

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHDENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KOMPOZİT YAPILARDA MAKRO VE MİKRO HASAR DAVRANIŞININ DENEYSEL VE
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mak. Yük. Müh. İsmail ÖZEN

**MAYIS 2022
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KOMPOZİT YAPILARDA MAKRO VE MİKRO HASAR DAVRANIŞININ DENEYSEL VE
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Mak. Yük. Müh. İsmail ÖZEN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 31 / 03 / 2022

Tezin Savunma Tarihi : 10 / 05 / 2022

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hasan GEDİKLİ

Trabzon 2022

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır.

“Kompozit Yapılarda Makro ve Mikro Hasar Davranışının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi” isimli tez çalışması süresince bana her konuda destek olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hasan GEDİKLİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitesinde yer alan ve tez süresi boyunca ilgi, alaka ve desteklerini esirgemeyen değerli Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU ve Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK hocalarıma saygılarımı sunarım.

Tez çalışmamın deneysel kısmında yer alan, numunelerin mekanik testlerinde benden bilgi, tecrübe ve desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Mustafa ASLAN' a şükranlarımı sunarım. Ayrıca, 117M905 kodlu 3001 proje desteği ile bu çalışmaya vermiş olduğu katkılardan dolayı TÜBİTAK' a teşekkür ederim.

Katı parçacık erozyon testleriyle ilgili laboratuvar alt yapısının oluşturulmasına yönelik vermiş oldukları proje desteğinden dolayı TUSAŞ-TAI/DKTM kurumlarına teşekkür ederim.

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2019-8279 proje numarası ile desteklenmiştir. Tez çalışmasının sorunsuz bir şekilde yürütülmesi için laboratuvar alt yapı ve proje desteği sağlayan Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Bu çalışmanın gelecekte yapılacak yeni çalışmalara öncü olmasıyla birlikte vatanımıza ve milletimize faydalı olmasını temenni ederim.

İsmail ÖZEN

Trabzon, 2022

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Kompozit Yapılarda Makro ve Mikro Hasar Davranışının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Hasan GEDİKLİ’ nin sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 10/05/2022

İsmail ÖZEN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XVIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIX
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Araştırması	2
1.3. Katı Parçacık Erozyon Davranışı	14
1.3.1. Katı Parçacık Erozyon Davranışının Deneysel Belirlenmesi	17
1.3.2. Katı Parçacık Erozyon Hasarının Katı Cisimler Mekaniği ile Belirlenmesi	22
1.3.3. Katı Parçacık Erozyon Hasarının Akışkanlar Dinamiği ile Belirlenmesi.....	24
1.3.3.1. Akışla İlgili Korunum Denklemleri	26
1.3.3.2. Parçacık Hareket Denklemleri	28
1.3.3.3. Hedef Yüzeydeki Erozyon Hızıyla İlgili Denklemler.....	29
1.4. Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri	31
1.5. Kompozit Yapıların Enerji Sönümleme ve Hasar Davranışı	37
1.5.1. Kompozit Malzemelerin Hasar Teorileri	37
1.5.2. Kompozit Yapıların Enerji Sönümleme Davranışının Belirlenmesi.....	42
1.5.2.1. Sandviç Panellerde Enerji Sönümleme Davranışının Belirlenmesi	42
1.5.2.2. Çarpışma Kutularında Enerji Sönümleme Davranışının Belirlenmesi	46
1.6. Kompozit Yapılarda Hasarın Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Belirlenmesi	51
1.7. Tezin Amacı ve Kapsamı	56
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	58
2.1. Deneysel Çalışmalar	58
2.1.1. Kompozit Yapıların Üretimi	58

2.1.1.1.	Kompozit Plakaların Vakum İnfüzyon Yöntemi ile Üretimi.....	58
2.1.1.2.	Kompozit Sandviç Panellerin Üretimi	63
2.1.1.3.	Kompozit Çarpışma Kutularının Vakum Torbalama Yöntemi ile Üretimi	65
2.1.2.	Kompozit Malzemelerin Mekanik Testleri	76
2.1.3.	Katı Parçacık Erozyon Testi	79
2.1.4.	Kompozit Sandviç Panellerin Serbest Ağırlık Düşürmeli Darbe Testi.....	82
2.1.5.	Kompozit Çarpışma Kutularının Ezilme Testi.....	83
2.2.	Sayısal Çalışmalar.....	84
2.2.1.	HAD Tabanlı Sayısal Erozyon Analizi	84
2.2.1.1.	HAD Tabanlı Sayısal Erozyon Doğrulama Modeli	85
2.2.1.2.	Aşınma Kalkanının HAD Tabanlı Sayısal Erozyon Modeli.....	86
2.2.2.	Kompozit Sandviç Panellerin Düşük Hızlı Darbe Hasarının Modellenmesi	90
2.2.3.	Kompozit Çarpışma Kutularında Ezilme Hasarının Modellenmesi	95
3.	BULGULAR VE İRDELEME	101
3.1.	KETP ve CETP Kompozit Malzemeli Plaka Numunelerin Katı Parçacık Erozyon Davranışı.....	101
3.2.	CETP ve KETP Kompozit Malzemeli Plaka Numunelerin Katı Parçacık Erozyon Davranışına Göre PU Bant Malzeme ile Karşılaştırması	102
3.3.	SS304 ve Ni Malzemeli Plaka Numunelerin Katı Parçacık Erozyon Davranışına Göre PU Bant Malzeme ile Karşılaştırması.....	104
3.4.	CETP, KETP, PU Bant, SS304 ve Ni Malzemelerin HAD tabanlı Sayısal Erozyon Modellerinde Kullanılan Malzeme Sabitleri	106
3.5.	CETP, KETP ve PU Bant Malzemeli Numunelerin Deneysel ve HAD Tabanlı Sayısal Erozyon Doğrulama Modeli Sonuçlarının Karşılaştırması	107
3.6.	CETP, KETP, PU Bant, SS304 ve Ni Malzemelerin Helikopter Rotor Pali Aşınma Kalkanındaki Erozyon Performansı.....	111
3.7.	CETP, KETP, PU Bant, SS304 ve Ni Malzemeli Numunelerin Erozyona Uğramış Yüzeylerinin SEM Görüntüleri	119
3.8.	Kompozit Sandviç Panellerin Enerji Sönümleme ve Hasar Davranışları.....	122
3.8.1.	Kompozit Sandviç Panellerin Sonlu Elemanlar Darbe Modelinin Doğrulanması	122
3.8.2.	Kompozit Sandviç Panellerin Enerji Sönümleme Davranışı	124
3.8.3.	Kompozit Sandviç Panellerin Hasar Davranışı.....	137
3.9.	Kompozit Çarpışma Kutularının Enerji Sönümleme ve Hasar Davranışları	140
3.9.1.	KETP Kompozit Malzemenin Mekanik Özellikleri	140
3.9.2.	Kompozit Çarpışma Kutularının Sonlu Elemanlar Ezilme Modelinin Doğrulanması	145

3.9.3.	Kare Tip KETP Kompozit arpışma Kutularının Enerji Sönümlleme Davranışı	146
3.9.4.	Altıgen Tip KETP Kompozit arpışma Kutularının Enerji Sönümlleme Davranışı	149
3.9.5.	Silindir Tip KETP Kompozit arpışma Kutularının Enerji Sönümlleme Davranışı	152
3.9.6.	Kompozit arpışma Kutularının Ezilme Karakteristikleri	155
3.9.7.	Kompozit arpışma Kutularının Ezilme Sürecindeki Hasar Davranışları	160
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	172
5.	KAYNAKLAR	177
ÖZGEçMİş		



Doktora Tezi

ÖZET

KOMPOZİT YAPILARDA MAKRO VE MİKRO HASAR DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

İsmail ÖZEN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Hasan GEDİKLİ
2022, 188 Sayfa

Bu tez çalışmasında, mühendislik uygulamalarında karşılaşılan kompozit yapıların mikro ve makro hasar davranışının ortaya çıkarılması ve yenilikçi yaklaşımlarla iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, ilk olarak, cam elyaf takviyeli polimer (CETP) kompozit, karbon elyaf takviyeli polimer (KETP) kompozit, ticari 3M-8663 kodlu poliüretan (PU) bant, 304 paslanmaz çelik ve saf nikel malzemelerde katı parçacık çarpması sonucu oluşan hasar (erozyon) davranışı deneysel ve sayısal olarak karakterize edilmiştir. Ayrıca bahsi geçen malzemelerin bir helikopter rotor pali aşınma kalkanındaki katı parçacık erozyon performansları 0° hücum açısı ve farklı çarpma hızları için (110, 150, 190 ve 230 m/s) sayısal olarak belirlenmiştir. İkinci olarak, 3D yazıcılar kullanılarak düzlem içi ve düzlem dışı yönlü üretilen termoplastik çekirdek yapılar ile KETP kompozit yüzey plakaları birleştirilerek oluşturulan kompozit sandviç panellerin düşük enerjili darbe etkisi altındaki enerji sönümleme ve hasar davranışları incelenmiştir. Son olarak, KETP kumaşlar kullanılarak vakum torbalama yöntemiyle üretilen içi boş ve hücreli (kare, altıgen) dolgulu kare, altıgen ve silindirik dış yüzeyli kompozit çarpışma kutularının statik basma yükü altındaki ezilme karakteristikleri ve hasar mekanizmaları deneysel ve sayısal olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, yüksek çarpma hızlarında (190 ve 230 m/s) aşınma kalkanındaki ortalama erozyon oranı, PU bant malzemeye göre cam elyaf takviyeli kompozit malzemede 10 kat daha yüksek elde edilmiştir. Düzlem içi yönlü hücre deseni tasarımı açısından, ökzetik çekirdekli kompozit sandviç panel bal beteği çekirdekli kompozit sandviç panele göre daha iyi darbe dayanımı ve enerji yayma kabiliyeti göstermiştir. İçi boş kare tip kompozit çarpışma kutusuna altıgen hücreli dolgu ilavesinin, özgül enerji sönümleme performansını yaklaşık olarak %140 arttırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit yapılar, Katı parçacık erozyonu, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Sandviç panel, Hasar, Çarpışma kutuları, Enerji sönümleme, Katı cisimler mekaniği

Doctoral Thesis

SUMMARY

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF MACRO AND MICRO DAMAGE BEHAVIOR IN COMPOSITE STRUCTURES

İsmail ÖZEN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Hasan GEDİKLİ
2022, 188 Pages

This thesis aims to reveal the micro and macro damage behavior of composite structures encountered in engineering applications and to improve them with innovative approaches. For this purpose, firstly, damage (erosion) behavior under solid particle impact of plain-woven glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite, commercial 3M-8663 polyurethane (PU) tape, 304 stainless steel and pure nickel materials was characterized experimentally and numerically. Also, the solid particle erosion performances of the aforementioned materials were numerically determined for 0° angle of attack and different impact velocities (110, 150, 190 and 230 m/s) in wear shield of a helicopter rotor blade. Secondly, composite sandwich panels were manufactured by combining CFRP composite face sheets and in-plane and out-of-plane oriented thermoplastic core structures fabricated using 3D printers. Energy absorption and damage behavior of the composite sandwich panels under low-energy (20, 40 ve 70 J) impact were experimentally and numerically investigated. Lastly, the crushing characteristics and damage mechanisms under static compression load of the composite crash boxes with hollow and cellular (square, hexagonal) filled square, hexagonal and cylindrical outer surface, produced by vacuum bagging method using CFRP fabrics, were determined experimentally and numerically. As a result, the average erosion rate on the wear shield of the GFRP composite material was 10 times higher than that of the polyurethane material at high impact velocities (190 and 230 m/s). In terms of in-plane oriented cell pattern design, auxetic core based composite sandwich panel showed better impact resistance and energy dissipation ability than honeycomb core based composite sandwich panel. It was found that the addition of hexagonal cell filler to the hollow square type composite crash box increased the specific energy absorption ability by approximately 140%.

Key Words: Composite structures, Solid particle erosion, Computational fluid dynamics, Sandwich panel, Failure, Crash boxes, Energy absorption, Solid mechanics

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Kompozit yapıların helikopter rotor palinde uygulaması (URL-1, 2022).	9
Şekil 1.2.	Katı parçacık erozyon hasar mekanizmaları: (a) Düşük çarpma açısında abrazyon, (b) Düşük çarpma hızında yüzey yorulması, (c) Orta çarpma hızı ve yüksek çarpma açısında gevrek hasar veya çoklu plastik deformasyon, (d) Yüksek çarpma hızında yüzey erime, (e) İkincil etkili makro düzeyde erozyon (Stachowiak ve diğ., 2001).	15
Şekil 1.3.	Sünek ve gevrek malzemelerin çarpma zamanı (a) ve çarpma açısına (b) göre katı parçacık erozyon davranışlarını gösteren eğriler (Barkoula ve diğ., 2002).	16
Şekil 1.4.	Sünek malzemedeki katı parçacık erozyon hasar mekanizmaları katı cisimler mekaniğine dayalı sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmesi (Wang ve Yang, 2008).	23
Şekil 1.5.	Sünek malzemedeki katı parçacık erozyon hasarının (a) Ağ bağımlı ve (b) Ağ bağımsız (SPH) tekniklerle modellenmesi (Li ve diğ., 2010).	24
Şekil 1.6.	Kompozit yapının el yatırma yöntemiyle üretimi (URL-2, 2022).	32
Şekil 1.7.	Kompozit yapının elyaf sarma yöntemiyle üretimi (URL-3, 2022).	33
Şekil 1.8.	Kompozit yapı üretiminde kullanılan otoklav fırını (URL-4, 2022).	35
Şekil 1.9.	Kompozit yapının vakum torbalama yöntemiyle üretimi (Durgun ve diğ., 2014).	36
Şekil 1.10.	Kompozit yapının vakum infüzyon yöntemiyle üretimi (URL-5, 2022).	37
Şekil 1.11.	Kompozit yüzey plakalı değişik tip çekirdek yapıları sahip sandviç panel geometrileri (Friedrich ve Almajid, 2013).	43
Şekil 1.12.	Sandviç panelin düşük enerjili darbe testlerinde geri tepme, saplanma ve delinme durumunu gösteren kuvvet-zaman eğrileri.	44
Şekil 1.13.	Sandviç panelin düşük enerjili darbe testlerinde geri tepme, saplanma ve delinme durumunu gösteren enerji-zaman eğrileri	45
Şekil 1.14.	Çarpışma kutusu ve sandviç yapıların binek araçlarda uygulama yeri (Friedrich ve Almajid, 2013).	47
Şekil 1.15.	Kompozit çarpışma kutusunun ezilme testinden elde edilen tipik kuvvet-yer değiştirme eğrisi (Rabiee, 2018).	48
Şekil 2.1.	Kompozit plakaların üretimi için imal edilen ısıtma sistemli vakum infüzyon düzeneğinin genel görünüşü.	59

Şekil 2.2.	Isıtma sistemli vakum infüzyon düzeneğinde farklı türden kompozit plakaların üretim biçimleri: (a) 20 cm x 20 cm ebatlarındaki kompozit plakaların aynı şartlar altında üretimi, (b) 40 cm x 40 cm ebatlarındaki kompozit plakanın tek başına üretimi	61
Şekil 2.3.	Vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretilen kompozit plakalar: (a) CETP kompozit plaka, (b) KETP kompozit plaka.....	62
Şekil 2.4.	Üretilen kompozit plakalardan kesilen katı parçacık erozyon test numuneleri: (a) CETP kompozit numuneler, (b) KETP kompozit numuneler	62
Şekil 2.5.	Kompozit sandviç panellerin çekirdek yapı hücrelerinin boyutlandırması: (a) Bal peteği hücre desen, (b) Ökzetik hücre desen	63
Şekil 2.6.	Kompozit sandviç panel numunesinin geometrik konfigürasyonu ve boyutlandırması.....	64
Şekil 2.7.	Düzlem içi ve düzlem dışı çekirdek yönlü üretilen KETP yüzey plakalı kompozit sandviç panel numunelerin tasarımları	65
Şekil 2.8.	KETP kompozit çarpışma kutularının tasarımları: (a) Kare, (b) Altıgen, c) Silindir, d) Kare hücreli ve d) Altıgen hücreli (Ölçü birimi: mm)	66
Şekil 2.9.	Vakuma alınmış kompozit çarpışma kutularının kürleştirme işlemiyle üretimi: (a) İçi boş kare, altıgen ve silindir dış duvarlı kompozit çarpışma kutularının üretimi, (b) Kompozit çarpışma kutularının dolgu kısımlarının üretimi.....	69
Şekil 2.10.	Kare, altıgen ve daire dış kesitli içi boş KETP kompozit çarpışma kutuları ve hücre dolgu kısımları	70
Şekil 2.11.	KETP kompozit çarpışma kutularına hasar tetikleyici kanalların açılması ve türlerine göre hücresel gözenekli kısımların dış duvarlara yüzey temaslı olarak yerleştirilmesi.....	70
Şekil 2.12.	Kare hücre dolgulu kare (KHDK) tip KETP kompozit çarpışma kutusunun içi boş kare (BK) ve kare hücre dolgusu (KHD) ile iç içe tasarımı.....	71
Şekil 2.13.	Altıgen hücre dolgulu kare (AHDK) tip KETP kompozit çarpışma kutusunun içi boş kare (BK) ve altıgen hücre dolgusu (AHD) ile iç içe tasarımı.....	71
Şekil 2.14.	Kare hücre dolgulu altıgen (KHDA) tip KETP kompozit çarpışma kutusunun içi boş altıgen (BA) ve kare hücre dolgusu (KHD) ile iç içe tasarımı.....	72
Şekil 2.15.	Altıgen hücre dolgulu altıgen (AHDA) tip KETP kompozit çarpışma kutusunun içi boş altıgen (BA) ve altıgen hücre dolgusu (AHD) ile iç içe tasarımı	72

Şekil 2.16.	Kare hücre dolgulu silindirik (KHDS) tip KETP kompozit çarpışma kutusunun içi boş silindir (BS) ve kare hücre dolgusu (KHD) ile iç içe tasarımı.....	73
Şekil 2.17.	Altıgen hücre dolgulu silindirik (AHDS) tip KETP kompozit çarpışma kutusunun içi boş silindir (BS) ve altıgen hücre dolgusu (AHD) ile iç içe tasarımı	73
Şekil 2.18.	Hibrit (altıgen-kare) hücre dolgulu kare (HHDK) tip KETP kompozit çarpışma kutusunun içi boş kare (BK) ve hibrit hücre dolgusu (HHD) ile iç içe tasarımı	74
Şekil 2.19.	Hibrit (altıgen-kare) hücre dolgulu altıgen (HHDK) tip KETP kompozit çarpışma kutusunun içi boş altıgen (BA) ve hibrit hücre dolgusu (HHD) ile iç içe tasarımı	74
Şekil 2.20.	Hibrit (altıgen-kare) hücre dolgulu silindirik (HHDK) tip KETP kompozit çarpışma kutusunun içi boş kare (BS) ve hibrit hücre dolgusu (HHD) ile iç içe tasarımı.....	75
Şekil 2.21.	KETP kompozit plakalardan kesilen numunelerin ASTM test standartlarına göre ölçüleri: (a) Çekme numunesi, (b) Basma numunesi ve (c) Üç nokta eğilme numunesi	77
Şekil 2.22.	ASTM D6641 standartlarına göre gerçekleştirilen basma testlerinde kullanılan aparat: (a) Tasarım ve (b) Test cihazına bağlanış biçimi.....	78
Şekil 2.23.	(a) Kamera ile görüntü alma işlemi, (b) Çekme testi numunesi, (c) Kayma testi numunesi, (d) Basma testi numunesi	78
Şekil 2.24.	Üç nokta eğilme testi numunesi.....	79
Şekil 2.25.	Katı parçacık erozyon testlerinde kullanılan deney düzeneği.....	79
Şekil 2.26.	Katı parçacık erozyon testlerinde kullanılan SiC parçacıklarının SEM görüntüsü (114-268 μm)	80
Şekil 2.27.	Kompozit sandviç panellerin düşük hızlı darbe testlerinde kullanılan serbest ağırlık düşürmeli test sistemi	83
Şekil 2.28.	(a) HAD tabanlı sayısal erozyon doğrulama modeli ve (b) Modelin ağ yapısı	85
Şekil 2.29.	HAD tabanlı sayısal erozyon analizlerinde kullanılan helikopter rotor palinin geometrisi.....	86
Şekil 2. 30.	Helikopter rotor pali için tasarlanan aşınma kalkanının geometrisi	87
Şekil 2.31.	Helikopter rotor palindeki hücum açısı (ψ) ve parçacık çarpma açısı (θ) ...	87
Şekil 2.32.	Helikopter rotor palinin HAD tabanlı sayısal erozyon analizlerinde kullanılan aşınma kalkanı yüzey tipleri: (a) PU bant, Ni, SS304, KETP ve CETP kompozit malzemeli kalkan yüzeyleri, (b) PU bant/SS304 ve PU bant/Ni malzemeli hibrit aşınma kalkan yüzeyleri	88

Şekil 2.33.	Helikopter rotor palinin HAD tabanlı sayısal erozyon analizleri için oluşturulan sonlu hacimler modeli ve sınır şartları.....	89
Şekil 2.34.	Helikopter rotor pali aşınma kalkanının HAD tabanlı sayısal erozyon analizleri için oluşturulan sonlu hacimler modelinin ağ yapısı	89
Şekil 2.35.	Bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panellerin sonlu elemanlar darbe modeli ve ağ yapısı	90
Şekil 2.36.	ABS malzeme için deneysel olarak elde edilen akma sonrası normal gerilme-etkin plastik şekil değiştirme eğrisi	94
Şekil 2.37.	Kompozit çarpışma kutuları için oluşturulan sonlu elemanlar ezilme modeli	96
Şekil 2.38.	İçi boş kare (BK), kare hücre dolgulu kare (KHDK), altıgen hücre dolgulu kare (AHDK) ve hibrit hücre dolgulu kare (HHDK) dış duvarlı tip KETP kompozit çarpışma kutularının ağ (mesh) yapıları	97
Şekil 2.39.	İçi boş altıgen (BA), kare hücre dolgulu altıgen (KHDA), altıgen hücre dolgulu altıgen (AHDA) ve hibrit hücre dolgulu altıgen (HHDA) dış duvarlı tip KETP kompozit çarpışma kutularının ağ yapıları.....	98
Şekil 2.40.	İçi boş silindir (BS), kare hücre dolgulu silindir (KHDS), altıgen hücre dolgulu silindir (AHDS) ve hibrit hücre dolgulu silindir (HHDS) dış duvarlı tip KETP kompozit çarpışma kutularının ağ yapıları.....	100
Şekil 3.1.	KETP kompozit malzemeli plaka numunesinin deneysel erozyon davranışının çarpma açısına göre değişimi ($V_P = 110$ m/s).....	102
Şekil 3.2.	CETP kompozit malzemeli plaka numunesinin deneysel erozyon davranışının çarpma açısına göre değişimi ($V_P = 110$ m/s).....	102
Şekil 3.3.	PU bant, KETP kompozit ve CETP kompozit malzemeli plaka numunelerin çarpma açısına bağlı erozyon davranışının çarpma hızına göre karşılaştırması: (a) $V_P = 70$ m/s, (b) $V_P = 110$ m/s, (c) $V_P = 150$ m/s ve (d) $V_P = 190$ m/s.....	104
Şekil 3.4.	PU bant, Ni ve SS304 malzemeli plaka numunelerinin çarpma açısına bağlı erozyon davranışlarının çarpma hızına göre karşılaştırması: (a) $V_P = 70$ m/s, (b) $V_P = 110$ m/s, (c) $V_P = 150$ m/s ve (d) $V_P = 190$ m/s.....	105
Şekil 3.5.	PU bant plaka numunelerinde deneysel ve sayısal olarak elde edilen erozyon izlerinin çarpma açısına göre karşılaştırması ($V_P = 110$ m/s).....	107
Şekil 3.6.	PU bant plaka numunelerinde deneysel ve sayısal olarak elde edilen erozyon oranı değerlerinin çarpma açısı ve çarpma hızına göre karşılaştırması: (a) $V_P = 110$ m/s için çarpma açısı, (b) $\theta = 90^\circ$ için çarpma hızı.....	108
Şekil 3.7.	CETP kompozit plaka tip hedef yüzeydeki HAD tabanlı sayısal erozyon hızının çarpma açısına bağlı değişimi ($V_P = 110$ m/s).....	109
Şekil 3.8.	KETP kompozit plaka tip hedef yüzeydeki HAD tabanlı sayısal erozyon hızının çarpma açısına bağlı değişimi ($V_P = 110$ m/s).....	110

Şekil 3.9.	CETP kompozit plaka numunelerinde deneysel ve sayısal olarak elde edilen erozyon oranı değerlerinin karşılaştırması: (a) $V_P = 110$ m/s için çarpma açısına göre, (b) $\theta = 90^\circ$ için çarpma hızına göre.....	110
Şekil 3.10.	KETP kompozit plaka numunelerinde deneysel ve sayısal olarak elde edilen erozyon oranı değerlerinin karşılaştırması: (a) $V_P = 110$ m/s için çarpma açısına göre, (b) $\theta = 90^\circ$ için çarpma hızına göre.....	111
Şekil 3.11.	HAD tabanlı sayısal erozyon analizi sonucu parçacıkların helikopter rotor paline çarpması sonrası elde edilen hız ve yörünge değişimleri: (a) $V_P = 110$ m/s, (b) $V_P = 150$ m/s, (c) $V_P = 190$ m/s, (d) $V_P = 230$ m/s	111
Şekil 3.12.	HAD tabanlı sayısal analiz sonuçlarına göre, parçacıkların boyutsuz aşınma kalkan yüksekliğine göre yüzeyde birikme debisinin 2D olarak değişimi ($V_P = 230$ m/s).....	112
Şekil 3.13.	HAD tabanlı sayısal analiz sonuçlarına göre, parçacıkların aşınma kalkanı yüzeyindeki birikme debilerinin 3D olarak değişimi: (a) $V_P = 110$ m/s, (b) $V_P = 150$ m/s, (c) $V_P = 190$ m/s ve (d) $V_P = 230$ m/s.....	112
Şekil 3.14.	PU bant, KETP ve CETP kompozit malzemelerin aşınma kalkanı yüzeyinde erozyon hızı değişimlerinin çarpma hızına göre karşılaştırması: (a) $V_P = 110$ m/s, (b) $V_P = 150$ m/s, (c) $V_P = 190$ m/s ve (d) $V_P = 230$ m/s	113
Şekil 3.15.	PU bant, KETP ve CETP kompozit malzemelerin aşınma kalkanında sayısal olarak hesaplanan ortalama erozyon oranı değerlerinin çarpma hızına göre karşılaştırması	114
Şekil 3.16.	PU bant, Ni ve SS304 malzemelerin aşınma kalkanı yüzeyinde erozyon hızı değişimlerinin çarpma hızına göre karşılaştırması: (a) $V_P = 110$ m/s, (b) $V_P = 150$ m/s, (c) $V_P = 190$ m/s ve (d) $V_P = 230$ m/s.....	116
Şekil 3.17.	HAD tabanlı sayısal erozyon analiz sonuçlarına PU bant, PU bant/SS304 ve PU bant/Ni malzemelerin aşınma kalkanındaki erozyon hızı dağılımlarının çarpma hızına göre karşılaştırması: (a) $V_P = 110$ m/s, (b) $V_P = 150$ m/s, (c) $V_P = 190$ m/s ve (d) $V_P = 230$ m/s.....	117
Şekil 3.18.	SS304, Ni, PU bant/SS304 ve PU bant/Ni malzemelerin aşınma kalkanında sayısal olarak hesaplanan ortalama erozyon oranı değerlerinin çarpma hızına göre karşılaştırması	118
Şekil 3.19.	KETP (a, b), CETP (c, d) ve PU bant (e, f) malzemeli plaka numunelerin 30° ve 90° çarpma açılarında erozyona uğramış yüzeylerinin 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri ve hasar mekanizmaları ($V_P = 110$ m/s).....	120
Şekil 3.20.	SS304 (a, b) ve Ni (c, d) malzemeli plaka numunelerin 30° ve 90° çarpma açılarında erozyona uğramış yüzeylerinin 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri ve hasar mekanizmaları ($V_P = 110$ m/s)	122

Şekil 3.21.	Serbest ağırlık düşürmeli darbe testinden elde edilen vurucu yer değiştirme-zaman eğrileri ile sonlu elemanlar darbe modeli sonuçlarının doğrulanması	123
Şekil 3.22.	Kompozit sandviç panellerin maksimum kuvvet (a) ve sönümlenen enerji değerlerinin (b) çarpma enerjisine göre deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması	124
Şekil 3.23.	2,236 m/s çarpma hızında düzlem içi yönlü bal peteği (a) ve ökzetik (b) desen çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sırasındaki tepki kuvveti ve enerji eğrilerinin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması	126
Şekil 3.24.	3,163 m/s çarpma hızında düzlem içi yönlü bal peteği (a) ve ökzetik (b) desen çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sırasındaki tepki kuvveti ve enerji eğrilerinin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması	127
Şekil 3.25.	4,183 m/s çarpma hızında düzlem içi yönlü bal peteği (a) ve ökzetik (b) desen çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sırasındaki tepki kuvveti ve enerji eğrilerinin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması	129
Şekil 3.26.	2,236 m/s çarpma hızında düzlem dışı yönlü bal peteği (a) ve ökzetik (b) desen çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sırasındaki tepki kuvveti ve enerji eğrilerinin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması	132
Şekil 3.27.	3,163 m/s çarpma hızında düzlem dışı yönlü bal peteği (a) ve ökzetik (b) desen çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sırasındaki tepki kuvveti ve enerji eğrilerinin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması	133
Şekil 3.28.	4,183 m/s çarpma hızında düzlem dışı yönlü bal peteği (a) ve ökzetik (b) desen çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sırasındaki tepki kuvveti ve enerji eğrilerinin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması	135
Şekil 3.29.	Düzlem içi yönlü bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panelde darbe sonrası oluşan hasarın çarpma enerjisine göre deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması	138
Şekil 3.30.	Düzlem içi yönlü ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelde darbe sonrası oluşan hasarın çarpma enerjisine göre deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması	138
Şekil 3.31.	Düzlem dışı yönlü bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panelde darbe sonrası oluşan hasarın çarpma enerjisine göre deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması	139
Şekil 3.32.	Düzlem dışı yönlü ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelde darbe sonrası oluşan hasarın çarpma enerjisine göre deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması	140
Şekil 3.33.	KETP kompozit malzemenin çekme testi (a) ve sayısal çekme analizi (b) sonucu elde edilen hasar görüntülerinin karşılaştırması	141
Şekil 3.34.	KETP kompozit malzemenin çekme testi ve sayısal çekme analizinden edilen normal gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması	141

Şekil 3.35.	KETP kompozit malzemenin kayma testi (a) ve sayısal kayma analizi (b) sonucu elde edilen hasar görüntülerinin karşılaştırması	142
Şekil 3.36.	KETP kompozit malzemenin kayma testi ve sayısal kayma analizinden edilen normal gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması	142
Şekil 3.37.	KETP kompozit malzemenin basma testi (a) ve sayısal analizi (b) sonucu elde edilen hasar görüntülerinin karşılaştırması	143
Şekil 3.38.	KETP kompozit malzemenin basma testi ve sayısal basma analizinden elde edilen normal gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması....	143
Şekil 3.39.	KETP kompozit malzemenin eğilme testi (a) ve sayısal eğilme analizi (b) sonucu elde edilen deformasyon görüntülerinin karşılaştırması	144
Şekil 3.40.	KETP kompozit malzemenin üç nokta eğilme testi ve sayısal üç nokta eğilme analizinden elde edilen normal gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması.....	144
Şekil 3.41.	İçi boş silindir (BS) tip kompozit çarpışma kutularının ezilme testinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrisi ile sonlu elemanlar ezilme model sonuçlarının doğrulanması	145
Şekil 3.42.	Kare dış duvarlı içi boş ve hücre dolgulu tip KETP kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen deneysel ve sayısal kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması.....	147
Şekil 3.43.	Kare dış duvarlı içi boş ve hücre dolgulu tip KETP kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen deneysel ve sayısal enerji sönümlenme-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması.....	148
Şekil 3.44.	Kare dış duvarlı içi boş ve hücre dolgulu tip KETP kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen deneysel ve sayısal özgül enerji sönümlenme-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması.....	149
Şekil 3.45.	Altıgen dış duvarlı içi boş ve hücre dolgulu tip KETP kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen deneysel ve sayısal kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması	150
Şekil 3.46.	Altıgen dış duvarlı içi boş ve hücre dolgulu tip KETP kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen deneysel ve sayısal enerji sönümlenme-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması.....	151
Şekil 3.47.	Altıgen dış duvarlı içi boş ve hücre dolgulu tip KETP kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen deneysel ve sayısal özgül enerji sönümlenme-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması.....	152
Şekil 3.48.	Silindir dış duvarlı içi boş ve hücre dolgulu tip KETP kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen deneysel ve sayısal kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması	153
Şekil 3.49.	Silindir dış duvarlı içi boş ve hücre dolgulu tip KETP kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen deneysel ve sayısal enerji sönümlenme-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması.....	154

Şekil 3.50.	Silindir dış duvarlı içi boş ve hücre dolgulu tip KETP kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen deneysel ve sayısal özgül enerji sönümleme-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması.....	155
Şekil 3.51.	KETP kompozit çarpışma kutularının ÖES ve EKV değerlerinin karşılaştırması: (a) Deneysel ve (b) Sayısal.....	156
Şekil 3.52.	KETP kompozit çarpışma kutularının ÖES ve ES değerlerinin karşılaştırması: (a) Deneysel ve (b) Sayısal.....	157
Şekil 3.53.	KETP kompozit çarpışma kutularının ÖES ve OEK değerlerinin karşılaştırması: (a) Deneysel ve (b) Sayısal.....	159
Şekil 3.54.	BK tip kompozit çarpışma kutusunun s=10, 40, 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal.....	161
Şekil 3.55.	KHDK tip kompozit çarpışma kutusunun s=10, 40 ve 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal.....	161
Şekil 3.56.	AHDK tip kompozit çarpışma kutusunun s=10, 40 ve 70 mm ezilme anındaki görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal	162
Şekil 3.57.	Kare dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının deneysel ve sayısal son deformasyon görüntülerinin karşılaştırması.....	163
Şekil 3.58.	BA tip kompozit çarpışma kutusunun s=10, 40 ve 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal.....	164
Şekil 3.59.	KHDA tip kompozit çarpışma kutusunun s=10, 40 ve 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal.....	164
Şekil 3.60.	AHDA tip kompozit çarpışma kutusunun s=10, 40 ve 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal.....	165
Şekil 3.61.	HHDA tip kompozit çarpışma kutusunun s=10, 40 ve 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal.....	166
Şekil 3.62.	Altıgen dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının deneysel ve sayısal son deformasyon görüntülerinin karşılaştırması	167
Şekil 3.63.	BS tip kompozit çarpışma kutusunun s=10, 40 ve 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal.....	168
Şekil 3.64.	KHDS tip kompozit çarpışma kutusunun s=10, 40 ve 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal.....	168
Şekil 3.65.	AHDS tip kompozit çarpışma kutusunun s=10, 40 ve 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal.....	169
Şekil 3.66.	HHDS tip kompozit çarpışma kutusunun s=10, 40 ve 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal.....	170
Şekil 3.67.	Silindir dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının deneysel ve sayısal son deformasyon görüntülerinin karşılaştırması	171

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1.	LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımında yer alan kompozit malzeme hasar modelleri (Andersson ve Liedberg, 2014).....	52
Tablo 2.1.	Kompozit sandviç panellerin çekirdek hücrelerinin boyutlandırması.....	65
Tablo 2.2.	SiC parçacıkların malzeme özellikleri	81
Tablo 2.3.	3K düzlemsel örgülü KETP kompozitin deneysel belirlenen mekanik özellikleri	81
Tablo 2.4.	3K düzlemsel örgülü CETP kompozitin deneysel belirlenen mekanik özellikleri	81
Tablo 2.5.	Kompozit yüzey plakalı sandviç panelin sonlu elemanlar darbe modelinde kullanılan eleman tipleri ve sayıları	92
Tablo 2.6.	Kompozit sandviç panellerin sonlu elemanlar darbe modelindeki rijit cisimlerin malzeme özellikleri	92
Tablo 2.7.	12K düzlemsel örgülü KETP kompozit malzemenin mekanik özellikleri ..	93
Tablo 2.8.	12K düzlemsel örgülü KETP kompozitin MAT54 malzeme modeli için kullanılan hasar parametreleri	93
Tablo 2.9.	ABS malzemenin deneysel belirlenen mekanik özellikleri ve MAT24 malzeme hasar modeli için kalibre edilen etkin hasar şekil değiştirme parametresi	94
Tablo 2.10.	12K [0/90] örgülü KETP kompozit malzemenin deneysel belirlenen mekanik özellikleri.....	99
Tablo 2.11.	12K [0/90] örgülü KETP kompozit malzemenin MAT54 hasar modeli için kalibre edilen hasar parametreleri	100
Tablo 3.1.	Malzemelerin deneysel olarak belirlenen K ve n erozyon sabitleri.....	106
Tablo 3.2.	Malzemelerin deneysel olarak belirlenen $F(\theta)$ erozyon fonksiyon sabiti katsayıları.....	106
Tablo 3.3.	Kompozit sandviç panel numunelerinin elastik ve sönümlenen enerji değerlerinin çarpma enerjisine göre karşılaştırması	137
Tablo 3.4.	KETP kompozit çarpışma kutularının ezilme testlerinden elde edilen ezilme karakteristikleri.....	158
Tablo 3.5.	KETP kompozit çarpışma kutularının sonlu elemanlar ezilme analizlerinden elde edilen ezilme karakteristikleri	158

SEMBOLLER DİZİNİ

X_t	: Boylamasına yönde maksimum çekme mukavemeti
X_c	: Boylamasına yönde maksimum basma mukavemeti
Y_t	: Enine yönde maksimum çekme mukavemeti
Y_c	: Enine yönde maksimum basma mukavemeti
S_c	: Maksimum düzlemsel kayma mukavemeti
W_{er}	: Kütleli erozyon oranı
ΔW_S	: Numunedeki ağırlık kaybı
ΔW_{ep}	: Numuneye çarpan parçacıkların ağırlığı
t	: Zaman
v_i	: Çarpma hızı
$v(t)$	: Zamana bağlı hız
$F(t)$	: Zamana bağlı kuvvet
δ_i	: Çarpma öncesi vurucu yer değiştirmesi
$\delta(t)$	: Çarpma sonrası vurucunun zamana bağlı yer değiştirmesi
m	: Kütle
g	: Yer çekimi ivmesi
$E_s(t)$	: Zamana bağlı enerji sönümleme
$F(s)$	: Ezilme yer değiştirmesine bağlı kuvvet
ES_T	: Toplam enerji sönümleme
ρ	: Yoğunluk
ρ_b	: Bağlı yoğunluk
u	: Ortalama akışkan hızı
μ	: Dinamik viskozite
p	: Ortalama akışkan basıncı
δ_{ij}	: Kronecker-Delta operatörü
$\emptyset$	: Parçacık şekil faktörü
V_p	: Ortalama parçacık hızı
ρ_p	: Katı parçacık yoğunluğu
d_p	: Ortalama parçacığın çapı

F_D	: Parçacığın sürüklenme kuvveti
Re_{sph}	: Küresel parçacıklı akışın Reynolds sayısı
C_D	: Sürüklenme katsayısı
b_1, b_2, b_3, b_4	: Parçacık sürüklenme katsayısı fonksiyon sabitleri
k	: Türbülans kinetik enerjisi
ε	: Türbülans yayılım hızı
ω	: Türbülans girdap frekansı
E_R	: Hedef yüzeydeki erozyon hızı
$\dot{m}_p$	: Parçacık debisi
K, n	: Finnie erozyon modeliyle ilgili malzeme sabitleri
$F(\theta)$	: Parçacık çarpma açısına bağlı malzeme sabiti
$A_1, \dots, A_7$	: Parçacık çarpma açısına bağlı malzeme sabiti katsayıları
θ	: Parçacık çarpma açısı
e_n	: Yüzeye normal geri tepme hızı katsayısı
e_t	: Yüzeye teğet geri tepme hızı katsayısı
$\Delta \dot{h}_i$	: Herhangi bir ağ elemanındaki erozyon hızı
$(e_r)_i$	: Herhangi bir ağ elemandaki erozyon oranı
ρ_w	: Duvar malzemesini yoğunluğu
$\dot{m}_i$	: Herhangi bir ağ elemandaki parçacık debisi
A_i	: Herhangi bir ağ elemanın yüzey alanı
S_{tk}	: Stokes sayısı
l	: Akışın karakteristik uzunluğu
μ_f	: Akışkanın dinamik viskozitesi
V_f	: Akışkan hızı
$N_{parçacık}$	: Parçacık sayısı
RO	: Malzeme yoğunluğu
E_1	: Boylamasına yönde elastisite modülü
E_2	: Enine yönde elastisite modülü
G_{12}	: Kayma modülü
ν_{12}	: Major Poisson oranı
ν_{21}	: Minör Poisson oranı
e_f	: Boylamasına yönde çekme hasar kriteri

e_c	: Boylamasına yönde basma hasar kriteri
e_m	: Enine yönde çekme hasar kriteri
e_d	: Enine yönde basma hasar kriteri
β	: Boylamasına yönde çekme hasarı için kayma gerilmesi faktörü
σ_1	: Boylamasına yönde çekme gerilmesi
σ_2	: Enine yönde çekme gerilmesi
σ_{12}	: Düzlemsel kayma gerilmesi
μ_t	: Türbülans viskozitesi
ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
AHDS	: Altıgen Hücre Dolgulu Silindir
AHDA	: Altıgen Hücre Dolgulu Altıgen
AHDK	: Altıgen Hücre Dolgulu Kare
ALPH	: Kayma gerilmesinin doğrusal olmayan bölgesi için düzeltme katsayısı
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BA	: Boş Altıgen
BETA	: Boylamasına yönde çekmede kayma terimi için ağırlıklaştırma faktörü
BS	: Boş Silindir
BK	: Boş Kare
CETP	: Cam Elyaf Takviyeli Polimer
DEM	: Discrete Element Method
DNV	: Det Norske Veritas (Şirket adı)
EFS	: Effective Failure Strain
EKV	: Ezilme Kuvveti Verimi
ELFORM	: Eleman formülasyonu
EPP	: Expanded Polipropilen
ES	: Enerji Sönümleme
FEA	: Finite Element Analysis
FBRT	: Boylamasına yönde çekme hasarı sonrası mukavemet azaltma katsayısı
FDM	: Fused Deposition Modeling
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HHDA	: Hibrit Hücre Dolgulu Altıgen
HHDK	: Hibrit Hücre Dolgulu Kare
HHDS	: Hibrit Hücre Dolgulu Silindir

KETP	: Karbon Elyaf Takviyeli Polimer
KHDA	: Kare Hücre Dolgulu Altıgen
KHDK	: Kare Hücre Dolgulu Kare
KHDS	: Kare Hücre Dolgulu Silindir
MEK	: Maksimum Ezilme Kuvveti
MIL-STD	: Military Standart
Ni	: Nikel
OEK	: Ortalama Ezilme Kuvveti
ÖES	: Özgöl Enerji Sönümleme
PU	: Poliüretan
PEI	: Polyethylenimine
PEK	: Polyetherketone
PMK	: Polimer Matris Kompozit
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SiC	: Silicon Carbide
SLIMC1	: Hasar sonrası boylamasına yönde basma mukavemetini sınırlama faktörü
SLIMC2	: Hasar sonrası enine yönde basma mukavemetini sınırlama faktörü
SLIMT1	: Hasar sonrası boylamasına yönde çekme mukavemetini sınırlama faktörü
SLIMT2	: Hasar sonrası enine yönde çekme mukavemetini sınırlama faktörü
SLIMS	: Hasar sonrası düzlemsel kayma mukavemetini sınırlama faktörü
SPH	: Smoothed Particle Hydrodynamics
SS304	: 304 Paslanmaz Çelik
SST	: Shear Stress Transport
TFAIL	: Zaman adımlı hasar kriteri
YCFAC	: Boylamasına yönde basma hasarı sonrası mukavemet azaltma katsayısı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Kompozit malzemeler geleneksel metalik malzemelere göre hafif ağırlık, özgül enerji sönümleme, korozyon direnci, boyutsal kararlılık, termal dayanım, statik ve dinamik yüklere karşı özgül mukavemet özelliklerinin iyi olması bakımından pek çok avantajlara sahiptir. Bu avantajlar, havacılık ve otomotiv gibi endüstriyel sektörlerde çalışma performansını arttırmalarının yanında daha düşük yakıt tüketimi ve emniyetli sürüş kolaylığı sağlar. Örneğin, bir kara taşıtının toplam ağırlığındaki her %10' luk bir azalma %7' ye kadar yakıt tasarrufuyla sonuçlanır (Elmarakbi, 2014). Yeni nesil bir kara taşıtının şasi ve kaporta parçalarının karbon elyaf gibi kompozit malzemeden yapılması taşıtın ağırlığının %50 kadar azaltır. Bunun yanında hava taşıtlarında kullanılan yapısal parçaların kompozit malzemeden yapılması ağırlıkça %50 kazanç sağladığı için yakıt ekonomisini önemli derecede artırır (Antil ve diğ., 2015). Ayrıca kara ve hava taşıtlarının tasarımında elyaf takviyeli kompozit yapıların kullanılması, engele çarpma veya çarpışma durumunda yolculardaki yaralanma veya ölümlerin önlenmesinde büyük avantajlar sağlar (Hadavinia ve diğ., 2010). Bu yüzden kompozitlerin kullanım yerlerine göre çarpışma, şok dalgası ve darbe etkisi gibi durumlarda hasar davranışlarının ortaya çıkarılması önemli bir araştırma konusudur.

Kompozit malzemelerin kullanım yerlerinin geçmişten günümüze kadar birçok endüstriyel alanda yaygınlaşmasıyla birlikte literatürde kompozit yapılardaki hasarın incelenmesiyle ilgili pek çok çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Özellikle kompozit yapıların ağırlıklarının hafif olması, çok iyi korozyon ve ısıl direncine sahip olmaları, metalik malzemelere göre enerji sönümleme kabiliyetlerinin yüksek olması nedeniyle günümüzde kompozit malzemelerin üretim teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak bu malzemelere olan ilgi olmaktadır. Ancak farklı türden kompozit yapıların üzerine gelen darbe (çarpışma, şok, katı parçacık çarpması) yüklerine karşı davranışın belirlenmesi günümüzde hala bir tartışma konusudur. Bu nedenle çarpışma, ezilme ve katı parçacık etkisine karşı dayanıklı kompozit yapıların geliştirilmesi, bu yapıların hasar davranışının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi literatüre yeni bilgilerin kazandırılmasında önemli olacaktır.

1.2. Literatür Araştırması

Katı parçacık erozyonu, otomotiv, havacılık ve uzay endüstrisi gibi çeşitli endüstriyel alanlarda karşılaşılan önemli bir hasar türüdür. Uçak motorlarının türbin ve kompresör kanatçıkları, helikopter rotor palleri, uçak pervanesi, kanat hücum kenarları ve roket motoru kuyruk lüleleri çalışma sırasında katı parçacıklı hava akışına maruz kalarak erozyona uğrar. Günümüzde havacılıkta yaygın kullanım alanı olan kompozitlerin heterojen ve izotrop olmayan malzeme yapısından dolayı kompozit malzemelerin katı parçacık erozyon davranışları geleneksel metalik malzemelerinkinden oldukça farklıdır. Örneğin, cam elyaf takviyeli kompozitlerde erozyon davranışı, elyaf içeriğindeki artışla birlikte sünek durumdan gevrek duruma geçiş yapar. Kısa elyaf ilavesi ile bu tür kompozitlerin erozyon direnci düşük çarpma açılarında azalır. Bunun nedeni, matrisin takviye elemana göre daha düşük hacim oranına sahip olmasından dolayı öncelikli olarak erozyona uğramasıdır. Böylece mikro bükülme ve kırılmalar nedeniyle kolayca zarar görebilecek elyaflar ortaya çıkar (Ahmed ve diğ., 2009).

Son zamanlarda, kompozit malzemelerin katı parçacık erozyon hasar davranışına yönelik araştırmalara artan bir ilgi olmaktadır. Farklı boyutlardaki katı parçacıkların farklı çarpma hızları ve açıları altında hedef yüzeylere çarparak meydana getirdiği hasar türlerinden birisi olan katı parçacık erozyon hasarı, malzeme kayıplarına ve fonksiyonel değişimlere yol açar (Mills, 1992; Sundararajan ve diğ., 1997; Hebbbar ve diğ., 2010). Kompozitlerde erozyon aşınması süreçleri, bir dizi çalışma değişkenini içeren karmaşık olaylardır ve kompozitlerin aşınma özelliklerinin farklı çalışma koşullarından nasıl etkilendiğinin anlaşılması önemlidir. Çok sayıda araştırmacı kompozitlerin özellikleri, performansı ve katı parçacık erozyon hasarı gibi özellikleri hakkında inceleme yapmasına karşın ne katı parçacık erozyon hasar süreçlerinin optimizasyonu ne de bu süreç parametrelerinin erozyon oranı üzerindeki etkisini yeterince detaylı olarak inceleyememiştir. Geleneksel deney modeli tatmin edici bir sonuç elde etmek amacıyla çok fazla deneysel çalışma gerektirdiği için doğru çalışma koşullarının seçilmesi her zaman büyük bir endişe kaynağı olmuştur. Herhangi bir işlem için gerekli test parametreleri ya deneyime dayanarak ya da bir el kitabı kullanılarak belirlenmektedir. Ancak bu işlemler belirli bir durum için en uygun test parametrelerini sağlamamaktadır. Bu nedenle uygun test koşullarını belirlemek için istatistiksel regresyon tekniklerine dayanan çeşitli matematiksel modeller araştırmacılar tarafından oluşturulmuştur (Spuzic, 1997; Prasad, 2002). Tam faktöriyel tasarımı, gerekli

olan çalışma sayısını geometrik olarak arttırırken kısmi faktöriyel tasarımı ise verimli ve önemli ölçüde süreyi azaltmaktadır. Bu yöntem basitliği nedeniyle popülerdir, ancak güvenilir olmayan ve yetersiz sonuçlara yol açmaktadır. Öte yandan, geleneksel çok faktörlü deneysel tasarım 'bir seferde bir faktörlü değişim' yöntemidir. Bu yöntem ile sadece bir faktör değiştirilirken, diğer tüm faktörler belirli koşullar altında sabit tutulur. Bu sorunların üstesinden gelmek için, Taguchi ve Konishi (1987) dik dizileri kullanarak ürün ve süreçlerin sağlam tasarımıyla birlikte dik dizilerle sinyal-gürültü oranı uygulayan yeni bir deney modeli (Taguchi, 1990) tasarlamışlardır. Wu ve diğ. (1986), Shoemaker ve diğ. (1988) ürünleri ve süreç parametrelerini tasarlamak için Taguchi yöntemini tercih etmişlerdir. Taguchi'nin parametre tasarımına dayanan bu ekonomik ve kullanımı kolay olan deneysel modeli çeşitli parametrelerin etkilerini ve bunların bir dizi mühendislik sürecindeki etkileşimlerini incelemek için kullanmışlardır. Bu model, cam polyester kompozitlerin erozyon hasarıyla ilgili işlemde parametrik değerlendirme için başarıyla uygulanmıştır.

Kompozit malzemelerin düşük hızlı katı parçacık erozyon hasarıyla ilgili literatürde çok sayıda deneysel çalışmalar mevcuttur. Tewari ve diğ. (2003) tek yönlü karbon ve cam elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin katı parçacık erozyon davranışını incelemişlerdir. Üç farklı elyaf yönünde (0° , 45° ve 90°) farklı çarpma açılarının erozyon davranışına etkisini belirlemişlerdir. Çalışmada kullandıkları kompozit malzemelerin maksimum erozyon oranını 60° çarpma açısında elde ederek bu malzemelerin yarı sünek erozyon hasar davranışı sergilediğini tespit etmişlerdir. Ayrıca elyaf yönünün erozyon oranı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu da tespit etmişlerdir. Harsha ve diğ. (2008) yapmış oldukları bir çalışmada, iki yönlü (örgülü) cam elyaf takviyeli polimer kompozitin yüzeye normal çarpma açısında (90°) tek yön elyaf takviyeli polimer kompozitlerden daha iyi erozyon direncine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Li ve Hutchings (1990) çok çeşitli mekanik özelliklere sahip olan polyester bazlı tek bileşenli dökülebilir poliüretan elastomer serisinin erozyon davranışını ortalama $120\ \mu\text{m}$ çapında silika kumu ile $50\ \text{m/s}$ çarpma hızı için 30° ve 90° çarpma açıları şartları altında incelemişlerdir. Erozyon oranının hedef yüzey malzemesinin sertlik, elastisite modülü ve çekme mukavemetindeki artışa bağlı olarak arttığını belirlemişlerdir. Lindsley ve Marder (1999) çarpma hızının katı parçacık erozyon hasarında kritik bir parametre olduğunu ve hedef yüzey malzemesi, çarpma açısı vb. gibi diğer parametrelerden daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Goretti ve diğ. (1996) portland çimentosu bazlı betonun ve karşılaştırma için bir nükleer atık camının katı parçacık erozyon davranışını incelemiştir. Ortalama $42\ \mu\text{m}$, $63\ \mu\text{m}$, $143\ \mu\text{m}$ ve $390\ \mu\text{m}$ çaplarında olan keskin

köşeli alüminyum oksit (Al_2O_3) parçacıkları 50 m/s çarpma hızı altında 20° ve 90° çarpma açısıyla hedef yüzeye çarptırarak elde ettikleri erozyon oranının parçacık boyutuna bağlı olarak önemli derecede değiştiğini belirlemişlerdir. Ortalama 450 μm çapı olan yuvarlak silisyum oksit (SiO_2) kum parçacıklar ve ortalama 390 μm çaplı keskin köşeli Al_2O_3 parçacıkların erozyon oranları arasında farklılıklar gözlemlemişlerdir. Suresh ve diğ. (2010) tarafından yapılan bir çalışmada, değişen elyaf içeriğine (ağırlıkça %30' a kadar) sahip kısa cam elyaf takviyeli polieterketonun (PEK) katı parçacık erozyon davranışını incelemişlerdir. Aşındırıcı olarak silika kum parçacıkları kullanarak farklı çarpma açıları ($15-90^\circ$ arasında) ve farklı çarpma hızları (25-66 m/s arasında) için katı parçacık erozyon testleri gerçekleştirmişlerdir. PEK ve kompozitlerinin 30° çarpma açısında maksimum erozyon oranı (sünek malzeme erozyon davranışı) gösterdiğini, erozyon oranının cam elyaf içeriğindeki artışla birlikte arttığını belirlemişlerdir. Harsha ve Jha (2008) sade epoksi, örgülü E-cam dokumalı, tek yönlü cam ve karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerin erozyon davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmadan elde ettikleri sonuçlara göre örgülü cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin tek yönlü elyaf takviyeli muadillerine göre daha fazla enerji sönmlediği için daha yüksek erozyon direnci gösterdiğini belirlemişlerdir. Rattan ve Bijwe (2007) polietirimid (PEI) ve kompozitlerinin erozyon davranışını, silika kum parçacıkları kullanarak sabit çarpma hızı ve değişik çarpma açılarında incelemişlerdir. PEI'nin mekanik özellikleri karbon elyaf takviyesi ile önemli ölçüde iyileşmiş olsa da malzemenin erozyon oranının tüm çarpma açılarında 4-6 kat arasında arttığını tespit etmişlerdir. Miyazaki ve Hamao (1994) matris malzeme ve elyaflar arasındaki ara yüzey kuvvetinin elyaf takviyeli plastiklerin katı parçacık erozyon davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak için bir çalışma yapmışlardır. Erozyon testlerinin sonuçları, işlenmiş elyaflara sahip elyaf takviyeli polimer kompozitlerin matris malzeme ve elyaflar arasındaki ara yüzey kuvvetinin daha yüksek olması yüzünden işlenmemiş elyaf takviyeli polimer kompozitlerden daha yüksek erozyon direncine sahip olduğunu göstermiştir. Tsuda ve diğ. (2006) değişik türden cam elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin erozyon hasar davranışını ve aşınma mekanizmalarını incelemişlerdir. Çalışmanın bir sonucu olarak, elyaf takviyeli polimer kompozitlerin elyaf içeriğinin artırılmasıyla erozyon davranışının sünek durumdan kırılgan hale geçiş yaptığını ve cam elyaf içeriği fazla olan kompozitin 90° çarpma açısındaki erozyon oranının maksimum olduğunu belirlemişlerdir.

Elyaf takviyeli polimer kompozitlere kıyasla parçacık takviyeli kompozitlerle ilgili literatürde çok daha az sayıda çalışma yapılmıştır (Biswas ve diğ., 2010). Polimer matris

malzemeye parçacık ilavesiyle kayar ara yüzeyde oluşan koruyucu tribo katmanın kayar aşınma performansını arttırmasına rağmen katı parçacık erozyon uygulamaları için bu etki tam olarak belirlenememiştir (Bhagyashekar ve diğ., 2007). Arttırılmış takviye hacim kısmı için erozyon oranında artış ve azalma olmaktadır. Zahavi ve diğ. (1981) polimer matris kompozitlere kuvars ve cam parçacıkları ilavesinin erozyon oranı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmadan elde ettikleri sonuçlarına göre, parçacık takviyeli polimer matris kompozitlerin saf malzemeye göre daha düşük bir erozyon direnci göstermiş ve takviye malzemesi hacim oranının arttırılmasıyla erozyon direncinin azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, polimer matris kompozitlere matris parçacık ilave edilmesinin daha gevrek bir erozyon hasar davranışına neden olduğu ve maksimum erozyon oranının yüksek çarpma açılarında meydana geldiğini belirtmişlerdir. Huang ve diğ. (2001) SiC ve Al₂O₃ parçacıkları ile takviye edilmiş bir silikon matrisinin katı parçacık erozyon davranışını incelemişlerdir. Hem SiC hem de Al₂O₃ parçacıkların optimal hacim yüzde değeri için parçacık takviyeli kompozitin erozyon oranının minimum değere düştüğünü gözlemlemişlerdir. Saputra ve diğ (1998) ortalama büyüklüğü 17 µm ve hacim yüzdesi %30 olan küresel cam parçacıkları ile takviye edilmiş epoksinin katı parçacık erozyonun davranışını incelemişlerdir. Takviye ve matris malzeme arasındaki güçlü yapışmanın daha iyi erozyon direnci sağladığını tespit etmişlerdir.

Günümüzde polimer kompozitlerin katı parçacık erozyonu davranışına daha çok önem verilmektedir. Bunun nedenlerinden birisi, bu malzemelerin çok sayıda mekanik ve yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmalarıdır. Dolayısıyla polimer kompozitlerin erozyon dayanımı, özellikle alternatif malzemelerin seçiminde önemli bir malzeme özelliği haline gelmiştir. Kısa elyaf takviyeli polimer kompozitlerin, tek yönlü elyaf takviyeli polimer kompozitlere göre erozyon direncinin daha iyi olduğu literatürde yapılan bir çalışmada gözlemlenmiştir (Barkoula ve diğ., 2002). Bu nedenle polimer kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılan elyafların farklı düzenlemeleri erozyon hasarı üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Polimer matris kompozitlerin (PMK) endüstriyel uygulamalarda dayanıklılığını belirlemek için korozyon ve erozyon gibi çeşitli koşullar altında hasar mekanizmasının incelenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Katı parçacıklı akışkan ortamındaki çalışma şartları, polimer kompozitlerin katı parçacık erozyon hasarıyla ilgili özelliklerinin araştırılmasında çok büyük önem arz etmektedir. Polimer kompozitler sahip oldukları avantajlar sayesinde çeşitli mühendislik uygulamalarında yapısal malzeme olarak kullanımları yaygınlaştırılmaktadır. Polimer kompozit yapıların katı parçacık etkileşimli

olduğu akış ortamların tipik örnekleri; kum taşıyan boru hatları, helikopter rotor palleri, pompa pervane kanatları, yüksek hızlı trenlerin gövdesi, uçak kanatları, su türbini kanatçıkları, uçak motor türbin kanatçıkları, füze parçaları, kanopiler rüzgâr türbini kanatlarıdır. Kompozitler temel olarak takviye elemanları ile güçlendirilen izotrop olmayan oldukça karmaşık malzeme yapısına sahiptir. Polimer matris kompozitlerde bu karmaşıklık düzeyi daha fazladır. Çeşitli polimer matrisli kompozitlerin erozyon davranışındaki farklılıklar takviye elemanının miktarı, türü, yönlendirmesi ve özellikleri, matris türü ve özellikleri, elyaf malzemelere parçacıkların yapışmasından kaynaklanmaktadır. Bunun yanında test koşulları (çarpma açısı, parçacık hızı, parçacık şekli, parçacıkların debisi) malzemelerin erozyon davranışı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bu tür malzemeler metalik malzemelere göre 2-3 kat daha yüksek erozyon oranına sahip oldukları için oldukça zayıf bir erozyon direnci gösterirler. Makine veya bir yapısal parçanın tasarımında malzeme seçiminin uygun adımlarını belirlemek için tüm sistem değişkenlerinin erozyon hasarı üzerindeki etkilerinin tam olarak anlaşılması gerekir. Bazı araştırmacılar çeşitli PMK türlerinin katı parçacık erozyon direncinin belirlenmesine yönelik olarak çalışmalar yapmışlardır. Tilly (1969) grafit, cam ve çelik elyaflı polimer kompozit malzemelerin takviye elemanının tipine bağlı olarak erozyon direncinin artırabileceği tespit etmiştir. Zahavi ve Schmitt (1981) değişik elyaf takviyeli PMK malzemelerin erozyon direnci belirlemek için testler yaparak cam elyaf takviyeli polimer (CETP) kompozit malzemenin iyi derecede erozyon direncine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Pool ve diğ. (1986) dört farklı türden PMK malzemelerin erozyon testleri yapmışlar ve termoplastik matristeki sünek elyafların en düşük erozyon oranı değerleri sağladığını ortaya çıkarmışlardır. Tsiang (1989) cam, grafit ve kevlar elyaflarına sahip termoplastik PMK malzemelere katı parçacık erozyon testleri uygulamışlardır. Çalışmanın bir sonucu olarak, polimer malzemeye karıştırılan kevlar elyaflarının en iyi erozyon direnci gösterdiği tespit edilmiştir. Mathias ve diğ. (1989) grafit elyaf takviyeli polimer kompozit malzemenin katı parçacık erozyon davranışını incelemişlerdir. PMK malzemenin erozyon direncinin takviyesiz polimerden daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. İlave olarak termoset matrisli polimer kompozitlerin maksimum erozyon oranını 90° çarpma açısında (gevrek erozyon hasar davranışı), termoplastik polimer kompozitlerin maksimum erozyon oranını ise $40-50^\circ$ arasındaki çarpma açısında (yarı sünek erozyon davranışı) elde etmişlerdir.

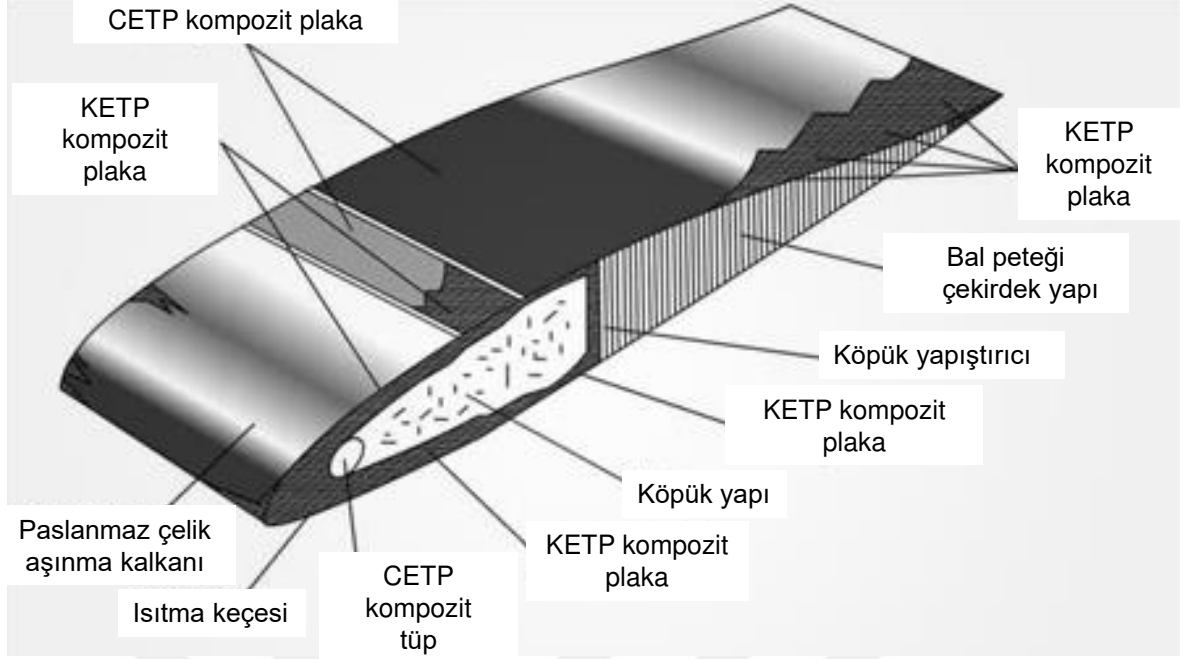
Uygun şartlar altında test edilen malzemelerin erozyon davranışları arasındaki ilişki literatürde yapılan çalışmalarla ortaya çıkarılmıştır. Deneysel çalışmaların çoğunun amacı,

parçacık çarpma hızı ve açısının yanında deneyde kullanılan malzemelerin erozyon oranı ve fiziksel özellikleri arasında ilişki kurmak için veri elde etmektir. Ruff ve Wiederhorn (1979) metallerin ve seramiklerin erozyon hasar davranışı üzerine tekli ve çoklu parçacık modellerini göz önünde bulundurarak katı parçacık erozyonuyla ilgili araştırmalar yapmışlardır. Katı parçacıklar ve hedef yüzey malzeme karakteristikleri için önemli parametreleri de incelemişlerdir. Humphrey (1990) akışkan hareketi ve erozyonun temelleri hakkında kapsamlı bir inceleme yapmıştır. Yapmış olduğu inceleme sonucunda, katı parçacık erozyonuyla ilgili deneysel yöntemler ve katı parçacıkların hareketi ile ilgili çeşitli temel konuları irdelemiştir. Hedef yüzeye çarpan parçacıkların erozyonunu önemli ölçüde etkileyebilecek akışkan akışıyla ilgili bir değerlendirme de yapmıştır. Boru içi akışta özellikle dirsek bağlantısı yüzeylerinde katı parçacık erozyon hasarı gaz ve petrol endüstrileriyle doğrudan ilişkili olduğu için birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir. Boru içi akış durumunda erozyon oranını ve bunun sürece dahil olan diğer parametrelerle ilişkisini belirlemek amacıyla literatürde bazı deneysel çalışmalar mevcuttur. McLaury ve diğ. (1997) boru dirsekleri ve düz boruların iç yüzeyindeki erozyon oranıyla ilgili dirsek çapı, parçacık hızı ve boyutunun farklı değerlerinde penetrasyon hızı ve akış hızı arasında bir ilişki olduğunu belirlemişlerdir. Blanchard ve diğ. (1984) su içerisinde hareket eden katı parçacıklar yüzünden boru dirseği yüzeylerinde meydana gelen erozyon hasarını kapalı bir devre sisteminde deneysel olarak incelemişlerdir. Dirsek yüzeyini elektro yöntemle kaplayıp uzun bir süre fotoğraflayarak erozyon hasar izini ortaya çıkarmışlardır.

Rüzgâr türbini kanatları genellikle çevredeki katı parçacıklardan dolayı erozyona maruz kalmaktadırlar. Şiddetli yağış ve kum fırtınasına karşı rüzgâr türbin kanatlarının kaplamasına ihtiyaç duyulur. Türbin kanatları yeterli yüzey korumasına sahip değilse, katı parçacık erozyonu yüzünden ciddi hasar görebilir. Bu durum rüzgâr türbinin kanadının aerodinamik yapısını bozarak çalışma performansını olumsuz yönde etkilemektedir (Wood, 2011). Aşırı derecede katı parçacık erozyonuna uğramış bir hücum kenarı, elektrik üretiminde %20' ye kadar verim kaybına neden olabilmektedir (3M, 2011). Rüzgâr türbini kanatlarının artan boyutları yüzünden prototip maliyetinin azaltılmasında hesaplamalı analiz kaçınılmaz hale gelmektedir. Zaman geçtikçe katı parçacık erozyonunun nasıl geliştiğinin önceden belirlenmesi rüzgâr türbini tasarım sürecini geliştirilebilir. Bu durum tasarımcıların yeni bir kanat koruma stratejileri keşfetmesine ve etkili bakım programları planlamalarına yardımcı olabilir. Literatürde yapılan bir çalışmada, tam açıklıklı bir rüzgâr türbin kanadındaki yağmur erozyonunun belirlenmesiyle ilgilidir (Castorrini ve diğ., 2016). Bu

çalışmada, yağmur erozyonunun kanatın aerodinamik performansı üzerindeki etkisine odaklanılmış olup erozyon dağılımı ile kanat geometrisi arasındaki ilişkiye vurgu yapılmıştır. Birbiriyle etkileşimli olan aerodinamik, erozyon ve kanat şeklinin rüzgâr türbini performansı üzerinde çok fazla etkisi olduğu açıktır. Corsini ve diğ. (2015) benzer çalışma şartlarında aynı güç çıkışı için kanat geometrisinin tasarımına bağlı olarak kanat üzerindeki erozyon dağılımının değişkenlik gösterdiği ve birbirinden farklı yerel aerodinamik bölgeler oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Bu nedenle kanat bölümünün kritik kısımlarında yapılan küçük bir tasarım değişikliği akış üzerinde belirgin bir fark ortaya çıkarabileceği düşünülebilir. Rüzgâr türbini kanadından en ideal çalışma performansı elde etmek için kanat profili optimize edilir. Kanat profilinin kritik kısımlarının geometrisi değişirse, akış alanı etkilenmekte ve türbinin aerodinamik performansı ve güç üretimi azalmaktadır. Ayrıca kanadın aerodinamik yapısı katı parçacık hareketini ve dolayısıyla erozyon miktarını etkiler. Hesaplama analizinin uygunluk derecesini arttırılarak akışkan-parçacık dinamiği yöntemi ile kanat erozyonu ve kanat geometrisi arasındaki etkileşimin zamana göre değişimini tahmin etmek için etkileşimli yöntemler geliştirilmektedir.

Helikopterin rotor palleri özellikle katı parçacıkların yoğun olduğu düşük rakımlarda erozyona uğramaktadırlar. Yüksek devirde dönen helikopter ana rotor palinin uç kısmı yüksek çevresel hıza sahip olduğu için yüksek hızlı katı parçacık çarpmasına maruz kalmaktadır. Yüksek hızlı katı parçacık çarpmasına maruz kalan pal yüzeylerinin aerodinamik yapısı zamanla kötüleştiği için helikopterin uçuş performansı olumsuz yönde etkilenmektedir (Shin, 2010). Bu gibi durumlardan etkilenmemek için helikopterlerin ana rotor palleri belli zaman aralıklarıyla bakım ve onarıma tabi tutulmaktadır. Palin doğrudan değiştirilmesi yüksek maliyetlere neden olduğu için pal yüzeyleri katı parçacık erozyonuna karşı dayanıklı malzemelerle kaplanmaktadır. Günümüzde helikopter rotor pallerini katı parçacık erozyon hasarından korumak için pal yüzeyinde Şekil 1.1’ de gösterilen erozyon direnci iyi olan, tamir ve bakım maliyetlerini azaltmada büyük avantaj sağlayan aşınma kalkanları kullanılmaktadır (Özen ve Gedikli, 2019).



Şekil 1.1. Kompozit yapıların helikopter rotor palinde uygulaması (URL-1, 2022).

Kompozit yüzey plakalı bal peteği desen çekirdekli sandviç paneller metalik muadillerine göre daha yüksek mukavemet ve rijitliğe sahip oldukları için bu panellerin tasarımlarının geliştirilmesine ilave olarak özellikle dinamik yükler altındaki mekanik davranışları araştırılmaktadır. Zhang ve diğ. (2017) karbon elyaf takviyeli polimer (KETP) yüzey plakaları ve dört farklı çekirdek yapıdan oluşturdukları kompozit sandviç panellerin düşük hızlı darbe davranışlarını incelemişlerdir. Alüminyum (Al) bal peteği ve genişletilmiş polipropilen (EPP) köpük çekirdek yapıları kompozit sandviç panellerin darbe yükü altındaki enerji sönümleme kabiliyetlerinin diğerlerine göre daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Chen ve diğ. (2017) KETP kompozit yüzey plakaları ve Nomex bal peteği çekirdek yapılarından oluşturdukları kompozit sandviç panellerin düşük hızlı darbe davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Kompozit sandviç panellerin normal (90°) ve düşük eğimli darbe yükü altında enerji sönümleme kabiliyetini arttırmak amacıyla en iyi kompozit yüzey plaka geometrisinin belirlenmesine yönelik olarak optimizasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir (Chen ve diğ., 2018).

Üç boyutlu (3D) yazıcı teknolojisi, hızlı tasarım süreci ve parça üretimi açısından son zamanlarda artan bir etkiye sahiptir. Havacılık, otomotiv, bio-medikal, inşaat gibi değişik endüstriyel alanlarda 3D yazıcı teknolojisi yaygın olarak kullanılmaktadır (Jyothish Kumar ve Krishnadas Nair, 2016). ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) darbe yükü, abrazyon ve

kimyasallara karşı dayanıklı hafif bir termoplastik malzemedir. Kolay işlenmesi, üretimde kolaylık sağlaması ve boyanabilir olması gibi özellikleri sayesinde 3D yazıcılarda en yaygın kullanılan malzemelerden birisidir. Isıya karşı dayanımı, düşük maliyeti, orta seviyeli esnekliği, uzun çalışma ömrü sayesinde FDM (Fused Deposition Modeling) tekniğinin 3D yazıcılarda kullanılmasıyla çevrimsel yükler ve sıcaklık değişimlerine uyum sağlamak zorunda olan tüm parçaların istenilen tarzda üretimi mümkün olmaktadır. Günümüzde 3D yazıcı teknolojisi ile üretilen kompozit sandviç panellerin çekirdek yapılarının statik ve dinamik yükler altındaki mekanik davranışları üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Pollard ve diğ. (2017) FDM tipi 3D yazıcı ile ürettikleri yapılarda kullandıkları malzemelerin çekme dayanımlarını üretim hızı ve duvar kalınlığı parametrelerine bağlı olarak incelemişlerdir. Çalışmanın bir sonucu olarak, duvar kalınlığının artırılmasıyla malzemelerin çekme dayanımlarının arttığını ve daha sünek bir yapı elde edilebileceğini tespit etmişlerdir. Bunun yanında, geleneksel metotlarla üretilen bal peteği desenli nomex yapı ve FDM tipi 3D yazıcı ile üretilen ABS malzemeli bal peteği desenli yapının basma dayanımlarını karşılaştırarak 3D yazıcı ile üretilen kalın duvarlı yapıların basma dayanımını nomex yapılarındakinden daha yüksek elde etmişlerdir. Diğer tarafta, Yazdani Sarvestani ve diğ. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, 3D yazıcı ile üretilen dikdörtgen, bal peteği ve ökzetik desenli çekirdek yapıların düşük hızlı darbe yükü altındaki enerji sönümleme davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Dikdörtgen, altıgen ve ökzetik desenli yapılar, düzlem içi ve düzlem dışı desen yönlü olarak iki farklı türde üretilmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre 3D yazıcı ile üretilen ökzetik desenli çekirdek yapıların sandviç panellerde kompozit yüzey plakalarıyla birlikte kullanımının darbe yüklerine karşı enerji sönümleme için uygun olduğu belirlenmiştir. Hou ve diğ. (2014) yapmış oldukları bir çalışmada kademeli çekirdekli (ökzetik ve bal peteği hücre desenli) sandviç paneller üretmişlerdir. Statik basma testinden elde ettikleri sonuçlara göre çalışmada kullandıkları sandviç panellerin geleneksel sandviç panellerden daha yüksek basma dayanımı sağladığını ve düşük hızlı darbe yükü altında ökzetik desen çekirdekli sandviç panelin bal peteği desen çekirdekli sandviç panele göre daha yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu tespit etmişlerdir (Hou ve diğ., 2016).

