

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZLI
DARBE PERFORMANSINI GELİŞTİRMEYE
YÖNELİK YAPISAL PARAMETRELERİN
İNCELENMESİ**

Hüseyin Erdem YALKIN

Nisan, 2020

İZMİR

SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZLI DARBE PERFORMANSINI GELİŞTİRMEYE YÖNELİK YAPISAL PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı

Hüseyin Erdem YALKIN

Nisan, 2020

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

HÜSEYİN ERDEM YALKIN, tarafından **PROF.DR. RAMAZAN KARAKUZU** yönetiminde hazırlanan “**SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZLI DARBE PERFORMANSINI GELİŞTİRMEYE YÖNELİK YAPISAL PARAMETRELERİN İNCELENMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.


Prof.Dr. Ramazan KARAKUZU

Yönetici


Prof.Dr. Yusuf ARMAN

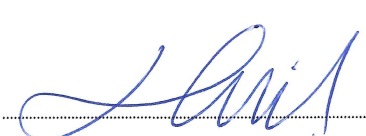
Tez İzleme Komitesi Üyesi


Doç. Dr. Tuba ALPYILDIZ

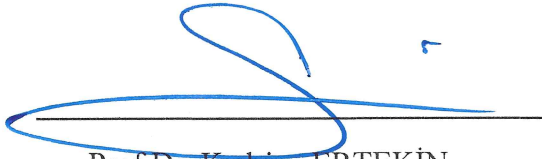
Tez İzleme Komitesi Üyesi


Prof. Dr. Yelb Pekbey

Jüri Üyesi


Prof. Dr. Mehmet Çevik

Jüri Üyesi


Prof.Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bana her zaman, her konuda yardımcı olan, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, sürekli destek olan tez danışmanım Sayın Prof.Dr. Ramazan KARAKUZU hocama çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamda yardımlarından dolayı Sayın Doç.Dr. Tuba ALPYILDIZ hocama ve Sayın Prof.Dr. Yusuf ARMAN hocama, makina mühendisliği mekanik anabilimdalı öğretim üyeleri ve araştırma görevlilerine, numune hazırlık aşamasında yardımcı olan kompozit laboratuvarı teknisyeni Canip DURAK’a teşekkür ederim. Bu tezin deneysel çalışmaları bursiyeri olduğum projede (Proje no: 213M603) doktora ders aşamasında gerçekleştirilmiştir. Katkıda bulunan TÜBİTAK’a teşekkür ederim.

Bana her zaman destek olan eşime, eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan destekte bulunan anneme, babama, ablama, ağabeyime ve üzerimde emeği olan herkese çok teşekkür ederim.

Hüseyin Erdem YALKIN

SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZLI DARBE PERFORMANSINI GELİŞTİRMEYE YÖNELİK YAPISAL PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

ÖZ

Bu çalışmada, sandviç kompozitlerin düşük hızlı darbe performansının artırılması amaçlanmıştır. Sandviç kompozitlerin, tabakalı kompozitlere göre eğilme rijitlikleri ve düşük hızlı darbe testinde absorbe ettiği enerji değerleri daha yüksektir. Ancak sandviç kompozitteki kabuk ve çekirdek malzemesi arasındaki yüksek dayanım farkından dolayı, birleşme arayüzeyinde yükleme anında ayrılma meydana gelebilmektedir. Sandviç kompozite çeşitli işlemler yapılarak düşük hızlı darbe testinde absorbe edeceği enerji değerinin artırılmasına ve delaminasyon alanının azaltılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır.

Sandviç kompozit yapılarda, iki çekirdekli hale getirme, epoksi kolonlar oluşturma, çekirdek dikiş işlemi, çekirdek ve kabukların birlikte dikiş işlemi uygulanmıştır. Bu kompozitlerin nümerik çalışma sonuçları ile deneysel çalışma sonuçları temas kuvveti - zaman eğrileri, temas kuvveti - çökme eğrileri ve absorbe edilen enerji değerleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Düşük hızlı darbe testinde vurucu kütlesi sabit tutulup, farklı enerjilerde düşük hızlı darbe testi yapılmıştır.

Sandviç kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışını etkileyecek çeşitli düzlem dışı takviye uygulamaları sayesinde, absorbe edilen enerji değerinde artış ve delaminasyon alanında azalış elde edilmiştir. Çekirdek dikiş işleminin absorbe edilen enerji değeri bakımından kabuk dikiş işlemine alternatif olabileceği tespit edilmiştir. LS-DYNA yazılımı kullanılarak yapılan sonlu elemanlar analizi sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve iyi bir uyum görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Tabakalı kompozit, sandviç kompozit, cam elyaf, PVC köpük, dikiş, düşük hızlı darbe, sonlu elemanlar metodu

INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL PARAMETERS AIMED TO IMPROVE LOW VELOCITY IMPACT PERFORMANCE OF SANDWICH COMPOSITES

ABSTRACT

In this study, it is aimed to increase the low velocity impact performance of sandwich composites. Sandwich composites have higher bending stiffness and absorbed energy values in low velocity impact test than laminated composites. However, due to the strength difference between facesheet and core material in the sandwich composite, delamination may occur in this interface. Studies have been carried out to increase the absorbed energy value and to reduce the delamination area by performing various modifications on sandwich composites in the low velocity impact.

The modifications were performed in the sandwich composite structures by using two-part core, forming epoxy columns in the core, stitching through the core, stitching the core and the facesheets together. The numerical results of composites were compared with experimental results according to the contact force - time curves, the contact force - deflection curves and absorbed energy values. In the low velocity impact test, the impactor mass was kept constant and the impact energy was obtained by changing the impactor velocity.

Due to the out of plane modifications, which will affect the low velocity impact behavior of sandwich composites, increase in the absorbed energy values and the decrease in the delamination areas were achieved. It has been determined that the core stitching process may be an alternative to the facesheet stitching process in terms of absorbed energy value. The finite element analysis results by using LS-DYNA software were compared with experimental results and a good agreement between them was observed.

Keywords: Laminated composites, sandwich composites, glass fiber, PVC foam, stitching, low velocity impact, finite element method

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
1.1 Kompozit Malzemeler	1
1.2 Sandviç Kompozitler	2
1.3 Kompozit Malzemelerin Avantajları	3
1.4 Kompozitlerin Malzemelerin Dezavantajları	4
1.5 Literatür Araştırması	5
BÖLÜM İKİ - DENEYSEL METOTLAR	10
2.1 Kompozit Üretim Yöntemleri.....	10
2.1.1 Kompozit Numune Üretimi	10
2.2 Darbe Çeşitleri.....	13
2.2.1 Düşük Hızlı Darbe	14
2.2.2 Darbe Enerjisi	16
2.2.3 Düşük Hızlı Darbede Hasar Modları	17
2.2.4 Sandviç Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe Davranışı	19
2.3 Çekirdek Malzemesi Testleri.....	20
2.3.1 Basma Testi.....	20
2.3.2 Çekme Testi	21
2.3.4 Kayma Testi	22
2.4 Sandviç Kompozit Kırılma Tokluğu Testleri	23

BÖLÜM ÜÇ - SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	26
3.1 Giriş	26
3.2 Modelin Tanımlanması.....	27
3.3 Kompozit Malzeme Modeli.....	29
3.4 Çekirdek Malzeme Modeli	31
3.5 Delaminasyon Modeli	32
 BÖLÜM DÖRT - SONUÇLAR VE TARTIŞMA	 35
4.1 Giriş	35
4.2 Tabakalı Kompozit Sonuçları.....	36
4.2 Sandviç Kompozit Sonuçları.....	42
4.2.1 Tek Çekirdekli Sandviç Kompozit (S).....	43
4.2.1 İki Çekirdekli Sandviç Kompozit (2S)	46
4.2.3 İki Çekirdekli Epoksi Kolonlu Sandviç Kompozit (2SEK).....	49
4.2.4 İki Çekirdekli Çekirdek Dikişli Sandviç Kompozit (2SCD)	51
4.2.5 İki Çekirdekli Kabuk Dikişli Sandviç Kompozit (2SKD).....	54
4.2.6 Absorbe Edilen Enerjilerin Karşılaştırılması	56
4.3 Gerilme Dağılımları	58
4.3.1 Kabuk Malzemesinde Meydana Gelen Gerilme Dağılımları	58
4.3.2 Çekirdek Malzemesinde Meydana Gelen Gerilme Dağılımları	62
4.4 Tabakalar Arası Ayrılma (Delaminasyon)	65
 BÖLÜM BEŞ - DEĞERLENDİRME	 74
 KAYNAKLAR	 76

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Sandviç malzeme şematik görünümü	2
Şekil 1.2 Sandviç malzeme ve I profil	3
Şekil 2.1 İki çekirdekli çekirdek dikişli sandviç kompozit (2SCD) ve iki çekirdekli kabuk dikişli sandviç kompozit (2SKD)	12
Şekil 2.2 Vakum infüzyon sistemi	13
Şekil 2.3 Ağırlık düşürme darbe testi cihazı	15
Şekil 2.4 Ağırlık düşürme darbe testi cihazında test öncesi numune yerleşimi.....	16
Şekil 2.5 Basma aparatı, test düzeneği ve numune	20
Şekil 2.6 Sandviç kompozit çekme aparatı ve test düzeneği	21
Şekil 2.7 Kayma aparatı, numune ve yer değiştirme ölçer	23
Şekil 2.8 SCB numunenin test esnasındaki görüntüsü.....	24
Şekil 2.9 SLB numunesi test esnasında görünümü	25
Şekil 3.1 Kompozit modellemede mertebe yaklaşımları	27
Şekil 3.2 Tabakalı kompozit için nümerik analiz modeli	28
Şekil 3.3 Sandviç kompozit için nümerik analiz modeli	28
Şekil 3.5 Gerilme - hacimsel şekil değiştirme eğrisi.....	32
Şekil 4.1 Absorbe edilen enerji ve darbe enerjisi eğrileri	37
Şekil 4.2 Deneysel ve nümerik temas kuvveti – zaman eğrileri	39
Şekil 4.3 Deneysel ve nümerik temas kuvveti – çökme eğrileri	39
Şekil 4.4 Deneysel ve nümerik çalışmaların delaminasyon görüntüleri	41
Şekil 4.5 S Numunesi 60J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri	44
Şekil 4.6 S Numunesi 65J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri	44
Şekil 4.7 S Numunesi 70J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri	45
Şekil 4.8 2S Numunesi 60J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri	47
Şekil 4.9 2S Numunesi 65J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri	47

Şekil 4.10 2S numunesi 70J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri	48
Şekil 4.11 2SEK Numunesi 60J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri.....	49
Şekil 4.12 2SEK Numunesi 65J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri.....	50
Şekil 4.13 2SEK Numunesi 70J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri.....	50
Şekil 4.14 2SCD Numunesi 65J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri.....	52
Şekil 4.15 2SCD Numunesi 70J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri.....	52
Şekil 4.16 2SCD Numunesi 75J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri.....	53
Şekil 4.17 2SKD Numunesi 65J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri.....	54
Şekil 4.18 2SKD Numunesi 70J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri.....	55
Şekil 4.19 2SKD Numunesi 75J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri.....	55
Şekil 4.20 Sandviç kompozit numunelerin 70J darbe enerjisinde absorbe ettikleri enerji değerleri.....	57
Şekil 4.21 0,75 ms ve 1,25 ms'de üst kabuktaki gerilme dağılımı	58
Şekil 4.22 2 ms ve 10 ms'de üst kabuktaki gerilme dağılımı	59
Şekil 4.23 2,5 ms ve 3 ms'de orta kabuktaki gerilme dağılımı.....	60
Şekil 4.24 3,5 ms ve 10 ms'de orta kabuktaki gerilme dağılımı.....	60
Şekil 4.25 3,5 ms ve 6 ms'de alt kabuktaki gerilme dağılımı	61
Şekil 4.26 7,25 ms ve 10 ms'de alt kabuktaki gerilme dağılımı	61
Şekil 4.27 Zaman göre üst çekirdekdeki gerilme dağılımı	63
Şekil 4.28 Zaman göre alt çekirdekdeki gerilme dağılımı	64
Şekil 4.29 S - Sandviç kompozitin düşük hızlı darbe testi sonrası ön ve arka yüzeyleri	65

Şekil 4.30 2S - İki çekirdekli sandviç kompozitin düşük hızlı darbe testi sonrası ön ve arka yüzeyleri	66
Şekil 4.31 2SEK - İki çekirdekli epoksi kolonlu sandviç kompozitin düşük hızlı darbe testi sonrası ön ve arka yüzeyleri	66
Şekil 4.30 2SCD - İki çekirdekli çekirdek dikişli sandviç kompozitin düşük hızlı darbe testi sonrası ön ve arka yüzeyleri	67
Şekil 4.31 2SKD - İki çekirdekli kabuk dikişli sandviç kompozitin düşük hızlı darbe testi sonrası ön ve arka yüzeyleri	68
Şekil 4.34 Numunelerin düşük hızlı darbe testi sonrası kesiti	69
Şekil 4.35 Deneysel ve nümerik olarak delaminasyon alanlarının karşılaştırılması..	71
Şekil 4.36 2S numunesinde çekirdek-kabuk ayrılma bölgesi	72
Şekil 4.37 2SEK numunesinde çekirdek-kabuk ayrılma bölgesi	72
Şekil 4.38 2SCD numunesinde çekirdek-kabuk ayrılma bölgesi.....	73
Şekil 4.39 2SKD numunesinde çekirdek-kabuk ayrılma bölgesi.....	73

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Üretilen kompozit numunelerin tanımları ve elyaf yönlenmeleri.....	11
Tablo 4.1 E-cam/epoksi mekanik özellikleri	35
Tablo 4.2 Sandviç kompozitin mekanik özellikleri	36
Tablo 4.3 Absorbe edilen enerji değerleri.....	39
Tablo 4.4 Tabakalı kompozit (T) pik temas kuvveti, çökme miktarı ve temas süresi değerleri.....	40
Tablo 4.5 Tek çekirdekli sandviç kompozit (S) absorbe edilen enerji değerleri, çökme miktarları ve temas süreleri karşılaştırması.....	45
Tablo 4.6 Tek çekirdekli sandviç (S) kompozit pik temas kuvvetleri	46
Tablo 4.7 İki çekirdekli sandviç kompozit (2S) absorbe edilen enerji değerleri, çökme miktarları ve temas süreleri karşılaştırması.....	48
Tablo 4.8 İki çekirdekli sandviç kompozit (2S) pik temas kuvvetleri	48
Tablo 4.9 İki çekirdekli epoksi kolonlu sandviç kompozit (2SEK) absorbe edilen enerji değerleri, çökme miktarları ve temas süreleri karşılaştırması.....	51
Tablo 4.10 İki çekirdekli epoksi kolonlu sandviç kompozit (2SEK) pik temas kuvvetleri.....	51
Tablo 4.11 İki çekirdekli, çekirdek dikişli sandviç kompozit (2SCD) absorbe edilen enerji değerleri, çökme miktarları ve temas süreleri karşılaştırması.....	53
Tablo 4.12 İki çekirdekli, çekirdek dikişli sandviç kompozit (2SCD) pik temas kuvvetleri.....	54
Tablo 4.13 İki çekirdekli kabuk dikişli sandviç kompozit (2SKD) absorbe edilen enerji değerleri, çökme miktarları ve temas süreleri karşılaştırması.....	56
Tablo 4.14 İki çekirdekli kabuk dikişli sandviç kompozit (2SKD) pik temas kuvvetleri	56

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler uzun yıllardır kullanılmasına rağmen ilk büyük ölçekli uygulaması, II. Dünya Savaşı sırasında askeri denizcilik uygulamalarıyla başlamıştır. Birçok avantajından dolayı kompozit malzemeler havacılık, otomotiv, denizcilik, spor malzemeleri, altyapı vb. alanlarda kullanımı hızla artmıştır.

Kompozit malzemeler genellikle takviye ve matris malzemelerinin makro düzeyde bir araya getirilmesiyle oluşan yeni üstün özelliklere sahip malzemeler olarak tanımlanabilir. Takviye malzemesi; sürekli elyaf, süreksiz elyaf, partikül şeklinde olabilir. Matris malzemeleri ise metaller, polimer veya seramikler olabilir. Polimer matris ile yapılan kompozitler çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bir kompozit yapı içindeki elyaf; yükü taşır, mukavemet, termal stabilite ve diğer yapısal özellikleri sağlar. Kullanılan elyaf türüne göre elektriksel iletkenlik veya yalıtım sağlayabilir. Elyaf, sürekli elyafdan üretilmiş kumaştan veya kısa doğranmış elyaftan oluşan mat gibi formlarda bulunabilir. Kısa doğranmış elyaftan oluşan kompozit ürün, sürekli elyaftan oluşan kompozit ürüne göre daha düşük mekanik özellikler verir. Uygulama tipine ve üretim yöntemine bağlı olarak elyaf formu seçilir.

Kompozit yapıdaki matris malzemesi ise; elyafı bir arada tutar ve elyafa yükü aktarır. Matris malzemesi sayesinde elyaf birbirinden izole olur ve böylece çatlağın ilerlemesini durdurabilir veya yavaşlatabilir. Matris malzemesi, iyi bir yüzey kalitesi sağlayabilir, takviye elyafını UV ışınlarına, kimyasallara ve aşınmaya karşı korunmasını sağlar. Kompozit ürünün sünekliği, darbe performansı vb. özellikleri matris malzemesine bağlı olarak değişebilir. Kompozit malzemede meydana gelen hasar, matris malzemesinin türünden ve elyaf ile olan uyumundan oldukça fazla etkilenir (Mazumdar, 2001).

1.2 Sandviç Kompozitler

Sandviç malzemeler genellikle iki adet ince, yüksek mukavemete sahip metal veya polimer matrisli kompozit malzemeden üretilmiş kabuklar arasına, kalın ve hafif malzemelerden üretilmiş, çekirdek olarak adlandırılan yapılar getirilerek oluşturulur. Şekil 1.1 'de sandviç malzemelerin şematik görünümü verilmiştir.

Çekirdek olarak balsa ağacı, köpük ve bal peteği yapıları malzemeler sandviç yapıları elde etmek için kullanılır. Çekirdek malzemesinin seçimi yapının işlevine, yükleme durumuna, bulunabilirliğe ve maliyete bağlıdır. Örneğin, havacılık ve uzay yapılarının çekirdek malzemesi genellikle alüminyum veya Nomex bal peteği şeklindedir. İnşaatlarda kullanılan sandviç kompozitlerin çekirdek malzemesi olarak genellikle kapalı hücreli veya açık hücreli bir köpük tercih edilirken, deniz araçları, rüzgar türbin kanadı yapımında çeşitli yoğunluktaki balsa ağacı ve kapalı gözenekli köpükler kullanılmaktadır. Kabuk ve çekirdek malzemeleri arayüzeyindeki yapıştırıcı yükleri bir yüzeyden diğerine aktarır (Birman ve Kardomateas, 2018; Mazumdar, 2001).

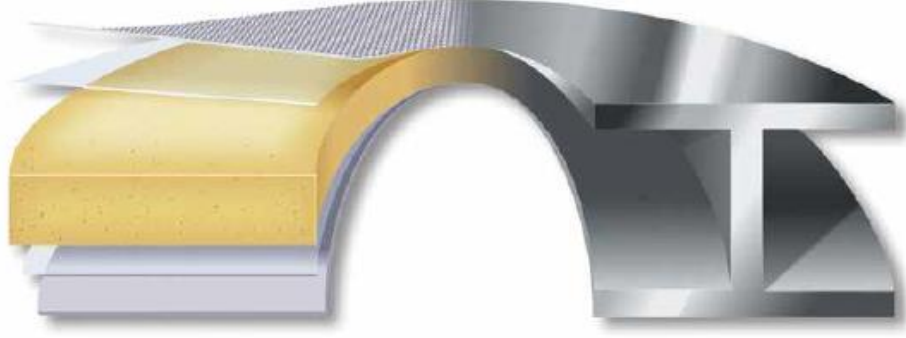


Şekil 1.1 Sandviç malzeme şematik görünümü (Guideline to Core and Sandwich, 2018)

Sandviç yapıları malzemeler, Şekil 1.2'deki gibi I profile benzetilebilir. Yapı eğilme yüküne maruz kaldığında dış yüzeyler çekme ve basma yüklerini taşıırken, orta kısımlar kayma yüklerini taşırlar. Sandviç yapı ile I profil arasındaki fark, sandviç yapıda çekirdek malzemesinin kabukların arasında tamamen yer alarak yüksek burulma rijitliği sağlanmasıdır. I profilde ise, destek sadece ortadadır, dolayısıyla I profil daha az burulma rijitliğine sahiptir.

Sandviç yapı, en yüksek dayanım - ağırlık oranını ve rijitlik - ağırlık oranını sağlar. Daha kalın bir çekirdek kullanılarak aynı zamanda daha yüksek rijitlik - ağırlık oranı sağlanabilir. Sandviç kompozitlerin sağladığı diğer avantajlar ise kullanıldığı yere

göre ısı yalıtımı, ses yalıtımı, yüzdürme özelliği ve korozyon direnci olabilir. (Birman ve Kardomateas, 2018; Guideline to Core and Sandwich, 2018; Mazumdar, 2001)



Şekil 1.2 Sandviç malzeme ve I profil (Guideline to Core and Sandwich, 2018)

1.3 Kompozit Malzemelerin Avantajları

Geleneksel mühendislik malzemeleri yerine kompozit malzemelerin tercih edilmesi üretilecek yapının bazı özelliklerini geliştirir. Bunlar; mukavemet, rijitlik, korozyon dayanımı, aşınma dayanımı, ağırlık, yorulma ömrü, termal yalıtım veya iletkenlik, akustik yalıtım olarak örneklendirilebilir.

Kompozit malzemeler parça birleştirme işlemini kolaylaştırır. Çok fazla metal parçadan oluşan bir yapı, tek bir kompozit parça ile değiştirilebilir. Kompozit yapılar, yerleşik sensörler yardımıyla, yapı kullanım süresi boyunca izlenme olanağı sağlanabilir. Örneğin bu özellik, uçak yapılarındaki yorulma hasarını izlemek için kullanılabilir.

Kompozit malzemeler, yaygın olarak kullanılan çelik, alüminyum vb. malzemeler yerine çoğu zaman daha iyi performansla kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Çelik parçaların kompozit parçalarla değiştirilmesi parça ağırlığında % 60-80, alüminyum parçaların değiştirilmesi ise parça ağırlığında % 20-50 oranında ürünü hafifletilebilir.

Kompozit malzemelerin yorulma dayanımı metallere göre daha yüksektir. Çelik ve alüminyum alaşımları, statik dayanımlarının yaklaşık % 50'sine kadar iyi yorulma

dayanımı gösterirken tek yönlü karbon epoksi kompozitler, statik dayanımlarının % 90'ına kadar iyi yorulma dayanımına gösterir. Kompozit malzemelerin dış yüzeyleri plastikten oluştuğu için korozyon dayanımı ve kimyasal dayanımı daha iyidir. Metallerde su ve hava varlığında korozyon meydana gelebilir, korozyon meydana gelmesini önlemek veya korozyon hızını azaltmak için özel kaplamalar ve alaşımlama gerekebilir. Kompozitler, iyi darbe özellikleri sunar. Cam ve aramid elyaf içeren kompozitler, çelik ve alüminyumdan daha yüksek darbe performansı sağlar (Jones, 1999; Mazumdar, 2001).

1.4 Kompozitlerin Malzemelerin Dezavantajları

Kompozit malzemelerin geleneksel mühendislik malzemelerinden üstün özelliklerinin yanında, kullanılmasını engelleyen veya azaltan dezavantajları vardır. Kompozit malzemelerin maliyeti, çelik ve alüminyum ile karşılaştırıldığında çok yüksektir. Büyük yapıların düşük hacimde üretilmesi için kompozit malzemeler kullanılmaktadır ancak, bu üretimler genellikle insan gücüne dayalıdır. Kompozit üretiminde seri üretim yöntemlerinin kullanım alanları kısıtlıdır. Kompozit parçaların sıcaklık dayanımı ve kimyasal dayanımı kullanılan matris malzemesinin dayanımına bağlıdır (Mazumdar, 2001).

Kompozit malzemeler tabakalar arası kayma gerilmelerine hassastır, yükleme anında delaminasyon meydana gelebilir. Tabakalı kompozitlerde yükleme davranışını, takviye malzemesi ve matris malzemesi belirlerken, sandviç kompozitlerin yükleme davranışını takviye malzemesi, matris malzemesi, çekirdek malzemesi, çekirdek ve kabuğun birleşme ara yüzeyi belirler. Sandviç kompozit bir yapıda kabuk malzemesi aksenal yükleme ve eğilme sonucu oluşan çekme ve basma yüklerini taşır. Çekirdek malzemesi yapıda orta kısımda olduğu ve kalın bir yapıyı oluşturduğu için meydana gelen kayma yüklerini taşır. Sandviç kompozitlerin en büyük dezavantajı kabuk ile çekirdek malzemelerinin birbiri arasındaki yüksek dayanım farkından dolayı ara yüzeyinde meydana gelebilecek statik ve dinamik yüklemelere karşı hassastır. Sandviç kompozitlerde hasar genellikle bu ara yüzeyin birbirinden ayrılması şeklinde oluşur (Aktas, Potluri ve Porat, 2009; Fan Xia ve Xiao Qing Wu, 2010; Kim, Lee, Park ve

Kim, 1999; Lascoup, Aboura, Khellil ve Benzeggagh, 2010; Vaidya ve diğer., 1999; Yoon, Jang, Cho, Park ve Cho, 1999).

1.5 Literatür Araştırması

Kompozit malzemelerin darbe davranışı hem deneysel hem de nümerik olarak birçok çalışmada incelenmiştir. Tabakalı kompozitler kullanılarak yapılan nümerik çalışmalarda, (Aslan, Karakuzu ve Okutan, 2003; Karakuzu, Erbil ve Aktas, 2010), E-cam/epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışını deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Ağırlık düşürme darbe testi cihazı ile yapılan her iki çalışmada nümerik analizler 3DIMPACT sonlu elemanlar analiz kodu ile tamamlanmıştır. Nümerik sonuçların deneysel sonuçlarla iyi bir uyum sağladığı görülmüştür. Chandekar, Thatte ve Kelkar, (2010); Menna, Asprone, Caprino, Lopresto ve Prota, (2011); Singh, Singh ve Jha, (2016) cam elyaf kompozitlerde düşük hızlı darbe davranışını incelemişlerdir. Numuneler LS-DYNA kullanılarak düşük hızlı darbe yükü altında artan darbe enerjisi ile analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar nümerik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karbon elyaf kompozit numunelerin darbe davranışları hakkında bazı çalışmalar da mevcuttur. Ahmad, Abbassi, Park, Jung ve Hong, (2019); Dogan, Hadavinia, Donchev ve Bhonge, (2012); Heimbs, Heller, Middendorf, Hähnel ve Weiße, (2009); Maio, Monaco, Ricci ve Lecce, (2013) karbon elyaf takviyeli tabakalı kompozit numunelerin düşük hızda darbe davranışlarını tek enerji seviyesi ile incelemişlerdir. Sevkati, Liaw ve Delale, (2013), S2cam - IM7grafit/epoksi hibrit kompozitleri araştırmışlardır, (Berk ve diğer., 2016) S2 cam/epoksi ve aramid/epoksi kompozit numuneleri düşük hızlı darbe testi ile test etmişlerdir ve LS-DYNA yazılımı ile nümerik olarak analiz etmişlerdir. Bazı çalışmalar enerji absorbe edicilerle ilgilidir. Hosseinzadeh, Shokrieh ve Lessard, (2005) cam elyaf kompozitten yapılmış ticari ön tampon kirişi üzerindeki darbe etkisini incelemiştir. Kellas ve Jackson, (2010) aramid, cam ve grafit elyaf kompozit enerji absorbe edicileri, bir dizi tam ölçekli numuneler ile test etmişlerdir. Jackson, Fasanella, Lyle ve Spellman, (2006), grafit kevlar hibrit kompozit enerji absorbe edicileri, (Dong, Sheldon ve Carney, 2018) farklı elyaf açıları kullanılan karbon elyaf enerji absorbe edicileri, (Jackson, Fasanella ve Littell, 2017) farklı şekilli kompozit numuneleri, absorbe ettikleri enerji bakımından test etmişlerdir.

Bu çalışmalarda kullanılan LS-DYNA analizleri ile deneysel testler arasında iyi bir uyum gözlemlenmiştir.

Tabakalı kompozitlerde meydana gelen tabakalar arası ayrılmaya karşı dayanımın artırılması için bazı çalışmalarda, tabakalı kompozitlere kalınlık boyunca takviye işlemi yapılmıştır. Mouritz ve Cox, (2000, 2010), yaptıkları çalışmalarda dikişli tabakalı kompozitlerde dikiş işleminin çekme, basma, eğme, kayma, yorulma dayanımlarına etkisi incelenmiştir. Nie ve diğer., (2008) karbon elyaf kumaşları karbon dikiş ipliği kullanarak ve dikiş adımı değiştirilerek dikmişlerdir. Dikiş işleminin çekme ve kayma özelliklerinin arttırdığı, eğme özelliklerinde çok az bir değişime neden olduğunu tespit etmişlerdir. Tan, Watanabe ve Iwahori, (2012) dikiş adımı ve iplik kalınlığının tabakalı kompozit numunelerin darbe performansına etkisini incelemişlerdir. Dikiş yoğunluğu arttıkça delaminasyon alanının azaldığı, çatlak ilerlemesinin durduğu, iplik kalınlığı arttıkça hasar dayanımı üzerinde pek etkili olmadığı ancak delaminasyon üzerinde etkili olduğu ve darbe enerjisi değeri arttıkça etkisinin arttığı belirlenmiştir.

Sandviç kompozitlerde kabuk ile çekirdek malzemeleri arasındaki yüksek dayanım farkından dolayı, hasar ara yüzeyin birbirinden ayrılması şeklinde meydana gelir. Farklı yöntemler kullanılarak sandviç kompozitlerin düşük hızlı darbe performansının geliştirilmesi için birçok deneysel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda çekirdek malzemenin yoğunluğu, şekli ve yerleşiminin yapının düşük hızlı darbe performansını etkilediği belirlenmiştir (Al-Shamary, Karakuzu ve Özdemir, 2016; Baba, 2017; Hassan ve Cantwell, 2012; Ozdemir, Karakuzu ve Al-Shamary, 2015; Zaretsky, Asaf, Ran ve Aizik, 2012).

Sandviç kompozitlerde meydana gelen kabuk - çekirdek arayüzeyinde ayrılmaya karşı dayanımının artırılması için bazı çalışmalarda sandviç kompozitlere de kalınlık boyunca takviye işlemi yapılmıştır. Sandviç kompozitlere dikme işlemi yaparak (Fan Xia ve Xiao Qing Wu, 2010; Kim ve diğer., 1999; Yoon ve diğer., 1999) dikişsiz sandviç numuneler ile karşılaştırma yapmışlardır. Dikiş adımının etkisi (Lascoup, Aboura, Khellil ve Benzeggagh, 2006; Lascoup ve diğer., 2010; Ma, Yan, Liu ve

Yang, 2012; Potluri, Kusak ve Reddy, 2003) çalışmalarında incelenmiştir. Ayrıca dikiş açısını değiştirerek, açılı dikişin etkisi (Aktas ve diğer., 2009; Lascoup ve diğer., 2006, 2010; Sok, 2010) çalışmalarında incelemişlerdir. Dikiş üzerine yapılan çalışmalar genellikle deneysel olarak incelenmiştir. Sandviç kompozitlere yapılan dikiş işleminin darbeye karşı etkisinin belirlenmesi için (Fan Xia ve Xiao Qing Wu, 2010, 2010; Lascoup ve diğer., 2010; Ma ve diğer., 2012; Nanayakkara, Feih ve Mouritz, 2012; Stanley, 2001; Yoon ve diğer., 1999) çalışmalarında darbe testi uygulanmıştır. Ayrıca dikişli kompozit yapılar çeşitli diğer testlerle de incelenmiştir. Eğme testi (Aktas ve diğer., 2009; Kim ve diğer., 1999; Lascoup ve diğer., 2006; Stanley, 2001) darbe sonrası basma testi (Ma ve diğer., 2012; Stanley, 2001) kayma testi (Lascoup ve diğer., 2006; Sok, 2010; Stanley, 2001) basma testi (Lascoup ve diğer., 2006; Nanayakkara ve diğer., 2012; Sok, 2010), çekme testi (Lascoup ve diğer., 2006; Stanley, 2001) gibi bir çok farklı test ile dikişin sandviç kompozitlere olan etkileri incelenmiştir. Sandviç kompozitler kullanılarak yapılan deneysel ve nümerik çalışmalarda, (Feng ve Aymerich, 2013; He, Liu, Wang ve Xie, 2018; Heimbs, Cichosz, Klaus, Kilchert ve Johnson, 2010; Qi, Yang, Yang, Han ve Lu, 2014; Rajaneesh, Sridhar ve Rajendran, 2012) düşük hızlı ve yüksek hızlı darbe testi yapmışlardır.

