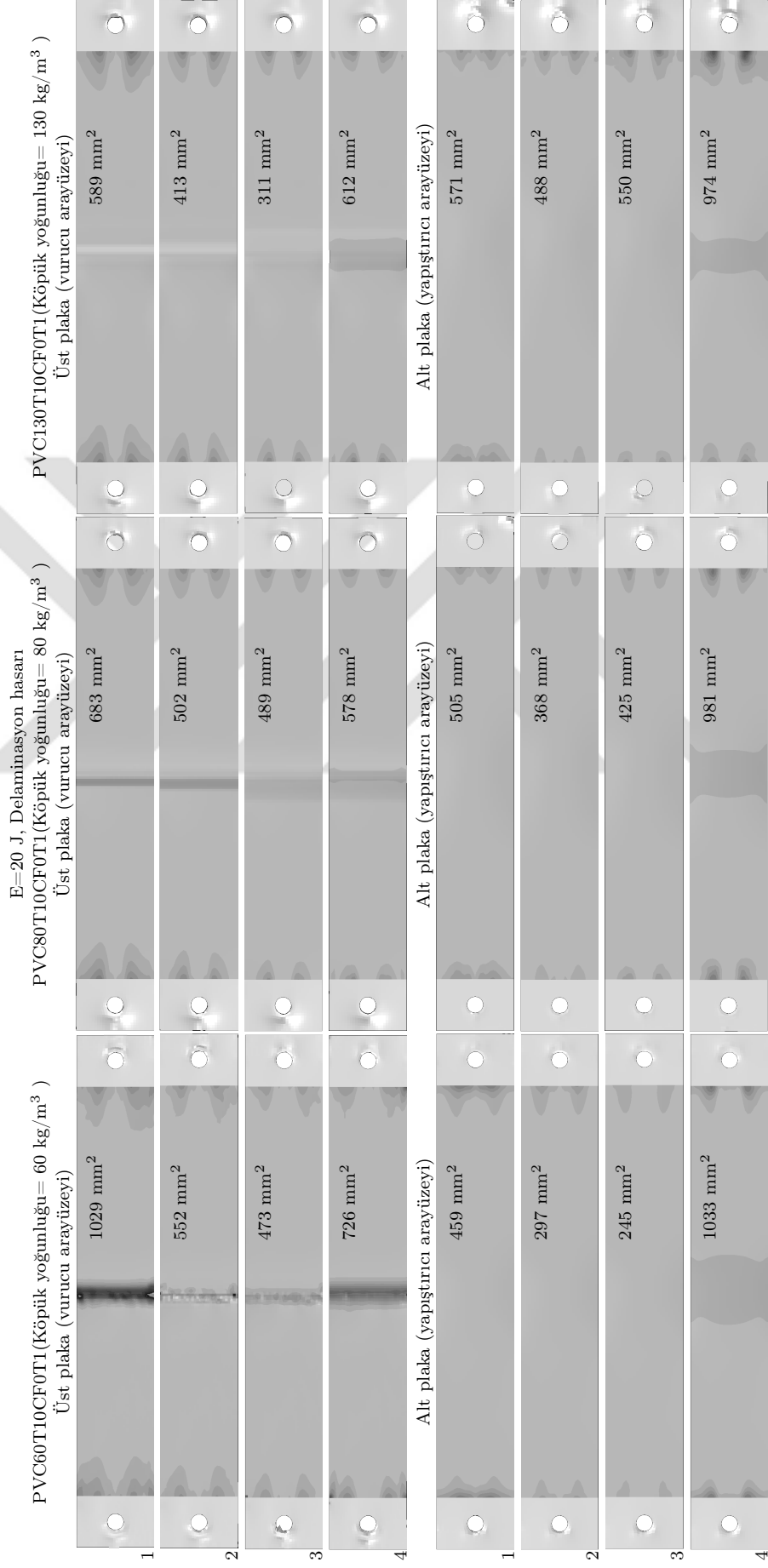
Artan darbe enerjilerinde fiber ve matris çekme hasarlarındaki artışlara benzer delaminasyon hasarlarında da artış gözlemlenmiştir (Şekil 6.12). Üst plakalarda darbe bölgesinde oluşan delaminasyon hasarları alt plakalarda pim civarında oluşmuştur. En büyük hasar alanları köpük yoğunluğu arttıkça sırası ile 1033 mm² (alt plaka 4. katman), 981 mm² (alt plaka 4. katman) ve 974 mm² (alt plaka 4. katman) hesaplanmıştır.



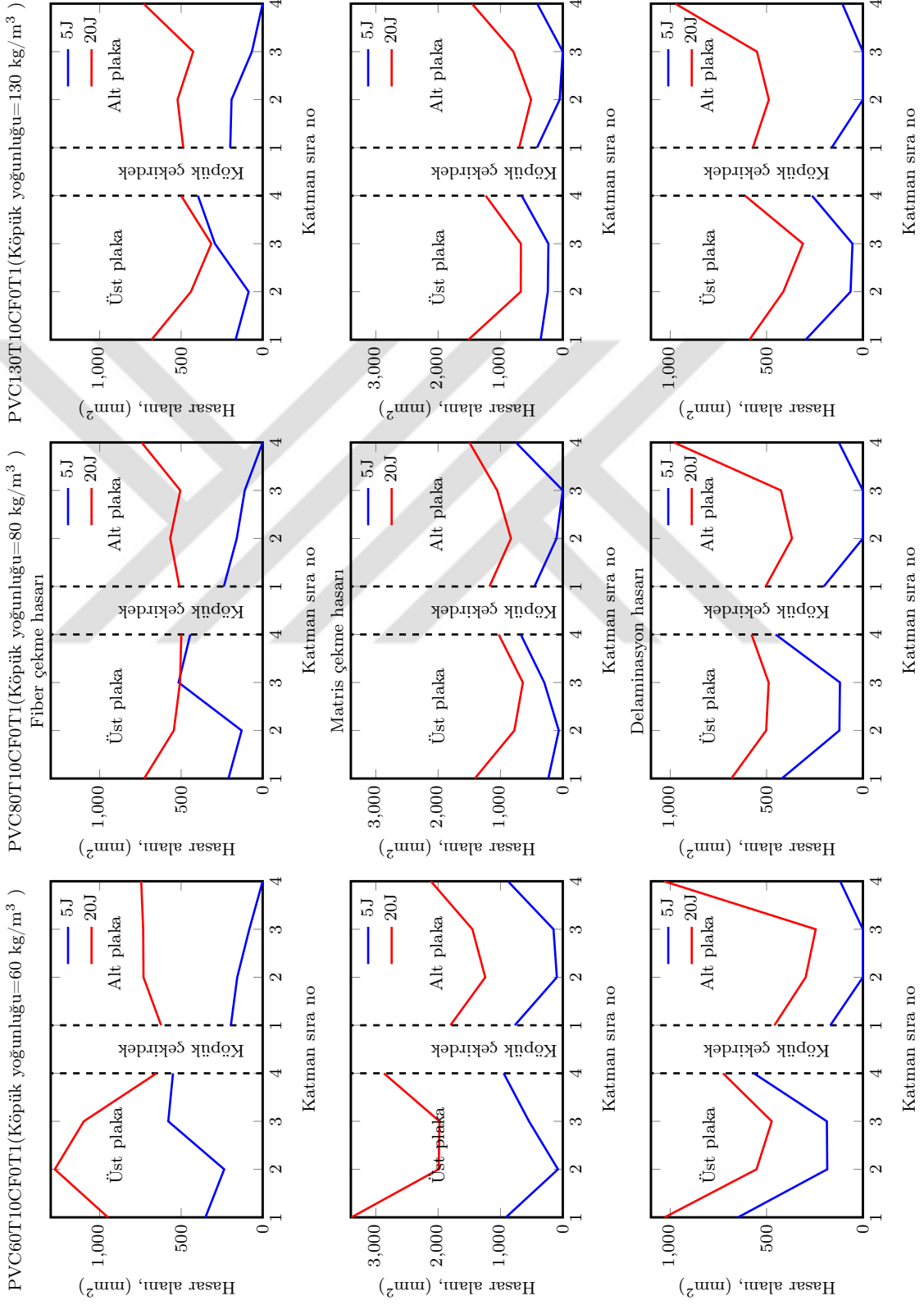
Şekil 6.10. Köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m³ olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında fiber çekme hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları (E=20 J).



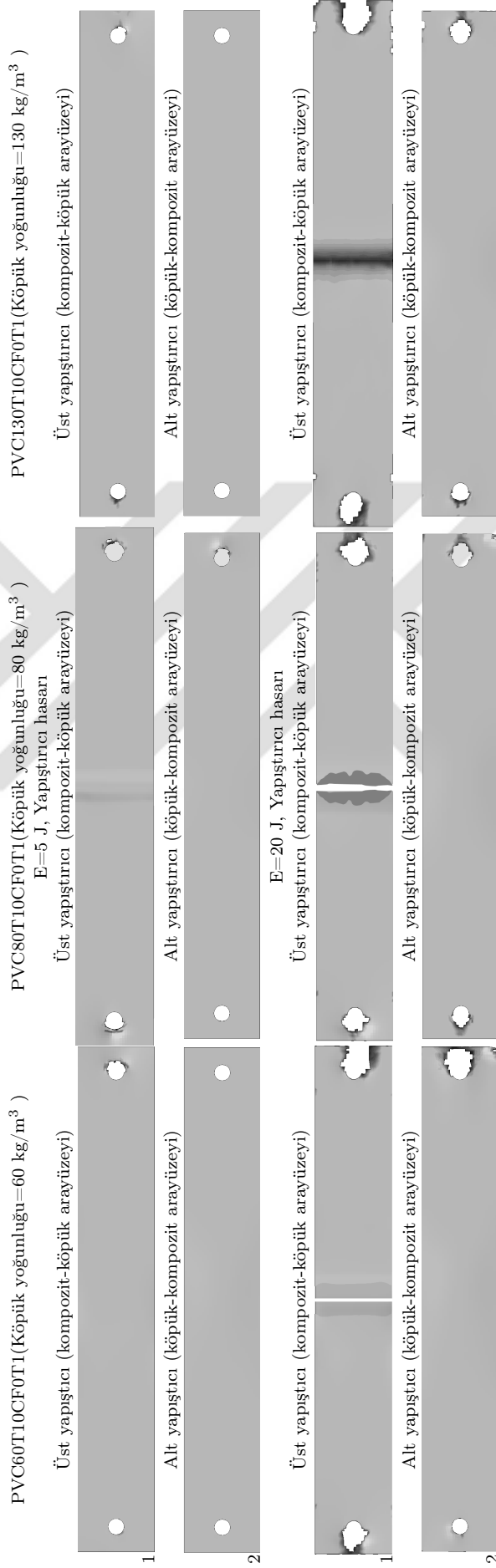
Şekil 6.11. Köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m³ olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandwich kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında matris çekme hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları ($E=20$ J).



Şekil 6.12. Köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m³ olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında delaminasyon hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları (E= 20 J).



Şekil 6.13. Köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m³ olan kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası fiber çekme, matris çekme ve delaminasyon hasar kriterlerine göre hasar alanlarının kalınlık boyunca değişimleri (E=5 ve 20 J).

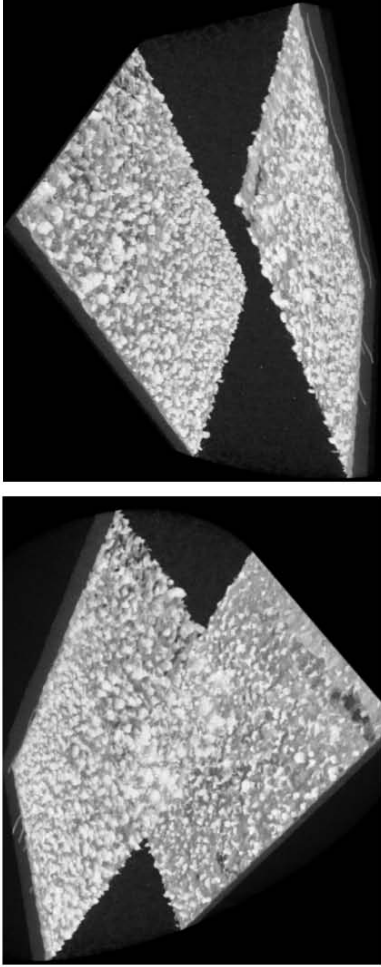


Şekil 6.14. Köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m³ olan kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası alt ve üst yapıştırıcı tabakalarında hasar bölgeleri (E=5 ve 20 J).

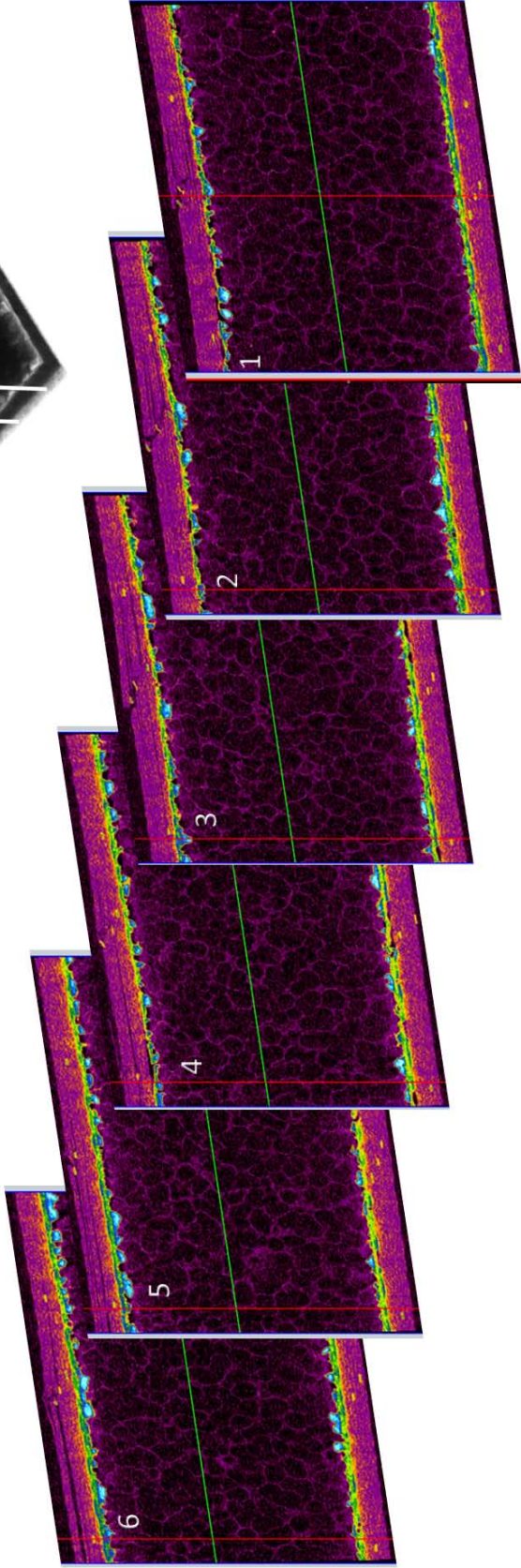
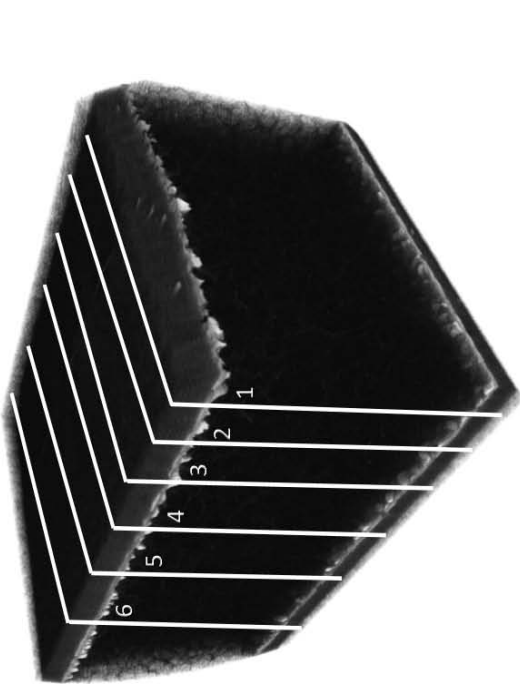
Farklı köpük yoğunluklarına sahip sandviç kirişlerin farklı darbe enerjileri altında plaka katmanlarında çekme altında fiber ve matris ve delaminasyon hasar kriterlerine göre hasar ayrıntılı incelenmiştir. Köpük yoğunluğu düşük olan sandviç kirişlerde daha fazla hasar alanlarının oluştuğu görülmüştür. Şekil 6.13'de bu hasar alanlarının kiriş kalınlığı boyunca değişimleri verilmiştir. Numunelerin hasar davranışları artan darbe enerjisi ve köpük yoğunluğu ile benzerlik göstermiştir. En büyük hasar alanları 1. veya 4. katmanlarda meydana gelmiştir. Kompozit katmanlardaki hasar bölgeleri incelendikten sonra yapıştırıcı tabakasındaki hasar bölgeleri incelenmiştir (Şekil 6.14). 5 J darbe enerjisi altında sandviç kirişlerin alt yapıştırıcı tabakasında hasar meydana gelmediği, üst yapıştırıcı tabakasında ise pim civarında hasarların oluşmaya başladığı görülmüştür. Darbe enerjisi 20 J olduğunda ise alt yapıştırıcı tabakasında pim civarında hasar oluşmuştur. Üst yapıştırıcı tabakasında ise darbe bölgesinde hasar oluşmuştur. 60 ve 80 kg/m³ yoğunluklara sahip kirişlerin üst yapıştırıcı tabakasında yapıştırıcı elemanları hasara uğrar iken 130 kg/m³ yoğunluklu kirişte ise düşük hasar düzeyleri oluşmuştur.

Şekil 6.15, 6.16 ve 6.17'de köpük yoğunluğu 60, 80 ve 130 kg/m³ olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişlerin 20 J darbe enerjisinde darbe sonrası Mikro-Ct analizleri, yapıştırıcı tabakaları ve kesit görüntüleri sunulmuştur. Sandviç kirişlerin darbeye maruz kalan orta bölgelerine Micro-Ct taramaları yapılmıştır. Tarama sonucunda, üç ekseninde kesit görüntüleri almak mümkündür. Ancak darbe davranışı en iyi bir şekilde analiz edebilmek için kirişin ön bölgesinden arka bölgesine doğru kesit görüntüleri irdelenmiştir. Darbe sonrası görüntüler ile birlikte kesit görüntüleri değerlendirildiğinde, köpük yoğunluğu 60 kg/m³ olan numunenin 20 J darbe enerjisinde çekirdek malzemesinde hasar oluştuğu görülmektedir. Bu nedenle yapı eğilme rijitliğini yitirmiştir. Kirişin üst kompozit plakasında fiber kırılmaları ve ayrılmalar mevcuttur, ancak bu durum belirsizdir. Köpük yoğunluğu 80 kg/m³ olan numune irdelendiğinde, üst kompozit plakada fiber kırılmaları ve ayrılmalar daha belirgindir. Köpük malzemesinde hasar oluşmamıştır. En yüksek köpük yoğunluğuna sahip kirişte ise fiber kırılmaları daha belirgin, ancak ayrılmalar daha azdır. Gevrek bir kırılma meydana gelmiştir. Köpük yoğunluğunun artışı yapıyı rijitleştirmiştir.