Kompozit yüzey plakalı sandviç panellerin düşük hızlı darbe yükü altındaki enerji sönümleme davranışının incelenmesi için deneysel, teorik ve sayısal yaklaşımlar kullanılmaktadır. Düşük hızlı darbe testleri ile sandviç panelde oluşan tepki kuvveti, enerji sönümleme ve deformasyon verileri kaydedilir. Kompozit sandviç panellerin hasar

davranışları düşük hızlı darbe testleri ile detaylı olarak incelenememektedir. Bundan dolayı birçok araştırmacı kompozit sandviç panellerin düşük hızlı darbe davranışını detaylı bir şekilde incelemek için sonlu elemanlar yönteminden yararlanmaktadır. Riccio ve diğ. (2018) keten elyaf takviyeli termoplastik malzemeden oluşan bir bal peteği çekirdek yapının çarpışma yükü altında enerji sönümleme ve hasar davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasında çok iyi bir uyum elde etmişler ve kompozit çekirdek yapılarda tabakalar arası hasarları ortaya çıkarmak için kullandıkları sonlu elemanlar yönteminin etkinliğini kanıtlamışlardır. Başka bir çalışmada ise içi boş silindirik ve dış duvarı kompozit yüzey plakalı bal peteği desenli çekirdek yapıdan oluşan kompozit çarpışma kutusunun düzlem dışı yükleme altında düşük hızlı darbe davranışı araştırılmıştır. Çalışmada kullandıkları X-ray mikro bilgisayarlı tomografi yöntemi ile bal peteği desen çekirdekli kompozit çarpışma kutusunun hasar mekanizmalarına (matris çatlaması, elyaf kırılması, delemantasyon, vb.) ilave olarak hasar süreçleri ortaya çıkarılmıştır. Çalışmadan elde edilen bulgulara göre bal peteği çekirdek yapıdaki çoklu hasar mekanizmalarının (çekirdek burkulması, çekirdek ezilmesi ve delemantasyon) kompozit yüzey plakasından daha fazla enerji yaydığı tespit edilmiştir (Zhang ve Tan, 2020). Di Caprio ve diğ. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, ağ bağımsız (SPH) ve ağ bağımlı yöntemler bir arada kullanılarak dikey bir kuyruk kanadının hücum kenarına kuş çarpması durumundaki hasar davranışı sayısal olarak incelemiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre yüzey plakası ve bal petek desenli çekirdek yapının duvar kalınlığının artırılmasıyla kuşun dikey kuyruk kanadının hücum kenarına saplanması önlenerek kanattaki deformasyon azaltılabileceği tespit edilmiştir. Başka bir çalışmada, polipropilen bal petek desenli çekirdek yapı, polipropilen matris ve cam elyaf takviye malzemeli yüzey plakalarından oluşan kompozit sandviç panelin düşük hızlı darbe davranışı incelenmiştir. Çalışmanın bir sonucu olarak, LS-DYNA sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sayısal sonuçların deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olduğu ve kompozit sandviç paneldeki baskın hasar mekanizmasının elyaf hasarı olduğu tespit edilmiştir (Yellur ve diğ., 2019). Xue ve diğ. (2019) bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panelin hücre duvar kalınlığı, hücre çapı, çekirdek yapı yüksekliği ve çarpma enerjisinin darbe dayanımına etkisini belirlemek için sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre, hücre duvar kalınlığı ve hücre çapı maksimum temas kuvvetini önemli ölçüde etkilerken çekirdek yapı yüksekliğinin ise maksimum temas kuvveti üzerinde hafif bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

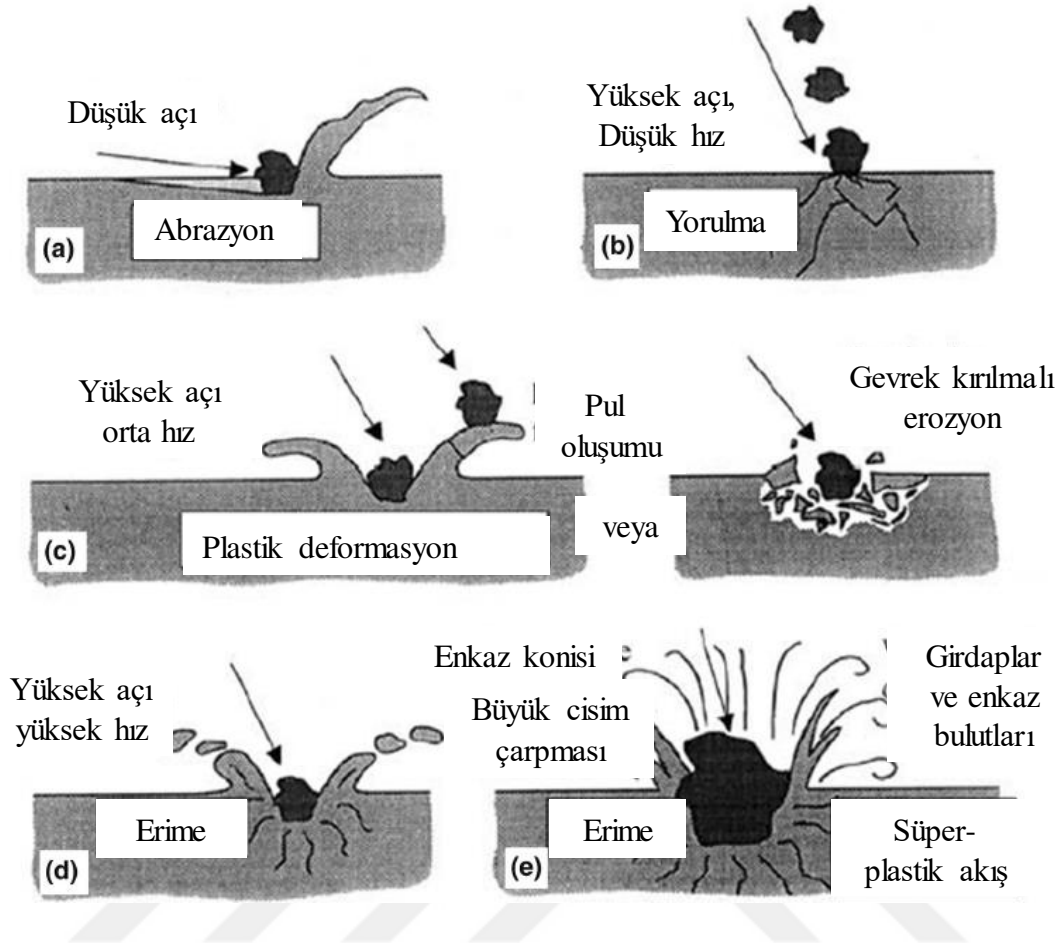
Kompozit malzemeler, üretim teknolojilerinin geliştirilmesiyle birlikte birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Herman, 2002). 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren daha ekonomik, daha mukavemetli ve daha hafif malzemelerin üretimiyle ilgili çalışmalara olan ilgi artmaktadır. Bu yüzden kompozit malzemelerin bileşen özelliklerinin farklı kombinasyonlarının sağladığı avantajlar sayesinde kullanım alanları sürekli olarak genişletilmektedir (Kellas, 2010). Kompozit malzemelerin üstün özellikleri arasında; hafiflik, yüksek korozyon direnci, yüksek çarpma veya çarpışma dayanımı, tasarım esnekliği, boyutsal kararlılık, düşük ısı ve elektrik iletkenliği, radar görünmezliği ve yüksek özgül enerji sönümleme kabiliyetleri bulunmaktadır (Fuchs ve diğ., 2008). Kompozit malzemelerin özgül enerji sönümleme kabiliyetinin iyi olması pasif güvenlik sistemlerinde enerji sönümleyici olarak kullanılmalarını teşvik etmektedir. Kompozit yapıların enerji sönümleme ve pik kuvvet değerleri istenen düzeyde olmamasından dolayı son yıllarda enerji sönümleme uygulamaları için hibrit kompozit yapılar üzerine çalışmalar yapılmaktadır (Sun ve diğ., 2018). Çarpışma kutusu, kara ve hava taşıtlarının pasif güvenlik sistemlerinde enerji sönümleyici olarak kullanılan ince cidarlı bir yapıdır. Çarpışma kutusunun tasarım türüne göre (dış duvar geometrisi, metal-kompozit esaslı hibrit, köpük dolgulu, vs.) enerji sönümleme kabiliyeti üzerindeki etkisiyle ilgili literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur. Gan ve diğ. (2016) tasarım şeklinin avantajlarını açıklığa kavuşturmak için KETP kompozit ve Al alaşım duvarlı dairesel, altıgen, kare, konik çarpışma kutularının statik basma yükü altında ezilme davranışını incelemişlerdir. İlave olarak, üretmiş oldukları çarpışma kutuları içerisine yerleştirdikleri köpük dolgusunun enerji sönümleme ve hasar davranışına etkisini belirlemişlerdir. Deneysel sonuçlara göre, konik dış duvarlı KETP kompozit çarpışma kutularının Al alaşım malzemeli konik dış duvarlı çarpışma kutularına göre daha yüksek özgül enerji sönümleme kabiliyeti sağladığı; poliüretan köpük dolgulu silindirik dış duvarlı KETP kompozit çarpışma kutularının kare ve altıgen dış duvarlı çarpışma kutularına göre daha iyi enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Hussein ve diğ. (2017) kare dış duvarlı KETP kompozit çarpışma kutularının etrafını Al sacla sararak elde ettikleri hibrit çarpışma kutusunun enerjisi sönümleme davranışını incelemişlerdir. Çalışmanın bir sonucu olarak, Al sac sargılı hibrit kompozit çarpışma kutusunun ortalama ezilme kuvveti ve enerji sönümleme değerlerinin Al sac tabaka sayısına bağlı olarak arttığını tespit etmişlerdir. Başka bir çalışmada, doğadan esinlenilmiş çok hücreli KETP kompozit ve Al kare dış duvarlı tip çarpışma kutularının statik basma yükü altında ezilme karakteristiklerini belirlemişlerdir (Liu ve diğ., 2020). Test sonuçlarına göre, KETP kompozit çarpışma

kutularının maksimum ezilme kuvveti, ortalama ezilme kuvveti ve özgül enerji sönümleme değerlerinin aynı hücre sayısına sahip Al çarpışma kutularınkinden daha yüksek olduğu; hücre sayısının çarpışma kutularının ezilme karakteristiklerini iyileştirmede etkili bir parametre olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan Dlugosch ve diğ. (2017) hibrit çarpışma kutuların özgül enerji sönümleme kapasitesinin kompozit çarpışma kutularıninkilerle karşılaştırılabilir bir seviyede olduğunu ezilme sürecindeki pik kuvvet değerinin ortalama ezilme kuvvetine oranının azaltılabileceğini belirlemişlerdir. Sun ve diğ. (2016) köpük ve bal peteği dolgu yoğunluğunun yanında KETP kompozit, Al ve çelik duvarlı hibrit çarpışma kutularının yapısal parametrelerine ilave olarak uzunluk/çap oranları ($R= 2, 3, 5$), KETP kompozit laminattaki tabaka sayısının ($5, 7, 9$) ezilme karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Statik basma testlerinden elde ettikleri sonuçlara göre, bal peteği dolgulu KETP kompozit çarpışma kutusunun özgül enerji sönümleme kabiliyetinin içi boş muadillerine göre biraz daha düşük, ancak tüm metal çarpışma kutularınkinden çok daha iyi olduğunu belirlemişlerdir. Liu ve diğ. (2016) statik basma yükü altında üç farklı tipte ürettikleri hibrit Al-KETP kompozit çarpışma kutularının enerji sönümleme ve hasar davranışlarını belirlemek için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Karşılaştırma amacıyla içi boş Al, KETP kompozit ve hibrit kompozit çarpışma kutularını da test etmişlerdir. Çalışmanın bir sonucu olarak, aynı enerji sönümleme performansı için, hibrit kompozit çarpışma kutularının KETP kompozit çarpışma kutularına kıyasla üretim maliyetini %32,1 oranında azalttığı ve Al çarpışma kutusuna göre %33,6 kadar bir ağırlık tasarrufu sağladığını belirlemişlerdir. Başka bir çalışmada, Tobby ve Bahaadini (2015) ticari bir sonlu elemanlar yazılımı kullanarak kompozit çarpışma kutularının statik ve dinamik yükler altındaki enerji sönümleme davranışını sayısal olarak incelemişlerdir. Kompozit çarpışma kutusunun sayısal modelinde kullanılan hasar başlatıcı (tetikleme) mekanizmanın kompozit laminat tabakaları arasındaki ayrılmayı azaltarak çarpma sırasında ortaya çıkan kinetik enerjinin sönümlenmesinde önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Reuter ve diğ. (2017) silindir dış duvarlı KETP kompozit çarpışma kutularının düzlem içi dinamik çarpma yükü altındaki hasar davranışını belirlemek için deneysel ve sayısal çalışmalar yapmışlardır. Sayısal modelde kullandıkları MAT54 kompozit malzeme modeli ile ilgili hasar parametrelerini kalibre etmek için çarpışma kutusu üretiminde kullandıkları KETP kompozit malzemeden ürettikleri plakanın dinamik basma yükü altındaki hasar davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Kalibrasyon işlemiyle elde etmiş oldukları hasar

parametrelerini kullanarak KETP kompozit çarpışma kutularının sayısal analizinden elde etmiş oldukları sonuçlar deneysel veriyle uyum içerisinde olmuştur.

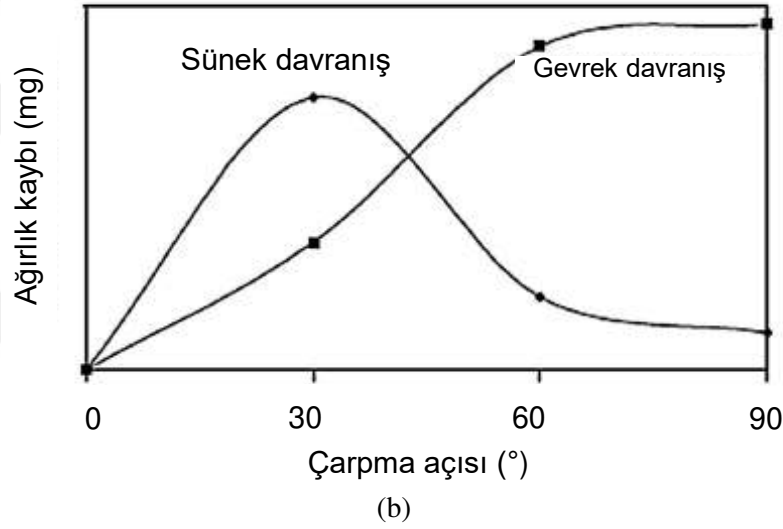
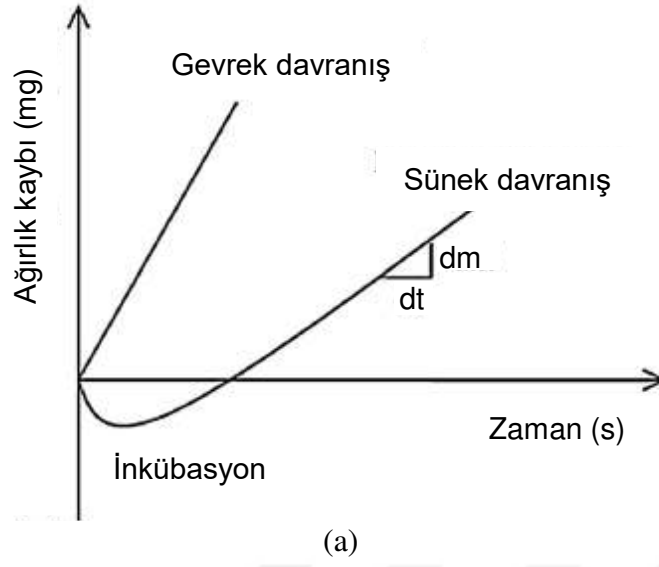
1.3. Katı Parçacık Erozyon Davranışı

Katı parçacık erozyonu, akışkan içerisinde sürüklenen katı parçacıkların bir hedef yüzeye çarparak meydana getirdikleri malzeme kaybıdır (Hutchings,1974). Finnie (1960) akış ortamındaki katı parçacıkların tekrarlı olarak çarptıkları hedef yüzeyde neden oldukları erozyon hasarının parçacık ve hedef yüzey malzemesinin özellikleri (sertlik, yoğunluk, elastisite modülü, akma dayanımı, vs.), parçacık geometrisi, parçacık hızı ve parçacık çarpma açısı gibi faktörlere bağlı olduğunu belirlemiştir. Bunun yanında katı parçacık erozyon hasar mekanizmalarının gevrek malzemede çatlama veya kırılma, sünek malzemede ise kesme ve kazıma şeklinde meydana geldiğini gözlemlemiştir. Katı parçacık erozyon hasarına uğramış yüzeyde termal, kimyasal ve fiziksel reaksiyonlarının da ortaya çıkması durumunda erozyon hasarı karmaşık hale gelmektedir (Patnaik ve diğ., 2010). Hedef yüzeyde oluşan erozyon hasarının mekanizmaları çarpma hızından önemli derecede etkilenmektedir. Şekil 1.2’ de değişik çarpma şartları altında parçacıkların hedef yüzeyde ortaya çıkardıkları erozyon hasar mekanizmalarından bazıları gösterilmiştir. Düşük hızlı katı parçacık çarpması yüzünden hedef yüzeyde oluşan gerilmeler plastik deformasyon için yetersizdir ve yüzey yorulması şeklinde erozyon hasarına neden olurlar. Orta hızlı katı parçacık çarpması nedeniyle hedef yüzeyde plastik deformasyon hasarı meydana gelmekte ve tekrarlanan plastik deformasyon hasarı malzeme kaybıyla sonuçlanmaktadır. Yüksek hızlı katı parçacık çarpması durumunda ise hedef yüzeyde erime şeklinde erozyon hasarı oluşmaktadır. Katı parçacık şeklinin de erozyon hasar mekanizmaları üzerinde etkisi olmaktadır. Küresel veya küt köşeli parçacıklar hedef yüzeyde ince pullar oluşturarak aşırı plastik deformasyon hasarına neden olabilmektedir. Keskin köşeli parçacıklar hedef yüzeyde kesme veya gevrek kırılma hasarları oluşturabilmektedir (Stachowiak ve diğ., 2001).



Şekil 1.2. Katı parçacık erozyon hasar mekanizmaları: (a) Düşük çarpma açısında abrazyon, (b) Düşük çarpma hızında yüzey yorulması, (c) Orta çarpma hızı ve yüksek çarpma açısında gevrek hasar veya çoklu plastik deformasyon, (d) Yüksek çarpma hızında yüzey erime, (e) İkincil etkili makro düzeyde erozyon (Stachowiak ve diğ., 2001).

Geleneksel metalik malzemelerden oluşan hedef yüzeylerin erozyon hasar davranışı Şekil 1.3' te gösterildiği gibi sünek ve gevrek olmak üzere iki farklı durumda meydana gelmektedir. Zamana bağlı sünek erozyon davranışı eğrisinde görülen inkübasyon olayının oluşmasının temel nedeni katı parçacıkların malzeme içerisine gömülmesi sonucu meydana gelen ağırlık artışından kaynaklanır. Gevrek erozyon davranış gösteren malzemelerde erozyon inkübasyon olayı meydana gelmediği için malzemedeki ağırlık kaybı zamana göre doğrusal olarak değişir (Şekil 1.3a). Sünek erozyon davranışı gösteren malzemelerde maksimum ağırlık kaybı genelde düşük çarpma açılarında ($15-45^\circ$) oluşur. Gevrek erozyon davranışı gösteren malzemelerde ise Şekil 1.3b' de görüldüğü gibi maksimum ağırlık kaybı yüksek çarpma açılarında ($60-90^\circ$) oluşmakta ve sünek davranış gösteren malzemelere göre daha yüksek ağırlık kaybı değerlerine ulaşılmaktadır (Biswas ve diğ., 2010).



Şekil 1.3. Sünek ve gevrek malzemelerin çarpma zamanı (a) ve çarpma açısına (b) göre katı parçacık erozyon davranışlarını gösteren eğriler (Barkoula ve diğ., 2002).

Kompozit malzemelerin erozyon hasar mekanizmaları matris, ara yüz veya takviye olmak üzere üç farklı fazdan birinde oluşmaktadır (Soboyejo, 2003). Katı parçacık çarpması altında bu tür malzemelerde çeşitli erozyon hasar mekanizmaları oluşmaktadır. Kompozit malzemelerin erozyon davranışına (yarı sünek veya yarı gevrek) bağlı olarak kompozit yüzeylerde meydana gelen erozyon hasar mekanizmalarından bazıları şunlardır:

- Matris veya elyaf çatlaması (tek veya çoklu çatlaklar)
- Ara yüz çatlaması veya ayrılma
- Elyaf çatlaması veya kırılması
- Tabakalar arası ayrılma (deleminasyon)

- Farklı faz katmanları arasındaki tünel çatlakları
- Sünek faz erimesi
- Plastik deformasyon
- Parçacıkların yüzeye gömülmesi

1.3.1. Katı Parçacık Erozyon Davranışının Deneysel Belirlenmesi

Erozyon hesabı için kapsamlı bir pratik yaklaşım olmadığından bazı araştırmacılar tarafından deneysel veriye dayalı erozyon modelleri geliştirilmiştir. Bu erozyon modelleri, hedef yüzey malzemesi, parçacık boyutu ve geometrisi, çarpma açısı ve hızı gibi önemli parametreleri içine alarak erozyon hasarının şiddetini belirten erozyon oranı arasında bir ilişki kurmaktadır. Finnie' nin (1958) erozyon hesabı için geliştirdiği erozyon modeli, hedef yüzeyin erozyon oranını katı parçacık kütlesi ve çarpma hızının karesiyle ilişkilendirilmiştir. Bitter (1963) tarafından geliştirilen erozyon modeli, katı parçacık erozyon hasarının parçacıkların hedef yüzeye tekrarlı çarpması ve hedef yüzeyde serbest hareket etmesi yüzünden oluşan baskın hasar mekanizmalarının plastik deformasyon ve kesme olarak ikiye ayırır. Bu erozyon modeline göre, düşük açılı çarpma durumunda kesme hasar mekanizmasının baskın olduğu hedef yüzeylerde gevrek malzeme kullanımı erozyon oranının azaltır. Tilly (1973) sünek malzemelerdeki erozyon işleminin farklı yönlerini açıklamak için iki aşamalı bir mekanizma önermiştir. İlk aşamada, parçacıklar hedef yüzeye nüfuz eder, yüzeyden talaşların uzaklaştırılmasına ve yüzeyde oluşan erozyon izi çevresinde malzeme enkazları zayıf tepeler oluşturur. İkinci aşamada ise parçacıklar hedef yüzeye çarptıktan sonra parçalanarak radyal olarak ikincil bir hasara yol açar. Ayrıca, hedef yüzeyde ortaya çıkan malzeme kaybının birim kütlesi başına düşen enerji ile parçacık hızı ve boyutu arasında bir ilişkiye sahiptir. Nesic (1991) tarafından yapılan diğer bir çalışmada, Finnie (1960) erozyon modelinin erozyon oranını gerçek değerinden daha fazla hesapladığı ileri sürülmüş ve erozyon oranı hesabı için çarpma hızı yerine kritik hıza bağlı başka bir denklem kullanmıştır. Yıllarca süren araştırmaların ardından Finnie (1995), katı parçacık erozyonunun metal ve seramik malzemeler üzerindeki etki parametrelerini ve baskın mekanizmalarını incelemiştir. Aynı yıl Meng ve Ludema (1995) mevcut aşınma modelleri ve hesaplama denklemleri hakkında bilgi sağlayarak erozyonun modellenmesiyle ilgili farklı bir yaklaşımda bulunmuşlardır. Katı parçacık erozyon hasarı genellikle basınçlı akış sırasında akışkanla birlikte sürüklenen keskin köşeli katı parçacıkların düzensiz bir şekilde

hedef yüzeye çarpmalarının bir sonucu olarak meydana gelmektedir. Bununla birlikte erozyon hasarının temel mekanizmaları, tek bir parçacığın bilinen geometrilili bir hedef yüzeye çarpmasının analizi ile daha kolay anlaşılabilir. Tek parçacık çarpma çalışmaları, hedef yüzeye çarptıktan sonra geri tepen parçacıklar arasındaki çarpışmalar nedeniyle erozyon potansiyelindeki değişimi dikkate alan modeller için çok önemli olan parçacıkların geri tepme kinematikini de ortaya çıkarabilmektedir (Gomes ve diğ., 2004).

Kompozit malzemelerin katı parçacık erozyon hasarıyla ilgili matematiksel bir model geliştirmek için erozyona neden olan hasar mekanizmalarının anlaşılması önemlidir. Kompozit bir hedef yüzeyde katı parçacık çarpması nedeniyle oluşan hasar, çarpma hızı, parçacık boyutu ve geometrisi, hedef yüzey ve katı parçacığın mekanik özellikleri, matris ve takviye fazı arasındaki bağlanmanın yanı sıra takviye fazının hacim oranı, boyutu ve özellikleri dahil olmak üzere birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörlerin sinerjisi, kompozit malzemelerin erozyon mekanizmasının deneysel olarak araştırılmasını zorlaştırmaktadır. Sayısal çalışmalar bu tür araştırmalar için etkili ve ekonomik bir yaklaşım sağlamaktadır. Erozyon hasarını analiz etmek için önerilen sayısal modeller makro ve mikro ölçekli modeller olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Makro ölçekli modeller, kesme mekanizması (Finnie, 1958) ve levhacık mekanizması (Hutchings, 1981) gibi çeşitli teorilere dayandırılmıştır. Kesme mekanizması, katı parçacığın sünek malzemeli bir hedef yüzeye düşük açı ($15-45^\circ$) ile çarparak yüzeyde serbest hareket etmesi sonucunda yüzeyi kazıyarak malzeme kaybına yol açtığı varsayımına dayanır. Levhacık mekanizması ise katı parçacıkların hedef yüzeye yüksek açı ($60-90^\circ$) ile tekrarlı çarptıktan sonra sünek malzemeli yüzeyde plastik deformasyon ve gevrek malzemeli yüzeyde kırılma hasarı oluşturduğunu kabul eder.

Araştırmacılar hedef yüzeyde meydana gelen erozyon hasarının şiddetini belirlemek için deneysel veriye dayalı olarak çeşitli erozyon modelleri geliştirmişlerdir. Bu erozyon modelleri hedef yüzey malzemesi, parçacık boyutu ve geometrisi, çarpma açısı ve hızı gibi önemli parametreleri içine alarak erozyon hasarının büyüklüğünü gösteren erozyon oranı arasında bir ilişki kurar.

Neilson ve Gilchrist (1968) tarafından geliştirilen erozyon modeli düşük ve yüksek çarpma açılarında katı parçacıkların hedef yüzeyde meydana getirdiği erozyon hasarını iki kısımda incelemiştir. Hedef yüzeye çarpan katı parçacıkların sahip olduğu kinetik enerjisinin normal ve paralel bileşenleri sırasıyla plastik deformasyon ve kesme şeklinde erozyon hasarına neden olur. Plastik deformasyon ve kesme şeklinde oluşan erozyon hasarı için

kullanılan denklemlerde her iki hasar durumu için bir faktör çarpanı vardır. Denklem 1.1a ve 1.1b sırasıyla kesme ve plastik deformasyon şeklinde erozyon hasarı oluşması durumunda erozyon oranını hesaplamak için kullanılır.

$$e_r = \frac{\frac{1}{2}[V_p^2 \cos^2 \theta - V_r^2]}{\chi} + \frac{1}{2} \frac{(V_p \sin \theta - K)^2}{\delta}, \theta < \theta_{p0} \quad (1.1a)$$

$$e_r = \frac{\frac{1}{2}[V_p^2 \cos^2 \theta]}{\chi} + \frac{1}{2} \frac{(V_p \sin \theta - K)^2}{\delta}, \theta > \theta_{p0} \quad (1.1b)$$

χ : Kesme erozyon faktörü

δ : Plastik deformasyon erozyon faktörü

K : Yüzeye normal hız bileşeni [m/s]

V_r : Düşük çarpma açılarında parçacık çarpma hızının yüzeye paralel bileşeni [m/s]

V_p : Parçacık çarpma hızı [m/s]

e_r : Erozyon oranı

Grant ve Tabakoff (1975) tarafından geliştirilen erozyon modeli parçacık çarpma açısı ve çarpma hızının yanında parçacık geometrisiyle ilgili düzeltme katsayılarını da içermektedir.

$$e_r = k_1 F(\theta) V_p^2 \cos^2 \theta (1 - e_t^2) + f(V_p) \quad (1.2a)$$

$$F(\theta) = \left\{ 1.0 + k_4 \left[k_2 \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{\theta}{\theta_0} \right) \right] \right\}^2 \quad (1.2b)$$

$$f(V_p) = k_3 [V_p \sin(\theta)]^4 \quad (1.2c)$$

$$k_4 = \begin{cases} 1, & \theta \leq 3\theta_0 \\ 0, & \theta > 3\theta_0 \end{cases} \quad (1.2d)$$

$$e_t = 1.0 - 0.001 V_p \sin(\theta) \quad (1.2e)$$

$f(V_p)$: Parçacığın normal hız bileşeninin oluşturduğu erozyon oranı

k_1, k_2, k_3, k_4 : Parçacık şekline bağlı düzeltme katsayıları

Oka ve diğ. (2005) tarafından geliştirilen erozyon modelinde ise erozyon oranıyla ilgili sabitler hedef yüzey ve katı parçacık malzemesine göre deneysel olarak belirlenmektedir.

$$e_r = 10^{-9} \rho_{wall} e_{rV} \quad (1.3a)$$

$$e_{rV} = e_{90} F(\theta) \quad (1.3b)$$

$$e_{90} = K(Hv)^{k1} \left(\frac{V_P}{V^*}\right)^{k2} \left(\frac{d_P}{d^*}\right)^{k3} \quad (1.3c)$$

$$F(\theta) = [\sin(\theta)]^{n1} \{1 + Hv[1 - \sin(\theta)]\}^{n2} \quad (1.3d)$$

$$n_1 = S_1(Hv)^{q1} \quad (1.3e)$$

$$n_2 = S_2(Hv)^{q2} \quad (1.3f)$$

$$k_2 = 2.3(Hv)^{0.038} \quad (1.3g)$$

e_{rV} : Hacimsel erozyon oranı [mm^3/kg]

e_{90} : Yüzeye normal çarpma açısındaki erozyon oranı [kg/kg]

V^* : Referans çarpma hızı [m/s]

d^* : Referans parçacık çapı [m]

Hv : Malzemenin Vickers sertliği [GPa]

$F(\theta)$: Çarpma açısına bağlı katsayılar fonksiyonu

Finnie (1960) tarafından sünek malzemeler için geliştirilen erozyon modelinde ise aşağıdaki denklemler kullanılarak hedef yüzeydeki erozyon oranı hesaplanır.

$$e_r = K.V_P^n.F(\theta) \quad (1.4a)$$

$$F(\theta) = \frac{1}{3} \cos^2 \theta, \tan \theta > \frac{1}{3} \quad (1.4b)$$

$$F(\theta) = \sin(2\theta) - 3\sin^2 \theta, \tan \theta \leq \frac{1}{3} \quad (1.4c)$$

Yukarıdaki denklemde yer alan K ve n , katı parçacık ve hedef yüzey malzemesi özelliklerine (yoğunluk, sertlik, elastisite modülü, parçacık geometrisi, parçacık çarpma açısı, parçacık hızı, vs.) bağlı olarak değişen malzeme sabitleridir.

DNV (2007) firması tarafından geliştirilen erozyon denkleminde gevrek ve sünek malzemeler için çarpma açısına bağlı sabitleri içeren polinomsal bir fonksiyon tanımlanmıştır.

$$F(\theta) = \sum (-1)^{(i+1)} A_i \left(\frac{\pi\theta}{180} \right)^i \quad (1.5)$$

A_i : Çarpma açısı fonksiyon sabitleri ($i=1, \dots, 8$)

Denklem 1.5' de verilen çarpma açısı fonksiyonu, Finnie (1960) tarafından önerilen erozyon denkleminde uygulanmıştır. Parçacık çarpma hızına bağlı değişken katsayısı olan n sabiti 90° çarpma açısında farklı hızlarda elde edilen erozyon değerleri Denklem 1.6a kullanılarak hesaplanır (DNV, 2007).

$$n = \frac{1}{N-1} \sum_i^{N-1} \frac{\frac{e_{90}(V_{P,i+1})}{e_{90}(V_{P,i})}}{\ln \left[\frac{V_{P,i+1}}{V_{P,i}} \right]} \quad (1.6a)$$

Parçacık ve numune malzemesinin özellikleriyle ilişkili olan K sabiti Denklem 1.6b kullanılarak hesaplanır.

$$K = \frac{1}{N} \sum_i^N \frac{e(V_{P,i})}{V_{P,i}^n} \quad (1.6b)$$

$V_{P,i}$: i. testteki parçacığın çarpma hızı [m/s]

$e(V_{P,i})$: i. testteki parçacık hızı için erozyon oranı değeri

Zhang ve diğ. (2007) tarafından geliştirilen erozyon modeli çarpma hızı ve çarpma açısına ilave olarak numune malzemesinin Brinell sertlik değeri, parçacıkların keskinlik derecesiyle ilgili olan şekil faktörünü de hesaba katar.

$$e_r = C(BH)^{-0.59} F_S V_P^n F(\theta) \quad (1.7a)$$

$$F(\theta) = 5.4\theta - 10.11\theta^2 + 10.93\theta^3 - 6.33\theta^4 + 1.42\theta^5 \quad (1.7b)$$

C : Parçacık ve numune malzeme özelliklerini içeren sabit

BH : Parçacıkların çarptığı yüzeyin malzemesinin Brinell sertliği [GPa]

F_S : Parçacık şekil faktörü

ANSYS firmasının HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yazılımı olan FLUENT paket programının kullandığı erozyon modeli, Finnie (1960) erozyon modeline parçacık çapına göre değişen malzeme sabiti fonksiyonu ilave edilerek geliştirilmiştir.

$$e_r = C(d_p) \cdot V_p^n \cdot F(\theta) \quad (1.8)$$

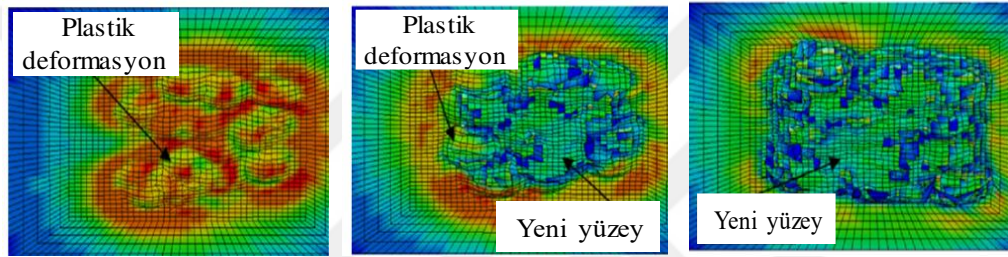
$C(d_p)$: Parçacık çapına bağlı malzeme sabiti fonksiyonu

Literatürde malzemelerin katı parçacık erozyon davranışını belirlemek için ASTM G76-13 (ASTM, 2013), ASTM F1864-05 (ASTM, 2010) olmak üzere iki standart mevcuttur. Bu standartlar, özellikle helikopterin iniş kalkışı sırasındaki çalışma koşullarını temsil etmemektedir. Bu yüzden Amerikan askeri standardı Mil-STD-3033 (Mil, 2010) geliştirilmiştir. Bu standart, yüksek hızlı katı parçacık erozyon testleri için takip edilmesi gereken test metodunu ve çalışma şartlarını ayrıntılı olarak belirtmektedir. Örneğin; testlerde kullanılacak parçacıklar keskin köşeli olup testten en az 24 saat önce 23 °C sıcaklıkta ve %50 nem koşullarında muhafaza edilmelidir. Helikopterlerin çöl vb. ortamlardaki iniş ve kalkış durumlarını temsil edebilmesi için katı parçacıkların hedef yüzeye çarpma hızı $225 \pm 10,6$ m/s (730 ± 30 ft/s) olmalıdır.

1.3.2. Katı Parçacık Erozyon Hasarının Katı Cisimler Mekaniği ile Belirlenmesi

Erozyon sürecinin karmaşıklığı ve erozyon modellerini türetmek için kullanılan kısıtlayıcı kabuller nedeniyle analitik modellerin pratik kullanışlılığı genel kurallarla sınırlıdır. Diğer yandan deneme yanılma deneyimlerini içeren geleneksel yöntemler zaman alıcı ve maliyetlidir. Katı parçacık erozyon hasarının katı cisimler mekaniği ile belirlenmesiyle ilgili çalışmalara olan ilgi bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak artmaktadır. Bu çalışmalar sayısal modelleme yazılımlarının ve deneysel verilere dayalı denklemlerin geliştirilmesine bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Katı parçacık erozyon hasarının katı cisimler mekaniği ile modellenmesinde sonlu elemanlar yöntemine dayalı ağ bağımlı teknikler ve SPH (Smooth Particle Hydrodynamics), DEM (Discrete Element Method) gibi ağ bağımsız teknikler kullanılmaktadır. Ağ bağımsız teknikler, ağ bağımlı tekniklere göre daha uzun çözüm süresi gerektirdiği için yüksek kapasiteli

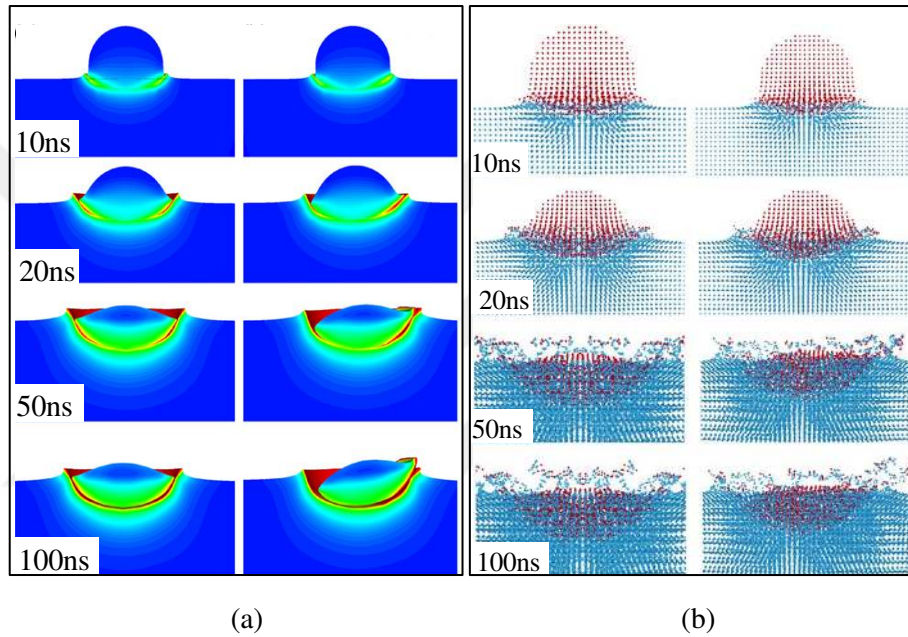
bilgisayarlara ihtiyaç duymaktadır. Son zamanlarda araştırmacılar çözüm süresini azaltmak için ağ bağımlı ve ağ bağımsız teknikleri birlikte kullanarak katı parçacık erozyon hasar analizleri gerçekleştirmektedir (Takaffoli ve Papini, 2012). Wang ve Yang (2008) tarafından yapılan bir çalışmada, sünek malzemenin (Ti-6Al-4V) katı parçacık erozyon davranışını belirlenmesi için 120 μm boyutunda küresel şekle sahip 100 adet silisyum karbür (SiC) parçacıklar kullanılarak katı cisimler mekaniğine dayalı malzeme hasar modelleriyle birlikte sonlu elemanlar erozyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, sünek malzemedeki erozyon hasar mekanizmasının parçacık çarpma açısıyla ilişkili olduğu tespit edilmiştir (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. Sünek malzemedeki katı parçacık erozyon hasar mekanizmaları katı cisimler mekaniğine dayalı sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmesi (Wang ve Yang, 2008).

Wang ve Yang (2009) tarafından yapılan diğer bir çalışmada, çarpma bölgesinde ağ bağımsız (SPH), hasarın daha önemsiz olduğu diğer bölgelerde ise ağ bağımlı elemanlar kullanılarak sonlu elemanlar katı parçacık erozyon analizinin çözüm süresi azaltılmıştır. Ağ bağımlı teknikle katı parçacık erozyon hasarının modellenmesi, genel olarak çok sayıda parçacığın olduğu durumlar için çok zaman alıcı olmaktadır. Bu yüzden ağ bağımlı tekniklerle yapılan modellemelerde sınırlı sayıda katı parçacık kullanılarak sonlu elemanlar erozyon analizleri gerçekleştirilmektedir. Diğer yandan ağ bağımsız teknikler kullanılarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar erozyon analizlerinde çok sayıda katı parçacık etkisine maruz kalan hedef yüzeydeki erozyon hasarının modellenmesi gelecekte katı cisimler mekaniği ile erozyon hasarının daha gerçekçi belirlenmesi bakımından ümit vermektedir (Zheng ve diğ., 2017). Özellikle SPH yöntemi, mikro boyuttaki deformasyonları kolayca modelleyebildiği için yüzeyden parçacık koparılması sonucu ortaya çıkan erozyon hasar mekanizmalarını daha gerçekçi şekilde modelleyebilmektedir. Buna karşın katı cisimler mekaniği kullanan sonlu elemanlar yazılımları, plastik şekil değiştirme hızı belirli bir eşik

değerine ulaşınca hasarlanan elemanı sonraki çözüm adımlarında yok saydığı için katı erozyon hasarıyla ilgili tam gerçekçi bir sonuç elde edilememektedir. SPH ve DEM yöntemlerinin etkin kullanımları ve yeterlilikleri sağlanmış olmasına rağmen bu yöntemler henüz tam olarak geliştirilememiştir. Li ve diğ. (2010) tarafından yapılan bir çalışmada, bakır malzemeli hedef yüzeye küresel şekle sahip bakır parçacıkların farklı çarpma açılarında çarpması durumunda oluşan erozyon hasarını modellemek için Lagrange ve SPH teknikleri ayrı ayrı kullanılmıştır (Şekil 1.5).



Şekil 1.5. Sünek malzemedeki katı parçacık erozyon hasarının (a) Ağ bağımlı ve (b) Ağ bağımsız (SPH) tekniklerle modellenmesi (Li ve diğ., 2010).

1.3.3. Katı Parçacık Erozyon Hasarının Akışkanlar Dinamiği ile Belirlenmesi

Son yıllarda, sıvı veya gaz halindeki akışkan içerisinde hareket eden katı parçacıkların hedef yüzeylerde meydana getirdikleri erozyon hasarını modellemek için HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yazılımları kullanılmaktadır. Boru içi akışlarda akışkan içerisinde sürüklenen katı parçacıkların boru dirseklerinde meydana getirdiği erozyon hasarı HAD ile belirlenebilmektedir. Parsi ve diğ. (2015) ticari bir HAD yazılımı kullanarak bir boru içerisinden akan akışkanla birlikte sürüklenen katı parçacıkların farklı eğim açılarında dirsek yüzeylerine çarparak oluşturdukları erozyon hasarını belirlemek için akış etkileşimli erozyon analizleri gerçekleştirmişlerdir. Analizlerde, Grant ve Tabakoff (1975), Zhang ve

diğ. (2017), Oka ve diğ. (2005), Neilson ve Gilchrist (1968), Mansouri (2015) tarafından birbirinden farklı malzemeler için geliştirilen erozyon modellerini kullanmışlardır. Bunun yanında otomotiv, havacılık ve uzay endüstrilerinde kullanılan karmaşık geometrili parçaların çalışma sırasında yüzeylerinde oluşan katı parçacık erozyon hasarının belirlenmesinde HAD erozyon analizleri çok büyük avantajlar sağlamaktadır. Shin (2010) düşük rakımda hava içerisinde hareket eden bir helikopterin yüksek devirde dönen ana rotor pali yüzeyinde oluşan katı parçacık erozyon hasarını incelemek için iki ve üç boyutlu HAD erozyon analizleri gerçekleştirmiştir. HAD tabanlı sayısal erozyon analizlerinden elde ettiği sonuçlara göre, palin kök kısmından uç kısmına doğru gidildikçe çevresel hızın doğrusal olarak artması nedeniyle artan parçacık çarpma hızına bağlı olarak palin yüzeyinde oluşan erozyon hasarının arttığı ve erozyon dağılımının palin hücum açısına göre değiştiğini tespit etmiştir. Campos-Amezcuca ve diğ. (2007) 300 MW' (Megawatt) lık bir buhar türbininde yüksek sıcaklıklı yanma şartlarında katı parçacıklara maruz kalan lüle yüzeyindeki erozyon hasarını belirlemek için HAD tabanlı sayısal erozyon analizleri gerçekleştirmiştir. Çalışmanın bir sonucu olarak, katı parçacık boyutundaki artışa bağlı olarak lüle yüzeyinde meydana gelen erozyon hasarının azaldığı tespit edilmiştir. Son zamanlarda bilgisayar teknolojisinin hızla gelişmesine paralel olarak akışla etkileşimli hedef yüzeylerdeki katı parçacık erozyon hasarını belirlemek için STAR CCM+, FLUENT, CFX gibi HAD yazılımları kullanılmakta ve bu yazılımlar araştırmacılar tarafından sürekli olarak geliştirilmektedir. Kim ve diğ. (2015) WC-Ni malzemesi ile kaplanmış plaka şeklinde bir hedef yüzeydeki katı parçacık erozyon hasarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal çalışmalar için sonlu hacimler metoduna dayalı bir HAD yazılımı olan ticari CFX paket programını kullanmışlardır. Zamandan bağımsız (sürekli) hava akışını modellemek için $k-\epsilon$ ve SST $k-\omega$ türbülans modeli, numune yüzeyindeki erozyon hasarını belirlemek için Finnie (1960) erozyon modelini kullanmışlardır. SST $k-\omega$ türbülans modeli sayesinde hedef yüzeyde deneysel veriyle daha uyumlu erozyon dağılımı elde etmişlerdir. Nguyen ve diğ. (2014) yüksek hızlı (Mach sayısı >1) hava akışına maruz bırakılan uzay endüstrilerinde kullanılan bir parçanın yüzeyindeki erozyon hasarının parçacık çarpma açısına göre değişimini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. 40° çarpma açısına kadar erozyon hasarının arttığını, 40° den sonraki çarpma açılarında ise çarpma açısındaki artışa bağlı olarak erozyon hasarının azaldığını deneysel ve sayısal olarak belirlemişlerdir. Azimian ve Bart (2013) içerisinde su-kum karışımı olan bir tankın dönme hareketi sırasında karışım içerisine daldırılmış paslanmaz çelik ve ST-50 malzemesinden yapılmış plaka şeklindeki

hedef yüzeyde oluşan erozyon hasarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Hedef yüzeydeki erozyon hızını hesaplamak ve çalışma ortamı içerisinde hava akışını modellemek için HAD tabanlı çoklu referans çerçeve (MRF) yöntemini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, deneysel ve sayısal sonuçları birbirleriyle uyumlu elde etmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre, MRF bölgesinin çapı ve yüksekliğinin sonuçlar üzerinde çok az bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

HAD yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen akış etkileşimli katı parçacık erozyon hasar analizi, akışla ilgili korunum denklemleri, parçacık hareket denklemleri ve hedef yüzeye ait erozyon modeliyle ilgili denklemlerinin çözümünden oluşmaktadır (Arabnejad ve diğ., 2015).

1.3.3.1. Akışla İlgili Korunum Denklemleri

Sıkıştırılamaz ve sürekli akış ortamında bulunan katı parçacıklarla etkileşim halinde olan akışkanın sahip olduğu özelliklerin (türbülans kinetik enerjisi, türbülans girdap frekansı, hız, basınç, yoğunluk, vs.) belirlenmesi için süreklilik (kütlenin korunumu) ve momentumun korunumu denklemlerinin çözülmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Akışla ilgili mühendislik uygulamalarında kütle ve momentum korunum denklemlerinin çözümü için Navier-Stokes denklemlerinin Reynolds ortalama formaları kullanılır. Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemlerinin genelleştirilmiş biçimleri Denklem 1.9 ve 1.10' da verilmiştir (FLUENT Manual, 2010).

Kütlenin korunumu:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1.9)$$

Momentumun korunumu:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (1.10)$$

Yukarıdaki eşitliklerde, ρ hava yoğunluğu, u ortalama hava hızı, μ havanın dinamik viskozitesi, p havanın basıncı, δ_{ij} Kronecker-Delta operator ve $-\rho \overline{u_i' u_j'}$ Reynolds kayma gerilmesi terimlerini temsil etmektedir.

Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemlerinin çözümü için akış sırasında meydana gelen küçük ölçekli türbülans dalgalanmalarının filtrelenmesi gerekir. Türbülans dalgalanmalarının filtrelenmesi sırasında Reynolds gerilmeleri olarak ortaya çıkan bilinmeyen değişkenlerin çözümü için kapalı formdaki denklemlere ihtiyaç duyulur. HAD tabanlı yazılımlar kapalı formdaki denklemler olarak birbirinden farklı değişik türbülans modelleri kullanmaktadır. Akışkan ve parçacık etkileşimli çok fazlı akışlarda çok iyi yakınsama ve hassas çözüm verdiği için genellikle $k-\varepsilon$, $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) türbülans modelleri kullanılmaktadır. Türbülans kinetik enerjisi hesabı için k , türbülans kinetik enerjisi yayılım hızı hesabı için ε , türbülans girdapların yayılım hızı hesabı için ω denklemleri kullanılır. Literatürde katı parçacık erozyon hasarının HAD tabanlı yazılım kullanılarak belirlendiği çalışmalarda, yüksek hızlı akışlarda genellikle daha iyi sonuçlar sağladığı için $k-\omega$ SST türbülans modeli tercih edilmektedir (Kim ve diğ., 2015; Shin, 2010).

Standart $k-\varepsilon$ türbülans modeliyle ilgili denklemler:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (1.11a)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (1.11b)$$

$k-\omega$ SST türbülans modeliyle ilgili denklemler:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (1.12a)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \omega)}{\partial x_j} = \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (1.12b)$$

Yukarıdaki denklemlerde ρ , μ_t , μ ve F_1 sırasıyla akışkan yoğunluğu, akışın türbülans viskozitesi, akışkanın dinamik viskozitesi ve birincil karışım fonksiyonunu temsil etmektedir. S ise türbülans modeliyle ilgili sabitler kullanılarak hesaplanan kaynak terimidir. (Menter ve diğ., 2003).

1.3.3.2. Parçacık Hareket Denklemleri

Akış ortamı içerisinde akışkanla etkileşim halinde olan katı parçacıkların hızları ve yörüngelerinin belirlenmesi için Euler-Lagrangian yaklaşımlı ayırık faz yöntemi HAD yazılımlarında kullanılmaktadır (FLUENT Manual, 2010). Ayırık faz yönteminde kullanılan hareket denklemi Denklem 1.13a' da verilmiştir:

Parçacık hareket denklemi:

$$\frac{dV_P}{dt} = F_D(U - V_P) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_{diğer} \quad (1.13a)$$

Parçacık sürüklenme kuvveti denklemi:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_d Re_{sph}}{24} \quad (1.13b)$$

Küresel parçacıklı akışın Reynolds sayısı denklemi:

$$Re_{sph} = \frac{\rho_p d_p (V_P - U)}{\mu} \quad (1.13c)$$

Parçacık sürüklenme kuvveti katsayısı denklemi:

$$C_D = \frac{24}{Re_{sph}} (1 + b_1 Re_{sph}^{b_2}) + \frac{b_3 Re_{sph}}{b_4 + Re_{sph}} \quad (1.13d)$$

$$b_1 = e^{(2,3288 - 6,4581\emptyset + 2,4486\emptyset^2)} \quad (1.13e)$$

$$b_2 = 0,0964 + 0,5565\emptyset \quad (1.13f)$$

$$b_3 = e^{(4,905 - 13,8944\emptyset + 18,4222\emptyset^2 - 10,2599\emptyset^3)} \quad (1.13g)$$

$$b_4 = e^{(1,4681 + 12,2584\emptyset - 20,7322\emptyset^2 + 15,8855\emptyset^3)} \quad (1.13h)$$

Parçacık şekil faktörü:

$$\emptyset = \frac{s}{S} \quad (1.13i)$$

Yukarıdaki denklemlerde, ρ_p [kg/m³] parçacığın malzeme yoğunluğu, d_p [m] parçacık çapı, U [m/s] ortalama akışkan hızını, $F_{diğer}$ [N] yer çekimi, kaldırma, basınç gibi diğer kuvvetleri, s parçacığın küresel yüzey alanı ve S parçacığın gerçek yüzey alanıdır.

1.3.3.3.Hedef Yüzeydeki Erozyon Hızıyla İlgili Denklemler

HAD yazılımları akış ortamındaki katı parçacıkların çarptığı hedef yüzeydeki erozyon hızının hesabı için Denklem 1.14' ü kullanmaktadır. Bu erozyon denklemi hedef yüzeye çarpan her bir parçacığın meydana getirdiği erozyonu ayrı ayrı hesaba katmaktadır (FLUENT Manual, 2010).

$$E_R = \sum_{i=1}^{N_p} \frac{\dot{m}_p e_r}{A_f} \quad (1.14)$$

Yukarıdaki eşitlikte, E_R [kg/(m².s)] hedef yüzeyin birim alanına karşılık gelen kütsel erozyon hızını, $\dot{m}_p$ [kg/s] hedef yüzeye çarpan parçacıkların kütsel debisini, A_f [m²] parçacıkların çarptığı yüzeydeki ağ elemanının yüz alanı, N_p ağ elemanı yüzüne çarpan parçacıkların sayısını temsil etmektedir.

Akış ortamında katı parçacık erozyonuna uğrayan hedef yüzeydeki erozyon oranının hesabı için literatürde yapılan çalışmalarda deneysel veriye dayalı olarak çok sayıda denklemler geliştirilmiştir. Hedef yüzeydeki erozyon oranının hesabı için Denklem 1.4a' da verilen Finnie (1960) erozyon denkleminin Det Norske Veritas (DNV) firması tarafından geliştirilmiş hali ANSYS FLUENT paket programına uygulanabilmektedir (DNV, 2007). Denkleminde yer alan K ve n sabitleri parçacık ve hedef yüzeyin malzeme özellikleri, parçacık boyutu ve geometrisine bağlı sabitler olup $F(\theta)$ hedef yüzey malzemesinin çarpma açısına bağlı erozyon davranışının eğilimi gösteren fonksiyondur. Malzemelerin erozyon oranlarını hacimsel kayıp cinsinden karşılaştırmak için hesaplanan erozyon oranı değeri hedef malzemelerin yoğunluğuna bölünür. Finnie (1960) erozyon eşitliğinde yer alan ve Denklem 1.5' te gösterilen $F(\theta)$ fonksiyonunun A_i ($i=1,2,...,7$) katsayılarını belirlemek için sabit çarpma hızında farklı çarpma açılarında erozyon testleri gerçekleştirilir.

HAD erozyon analizlerinde, parçacıkların hedef yüzeye çarptıktan sonra çarpma açısı, parçacık malzemesi ve geometrisine bağlı olarak hız bileşenlerinin belirlenmesi için Taslim ve diğ. (2009) tarafından önerilen geri tepme modeli kullanılır. Bu geri tepme modelinde yer alan normal hız bileşeni Denklem 1.15a ve teğetsel hız bileşeni Denklem 1.15b' de verilmiştir.

Normal geri tepme hızı katsayısı eşitliği:

$$e_n = 0,993 - 1,76\theta + 1,56\theta^2 - 0,49\theta^3 \quad (1.15a)$$

Teğetsel geri tepme hızı katsayısı eşitliği:

$$e_t = 0,988 - 1,66\theta + 2,11\theta^2 - 0,67\theta^3 \quad (1.15b)$$

Hedef yüzeye çarpan parçacıkların herhangi bir ağ elemanındaki erozyonun derinlik yönünde ilerleme hızı hesabı için Denklem 1.16' da verilen ve Mansouri ve diğ. (2015) tarafından geliştirilen eşitlik kullanılmaktadır.

$$\Delta \dot{h}_i = \frac{(e_r)_i \cdot \dot{m}_i}{\rho_w A_i} \quad (1.16)$$

Burada, $\Delta \dot{h}_i$ [m/s] hedef yüzeyin i. ağ elemanı için lokal erozyon ilerleme hızı, $(e_r)_i$ hedef yüzeydeki i. hücre elemanındaki kütleli erozyon oranı, ρ_w [kg/m³] hedef yüzey malzemesinin yoğunluğu, A_i [m²] hedef yüzeydeki i. hücre elemanının yüzey alanı, $\dot{m}_i$ [kg/s] parçacıkların hedef yüzeyin i. hücre elemanındaki besleme debisini temsil etmektedir.

ANSYS FLUENT yazılımı numune (hedef malzeme) yüzeyine çarpan parçacıkların her bir ağ elemanındaki birikme hızlarını hesaplamak için Denklem 1.17' yi kullanır. Parçacık birikme debisi ($R_{birikme}$) hedef yüzeyin birim yüzey alanına çarpan parçacıkların ($N_{parçacık}$) kütleli debisidir (FLUENT Manual, 2010).

$$R_{birikme} = \sum_{i=1}^{N_{parçacık}} \frac{\dot{m}_i}{A_i} \quad (1.17)$$

Akışkan içerisinde hareket eden parçacıkların karakteristik zamanının akışın karakteristik zamanına oranı Stokes sayısı olarak tanımlanmaktadır (Nguyen ve diğ. 2016). Eğrili yüzeyler için gerçekleştirilen HAD analizlerinde parçacıkların akış çizgilerinden etkilenmeden yüzeylerde daha düzgün erozyon dağılımı elde etmek için parçacıkların çarpma hızlarına göre Stokes sayıları (S_{ik}) Denklem 1.18 kullanılarak hesaplanır.

$$S_{tk} = \left(\frac{\rho_p d^2}{18\mu_f} \right) \left(\frac{V_f}{l} \right) \quad (1.18)$$

Burada, d parçacık çapı, μ_f akış ortamındaki akışkanın viskozitesi, V_f akışkan hızı ve l akışın karakteristik uzunluğunu (helikopter pali veter çizgi uzunluğu) temsil etmektedir.

HAD tabanlı sayısal erozyon analizlerinde hedef yüzeydeki ortalama erozyon oranı, Denklem 1.19' da verilen alan ağırlıklı ortalama fonksiyonu (ϕ) kullanılarak hesaplanan ortalama erozyon hızının parçacıkların yüzeydeki ortalama birikme debisine bölünmesiyle hesaplanır (FLUENT Manual, 2010).

$$\frac{1}{A} \int \phi dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^{N_{parçacık}} \phi_i |A_i| \quad (1.19)$$

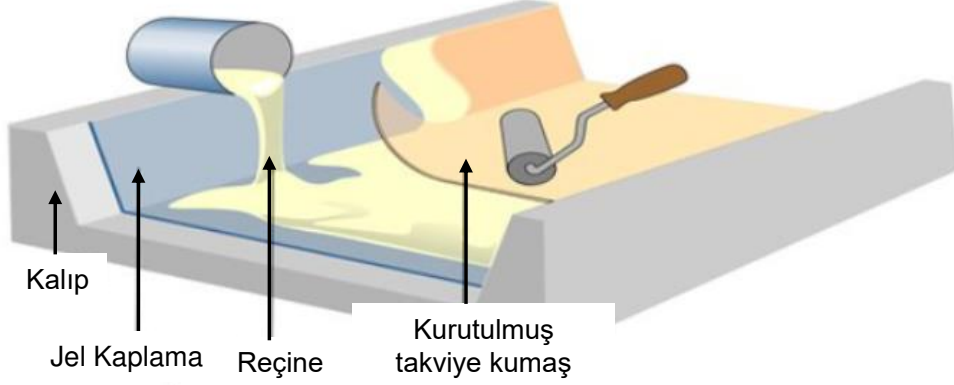
1.4. Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemeler: Takviye malzemesine göre parçacık, pul, kısa elyaf ve uzun (sürekli) elyaf takviyeli; Matris malzemesine göre polimer, seramik ve metal matris olarak sınıflandırılmaktadır (Kaw, 2005). Bu tez çalışmasında, sürekli elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerden oluşan kompozit yapılar üretilmiştir. Bu yapıların üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden (el yatırma, elyaf sarma, otoklav, vakum torbalama ve vakum infüzyon) aşağıda bahsedilmiştir (Buragohain, 2017).

El Yatırma Yöntemi:

El yatırma yönteminde ilk olarak kalıp ayırıcı krem beş dakika ara verilerek üç kez kalıp yüzeyine uygulanır (Şekil 1.6). Daha sonra kalıp yüzeyine bir jel kaplama uygulanır. Jel kaplama, daha iyi yüzey kalitesi sağlayan viskozitesi yüksek bir reçinedir. Bir yüzey paspası gibi düşük yüzey yoğunluklu takviye malzemesi jel kaplama üzerine yerleştirilir. Takviye kumaşlarının kuru kesilmiş parçaları daha sonra istenen kat sırasına göre yerleştirilir. Her kumaş tabakası sıvı reçine ile ıslatılır. Kuru kumaş üzerine reçine uygulamak için genellikle bir fırça kullanılır. Reçine uygulamanın değişik yöntemleri vardır. Örneğin, reçine kuru kumaş üzerine dökülüp bir spatula ile yaytırılabilir. Alternatif olarak kumaş ayrı ayrı ıslatılabilir ve daha sonra kalıp üzerine serilebilir. Fazla reçine ve hava

boşlukları bir merdane kullanılarak sıyrılır. Kompozit daha sonra ortam sıcaklığı şartları altında kürleştirilir. Kürleştirme işleminden sonra kompozit plaka kalıp yüzeyinden ayrılır.



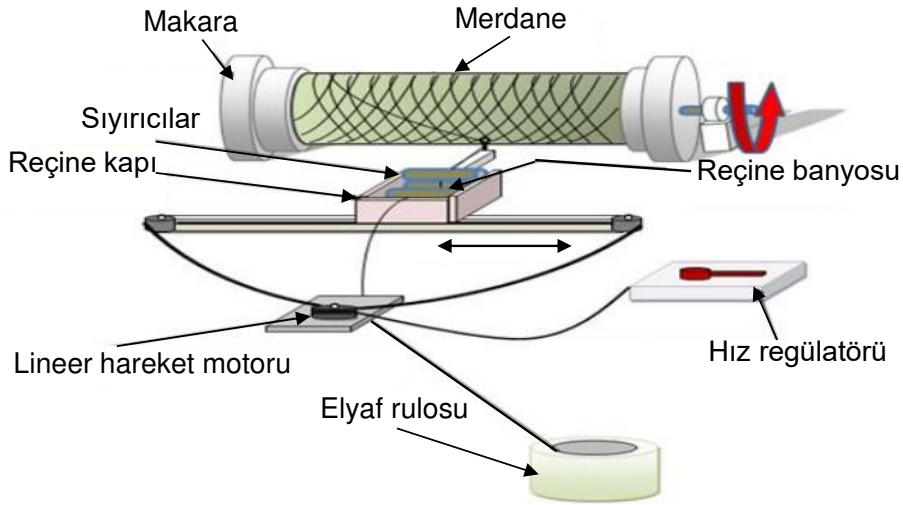
Şekil 1.6. Kompozit yapının el yatırma yöntemiyle üretimi (URL-2, 2022).

El yatırma yöntemiyle yapılan üretimde genellikle atmosferik basınçtaki oda sıcaklığı şartlarında kürleştirme işlemi yapılır. Bu yöntemde, araç gereç ve sermaye ekipmanlarına olan talep çok düşüktür. Çelik, ahşap, CETP kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılan kalıp malzemeleridir. Üretim esnasında hem erkek kalıp hem de dişi kalıp kullanılır. Erkek kalıp daha iyi iç yüzey sağlar ve tipik olarak banyo küveti vb. parçalar yapmak için kullanılır. Dişi kalıp ise daha iyi dış kaplama sağlar ve tipik olarak yat gövdesi vb. parçalar için kullanılır. KETP kompozit malzemeden yapılan kalıplar da kullanılmaktadır. Bu tür kompozit kalıplar, parçaya benzeyen bir desen üzerine cam kumaşlar serilerek üretilir. El yatırma yönteminde yaygın olarak kullanılan takviye elemanları cam, karbon ve kevlar kumaşlarıdır. Bu kumaşlar, tek yönlü veya iki yönlüdürler. Özel olarak üretilen çok tabakalı kumaşlar da kullanılır. Yaygın kullanılan reçineler polyester, epoksi ve vinil esterdir. Reçineler genellikle düşük viskoziteye sahiptir. El yatırma yönteminin çok çeşitli takviye malzemeleri ile çok çeşitli ürünler yapmaya olanak sağlaması ve maliyeti çok düşük olması avantajlarındandır. Ayrıca pahalı ekipman ve makineler genellikle ihtiyaç duyulmaz. El yatırma yönteminin dezavantajları ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

- 1) Yoğun işlem gerektiren bir süreçtir.
- 2) Parça kalitesi büyük ölçüde bireysel becerilere bağlıdır ve bu nedenle parçadan parçaya mekanik özellikler numuneden numuneye farklılık gösterebilir.
- 3) Sadece sınırlı sayıda orta ve büyük boyutlu parçaların üretimi için uygundur.
- 4) Biraz dağınık ve açık kalıp yapısından dolayı sağlıklı değildir.

Elyaf Sarma Yöntemi:

Diğer bir üretim yöntemi olan elyaf sarma yöntemi; kompozit malzeme üretimi için bir merdanenin çevresi boyunca önceden belirlenmiş belirli yol takip edilerek elyafların merdane üzerine sarılması işlemidir (Şekil 1.7). Sarma işlemi; kalınlık ve katman diziliminin uyumunu sağlamak için merdane yüzeyinde ipliklerin tek boyutlu birikmesini sağlamada kullanılır. Merdane üzerindeki kompozit malzeme kürleştirildikten sonra çıkartılır. El yatırma yöntemi ile kompozit üretiminin dört temel adımı elyaf sarma yöntemine de uygulanabilir. Reçine ile ıslatma işlemi sırasında, elyaflar genellikle ıslak, tekrar işlemeli ıslak ve kuru olmak üzere farklı şekilde kullanılırlar. Islatma işleminde, kuru elyaflar, gerdirmeye düzeneği sayesinde gerdirilir, iyice ıslanmak üzere bir reçine banyosundan geçirilir ve dönen bir merdane üzerine sarılır. Bu durumda kuru fitillerin ıslatılması, sarma sırasında reçine banyosunda gerçekleşir. Islak sarım tekniği diğerlerine göre basit ve daha az maliyetlidir. Elyafların tamamen ıslanması sağlanır ve sonuçta kürleştirilmiş kompozit boşluksuz olur. Bununla birlikte, üretim süreci karmaşık işlemler gerektirdiği için homojen bir elyaf hacim oranının elde edilmesi zordur. Islatılan elyaflar, elyaf biriktirme ünitesi aracılığıyla merdane üzerine sarılır. Elyaf biriktirme ünitesi, farklı hareket eksenlerine sahip bir taşıma sistemine sabitlenmiştir. Merdanenin dönüşü ve taşıyıcı sisteminin hareketleri kontrol ünitesinde daha önce yazılan bir program tarafından kontrol edilir ve taşıyıcı sistemin merdaneye göre bağlı hareketleri ile elyaflar istenildiği şekilde merdane üzerine sarılır.



Şekil 1.7. Kompozit yapının elyaf sarma yöntemiyle üretimi (URL-3, 2022).

Elyaf sarma yöntemi, basınçlı kaplar, borular vb. gibi belirli uygulamalar için kullanılmaktadır. Merdane yüzeyindeki elyaf yolu boyunca sarım açısı kat yönlendirme açısıdır. Bu nokta, elyaf sarmanın ayırt edici bir özelliği olarak belirtilebilir. El yatırma veya prepreg film yerleştirme işlemlerinde, kat yönlendirme açısı kattaki herhangi bir noktada aynıdır; elyaf sarımında ise bileşenin sarım tipine ve meridyen şeklindeki izine bağlı olarak sarım açısı, bir kat içerisinde sabit kalabilir veya olmayabilir. Örneğin, bir çember katındaki sarım açısı kattaki herhangi bir noktada aynıdır; fakat helis şeklindeki bir katta, sarım açısı değişebilir. Bu nedenle sarmal katlara sahip elyaf sarımlı bir yapıda, kat sırası bir kesitten diğerine değişebilir. Elyaf sarma işlemi sırasında, biriktirme ünitesi ile elyaf temas noktası arasındaki merdane üzerindeki düz durmalarını sağlayacak şekilde ipliklerin üzerine belirli bir gerilim uygulanır. Ayrıca elyaflar reçine banyosundan çekildiğinde ve makara sistemi boyunca yönlendirildiğinde, belirli miktarda gerilim oluşturulur. Elyaf gerginliği, içe doğru normal yönde hareket eden ve takviye basıncı üreten bir bileşene sahiptir. Böylece takviye basıncı sarma sırasında gerçekleşir. Takviye basıncı, elyaf gerilimi ile doğru orantılıdır ve elyaf yolunu içeren bir düzlemde yerel eğrilik yarıçapı ile ters orantılıdır.

Elyaf sarma yönteminin avantajları şunlardır:

- 1) Herhangi bir eksenel simetrik dönel kabuğun bileşenleri, minimum maliyet ve yapısal verimlilik ile sarılabilir. Böylelikle herhangi bir büyüklükteki borular, basınçlı kaplar, tanklar, miller vb. uygulamalar için kullanılabilir.
- 2) Son zamanlarda, bilgisayar teknolojisindeki kayda değer ilerlemeler sayesinde, dirsek, rüzgâr gülü kanadı, vs. gibi eksenel simetrik olmayan parçalar da elyaf sarma tekniği ile kolayca üretilmektedir.
- 3) Merdane dönüşü ve taşıyıcı ünitenin hareketleri bilgisayar kontrollü olduğu için kompozit malzemenin elyaf yönü açıları tam olarak kontrol edilebilir.
- 4) Elyaf sarma işlemi otomatik olarak gerçekleştirilebilmektedir.
- 5) Sarım sırasındaki elyaf gerginliği, elyafları birleştirmek için yeterli basınca neden olur ve kürleştirme sırasında ek bir birleştirme basıncına ihtiyaç duyulmaz.

Elyaf sarma yöntemi aşağıda belirtildiği gibi bazı dezavantajlara sahiptir;

- 1) Dışbükey şekilli kapalı parçalar için uygundur. Sarma işlemi içbükey bir yüzeye uygulanamaz.
- 2) Geometrik olarak herhangi bir helis açısı uygulanabilirken, çok küçük açılarda sarım işlemine uygun değildir. Ayrıca helis açıları silindir yarıçapı ve kutup açıklık

yarıçapı boyutlarına bağlı olduğu için elyafların yönlendirilmesiyle ilgili açısıl kısıtlamalara sahiptir.

- 3) Elyaf hacim oranı genellikle yaklaşık %60 ile sınırlıdır.

Otoklav Yöntemi:

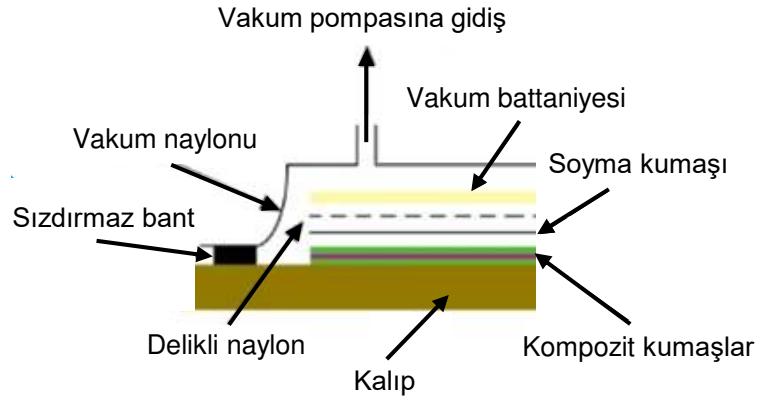
Otoklav yönteminde oda içerisinde dolaşan havaya veya gaza ısı girişi için hükümler içeren basınçlı bir tank kullanılır (Şekil 1.8). Negatif basınç, sıcaklık ve basınç izleme sistemi uygulamak için bir vakum sistemi ve işletme parametrelerini kontrol etmek için bir kontrol sistemi otoklavdaki diğer temel özelliklerdir. Hava, azot veya karbondioksit, basınçlandırma aracı olarak kullanılır. Hava kullanımı maliyetsizdir fakat yangın tehlikesi vardır. Hareketsiz gazlar arasında azot daha yaygındır. Kürleştirme sırasında basınçlandırma için hava/gaz fırın odaya enjekte edilir ve oda elektriksel yollarla veya gaz ateşiyle ısıtılır. Sıcaklığın düzgün bir şekilde yayılması için hava/gaz odanın içinde dolaştırılır. Uygulanan basıncı izostatik olarak etkili kılmak için her zaman bir vakum torbası kullanılır. Otoklav yöntemi yüksek kaliteli havacılık ürünlerinin elde edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak vakum torbası, hava alma, havalandırma, sızdırmazlık macunu vb. gibi bir dizi işlem için sarf malzemelere ihtiyaç olmasından dolayı maliyetli olmaktadır.



Şekil 1.8. Kompozit yapı üretiminde kullanılan otoklav fırını (URL-4, 2022).

Vakum Torbalama Yöntemi:

El yatırma yönteminde kalıp üzerine dizilen elyaf takviyeli polimer kompozit kumaşların vakum altına alınarak kürleştirme işlemine hazır hale getirilmesi için uygulanan işlemleri kapsar. Vakum torbalama yönteminde delikli naylon, elyaf takviyeli polimer kompozit kumaşlar üzerine yerleştirilir. Delikli naylon, kompozit parçanın vakum naylonuna yapışmaması için kullanılır (Şekil 1.9). Delikler, hapsolmuş havanın, fazla reçinelerin ve uçucu ürünlerin kürleşme sırasında tahliye edilmesine izin verir. İsteğe bağlı olarak, delikli naylonu yerleştirmeden önce kompozit parçaya bir soyma kumaşı (peel ply) yerleştirilir. Soyma kumaşı, daha sonraki bir aşamada başka bir kompozit parça yüzeyine yapıştırma için iyi düzeyde sürtünme yüzeyi oluşturur. Delikli naylonun üzerine havayı ve fazla reçineyi tahliye etmek için vakum battaniyesi keçesi yerleştirilir. Daha sonra vakum battaniyesi keçesi üzerine vakum naylonu yerleştirilir. Havalandırma, vakum battaniyesi keçesi aracılığıyla sağlanır. Bu sayede, nem, hava ve uçucu maddelerin kompozit parçadan tahliye edilmesine izin verilir. Son olarak, vakum naylonu yerleştirilir. Sızdırmazlık bantları, vakum naylonu ile kalıp arasında sızdırmazlık sağlamak için kullanılır. Kompozit parça içerisindeki havayı, fazla reçine ve nemi vakum yoluyla tahliye etmek için vakum pompasına bir boru vasıtasıyla bağlanan vakum portu kompozit parça üzerine hava sızdırmaz şekilde yerleştirilir. Vakuma alınmış kompozit parça daha sonra fırına koyularak kürleştirilir.

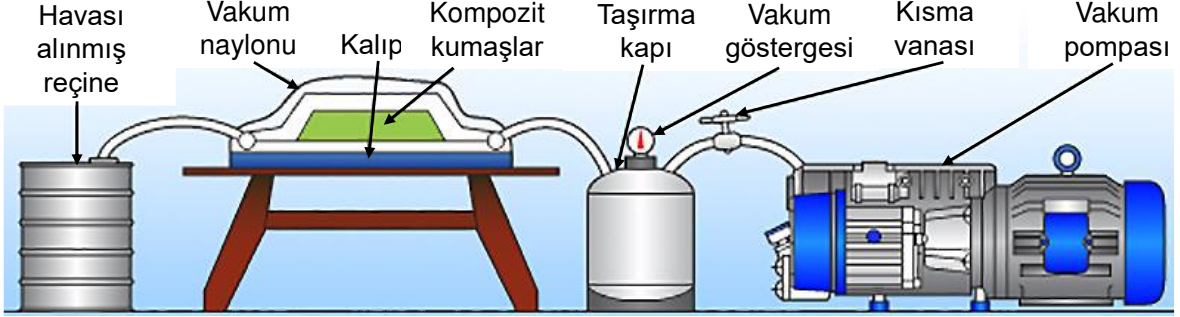


Şekil 1.9. Kompozit yapının vakum torbalama yöntemiyle üretimi (Durgun ve diğ., 2014).

Vakum İnfüzyon Yöntemi:

Vakum infüzyon yönteminde elyaf takviyeli kompozit kumaşları kalıp üzerine tabakalı olarak dizdikten sonra kumaşlar içerisine polimer matris (reçine) malzemeyi emdirmek için

vakum basıncı kullanılır. Elyaf takviyeli kumaşlar kalıp üzerine kurutulmuş olarak dizilir ve reçine emdirme işleminden önce vakum uygulanır (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. Kompozit yapının vakum infüzyon yöntemiyle üretimi (URL-5, 2022).

Vakum infüzyon yöntemi uçak endüstrisinde hem uygun maliyetli hem de yüksek kaliteli birincil yapıların üretilmesini sağlamaktadır (Kamae ve diğ., 2009). Havacılık alanında kullanılan geleneksel kompozit üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında, prepregsiz ve otoklavsız kompozit parça üretimi için düşük maliyetli en uygun yöntemlerden biridir (Takeda ve diğ., 2005). Vakum infüzyon yönteminin geleneksel el yatırma ve vakum torbalama yöntemlerine göre avantajları şunlardır:

- 1) Daha iyi elyaf-reçine oranı,
- 2) Daha az atık reçine,
- 3) Kompozit laminalar içerisinde çok daha homojen reçine dağılımı,
- 4) Üretim esnasında fırça veya rulo ile reçine sürme işlemi olmadığı için daha zahmetsiz ve temiz üretim imkânı sağlar.