Sandviç kompozitler hakkında ayrıntılı dikiş çalışması (Stanley, 2001) tarafından yapılmıştır. Dikiş işlemi ile sandviç kompozitlerin tabakalar arası ayrılma dayanımı ve hasar toleransını arttırmaya yönelik çalışmalar deneysel olarak tamamlanmıştır. Karbon elyaf kabuk malzemesi, köpük çekirdek malzemesi ve aramid dikiş ipliği kullanılarak numuneler 45°-90° dikiş açılarıyla, 400-1600-3200 denier dikiş ipliği kalınlığı ve 6,35 mm, 12,7 mm ve 25,4 mm dikiş adımı gibi değişkenleri kullanarak numuneler hazırlanmıştır. Eğme, çekme, kayma ve kenardan basma testleri yapılmıştır. Daha sonra darbe performansını test etmek için düşük hızlı darbe testi ve hasar toleransındaki değişimin saptanması için darbeden sonra basma testi yapılmıştır. Eğilme dayanımı ve rijitliğinin arttığını, çekme dayanımının arttığını, sandviç kayma dayanımı ve darbeden sonra basma dayanımının dikiş işlemiyle artırıldığı belirlenmiştir.

Lascoup ve diğer., (2006, 2010) dokuma cam elyaf kabuk malzemesi, poliüretan köpük çekirdek malzemesi ve cam dikiş ipliği kullanarak hazırladıkları dikişsiz, 45° açılı 12,5 mm, 25mm, 50 mm aralıklarla dikişli ve 60° açılı 25 mm aralıklarla dikişli sandviç kompozitlerin eğme, çekme, kayma dayanımlarını ve darbe performanslarını, dikiş açısı ve dikiş adımlarını değiştirerek karşılaştırmışlardır. Dikiş yoğunluğu arttıkça dayanımın daha da arttığı ve daha fazla enerji absorbe ettiği belirlenmiştir. Yapının rijitliği arttığından dolayı hasarın daha erken meydana geldiği belirlenmiştir.

Sok, (2010) karbon elyaf kabuk malzemesi ve poliüretan köpük çekirdek malzemesi kullanarak dikişsiz ve 30°, 45°, 60°, 90° açılarda aramid dikiş ipliği ile dikilmiş numuneler hazırlamıştır. Bu numunelere çekme, basma ve kayma testleri yapılmıştır. Ayrıca bu numunelere sürünme testi yapılmıştır. Çekme, basma, kayma ve sürünme testlerinden elde edilen sonuçlara göre dikiş işlemi ile dayanımın arttığı ve dikiş açısına göre oldukça değiştiği belirlenmiştir.

Yalkin, Icten ve Alpyildiz, (2015) dikişli çekirdek içeren sandviç kompozitlerde dikiş ipliği kalınlığının basma, eğme, kayma ve darbe özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada dikiş ipliği kalınlığı arttıkça dayanımın arttığı, eğme ve kayma testlerinde daha az uzama değerinde numunelerde hasarın meydana geldiği belirlenmiştir. Aynı zamanda dikişte kullanılan ipliğin dikiş esnasında kabuk ve çekirdek malzemesine sürtünmesinden dolayı dikiş ipliğinin bir miktar hasara uğradığı belirlenmiştir. Yalkin, Icten ve Alpyildiz, (2017) dikişli sandviç kompozitlerin çekme ve basma testleri karşısındaki davranışları incelenmiştir. Tek çekirdekli ve iki çekirdekli sandviç kompozitlerin basma ve çekme testleri için benzer davranış gösterdikleri belirlenmiştir.

Yapılan literatür çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre iki çekirdekten oluşan dikişli çekirdek yapıların düşük hızlı darbe davranışı çalışmasına rastlanamamıştır. Dikişli sandviç kompozitler hakkında nümerik çalışmalar da oldukça azdır. Kullanılacak çeşitli yöntemlerde sandviç kompozit dayanımı artırılmaya çalışılacaktır. Bu çalışmada öncelikle, $[\pm 45/(0/90)_2]_s$ elyaf yönlendirmesine sahip, cam elyaf epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe testi yapılarak farklı enerji değerlerinde

davranışları belirlenmiştir. Numuneler, LS-DYNA yazılımı ile nümerik olarak analiz edilmiştir. Aynı kabuk malzemeleri, aynı elyaf yönlenmesi kullanılarak, tek çekirdekli sandviç kompozit hazırlanmıştır. Daha sonra toplam çekirdek malzemesi kalınlığı aynı olmak üzere iki çekirdekli üç kabuklu sandviç kompozit elde edilmiştir. Çekirdek malzemesine belirli aralıklarla delikler açılıp, üretim esnasında bu deliklere dolan epoksilerin oluşturduğu kolonlara sahip iki çekirdekli epoksi kolonlu sandviç kompozit yapı oluşturulmuştur. Çekirdek malzemesinde oluşturulan bu deliklerden, ara tabaka cam elyaf ve iki çekirdek malzemesi olacak biçimde dikiş işlemi uygulanmıştır. Son olarak üç tabaka cam elyaf ve iki çekirdek malzemesi bir arada dikilerek oluşturulan sandviç kompozit numunelerin düşük hızlı darbe testinde elde edilen nümerik sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Vurucu ile kompozit numune arasındaki temas kuvveti, numunenin çökme miktarı verileri zamanın bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Daha sonra bu veriler temas kuvveti - zaman eğrileri, temas kuvveti - çökme eğrilerinin çizilmesi için kullanılmıştır. Absorbe edilen enerji değeri, temas kuvveti - çökme eğrilerinin altında kalan alandan hesaplanmıştır.

BÖLÜM İKİ

DENEYSEL METOTLAR

2.1 Kompozit Üretim Yöntemleri

Üretim yöntemi belirlenmesinde üretim hızı, maliyet, istenilen dayanım, parça boyutu gibi şartlar ve elyaf türü, matris malzemesi göz önünde bulundurularak değerlendirme yapılır. Kompozit üretiminde kullanılan birçok üretim tekniği vardır. Bunlar;

- Elyaf sarma,
- Pultrüzyon,
- Elle tabakalama,
- Spreyleme,
- Reçine transfer kalıplama (RTM),
- Pres,
- Vakum infüzyon,
- Otoklav olarak örneklendirebilir.

Kullanılan üretim tekniği yapının mekanik özelliklerini oldukça etkiler. Örneğin; ucuz bir üretim yöntemi olan elle tabakalamada elyaf matris oranı düşük olup, tabakalar arası boşluk miktarı yüksektir ve bu durum mekanik özellikleri düşürür. Otoklav yönteminde elyaf matris oranı yüksek olup üretim yönteminden dolayı tabakalar arası boşluk miktarı çok azdır ve bu durum mekanik özellikleri artırır ancak bu yöntem çok daha maliyetlidir. Bu çalışmada maliyeti nispeten düşük, köpük çekirdek malzemesi kullanımına uygun, en yüksek dayanım elde edilecek üretim yöntemi olan, rüzgâr türbin kanadı, tekne gövdesi gibi büyük yapıların da üretiminde kullanılan vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır.

2.1.1 Kompozit Numune Üretimi

Üretilen kompozit numunelerin tanımlamaları, verilen kodları, numunelerin elyaf yönlenmesi ve çekirdek malzemesinin özelliği Tablo 2.1’de verilmiştir. Öncelikle

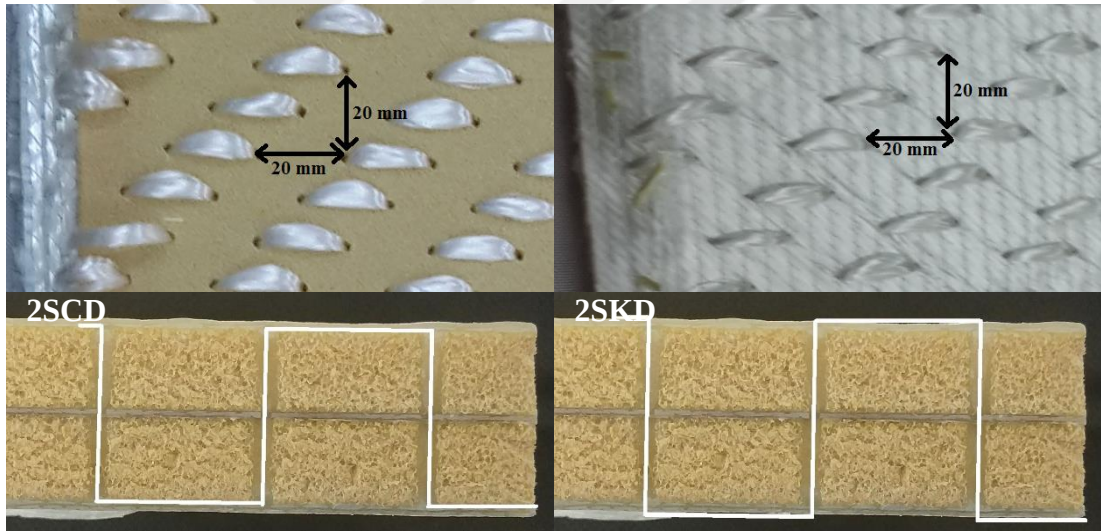
referans malzeme olarak aynı elyaf yönlenmesinde olacak şekilde tabakalı kompozit “T” ve ortasında 20 mm kalınlıkta çekirdek içeren sandviç kompozit “S” kullanılmıştır, bu numunede 20 mm kalınlığındaki çekirdek malzemesini belirtmek için “C20” kullanılmıştır. Diğer numunelerde 10 mm kalınlığındaki çekirdek malzemesi “C10” olarak belirtilmiştir. İki adet çekirdek malzemesinden oluşan sandviç kompozit “2S” olarak kod verilmiştir. 10 mm kalınlığındaki çekirdek malzemesine 200 mm²'de 1 delik olacak biçimde 2,5 mm çapında delikler açılmıştır. Delme işlemi yapılan çekirdek malzemesi içeren sandviç kompozitte, üretim esnasında çekirdekteki deliklere epoksi reçine dolmuştur, reçine kürlendikten sonra bu deliklere dolan epoksi kolon etkisi oluşturmaktadır. Epoksi kolon içeren çekirdek malzemesi “ekC10” olarak ve iki çekirdekli epoksi kolonlu sandviç kompozit “2SEK” olarak adlandırılmıştır.

Tablo 2.1 Üretilen kompozit numunelerin tanımları, elyaf yönlenmeleri ve çekirdek malzemesinin özellikleri

Kod	Tanımlama	Elyaf Yönlenmesi ve Çekirdek Malzemesinin Özelliği
T	Tabakalı Kompozit	$[\pm 45/0/90_2]_s$
S	Sandviç Kompozit	$[\pm 45/(0/90)_2/\overline{C20}]_s$
2S	İki Çekirdekli Sandviç Kompozit	$[\pm 45/0/90/C10/0/90]_s$
2SEK	İki Çekirdekli Epoksi Kolonlu Sandviç Kompozit	$[\pm 45/0/90/ekC10/0/90]_s$
2SCD	İki Çekirdekli Çekirdek Dikişli Sandviç Kompozit	$[\pm 45/0/90/d(ekC10/0/90)]_s$
2SKD	İki Çekirdekli Kabuk Dikişli Sandviç Kompozit	$d([\pm 45/0/90/ekC10/0/90]_s)$

Arasında dört tabaka cam elyaf olan delikli iki çekirdek malzemesi içeren yapı, 2400 Tex kalınlığındaki cam dikiş ipliği kullanılarak dikilmiştir, bu numune iki çekirdekli çekirdek dikişli sandviç kompozit olarak “2SCD” adlandırılmıştır. Delikli iki çekirdek malzemesi içeren kompozit 2400 Tex dikiş ipliği kalınlığı ile en üstte dört tabaka, ortada dört tabaka ve altta dört tabaka olacak biçimde hazırlandıktan sonra

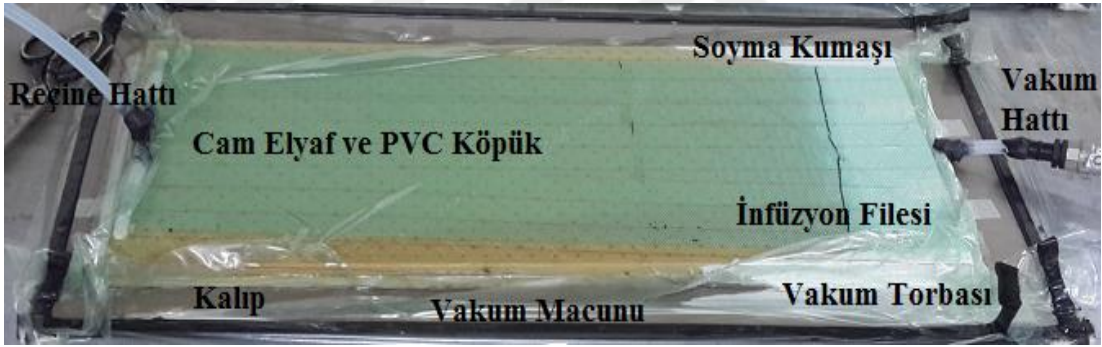
tamamı dikilmiştir ve iki çekirdekli kabuk dikişli sandviç “2SKD” olarak adlandırılmıştır. Cam dikiş ipliği ile dikilmiş çekirdek malzemesindeki deliklere üretim esnasında epoksi reçine dolmuştur ve reçine kürlendikten sonra cam elyaf takviyeli epoksi kolonlar yapıda oluşmuştur. İki çekirdekli çekirdek dikişli numunenin “2SCD” dikiş işlemi sonrası görünümü, üretim sonrası kesitteki dikiş ipliğinin çekirdek ve kabuk malzemelerinin arasından ve kolonlardan geçtiğini gösteren beyaz çizgi, iki çekirdekli kabuk dikişli numunenin “2SKD” dikiş işlemi sonrası görünümü, üretim sonrası kesitteki dikiş ipliğinin kabuk malzemesinin üzerinden ve kolonlardan geçtiğini gösteren beyaz çizgi Şekil 2.1’de verilmiştir. Dikiş malzemesinin kalınlığı olarak seçilen 2400 Tex dikiş ipliği için (Yalkın ve diğer., 2015) çalışması kullanılmıştır. Tex numarası ipliğin bin metre uzunluğunun gram olarak ağırlığını belirtmektedir.



Şekil 2.1 İki çekirdekli çekirdek dikişli sandviç kompozit (2SCD) ve iki çekirdekli kabuk dikişli sandviç kompozit (2SKD) (Kişisel arşiv, 2015)

Bu çalışma için Tablo 2.1’de belirtilen 1 adet tabakalı ve 5 adet sandviç kompozit plaka üretimi yapılmıştır (Alpyıldız, 2016). Çekirdek malzemesi olarak Airex C70.55 0.06 gr/cm^3 yoğunluğa sahip PVC köpük kullanılmıştır. Momentive L160-H160 epoksi reçine matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Numuneler tek yönlü E-cam elyaf, toplamda 12 katman ve her katman 300 g/m^2 alansal yoğunluğa sahiptir. Kompozit numuneler, vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Şekil 2.2’de vakum infüzyon sistemi görülmektedir. Vakum infüzyon işlemi için öncelikle cam üzerine

açık kahverengi teflon yapıştırılarak düz bir kalıp yüzeyi oluşturulmuştur. Kalıbın etrafına siyah vakum macunu çekilmiştir. Hazırlanan cam elyaf ve PVC köpük kalıba yerleştirilmiştir. Üzerine beyaz soyma kumaşı ve yeşil infüzyon filesi konulmuştur. Reçine hattı ve vakum hattı taraflarına spiral hortum ile T bağlantıları yerleştirilmiştir. Şeffaf vakum torbası, vakum macunu yardımıyla kalıp içindeki malzemeleri tamamen saracak biçimde kapatılmıştır. Sistemin hava almadığına emin olunduktan sonra hazırlanan reçine ve sertleştirici karışımı reçine hattı tarafından verilmiştir. İnfüzyon filesi sayesinde oluşturulan hava akımı, sıvı reçinenin kolaylıkla vakum tarafındaki spiral hortuma ulaşmasını sağlamıştır. Önce reçine hattı, daha sonra vakum hattı tarafı kapatılmıştır. Bir gece boyunca oda sıcaklığında kürlenene numuneler daha sonra 80°C sıcaklıkta ve 15 saat fırında kürlenmiştir. Kürlenene kompozit plakalar, uygulanacak teste uygun boyutlarda elmas uçlu testere kullanılarak, sulu kesme cihazında kesilmiştir.



Şekil 2.2 Vakum infüzyon sistemi (Kişisel arşiv, 2015)

2.2 Darbe Çeşitleri

Malzemeler kullanım yerine göre çok farklı darbelere maruz kalabilir. Bir tamir aletinin kompozit parça üzerine düşmesi düşük hızlı ve büyük kütle ile gerçekleşir. Patlamalar, kasırga ve kasırga enkazı, yol ve pistlerdeki yabancı cisimler orta hızda darbeye örnek olabilir. Yüksek hızlı (balistik) darbe genellikle silahların ateşinin veya patlayıcı savaş başlığı parçaları sonucudur. Hiper hızlı darbe ise en çok uzayda mikrometereitlere karşı koruma geliştirilmesi için incelenir.

Malzemelerin maruz kaldığı darbe genellikle; düşük hızlı darbe (büyük kütle) 10 m/s altındaki hızda, orta hızlı darbe 10 m/s ile 50 m/s aralığındaki hızlarda, yüksek

hız/balistik darbe (küçük kütle) 50 m/s ile 1000 m/s aralığındaki hızlarda ve hiper hızlı darbe 2-5 km/s hız civarında kabul edilir. Bu çalışmada düşük hızlı darbe testi kullanıldığı için sadece düşük hızlı darbe incelenmiştir (Abrate, 2011).

2.2.1 Düşük Hızlı Darbe

Polimer matrisli kompozitler düşük hızlı darbenin neden olduğu iç hasarlara karşı hassastır. Birçok durumda yüzeyde hasar görünmezken parçanın içinde önemli hasarlar meydana gelebilir. Kompozitin yapının dayanımını ve kullanım ömrünü olumsuz etkiler. Malzemeye etki eden düşük hızlı darbede, yapının dinamik yapısal tepkisi önemlidir. Darbenin temas süresi, etkisinin tüm yapıya yayılmasına imkan verecek kadar uzundur. Bu durum sayesinde elastik olarak daha fazla enerji absorbe edebilir.

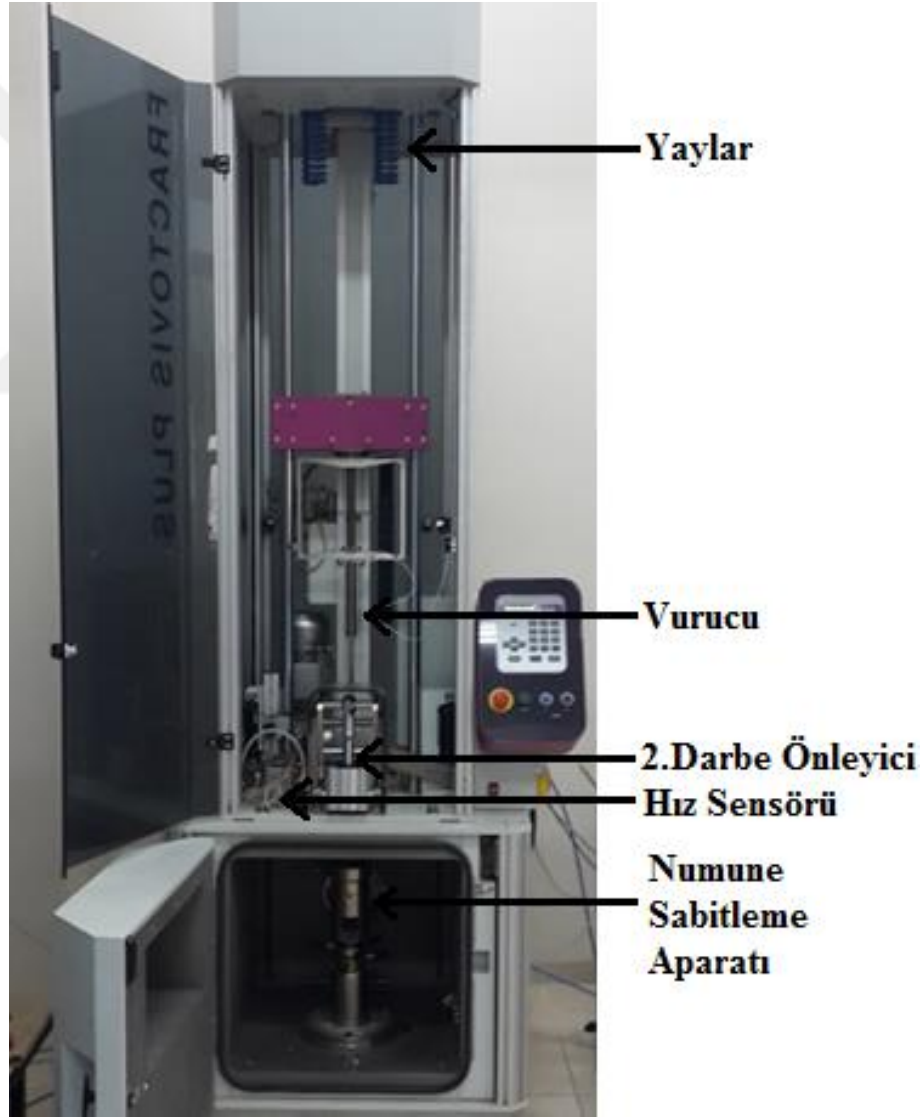
Düşük hızlı darbede, hasar modu ve enerji absorbe edilmesi; yapının büyüklüğüne, rijitliğine ve sınır koşullarına bağlıdır. Düşük hızlı darbeden dolayı yapıda oluşan mikro çatlaklar, elyafın kırılması ve delaminasyon, absorbe edilen enerji miktarını etkileyen faktörlerdir (Abrate, 2011).

Kompozit ürünlerin çalışma koşullarında meydana gelebilecek darbe yükleri ağırlık düşürme darbe testi cihazı ile daha iyi simüle edilebilmektedir. Şekil 2.3'te ağırlık düşürme darbe testi cihazı verilmiştir. Bu cihaz vurucu, düşebilen vurucunun hareketi için iki çelik hizalama kolunu ve numuneyi sabitleme aparatını içeren üç temel bölümden oluşur. Vurucunun bulunduğu kısım aynı zamanda ağırlık eklenebilir özelliktedir. Vurucuda test süresince kuvvet verilerinin alınabilmesi için yük hücresi bulunmaktadır. İstenilen darbe enerjisinin elde edilmesi için vurucu yüksekliği ve ağırlığı ayarlanır. Daha fazla enerji elde edilmek isteniyorsa sıkıştırma yayları kullanılarak vurucuya ilk hız verilebilir. Şekil 2.4'te ağırlık düşürme darbe testi cihazında test öncesi numune yerleşimi verilmiştir.

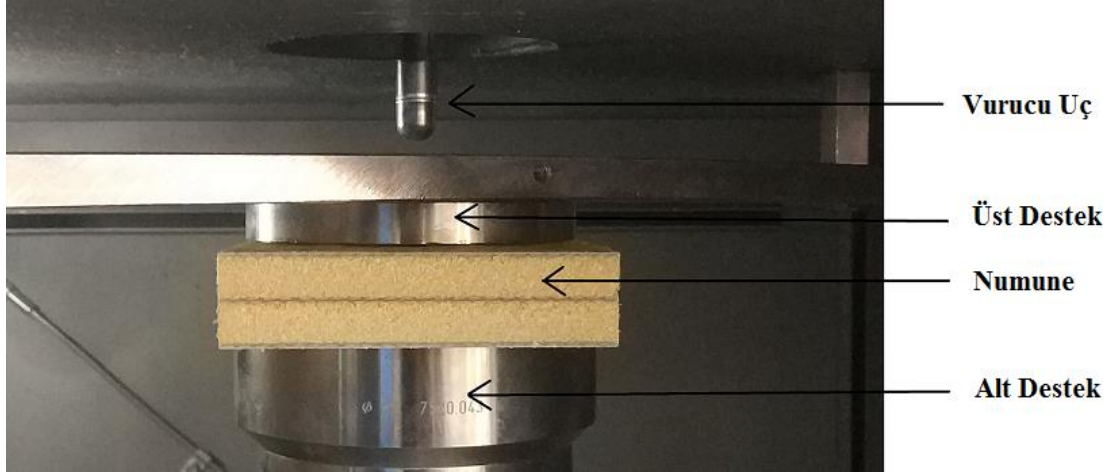
Vurucuya verilen enerji numuneyi delmek için yeterli değilse vurucu numuneden seker, ikinci darbeyi önlemek için sekmeden koruma sistemi (anti-rebounding system) vurucuyu tutar. Vurucunun numuneye vurmadan önceki hızını belirlemek için hız

ölçer mevcuttur. Vurucu, hız ölçerin hizasına geldiğinde veri kaydetme sistemi yük hücrelerinden gelen verileri kaydetmeye başlar. Veri kaydetme sistemi, anlık olarak vurucunun hızını, temas kuvvetini, yer değiştirmesini zamana bağlı olarak kaydeder.

Bu çalışmada kullanılan Ceast marka Fractovis Plus model darbe testi cihazı, ekstra yayları sayesinde maksimum 24 m/s hız değeri için 2 kg ağırlıkta, ya da maksimum 70 kg ağırlık değeri için 7 m/s hızda darbe testi yapabilmektedir. Cihazın maksimum test edebileceği enerji kapasitesi 1800J'dür. Veri kaydetme sistemi test esnasında 16000 veri alma kapasitesine sahiptir.



Şekil 2.3 Ağırlık düşürme darbe testi cihazı (Kişisel arşiv, 2016)



Şekil 2.4 Ağırlık düşürme darbe testi cihazında test öncesi numune yerleşimi (Kişisel arşiv, 2016)

Darbe ve geri sekme hızı optik dedektörü, çarpmadan hemen önce vurucunun hızını ölçmek ve vurucunun geri sekme durumunda vurucu için anti-rebounding sisteminin devreye girmesini sağlamak için kullanılır. Yapıya bir aparat ile sabitlenmiş bir fotosel ve vurucuya sabitlenmiş bir bayraktan oluşur. Vurucu test için serbest bırakıldığında, bayrak hizasından ard arda iki kez fotoselden geçer. İki fotosel mesafesinin geçen zamana bölümüyle darbe hızı tespit edilir.

Darbe testi cihazında numuneler -100 °C ila 150 °C arasındaki sıcaklıklarda test edilebilir. Numune koyulan kısım sıvı azot ile soğutabilir veya içinde bulunan ısıtma rezistansları ile ısıtılabilir. Numune; iç çapı 76,2 mm, dış çapı 110 mm olan halka şeklinde bir numune altlığına ve iç çapı 76,2 mm ve dış çapı 100 mm olan bir halka yardımıyla pnömatik olarak sıkıştırılır (Aktaş, 2007).

2.2.2 Darbe Enerjisi

Darbe testi öncesi vurucudaki maksimum enerjiyi (E_0) hesaplamak için Formül 2.1 kullanılır.

$$E_0 = \frac{1}{2} m V_0^2 \quad (2.1)$$

Burada m vurucunun kütlesi V_0 ise numuneye etki edecek darbeden hemen önceki vurucunun hızıdır. V_0 ağırlık düşürme yüksekliği biliniyorsa Formül 2.2 ile hesaplanır.

$$V_0 = \sqrt{2gh_0} \quad (2.2)$$

Darbe testi cihazının programı olan VisualIMPACT absorbe edilen enerjiyi, hızı ve yer değiştirmeyi hesaplar. Vurucunun yer değiştirmesi kuvvet eğrisinin çift katlı integrali alınarak Formül 2.3 ile hesaplar.

$$\delta_i = \int \int_i \frac{F(t)-gM}{M} dt^2 \quad (2.3)$$

Burada δ_i , i noktasındaki vurucunun yer değiştirmesi, $F(t)$ veri toplayıcıdan alınan kuvvet değeri, g yer çekimi ivmesi, M vurucunun toplam kütlesidir.

i noktasında absorbe edilen enerji değeri, kuvvet yer değiştirme eğrisinin altında kalan alan Formül 2.4 kullanılarak bulunur.

$$E_i = \int_i F(\delta) d\delta \quad (2.4)$$

Burada E_i , i noktasındaki absorbe edilen enerji, $F(\delta)$ veri toplayıcıdan alınan kuvvet değeridir. i noktasındaki hız, kuvvet zaman eğrisinin Formül 2.5'teki verildiği gibi integrali alınarak bulunur.

$$v_i = \int_i \frac{F(t)-gM}{M} dt \quad (2.5)$$

Burada v_i , i noktasındaki hız, $F(t)$ veri toplayıcıdan alınan kuvvet değeri, g yer çekimi ivmesi, M vurucunun toplam kütlesidir.

2.2.3 Düşük Hızlı Darbede Hasar Modları

Kompozit malzemelerin anizotropik yapıya sahip olmasından dolayı düşük hızlı darbede farklı tipte hasarlar meydana gelir. Bu hasarlar; matris kırılması şeklinde olabilir. Bu tip hasarlar çekme, basma veya kayma gerilmelerinden dolayı meydana gelebilir. Genellikle elyafa paralel oluşur.

Delaminasyondan kaynaklanan hasarlar tabakalar arası gerilmelerden dolayı oluşur. Delaminasyon, bitişik katmanlar arasındaki eğilme rijitliğinin uyumsuzluğundan kaynaklanır. Eğilme rijitliği uyumsuzluğu ne kadar büyük olursa, o kadar büyük delaminasyon alanı meydana gelir. Delaminasyon aynı zamanda malzeme özelliklerine, elyaf yerleşimine ve tabakalı kompozitin kalınlığına bağlıdır. Düşük hızlı darbeye, üç nokta eğmeye maruz kırışte delaminasyon hasarından dolayı meydana gelen absorbe edilen enerji Formül 2.6'ya göre hesaplanır.

$$E = \frac{2\tau^2 w L^3}{9E_f t} \quad (2.6)$$

Burada; E , enerji, t kalınlık, τ tabakalar arası kayma dayanımı (ILSS), w genişlik, L destekler arası mesafe ve E_f eğilme modülüdür. Absorbe edilen elastik şekil değiştirme enerjisi kalınlık ve eğilme modülü artışıyla azalır. Düşük hızlı darbeden dolayı meydana gelen delaminasyon, bir eşik enerjiye ulaştıktan sonra oluşur. Delaminasyon başlatan matris kırıkları en alt tabakada meydana gelen çekme gerilmelerinden dolayı oluşur. Delaminasyonlar ara yüze bitişik olarak yayılabilir. Eğilme ve kayma kırılmaları delaminasyonu başlatır ama delaminasyon kayma kırılmalarıyla uyarılır bunlar stabil değildir ve eğilme çatlakları delaminasyon ilerlemesini uygulanan yükle orantılı olarak sağlar.

Elyaf hasarı matris çatlamasından ve delaminasyondan sonra oluşur. Elyaf hasarı, bölgesel yüksek gerilme nedeniyle vurucunun hemen altında meydana gelir ve bıraktığı izin etkileri arka yüzey tarafında yüksek eğilme gerilmeleri nedeniyle oluşur. Elyaf hasarı, delinme durumuna öncülük eder. Arka yüzey eğilmesinden dolayı elyaf hasarı için gereken enerji Formül 2.7'de verilmiştir.

$$E = \frac{\sigma^2 w t L}{18E_f} \quad (2.7)$$

Burada σ eğilme mukavemeti, E_f eğilme modülü, w genişlik, L destekler arası uzunluk ve t numune kalınlığını göstermektedir.