Alt ve üst yapıştırıcı tabakaları

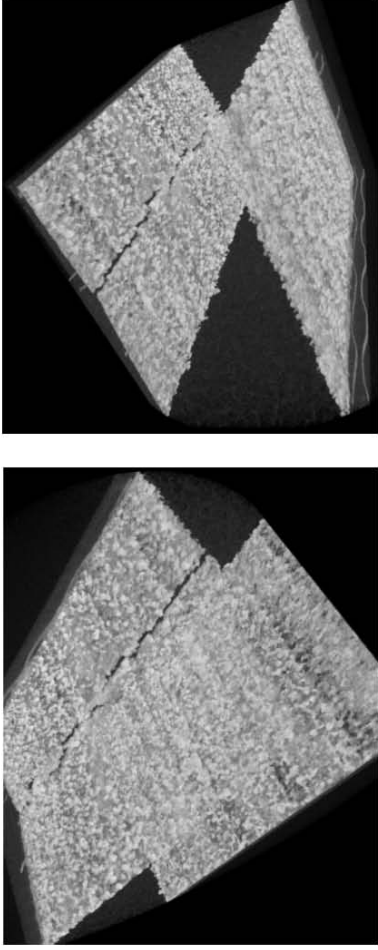


Sandviç kirişin orta bölgesi ve kesit sırası

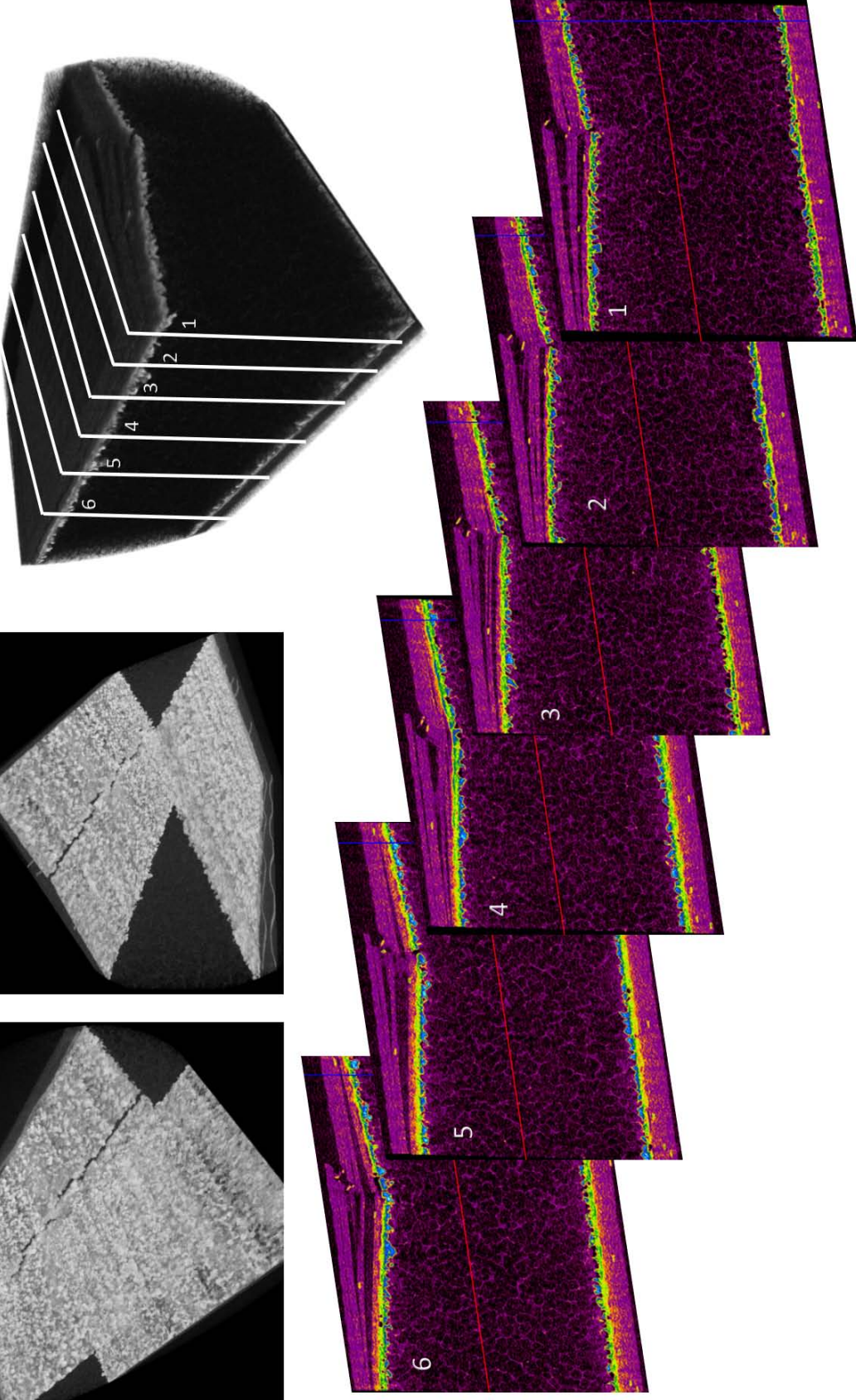


Şekil 6.15. Köpük yoğunluğu 60 kg/m^3 olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişin darbe sonrası Mikro-Ct analizi, alt ve üst yapıştırıcı tabakaları ve orta bölge kesit görüntüleri.

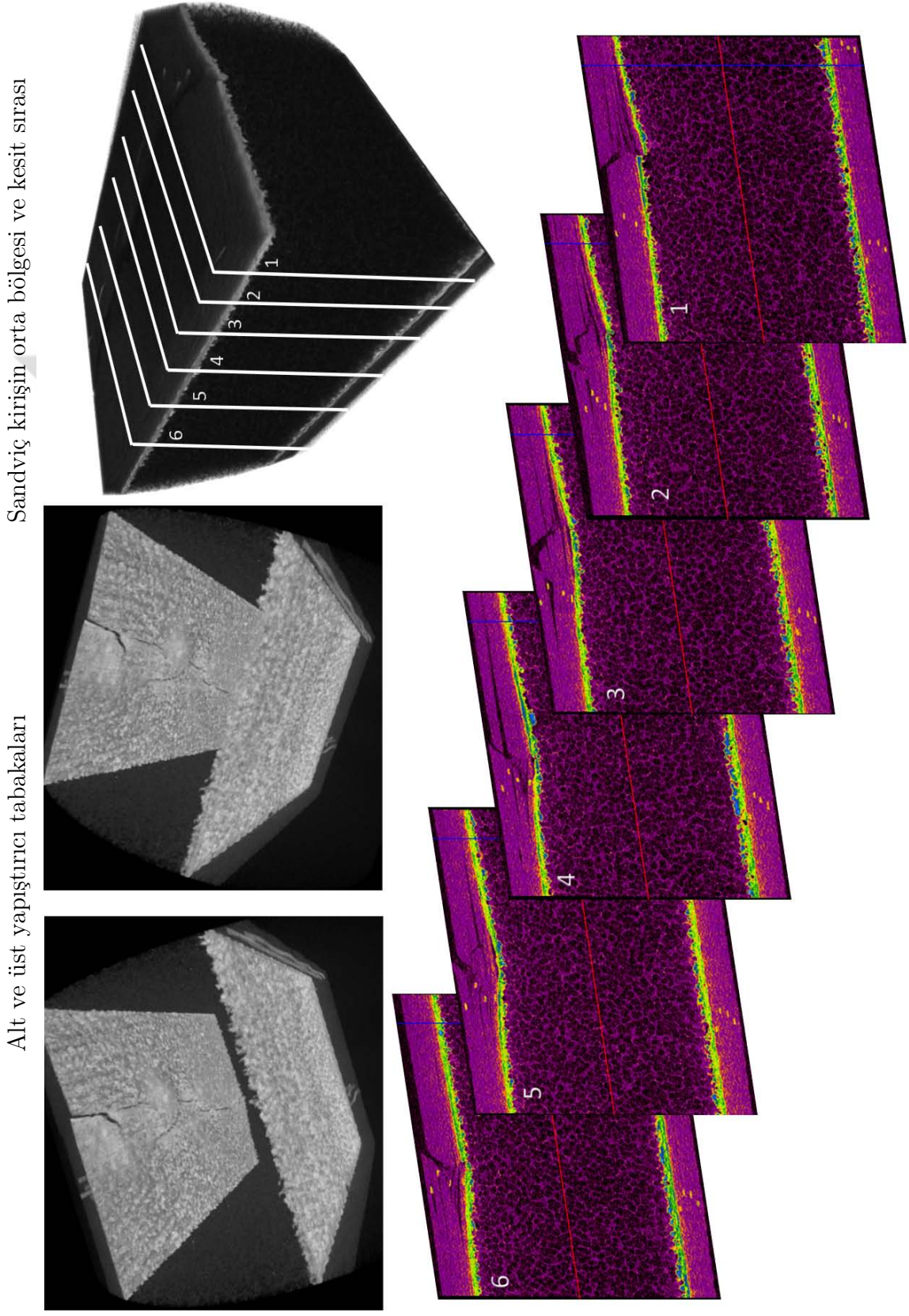
Alt ve üst yapıştırıcı tabakaları



Sandviç kirişin orta bölgesi ve kesit sırası



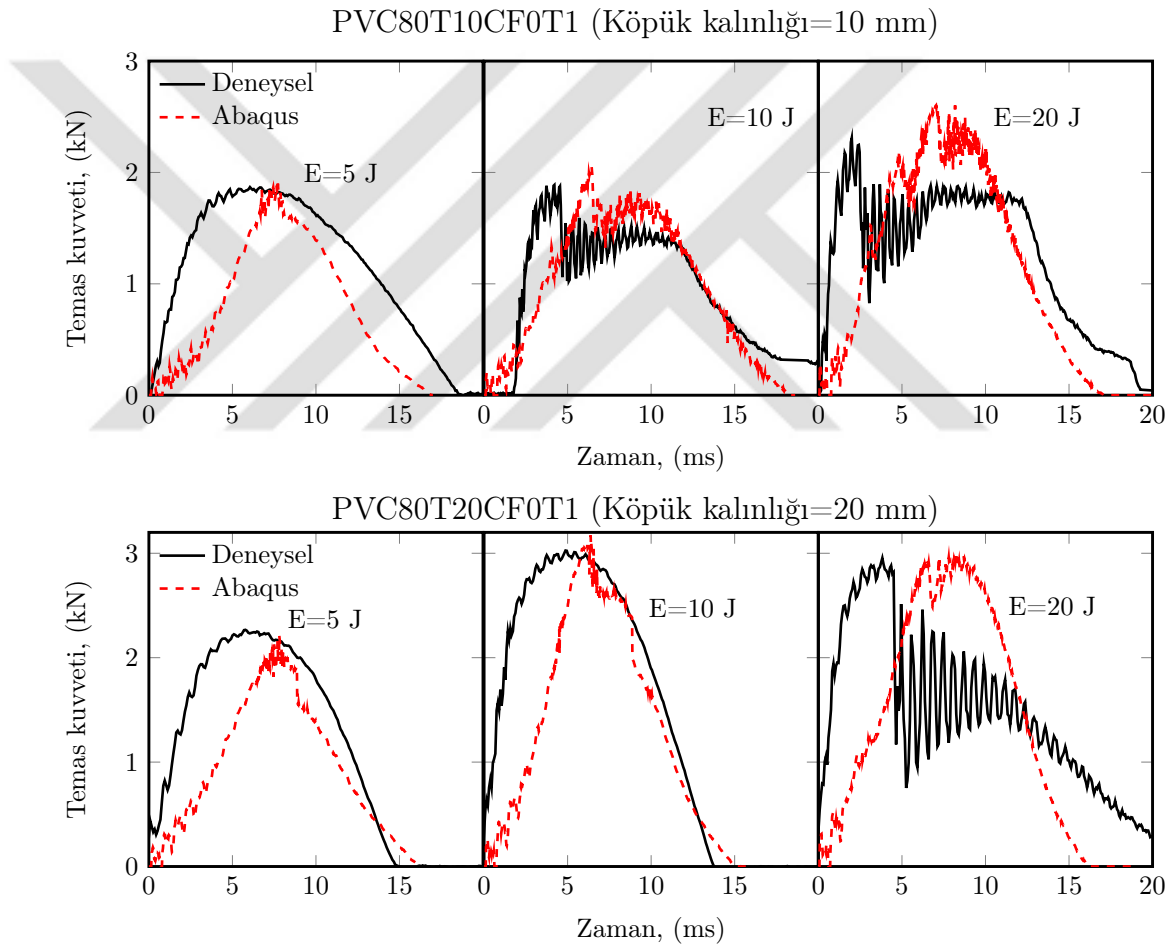
Şekil 6.16. Köpük yoğunluğu 80 kg/m^3 olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişin darbe sonrası Mikro-Ct analizi, alt ve üst yapıştırıcı tabakaları ve orta bölge kesit görüntüleri ($E=20 \text{ J}$).



Şekil 6.17. Köpük yoğunluğu 80 kg/m^3 olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit sandviç kirişin darbe sonrası Mikro-Ct analizi, alt ve üst yapıştırıcı tabakaları ve orta bölge kesit görüntüleri ($E=20 \text{ J}$).

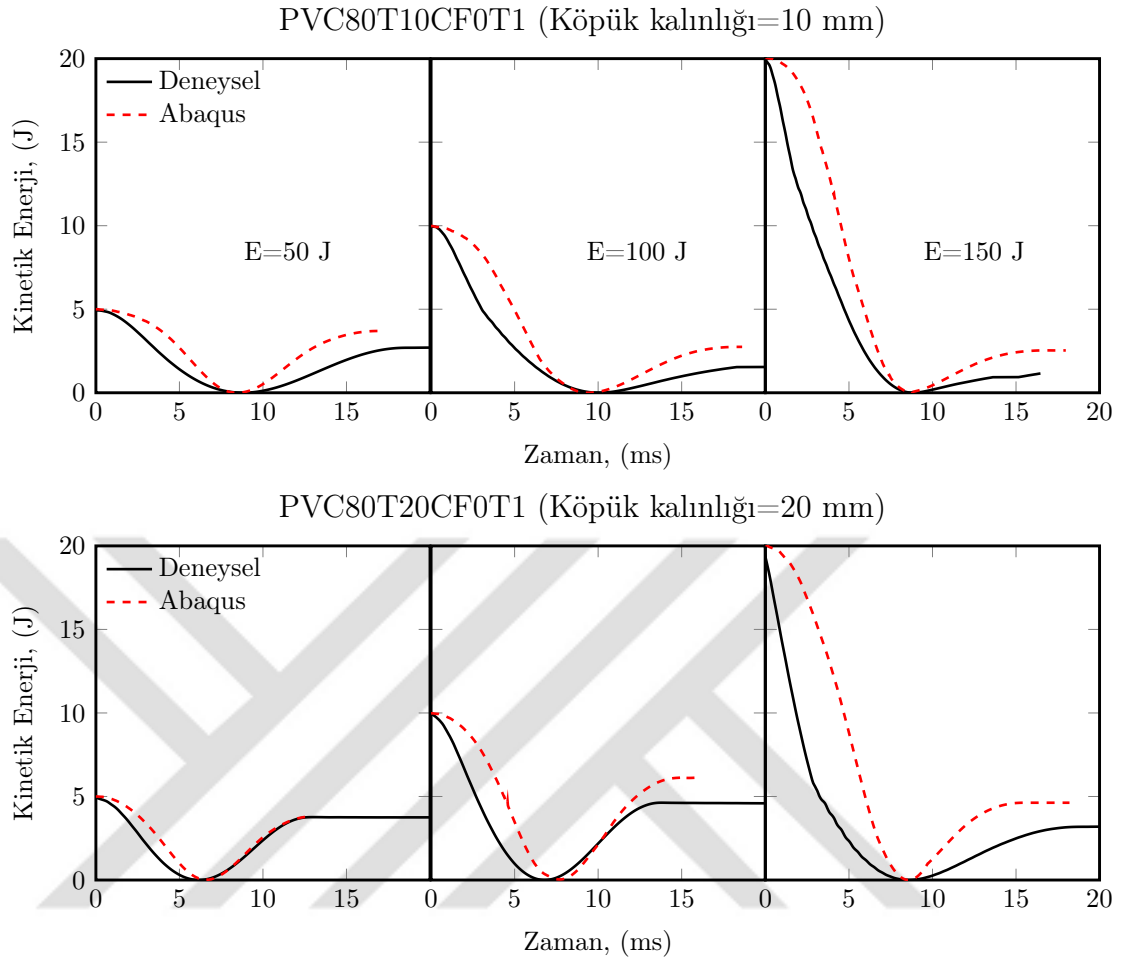
Mikro-Ct analiz sonucunda numunelere element analizi yapılarak, sandviç kirişi oluşturan malzemeler ayrıştırılmış, görüntüleri araştırılmış ve farklı açılardan verilmiştir. Yapıştırıcı tabakası bu sayede irdelenmiştir. En düşük köpük yoğunluğuna sahip sandviç kirişin yapıştırıcı katmanlarında hasar oluşmadığı gözükmektedir. Diğer iki köpük yoğunluğuna sahip sandviç kirişlerin üst yapıştırıcı katmanlarında çatlaklar ve hasar oluşmuştur.

6.3. Köpük Kalınlığı Etkisi



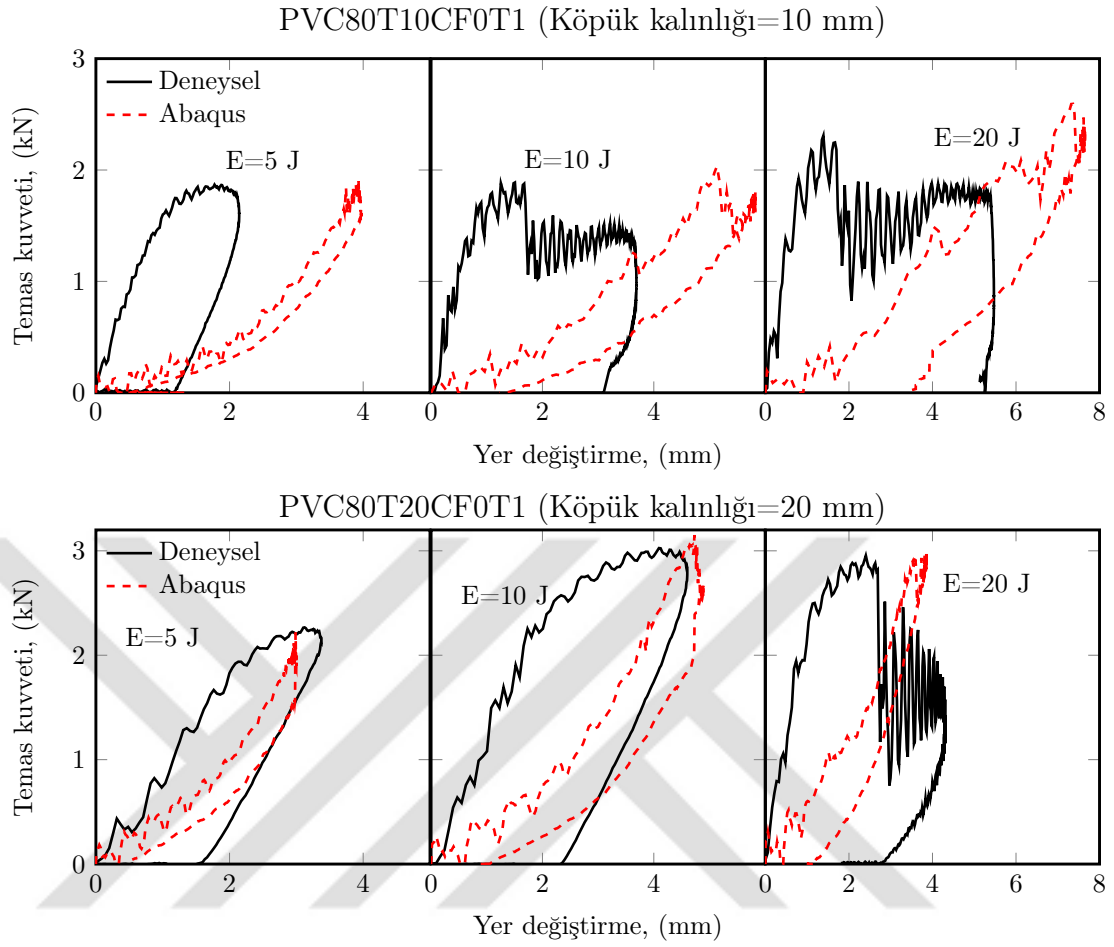
Şekil 6.18. Köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde sayısal ve deneysel temas kuvveti-zaman değişimleri.