1.5. Kompozit Yapıların Enerji Sönümleme ve Hasar Davranışı

1.5.1. Kompozit Malzemelerin Hasar Teorileri

Hasar teorileri birleşik gerilmeler etkisi altındaki bir kompozit laminatın dayanımı hakkında bilgi sağlar. Düzlem gerilme şartı altında tek yönlü bir kompozit laminadaki hasarı belirlemek için araştırmacılar tarafından birçok teori öne sürülmüştür. Bu hasar teorileri etkileşimli olmayan veya sınırlı (maksimum gerilme, maksimum şekil değiştirme),

etkileşimli (Azzi-Tsai-Hill, Tsai-Wu) ve kısmi etkileşimli veya hasar modu tabanlı (Hashin, Chang-Chang) olmak üzere üç kısma ayrılmıştır (Lakshya, 2008).

Maksimum Gerilme Hasar Teorisi:

Maksimum gerilme hasar teorisine göre, asal yönlerde (1, 2, 3) çekme, basma ve kayma gerilmeleri bu yönlerdeki normal ve kayma mukavemetine eşit olur ya da daha büyük olursa kompozit laminada hasar meydana geldiği varsayılır. Denklem 1.20a ve 1.20b' deki sınırlar aşıldığı zaman laminada hasar başlar.

$$-S_C < \sigma < S_T \quad (1.20a)$$

$$-S_S < \tau < S_S \quad (1.20b)$$

Burada S_T asal maksimum çekme mukavemeti, S_C asal maksimum basma mukavemeti ve S_S maksimum düzlemsel kayma mukavemetidir. σ ve τ ise sırasıyla asal yönlerde uygulanan normal ve kayma gerilmelerini temsil etmektedir.

Maksimum Şekil Değiştirme Hasar Teorisi:

Maksimum şekil değiştirme hasar teorisine göre kompozit laminada hasar, asal malzeme eksenlerinde şekil değiştirmelerden herhangi birisi ilgili eksendeki kritik şekil değiştirme değerine ulaştığı zaman başlar. Denklem 1.21a ve 1.21b' deki sınırlar aşıldığı zaman laminada hasar meydana gelir.

$$-\varepsilon_C < \varepsilon_a < \varepsilon_T \quad (1.21a)$$

$$-\gamma < \gamma_a < \gamma \quad (1.21b)$$

Burada ε_C , ε_T ve γ sırasıyla maksimum basma, çekme ve kayma asal şekil değiştirmelerdir. ε_a ve γ_a ise sırasıyla asal yönlerde uygulanan normal ve kayma şekil değiştirmelerdir.

Azzi-Tsai-Hill Hasar Teorisi:

Azzi-Tsai-Hill hasar teorisi, Hill' in metaller ve plastikler için kullandığı anizotropik quadratik akma teorisinin ortotropik kompozit laminaya uygulanmış halidir (Tsai, 1965). Bu

hasar teorisi, gerilme bileşenleri arasında etkileşim olduğu için maksimum gerilme ve maksimum şekil değiştirme hasar teorilerine göre avantajlıdır. Düzlem içi yükleme şartı için Azzi-Tsai-Hill hasar kriterinin uygulanma biçimi Denklem 1.22a' da verilmiştir.

$$\frac{\sigma_1^2}{S_{lT}^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{S_{lT}^2} + \frac{\sigma_2^2}{S_{tT}^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S_S^2} \leq 1 \quad (1.22a)$$

Düzlem dışı yükleme şartı için Azzi-Tsai-Hill hasar kriterinin uygulanma biçimi Denklem 1.22b' de verilmiştir.

$$\frac{\sigma_1^2}{S_{lT}^2} - \frac{\sigma_1\sigma_3}{S_{lT}^2} + \frac{\sigma_3^2}{S_{zT}^2} + \frac{\tau_{13}^2}{S_{zS}^2} \leq 1 \quad (1.22b)$$

Yukarıdaki eşitliklerdeki σ_1 , σ_2 ve σ_3 sırasıyla uzunlamasına, enine ve kalınlık yönlerindeki çekme gerilmelerini temsil etmektedir. τ_{12} ve τ_{13} ise düzlemsel kayma gerilmesi ve düzlem dışı yükleme için kayma gerilmeleridir. S_{lT} , uzunlamasına yöndeki maksimum asal çekme mukavemeti, S_{tT} enine yöndeki maksimum çekme mukavemeti, S_{zT} kalınlık yönündeki maksimum asal çekme mukavemeti, S_S düzlemsel maksimum asal kayma mukavemeti ve S_{zS} düzlem dışı yükleme durumundaki maksimum asal kayma mukavemetidir.

Tsai-Wu Hasar Teorisi:

Tsai-Wu hasar teorisine göre bir ortotropik lamina düzlem içi ve düzlem dışı yükleme şartlarına maruz kaldığı zaman Denklem 1.23' te verilen hasar kriterin sağlanması durumunda hasara uğrar (Tsai ve Wu, 1971).

$$F_i\sigma_i + F_{ij}\sigma_i\sigma_j = 1, \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (1.23)$$

Burada, F mukavemet katsayısıdır. F_{12} , F_{23} ve F_{13} gibi bilinmeyen sabitleri belirlemek için iki eksenli hasar testinin yapılması Tsai-Wu tarafından önerilmiştir.

Modifiye edilmiş Tsai-Wu hasar teorisinde ise Denklem 1.23' te verilen Tsai-Wu hasar teorisinin laminanın matris hasar kriterini belirlemek için düzeltilmiş ve LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımına uyarlanmıştır (Tsai ve Wu, 1971).

$$F_2\sigma_2 + F_2^2\sigma_2^2 + F_6\sigma_{12}^2 - 1 \geq 0 \text{ ise hasarlı, } \leq 0 \text{ ise elastik} \quad (1.24)$$

Burada, F mukavemet katsayısı ve σ matris (enine) yönündeki gerilmedir.

Hashin Hasar Teorisi:

Hashin hasar teorisi gerilme fonksiyonlarının ikinci dereceden denklemlerini kullanır. İkinci dereceden denklemlerin seçimi eğri uydurma düşüncesine dayalıdır (Hashin, 1980). Elyaf ve matris modundaki hasar kriterlerinin genelleştirilmiş İkinci dereceden polinomsal denklemleri aşağıda verilmiştir:

Elyaf modu hasarı için:

$$A_f\sigma_1 + B_f\sigma_1^2 + \frac{1}{S_{ls}^2}(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2) = 1 \quad (1.25a)$$

Burada A_f ve B_f tek eksenli çekme testten belirlenen katsayılarıdır. S_{ls} ise uzunlamasına düzlemdeki eksenel kayma hasar mukavemetidir.

Matris modu hasarı için:

$$A_m(\sigma_2 + \sigma_3) + B_m(\sigma_2 + \sigma_3)^2 + \frac{1}{S_{ts}^2}(\tau_{23}^2 - \sigma_2\sigma_{23}) + \frac{1}{S_{ls}^2}(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2) = 1 \quad (1.25b)$$

Burada, A_m ve B_m , denklemlerle ilgili gerilme katsayılarıdır. S_{ts} ise enine düzlemdeki kayma hasar mukavemetidir.

Chang-Chang Hasar Teorisi:

Chang-Chang hasar teorisine göre kompozit laminatın çekmeye maruz kalması durumundaki baskın hasar mekanizması düzlem içi hasardır. Bu hasar teorisine göre matris kırılması, elyaf-matris kesilmesi ve elyaf kırılması şeklinde üç farklı düzlem içi hasar modu oluşur (Chang, 1987). Matris kırılması ve elyaf-matris kesilmesi Hashin hasar teorisinin çekme hasar kriterine benzemektedir. Chang-Chang hasar teorisi çekme durumundaki matris kırılma hasar kriteri Denklem 1.26a' da görüldüğü gibi σ_{11} ' i içermez.

$$\left(\frac{\sigma_2}{S_{tT}}\right)^2 + \bar{\tau} = 1, \quad (\sigma_2 > 0) \quad (1.26a)$$

$\bar{\tau}$, elyaf-matris kesme terimidir ve Denklem 1.26b' deki gibi açıklanır:

$$\bar{\tau} = \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}^2} \right)^2 \left\{ \frac{1 + 1.5\alpha G_{12} \tau_{12}^2}{1 + 1.5\alpha G_{12} S_{12}^2} \right\} \quad (1.26b)$$

Yukarıdaki denklemde yer alan α , çekme durumunda oluşan kayma gerilmesinin doğrusal olmayan bölgesi için bir parametredir. G_{12} ise kayma modülüdür. Eğer laminat lineer elastik davranış gösterirse ($\alpha = 0$), Denklem 1.26a Denklem 1.26c' ye indirgenir.

$$\left(\frac{\sigma_2}{S_{tT}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}^2} \right)^2 = 1, \quad (\sigma_2 > 0) \quad (1.26c)$$

Eğer laminat matris elemanından çok daha fazla rijit elyafa sahipse, örneğin karbon elyaf takviyeli polimer kompozit malzemenin matris elemanı Denklem 1.26a' ya göre laminadaki kayma gerilmelerinden dolayı doğrusal olmayan şekilde ($0 < \alpha < 0.5$) hasarlanır. Doğrusal olmayan malzeme davranışı deneysel olarak belirlenmektedir.

Matris basma modu için Denklem 1.26d' ye göre enine basma ve kayma altında matris kırılması yüzünden hasarın meydana geldiği düşünülür.

$$\left(\frac{\sigma_2}{2S_{12}} \right)^2 + \left[\left(\frac{S_{tC}}{2S_{12}} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_2}{S_{tC}} + \bar{\tau} = 1, \quad (\sigma_2 < 0) \quad (1.26d)$$

Çekme modu altında Denklem 1.26e' de verilen şart sağlanırsa elyaf kırılma hasarı oluşur.

$$\left(\frac{\sigma_1}{S_{1T}} \right)^2 + \bar{\tau} = 1, \quad (\sigma_1 > 0) \quad (1.26e)$$

Basma modu altında Denklem 1.26f' deki şart sağlanırsa elyaf kırılma hasarı oluşur.

$$\left(\frac{\sigma_1}{S_{1C}} \right)^2 = 1, \quad (\sigma_1 < 0) \quad (1.26f)$$

Kompozit malzemelerin karmaşık yapısı ve üretim süreçleri değişik hasar mekanizmaları ortaya çıkarmıştır. Hasar mekanizmalarını yapısal bir model üzerinde ifade

etmek için baskın hasar durumu, hasarın yeri ve yüklemeye bağlı olarak nasıl meydana geldiğini karakterize etmek gerekir. Farklı yükleme koşulları altındaki kompozit malzemelerin hasar mekanizmaları bu üç kritik durum ile karakterize edilir ve bunların yapısal modellerin hasar kriterleriyle ilişkili olarak malzeme hasarı üzerindeki etkileri belirlenir (Ilyas, 2010). Kompozit malzemelerde yükleme durumuna bağlı olarak oluşan hasar mekanizmaları genel olarak elyaf kırılması, matris kırılması, elyaf burkulması ve delemantasyon şeklindedir.

Elyaf kırılması, elyaf yönü boyunca oluşan yüksek gerilme yüzünden ortaya çıkan en basit hasar mekanizmalarından birisidir ve tek eksenli çekme testleriyle karakterize edilebilmektedir.

Matris kırılmaları tek bir kompozit tabaka (lamina) içerisindeki elyaflar arasındaki çatlaklardan veya boşluklardan dolayı meydana gelir. Bu kırılmalar, elyaflara dik yöndeki çekmenin aşırı yüklemeli olması nedeniyle meydana gelir. Matris kırılmaların yoğunluğu yükleme durumuna bağlı olarak değişim gösterir. Örneğin, vurucu uç yüklemesi altında elyafe dik yönde çekme meydana gelmesi durumunda vurucu uç etrafında plaka içerisinde homojen dağılımlı matris kırılma hasarları oluşur.

Elyaf burkulması, elyaf yönünde basma durumunda meydana gelen yapısal bir hasar mekanizmasıdır. Burkulma kendi başına kompozit yapının hasarlanmasına neden olmayabilir, ancak elyaf matris bağlarının ayrılması gibi başka türlü hasar mekanizmalarını harekete geçirebilir.

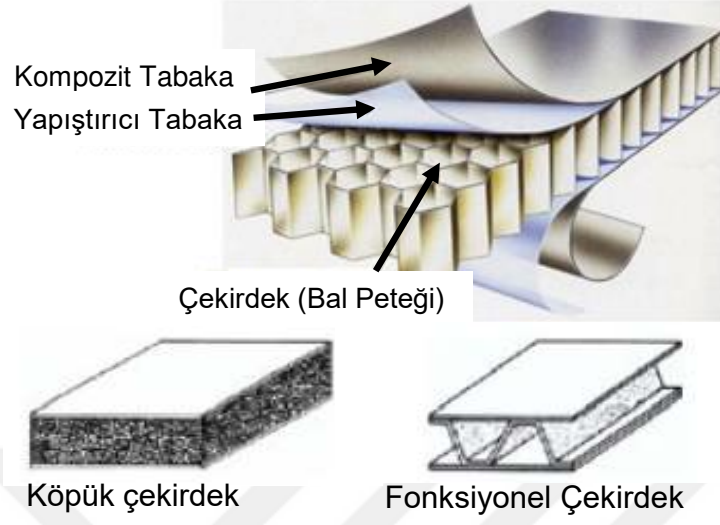
Delemantasyon veya tabakalar arası ayrılma hasarı, farklı yönlerde sahip bir kompozit laminatın iç katmanları arasındaki ayrılma ve genellikle laminat kalınlığı boyunca yüksek düzeyde süreksiz gerilmelerden kaynaklanır. Tahribatlı ve tahribatsız test yöntemleriyle laminat içerisindeki delemantasyonun yeri tespit edilebilmektedir.

1.5.2. Kompozit Yapıların Enerji Sönümleme Davranışının Belirlenmesi

1.5.2.1. Sandviç Panellerde Enerji Sönümleme Davranışının Belirlenmesi

Sandviç yapılar, farklı yüklere (çarpma veya çarpışma, ezilme, darbe, eğilme, vs.) karşı mukavemetli olma, uygun maliyetli malzeme seçimi sağlama, iyi derecede ses ve ısı yalıtım özelliğine sahip olma, eğrili yüzeylerde kullanılabilme ve çok iyi özgül enerji sönümleme kabiliyeti sağlama gibi üstün özellikleri sayesinde havacılık, otomotiv ve

savunma gibi endüstriyel alanlarda değişik mühendislik uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadır (Xiao ve diğ., 2009).

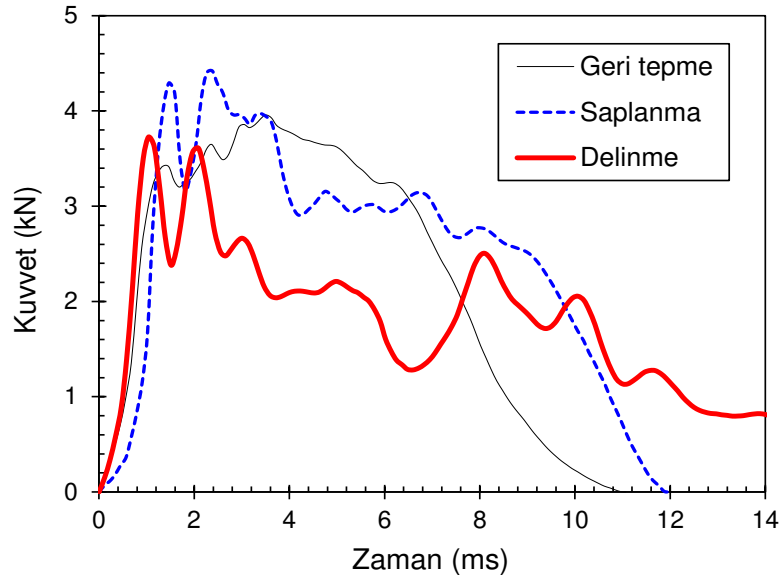


Şekil 1.11. Kompozit yüzey plakalı değişik tip çekirdek yapıları sahip sandviç panel geometrileri (Friedrich ve Almajid, 2013).

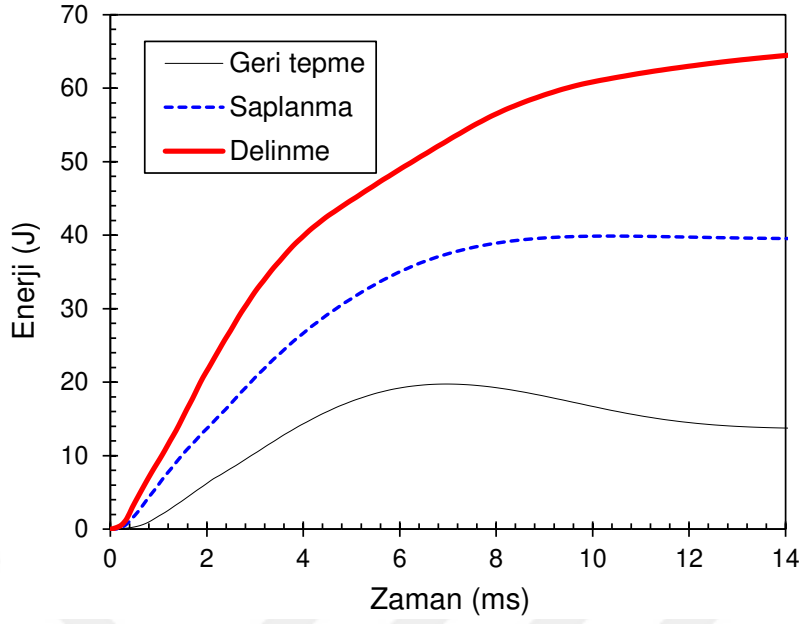
Sandviç yapılar mühendislik uygulamalarında genellikle çarpışma ve darbe yüklerine maruz kaldıkları için yük taşıma kabiliyetleri ve çalışma ömürleri olumsuz yönde etkilenir. Bu nedenle sandviç yapıların çarpma davranışı ve enerji sönümleme özelliklerinin belirlenmesiyle ilgili son yıllarda yapılan araştırmalar dikkat çekmektedir (He ve diğ., 2019). Yüksek performanslı sandviç yapılara olan taleple birlikte bu yapıların darbe dayanımı ve enerji sönümleme kapasitesini arttırmak için değişik türden sandviç yüzey ve çekirdek malzemeleri üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Elyaf takviyeli kompozit yüzey plakalar (Zhang ve diğ., 2017) ve bal peteği desenli çekirdek malzemeli (Wang ve diğ., 2016) sandviç yapılar mühendislik uygulamalarında yaygın kullanım alanına sahiptir. Bal peteği desenli çekirdekli sandviç yapılar (Şekil 1.11) özellikle basma ve çarpma yükleri altında yüksek mukavemet göstermektedir. Bu yapılar, çarpma yükü altında enerjinin sönümlenebildiği yüksek dayanım gerektiren yerlerde kullanılmaktadır.

Kuvvet-zaman ve enerji-zaman eğrileri, çarpma süresince sandviç panel numunelerinin darbe dayanımı ve enerji sönümleme davranışını belirlemek için kullanılır. Çarpma enerjisi, çarpma sırasında yapısal davranışları belirlemek ve hasar mekanizmalarını ortaya çıkarmak için önemli parametrelerden biridir. Tipik çarpma davranışını karakterize eden kuvvet-zaman eğrileri, sandviç panellerin hasar davranışı için tam geri tepme (rebound), tam olmayan geri tepme (penetration) ve kısmi veya tam delinme (perforation)

olmak üzere üç kısımda incelenir (Wang ve diğ. 2013; Chen ve diğ., 2017). Şekil 1.12’de vurucu ucun sandviç panel yüzeyinden geri tepme (rebound), vurucu ucun sandviç panele saplanması (penetration) ve vurucunun sandviç paneli delip geçmesi (perforation) gibi üç özel duruma ait tipik kuvvet-zaman eğrileri gösterilmiştir. Şekil 1.12’ den görüleceği üzere, düşük enerjili darbe testinde vurucu ucun sandviç panelin üst plakasına çarpıp geri dönmesi durumunda (geri tepme) kuvvet-zaman eğrisi maksimum seviyeye kadar arttıktan sonra azalma eğilimi gösterir. Plakada meydana gelen kırılmaların etkisiyle kuvvet-zaman eğrisinde dalgalanmalar olur. Çarpma enerjisi daha yüksek seviyeye kadar arttırıldığında vurucu uç sandviç panel plakasını delerek çekirdek yapı içinde kalır (saplanma). Bu durumda elde edilen kuvvet-zaman eğrisinde kuvvet değeri maksimuma yükseldikten sonra üst plakanın delinmesiyle aniden düşme eğilimi gösterir ve belirli bir seviyeye düştükten sonra bir süre stabil kaldıktan sonra tekrar düşmeye devam eder. Çarpma enerjisi en yüksek seviyeye çıkarıldığında vurucu ucun sandviç panelin üst plaka ve çekirdek yapısını delmesiyle kuvvet-zaman eğrisi maksimum seviyeye ulaştıktan sonra sandviç panelde oluşan kırılmaların etkisiyle dalgalı olarak azalır. Vurucu uç alt yüzey plakaya temas ettikten sonra alt plakada kırılma hasarı oluşurken kuvvet eğrisinde bir miktar artış olur ve daha sonra dalgalı olarak azalır (Delinme). Vurucu uç ile sandviç panel arasındaki sürtünmenin etkisiyle çarpmanın bitimine doğru kuvvet-zaman eğrisi sıfıra doğru azalmadan önce bir süre stabil değişim gösterir.



Şekil 1.12. Sandviç panelin düşük enerjili darbe testlerinde geri tepme, saplanma ve delinme durumunu gösteren kuvvet-zaman eğrileri



Şekil 1.13. Sandviç panelin düşük enerjili darbe testlerinde geri tepme, saplanma ve delinme durumunu gösteren enerji-zaman eğrileri

Şekil 1.13' te sandviç panel yüzeyinden vurucu ucun geri tepmesi (rebound), vurucu ucun sandviç panel içerisine saplanması (penetration) ve vurucunun sandviç paneli delip geçmesi (perforation) durumlarına ait tipik enerji-zaman eğrileri gösterilmiştir. Sandviç panel tarafından sönmölenen enerji, vurucunun sandviç panel içerisindeki yer değiştirmesine karşı elde edilen kuvvet eğrisinin altında kalan alana eşittir. Vurucu ucun sandviç panel yüzeyinden geri tepmesi durumunda sahip olduğu enerjinin tamamı sandviç panel tarafından sönmölenemez ve sönmölenemeyen artık çarpma enerjisi (elastik enerji) vurucu ucun sandviç panel yüzeyinden geri tepmesi sırasında harcanır. Vurucu ucun sandviç panele saplanması durumunda ise sahip olduğu çarpma enerjisinin tamamı sandviç panel tarafından sönmölenir ve enerji eğrisinin son kısmı Şekil 1.12 de göröleceği üzere hemen hemen yatay bir şekilde devam eder. Vurucu ucun sandviç paneli delip geçmesi durumunda ise, vurucu uç ile sandviç panel arasındaki sürtünmeden dolayı elde edilen enerji eğrisi yukarı yönlü artma eğilimi gösterir.

Vurucunun numuneye çarpması sırasında zamana bağlı hız, yer değiştirme ve enerji değişimi eğrilerini elde etmek için ASTM D7136 (2012) standardına göre sırasıyla Denklem 1.27, 1.28 ve 1.29 kullanılır.

$$v(t) = v_i + gt - \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \quad (1.27)$$

$$\delta(t) = \delta_i + v_i t + \frac{gt^2}{2} - \int_0^t \left(\int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \right) dt \quad (1.28)$$

$$E_s(t) = \frac{m(v_i^2 - (v(t))^2)}{2} + mg\delta(t) \quad (1.29)$$

Yukarıdaki eşitliklerde yer alan sembollerin açıklamaları aşağıda verilmiştir:

t : Vurucu uç numuneye çarptıktan sonra geçen süre [s]

v_i : Vurucu ucun numuneye ilk çarptığı andaki çarpma hızı [m/s]

$v(t)$: Vurucu ucun numuneye çarptıktan sonraki zamana göre hızı [m/s]

$F(t)$: Numunedeki çarpma kuvvetinin zamana bağlı değişimini [m/s]

δ_i : Vurucu ucun numuneye çarpmadan önceki yer değiştirmesi [m]

$\delta(t)$: Vurucu ucun numuneye çarptıktan sonraki zamana göre yer değiştirmesi [m]

m : Vurucunun kütlesi [kg]

g : Yer çekimi ivmesi [m/s²]

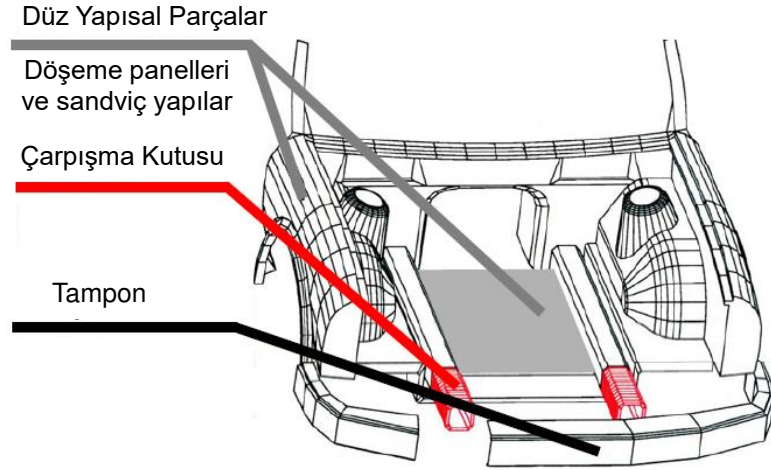
$E_s(t)$: Darbe sırasında numunenin sönümlendiği enerjinin zamana bağlı değişimi [J]

Sandviç panellerin çarpma yükü altındaki hasar mekanizması, vurucu ucun çarpma bölgesinin yakınında yüksek basma gerilmesi oluşturması nedeniyle yüzey plakasında matris kesilmesi şeklindeki kırılmalar ve çekirdek yapıda ezilmeler meydana gelir. Çekirdek yapının basma mukavemeti, çekme ve kesme mukavemetlerinden daha büyük olduğu için sandviç panelin çekirdek kısmı basma gerilmesi altında kırılmaz. Bununla birlikte yüksek eğilme momentinden dolayı eğilme deformasyonu arttıkça alt yüzey plakasına yakın olan bölgede çekirdek kısımda çekirdek çatlaması meydana gelir ve çekirdek kalınlığı boyunca üst yüzey levhasına doğru yayılır. Bu çatlağın yayılması, sandviç panelin delinmesi veya çökmesinde önemli bir rol oynar. Büyük çaplı diyagonal çekirdek kırılmalarının bir sonucu olarak yüzey plakaları ile çekirdek kısım arasındaki yapışma ara yüzeyinde delemantasyon hasarı oluşur (Morada ve diğ., 2017).

1.5.2.2. Çarpışma Kutularında Enerji Sönümleme Davranışının Belirlenmesi

Enerji sönümleyici yapılar çarpma veya çarpışma anında ortaya çıkan kinetik enerjiyi yapısal elemanlar yardımıyla diğer enerji türlerine (elastik, plastik, hasar, ısı, ses vb.) dönüştürerek oluşabilecek hasar etkilerini azaltan özelliklere sahiptir (Heimbs, 2012; Liu ve

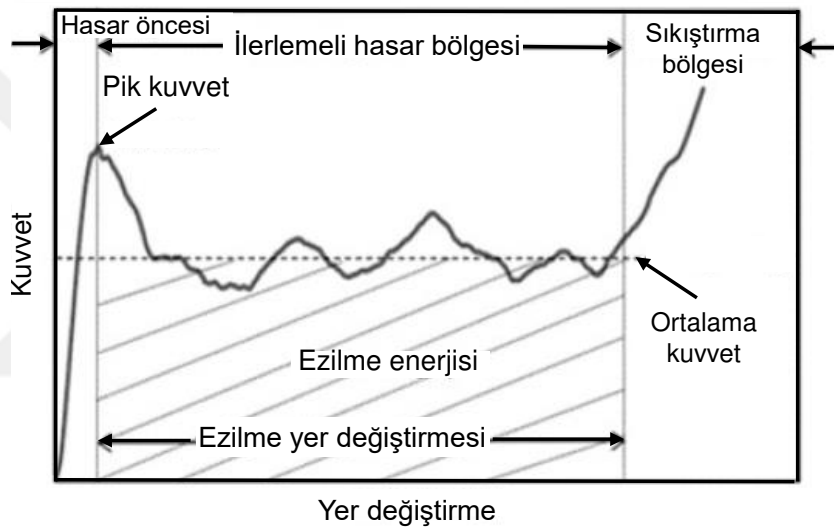
diğ., 2013). Otomotiv ve havacılık endüstrisinde kaza sırasında oluşabilecek ölümlü veya ağır yaralanmaların sayısının azaltılması için aktif ve pasif güvenlik sistemleri kullanılmaktadır (Atthapreyangkul, 2017; Mahbod ve diğ., 2018). Aktif güvenlik sistemleri, kaza oluşmadan önce devreye giren kontrol sistemleri (hız sabitleyici, araç takip sistemi, şerit takip sistemi, kör nokta uyarı sistemi vb.), frenleme ve diğer önleyici tedbirleri içermektedir. Aktif güvenlik sistemleri sürekli olarak geliştirilmesine rağmen yine de ölümlü veya ağır yaralanmalı kazalar meydana gelebilmektedir. Bu durum ise pasif güvenlik sistemlerinin önemini daha da artırmaktadır (Hussein ve diğ., 2016). Pasif güvenlik sistemleri, kaza anındaki can ve mal kayıplarını minimum düzeye indirmek için araç üzerinde bulunan yapısal parçaların geliştirilmesi ve iyileştirilmesi gibi tasarımları kapsamaktadır. Pasif güvenlik sistemlerinin en yaygın uygulaması, Şekil 1.14’ te gösterildiği gibi binek araçların çarpışma bölgelerine yerleştirilen metal esaslı enerji sönmüleyici ince cidarlı yapılardır (Hussein ve diğ., 2017; Zhu ve diğ., 2018). Bu yapılar, üstün özgül enerji sönmüleme kabiliyetleri, basit üretilebilir olmaları, düşük üretim maliyetleri ve verimlilikleri sayesinde pasif güvenlik sistemleri için tercih edilmektedirler. Bu yapıların en yaygın geometrik şekilleri; dairesel, kare, çok kenarlı (beşgen, altıgen vs.), oluklu ve konik kesitlere sahiptirler (Lu ve diğ., 2018).



Şekil 1.14. Çarpışma kutusu ve sandviç yapıların binek araçlarda uygulama yeri (Friedrich ve Almajid, 2013).

Kompozit çarpışma kutusunun statik basma (ezilme) testinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrisi, enerji sönmüleme kabiliyetinin ana unsurudur. Çarpışma kutusunun ezilmesi sırasında elde edilen tipik kuvvet-yer değiştirme eğrisi hasar öncesi, ilerlemeli hasar

ve sıkıştırma olmak üzere üç bölgede incelenir (Şekil 1.15). Hasar öncesi bölgede çarpışma kutusunda ezilme hasarı başlangıcına kuvvet-yer değiştirme eğrisinde doğrusal bir artış olur. İlerlemeli hasar bölgesinde çarpışma kutusu üzerinde maksimum ezilme kuvveti (MEK) oluştuğundan sonra kuvvet-yer değiştirme eğrisi kontrollü bir şekilde stabil olarak değişir. Sıkıştırma bölgesinde ise çarpışma kutusu üzerindeki yük testin sonuna kadar hızlı bir şekilde artar. Kuvvet-yer değiştirme eğrisi kullanılarak çarpışma kutusunun ezilme davranışı karakterize edilir. Kompozit çarpışma kutularının ezilme testinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrisi, yük taşıma ve enerji sönümleme kabiliyetleri açısından diğer enerji sönümleyici yapılarla karşılaştırma için önemli fikirler verir.



Şekil 1.15. Kompozit çarpışma kutusunun ezilme testinden elde edilen tipik kuvvet-yer değiştirme eğrisi (Rabiee, 2018).

Kompozit çarpışma kutularının tipik kuvvet-yer değiştirme eğrisinden elde edilen aşağıdaki parametreler ezilme karakteristiklerinin belirlenmesinde kritik öneme sahiptirler.

- 1) Pik kuvvet, ezilme hasarı sürecinde elde edilen maksimum kuvvettir.
- 2) Ezilme enerjisi, ilerlemeli hasar bölgesindeki kuvvet-yer değiştirme eğrisinin altındaki alan tarafından belirlenen sönümlenen enerjidir.
- 3) İlerlemeli hasar bölgesindeki ezilme yer değiştirmesi, hasarın öncesi ve sıkıştırma bölgesi hariç toplam ezilme yer değiştirmesidir.
- 4) Yer değiştirme, hasar öncesi ve sıkıştırma bölgesi dahil toplam ezilme yer değiştirmesidir.

- 5) Özgül enerji sönümlleme (ÖES), hasara uğramış kompozit çarpışma kutusunun birim kütlesi başına sönümlenen enerjidir.
- 6) Ezilme kuvveti verimi (EKV), ortalama ezilme kuvvetinin (OEK) maksimum ezilme kuvvetine (MEK) oranıdır.

Statik basma testi sırasında kaydedilen kuvvet-yer değıştirme eğrileri kullanılarak kompozit çarpışma kutularının ES_T , ÖES, OEK ve EKV gibi ezilme karakteristiklerini belirlemek için aşağıdaki denklemler kullanılmaktadır (Liu ve diğ., 2020).

ES_T [J], kompozit çarpışma kutularının ezilme testi sırasında elde edilen kuvvet-yer değıştirme eğrisinin altında kalan alandan hesaplanır ve Denklem 1.30'da verildiğı gibi anlık ezilme mesafesine (s) karşılık gelen kuvvet değerlerinin toplam ezilme mesafesine (L) kadar integralinin alınmasıyla hesaplanır.

$$ES_T = \int_0^L F(s)ds \quad (1.30)$$

ÖES [J/g], kompozit çarpışma kutularının enerji sönümlleme verimini değlendirmek için birim kütle başına düşen enerji sönümlleme kabiliyetidir ve Denklem 1.31' de verildiğı gibi çarpışma kutusundaki toplam enerji sönümlemesinin çarpışma kutusunun toplam kütlesine (m) bölünmesiyle elde edilmektedir.

$$\text{ÖES} = \frac{ES_T}{m} \quad (1.31)$$

OEK [N], kompozit çarpışma kutularının enerji sönümlleme kabiliyetinin belirlenmesi açısından önemli bir tasarım parametresidir. Çarpışma kutusunun OEK değeri arttıkça enerji sönümlleme kabiliyeti de aynı oranda artmaktadır. Denklem 1.32' de verildiğı gibi çarpışma kutusunun toplam enerji sönümlemesinin toplam ezilme mesafesine bölünmesiyle elde edilir.

$$\text{OEK} = \frac{ES_T}{L} \quad (1.32)$$

EKV, çarpışma kutularının hasar başlangıcında oluşan pik kuvvetin ilerlemeli hasar fazındaki durumu hakkında bilgi vermektedir. Çarpışma kutularının enerji sönümlleme

davranışının belirlenmesi açısından önemli bir tasarım parametresidir. Denklem 1.33' te verildiği gibi çarpışma kutularının ortalama ezilme kuvvetinin ezilme sırasındaki elde edilen MEK değerine bölünmesiyle elde edilir.

$$EKV = \frac{OEK}{MEK} \quad (1.33)$$

Özgül enerji sönümleme, çarpışma kutusunun ezilmesi sırasında oluşan hasar modlarına önemli derecede bağlıdır. Kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında oluşan hasar modları katastrofik (yıkıcı) ve ilerlemeli (stabil) hasar modu olarak ikiye ayrılır. Katastrofik hasar modu, çarpışma kutusunda stabil olmayan tabaka içi veya tabakalar arası çatlak büyümesi meydana geldiğinde ortaya çıkar ve hasar başlangıcında kuvvetin hızlı bir şekilde artarak maksimum seviye ulaştıktan sonra çok daha düşük değere kadar aniden düşüp ilerlemesi ile karakterize edilir. İlerlemeli hasar modu, çarpışma kutusundaki hasarın kontrol edilebilir olduğu ve çarpışma kutusunun yüksekliği boyunca yükleme hızına bağlı olarak kuvvetin stabil olarak değiştiği durumu temsil eder. Bu durumu sağlamak için, çarpışma kutusunun bir ucunda tetikleyici kanallar kullanılır. Hasar tetikleyici kanallar hasarın belirli bir konumda başlamasına neden olan gerilme yoğunlaştırıcısı gibi davranarak hasar başlangıcında oluşan maksimum kuvveti azaltmakla birlikte daha sonraki hasar aşamasında kuvvet-yer değiştirme eğrisinin stabil bir şekilde ilerlemesini sağlar. İlerlemeli hasar modunun avantajlarından birisi, ilerlemeli ezilme bölgesinde sönümlenen enerjinin, katastrofik hasar durumundaki sönümlenen enerjiden daha büyük olmasıdır. Ayrıca ilerlemeli hasar davranışı sergileyen enerji sönümleyiciler tarafından üretilen yükleri taşımak üzere tasarlanmış bir yapı, katastrofik hasar davranışı gösteren enerji sönümleyicilerin ürettiği yükleri taşımak için tasarlanan yapılardan daha hafif oldukları için özgül enerji sönümleme kabiliyetleri daha yüksektir (Garattoni, 2011).

Farley ve Jones (1989) tarafından kompozit çarpışma kutularla ilgili yapılan çalışmalar referans alınarak gevrek malzeme davranışı sergileyen kompozit çarpışma kutularındaki hasar mekanizmaları enine kesme veya parçalanma, gevrek kırılma, lamina bükülmesi veya yayılması, yerel burkulma veya ilerlemeli katlanma olmak üzere dört farklı grupta incelenebilmektedir

Enine kesme veya parçalanma modu, bir veya birden fazla kısa tabaka içi ve boyuna çatlaklara sahip lamina demetlerinin bir kısmını oluşturan kama biçimli bir laminatın kesiti

ile karakterize edilir. Temel enerji sönümleme mekanizması lamina demetlerinin kırılmasıdır. Kırılma sonrası parçalanma meydana geldiğinde, boyuna ve tabakalar arası çatlakların uzunluğu laminanınkinden daha kısadır. Gevrek kırılmalı hasar modunda ise temel enerji sönümleme mekanizması enine kesme hasar moduyla aynı olan lamina demetlerinin ezilme sırasındaki kırılma durumu karakterize edilir.

Lamina bükülmesi hasar modunda çok uzun tabakalar arası, tabaka içi ve elyaflara paralel çatlaklarla karakterize edilir, ancak lamina demetleri kırılmaz. Temel enerji sönümleme mekanizması çatlak büyümesidir. Üç tür çatlak kendine özgü modlarda oluşup büyürken, lamina demetleri önemli eğilme deformasyonu sergiler ancak kırılmazlar. Tabakalar arası, tabaka içi ve elyafa paralel çatlakların uzunlukları genellikle laminat kalınlığının on katından daha büyüktür. Lamina demetlerinin fazla uzun olması ve kırılmalarının az olması yetersiz bir ezilme modu ile sonuçlanır.

Yerel burkulma, malzemenin plastik deformasyonu yoluyla yerel burkulmaların oluşması ile karakterize edilir. Hem gevrek hem de sünek elyaf takviyeli kompozit malzemeler bu hasar modunu sergilenmektedir. Sünek elyaf takviyeli kompozit malzemeler, ezilmeden sonra bozulmamış kaldığı için ezilme sonrası bütünlüğünü korur. Ezilme sonrası bütünlük, elyaf ve matrisin plastik davranış sergilemesine ilave olarak elyaf ayrılmasının bir sonucudur. Gevrek elyaf takviyeli kompozitler, sadece tabakalar arası gerilmeler matris mukavemetine kıyasla küçük olması, matrisin elyaftan daha yüksek kırılma şekil değiştirmesine sahip olması ve matrisin yüksek gerilme altında plastik deformasyon sergilemesi durumunda yerel burkulmalı ezilme hasar davranışı sergiler. Elyafın ve/veya matrisin plastik akması gibi hasar mekanizmaları, ilerlemeli katlanma sırasında kırılma şeklinde meydana gelir. Yerel burkulma çarpışma kutuları için genellikle etkisiz bir ezilme hasar modudur. Yerel burkulmalı hasar modunu kontrol eden ezilme hasar mekanizması matris malzemenin doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışıyla ilişkilidir. Malzeme gevrekse, yerel burkulma sadece matris malzemenin yüksek hasar şekil değiştirmesine sahip olması durumunda meydana gelir. Sünek malzemelerin yerel burkulmalı ezilme mekanizması ise elyaf veya matris malzemenin rijitliğine bağlıdır.

1.6. Kompozit Yapılarda Hasarın Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Belirlenmesi

Kompozit yapılarda hasarın teorik yaklaşımlarla modellenmesi kapalı formdaki analitik çözümlerin uygulanabilirliğinin sınırlı olması nedeniyle karmaşıktır. Sonlu

elemanlar (SE) yazılımları sayesinde kompozit yapılarda hasar davranışı gerçek sınır şartları ve yükler altında sayısal olarak modellenabilmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile araştırmacılar optimizasyon çalışmaları yaparak tasarımda ilave gerekli olan bileşenleri belirleyebilmektedirler (Kreculj ve diğ., 2013). Kompozit yapılarda çarpışma, ezilme ve darbe yükleri altında meydana gelen hasarın modellenmesinde farklı malzeme modelleri kullanılmaktadır. Bu malzeme modelleri sürekli ortam hasar mekaniğine dayalı hasar teorilerini içerirler. Sürekli ortam hasar mekaniği metaller ve kompozitler dahil değişik malzemelere uygulanabilmektedir (Xiao, 2009). Sürekli ortam hasar mekaniğini esas alan orta ölçekli modelleri kullanarak, LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı için yapısal makro seviyede hasarı içeren malzeme modellerini tanımlamak mümkündür (Kreculj ve diğ., 2013). Sonlu elemanlar modelinde kabuk (Shell) elemanların kullanılması analiz süresinin azaltılması bakımından büyük avantaj sağlar.

Tablo1.1. LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımında yer alan kompozit malzeme hasar modelleri (Andersson ve Liedberg, 2014).

Malzeme Modeli	Hasar Kriteri	Eleman Tipi
MAT22	İndirgenmiş Chang-Chang	İnce kabuk, kalın kabuk, katı
MAT54/55	Chang-Chang/Tsai-Wu	İnce kabuk, kalın kabuk, katı
MAT58	Geliştirilmiş Hashin	İnce kabuk, kalın kabuk
MAT59	Geliştirilmiş Hashin	İnce kabuk, kalın kabuk, katı, SPH
MAT116/117/118	-	İnce kabuk
MAT158	Geliştirilmiş Hashin	İnce kabuk, kalın kabuk
MAT161/162	Hashin	İnce kabuk, kalın kabuk, katı
MAT261	Pinho	İnce kabuk, kalın kabuk
MAT262	Camanho	İnce kabuk, kalın kabuk

Bu tez çalışması kapsamında üretilen kompozit yapıların ezilme ve darbe yükü altında hasar davranışını sayısal olarak modellemek için LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Mevcut yazılımda metalik malzemelerin mekanik davranışını modellemek için çok sayıda hasar modeli kullanılırken kompozit malzemeler için kısıtlı sayıda hasar modelleri mevcuttur (Tablo 1.1). MAT22 kompozit malzeme hasar modeli Chang-Chang tarafından geliştirilen ve kompozit malzemeler için LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımına uygulanan ilk hasar modelidir. Bu model katı (solid) ve plak veya kabuk (Shell) elemanlarda kullanılabilmektedir. Kullanıcı tanımlı integrasyon kuralı ile birlikte plak kalınlığı boyunca

bu malzemeye ilgili sabitler değiştirilebilmektedir. MAT54/55 kompozit malzeme hasar modeli MAT22 kompozit malzeme hasar modelinin geliştirilmiş versiyonlarıdır. MAT58 kompozit malzeme hasar modeli şekil değiştirme hasar yüzey esaslı olup tek yönlü tabaka, örgülü elyaf ve tabakalı kompozit malzemelerin modellenmesi için kullanılabilmektedir. Hashin hasar kriterini kullanan bu model farklı kompozit türleri için kullanılabilmektedir (Chatla, 2012). MAT161 kompozit malzeme hasar modeli tabakalı kompozitlerin ilerlemeli hasar davranışının modellenenbilme kabiliyetini arttırmak için üç boyutlu gerilme alanına dayalı bir kompozit tabaka modeli olarak geliştirilmiştir. Bu hasar modeli tüm şartlar altında kompozit malzemedeki elyaf hasarı, matris hasarı ve delemantasyon davranışını etkin bir şekilde analiz etmek için kullanılabilmektedir. Bunun yanında bu modelle geniş aralıktaki (düşük, orta ve yüksek hızlar) çarpma problemleri için kompozit yapılarda hasar davranışı başarılı bir şekilde karakterize edilebilmektedir (Yen, 2008). MAT162 kompozit malzeme hasar modeli ile balistik çarpmalarda kompozit yapıdaki elyaf kırılması, ezilme, matris çatlaması ve delemantasyon davranışı ortaya belirlenebilmektedir (Deka ve Vaidya, 2008).

Kompozit yapılarda değişik türden (çarpma veya çarpışma, ezilme, darbe, vs.) yükleme şartları altındaki hasarın durumunu belirlemek için mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan MAT54/55 kompozit malzeme hasar modeli tercih edilmektedir. MAT54 kompozit malzeme hasar modeli Chang-Chang matris hasar kriterini kullanırken MAT55 kompozit malzeme hasar modeli Tsai-Wu matris hasar kriterini kullanır. Her iki malzeme modelinin formülasyonları birbirine çok yakın olup MAT54 kompozit malzeme hasar modeli elyaf malzeme için çekme ve basma hasar kriterini kullanırken MAT55 kompozit malzeme hasar modeli matris malzeme için çekme ve basma kriterini kullanmaktadır. Kullanıcı tanımlı integrasyon kuralı ile birlikte plak kalınlığı boyunca malzeme modeliyle ilgili sabitler değiştirilebilmektedir. MAT54 kompozit malzeme hasar modeli kompozit yapılarda çarpışma, ezilme ve darbe gibi yükler altında meydana gelen hasarı modelleyebilmek için geliştirilmiştir. Bu hasar modeli, Chang-Chang hasar kriterini kullanarak hasarın meydana gelmediği durumda ortotropik ve doğrusal elastik davranış göstermektedir (Chatla, 2012). Hasarın meydana gelmesi durumunda ise kompozit malzemede doğrusal olmayan durumlara geçiş yapmaktadır. Chang-Chang hasar kriteri, çarpışma kutusunun çarpması sırasında duvardaki gerilme, şekil değiştirme, bozulmayı hesaba katar. Elemandaki hasar değişkeni $1'$ e eşit olduğunda malzeme hasara uğrar ve gerilme bileşenleri sıfıra indirgenir (Chang ve Chang, 1987). Kompozit laminattaki tüm tabakaları hasar gören elemanı hasar kriterini kullanarak modelden siler (Hosseinzadeh ve

diğ., 2006; Feraboli ve diğ., 2010). MAT54 kompozit malzeme hasar modeli, boylamasına yöndeki çekme durumu için Denklem 3.13, boylamasına yöndeki basma durumu için Denklem 3.14, enine yöndeki çekme durumu için Denklem 3.15 ve enine yöndeki basma durumu için Denklem 3.16' yı kullanmaktadır. Denklem 3.13' te verilen eşitlikte, $\beta=0$ durumu için düzlemsel maksimum kayma gerilmesi kriteri, $\beta=1$ durumu için Hashin hasar kriteri söz konusu olmaktadır (Andersson ve Liedberg, 2014).

Boylamasına yönde çekme hasarı ($\sigma_1 < 0$):

$$e_f^2 = \left(\frac{\sigma_1}{X_t}\right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{12}}{S_c}\right)^2 - 1 \quad \begin{cases} \geq 0, \text{hasarlı} \\ < 0, \text{elastik} \end{cases} \quad (3.13)$$

Hasar durumunda, $E_1 = E_2 = G_{12} = v_{12} = 0$

Boylamasına yönde basma hasarı ($\sigma_1 < 0$):

$$e_c^2 = \left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 - 1 \quad \begin{cases} \geq 0, \text{hasarlı} \\ < 0, \text{elastik} \end{cases} \quad (3.14)$$

Hasar durumunda, $E_1 = v_{21} = v_{12} = 0$

Enine yönde çekme hasarı ($\sigma_2 > 0$):

$$e_m^2 = \left(\frac{\sigma_2}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_c}\right)^2 - 1 \quad \begin{cases} \geq 0, \text{hasarlı} \\ < 0, \text{elastik} \end{cases} \quad (3.15)$$

Hasar durumunda, $E_2 = G_{12} = v_{12} = v_{21} = 0$

Enine yönde basma hasarı ($\sigma_2 < 0$):

$$e_d^2 = \left(\frac{\sigma_2}{2S_c}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_2}{Y_c} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_c}\right)^2 - 1 \quad \begin{cases} \geq 0, \text{hasarlı} \\ < 0, \text{elastik} \end{cases} \quad (3.16)$$

Hasar durumunda, $E_2 = G_{12} = v_{12} = 0$

Yukarıdaki denklemlerde e_f , e_c , e_m ve e_d hasarın başlamasını temsil eden değişkenlerdir. Bu değişkenler, sırasıyla boylamasına ve enine yöndeki çekme ve basma durumunda hasarı başlatan hasar kriterleridir. σ_1 ve σ_2 , sırasıyla boylamasına ve enine yöndeki çekme gerilmelerini temsil ederken σ_{12} düzlemsel kayma gerilmesidir. β , boylamasına çekme durumunda kayma etkisini açık (explicit) yöntemle tanımlamak için kullanılan kayma gerilmesi

ağırlıklaştırma faktördür.

MAT54 kompozit malzeme hasar modeli, mikro burkulmaya karşı komşu elyaflarda matris malzeme etkinliğinin azalmasının neden olduğu matris hasarı için laminanın (X_C) elyaf yönü basma mukavemetindeki azalmayı hesaba katmaktadır. Bu durum, YCFAC olarak adlandırılan indirgeme faktörü ile açıklanmıştır. Yani enine yöndeki basma hasarından sonra boylamasına yönündeki basma mukavemeti değeri $X_C = YCFAC \cdot Y_C'$ ye düşürülür. Diğer tüm malzeme hasar modellerinde olduğu gibi MAT54 kompozit malzeme hasar modeli de hasar parametreleri içerir. Bu hasar parametreleri eleman silme, yumuşatma (SOFT) ve hasar başlangıcı sonrası malzeme davranışını karakterize eden parametreler olmak üzere üç grupta sınıflandırılmıştır. Birinci grup parametreleri, zaman adımı veya şekil değiştirme tabanlı kriterler gibi bazı koşulların sağlanması üzerine aşırı derecede bozulmuş elemanların modelden otomatik olarak uzaklaştırılmasını kontrol eder. Kalibrasyon gerektiren parametre sayısını azaltmak için mevcut durumdaki hasar kriterlerinden sadece ikisi kullanılabilir. Bunlardan biri minimum zaman adımına (TFAIL) bağlı iken diğeri bir elemanın etkin hasar şekil değiştirmesine (EFS) dayanmaktadır. Kompozit tabakaların tamamının hasar görmesi durumunda ilgili eleman modelden silinir. Silinen elemanlara düğümleri komşu olan elemanlar çarpışma elemanı olur. TFAIL hasar kriteri ve SOFT parametresi ile bu elemanların mukavemeti azaltılır (Feraboli ve diğ., 2017).

Sonlu elemanlar modeli kompozit kabuk elemanların hasarıyla ilgili doğru çözümü elde etmek için rijitlik esaslı (IHQ = 4) hourglass kontrolü kullanılır. Katı elemanlarda şok dalgalarını yaymada gerekli olan yığın viskoziteyi elde etmek için Flanagan-Belytschko rijitlik esaslı (IHQ = 5) hourglass kontrolü kullanılır. Rijitlik esaslı hourglass kontrolleri fiziksel olmayan deformasyon modlarından kaçınmak için hourglass modlarının neden olduğu düğüm yer değiştirmesi ile orantılı olan hourglass kuvvetlerini kullanılır (Zhang ve Zhou., 2007). Hourglass kuvvetleri, hourglass modları olarak bilinen elemanların gerçekçi olmayan düğüm yer değiştirmelerini ve eğilmeleri düzeltmek için modele ilave edilen kuvvetlerdir.

Kompozit yapıların tabakaları arasında meydana gelen ayrılmayı modelleyebilmek için LS-DYNA yazılımında yer alan deleminasyon hasar esaslı temas algoritmalarının yanında MAT138, MAT184, MAT185, MAT186 ve MAT240 gibi deleminasyon hasarı içeren malzeme modelleri de kullanılmaktadır (Doğan ve diğ., 2012). LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımında tabakalı kompozit yapı modeli oluşturmak için son zamanlarda geliştirilen PART COMPOSITE özelliğinin kullanımı uygulamada kolaylıklar

sağlamaktadır. Bu özellik ile kompozit yapının her bir tabakasının kalınlığı, hasar modeli, eleman formülasyonu, elyaf açısı ve dizilim sırası tanımlanabilmektedir. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan kompozit malzemenin hasar modeline göre ince kabuk, kalın kabuk, katı ve SPH eleman tanımlaması yapılabilmektedir. Her eleman tipi, kendi içerisinde çok sayıda eleman formülasyonuna sahiptir (Muhflahi ve diğ., 2014).

1.7. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tezin amacı, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerden oluşmuş yeni yapılar tasarlamak, üretmek ve bu yapıların makro-mikro hasar davranışlarını deneysel ve sayısal olarak ortaya çıkarmaktır. Bu amaç için ilk olarak, havacılık alanında yaygın olarak kullanılan KETP kompozit ve CETP kompozit malzemelerin yüksek hızlı katı parçacık etkisi altındaki mikro yapıdaki hasar (erozyon) davranışlarının ortaya çıkarılması ve bu malzemelerin katı parçacık çarpmasına maruz kalan yüzeylerde erozyon direncinin iyileştirilmesiyle ilgili literatüre yeni bilgiler kazandırılmıştır. İkinci olarak, çekirdek yapı tasarımı açısından çeşitli geometrik parametrelere sahip termoplastik çekirdek ve KETP kompozit yüzey plakalarından oluşan kompozit sandviç panellerin yenilikçi bir yaklaşımla üretilerek düşük enerjili darbe etkisi altında enerji sönümleme ve makro yapıdaki hasar davranışları ortaya çıkarılmıştır. Son olarak, havacılık ve otomotiv endüstrisinde yaygın kullanım alanı olan çarpışma kutularını yenilikçi bir yaklaşımla birbirinden farklı tasarımlara göre KETP kompozit malzemedan üretilip bu çarpışma kutularının statik basma yükü altında ezilme karakteristikleri ve makro yapıdaki hasar davranışları belirlenmiştir.

Bu tez çalışması üç kısımdan oluşmuştur. Birinci kısımda, ilk olarak KETP ve CETP kompozit plakaları vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiştir. KETP kompozit, CETP kompozit, ticari 3M-8663 kodlu poliüretan (PU) bant, SS304 kodlu paslanmaz çelik ve saf nikel (Ni) malzemelerin farklı çarpma açıları (20° , 30° , 45° , 60° ve 90°) ve farklı çarpma hızları (70, 110, 150 ve 190 m/s) şartları altında katı parçacık erozyon testleri gerçekleştirilmiş ve bu malzemelerin katı parçacık erozyonuyla ilgili kurulan sayısal modellerin doğrulaması yapılmıştır. Model doğrulama işleminden sonra, yukarıda bahsi geçen malzemelerin bir helikopter rotor pali aşınma kalkanı üzerindeki katı parçacık erozyon davranışları, 0° hücum açısı ve farklı çarpma hızlarında (110, 150, 190 ve 230 m/s) sayısal olarak belirlenmiştir. Ayrıca, kompozit yüzeylerden oluşan helikopter rotor palinin aşınma

kalkanında hibrit PU bant/SS304 ve PU bant/Ni malzemeli yüzeyler kullanımının katı parçacık erozyon direncine etkisi sayısal olarak incelenmiştir.

İkinci kısımda ise vakum infüzyon yöntemi ile KETP kompozit yüzey plakalar, ABS malzeme kullanılarak 3D yazıcı ile düzlem içi ve düzlem dışı yönlü hücre desenli bal peteği ve ökzetik çekirdek yapılar üretilmiştir. ABS malzemeli termoplastik bal peteği ve ökzetik desenli çekirdek yapılar KETP kompozit yüzey plakalarıyla birleştirilerek yeni tür kompozit sandviç paneller imal edilmiştir. İmal edilen kompozit sandviç panellerin üç farklı darbe enerjisi (20 J, 40 J ve 70 J) altındaki enerji sönümleme ve hasar davranışları deneysel ve sayısal belirlenmiştir.

Üçüncü kısımda, içi boş ve hücrel (kare, altıgen) dolgulu kare, altıgen ve silindir dış duvarlı olarak tasarlanan KETP kompozit çarpışma kutuları el yatırılmalı vakum torbalama yöntemiyle üretilmiştir. İçi boş ve hücrel dolgulu olarak üretilen kompozit çarpışma kutularının statik basma yükü altındaki ezilme karakteristikleri (ortalama ezilme kuvveti, ezilme kuvveti verimi, enerji sönümleme, özgül enerji sönümleme) ve hasar durumları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışması kapsamında kompozit plakalar, kompozit sandviç paneller ve kompozit çarpışma kutuları üretilmiştir. Üretilen kompozit yapıların makro ve mikro hasar davranışları deneysel ve sayısal olarak iki kısımda incelenmiştir.

2.1. Deneysel Çalışmalar

Çalışmanın bu aşamasında, ilk olarak, kompozit yapıların üretimleri gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak, CETP kompozit, KETP kompozit, ticari 3M-8663 kodlu PU bant, ticari SS304 paslanmaz çelik, ticari saf nikel malzemeli numunelere katı parçacık erozyon testleri yapılmıştır. Üçüncü olarak, düzlem içi ve düzlem dışı yönlü olarak üretilen bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli CETP kompozit yüzey plakalı sandviç panellere düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır. Dördüncü olarak, içi boş ve hücreli dolgu kare, altıgen ve silindirik dış duvarlı olarak üretilen kompozit çarpışma kutuları için ezilme testleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak, üretilen kompozit yapılarda kullanılan malzemelerin mekanik özellik ve hasar parametrelerini belirlemek için ilgili malzemelerin mekanik testleri yapılmıştır.

2.1.1. Kompozit Yapıların Üretimi

Katı parçacık erozyon testlerindeki kompozit plakalar ve düşük hızlı darbe testlerindeki kompozit sandviç panellerin yüzey plakaları vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Ezilme testlerinde kullanılan kompozit çarpışma kutuları ise el yatırmalı vakum torbalama yöntemi ile üretilmiştir.

2.1.1.1. Kompozit Plakaların Vakum İnfüzyon Yöntemi ile Üretimi

Kompozit plakaların üretimi için tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen ısıtma sistemli vakum infüzyon düzeneği Şekil 2.1' de gösterilmiştir. Bu düzenek sayesinde, üretim sırasında kompozit plakaların kürleştirme sıcaklığı 100° C' ye kadar yükseltilebilmektedir. Katı parçacık erozyon testleri için kullanılan kompozit plakaların üretimi için elyaf takviye

malzemesi olarak 45 cm x 45 cm ebatlarında kesilmiş 10 adet düzlemsel 3K örgülü cam (200 g/m²) ve 8 adet düzlemsel 3K örgülü karbon (200 g/m²) kumaşlar kullanılmıştır. Matris malzeme olarak LR 285 LH 287 reçine-sertleştirici (sertleştirici ağırlık oranı %40) seti tercih edilmiştir. Kompozit plakaların vakum infüzyon yöntemiyle üretimi için aşağıdaki işlem adımları takip edilmiştir:

- 1) İlk olarak, camın yüzeyi alkollü bir bezle iyice temizlenir.
- 2) Üretimi yapılacak olan kompozit plakayı üretimden sonra cam yüzeyinden kolayca ayırmak için temizlenen yüzey üzerine plakanın kenar uzunluğundan 20 mm fazla olacak şekilde teflon kumaş yerleştirilir.
- 3) Reçinenin elyaf kumaşların tamamını ıslatması için teflon kumaş üzerine delikli naylon serilir.
- 4) Teflon kumaşın çevresi boyunca kenarlarına en az 20 mm mesafe olacak şekilde sızdırmazlık bandı cam yüzeyine yapıştırılır.
- 5) Plakanın alt yüzeyinde pürüzlü yüzey oluşturmak için delikli naylon üzerine soyma kumaşı yerleştirilir.
- 6) Elyaf kumaşlar uygun ölçülerde kesilip elyaf hacim oranı hesabı için toplam ağırlıkları hassas terazide ölçüldükten sonra soyma kumaşı üzerine üst üste serilir.

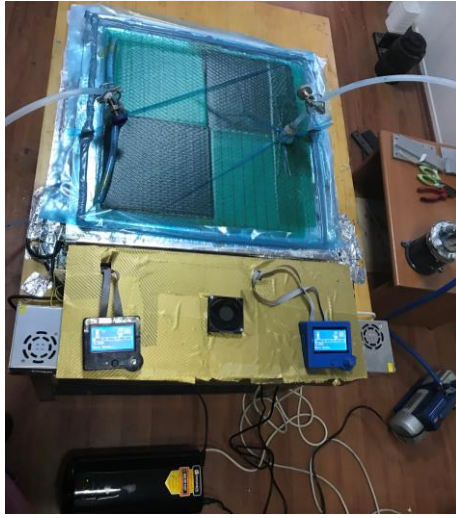


Şekil 2.1. Kompozit plakaların üretimi için imal edilen ısıtma sistemli vakum infüzyon düzeneğinin genel görünüşü

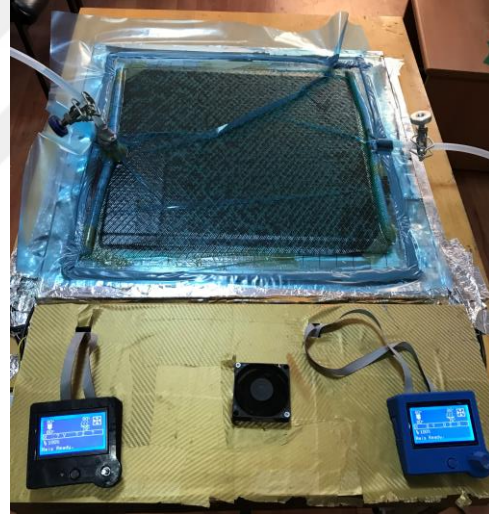
- 7) Plakanın üst yüzeyinde pürüzlü yüzey oluşturmak için en üst sıradaki elyaf kumaş üzerine soyma kumaşı yerleştirilir.
- 8) Elyaf kumaşlara reçineyi emdirmek için soyma kumaşı üzerine infüzyon filesi serilir.

- 9) Vakum pompasına giden hat ve reçine kabından gelen hat için elyaf kumaşların her iki tarafına karşılıklı olarak spiral hortumlar kumaş kenarları boyunca yerleştirilir.
- 10) Spiral hortumlara reçine hattı ve vakum hattından gelen boruların bağlantısını sağlamak için spiral hortumların orta kısmına T şeklinde aparatlar takılır.
- 11) Vakum naylonu, sızdırmazlık bantların kenarlarına 50 mm mesafe olacak şekilde uygun boyutlarda kesilir ve infüzyon filesinin üzerine yerleştirilir. Sızdırmazlık bant üzerine vakum naylonunu yapıştırırken spiral hortum bağlantı yerlerinde vakuma alma işlemi sırasında oluşabilecek sıkışmadan dolayı vakum naylonunun zarar görmesini engellemek için ilave sızdırmazlık bant parçaları kullanılır. Bu sayede, vakum naylonunun spiral hortuma yakın olan taraflarında kulaklar oluşturularak vakum naylonunun bollaştırılması sağlanır.
- 12) Reçine hattı tarafından gelen reçine akışını kontrol etmek için reçine hattı borusuyla spiral hortumun birleştiği yere kısma vanası Şekil 2.2' de görüldüğü gibi takılır. Aynı şekilde, vakum hattı tarafında vakuma alma işleminden sonra havanın dışarı kaçmasını önlemek için spiral hortuma yakın olan tarafa kısma vanası yerleştirilir.
- 13) Reçine hattı tarafındaki vana kapatılarak vakum pompası çalıştırılmış ve vakum naylonu altında kalan boşluğun havası alınır. Hava alma işleminden sonra vakum pompası kapatılarak sızdırmazlık bandının naylona yapıştırıldığı yerlerde kaçak olup olmadığını tespit etmek için 5 dakika beklenerek pompanın basınç göstergesinde basınç kontrol edilir. Basınçta düşme olması durumunda sızdırmazlık bandının üzerine yapıştırılan naylonun kaçak olan yerleri parmak ile bastırılarak kaçak önlenir ve tekrardan vakuma alma işlemi yapılarak vakum naylonu yapışma kenarlarından kaçağın olmadığından emin olana kadar bu işlem devam ettirilir.
- 14) Vakum pompası hattı tarafındaki vana kapatılarak vakum infüzyon sistemi üretime hazır hale getirilir.
- 15) Elyaf kumaşların toplam ağırlığının iki katı olacak şekilde uygun oranda sertleştiricisiyle karıştırılan reçine plastik bir kap içerisine konularak hassas terazide tartılır. Reçine içerisindeki havayı almak için 15 dakika süre boyunca vakum fırını içerisinde hava alma işlemi gerçekleştirilir.

- 16) Hava alma işlemi tamamlandıktan sonra reçine hattına bağlı olan hortum reçine kabı içerisine daldırılır.
- 17) Isıtma sistemi çalıştırılarak vakum naylonu altında kalan bölgenin sıcaklığı 50°C 'ye çıkarılır.
- 18) Vakum hattındaki vananın açılarak vakum pompasının çalıştırılmasından sonra reçine hattı tarafındaki vana açılmış ve elyaf kumaşlar içerisine reçine emdirilir.
- 19) Vakum pompası tarafındaki boru hattına reçine ulaşınca kadar elyaf kumaşlara reçine emdirme işlemine devam edilir. Reçine emdirme işlemi tamamlandıktan sonra reçine hattında bulunan vana kapatıldıktan sonra vakum hattındaki vana yarım saat daha açık tutularak kapatılır ve pompanın çalışması durdurulur.
- 20) Kompozit plakanın kürleştirme işlemi için 15 saat boyunca plakanın sıcaklığı 50°C 'de sabit tutulur. Daha sonra plaka sıcaklığı 80°C 'ye ayarlanarak 6 saat daha kürleştirme işlemine devam edilir.



(a)

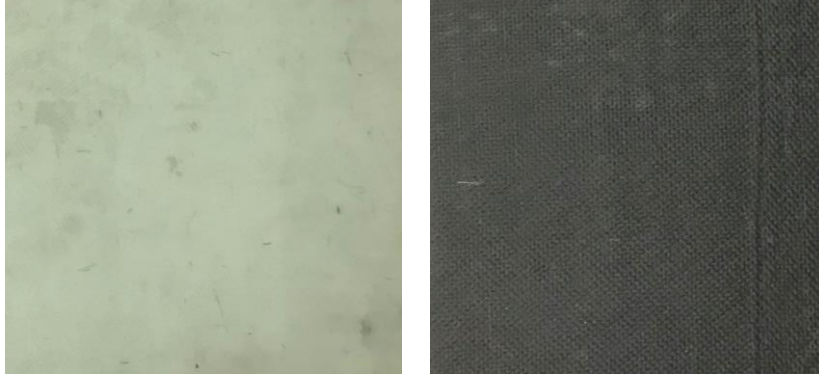


(b)

Şekil 2.2. Isıtma sistemli vakum infüzyon düzeneğinde farklı türden kompozit plakaların üretim biçimleri: (a) 20 cm x 20 cm ebatlarındaki kompozit plakaların aynı şartlar altında üretimi, (b) 40 cm x 40 cm ebatlarındaki kompozit plakanın tek başına üretimi

- 21) Kürleştirme işlemi tamamlandıktan sonra ısıtma sistemi kapatılır ve kompozit plakanın soğuması için 2 saat daha beklenir.
- 22) Vakum naylonu ve hortumlar yerinden söküldükten sonra kompozit plaka üzerindeki soyma kumaşı, infüzyon filesi, delikli naylon ve teflon kumaş ayrılır.

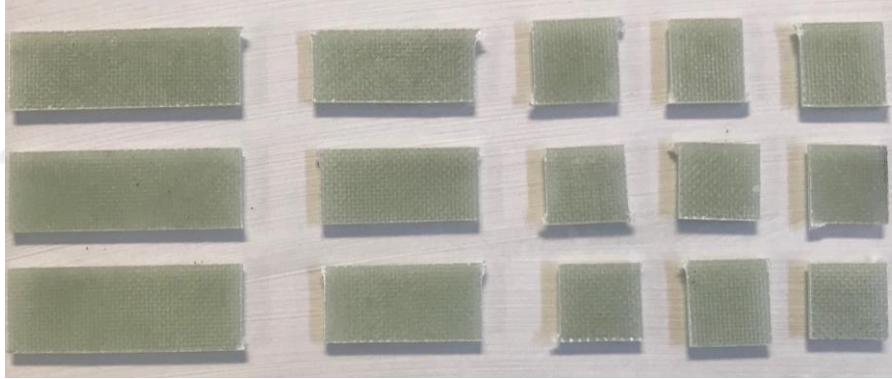
- 23) Üretimi yapılan kompozit plakanın kenarlarındaki fazlalık kısımlar kompozit kesme taşıyla düzgün bir şekilde kesilerek atılır (Şekil 2.3).



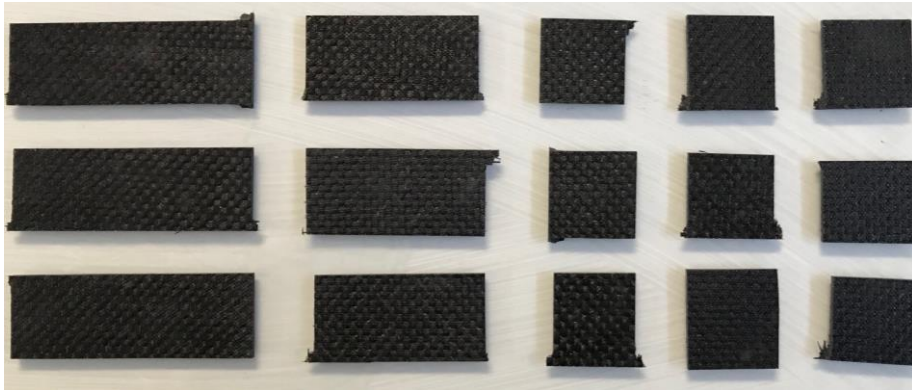
(a)

(b)

Şekil 2.3. Vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretilen kompozit plakalar:
(a) CETP kompozit plaka, (b) KETP kompozit plaka



(a)



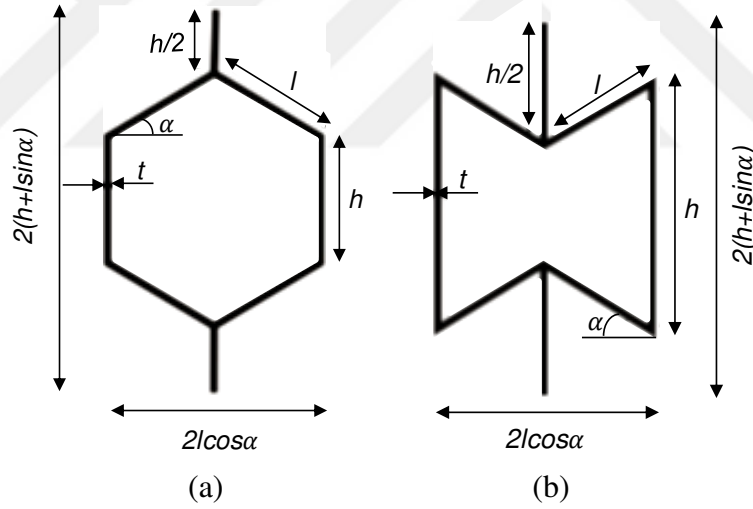
(b)

Şekil 2.4. Üretilen kompozit plakalardan kesilen katı parçacık erozyon test numuneleri: (a) CETP kompozit numuneler, (b) KETP kompozit numuneler

- 24) Üretilen kompozit plakalar daha sonra katı parçacık erozyon testlerinde kullanılacak numuneler için 25 mm x 25 mm (45°, 60° ve 90° çarpma açısı için), 25 mm x 50 mm (30° çarpma açısı için), 25 mm x 75 mm (20° çarpma açısı için) ebatlarında kesilir (Şekil 2.4).

2.1.1.2. Kompozit Sandviç Panellerin Üretimi

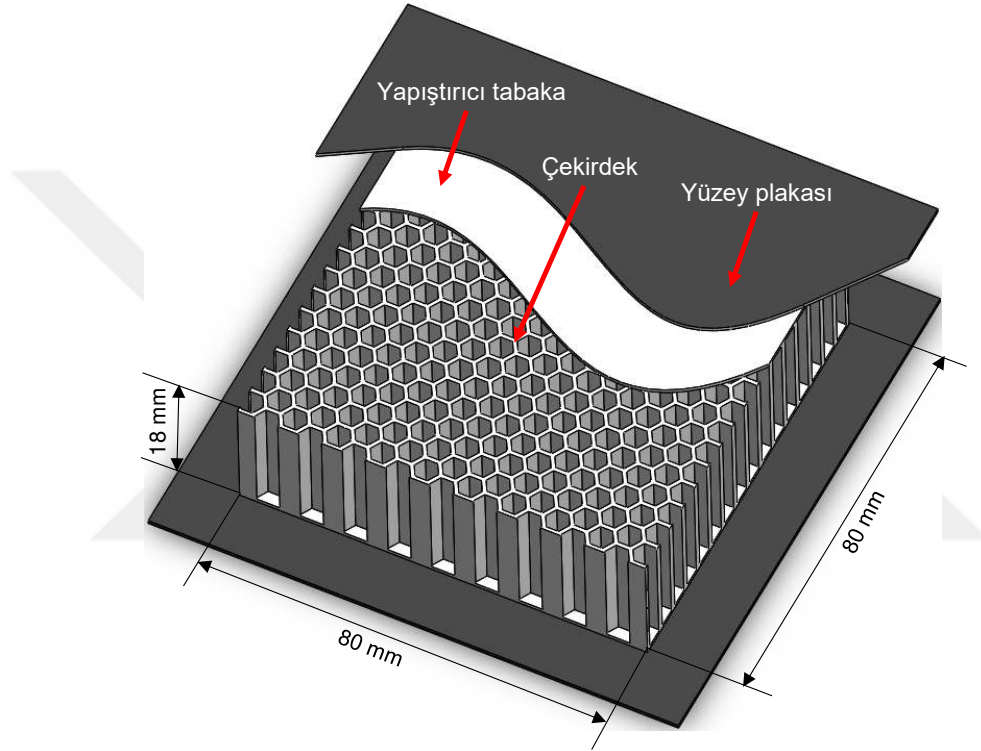
Bu tez çalışmasında, kompozit sandviç panellerin çekirdek yapıları bal peteği ve ökzetik desen geometrili olarak tasarlanmıştır. Bal peteği ve ökzetik desen geometrili çekirdek yapıların hücre kısımlarının boyutlandırması Şekil 2.5’ te gösterilmiştir. Kompozit sandviç panellerin çekirdek yapılarının üç boyutlu çizimleri bilgisayar destekli SOLIDWORKS çizim programında yapılmıştır.



Şekil 2.5. Kompozit sandviç panellerin çekirdek yapı hücrelerinin boyutlandırması: (a) Bal peteği hücre deseni, (b) Ökzetik hücre deseni

Kompozit sandviç panellerin alt ve üst kompozit yüzey plakalarının üretimi için vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır. Kompozit plakalar, 12K örgülü KETP kumaşlar (200 g/m²) kullanılarak 1 mm kalınlığında üretilmiştir. Kompozit sandviç panellerin çekirdek kısımların üretiminde ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) malzeme ile birlikte FDM tip 3D yazıcı teknolojisi kullanılmıştır. Kompozit yüzey plakaları ve

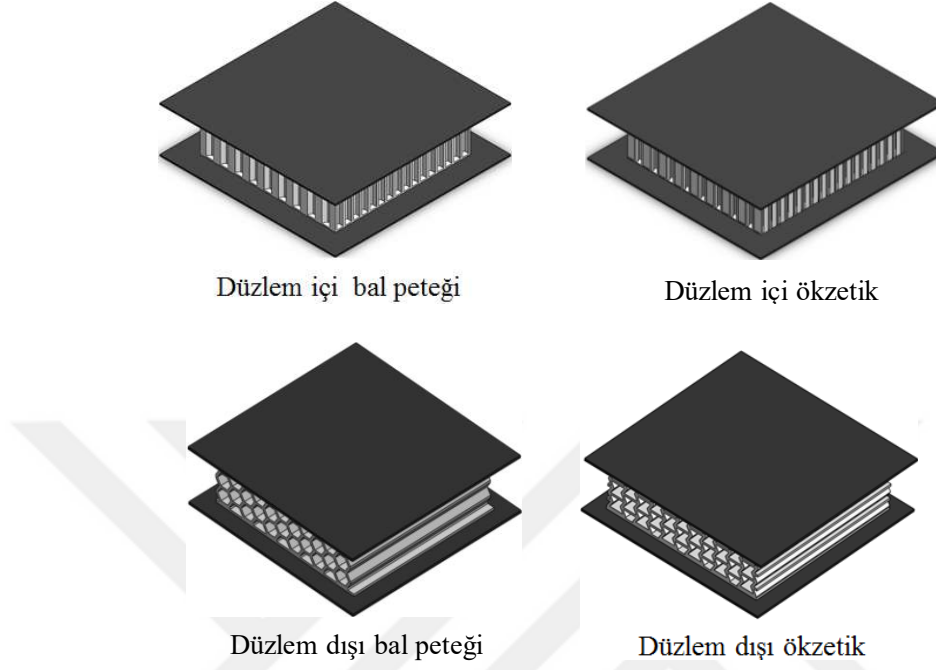
çekirdek yapı 3M™ Scotch-Weld™ 7260 kodlu epoksi yapıştırıcı film ile birbirine yapıştırılarak kompozit sandviç paneller imal edilmiştir. Epoksi film yapıştırıcı ile iyi bir yapışma sağlamak için sıcak presleme makinasıyla kompozit plakaların üzerine 120 °C sıcaklık altında iki saat süre boyunca sabit basınç uygulanmıştır. Yapıştırma işlemi tamamlandıktan sonra KETP kompozit yüzey plakalı sandviç paneller Şekil 2.6’ da gösterildiği gibi 80 mm x 80 mm boyutlarda kesilerek test numuneleri elde edilmiştir.