Delinme, makroskopik bir hasar modudur, elyafın kopması kritik bir dereceye ulaşır ve vurucunun numuneye tamamen nüfuz etmesini sağlar. Çeşitli faktörler, elyaf boyutu, elyaf yönlenmesi, dokuma türü, matris tipi ve ara yüzeyi delinmeyi etkiler. Aşağıdaki gibi absorbe edilen enerjiyi hesaplamak için önerilen analitik bir delinme modeli Formül 2.8’de verilmiştir.

$$E = \pi\gamma^2td \quad (2.8)$$

Burada γ kırılma enerjisi, d vurucu çapı ve t plaka kalınlığını göstermektedir (Abrate, 2011).

Malzemelere etki eden darbeye vurucunun boyutu, şekli, kütlesi, malzemesi ve vurma açısı gibi değişkenler malzemenin darbe davranışı üzerinde çok etkilidir. Keskin uçlu bir vurucu tarafından meydana gelen darbeler daha fazla yüzey ve elyaf hasarı oluşturur. Aynı zamanda matris malzemesinin türü absorbe edilen enerji ve darbe hasar modları için önemlidir (Aktaş, 2007).

2.2.4 Sandviç Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe Davranışı

Bir sandviç kompozitte meydana gelen düşük hızlı darbe hasarında; öncelikle vurucu üst tabakayı enine kesme kuvvetine maruz bırakır. Kabuk ve çekirdek malzemesi arasında şekil değiştirme uyumsuzluğundan dolayı ayrılmalar meydana gelebilir. Daha yüksek darbe enerjisinde vurucu, kabuk ve çekirdek malzemesi içinde ilerler. Vurucu alt kabuğa ulaştığında alt kabukta çekme gerilmesi meydana gelirken eğilmeye neden olur. Yüksek miktarda delaminasyon, vurucu alt kabuğa tamamen nüfuz etmeden önce meydana gelebilir.

Bir sandviç kompozitin darbe hasarı modu; sandviç kompozitin sınır koşullarına, vurucu şekline, boyutuna, elyaf yönlenmesine, kabuk ve çekirdek malzemelerinin özelliklerine bağlıdır. Kabuk tabakası çok ince olursa (çekirdek kalınlığının <10 katı), yer değiştirme büyük olma eğilimindedir (yüzey tabakasının kalınlığının katları) ve yüksek düzlem içi çekme kuvvetleri, çekirdekte mod I çekme çatlağına neden olur. Kabuk kalın olursa (çekirdek kalınlığının <2-5 katı), yer değiştirme küçük (kabuk kalınlığından az) olduğunda vurucunun vurduğu kısımlarda enine kayma kuvvetlerini

çevreleyen bölgelerde, çekirdekten mod II enine kayma çatlağına neden olur (Abrate, 2011).

2.3 Çekirdek Malzemesi Testleri

Numunelere yapılan düşük hızlı darbe testlerinin sonuçları nümerik sonuçlar ile kıyaslanabilmesi için üretilen sandviç kompozitlere basma, çekme ve kayma özelliklerinin tespit edilebilmesi için uygun testler yapılmıştır. Bu özelliklerin belirlenmesinde Shimadzu AG-X Plus 100 kN üniversal test cihazı kullanılmıştır.

2.3.1 Basma Testi

Üretilen sandviç kompozitin basma özelliklerini elde etmek için kalınlık boyunca basma testine tabi tutulmuştur. Numune boyutları 50 mm x 50 mm ve basma hızı 0,25 s⁻¹ olarak belirlenmiştir. Şekil 2.5'teki basma aparatı kullanılarak, sabit alt çene üzerine konulup ortalanmış numune hareketli üst çeneye tanımlanan test hızıyla basma testi yapılmıştır ve anlık yük değerleri kaydedilmiştir. Nümerik analizde kullanılması için numuneler cihazın yük kapasitesine uygun olarak neredeyse tamamen bastırılmıştır.



Şekil 2.5 Basma aparatı, test düzeneği ve numune (Kişisel arşiv, 2018)

Çekirdek malzemesinde meydana gelen gerilme Formül 2.9 ve şekil değiştirme Formül 2.10 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_z = \frac{P}{a.b} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta t}{t_c} \quad (2.10)$$

Burada σ_z düzlem dışı basma gerilmesi, ε_z birim şekil değiştirme, a ve b numunenin en ve boy ölçüleri, Δt numunenin basılma miktarı, t_c çekirdek malzemesinin kalınlığı ve P basma kuvveti değeridir.

2.3.2 Çekme Testi

Sandviç kompozit çekme testi için 50 mm x 50 mm boyutlarında numuneler kesilip, ortasında pim deliği olan çelik çekme bloklarına yapıştırılmıştır. Çekme hızı 0,5 mm/dk olarak belirlenmiştir. Sandviç kompozit numuneler çelik bloklara uygun biçimde yapıştırılıp Şekil 2.6'daki gibi çekme cihazına pimlenmiştir (Yalkın ve diğer., 2017).



Şekil 2.6 Sandviç kompozit çekme aparatı ve test düzeneği (Alpyıldız, 2016)

$$\sigma_z = \frac{P}{a.b} \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta t}{t_c} \quad (2.12)$$

Burada σ_z düzlem dışı çekme gerilmesi, ε_z birim şekil değiştirme, a ve b numunenin en ve boy ölçüleri, Δt numunenin uzama miktarı, t_c çekirdek malzemesinin kalınlığı ve P çekme kuvveti değeridir.

2.3.4 Kayma Testi

Sandviç kompozitlerin kayma özelliklerinin belirlenmesi için özel test aparatı kullanılmıştır. Test için iki yüzü pürüzlü numuneler 50 mm x 276 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Test öncesinde numuneler metal plakalara yapıştırılmıştır. Test hızı 0,5 mm/dk olarak belirlenmiştir. Şekil 2.7’de kayma testi numunesinin yakından görünümü sabit alt çene ve hareketli üst çeneye bağlı pimlenmiş kayma aparatı görülmektedir (Alpyıldız, 2016).

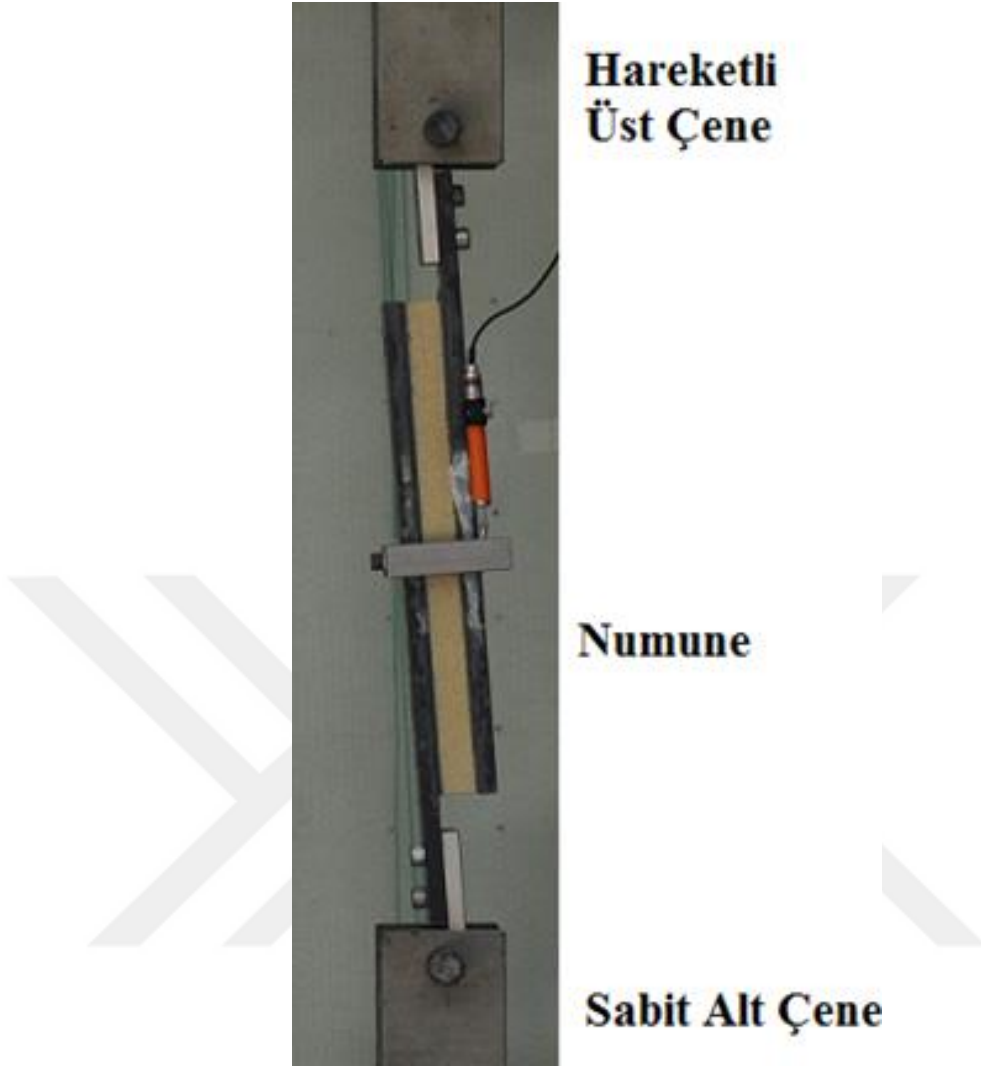
Kayma kuvveti Formül 2.13 ve 2.14 kullanılarak hesaplanır. Çekirdek malzemesine gelen kayma gerilmesini hesaplamak için, uygulanan kayma kuvveti sandviç kompozitin aparatla bağlantısı olan kısmının alanına bölünmesiyle Formül 2.15’te verildiği gibi bulunur.

$$F = P \cos \theta \quad (2.13)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{t_c}{l} \right) \quad (2.14)$$

$$\tau = \frac{F}{b.l} \quad (2.15)$$

Burada P numuneye cihaz tarafından uygulanan yük, F numunede meydana gelen kayma kuvveti, θ çekirdek kalınlığı ile uzunluk arasındaki açı, l numunenin uzunluğu, b numunenin genişliği, t_c çekirdek kalınlığı, τ kayma gerilmesi olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Kayma aparatı, numune ve yer değiştirme ölçer (Alpyıldız, 2016)

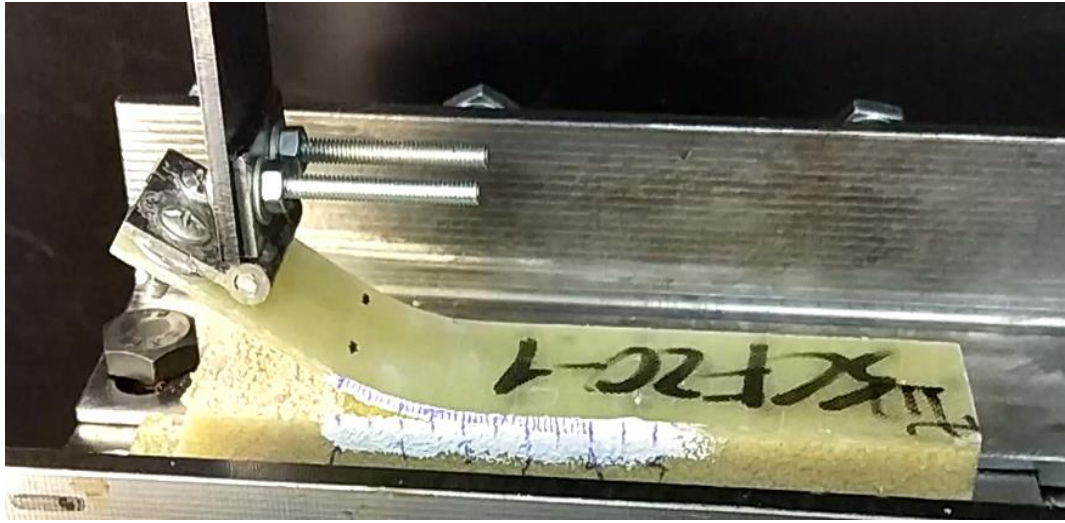
2.4 Sandviç Kompozit Kırılma Tokluğu Testleri

Sandviç kompozitlerin kırılma tokluğu değerlerinin belirlenmesi için 2 farklı test yapılmıştır. Bu testlerin numune hazırlanması, hesaplamaları ve değerlendirmeleri (Lascoup, Aboura, Khellil ve Benzeggagh, 2014; Shah ve Tarfaoui, 2017) çalışmasına göre yapılmıştır. Bu testler için numunelere uygun ön işlemler gerekmektedir. Mod I kırılma için numunede başlangıç çatlak oluşturulmuştur ve uygun biçimde yük uygulanabilmesi için numuneye menteşe bağlanmıştır. Yapıştırırmalı bağlantı deneme testlerinde ayrıldığı için cıvatalı bağlantı yapılmıştır. Test için numuneler 25 mm x 150 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Test hızı 0,5 mm/dk olarak belirlenmiştir. Şekil 2.8’de SCB (single cantilever beam) numunesinin yakından görünümü sabit alt ve

hareketli üst çeneye bağlı numune görülmektedir. Mod I kırılma tokluğu Formül 2.16 kullanılarak bulunur.

$$G_I = \frac{3P\delta}{2ba} \quad (2.16)$$

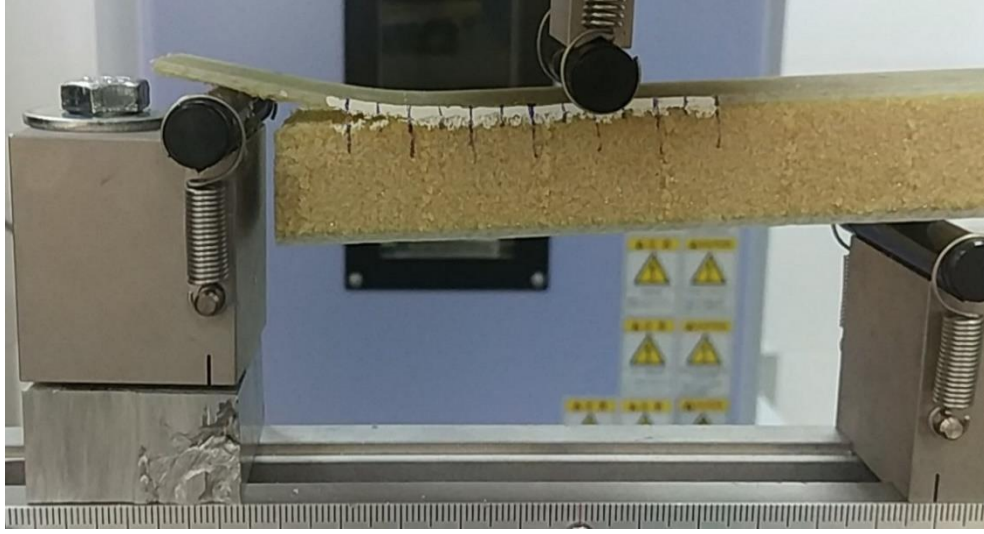
Burada P numuneye cihaz tarafından uygulanan yük, δ yer değiştirme, b numunenin genişliği, a ise test anındaki çatlak boyu olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.8 SCB numunenin test esnasındaki görüntüsü (Kişisel arşiv, 2019)

Şekil 2.9’da verilen test düzeneğinde görüleceği gibi mod II kırılma için öncelikle üç nokta eğme testi aparatına alt kabuk ve çekirdek malzemesi kalınlığı kadar parça eklenmiştir. Parça eklenen kısma üst kabuğun alt destek olabilesi için alt kabuk ve çekirdek malzemesinden 25 mm’lik kısım çıkartıldıktan sonra, numunede başlangıç çatlağı oluşturulmuştur.

SLB (single leg bend) numunesinde çatlak, açılma ve kayma modlarında ilerler, Formül 2.17-2.23 kullanılarak hesaplanan değerler karışık mod’tur, yani hesaplanan toplam enerjide hem açılma hem de kayma bileşeni vardır. Mod II değerinin bulunması için Formül 2.16 kullanılarak elde edilen mod I değeri çıkartılarak bulunur (Shah ve Tarfaoui, 2017).



Şekil 2.9 SLB numunesi test esnasında görünümü (Kişisel arşiv, 2019)

$$G_{\frac{I}{II}} = \frac{3P\delta a^2}{2b} \left[\frac{R-1}{2L^3 + a^3(R-1)} \right] \quad (2.17)$$

$$R = \frac{D}{D_s} \quad (2.18)$$

$$D_s = \frac{E_s t_s^3}{12} \quad (2.19)$$

$$D = D_{11} - \frac{B_{11}^2}{A_{11}} \quad (2.20)$$

$$A_{11} = 2E_s t_s + E_c t_c \quad (2.21)$$

$$B_{11} = \frac{(E_c - E_s) t_s t_c}{2} \quad (2.22)$$

$$D_{11} = \frac{E_s t_s (2t_s^2 + 3t_c^2) + E_c t_c (t_c^2 + 6t_s^2)}{12} \quad (2.23)$$

Burada, P numuneye cihaz tarafından uygulanan yük, δ yer değiştirme, b numunenin genişliği, a ise çatlak boyu, E_s kabuk malzemesinin elastisite modülü, E_c çekirdek malzemesinin elastisite modülü, t_s kabuk malzemesinin kalınlığı, t_c çekirdek malzemesinin kalınlığıdır. D ve D_s faktörlerini bulmak için, verilen A_{11} çekme, B_{11} çekme-eğme ve D_{11} eğme formülleri kullanılır.

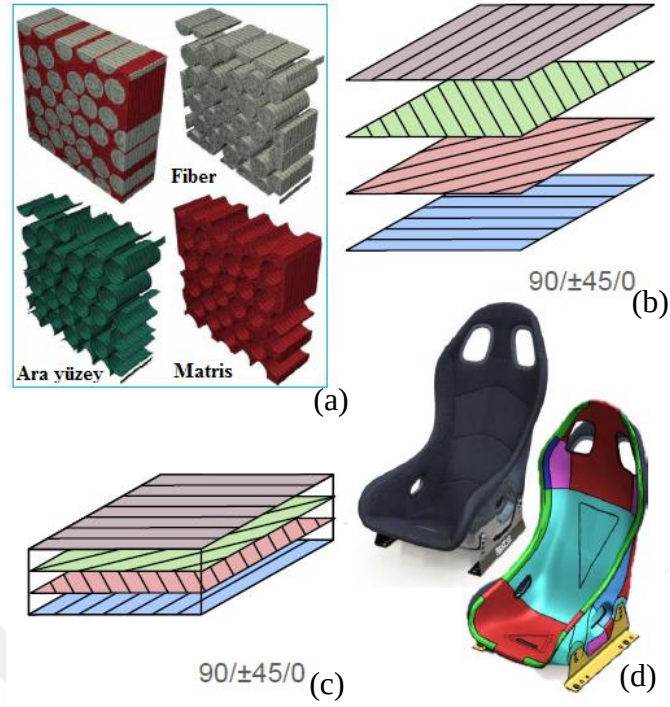
BÖLÜM ÜÇ

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

3.1 Giriş

Sonlu elemanlar analizi, karmaşık mühendislik problemlerini çözmek için ortaya çıkmıştır ve bilgisayar destekli tasarım, imalat, mühendislik ve optimizasyon sürecinin ayrılmaz bir parçası olmuştur. Bir sonlu elemanlar analizi yer değiştirme bazlı, gerilme bazlı, karışık veya hibrit olabilir. Yer değiştirmeye dayalı sonlu elemanlar analizi, sadeliği, genelliği ve iyi sayısal özellikleri nedeniyle en yaygın şekilde kullanılır. Sonlu elemanlar yöntemi kiriş, plaka, kabuk, düzlem gerilme, düzlem şekil değiştirme, eksenel simetrik ve üç boyutlu katı elemanlar modellemek için kullanılır. Sonlu elemanlar, malzemeyi küçük parçalara ayırarak daha kolay problem çözümü yapılan modelleme yöntemidir (ASM Handbook 21, 1990).

Kompozit malzemelerin anizotropik yapısı aynı zamanda kompozit malzemelerin sonlu elemanlar analizini metal malzemelerin sonlu elemanlar analizinden ayıran ve kompozitlerin analizini daha karmaşık ve zaman alıcı yapan en önemli özelliğidir. Kompozit yapıların analizinde, mikro merteye, orta merteye ve makro merteye yaklaşımları kullanılır. Şekil 3.1 (a) 'da görüleceği gibi mikro merteye yaklaşımında elyaf, matris ve ara yüzey ayrı ayrı tanımlanır. Bu tanımlama en detaylı yaklaşımdır ancak modellenmesi ve çözümlenmesi oldukça fazla zaman alabilir. Şekil 3.1 (b) ve Şekil 3.1 (c)'de verilen orta merteye yaklaşımında ise tabaka boyutunda veya birkaç tabakadan oluşan tabakalı boyutta malzeme homojen olarak kabul edilir. Gerilme dağılımları, yer değiştirmeler, hasar kriteri sonuçları bu yaklaşımla elde edilebilir. Şekil 3.1 (d)'de görüldüğü gibi makro merteye yaklaşımında yapısal elemanların montajlanmış hali, sınır koşulları ve uygulanan yükler bir arada kullanılıp bütün yapı homojen kabul edilerek, yer değiştirme, burkulma ve titreşim analizleri yapılabilir (Arikan, 2019; Mohamed, 2018).

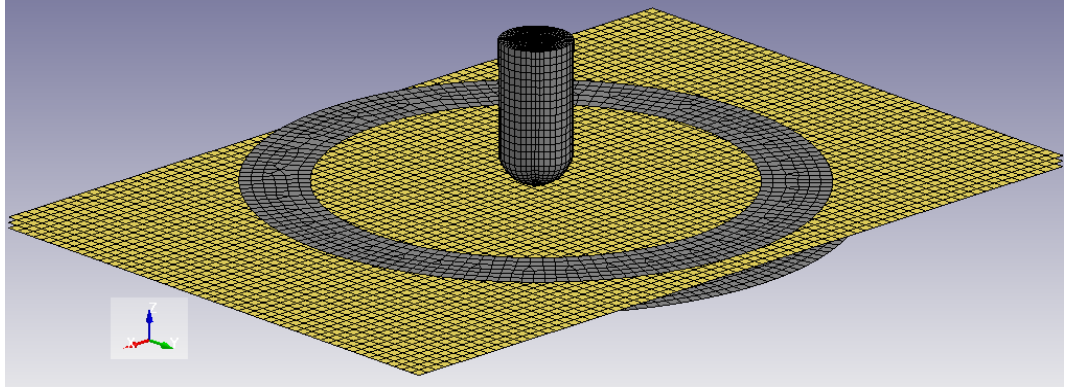


Şekil 3.1 Kompozit modellemede meritebe yaklaşımları (Mohamed, 2018)

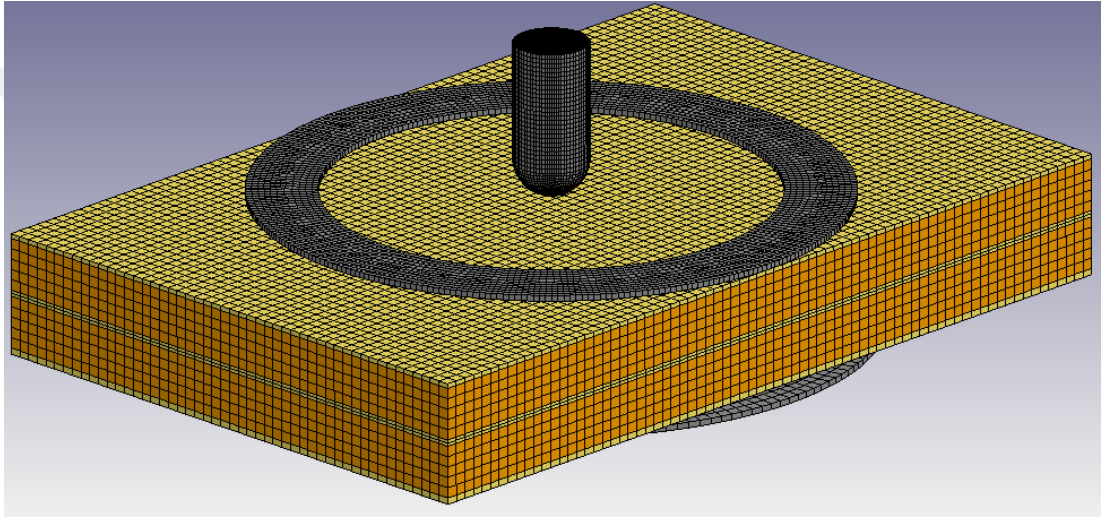
3.2 Modelin Tanımlanması

Numunelerin modellemesi, sonlu elemanlar analizi için gerekli tanımlamalar, analizi sonrası elde edilen verilerin alınması için LS- PrePost yazılımı kullanılmıştır. Tabakalı kompozit, Şekil 3.2’de ve sandviç kompozit Şekil 3.3’te gösterildiği gibi modellenmiştir. Modellenen vurucu, yarı küresel başlı silindir olarak 12,7 mm çap ve 4,92 kg kütleyle sahiptir. Dairesel destekler, kabuk elemanlar ile modellenmiştir. Nümerik analiz için deneylerde kullanılan aynı sınır şartları tanımlanmıştır.

Kompozit yapı ile vurucu arasındaki etkileşimi modellemek için, “Contact_ Automatic_ Surface_ to_ Surface” bağlantı modeli kullanılmıştır. Bu bağlantı modeli önerilen bir bağlantı temas modelidir. Darbe analizlerinde, parçaların birbirine göre yönelimi, model büyük deformasyonlara maruz kalabileceği için tahmin edilemeyebilir. Otomatik bağlantılar, bir kabuk elemanın her iki tarafındaki birbirine geçiş olup olmadığını kontrol eder (Hallquist, 2006).



Şekil 3.2 Tabakalı kompozit için nümerik analiz modeli



Şekil 3.3 Sandviç kompozit için nümerik analiz modeli

Vurucunun modellenmesi için “MAT020-Rijid” malzeme modeli kullanılmıştır. Aynı zamanda halka şeklindeki alt ve üst destekler için de aynı malzeme modeli kullanılmıştır. Vurucunun sadece düşey eksen doğrultusunda tek eksenli hareket etmesi için sınır koşulları bu malzeme modelinde tanımlanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan vurucu ile modellenen vurucunun ağırlığının aynı olması için modellenen vurucunun yoğunluğu arttırılmıştır. Tüm nümerik analiz verileri deneysel çalışmada olduğu gibi vurucudan alınmıştır.

Part_Composite tanımı, her bir kompozit katman için kullanıcı tanımlı integrasyon kuralları ve parça tanımı ihtiyacını ortadan kaldıran kabuk elemanlarında kompozit malzeme modelinin tanımlanması için basitleştirilmiş bir yöntem sağlar. Kompozit bir

kabuğun her bir kalınlık integrasyon noktası için tanımlanan malzeme numarası, tabaka kalınlığı, elyaf yönlenmesi ve varsa termal malzeme numarası bu tanımda verilir. Toplam integrasyon sayısı bu modeldeki girişlerin sayısı ile belirlenir (LS-DYNA Manual I, 2017). Bu çalışmada, Part_Composite özelliği; malzeme modeli, tabaka kalınlığı ve elyaf yönlenmesinin tanımlanması için kullanılmıştır.

3.3 Kompozit Malzeme Modeli

Kompozit malzemeler için kullanılan birçok farklı hasar kriteri vardır. Bunlar; bağımsız hasar kriterleri; maksimum gerilme, maksimum şekil değiştirme, polinomial hasar kriterleri; Tsai-Wu, Tsai-Hill, Hoffman, direk mod hasar kriterleri; Hashin, Puck, LaRC olarak örneklendirilebilir (Arikan, 2019). Bu çalışmada kullanılan malzeme modeli Hashin hasar kriterini baz almaktadır.

MAT058 Laminated_Composite_Fabric, malzeme modeli kabuk elemanları için “sürekli ortam hasar mekaniği” (continuum damage mechanics) temelli malzeme modeli kullanılarak uygulanmıştır (Hallquist, 2006).

Hashin, (1980) tarafından geliştirilen metodoloji laminadaki hasar kriterlerini bulmak için uygun bir yöntemdir. Üç boyutlu enine izotropik sürekli ortam, bir hasar kriterinin genel formuna, gerilme uzayındaki bütünlük temeli açısından tam bir kuadratik polinom ile yaklaşmaktadır. Genel hasar kriterini dört ayrı kritere bölmek için hasar yüzeyleri vardır. Bunlar; mod I elyaf kopması, elyaf doğrultusundaki çekme gerilmelerinden, mod II elyaf burkulması ve elyaf bükülmesi, elyaf doğrultusundaki basma gerilmelerinden dolayı oluşan matris kırılması eşliğinde oluşur. Mod III elyaf yönüne dik çekme ve kayma gerilmelerinden oluşan matris kırılması ve mod IV elyaf yönüne dik basma ve kayma gerilmelerinden dolayı oluşan matris ezilmesi meydana gelir.

Matris ve elyaf için hasar kriterlerinin her biri, daha sonra çekme ve basma modlarına ayrılmıştır. İkinci dereceden polinomun dört gerilme parametresi X_t , X_c , Y_t , Y_c tek eksenli çekme ve basma testi ile edinilebilir. Birçok uygulamada, elyaf yönünde ve elyaf yönüne dik kayma gerilmeleri ve kayma direnci parametreleri eşit

olarak kabul edilmiştir ve S_c ile gösterilmektedir. Düzlem gerilme varsayımları dört hasar kriterine uygulandıktan sonra, aşağıdaki basit biçimlerde Formül 3.1-3.4'e indirgenebilir;

Elyaf çekme modu I: $\sigma_{11} \geq 0$

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{hasar} \\ < 0 & \text{elastik} \end{cases} \quad (3.1)$$

Elyaf basma modu II: $\sigma_{11} < 0$

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{hasar} \\ < 0 & \text{elastik} \end{cases} \quad (3.2)$$

Matris çekme modu III: $\sigma_{22} \geq 0$

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_c}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{hasar} \\ < 0 & \text{elastik} \end{cases} \quad (3.3)$$

Matris basma modu IV: $\sigma_{22} < 0$

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_c}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{hasar} \\ < 0 & \text{elastik} \end{cases} \quad (3.4)$$

Burada, σ_{11} elyaf yönünde meydana gelen gerilme, σ_{22} elyaf yönüne dik meydana gelen gerilme, τ_{12} kayma gerilmesi, X_t elyaf yönündeki çekme dayanımı, X_c elyaf yönündeki basma dayanımı, Y_t elyafa dik yönde çekme dayanımı, Y_c elyafa dik yönde basma dayanımı, S_c kayma dayanımıdır.

Bu malzeme modelinde bir elemandaki hasarı kontrol etmek için kullanılan parametre ERODS'tur. Maksimum efektif şekil değiştirme, yani maksimum değer =1, % 100 şekil değiştirme anlamına gelmektedir. Eleman maksimum efektif şekil değiştirmeye (çekme, basma, kayma) ulaşıldıktan sonra tamamen silinir. Gerilme limit faktörleri, gerilmeleri belirli bir değere sınırlamak için kullanılan faktörlerdir.

$$\sigma_{min} = SLIM_{xx} \times dayanım \quad (3.16)$$

Böylece hasar değeri, elastoplastik benzeri davranışın eşik gerilimi ile elde edileceği şekilde biraz değiştirilmiş olur. $SLIM_{xx}$ faktörü 0,0 ile 1,0 arasında bir sayı olabilir. Bu faktör 1,0 değeri ile gerilme, ideal elastoplastik davranışa benzeyen, dayanıma (Formül 3.16) eş bir maksimum değerde kalır. Elyaf yönünde ve elyafa dik yönde çekme hasarı için kullanılan $SLIM_{Tx}$ için küçük bir değer genellikle makul iken, elyaf yönünde ve elyafa dik yönde basma için kullanılan $SLIM_{Cx}=1,0$ ve kayma hasarı için kullanılan $SLIM_S = 1,0$ tercih edilmesi uygundur. (Hallquist, 2006; LS-DYNA Manual II, 2017). Bu çalışmada tabakalı ve sandviç kompozit için $SLIM_{Cx} = 1,0$, $SLIM_S = 1,0$ olarak alınmıştır. Tabakalı kompozit için; $SLIM_{Tx} = 0,32$ ve $ERODS = 0,60$ sandviç kompozit için $SLIM_{Tx} = 0,45$ ve $ERODS = 0,55$ değerlerinin daha uygun olduğu belirlenmiştir.