Kompozit sandviç kirişlerin düşük hızlı eğilme darbe davranışlarına köpük malzemesinin mekanik özelliklerinin etkisine ek olarak geometrik özelliklerinin de etkisi araştırılmıştır. 10 ve 20 mm köpük kalınlıklarına sahip sandviç kirişlerin yüzey malzemeleri 4 katmanlı (1 mm), tek yönlü ve 0° fiber açısına sahip karbon fiber



Şekil 6.19. Köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde sayısal ve deneysel kinetik enerji-zaman değişimleri.

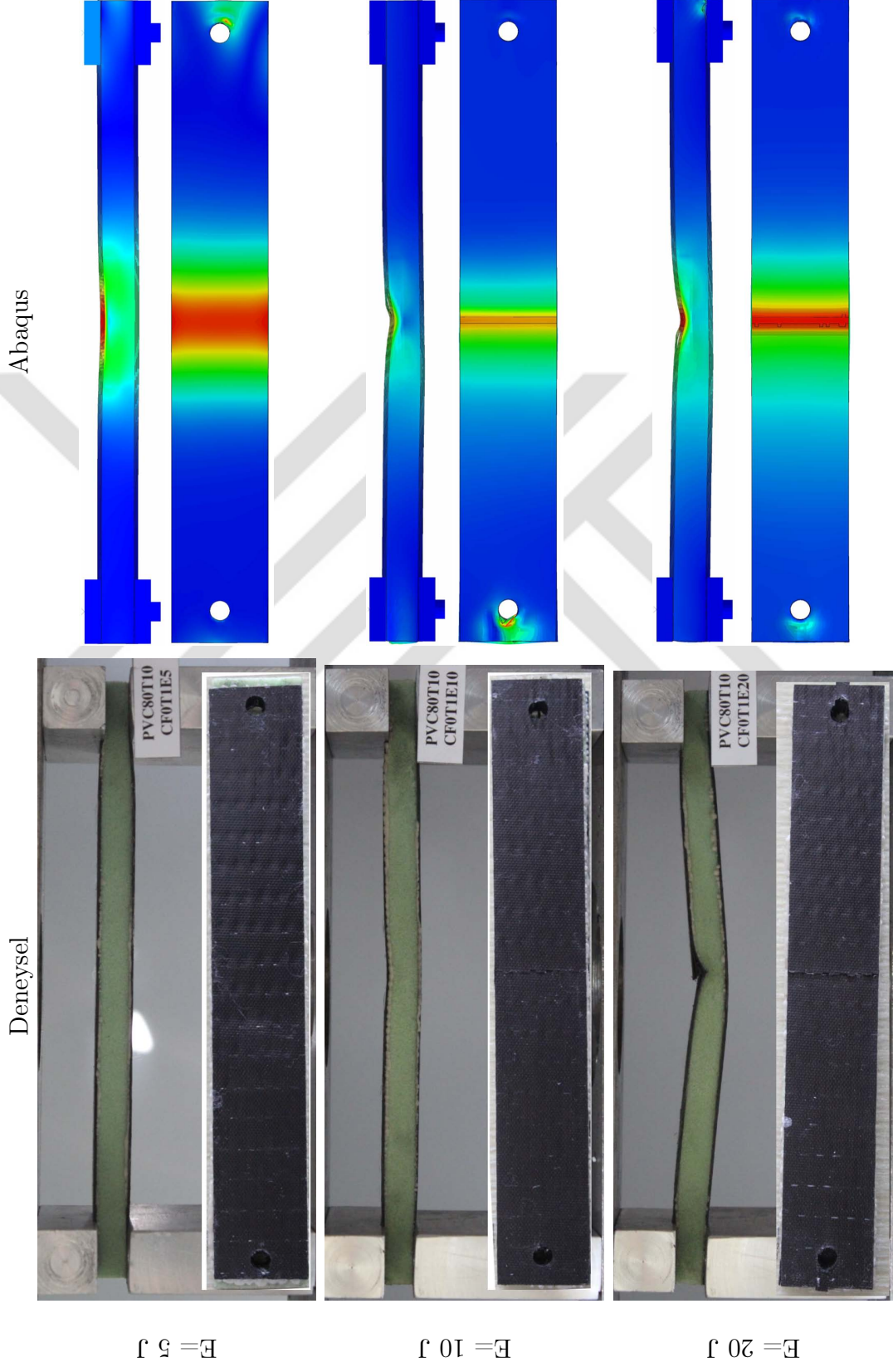
takviyeli kompozit plakalardır. Şekil 6.18’de köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde sayısal ve deneysel temas kuvveti-zaman değişimleri karşılaştırılmıştır. Köpük kalınlığı 10 mm olan sandviç kirişlerin üç farklı enerji seviyesinde en büyük temas kuvveti değerleri yaklaşık 2 kN ve temas süreleri ise 17 ms civarındadır. Sayısal ve deneysel en büyük temas kuvvetleri birbiri ile uyumludur. Genel davranış olarak deneysel temas kuvveti-zaman eğrileri daha geniş alanlara sahiptir. Köpük kalınlığı 20 mm’ye arttırıldığında temas kuvvetleri artmıştır. 5 J darbe enerjisi için yaklaşık en büyük temas kuvveti 2.2 kN olurken diğer enerji seviyeleri için 3 kN civarındadır. Sayısal ve deneysel en büyük temas kuvvetleri yakın seviyelerdedir. Temas süreleri ise azalmış olup 15 ms civarındadır. İnce köpük kalınlıklı kirişlerde hasar 10 J darbe enerjisinde belirginleşirken kalın köpük kalınlıklı kirişlerde 20 J darbe enerjisinde hasar olduğu eğrilerdeki ani



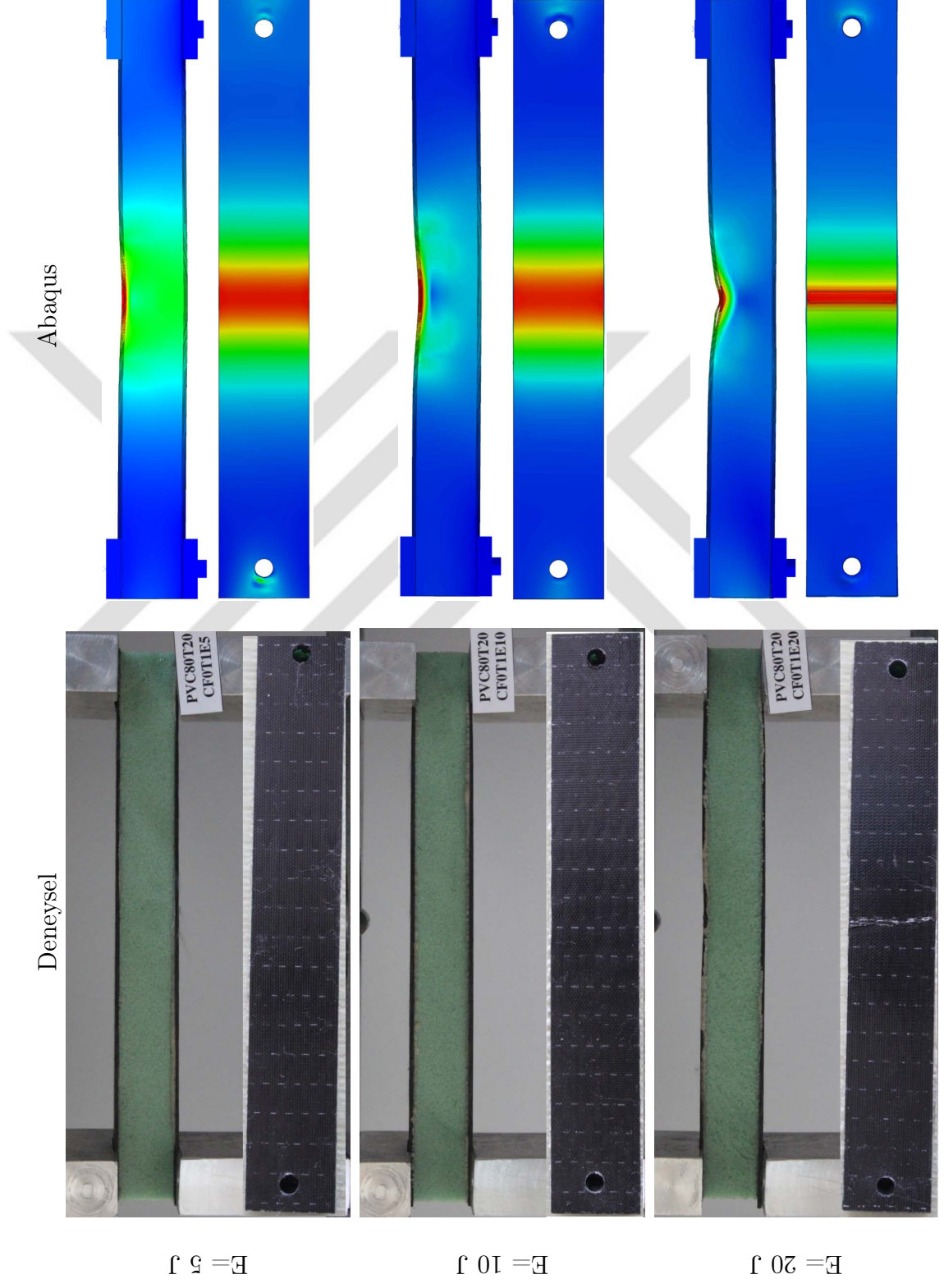
Şekil 6.20. Köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde sayısal ve deneysel temas kuvveti-yer değiştirmesi değişimleri.

düşüşlerden anlaşılmaktadır.

Şekil 6.19'de farklı köpük kalınlıklarına sahip kompozit sandviç kirişlerin mevcut darbe enerjisi seviyelerinde sayısal ve deneysel kinetik enerji-zaman değişimleri gösterilmektedir. Sayısal ve deneysel kinetik enerji-zaman eğrileri benzer olsa da sayısal model deney numunelerine göre daha elastik davranmıştır. Sönümlenen enerji farkları küçük de olsa köpük kalınlığı küçük olan kirişler daha fazla enerji sönümlemiştir. Köpük kalınlığı artışının enerji sönümleme kabiliyetini iyileştirmesi beklenmektedir. Ancak köpük kalınlığı daha küçük olan kirişlerin alt ve üst kompozit plakalarında daha geniş hasar bölgelerine rastlanmıştır. Bu durum enerjinin köpük malzemesi tarafından enerjinin yeterince sönümlenmediği geriye kalan enerjinin büyük kısmını kompozit malzemeleri hasara uğrattığına işaret eder. Düşük enerji seviyelerinde sandviç kirişler daha fazla elastik davranmışlardır.



Şekil 6.21. Köpük kalınlığı 10 mm olan fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde deneysel ve sayısal darbe sonrası görüntüleri.



Şekil 6.22. Köpük kalınlığı 20 mm olan fiber takviyeli kompozit sandviç kırımların 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde deneysel ve sayısal darbe sonrası görüntüleri.

Şekil 6.20 köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan sandviç kirişlerin üç farklı enerji seviyesindeki temas kuvveti-zaman değişimlerini göstermektedir. Köpük kalınlığının artışı ile sayısal ve deneysel elastik yer değiştirme değişimleri benzerlik göstermiştir. Darbe enerjisi arttıkça elastik yer değiştirmeler azalmıştır. Sayısal ve deneysel en büyük temas kuvvetleri uyumlu değişimler seğılemiştir.

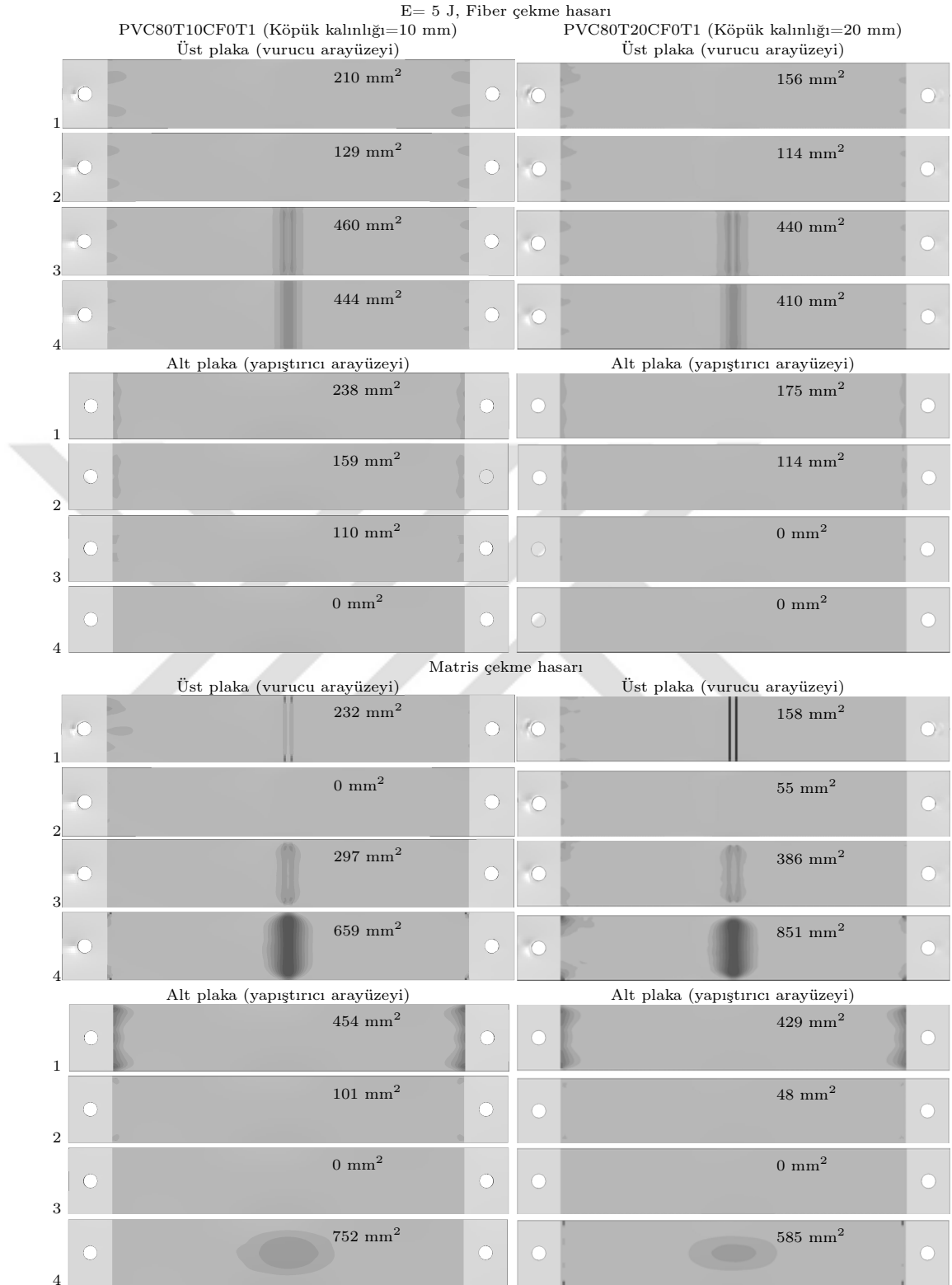
Şekil 6.21 ve 6.22’de sırasıyla köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan kompozit sandviç kirişlerin 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde deneysel ve sayısal darbe sonrası görüntüleri karşılaştırılmıştır. Artan köpük kalınlığı ile kompozit plakalardaki hasarlar azalmıştır. Sayısal ve deneysel darbe sonrası görüntüler her iki köpük kalınlığı için oldukça uyumludur. İnce köpük kalınlıklı sandviç kirişlerde kalıcı çökmeler mevcuttur. Bu durumun nedeni köpüğün yeterince darbe enerjisini sönümleyememesi ve geriye kalan darbe enerjisinin kompozit plakaları hasara uğratmasıdır. Köpük kalınlığı kalın olan kirişlerde kalıcı çökmeler belirgin azalır. Çünkü, köpük kalınlığı darbe enerjisini yeterince sönümleyebilecek kalınlıkta olup, alt ve üst kompozit levhalara daha az enerji iletir. Kompozit plakalarda hasar ise sadece 20 J darbe enerjisinde üst plakada ortaya çıkmaktadır. Pim delikleri civarında hasar oluşmadığı gözükmektedir. Köpük malzemelerinde herhangi bir hasar veya çatlaklar oluşmamıştır.

Şekil 6.23 5 J darbe enerjisinde köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit alt ve üst plakalarının tabakalarında fiber ve matris çekme hasar kriterlerine göre belirlenen hasar bölgelerini ve alanlarını göstermektedir. 10 ve 20 mm köpük kalınlıklı kirişlerin matris ve fiber çekme hasar alanları ve bölgeleri benzerdir. Artan Köpük kalınlığı ile hasar alanları nispeten azalmıştır. Köpük kalınlığı 10 mm olan sandviç kirişin 5 J darbe enerjisinde altındaki en büyük fiber çekme hasar alanı 460 mm^2 ile üst plakanın 3. katmandadır. Matris çekme hasar alanı ise 752 mm^2 ile alt plakanın 4. katmanındadır. Köpük kalınlığı 20 mm olan kirişin 5 J darbe enerjisi altındaki en büyük fiber çekme hasar alanı 440 mm^2 ile üst plakanın 3. katmanında oluşurken en büyük matris çekme hasar alanı 851 mm^2 ile üst plakanın 4. katmanındadır. Fiber çekme hasar alanları üst plakada vurucu bölgesinde meydana gelirken alt plakanın 4. katmanına doğru azalmaktadır. Matris çekme hasar alanı ise üst plakada vurucu bölgesinde oluşurken alt plakada

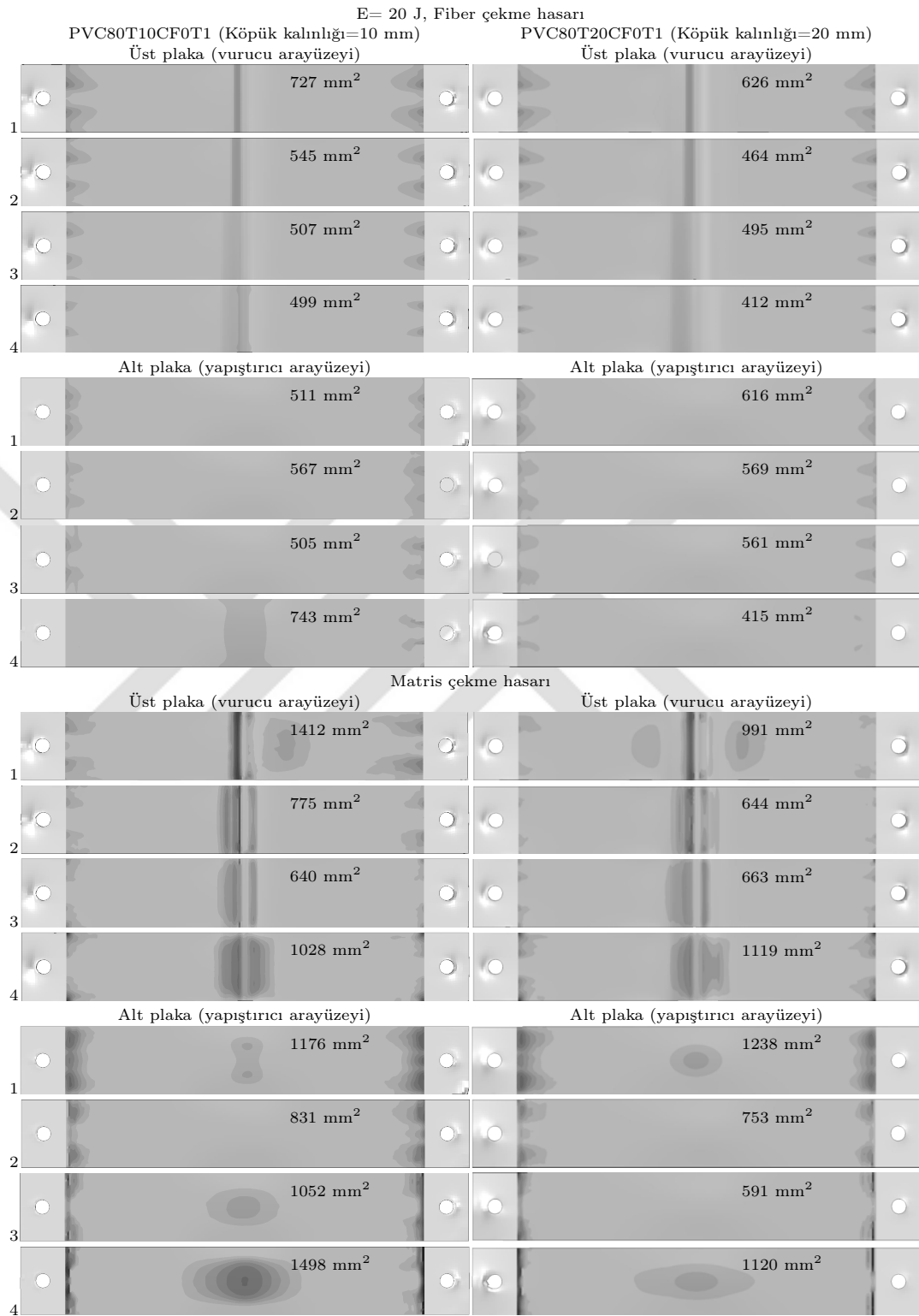
fiber civarında meydana gelmiştir.