Şekil 2.6. Kompozit sandviç panel numunesinin geometrik konfigürasyonu ve boyutlandırması

Şekil 2.7’ de düzlem içi ve düzlem dışı çekirdek desen yönüne göre tasarımları gösterilen kompozit sandviç panellerin çekirdek yapılarının üretim parametreleri Tablo 2.1’ de verilmiştir. Bu çalışmada, kompozit sandviç panellerin çekirdek yapıları aynı bağıl yoğunluk yaklaşımına göre tasarlanmıştır. Bu yaklaşım, kompozit sandviç panellerin çekirdek desen türüne göre deformasyonunu karşılaştırmak için daha net bir gözlem sağlamaktadır (Hou ve diğ., 2018). Bal peteği ve ökzetik desenli çekirdek yapıların her bir hücresinin bağıl yoğunluğu (ρ_b) 0,193 olarak hesaplanmıştır. Çekirdek yapılarda kullanılan bal peteği ve ökzetik desenli hücrelerin (Zhang ve Yang, 2016; Ali ve Jun, 2014) bağıl yoğunluğunu hesaplamak için Denklem 2.1 kullanılmıştır.

$$\rho_b = \frac{t(h/l + 2)}{2 \cos \alpha l(h/l + \sin \alpha)} \quad (2.1)$$



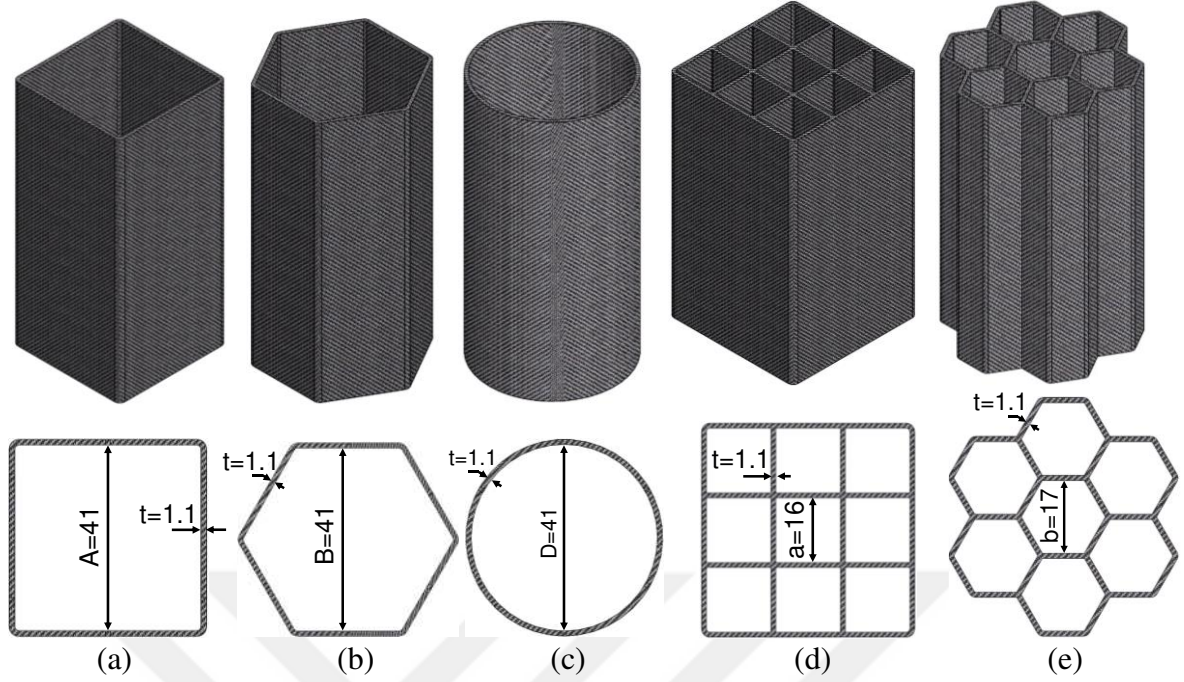
Şekil 2.7. Düzlem içi ve düzlem dışı çekirdek yönlü üretilen KETP yüzey plakalı kompozit sandviç panel numunelerin tasarımları

Tablo 2.1. Kompozit sandviç panellerin çekirdek hücrelerinin boyutlandırması

Geometrik parametreler	Bal peteği	Ökzetik
Hücre duvar yüksekliği (h) [mm]	6	10
Hücre duvar uzunluğu (l) [mm]	6	6
Hücre duvar kalınlığı (t) [mm]	1	0,635
Hücre duvar açısı (α) [°]	30	-30
Bağıl yoğunluk (ρ_b)	0,193	0,193

2.1.1.3. Kompozit Çarpışma Kutularının Vakum Torbalama Yöntemi ile Üretimi

Firma verilerine göre elyaf ağırlığı 600 g/m^2 ve elyaf hacim oranı %50 olan KETP kompozit prepeg kumaşlar kare, altıgen ve daire kesitli kalıplara sarılarak el yatırmalı vakum torbalama yöntemiyle Şekil 2.8’ de tasarımları gösterilen içi boş ince cidarlı ve hücreli geometriye sahip kompozit çarpışma kutuları üretilmiştir.



Şekil 2.8. KETP kompozit çarpışma kutularının tasarımları: (a) Kare, (b) Altıgen, c) Silindir, d) Kare hücreli ve e) Altıgen hücreli (Ölçü birimi: mm)

Kompozit çarpışma kutularının üretimi için aşağıda verilen işlem adımları takip edilmiştir:

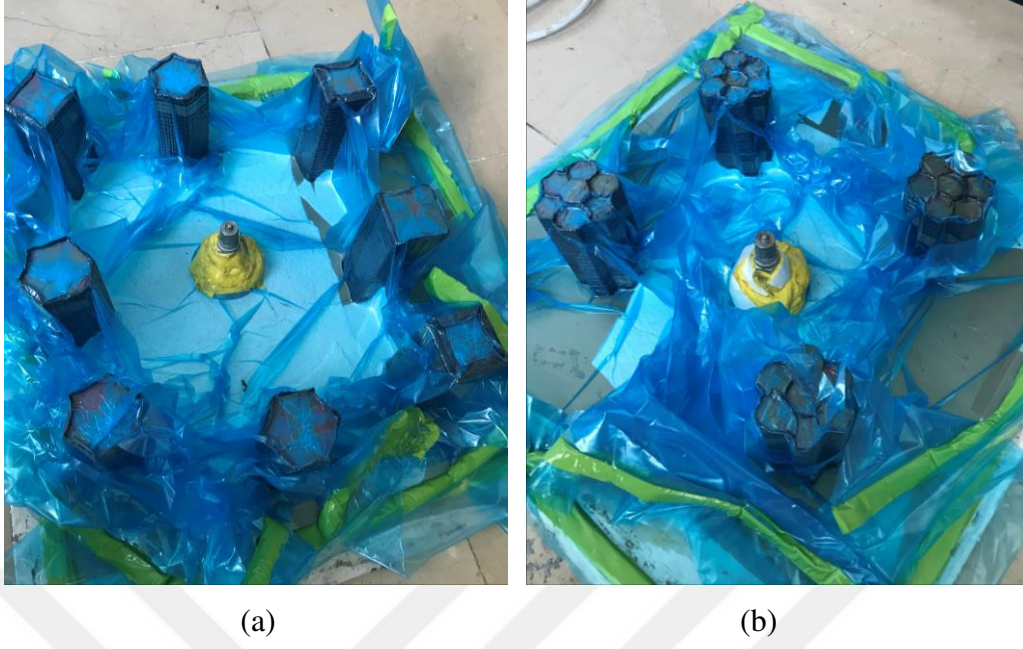
- 1) 50 cm x 50 cm x 1cm ebatlarında Al alaşım malzemeli plaka vakum torbalama tekniğine uygun olacak şekilde hazırlanır.
- 2) Üretimi yapılacak çarpışma kutusu kalıplarından üretim sonrasında kalıpları rahatça ayırmak için kalıplar üzerine 200° C sıcaklığa dayanıklı yaklaşık 0,1 mm kalınlığında ince ayırıcı film sarılır. Sarım işleminden sonra ince ayırıcı filmin kalıp yüzeylerine sıkıca tutunmasını sağlamak için naylonun açıkta kalan ucuna teflon bant yapıştırılır.
- 3) Dondurucu dolapta muhafaza edilen 120 cm genişliğinde rulo şeklindeki KETP prepreg kumaş dışarı çıkarılarak çözünmesi için 10 dakika beklenir. Bekleme işleminden sonra rulo şeklindeki KETP prepreg kumaştan 1 metre uzunluğunda parça kesilir. Kesilen kumaş parçası çarpışma kutusu numune kalıp yüksekliğine (10 cm) eşit olacak şekilde dilimlere ayrılır.
- 4) 10 cm genişliğinde dilimlere ayrılan KETP prepreg kumaş yüzeyinden koruyucu naylon çıkartılarak üretimi yapılacak çarpışma kutusunun kalıp yüzeylerine

gerdirilerek sarılır. Kalıplara sarım işlemi sırasında merdane prepreg kumaş üzerinde gezdirilerek üretim sırasında oluşabilecek potluk önlenir.

- 5) İnce cidarlı içi boş kare, altıgen ve silindirik duvarlı çarpışma kutularının yaklaşık 1,1 mm kalınlığında üretimi için sarım işlemi 2 katlı olarak yapılır. KETP prepreg kumaşın birim alana düşen ağırlığı ve elyaf hacim oranı değerleri üretici firmadan temin edilir.
- 6) Kare ve altıgen hücre dolgulu çarpışma kutularının hücresel kısımlarının üretimi için uygun ölçülerdeki KETP prepreg kumaşlar merdane ile gerdirilerek kalıplar etrafına tek kat sarılır. Kalıplara sarım işlemi tamamlandıktan sonra KETP prepreg kumaşın kalıplara sıkı bir şekilde tutunmasını sağlamak için kumaşlar 5 mm daha sarıldıktan sonra makasla kesilir.
- 7) Sarım işlemleri tamamlanan kalıpların dış yüzeyleri birbirine temas ettirilerek birleştirilir. Birleştirme işleminde ilk önce kare hücre dolgulu çarpışma kutusu için 9 adet, altıgen hücre dolgulu çarpışma kutusu için 7 adet KETP prepreg kumaş sarımlı kalıplar boşluksuz olarak bir arada tutulur Daha sonra birbirine yapışık olan kalıpların dışarda kalan kısımlarına çevresel olarak 1 kat daha KETP prepreg kumaşla sarım işlemi yapılır.
- 8) Numune kalıplarına KETP prepreg kumaş sarım işlemi tamamlandıktan sonra en dış tarafta kalan yüzeyler üzerine delikli naylon (mavi renkli) sarılır. Delikli naylonun KETP prepreg kumaş yüzeyine iyice tutunmasını sağlamak için naylonun açıkta kalan uçları teflon bantla kapatılır.
- 9) KETP prepreg kumaşla sarılmış kalıplar 50 cm x 50 cm x 1 cm ebatlarındaki Al alaşım malzemeli plakanın üzerinde 10 cm aralıklarla plaka kenarlarına 5 cm mesafe olacak şekilde çevresel olarak dizilir. Plakanın tam ortasına vakum aparatının alt kısmı yerleştirilir (Şekil 2.9).
- 10) 90 cm x 90 cm ebatlarında kesilen vakum naylonu üzerine çevresi boyunca kenarlardan 5 cm içeride kalacak şekilde 200° C sıcaklığa dayanıklı sarı renkli sızdırmazlık bant yapıştırılır.
- 11) Vakum naylonuna yapıştırılan sızdırmazlık bandının diğer yüzeyi Al alaşım plaka üzerine çevresi boyunca kenarlarından 1 cm içeride olacak şekilde yapıştırılır. Sızdırmazlık bandının plaka yüzeyine yapıştırılması işlemi sırasında vakum naylonuna bollaşma verilerek vakuma alma işlemi sırasında vakum naylonunun KETP prepreg kumaşların üzerine homojen bir şekilde baskı yapması

sağlanır. Bu yüzden, 10 cm aralıklarla yerleştirilen kalıpların arasındaki boşluk kısımlara karşılık gelen yerlerde vakum naylonuna yapıştırılmış olan sızdırmazlık bandın dışarda kalan yüzeyleri Şekil 2.9' da görüldüğü gibi 8 cm uzunlukta olacak şekilde birbirlerine temas ettirilerek kulaklar yapılır.

- 12) Vakum aparatının vakum naylonu altında kalan alt parçasına bağlantısı için vakum naylonunun tam ortası kesici uç ile 1 cm uzunluğunda enine ve boyuna yönde kesilir. Vakum aparatının bağlantısı yapıldıktan sonra naylonun kenarlarından hava kaçağını önlemek için aparatın yüzeyi ile naylon arasında kalan boşluk sızdırmazlık bandı ile kapatılır.
- 13) Vakum naylonunun plaka üzerine yapıştırılmasından sonra vakum pompası çalıştırılarak naylon altındaki hava tahliye edilir. Hava tahliye işleminden sonra pompa kapatılarak sızdırmazlık bandının yapıştırıldığı kısımlarda kaçak kontrolü yapılır. Kaçak kontrol işlemi için 5 dakika beklenerek vakum naylonunda bollaşma olup olmadığı el ile kontrol edilir. Hava kaçağı olmadığından emin olunduktan sonra vakum aparatına bağlanan hortum yerinden çıkarılır.
- 14) Vakum altındaki kalıplara sarılı çarpışma kutusu numuneleri Al alaşımlı plaka ile birlikte kürleştirme işlemi için etüv fırınına yerleştirilir. Fırına yerleştirme işleminden sonra kürleştirme sırasında sıcaklık artışı nedeniyle vakum naylonundaki bollaşmayı önlemek için vakum aparatı yerine takılarak vakum pompası tekrar çalıştırılır.
- 15) Kürleştirme işlemi için etüv fırını çalıştırılarak 80° C' de 30 dakika, 120° C' de 2 saat süre boyunca sıcaklık sabit tutulur.
- 16) Kürleştirme işlemi bittikten sonra vakum pompası ve fırın kapatılarak plaka ile birlikte fırından dışarı alınan kompozit çarpışma kutusu numuneleri kalıplara sarılı iken oda sıcaklığında soğumaya bırakılır.
- 17) Numunelerin soğuma işlemi bittikten sonra vakum naylonu plakadan ayrılır.
- 18) Üretimi gerçekleştirilen kompozit çarpışma kutusu numunelerinin dış yüzeyinde bulunan teflon bant ve delikli naylon ayrılır.
- 19) Kompozit çarpışma kutusu numuneleri Al alaşımlı plaka üzerinden alınır ve iç taraflarında yer alan kalıpların ayırma işlemi pres altında gerçekleştirilir.



Şekil 2.9. Vakuma alınmış kompozit çarpışma kutularının kürleştirme işlemiyle üretimi: (a) İçi boş kare, altıgen ve silindir dış duvarlı kompozit çarpışma kutularının üretimi, (b) Kompozit çarpışma kutularının dolgu kısımlarının üretimi

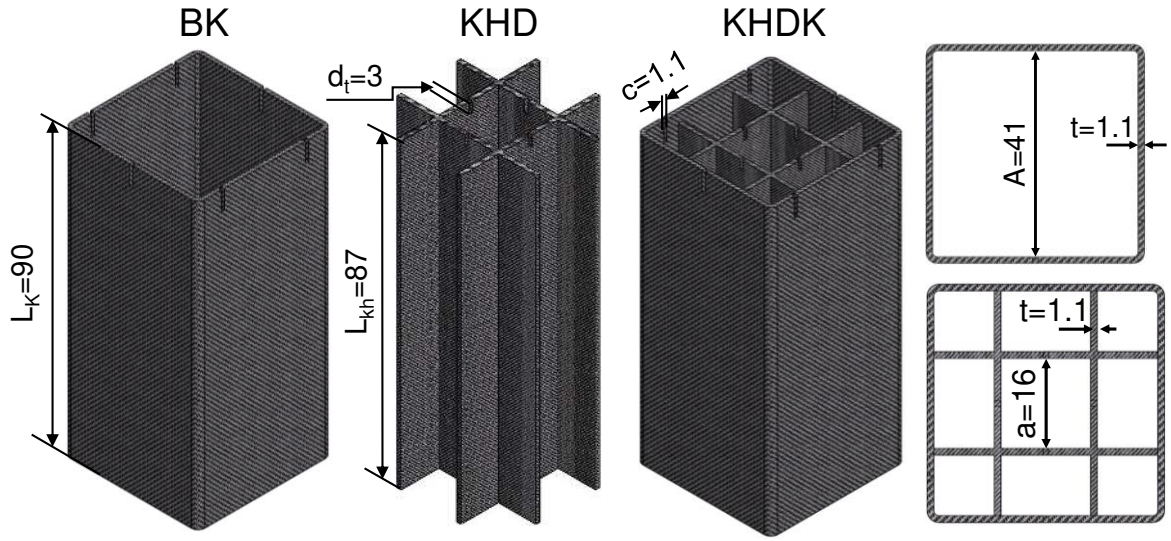
- 20) Üretimi yapılan çarpışma kutusu numunelerinin taban ve üst kısımları dairesel kompozit kesme taşıyla tıraşlanarak düzleştirilir (Şekil 2.10).
- 21) İçi boş kare, altıgen ve dairesel kesitli kompozit çarpışma kutusu numunelerinin içerisine kare ve altıgen hücreli dolgu kısımları temaslı olarak yerleştirilir. Bu işlem için kompozit çarpışma kutularının dış duvarları referans alınarak kare ve altıgen hücreli dolgu kısımlarının kesim yerleri ince uçlu keçeli kalem ile işaretlenir. Daha sonra dairesel kompozit kesme taşı ile kesim işlemi yapılarak kompozit kare ve altıgen hücreli dolgu kısımları pres altında içi kompozit çarpışma kutularının içerisine temaslı olarak yerleştirilir (Şekil 2.11).
- 22) Dremel ucuna bağlanan 1 mm kalınlığında 10 mm çaplı daire tipi kesici ağızla çarpışma kutusu duvarlarının üst kısımlarına Şekil 2.12, 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19 ve 2.20' de gösterildiği gibi 6 adet hasar tetikleyici kanallar açılır. Çarpışma kutularının dış duvarlarına 6 mm, iç taraftaki hücresel dolgu duvarlarının ortada kalan birleştirme kısımlarına ise 3 mm derinliğinde hasar tetikleyici (trigger) kanallar açılır.



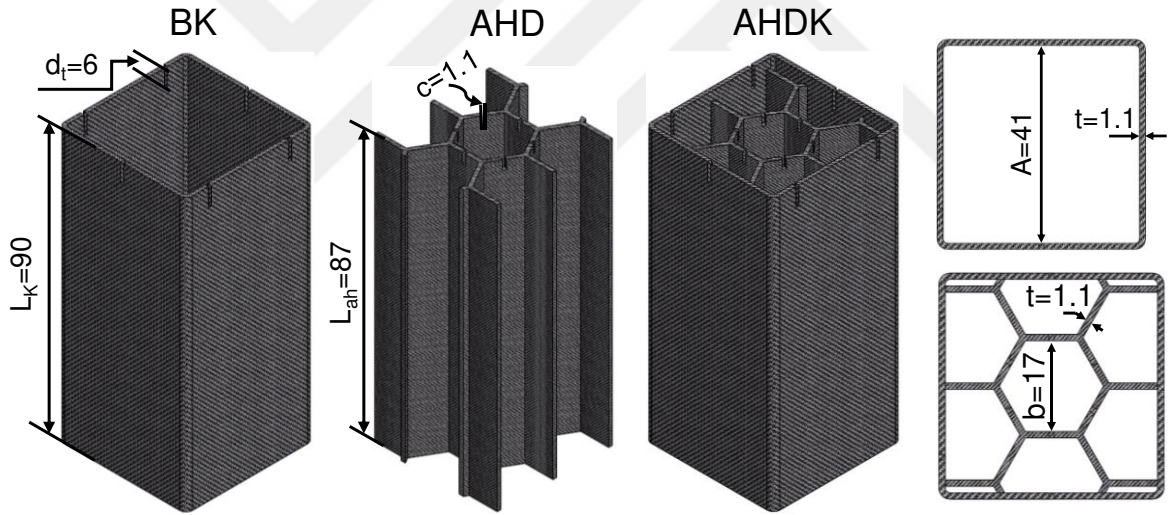
Şekil 2.10. Kare, altıgen ve daire dış kesitli içi boş KETP kompozit çarpışma kutuları ve hücre dolgu kısımları



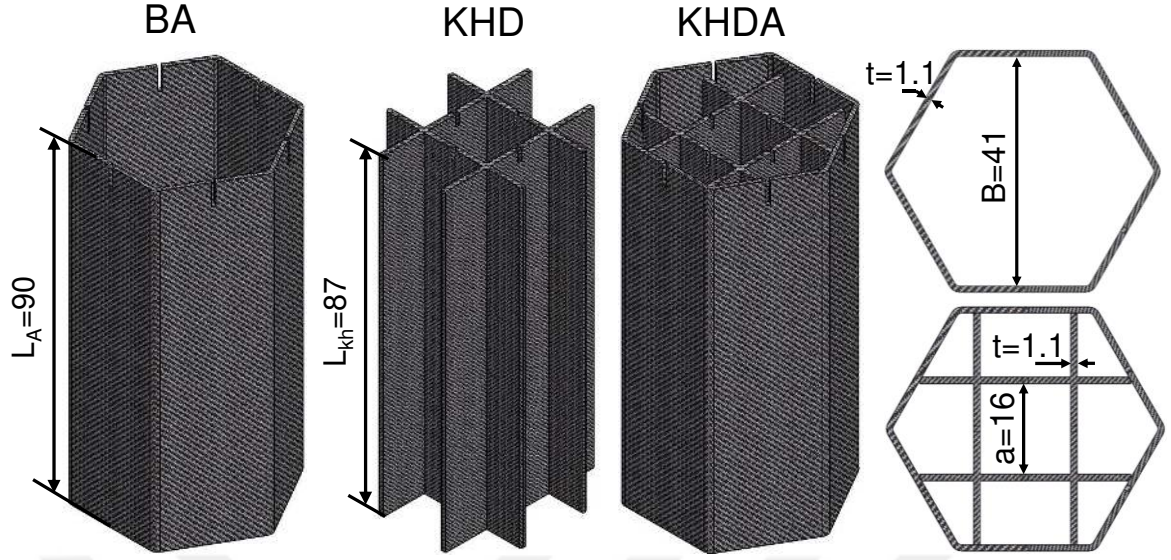
Şekil 2.11. KETP kompozit çarpışma kutularına hasar tetikleyici kanalların açılması ve türlerine göre hücresel gözenekli kısımların dış duvarlara yüzey temaslı olarak yerleştirilmesi



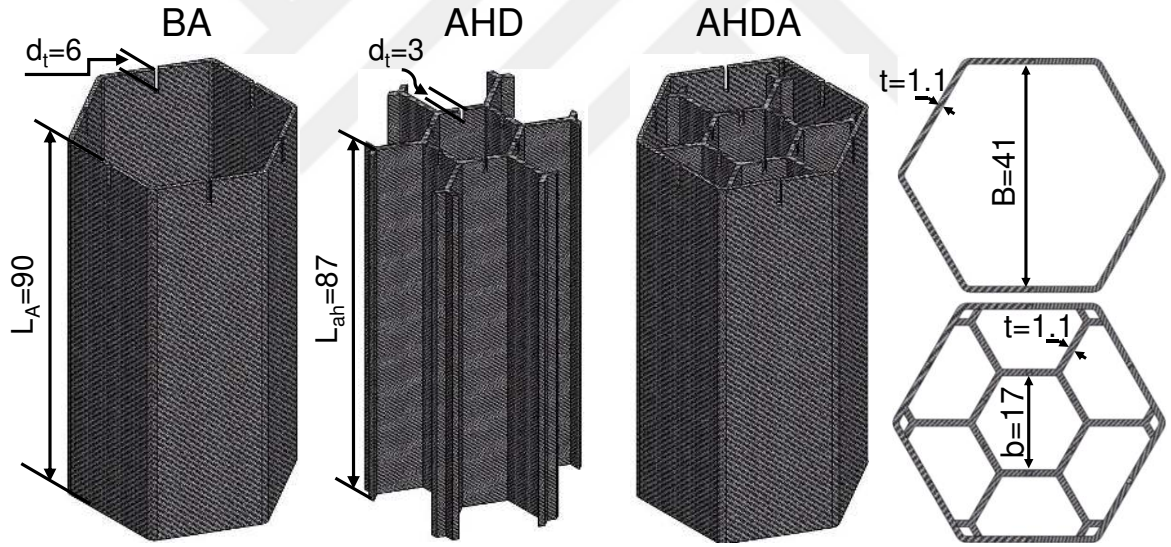
Şekil 2.12. Kare hücre dolgulu kare (KHDK) tip KETP kompozit çarpışma kutusunun içi boş kare (BK) ve kare hücre dolgusu (KHD) ile iç içe tasarımı



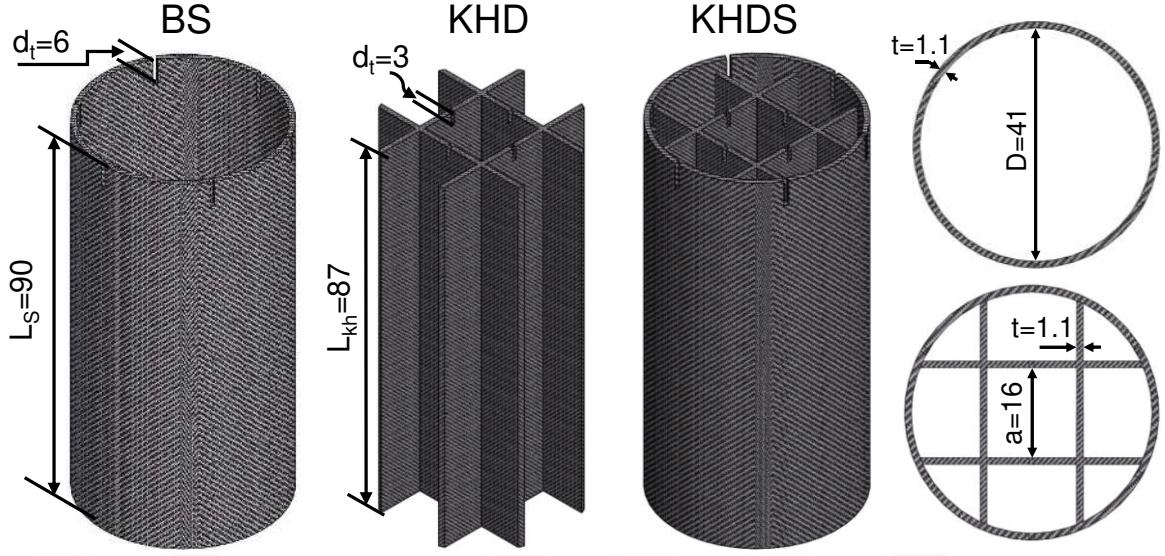
Şekil 2.13. Altıgen hücre dolgulu kare (AHDK) tip KETP kompozit çarpışma kutusunun içi boş kare (BK) ve altıgen hücre dolgusu (AHD) ile iç içe tasarımı



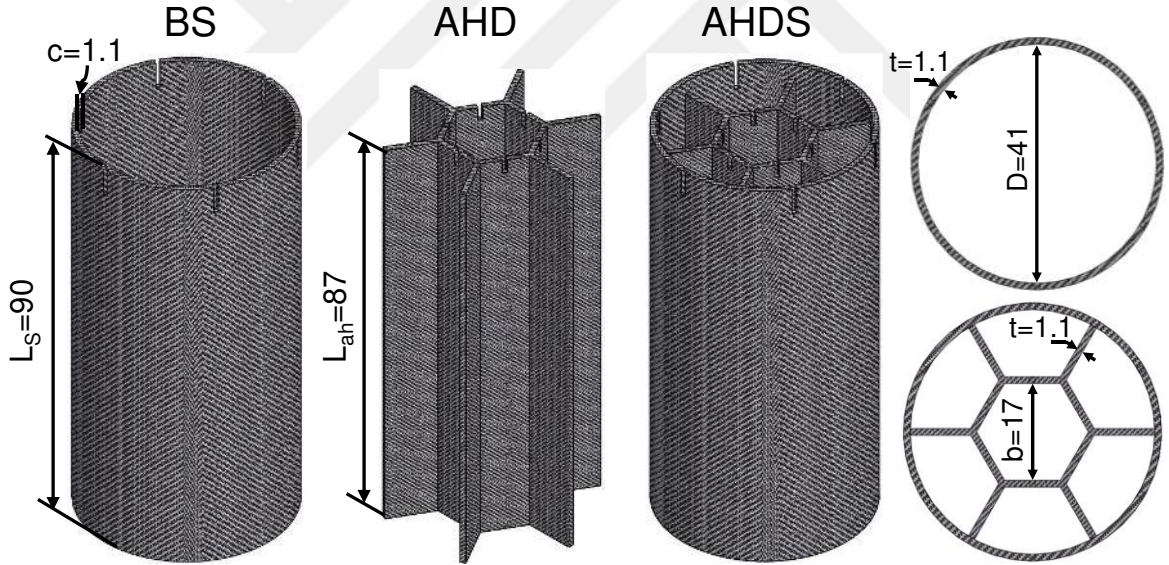
Şekil 2.14. Kare hücre dolgulu altıgen (KHDA) tip KETP kompozit çarpışma kutusunun içi boş altıgen (BA) ve kare hücre dolgusu (KHD) ile iç içe tasarımı



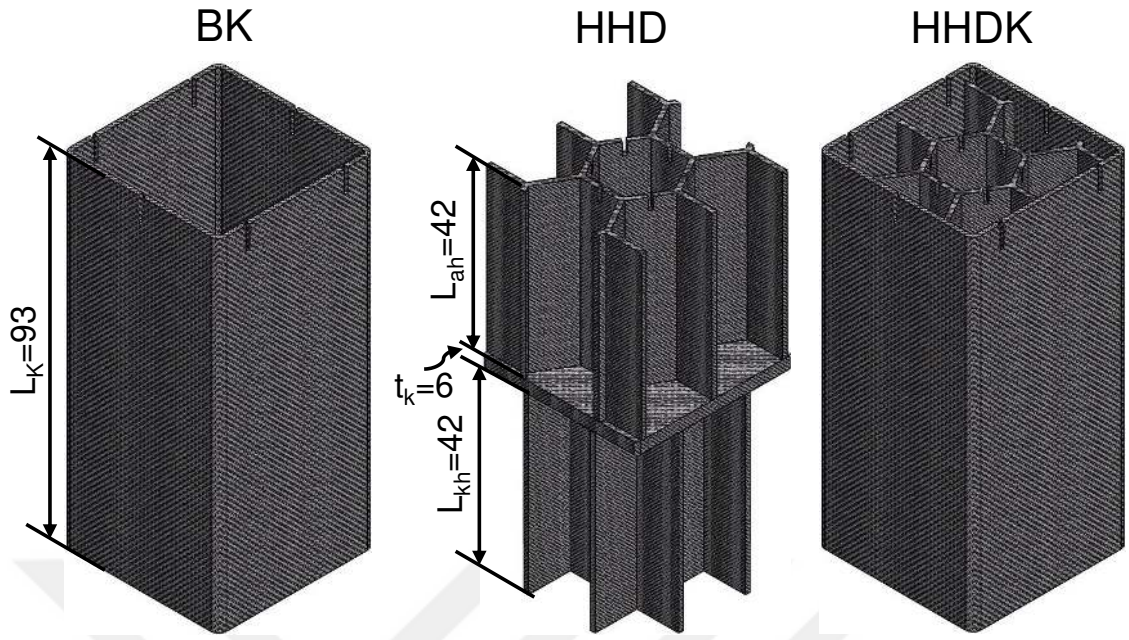
Şekil 2.15. Altıgen hücre dolgulu altıgen (AHDA) tip KETP kompozit çarpışma kutusunun içi boş altıgen (BA) ve altıgen hücre dolgusu (AHD) ile iç içe tasarımı



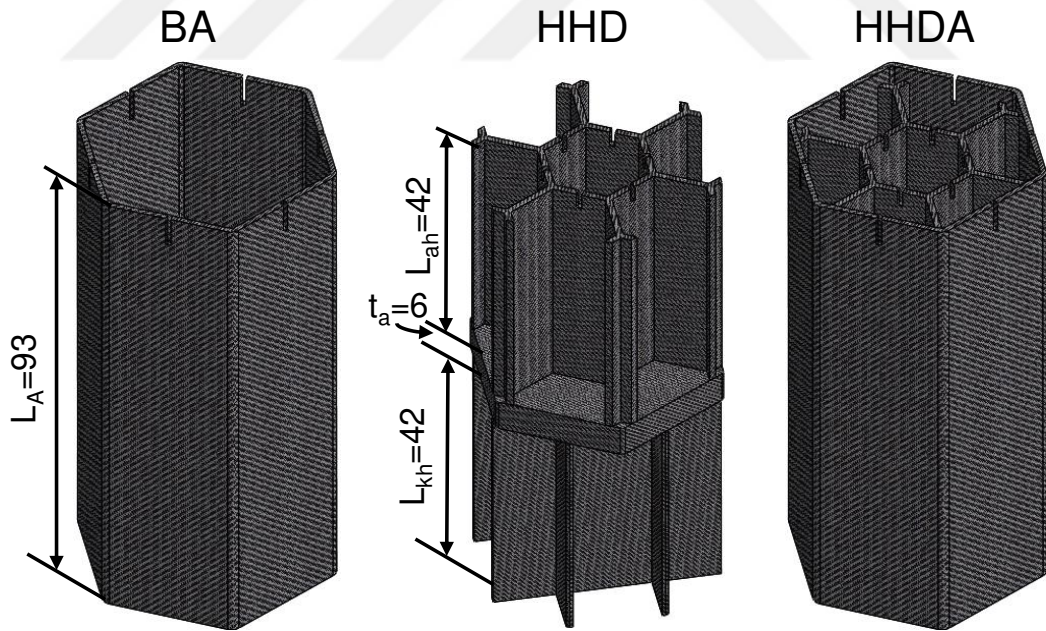
Şekil 2.16. Kare hücre dolgulu silindirik (KHDS) tip KETP kompozit çarpışma kutusunun içi boş silindir (BS) ve kare hücre dolgusu (KHD) ile iç içe tasarımı



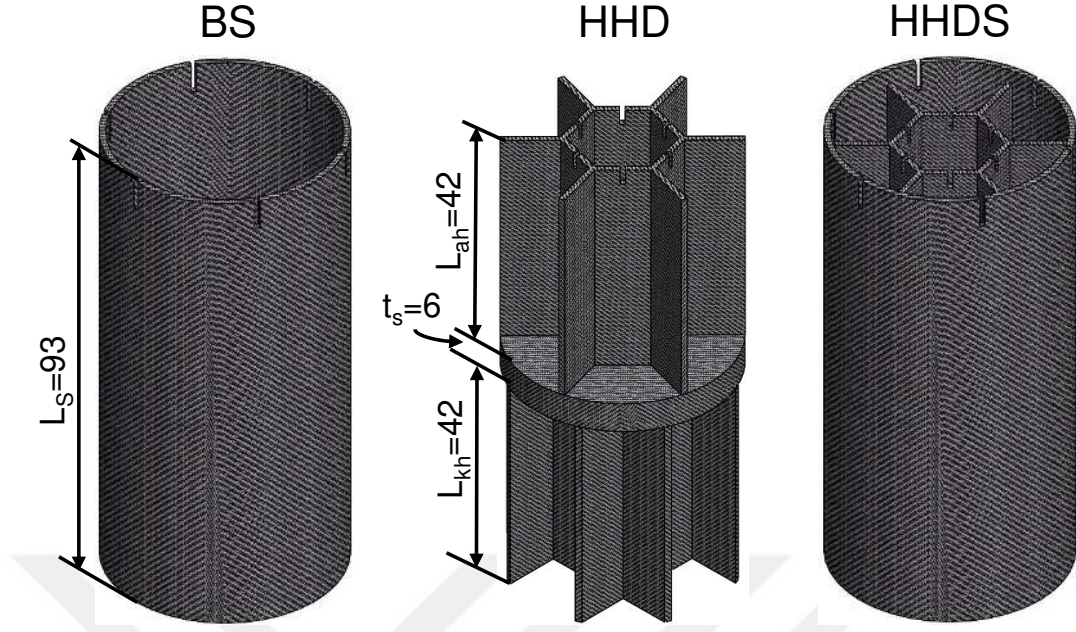
Şekil 2.17. Altıgen hücre dolgulu silindirik (AHDS) tip KETP kompozit çarpışma kutusunun içi boş silindir (BS) ve altıgen hücre dolgusu (AHD) ile iç içe tasarımı



Şekil 2.18. Hibrit (altıgen-kare) hücre dolgulu kare (HHDK) tip KETP kompozit çarpışma kutusunun içi boş kare (BK) ve hibrit hücre dolgusu (HHD) ile iç içe tasarımı



Şekil 2.19. Hibrit (altıgen-kare) hücre dolgulu altıgen (HHDK) tip KETP kompozit çarpışma kutusunun içi boş altıgen (BA) ve hibrit hücre dolgusu (HHD) ile iç içe tasarımı



Şekil 2.20. Hibrit (altıgen-kare) hücre dolgulu silindirik (HHDK) tip KETP kompozit çarpışma kutusunun içi boş kare (BS) ve hibrit hücre dolgusu (HHD) ile iç içe tasarımı

- 23) Hibrit (kare ve altıgen) hücre dolgulu KETP kompozit çarpışma kutularının kare ve altıgen kesitli hücre kısımları 6 mm kalınlığında üretilen KETP kompozit plakadan su jetiyle kesilen kare, altıgen ve daire tipi plakalara yapıştırılarak birleştirilir.
- 24) Çekme ve kayma numunelerinin üretimi için KETP kompozit prepeg kumaşlar 40 cm x 40 cm ölçülerinde 3 adet olarak kesilir. Üretimin yapılacağı 50 cm x 50 cm x 1 cm ebatlarındaki Al alaşım plakanın üzerine ince ayırıcı film serilerek teflon bantla sabitlenir.
- 25) KETP kompozit prepeg kumaşlar plaka üzerine 3 kat olacak şekilde elle yatırılarak üst üste dizilir. Dizme işlemi sırasında kompozit kumaşlar üzerine merdane ile baskı uygulanarak gerdirme işlemi yapılır. En üst tarafta kalan prepeg kumaş üzerine soyma kumaşı ve delikli naylon yerleştirilir.
- 26) Kompozit çarpışma kutularının üretim sürecinde olduğu gibi benzer işlem adımları (vakuma alma, kaçak kontrolü, kürleştirme ve soğuma) uygulanarak KETP kompozit plaka üretilir.
- 27) Basma ve eğilme numunelerinin üretimi için 6 adet KETP kompozit prepeg kumaş 30 cm x 30 cm ölçülerinde kesilir. Üretimin yapılacağı 50 cm x 50 cm x 1

cm ebatlarındaki Al alaşımlı plakanın üzerine ince ayırıcı film serilerek teflon bantla sabitlenir.

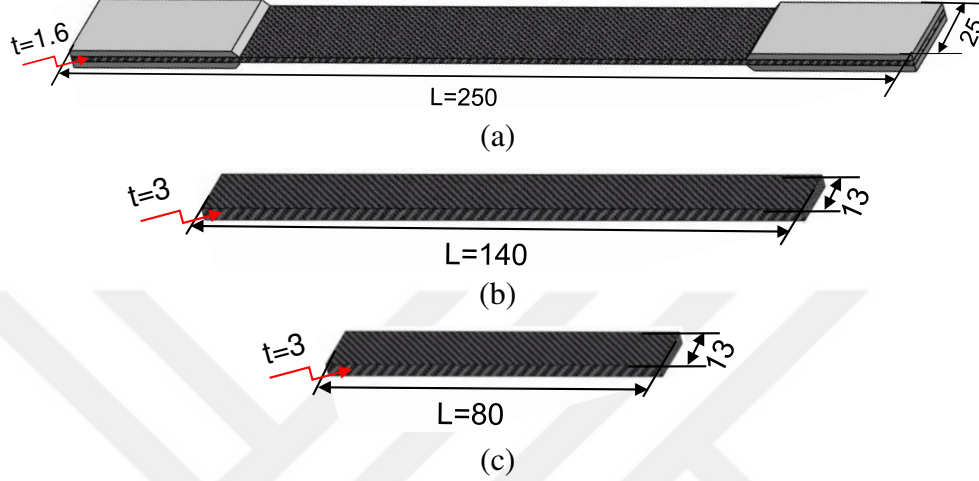
- 28) KETP kompozit prepreg kumaşlar plaka üzerine 6 kat olacak şekilde elle yatırılarak üst üste dizilir. En üst tarafta kalan kompozit prepreg kumaş üzerine delikli naylon serilerek teflon bantla sabitlenir. Kompozit çarpışma kutularının üretim sürecinde olduğu gibi benzer işlem adımları (vakuma alma, kürleştirme ve soğuma) uygulanarak üretim işlemi tamamlanır.

2.1.2. Kompozit Malzemelerin Mekanik Testleri

Sayısal modelde yer alan kompozit malzeme hasar modeli için gerekli olan mekanik özellik ve hasar parametrelerini belirlemek için çekme, kayma ve basma testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sayısal modelde kullanılan kompozit malzeme hasar modeliyle ilgili deneysel olarak belirlenemeyen parametreleri kalibre etmek için üç nokta eğilme testi yapılmıştır. Üretimleri gerçekleştirilen farklı türden kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için KTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde bulunan 100 kN kuvvet ölçme kapasiteli MTS marka universal çekme cihazı kullanılmıştır. Mekanik testler için aşağıda verilen işlem adımları takip edilmiştir:

- 1) Şekil 2.21a' da ASTM D3039 (2014) standardına göre boyutları verilen çekme numuneleri 0° ve 90° yönde plaka üzerinden su jetiyle kesilir.
- 2) Şekil 2.21a' da ASTM D3518 (2007) standardına göre boyutları gösterilen kayma numuneleri 45° yönde plaka üzerinden su jetiyle kesilir.
- 3) Şekil 2.21b' de ASTM D6641 (2016) standardına göre boyutları verilen basma numuneleri 0° ve 90° yönde plaka üzerinden su jetiyle kesilir.
- 4) Şekil 2.21c' de ASTM D790 (2003) standardına göre boyutları gösterilen üç nokta eğilme numuneler 0° ve 90° yönde plaka üzerinden su jetiyle kesilir.
- 5) Çekme ve kayma testleri sırasında çenelerle numune arasında meydana gelebilecek kaymayı önlemek için numunelerin çeneye oturan kısımlarına cam elyaf takviyeli polimer (CETP) kompozit malzemedan yapılmış taplar yapıştırılır. Tapları numunelere yapıştırmak için ARALDITE 2014 marka çift fazlı epoksi yapıştırıcı kullanılır. Böylece, çenelerdeki pürüzlü yüzeyler yarı-sünek malzeme özelliğine sahip CETP kompozit tapların temas yüzeylerine sıkı bir şekilde tutunarak numunelerin çekme testi sırasında numunelerin çenelerden kayması engellenir.

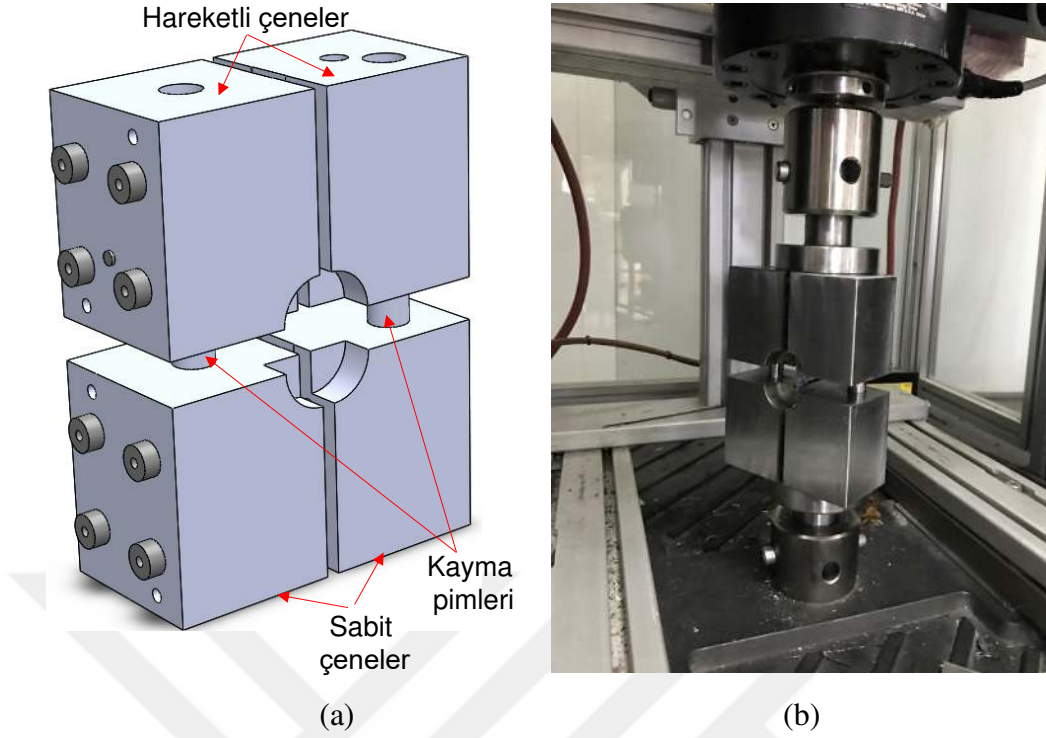
Çekme testi sırasında numunelerin çene tiplerinden gerilme yığılması nedeniyle kopmasını önlemek için tapların çene tipine bakan kısımlarına zımpara taşında 45° pah yapılır. Bu sayede, numunelerin test esnasında ölçüm bölgesinden kopması sağlanarak elde edilen mukavemet değerlerinin daha doğru ölçülür.



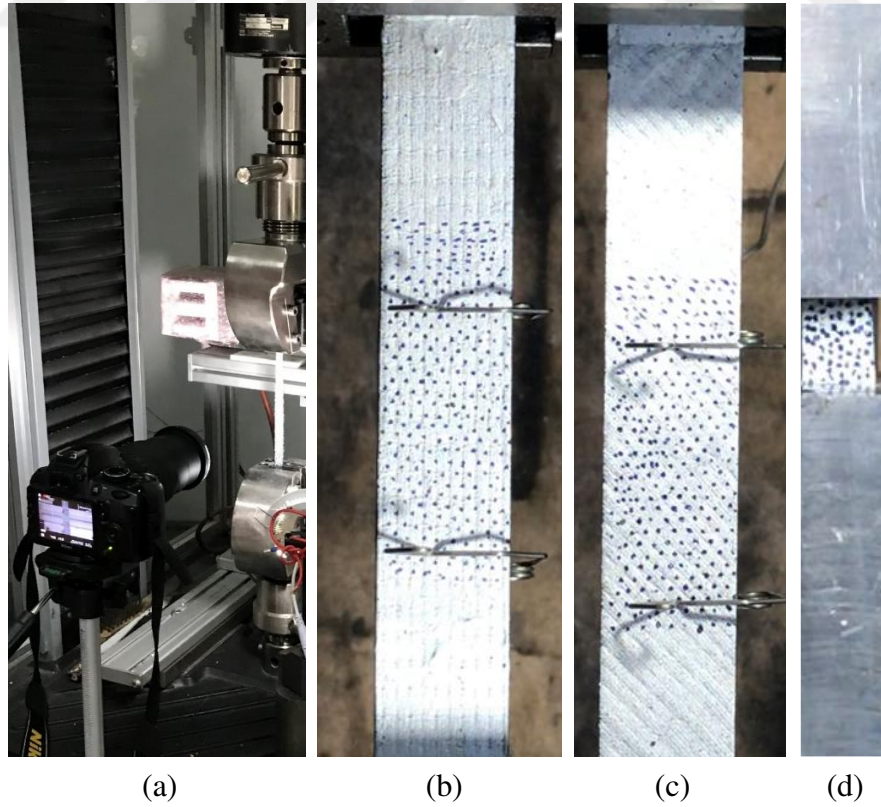
Şekil 2.21. KETP kompozit plakalardan kesilen numunelerin ASTM test standartlarına göre ölçüleri: (a) Çekme numunesi, (b) Basma numunesi ve (c) Üç nokta eğilme numunesi

- 6) Çekme, kayma ve basma testi sırasında numune yüzeyindeki enine ve boyuna yönde şekil değişimini belirlemek için görüntü işleme (DIC) tekniği kullanılmıştır. Bu teknikle ölçüm yapmak için numunenin görüntü alınacak yüzeyi önce beyaz boya ile boyanır. Boyalı yüzey kuruduktan sonra numunelerin ölçüm bölgesine ince uçlu siyah kalem ile eşit aralıklı noktalar koyulur (Şekil 2.23).
- 7) Numune ölçüm yüzeyinden hassas görüntü almak için LED lamba ile kameranın bakış açısına göre numune yüzeyine beyaz ışık yansıtılır.
- 8) Çekme ve kayma testleri 3 mm/dak, basma ve üç nokta eğilme testleri ise 1 mm/dak çene hızında yapılmıştır. Testler esnasında numune ölçüm yüzeyinden görüntü almak için kullanılan kamera tripot ayaklar üzerine uygun pozisyonda teraziye alınır. Testler sırasında elde edilen veriler bilgisayarda kaydedilir.
- 9) Testler sırasında kamera ile yapılan video çekimleri bilgisayarda kaydedilerek MATLAB yazılımında görüntü işleme analizleri için kullanılır.

ASTM D6641 (2016) standardına göre basma testlerini gerçekleştirmek için SOLIDWORKS programında Şekil 2.22a' da gösterildiği gibi tasarımı yapılan basma aparatı özel olarak imal edilmiştir (Şekil 2.22b).



Şekil 2.22. ASTM D6641 standartlarına göre gerçekleştirilen basma testlerinde kullanılan aparat: (a) Tasarım ve (b) Test cihazına bağlanış biçimi



Şekil 2.23. (a) Kamera ile görüntü alma işlemi, (b) Çekme testi numunesi, (c) Kayma testi numunesi, (d) Basma testi numunesi



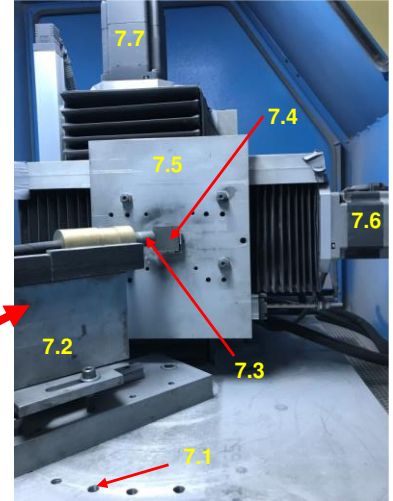
Şekil 2.24. Üç nokta eğilme testi numunesi

2.1.3. Katı Parçacık Erozyon Testi

Malzemelerin katı parçacık erozyon davranışlarını belirlemek için Şekil 2.25' te gösterilen ve KTÜ makina mühendisliği mekanik laboratuvarında bulunan katı parçacık erozyon test sistemi kullanılmıştır. Bu test sisteminde, ASTM G76 (ASTM, 2013), ASTM F1864 (ASTM, 2010) ve Mil-STD-3033 (Mil, 2010) standartlarına göre katı parçacık erozyon testleri yapılabilmektedir. Bu çalışmada, katı parçacık erozyon testleri Mil-STD-3033 (Mil, 2010) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



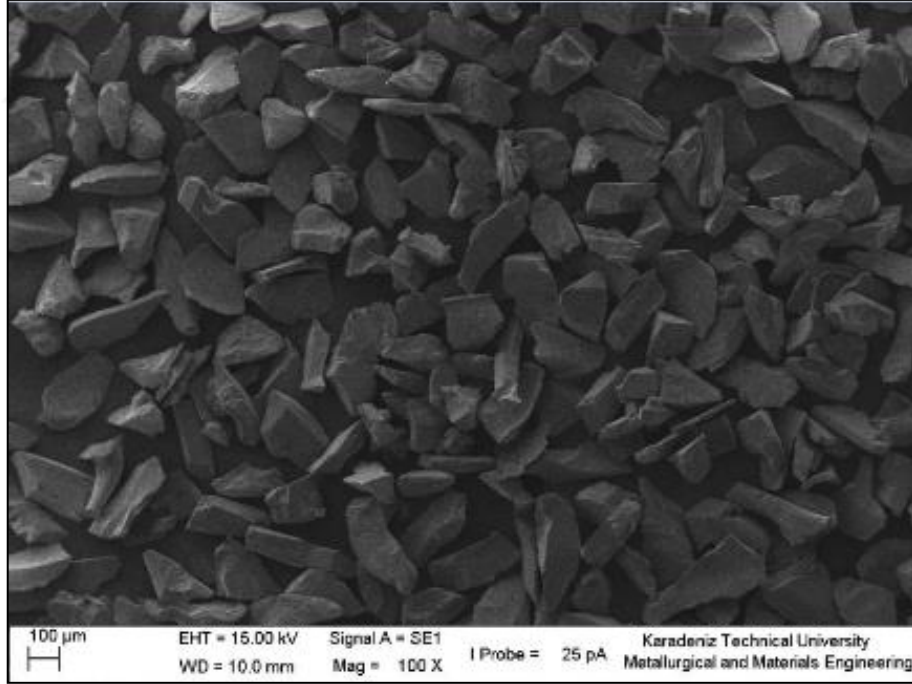
1. Kompresör
2. Birinci basınç tankı
3. Nem alma ünitesi
4. İkinci basınç tankı
5. Kontrol ünitesi
6. Parçacık besleme ünitesi
7. Test kabini



- 7.1. Açılabilir konumlandırma deliği
- 7.2. Nozul tutucu
- 7.3. Nozul
- 7.4. Numune
- 7.5. Numune tutucu
- 7.6. Yatay adım motoru
- 7.7. Dikey adım motoru

Şekil 2.25. Katı parçacık erozyon testlerinde kullanılan deney düzeneği

Katı parçacık erozyon test sistemi, ortalama 500 μm φ ındaki katı parçacıkları 300 m/s hıza kadar fırlatabilen 3,2 mm (1/8 inç) boğaz ve 7,4 mm çıkış φ aplı yakınsak-ıraksak bir lüleye sahiptir. Bunun yanında, parçacıkların besleme debisini $\pm 0,2$ g/dk. hassasiyetinde ayarlayabilen bir elektromanyetik parçacık besleme ünitesi, 40 bar seviyesine kadar basınç üreten bir kompresör, basınçlı havayı yüksek basınçlarda depolayabilen 100 bar basınca dayanıklı olan birinci ve ikinci basınç tankları, parçacık hızının istenen seviyede sabit tutulmasını sağlayan üçüncü basınç tankı, kontrol ünitesi ve test kabinden oluşmaktadır. Numunelerin erozyon testlerinin gerçekleştirildiği test kabini içerisinde lüle çıkışı ile numune yüzeyi arasındaki mesafeyi 0-100 mm arasında ayarlayabilen bir kızak sistemi, çarpma açısının 10-90° arasında ayarlanabildiği konumlandırma delikleri ve numune tutucu bulunmaktadır. Ayrıca, eğrili veya düz plaka geometrisine sahip numunelerin erozyon testlerini yüzey taraması şeklinde yapmak için kontrol ünitesinde tanımlanan hızlarda numuneyi yatay ve dikey yönlerde hareket ettiren adım motorları da test kabini içerisinde yer almaktadır.



Şekil 2.26. Katı parçacık erozyon testlerinde kullanılan SiC parçacıklarının SEM görüntüsü (114-268 μm)

Katı parçacıkların numune yüzeyine çarpma hızını belirlemek için çift disk metoduna dayalı hız ölçme sistemi kullanılmıştır (Ruff ve Ives, 1975). Erozyon testlerinde kullanılan

silisyum karbür (SiC) parçacıkların malzeme özellikleri Tablo 2.2’ de verilmiştir. Şekil 2.26’ da taramalı elektron mikroskop (SEM) altında 114-268 μm boyut aralığında SiC parçacıklar için elde edilen görüntü göstermektedir. 3K düzlemsel örgülü KETP ve CETP kompozit malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 2.3 ve Tablo 2.4’ te sırasıyla verilmiştir.

Tablo 2.2. SiC parçacıkların malzeme özellikleri

Yoğunluk [kg/m ³]	Sertlik [Mohs]	Parçacık boyutu [μm]	Ortalama parçacık çapı [μm]	Parçacık şekil faktörü
3210	9,2	114-268	175	0,700

Tablo 2.3. 3K düzlemsel örgülü KETP kompozitin deneysel belirlenen mekanik özellikleri

E ₁ [GPa]	E ₂ [GPa]	G ₁₂ [GPa]	ν_{21}	X _T [MPa]	X _C [MPa]	Y _T [MPa]	Y _C [MPa]	S _C [MPa]
50,17	50,17	3,41	0,063	763	387	763	387	60

Tablo 2.4. 3K düzlemsel örgülü CETP kompozitin deneysel belirlenen mekanik özellikleri

E ₁ [GPa]	E ₂ [GPa]	G ₁₂ [GPa]	ν_{21}	X _T [MPa]	X _C [MPa]	Y _T [MPa]	Y _C [MPa]	S _C [MPa]
16,46	16,46	1,61	0,24	302	212	302	212	40

Katı parçacık erozyon testleri, 2,5 gr/dak besleme debisi ve 175 μm ortalama çapa sahip keskin köşeli SiC parçacıkların farklı çarpma hızları (70, 110, 150 ve 190 m/s) ve farklı çarpma açıları (20°, 30°, 45°, 60° ve 90°) şartları altında gerçekleştirilmiştir. Erozyon testleri esnasında numunelerde oluşan ağırlık kaybının ölçümü için 1 mg hassasiyetli tartım cihazı kullanılmıştır. Erozyon test sürecinde zamandan bağımsız erozyon oranlarını belirlemek için KETP ve CETP kompozit numunelerin ağırlık kaybı ölçümleri 30 saniye aralıklarla toplamda 3 dakikada yapılmıştır. 3M markalı 8663 kodlu PU bant, SS304 kodlu paslanmaz çelik ve saf nikel (Ni) malzemeli numunelerin ağırlık kaybı ölçümleri ise 4 dakika aralıklarla toplamda 16 dakikada yapılmıştır. Numunelerin ağırlık kaybı ölçümleri yapılmadan önce numune yüzeyleri basınçlı havayla iyice temizlenmiştir. Erozyon testlerinden sonra

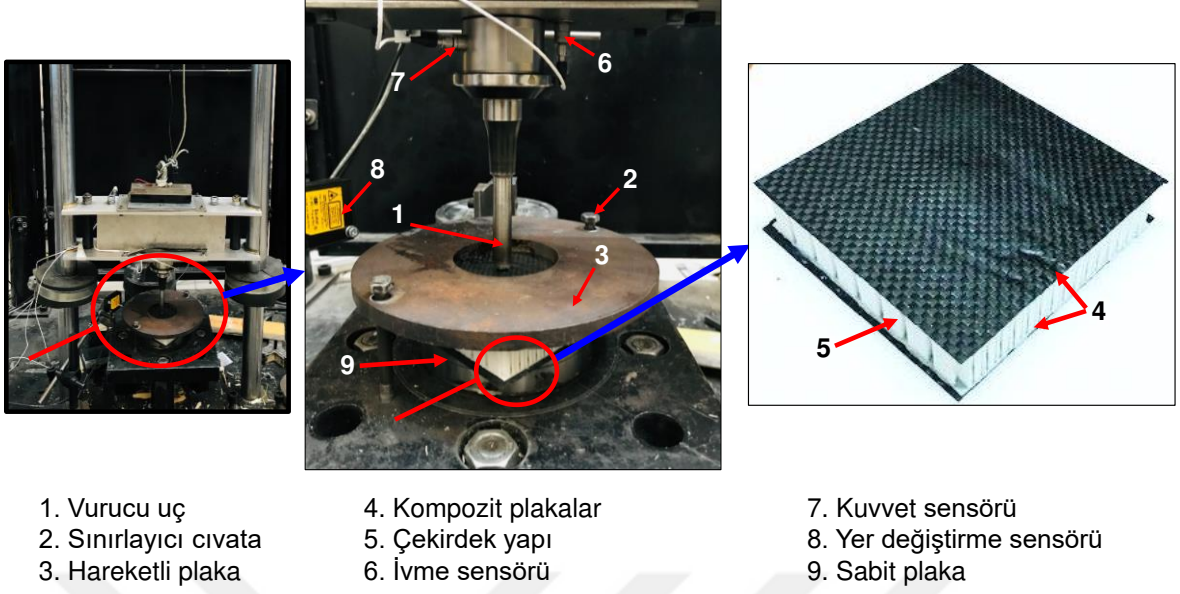
numunelerin zamandan bağımsız ortalama erozyon oranlarını (W_{er}) hesaplamak için Denklem 2.2 kullanılmıştır.

$$W_{er} = \Delta W_s / \Delta W_{ep} \quad (2.2)$$

Yukarıdaki eşitlikte yer alan ΔW_s ve ΔW_{ep} sırasıyla erozyon testi için belirlenen zaman aralığında numunelerde oluşan ağırlık kaybı ve numune yüzeyine çarpan katı parçacıkların toplam ağırlığını temsil etmektedir.

2.1.4. Kompozit Sandviç Panellerin Serbest Ağırlık Düşürmeli Darbe Testi

Kompozit sandviç panellerin düşük hızlı darbe testleri Şekil 2.27’ de gösterilen serbest ağırlık düşürme deney düzeneğinde ASTM D7136 (2012) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği, serbest ağırlık taşıyıcı sistem, vurucu uç, piezotip yük hücresi, ivme sensörü, lazer tip yer değiştirme sensörü, lazer tip yükseklik ölçme sensörü, numune sabitleme ünitesi, manyetik kaldırma ünitesi gibi kısımlardan oluşmaktadır. Vurucu, 8 kg ağırlık ve 12,7 mm (0,5 inç) çapında yarı-küresel uça sahiptir. Numune sabitleme ünitesi, 50 mm iç delik çaplı numune yüksekliğine göre ayarlanabilen bir adet hareketli ve bir adet sabit dairesel plakalardan oluşmaktadır. Numuneyi hareketli ve sabit plakalar arasında yeterli basınçla sıkıştırmak için 2 adet sıkma cıvatası kullanılmaktadır. Vurucunun üzerine bağlanan 222 kN yük ölçme kapasiteli yük hücresi 100 kHz veri toplama hızına sahip sisteme bağlanmıştır. Çarpma hızı vurucunun yer değiştirme yüksekliği değiştirilerek ayarlanmıştır. Numunelere vurucu ucun çarpması sırasında tam geri tepme (rebound), kısmi geri tepme veya saplanma (penetration) ve kısmi veya tam delinme (perforation) koşullarını sağlamak için darbe testleri üç farklı çarpma hızında (2,236 m/s, 3,163 m/s ve 4,183 m/s) yapılmıştır.



Şekil 2.27. Kompozit sandviç panellerin düşük hızlı darbe testlerinde kullanılan serbest ağırlık düşürmeli test sistemi

2.1.5. Kompozit Çarpışma Kutularının Ezilme Testi

Üretilen kompozit çarpışma kutularına statik basma yükü altında sabit ilerleme hızlı ezilme testi uygulanarak kompozit çarpışma kutularının ezilme karakteristikleri ve hasar mekanizmaları belirlenmiştir. Kompozit çarpışma kutularının ezilme testler için uygulanan işlem adımları aşağıda verilmiştir:

- 1) Kompozit çarpışma kutuları 1 mg hassasiyetindeki terazide tartılarak ağırlık değerleri kaydedilmiştir.
- 2) Test sırasında kompozit çarpışma kutularının ölçüm yüzeyinde meydana gelen deformasyonları görüntülemek için numunelerin ön yüzeyleri siyah-beyaz benekli olarak boyanmıştır.
- 3) Tripot ayaklar üzerine uygun pozisyonda yerleştirilen kamera ile test süresince kompozit çarpışma kutularında meydana gelen deformasyonları görüntülemek için video çekimi yapılmıştır. Test esnasında kompozit çarpışma kutularının ön yüzeyleri LED lamba ile aydınlatılarak kamera görüntüsünün netliği artırılmıştır.
- 4) Kompozit çarpışma kutularının ezilme testleri 3 mm/dak basma hızında yapılmıştır.
- 5) Kompozit çarpışma kutusu yüksekliğinin %80' i ($90 \text{ mm} \times 0,8 = 72 \text{ mm}$) hasarlanıncaya kadar ezilme testine devam ettirilmiştir.

- 6) Hareketli tabla başlangıç konumuna getirilinceye kadar görüntü alma işlemine devam edilmiştir.
- 7) Testler sırasında elde edilen veriler ve kamera görüntüleri kaydedilmiştir.
- 8) Test sırasında kaydedilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri kullanılarak kompozit çarpışma kutularının toplam enerji sönümleme, özgül enerji sönümleme, ortalama ezilme kuvveti ve ezilme kuvveti verimi karakteristikleri belirlenmiştir.

2.2. Sayısal Çalışmalar

Çalışmanın bu aşamasında, ilk olarak, CETP kompozit, KETP kompozit, ticari 3M-8663 kodlu poliüretan bant, SS304 paslanmaz çelik ve nikel malzemelerin plaka ve aşınma kalkanı yüzeyindeki katı parçacık erozyon davranışları sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal katı parçacık erozyon analizleri için ticari ANSYS-FLUENT yazılımı kullanılmıştır. İkinci olarak, bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panellerin düşük hızlı darbe etkisi altındaki enerji sönümleme ve hasar davranışı sayısal olarak belirlemek için ticari LS-DYNA yazılımında sonlu elemanlar modelleri oluşturularak analizler yapılmıştır. Son olarak, içi boş ve hücresel dolgulu kare, altıgen ve silindir dış duvarlı KETP kompozit çarpışma kutularının ezilme yükü altındaki enerji sönümleme ve hasar davranışlarını sayısal olarak incelemek için ticari LS-DYNA yazılımında sonlu elemanlar modelleri oluşturularak analizler gerçekleştirilmiştir.

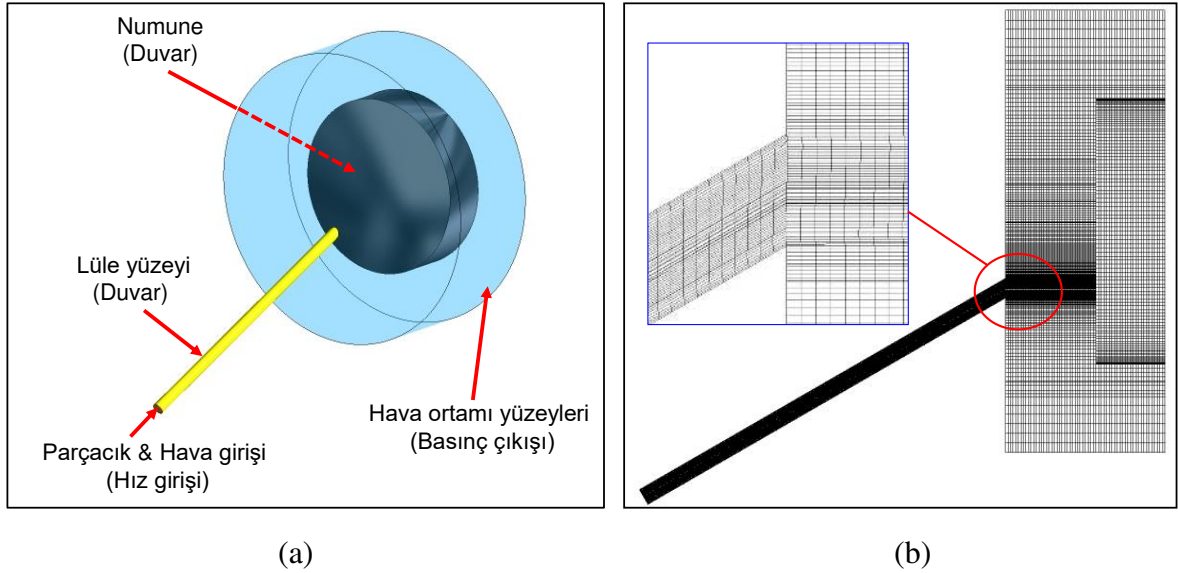
2.2.1. HAD Tabanlı Sayısal Erozyon Analizi

Katı parçacık erozyon testlerinde kullanılan malzemelerin erozyon analizleri, Finnie (1960) erozyon modeli ile birlikte sonlu hacimler yöntemini kullanan ticari ANSYS-FLUENT paket programında gerçekleştirilmiştir. Finnie (1960) erozyon eşitliğinde yer alan $F(\theta)$ fonksiyonu katsayılarını ($A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7$) belirlemek için 110 m/s çarpma hızında farklı çarpma açıları ($20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ve 90°) şartları altında erozyon testleri gerçekleştirilmiştir. K ve n malzeme sabitlerini belirlemek için 90° çarpma açısı ve farklı çarpma hızlarında (70, 110, 150, 190 ve 230 m/s) gerçekleştirilen erozyon testlerinden elde edilen veriler kullanılmıştır. Hacimsel erozyon oranını hesaplamak için kütleli erozyon oranı malzeme yoğunluğuna bölünmüştür. HAD tabanlı sayısal erozyon analizlerinde, parçacıkların hedef yüzeye çarptıktan sonraki hız bileşenlerinin çarpma açısına bağlı olarak

belirlenmesi için Taslim ve diğ. (2009) tarafından yapılan bir çalışmada SiC parçacıklar için önerdikleri geri tepme (Rebound) modeli kullanılmıştır. Helikopter rotor pali aşınma kalkanının HAD erozyon analizlerinde 110 m/s, 150 m/s, 190 m/s ve 230 m/s çarpma hızlarındaki S_{tk} sayıları sırasıyla 2,231, 3,041, 3,851 ve 4,661 olarak hesaplanmıştır.

2.2.1.1.HAD Tabanlı Sayısal Erozyon Doğrulama Modeli

Katı parçacık erozyon analizi sonuçlarının doğrulanması için Şekil 2.28a’ da sınır şartları ve Şekil 2.28b’ de ağ yapısı gösterilen HAD doğrulama modeli oluşturulmuştur. HAD tabanlı sayısal erozyon doğrulama modeli için test koşullarında olduğu gibi ortalama 175 μm çaplı SiC malzemeli parçacıklar ve 7,4 mm çapa sahip lüle (erozyon testlerinde kullanılan lülenin çıkış çapı) kullanılmıştır. Modelde kullanılan hedef numunenin çapı 50 mm olarak seçilmiştir. Modelin ağ yapısı için 800 bin adet altı köşeli elemanlar kullanılmış olup, lüle cidarı ve hedef numune yüzeylerine yakın olan yerlerde çözüm hassasiyetini arttırmak için yapılandırılmış elemanlar tercih edilmiştir. HAD tabanlı sayısal erozyon analiz sonuçları ağ yapısından bağımsız hale getirilerek en iyi yakınsamalı çözüm elde edilmiştir.



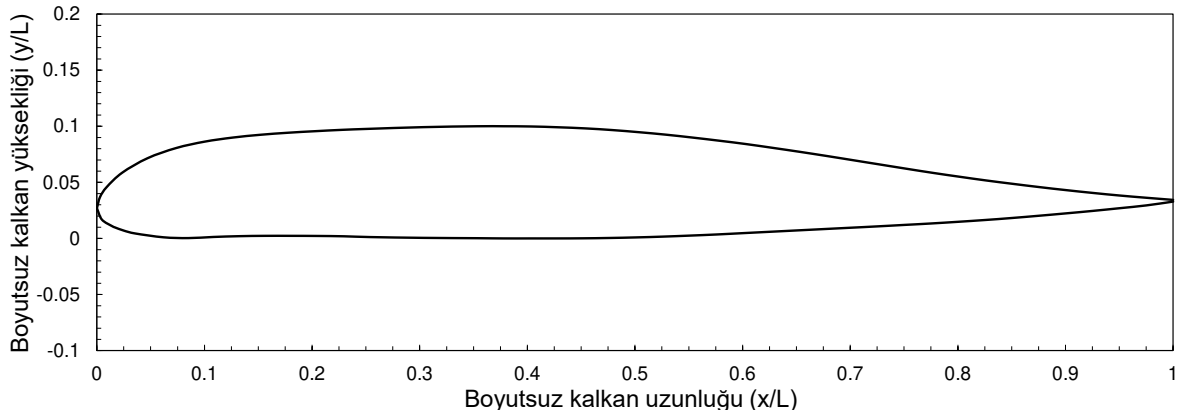
Şekil 2.28. (a) HAD tabanlı sayısal erozyon doğrulama modeli ve (b) Modelin ağ yapısı

HAD tabanlı sayısal erozyon doğrulama analizleri, 110 m/s çarpma hızı için farklı çarpma açıları (20°, 30°, 45°, 60° ve 90°) ve 90° çarpma açısı için farklı çarpma hızları (70,

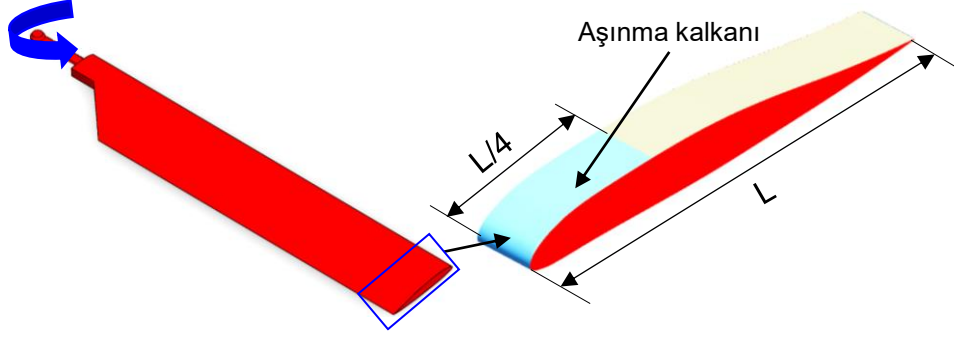
110, 150 ve 190 m/s) şartları altında gerçekleştirilmiştir. Akışla ilgili korunum denklemlerinin çözümünde analiz süresini azalmak için zamandan bağımsız (sürekli) akış şartıyla birlikte katı parçacık etkileşimli akışkanın (hava) sıkıştırılmaz olduğu kabul edilmiştir.

2.2.1.2. Aşınma Kalkanının HAD Tabanlı Sayısal Erozyon Modeli

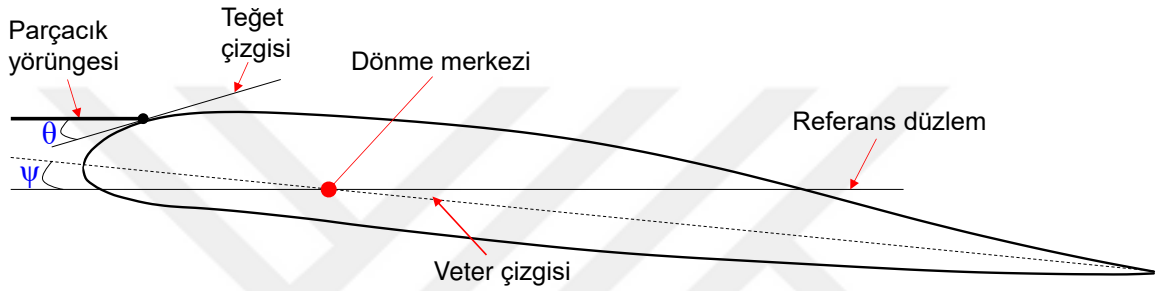
Katı parçacık erozyon testlerinde kullanılan malzemelerin aşınma kalkanındaki erozyon davranışını belirlemek için HAD tabanlı sayısal erozyon analizlerinde kullanılan ve Şekil 2.29’ da geometrisi verilen helikopter rotor paliyle ilgili boyutlar Rodriguez (2012) tarafından yapılan bir çalışmadan alınmıştır. HAD tabanlı akış analizlerinin çözüm süresini azaltmak için Şekil 2.30’ da gösterildiği gibi helikopter palinin en uç tarafındaki küçük bir dilim üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Helikopter rotor pali dönerken palin en uç kısmı maksimum çevresel hıza sahiptir. Bu nedenle askeri alanda kullanılan helikopterlerin çöl vb. ortamlardaki iniş ve kalkış durumlarını temsil edebilmesi için SiC parçacıkların pal yüzeyine çarpma hızı $225 \pm 10,6$ m/s aralığında olacak şekilde maksimum 230 m/s olarak seçilmiştir (Mil, 2010).