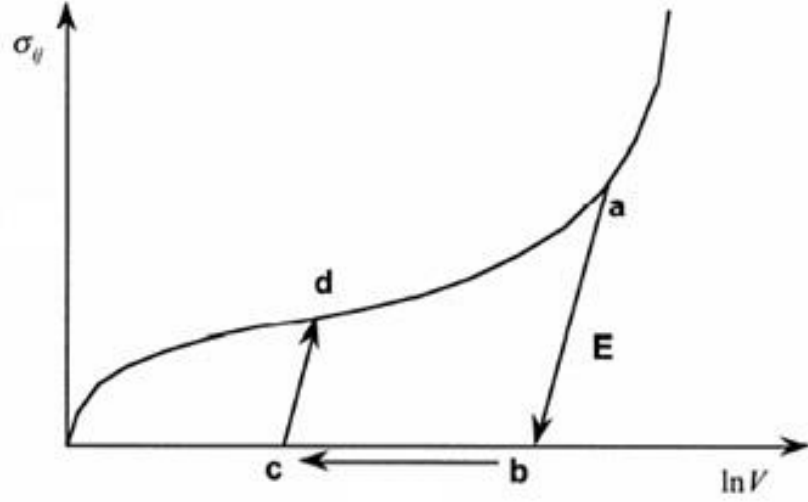
3.4 Çekirdek Malzeme Modeli

MAT063 Crushable_Foam, malzeme modelinin amacı, darbede kırılabilir köpükler ve döngüsel davranışın kullanılmadığı uygulamalardır. Bu izotropik köpük modeli, aslında sıfır olan bir poisson oranı ile tek boyutlu olarak ezilir. Gerilme - şekil değiştirme davranışı Şekil 3.5'te gösterilmektedir, burada a noktasından b noktasına yük boşaltma, sonra c noktasına geri gelmesi ve son olarak d noktasına yeniden yükleme örneği gösterilmektedir. Bu noktada yeniden yükleme, yükleme eğrisi boyunca devam edecektir. Bu malzeme modelinde elastisite modülünün sabit olduğu varsayılır ve elastik davranış varsayılarak gerilmeler güncellenir (Formül 3.17).

$$\sigma_{ij}^{trial} = \sigma_{ij}^n + E \varepsilon_{ij}^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (3.17)$$

Asal değerlerin temel değerlerinin büyüklüğü, $\sigma_i^{trial}, i = 1,3$ daha sonra, akma gerilmesi olup olmadığını görmek için σ_y aşılırsa kontrol edilir ve öyleyse akma yüzeyine geri ölçeklendirilir (Formül 3.18).

$$\sigma_y < |\sigma_i^{trial}| \text{ ise } \sigma_i^{n+1} = \sigma_y \frac{\sigma_i^{trial}}{|\sigma_i^{trial}|} \quad (3.18)$$



Şekil 3.5 Gerilme - hacimsel şekil değiştirme eğrisi (LS-DYNA Manual II, 2017)

Temel değerler ölçeklendikten sonra, gerilme tensörü tekrar genel sisteme dönüştürülür. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi akma gerilimi, hacmin (V), hacimsel şekil değiştirmenin doğal logaritmasının bir fonksiyonudur (Formül 3.19). Bu malzeme modeli için gerilme şekil değiştirme eğrisi verileri kullanılması gerekmektedir (LS-DYNA Manual II, 2017).

$$\varepsilon_v = 1 - \frac{V}{V_0} = 1 - \frac{AL}{A_0 L_0} \quad \varepsilon_v = 1 - \frac{L}{L_0} \quad (3.19)$$

3.5 Delaminasyon Modeli

Delaminasyon kompozit malzemeler için oldukça önemli bir hasar mekanizmasıdır. Delaminasyon yüksek tabakalar arası gerilmelerden dolayı meydana gelir. Düzlem dışından gelen yüklemeler kavisli veya incelen şekillerden, çatlaklardan dolayı meydana gelen süreksizliklerden, tabaka sayısı değişirken meydana gelen reçinece zengin bölgelerden ve kenar kısımlarından dolayı meydana gelebilir. CZM (Cohesive Zone Model) modeli bir çatlak ucu veya yapışma arayüzündeki çatlaklı

yüzeylerin ayrılmasını tanımlar. Bu tanımlama LS-DYNA’da yapışma ara yüzeyi elemanları ve “tiebreak” bağlantısı kullanılarak yapılabilir (Mohamed, 2018).

Tabakalı kompozit numunelerin delaminasyon modellemesi için, kabuk elemanı katmanları arasında “Automatic_One_Way_Surface_to_Surface_Tiebreak” bağlantı modeli seçenek 8 kullanılmıştır. Bu bağlantı modeli malzemenin normal ve kayma mukavemeti açısından tabakalar arası özelliklerini kullanır. LS-DYNA’da delaminasyonu modellemek için tiebreak bağlantı tipinde farklı seçenekler vardır. Tabakalı kompozitlerin delaminasyonunun analizi için, elemanlar kabuk katmanı olarak modellenir, ancak başlangıçta temasta olan katlar arasındaki düğümler, tiebreak bağlantısına karşılık gelen bir hasar kriterine ulaşılan kadar kayma hareketlerini önleyerek bir araya getirilir. Özellikle, düğümdeki gerilme analiz boyunca izlenir ve arayüz dayanımına dayalı hasar kriteri uygulanır:

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{NFLS}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{SFLS}\right)^2 \geq 1 \quad (3.17)$$

Burada mevcut normal gerilmeler σ_n ve kayma gerilmeleri σ_s , tabakalar arası normal gerilme NFLS ve tabakalar arası kayma gerilmesi SFLS, olarak bağlantı modelinde kullanılır. Formül 3.17’nin değeri 1’e ulaştığında, başlangıçta temas halinde olan iki nokta arasındaki mesafenin bir fonksiyonu olarak doğrusal olarak sıfıra indirgenir. Tanımlanmış bir kritik çatlak açıklığına ulaşılar ulaşılmaz, bu düğümler için bağlantı temas tanımı serbest bırakılır. Temas tanımının bağlantı bileşeni silindiğinde, bu düğümler için temas, iç içe geçmeyi önleyen standart bir “surface_to_surface” tanımına dönüştür (Menna ve diğer., 2011).

Sandviç kompozitlerde kabuk çekirdek arasındaki delaminasyonun analizi için “Automatic_One_Way_Surface_to_Surface_Tiebreak” bağlantı modelinde seçenek 9 kullanılmıştır. Bu model ikinci dereceden karışık mod delaminasyon kriteri ve bir hasar formülasyonu içerir. Normal ve teğetsel yönlerdeki nihai yer değiştirmeler, malzemenin tamamen hasara uğradığı zamandaki yer değiştirmelerdir, yani değerler sıfırdır. Yükleme esnasında lineer artış ve ardından hasar sırasında lineer azalış meydana gelmektedir. Kırılma tokluğu, maksimum değer ve nihai yer değiştirmeler

arasında basit bir ilişki sağlar. Bu malzeme modelinde verilen toplam karışık mod relatif yer değiştirme Formül 3.18’de verilmiştir. Formül 3.19’da mod I normal doğrultuda ayrılma, Formül 3.20’de mod II teğetsel doğrultuda ayrılmalıdır (*LS-DYNA Manual II*, 2017; Mohamed, 2018).

$$\delta_m = \sqrt{\delta_I^2 + \delta_{II}^2} \quad (3.18)$$

$$\delta_I = \delta_3 \quad (3.19)$$

$$\delta_{II} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2} \quad (3.20)$$

BÖLÜM DÖRT

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1 Giriş

Bu bölümde, yapılan testlerden elde edilen mekanik özellik sonuçları, tabakalı kompozit ve sandviç kompozitlere yapılan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen sonuçlar, deneysel ve nümerik karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Öncelikle tabakalı kompozitin sonuçları, enerji profil diyagramı oluşturularak, absorbe edilen enerji, temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri değerlendirilmiştir. Tabakalı kompozitin (T) elyaf yerleşiminin ortasına 20 mm çekirdek malzemesi kullanılarak tek çekirdekli sandviç kompozit (S) elde edilmiştir. Çekirdek malzemesi kalınlığı yarıya indirilerek üç kabuk ve iki çekirdek malzemesinden oluşan tek çekirdekli sandviç kompozit ile aynı kalınlıkta iki çekirdekli sandviç kompozit (2S) ve çekirdek malzemesine belirli aralıklarla açılan deliklere üretim esnasında dolan epoksi reçinelerin oluşturduğu iki çekirdekli epoksi kolonlu sandviç kompozit (2SEK) yapı oluşturulmuştur. Daha sonra orta kabuktaki cam elyaf tabakaları ve iki çekirdek dikilerek oluşturulan iki çekirdekli çekirdek dikişli sandviç kompozit (2SCD) ve tüm kabuklarda kullanılacak cam elyaf tabakaları ve iki çekirdek dikilerek oluşturulan iki çekirdekli kabuk dikişli sandviç kompozit (2SKD) yapılar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için temas kuvveti - zaman, temas kuvveti - çökme eğrileri oluşturulmuştur. Absorbe edilen enerji, pik kuvvet, maksimum çökme ve temas süresi değerleri tablolarda deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılmıştır.

Nümerik analizde kullanılan E-cam/epoksi kompozit malzemenin mekanik özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir. Sandviç kompozitin mekanik özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.1 E-cam/epoksi mekanik özellikleri

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	X_t (MPa)	Y_t (MPa)	X_c (MPa)	Y_c (MPa)	S (MPa)
33,5	11,9	3,21	0,28	728	476	164,6	113,5	76,1

Tablo 4.2 Sandviç kompozitin mekanik özellikleri

Numune	Basma Dayanımı (MPa)	Basma Modülü (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)	Kayma Modülü (MPa)
S	0,88	42,7	1,71	42,1	0,68	18,4
2S	1,03	53,0	2,35	47,1	0,88	23,9
2SEK	3,67	110	1,60	61,0	0,91	27,9
2SCD	4,36	206	2,06	69,8	1,23	30,9
2SKD	3,79	165	2,65	64,3	1,20	30,8

4.2 Tabakalı Kompozit Sonuçları

Tabakalı kompozit numunenin orta noktasına yapılan düşük hızlı darbe testinde vurucunun kütlesi sabit tutulup hızı değiştirilmiştir. Darbe hızları 2,01 m/s, 2,84 m/s, 3,48 m/s, 4,02 m/s, 4,27 m/s, 4,5 m/s, 4,72 m/s, 4,93 m/s sırasıyla 10J, 20J, 30J, 40J, 45J, 50J, 55J, 60J enerji değerlerini elde etmek için kullanılmıştır.

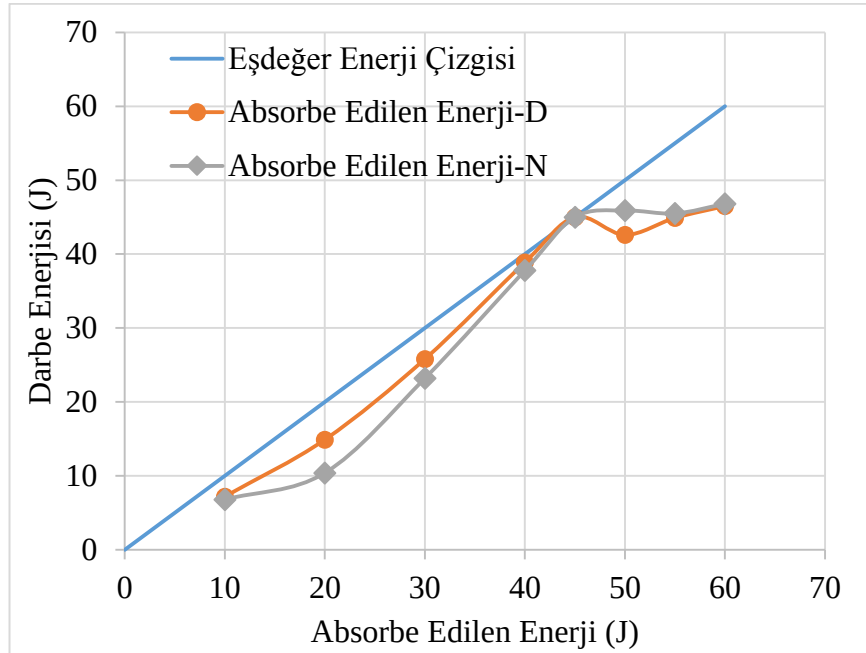
Sekiz farklı enerji değerinde yapılan, nümerik çalışmalar (Yalkın, Karakuzu ve Alpyıldız, 2020;Yalkın ve Karakuzu, 2019) deneysel (Alpyıldız, 2016) sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Numune ile vurucu arasındaki temas kuvveti, numunede meydana gelen çökme miktarı verileri zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar temas kuvveti - zaman eğrileri, temas kuvveti - çökme eğrilerini elde etmek için kullanılmıştır. Temas kuvveti - çökme eğrisinin altında kalan alan absorbe edilen enerji değerinin hesaplanmasında kullanılmıştır.

Darbe enerjisi (E_i) ve absorbe edilen enerji (E_a), kompozit yapıların darbe davranışını değerlendirmek için iki önemli parametredir. Darbe enerjisi, yapıya test esnasında verilen toplam enerji miktarı olarak tanımlanır. Absorbe edilen enerji, numunede meydana gelen bir takım hasarlarla (matris kırılması, çatlak ilerlemesi, elyaf kırılması vb.) yapı tarafından absorbe edilen enerjidir. Darbe enerjisi ile absorbe edilen enerji arasındaki ilişkiyi gösteren eğri enerji profil diyagramı olarak adlandırılır. Enerji profili oluşturma yöntemi, geri sekme, saplanma ve delinme eşikleri gibi bazı düşük hızlı darbe özelliklerini karakterize etmekte kullanılır. Bir enerji profil

diyagramının şekli, hem vurucu hem de kompozit yapıdan kaynaklı bir dizi faktörden etkilenebilir. Örneğin; elyafın yapısı, kalınlığı, elyaf yerleşimi ve vurucunun şeklinden olabilir (Liu, 1988).

Düşük hızlı darbe testinde numune ile vurucu arasında üç durum meydana gelebilir. Bunlar geri sekme, saplanma ve delinmedir. Geri sekme durumunda vurucuya elastik olarak enerji geri dönüşü oluşurken, saplanma ve delinme durumunda elastik olarak enerji geri dönüşü yoktur. Temas kuvveti - çökme eğrilerinde tüm durumlarda maksimum kuvvete kadar aynı davranış sergilenir. Temas kuvvetinin azalması, farklı enerji değerleri için farklı hasar mekanizmaları nedeniyle farklıdır.

Enerji profil diyagramını çizmek için, 10J ile 60J arasında değişen çeşitli darbe enerjilerinde toplam sekiz enerji değerinde test yapılmıştır. Absorbe edilen enerjiye karşı darbe enerjisi eğrileri hem deneysel hem de nümerik olarak elde edilen sonuçlar kullanılarak çizilmiştir (Şekil 4.1). Bu eğriler üç farklı bölgeden oluşur. 10J - 40J arasındaki enerji değerlerinde, numunelerden vurucunu geri sekme davranışı göstermiştir. Geri sekme durumunda, temas kuvveti sıfır kuvvet değerine geri döner.

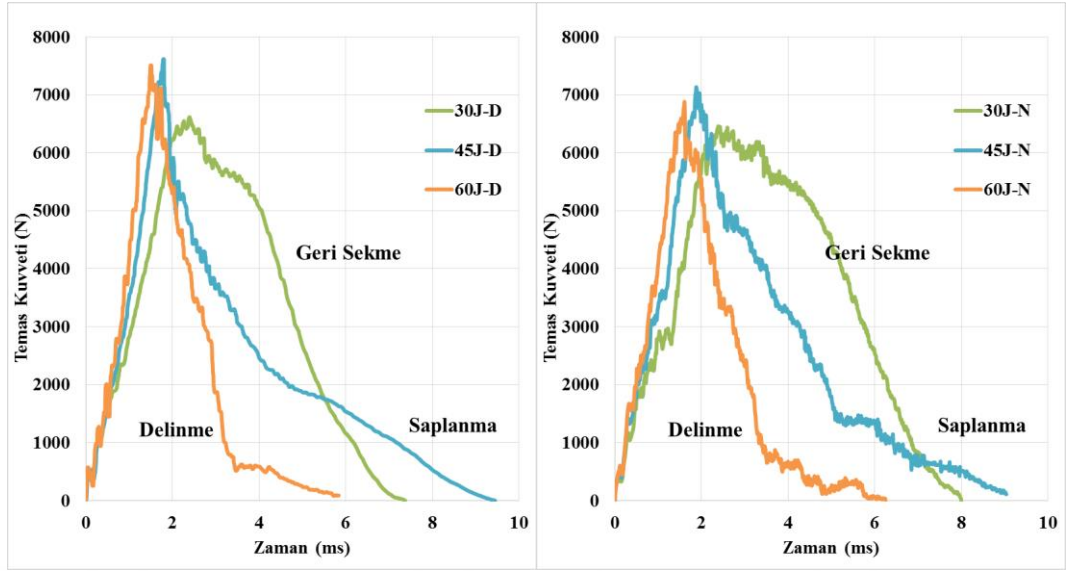


Şekil 4.1 Absorbe edilen enerji ve darbe enerjisi eğrileri

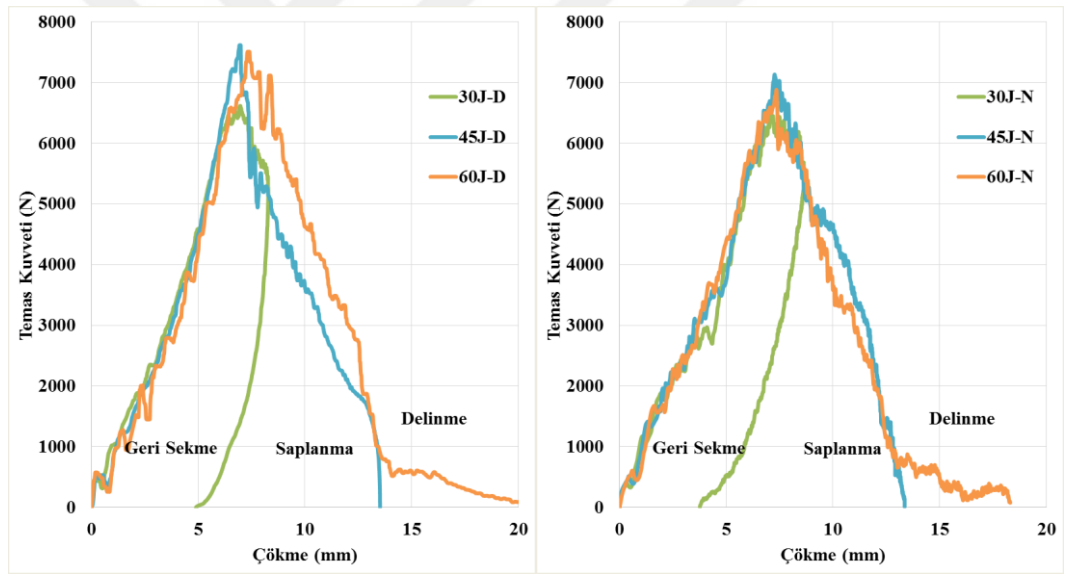
Saplanma durumu, darbe enerjisinin tamamen numune tarafından absorbe edildiği anlamına gelir. 45J enerji değeri saplanma enerji seviyesidir (Şekil 4.1), bu durumda vurucu durur ve temas kuvveti değeri aynı anda sıfır olur. Absorbe edilen enerji değeri ilk defa darbe enerjisine eşittir. Delinme durumu ise 50J, 55J, 60J enerji değerlerinde meydana gelmiştir. Delinmeden sonra temas kuvveti, tabakalı kompozit numune ile vurucu arasındaki sürtünme nedeniyle nispeten sabit bir değere ulaşmıştır. Absorbe edilen enerji değerleri, farklı darbe enerjisi değerleri için neredeyse sabit kalır. Düşük hızlı darbe davranışlarının basit bir şekilde anlaşılması için, temas kuvveti - zaman eğrilerinde sadece üç enerji değeri kullanılmıştır. Bunlar Şekil 4.2’de deneysel ve nümerik olarak verilen sonuçlarda geri sekme için enerji değeri 30J, saplanma için enerji değeri 45J ve delinme için enerji değeri 60J’dir. Şekil 4.3’de verilen temas kuvveti - çökme eğrilerinde bu enerji değerleri için deneysel ve nümerik çalışmalar arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir.

Temas kuvveti çökme eğrileri de düşük hızlı darbe davranışları gösterir. Şekil 4.4’de görüldüğü gibi 30J geri sekme enerjisi için, vurucu geri sekmiştir ve vurucu ikincil darbenin önlemesi için ikincil darbe önleyici sistem tarafından engellenmiştir. Nümerik ve deneysel çalışmalarda maksimum çökme değerleri yaklaşık 9 mm’dir. Saplanma durumunda 45J darbe enerjisi değeri için, temas kuvveti sıfır olduğunda çökme değerleri yaklaşık 13 mm’dir. Delinme durumda, vurucu ile tabakalı kompozit arasındaki sürtünme nedeniyle deneysel ve nümerik olarak 13 mm’den sonra sistemde az miktarda temas kuvveti meydana gelmektedir.

Absorbe edilen enerji verileri tüm darbe enerjileri için Tablo 4.3’de verilmiştir. Verilen tabloda gösterildiği gibi, deneysel ve nümerik sonuçların enerji değerleri birbirine çok yakındır. Tablo 4.4’te maksimum temas kuvveti, çökme miktarı ve zaman değerleri karşılaştırılmıştır. Absorbe edilen enerji değerleri, darbe enerjisi değerini saplanma enerjisine kadar artırarak temas kuvvetinin arttığını göstermektedir. Delinme enerjisi üzerinde, maksimum temas kuvveti bir miktar azalır. Bununla birlikte, darbe enerjisi değeri artarak vurucunun temas süresi azalır.



Şekil 4.2 Deneysel ve nümerik temas kuvveti – zaman eğrileri



Şekil 4.3 Deneysel ve nümerik temas kuvveti – çökme eğrileri

Tablo 4.3 Absorbe edilen enerji değerleri

Darbe Enerjisi - E_i (J)	10	20	30	40	45	50	55	60
Absorbe Edilen Enerji - Deneysel E_a (J)	7,2	14,9	25,8	38,9	45	42,6	44,9	46,5
Absorbe Edilen Enerji - Nümerik E_a (J)	6,8	10,4	23,2	37,8	45	45,9	45,5	46,8

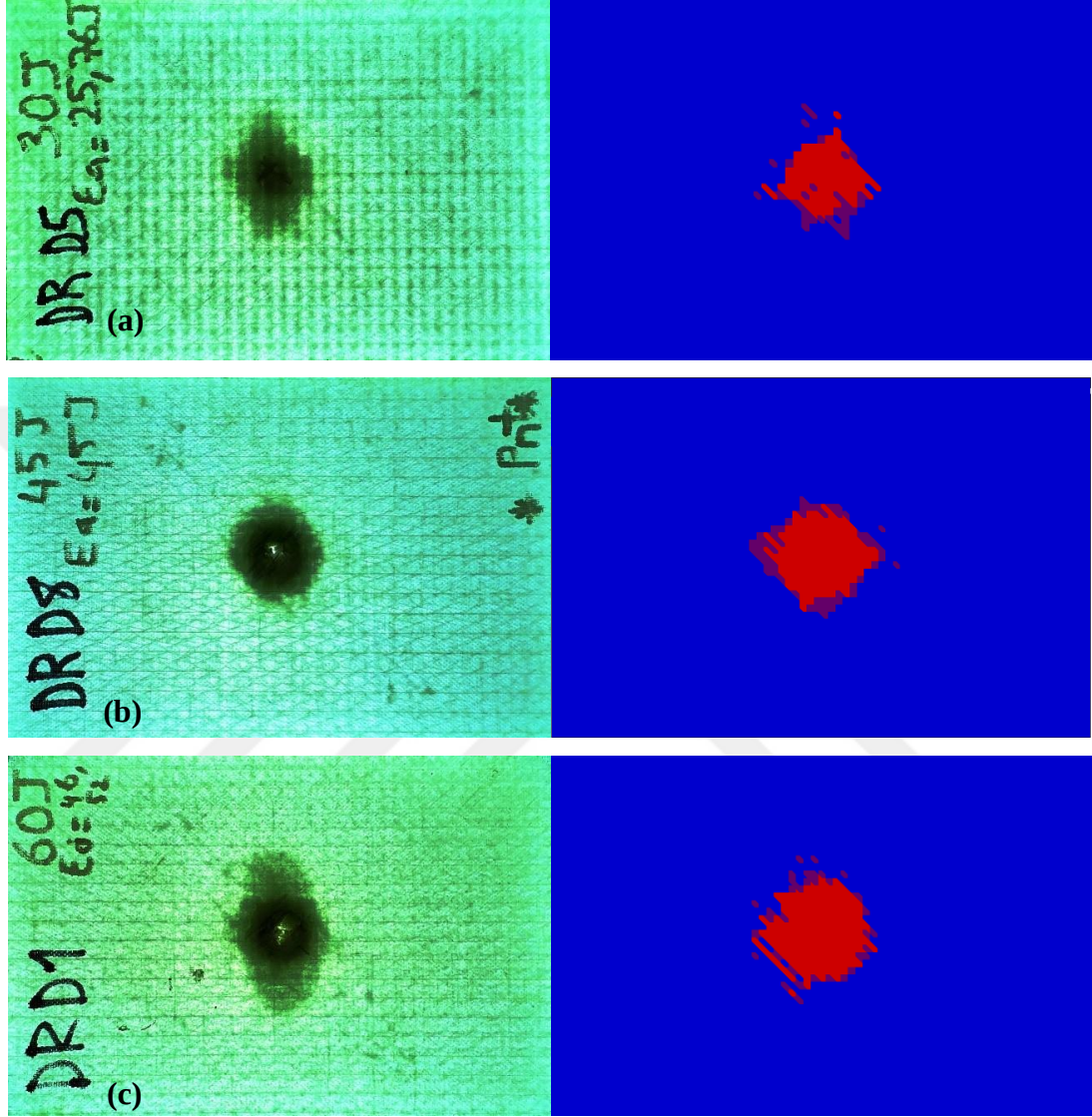
Delaminasyon davranışı, “LS-DYNA Program Manager” içindeki, “advanced” sekmesinde “intfor” komut satırı eklenerek elde edilir. Elde edilen veri dosyası delaminasyon verilerini içerir. Delaminasyonun görselleştirilmesi için iki renkli gösterim seçilir. İlk olarak, delaminasyon modeli on iki katman ve altı katman ile denenmiş, ancak modellenen katmanlar nümerik dengesizliklere neden olmuştur. Bundan dolayı, iki bağlantı ara yüzüne sahip olan delaminasyon analiz modeli, üç kabuk eleman tabakası ile seçilmiştir. Bu iki arayüzey “automatic_one_way_surface_to_surface_tiebreak” delaminasyon tanımı seçenek 8 ile tanımlanmıştır. Tabakalar arası çekme dayanımı NFLS: 33 MPa, tabakalar arası kayma dayanımı SFSL: 36 MPa olarak tanımlanmıştır.

Tablo 4.4 Tabakalı kompozit (T) pik temas kuvveti, çökme miktarı ve temas süresi değerleri

T Darbe Enerjisi - E_i (J)	Pik Temas Kuvveti (N) - Deneysel	Pik Temas Kuvveti (N) - Nümerik	Maks. Çökme Miktarı (mm) - Deneysel	Maks. Çökme Miktarı (mm) - Nümerik	Temas Süresi (ms) - Deneysel	Temas Süresi (ms) - Nümerik
10	3744	4294	5,13	5,38	7,45	7,60
20	5927	6260	7,67	7,08	7,02	7,19
30	6616	6457	9,31	8,67	7,10	7,74
40	6782	6866	12,80	10,72	8,33	8,92
45	7616	7132	13,49	13,30	8,68	8,57
50	7326	7063	13,40	13,51	4,41	4,85
55	6972	6678	13,14	13,10	3,84	4,08
60	7509	6877	13,12	13,46	3,46	3,86

Her bir kabuk elemanı, elyaf yönlenmesine göre dört iç integrasyon noktasına sahiptir. Temas kuvveti, çökme ve zaman eğrilerindeki gibi üç enerji seviyesi seçilmiştir. Bunlar; 30J geri sekme enerjisi (Şekil 4.4(a)), 45J saplanma enerjisi (Şekil 4.4(b)) ve 60J delinme enerjisidir (Şekil 4.4(c)). Deneysel çalışmadaki numune fotoğrafları, numunenin altında bir ışık kaynağı ile çekilmiştir. Nümerik çalışmadaki

numune ekran görüntüleri, katmanların saydamlığı değiştirilerek alınmıştır. ImageJ görüntü işleme programı kullanılarak delaminasyon alanları hesaplanmıştır.



Şekil 4.4 Deneysel ve nümerik çalışmaların delaminasyon görüntüleri (Kişisel arşiv, 2019)

Darbe enerjilerine göre, tabakalı kompozitler farklı hasar davranışlarına sahiptir. Düşük enerji değerlerinde matris çatlakları alt tabakadaki elyafa paralel olarak başlar, delaminasyon başlangıcı ± 45 tabakalar arasındaki interlaminar gerilmelere bağlı matris çatlağını takip eder. Elyaf kırılması, matris çatlakları ve delaminasyondan sonra meydana gelir. 30J geri sekme darbe enerjisinde, yükleme sırasında matris çatlakları ve delaminasyon meydana gelir. Bu temas kuvveti pik değere ulaşmasından sonra temas kuvveti önemli ölçüde azalmıştır. Bu temas

kuvvetindeki azalma, 30J geri sekme enerjisinde elyaf kırılmasından kaynaklanır. Hasar alanı deneysel ve nümerik çalışmalar için sırasıyla 507 mm² ve 466 mm² olarak hesaplanmıştır. 45J darbe enerjisinde, vurucu numuneye nüfuz eder. Etkilenen bölgenin her iki tarafında da delaminasyon alanı genişler ve elyaf kırılması artar. Hasar alanı deneysel ve nümerik çalışmalar için sırasıyla 609 mm² ve 683 mm² olarak hesaplanmıştır. 60J delinme enerjisinde, delaminasyon ve elyaf kırılması artırarak vurucu numuneye tamamen nüfuz eder. Hasar alanı deneysel çalışma için 756 mm² ve nümerik analiz için 712 mm² olarak hesaplanmıştır.

Deneysel ve nümerik çalışmaların toplam delaminasyon alanları seçilen enerji değerleri için birbirine yakındır. Verilen şekillerde görüldüğü gibi, hem deneysel hem de nümerik çalışmalar için darbe enerjisinin artışıyla hasar alanı artar.

4.2 Sandviç Kompozit Sonuçları

Sandviç kompozit numunenin orta noktasına yapılan darbe testinde vurucunun kütlesi sabit tutulup hızı değiştirilmiştir. Darbe hızları 4.942 m/s, 5.143 m/s, 5.34 m/s, 5.525 m/s sırasıyla 60J, 65J, 70J, 75J enerji değerlerini elde etmek için kullanılmıştır. S, 2S ve 2SEK ile kodlanan sandviç kompozitlere 60J, 65J ve 70J enerji değerlerinde, 2SCD ve 2SKD ile kodlanan sandviç kompozitlere 65J, 70J ve 75J enerji değerlerinde düşük hızlı darbe testi yapılmıştır.

Her farklı tip numune için üç farklı enerji değerinde yapılan nümerik çalışmalar deneysel sonuçlarla (Alpyıldız, 2016) karşılaştırılmıştır. Sandviç kompozit numune ile vurucu arasındaki temas kuvveti, numunede meydana gelen çökme miktarı verileri zamana bağlı olarak elde edilmiştir.