Şekil 6.24 farklı köpük kalınlığına sahip kompozit sandviç kirişlerin 20 J darbe enerjisinde alt ve üst plakalarının katmanlarında fiber ve matris çekme hasar kriterine göre tespit edilen hasar bölgeleri ve alanlarını gösterir. Köpük kalınlığının artması ile hasar alanları daralmıştır. En geniş hasar alanları matris çekme hasar kriterine göre ve üst plakalarda ortaya çıkmıştır. Köpük kalınlığı 10 mm olan sandviç kirişte 20 J darbe enerjisinde ortaya çıkan en büyük fiber ve matris çekme hasar alanları 743 mm² ile alt plakanın 4. katmanında ve 1498 mm² ile alt plakanın 4. katmanındadır. Köpük kalınlığı 20 mm olan sandviç kirişte en büyük fiber ve matris çekme hasar alanları ise sırası ile 626 mm² (üst plaka 1. katman) ve 1120 mm² (alt plaka 4. katman) olmuştur.

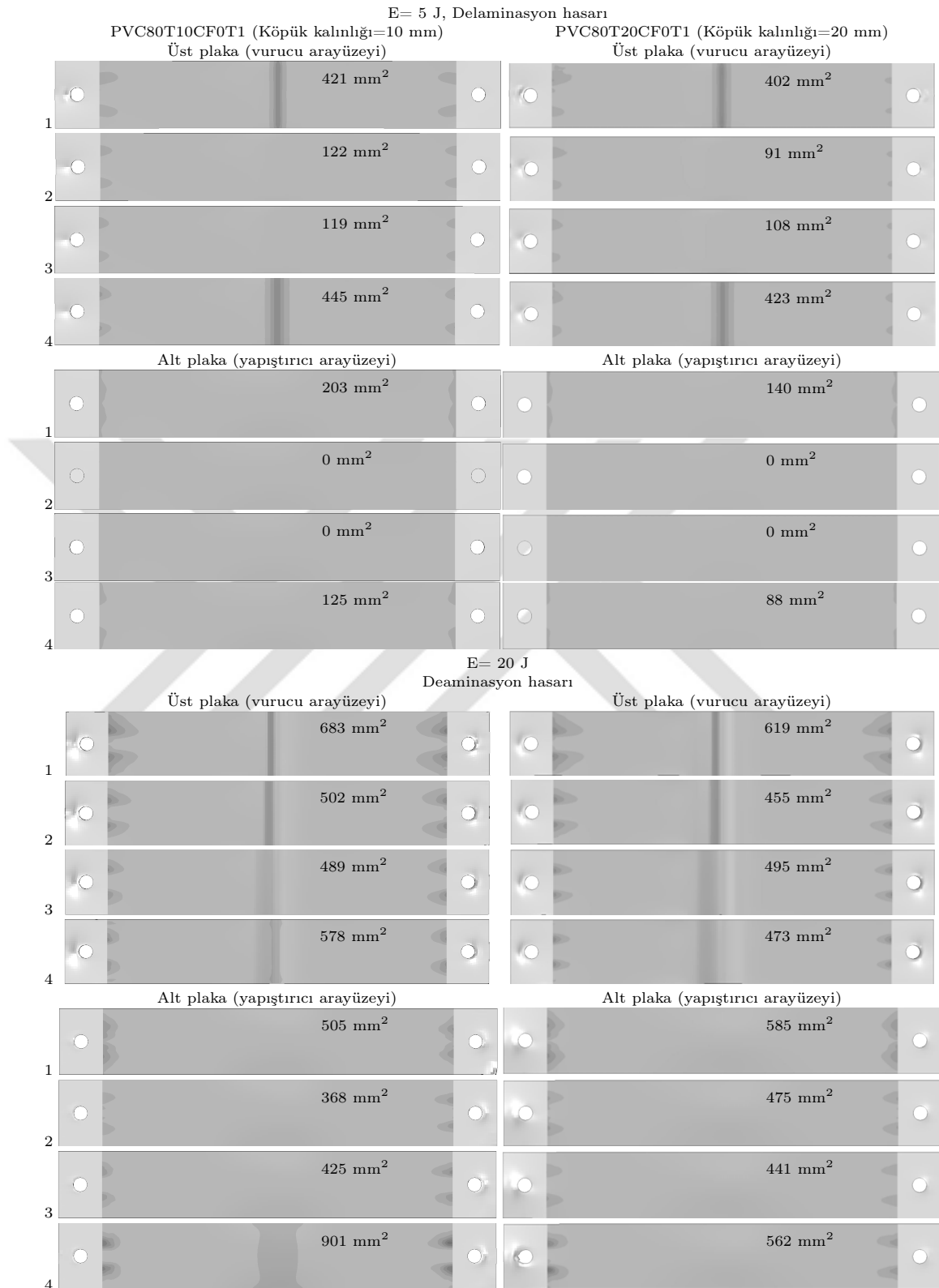
5 ve 20 J darbe enerjisinde farklı köpük kalınlıklarına sahip kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası kompozit tabakalarında delaminasyon hasar kriterine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları Şekil 6.25’de gösterilmiştir. Köpük kalınlığı artması ile hasar alanları daralmıştır. Alt plakalarda pim civarında delaminasyon hasarlarının oluştuğu görülmektedir. En büyük delaminasyon hasarı 10 mm köpük kalınlığı için 5 ve 20 J darbe enerjilerinde sırası ile 445 mm² (üst plaka 4. katman) ve 901 mm² (alt plaka 4. katman) ve köpük kalınlığı 20 mm olan kiriş plakalarında delaminasyon hasar alanları 423 mm² (4. katman üst plaka) ve 619 mm² (üst plaka 1. katman) olmuştur.



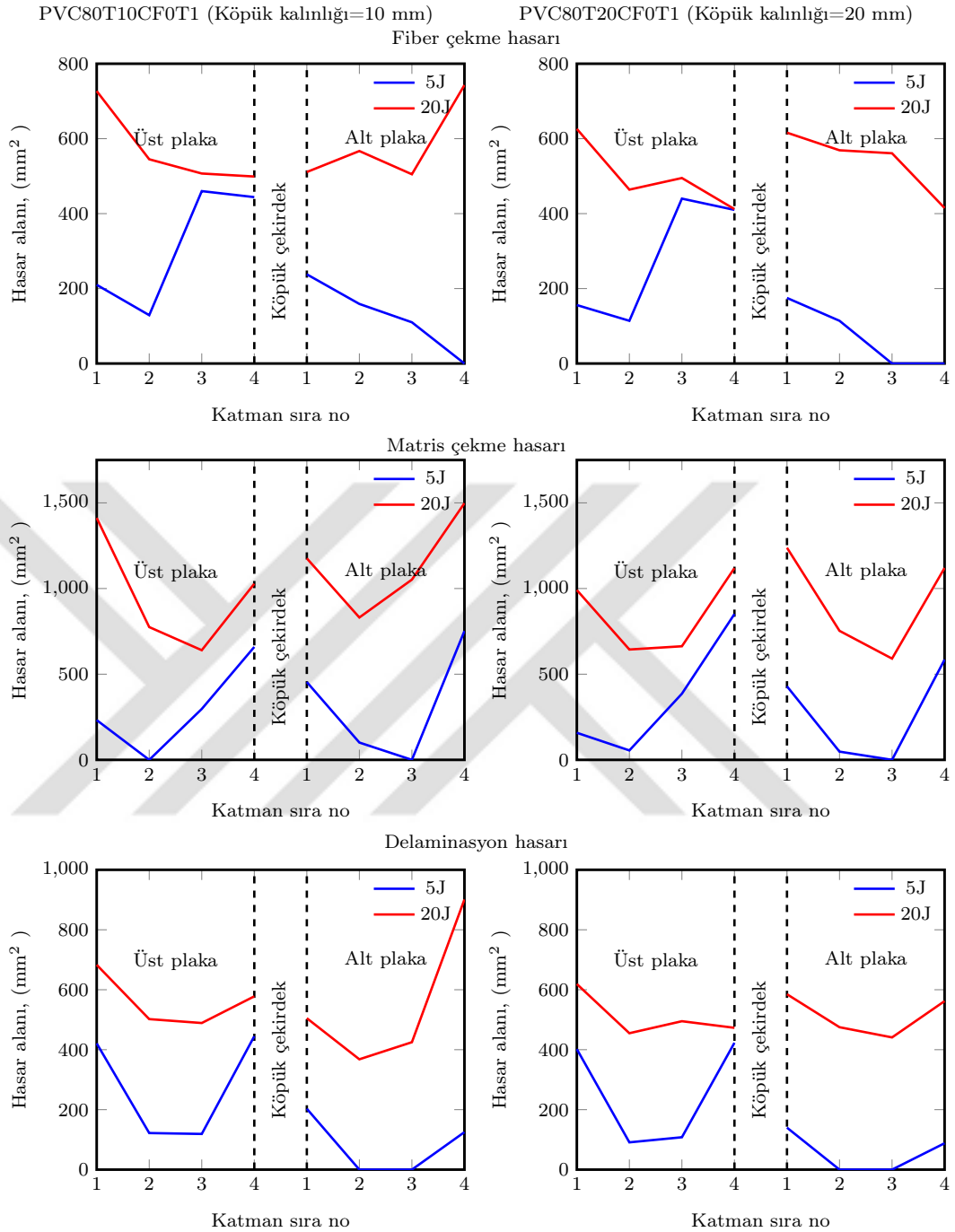
Şekil 6.23. Köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası alt ve üst kompozit plakalarının tabakalarında fiber ve matris çekme hasar kriterlerine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları (E=5 J).



Şekil 6.24. Köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası alt ve üst kompozit plakalarının tabakalarında fiber ve matris çekme hasar kriterlerine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları (E=5 J).

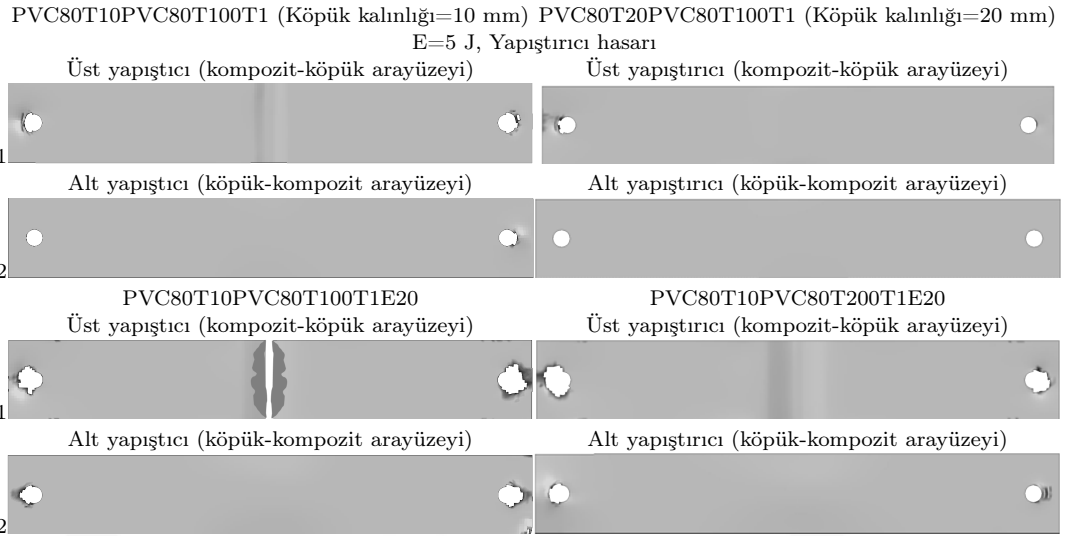


Şekil 6.25. Köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası alt ve üst kompozit plakalarının tabakalarında delaminasyon hasar kriterlerine göre belirlenen hasar bölgeleri ve alanları (E=5 J).



Şekil 6.26. 5 ve 20 J darbe enerjilerinde köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası fiber çekme, matris çekme ve delaminasyon hasar kriterlerine göre belirlenen hasar alanlarının kalınlık boyunca değişimleri.

Farklı köpük kalınlığına sahip kompozit sandviç kirişlerin farklı darbe enerjilerinde düşük hızlı darbe davranışları ayrıntılı incelenmiştir. Fiber ve matris çekme ve delaminasyon kriterine göre hasar alanları 5 ve 20 J darbe enerji seviyeleri için ayrıntılı irdelenmiştir. Şekil 6.26'da fiber çekme, matris çekme ve delaminasyon



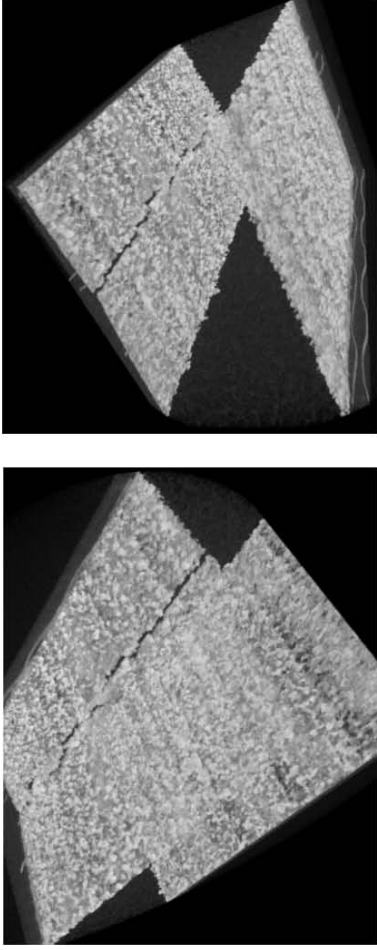
Şekil 6.27. Köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası alt ve üst yapıştırıcı tabakalarında 5 ve 20 J darbe enerjilerinde oluşan hasar bölgeleri.

hasar kriterlerine göre alt ve üst kompozit plakaların katmanlarında oluşan hasar alanlarının kiriş kalınlığı boyunca değişimleri gösterilmiştir. Hasar alanlarının değişimi fiber çekme hasar kriteri için farklı iken matris çekme ve delaminasyon hasar kriterleri için benzerdir. En büyük hasar alanları matris çekme hasar kriterinde ortaya çıkmıştır.

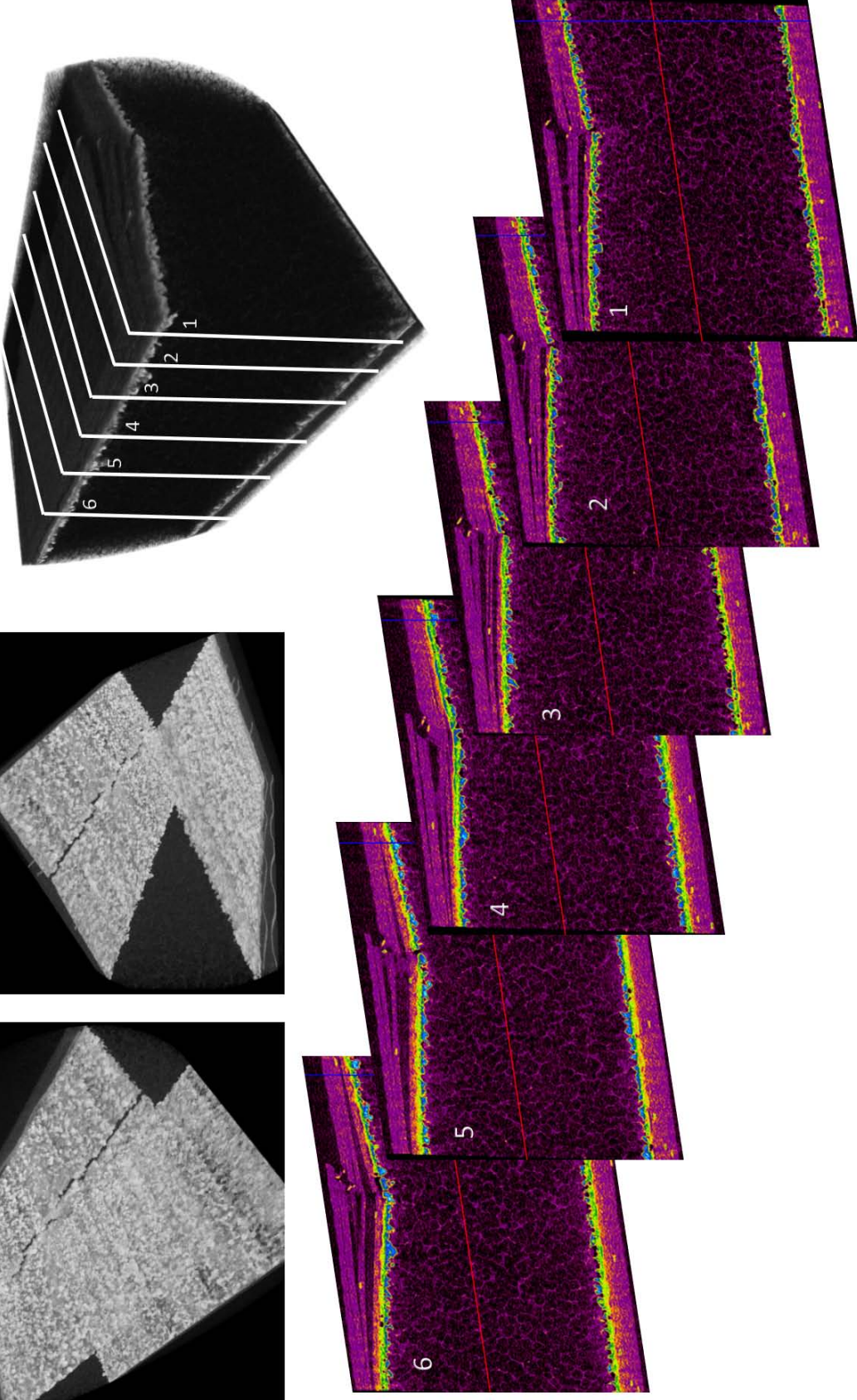
Şekil 6.27'de köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan kompozit sandviç kirişlerin darbe sonrası alt ve üst yapıştırıcı tabakalarında 5 ve 20 J darbe enerjilerinde oluşan hasar bölgeleri verilmiştir. 5 J darbe enerjisinde her iki yapıştırıcı tabakalarında hasar oluşmamıştır. Ancak darbe enerjisi 20 J'e arttırıldığında köpük kalınlığı 10 mm olan kirişin üst yapıştırıcı tabakasında darbe bölgesinde delaminasyon oluşmuştur. Alt yapıştırıcı katmanında ise hasar pim delikleri civarında oluşmuştur.