Şekil 2.29. HAD tabanlı sayısal erozyon analizlerinde kullanılan helikopter rotor palinin geometrisi



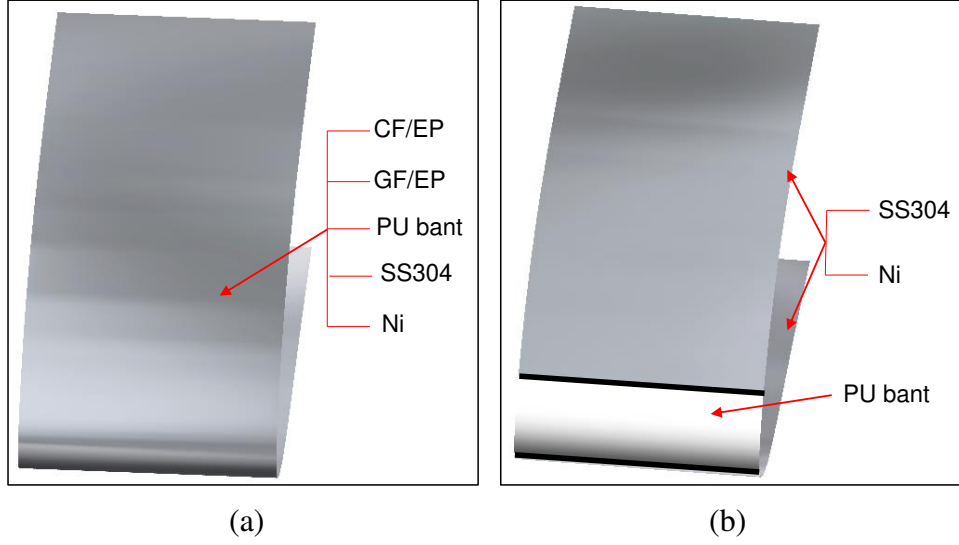
Şekil 2. 30. Helikopter rotor pali için tasarlanan aşınma kalkanının geometrisi



Şekil 2.31. Helikopter rotor palindeki hücum açısı (ψ) ve parçacık çarpma açısı(θ)

HAD tabanlı sayısal erozyon analizlerinin çözüm süresini azaltmak amacıyla sadece helikopter rotor palinin ön tarafına yerleştirilen aşınma kalkanı yüzeyi için erozyon hesaplamaları yapılmıştır. Helikopter rotor pali üzerine çarpan katı parçacıkların çarpma açısı (θ) Şekil 2.31' de gösterildiği gibi parçacık yörüngesi ile palin teğetsel çizgisi arasındaki açı iken hücum açısı (ψ) palin veter çizgisi ile referans düzlemi arasındaki açı olarak tanımlanmıştır.

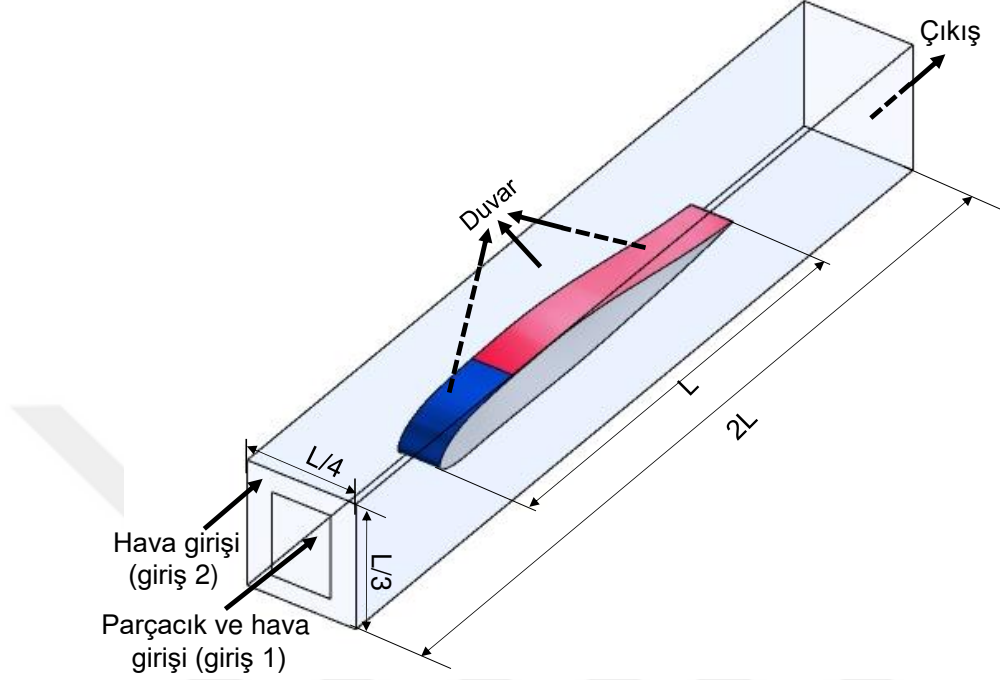
Bu çalışmanın amaçlarından birisi, KETP ve CETP kompozit malzemelerin aşınma kalkanı yüzeyindeki erozyon davranışlarını belirlemek ve ticari 3M-8663 kodlu PU bant, SS304 ve Ni malzemelerinkilerle karşılaştırmaktır. Bu amaçla, ilk olarak, tüm malzemelerin 0° hücum açısı ve farklı parçacık çarpma hızları altında (110 m/s, 150 m/s, 190 m/s ve 230 m/s) aşınma kalkanındaki erozyon davranışları ayrı ayrı sayısal olarak incelenmiştir (Şekil 2.32a). İkinci olarak, PU bant/SS304 ve PU bant/Ni hibrit malzemelerden oluşan aşınma kalkanı yüzeylerinin erozyon davranışları aynı şartlar altında sayısal olarak belirlenmiş (Şekil 2.32b) ve karşılaştırmalar yapılmıştır.



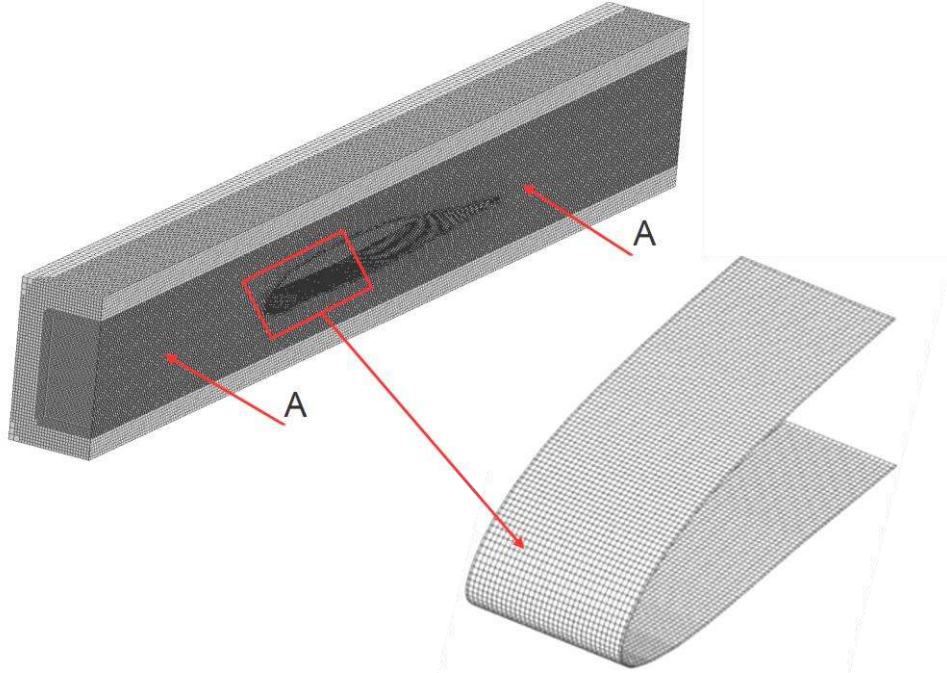
Şekil 2.32. Helikopter rotor palinin HAD tabanlı sayısal erozyon analizlerinde kullanılan aşınma kalkanı yüzey tipleri: (a) PU bant, Ni, SS304, KETP ve CETP kompozit malzemeli kalkan yüzeyleri, (b) PU bant/SS304 ve PU bant/Ni malzemeli hibrit aşınma kalkan yüzeyleri

Helikopter rotor pali aşınma kalkanı için gerçekleştirilen HAD tabanlı sayısal erozyon analizlerinde kullanılan sonlu hacimler modeli Şekil 2.33' te sınır şartlarıyla birlikte gösterilmiştir. HAD tabanlı sayısal erozyon analizlerinin çözüm süresini daha da azaltmak için sonlu hacimler modeline parçacıkların giriş yaptığı yüzeyin boyutları modelde kullanılan pal dilimin tüm yüzeylerine parçacıklar çarpacak şekilde ayarlanmıştır. Parçacıklar ve havanın akış ortamına giriş hızı aşınma kalkanındaki çarpma hızına eşit olacak şekilde giriş yüzeylerine normal doğrultuda tanımlanmıştır. Katı parçacıklar ve havanın modele giriş hızları birbirine eşit olup parçacıkların besleme debisi $5,8 \text{ g/cm}^2$ olarak ayarlanmıştır. Parçacık besleme debisi için bu değer katı parçacık erozyon testlerinde kullanılan lülenin çıkış çapına göre hesaplanmıştır. Analiz süresini azaltmak amacıyla modelin giriş tarafında hava girişi (giriş 2) ve parçacık&hava (giriş 1) girişi olmak üzere iki farklı giriş kullanılmıştır. Parçacıkların akış ortamına girişi hava ile homojen karışımli olarak tanımlanmıştır. Akış ortamının çıkış kısmı basınç çıkışı şeklinde tanımlanmış olup helikopter rotor pali dilimi yüzeyleri de dahil olmak üzere diğer yüzeylere sabit duvar sınır şartı verilmiştir. Akış ortamının boyutları helikopter palinin veter uzunluğuna orantılı olarak belirlenmiş olup akışla ilgili blokaj, ters akış etkileri olmayacak şekilde ayarlanmıştır. Helikopter pali için oluşturulan sonlu hacimler modelinin erozyon analiz sonuçları ağ yapısındaki eleman sayısından bağımsız hale getirilmiş olup modelde 3,1 milyon adet altı köşeli eleman kullanılmıştır. HAD tabanlı sayısal erozyon analizlerinin çözüm hassasiyetini

arttırmak için Şekil 2.34' te gösterildiği gibi helikopter palı etrafında yapılandırılmış elemanlar oluşturulmuştur.



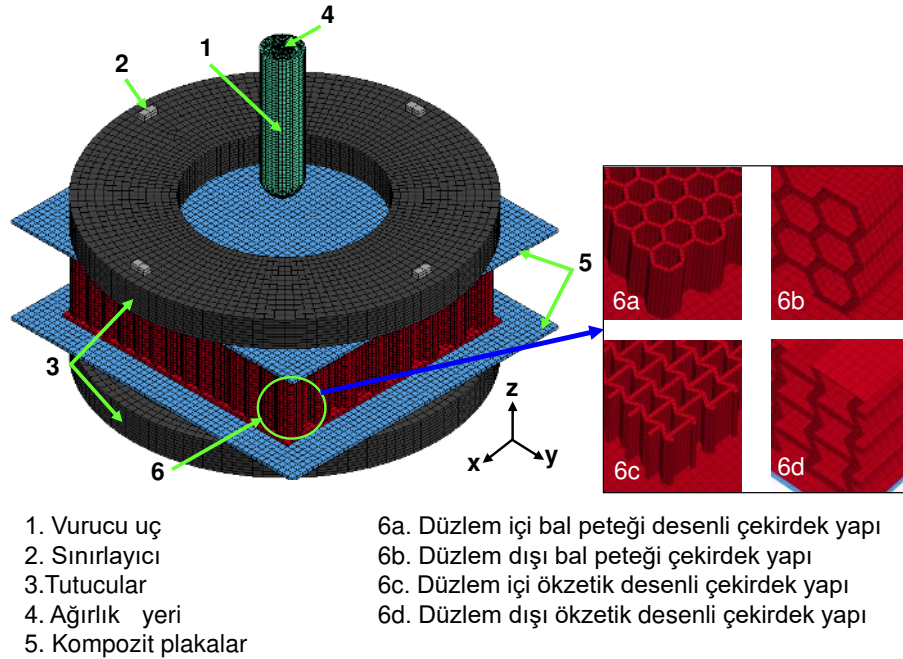
Şekil 2.33. Helikopter rotor palinin HAD tabanlı sayısal erozyon analizleri için oluşturulan sonlu hacimler modeli ve sınır şartları



Şekil 2.34. Helikopter rotor palı aşınma kalkanının HAD tabanlı sayısal erozyon analizleri için oluşturulan sonlu hacimler modelinin ağ yapısı

2.2.2. Kompozit Sandviç Panellerin Düşük Hızlı Darbe Hasarının Modellenmesi

Kompozit sandviç panellerin düşük hızlı darbe etkisi altındaki hasar davranışını sayısal olarak modellemek için ticari LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımında kompozit sandviç paneller için oluşturulan düşük hızlı darbe hasar modeli Şekil 2.35’ te ağ yapısı ve bileşenleriyle birlikte gösterilmiştir. Kompozit yüzey plakaları 1 mm kalınlık ve 90 mm x 90 mm, çekirdek yapı üzerinde yer alan tabaka ise 1 mm kalınlık ve 80 mm x 80 mm boyutlara sahip olacak şekilde modellenmiştir. Kompozit sandviç panel numunelerinin üst ve alt yüzey plakalarının sayısal modelde çekirdek yapıdan ayırt edilmesi için plakaların yüzey alanları çekirdek yapının yüzey alanından biraz daha büyük yapılmıştır. Sandviç panelleri sabitlemek için panellerin alt ve üst tarafına delik çapı 50 mm, dış çapı 120 mm ve kalınlıkları 10 mm olan tutucular yerleştirilmiştir. Yarı küresel başlı vurucu ucun çapı 12,7 mm’ ye ayarlanmıştır. Vurucu ucun kompozit sandviç panele çarpması sırasında üst tutucunun yukarı yönlü hareketini engellemek için üst tutucu üzerinde 2,5 mm kalınlığa sahip sınırlayıcılar kullanılmıştır. Bal peteği ve ökzetik desenli çekirdek yapıların hücre kısımlarının geometrik boyutlandırmaları Tablo 2.1’ de verilen ölçülere göre yapılmıştır. Kompozit sandviç panel numunelerinin boyutlandırmaları için Şekil 2.6’ da gösterilen ölçüler kullanılmıştır.



Şekil 2.35. Bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panellerin sonlu elemanlar darbe modeli ve ağ yapısı

Kompozit sandviç panellerin yüzey plakaları ve çekirdek kısmı üzerinde yer alan yapıştırıcı tabaka için dört düğüm noktalı kabuk elemanlar (ELFORM=2) kullanılmıştır. Her iki plakanın düzlemsel boyutlarının kalınlıklarına oranı 10' dan büyük olduğu için kabuk eleman yaklaşımı problemin çözüm süresinin azaltılması açısından avantaj sağlamaktadır (Heimbs ve diğ., 2006). Kompozit sandviç panelin yüzey plakaları için LS-DYNA dört düğüm noktalı ve tam etkileşimli eleman formülasyona sahip kabuk elemanlar kullanılmıştır. CETP kompozit laminalar, LS-DYNA yazılımında yer alan INTEGRATION SHELL özelliği ile [0/90/0/90/0] yönlerine göre aynı kalınlıkta (0,2 mm) dizilerek 1 mm kalınlığında kompozit laminat oluşturulmuştur (LSTC, 2009). Çekirdek yapının desen kalınlığının düzlemsel boyutlarına oranı beşten küçük olduğu için analiz sonuçlarının hassasiyeti açısından kompozit sandviç panelin çekirdek kısımlarında sekiz düğüm noktalı katı (ELFORM= 1) elemanlar kullanılmıştır. Tablo 2.5' te kompozit sandviç panellerin düşük hızlı darbe analizleri için oluşturulan sonlu eleman modelinde yer alan bileşenlerin eleman boyutları, eleman tipleri ve eleman sayıları gösterilmiştir. Modellere uygulanan sınır şartları, deneysel çalışmada kullanılan tutucu sistemle eşleştirilecek şekilde ayarlanmıştır (Bernard, 2011). Sonlu elemanlar darbe modelinde kompozit sandviç panellere uygulanan sınır şartları için alt ve üst tutuculara hareket kısıtlaması tanımlanmıştır. Kompozit sandviç panele üst tutucu tarafından baskı uygulamak için LOAD SEGMENT kartı kullanılmıştır. Üst tutucuya x ve y yönlerinde hareket kısıtlaması verilirken z yönünde (aşağı yön) hareketine izin verilmiştir. Alt tutucunun hareketi tüm yönlerde kısıtlanarak kompozit sandviç panelin aşağı doğru hareket etmesi engellenmiştir. Alt ve üst tutucuların x, y ve z eksenleri etrafında dönmesi kısıtlanmıştır. Vurucu ucun üst tarafında merkezde yer alan bir düğüm noktasına 8 kg' lık kütle tanımlaması yapılmıştır (Buizer, 2010). Vurucu ucun aşağı yön (z yönü) hariç diğer tüm yönlerde hareketi kısıtlanmıştır. Darbe analizlerinde kompozit sandviç panellerde tam geri tepme (rebound), kısmi geri tepme veya saplanma (penetration) ve kısmi veya tam (perforation) delme şartlarını sağlamak için düşük hızlı darbe testlerinde olduğu gibi vurucu uça sırasıyla 2,236, 3,163 ve 4,183 m/s' lik başlangıç hız şartları tanımlanmıştır.

Tablo 2.5. Kompozit yüzey plakalı sandviç panelin sonlu elemanlar darbe modelinde kullanılan eleman tipleri ve sayıları

Bileşen	Eleman tipi	Boyut (mm)	Çekirdek yapının eleman sayısı			
			Düz. içi bal petek	Düz. içi ökzetik	Düz. dışı bal petek	Düz. dışı ökzetik
Yüzey plakaları	Shell	2	4050	4050	4050	4050
Yapıştırıcı tabakalar	Shell	2	3200	3200	3200	3200
Çekirdek	Solid	1	49220	57400	26255	26468
Vurucu uç	Shell	0,5-1	3200	3200	3200	3200
Tutucular	Solid	1,5-3	33300	33300	33300	33300
Sınırlayıcılar	Solid	2,5-3	8	8	8	8
Toplam	-	-	92978	101158	70013	70226

Kompozit sandviç panellerin sonlu elemanlar darbe modelinde malzeme özelliklerinin tanımlanması sürecinde malzemeye ilgili tüm hasar parametrelerinin deneysel olarak belirlenememesi nedeniyle deneysel ve sayısal sonuçlar arasında farklılıklar olabilmektedir. Bu nedenle, malzeme özellikleri sonlu elemanlar darbe modeline tanımlandıktan sonra malzeme özelliklerinin kalibrasyonu için darbe testlerinden elde edilen verilerle sayısal sonuçlar karşılaştırılarak malzemelerin etkin hasar şekil değiştirme parametreleri kalibre edilmiştir (Bernard, 2011). Düşük hızlı darbe testlerinde kullanılan vurucu uç, sıkıştırma cıvataları, alt ve üst tutucular çelik malzemeden yapılmış olup çarpma esnasında plastik deformasyona uğramadıkları tespit edilmiştir. Bu nedenle, sayısal modelde bu parçalar rijit cisim olarak tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar darbe modelindeki rijit cisimler için çelik malzeme özellikleriyle birlikte MAT20 malzeme modeli kullanılmıştır. Tablo 2.6' da kompozit sandviç panellerin sonlu elemanlar darbe modelinde kullanılan rijit malzemelerin özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.6. Kompozit sandviç panellerin sonlu elemanlar darbe modelindeki rijit cisimlerin malzeme özellikleri

Yoğunluk [kg/m ³]	Elastisite modülü [GPa]	Poisson oranı
7850	210	0,3

Kompozit sandviç panellerin yüzey plakalarının hasar davranışını belirlemek için LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımında yer alan MAT54 kompozit malzeme hasar modeli kullanılmıştır. 12K düzlemsel örgülü KETP kompozit çekme numunesi için gerçekleştirilen çekme testinden elde edilen elastisite modülü ve şekil değiştirme değerleri Tomblin ve diğ. (2002) tarafından yapılan çalışmadaki verilerle uyumlu elde edilmiştir. Bu nedenle, kompozit sandviç panellerin yüzey plakasında kullanılan 12K düzlemsel örgülü KETP kompozit malzemenin mekanik özellikleri ve hasar parametreleri için Tablo 2.7 ve Tablo 2.8’ de verilen değerler kullanılmıştır (Feraboli ve diğ., 2011).

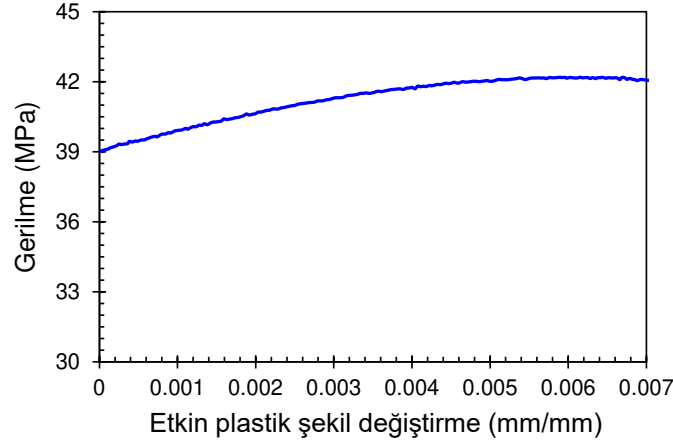
Tablo 2.7. KETP kompozit malzemenin mekanik özellikleri

E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	G_{12} [GPa]	ν_{21}	X_T [MPa]	X_C [MPa]	Y_T [MPa]	Y_C [MPa]	S_C [MPa]
55,92	54,4	4,199	0,043	910,1	710,2	772,2	703,2	131

Tablo 2.8. KETP kompozitin MAT54 malzeme modeli için kullanılan hasar parametreleri

DFAILT [mm/mm]	DFAILC [mm/mm]	DFAILM [mm/mm]	DFAILS [mm/mm]	EFS [mm/m]	TFAIL	FBRT	YCFAC	SOFT	ALPH	BETA
0,0164	-0,013	0,014	0,03	0	$1,153 \times 10^{-9}$	0,5	1,2	0	0,1	0,5

Kompozit sandviç panelin çekirdek kısmı, izotrop davranış gösteren ABS malzemeden üretildiği için LS-DYNA sonlu elemanlar darbe modelinde bu malzeme için hasar modeli olarak MAT24 (PIECEWISE LINEAR PLASTICITY) tercih edilmiştir. MAT24 malzeme hasar modeli, şekil değiştirme hızı etkisini hesaba katarak tüm şekil değiştirme hızları için tek bir etkin hasar şekil değiştirme parametresi kullanır (Megan ve diğ., 2015). Bu malzeme hasar modeli için malzeme özellikleri olarak, poisson oranı, elastisite modülü ve akma mukavemeti ile çekme testinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisinin akma sınırından sonraki etkin plastik şekil değiştirmeye karşı gerilme eğrisi kullanılır (Şekil 2.36).



Şekil 2.36. ABS malzeme için deneysel olarak elde edilen akma sonrası normal gerilme-etkin plastik şekil değiştirme eğrisi

ASTM D638-14 standardına göre boyutlandırılarak FDM tip 3D yazıcıda üretilen ABS malzemeli numunenin çekme testleri 2 mm/dak sabit çene hızında gerçekleştirilmiştir (ASTM D638, 2004). ABS malzemenin çekme testleri sonucunda çekme mukavemeti, elastisite modülü, akma mukavemeti gibi mekanik özelliklerinin yanında gerilme-şekil değiştirme eğrisi elde edilmiştir. Etkin hasar şekil değiştirme değeri, kompozit sandviç panellerin sonlu elemanlar darbe analizleri ve darbe testlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılmasıyla kalibre edilerek belirlenmiştir. ABS malzeme için belirlenen mekanik özellikler ve etkin hasar şekil değiştirme değeri Tablo 2.9’ da verilmiştir. Kompozit sandviç panellerin sonlu elemanlar analizlerinde KETP kompozit ve ABS malzeme için şekil değiştirme hızı etkileri ihmal edilmiştir.

Tablo 2.9. ABS malzemenin deneysel belirlenen mekanik özellikleri ve MAT24 malzeme hasar modeli için kalibre edilen etkin hasar şekil değiştirme parametresi

Yoğunluk [kg/m ³]	Elastisite modülü [GPa]	Akma mukavemeti [MPa]	Poisson oranı	Etkin hasar şekil değiştirmesi [mm/mm]
1100	1,741	39	0,35	1,5

Vurucu ucun kompozit sandviç panele çarpması sırasında çekirdek duvarlarının kendi kendine teması ve farklı parçalar arasındaki olası etkileşimleri modellemek için sonlu elemanlar darbe modelinde temas algoritmaları kullanılmıştır. Kompozit sandviç panellerin sonlu elemanlar darbe modelinde malzemelerin hasar parametreleri tanımlandığı için vurucu

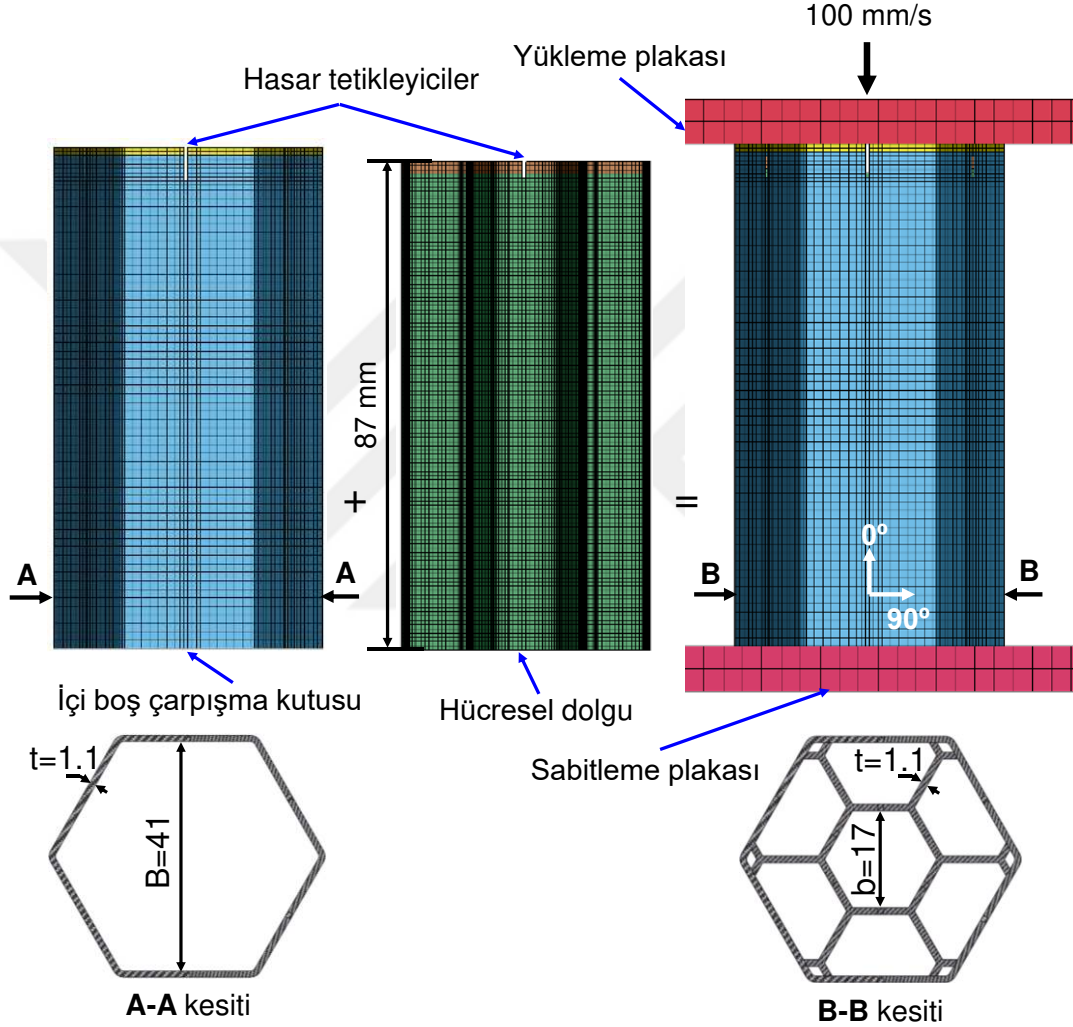
uç ile panel arasında ERODING SURFACE TO SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. Sınır şartlarını oluşturan tutucular ve kompozit sandviç panelin yüzey plakaları arasında AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE temas algoritması tercih edilmiştir. Çarpma sırasında kompozit sandviç panel bileşenlerinin kendi kendine temasını sağlamak için her bir bileşene ERODING SINGLE SURFACE temas algoritması tanımlanmıştır. Bununla birlikte çekirdek yapı ile yapışma tabakası arasında TIED NODES TO SURFACE temas türü kullanılarak çok iyi temas olduğu varsayılmıştır. Kompozit yüzey plakaları ile çekirdek yapının yapışma tabakası arasındaki temas için normal (NFLS) ve kayma (SFLS) mukavemet özellikli delemantasyon hasar kriterini içeren temas türü (ONEWAY SURFACE TO SURFACE TIEBREAK) kullanılmıştır. Epoksi film yapıştırıcının normal ve kayma hasar mukavemetleri sırasıyla 56 MPa ve 44 MPa olarak kabul edilmiştir (Dogan ve diğ., 2012). Vurucu uç ile kompozit sandviç panel, tutucular ile kompozit yüzey plakaları arasındaki temas algoritmalarında statik sürtünme katsayısı değeri 0,3, dinamik sürtünme katsayısı 0,2 olarak alınmıştır. Bu değerler, Luo ve diğ. (2004)' nin karbon elyaf takviyeli polimer kompozit malzemeler için yaptıkları sürtünme deneylerinden elde edilmiştir.

Kompozit sandviç panellerin sonlu elemanlar darbe modelinde, kompozit yüzey plakalarında kullanılan kabuk elemanların eğilme durumuna karşı doğru bir çözüm elde etmek amacıyla bu elemanlar için rijitlik esaslı (IHQ=4) hourglass kontrolü kullanılmıştır. Katı elemanlarda şok dalgalarını yaymada kullanılan yığın viskozite için Flanagan-Belytschko rijitlik esaslı (IHQ=5) hourglass kontrolü tercih edilmiştir.

2.2.3. Kompozit Çarpışma Kutularında Ezilme Hasarının Modellenmesi

Bu çalışma kapsamında üretilen kompozit çarpışma kutularının ezilme hasarıyla ilgili sayısal analizler için ticari LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım sayesinde karmaşık sayısal modellerin geliştirilmesinin yanında gerçek sınır şartları ve yüklemeler altında kompozit yapılardaki hasar davranışı açık (explicit) çözümle analiz edilebilmektedir. Şekil 2.37' de kompozit çarpışma kutularının sayısal ezilme analizleri için oluşturulan sonlu elemanlar modeli gösterilmiştir. Kompozit çarpışma kutularının sonlu elemanlar ezilme modeli, kompozit çarpışma kutusu, yükleme plakası, sabitleme plakası, hasar tetikleyiciler olmak üzere dört bileşenden oluşmaktadır. Ezilme sürecinde oluşan pik (maksimum) kuvveti azaltmak için kompozit çarpışma kutularının iç ve dış duvarlarının üst

taraflarında 6' şar adet 1 mm genişliğinde sırasıyla 3 mm ve 6 mm derinliğinde hasar tetikleyici kanallar kullanılmıştır. Kompozit çarpışma kutuları daire tipi kesme taşı ile kesilirken üst tarafları çentik etkisine maruz kalarak zayıfladığı için sonlu elemanlar ezilme modelinde bu kısımlar için 3 mm yüksekliğinde olacak şekilde çarpışma kutusu kalınlığının yarısı kadar inceltilmiştir.

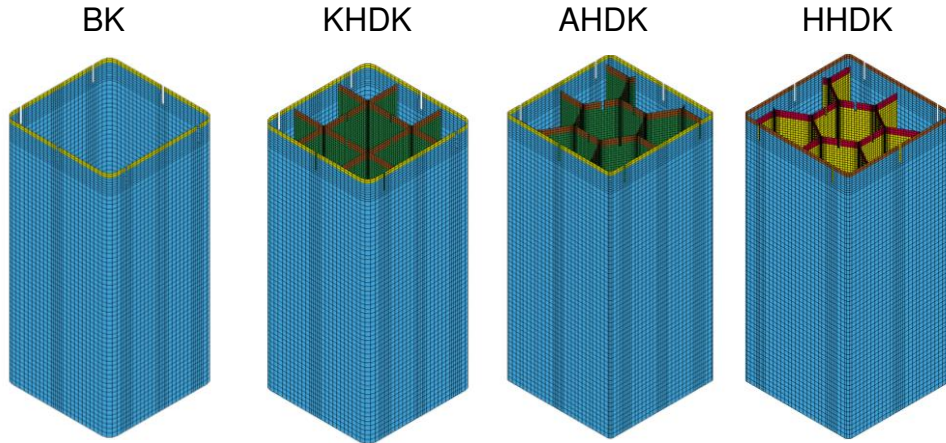


Şekil 2.37. Kompozit çarpışma kutuları için oluşturulan sonlu elemanlar ezilme modeli

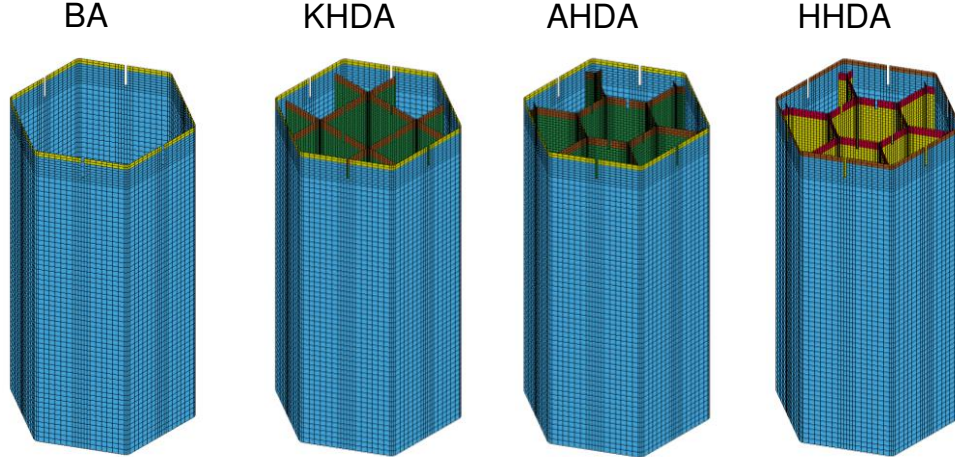
Kompozit çarpışma kutularının duvarlarının kalınlığı yükseklik ve genişliğe göre yeterince ince olduğu için sonlu elemanlar ezilme modelinde bu kısımlar için kabuk eleman yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde sonlu elemanlar ezilme analizlerinin çözüm süresi azaltılmıştır. Kabuk eleman yaklaşımıyla her lamina elemanı için bir etkileşim noktasıyla birlikte lamina kalınlığı, elyaf yönü ve açısı tanımlanarak kompozit laminat oluşturulmaktadır. Sonlu elemanlar ezilme modelinde PART COMPOSITE kartı kullanılarak

kompozit çarpışma kutularının duvarlarına dizilim sırasına göre lamina kalınlığı, eleman formülasyonu, elyaf açısı ve hasar modeli tanımlanarak laminalı kabuk teorisi uygulanmıştır. Laminalı kabuk teorisini aktif etmek için CONTROL SHELL kartında LAMSHT=1 olarak ayarlanmıştır. Belytschko-Tsai tip eleman formülasyonu (ELFORM=2) ve rijitlik esaslı hourglass kontrol (IHQ=4) ile birlikte dört düğüm noktalı kabuk elemanlar kompozit çarpışma kutularının duvarlarına tanımlanmıştır.

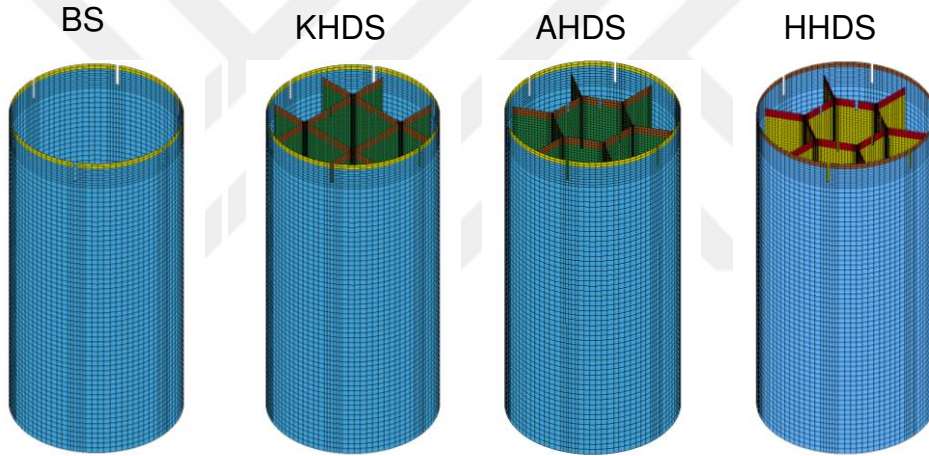
Analiz sonuçlarının eleman boyutundan bağımsızlığını (mesh optimizasyonu) sağlamak için kabuk elemanların boyutları kompozit çarpışma kutusu dış duvarlarında 1,5 mm, hücresel dolgu duvarlarında 0,75 mm olarak seçilmiştir. Hasar tetikleyici kanallar ve hücresel dolgu kısımların birleşme yerlerinde Şekil 2.38, 2.39 ve 2.40’ da görüldüğü gibi yapılandırılmış elemanlar kullanılmıştır. Yükleme ve sabitleme plakaları için sekiz düğüm noktalı katı (ELFORM= 1) elemanlar tercih edilmiştir. Ezilme analizi süresince yükleme plakasına aşağı yönlü eksenel yer değiştirmeli 100 mm/s’ lik sabit hareket hızı sınır şartı tanımlanmıştır. Yükleme plakasının aşağı yönlü hareketi hariç diğer tüm yönlerde hareketi kısıtlanmıştır. Sabitleme plakasına ise tüm yönlerde hareket kısıtlaması verilmiştir. Kompozit çarpışma kutusunun üst tarafı tüm yönlerde serbest bırakılmış olup alt tarafına ise sadece aşağı yönde hareket serbestliği tanımlanmıştır.



Şekil 2.38. İçi boş kare (BK), kare hücre dolgulu kare (KHDK), altıgen hücre dolgulu kare (AHDK) ve hibrit hücre dolgulu kare (HHDK) dış duvarlı tip KETP kompozit çarpışma kutularının ağ (mesh) yapıları



Şekil 2.39. İçi boş altıgen (BA), kare hücre dolgulu altıgen (KHDA), altıgen hücre dolgulu altıgen (AHDA) ve hibrit hücre dolgulu altıgen (HHDA) dış duvarlı tip KETP kompozit çarpışma kutularının ağ yapıları



Şekil 2.40. İçi boş silindir (BS), kare hücre dolgulu silindir (KHDS), altıgen hücre dolgulu silindir (AHDS) ve hibrit hücre dolgulu silindir (HHDS) dış duvarlı tip KETP kompozit çarpışma kutularının ağ yapıları

Kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında duvarların kendi kendine teması ve farklı parçalar arasındaki olası etkileşimleri hesaba katmak için sonlu elemanlar ezilme modelinde temas algoritmaları kullanılmıştır. Yükleme plakası ile kompozit çarpışma kutusu arasında AUTOMATIC NODES TO SURFACE, sabitleme plakası ile kompozit çarpışma kutusu arasında AUTOMATIC SINGLE SURFACE, kompozit çarpışma kutularının hücresel dolgu kısımları ve dış duvarları arasında AUTOMATIC NODES TO SURFACE temas algoritmaları sonlu elemanlar ezilme modelinde tanımlanmıştır. Kompozit çarpışma kutusu duvarlarının kendi kendine temasını sağlamak için AUTOMATIC SINGLE SURFACE temas algoritması sonlu elemanlar ezilme modelinde çarpışma kutusu

duvarlarına uygulanmıştır. Hibrit hücresel dolgulu kompozit çarpışma kutularında kullanılan birleştirme plakasının kare ve altıgen hücrelere temas yerlerinde AUTOMATIC SINGLE SURFACE temas türü sonlu elemanlar ezilme modelinde kullanılmıştır. Kompozit çarpışma kutularının sonlu elemanlar ezilme modellerinin tümünde temas algoritmaları tümü için statik sürtünme katsayısı değeri 0,2, dinamik sürtünme katsayısı 0,1 olarak kabul edilmiştir.

Ezilme testlerinde kullanılan yükleme ve sabitleme plakaların test sırasında deformasyonları ihmal edilebilir düzeyde olduğu için sonlu elemanlar ezilme modelinde bu plakalar rijit cisim kabulü yapılmıştır. LS-DYNA sonlu elemanlar ezilme modelinde MAT20 rijit cisim malzeme modeli kullanılmıştır. Sonlu elemanlar ezilme modelinde çelik malzeme yükleme ve sabitleme plakalarının malzeme özellikleri Tablo 2.6' da verilmiştir. Kompozit çarpışma kutularının statik basma yükü altındaki hasar davranışlarını belirlemek için sonlu elemanlar ezilme modelinde MAT54 kompozit malzeme hasar kriteri tercih edilmiştir. 12K [0/90] örgülü KETP kompozit malzemenin ASTM standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen mekanik testlerinden elde edilen özellikler Tablo 2.10' da verilmiştir. Kompozit çarpışma kutularının sonlu elemanlar ezilme modelinde KETP kompozit malzeme için kalibre edilerek elde edilen hasar parametreleri ise Tablo 2.11' de gösterilmiştir. Kompozit çarpışma kutularının ezilme analizlerinde çözüm süresini azaltmak için sonlu elemanlar ezilme modeline kütle ölçeklendirme işlemi uygulanmıştır.

Tablo 2.10. 12K [0/90] örgülü KETP kompozit malzemenin deneysel belirlenen mekanik özellikleri

Sembol	Özellik	Değer
ρ	Yoğunluk	1371 kg/m ³
E_1	Boylamasına yönde elastisite modülü	53,02 GPa
E_2	Enine yönde elastisite modülü	53,02 GPa
G_{12}	Düzlemsel kayma modülü	3,150 GPa
ν_{21}	Minör Poisson oranı	0,043
X_t	Boylamasına yönde maksimum çekme mukavemeti	711 MPa
X_c	Boylamasına yönde maksimum basma mukavemeti	298 MPa
Y_t	Enine yönde maksimum çekme mukavemeti	711 MPa
Y_c	Enine yönde maksimum basma mukavemeti	298 MPa
S_c	Maksimum düzlemsel kayma Mukavemeti	58 MPa

Tablo 2.11. 12K [0/90] örgülü KETP kompozit malzemenin MAT54 hasar modeli için kalibre edilen hasar parametreleri

Sembol	Özellik	Değer
EFS	Etkin hasar şekil değiştirmesi	0,9
TFAIL	Zaman adımlı hasar kriteri	0,4
FBRT	Boylamasına yönde çekme hasarı sonrası mukavemet azaltma katsayısı	1,5
YCFAC	Boylamasına yönde basma hasarı sonrası mukavemet azaltma katsayısı	1,5
SOFT	Hasar sonrası ağ elemanlarının malzeme mukavemetini azaltan yumuşatma faktörü	0,9
ALPH	Kayma gerilmesinin doğrusal olmayan bölgesi için düzeltme katsayısı	0
BETA	Boylamasına yönde çekmede kayma terimi için ağırlıklaştırma faktörü	0
SLIMT1	Hasar sonrası boylamasına yönde çekme gerilmesini sınırlama faktörü	0,01
SLIMC1	Hasar sonrası boylamasına yönde basma mukavemetini sınırlama faktörü	0,35
SLIMT2	Hasar sonrası enine yönde çekme mukavemetini sınırlama faktörü	0,1
SLIMC2	Hasar sonrası enine yönde basma mukavemetini sınırlama faktörü	1
SLIMS	Hasar sonrası düzlemsel kayma mukavemetini sınırlama faktörü	1

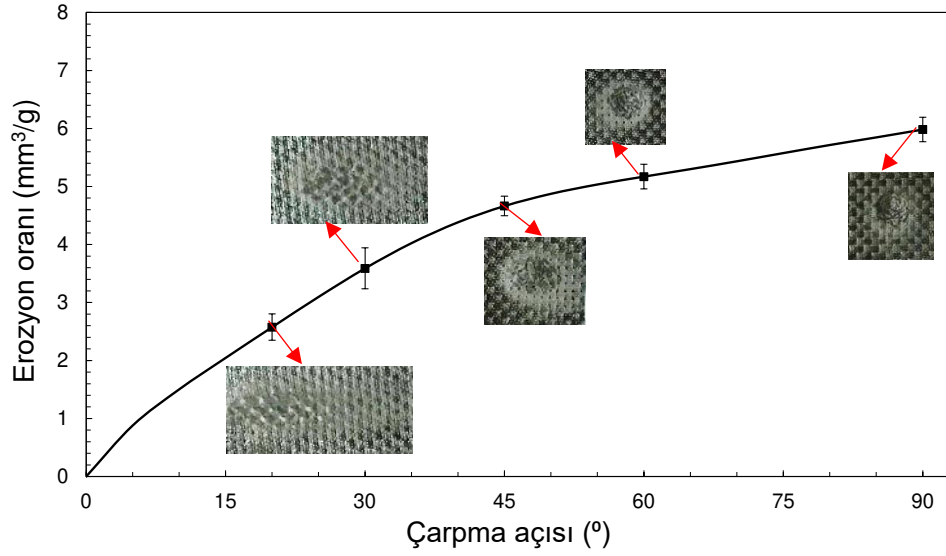
3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. KETP ve CETP Kompozit Malzemeli Plaka Numunelerin Katı Parçacık Erozyon Davranışı

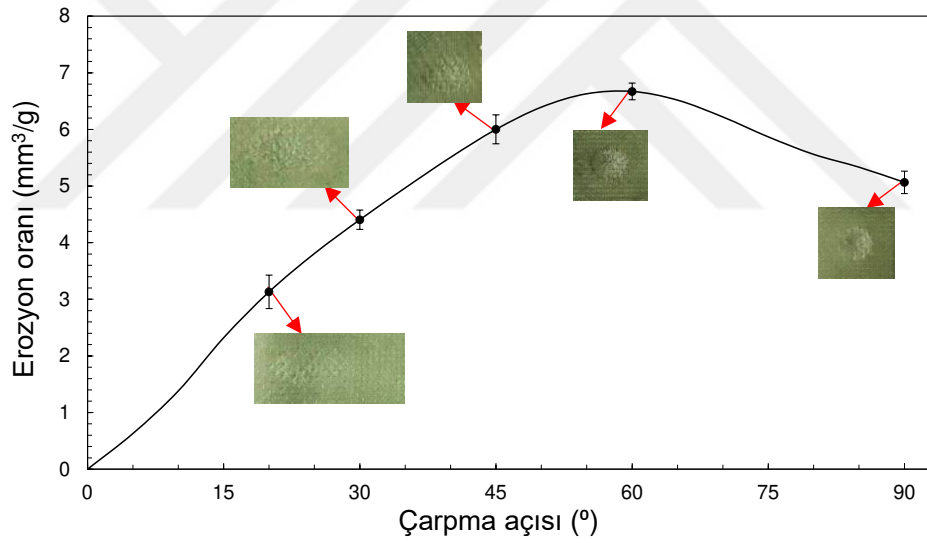
Düzlemsel 3K örgülü cam elyaf takviyeli polimer (CETP) ve karbon elyaf takviyeli polimer (KETP) kompozit laminatların elyaf hacim oranları karışımlar kuralı kullanılarak sırasıyla %50 ve %64 olarak hesaplanmıştır. CETP ve KETP kompozit malzemeler için elde edilen bu elyaf hacim oranı değerleri havacılıkta kullanılan birincil derecedeki yapısal parçaların üretimi için uygundur (Hashim ve diğ., 2017).

Çok yönlü veya örgülü kompozitlerin erozyon davranışı, 15°'den daha yüksek çarpma açılarında laminatların elyaf yönüne duyarlı değildir (Kim ve Kim, 2009). Helikopterin uçuşu sırasında ana rotor palleri hücum açısına bağlı olarak genellikle yüksek çarpma açılı katı parçacıklara maruz kalırlar. Bu nedenle bu çalışmada elyaf yönünün erozyon hasarına etkisi göz ardı edilmiştir. Maksimum erozyon oranı 15-45° arasında olan malzemeler sünek hasar davranışı gösterir. Bununla birlikte maksimum erozyon oranı 90° çarpma açısında elde edilmesi durumunda ise malzeme gevrek hasar davranışı sergiler. Maksimum erozyon oranı 45-60° arasında olan malzemelerin yarı sünek-yarı gevrek hasar davranışı gösterdiği literatürdeki çalışmalarda belirtilmiştir (Harsha ve diğ., 2003; Tewari ve diğ., 2003; Cai ve diğ., 2016).

Katı parçacık erozyon testleri sonucu KETP ve CETP kompozit numune yüzeylerinde oluşan çarpma açısına göre erozyon oranının değişimi erozyon hasar izleriyle birlikte Şekil 3.1 ve Şekil 3.2' de gösterilmiştir. KETP kompozit malzemenin maksimum erozyon oranı 90° çarpma açısında elde edildiği için bu malzeme gevrek hasar davranışı sergilemiştir. Buna karşın CETP kompozit malzemenin maksimum erozyon oranı 60° çarpma açısında olduğu için bu malzeme yarı gevrek-yarı sünek hasar davranışı göstermiştir.



Şekil 3.1. KETP kompozit malzemeli plaka numunesinin deneysel belirlenen erozyon davranışının çarpma açısına göre değişimi ($V_P = 110$ m/s)

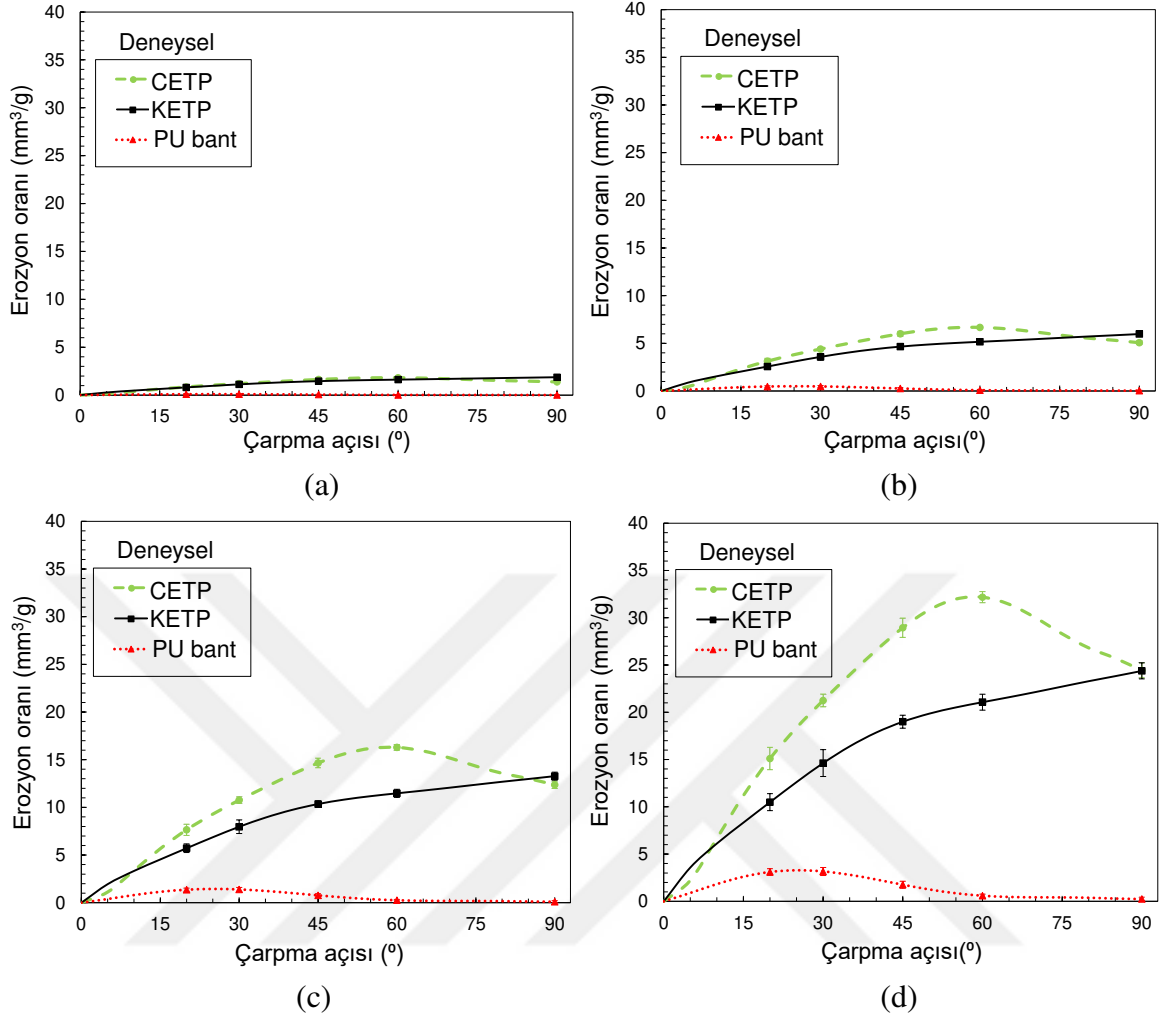


Şekil 3.2. CETP kompozit malzemeli plaka numunesinin deneysel erozyon davranışının çarpma açısına göre değişimi ($V_P = 110$ m/s)

3.2. CETP ve KETP Kompozit Malzemeli Plaka Numunelerin Katı Parçacık Erozyon Davranışına Göre PU Bant Malzeme ile Karşılaştırması

Şekil 3.3' te CETP, KETP ve PU bant malzemelerin farklı çarpma hızları (70, 110, 150 ve 190 m/s) için farklı çarpma açıları altında gerçekleştirilen katı parçacık erozyon testlerinden elde edilen çarpma açısına karşı erozyon oranı değişim eğrileri gösterilmiştir. Malzemelerin erozyon oranı değerlerinde çarpma hızındaki artışa bağlı olarak önemli derece

artışlar olmuştur. CETP ve KETP kompozit malzemeleri 90° çarpma açısında çarpma hızına bağlı erozyon değerleri yüksek çarpma hızlarında ($V_P = 150$ m/s ve $V_P = 190$ m/s) Şekil 3.3c ve d' de görüldüğü gibi birbirine çok yakın elde edilmiştir. Daha düşük çarpma hızında ($V_P = 70$ m/s) CETP ve KETP kompozit malzemelerin 30° çarpma açısına kadar erozyon değişimi birbiriyle yeterli oranda uyumlu elde edilmiştir (Şekil 3.3a). Diğer tarafta, PU bant malzemesi CETP ve KETP kompozit malzemelere göre çok daha az hasarlı erozyon davranışı sergilemiştir. CETP kompozit malzemeli numunede çarpma hızındaki artışa bağlı olarak özellikle 30-75° arasındaki çarpma açılarında KETP kompozit ve PU bant malzemelere göre daha yüksek seviyeli erozyon oranı elde edilmiştir. PU bant malzemeli numunede erozyon oranı 30° çarpma açısında en yüksek seviyede ve 60-90° arasındaki çarpma açılarında en düşük seviyelerde elde edilmiştir. PU bant malzeme 30° çarpma açısında maksimum erozyon davranışı gösterdikten sonra 90° çarpma açısına kadar çarpma açısındaki artışa bağlı olarak daha düşük erozyon seviyelerine sahip olduğu için sünek hasar davranışı sergilemiştir (Finnie, 1960). Buna karşın CETP kompozit numunede en yüksek erozyon oranı 60° çarpma açısında elde edilmiştir. Maksimum erozyon oranı 45-60° arasında çarpma açısında olduğu için CETP kompozit malzeme yarı sünek-yarı gevrek erozyon hasar davranışı göstermiştir. KETP kompozit malzemeli numunedeki erozyon oranı çarpma açısındaki artışa bağlı olarak sürekli artmış ve 90° çarpma açısında maksimum değerine ulaşmıştır. Bu durum KETP kompozit malzemenin gevrek hasar davranışına sahip olduğunu göstermektedir. En düşük çarpma hızı (70 m/s) için PU bant, CETP kompozit ve KETP kompozit malzemelerin maksimum erozyon oranı değerleri sırasıyla 0,099 mm³/g, 1,816 mm³/g ve 1,871 mm³/g olarak elde edilmiştir. En yüksek çarpma hızı (190 m/s) için ise maksimum erozyon oranı değerleri sırasıyla 3,164 mm³/g, 32,174 mm³/g ve 24,378 mm³/g olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla bu malzemelerin erozyon oranı değerleri çarpma hızındaki artışa bağlı olarak önemli bir artış göstermiştir. Sonuç olarak, CETP kompozit malzeme 70 m/s ve 190 m/s çarpma hızlarında PU bant malzemeye göre sırasıyla 20 ve 10 kat daha yüksek maksimum seviyeli erozyon değerleriyle birlikte çok daha kötü erozyon davranışı sergilemişlerdir. Ayrıca KETP kompozit malzeme özellikle 90° çarpma açısında düşük çarpma hızları için (70 m/s ve 110 m/s) PU bant malzemeye göre çok daha yüksek erozyon oranına sahip olmuştur.

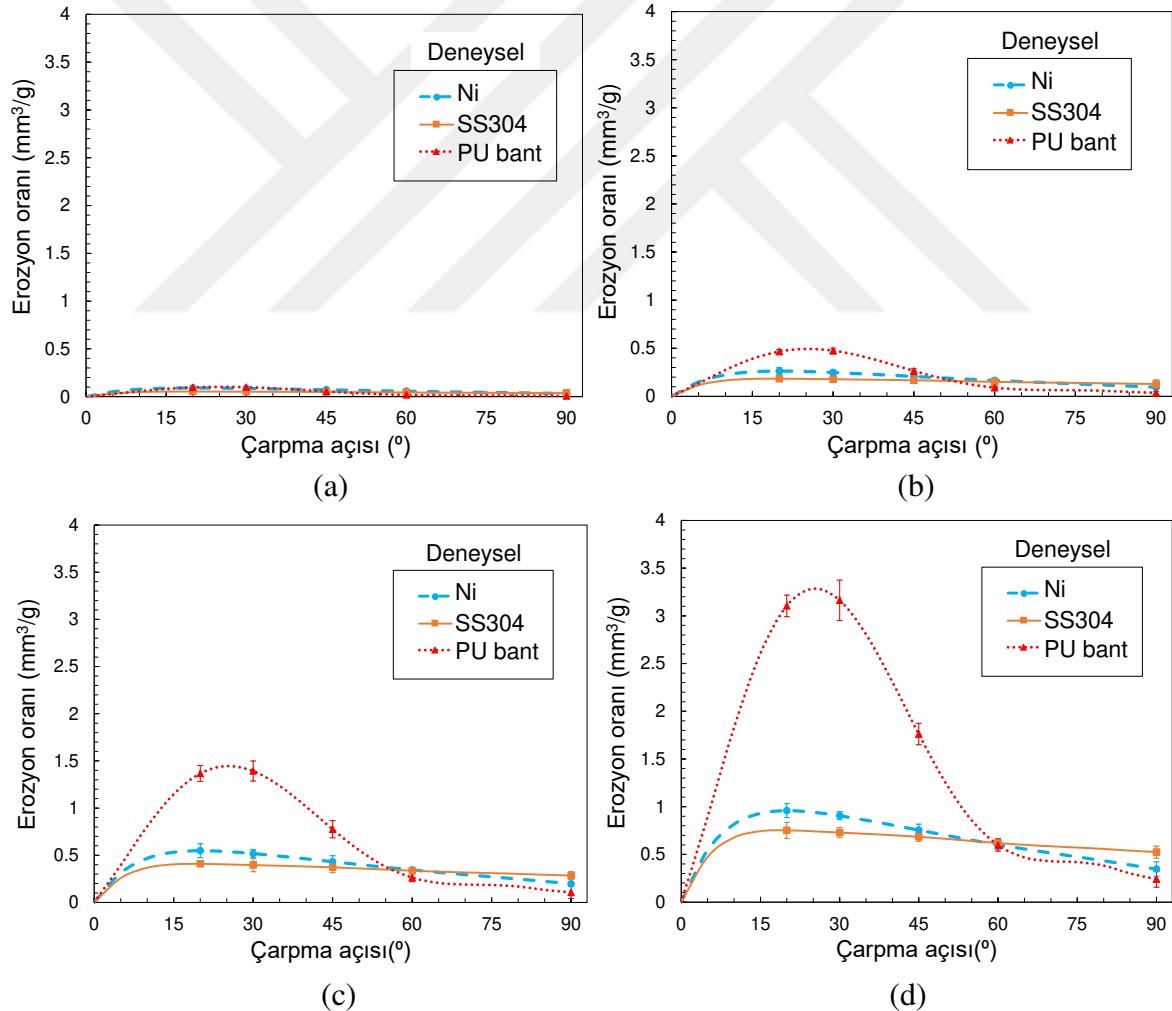


Şekil 3.3. PU bant, KETP kompozit ve CETP kompozit malzemeli plaka numunelerin çarpma açısına bağlı erozyon davranışının çarpma hızına göre karşılaştırması: (a) $V_p = 70$ m/s, (b) $V_p = 110$ m/s, (c) $V_p = 150$ m/s ve (d) $V_p = 190$ m/s

3.3. SS304 ve Ni Malzemeli Plaka Numunelerin Katı Parçacık Erozyon Davranışına Göre PU Bant Malzeme ile Karşılaştırması

Şekil 3.4' te paslanmaz çelik (SS304) ve saf nikel (Ni) malzemelerinin farklı çarpma hızları için (70 m/s, 110 m/s, 150 m/s ve 190 m/s) çarpma açısına göre elde edilen erozyon oranı değişimlerinin PU bant malzemeyle karşılaştırması gösterilmiştir. Çarpma hızındaki artışa bağlı olarak malzemelerin erozyon oranı değerlerinde önemli miktarlarda artışlar olmuştur. Yüzeye normal çarpma açısı (90°) için SS304 malzeme tüm çarpma hızlarında en kötü erozyon performansı sergilerken PU bant malzeme en iyi erozyon performansı sergilemiştir. 20° çarpma açısında maksimum erozyon oran değerleri SS304 ve Ni malzemelerde elde edilmiştir. Bu durum, SS304 ve Ni malzemelerin katı parçacık çarpması

altında sünek hasar davranışı sergilediğini göstermektedir (Oka ve diğ., 2005). En düşük çarpma hızı (70 m/s) için PU bant, SS304 ve Ni malzemelerinin maksimum erozyon oranı değerleri sırasıyla 0,099 mm³/g, 0,054 mm³/g ve 0,092 mm³/g olarak elde edilmiştir. Buna karşın en yüksek çarpma hızı (190 m/s) için bu değerler sırasıyla 3,164 mm³/g, 0,753 mm³/g ve 0,959 mm³/g olmuştur. Bunun yanında PU bant malzemenin erozyon oranı değerleri düşük çarpma hızı için (70 m/s) 20-45° arasında, daha yüksek çarpma hızları için (110 m/s, 150 m/s ve 190 m/s) 55° çarpma acısına kadar SS304 ve Ni malzemelere göre daha yüksek seviyelerde elde edilmiştir. PU bant malzeme tüm çarpma hızları için 60-90° arasındaki çarpma açılarında SS304 ve Ni malzemelere göre daha az hasarlı erozyon davranışı sergilemiştir.



Şekil 3.4. PU bant, Ni ve SS304 malzemeli plaka numunelerinin çarpma açısına bağlı erozyon davranışlarının çarpma hızına göre karşılaştırması: (a) $V_P = 70$ m/s, (b) $V_P = 110$ m/s, (c) $V_P = 150$ m/s ve (d) $V_P = 190$ m/s

3.4. CETP, KETP, PU Bant, SS304 ve Ni Malzemelerin HAD tabanlı Sayısal Erozyon Modellerinde Kullanılan Malzeme Sabitleri

Testlerde kullanılan malzemelerin Denklem 1.4a’ da yer alan K ve n malzeme erozyon sabitleri 90° çarpma açısı ve farklı çarpma hızları şartlarında gerçekleştirilen erozyon testlerinden elde edilen erozyon oranı değerleri kullanılarak hesaplanmıştır (DNV, 2007). Testler sonucunda elde edilen malzeme erozyon sabitleri Tablo 3.1’ de malzemelerin yoğunluklarıyla birlikte verilmiştir. CETP ve KETP kompozit malzemeler için hesaplanan n malzeme erozyon sabitleri literatürle uyumlu olarak 2,5-5 aralığında elde edilmiştir (Pool ve diğ., 1986). Bununla birlikte PU bant malzeme için hesaplanan n malzeme erozyon sabiti Arnoldt ve Hutchings (1992) tarafından yapılan çalışmayı desteklemektedir. SS304 ve Ni malzemeler için hesaplanan n malzeme erozyon sabiti değerleri 2,05-2,440 arasında Finnie (1960)’nin çalışmasıyla uyumlu elde edilmiştir. KETP kompozit, CETP kompozit, PU bant, Ni ve SS304 malzemelerin farklı çarpma açılarında gerçekleştirilen testler sonucu elde edilen erozyon oranı değerleri kullanılarak hesaplanan $F(\theta)$ fonksiyon sabitleri ($A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7$) Tablo 3.2’ de verilmiştir.

Tablo 3.1. Malzemelerin deneysel olarak belirlenen K ve n erozyon sabitleri

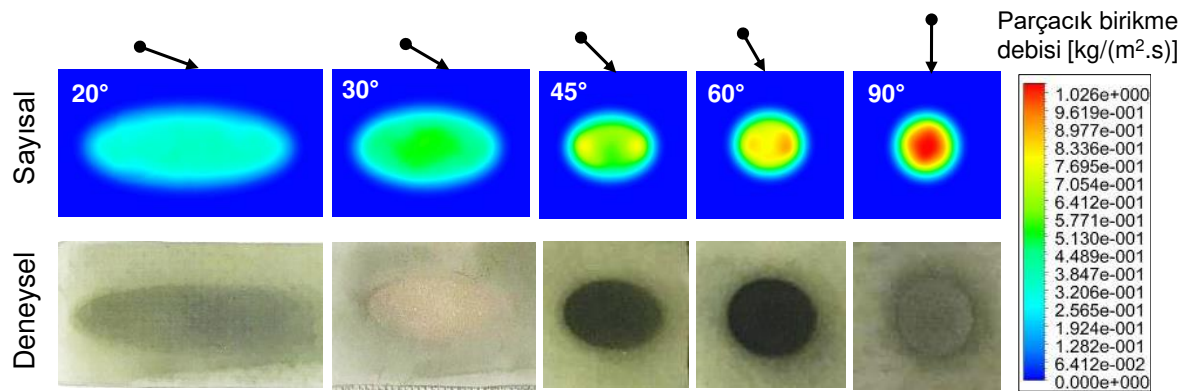
Malzeme	n	K	Yoğunluk [kg / m^3]
KETP	2,571	$4,921 \times 10^{-8}$	1500
CETP	2,878	$1,531 \times 10^{-8}$	1700
PU bant	3,472	$4,231 \times 10^{-11}$	1090
SS304	2,582	$7,371 \times 10^{-9}$	7930
Ni	2,273	$5,201 \times 10^{-8}$	8890

Tablo 3.2. Malzemelerin deneysel olarak belirlenen $F(\theta)$ erozyon fonksiyon sabiti katsayıları

Malzeme	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
KETP	2,117	-6,389	18,844	-29,592	24,035	-9,716	1,554
CETP	-0,039	12,971	-45,616	77,298	-68,832	30,531	-5,313
PU bant	2,821	6,883	-26,869	19,845	4,066	-8,966	2,449
SS304	10,262	-41,948	89,321	-108,643	75,338	-27,659	4,167
Ni	8,737	-29,961	54,093	-58,935	38,262	-13,545	2,004

3.5. CETP, KETP ve PU Bant Malzemeli Numunelerin DeneySEL ve HAD Tabanlı Sayısal Erozyon Doğrulama Modeli Sonuçlarının Karşılaştırması

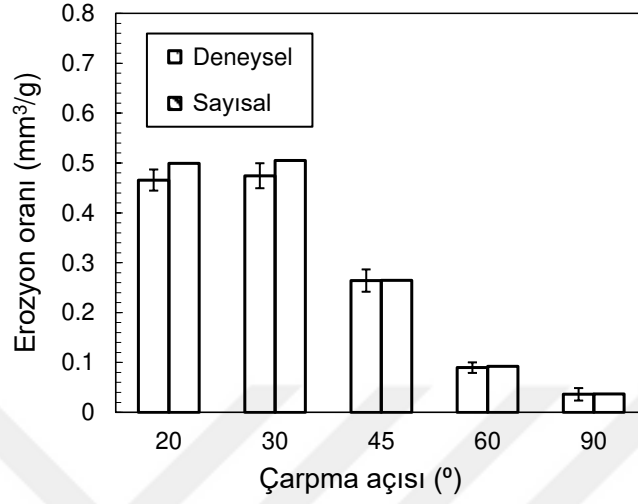
Şekil 3.5’ te HAD tabanlı sayısal erozyon analizi ve testler sonucu 110 m/s parçacık çarpma hızı için PU bant malzemeli numunelerin yüzeyinde elde edilen erozyon izleri gösterilmiştir. HAD tabanlı sayısal erozyon analizi ve testlerden elde edilen erozyon izleri Şekil 3.5’ te görüleceği üzere birbirleriyle uyum içerisinde olmuştur. Çarpma açısındaki azalmaya bağlı olarak numunelerde elips şeklinde daha büyük yüzey alanlı erozyon izleri elde edilmiştir. Yüksek çarpma açılarında (60° ve 90°) çarpma açısındaki artışa bağlı olarak numunelerde lüle çıkış çapına yakın yüzey alanına sahip dairesel şekilde erozyon izi oluşmuştur. Şekil 3.5’ in sağındaki skaladan görüleceği üzere HAD tabanlı sayısal erozyon analizlerinin bir sonucu olarak 90° çarpma açısında birim alana çarpan parçacıkların birikme debisi maksimum seviyede elde edilmiştir. Bunun bir sonucu olarak, testler sonucu elde edilen erozyon izlerine göre 90° çarpma açılı numunede birim alana çarpan parçacık miktarının fazla olması nedeniyle erozyon derinliği belirgin derecede daha fazla olmuştur. Lüleden çıkan parçacıkların lüle duvarlarındaki sürtünme nedeniyle çıkış hızları merkeze göre daha düşük olduğu için numunelerin erozyona uğramış yüzeylerinin merkezlerinde erozyon derinliği daha fazla elde edilmiştir. Parçacık besleme debisi sabit olduğu için düşük çarpma hızlarında parçacıkların daha geniş yüzey alanına çarpması yüzünden düşük çarpma açılı numune yüzeylerinde erozyon derinlikleri daha az olmuştur.



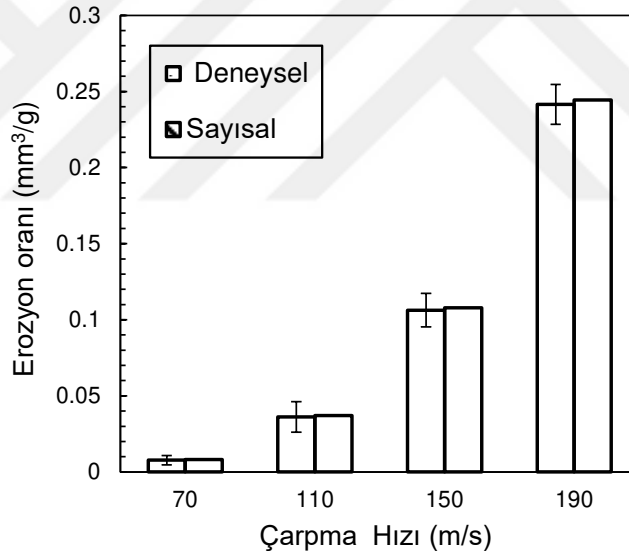
Şekil 3.5. PU bant plaka numunelerinde deneysel ve sayısal olarak elde edilen erozyon izlerinin çarpma açısına göre karşılaştırması ($V_P = 110$ m/s)

PU bant malzemeli numunelerin HAD tabanlı sayısal erozyon analiz ve test sonuçlarına göre 110 m/s parçacık çarpma hızında çarpma açısı ve 90° çarpma açısında

çarpma hızına bağlı erozyon oranlarının değişimleri karşılaştırmalı olarak Şekil 3.6' da gösterilmiştir.



(a)



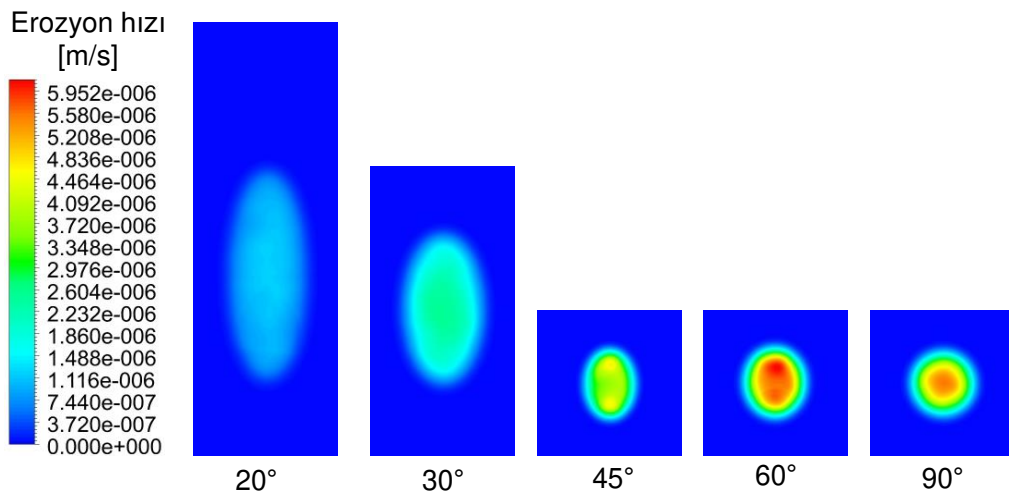
(b)

Şekil 3.6. PU bant plaka numunelerinde deneysel ve sayısal olarak elde edilen erozyon oranı değerlerinin çarpma açısı ve çarpma hızına göre karşılaştırması: (a) $V_P = 110$ m/s için çarpma açısı, (b) $\theta = 90^\circ$ için çarpma hızı

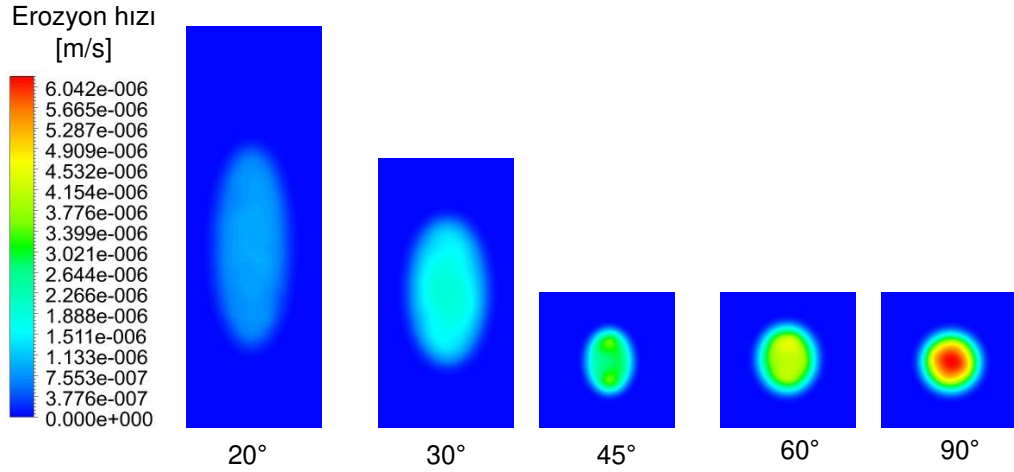
Erozyon testleri ve HAD tabanlı sayısal erozyon analizlerinin sonuçlarına göre PU bant malzemenin erozyon oranı değerleri çarpma açısı ve çarpma hızına göre değişimler açısından birbiriyle uyum içerisinde elde edilmiştir. Özellikle 45-90° arasındaki çarpma açıları (Şekil 3.6a) ve 110-190 m/s aralığındaki çarpma hızlarında (Şekil 3.6b) deneysel ve

sayısal erozyon oranı değerleri birbirine çok yakın elde edilmiştir. HAD tabanlı sayısal erozyon analizi ve erozyon testleri sonucu elde edilen erozyon oranı değerleri arasındaki farklar 20° , 30° , 45° , 60° ve 90° çarpma açıları için sırasıyla %7,181, %6,451, %0,191, %2,941 ve %2,381 olarak elde edilmişken 70 m/s, 110 m/s, 150 m/s ve 190 m/s çarpma hızları için bu farklar sırasıyla %4,581, %2,381, %1,361 ve %1,181 olarak elde edilmiştir. Düşük çarpma açılarında ağ yapısının çözüm hassasiyetinin azalmasından dolayı tam yakınsama sağlanamadığı için deneysel ve sayısal erozyon oranı değerleri arasındaki fark daha yüksek elde edilmiştir. Buna karşın düşük çarpma hızlarında (70 m/s) deneysel ve sayısal erozyon oranı değerleri arasındaki farkın yüksek çarpma hızlarına göre daha yüksek elde edilmesinin nedenlerinden birisi akış analizlerinde kullanılan türbülans modelinin düşük hızlı akışlarda tam yakınsamış çözüm sağlayamamış olmasıdır.