Tek çekirdekli sandviç kompozitin (S) düşük hızlı darbe testi temas kuvveti eğrilerinde iki adet pik kuvvet değeri yer almaktadır. Vurucu sandviç kompoziti delmek için yeterli enerjiye sahipse düşük hızlı darbe esnasında temas kuvveti, vurucu üst kabuğa temas etmeye başladığından itibaren hızlı bir şekilde artmaya başlar, 1.pik temas kuvveti bu aralıktaki en yüksek kuvvet değeridir. Elyaf kırılması meydana gelip, elyaf kırılmaları artarken temas kuvveti düşüşe geçer, vurucu kabuk malzemesine göre

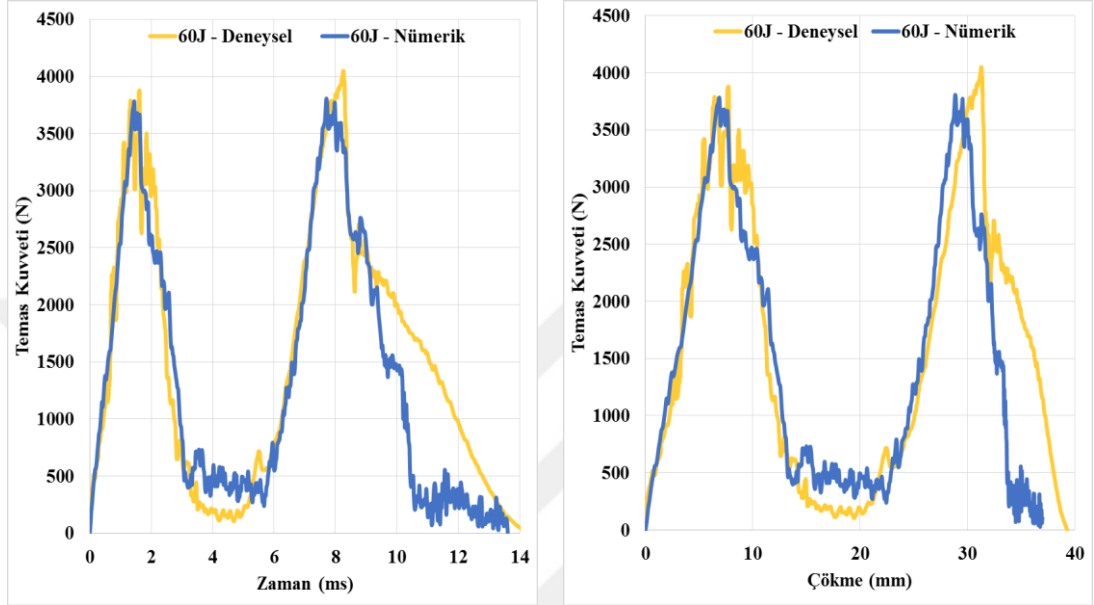
çok zayıf olan çekirdek malzemesi içinde ilerlerken temas kuvveti değeri oldukça düşük seviyededir. Vurucu çekirdek malzemesini geçip alt kabuğa ulaştıktan sonra tekrar temas kuvveti hızlı bir biçimde artmaya başlar, 2.pik temas kuvveti bu aralıktaki en yüksek kuvvet değeridir. Alt kabukta elyaf kırılması meydana gelip, elyaf kırılmaları artarken temas kuvveti tekrar düşüşe geçer ve sandviç kompozit numune delinmiş olur.

İki çekirdek içeren sandviç kompozit (2S), iki çekirdek içeren epoksi kolonlu sandviç kompozit (2SEK), iki çekirdek içeren çekirdek dikişli sandviç kompozit (2SCD) ve iki çekirdek içeren kabuk dikişli sandviç kompozit (2SKD) numuneleri düşük hızlı darbe testi temas kuvveti eğrilerinde benzer davranışı sergilemektedir. Bu eğrilerde üç adet pik kuvvet değeri yer almaktadır. Vurucu iki çekirdekli sandviç kompoziti delmek için yeterli enerjiye sahipse düşük hızlı darbe esnasında, vurucu üst kabuğa temas etmeye başladığından itibaren temas kuvveti hızlı bir şekilde artmaya başlar, 1.pik temas kuvveti bu aralıktaki en yüksek kuvvet değeridir. Elyaf kırılması meydana gelip, elyaf kırılmaları artarken temas kuvveti düşüşe geçer. Vurucu kabuk malzemesine göre çok zayıf olan üst çekirdek malzemesi içinde ilerlerken temas kuvveti değeri bir miktar düşer ancak ortadaki kabuk malzemesiyle aradaki mesafe az olduğu için kuvvet değeri tekrar artmaya başlar. 2.pik temas kuvveti bu aralıkta elde edilen en yüksek kuvvet değeri olarak kullanılır. Yine ortadaki kabuk malzemesinde elyaf kırılmaları meydana gelince temas kuvveti tekrar azalmaya başlar. Vurucu alt çekirdek malzemesinde ilerlerken üst çekirdekteki gibi aradaki mesafe az olduğu için temas kuvveti değeri çok azalmadan alt kabuğa temas eder. 3.pik temas kuvveti bu aralıktaki meydana gelen en yüksek kuvvet değeri olarak alınır. Vurucu alt kabukta elyaf kırılması meydana gelip, elyaf kırılmaları artarken temas kuvveti tekrar düşüşe geçer ve iki çekirdekli sandviç kompozit numune delinmiş olur.

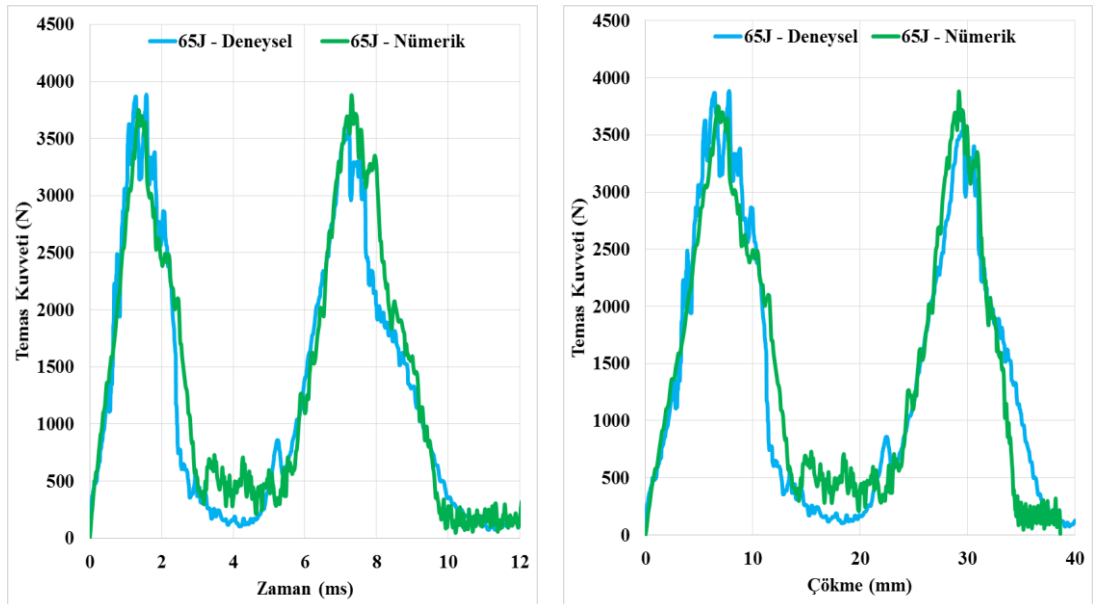
4.2.1 Tek Çekirdekli Sandviç Kompozit (S)

Tek çekirdekli sandviç kompozitin 60J darbe enerjisinde deneysel numunede saplanma görülüp numune tüm darbe enerjisi olan 60J enerjiyi absorbe ederken nümerik çalışmada bu numune 57,7J enerji absorbe etmiştir. Şekil 4.5'te verilen temas kuvveti - çökme eğrilerinde görüleceği gibi absorbe edilen enerjisi değerini

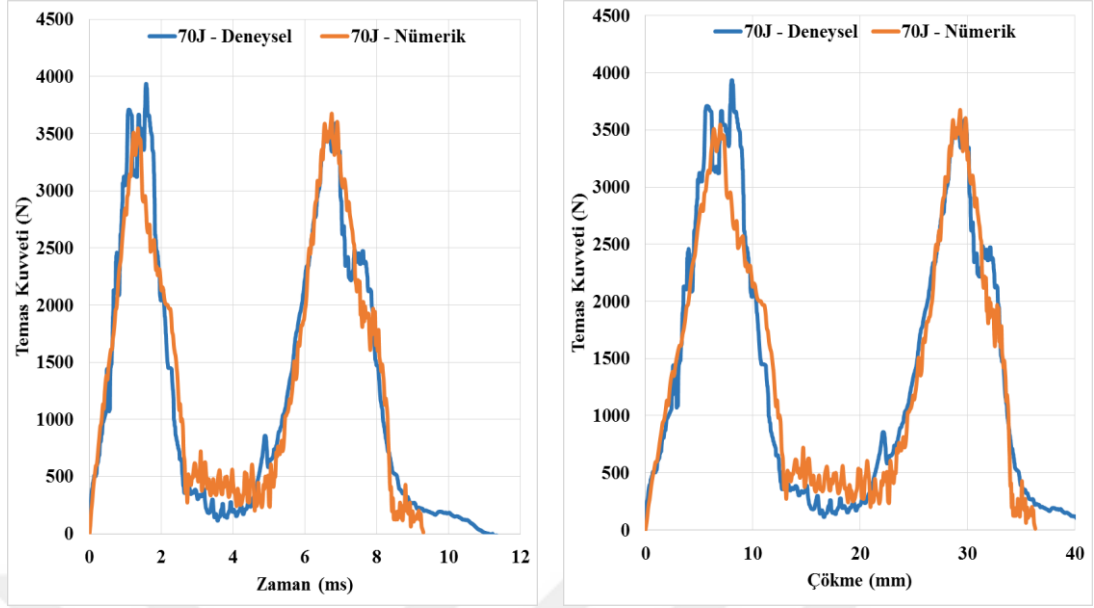
hesaplama da kullanılan bu eğrilerin altında kalan alan, deneysel çalışmada nümerik çalışmaya göre daha büyüktür. Tek çekirdekli sandviç numunenin Şekil 4.6’da verilen 65J ve Şekil 4.7’de verilen 70J darbe enerjisi değerlerinde ise temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrilerinin çok daha uyumlu olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.5 S Numunesi 60J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri



Şekil 4.6 S Numunesi 65J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri



Şekil 4.7 S Numunesi 70J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri

Tek çekirdekli sandviç kompozitin absorbe edilen enerji değerleri, çökme miktarları ve temas sürelerinin karşılaştırması Tablo 4.5'te verilmiştir. 60J enerji değeri için deneysel çalışma saplanma enerjisinde, numune tam olarak delinemediği için vurucunun hareketinin durması temas süresini artırmaktadır. Delinme enerjilerinde ise vurucu numuneyi delip geçtiği için temas süresi azalmaktadır. Bu durum saplanma ile delinme temas süreleri arasında yaklaşık 3,5 ms temas süresi farkına neden olmaktadır. Maksimum çökme değerinde deneysel ve nümerik çalışmalarda 3-4 mm aralığında küçük bir miktar fark gözlemlenmiştir.

Tablo 4.5 Tek çekirdekli sandviç kompozit (S) absorbe edilen enerji değerleri, çökme miktarları ve temas süreleri karşılaştırması

S Darbe Enerjisi E_i (J)	Absorbe Edilen Enerji E_a (J) Deneysel	Absorbe Edilen Enerji E_a (J) Nümerik	Maks. Çökme Miktarı (mm) Deneysel	Maks. Çökme Miktarı (mm) Nümerik	Temas Süresi (ms) Deneysel	Temas Süresi (ms) Nümerik
60	60,0	57,7	39,2	36,0	14,1	11,0
65	56,4	54,1	37,9	34,9	10,6	9,8
70	55,2	54,4	39,6	35,5	10,4	9,2

Tek çekirdekli sandviç numunede iki adet kabuk tabakası olduğu için iki adet pik temas kuvveti değeri oluşmuştur. Elde edilen pik temas kuvveti verilerinin karşılaştırılması Tablo 4.6’da verilmiştir. Pik temas kuvveti değerlerinde 200 N civarında farklarla birbirlerine yakın değerler elde edilmiştir.

Tablo 4.6 Tek çekirdekli sandviç (S) kompozit pik temas kuvvetleri

S Darbe Enerjisi - E_i (J)	1.Pik Temas Kuvveti (N) Deneysel	1.Pik Temas Kuvveti (N) Nümerik	2.Pik Temas Kuvveti (N) Deneysel	2.Pik Temas Kuvveti (N) Nümerik
60	3868	3778	4047	3806
65	3884	3750	3629	3879
70	3934	3546	3592	3670

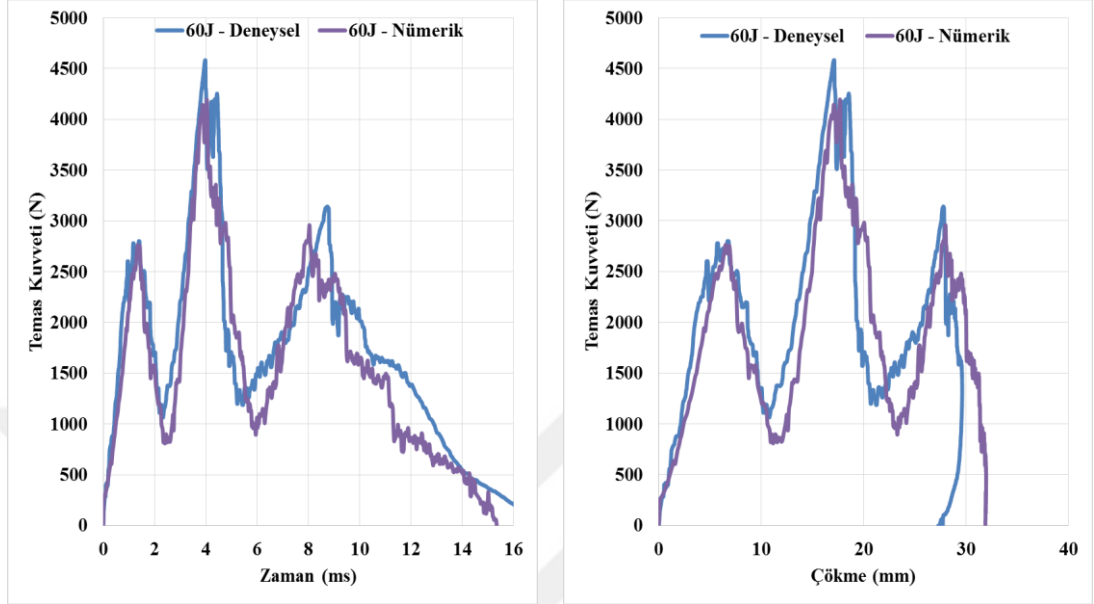
4.2.2 İki Çekirdekli Sandviç Kompozit (2S)

İki çekirdekli sandviç kompozitin 60J darbe enerjisi değerinde hem deneysel hem de nümerik analiz sonuçları saplanma durumunu göstermektedir. Bu darbe enerjisinde vurucu numuneden çok az miktar geri döndüğü Şekil 4.8’de verilen temas kuvveti - çökme eğrilerinde görünmektedir. Şekil 4.9’da verilen 65J darbe enerjisi değeri için deneysel absorbe edilen enerji değeri saplanma değerine daha yakın olduğu için temas süresi nümerik analizde daha kısa zamanda meydana gelmiştir. Şekil 4.10’da verilen eğrilere göre 1.pik kuvveti hareketinde bir miktar fark meydana gelmekle birlikte eğrilerin uyumu yüksektir.

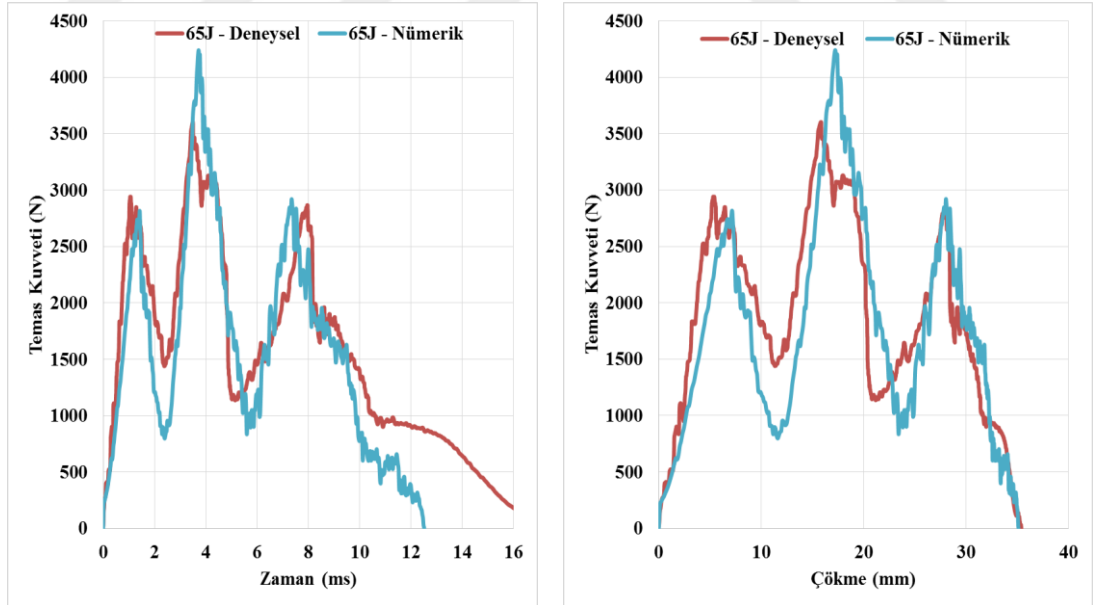
2S numunesi için uygulanan darbe enerjilerinde elde edilen absorbe edilen enerji değerleri, çökme miktarları ve temas süreleri karşılaştırması Tablo 4.7’de verilmiştir. Verilen bu değerlerde yüksek uyum gözlemlenirken sadece 65J enerji değeri için temas süresi farkı yaklaşık 3,6 ms’dir. Elde edilen diğer verilerde sonuçlar uyumludur.

Tablo 4.8’de verilen pik temas kuvveti değerleri incelendiğinde 1.pik temas kuvvetinde ve 3.pik temas kuvvetinde birbirleriyle uyumlu değerler elde edilirken, 2.pik temas kuvvetinde sapma değeri yaklaşık 600 N değerine kadar çıkmıştır. Bu

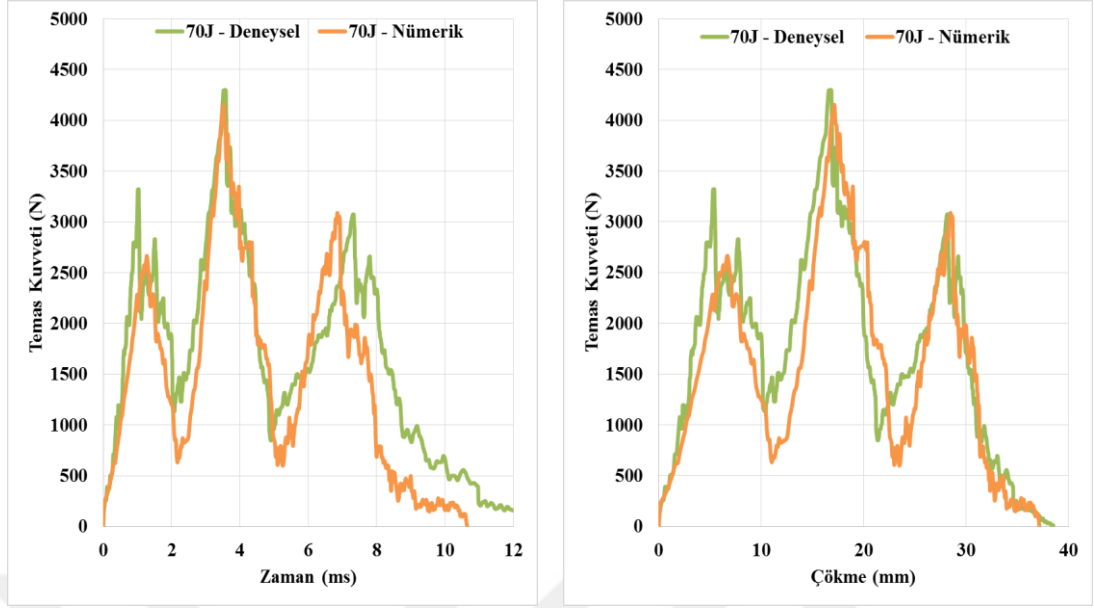
sapma değeri numunenin genel darbe davranışını yüksek miktarda etkileyecek sapma değeri değildir.



Şekil 4.8 2S Numunesi 60J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri



Şekil 4.9 2S Numunesi 65J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri



Şekil 4.10 2S numunesi 70J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri

Tablo 4.7 İki çekirdekli sandviç kompozit (2S) absorbe edilen enerji değerleri, çökme miktarları ve temas süreleri karşılaştırması

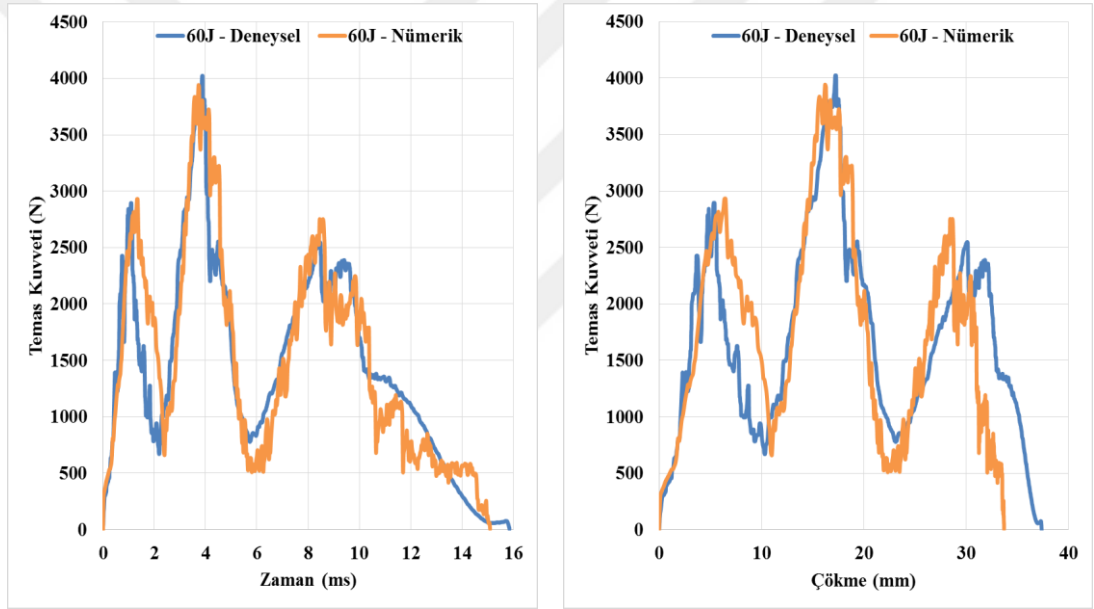
2S Darbe Enerjisi E_i (J)	Absorbe Edilen Enerji E_a (J) Deneysel	Absorbe Edilen Enerji E_a (J) Nümerik	Maks. Çökme Miktarı (mm) Deneysel	Maks. Çökme Miktarı (mm) Nümerik	Temas Süresi (ms) Deneysel	Temas Süresi (ms) Nümerik
60	60,0	60,0	29,6	31,9	16,0	14,8
65	64,0	62,8	35,3	35,3	15,8	12,2
70	62,6	58,9	37,1	38,9	12,2	10,6

Tablo 4.8 İki çekirdekli sandviç kompozit (2S) pik temas kuvvetleri

2S Darbe Enerjisi E_i (J)	1.Pik Temas Kuvveti (N) Deneysel	1.Pik Temas Kuvveti (N) Nümerik	2.Pik Temas Kuvveti (N) Deneysel	2.Pik Temas Kuvveti (N) Nümerik	3.Pik Temas Kuvveti (N) Deneysel	3.Pik Temas Kuvveti (N) Nümerik
60	2800	2764	4582	4188	3120	2954
65	2940	2816	3601	4240	2865	2918
70	2779	2666	4582	4147	3120	3088

4.2.3 İki Çekirdekli Epoksi Kolonlu Sandviç Kompozit (2SEK)

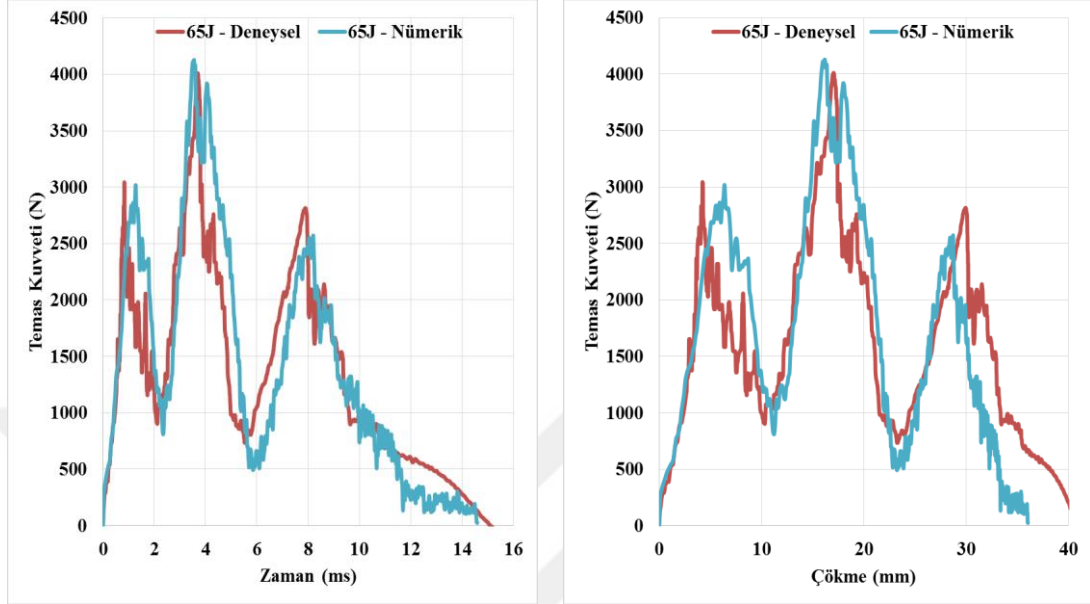
İki çekirdekli epoksi kolonlu sandviç kompozitin 60J darbe enerjisi değerinde hem deneysel hem de nümerik analizde saplanma meydana gelmiştir. Her iki çalışmada da vurucudaki enerjinin tamamı numune tarafından absorbe edilmiştir. Şekil 4.11’de görüleceği üzere yaklaşık 3 mm çökme miktarı farkına rağmen her iki numune de saplanma durumundadır. Şekil 4.12’de verilen eğrilerde sadece bir miktar çökme farkı görülürken, Şekil 4.13’te verilen eğrilerde çökme ve temas süresi eğrilerinde az bir miktar sapma olmasına rağmen, deneysel ve nümerik analizin eğrileri birbirlerine çok benzer olarak elde edilmiştir.



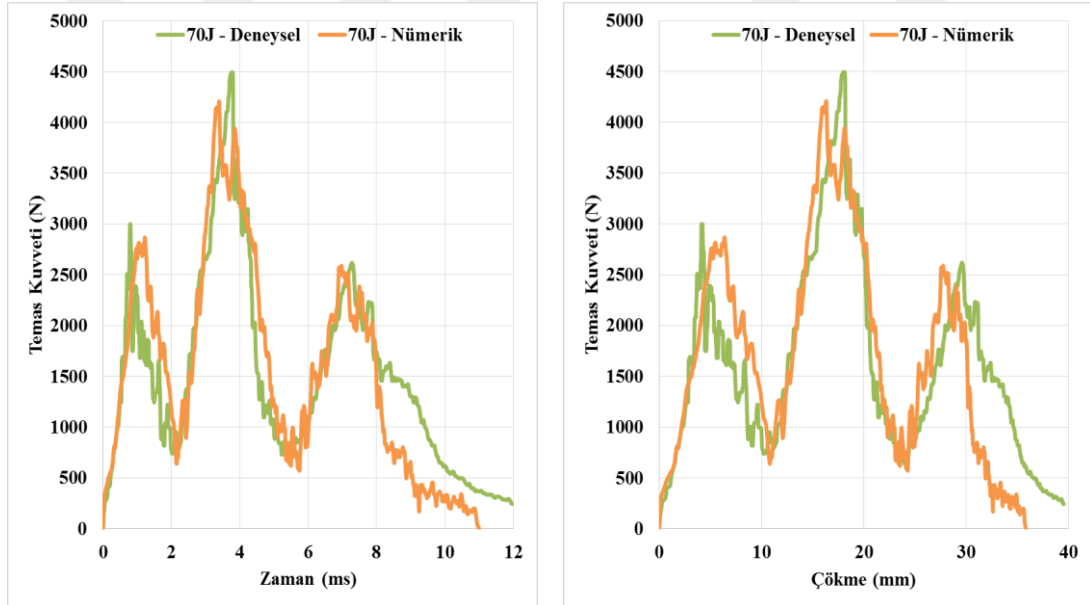
Şekil 4.11 2SEK Numunesi 60J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri

2SEK numunesi için şekillerdeki eğrilerden elde edilen, absorbe edilen enerji değerleri, çökme miktarları ve temas süreleri Tablo 4.9’da deneysel ve nümerik değerler karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çökme değerlerinde 3-8 mm arasında bir miktar fark vardır. Temas süresinde ise sapma değeri yaklaşık 3 ms olarak meydana gelmiştir. Bu numune için verilen eğrilerden görüldüğü gibi bu sapma değerleri çok yüksek sapma değerleri değildir. Elde edilen nümerik analiz değerleri bu numunenin genel deneysel darbe davranışını temsil etmektedir. Elde edilen pik kuvvet değerleri Tablo 4.10’da 2SEK

numunesi için verilmiştir. Bu kuvvet değerleri incelendiğinde her pik için değerlerin birbirine yakın ve uyum içinde oldukları belirlenmiştir.