Şekil 6.28 ve 6.29'de köpük kalınlığı 10 ve 20 mm olan kompozit sandviç kirişlerin 20 J darbe enerjisinde darbe sonrası mikro-ct analiz sonuçları yapıştırıcı tabakalarının ve kirişin kesit görüntüleri verilmiştir. Köpük kalınlığının darbe davranışını önemli derece etkilediği temas kuvveti-zaman, kinetik enerji-zaman ve temas kuvveti-yer değiştirme eğrilerinden anlaşılmaktadır. Mikro-Ct analizi kesit görüntüleri irdelendiğinde bu durum daha belirgin açıkça ortaya konmuştur. Köpük kalınlığı artışı ile hemen hemen nerdeyse hasar önlenmiştir. Fiber kırıkları meydana gelmesine rağmen tabakalararası ayrılmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir.

Alt ve üst yapıştırıcı tabakaları

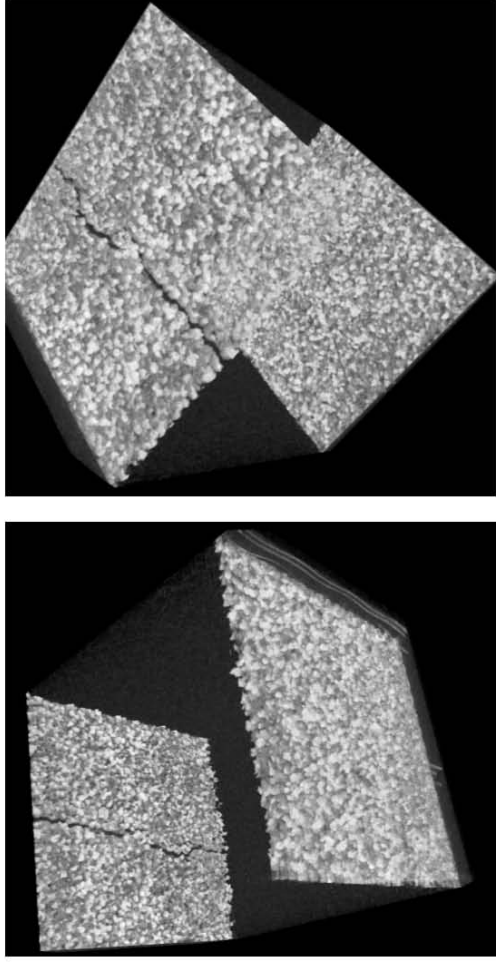


Sandviç kirişin orta bölgesi ve kesit sırası

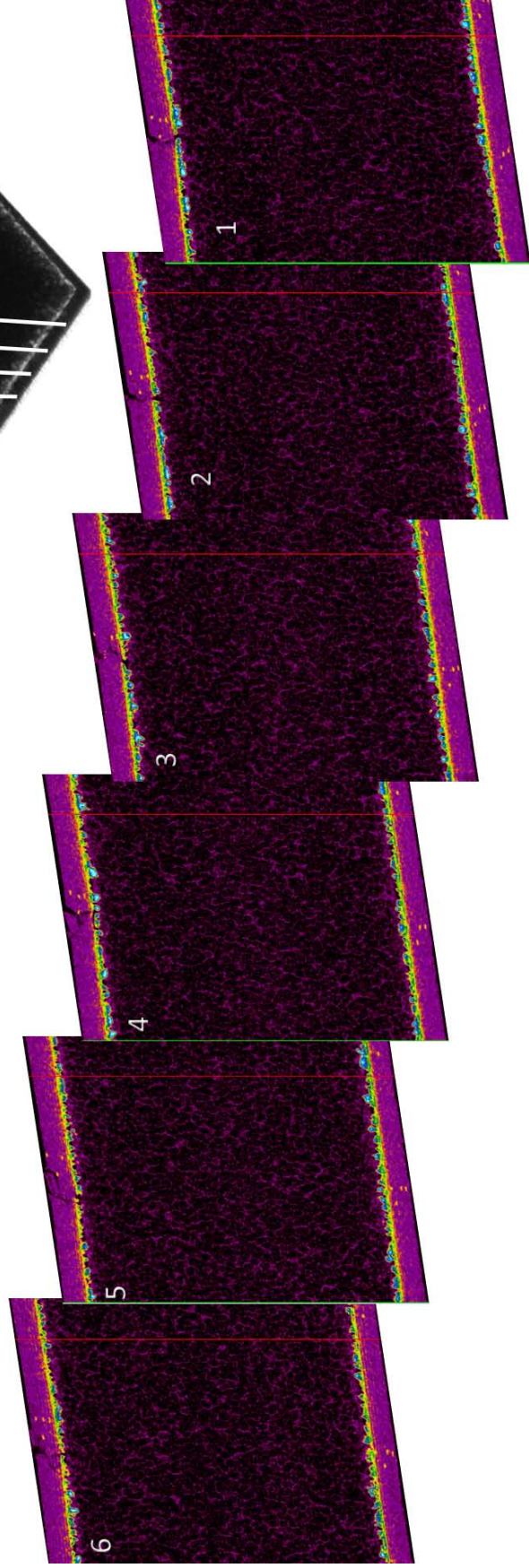
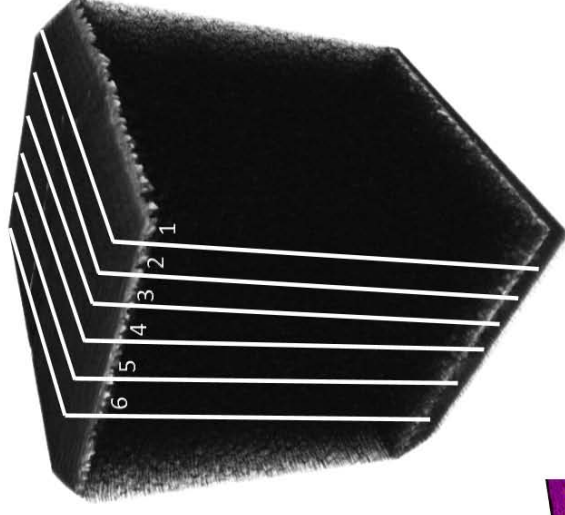


Şekil 6.28. Köpük kalınlığı 10 mm olan kompozit sandviç kirişin 20 J darbe enerjisinde darbe sonrası Mikro-Ct analizi, alt ve üst yapıştırıcı tabakaları ve orta bölge kesit görüntüleri.

Alt ve üst yapıstırıcı tabakaları



Sandviç kirişin orta bölgesi ve kesit sırası



Şekil 6.29. Köpük kalınlığı 20 mm olan kompozit sandviç kirişin 20 J darbe enerjisinde darbe sonrası Mikro-Ct analizi, alt ve üst yapıstırıcı tabakaları ve orta bölge kesit görüntüleri.

Alt kompozit plakalarında kırılmalar ve ayrılmalar oluşmamıştır. Alt ve üst yapıştırıcı tabakaları incelendiğinde üst yapıştırıcı tabakasında her iki köpük kalınlığı için sandviç kirişlerde çatlaklar ve hasarlar ortaya çıkmıştır. Gerek deneysel makroskopik düzeyde numunelerin deforme olmuş geometrileri, gerekse Mikro-Ct ayrıntılı hasar analizi sonuçları, bu tarzda kompozit plakalar ve yapıştırıcı tabakalarının malzemelerinde hasar tipleri için uygulanan malzeme ve hasar modellerinin makul sayısal analiz sonuçlarını sunduğunu doğrulamaktadır. Ancak kompozit matris malzemesinin sayısal modelde elastik değerlendirilmesi, hasar kriterlerinin elastik sınırı esas alınması temas kuvveti-çökme eğrilerinde belirgin bir farklılığa sebebiyet vermiştir.



7. BÖLÜM

SANKİ-STATİK YÜK ALTINDA EĞİLME DAVRANIŞI

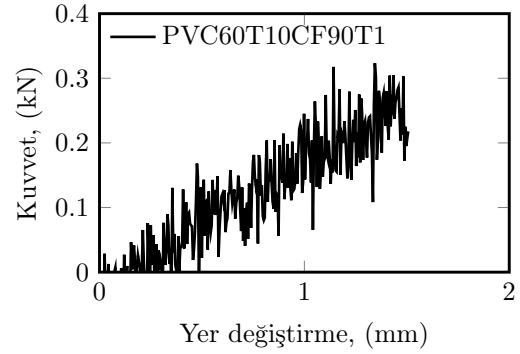
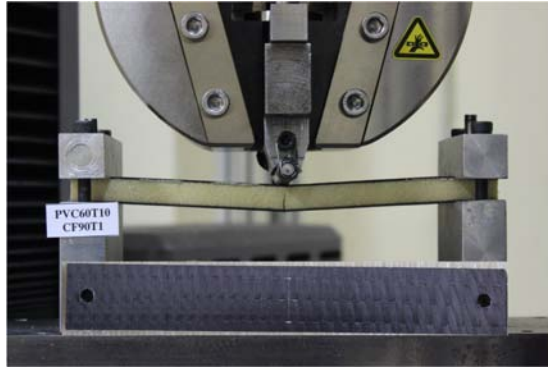
7.1. Giriş

Bu bölümde kompozit sandviç kirişlerin sanki-statik eğilme davranışı karşılaştırılmıştır. İrdelenmiştir. Endüstride farklı kullanım alanlarına sahip sandviç yapılar, farklı çalışma şartlarında farklı yüklemelere maruz kalabilmektedirler. Sandviç yapıların özel bir hali olan sandviç kirişler için de bu durum söz konusudur. Kirişin geometrisi kullanım amacını ve taşıyacağı yük tipini belirlemektedir. Bu tür yapıların malzemelerinin statik ve dinamik yükler altında davranışları farklı olacaktır. Dayanımı en yüksek ve düşük olan ve farklı plaka kalınlığında, farklı fiber açılı kompozit dış plakalı kirişler için sanki-statik yükler altında eğilmeye maruz bırakılarak mekanik davranışları incelenmiştir. Sanki-statik eğilme testleri yapı yük taşıma kabiliyetini kaybedinceye dek devam etmiştir. Sanki-statik ve dinamik yükler altındaki sonuçları karşılaştırabilmek için testler aynı sınır şartları altında gerçekleştirilmiştir.

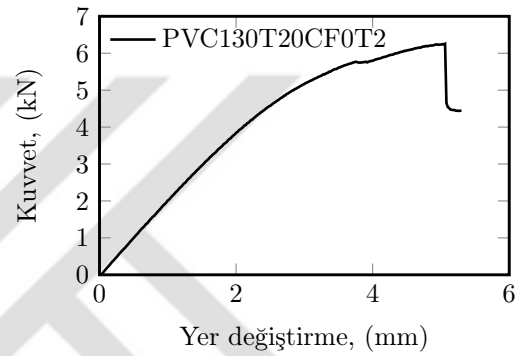
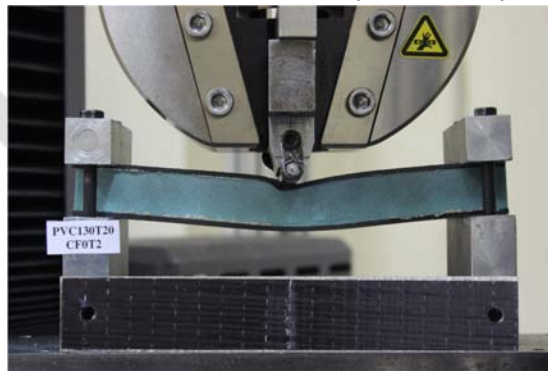
7.2. Sonuçlar

Kompozit sandviç kirişlerin düşük hızlı eğilme darbe davranışları önceki bölümlerde ayrıntılı irdelenmiştir. Darbe davranışına etki eden parametreler değerlendirilerek dayanımı en yüksek ve en düşük sandviç kiriş tipleri belirlenmiştir. Bu sayede kirişlerin taşıyabileceği en büyük ve en küçük yük aralığı belirlenebilecektir. Dayanımı en düşük sandviç kiriş özelliklerine en düşük köpük yoğunluklu (60 kg/m^3), ince plaka kalınlıklı (1 mm), en düşük yük taşıma kapasitesi olan fiber açılı kompozit plaka (90°) olarak karar verilmiştir. Dayanımı en büyük

Dayanımı en düşük sandviç kiriş



Dayanımı en yüksek sandviç kiriş

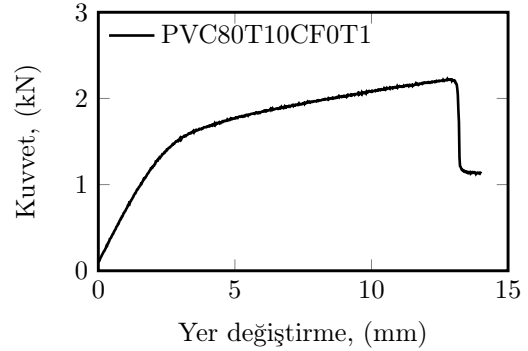
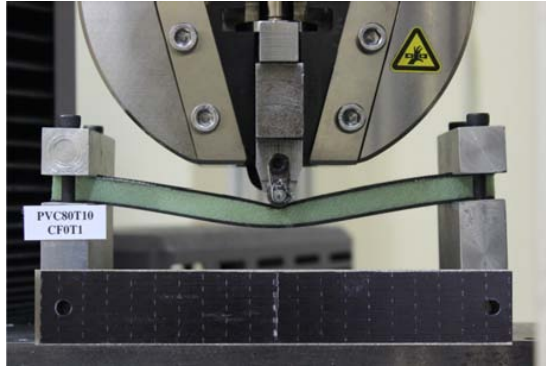


Şekil 7.1. Dayanımı düşük ve yüksek olan fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin sanki-statik yük altındaki kuvvet-yer değiştirme değişimleri ve test sonrası görüntüleri.

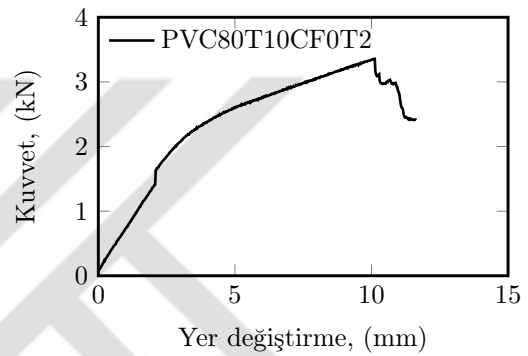
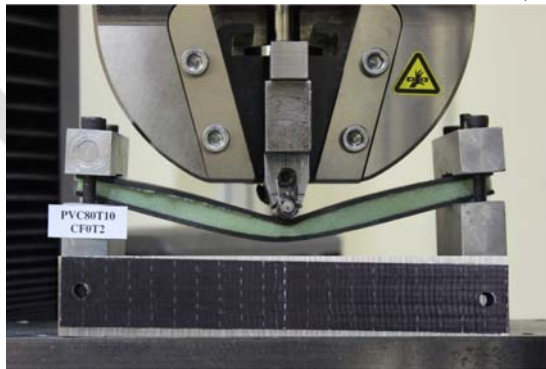
sandviç kiriş özellikleri (80 kg/m^3 köpük yoğunluğu, 2 mm plaka kalınlığı ve 0° fiber açısı) olarak belirlenmiştir. Sanki-statik eğilme testleri 0.02 mm/s basma hızı altında gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.1'de dayanımı düşük ve yüksek olan fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin sanki-statik yük altındaki kuvvet-yer değiştirme değişimleri ve test sonrası görüntüleri sunulmuştur. Dayanımı düşük olan sandviç kirişin sanki-statik eğilme yükü altında en büyük dayanım kuvvet değeri 0.3 kN iken bu kuvvete karşılık gelen yer değiştirme değeri 1.5 mm 'dir. Dayanımı yüksek olan sandviç kirişin taşıyabileceği en büyük kuvvet 6.2 kN iken bu kuvvete karşılık gelen yer değiştirme ise 5.0 mm 'dir. En yüksek dayanımlı sandviç kiriş oldukça rijit davranmıştır. Sandviç kirişin üst kompozit plakası kırılana kadar kiriş yük taşımaya devam etmiştir. Dayanımı düşük olan sandviç kiriş dış plaka malzemesi 90° fiber açısına sahip olması nedeniyle matris malzemesinden ve kirişin köpük malzemesinden kırıldığı görülmektedir. Dayanımı yüksek olan kirişte hasar belirgin oluşmamıştır.

Şekil 7.2 plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan kompozit sandviç kirişlerin sanki-statik yük

PVC80T10CF0T1 (Plaka kalınlığı=1 mm)



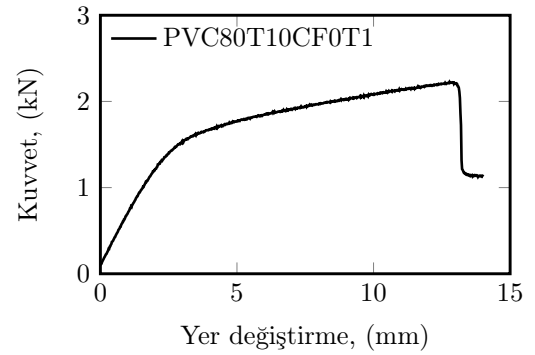
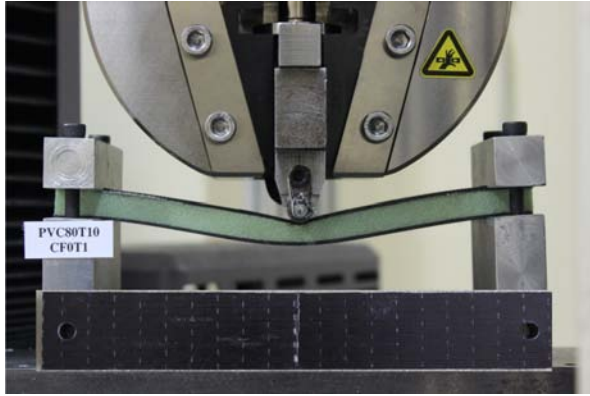
PVC80T10CF0T2 (Plaka kalınlığı=2 mm)



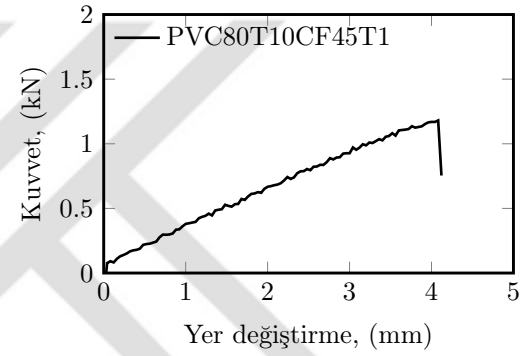
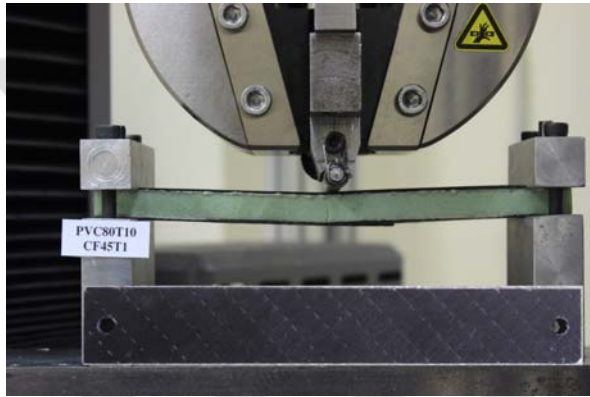
şekil 7.2. Plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin sanki-statik yük altında kuvvet-yer değiştirme değişimleri ve test sonrası görüntüleri.

altında kuvvet-yer değiştirme değişimlerini ve test sonrası görüntülerini vermektedir. Eğilme davranışına etki eden bir önemli parametre de plaka kalınlığıdır. Kalınlığı 1 mm olan kompozit plaka 4 tabakadan oluşurken, 2 mm olan kompozit plaka 8 tabakadan (tek yönlü, fiber açısı=0°) oluşmaktadır. Eğilme testleri, 0.02 mm/s basma hızında gerçekteştirilmiştir. 1 mm plaka kalınlığına sahip kirişin taşıdığı tepe kuvvet değeri 2.2 kN iken bu kuvvete karşılık gelen yer değiştirme değeri 12.7 mm'dir. Plaka kalınlığı 2 mm olan kirişte ise taşınabilen en büyük kuvvet değeri 3.3 kN ve tekabül eden yer değiştirme değeri 10.1 mm'dir. Plaka kalınlığının artması ile en büyük taşınabilen kuvvet değerlerinde yaklaşık 1 kN'luk artış olmaktadır. Yer değiştirme değerleri birbirine yakın olsada düşük plaka kalınlıklı kirişte daha yüksektir. Bu durum kirişin eğilme rijitliği ile ilgilidir.