HAD tabanlı sayısal erozyon analizleri sonucu CETP ve KETP kompozit numune yüzeylerinde çarpma açısına göre elde edilen erozyon hızı dağılımları erozyon izleriyle birlikte sırasıyla Şekil 3.7 ve 3.8’ de gösterilmiştir. Düşük çarpma açılarında ($\theta=20^\circ$, $\theta=30^\circ$ ve $\theta=45^\circ$) parçacıklar daha büyük yüzey alanına çarparak elips şeklinde erozyon izleri oluştururken yüksek çarpma açılarında ($\theta=60^\circ$ ve $\theta=90^\circ$) çarpma açısındaki artışa bağlı olarak parçacıklar lüle çapına yakın olacak şekilde daha düşük yüzey alanına sahip dairesel şekle yakın veya dairesel şekilli erozyon izleri oluşturmuşlardır. Maksimum erozyon hızı değeri, KETP kompozit malzemeli numunenin yüzeyinde 90° çarpma açısında elde edilirken CETP kompozit numune yüzeyinde ise 60° çarpma açısında elde edilmiştir.

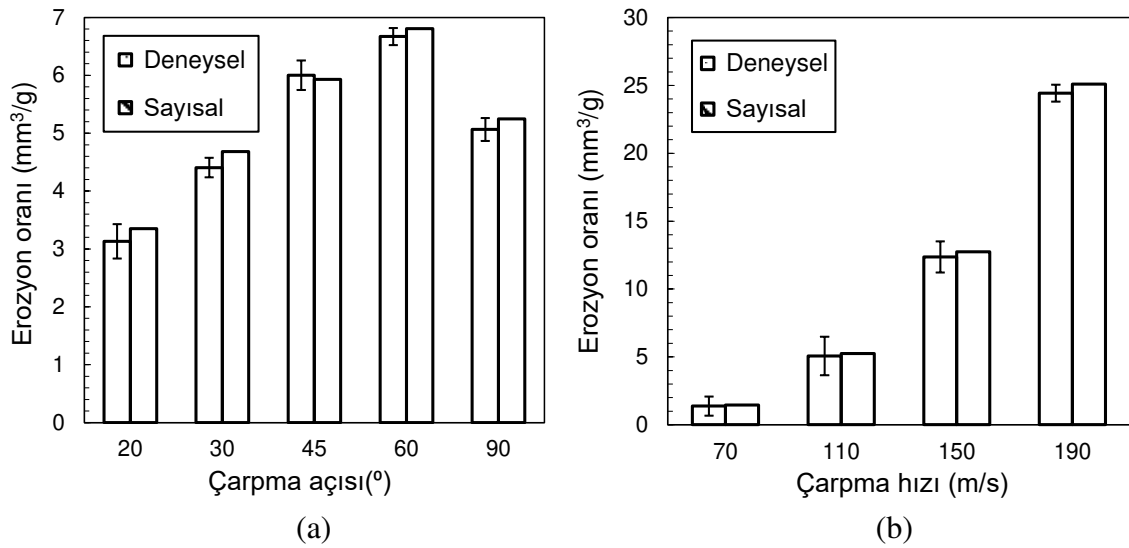


Şekil 3.7. CETP kompozit plaka tip hedef yüzeydeki HAD tabanlı sayısal erozyon hızının çarpma açısına bağlı değişimi ($V_P = 110$ m/s)

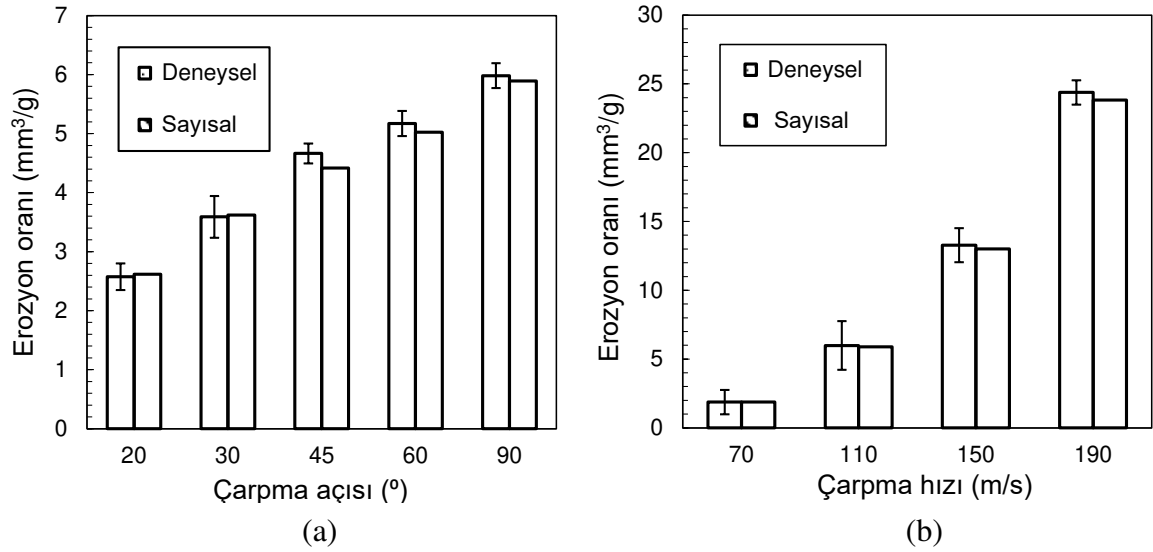


Şekil 3.8. KETP kompozit plaka tip hedef yüzeydeki HAD tabanlı sayısal erozyon hızının çarpma açısına bağlı değişimi ($V_P = 110$ m/s)

KETP ve CETP kompozit malzemeli numunelerin 110 m/s çarpma hızında çarpma açısı ve 90° çarpma açısında çarpma hızına bağlı erozyon oranı değerlerinin katı parçacık erozyon testi ve HAD tabanlı katı parçacık erozyon analiz sonuçlarına göre karşılaştırmaları sırasıyla Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’ da verilmiştir. Hem çarpma açısı hem de çarpma hızına göre erozyon değerleri bakımından deneysel ve sayısal sonuçlar birbiriyle uyum içerisinde elde edilmiştir. KETP ve CETP kompozit malzemeli numuneler için hesaplanan erozyon oranları çarpma hızındaki artışla birlikte önemli derece artmıştır.



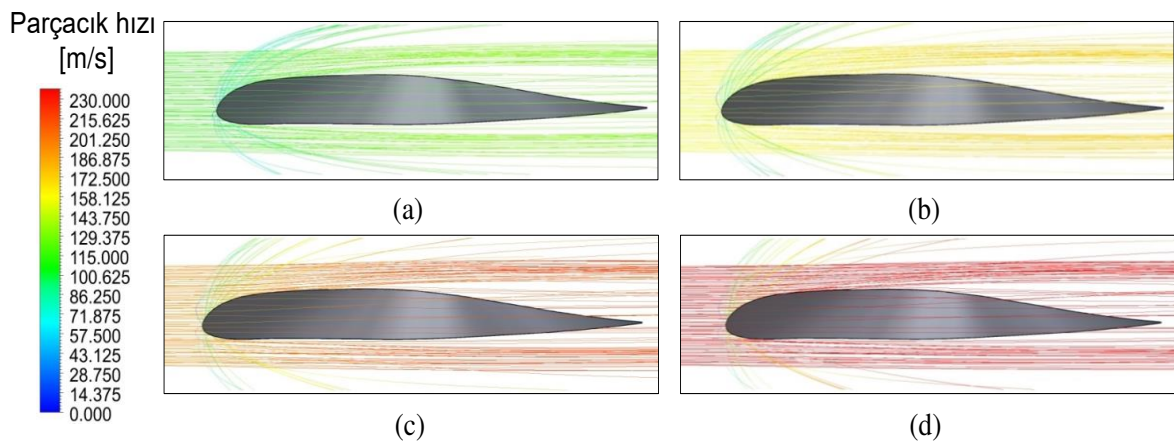
Şekil 3.9. CETP kompozit plaka numunelerinde deneysel ve sayısal olarak elde edilen erozyon oranı değerlerinin karşılaştırması: (a) $V_P = 110$ m/s için çarpma açısına göre, (b) $\theta = 90^\circ$ için çarpma hızına göre



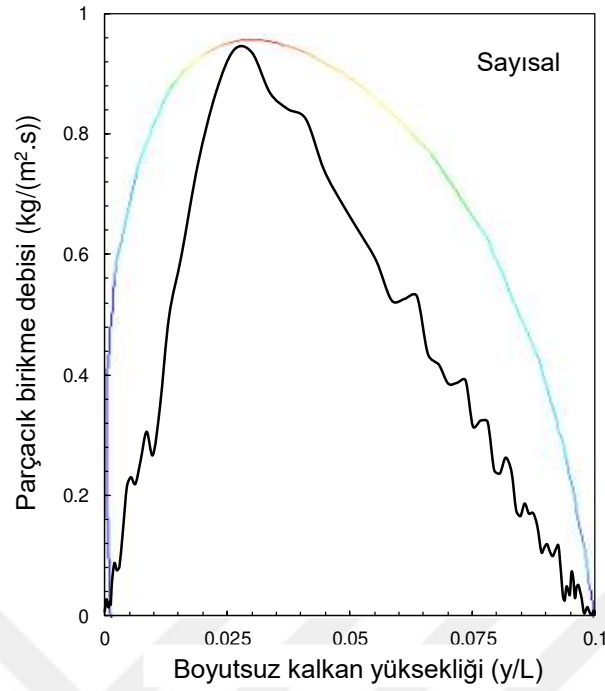
Şekil 3.10. KETP kompozit plaka numunelerinde deneysel ve sayısal olarak elde edilen erozyon oranı değerlerinin karşılaştırması: (a) $V_P = 110$ m/s için çarpma açısına göre, (b) $\theta = 90^\circ$ için çarpma hızına göre

3.6. CETP, KETP, PU Bant, SS304 ve Ni Malzemelerin Helikopter Rotor Pali Aşınma Kalkanındaki Erozyon Performansı

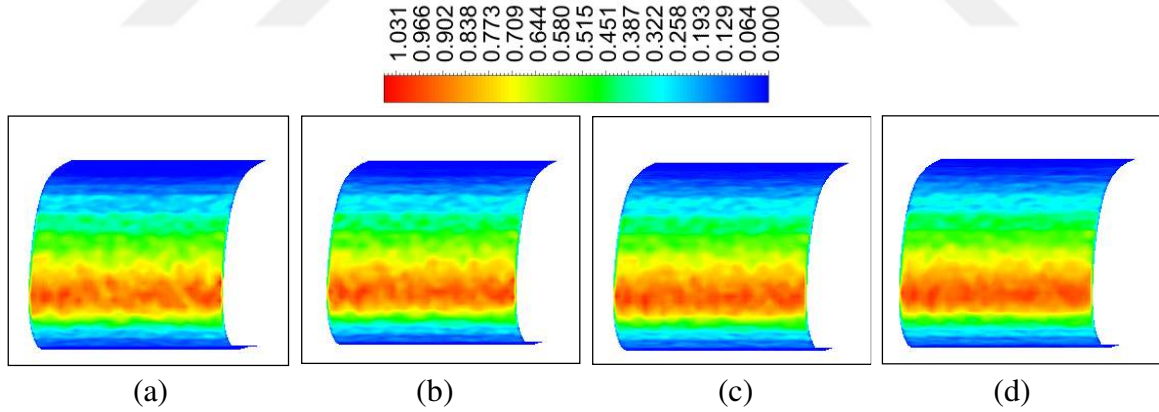
HAD tabanlı sayısal analiz sonuçlarına göre farklı çarpma hızları için helikopter rotor pal yüzeyine çarpan parçacıkların yörünge ve hız dağılımları Şekil 3.11’ de gösterilmiştir. Parçacıklar pal yüzeyine çarptıktan sonra hız ve yörüngeleri çarpma açısı, çarpma hızı, akışın türbülans durumu, parçacıkların yüzeyde birikme debisi gibi etkenlerden dolayı birbirinden farklı elde edilmiştir.



Şekil 3.11. HAD tabanlı sayısal erozyon analizi sonucu parçacıkların helikopter rotor paline çarpması sonrası elde edilen hız ve yörünge değişimleri: (a) $V_P = 110$ m/s, (b) $V_P = 150$ m/s, (c) $V_P = 190$ m/s, (d) $V_P = 230$ m/s



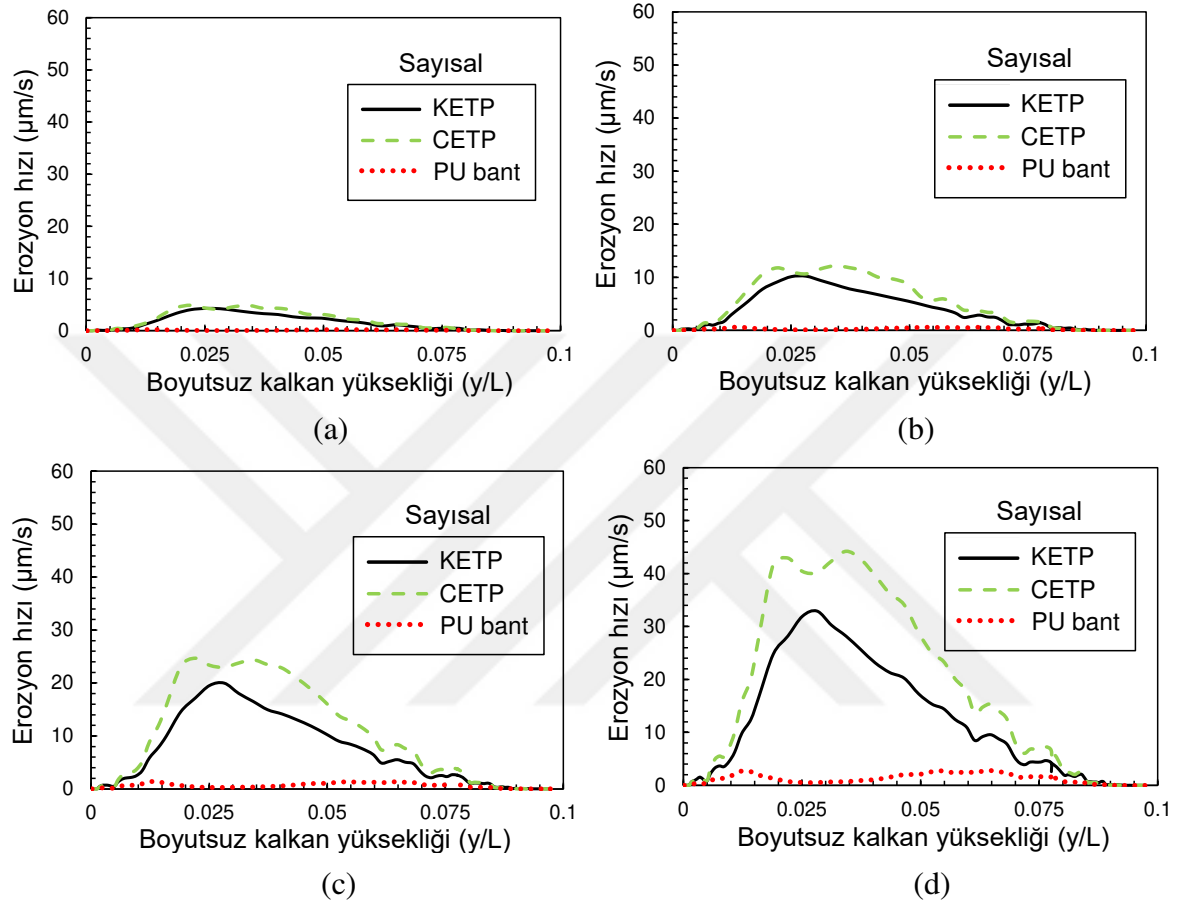
Şekil 3.12. HAD tabanlı sayısal analiz sonuçlarına göre, parçacıkların boyutsuz aşınma kalkan yüksekliğine göre yüzeyde birikme debisinin 2D olarak değişimi ($V_P = 230$ m/s)



Şekil 3.13. HAD tabanlı sayısal analiz sonuçlarına göre, parçacıkların aşınma kalkanı yüzeyindeki birikme debilerinin 3D olarak değişimi: (a) $V_P = 110$ m/s, (b) $V_P = 150$ m/s, (c) $V_P = 190$ m/s ve (d) $V_P = 230$ m/s

HAD tabanlı sayısal analiz sonuçlarına göre aşınma kalkanının yüzeyine çarpan parçacıkların yüzeydeki birikme debilerinin dağılımları 2D ve 3D olarak sırasıyla Şekil 3.12 ve 3.13’ te gösterilmiştir. Maksimum parçacık birikme debisi aşınma kalkanının burun tarafında ($y/L = 0,028$) parçacıkların yüzeye normal açıda (90°) çarptıkları yerde $0,947$ $\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})$ olarak elde edilmiştir (Şekil 3.12). Hava içerisinde hareket eden parçacıkların

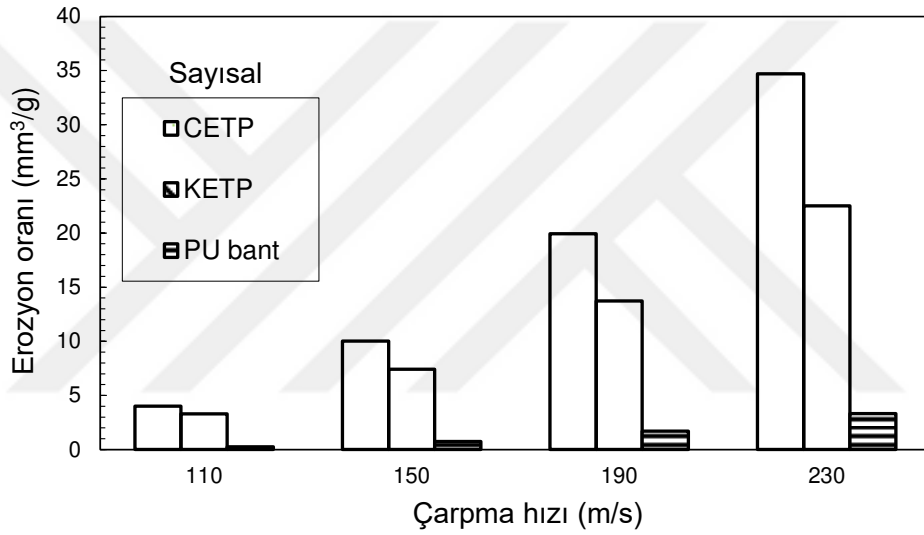
modele girişinde kütleli debisi sabit kabul edildiği için parçacık çarpma hızının aşınma kalkanı yüzeyindeki parçacık birikme debisine etkisi ihmal edilebilir düzeyde olmuştur (Şekil 3.13).



Şekil 3.14. PU bant, KETP ve CETP kompozit malzemelerin aşınma kalkanı yüzeyinde erozyon hızı değişimlerinin çarpma hızına göre karşılaştırması: (a) $V_p = 110$ m/s, (b) $V_p = 150$ m/s, (c) $V_p = 190$ m/s ve (d) $V_p = 230$ m/s

KETP kompozit, CETP kompozit ve PU bant malzemelerin farklı parçacık çarpma hızları (110, 150, 190 ve 230 m/s) için HAD tabanlı sayısal analiz sonuçlarına göre aşınma kalkanının orta düzlemindeki erozyon hızı değişimleri Şekil 3.14' te verilmiştir. CETP kompozit malzemeli kalkan yüzeyi için en yüksek erozyon hızı değerleri, $y/L = 0,022$ (4,886, 11,707, 24,662 ve 42,915 µm/s) ve $y/L = 0,034$ (4,832, 12,161, 24,368 ve 44,195 µm/s) 65° çarpma açılı yerlerde elde edilmiştir. Çarpma açısının yaklaşık 90° olduğu $y/L = 0,028$ (4,229, 10,203, 19,983 ve 32,909 µm/s) burun bölgesinde KETP kompozit malzemeli aşınma kalkanı için erozyon hızı değerleri maksimum olarak elde edilirken çarpma hızındaki

artışa bağlı olarak erozyon hızı değerlerinde önemli miktarda artışlar olmuştur. PU bant malzemeli kalkanın $y/L = 0,028$ (0,036, 0,114, 0,277 ve 0,744 $\mu\text{m/s}$) burun bölgesinde KETP ve CETP malzemelere göre çok daha düşük seviyede erozyon hızı değeri elde edilmiş ve düşük çarpma açısına sahip diğer bölgelerde bu değerlerde artışlar olmuştur. CETP kompozit malzeme tüm çarpma hızlarında kalkan yüzeyi boyunca en kötü erozyon davranışı sergilerken, PU bant malzeme KETP ve CETP kompozit malzemelere göre çok daha iyi erozyon performansı göstermiştir. Bunun olası nedenlerinden birisi, Şekil 3.3' te görüldüğü gibi PU bant malzemenin tüm çarpma açılarında tüm çarpma hızları için çok daha iyi erozyon davranışına sahip olmasıdır.

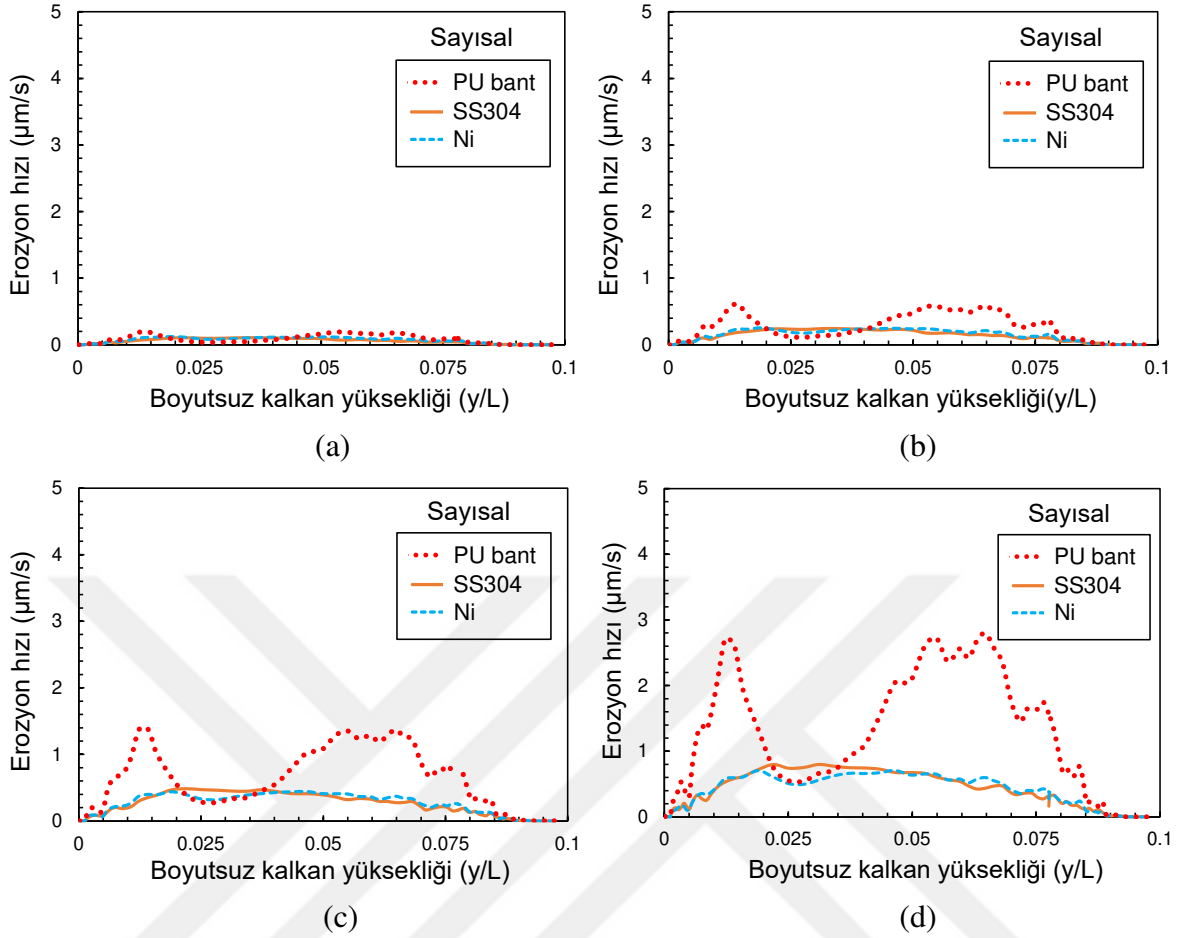


Şekil 3.15. PU bant, KETP ve CETP kompozit malzemelerin aşınma kalkanında sayısal olarak hesaplanan ortalama erozyon oranı değerlerinin çarpma hızına göre karşılaştırması

Şekil 3.15' te KETP kompozit, CETP kompozit ve PU bant malzemelerin aşınma kalkanı yüzeyindeki HAD tabanlı ortalama erozyon oranlarının parçacık çarpma hızlarına göre değişimlerinin karşılaştırması verilmiştir. 110, 150, 190 ve 230 m/s çarpma hızları altında malzemelerin aşınma kalkanı üzerindeki ortalama erozyon oranı değerlerinin küçükten büyüğe doğru sıralaması PU bant, KETP ve CETP şeklinde olmuştur. Bu değerler, PU bant için 0,242, 0,734, 1,698 ve 3,330 mm^3/g ; KETP için 3,291, 7,420, 13,727 ve 22,501 mm^3/g ; CETP için 4,018, 10,023, 19,943 ve 34,705 mm^3/g olarak elde edilmiştir. 190 ve 230 m/s çarpma hızları için CETP kompozit KETP kompozit malzemeye göre sırasıyla %45 ve %54 daha fazla ortalama erozyon oranı değerlerine sahip olarak aşınma kalkanı üzerinde daha kötü erozyon performansı göstermiştir. PU bant malzemesinin aşınma kalkanı yüzeyi

boyunca ortalama erozyon oranı değerleri CETP ve KETP kompozit malzemelerin ortalama erozyon oranı değerlerine göre çok daha düşük seviyelerde elde edilmiştir. Örneğin, 190 ve 230 m/s çarpma hızında CETP kompozitin aşınma kalkanındaki ortalama erozyon oranı değerleri PU bant malzemenin ortalama erozyon oranı değerlerine göre sırasıyla 11,741 ve 10,422 kat daha fazla elde edilmiştir. Dolayısıyla CETP ve KETP kompozit malzemelerin zayıf erozyon dayanımları yüzünden helikopter rotor palinin en dış yüzeylerinde kullanımları uygun değildir. Bu durum, PU bant malzemesinin kompozit malzemelerden yapılmış helikopter rotor palini aşırı erozyon hasarından korumak için alternatif aşınma kalkanı malzemesi olabileceğini göstermektedir. Bu yüzden genellikle CETP kompozit malzemeli rüzgâr türbinlerinin katı parçacık erozyon direncini arttırmak için aşınma kalkanı malzemesi olarak PU bandın kullanımı günümüzde yaygınlaştırılmaktadır (Castorrini ve diğ. 2016).

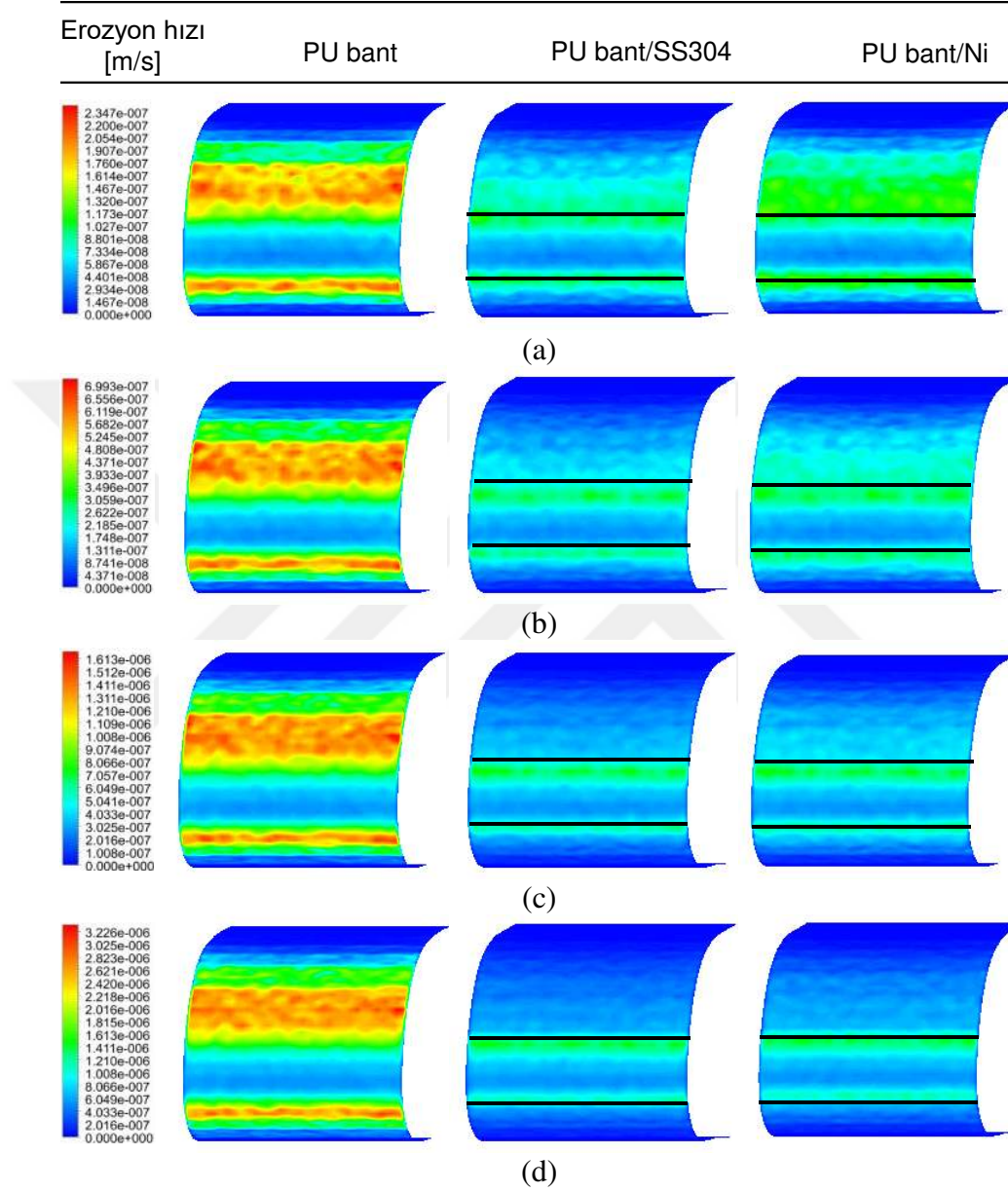
SS304, Ni ve PU bant malzemelerin aşınma kalkan yüzeyinin orta düzlemi boyunca farklı parçacık çarpma hızları için HAD tabanlı sayısal analiz sonuçlarına göre erozyon hızı değişimleri Şekil 3.16' da gösterilmiştir. Tüm çarpma hızlarında (110, 150, 190 ve 230 m/s) en yüksek erozyon hızı değerleri parçacık çarpma açısının yaklaşık 30° olduğu PU bant malzemeli kalkan yüzeyinde hesaplanmıştır. Bu değerler, $y/L = 0,012$ (0,183, 0,551, 1,374 ve 2,712 $\mu\text{m/s}$) ve $y/L = 0,065$ (0,179, 0,588, 1,372 ve 2,798 $\mu\text{m/s}$) bölgelerinde elde edilmiştir. Buna karşın, Ni malzemeli aşınma kalkanı için en yüksek erozyon hızı değerleri çarpma açısının yaklaşık 55° olduğu bölgelerde hesaplanmıştır. Bu değerler, $y/L = 0,019$ (0,121, 0,254, 0,439 ve 0,706 $\mu\text{m/s}$) ve $y/L = 0,047$ (0,111, 0,247, 0,443 ve 0,709 $\mu\text{m/s}$) aşınma kalkanı bölgelerinde elde edilmiştir. Parçacık çarpma açısının yüksek (55°) olmasına karşın erozyon hızı değerlerinin maksimum seviyelerde elde edilmesi parçacık birikme debi değerlerinin (0,810 $\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})$ ve 0,719 $\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})$) bu bölgelerde yüksek olmasından kaynaklanmıştır. SS304 malzemeli aşınma kalkanı için maksimum erozyon hızı değerleri, çarpma açısının yaklaşık 65° ve parçacık birikme debisinin 0,866 $\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})$ ve 0,885 $\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})$ olduğu bölgelerde elde edilmiştir. Çarpma hızındaki artışa göre maksimum erozyon hızı değerleri $y/L = 0,022$ (0,105, 0,239, 0,483 ve 0,799 $\mu\text{m/s}$) ve $y/L = 0,034$ (0,106, 0,243, 0,445 ve 0,772 $\mu\text{m/s}$) bölgelerinde hesaplanmıştır.



Şekil 3.16. PU bant, Ni ve SS304 malzemelerin aşınma kalkanı yüzeyinde erozyon hızı değişimlerinin çarpma hızına göre karşılaştırması: (a) $V_p = 110$ m/s, (b) $V_p = 150$ m/s, (c) $V_p = 190$ m/s ve (d) $V_p = 230$ m/s

Çarpma açısının yaklaşık 90° olduğu PU bant, SS304 ve Ni malzemeli aşınma kalkan yüzeylerinin $y/L = 0,0282$ burun bölgelerinde erozyon hızı değerlerinde azalmalar olmuştur. Bunun nedenlerinden birisi, Şekil 3.4’ te görüldüğü gibi 90° çarpma açısında bu malzemelerin erozyon oranı değerlerinin minimum seviyelere düşmesinden kaynaklı olmasıdır. Sonuç olarak, parçacıkların yoğun olarak çarptıkları aşınma kalkanının burun bölgesinde ($60-90^\circ$ arasındaki çarpma açılı bölgeler) SS304 malzeme tüm çarpma hızlarında en kötü erozyon davranışı sergilerken PU bant malzeme 190 m/s çarpma hızına kadar en iyi erozyon davranışı göstermiştir. Bunun yanında aşınma kalkan yüzeyinin düşük çarpma açılı bölgeleri için PU bant malzeme, SS304 ve Ni malzemeye göre tüm çarpma hızlarında daha kötü erozyon performansı sergilemiştir. Bu durum, PU bant malzemenin aşınma kalkanında SS304 ve Ni malzemeye göre daha iyi erozyon dayanımı sağladığı bölgelerde bu malzemelerle birlikte hibrit olarak kullanılmasının helikopter rotor palinin katı parçacık

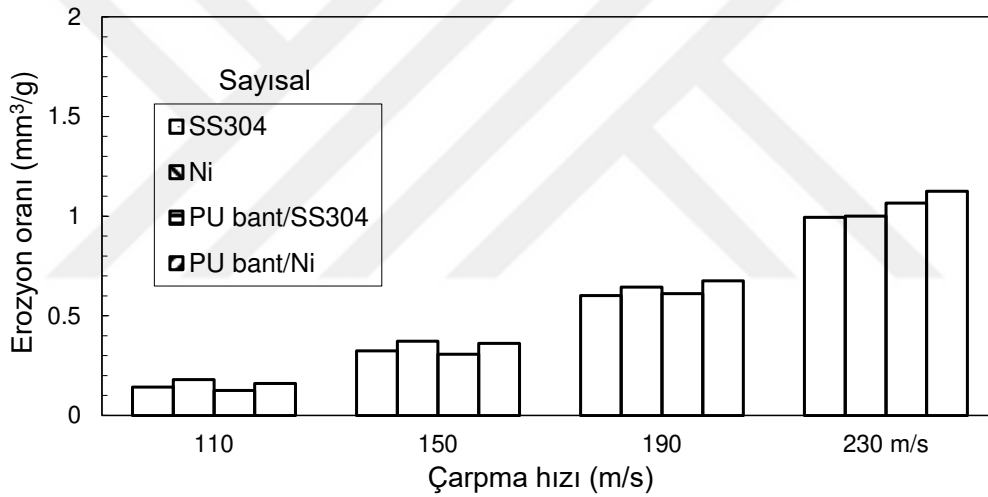
erozyon direncinin daha da arttırılması bakımından etkili bir çözüm olacağını göstermektedir.



Şekil 3.17. HAD tabanlı sayısal erozyon analiz sonuçlarına PU bant, PU bant/SS304 ve PU bant/Ni malzemelerin aşınma kalkanındaki erozyon hızı dağılımlarının çarpma hızına göre karşılaştırması: (a) $V_P = 110$ m/s, (b) $V_P = 150$ m/s, (c) $V_P = 190$ m/s ve (d) $V_P = 230$ m/s

PU bant, PU bant/SS304 hibrit ve PU bant/Ni hibrit malzemeli aşınma kalkanlarının yüzeyindeki erozyon hızı değişimlerinin farklı çarpma hızları için (110, 150, 190 ve 230 m/s) karşılaştırması Şekil 3.17' de gösterilmiştir. Parçacıkların birikme debisinin yüksek

olduğu (Şekil 3.12) çarpma açısının 50° den 90° ye kadar değişim gösterdiği SS304 ve Ni aşınma kalkanlarının $y/L=0,017$ ve $y/L= 0,044$ bölgeleri arasına PU bant yüzey yerleştirilerek hibrit aşınma kalkanı elde edilmiştir. Şekil 3.17’ deki erozyon hızı ölçeklerinden görüleceği üzere çarpma hızındaki artışa bağlı olarak artan erozyon hızlarıyla birlikte PU bant malzemeli kalkan PU bant/SS304 ve PU bant/Ni hibrit malzemeli kalkanlara kıyasla çok daha kötü erozyon performansı sergilemiştir. Buna karşın PU bant malzeme hibrit aşınma kalkan yüzeylerinin burun bölgelerinde minimum erozyon hızı değerleri sağlayarak aşınma kalkanının erozyon direncinde özellikle 150 m/s çarpma hızına kadar artışlar sağlamıştır. Sonuç olarak, PU bant malzeme, SS304 ve Ni malzemeye göre en iyi erozyon davranışı sergilediği yüksek çarpma açılı yerlerde ($60-90^\circ$ arası) aşınma kalkanının erozyon direncini 110 ve 150 m/s çarpma hızlarında iyi derecede arttırmıştır.



Şekil 3.18. SS304, Ni, PU bant/SS304 ve PU bant/Ni malzemelerin aşınma kalkanında sayısal olarak hesaplanan ortalama erozyon oranı değerlerinin çarpma hızına göre karşılaştırması

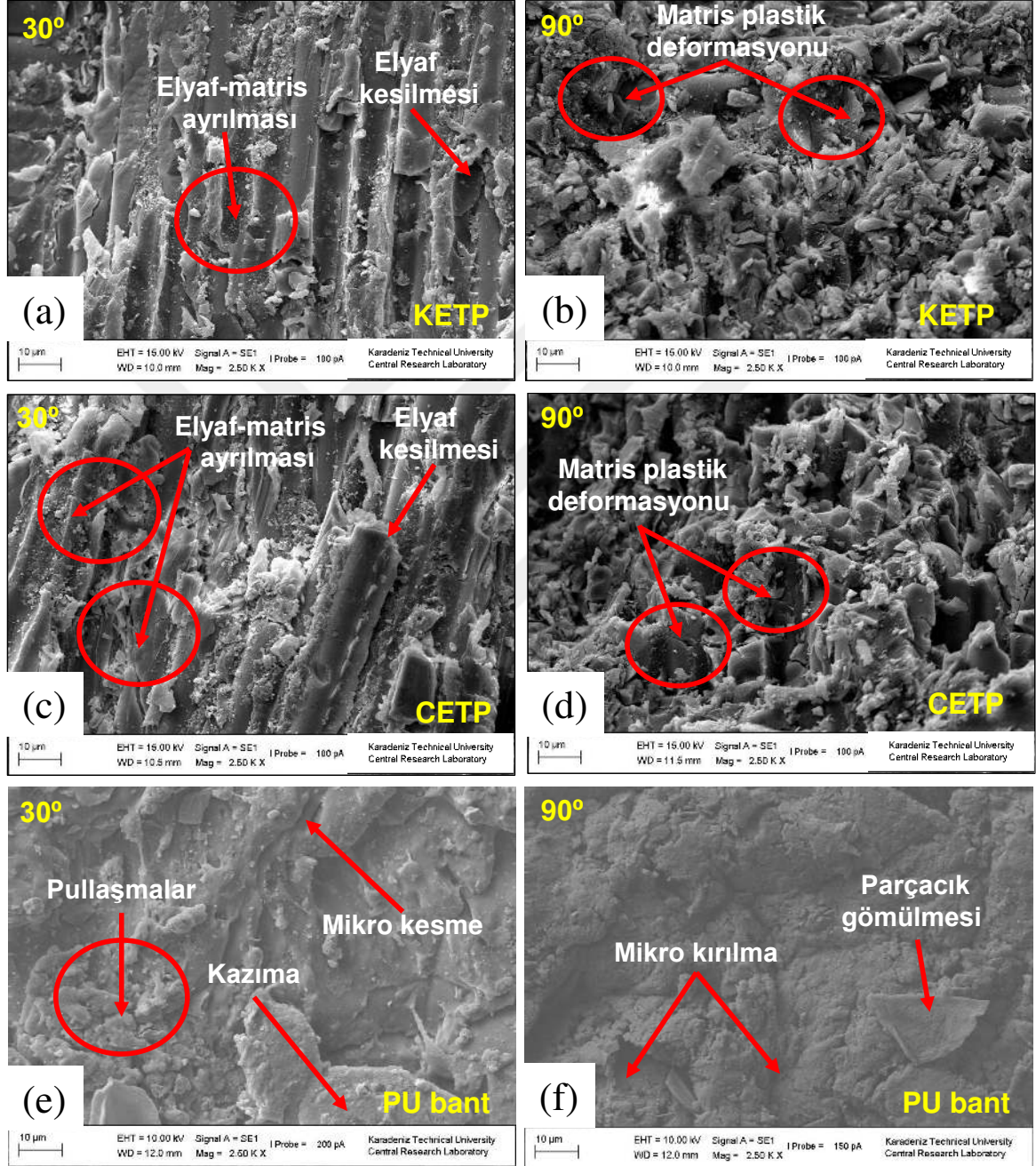
Şekil 3.18’ de HAD tabanlı sayısal erozyon analiz sonuçlarına göre SS304, Ni, PU bant/SS304 ve PU bant/Ni malzemeli aşınma kalkan yüzeylerindeki ortalama erozyon oranı değerlerinin çarpma hızına göre değişimleri gösterilmiştir. Aşınma kalkanındaki ortalama erozyon oranı değerleri sırasıyla 110, 150, 190 ve 230 m/s çarpma hızlarında elde edilmiştir. PU bant/SS304 malzemelerinden oluşan hibrit yüzeyli aşınma kalkanının 150 m/s çarpma hızına kadar diğerlerine göre daha iyi erozyon dayanımı sağlarken daha yüksek çarpma hızlarında PU bant malzemenin erozyonu iyileştirme katkısı azaldığı için SS304 malzemeli aşınma kalkanına göre hibrit aşınma kalkanının erozyon performansı kötüleşmiştir. Diğer

yandan 230 m/s çarpma hızında PU bant/Ni malzemeli hibrit aşınma kalkanı Ni malzemeli aşınma kalkanına göre daha yüksek erozyon oranına sahip olmuştur. Bunun olası nedenlerinden birisi, 230 m/s çarpma hızında Şekil 3.16' dan görüleceği gibi Ni malzemenin aşınma kalkanının burun bölgesinde PU bant malzemeye göre daha düşük erozyon hızı değerleri sağlamış olmasıdır. Sonuç olarak, PU bant malzemenin değişimi kolay olduğu için yüzeylerin (uçak kanatlarının hücum kenarları, rüzgâr türbin kanatları, helikopter rotor palleri, vs.) erozyon direncini arttırması bakımından önemli avantajlar sağlayabileceği anlaşılmaktadır. Bunun yanında SS304 ve Ni malzemeli aşınma kalkanlarının yüksek çarpma açılı bölgelerinde (60-90°) PU bant malzemenin koruyucu olarak kullanılması durumunda da kalkanın erozyon dayanımı iyileştirebilir.

3.7. CETP, KETP, PU Bant, SS304 ve Ni Malzemeli Numunelerin Erozyona Uğramış Yüzeylerinin SEM Görüntüleri

Şekil 3.19' da PU bant, KETP kompozit ve CETP kompozit malzemeli plaka şeklindeki numunelerin 30° ve 90° çarpma açısı altında erozyona uğramış yüzeylerinin taramalı elektron mikroskop (SEM) altında elde edilen 2500 kat büyütülmüş resimleri gösterilmiştir. Cam ve karbon elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerde erozyon hasar mekanizmaları çarpma açısı ve çarpma hızına göre değişik şekillerde meydana gelmiştir. İlk olarak, reçine bakımından zengin bölgeler, ikinci olarak elyaf bölgeleri ve son olarak elyaf ile matris malzeme arasındaki bağlanma bölgeleri erozyona uğramıştır (Bagci ve İmrek, 2011). Matris malzeme elyaftan önce erozyona uğrayarak elyafları erozyon hasarından korumuştur. Bu yüzden matris malzemenin erozyon dayanımı, kompozit malzemenin erozyon dayanımının arttırılması açısından önemli olmaktadır. Matris malzeme erozyona uğradıktan sonra elyaflar açığa çıkmıştır. Böylelikle parçacık çarpmasına maruz kalan elyafın sertliği, bir sonraki aşamada kompozitlerin erozyon hasar mekanizmalarını doğrudan etkilemiştir. Elyaf takviye malzemelerinin erozyon üzerindeki etkisi, elyaf malzemesi, elyaf oranı ve elyaf yönüne göre etkilenmiştir. Elyaf malzeme erozyona uğradığında, elyaf-matris arasında ayrılma ve elyaf kesilmesi şeklinde hasar oluşmuştur (Barkoula ve diğ., 2002). KETP kompozit malzemeli numune yüzeyine düşük çarpma açısı altında çarpan parçacıklar Şekil 3.19a' da görüldüğü gibi numune yüzeyinde elyaf boyunca kazıma, matrisin elyaftan ayrılması, elyaf kesilmesi şeklinde erozyon hasarı oluşmasına neden olmuşlardır (Li ve Hutchings, 1990). Parçacıkların numune yüzeyine tekrarlı çarpması sonucu numunenin üst yüzeyindeki matris malzeme hasara uğradıktan sonra elyaflar açığa çıkıp parçacıklarla

doğrudan temastan dolayı kesilmişlerdir (Suresh ve diğ., 2009). Parçacıklar elyaflar arasındaki matris malzemeyi numuneden uzaklaştırarak elyaflar arasında boşluklar oluşmasına neden olmuştur.

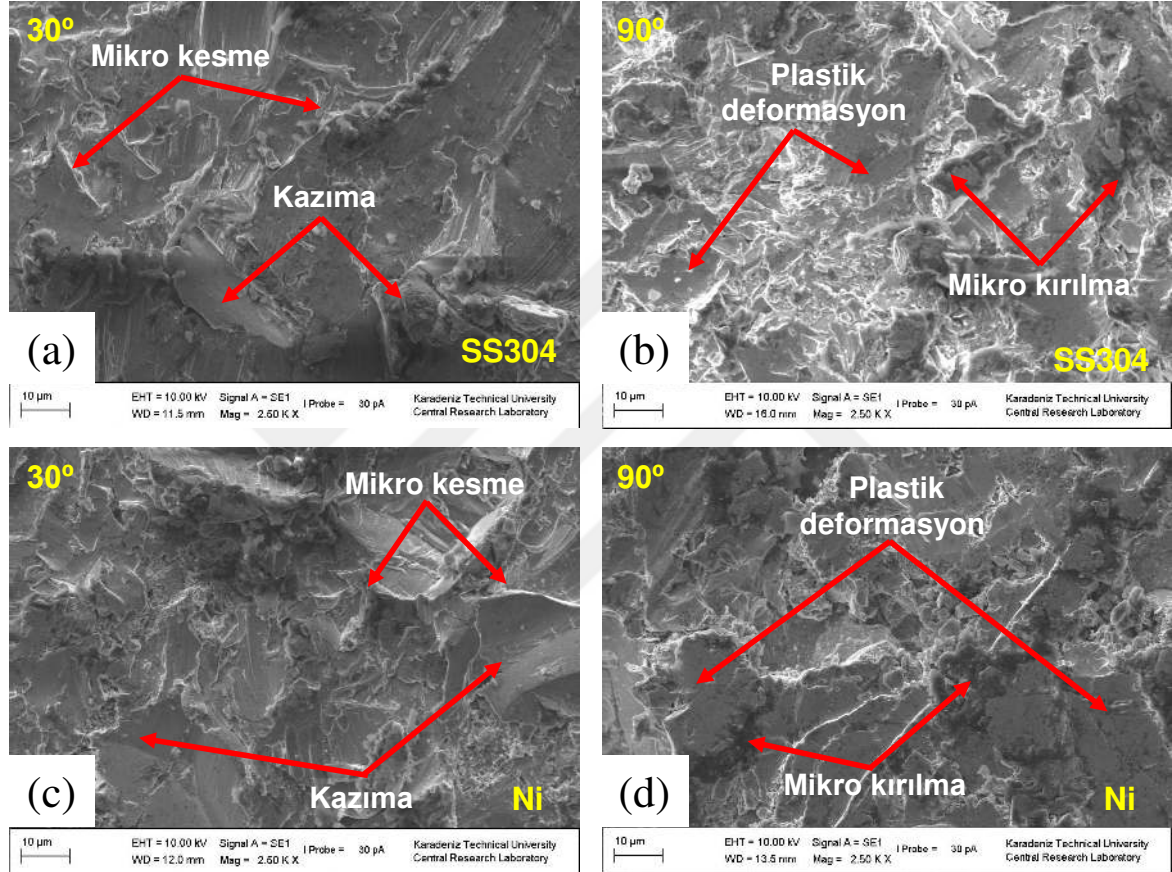


Şekil 3.19. KETP (a, b), CETP (c, d) ve PU bant (e, f) malzemeli plaka numunelerinin 30° ve 90° çarpma açılarında erozyona uğramış yüzeylerinin 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri ve hasar mekanizmaları ($V_P = 110$ m/s)

Düşük açılı (30°) parçacık çarpmasında CETP kompozit malzemeli numune yüzeyinde KETP kompozit' e göre daha fazla kesme ve kazıma şeklinde erozyon hasarı oluşmuştur (Şekil 3.19c). Matris malzeme numune yüzeyinden uzaklaşarak elyaf ve matris arasındaki bağı zayıflatmasıyla elyaflar kırılarak toz haline gelmesine neden olmuştur. PU bant malzemeli numune yüzeyinde düşük açılı çarpmada mikro düzeyde kesme ve kazıma şeklinde erozyon hasarı oluşmuştur (Şekil 3.19e). Numune yüzeyine parçacıkların sürekli çarpması sonucu numune yüzeyinde pullaşma hasarı meydana gelerek kopmalar olmuştur. Numune yüzeyine normal olan çarpma açısında (90°) çarpan parçacıkların kinetik enerjilerinin tamamı yüzey tarafından karşılanmıştır (Harsha ve diğ., 2003; Öztürk ve diğ., 2020). Çarpma açısındaki artışla birlikte KETP ve CETP kompozit numunelerde elyaf matris ayrılması, matris plastik deformasyonu, gevrek hasarlı matris kırılması ve elyaf parçalanması şeklinde erozyon hasarı oluşmuştur (Şekil 3.19b, d). Bu sonuç, termoset matris malzemeli kompozitlerin gevrek erozyon hasar mekanizmasına sahip olduğunu belirten önceki bulguları desteklemektedir (Barkoula ve diğ., 2002). KETP ve CETP kompozit numune yüzeyleri tekrarlı olarak yüksek çarpma açılı (90°) katı parçacık çarpmasına maruz kaldığında elyaf incilmesi, elyafın matristen ayrılması ve elyaf tozlaşması nedeniyle numune yüzeyinde boşluklar ortaya çıkmıştır (Harsha ve diğ., 2008). Poliüretan bant malzemeli numunede yüzeye normal yöndeki çarpma açısında parçacıklar keskin köşeli olmalarından dolayı yüzey içerisine gömülerek inkübasyona neden olmuşlardır (Şekil 3.19f). Parçacıkların numune yüzeyine sürekli normal yönde (90°) çarpmaları sonucu bir müddet sonra PU bant numune yüzeyinde çukurlaşmalar ve mikro düzeyde kırılma şeklinde erozyon hasarı meydana gelmiştir (Rajesh ve diğ., 2001). Erozyona uğramış numune yüzeydeki hasar mekanizmaları, numune malzemesinin sünekliği ve erozyon koşullarına göre değişmiştir (Cai ve diğ., 2016). Keskin köşeli parçacıklar düşük çarpma açısında numune yüzeyine çarptıktan sonra parçacıklar numune içerisine gömüldükten sonra teğetsel yönde hareket ettikleri için numune yüzeyinde kazıma hasarı meydana gelmiştir. Diğer yandan parçacıklar düşük çarpma açısında numune yüzeyini keserek malzemenin uzaklaştırılmasına neden olduğundan numune yüzeyinde kesme hasarı oluşmuştur (Nguyen ve diğ., 2016).

Düşük eğimli parçacık çarpması şartlarında SS304 ve Ni malzemeli numunelerin yüzeyinde Şekil 3.20a, c' de görüldüğü gibi temel olarak mikro-kesme ve kazıma şeklinde erozyon hasarı meydana gelmiştir (Nguyen ve diğ., 2014). Numune yüzeylerine parçacıkların normal yönde (90°) tekrarlı çarpması sonucu numune yüzeylerinde plastik

deformasyon ve mikro-kırılma şeklinde hasar mekanizmaları ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, düşük eğimli çarpmada (30°) Ni malzemeli numune yüzeyinde kesme ve kazıma şeklindeki erozyon hasarı SS304 malzemeli numune yüzeyine göre daha fazla elde edilmişken yüksek eğimli (90°) çarpma açısında SS304 malzemeli numune yüzeyinde daha fazla plastik deformasyon ve mikro-kırılma hasarı oluşmuştur (Şekil 3.20b, d).



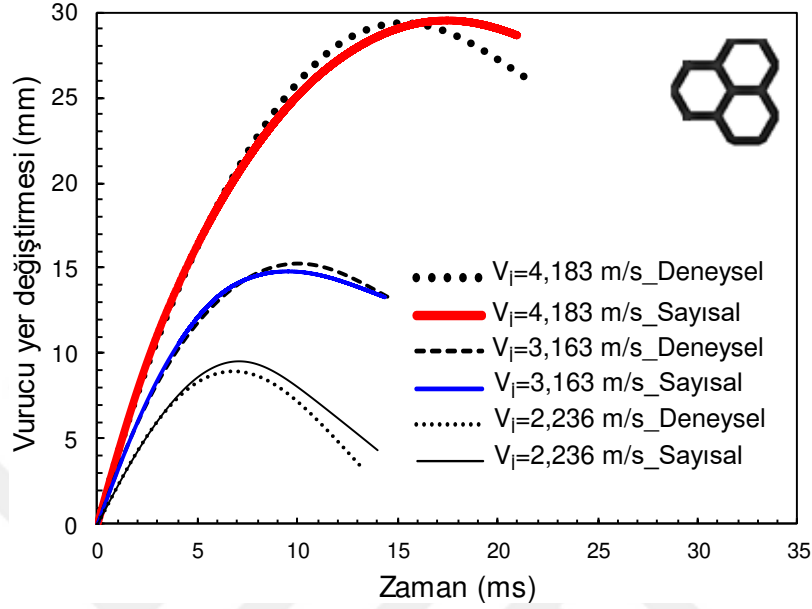
Şekil 3.20. SS304 (a, b) ve Ni (c, d) malzemeli plaka numunelerin 30° ve 90° çarpma açılarındaki erozyona uğramış yüzeylerinin 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri ve hasar mekanizmaları ($V_p = 110$ m/s)

3.8. Kompozit Sandviç Panellerin Enerji Sönümleme ve Hasar Davranışları

3.8.1. Kompozit Sandviç Panellerin Sonlu Elemanlar Darbe Modelinin Doğrulanması

Bu çalışmada kullanılan kompozit sandviç paneller için oluşturulan sonlu elemanlar darbe modelini doğrulamak amacıyla düzlem içi yönlü tasarlanan bal peteği desen çekirdekli

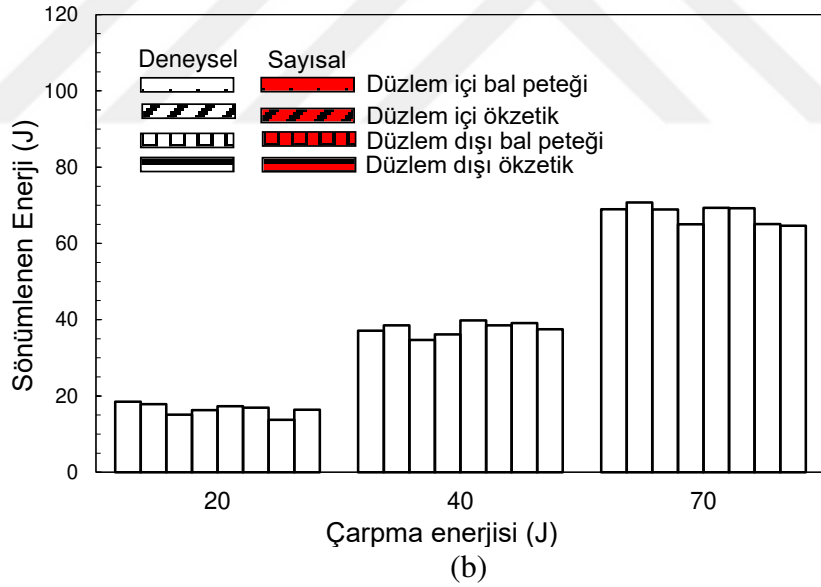
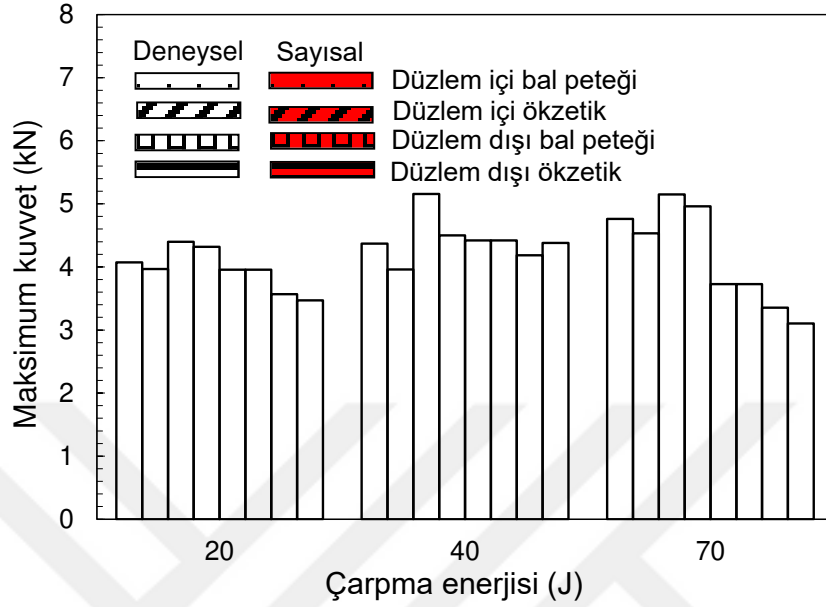
kompozit sandviç panellerde vurucu ucun üç farklı çarpma hızında elde edilen deneysel ve sayısal yer değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.21. Serbest ağırlık düşürmeli darbe testinden elde edilen vurucu yer değiştirmesi-zaman eğrileri ile sonlu elemanlar darbe modeli sonuçlarının doğrulanması

Şekil 3.21’ de görüldüğü gibi, sonlu elemanlar darbe analizleri sonucu 2,236 m/s ve 3,163 m/s çarpma hızlarında hesaplanan vurucu uç yer değiştirme değerleri ile düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen yer değiştirme değerleri birbiriyle çok iyi derecede uyum içerisinde olmuştur. Bu çarpma hızlarında vurucu uç kompozit sandviç panele çarptıktan sonra tam ve kısmi olarak geri tepmiştir. Buna karşın 4,183 m/s’ lik (70 J) çarpma hızında vurucu uç kompozit sandviç panel içerisinde daha fazla ilerleyerek çekirdek kısmın tamamını delmiştir. Vurucu uç alt kompozit yüzey plakasına temas ettikten sonra kısmi olarak geri tepmiştir. Şekil 3.22a’ dan görüleceği üzere, deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum temas kuvvet değerleri arasındaki farklar çarpma enerjisindeki artışa bağlı olarak artmıştır. Bunun olası nedenlerinden birisi, düşük hızlı darbe testlerinde artan çarpma enerjisiyle birlikte kompozit sandviç panel numunelerinin çekirdek ve yüzey plakalarının enkazının vurucu uç ile numune arasındaki sürtünmeyi arttırmış olmasıdır. Sonlu elemanlar darbe analizlerinde çarpma bölgesi etrafındaki hasarlı kısımlar analiz sırasında modelden silinmiş ve sonraki zaman adımlarında ihmal edildiği için sayısal maksimum kuvvet değerleri daha düşük hesaplanmıştır (He ve diğ., 2019). Diğer tarafta, çarpma enerjisindeki

artışa bağlı olarak deneysel ve sayısal olarak elde edilen sönümlenen enerji değerleri birbirleriyle iyi derecede uyum içerisinde elde edilmiştir (Şekil 3.22b).

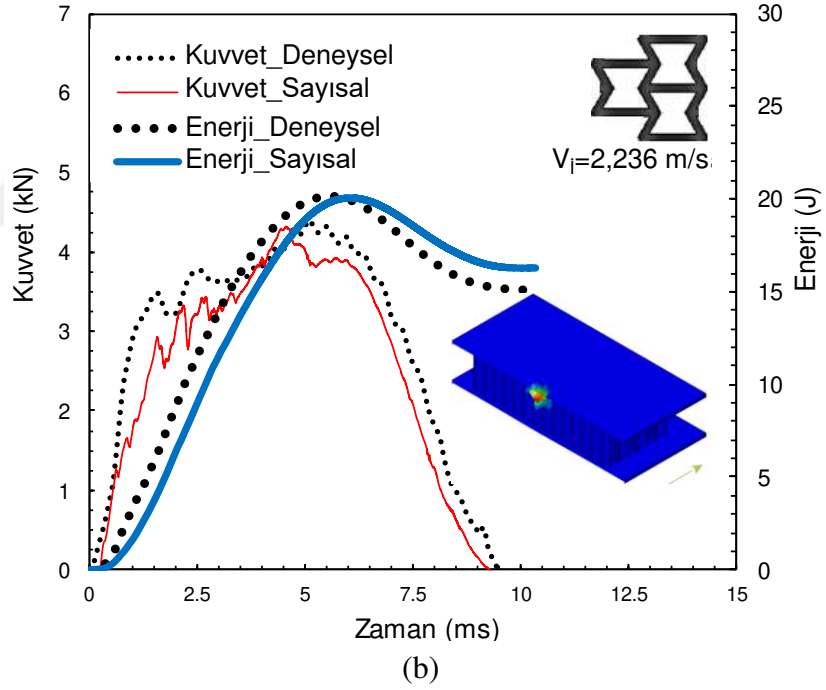
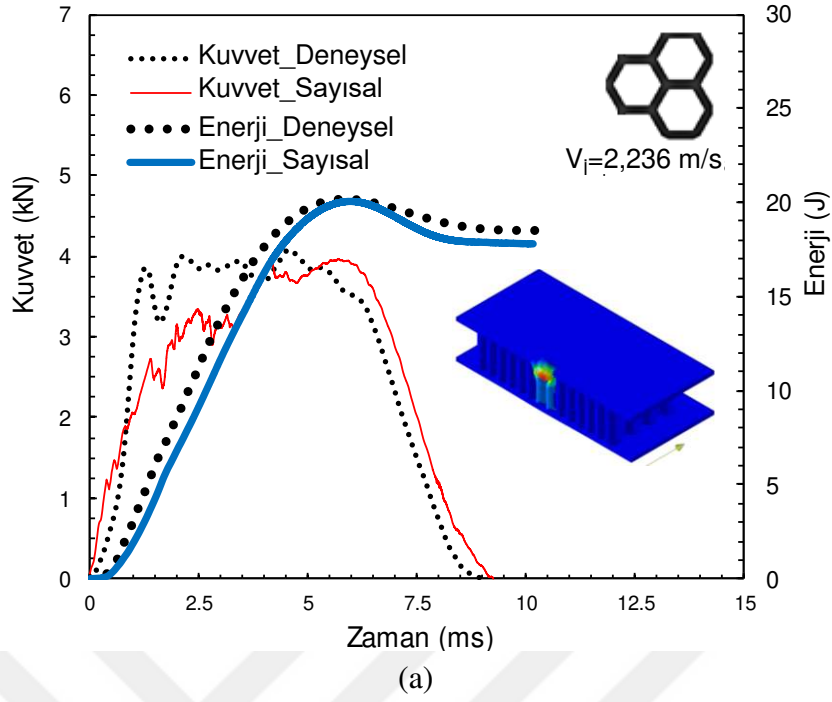


Şekil 3.22. Kompozit sandviç panellerin maksimum kuvvet (a) ve sönümlenen enerji değerlerinin (b) çarpma enerjisine göre deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması

3.8.2. Kompozit Sandviç Panellerin Enerji Sönümleme Davranışı

Düzlem içi yönlü bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe dayanımı ve enerji sönümleme davranışları üç farklı çarpma hızı altında deneysel ve

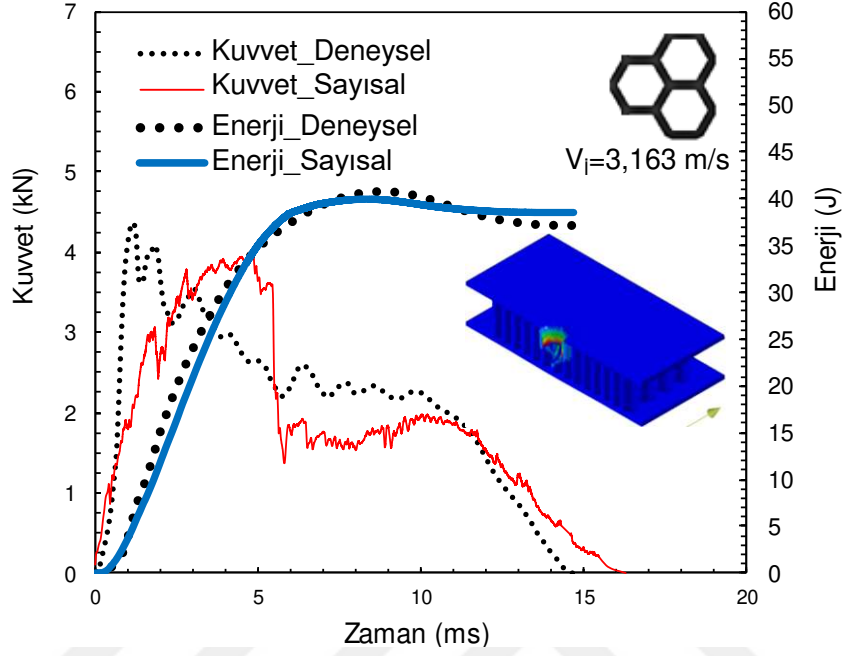
sayısal olarak incelenmiştir. 2,236 m/s ilk çarpma hızındaki vurucu ucun düzlem içi yönlü bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panellere çarpması sırasında deneysel ve sayısal olarak elde edilen zamana bağlı kuvvet ve enerji grafikleri sırasıyla Şekil 3.23a ve 3.23b' de gösterilmiştir. 2.236 m/s' lik çarpma hızında kompozit sandviç panel numunelerin üst yüzey plakaları temel olarak matris çatlaması ve elyaf kırılmasını içeren karmaşık hasara maruz kalırken üst yüzey plakasına yakın çarpma bölgesinde genel olarak çekirdek ezilmesi hasarı oluşmuştur. Temas kuvvetinin maksimum değere ulaşmasının ardından vurucu uç geri dönmüş ve bu sırada çarpma enerjisinin bir kısmı üst yüzey plakaları ve çekirdek yapının ezilmesi yoluyla kompozit sandviç panel numuneleri tarafından sönmülmüştür. Hem bal petek hem de ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panellerin çekirdek yapılarında kayda değer hasar oluşmadığı için her iki kompozit sandviç panelin deneysel ve sayısal zamana bağlı kuvvet eğrileri birbirine benzer elde edilmiştir. Bu durum, kompozit sandviç panelin üst tarafındaki kompozit plakanın darbe etkisi altında hasar davranışının sayısal olarak iyi derecede modellenilebildiğini göstermektedir. Bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panelde maksimum temas kuvveti deneysel olarak 4,073 kN, sayısal olarak 3,908 kN elde edilmiştir (%4,051 hata). Ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelde ise maksimum temas kuvveti deneysel olarak 4,401 kN, sayısal analiz sonucuna göre 4,287 kN olarak elde edilmiştir (%2,591 hata). Bu durumda ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelde oluşan temas kuvveti bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panele göre deneysel olarak %8,053 daha fazladır. Enerji eğrileri göz önüne alındığında bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panellerde oluşan maksimum enerji seviyeleri deneysel ve sayısal olarak birbirine çok küçük bir sapma ile uyumlu elde edilmiştir. Maksimum enerji değerinden önce ve sonraki enerji eğrileri arasında küçük sapmalar olmuştur. Çarpmanın bitiminde bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panelde enerji sönmüleme değerleri deneysel olarak 18,512 J, sayısal olarak 17,801 olarak elde edilirken (%3,841 hata), ökzetik desen çekirdekli sandviç panelde bu değerler deneysel olarak 15,087 J, sayısal olarak 16,276 J olarak hesaplanmıştır (%7,881 hata).



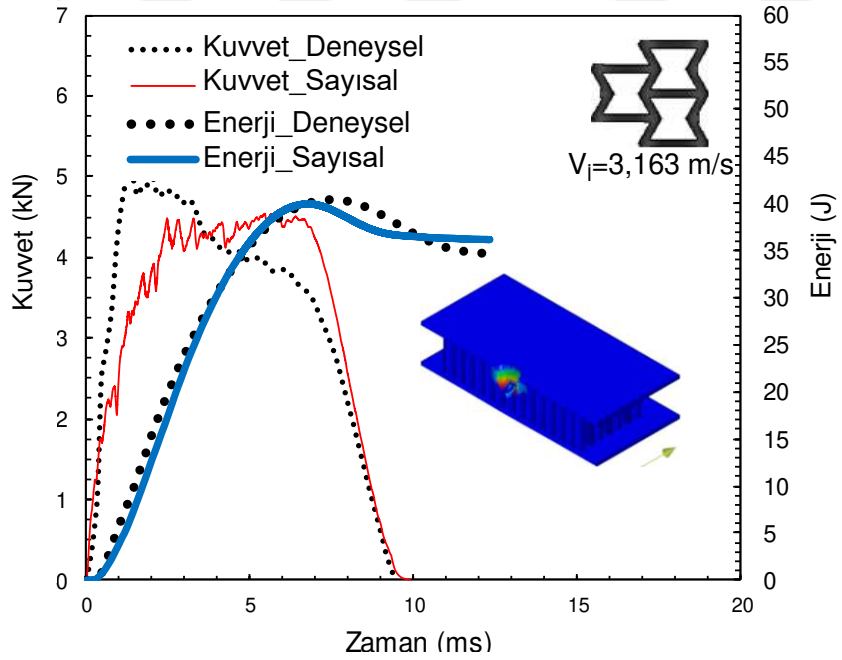
Şekil 3.23. 2,236 m/s çarpma hızında düzlem içi yönlü bal peteği (a) ve ökzetik (b) desen çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sırasındaki tepki kuvveti ve enerji eğrilerinin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması

3,163 m/s ilk çarpma hızındaki vurucu ucun düzlem içi yönlü bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panellere çarpması sırasında deneysel ve sayısal olarak

elde edilen zamana bağlı kuvvet ve enerji eğrilerinin karşılaştırması sırasıyla Şekil 3.24a ve 3.24b’ de gösterilmiştir.



(a)

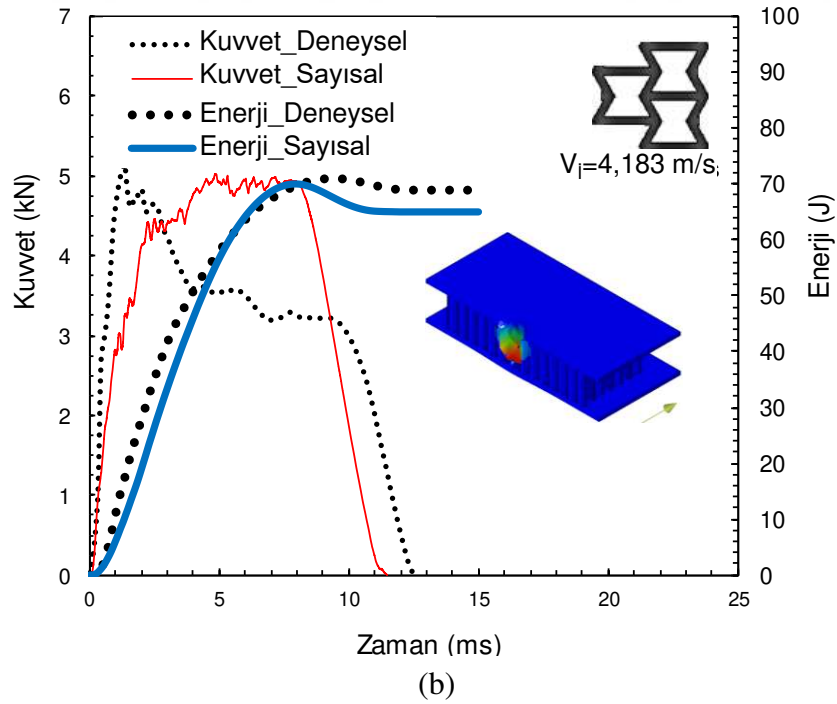
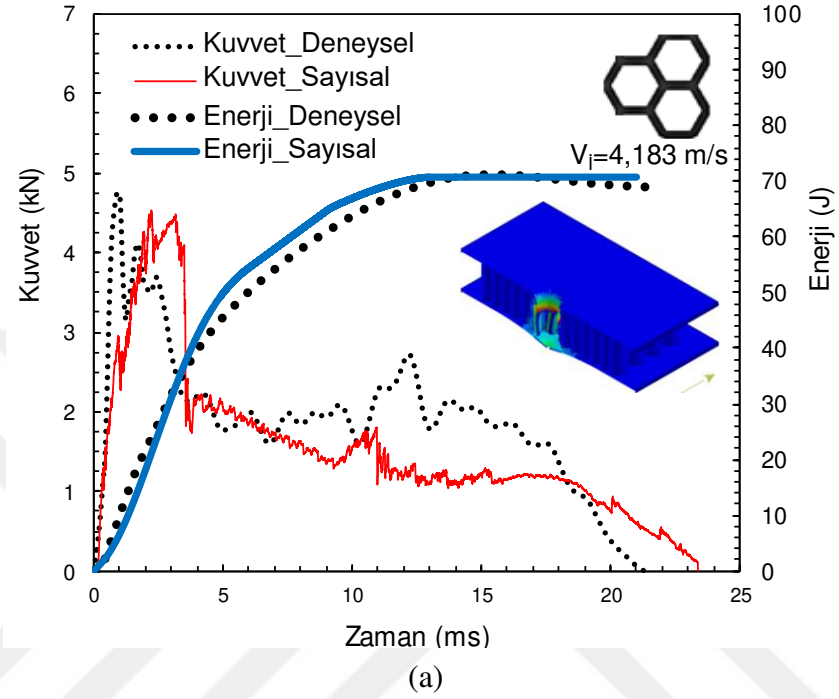


(b)

Şekil 3.24. 3,163 m/s çarpma hızında düzlem içi yönlü bal peteği (a) ve ökzetik (b) desen çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sırasındaki tepki kuvveti ve enerji eğrilerinin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması

Bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panelin üst kompozit yüzey plakasının kırılmasının ardından kuvvet eğrisinde maksimum değere ulaşıldıktan sonra ani bir düşüş olmuştur (Zhang ve diğ., 2017). Kuvvet eğrisindeki bu ani düşüş, hasarlı bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panelin çekirdek yapısının üst kompozit yüzey plakasında ilerlemeli elyaf kırılması, çarpma bölgesi etrafındaki çekirdek yapıların ezilmesi, çatlaması ve burkulması yüzünden olmuştur (Yazdani Sarvestani ve diğ., 2018). Ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelde vurucu uç çekirdek yapı içerisine girdiği andaki kuvvet eğrisi maksimum değerine ulaştıktan sonra kontrollü plato davranışı sergilemiştir. Bu esnada, üst kompozit yüzey plakasının çarpma bölgesinde ciddi hasarla birlikte bariz bir girinti oluşarak ökzetik desenli çekirdek yapının ezilmesi ve burkulmasıyla kuvvet eğrisi stabil olarak değişmiştir. Diğ er yandan ökzetik desenli çekirdek yapı bal peteği desenli çekirdek yapıdan daha az hasar görmüş, kuvvet eğrisi çekirdek ezilmesi ve çekirdek burkulması yoluyla daha kararlı dayanım göstermiştir. Bu bulgu Jiang ve Hu (2017) tarafından yapılan çalışmayı desteklemektedir. Düzlem içi çekirdek yönlü kompozit sandviç panellerin darbelenmesi sırasında deneysel ve sayısal olarak elde edilen tepki kuvveti eğrilerine göre, maksimum temas kuvveti oluştuktan sonra sandviç panellerin çekirdek yapılarında meydana gelen kırılmalar nedeniyle deneysel ve sayısal kuvvet eğrileri arasında kayda değer farklılıklar olmuştur. Bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panelde maksimum temas kuvveti deneysel olarak 4,369 kN, sayısal analiz sonucuna göre 3,961 kN elde edilmiştir (%9,338 hata). Buna karşın ökzetik desen çekirdekli sandviç panelde ise maksimum temas kuvveti deneysel olarak 5,157 kN, sayısal olarak 4,505 kN elde edilmiştir (%12,601 hata). Deneysel kuvvet verileri karşılaştırıldığında, ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelde oluşan maksimum tepki kuvveti bal peteği desenli çekirdek yapıya göre %18,036 daha fazla olmuştur. Enerji eğrileri göz önüne alındığında, bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panellerde oluşan enerjinin zaman göre değişimleri maksimum enerji değerine kadar deneysel ve sayısal sonuçlar açısından uyumlu elde edilmiştir. Maksimum enerji değerinden sonra enerji eğrileri arasında hafif sapmalar olmuştur. Bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panelde enerji sönümleme değerleri deneysel olarak 37,138 J, sayısal olarak 38,526 J olarak hesaplanmıştır (%3,737 hata). Ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelde ise bu değerler deneysel olarak 34,695 J, sayısal olarak 36,157 J olarak elde edilmiştir (%4,214 hata).