Şekil 4.12 2SEK Numunesi 65J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri



Şekil 4.13 2SEK Numunesi 70J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri

Tablo 4.9 İki çekirdekli epoksi kolonlu sandviç kompozit (2SEK) absorbe edilen enerji değerleri, çökme miktarları ve temas süreleri karşılaştırması

2SEK Darbe Enerjisi E_i (J)	Absorbe Edilen Enerji E_a (J) Deneysel	Absorbe Edilen Enerji E_a (J) Nümerik	Maks. Çökme Miktarı (mm) Deneysel	Maks. Çökme Miktarı (mm) Nümerik	Temas Süresi (ms) Deneysel	Temas Süresi (ms) Nümerik
60	60,0	60,0	36,8	33,7	14,9	15,1
65	64,1	63,1	40,8	35,9	14,9	12,5
70	64,6	62,6	43,8	35,4	14,4	11,1

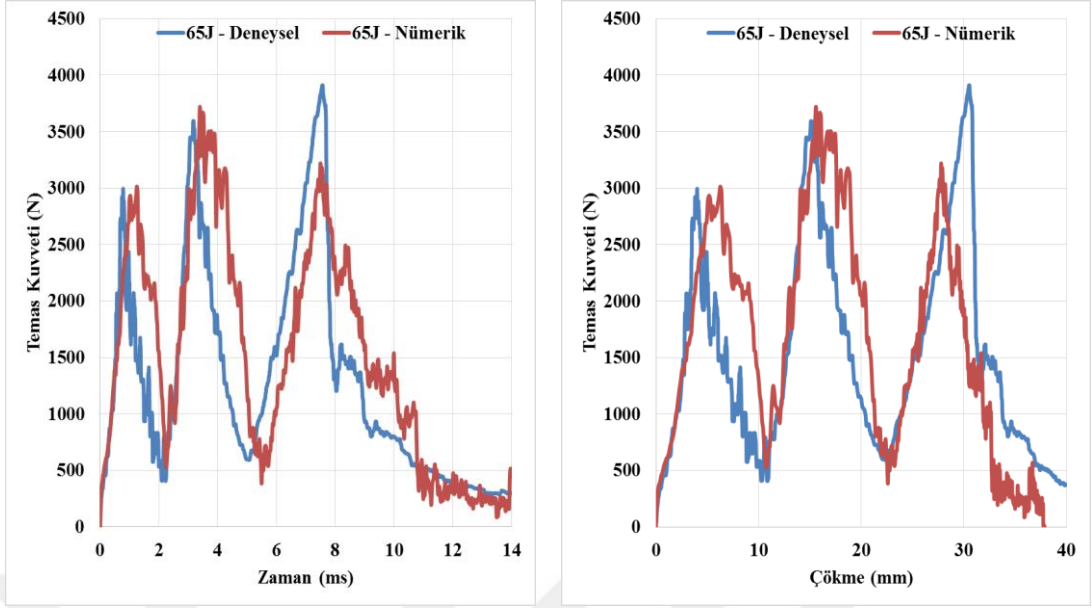
Tablo 4.10 İki çekirdekli epoksi kolonlu sandviç kompozit (2SEK) pik temas kuvvetleri

2SEK E_i (J)	1.Pik Temas Kuvveti (N) Deneysel	1.Pik Temas Kuvveti (N) Nümerik	2.Pik Temas Kuvveti (N) Deneysel	2.Pik Temas Kuvveti (N) Nümerik	3.Pik Temas Kuvveti (N) Deneysel	3.Pik Temas Kuvveti (N) Nümerik
60	2894	2930	4022	3941	2544	2751
65	3042	3017	4009	4128	2814	2571
70	2997	2868	4491	4202	2617	2589

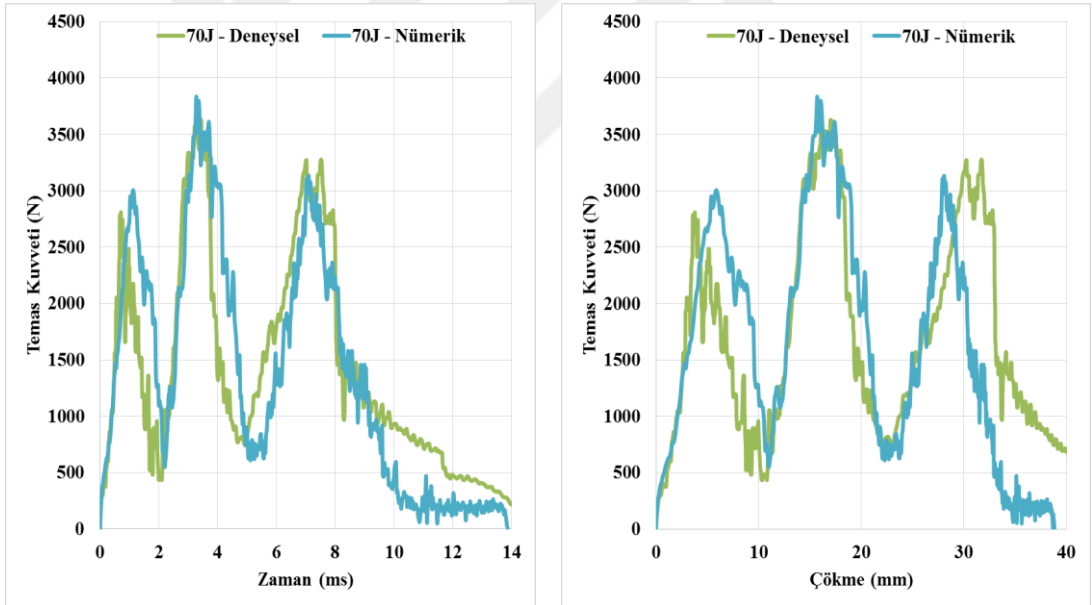
4.2.4 İki Çekirdekli Çekirdek Dikişli Sandviç Kompozit (2SCD)

İki çekirdekli çekirdek dikişli sandviç kompozit numuneye 65J enerji değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme miktarı eğrileri Şekil 4.14'te verilmiştir. 65J eğrilerinde 3.pik kuvvetinde görülen sapma değeri, Şekil 4.15'te verilen 70J enerji değerinde ve Şekil 4.16'da verilen 75J enerji değerindeki 3. pik kuvvet değerine göre oldukça yüksektir. 65J darbe enerjisi değeri için 3.pik kuvvet değerinde eğriler arasında bir miktar uyumsuzluk görülmektedir.

70J enerji değeri için 3.pik temas kuvvetinin meydana geldiği çökme değeri deneysel ve nümerik analiz için bir miktar farklı olduğu eğride görülmektedir. Verilen bu eğrilerde bir miktar sapma ile deneysel ve nümerik analiz eğrilerinin birbirlerine yakın oldukları tespit edilebilir.



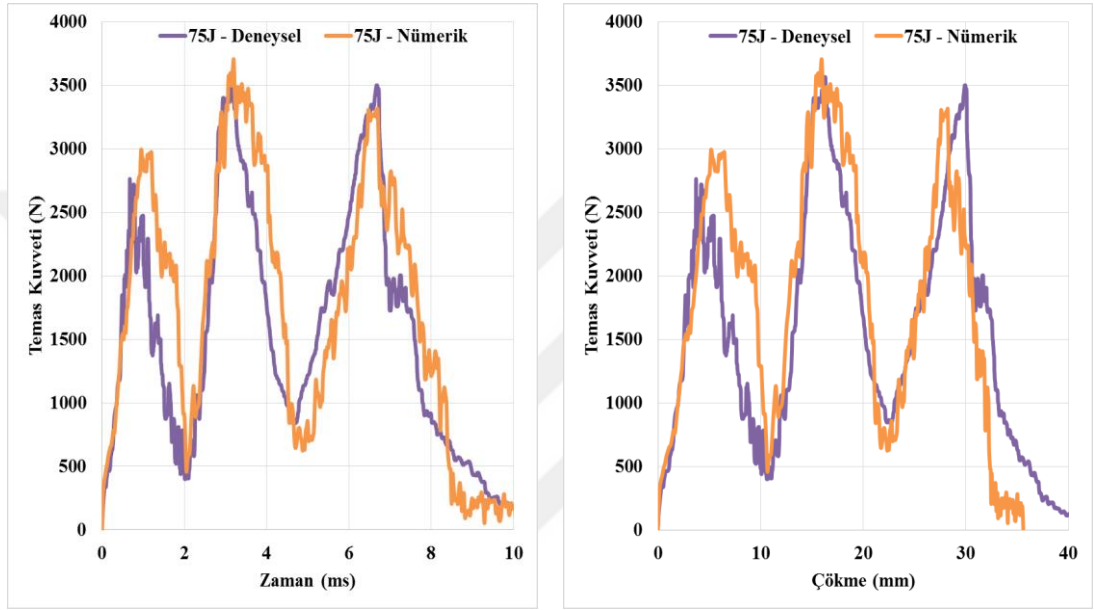
Şekil 4.14 2SCD Numunesi 65J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri



Şekil 4.15 2SCD Numunesi 70J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri

2SCD numunesi için şekillerdeki eğrilerden elde edilen, absorbe edilen enerji değerleri, çökme miktarları ve temas süreleri Tablo 4.11’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Deneysel ve nümerik analizlerden elde edilen sonuçlara göre çökme değerlerinde 9 mm’ye kadar bir miktar fark meydana gelmiştir. 2SCD numunesi için

verilen eğrilerden görüleceği gibi numunenin deneysel ve nümerik analiz darbe davranışı birbirine oldukça yakındır. Elde edilen pik kuvvet değerleri Tablo 4.12’de 2SCD numunesi için verilmiştir. Bu kuvvet değerleri incelendiğinde 65J darbe enerjisi 3.pik değeri hariç deneysel ve nümerik analiz değerleri en fazla 200 N civarında sapmıştır. Elde edilen pik kuvvet değerlerinin birbirine yakın ve uyum içinde oldukları belirlenmiştir.



Şekil 4.16 2SCD Numunesi 75J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri

Tablo 4.11 İki çekirdekli, çekirdek dikişli sandviç kompozit (2SCD) absorbe edilen enerji değerleri, çökme miktarları ve temas süreleri karşılaştırması

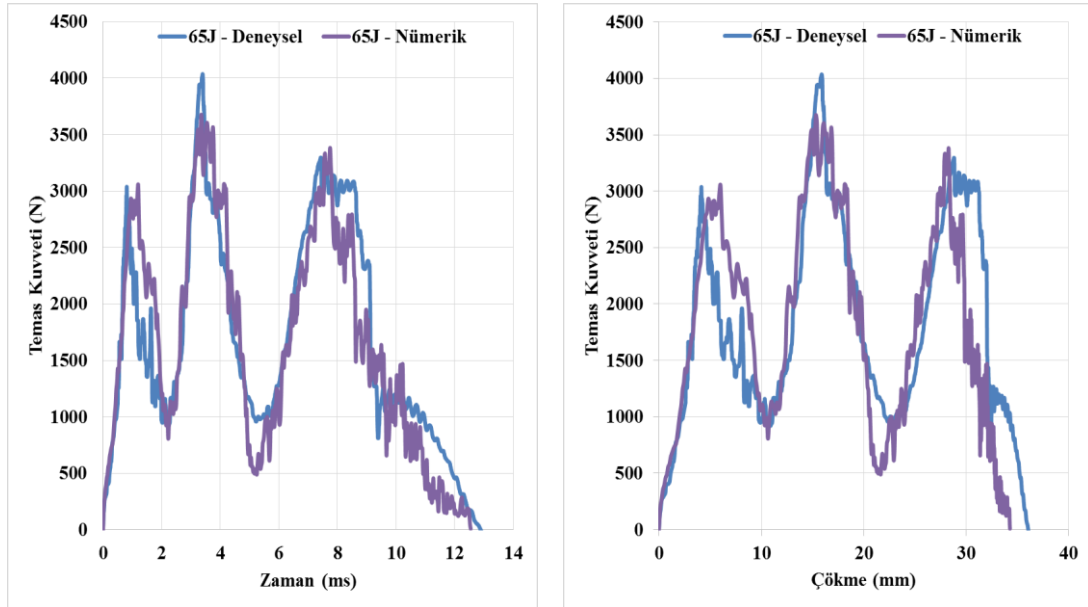
2SCD Darbe Enerjisi E_i (J)	Absorbe Edilen Enerji E_a (J) Deneysel	Absorbe Edilen Enerji E_a (J) Nümerik	Maks. Çökme Miktarı (mm) Deneysel	Maks. Çökme Miktarı (mm) Nümerik	Temas Süresi (ms) Deneysel	Temas Süresi (ms) Nümerik
65	61,9	63,8	45,7	38,2	15,8	13,5
70	67,5	66,7	43,6	34,4	14,5	13,9
75	62,4	64,9	40,2	33,4	10,5	9,5

Tablo 4.12 İki çekirdekli, çekirdek dikişli sandviç kompozit (2SCD) pik temas kuvvetleri

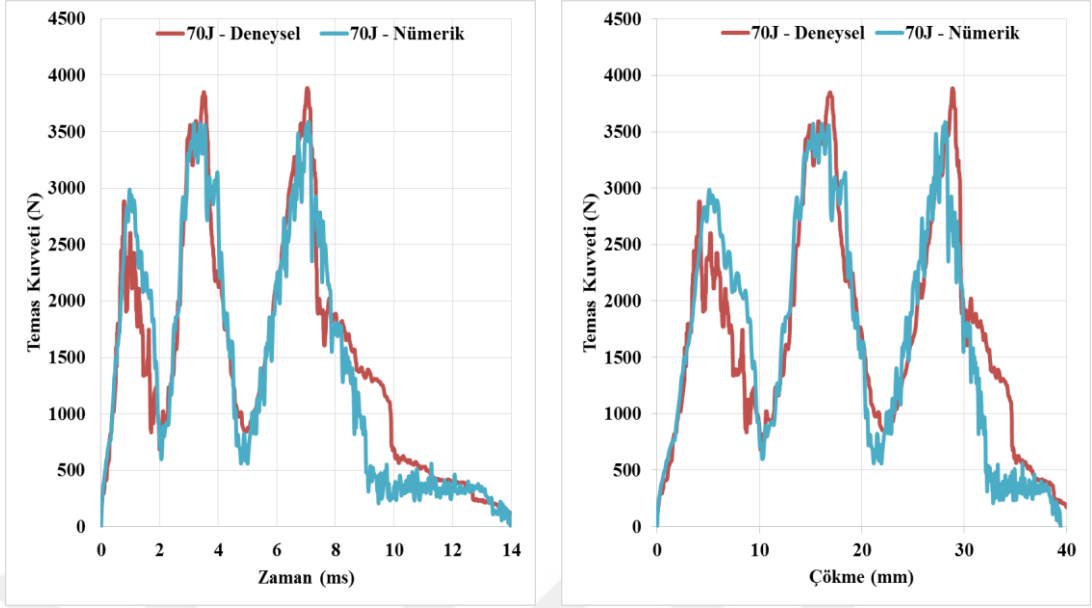
2SCD Ei (J)	1.Pik Temas Kuvveti (N) Deneyssel	1.Pik Temas Kuvveti (N) Nümerik	2.Pik Temas Kuvveti (N) Deneyssel	2.Pik Temas Kuvveti (N) Nümerik	3.Pik Temas Kuvveti (N) Deneyssel	3.Pik Temas Kuvveti (N) Nümerik
65	2993	3013	3592	3719	3908	3217
70	2786	3005	3627	3834	3271	3131
75	2760	2989	3563	3700	3498	3309

4.2.5 İki Çekirdekli Kabuk Dikişli Sandviç Kompozit (2SKD)

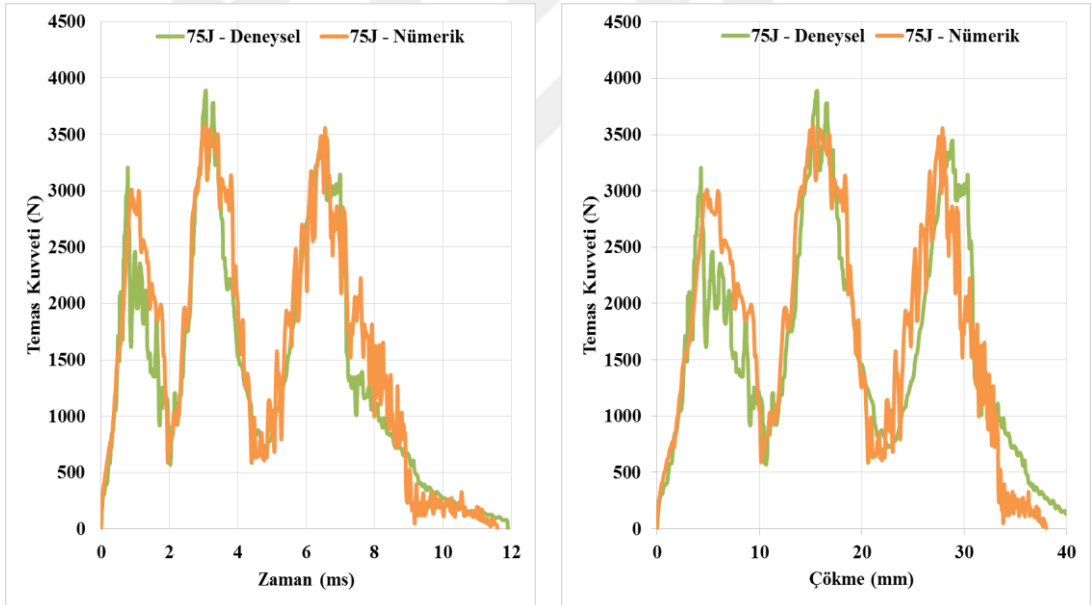
İki çekirdekli kabuk dikişli sandviç kompozit numuneye 65J enerji değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme miktarı eğrileri Şekil 4.17’de verilmiştir. 65J eğrilerinde deneyssel ve nümerik çalışmalar arasında 3.pik kuvveti hareketinde az bir miktar fark meydana gelmiştir. Şekil 4.18’de 70J darbe enerjisi için ve Şekil 4.19’da 75J darbe enerjisi için verilen eğrilerde numunelerin darbe davranışı deneyssel ve nümerik çalışmalar arasında yüksek miktarda uyum gözlemlenmiştir.



Şekil 4.17 2SKD Numunesi 65J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri



Şekil 4.18 2SKD Numunesi 70J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri



Şekil 4.19 2SKD Numunesi 75J darbe enerjisi değerindeki temas kuvveti - zaman ve temas kuvveti - çökme eğrileri

2SKD numunesinin deneysel ve nümerik analizleri sonuçları Tablo 4.13'de karşılaştırılmıştır. Absorbe edilen enerji, temas süresi ve çökme miktarı değerleri karşılaştırılan bu tablodan görüleceği üzere sadece 75J darbe enerji değeri için çökme miktarı farkı 5 mm civarındadır, elde edilen diğer değerler birbirine oldukça yakındır.

2SKD numunesi pik temas kuvvetleri açısından karşılaştırması Tablo 4.14'te verilmiştir. Pik kuvvet değerlerine bakıldığında en fazla sapmanın 350 N kadar olduğu ve değerlerin birbirleri arasında yüksek uyum içinde oldukları tespit edilmiştir.

Tablo 4.13 İki çekirdekli kabuk dikişli sandviç kompozit (2SKD) absorbe edilen enerji değerleri, çökme miktarları ve temas süreleri karşılaştırması

2SKD Darbe Enerjisi E_i (J)	Absorbe Edilen Enerji E_a (J) Deneyssel	Absorbe Edilen Enerji E_a (J) Nümerik	Maks. Çökme Miktarı (mm) Deneyssel	Maks. Çökme Miktarı (mm) Nümerik	Temas Süresi (ms) Deneyssel	Temas Süresi (ms) Nümerik
65	65	63,5	36,0	34,6	12,8	12,5
70	67,9	66,2	40,6	39,6	14,0	13,7
75	64,6	65,8	41,4	35,8	11,4	9,3

Tablo 4.14 İki çekirdekli kabuk dikişli sandviç kompozit (2SKD) pik temas kuvvetleri

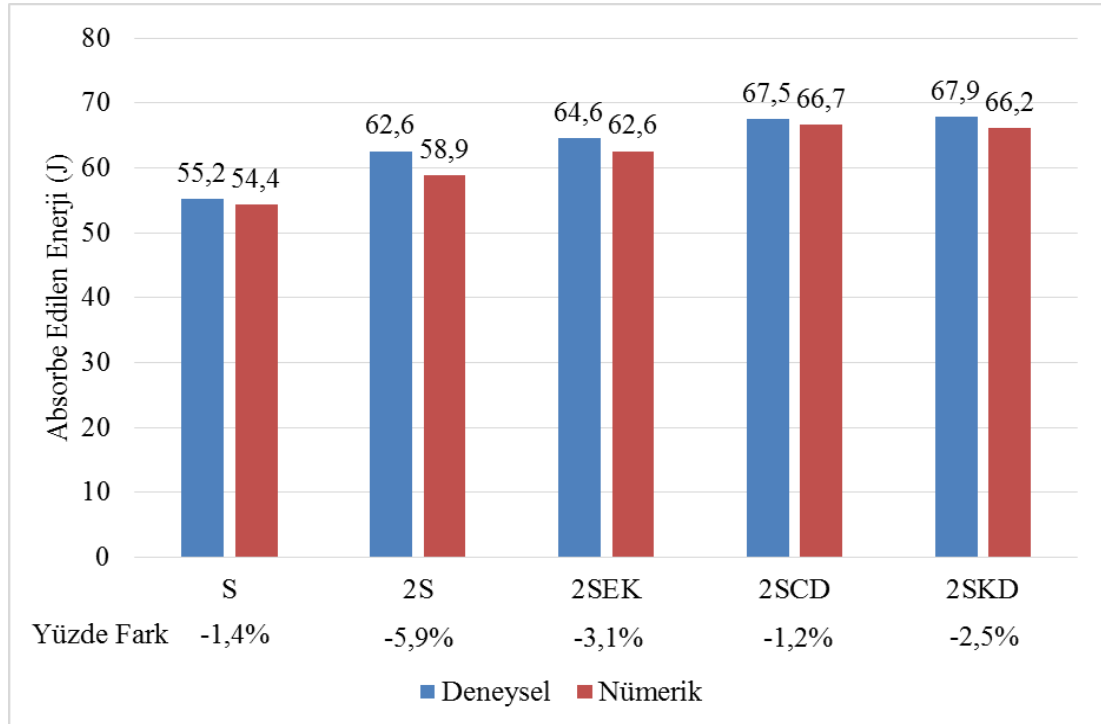
2SKD E_i (J)	1.Pik Temas Kuvveti (N) Deneyssel	1.Pik Temas Kuvveti (N) Nümerik	2.Pik Temas Kuvveti (N) Deneyssel	2.Pik Temas Kuvveti (N) Nümerik	3.Pik Temas Kuvveti (N) Deneyssel	3.Pik Temas Kuvveti (N) Nümerik
65	3037	3050	4035	3676	3295	3382
70	2881	2987	3848	3573	3884	3586
75	3204	3007	3889	3578	3448	3548

4.2.6 Absorbe Edilen Enerjilerin Karşılaştırılması

Elde edilen absorbe edilen enerji değerlerinde tabakalı kompozitin (T) saplanma enerjisi 45J, sandviç kompozitin (S) saplanma enerjisi 60J olarak elde edilmiştir. Yapıyı sandviç hale getirmek, absorbe edilen enerji değerini yüksek miktarda artırmaktadır. Sandviç kompozit numunelerin birlikte karşılaştırılabilmesi için Şekil 4.20'de ortak enerji değeri olarak seçilen 70J darbe enerjisi değeri için absorbe edilen enerji değerleri deneyssel ve nümerik olarak verilip, deneyssel çalışma ile nümerik çalışmadan elde edilen sonuçlar arasındaki farklar yüzdesel olarak verilmiştir. Tek çekirdekli sandviç kompozitin (S) iki çekirdekli sandviç kompozit (2S) haline

getirilmesi absorbe edilen enerji değerini hem deneysel hem de nümerik çalışmalarda arttırmıştır. İki çekirdekli epoksi kolonlu sandviç kompozit (2SEK), kolon olmayan iki çekirdekli sandviç kompozite göre daha fazla enerji absorbe etmiştir. Üretimden önce çekirdek malzemesinde oluşturulan deliklerden dikiş ipliği kullanılarak ortadaki cam elyaf tabakalarıyla birlikte çekirdek malzemelerinin dikilmesiyle oluşturulan iki çekirdekli çekirdek dikişli sandviç kompozit (2SCD) numunesi, iki çekirdekli epoksi kolonlu sandviç kompozit numunesine göre deneysel ve nümerik olarak daha fazla enerji absorbe etmiştir. Kabukta kullanılan cam elyaf tabakaları ve çekirdek malzemeleri birlikte dikilerek oluşturulan iki çekirdekli kabuk dikişli sandviç kompozit (2SKD) çekirdek dikişli sandviç kompozite göre deneysel çalışmada az miktar farkla daha fazla enerji absorbe ederken nümerik çalışmada az miktar farkla daha az enerji absorbe etmiştir.

Deneysel ve nümerik çalışmalardan elde edilen pik temas kuvvetleri, maksimum çökme miktarları, temas süreleri ve absorbe edilen enerji değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen değerler için deneysel ve nümerik çalışmalar arasında az bir miktar fark ile uyum olduğu belirlenmiştir.



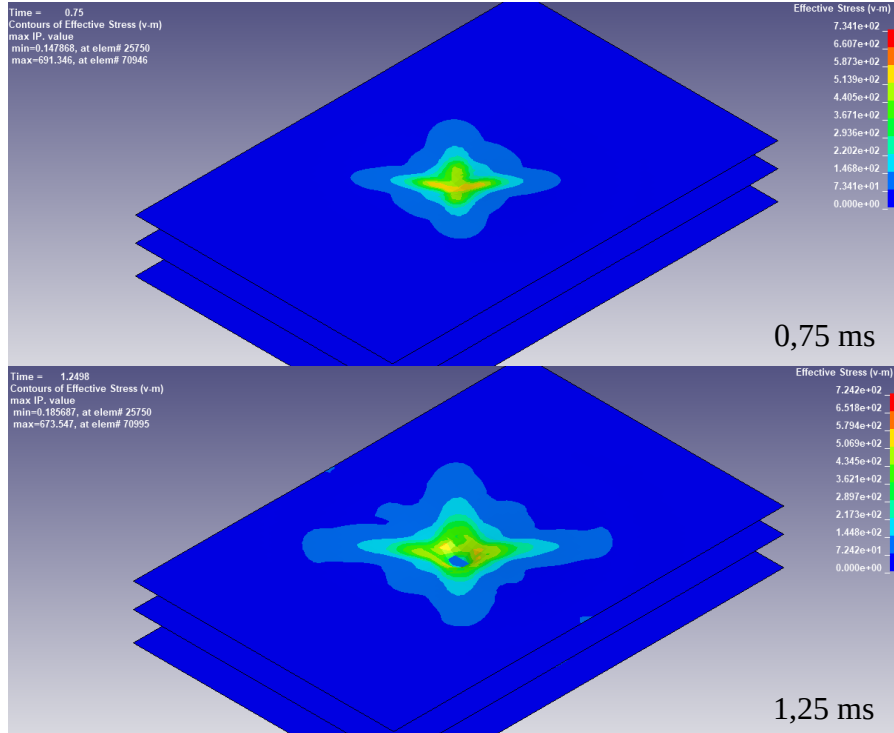
Şekil 4.20 Sandviç kompozit numunelerin 70J darbe enerjisinde absorbe ettikleri enerji değerleri

4.3 Gerilme Dağılımları

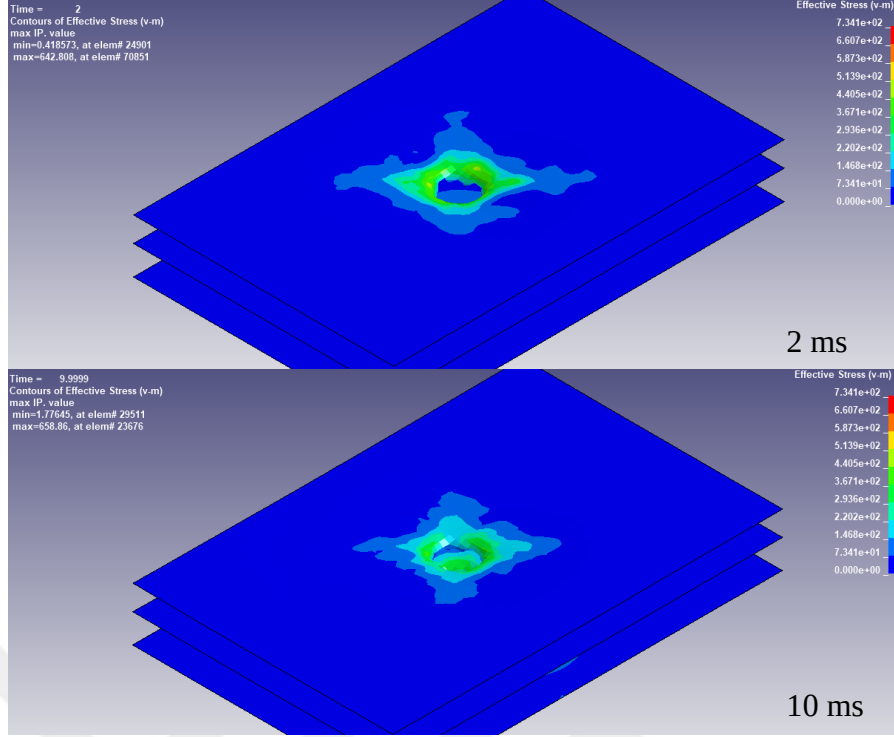
4.3.1 Kabuk Malzemesinde Meydana Gelen Gerilme Dağılımları

Kabuk malzemelerinde meydana gelen gerilme dağılımının gösterimi için örnek olarak 2SCD numunesinin analiz modelinde, çekirdek malzemeleri, vurucu ve destekler kaldırılıp, sadece alt kabuk, orta kabuk ve üst kabuk değerlendirme ekranında bırakılmıştır. Görüntüyü elde etmek için modele izometrik olarak bakılmıştır. Alt kabuk desteğe değen kısım, orta kabuk iki çekirdek arasındaki kısım ve üst kabuk vurucunun ilk olarak temas ettiği kabuk olarak adlandırılmıştır.

Şekil 4.21-4.22’de üst kabukta meydana gelen gerilmeler zamana göre verilmiştir. 0,75 ms’de üst kabukta en üstte yer alan $\pm 45^\circ$ açılı yerleştirilmiş elyaf tabakalarında meydana gelen gerilmeler görülmektedir. 1,25 ms’de üst kabukta elyaf kırılmaları başlamıştır. Gerilmeler elyaf boyunca meydana gelmektedir. 2 ms’deki görüntüde ise üst kabukta elyaf kırılmaları tamamlanmış, vurucu üst kabukta ilerlemektedir. Gerilmeler önceki görüntüye göre daha küçük bir alanda meydana gelmektedir. 10 ms’de ise vurucudan dolayı meydana gelen gerilmeler görülmektedir.



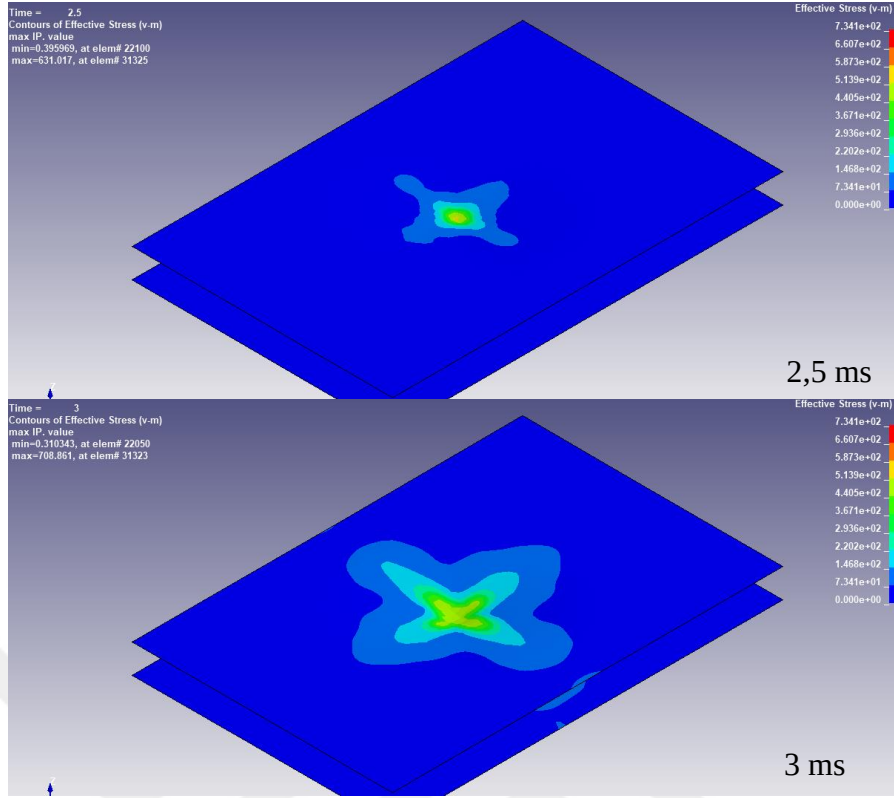
Şekil 4.21 0,75 ms ve 1,25 ms’de üst kabuktaki gerilme dağılımı



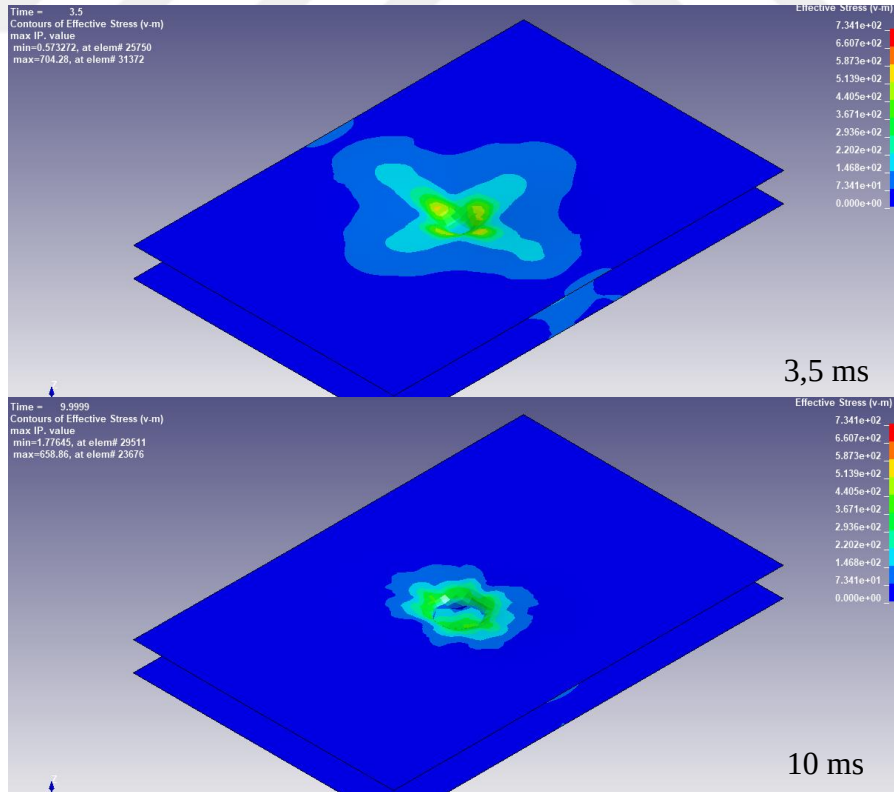
Şekil 4.22 2 ms ve 10 ms’de üst kabuktaki gerilme dağılımı

Şekil 4.23-4.24’te orta kabukta meydana gelen gerilmeler zamana göre verilmiştir. 2,5 ms’de orta kabuktaki gerilmeler artmaya başlamıştır. 3 ms’de orta kabukta yer alan 0°-90° açılı yerleştirilmiş elyaf tabakalarında, elyaf doğrultularındaki gerilmeler görülmektedir. 3,5 ms’de orta kabukta elyaf kırılmaları başlamıştır. Gerilmeler elyaf boyunca meydana gelmektedir. 10 ms’de üst kabuktaki gibi vurucudan dolayı meydana gelen gerilmeler görülmektedir.