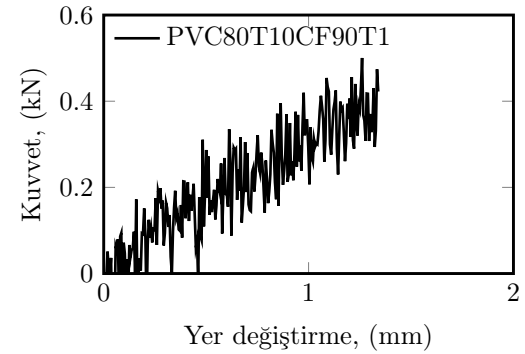
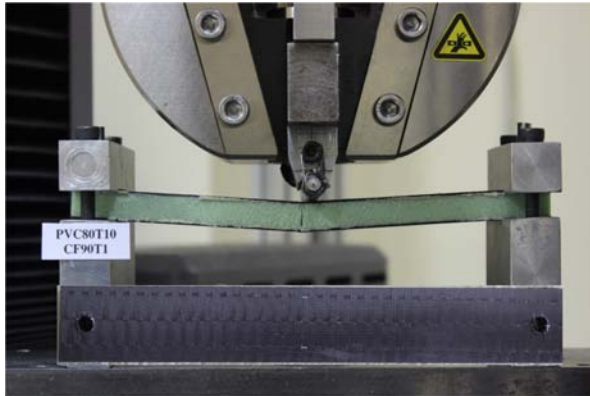
PVC80T10CF0T1 (Fiber açısı=0°)



PVC80T10CF45T1 (Fiber açısı=45°)



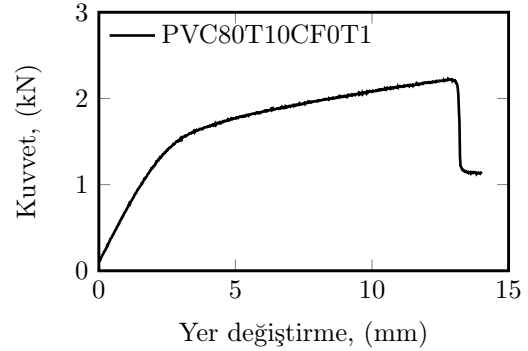
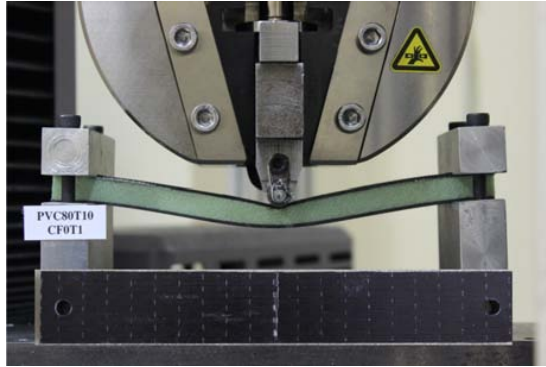
PVC80T10CF90T1 (Fiber açısı=90°)



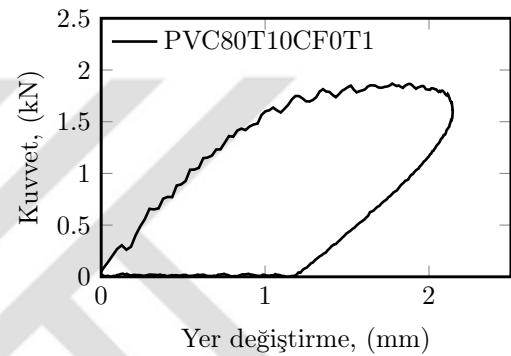
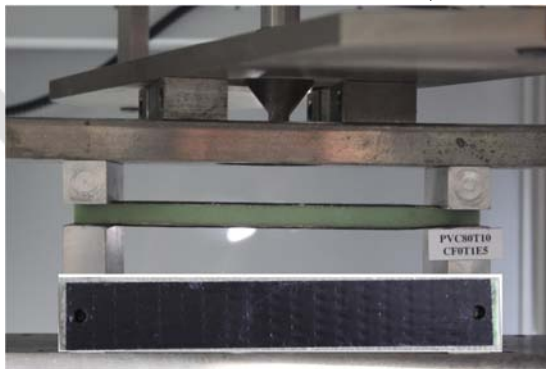
Şekil 7.3. Fiber açısı 0°, 45° ve 90° olan fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin sanki-statik yük altındaki kuvvet-yer değiştirme değişimleri ve test sonrası görüntüleri.

Şekil 7.3'de farklı fiber açılara sahip kompozit kirişlerin sanki-statik yük altında kuvvet-yer değiştirme değişimleri ve test sonrası görüntüleri yer almaktadır. Köpük yoğunluğu 80 kg/m³, kalınlığı 10 mm olan sandviç kirişlerin kompozit plakalarının fiber açıları 0°, 45° ve 90°'dir. Eğilme testleri 0.02 mm/s kafa hızı altında yapılmıştır. Fiber açısı 0°, 45° ve 90° olan kirişlerde meydana gelen en büyük kuvvet değerleri sırası ile 2.2, 1.2 ve 0.5 kN ve tekabül eden yer değiştirme değerleri ise 12.7, 4.1 ve 1.3

PVC80T10CF0T1 (Basma hızı= 0.02 mm/s)



PVC80T10CF0T1 (Darbe hızı= 1.37 m/s (1370 mm/s))

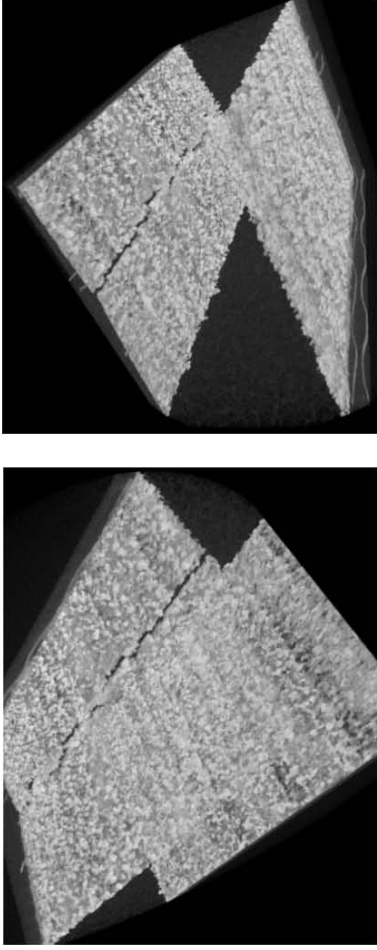


Şekil 7.4. Fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin sanki-statik ve dinamik yük altındaki kuvvet-yer değiştirme değişimleri ve test sonrası görüntüleri.

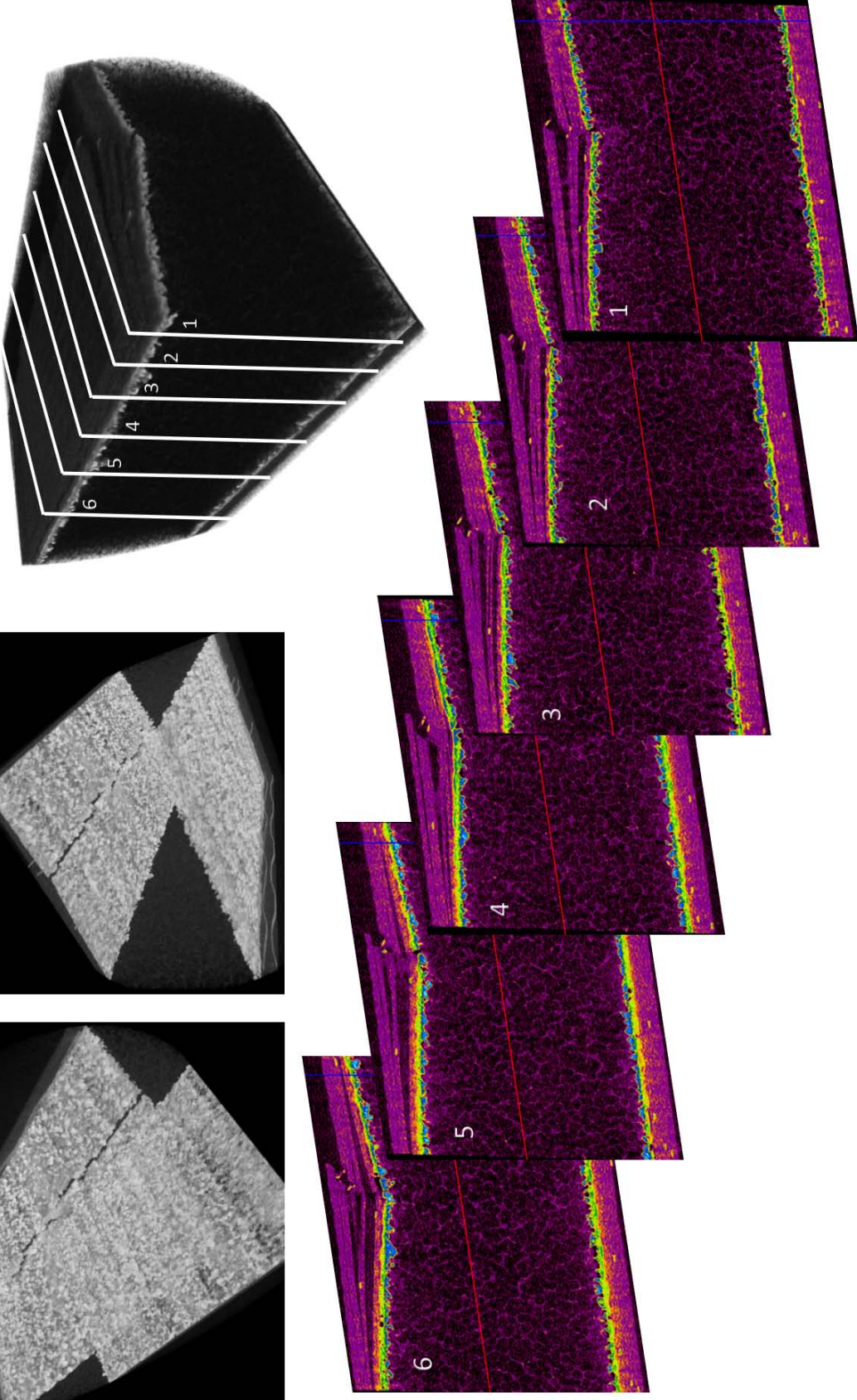
mm'dir. Fiber açısı arttıkça kuvvet ve yer değiştirme değerleri düşmektedir. Fiber açısı 90° olan kirişin köpük ve plaka malzemesinden kırıldığı görülmektedir. 90°'lik fiber açılı kirişin dayanımının düşük olması nedeni ile darbe testleri yapılamamıştır. Ancak sanki-statik eğilme testine maruz bırakılarak taşıyabileceği yük kapasitesi belirlenebilmiştir.

Şekil 7.4'de fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin sanki-statik ve dinamik yük altındaki kuvvet-yer değiştirme değişimleri ve test sonrası görüntüleri karşılaştırılmaktadır. Bu kiriş 80 kg/m³ yoğunluklu ve 10 mm kalınlıklı köpük, 0° fiber açısına sahip karbon fiber takviyeli kompozit plakadan oluşmaktadır. Sanki-statik eğilme testinin basma hızı 0.02 mm/s iken dinamik yüklemedeki darbe hızı 1.37 m/s (1370 mm/s)'dir. Sanki-statik eğilme testi altında sandviç kirişte meydana gelen en büyük kuvvet 2.2 kN, tekabül eden yer değiştirme değeri ise 12.7 mm'dir. Dinamik yüklemde ortaya çıkan en büyük temas kuvveti 1.8 kN iken, tekabül eden yer değiştirme değeri 2.1 mm'dir. Statik yükleme altında sandviç kirişte daha büyük kuvvet ve yer değiştirmeler ortaya çıkmıştır.

Alt ve üst yapıştırıcı tabakaları

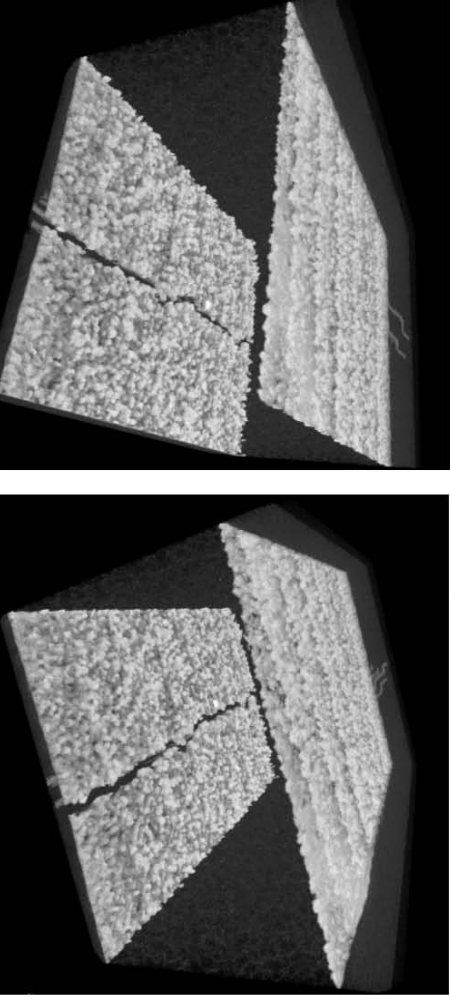


Sandviç kirişin orta bölgesi ve kesit sırası

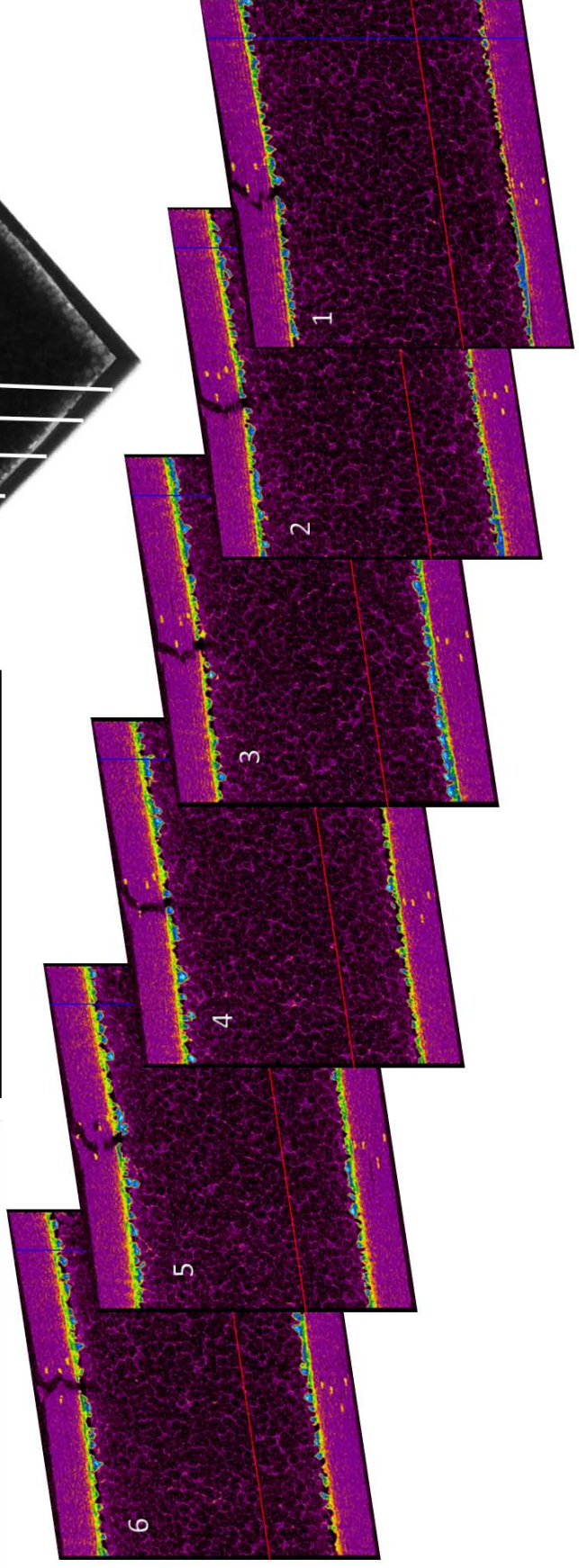
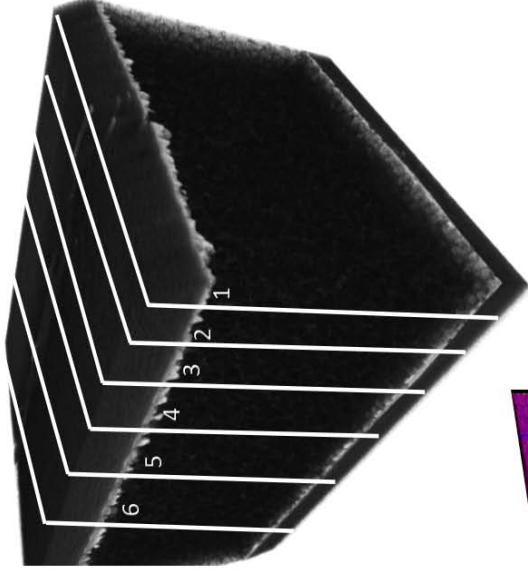


Şekil 7.5. Fiber takiyeli kompozit sandviç kirişin 20 J darbe enerjisinde darbe sonrası Mikro-Ct analizi, alt ve üst yapıştırıcı katmanları ve orta bölge kesit görüntüleri.

Alt ve üst yapıştırıcı tabakaları



Sandviç kirişim orta bölgesi ve kesit sırası



Şekil 7.6. Fiber takiyeli kompozit sandviç kirişim sanki-statik yük altındaki test sonrası Mikro-Ct analizi, alt ve üst yapıştırıcı tabakaları ve orta bölge kesit görüntüleri.

Şekil 7.5 ve 7.6 sırasıyla fiber takviyeli kompozit sandviç kirişin 20 J darbe enerjisinde darbe testi sonrası ve sanki-statik yük altında eğilme testi sonrası Mikro-Ct analizi, yapıştırıcı tabakalarının ve kirişin kesit görüntüleri verilmiştir. Sanki-statik eğilme, (yükün uygulanma hızı) hasar oluşum biçimini önemli derecede etkilemiştir. Darbe testi sonrasında fiber kırılmaları ile birlikte tabakalar arası ayrılmalar meydana gelmiş ve bu ayrılmalar ilerlemiştir. Ancak, sanki-statik yük altındaki eğilme testinde ayrılmalar meydana gelmemiştir. Fiber kırıkları daha belirgin bir şekilde gözükmemektedir. Gevrek bir kırılma meydana gelmiştir. Yapıştırıcı tabakaları incelendiğinde ise, darbe testine maruz kalan kirişin üst yapıştırıcı tabakasında çatlak oluşmuş ve hasar meydana gelmiştir. Sanki-statik eğilme testine maruz kalan numunede de üst yapıştırıcı tabakasında hasar meydana gelmiştir. Ancak daha fazla yapıştırıcı tabakasının hasara uğradığı ve hasarın arttığı gözlemlenmektedir.