4.183 m/s çarpma hızında düzlem içi yönlü bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panellerde zamana bağlı olarak deneysel ve sayısal olarak elde edilen kuvvet ve enerji eğrilerinin karşılaştırması sırasıyla Şekil 3.25a ve 3.25b' de gösterilmiştir.

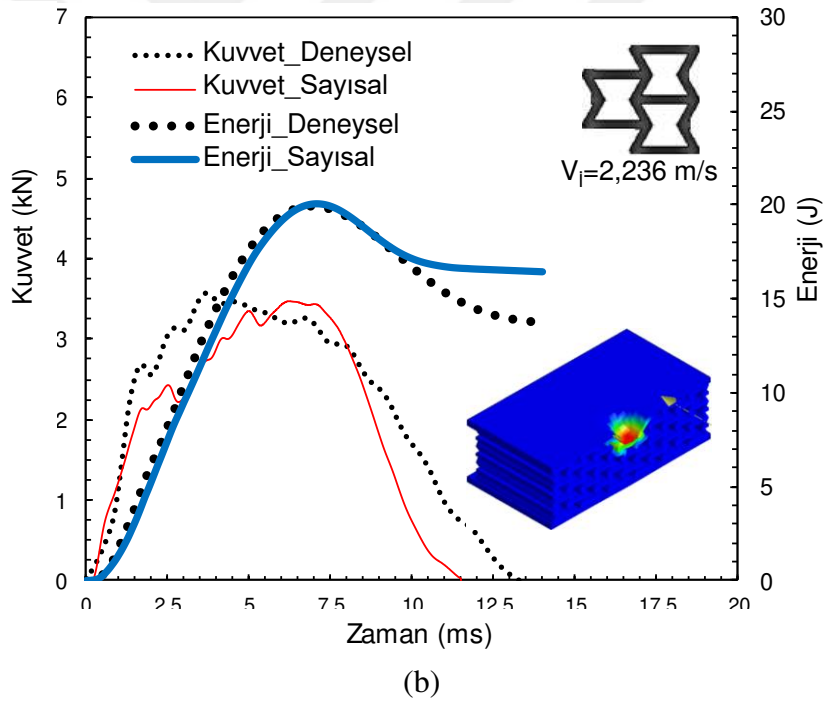
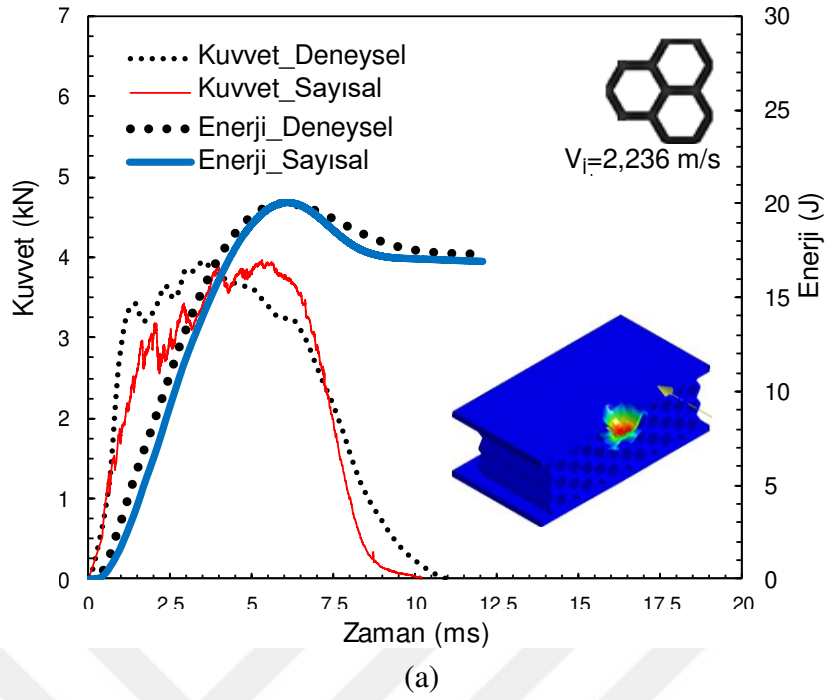


Şekil 3.25. 4,183 m/s çarpma hızında düzlem içi yönlü bal peteği (a) ve ökzetik (b) desen çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sırasındaki tepki kuvveti ve enerji eğrilerinin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması

Bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panel numunesine vurucu ucun çarpması sırasında vurucu uç üst kompozit yüzey plakası, çekirdek yapı ve alt kompozit yüzey plakasına temas ederek numune içerisine tamamen girmiştir. Kompozit sandviç panelde kırılma başlangıcı sonrası çatlak ilerleme fazı sırasında tepki kuvveti maksimum değere ulaştıktan sonra stabil duruma gelinceye kadar yavaş yavaş azaldığı sırada üst kompozit yüzey plakasında elyaf kopması ve elyaf kırılması, çekirdek yapıda ise kesilme ve vurucu ucun alt tarafında kalan yerlerde burkulmalar ve ezilmeler olmuştur. Vurucu uç alt kompozit yüzey plakasına temas ettiğinde kuvvet eğrisinde tekrar bir artma ve azalma olurken bu plakada elyaf kopması ve elyaf kırılması hasarı meydana gelmiştir. Diğer yandan vurucu uç ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panel numunesinin üst yüzey plakasını deldikten sonra çekirdek yapının içine girerek üst kompozit plakada elyaf kırılması ve elyaf kopması, çekirdek yapıda ezilme, burkulma ve çatlama ve kırılmalara neden olmuştur. Bu duruma karşılık gelen kuvvet eğrisi maksimum değerine ulaştıktan sonra kontrollü plato bölgesine kadar kademeli olarak azalmıştır. Daha düşük hızlı darbe testi sonuçlarıyla karşılaştırma yapıldığında, artan çarpma hızıyla birlikte kompozit sandviç panel numunelerinin maksimum tepki kuvveti değerleri artmıştır. Her iki kompozit sandviç panelin hasar durumu için zamana bağlı deneysel ve sayısal kuvvet eğrileri arasında yapılan değerlendirmeye göre çarpma hızındaki artışa bağlı olarak kompozit sandviç panellerin çekirdek yapılarında değişik hasar mekanizmaları (ezilme, çatlama, kırılma, delinme) oluşması nedeniyle kuvvet eğrilerinde kayda değer derecede bariz sapmalar olmuştur. 4.183 m/s çarpma hızında bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panelde maksimum tepki kuvveti deneysel olarak 4,762 kN, sayısal olarak 4,534 kN elde edilmiştir (%4,788 hata). Buna karşın ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelde ise maksimum tepki kuvveti deneysel olarak 5,149 kN, sayısal olarak 4,951 kN belirlenmiştir (%3,845 hata). Bu duruma göre, ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelde çarpma sırasında oluşan maksimum tepki kuvveti bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panele göre %8,126 daha fazla olmuştur. Maksimum enerjisi değerine kadar bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panellerde oluşan enerjinin zamana göre deneysel ve sayısal değişimleri birbiriyle uyumlu elde edilmiştir. Maksimum enerji değerinden sonra bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panelin enerji eğrileri birbiriyle uyumlu olurken ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelin enerji eğrileri arasında belirgin sapmalar olmuştur. Çarpmanın bitiminde bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panelde enerji sönümleme değerleri deneysel olarak 68,959 J, sayısal olarak 69,972 J belirlenmiştir (%1,469 hata). Diğer yandan ökzetik

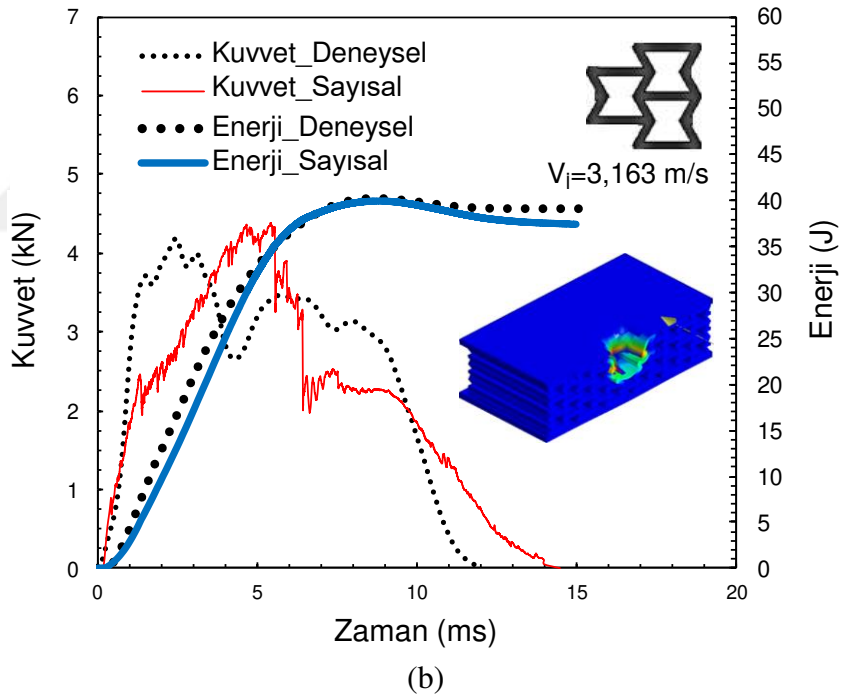
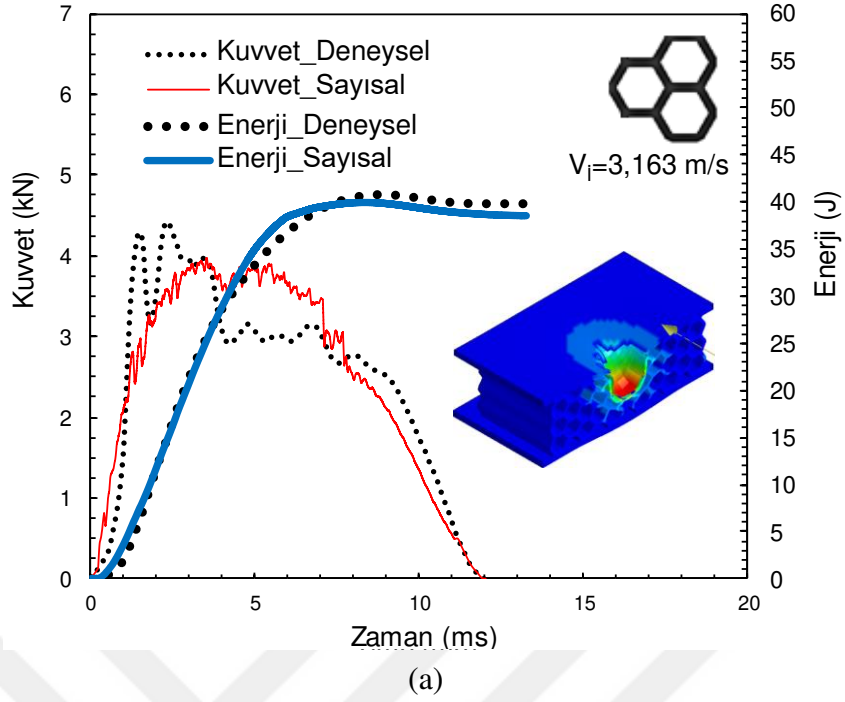
desen çekirdekli sandviç panelde ise bu değerler deneysel olarak 68,896 J, sayısal olarak 65 J olarak hesaplanmıştır. Düzlem içi yönlü bal peteği desen çekirdekli yapıdaki çarpma olayında vurucu uç çekirdek yapıya girdiğinde çekirdek duvarları çarpma bölgesinden dışarı doğru genişleyerek yük taşıma kabiliyetinin azalmasına neden olmuştur. Buna karşın düzlem içi yönlü ökzetik desen çekirdekli yapının çekirdek duvarları negatif Poisson oranı etkisinin bir sonucu olarak çarpma bölgesinin merkezine doğru kapanmıştır (Liu ve diğ., 2016). Bu durum ökzetik desenli çekirdek yapının sertliğini hızla arttırarak darbe yüküne karşı enerji yayma kabiliyetinde bir artışa yol açmıştır (Choi, 1996; Lakes, 1993).

Düzlem dışı yönlü bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe dayanımı ve enerji sönümleme davranışları üç farklı çarpma hızı altında deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. 2,236 m/s çarpma hızında düzlem dışı yönlü bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panellerde çarpma sırasında deneysel ve sayısal olarak elde edilen zamana bağlı kuvvet ve enerji eğrileri sırasıyla Şekil 3.26a ve 3.26b' de gösterilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere çarpma sırasında kuvvet eğrilerinde bariz dalgalanmalar olmuştur. Bu dalgalanmalar kompozit sandviç panel numunelerinin üst kompozit yüzey plakalarında çoklu matris ve elyaf kırılmalarından kaynaklanmıştır. Kompozit sandviç panel numunelerinin üst yüzey plakalarında delinme ve çekirdek yapılarda ezilme hasarı baskın olmuştur. Üst kompozit yüzey plakası ve çekirdek yapı malzemelerinin maksimum mukavemet değerlerine ulaşıldığında tepki kuvveti maksimum değere yükselmiştir. Maksimum kuvvet değerinden sonra kompozit sandviç panel numunelerinin çekirdek kısımlarında ezilme ve burkulma hasarları meydana gelmiştir. Her iki kompozit sandviç panelin zamana bağlı deneysel ve sayısal kuvvet eğrileri birbiriyle uyumlu olmuştur. Bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panelde maksimum tepki kuvveti deneysel olarak 3,956 kN, sayısal olarak 3,901 kN elde edilmiştir (%1,390 hata). Ökzetik desen çekirdekli sandviç panelde ise maksimum temas kuvveti deneysel 3,566 kN, sayısal 3,469 kN olarak belirlenmiştir (%2,72 hata). Bu duruma göre, ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelde oluşan maksimum tepki kuvveti bal petek desen çekirdekli kompozit panele göre deneysel olarak %9,858 daha az olmuştur. Bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli sandviç panellerdeki deneysel ve sayısal enerji eğrileri maksimum enerji değerine kadar hafif sapmalar ile iyi derecede uyumlu elde edilmiştir.



Şekil 3.26. 2,236 m/s çarpma hızında düzlem dışı yönlü bal peteği (a) ve ökzetik (b) desen çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sırasındaki tepki kuvveti ve enerji eğrilerinin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması

3,163 m/s çarpma hızındaki vurucu ucun düzlem dışı yönlü bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panellere çarpması sırasında elde edilen deneysel ve sayısal zamana bağlı kuvvet ve enerji eğrileri sırasıyla Şekil 3.27a 3.27b' de gösterilmiştir.



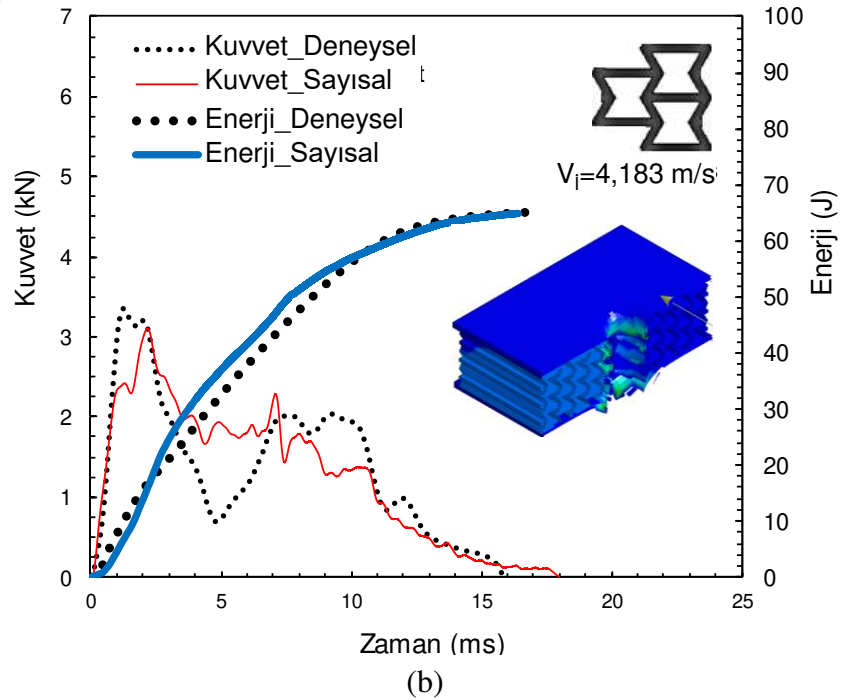
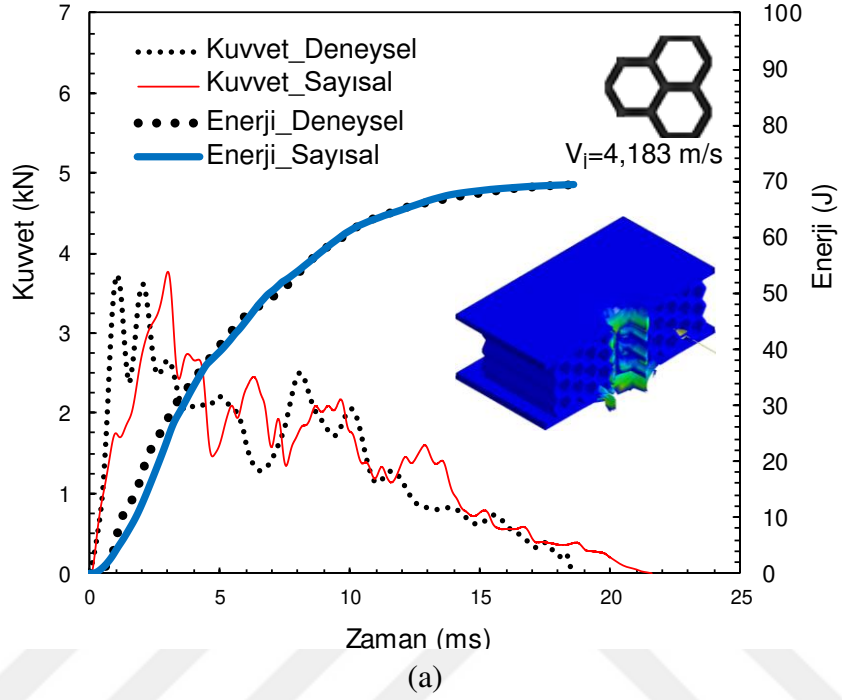
Şekil 3.27. 3,163 m/s çarpma hızında düzlem dışı yönlü bal peteği (a) ve ökzetik (b) desen çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sırasında tepki kuvveti ve enerji eğrilerinin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması

Çarpma hızının 3.163 m/s' ye artırılmasıyla çarpma sırasında oluşan maksimum temas kuvveti kritik değere kadar yükseldikten sonra dalgalı olarak azalma eğilimine girmiştir. Düzlem dışı yönlü bal peteği ve ökzetik desenli çekirdek yapılarında ezilme hasarının artmasıyla birlikte eğilme ve katlanma hasarları ortaya çıkmıştır. Her iki kompozit

sandviç panelin üst yüzey plakalarında delinme, çekirdek yapılarında ezilme ve kırılmalar olduğu için zamana bağlı deneysel ve sayısal kuvvet eğrilerinde arasında sapmalar olmuştur. Bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panelde maksimum tepki kuvveti test sonucuna göre 4,419 kN, analiz sonucuna göre 3,909 kN olarak elde edilmiştir (%11,541 hata). Ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelde ise maksimum tepki kuvveti deneysel 4,185 kN, sayısal 4,383 kN olarak belirlenmiştir (%2,72 hata). Bu duruma göre, ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelde oluşan maksimum tepki kuvveti bal peteği desen çekirdekli sandviç paneline göre deneysel olarak %4,731 daha az olmuştur. Enerji eğrileri göz önüne değerlendirildiğinde, bal peteği ve ökzetik desenli kompozit sandviç panellerdeki deneysel ve sayısal enerji değişimleri çarpmanın bitimine kadar birbiriyle uyumlu elde edilmiştir. Çarpmanın bitimine doğru deneysel ve sayısal enerji sönümlleme değerleri arasında farklılıklar olmuştur. Örneğin, çarpmanın bitiminde bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panelde enerji sönümlleme değeri deneysel 39,818 J, sayısal 38,543 J olarak hesaplanmıştır (%3,202 hata). Buna karşın ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelde bu değerler deneysel 39,121 J, sayısal 37,419 J olarak elde edilmiştir (%4,351 hata).

4,183 m/s çarpma hızındaki vurucu ucun bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panellere çarpması sırasında zamana bağlı deneysel ve sayısal olarak elde edilen kuvvet ve enerji eğrilerinin karşılaştırmaları sırasıyla Şekil 3.28a ve 3.28 b' de gösterilmiştir. Çarpma enerjisindeki artışla (70 J) birlikte düzlem dışı yönlü ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panel numunesi bal petek desen çekirdekli kompozit sandviç panel numunesine göre daha kısa sürede delinmiş ve numunelerin maksimum temas kuvveti değerleri azalmıştır. Deneysel ve sayısal kuvvet eğrileri incelendiğinde her iki kompozit sandviç panelin üst ve alt yüzey plakalarında delinme, çekirdek yapılarında kırılmalar olduğu için kuvvet eğrileri arasında sapmalar olmuştur. Bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panelde maksimum tepki kuvveti deneysel 3,725 kN, sayısal 3,767 kN olarak elde edilmiştir (%1,127 hata). Ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelde ise maksimum temas kuvveti deneysel 3,354 kN, sayısal 3,105 kN olarak belirlenmiştir (%7,423 hata). Deneysel sonuçlara göre, ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelde çarpma sırasında elde edilen maksimum tepki kuvveti bal petek desen çekirdekli kompozit sandviç panele göre %9,959 daha az olmuştur. Enerji eğrileri değerlendirildiğinde, bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panellerdeki deneysel ve sayısal enerji değişimleri çarpmanın bitimine kadar birbiriyle çok iyi uyumlu elde edilmiştir. Bal peteği

desen çekirdekli sandviç panelde enerji sönümlleme deneysel 69,338 J, sayısal 69,396 J olarak belirlenirken (%0,081 hata), ökzetik desen çekirdekli sandviç panelde deneysel 65,068 J, sayısal 64,889 J olarak hesaplanmıştır (%0,275 hata).



Şekil 3.28. 4,183 m/s çarpma hızında düzlem dışı yönlü bal peteği (a) ve ökzetik (b) desen çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sırasındaki tepki kuvveti ve enerji eğrilerinin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması

Eğilme, burkulma ve çarpma gibi dış yükler altında düzlem dışı yönlü ökzetik desenli çekirdek yapının rijitlik ve mukavemeti düzlem dışı yönlü bal petek desenli çekirdek yapıya göre daha düşük olması nedeniyle bu çekirdek yapıya sahip kompozit sandviç panelin çarpma sırasındaki maksimum tepki kuvveti daha düşük olmuştur. Diğer yandan düzlem içi yönlü ökzetik desenli çekirdek yapının duvarları eksenel deformasyona maruz kaldığı için bu çekirdek yapıya sahip kompozit sandviç panelin darbelenmesi sırasındaki maksimum tepki kuvveti düzlem içi bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panele göre daha yüksek elde edilmiştir (Gibson, 1997).

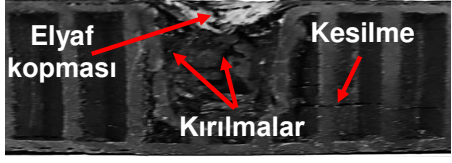
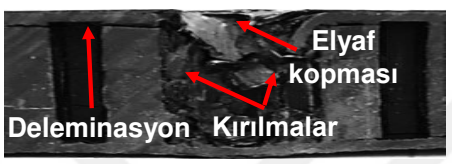
Düzlem içi ve düzlem dışı kompozit sandviç panellerin çarpma enerjisine göre sönümledikleri enerji ve elastik enerji değerlerinin karşılaştırmaları Tablo 3.3' te verilmiştir. Düzlem içi yönlü bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panel 20 J' lük çarpma enerjisinde 18,51 J ile diğer sandviç panellere göre daha fazla enerji sönümlenmiştir. Aynı çarpma enerjisinde en fazla elastik (geri tepme) enerji 6,26 J ile düzlem dışı yönlü ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panele aittir. Yani düzlem dışı yönlü ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panel, üzerine gelen çarpma enerjisinin %31,29 sönümlemeden geri vererek daha iyi enerji yayma kabiliyeti sergilemiştir. Düzlem dışı yönlü ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelden sonra en iyi enerji yayma kabiliyetini %24,56 geri dönüşüm oranıyla düzlem içi ökzetik desen çekirdekli sandviç panel göstermiştir. 40 J' lük çarpma enerjisinde ise düzlem dışı bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç paneller sırasıyla 39,82 ve 39,12 J enerji değerleri ile daha iyi enerji sönümleme davranışına sahip olmuşlardır. Aynı çarpma enerjisinde en yüksek elastik enerji 5,31 J ile düzlem içi ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelde elde edilmiştir. 70 J' lük çarpma enerjisinde düzlem içi yönlü bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç paneller sırasıyla 1,00 J ve 1,11 J elastik enerji seviyeleri ile en iyi darbe dayanımı ve enerji yayma kabiliyeti göstermişlerdir. Düzlem dışı yönlü bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç paneller ise üzerlerine gelen çarpma enerjisinin sırasıyla 69,34 ve 65,09 J' lük kısımlarını sönümledikten sonra çarpma enerjisinin geri kalan kısmına dayanamayıp delinmişlerdir.

Tablo 3.3. Kompozit sandviç panel numunelerinin elastik ve sönümlenen enerji değerlerinin çarpma enerjisine göre karşılaştırması

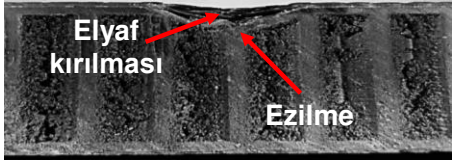
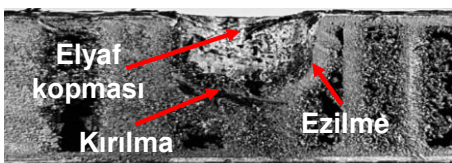
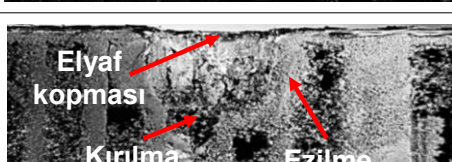
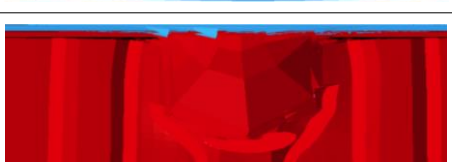
Çekirdek deseni ve yönü	Çarpma enerjisi [J]	Sönümlenen enerji [J]	Elastik enerji [J]	Enerji sönümleme verimi [%]
Bal peteği (Düzlem içi)	20	18,51	1,49	92,55
	40	37,14	2,86	92,85
	70	68,96	1,04	98,51
Ökzetik (Düzlem içi)	20	15,09	4,91	75,44
	40	34,69	5,31	86,74
	70	68,89	1,11	98,42
Bal peteği (Düzlem dışı)	20	17,32	2,68	86,59
	40	39,82	0,18	99,54
	70	69,34	0	99,05
(Ökzetik) (Düzlem dışı)	20	13,74	6,26	68,71
	40	39,12	0,88	97,80
	70	65,09	0	92,99

3.8.3. Kompozit Sandviç Panellerin Hasar Davranışı

Düzlem içi yönlü bal petek ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panel numunelerinin 20 J çarpma enerjisi altında üst yüzey plakalarında delemantasyon, tabakalar arası çatlaklar, elyaf kırılmaları, matris çatlaması ve çekirdek yapılarında ezilme hasarı oluşmuştur. Üst kompozit yüzey plakalarında meydana gelen hasar mekanizmaları lietratürü açık bir şekilde desteklemektedir (Zhang ve Tan, 2020). 40 J' lük çarpma enerjisine sahip vurucu uç kompozit sandviç panel numunesinin içine daha fazla girerek üst kompozit yüzey plakalarında elyaf kopmasına, çekirdek yapılarda ezilme, kesilmeler ve çatlamalara neden olmuştur. Bunun yanında 70 J' lük çarpma enerjisi için vurucu uç düzlem içi yönlü bal peteği desen çekirdekli yapıyı delmiş ve geride kalan enerjisiyle birlikte alt kompozit yüzey plakasına temas ederek bu plakada elyaf kırılması, yapışma ara yüzeyinde delemantasyon; çekirdek yapıda ezilme ve kırılmalar neden olmuştur (Şekil 3.29). Aynı çarpma enerjisinde, Şekil 3.30' da görüldüğü gibi vurucu uç ökzetik desenli çekirdek yapı içerisine kısmi giriş yaparak saplanmıştır. Bu nedenle üst kompozit yüzey plakasının kırılmasının ardından çekirdek yapıda ezilme ve kırılmalar meydana gelmiştir

Çarpma enerjisi	Deneysel	Sayısal
20 J		
40 J		
70 J		

Şekil 3.29. Düzlem içi yönlü bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panelde darbe sonrası oluşan hasarın çarpma enerjisine göre deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması

Çarpma enerjisi	Deneysel	Sayısal
20 J		
40 J		
70 J		

Şekil 3.30. Düzlem içi yönlü ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelde darbe sonrası oluşan hasarın çarpma enerjisine göre deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması

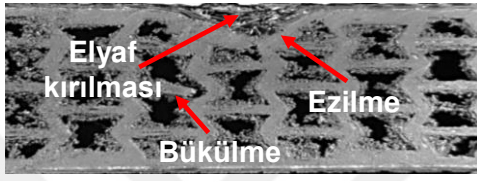
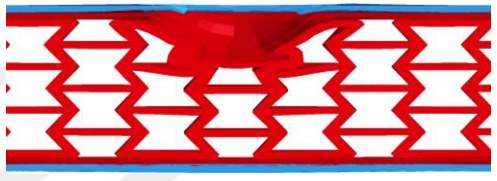
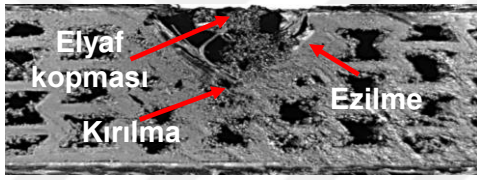
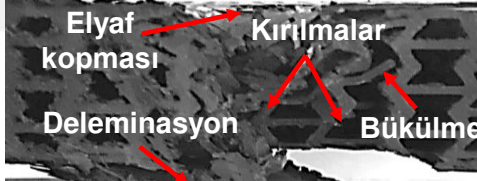
Şekil 3.31’ de 20 J’ lük çarpma enerjisine sahip vurucu ucun düzlem dışı yönlü bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panelin üst yüzey plakasında elyaf kırılması, çekirdek yapısında ise ezilme hasarı meydana getirdiği görülmektedir. Artan çarpma enerjisiyle birlikte (40 J) vurucu uç kompozit sandviç panel içerisine daha fazla girerek üst yüzey plakasında elyaf kopmaları, çekirdek yapıda kırılmalar ve ezilme hasarlarına neden olmuştur. Daha yüksek çarpma enerjisinde ise (70 J), vurucu uç kompozit sandviç panel içerisinde daha fazla ilerleyerek çekirdek yapının hücrelerini kırılıp ayırdıktan sonra delinmesine neden olmuş ve geride kalan enerjisiyle alt kompozit yüzey plakayı da kırarak çekirdek yapıdan tamamen ayırmıştır.

Çarpma enerjisi	Deneysel	Sayısal
20 J		
40 J		
70 J		

Şekil 3.31. Düzlem dışı yönlü bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panelde darbe sonrası oluşan hasarın çarpma enerjisine göre deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması

Düzlem dışı yönlü ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelde ise 20 J çarpma enerjisine sahip vurucu uç üst kompozit yüzey plakalarına temas ettikten sonra geri teperek plakalarda elyaf kırılmasına, çekirdek yapıda ezilme ve bükülme hasarlarına neden olmuştur (Şekil 3.32). Çarpma enerjisi 40 J’ e arttırıldığında, vurucu uç kompozit sandviç panel numunesinin üst kompozit yüzey plakalarını delerek çekirdek yapı içerisine girip

saplanmıştır. Bu durumda kompozit sandviç panel numunesinin üst yüzey plakalarında elyaf kopması, çekirdek yapılarında ezilme, kırılma ve katlanma hasarlarına neden olmuştur. Buna karşın daha yüksek çarpma enerjisinde (70 J), düzlem dışı ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panel numunesi tamamen delinerek kompozit plakalarda elyaf kopmaları, elyaf kırılmaları, delemantasyon; çekirdek yapılarında ise ciddi derecede kırılma ve bükülmeler oluşmuştur.

Çarpma enerjisi	Deneysel	Sayısal
20 J	 Elyaf kırılması Ezilme Bükülme	
40 J	 Elyaf kopması Ezilme Kırılma	
70 J	 Elyaf kopması Kırılmalar Delemantasyon Bükülme	

Şekil 3.32. Düzlem dışı yönlü ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelde darbe sonrası oluşan hasarın çarpma enerjisine göre deneysel ve sayısal olarak karşılaştırması

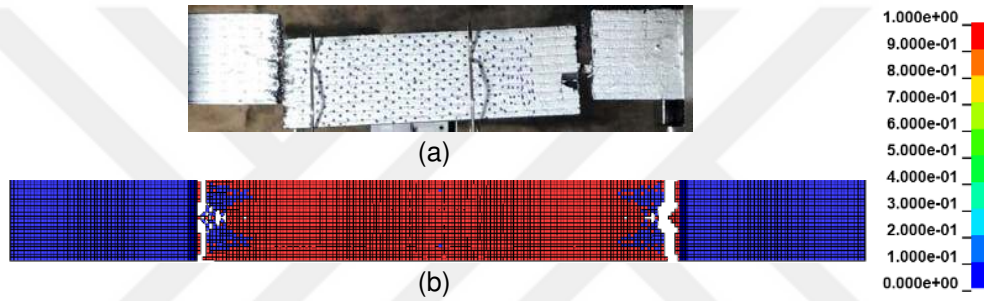
3.9. Kompozit Çarpışma Kutularının Enerji Sönümleme ve Hasar Davranışları

3.9.1. KETP Kompozit Malzemenin Mekanik Özellikleri

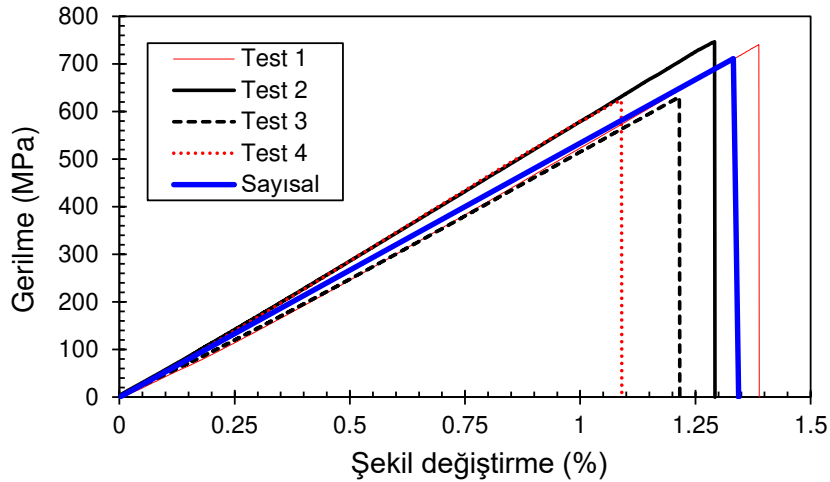
Vakum torbalama tekniğiyle üretilen KETP kompozit plakalardan ASTM standartlarına uygun ölçülerde kesilen çekme, kayma ve basma numunelerine ilgili statik testler uygulanarak çarpışma kutularının üretiminde kullanılan KETP kompozit malzemenin mekanik özellikleri (elastisite modülü, poisson oranı, kayma modülü, çekme dayanımı, basma dayanımı, kayma dayanımı vs.) belirlenmiştir. KFTE kompozit malzemenin mekanik

özellik ve hasar parametreleri sayısal modelde girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Statik çekme, kayma, basma ve üç nokta eğilme testleri sayısal olarak doğrulanarak sayısal modelde kullanılan MAT54 kompozit malzeme hasar modeliyle ilgili parametreler kalibre edilmiştir.

KETP kompozit malzemenin statik çekme testi ve sayısal çekme analizi sonucu çekme numunesinde oluşan hasarların karşılaştırması Şekil 3.33’ te gösterilmiştir. ASTM D3039 standardına göre gerçekleştirilen statik çekme testi (Şekil 3.33a) ve sayısal çekme analizinden (Şekil 3.33b) elde edilen görüntülere göre numunenin ölçü bölgesinin her iki tarafında birbirine benzer kopma hasarı meydana gelmiştir.



Şekil 3.33. KETP kompozit malzemenin çekme testi (a) ve sayısal çekme analizi (b) sonucu elde edilen hasar görüntülerinin karşılaştırması

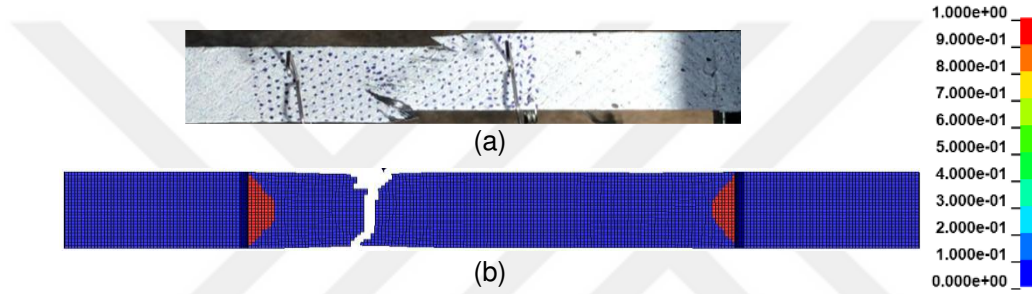


Şekil 3.34. KETP kompozit malzemenin çekme testi ve sayısal çekme analizinden edilen normal gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

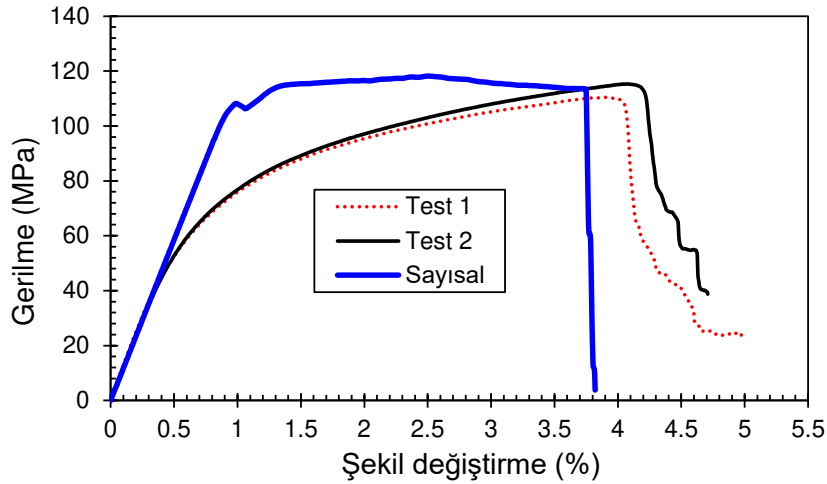
Şekil 3.34’ te ASTM D3039 standardına göre gerçekleştirilen statik çekme testi ve sayısal çekme analizinden elde edilen normal gerilme-şekil değiştirme eğrileri

karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tekrarlı testler sırasında bazı (Test 3 ve Test 4) numunelerde kopmalar Şekil 3.34’ te görüldüğü gibi çene tipinde meydana geldiği için ölçülen bu test numunelerinin maksimum normal gerilme değerleri diğer numunelere göre daha düşük elde edilmiştir. Sayısal çekme analizinden elde edilen normal gerilme-şekil değiştirme eğrisi ile diğer numunelerin çekme testlerinden (Test 1 ve Test 2) elde edilen normal gerilme-şekil değiştirme eğrileri birbiriyle uyum içerisinde olmuştur.

ASTM D3518 standardına göre yapılan statik kayma testi (Şekil 3.35a) ve sayısal analizinden (Şekil 3.35b) elde edilen görüntülere göre numunenin ölçü bölgesi içerisinde 45° elyaf açısı yönünde birbirine benzer kopma hasarı meydana gelmiştir.



Şekil 3.35. KETP kompozit malzemenin kayma testi (a) ve sayısal kayma analizi (b) sonucu elde edilen hasar görüntülerinin karşılaştırması

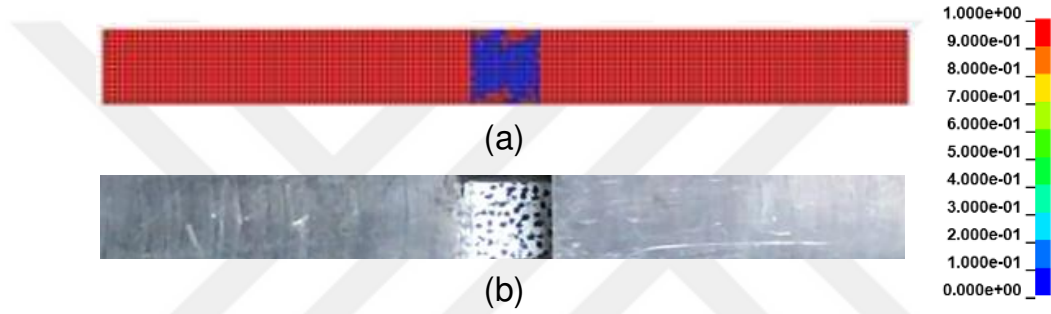


Şekil 3.36. KETP kompozit malzemenin kayma testi ve sayısal kayma analizinden edilen normal gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

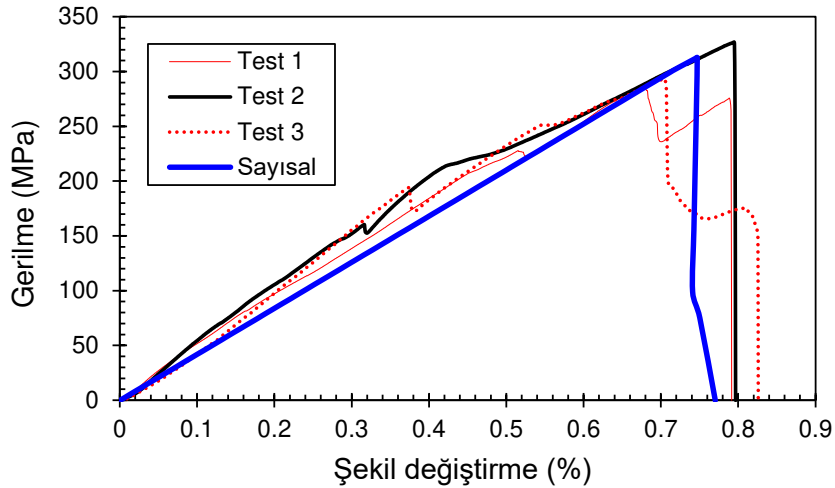
Şekil 3.36’ da statik kayma testi ve sayısal kayma analizinden elde edilen normal gerilme-şekil değiştirme eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tekrarlı kayma testlerinde

her iki numune için elde edilen normal gerilme-şekil değiştirme eğrileri birbiriyle uyumlu olmuştur. Sayısal kayma analizden elde edilen şekil değiştirme-gerilme eğrisinin elastik bölgesindeki kısım deneysel eğrilerle uyumlu elde edilmiştir. Sayısal kayma analizinden elde edilen şekil değiştirme-gerilme eğrisi maksimum gerilme değerine ulaşılan kadar doğrusal arttıktan sonra plato şeklinde düzleşme eğilimi göstermiştir.

KETP kompozit malzeme için ASTM D6641 standardına göre gerçekleştirilen statik basma testleri ve sayısal basma analizi sonucu basma numunesinde oluşan hasarın görüntüleri Şekil 3.37’ da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 3.37a ve Şekil 3.37b’ den görüleceği üzere numunelerdeki kırılma hasarı ölçü bölgesi içerisinde oluşmuştur.



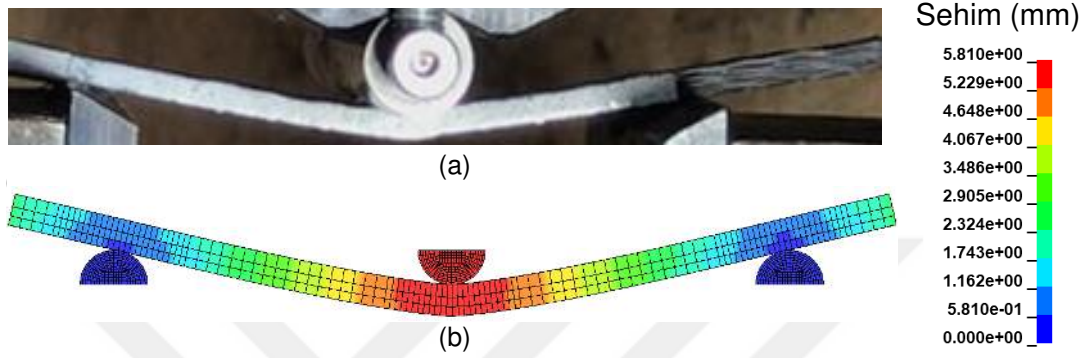
Şekil 3.37. KETP kompozit malzemenin basma testi (a) ve sayısal analizi (b) sonucu elde edilen hasar görüntülerinin karşılaştırması



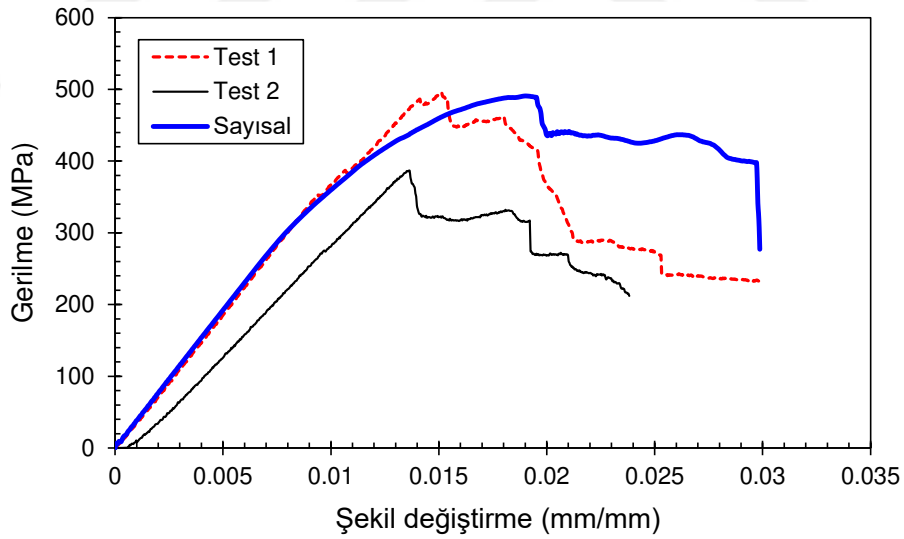
Şekil 3.38. KETP kompozit malzemenin basma testi ve sayısal basma analizinden elde edilen normal gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

Şekil 3.38’ de statik basma testi ve sayısal analizinden elde edilen normal gerilme-şekil değiştirme eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Basma testi sırasında tüm

kompozit numunelerin normal gerilme-şekil değiştirme eğrileri kırılma anına kadar doğrusal olarak değişmiştir. Tekrarlı testlerde her üç test numunesi için elde edilen normal gerilme-şekil değiştirme eğrileri birbirine uyumlu elde edilmiştir. Sayısal basma analizi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisi de tekrarlı basma testlerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileriyle uyum içerisinde olmuştur.



Şekil 3.39. KETP kompozit malzemenin eğilme testi (a) ve sayısal eğilme analizi (b) sonucu elde edilen deformasyon görüntülerinin karşılaştırması



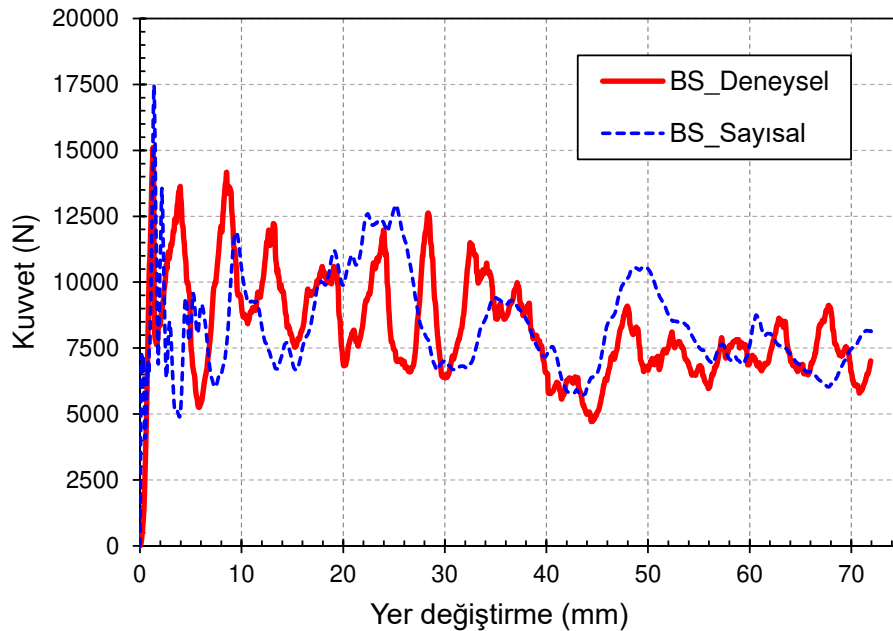
Şekil 3.40. KETP kompozit malzemenin üç nokta eğilme testi ve sayısal üç nokta eğilme analizinden elde edilen normal gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

KETP kompozit malzeme için ASTM D790 standardına göre gerçekleştirilen üç nokta eğilme testleri ve sayısal üç nokta eğilme analizinin sonucunda eğilme numunesinde elde edilen deformasyon görüntüleri Şekil 3.39’ da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Hem test hem de sayısal analiz sonucuna göre eğilme numunelerindeki deformasyon görüntüleri

birbirine benzemektedir. Test 2 numunesinde meydana gelen delemantasyon hasarı nedeniyle elde edilen normal gerilme-şekil değiştirme eğrisinde maksimum gerilme değeri Test 1 numunesininkine göre daha düşük olmuştur. Deneysel (Test 1) ve sayısal normal gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.40' ta görüldüğü gibi numunede kırılma meydana gelinceye kadar birbiriyle çok iyi uyumlu elde edilmiştir.

3.9.2. Kompozit Çarpışma Kutularının Sonlu Elemanlar Ezilme Modelinin Doğrulanması

Kompozit çarpışma kutularının sonlu elemanlar ezilme modelinden elde edilen sonuçları doğrulamak için içi boş silindir tip (BS) kompozit çarpışma kutusunun test verisi ile karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 3.41' den görüleceği üzere, deneysel ve sayısal kuvvet-yer değiştirme eğrileri birbiriyle uyum içerisinde elde edilmiştir. Kompozit çarpışma kutularının sonlu elemanlar ezilme analizlerinin tümü 0,72 s' lik bir tamamlanma süresi içerisinde gerçekleştirilmiştir. Bu tamamlanma süresine karşılık olarak, tüm kompozit çarpışma kutularının ezilme karakteristikleri yükleme plakasının 72 mm' lik yer değiştirmesine göre hesaplanmıştır.

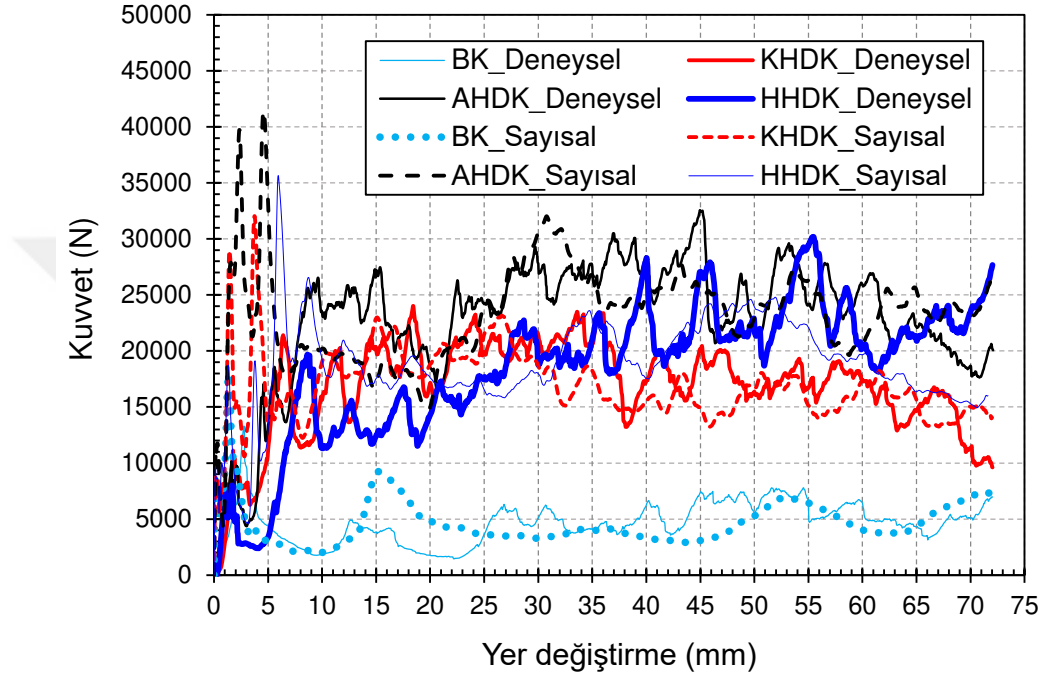


Şekil 3.41. İçi boş silindir (BS) tip kompozit çarpışma kutularının ezilme testinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrisi ile sonlu elemanlar ezilme model sonuçlarının doğrulanması

3.9.3. Kare Tip KETP Kompozit Çarpışma Kutularının Enerji Sönümleme Davranışı

Basma yükü altındaki kare tip KETP kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen deneysel ve sayısal kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil 3.42’ de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bazı özel durumlar hariç içi boş olarak üretilen kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri birbirine belirgin derecede benzer eğilimler göstermektedir. Kompozit çarpışma kutularının kuvvet-yer değiştirme eğrileri genel olarak elastik ve ilerlemeli hasar olmak üzere iki bölgede değerlendirilmektedir (Sun ve diğ., 2016). Elastik bölgede, ezilme başlangıcında oluşan tepki kuvveti hızla artarak maksimum değere ulaştıktan sonra daha düşük bir seviyeye kadar aniden düşer ve kompozit çarpışma kutularında ezilme hasarı oluşur. İlerlemeli hasar bölgesinde ise kompozit çarpışma kutuları üzerindeki ezilme kuvveti yükleme plakasının yer değiştirmesine bağlı olarak salınımlı bir şekilde artma ve azalma eğilimi gösteren plato eğrisi oluşturur (Rabiee, 2018). Şekil 3.42’ den görüleceği üzere, test verisine göre içi boş kare (BK) tip kompozit çarpışma kutusundaki ezilme kuvveti 13,299 kN’ a ulaştıktan sonra 3,511 kN ‘a kadar aniden düşerek ilerlemeli hasar bölgesinde 7,043 kN’ a kadar yükselip salınımlı plato eğrisi şeklinde değişim göstermiştir. Kare, altıgen ve hibrit (kare-altıgen) hücre dolgulu tip kompozit çarpışma kutularında ise dış taraftaki duvar ve iç taraftaki hücresel dolgu duvarları arasındaki 3 mm’ lik yükseklik farkı sayesinde ezilme başlangıcındaki pik kuvvetin çok yüksek değere çıkması engellenmiştir. Test verilerine göre hücresel dolgulu kare tip kompozit çarpışma kutularındaki ezilme kuvveti yükleme plakasının ilerleme durumuna göre maksimum değere ulaşıncaya kadar salınımlı olarak sürekli artmıştır. Sayısal analiz sonucuna göre hücresel dolgulu kompozit çarpışma kutularının ezilme başlangıcında iki farklı büyüklükte pik kuvvetler oluşmuştur. İlerlemeli hasar aşamasındaki deneysel ve sayısal yer kuvvet-değiştirme eğrileri birbiriyle uyum içerisinde elde edilmiştir. Kare tip kompozit çarpışma kutularında maksimum kuvvet değerleri birbirinden farklı ezilme mesafesinde elde edilmiştir. Test verilerine göre bu değerler; kare hücre dolgulu kare (KHDK) tip kompozit çarpışma kutusunda 24,025 kN, altıgen hücre dolgulu kare (AHDK) tip kompozit çarpışma kutusunda 32,566 kN ve hibrit hücre dolgulu kare (HHDK) tip kompozit çarpışma kutusunda 30,189 kN olarak belirlenmiştir. Buradan anlaşılabacağı üzere, kare, altıgen ve hibrit hücresel dolgulu kare tip kompozit çarpışma kutuları içi boş kare tip kompozit çarpışma kutusunun aksine maksimum kuvvet değerine ilerlemeli hasar bölgesinde salınımlı olarak sürekli artma eğilimiyle ulaşmıştır. HHDK tipkompozit çarpışma kutusunda ilerlemeli hasar bölgesinin sonlarına kadar sürekli artan

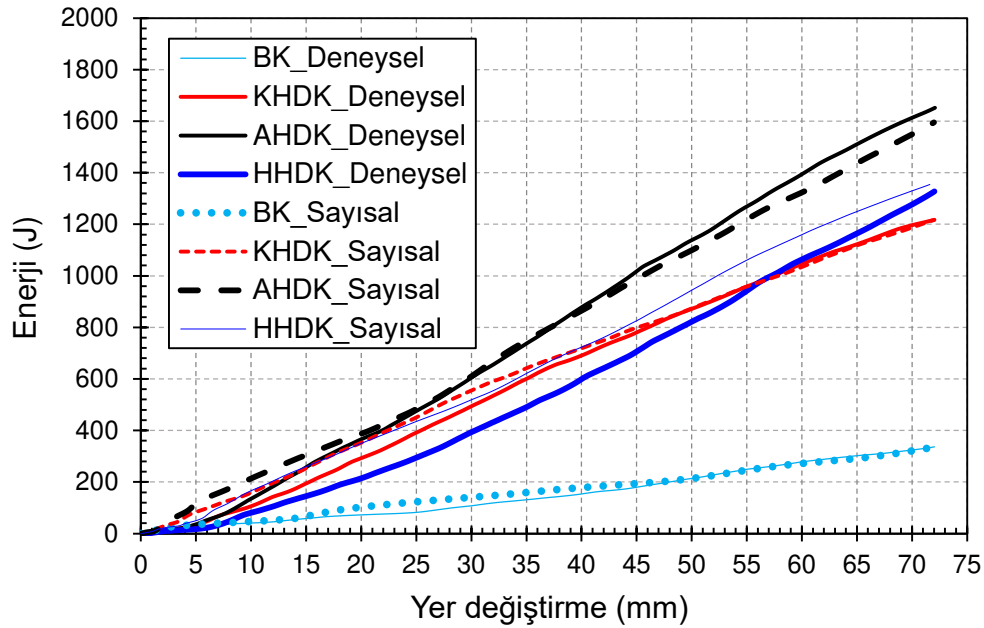
kuvvet-yer değiştirme eğrisinin elde edilmesi ezilme dayanımı açısından ideal bir sonuç ortaya koymuştur. AHDK tip kompozit çarpışma kutusu, ezilme dayanımı açısından KHDK ve HHDK tip kompozit çarpışma kutularına göre daha yüksek kuvvet değerlerine sahip olmuştur. KHDK tip kompozit çarpışma kutusu ise ilerlemeli hasar bölgesinde salınımlı plato eğrisi şeklinde yük taşıma kabiliyeti göstermiştir.



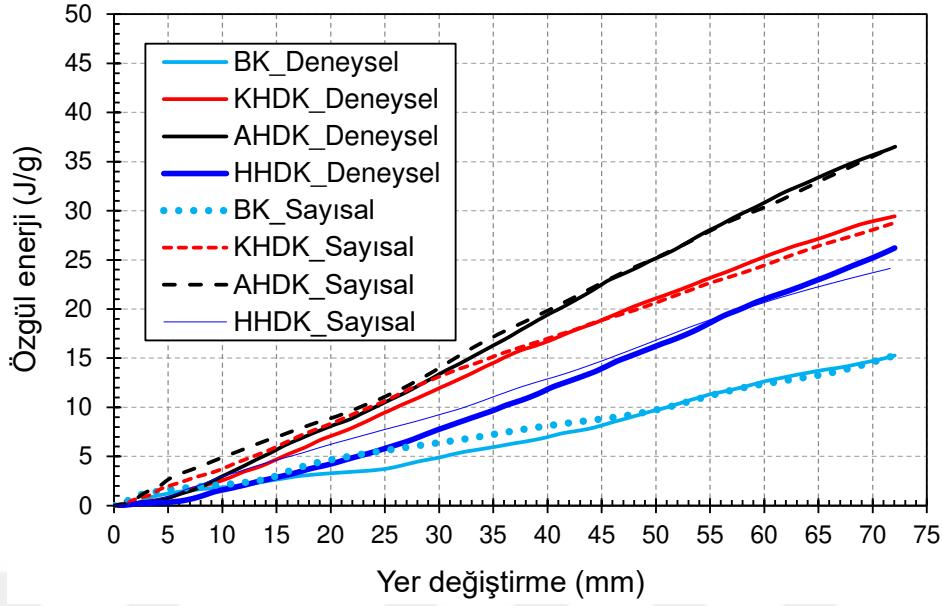
şekil 3.42. Kare dış duvarlı içi boş ve hücre dolgulu tip KETP kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen deneysel ve sayısal kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

Kare dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında deneysel ve sayısal olarak elde edilen enerji sönümleme-yer değiştirme eğrileri şekil 3.43, özgül enerji sönümleme-yer değiştirme eğrileri şekil 3.44’ de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. şekil 3.43’ den görüleceği üzere BK, KHDK ve AHDK tip kompozit çarpışma kutularının deneysel ve sayısal enerji sönümleme-yer değiştirme eğrileri birbiriyle çok iyi derecede uyumlu elde olmuştur. Ezilme testi sonunda toplam enerji sönümleme değerleri; AHDK tip kompozit çarpışma kutusu için 1652,117 J, KHDK tip kompozit çarpışma kutusu için 1217,358 J, HHDK tip kompozit çarpışma kutusu için 1327,615, BK tip kompozit çarpışma kutusu için 336,351 J olarak elde edilmiştir. Kare tip kompozit çarpışma kutularının özgül enerji sönümleme değerleri; AHDK tip kompozit çarpışma kutusu için 36,522 J/g, KHDK tip kompozit çarpışma kutusu için 29,440 J/g, HHDK tip kompozit çarpışma kutusu için 26,217, BK tip çarpışma

kutusu için 15,243 J/g olarak hesaplanmıştır. BK tip kompozit çarpışma kutusunun enerji sönümleme değerleriyle kıyaslama yapıldığında, AHDK tip çarpışma kutusu %391,112, KHDK tip çarpışma kutusu %261,912, HHDK çarpışma kutusu %294,613 daha fazla toplam enerji sönümleme kapasitesine sahip olmuştur. Özgül enerji sönümleme değerleri BK tip kompozit çarpışma kutusuna göre karşılaştırıldığında, AHDK tip kompozit çarpışma kutusu %139,512, KHDK tip kompozit çarpışma kutusu %92,912, HHDK tip kompozit çarpışma kutusu %72,051 daha fazla özgül enerji sönümleme kabiliyeti göstermiştir. Buradan anlaşılaacağı üzere, AHDK tip kompozit çarpışma kutusu en iyi enerji ve özgül enerji sönümleme kabiliyeti sergilerken HHDK tip kompozit çarpışma kutusu KHDK tip kompozit çarpışma kutusuna göre daha az enerji sönümleme değeri ile daha fazla özgül enerji sönümleme davranışı göstermiştir (Şekil 3.44). Sonuç olarak, içi boş kare tip kompozit çarpışma kutularının yük taşıma, enerji sönümleme ve özgül enerji sönümleme kabiliyetleri içlerine koyulan hücresel dolgu sayesinde hücre geometrisine bağılı olarak önemli ölçüde arttırılabilmektedir.



Şekil 3.43. Kare dış duvarlı içi boş ve hücre dolgulu tip KETP kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen deneysel ve sayısal enerji sönümleme-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

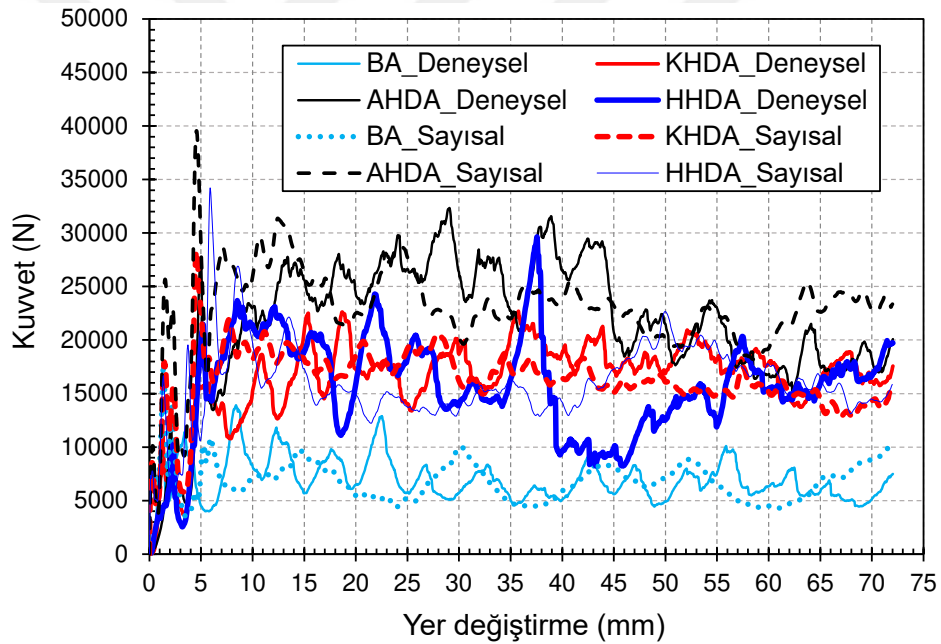


Şekil 3.44. Kare dış duvarlı içi boş ve hücre dolgulu tip KETP kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen deneysel ve sayısal özgül enerji sönümlerine yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

3.9.4. Altıgen Tip KETP Kompozit Çarpışma Kutularının Enerji Sönümlerine Davranışı

Altıgen dış duvarlı tip KETP kompozit çarpışma kutularının basma yükü altında ezilmeleri sırasında elde edilen deneysel ve sayısal kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil 3.45' te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Altıgen tip kompozit çarpışma kutularında ezilme hasarı başlangıcına kadar doğrusal olarak artan ezilme kuvveti, hasar oluşuktan sonra aniden düşerek tekrar artma eğilimi göstermiştir. Sayısal analiz sonuçlarına göre, altıgen dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının tümünde pik kuvvetler yükleme plakasının 5 mm' lik yer değiştirme süreci içerisinde oluşmuştur. Deneysel sonuçlara göre, hücreli dolgulu kompozit çarpışma kutularının maksimum tepki kuvveti ilerlemeli hasar bölgesi içerisinde yükleme plakasının 35 mm'lik yer değiştirmesi sırasında elde edilmiştir. İçi boş altıgen (BA) tip kompozit çarpışma kutusu üzerindeki tepki kuvveti elastik bölgede 13,911 kN' a ulaştıktan sonra hızla 5,021 kN seviyesine kadar düşerek ilerlemeli hasar bölgesinde 12,052 kN' a kadar tekrar tekrar yükselerek salınımlı plato eğrisi şeklinde hasar davranışı sergilemiştir. Özellikle BA ve kare hücre dolgulu altıgen (KHDA) tip kompozit çarpışma kutularının ilerlemeli hasar bölgesinde kuvvet-yer değiştirme eğrileri birbiriyle çok iyi derecede uyumlu elde edilmiştir. Hibrit hücre dolgulu altıgen (HHDA) tip kompozit çarpışma kutusunun ezilme testi sırasında elde edilen maksimum tepki kuvveti 35 mm ezilmeden sonra hızla artarak 29,639 kN' a kadar

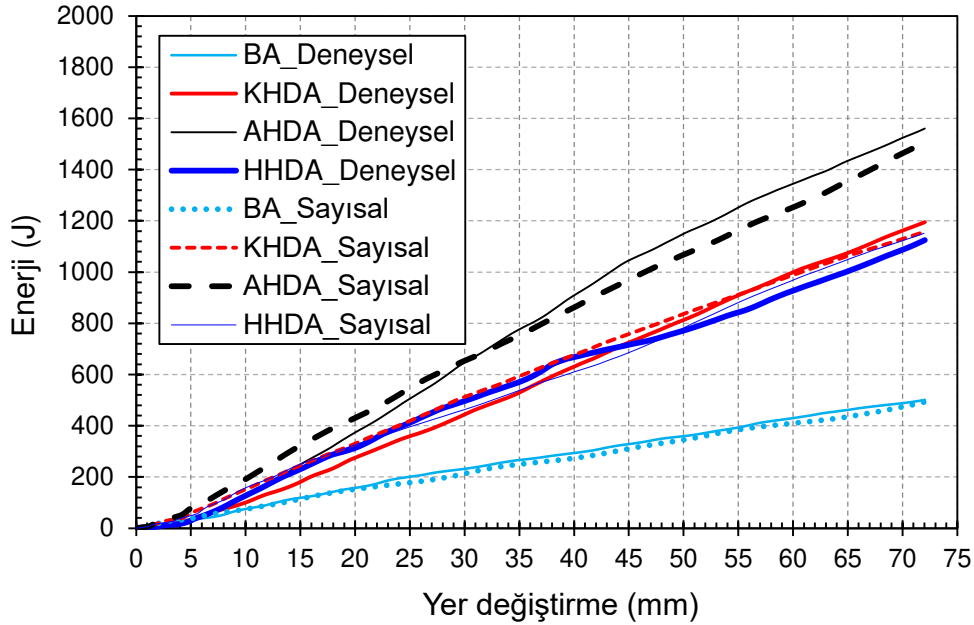
ulaştıktan sonra 10,015 kN' a aniden düşüp tekrar artma eğilimine girmiştir. Bunun olası nedenlerinden birisi altıgen ve kare tip hücresel dolguları birleştirme plakasının çarpma sırasında oluşan pik kuvvete dayanamayıp hasara uğramasıdır. Bununla birlikte sayısal çarpışma analizinde HHDA tip çarpışma kutusunda hücresel dolguları birleştiren plakada hasar meydana gelmediği için 50 mm ezilme hasarına kadar ezilme kuvveti sürekli olarak arttıktan sonra azalma eğilimine girmiştir. Ezilme testi verisine göre KHDA, altıgen hücre dolgulu altıgen (AHDA) ve HHDA tip kompozit çarpışma kutularındaki maksimum tepki kuvveti değerleri sırasıyla 22,698 kN, 32,343 kN ve 29,639 kN olarak elde edilmiştir. KHDA çarpışma kutusu ilerlemeli hasar bölgesinde salınımlı plato eğrisi şeklinde yük taşıma kabiliyeti göstermiştir. Diğer yandan AHDA tip kompozit çarpışma kutusu KHDA ve HHDA tip kompozit çarpışma kutularına göre daha iyi ezilme dayanımı davranışı sergilemiştir.



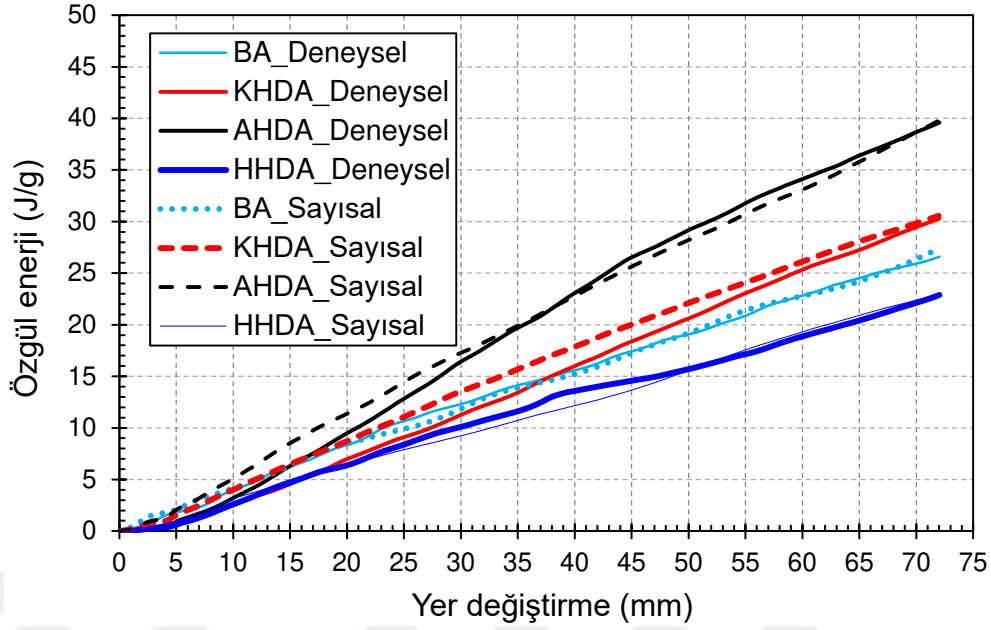
Şekil 3.45. Altıgen dış duvarlı içi boş ve hücre dolgulu tip KETP kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen deneysel ve sayısal kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

Altıgen dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında deneysel ve sayısal olarak elde edilen enerji sönmüleme-yer değiştirme ve özgül enerji sönmüleme-yer değiştirme eğrileri sırasıyla Şekil 3.46 ve Şekil 3.47' de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 3.46' dan görüleceği üzere, altıgen dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının tümü için elde edilen deneysel ve sayısal enerji sönmüleme eğrileri birbirleriyle çok iyi derecede uyum içerisinde

olmuştur. Ezilme testi sonucunda toplam enerji sönümleme değerleri; AHDA tip kompozit çarpışma kutusu için 1560,556 J, KHDA tip kompozit çarpışma kutusu için 1194,989 J, HHDA tip kompozit çarpışma kutusu için 1124,851 ve BA tip kompozit çarpışma kutusu için 501,072 J olarak elde edilmiştir. Bu enerji sönümleme değerlerine karşılık olarak altıgen dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının özgül enerji sönümleme değerleri; AHDA tip kompozit çarpışma kutusu için 39,596 J/g, KHDA tip kompozit çarpışma kutusu için 30,294 J/g, HHDA tip kompozit çarpışma kutusu için 22,886 ve BA tip kompozit çarpışma kutusu için 26,595 J/g olarak hesaplanmıştır. BA tip kompozit çarpışma kutusunun toplam enerji sönümleme değerleriyle kıyaslama yapıldığında, AHDA tip kompozit çarpışma kutusu %211,451, KHDA tip kompozit çarpışma kutusu %138,49, HHDA tip kompozit çarpışma kutusu %124,491 daha fazla enerji sönümleme kabiliyeti göstermiştir. BA tip kompozit çarpışma kutusuna göre özgül enerji sönümleme değerleri karşılaştırıldığında, AHDA tip kompozit çarpışma kutusu %48,892, KHDA tip kompozit çarpışma kutusu %13,911 daha fazla özgül enerji sönümleme kabiliyeti sergilemiştir. Buna karşın HHDA tip kompozit çarpışma kutusu içerisine BA tip kompozit çarpışma kutusundan %13,951 daha az özgül enerji sönümleme kapasitesine sahip olmuştur. Sonuç olarak, AHDA tip kompozit çarpışma kutusu diğer altıgen dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularına göre daha iyi enerji ve özgül enerji sönümleme performansı göstermiştir.