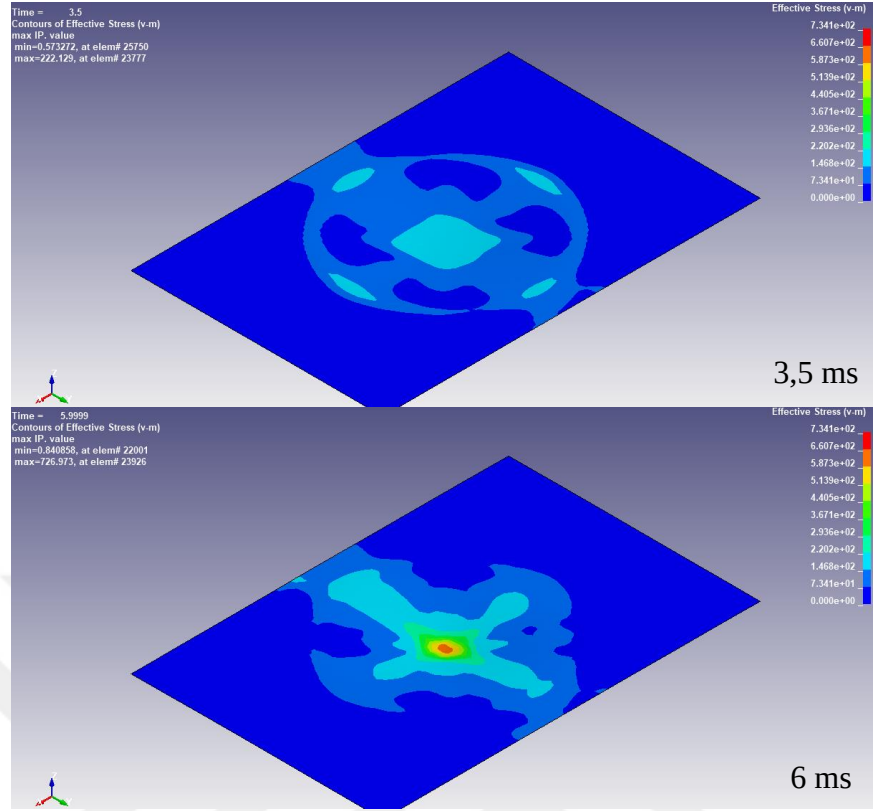
Şekil 4.25-4.26’da alt kabukta oluşan gerilmeler verilmiştir. Alt kabuk halka biçimindeki destek üzerinde bulunduğundan dolayı meydana gelen gerilmeler desteğe göre şekillenmiştir. 3,5 ms’de alt kabukta meydana gelen gerilmeler artmaya başlamıştır. 6,0 ms’de alt kabukta yer alan 0°-90° açılı yerleştirilmiş elyaf tabakalarında, elyaf doğrultularında desteğe kadar yayılmış gerilmeler görülmektedir. 7,25 ms’de alt kabukta elyaf kırılmaları başlamıştır ve gerilmeler elyaf boyunca meydana gelirken desteğe yakın kısımlarda diğer kabuklara göre çok daha fazla gerilmeler oluşmaktadır. 10 ms’de tüm kabuklar tamamen delinmiştir ve üst ve orta kabukta meydana gelen gerilmeler gibi alt kabukta meydana gelen gerilmeler yarı küresel başlı silindirik vurucunun varlığından kaynaklanmaktadır.



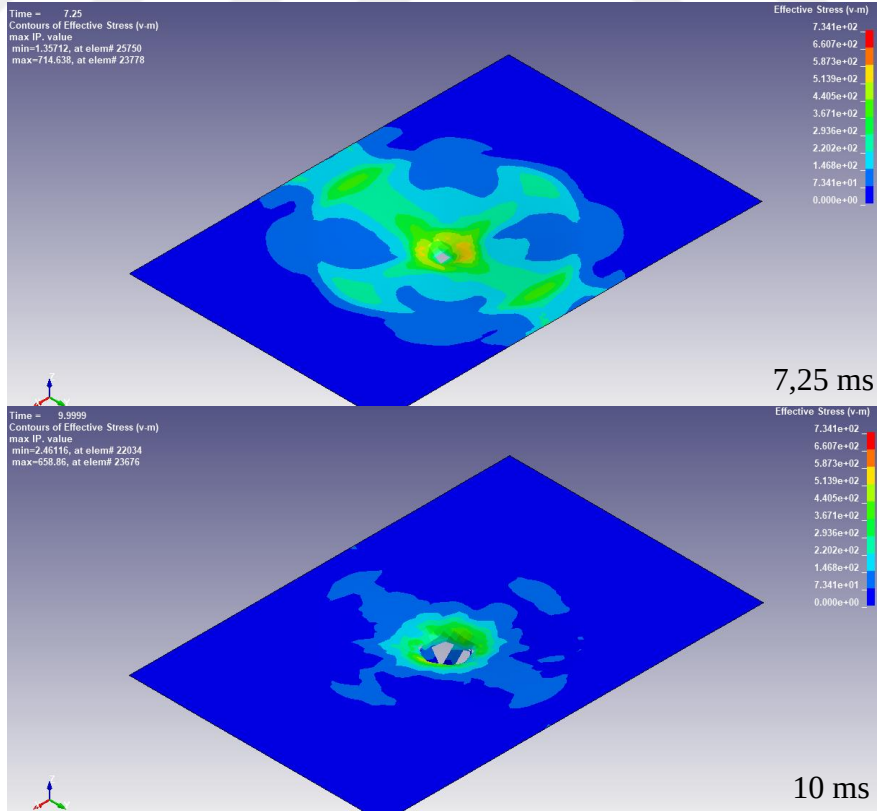
Şekil 4.23 2,5 ms ve 3 ms’de orta kabuktaki gerilme dağılımı



Şekil 4.24 3,5 ms ve 10 ms’de orta kabuktaki gerilme dağılımı



Şekil 4.25 3,5 ms ve 6 ms’de alt kabuktaki gerilme dağılımı



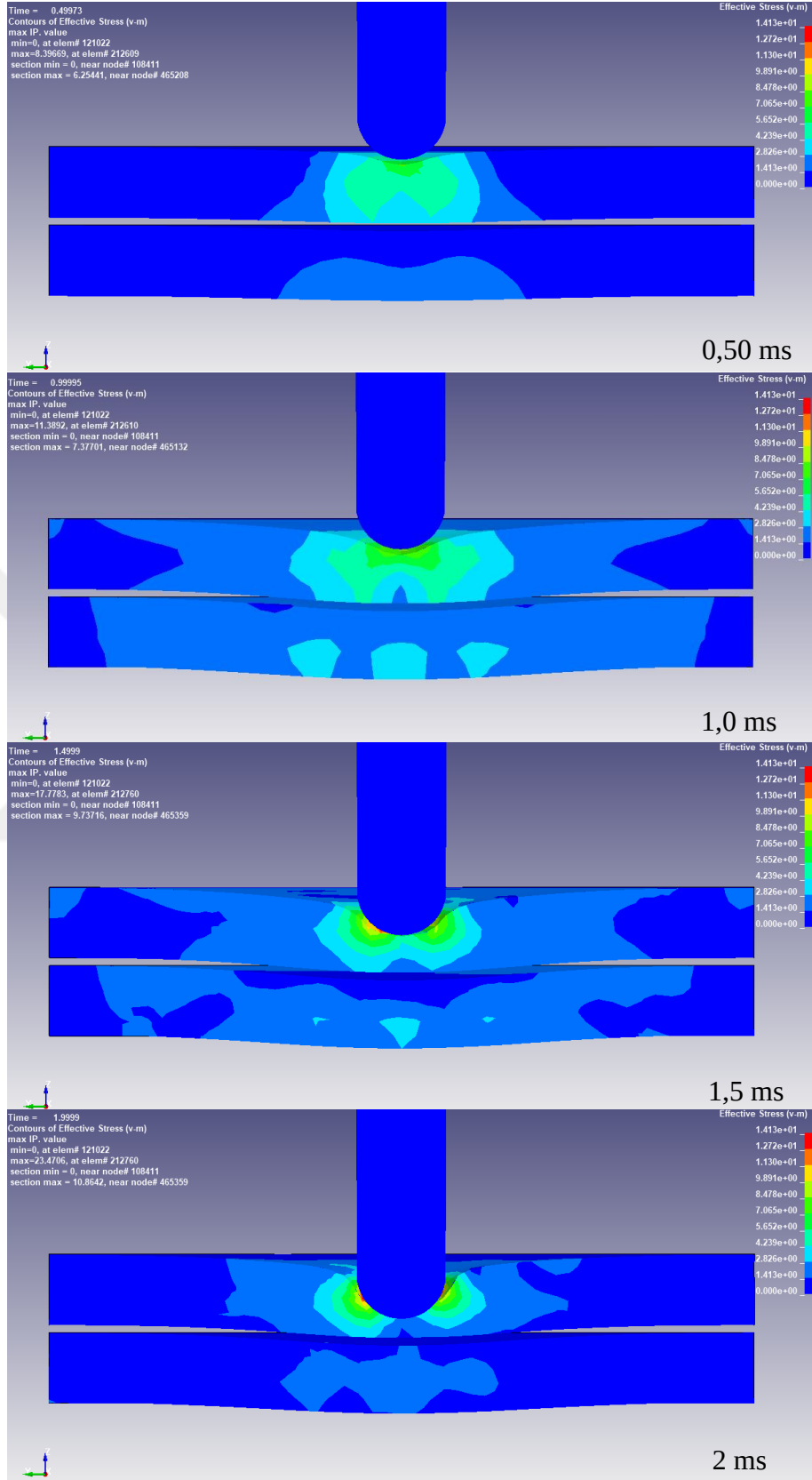
Şekil 4.26 7,25 ms ve 10 ms’de alt kabuktaki gerilme dağılımı

4.3.2 Çekirdek Malzemesinde Meydana Gelen Gerilme Dağılımları

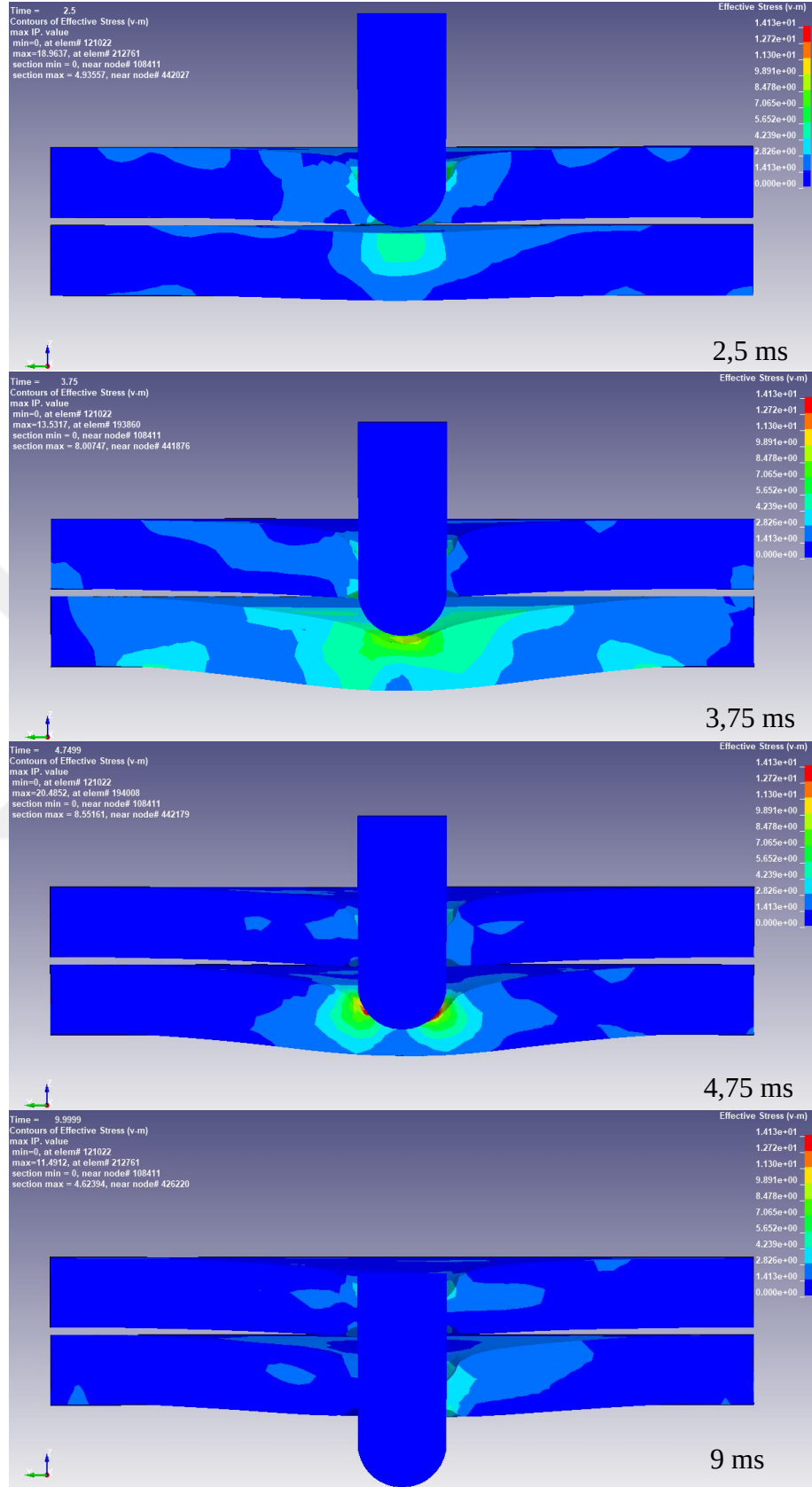
Çekirdek malzemelerinde meydana gelen gerilmelerin gösterimi için örnek olarak iki çekirdekli çekirdek dikişli sandviç kompozit (2SCD) numunesinin 70J darbe enerji değerinde elde edilen sonuçlar kullanılmıştır. Analiz modelinde, kabuk malzemeleri ve destekler kaldırılıp, çekirdek malzemeleri ve vurucu analiz ekranında bırakılmıştır. Görüntüyü elde etmek için modelin tam ortasında kesit alınıp, modele önden bakılmıştır.

Şekil 4.27’de zamana bağlı olarak vurucu üst çekirdek malzemesinde ilerlerken meydana gelen gerilme dağılımı verilmiştir. 0,5 ms’de vurucu üst çekirdeğe yeni etki ettiği için dar bir alanda gerilmeler meydana gelirken, alt çekirdeğe çok az iletilen yük olduğu için alt çekirdekte az miktarda gerilme başlamaktadır. 1 ms’de üst kabuk ezilmeye başlamıştır, bu anda gerilme her iki kabukta da yapıya oldukça geniş alanda yayılmaktadır. 1,5 ms’de çekirdek malzemesi hasara uğramaya başlamıştır ve 2 ms ‘de hasar ilerleyerek gerilmeler tüm yapı yerine vurucunun hasar verdiği bölgede meydana gelmektedir. Alt çekirdeğe iletilen yük üst çekirdek o anda hasara uğradığı için anlık gerilmeler çok daha az meydana gelmiştir.

Şekil 4.28’de zamana bağlı olarak vurucu alt çekirdek malzemesinde ilerlerken meydana gelen gerilme dağılımı verilmiştir. 2,5 ms’de üst çekirdek delinmiş, vurucunun orta kabuk malzemesine etkisi alt çekirdeğe iletmeye başlamıştır ve alt çekirdekte çok küçük bir bölgede gerilmeler meydana gelmektedir. 3,75 ms’de orta kabuk malzemesi delinip vurucu alt çekirdek malzemesine ulaşmıştır. Çekirdek malzemesi henüz hasara uğramamıştır, alt çekirdeğe etki eden yük tüm yapıya yayılmıştır. 4,75 ms’de çekirdek malzemesi hasara uğradığı için gerilmeler vurucunun etki ettiği bölgeye yakın bölgede meydana gelmektedir. 9 ms’de çekirdek malzemeleri delinmiştir. Vurucunun sürtünmesinden kaynaklı yapıda bir miktar gerilme meydana gelmektedir.



Şekil 4.27 Zaman göre üst çekirdekteki gerilme dağılımı



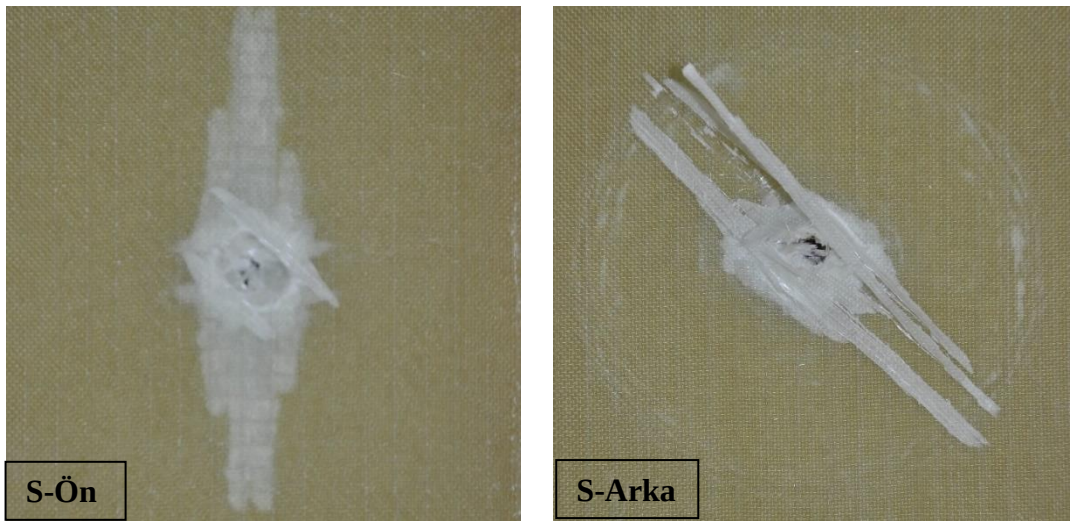
Şekil 4.28 Zaman göre alt çekirdekdeki gerilme dağılımı

4.4 Tabakalar Arası Ayrılma (Delaminasyon)

Deneyisel düşük hızlı darbe testinden sonra 70J ortak enerji değerinde sandviç kompozit numunelerin ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen hasar görüntüleri Şekil 4.29-4.33'te verilmiştir.

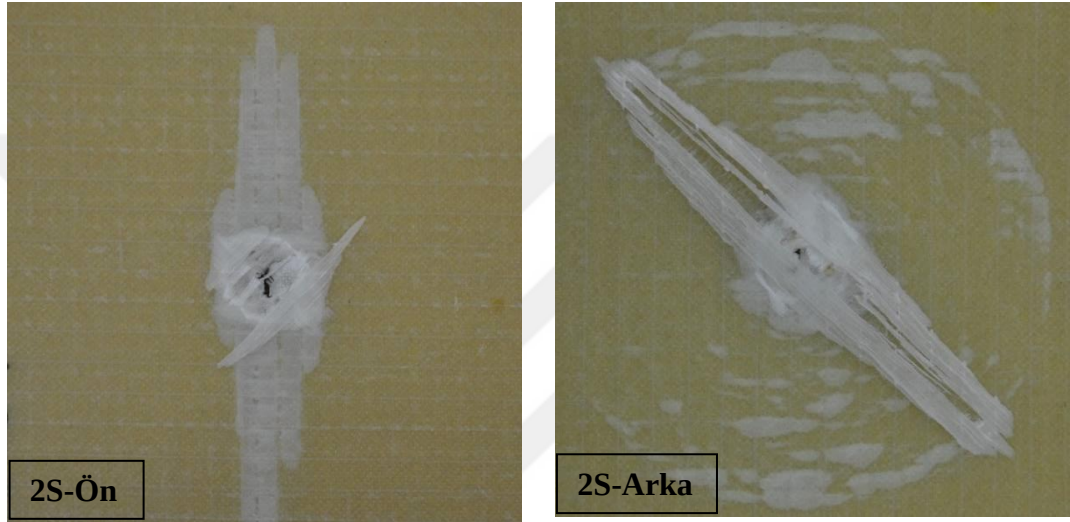
Şekil 4.29'da S sandviç kompozitin düşük hızlı darbe testi sonrası ön yüzeyinde en üstte 45° açılı elyafın yönlenmesi vurucunun deldiği bölgeye yakın kısımda belli olurken, çekirdek malzemesiyle üzerindeki elyafın ayrılması yoğun beyaz renklenme ile görülmektedir. Arka yüzeyinde yine 45° açılı elyafın yönlenmesi görünürken, arka yüzeydeki darbe hasarının halka şeklindeki alt destekten kaynaklanan bir miktar beyazlama vardır ancak delaminasyon hakkında bilgi vermemektedir.

Şekil 4.30'da 2S iki çekirdekli sandviç kompozitin düşük hızlı darbe testi sonrası ön ve arka yüzeyleri verilmiştir. S sandviç kompozitindeki gibi ön ve arka yüzeydeki 45° açılı elyafın yönlenmesi hasardan dolayı belli olurken, çekirdek malzemesiyle üzerindeki elyafın ayrılması görülmektedir. 2S numunesindeki üst ve alt kabuk S numunesine göre daha ince olduğu için, darbeden dolayı meydana gelen üst kabuktaki beyazlama ve halka şeklindeki alt destekten kaynaklanan daha fazla beyazlama görülmektedir.

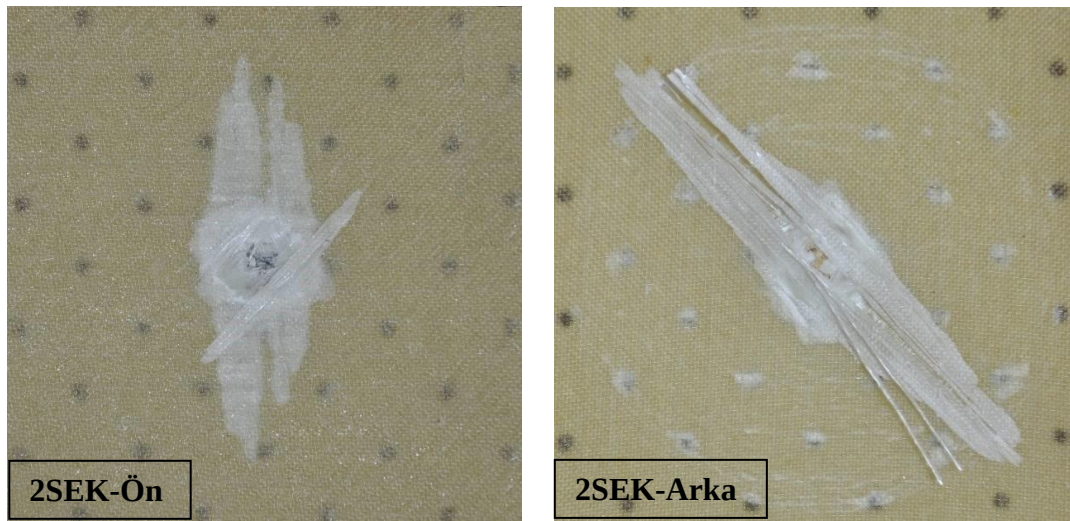


Şekil 4.29 S - Sandviç kompozitin düşük hızlı darbe testi sonrası ön ve arka yüzeyleri (Kişisel arşiv, 2016)

Şekil 4.31’de 2SEK iki çekirdekli epoksi kolonlu sandviç kompozitin düşük hızlı darbe testi sonrası ön ve arka yüzeyleri verilmiştir. Ön yüzeyde, çekirdek malzemesiyle üzerindeki elyafın ayrılması S ve 2S numunelerine oranla daha küçük bir alanda görülmektedir. Arka yüzeyinde yine 45° açılı elyafın yönlenmesi görünürken, arka yüzeydeki darbe hasarı bölgesel olarak görülmektedir. Bu beyaz renkli ayrılma bölgeleri kolonların kabuk malzemesi ile birleştiği bölgelerde net olarak görülmektedir.



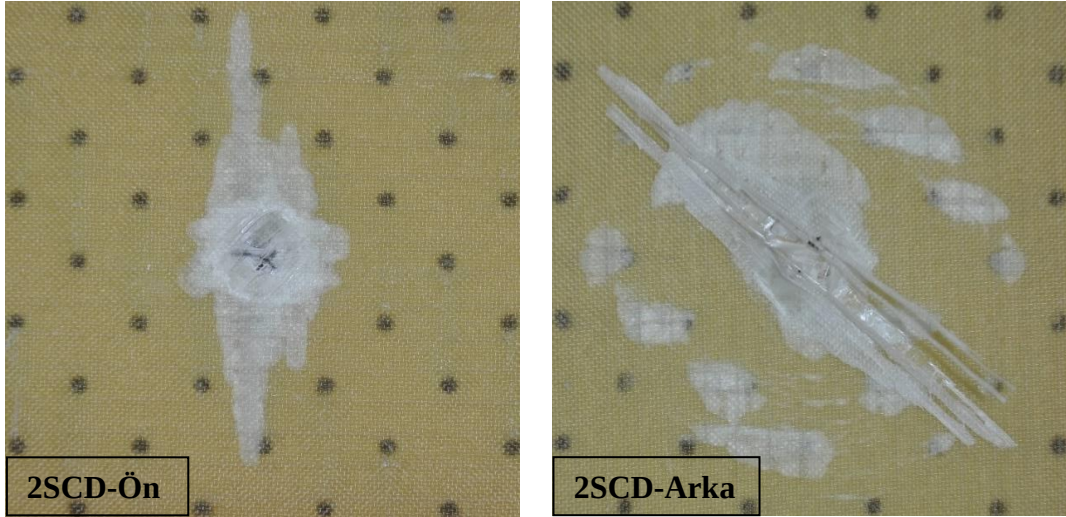
Şekil 4.30 2S - İki çekirdekli sandviç kompozitin düşük hızlı darbe testi sonrası ön ve arka yüzeyleri (Kişisel arşiv, 2016)



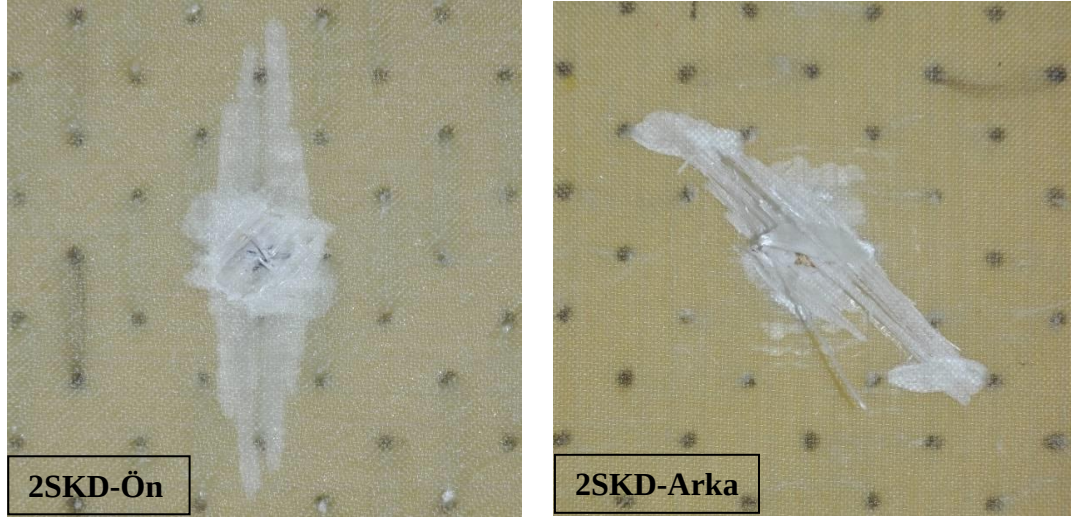
Şekil 4.31 2SEK - İki çekirdekli epoksi kolonlu sandviç kompozitin düşük hızlı darbe testi sonrası ön ve arka yüzeyleri (Kişisel arşiv, 2016)

Şekil 4.32’de 2SCD iki çekirdekli çekirdek dikişli sandviç kompozitin darbe testi sonrası ön ve arka yüzeyleri verilmiştir. Ön yüzeyde, çekirdek malzemesiyle üzerindeki elyafın ayrılması 2SEK numunesine oranla daha küçük bir alanda görülmektedir. Çekirdek malzemesinin dikişli olması delaminasyon alanını azaltmıştır. Arka yüzeyinde yine 45° açılı elyafın yönlenmesi görünürken, arka yüzeydeki darbe hasarı bölgesel olarak görülmektedir. Bu beyaz renkli bölgeler, çekirdek dikiş ipliğinin kabuk malzemesi ile temas ettiği bölgelerde meydana gelen ayrılmaları göstermektedir. Alt kabuk ile çekirdek malzemesi arasında meydana gelen delaminasyon alanının azaldığı görülebilmektedir.