Statik ve dinamik yükler altında aynı sandviç kirişlerin hasar davranışı, yük taşıma kabiliyetleri farklıdır. Bu nedenle dinamik yük taşıması arzu edilen kirişlerin mümkün olduğunca darbe enerjisini sönmüleyebilecek tarzda tasarlanması gerekmektedir. Bu tedbir kompozit dış destek plakalarının daha az enerji iletilerek, enerjinin çoğu köpük malzemesi tarafından sönmülenerek, yapı bütünlüğünü korumalarına imkan tanıyacaktır.

8. BÖLÜM

TARTIŞMA SONUÇ ve ÖNERİLER

8.1. Sonuç ve Yorumlar

Bu tez çalışmasında, köpük çekirdekli kompozit sandviç kirişlerin eğilme darbe davranışı sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Temel parametreler: sandviç kirişlerin dış plaka malzemesi, kompozit dış plakalarının kalınlığı, kompozit yüzey plakalarının fiber açısı, sandviç kirişlerin çekirdek köpük malzemesi yoğunluğu, köpük malzemesi kalınlığı ve darbe hızıdır. Bütün parametreler kendi değişim aralığında analiz edilerek sayısal ve deneysel sonuçla kıyaslanmıştır. Bu parametrelerin özellikle darbe davranışlarına kirişlerin etkileri araştırılmıştır.

Fiber takviyeli kompozit plakalar, vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Çekirdek malzemesi farklı yoğunluk ve kalınlıklarda PVC köpük malzemesidir. Köpük malzemesi, yüzey plakalarına çift fazlı endüstriyel yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmıştır. Eğilme darbe testleri üç farklı enerji seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Darbe testleri sonrası Mikro-Ct analizleri yapılarak, sandviç kirişlerin iç yapısı, hasar oluşumu ve gelişimi, yapıştırıcı tabakalarında hasarlar araştırılmıştır. Sayısal sonlu eleman analizlerinde fiber takviyeli kompozit plakalar katı elemanlar kullanılarak, kompozit plakaların elastik davranışı, üç boyutlu ortotropik ortotropik malzeme davranışı ile üç boyutlu etkin hasar kriterleri hazırlanan kullanıcı tanımlı malzeme modeli (VUMAT) ile kompozit malzemenin hasar davranışı modellenmiştir. Fortran dilinde hazırlanan altprogramlama ABAQUS® yazılımına uyarlanmıştır. Kompozit malzemedeki yerel yük taşıma kabiliyetinin azalışı, oluşturulan bir elastik bozunum modeli ile sayısal modele aktarılmıştır. Analizlerde yapıştırıcı tabakası için kohezif bölge modeli uyarlanmıştır. Köpük malzemesinin elastik ve plastik davranışı iki

farklı malzeme modeli ile ve hasar davranışı sünek ve kayma hasar modeller değerlendirilmiştir. Numune üretiminden sonra darbe testleri yapılmış ve sonuçlar sayısal analizlerin sonuçları ile mukayese edilmiştir. Kompozit sandviç kirişlerin düşük hızlı eğilme darbe davranışı temas kuvveti-zaman, kinetik enerji-zaman, temas kuvveti-yer değiştirme değişimleri ve hasar tipine göre hasar bölgelerinin toplam alanları açısından irdelenmiştir. Sayısal modelde kompozit katmanların herbirinde farklı hasar kriterlerine göre meydana gelen hasar alanlarının oluşumu ve toplam hasar alanları görüntü işleme yöntemi ile hesaplanmış ve mevcut parametrelerin kirişin darbe davranışına olan etkisi araştırılmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Yüzey plaka malzemesi etkisi: Fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin düşük hızlı eğilme darbe davranışı, karbon fiber/epoksi ve alüminyum yüzey plakaları için 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde araştırılmıştır. Darbe enerjisi arttıkça temas kuvvetleri artmaktadır. Ancak, temas sürelerinde anlamlı bir değişim olmamıştır. En yüksek temas kuvveti, yüzey malzemesi karbon fiber takviyeli kompozit malzeme olan sandviç kirişlerde meydana gelmiştir. Yüzey malzemesi fiber takviyeli kompozit olan sandviç kirişlerde, darbe enerjisi arttıkça en büyük temas kuvvetlerindeki değişim oldukça küçüktür. Alüminyum sandviç kirişlerde, yüksek plastik deformasyonlar oluşurken, fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerde çok düşük kalıcı yer değiştirmeler oluşmuş daha elastik davranmışlardır. Fiberlerde oluşan kırılmalar, temas kuvvetlerinde ani düşüslere neden olmaktadır. Sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Kullanılan kompozit malzeme modeli, deneysel ile uyumlu sonuçlar vermiştir. Sayısal analizlerde elastik yer değiştirmeler daha fazla olması sandviç kirişlerin analizlerde daha elastik davrandığını göstermektedir. Deneysel sonuçlarda ise sandviç kirişlerin daha fazla kalıcı yer değiştirmeye sahip olduğu görülmektedir. Deneysel yer değiştirme verileri, düşük hızlı darbe test cihazı tarafından temas kuvveti ve zaman verilerine göre hesaplanarak elde edilmektedir. Metal dış yüzey plakalı sandviç kirişlerde deneysel ve sayısal sonuçlar daha uyumludur. Metal malzemenin kompozit malzemelere göre iyi plastik deformasyon kabiliyeti sergilemesinden dolayı deneysel ve sayısal sonuçlar daha uyumludur. Sayısal

analizlerde malzemenin plastik lineer olmayan davranışı dikkate alınmıştır. Ancak kompozitler elastik modellenmiştir. Analizlerde hasar oluşumu ve gelişimi altı farklı hasar kriteri ile takip edilmiştir. Analizlerden en etkin üç hasar kriteri; fiber çekme ve matris çekme ve delaminasyon hasar kriterleri olarak tespit edilmiş ve görüntü işleme yöntemi ile hasar alanları hesaplanmıştır. Plakalarda matris çekme hasar kriterine göre en geniş hasar alanları oluşmuştur. Karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kiriş ve alüminyum sandviç kiriş benzer enerji sönümleme yetenekleri sergilemişlerdir. Ancak alüminyum sandviç kirişler, plastik deformasyona uğrayarak enerji sönümlerken fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerde, yüzey malzemesinde meydana gelen ilave kalıcı hasarlar sonucu enerji sönümlenmiştir. Fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin çekemeye maruz kalan bölgelerinde en büyük hasar alanları oluşmuştur. Darbe enerjisi arttıkça, hasar alanlarında artış olmaktadır. Darbe testleri sonrası, en yüksek darbe enerjilerine maruz kalan sandviç kirişlerin orta bölgesinin Mikro-Ct taraması yapılarak kirişlerin iç yapısı ve hasar oluşumları incelenmiştir. Analizlerin belirlediği karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişin üst plakasındaki fiber kırılması ve delaminasyonlarını Mikro-Ct analizleri doğrulamıştır.

- Yüzey plakası kalınlığı etkisi: Fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin düşük hızlı eğilme darbe davranışına yüzey plakası kalınlığının etkisi araştırılmıştır. Karbon fiber takviyeli, tek yönlü, fiber açısı 0° olan yüzey plakalarının kalınlığı 1 (4 tabaka) ve 2 mm (8 tabaka) olarak seçilmiştir. Plaka kalınlığı artışı darbe davranışını tamamen değiştirmiştir. Yapının eğilme rijitliği artmıştır. Plaka kalınlığının artışı ile temas kuvvetleri artmıştır, temas süreleri ise kısalmıştır. Plaka kalınlığı 2 mm olan sandviç kirişler oldukça düzgün değişimler sergilenmiştir. Fiber kırılmaları sadece 20 J darbe enerjisinde gerçekleşmiştir. Sayısal ve deneysel temas kuvvetleri arasında belirgin bir uyum tespit edilmiştir. Plaka kalınlığı ince olan kompozit sandviç kiriş daha fazla hasara uğrayarak, kalın yüzey plakasına sahip olan sandviç kirişten daha fazla enerji sönümlenmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasında farklılıklar bulunmaktadır. Şöyle ki, sayısal analizler daha elastik davrananan yapılara işaret etmiştir. Plaka kalınlığının darbe davranışına etkisi kirişe yapılan iş cinsinden irdelenmiştir. Deneysel

sonuçlara göre kalıcı yer değiştirmeler plaka kalınlığı arttıkça azalmaktadır. Yüzey plaka kalınlığının artması kompozit plakalardaki hasarları ve kalıcı çökmeleri engellemiştir. Yüzey malzemesi 2 mm olan sandviç kirişin 20 J darbe enerjisinde çekirdek malzemesinde kırılmalar meydana gelmiştir. Bu durum sayısal modelde görülmemiştir. Deney numunesi sayısal modelde tahmin edilenden daha fazla rijit davranmıştır. Analizlerde plaka kalınlığı kalın olan sandviç kirişte daha geniş hasar alanları oluşmaktadır. Ancak hasar indeksleri oldukça düşüktür. Yüzey plaka kalınlığı 1 ve 2 mm olan sandviç kirişlerin hasar mekanizmaları benzerdir. 20 J darbe enerjisinde 2 mm plaka kalınlıklı sandviç kirişin üst yapıştırıcı tabakasında yüksek hasar oluşmuştur. 1 mm plaka kalınlıklı sandviç kiriş, 2 mm plaka kalınlıklı sandviç kirişten daha elastik davranmıştır ve hasar oluşumunu geciktirmiştir. 2 mm plaka kalınlığına sahip sandviç kirişlerin analizlerinde eleman şekil bozulmaları ile karşılaşmış engel olmak için eleman şeklini düzelteren adaptif eleman algoritması uyarlanmıştır. Ancak bu analiz sürelerini oldukça uzatmıştır. Yüzey plaka kalınlığı 1 mm olan tek yönlü (fiber açısı=0°) karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kiriş 20 J darbe enerjisinde darbe testi sonrası Mikro-Ct analizi ile yapıştırıcı tabakaları ve kiriş kesitlerinin görüntüleri elde edilmiştir. Sandviç kirişin darbeye maruz kalan orta bölgesi yüksek hızlı testere ile kesilerek Mikro-Ct taraması yapılmıştır. Tarama sonucunda üç eksen de kesit görüntülerini incelemek mümkün olmuştur. Sandviç kirişin darbeye maruz kalan bölgesi boyunca ayrıntılı kesit görüntüleri alınmıştır. Bu görüntülerden darbe sonrası kompozit malzemedeki kırılmalar ve ayrılmalar açıkça tespit etmek mümkün olmuştur. 4 tabakadan oluşan kompozit plakada kesitler boyunca tabakalararası ayrılmalar gözlenmiştir. Alt plakada hasar meydana gelmemiş ve köpük malzemesinde kırılmalar olmamıştır. Tarama sonuçları sonrasında element analizi yapılmış ve sandviç kirişin malzemeleri ayrıştırılmıştır. Bu sayede yapıştırıcı tabakasının durumu görüntülenebilmiştir. Üst yapıştırıcı tabakasında hasar meydana geldiği görülmüştür. Orta bölgede çatlak oluşmuş ve ilerlemiştir. Alt yapıştırıcı tabakasında hasar oluşmamıştır. Tarama sonuçları, yapışma olayının ne kadar düzgün gerçekleştiği hakkında bilgi vermektedir. Plaka kalınlığının artışı darbe davranışını önemli derecede etkilemiştir. Bu durum kesit görüntülerinde de belirgin olarak ortaya çıkmıştır. Kompozit plakanın üst

katmanlarında ayrılmalar olurken fiber kırılmaları olmamıştır. Sandviç kirişin ön kesitinden arkaya doğru gidildikçe, hasar davranışının değiştiği görülmektedir. Alt plakada ve köpük malzemesinde hasar ve kırılma meydana gelmemiştir. Yapıştırıcı tabakalarında hasar oluşmadığı ve düzgün bir yapışma olayı gerçekleştiği görülmüştür.

- Kompozit yüzey plakasının fiber açısı etkisi: Karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin düşük hızlı eğilme darbe davranışına fiber açısının etkisi ayrıca araştırılmıştır. Tek yönlü 0° , 45° ve 90° fiber açıları için 5, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde temas kuvveti-zaman, kinetik enerji-zaman ve temas kuvveti-yer değiştirme değişimleri irdelenmiştir. Darbe deneylerinde kirişler, darbe yüklerine karşı oldukça zayıf kalmıştır. Bu açıdan mukavemeti en yüksek olan kiriş yapısı seçilmiş ve darbe davranışına fiber açısı değişimi irdelenmiştir. 0° fiber açısına sahip kirişler için darbe enerjisi arttıkça, en büyük temas kuvvetleri arttırmıştır. Temas süreleri aynı kalmıştır. Sayısal ve deneysel temas kuvveti-zaman değişimlerinde iyi bir uyum vardır. 20 J darbe enerjisi için temas kuvveti değişiminde tepe noktasındaki ani düşüş sayısal modelde de tespit edilmiştir. 45° fiber açısına sahip kirişte en büyük temas kuvvetleri yarı seviyeye inmiştir. Eğrilerden temastan itibaren kırılmaların başladığı anlaşılmaktadır ve bu nedenle temas süreleri uzamıştır. Sayısal ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum mevcuttur. 90° fiber açılı sandviç kirişlerde, en büyük temas kuvvetlerinin yaklaşık 4 kat azaldığı, kırılmaların ilk temastan itibaren başladığı görülmektedir. 0° fiber açılı plakalara sahip sandviç kiriş darbe enerjisinin yarısını sönmülemiştir. 45° fiber açılı plakaya sahip kirişlerde darbe enerjisinin tümü sönmülenmiştir. 90° fiber açılı sandviç kirişlerin yaklaşık 10 J enerji seviyesinde tamamen hasara uğradığı ve koptuğu belirlendi. Temas kuvveti-yer değiştirme grafiklerinin altında kalan alanlardan hesaplanan kirişlerin bünyesinde yapılan sayısal ve deneysel iş değerleri benzerdir. Fiber açısı sandviç kirişin darbe davranışını etkilemiştir. 0° fiber açılı sandviç kirişte 5 J darbe enerjisinde üst plakada kırılma olmazken, 10 ve 20 J darbe enerjilerinde üst plakalarda kırılmalar mevcuttur. Köpük malzemesinde hasar ve belirgin yer değiştirme meydana gelmemiştir. 45° fiber açısına sahip kirişlerin darbe testi sonrası üst

plakasının orta bölgelerinde hasara rastlanılmamıştır. Ancak alt plakalar kırılarak hasar köpük malzemesine geçmiş ve fiber yönünde ilerleyen çatlaklar meydana gelmiştir. Sayısal model çatlakları ve kırılmaları tahmin edebilmiştir. Ancak sayısal modelde hasar üst plakadan ve köpük malzemesine nüfus ederek devam etmiştir. Köpük malzemesinin alt bölgelerde hasara uğradığı görülmektedir. Hasarlar fiber doğrultularında meydana gelmiştir. Numunelerde kırılmaların alt plakada başlaması ve köpük malzemesinin içinde ilerlemesi yapının eğilmeden dolayı meydana gelen çekme yüküne karşı bu bölgelerde zayıf olması ile ilgilidir. 90° fiber açılı sandviç kirişlerde, 5 J darbe enerjisinde numune belirgin hasara uğramış ancak tamamen kırılmamıştır. Üst plaka kırılmazken alt plaka ve köpük malzemesi tamamen kırılmıştır. Sayısal modelde hasar üst bölgede başlamıştır, pimler civarında hasarlar ve kırıklar meydana gelmiştir. Sayısal modelde hasar üst bölgede başlamıştır. 10 ve 20 J darbe enerjisinde sandviç kiriş numuneler tamamen kırılmıştır. Sayısal modelde köpükte ilk hasar uğramaya başlamış, fiber doğrultusunda ilerlemiştir. Pim civarlarında hasar meydana gelmiştir. Dayanımı en yüksek olan 0° fiber açılı kiriş iken, 90° fiber açılı kiriş dayanımı en düşük olan sandviç kiriş olmuştur. Yapıştırıcı tabakalarında oldukça fazla hasar alanları oluşmuştur. Mikro-Ct taramaları sonucunda, 0° fiber açılı kirişte üst yapıştırıcı tabakaları darbe ucu eksenine boyunca kırılmış ve hasara uğramıştır. Fiber açısı 45° olan sandviç kirişlerde hasar mekanizması tamamen değişmiştir. Üst plakada hasar oluşmazken, alt plakada fiber doğrultusunda kiriş kırılmıştır. Alt kompozit plaka matris malzemesinden kırılmıştır. Hasar, yapıştırıcı tabakası ve köpük malzemesine doğru ilerlemiştir. Bu durum yapıştırıcı tabakasında daha açık görülmektedir. Alt yapıştırıcı tabakası fiber doğrultusunda kırılmıştır. Üst yapıştırıcı tabakasında ise hasar oluşmamıştır. Fiber açısı 90° olan sandviç kirişin 20 J darbe enerjisinde sandviç kirişler tamamen kırılmıştır. Kesit görüntülerinde, fiber doğrultusunda kompozit plakaların kırıldığı, yapıştırıcı tabakası ve köpük malzemesinin kırıldığı görülmektedir. Kompozit plakalar matris malzemesinden hasara uğramıştır. Yapıştırıcı tabakaları incelendiğinde alt ve üst yapıştırıcı tabakalarının kırıldığı anlaşılmaktadır.

- Köpük yoğunluğu etkisi: Karbon fiber takviyeli kompozit sandviç kirişlerin

düşük hızlı eğilme darbe davranışı farklı köpük yoğunlukları için araştırılmıştır. PVC köpük malzemesine sahip kirişlerde üç farklı köpük yoğunluğu (60, 80 ve 130 kg/m^3) kullanılmıştır. Köpük yoğunluğu arttıkça, temas kuvvetleri artmakta, fakat temas süreleri aynı kalmaktadır. İlk temastan sonra kirişlerde hasar meydana gelmiştir ve temas kuvvetleri daha fazla yükselmemiştir. Sayısal ve deneysel temas kuvveti değişimleri oldukça uyumludur. En düşük köpük yoğunluğuna sahip sandviç kirişler daha fazla enerji sönümlenmiştir. Bu durum malzemelerde meydana gelen hasarlar ile ilgilidir. En fazla hasar düşük köpük yoğunluğuna sahip kirişlerde meydana gelmiştir ve enerji bu şekilde sönümlenmiştir. Deneysel temas kuvveti-yer değiştirme değişimlerinde kalıcı çökmeler belirgin iken sayısal modelde daha az belirgindir. Sayısal model, deneysel sonuçlara göre daha elastik davranmıştır. 60 kg/m^3 köpük yoğunluğuna sahip sandviç kirişin 20 J darbe enerjisinde, çekirdek malzemesinde hasarlar ve çatlaklar oluşmuştur. Oluşan kalıcı hasar geometrisi simetriktir. Diğer köpük yoğunluklu sandviç kirişlerin üst plakalarında fiber kırılmaları oluşmuştur. Köpük yoğunluğu arttıkça fiber ve matris çekme hasar alanları azalmaktadır. Darbe enerjisinin artmasıyla hasar alanlarında da artış olmaktadır. Darbe sonrası kirişlerin Mikro-Ct kesit görüntüleri değerlendirildiğinde, köpük yoğunluğu 60 kg/m^3 olan numunenin 20 J darbe enerjisinde çekirdek malzemesinde hasar olduğu görülmektedir. Bu nedenle kiriş rijitliğini yitirmiştir. Kirişin üst kompozit plakasında belirsiz fiber kırılmaları ve ayrılmaları görülmüştür. Köpük yoğunluğu 80 kg/m^3 olan numunenin üst kompozit plakasında fiber kırılmaları ve ayrılmalar daha belirgindir, ve köpük malzemesinde hasar oluşmamıştır. En yüksek köpük yoğunluğuna sahip kirişte ise fiber kırılmaları daha belirgin, ancak ayrılmalar daha azdır. Gevrek bir kırılma meydana gelmiştir. Köpük yoğunluğunun artışı yapıyı rijitleştirmiştir. En düşük köpük yoğunluğuna sahip sandviç kirişin yapıştırıcı tabakalarında hasar oluşmamıştır. Daha büyük köpük yoğunluğuna sahip sandviç kirişlerin üst yapıştırıcı tabakalarında çatlaklar ve hasar oluşmuştur.

- Köpük kalınlığı etkisi: 10 ve 20 mm köpük kalınlığına sahip sandviç kirişlerin düşük hızlı eğilme darbe davranışı araştırılmıştır. Köpük kalınlığı artışı ile temas

kuvvetleri artmıştır. Temas süreleri ise azalmıştır. Köpük kalınlığı kalın olan numunede sadece en yüksek enerji seviyesinde hasar oluşmuştur. İnce köpük kalınlıklı sandviç kirişlerde köpük daha fazla hasara uğrayarak daha fazla enerji sönümlemiştir. Köpük kalınlığının tesiri sayısal model ve deneysel sonuçlarla aynıdır. Sayısal modelin elastik davranışı köpük kalınlığı artışı ile azalmıştır. Darbe enerjisi arttıkça elastik yer değiştirmelerde en yüksek seviyeye erişmiştir. Sayısal ve deneysel en büyük temas kuvvetleri uyumludur. Köpük kalınlığının artması ile hasar alanları azalmıştır. En fazla hasar alanlarının matris çekme hasar kriteri ile üst plakalarda ortaya çıktığı belirlenmiştir. Alt plakalarda pim delikleri civarında delaminasyon hasarlarının oluştuğu görülmektedir. Mikro-Ct kesit görüntüleri köpük kalınlığı artışı ile hasarın azaldığına işaret etmiştir. Alt kompozit plakalarda kırılmalar ve ayrılmalar oluşmamıştır. Yapıştırıcı tabakaları irdelendiğinde üst yapıştırıcı tabakalarında her iki köpük kalınlıklı sandviç kiriş için çatlaklar ve hasarlar mevcuttur.

- Sanki-statik eğilme testi etkisi: Darbe dayanımı en yüksek ve düşük olan kirişler, farklı plaka kalınlığına sahip kirişler ve farklı fiber açısına sahip kirişler için statik eğilme yükü altında davranışları incelenmiştir. Statik eğilme testleri kirişler yük taşıma kabiliyetini kaybedince tamamlamıştır. Statik ve dinamik yük testleri aynı sınır şartları altında yapılmıştır. Dayanımı en düşük olan kiriş için 0.3 kN'luk en büyük basma kuvveti, dayanımı en büyük olan kiriş için 6 kN'luk en büyük basma kuvveti elde edilmiştir. En yüksek dayanımlı sandviç kiriş oldukça rijit davranmıştır. Sandviç kirişin üst kompozit plakası kırılana kadar kiriş yük taşımaya devam etmiştir. Dayanımı düşük olan sandviç kiriş yüzey plaka malzemesi 90° fiber açısına sahip olması nedeniyle matris malzemesinden kırılmıştır. Dayanımı düşük olan kirişin köpük malzemesinden ilaveten kırıldığı görülmektedir. 1 ve 2 mm plaka kalınlığına sahip sandviç kirişlerin ise statik yük altında en büyük temas kuvvetleri arasında 1 kN fark vardır ve kalın plakalı kirişte temas kuvveti daha yüksektir. Fiber açısı değişimi ise sandviç kirişin statik eğilme davranışı oldukça etkilemiştir. Farklı fiber açısına sahip kirişlerin basma kuvveti aralığı 0.4-2 kN arasındadır. Fiber açısı 90° olan kirişin plakaya ilaveten köpük malzemesinin kırıldığı görülmektedir. Sandviç kirişler, statik yük

altında daha yüksek basma kuvveti taşımıştır. Kuvvetin uygulanma hızı hasar davranışını belirgin etkilemektedir, statik testler bunu doğrulamaktadır. Darbe testleri sonrasında fiber kırılmaları ile birlikte tabakalar arası ayrılmalar meydana gelmiş ve bu ayrılmalar ilerlemiştir. Ancak, sanki-statik yük altında eğilme testinde ayrılmalar meydana gelmemiştir. Fiber kırıkları daha belirgin olmuştur. Gevrek bir kırılma meydana gelmiştir. Yapıştırıcı tabakaları incelendiğinde, darbe testinden sonra kirişin üst yapıştırıcı tabakasında çatlaklar oluşmuş ve hasar meydana gelmiştir. Statik eğilme testinde numunede yalnız üst yapıştırıcı tabakasında hasar meydana gelmiştir.



KAYNAKÇA

1. Crupi, V., Kara, E., Epasto, G., Guglielmino, E., ve Aykul, H., 2015. Prediction model for the impact response of glass fibre reinforced aluminium foam sandwiches, **International Journal of Impact Engineering**, **77**:97 – 107.
2. Zhang, J., Qin, Q., Xiang, C., Wang, Z., ve Wang, T., 2016. A theoretical study of low-velocity impact of geometrically asymmetric sandwich beams, **International Journal of Impact Engineering**, **96**:35 – 49.
3. Topac, O.T., Gozluclu, B., Gurses, E., ve Coker, D., 2017. Experimental and computational study of the damage process in CFRP composite beams under low-velocity impact, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, **92**:167 – 182.
4. Campbell, F.C., 2010. Structural Composite Materials, United States of America: ASM International.
5. Definition of Terms Relating to Adhesive, 1974. ASTM.
6. Stronge, W.J., 2000. Impact Mechanics, University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.
7. Chen, J.F., Morozov, E.V., ve Shankar, K., 2014. Simulating progressive failure of composite laminates including in-ply and delamination damage effects, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, **61**:185 – 200.
8. Long, S., Yao, X., ve Zhang, X., 2015. Delamination prediction in composite laminates under low-velocity impact, **Composite Structures**, **132**:290 – 298.
9. Singh, H., Namala, K.K., ve Mahajan, P., 2015. A damage evolution study of E-glass/epoxy composite under low velocity impact, **Composites Part B: Engineering**, **76**:235 – 248.

10. Chen, J., Morozov, E., ve Shankar, K., 2012. A combined elastoplastic damage model for progressive failure analysis of composite materials and structures, **Composite Structures**, **94**(12):3478 – 3489.
11. Cousigné, O., Moncayo, D., Coutellier, D., Camanho, P., ve Naceur, H., 2014. Numerical modeling of nonlinearity, plasticity and damage in CFRP-woven composites for crash simulations, **Composite Structures**, **115**:75 – 88.
12. Zhang, J. ve Zhang, X., 2015. An efficient approach for predicting low-velocity impact force and damage in composite laminates, **Composite Structures**, **130**:85 – 94.
13. Liu, P., Liao, B., Jia, L., ve Peng, X., 2016. Finite element analysis of dynamic progressive failure of carbon fiber composite laminates under low velocity impact, **Composite Structures**, **149**:408 – 422.
14. Chen, Y., Hou, S., Fu, K., Han, X., ve Ye, L., 2017. Low-velocity impact response of composite sandwich structures: Modelling and experiment, **Composite Structures**, **168**:322 – 334.
15. Kim, D.H., Jung, K.H., Lee, I.G., Kim, H.J., ve Kim, H.S., 2017. Three-dimensional progressive failure modeling of glass fiber reinforced thermoplastic composites for impact simulation, **Composite Structures**, **176**:757 – 767.
16. Zhou, J., Hassan, M.Z., Guan, Z., ve Cantwell, W.J., 2012. The low velocity impact response of foam-based sandwich panels, **Composites Science and Technology**, **72**(14):1781 – 1790.
17. Cestino, E., Romeo, G., Piana, P., ve Danzi, F., 2016. Numerical/experimental evaluation of buckling behaviour and residual tensile strength of composite aerospace structures after low velocity impact, **Aerospace Science and Technology**, **54**:1 – 9.
18. Morada, G., Ouadday, R., Vadean, A., ve Boukhili, R., 2017. Low-velocity impact resistance of ATH/epoxy core sandwich composite panels:

- Experimental and numerical analyses, **Composites Part B: Engineering**, **114**:418 – 431.
19. Lopes, C., Camanho, P., Gürdal, Z., Maimí, P., ve González, E., 2009. Low-velocity impact damage on dispersed stacking sequence laminates. Part II: Numerical simulations, **Composites Science and Technology**, **69**(7):937 – 947.
 20. Mines, R. ve Jones, N., 1995. Approximate elastic-plastic analysis of the static and impact behaviour of polymer composite sandwich beams, **Composites**, **26**(12):803 – 814.
 21. Kawashita, L.F. ve Hallett, S.R., 2012. A crack tip tracking algorithm for cohesive interface element analysis of fatigue delamination propagation in composite materials, **International Journal of Solids and Structures**, **49**(21):2898 – 2913.
 22. Ivañez, I., Barbero, E., ve Sanchez-Saez, S., 2014. Analytical study of the low-velocity impact response of composite sandwich beams, **Composite Structures**, **111**:459 – 467.
 23. Harper, P.W., Sun, L., ve Hallett, S.R., 2012. A study on the influence of cohesive zone interface element strength parameters on mixed mode behaviour, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, **43**(4):722 – 734.
 24. Lorenzis, L.D., Fernando, D., ve Teng, J.G., 2013. Coupled mixed-mode cohesive zone modeling of interfacial debonding in simply supported plated beams, **International Journal of Solids and Structures**, **50**(14):2477 – 2494.
 25. Singh, H. ve Mahajan, P., 2015. Modeling damage induced plasticity for low velocity impact simulation of three dimensional fiber reinforced composite, **Composite Structures**, **131**:290 – 303.
 26. Liao, B. ve Liu, P., 2017. Finite element analysis of dynamic progressive failure of plastic composite laminates under low velocity impact, **Composite Structures**, **159**:567 – 578.

27. Yu, J., Wang, X., Wei, Z., ve Wang, E., 2003. Deformation and failure mechanism of dynamically loaded sandwich beams with aluminum-foam core, **International Journal of Impact Engineering**, **28**(3):331 – 347.
28. Tan, Z., Luo, H., Long, W., ve Han, X., 2013. Dynamic response of clamped sandwich beam with aluminium alloy foam core subjected to impact loading, **Composites Part B: Engineering**, **46**:39 – 45.
29. López-Aenlle, M. ve Pelayo, F., 2014. Dynamic effective thickness in laminated-glass beams and plates, **Composites Part B: Engineering**, **67**:332 – 347.
30. Wang, H., Ramakrishnan, K.R., ve Shankar, K., 2016. Experimental study of the medium velocity impact response of sandwich panels with different cores, **Materials & Design**, **99**:68 – 82.
31. Flores-Johnson, E. ve Li, Q., 2011. Experimental study of the indentation of sandwich panels with carbon fibre-reinforced polymer face sheets and polymeric foam core, **Composites Part B: Engineering**, **42**(5):1212 – 1219.
32. Manes, A., Gilioli, A., Sbarufatti, C., ve Giglio, M., 2013. Experimental and numerical investigations of low velocity impact on sandwich panels, **Composite Structures**, **99**:8 – 18.
33. Wang, J., Waas, A.M., ve Wang, H., 2013. Experimental and numerical study on the low-velocity impact behavior of foam-core sandwich panels, **Composite Structures**, **96**:298 – 311.
34. Quaresimin, M., Ricotta, M., Martello, L., ve Mian, S., 2013. Energy absorption in composite laminates under impact loading, **Composites Part B: Engineering**, **44**(1):133 – 140.
35. Mohmmmed, R., Zhang, F., Sun, B., ve Gu, B., 2013. Finite element analyses of low-velocity impact damage of foam sandwiched composites with different ply angles face sheets, **Materials & Design**, **47**:189 – 199.

36. Ivañez, I., Santiuste, C., ve Sanchez-Saez, S., 2010. FEM analysis of dynamic flexural behaviour of composite sandwich beams with foam core, **Composite Structures**, **92**(9):2285 – 2291.
37. Jun Li, B., 2010. Numerical Simulation and Optimization Design of Foam Core/Carbon Fiber Composite Sandwich Beams, **Applied Mechanics and Materials**, **29-32**:2256–2261.
38. Mines, R. ve Alias, A., 2002. Numerical simulation of the progressive collapse of polymer composite sandwich beams under static loading, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, **33**(1):11 – 26.
39. Fard, K.M., Khalili, S., Forooghi, S., ve Hosseini, M., 2014. Low velocity transverse impact response of a composite sandwich plate subjected to a rigid blunted cylindrical impactor, **Composites Part B: Engineering**, **63**:111 – 122.
40. Aktay, L., Johnson, A.F., ve Holzapfel, M., 2005. Prediction of impact damage on sandwich composite panels, **Computational Materials Science**, **32**(3):252 – 260.
41. Dawood, M., Taylor, E., Ballew, W., ve Rizkalla, S., 2010. Static and fatigue bending behavior of pultruded GFRP sandwich panels with through-thickness fiber insertions, **Composites Part B: Engineering**, **41**(5):363 – 374.
42. Yu, J., Wang, E., Li, J., ve Zheng, Z., 2008. Static and low-velocity impact behavior of sandwich beams with closed-cell aluminum-foam core in three-point bending, **International Journal of Impact Engineering**, **35**(8):885 – 894.
43. Zenkert, D., Shipsha, A., ve Persson, K., 2004. Static indentation and unloading response of sandwich beams, **Composites Part B: Engineering**, **35**(6):511 – 522, marine Composites.
44. Cai, D., Zhou, G., Wang, X., Li, C., ve Deng, J., 2017. Experimental investigation on mechanical properties of unidirectional and woven fabric

- glass/epoxy composites under off-axis tensile loading, **Polymer Testing**, **58**:142 – 152.
45. Tagarielli, V., Deshpande, V., ve Fleck, N., 2007. The dynamic response of composite sandwich beams to transverse impact, **International Journal of Solids and Structures**, **44**(7):2442 – 2457.
46. Jing, L., Wang, Z., Ning, J., ve Zhao, L., 2011. The dynamic response of sandwich beams with open-cell metal foam cores, **Composites Part B: Engineering**, **42**(1):1 – 10.
47. Zhou, J., Guan, Z., ve Cantwell, W., 2013. The impact response of graded foam sandwich structures, **Composite Structures**, **97**:370 – 377.
48. Zhang, J., Qin, Q., Han, X., ve Ai, W., 2016. The initial plastic failure of fully clamped geometrical asymmetric metal foam core sandwich beams, **Composites Part B: Engineering**, **87**:233 – 244.
49. Sisi, M.K., Shakeri, M., ve Sadighi, M., 2015. Dynamic response of composite laminated beams under asynchronous/repeated low-velocity impacts of multiple masses, **Composite Structures**, **132**:960 – 973.
50. Banghai, J., Zhibin, L., ve Fangyun, L., 2015. Failure mechanism of sandwich beams subjected to three-point bending, **Composite Structures**, **133**:739 – 745.
51. dong Xu, G., Yang, F., Zeng, T., Cheng, S., ve hai Wang, Z., 2016. Bending behavior of graded corrugated truss core composite sandwich beams, **Composite Structures**, **138**:342 – 351.
52. Bernard, L., Michon, G., Fatmi, R.E., ve Castanié, B., 2016. Static and dynamic analysis of bending–torsion coupling of a CFRP sandwich beam, **Composite Structures**, **145**:26 – 36.
53. Qin, Q., Xiang, C., Zhang, J., Wang, M., Wang, T., ve Poh, L., 2017. On low-velocity impact response of metal foam core sandwich beam: A dual beam model, **Composite Structures**, **176**:1039 – 1049.

54. Morada, G., Vadean, A., ve Boukhili, R., 2017. Failure mechanisms of a sandwich beam with an ATH/epoxy core under static and dynamic three-point bending, **Composite Structures**, **176**:281 – 293.
55. Ji, W. ve Waas, A.M., 2017. Dynamic failure of a sandwich structure subjected to an in-plane axial impact, **Composite Structures**, **180**:751 – 759.
56. Chen, Q., Linghu, T., Gao, Y., Wang, Z., Liu, Y., Du, R., ve Zhao, G., 2017. Mechanical properties in glass fiber PVC-foam sandwich structures from different chopped fiber interfacial reinforcement through vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) processing, **Composites Science and Technology**, **144**:202 – 207.
57. Sabah, S.A., Kueh, A., ve Al-Fasih, M., 2017. Comparative low-velocity impact behavior of bio-inspired and conventional sandwich composite beams, **Composites Science and Technology**, **149**:64 – 74.
58. Schneider, C., Kazemahvazi, S., Russell, B., Zenkert, D., ve Deshpande, V., 2016. Impact response of ductile self-reinforced composite corrugated sandwich beams, **Composites Part B: Engineering**, **99**:121 – 131.
59. Airoidi, A., Sala, G., Bettini, P., ve Baldi, A., 2013. An efficient approach for modeling interlaminar damage in composite laminates with explicit finite element codes, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, **32**(15):1075–1091.
60. Al-Shamary, A.K.J., Karakuzu, R., ve Özdemir, O., 2016. Low-velocity impact response of sandwich composites with different foam core configurations, **Journal of Sandwich Structures & Materials**, **18**(6):754–768.
61. El-Sisi, A.E.D.A., El-Emam, H.M., Salim, H.A., ve Sallam, H.E.D.M., 2015. Efficient 3D modeling of damage in composite materials, **Journal of Composite Materials**, **49**(7):817–828.
62. KAW, A.K., 2006. Mechanics of Composite Materials, Taylor & Francis Group, LLC, second edition.

63. ABAQUS/Explicit (Version 6.14), User's manual, Finite Element Software. Available from <http://www.simulia.com>.
64. Hashin, Z., 1980. Failure criteria for unidirectional fiber composites, **Journal of Applied Mechanics**, **47**(2):329–334.
65. Baldi, A., Airoidi, A., Crespi, M., Iavarone, P., ve Bettini, P., 2011. Modelling competitive delamination and debonding phenomena in composite T-Joints, **Procedia Engineering**, **10**:3483 – 3489.
66. Campilho, R., Banea, M., Neto, J., ve da Silva, L., 2013. Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer, **International Journal of Adhesion and Adhesives**, **44**:48 – 56.
67. ASTM E8 / E8M - 13a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
68. ASTM E9 - 09, Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature.
69. Carneiro, M.A.S. ve Campilho, R.D.S.G., 2017. Analysis of adhesively-bonded T-joints by experimentation and cohesive zone models, **Journal of Adhesion Science and Technology**, **31**(18):1998–2014.
70. Kapti, S., Sayman, O., Ozen, M., ve Benli, S., 2010. Experimental and numerical failure analysis of carbon/epoxy laminated composite joints under different conditions, **Materials & Design**, **31**(10):4933 – 4942.
71. MATLAB, Mathematical software, ver 2017a, The MathWorks. Available from: <http://www.mathworks.com>.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Umut ÇALIŞKAN
Uyruğu: Türkiye (T.C)
Doğum Tarihi ve Yeri: 19.06.1989 - AMASYA
Medeni Durum: Evli
e-mail: ucaliskan@erciyes.edu.tr
Yazışma Adresi: Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Sekreterliği

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü	2014
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü	2012
Lise	Havza Anadolu Lisesi, Samsun/Havza	2007

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2012-Halen	Erciyes Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Çalışkan, U., Apalak, M.K. (2017). Bending impact behaviour of sandwich beams with expanded polystyrene foam core: Analysis. *Journal of Sandwich Structures Materials*.
2. Çalışkan U., Ekici R., Apalak M. K. (2017). Effect of Composite Patch Geometry in Notched Plates Under Low Velocity Impact. *International Journal of Engineering Research and Development (IJERAD)*, 9(3), ss 113-124.
3. Çalışkan U., Apalak M. K., (2017). Fem Analyses Of Low Velocity Impact Behaviour Of Sandwich Panels With Eps Foam Core. *Journal of Thermal Engineering*, 3(6), ss 1544-1552.
4. Çalışkan U., Apalak M. K., (2017). Low velocity bending impact behavior of foam core sandwich beams: Experimental. *Composites Part B: Engineering*, 112, ss 158-175.