Şekil 4.33e’te 2SKD iki çekirdek içeren kabuk dikişli sandviç kompozitin düşük hızlı darbe testi sonrası ön ve arka yüzeyleri verilmiştir. Ön yüzeyde, çekirdek malzemesiyle üzerindeki elyafın ayrılması 2SCD numunesine oranla net bir fark görülememektedir. Arka yüzeyinde yine 45° açılı elyafın yönlenmesi görünürken, bu elyafdaki ayrılmanın kabuk dikiş ipliği tarafından engellendiği görülmektedir. Alt kabuk ile çekirdek malzemesi arasında meydana gelen delaminasyon alanının yüksek miktarda azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.30 2SCD - İki çekirdekli çekirdek dikişli sandviç kompozitin düşük hızlı darbe testi sonrası ön ve arka yüzeyleri (Kişisel arşiv, 2016)

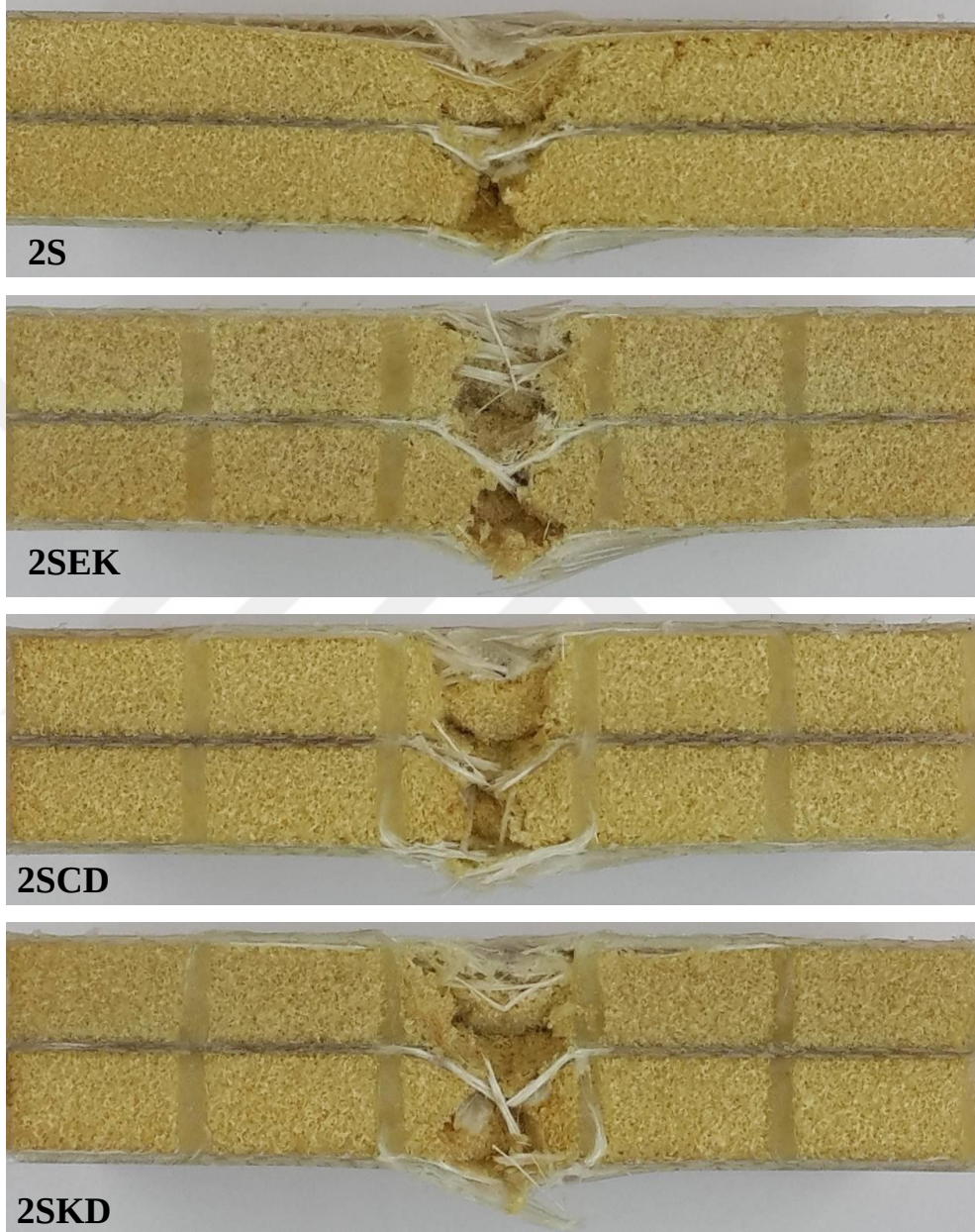


Şekil 4.31 2SKD - İki çekirdekli kabuk dikişli sandviç kompozitin düşük hızlı darbe testi sonrası ön ve arka yüzeyleri (Kişisel arşiv, 2016)

Şekil 4.29-4.33'te düşük hızlı darbe testi yapılmış sandviç kompozitlerin ön ve arka yüzey görüntüleri ele alındığında, bu şekillerdeki hasar bölgeleri; S ve 2S numunelerinde ayrılma hasarı çekirdek içinde meydana geldiği için tam olarak görülememektedir. 2SEK epoksi kolonlu numunede ise kolonların alt kabuktan ayrılma bölgeleri belli olurken, hasar çekirdek malzemesinde kabuk malzemesine paralel olarak meydana geldiği için tüm hasar alanı görülememektedir. 2SCD çekirdek dikişli numunede dikiş ipliği kabuk arasındaki ayrılma belli olurken diğer numunelerde olduğu gibi hasar çekirdek malzemesinde kabuk malzemesine paralel ilerlediği için tüm hasar alanı görülemeyebilir. 2SKD kabuk dikişli numunede çekirdek ile kabuk malzemesini birbirine bağlayan dikiş ipliği olduğu için ayrılma yüzeyi daha az beklenmektedir ve diğer numunelere göre az daha az hasar alanı olduğu belli olmaktadır. Ancak bu değerlendirme hasar için yeterli değildir.

Hasar alanlarının daha net anlaşılabilmesi için düşük hızlı darbe bölgesinden kesit alınacak biçimde kesim yapılarak düşük hızlı darbe bölgeleri Şekil 4.34'te verilmiştir. Bu şekillerde vurucunun numunelere verdiği hasar görülmektedir. 2S numunesinde alt kabuk ile çekirdek malzemesinin ayrıldığı görülürken, 2SEK numunesinde darbeden dolayı alt kabuk ve çekirdek ayrılmasının yanı sıra epoksi kolonlar ile kabuk malzemesi birleşme bölgesinden ayrıldığı belli olmaktadır. 2SCD numunesinde dikiş ipliği görülebilmektedir, ayrılma daha bölgesel ve dikiş kısmına yakın olarak meydana

geldiği belirtilebilir. 2SKD numunelerde ise kabuk malzemesini diken iplik görülmektedir ve bu dikiş ipliğinde meydana gelen kırılmalar gözlemlenirken, kabuk çekirdek malzemesi arasında ayrılma gözlemlenmemektedir.



Şekil 4.34 Numunelerin düşük hızlı darbe testi sonrası kesiti (Kişisel arşiv, 2016)

Hasar alanının daha net görülmesi için vurucunun deldiği kısım ikiye kesilerek kesit alınan sandviç kompozitler, koyu renkli bir penetrant sıvıda bekletilmiştir. Bekletilme süresinde bu koyu renkli penetrant sıvı hasarlı bölgelere sızmıştır. Cam elyafın şeffaf

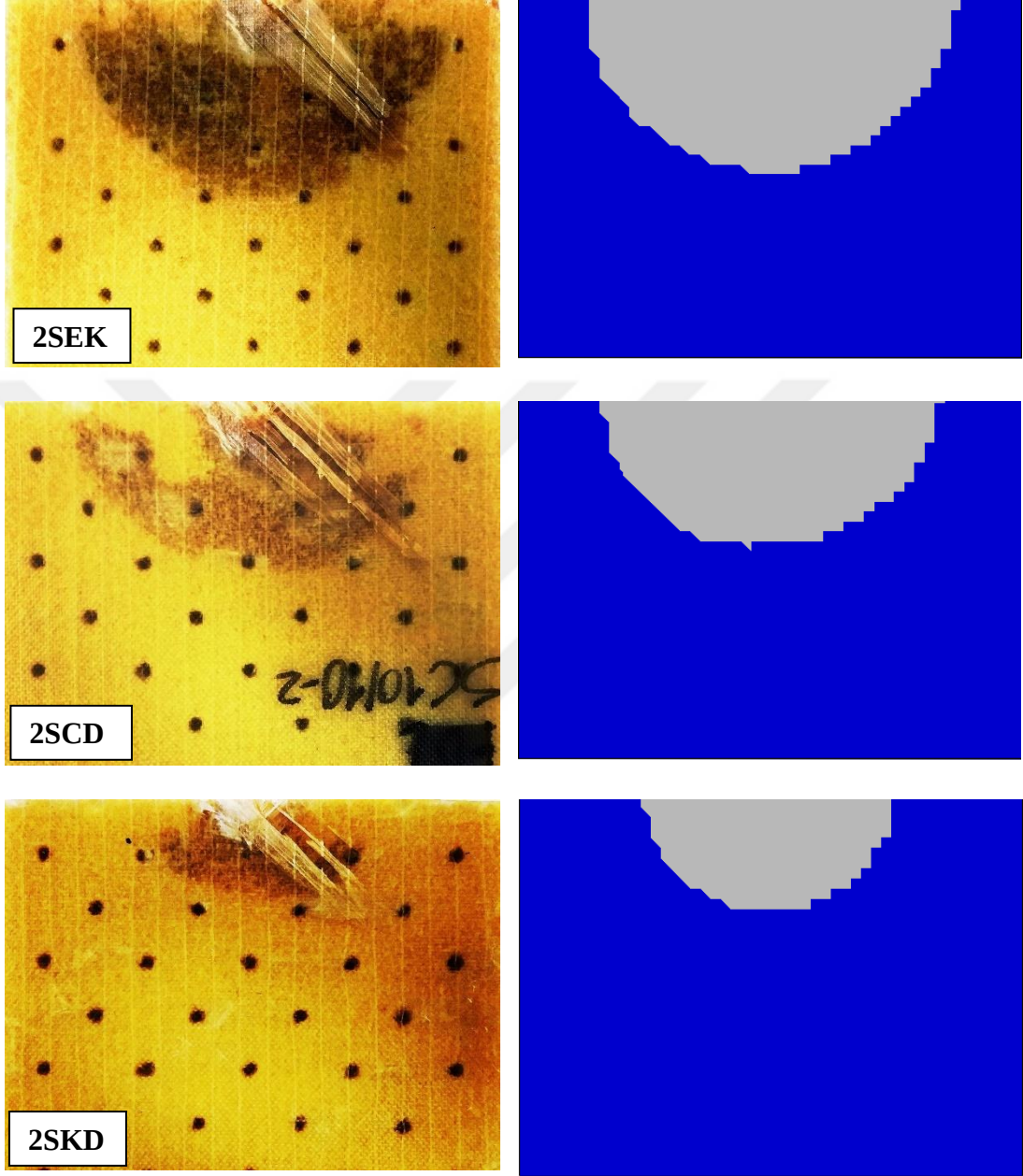
olmasından dolayı koyu renkli sıvının hasarlı bölgelere sızması gözle görülebilmektedir. Şekil 4.35'te kesit alınmış yarım numunelerin delaminasyon alanları deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılmıştır. ImageJ görüntü işleme programı kullanılarak numunelerde meydana gelen delaminasyon alanları hesaplanmıştır. 2SEK numunesi nümerik çalışması için yapılan kırılma tokluğu testlerinde elde edilen G_{IC} değeri $0,44 \text{ kJ/m}^2$ ve G_{IIC} değeri $0,47 \text{ kJ/m}^2$ delaminasyon analizinde kullanılmıştır. Deneysel çalışmada için 2270 mm^2 nümerik çalışmada 2420 mm^2 delaminasyon alanı hesaplanmıştır. 2SCD numunesi için yapılan kırılma tokluğu testlerinde elde edilen G_{IC} değeri $0,92 \text{ kJ/m}^2$ ve G_{IIC} değeri $1,17 \text{ kJ/m}^2$ nümerik delaminasyon analizinde kullanılmıştır. Deneysel çalışmada için 1680 mm^2 nümerik çalışmada 1870 mm^2 delaminasyon alanı hesaplanmıştır. 2SKD numunesi için ise G_{IC} değeri $2,26 \text{ kJ/m}^2$ ve G_{IIC} değeri $2,69 \text{ kJ/m}^2$ delaminasyon analizinde kullanılmıştır. 650 mm^2 delaminasyon alanı deneysel çalışmada, 760 mm^2 delaminasyon alanı nümerik çalışmada hesaplanmıştır.

2SEK numunesinde neredeyse alt desteğin çapı kadar bir alanda hasar meydana gelirken, 2SCD numunesinde dikiş ipliğinin kabuk malzemesi ile yapışması daha iyi olduğu için hasar alanı azalmıştır. 2SKD numunesinde ise hasar diğer numunelere göre çok daha küçük bir alanda meydana gelmiştir. Dikiş ipliği kabuk malzemesi ile çekirdek malzemesi arasında meydana gelen ayrılmayı oldukça azaltmıştır.

Düzlem dışında meydana gelen çekme gerilmeleri delaminasyonu etkiler. Darbe testinde meydana gelen delaminasyonların değerlendirilmesi için çekme testinde elde edilen hasar görüntüleri alt çeneye gelen numune parçası ve üst çeneye gelen numune parçası ortaya göre simetrik olarak şekillerde verilmiştir.

Şekil 4.36'da verilen 2S numunesinde hasar, kabuk ve çekirdek malzemesi epoksi reçine ile yapıştığından dolayı dayanımı en az olan çekirdek malzemesinde, düz bir yüzey halinde meydana gelmiştir. Şekil 4.37'de verilen 2SEK numunesinde çekme hasarı kolonlar için kolon kabuk birleşme ara yüzeyinde meydana gelirken, çekirdek malzemesinde hasar kolon hasar bölgeleri arasında küçük tepeler şeklinde meydana

gelmiştir. Bu durum hasara uğrayan çekirdek malzemesi yüzeyini arttırıp delaminasyonun ilerlemesi gereken yolu artırmaktadır.



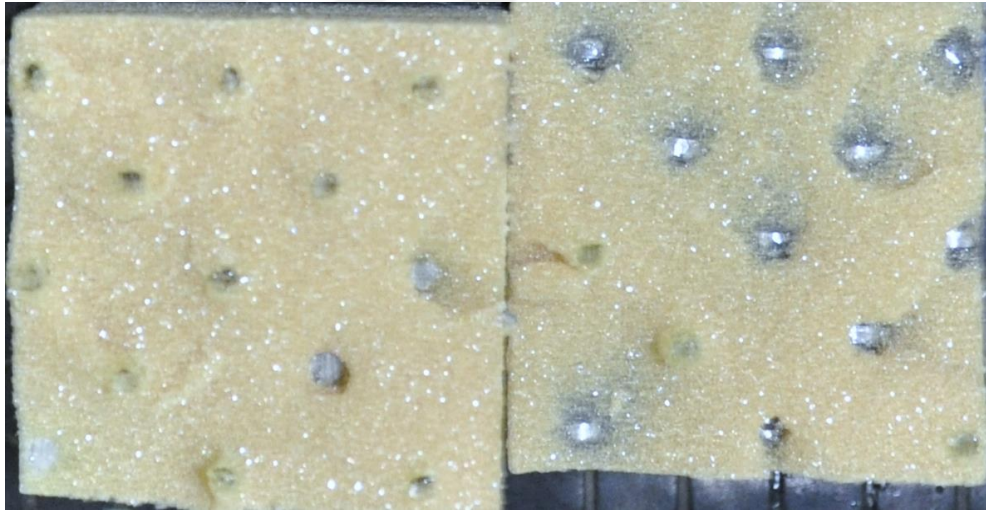
Şekil 4.35 DeneySEL ve nümerik olarak delaminasyon alanlarının karşılaştırılması (Kişisel arşiv, 2019)

Şekil 4.38’de verilen 2SCD numunesinde kabuk malzemesi, çekirdek malzemesi ve dikiş ipliği arasındaki ayrılma görülmektedir. Bu çalışmada üretilen sadece çekirdek malzemesi dikişli sandviç kompozitte, dikiş ipliğinin çekirdek malzemesi yüzeyinde kalan kısım ile kabuk malzemesinin epoksi ile yapışma yüzeyi oluşturması

sandviç kompozitin performansını oldukça arttırmıştır. Ayrıca bu dikiş sayesinde çekirdek malzemesindeki hasar yüzey alanı artarak daha çok enerji absorbe edilmesine yardımcı olmuştur.



Şekil 4.36 2S numunesinde çekirdek-kabuk ayrılma bölgesi (Kişisel arşiv, 2016)



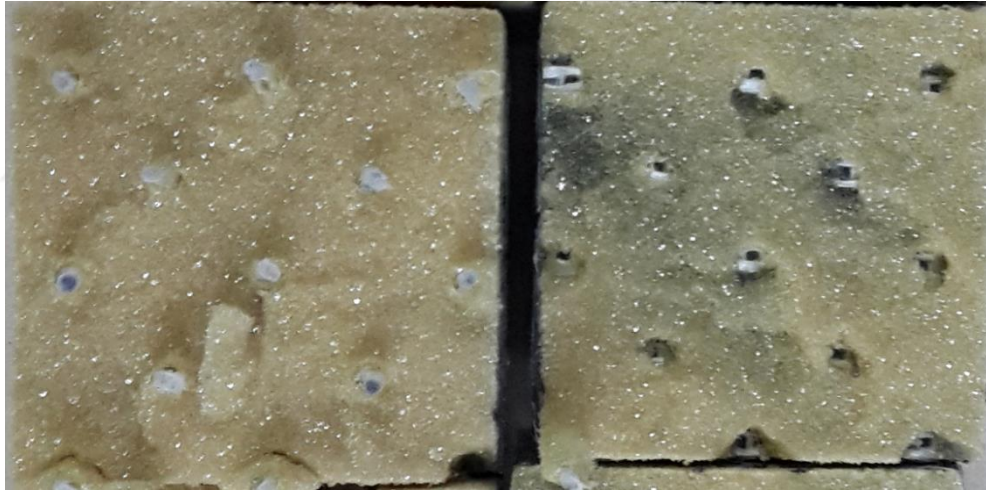
Şekil 4.37 2SEK numunesinde çekirdek-kabuk ayrılma bölgesi (Kişisel arşiv, 2016)

Şekil 4.39’da verilen 2SKD numunesinin hasar yüzeyi çekirdek malzemesi hasarı bakımından 2SEK hasarına benzemektedir. Bu numunede kabuk malzemesi dikişli olduğundan hasarın meydana gelebilmesi için dikiş ipliğinin tamamen kopması gerekir, bu durum çekirdek malzemesinde meydana gelen delaminasyon çatlağının

durmasında önemli rol oynar. Bu yüzden en az delaminasyon alanı bu numunede meydana gelmiştir.



Şekil 4.38 2SCD numunesinde çekirdek-kabuk ayrılma bölgesi (Kişisel arşiv, 2016)



Şekil 4.39 2SKD numunesinde çekirdek-kabuk ayrılma bölgesi (Kişisel arşiv, 2016)

BÖLÜM BEŞ

DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, sandviç kompozitlerin düşük hızlı darbe performansının arttırılmasına yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Kompozit malzemeye yapılan her yeni işlemin etkisi incelenmiştir. Değerlendirme için deneysel ve nümerik olarak elde edilen temas kuvveti - zaman eğrileri, temas kuvveti - çökme eğrileri, pik temas kuvvetleri, absorbe edilen enerji değerleri ve delaminasyon alanları kullanılmıştır.

Referans malzemeler olarak belirlenen tabakalı kompozit ve köpük çekirdek malzemesi içeren sandviç kompozit kullanılmıştır. Tabakalı kompozit enerji profil diyagramı oluşturacak biçimde geri sekme, saplanma ve delinme enerjilerinde darbe testine tabi tutulmuştur. Sandviç kompozit ve tabakalı kompoziti değerlendirmek için saplanma enerjileri göz önünde bulundurulduğunda sandviç kompozit tabakalı kompozite göre çok daha fazla enerji absorbe etmiştir ancak sandviç kompozitte darbeden dolayı meydana gelen delaminasyon alanı tabakalı kompozite oranla oldukça yüksektir. Sandviç kompozitte kullanılan çekirdek malzemesinin yarısı kalınlığındaki iki çekirdek malzemesi kullanılarak toplamda aynı kalınlıkta, iki çekirdek malzemesi ve üç kabuk malzemesi içeren sandviç kompozit elde edilmiştir. Yapılan bu işlemin absorbe edilen enerji değerini arttırdığı görülmüştür ancak delaminasyon alanı tek çekirdekli sandviç kompozitteki gibi çok yüksektir. Çekirdek malzemesine belli aralıklarla açılmış deliklere üretim esnasında epoksi dolmuştur ve bu durum yapıda kolon etkisi oluşturmaktadır. Oluşan bu kolonlar düşük hızlı darbeye absorbe edilen enerji değerini arttırmıştır. Arasında dört tabaka cam elyaf olan delikli iki çekirdek malzemesi içeren yapı, cam dikiş ipliği kullanılarak dikilmiştir, kürlendikten sonra yapıda cam elyaf takviyeli epoksi kolonlar meydana gelmiştir. Oluşturulan iki çekirdekli çekirdek dikişli sandviç kompozitte, iki çekirdekli epoksi kolonlu sandviç kompozite göre hem absorbe edilen enerji değeri artmıştır hem de delaminasyon alanı azaltmıştır. Delikli iki çekirdek malzemesi ve en üstte dört tabaka, ortada dört tabaka ve altta dört tabaka olacak biçimde birlikte dikilmiştir. Üretim esnasında çekirdek malzemesi içinde cam dikiş ipliği olan deliklere epoksi reçine dolmuştur ve reçine kürlendikten sonra cam elyaf takviyeli epoksi kolonlar bu numunede de oluşmuştur.

Yapılan bu işlem iki çekirdekli çekirdek dikişli sandviç kompozite göre absorbe edilen enerji değerinde çok az bir artışa neden olurken, kompozitte meydana gelen delaminasyonun alanı yüksek oranda azalmıştır. Bu iki numune arasındaki absorbe edilen enerji farkının az olması, dikiş esnasında kabuk dikişli sandviç kompozitte kullanılan dikiş ipliği dikme işlemi sırasında çekirdek dikişli sandviç kompozitin dikiş ipliğine göre daha fazla zarar görmesinden kaynaklanmış olabilir.

Yapılan çalışmalarda sandviç kompozitin darbe performansını arttıran ve delaminasyon alanını azaltan yöntemler incelenmiştir. Çekirdek malzemesine yapılan her bir geliştirme, ek işlem getirmektedir. Tasarlanan yapının ihtiyacına göre, sandviç kompozit yapı iki çekirdekli, epoksi kolonlu, çekirdek dikişli veya kabuk dikişli olarak tercih edilebilir. Daha önce birçok çalışmada incelenen kabuk dikiş işlemine alternatif olarak çekirdek dikiş işleminin de yapılabileceği elde edilen verilerle tespit edilmiştir.

Bu çalışmalarda kullanılan dikiş ipliğinin, dikiş esnasındaki sürtünmeden dolayı zarar görmesinin engellemek için önceden reçine emdirilmiş dikiş ipliği kullanılarak çalışma yapılabilir. Reçine emdirilmiş elyaf daha az hacim kaplayacağından dolayı daha kalın iplik kullanılmasına imkan verebilir. Farklı türde elyaf dikiş işleminde kullanılarak çalışmalar yürütülebilir.

KAYNAKLAR

- Abrate, S. (2011). *Impact engineering of composite structures*. (1st ed.) Udine: Springer.
- Ahmad, F., Abbassi, F., Park, M. K., Jung, J.W. ve Hong, J.W. (2019). Finite element analysis for the evaluation of the low-velocity impact response of a composite plate. *Advanced Composite Materials*, 28, 271-285.
- Aktas, A., Potluri, P., & Porat, I. (2009). Multi-needle stitched composites for improved damage tolerance. *International Committee on Composite Materials*. 11 Nisan 2015. <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM17proceedings/>
- Aktaş, M. (2007). *Temperature effect on impact behavior of laminated composite plates*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Alpyıldız, T. (2016). *Sandviç kompozitlerin mekanik performansının artırılması*. TÜBİTAK 1001 Projesi Sonuç Raporu, 213M603.
- 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, 754-768.
- Arikan, V. (2019). *Sandviç kompozitlerin onarım parametrelerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Aslan, Z., Karakuzu, R. ve Okutan, B. (2003). The response of laminated composite plates under low-velocity impact loading. *Composite Structures*, 59, 119-127.
- ASM Handbook 21 (Ed.). (1990). *ASM handbook volume 21 composites* (10th ed.). Materials Park, Ohio: ASM International.

- Baba, B. O. (2017). Curved sandwich composites with layer-wise graded cores under impact loads. *Composite Structures*, 159, 1-11.
- Berk, B., Karakuzu, R., Murat Icten, B., Arikan, V., Arman, Y., Atas, C. ve Goren, A. (2016). An experimental and numerical investigation on low velocity impact behavior of composite plates. *Journal of Composite Materials*, 50, 3551-3559.
- Birman, V. ve Kardomateas, G. A. (2018). Review of current trends in research and applications of sandwich structures. *Composites Part B: Engineering*, 142, 221-240.
- Chandekar, G. S., Thatte, B. S. ve Kelkar, A. D. (2010). On the behavior of fiberglass epoxy composites under low velocity impact loading. *Advances in Mechanical Engineering*, 2, 1-11.
- Dogan, F., Hadavinia, H., Donchev, T., & Bhonge, P. (2012). Delamination of impacted composite structures by cohesive zone interface elements and tiebreak contact. *Central European Journal of Engineering*, 4, 612-626.
- Dong, S., Sheldon, A., & Carney, K. (2018). Modeling of carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) composites in LS-DYNA® with optimization of material and failure parameters in LS-OPT®. *15th International LS-DYNA® Users Conference*, 5 Ocak 2019, <https://www.dynalook.com/>
- Fan Xia ve Xiao Qing Wu. (2010). Work on impact properties of foam sandwich composites with different structure. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 12, 47-62.
- Feng, D. ve Aymerich, F. (2013). Damage prediction in composite sandwich panels subjected to low-velocity impact. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 52, 12-22.

- Guideline to core and sandwich, (2018). 10 Haziran 2018, <http://www.diabgroup.com/en-GB/Knowledge/Sandwich-technology>.
- Hallquist, J. (2006). *LS-DYNA theory manual*. 6 Ekim 2017, <https://www.dynasupport.com/manuals>
- Hashin, Z. (1980). Failure criteria for unidirectional fiber composites. *Journal of Applied Mechanics*, 47, 329-334.
- Hassan, M. Z. ve Cantwell, W. J. (2012). The influence of core properties on the perforation resistance of sandwich structures – An experimental study. *Composites Part B: Engineering*, 43, 3231-3238.
- He, W., Liu, J., Wang, S. ve Xie, D. (2018). Low-velocity impact behavior of X-Frame core sandwich structures – Experimental and numerical investigation. *Thin-Walled Structures*, 131, 718-735.
- Heimbs, S., Cichosz, J., Klaus, M., Kilchert, S. ve Johnson, A. F. (2010). Sandwich structures with textile-reinforced composite foldcores under impact loads. *Composite Structures*, 92, 1485-1497.
- Heimbs, S., Heller, S., Middendorf, P., Hähnel, F. ve Weiße, J. (2009). Low velocity impact on CFRP plates with compressive preload: Test and modelling. *International Journal of Impact Engineering*, 36, 1182-1193.
- Hosseinzadeh, R., Shokrieh, M. M. ve Lessard, L. B. (2005). Parametric study of automotive composite bumper beams subjected to low-velocity impacts. *Composite Structures*, 68, 419-427.
- Jackson, K. E., Fasanella, E. L., & Littell, J. D. (2017). Development of a continuum damage mechanics material model of a Graphite - Kevlar® hybrid fabric for simulating the impact response of energy absorbing subfloor concepts. *3rd AHS*

International Annual Forum & Technology Display. 16 Ekim 2017,
<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20170005463>

Jackson, K. E., Fasanella, E. L., Lyle, K. H., & Spellman, R. L. (2006). A mesh refinement study on the impact response of a shuttle leading-edge panel finite element simulation. *9th International LS-DYNA Users Conference*. 5 Ocak 2019,
<https://www.dynalook.com/>

Jones, R. M. (1999). *Mechanics of composite materials* (2nd ed). Philadelphia, PA: Taylor & Francis.

Karakuzu, R., Erbil, E. ve Aktas, M. (2010). Impact characterization of glass/epoxy composite plates: An experimental and numerical study. *Composites Part B: Engineering*, 41, 388-395.

Kellas, S. ve Jackson, K. E. (2010). Deployable system for crash - load attenuation. *Journal of the American Helicopter Society*, 55, 6 Ekim 2017,
<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20070021731>

Kim, J. H., Lee, Y. S., Park, B. J. ve Kim, D. H. (1999). Evaluation of durability and strength of stitched foam-cored sandwich structures. *Composite Structures*, 47, 543-550.

Lascoup, B., Aboura, Z., Khellil, K. ve Benzeggagh, M. (2006). On the mechanical effect of stitch addition in sandwich panel. *Composites Science and Technology*, 66, 1385-1398.

Lascoup, B., Aboura, Z., Khellil, K. ve Benzeggagh, M. (2010). Impact response of three-dimensional stitched sandwich composite. *Composite Structures*, 92, 347-353.

Lascoup, B., Aboura, Z., Khellil, K. ve Benzeggagh, M. (2014). Core–skin interfacial toughness of stitched sandwich structure. *Composites Part B: Engineering*, 67, 363-370.

LS-DYNA Manual I. (2017). 6 Ekim 2017, <https://www.dynasupport.com/manuals>

LS-DYNA Manual II. (2017). 6 Ekim 2017, <https://www.dynasupport.com/manuals>

Ma, J., Yan, Y., Liu, Y. J. ve Yang, L. (2012). Compression strength of stitched foam-core sandwich composites with impact induced damage. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31, 1236-1246.

Maio, L., Monaco, E., Ricci, F. ve Lecce, L. (2013). Simulation of low velocity impact on composite laminates with progressive failure analysis. *Composite Structures*, 103, 75-85.

Mazumdar, S. (2001). *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. (1st ed.) Florida: CRC Press.

Menna, C., Asprone, D., Caprino, G., Lopresto, V. ve Prota, A. (2011). Numerical simulation of impact tests on GFRP composite laminates. *International Journal of Impact Engineering*, 38, 677-685.

Mohamed, G. (2018). *Introduction to composites modelling in LS-DYNA*. 9 Şubat 2020, https://www.oasys-software.com/dyna/wp-content/uploads/2020/01/LS-DYNA_Composites_Introduction_Webinar.pdf

Mouritz, A. P. ve Cox, B. N. (2000). A mechanistic approach to the properties of stitched laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31, 1-27.

- Mouritz, A. P. ve Cox, B. N. (2010). A mechanistic interpretation of the comparative in-plane mechanical properties of 3D woven, stitched and pinned composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41, 709-728.
- Nanayakkara, A., Feih, S. ve Mouritz, A. P. (2012). Experimental impact damage study of a z-pinned foam core sandwich composite. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 14, 469-486.
- Nie, J., Xu, Y., Zhang, L., Yin, X., Cheng, L. ve Ma, J. (2008). Effect of stitch spacing on mechanical properties of carbon/silicon carbide composites. *Composites Science and Technology*, 68, 2425-2432.
- Ozdemir, O., Karakuzu, R. ve Al-Shamary, A. K. J. (2015). Core-thickness effect on the impact response of sandwich composites with poly(vinyl chloride) and poly(ethylene terephthalate) foam cores. *Journal of Composite Materials*, 49, 1315-1329.
- Potluri, P., Kusak, E. ve Reddy, T. Y. (2003). Novel stitch-bonded sandwich composite structures. *Composite Structures*, 59, 251-259.
- Qi, C., Yang, S., Yang, L.-J., Han, S.-H. ve Lu, Z.-H. (2014). Dynamic response and optimal design of curved metallic sandwich panels under blast loading. *The Scientific World Journal*, 1-14.
- Rajaneesh, A., Sridhar, I. ve Rajendran, S. (2012). Impact modeling of foam cored sandwich plates with ductile or brittle faceplates. *Composite Structures*, 94, 1745-1754.
- Sevkat, E., Liaw, B. ve Delale, F. (2013). Drop-weight impact response of hybrid composites impacted by impactor of various geometries. *Materials & Design*, 52, 67-77.

- Shah, O. R. ve Tarfaoui, M. (2017). Determination of mode I & II strain energy release rates in composite foam core sandwiches. An experimental study of the composite foam core interfacial fracture resistance. *Composites Part B: Engineering*, 111, 134-142.
- Singh, K. K., Singh, N. K. ve Jha, R. (2016). Analysis of symmetric and asymmetric glass fiber reinforced plastic laminates subjected to low-velocity impact. *Journal of Composite Materials*, 50, 1853-1863.
- Sok, T. (2010). *Effects of angled stitch reinforcement on foam core sandwich structures*. Yüksek Lisans Tezi. The University of Utah, Utah.
- Stanley, L.E. ve Adams D.O. (2001). *Development and evaluation of stitched sandwich panels*. 14 Eylül 2015, <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20010073740>
- Tan, K. T., Watanabe, N. ve Iwahori, Y. (2012). Impact damage resistance, response, and mechanisms of laminated composites reinforced by through-thickness stitching. *International Journal of Damage Mechanics*, 21, 51-80.
- Vaidya, U., Hosur, M., Kumar, P., Mahfuz, H., Haque, A., & Jeelani, S. (1999). Impact damage resistance of innovative functional sandwich composite. *Symposium on Recent Developments in the Study of Impacts on Composite Materials*, 404-413.
- Yalkın, H. E., Karakuzu, R. ve Alpyıldız, T. (2020). Experimental and numerical behaviors of GFRP laminates under low velocity impact. *Journal of Composite Materials*, 9. <https://doi.org/10.1177/0021998320906871>.
- Yalkın, H.E., Icten, B. M. ve Alpyıldız, T. (2015). Enhanced mechanical performance of foam core sandwich composites with through the thickness reinforced core. *Composites Part B: Engineering*, 79, 383-391.

Yalkın, H.E., Icten, B. M. ve Alpyildiz, T. (2017). Tensile and compressive performances of foam core sandwich composites with various core modifications. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 19, 49-65.

Yalkın, H.E. ve Karakuzu, R. (2019). Drop weight impact response of laminated composites. *3rd International Students Science Congress*, 3, 457-463.

Yoon, S.H., Jang, K.J., Cho, S.H., Park, B.J. ve Cho, J.M. (1999). Low energy impact behaviors of nonstitched and stitched foam cored sandwich structures. *Proceedings of the Twelfth International Conference on Composite Materials*, 1- 10.

Zaretsky, E., Asaf, Z., Ran, E. ve Aizik, F. (2012). Impact response of high density flexible polyurethane foam. *International Journal of Impact Engineering*, 39, 1-7.