Şekil 3.46. Altıgen dış duvarlı içi boş ve hücre dolgulu tip KETP kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen deneysel ve sayısal enerji sönümleme-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

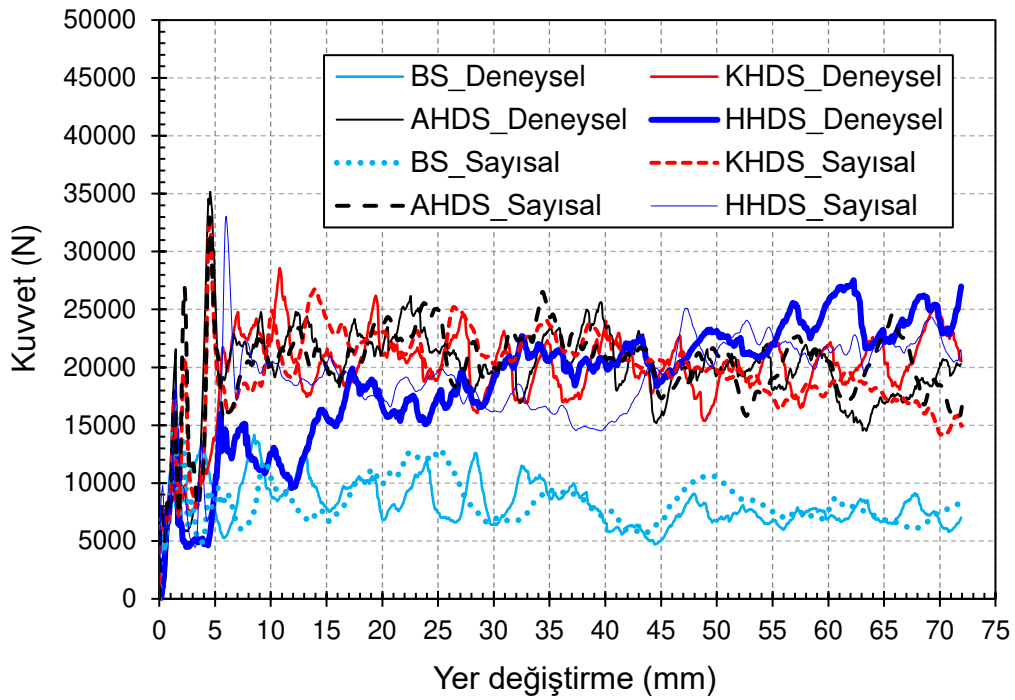


Şekil 3.47. Altıgen dış duvarlı içi boş ve hücre dolgulu tip KETP kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen deneysel ve sayısal özgül enerji sönümlenme-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

3.9.5. Silindir Tip KETP Kompozit Çarpışma Kutularının Enerji Sönümlenme Davranışı

Silindir dış duvarlı tip KETP kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında deneysel ve sayısal olarak elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil 3.48' de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Silindir tip kompozit çarpışma kutularındaki ezilmeye karşı tepki kuvveti hasar başlangıcına kadar doğrusal olarak artmış ve hasar sonrası aniden düşerek tekrar yükselme eğilimine girmiştir. İlerlemeli hasar bölgesinde, kompozit çarpışma kutularındaki tepki kuvveti salınımlı olarak artmaya devam ettikten sonra kontrollü plato eğrisi şeklinde değişkenlik göstermiştir. Şekil 3.48' den de anlaşılacağı üzere, içi boş (BS), kare hücre dolgulu (KHDS), altıgen hücre dolgulu (AHDS) tip kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen deneysel ve sayısal kuvvet-yer değiştirme eğrileri birbiriyle uyum içerisindedir. HHDS tip kompozit çarpışma kutusunu ezilmesi sırasında oluşan tepki kuvveti deneysel veriye göre sürekli artmıştır. Bu durum, HHDS tip kompozit çarpışma kutusunun ezilme dayanımı ve enerji sönümlenme davranışı açısından ideal bir davranış sergilediğini göstermektedir. HHDS tip kompozit çarpışma kutusunda 40 mm ezilme yer değiştirmesine kadar ilerlemeli hasar bölgesindeki tepki kuvveti salınımlı plato şeklinde değişmiştir. Daha sonraki ezilme safhalarında deneysel ve sayısal kuvvet-yer

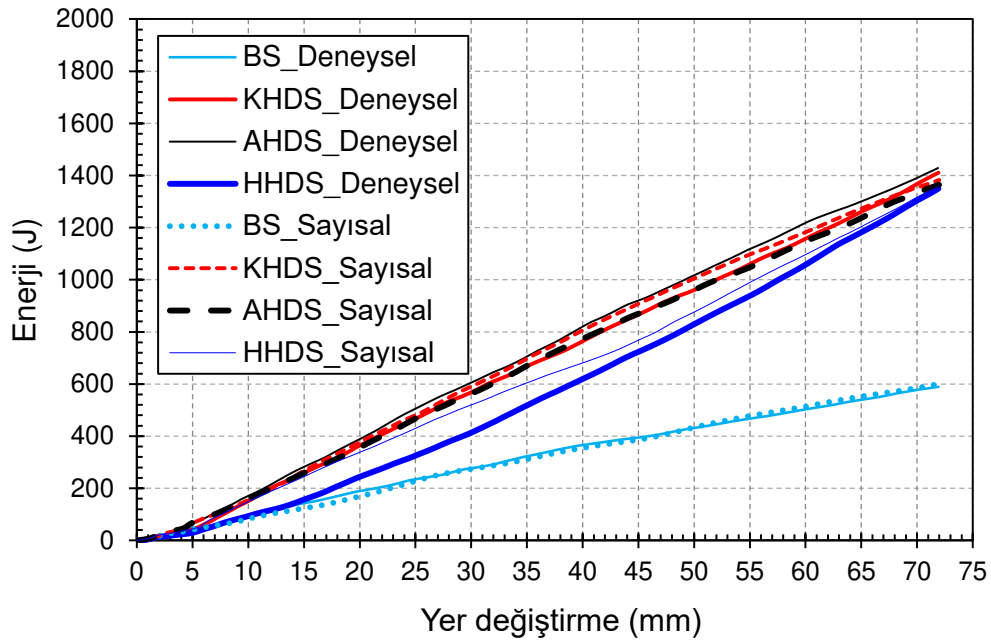
değiştirme eğrileri birbiriyle uyum içerisinde olmuştur. AHDS tip kompozit çarpışma kutusunda yükleme plakasının 5 mm' lik yer değiştirmesinden sonra ezilme tepki kuvveti 35,176 kN değerine ulaştıktan sonra aniden 20,032 kN'a kadar düşerek ilerlemeli hasar bölgesinde kontrollü plato eğrisi şeklinde değişmiştir. AHDS ve KHDS tip kompozit çarpışma kutuları ezilme dayanımı açısından ilerlemeli hasar bölgesinde birbirine benzer kontrollü plato davranışı göstermiştir. BS tip kompozit çarpışma kutusundaki ezilme tepki kuvveti 15,109 kN' luk maksimum değere ulaşp 5,032 kN' a kadar ani bir şekilde düşerek 14,051 kN' a yükseldikten sonra ezilme bitimine kadar kontrollü olarak azalmıştır.



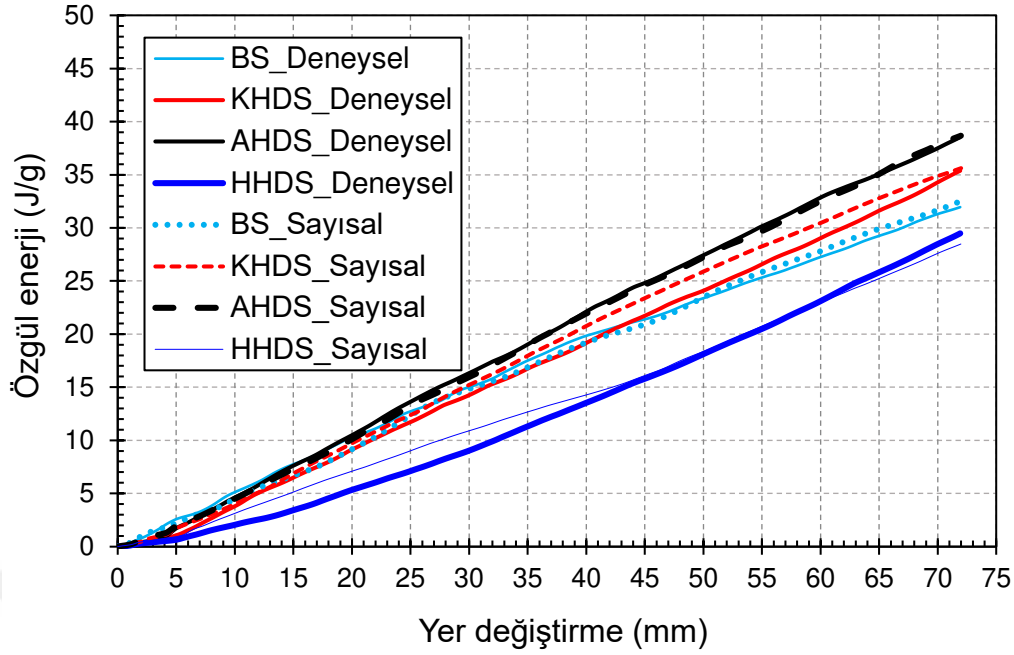
Şekil 3.48. Silindir dış duvarlı içi boş ve hücre dolgulu tip KETP kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen deneysel ve sayısal kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

Silindir dış duvarlı tip KETP kompozit çarpışma kutularının deneysel ve sayısal olarak elde edilen enerji sönümleme-yer değiştirme eğrileri Şekil 3.49, özgül enerji sönümleme-yer değiştirme eğrileri ise Şekil 3.50' de verilmiştir. Şekil 3.49' dan anlaşılabacağı üzere, silindir dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının tümü için elde edilen deneysel ve sayısal enerji sönümleme-yer değiştirme eğrileri birbiriyle iyi derecede uyum içerisinde olmuştur. Ezilme testi verisine göre toplam enerji sönümleme değerleri; AHDS tip kompozit çarpışma kutusu için 1428,672 J, KHDS tip kompozit çarpışma kutusu için 1410,661 J, HHDS tip kompozit çarpışma kutusu için 1349,795, BS tip kompozit çarpışma kutusu için 589,512 J olarak elde

edilmiştir. Bu toplam enerji sönümleme değerlerine karşılık gelen özgül enerji sönümleme değerleri; AHDS tip kompozit çarpışma kutusu için 38,523 J/g, KHDS tip kompozit çarpışma kutusu için 35,375 J/g, HHDS tip kompozit çarpışma kutusu için 29,481, BS tip kompozit çarpışma kutusu için 31,952 J/g olarak hesaplanmıştır. BS tip kompozit çarpışma kutusunun enerji sönümleme değerleriyle kıyaslandığında, AHDS tip kompozit çarpışma kutusu %142,351, KHDS tip kompozit çarpışma kutusu %139,291 ve HHDS tip kompozit çarpışma kutusu %128,972 daha fazla enerji sönümleme kapasitesine sahip olmuştur. Özgül enerji sönümleme değerleri BS tip kompozit çarpışma kutusununkiyle karşılaştırıldığında; AHDS tip kompozit çarpışma kutusu %20,571, KHDS tip kompozit çarpışma kutusu %10,712 daha fazla özgül enerji sönümleme kabiliyeti göstermiştir (Şekil 3.50). Diğer taraftan HHDS tip kompozit çarpışma kutusu BS tip kompozit çarpışma kutusuna göre %7,732 daha az özgül enerji sönümleme kabiliyeti sergilemiştir. Hücresel dolgu türüne göre karşılaştırma yapıldığında, AHDS ve KHDS tip kompozit çarpışma kutuları HHDS tip kompozit çarpışma kutusuna göre daha iyi enerji sönümleme ve özgül enerji sönümleme davranışı göstermiştir.



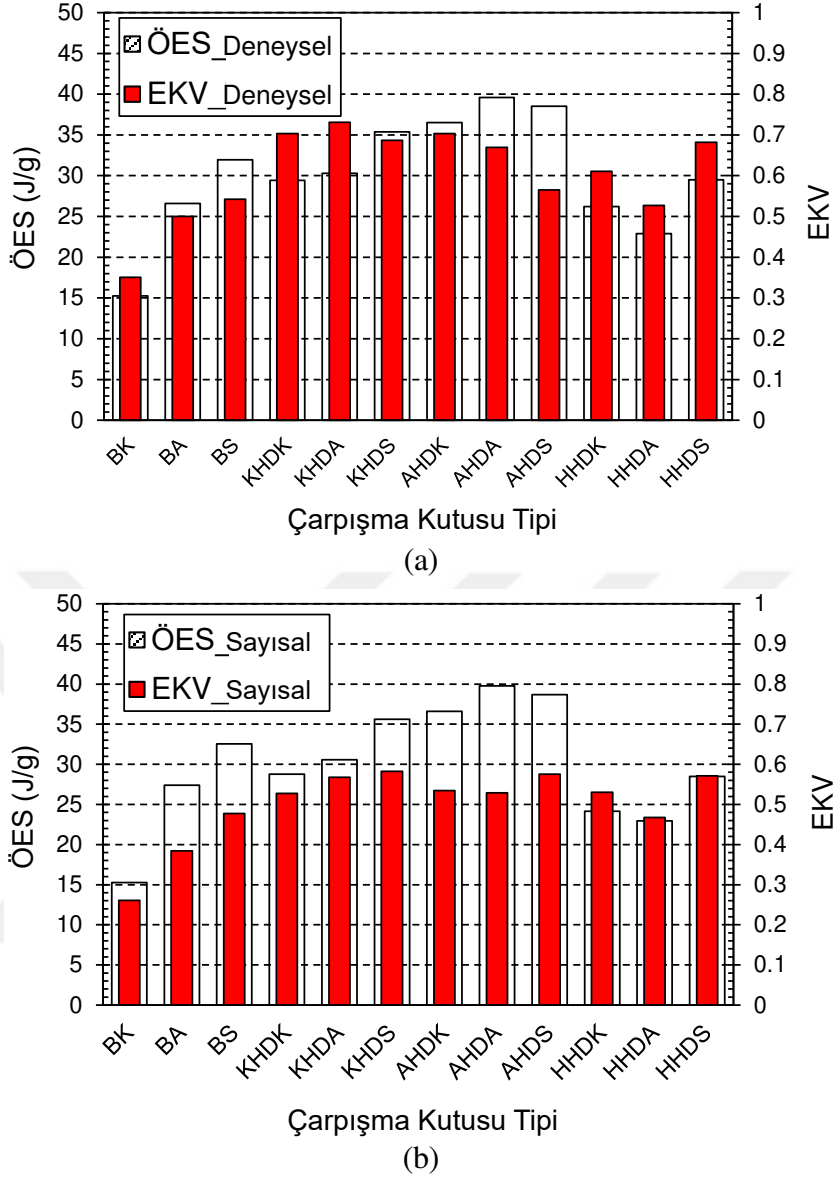
Şekil 3.49. Silindir dış duvarlı içi boş ve hücre dolgulu tip KETP kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen deneysel ve sayısal enerji sönümleme-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması



Şekil 3.50. Silindir dış duvarlı içi boş ve hücre dolgu tip KETP kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında elde edilen deneysel ve sayısal özgül enerji sönümlenme-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

3.9.6. Kompozit Çarpışma Kutularının Ezilme Karakteristikleri

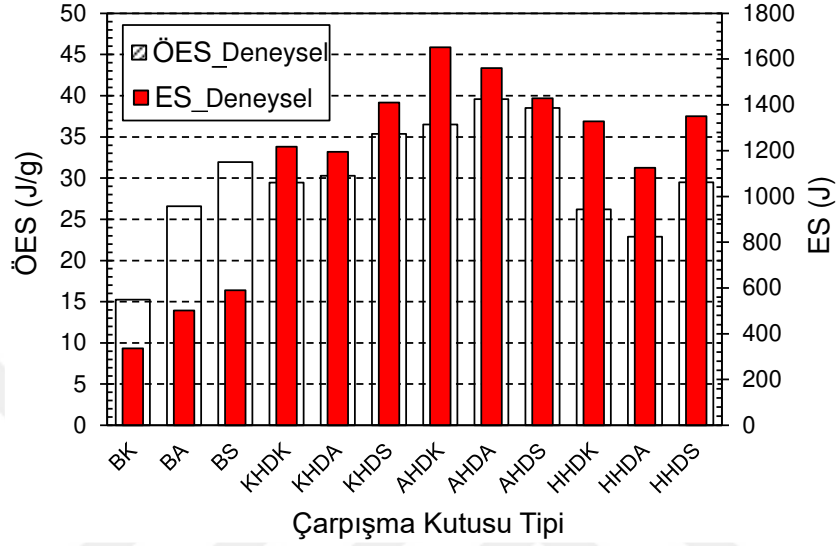
KETP tip kompozit çarpışma kutularının ezilme kuvveti verimi (EKV), özgül enerji sönümlenme (ÖES) değerlerinin ezilme testi ve sonlu elemanlar ezilme analiz sonuçlarına göre karşılaştırılması Şekil 3.51' de gösterilmiştir. Ezilme testi sonuçlarına göre EKV değerleri karşılaştırıldığında, Şekil 3.51a' da görüleceği üzere KHDA tip kompozit çarpışma kutusu 0,731 ile en yüksek değere sahip iken BK tip kompozit çarpışma kutusu 0,351' lik değer ile en düşük değere sahip olmuştur. Sonlu elemanlar ezilme analizi sonuçları karşılaştırıldığında, Şekil 3.51b' de görüldüğü gibi KHDS tip kompozit çarpışma kutusu 0,582 ile en yüksek, BK tip kompozit çarpışma kutusu 0,261 ile en düşük EKV değeri sağlamıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar bakımından EKV değerlerinin birbirinden farklı olmasının temel nedeni sonlu elemanlar ezilme analizlerinden elde edilen maksimum ezilme kuvveti (MEK) değerlerinin daha yüksek olmasıdır. Deneysel ve sayısal özgül enerji sönümlenme (ÖES) değerleri karşılaştırıldığında, en yüksek ÖES değerleri sırasıyla AHDA, AHDS, AHDK ve KHDS tip kompozit çarpışma kutularında 35,375-39,596 J/g aralığında elde edilmiştir.



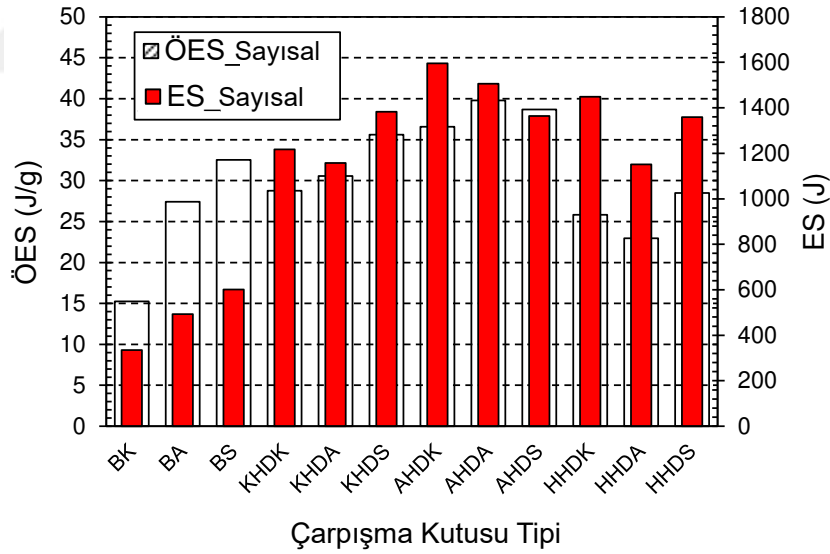
Şekil 3.51. KETP kompozit çarpışma kutularının ÖES ve EKV değerlerinin karşılaştırması: (a) Deneysel ve (b) Sayısal

Şekil 3.52’ de KETP kompozit çarpışma kutularının ÖES ve ES değerlerinin karşılaştırması bir arada verilmiştir. Ezilme testi verisine göre 1652,117 J, sonlu elemanlar ezilme analizi sonucuna göre 1595,395 J değerleri ile AHDK tip kompozit çarpışma kutusu en iyi enerji sönümleme kapasitesine sahip olmuştur. Buna karşın AHDK tip kompozit çarpışma kutusunun ÖES değeri AHDA ve AHDS tip kompozit çarpışma kutularıninkilere göre daha düşük elde edilmiştir. Tüm kompozit çarpışma kutularının deneysel ve sayısal ÖES değerleri birbiriyle çok iyi derecede uyum içerisinde olmuştur. Buradan çıkarılacak sonuçlardan birisi, kompozit çarpışma kutularının özgül enerji sönümleme kapasitelerinin hücre dolgusu ve dış

duvar geometrisine bağılı olarak önemli derecede arttırılabilmesidir. Hibrit hücre dolgulu tip kompozit çarpışma kutularında özgül enerji sönümleme değerlerinin 30 J/g' dan daha düşük elde edilmesinin nedenlerinden birisi bu tip kompozit çarpışma kutularının içerisine yerleştirilen birleştirme plakalarının toplam ağırlığı arttırmasıdır.



(a)



(b)

Şekil 3.52. KETP kompozit çarpışma kutularının ÖES ve ES değerlerinin karşılaştırması: (a) Deneysel ve (b) Sayısal

Tablo 3.4' te verilen ezilme testi sonuçlarına göre kare ve altıgen hücre dolgulu tip kompozit çarpışma kutuları 0,527-0,731, içi boş tip kompozit çarpışma kutuları 0,351-0,543 aralığında EKV değerlerine sahip olmuştur. Tablo 3.5' te gösterilen sonlu elemanlar ezilme analizi sonuçlarına göre bu değerler kare ve altıgen hücre dolgulu tip kompozit çarpışma

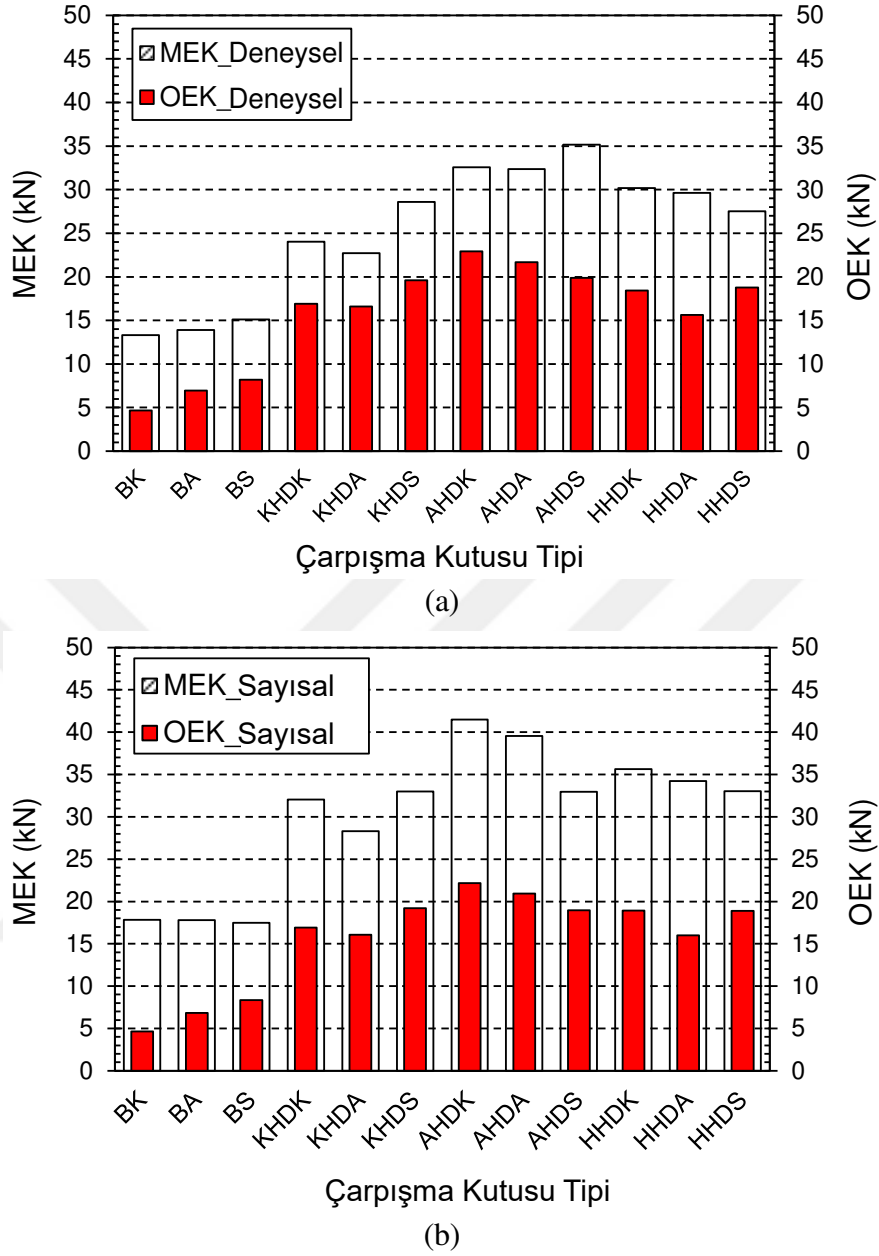
kutularında 0,468-0,582, içi boş tip kompozit çarpışma kutularında 0,261-0,477 aralığında elde edilmiştir.

Tablo 3.4. KETP kompozit çarpışma kutularının ezilme testlerinden elde edilen ezilme karakteristikleri

Çarpışma Kutusu Tipi	Kütle [g]	MEK [kN]	OEK [kN]	EKV	ES _r [J]	ÖES [J/g]
Boş Kare (BK)	22,066	13,299	4,669	0,351	336,351	15,243
Boş Altıgen (BA)	18,841	13,911	6,957	0,500	501,072	26,595
Boş Silindir (BS)	18,450	15,109	8,197	0,543	589,512	31,952
Kare Hücre Dolgulu Kare (KHDK)	41,350	24,025	16,891	0,703	1217,358	29,440
Kare Hücre Dolgulu Altıgen (KHDA)	39,446	22,698	16,591	0,731	1194,989	30,294
Kare Hücre Dolgulu Silindir (KHDS)	39,877	28,576	19,615	0,686	1410,661	35,375
Altıgen Hücre Dolgulu Kare (AHDK)	45,236	32,566	22,915	0,704	1652,117	36,522
Altıgen Hücre Dolgulu Altıgen (AHDA)	39,412	32,343	21,661	0,670	1560,556	39,596
Altıgen Hücre Dolgulu Silindir (AHDS)	37,086	35,176	19,874	0,565	1428,672	38,523
Hibrit Hücre Dolgulu Kare (HHDK)	50,640	30,189	18,436	0,611	1327,615	26,217
Hibrit Hücre Dolgulu Altıgen (HHDA)	49,150	29,639	15,623	0,527	1124,851	22,886
Hibrit Hücre Dolgulu Silindir (HHDS)	45,785	27,529	18,769	0,682	1349,795	29,481

Tablo 3.5. KETP kompozit çarpışma kutularının sonlu elemanlar ezilme analizlerinden elde edilen ezilme karakteristikleri

Çarpışma Kutusu Tipi	Kütle [g]	MEK [kN]	OEK [kN]	EKV	ES _r [J]	ÖES [J/g]
Boş Kare (BK)	21,960	17,832	4,655	0,261	335,151	15,262
Boş Altıgen (BA)	17,975	17,802	6,842	0,384	492,620	27,406
Boş Silindir (BS)	18,470	17,481	8,345	0,477	600,781	32,527
Kare Hücre Dolgulu Kare (KHDK)	42,313	32,041	16,901	0,527	1216,810	28,757
Kare Hücre Dolgulu Altıgen (KHDA)	37,858	28,310	16,074	0,568	1156,931	30,560
Kare Hücre Dolgulu Silindir (KHDS)	38,820	32,981	19,206	0,582	1382,772	35,620
Altıgen Hücre Dolgulu Kare (AHDK)	43,605	41,474	22,160	0,534	1595,395	36,587
Altıgen Hücre Dolgulu Altıgen (AHDA)	37,858	39,555	20,918	0,529	1505,984	36,587
Altıgen Hücre Dolgulu Silindir (AHDS)	35,282	32,959	18,958	0,575	1364,491	38,674
Hibrit Hücre Dolgulu Kare (HHDK)	56,115	35,651	18,912	0,530	1354,466	24,137
Hibrit Hücre Dolgulu Altıgen (HHDA)	50,168	34,217	15,999	0,468	1151,542	22,954
Hibrit Hücre Dolgulu Silindir (HHDS)	47,709	33,039	18,877	0,571	1358,702	28,479



Şekil 3.53. KETP kompozit çarpışma kutularının ÖES ve OEK değerlerinin karşılaştırması: (a) Deneysel ve (b) Sayısal

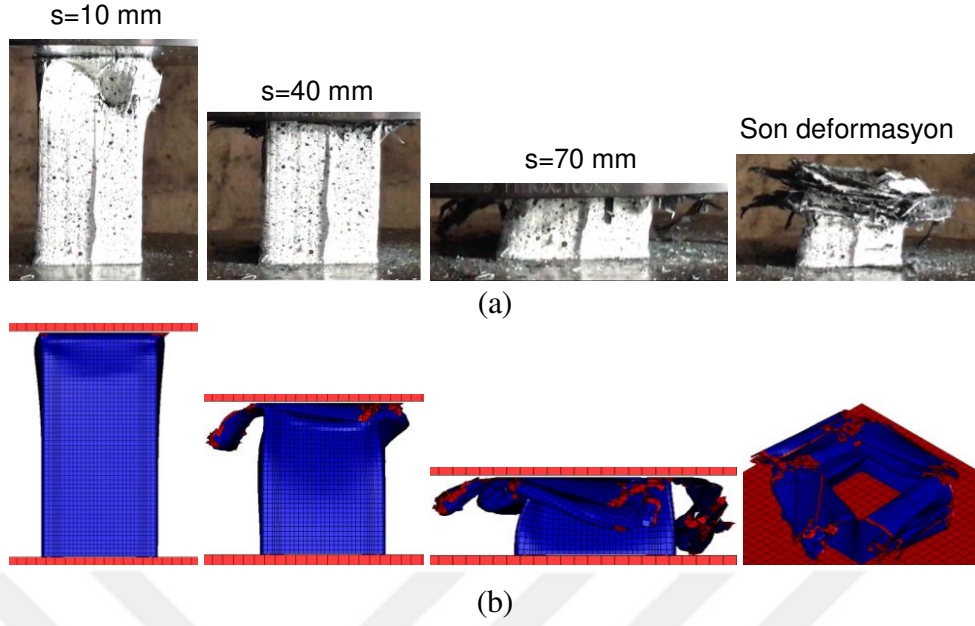
Şekil 3.53’ te görüldüğü gibi KETP kompozit çarpışma kutularında hücresel dolgu ve dış duvar geometrisine bağlı olarak deneysel ve sayısal maksimum ezilme kuvveti (MEK) değerlerinde değişimler olmuştur. AHDS tip çarpışma kutusunda deneysel MEK değeri 35,176 kN olarak diğer çarpışma kutularına göre en yüksek seviyede elde edilmiştir (Şekil 3.53a)). Buna karşın sonlu elemanlar ezilme analizinde 32,959 kN olarak hesaplanan bu değer ezilme testinden elde edilen değere göre daha düşüktür. Bunun olası nedenlerinden birisi, AHDS tip kompozit çarpışma kutusunun ezilme testi sırasında hasarın tetikleyici kanal olmayan taraftan

başlamasıdır. Sonlu elemanlar ezilme analizlerinin tümünde kompozit çarpışma kutularının tabanına basma yönü hariç tüm yönlerde hareket kısıtlaması verildiği için analiz sırasında tetikleyici kanalların olduğu tarafta ezilme hasarı başlamıştır. Sonlu elemanlar ezilme analizleri sonucunda en yüksek MEK değerleri sırasıyla 41,474 kN ile AHDK, 39,555 ile AHDA tip kompozit çarpışma kutuları için hesaplanmıştır. Şekil 3.53' ten görüleceği üzere deneysel ve sayısal ortalama ezilme kuvveti (OEK) değerleri birbiriyle uyum içerisinde elde edilmiştir. Büyükten küçüğe doğru en yüksek OEK değerleri sırasıyla AHDK (deneysel 22,915 kN, sayısal 22,160 kN), AHDA (deneysel 21,661 kN, sayısal 20,918 kN) ve AHDS (deneysel 19,874 kN, sayısal 18,958 kN) ve KHDS (deneysel 19,615 kN, sayısal 19,206 kN) tip kompozit çarpışma kutularında elde edilmiştir. BK (deneysel 4,669 kN, sayısal 4,655 kN), BA (deneysel 6,957 kN, sayısal 6,842 kN) ve BS (deneysel 8,197 kN, sayısal 8,345 kN) tip kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında yükleme plakası sadece dış duvar uçlarına temas ettiği için bu değerler çok daha düşük seviyelerde elde edilmiştir.

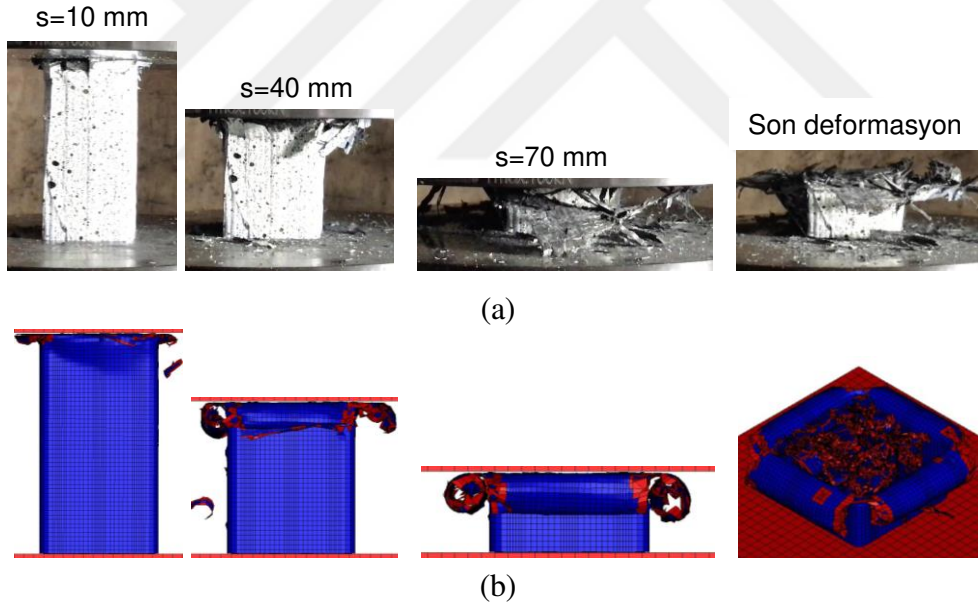
3.9.7. Kompozit Çarpışma Kutularının Ezilme Sürecindeki Hasar Davranışları

KETP kompozit çarpışma kutularının ezilme testi sırasında oluşan hasar şekillerinin bilinmesi ezilme dayanımı ve enerji sönmleme açısından önemlidir. Hücresel dolgu tip kompozit çarpışma kutularının hücresel dolgu kısımlarında meydana gelen hasar mekanizmaları, dış duvar geometrisinin tasarımına bağlı olarak farklı şekillerde oluştuğu için enerji sönmleme performansı üzerinde kritik önem taşımaktadır.

Kare dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının ezilme testi ve sonlu elemanlar ezilme analizleri sırasında yükleme plakasının farklı yer değiştirme anlarındaki ($s=10$ mm, $s=40$ mm ve $s=70$ mm) hasar görüntüleri sırasıyla Şekil 3.54, 3.55, 3.56' da gösterilmiştir. Şekil 3.54' te görüldüğü gibi ezilme hasarı başlangıcında ($s=10$ mm) BK tip kompozit çarpışma kutusunun duvarlarında dışa doğru açılıp katlanma, $s=40$ mm' lik ezilmede tekrar dışa doğru açılma ve $s=70$ mm' lik ezilmede dışa doğru açılıp içe doğru katlanma şeklinde hasar meydana gelmiştir. Ezilme testi (Şekil 3.54a) ve sonlu elemanlar ezilme analizi (Şekil 3.54b) sonucunda elde edilen son deformasyon görüntülerine göre BK tip kompozit çarpışma kutusu duvarlarında içe ve dışa doğru katlanma şeklinde hasarın meydana geldiği belli olmaktadır.



Şekil 3.54. BK tip kompozit çarpışma kutusunun $s=10$, 40, 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal

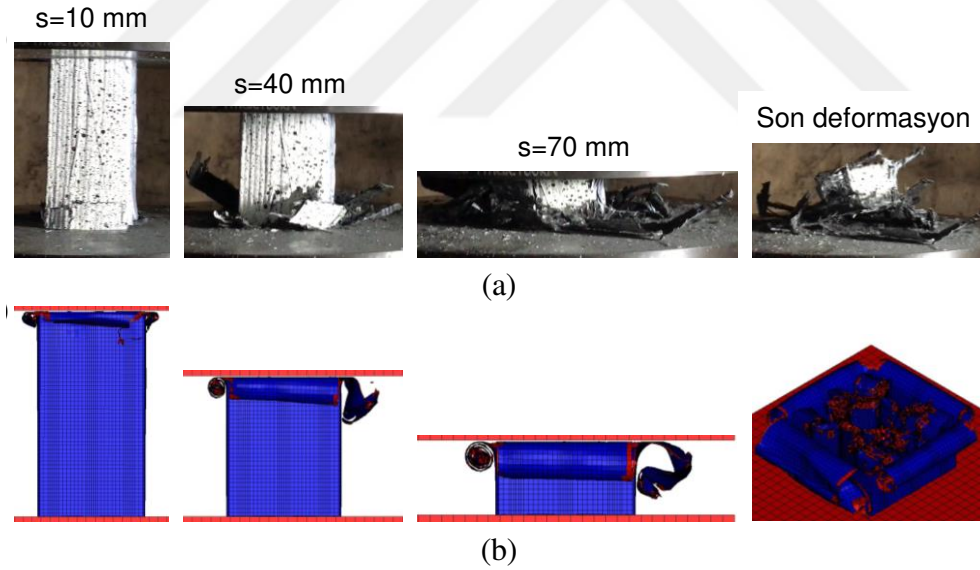


Şekil 3.55. KHDK tip kompozit çarpışma kutusunun $s=10$, 40 ve 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal

Şekil 3.55’ te gösterilen hasar görüntülerine göre KHDK tip kompozit çarpışma kutusunun ezilme başlangıcında ($s=10$ mm) dış duvarları iç kısımdaki kare hücre dolgusu yüzünden sadece dışa doğru açılmıştır. İlerlemeli hasar aşamasında ise kare hücre dolgu duvarlarında içe dışa doğru katlanma şeklinde oluşan hasarla birlikte kompozit çarpışma kutusunun dış duvarları $s=40$ mm ve $s=70$ mm ezilme anında dışarı doğru açılmaya devam

etmiştir. Son deformasyon görüntülerine göre, KHDK tip kompozit çarpışma kutusunun kare hücre dolgu duvarları içe ve dışa doğru katlanırken dış duvarlarının dışa doğru açılarak kendi üzerine katlandığı Şekil 3.55a’ da ve Şekil 3.55b’ de hem deneysel hem de sayısal son deformasyon görüntülerinden anlaşılmaktadır.

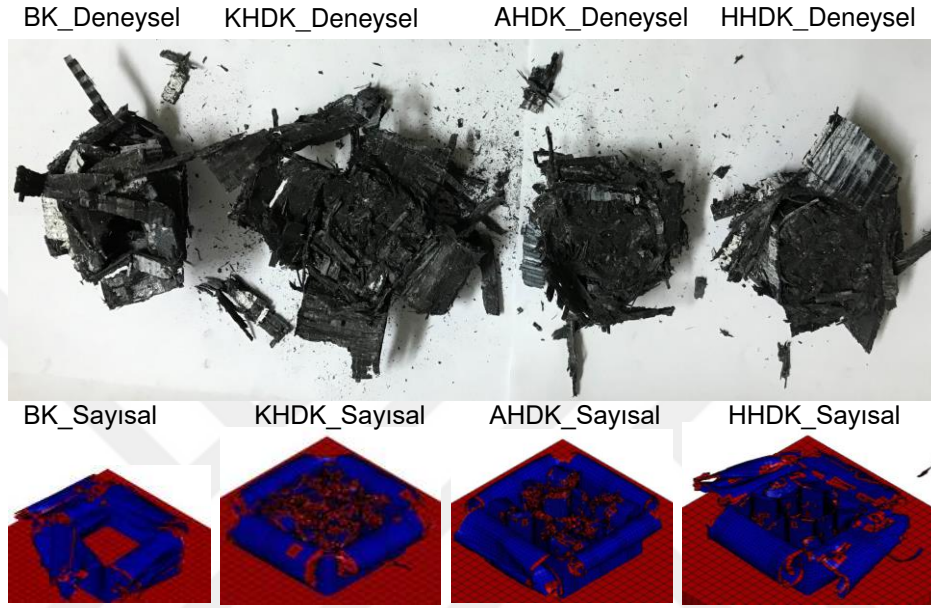
Şekil 3.56a’ da görüleceği üzere, AHDK tip kompozit çarpışma kutusunun ezilme testi sırasında elde edilen hasar görüntülerine göre ezilme başlangıcında oluşan hasar, hasar tetikleyici kanallarının olmadığı alt tarafta meydana gelmiştir. Sonlu elemanlar ezilme analizi hasar görüntülerine (Şekil 3.56b) göre hasar tetikleyici kanalların olduğu üst tarafta ezilme hasarı başlamıştır. Bunun nedenlerinden birisi, sonlu elemanlar ezilme analizlerinin tümünde kompozit çarpışma kutularının alt tarafına basma yönü hariç diğer yönlerde hareket kısıtlaması verilmiş olmasıdır. Ezilme başlangıcından ($s=10$ mm) itibaren ezilme bitimine ($s=40$ mm ve $s=70$ mm) kadar AHDK tip kompozit çarpışma kutusunun dış duvarlarının iç altıgen hücre dolgusu yüzünden dışa doğru açılma davranışı sergilediği sayısal son deformasyon görüntüsünden anlaşılmaktadır.



Şekil 3.56. AHDK tip kompozit çarpışma kutusunun $s=10$, 40 ve 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal

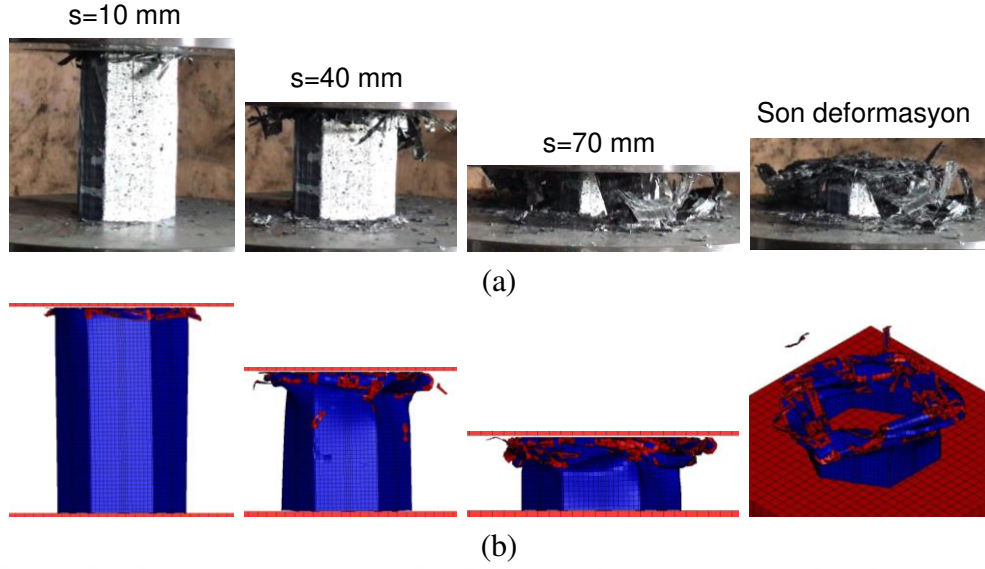
Kare dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının ezilme testi ve sonlu elemanlar ezilme analizi sonucu elde edilen son deformasyon görüntüleri Şekil 3.57’ de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. İçi boş kare (BK) tip kompozit çarpışma kutusunun ezilmesi sırasında duvarlarının içe ve dışa doğru katlandığı hem deneysel hem de sayısal son deformasyon görüntülerinden belli olmaktadır. Hücresel dolgulu kare tip kompozit çarpışma kutularının ezilme sırasında

hücre duvarlarının içe ve dışa doğru yaprak şeklindeki katlanmaları yüzünden dış duvarlarında oluşan çatlaklar büyük parçalanmalara neden olmuştur. Özellikle AHDK ve HHDK tip kompozit çarpışma kutularının hücre geometrisine bağlı olarak dış duvarlarında daha fazla çatlaklar ve kırılmalar oluşmuştur.

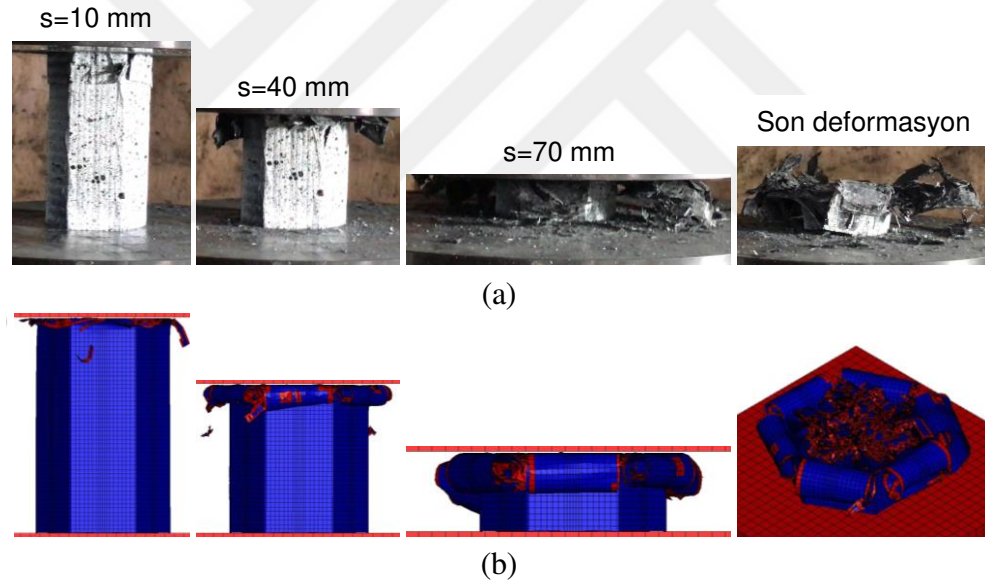


Şekil 3.57. Kare dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının deneysel ve sayısal son deformasyon görüntülerinin karşılaştırması

Altıgen dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının ezilmesi sırasında yükleme plakasının farklı yer değiştirme anlarındaki ($s=10$ mm, $s=40$ mm ve $s=70$ mm) deneysel ve sayısal hasar görüntüleri sırasıyla Şekil 3.58, 3.59, 3.60 ve 3.61’ de gösterilmiştir. Şekil 3.58’ de görüldüğü gibi, ezilme başlangıcında ($s=10$ mm) BA tip kompozit çarpışma kutusunun duvarları dışa doğru açılma, $s=40$ mm’ lik ezilmede duvarların dışa doğru açılıp yaprak şeklinde saçılma ve $s=70$ mm’ lik ezilmede içe doğru katlanma şeklinde hasara uğramıştır. Deneysel ve sayısal son deformasyon görüntülerine göre, BA tip kompozit çarpışma kutusu duvarlarının içe ve dışa doğru katlanması sırasında oluşan çatlamlar ve kırılmalar nedeniyle ortaya çıkan hasar enkazları etrafa saçılmıştır.



Şekil 3.58. BA tip kompozit çarpışma kutusunun $s=10$, 40 ve 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal

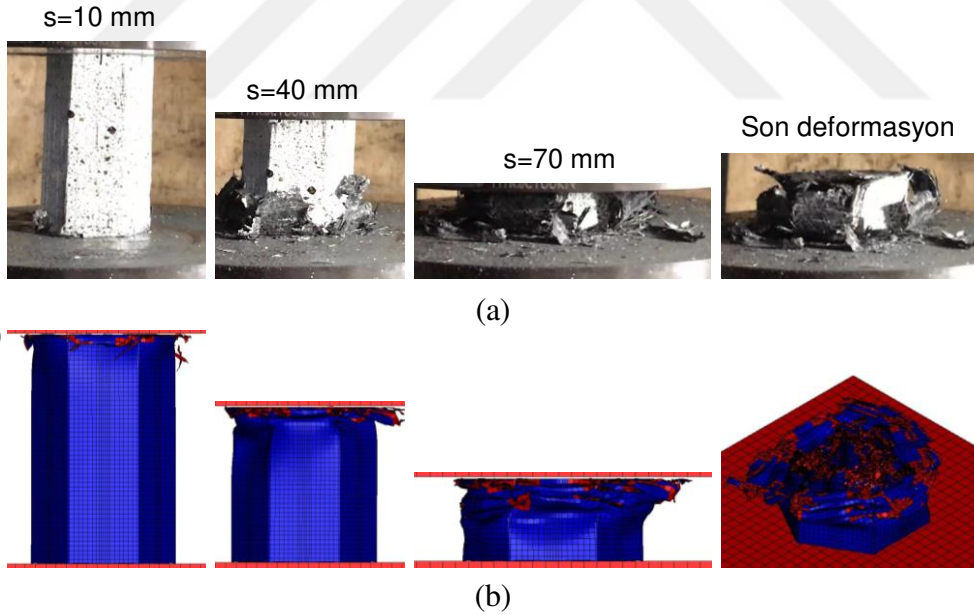


Şekil 3.59. KHDA tip kompozit çarpışma kutusunun $s=10$, 40 ve 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal

Şekil 3.59' da gösterilen deneysel ve sayısal hasar görüntülerine göre, KHDA tip kompozit çarpışma kutusunun dış duvarları ezilme başlangıcında ($s=10$ mm) iç kısımdaki kare hücre dolgusu yüzünden köşeli kısımlardan yarılarak sadece dışa doğru açılmıştır. Ezilmenin ilerleyen safhalarında ($s=40$ mm) kare hücre duvarlarının içe ve dışa doğru katlanarak dış duvarlara uyguladıkları baskı nedeniyle $s=70$ mm' lik ezilme anına kadar dış duvarlar kendi üzerine katlanmaya devam etmiştir. KHDA tip kompozit çarpışma kutusunun kare hücre

duvarlarının içe ve dışa doğru katlanarak dış duvarların bariz bir şekilde dışa doğru açılmasına neden olduğu deneysel (Şekil 3.59a) ve sayısal (Şekil 3.59b) son deformasyon görüntülerinden belli olmaktadır.

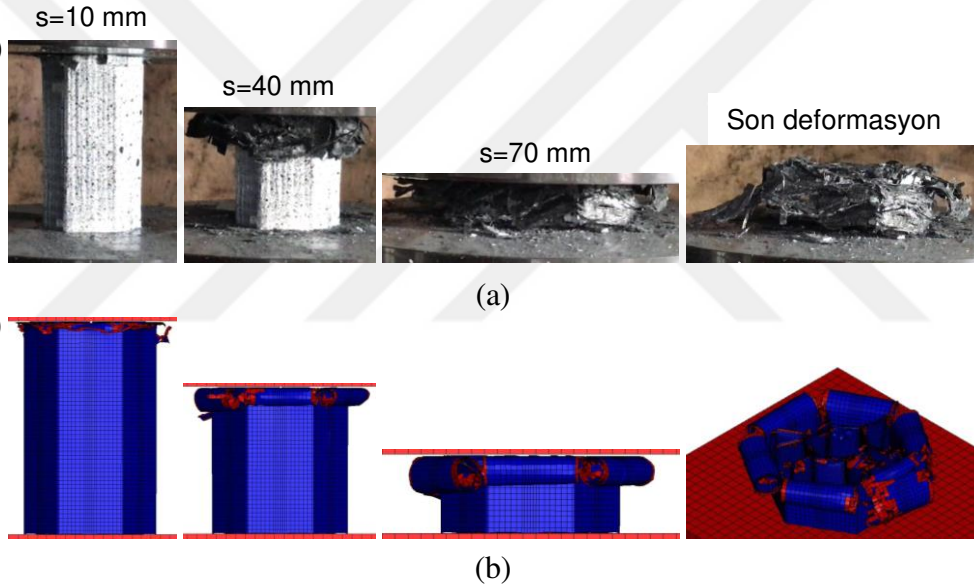
AHDA tip kompozit çarpışma kutusunun ezilme testi sırasında hasar, Şekil 3.60a'da görüldüğü gibi hasar tetikleyici kanallarının olmadığı alt tarafta başlamıştır. Sayısal elemanlar ezilme analizinde (Şekil 3.60b) ise hasar başlangıcı, kompozit çarpışma kutusunun alt tarafına hareket kısıtlaması verildiği için hasar tetikleyici kanalların olduğu üst tarafta meydana gelmiştir. Ezilme başlangıcında ($s=10$ mm) AHDA tip kompozit çarpışma kutusunun dış duvarlarında çatlama ve kırılma, $s=40$ mm ezilme anında dış duvarların katlanma yerlerinden kırılarak oluşan enkazların etrafa saçılması ve ezilme sonlarına doğru ($s=70$ mm) ise iç altıgen hücre duvarlarıyla birlikte dış duvarların içe ve dışa doğru katlanması şeklinde hasar oluşmuştur. Sayısal son deformasyon görüntüsünden, AHDA tip kompozit çarpışma kutusunun iç altıgen hücre duvarları ve dış duvarlarının birbiri üzerine eğilip kırılarak katlandığı açık bir şekilde anlaşılmaktadır.



Şekil 3.60. AHDA tip kompozit çarpışma kutusunun $s=10$, 40 ve 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal

HHDA tip kompozit çarpışma kutusunun ezilme testi sırasındaki hasar görüntüleri Şekil 3.61' de verilmiştir. Ezilme başlangıcında ($s=10$ mm), hasar tetikleyici kanallarının olduğu üst tarafta HHDA tip kompozit çarpışma kutusunun dış duvarlarının eğilerek kırılması şeklinde hasar oluşmuştur. Ezilmenin ortalarına ($s=40$ mm) kadar HHDA tip

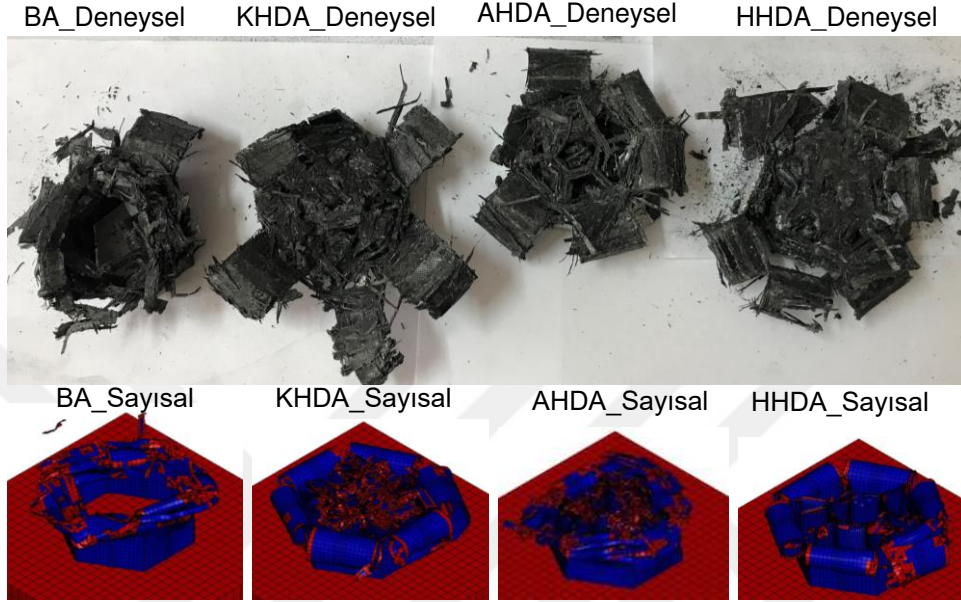
kompozit çarpışma kutusunun altıgen hücre dolgu duvarlarında oluşan kırılmalarla birlikte ortaya çıkan enkaz birleştirme plakası üzerinde birikmiştir. Bu sırada HHDA tip kompozit çarpışma kutusunun dış duvarlarına uygulanan baskı nedeniyle dış duvarlar dışa doğru açılıp kendi üzerine katlanmıştır. Daha sonra, birleştirme plakasının uyguladığı baskı kuvvetinin daha da artmasıyla ezilme bitimine ($s=70\text{ mm}$) kadar kare hücre dolgu duvarları ezilip kırılırken HHDA tip kompozit çarpışma kutusunun dış duvarları dışa doğru açılıp kendi üzerine katlanmaya devam etmiştir. Ezilmenin bitiminde elde edilen sayısal son deformasyon görüntüsünden (Şekil 3.61b) anlaşılabacağı üzere, HHDA tip kompozit çarpışma kutusunun dış duvarları ve iç tarafındaki altıgen hücre dolgu duvarları köşe yerlerinden ayrılarak yaprak şeklinde dışa doğru açılarak kendi üzerlerine katlanmışlardır.



Şekil 3.61. HHDA tip kompozit çarpışma kutusunun $s=10$, 40 ve 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal

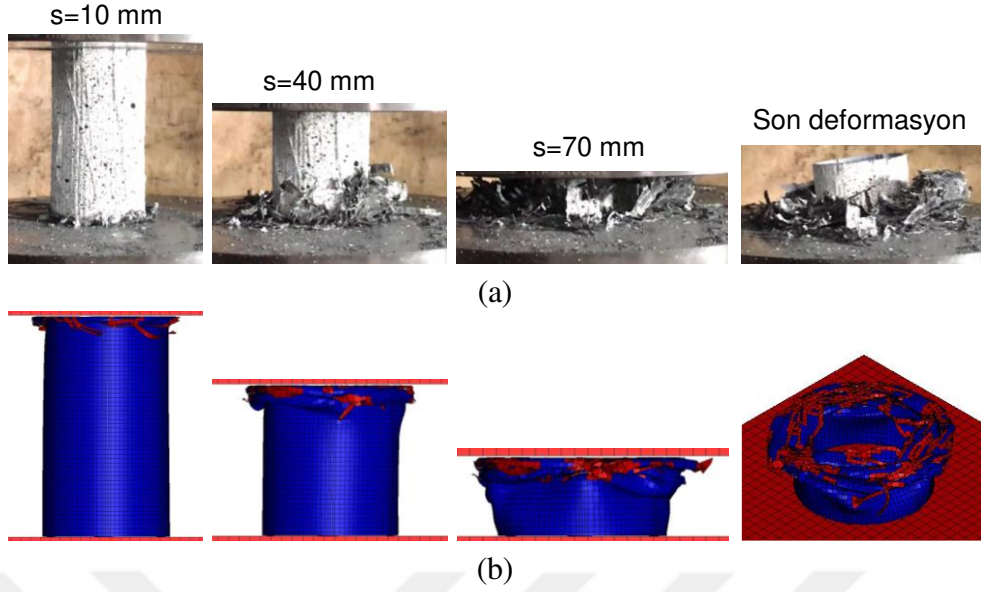
Altıgen dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının deneysel ve sayısal son deformasyon görüntüleri Şekil 3.62’ de birlikte verilmiştir. Deneysel ve sayısal son deformasyon görüntülerinden görüleceği üzere, BA tip kompozit çarpışma kutusunun duvarları ezilme sırasında dışa doğru katlanırken KHDA tip kompozit çarpışma kutusunun dış duvarları köşelerden ayrılarak dışa doğru yaprak şeklinde açılıp kendi üzerine katlanmıştır. AHDA tip kompozit çarpışma kutusunun hücresel dolgu duvarlarında oluşan kırılmalar yüzünden dış duvarlarının dışarı doğru açılması sırasında eğilme yerlerinde kırılmalar olmuştur. HHDA tip kompozit çarpışma kutusunun ezilmesi sırasında iç kısmındaki kare ve altıgen hücre dolgu

duvarlarının kırılması ve katlanması yüzünden oluşturdıkları baskıya bağlı olarak dış çarpışma kutusunun dış duvarlarında yaprak şeklinde kırılmalı katlanma hasarına neden olduğu Şekil 3.62’ deki deneysel ve sayısal son deformasyon görüntülerinden anlaşılmaktadır.

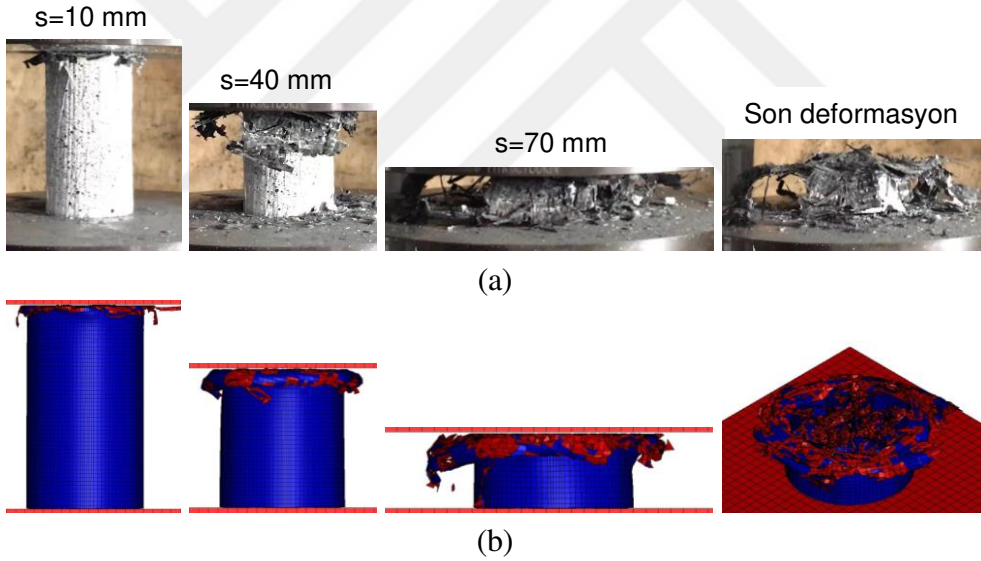


Şekil 3.62. Altıgen dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının deneysel ve sayısal son deformasyon görüntülerinin karşılaştırması

Silindir dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının ezilme testi ve sonlu elemanlar ezilme analizleri sırasında yükleme plakasının farklı yer değiştirme ($s=10$ mm, $s=40$ mm ve $s=70$ mm) anlarında elde edilen hasar görüntüleri sırasıyla Şekil 3.63, 3.64, 3.65 ve 3.66’ da gösterilmiştir. Şekil 3.63a’da görüleceği üzere, BS tip kompozit çarpışma kutusunun ezilmesi başlangıcında ($s=10$ mm) oluşan hasar, tetikleyici kanallarının olmadığı alt tarafta meydana gelmiştir. Şekil 3.63b’ de gösterilen sonlu elemanlar ezilme analizinde ise BS tip kompozit çarpışma kutusunun alt tarafına hareket kısıtlaması verildiği için tetikleyici kanalların olduğu üst tarafta ezilme hasarı başlamıştır. Ezilme başlangıcında ($s=10$ mm) dış duvarda oluşan çatlama ve kırılma yüzünden dışa doğru açılıp katlanma şeklinde ortaya çıkan hasar $s=40$ mm ve $s=70$ mm anında da aynı şekilde devam etmiştir. BS tip kompozit çarpışma kutusunun deneysel ve sayısal son deformasyon görüntüleri incelendiğinde, içe ve dışa doğru katlanmalar sırasında oluşan çıkan kırılmalar yüzünden ortaya çıkan hasar enkazının bir kısmı etrafa doğru saçılmıştır.



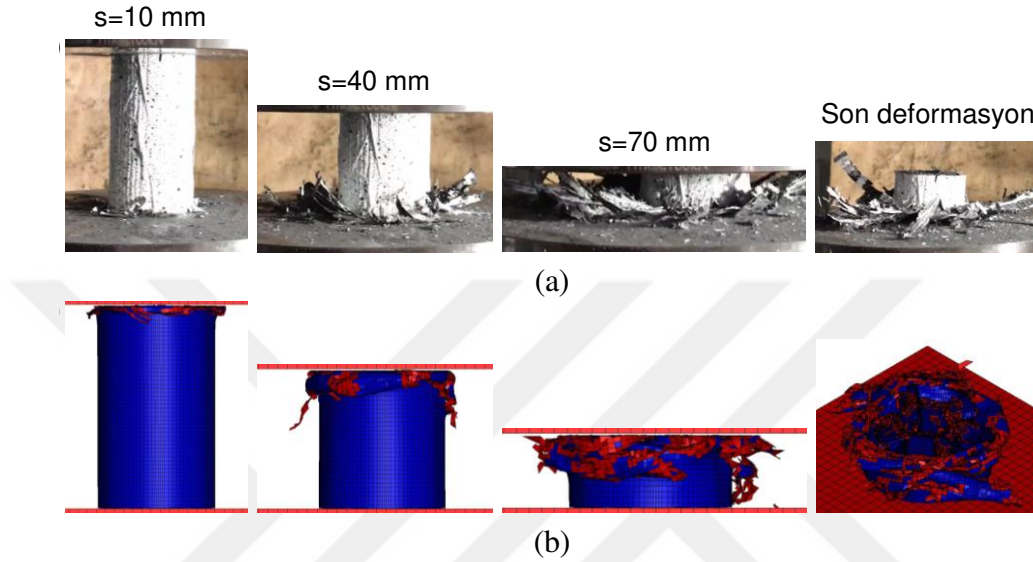
Şekil 3.63. BS tip kompozit çarpışma kutusunun s=10, 40 ve 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal



Şekil 3.64. KHDS tip kompozit çarpışma kutusunun s=10, 40 ve 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal

KHDS tip kompozit çarpışma kutusunun dış duvarı, ezilme başlangıcında (s=10 mm) iç kısımdaki kare hücre dolgu duvarlarının uyguladığı baskı yüzünden tetikleyici kanalların olduğu taraftan dışa doğru açılarak hasarlanmıştır (Şekil 3.64). Ezilmenin ortaları (s=40 mm) ve sonlarına (s=70 mm) doğru iç taraftaki kare hücre dolgu duvarlarının kırılıp katlanarak dış duvara uyguladıkları baskı devam ettiği için KHDS tip kompozit çarpışma kutusunun dış duvarları dışa doğru yaprak şeklinde açılmaya devam etmiştir. KHDS tip kompozit çarpışma

kutusunun kare hücre dolgu duvarlarının ezilme sırasında oluşturdıkları hasar enkazının boşluklara dolmasıyla birlikte dış duvara uygulanan baskıdan dolayı dış duvarın yaprak şeklinde dışa doğru açılıp kendi üzerine katlandığı deneysel (Şekil 3.64a) ve sayısal (Şekil 3.64b) son deformasyon görüntülerinden bariz bir şekilde anlaşılmaktadır.

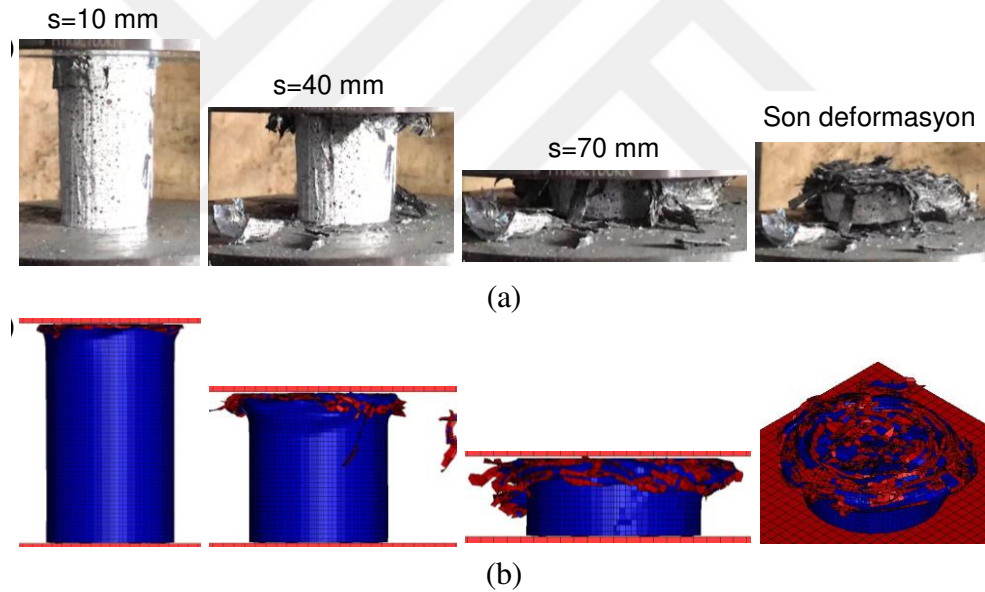


Şekil 3.65. AHDS tip kompozit çarpışma kutusunun s=10, 40 ve 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal

Şekil 3.65a'da görüleceği üzere AHDS tip kompozit çarpışma kutusunun ezilme testi başlangıcında oluşan hasar, tetikleyici kanallarının olmadığı alt tarafta meydana gelmiştir. Şekil 3.65b'de gösterilen sonlu elemanlar ezilme analizi hasar görüntülerinde ise AHDS tip kompozit çarpışma kutusunun alt tarafına hareket kısıtlaması verildiği için tetikleyici kanalların olduğu üst tarafta hasar başlamıştır. AHDS tip kompozit çarpışma kutusundaki hasar, hücresel dolgu duvarlarının kırılıp kendi üzerlerine katlanmasıyla uyguladıkları baskı yüzünden dış duvarın ezilme başlangıcında (s=10 mm) çatlaması ve kırılması, ezilme ortalarına doğru (s=40 mm) dışa doğru açılıp katlanması ve ezilme sonlarına doğru (s=70 mm) hücresel dolgu duvarlarının enkazının hücre boşluklarına dolmasıyla dışa doğru açılma şeklinde olmuştur. Deneysel ve sayısal son deformasyon görüntüleri birbiriyle uyum içerisinde olup AHDS tip kompozit çarpışma kutusunun hücresel dolgu duvarlarının kırılarak hücre boşluklarına doldurdukları enkaz yüzünden dış duvar parçalanmış yaprak şeklinde dışarı doğru açılmıştır.

HHDS tip kompozit çarpışma kutusunun ezilme testi sırasındaki hasar görüntüleri Şekil 3.66a'da gösterilmiştir. Ezilme başlangıcında (s=10 mm) altıgen hücre dolgusunun olduğu üst taraftan başlayan hasar altıgen hücre dolgu duvarlarının hasarlanmasıyla birlikte HHDS tip

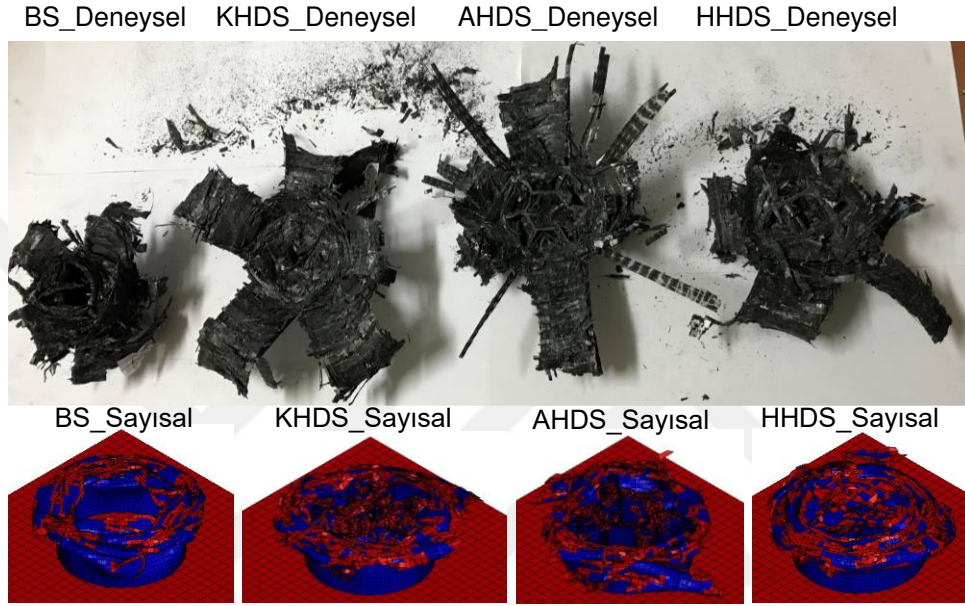
kompozit çarpışma kutusunun dış duvarı tetikleyici kanalların olduğu yerlerden yarılarak dışa doğru açılmıştır. Ezilmenin ortalarına ($s=40$ mm) kadar HHDS tip kompozit çarpışma kutusunun altıgen hücre dolgu duvarlarının kırılıp kendi üzerlerine katlanmasıyla birlikte oluşan hasarın enkazı birleştirme plakası üzerine birikmiştir. Bu sırada, Şekil 3.66a'da görüldüğü gibi HHDS tip kompozit çarpışma kutusunun dış duvarına uygulanan baskıdan dolayı dış duvarda oluşan parçalanmış hasar enkazı ortaya çıkmıştır. Birleştirme plakasının kare hücre dolgu duvarlarına uyguladığı kuvvetin artmasıyla bu duvarlarda oluşan kırılmalar nedeniyle HHDS tip kompozit çarpışma kutusunun dış duvarında dışa doğru parçalanmış hasar enkazının oluşumu devam etmiştir. Şekil 3.66b' de gösterilen sayısal son deformasyon görüntüsünden anlaşılaçağı üzere, HHDS tip kompozit çarpışma kutusunun kare ve altıgen hücre dolgu duvarlarının ezilme sırasında oluşturduğu enkazın hücresel boşluklara dolmasıyla dış duvarında parçalanmış yaprak şeklinde hasar meydana geldiği belli olmaktadır.



Şekil 3.66. HHDS tip kompozit çarpışma kutusunun $s=10$, 40 ve 70 mm ezilme anındaki hasar görüntüleri: (a) Deneysel, (b) Sayısal

Silindir dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının deneysel ve sayısal son deformasyon görüntüleri Şekil 3.67' de bir arada verilmiştir. BS tip kompozit çarpışma kutusunun duvarı ezilme sırasında dışa doğru açılıp katlanırken KHDS tip kompozit çarpışma kutusunun dış duvarı hasar tetikleyici kanalların olduğu kısımlarından yaprak şeklinde parçalara ayrılmış ve bu sırada kare hücre dolgu duvarlarının enkazı hücre boşluklarını doldurmuştur. AHDS tip kompozit çarpışma kutusunun hücresel dolgu duvarlarında meydana

gelen kırılmalar yüzünden dış duvarında dışa doğru açılma ve içe doğru eğilmeler yüzünden elyaf kırılmaları ve ayrılmaları olmuştur. HHDS tip kompozit çarpışma kutusunun kare ve altıgen hücre dolgu duvarlarında oluşan hasar enkazının hücresel boşluklara dolarak uyguladığı baskı sonucu dış duvarı yaprak şeklinde dışarı doğru açılıp kendi üzerine katlanırken daha fazla kırılma ve parçalanmalara maruz kalmıştır.



Şekil 3.67. Silindir dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının deneysel ve sayısal son deformasyon görüntülerinin karşılaştırması

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar üç kısımda gerçekleştirilmiştir. Birinci kısımda, sürekli cam elyaf takviyeli polimer (CETP) kompozit, sürekli karbon elyaf takviyeli polimer (KETP) kompozit, ticari 3M-8663 poliüretan (PU) bant, ticari 304 paslanmaz çelik (SS304) ve saf nikel (Ni) malzemelerin katı parçacık erozyon davranışları deneysel ve sayısal olarak karakterize edilmiştir. Ayrıca bu malzemelerin havacılıkta kullanılan bir helikopter rotor palinin aşınma kalkanındaki katı parçacık erozyon performansları 0° hücum açısı ve farklı parçacık çarpma hızları (110, 150, 190 ve 230 m/s) şartları altında sayısal olarak incelenmiştir. Bunlara ilave olarak, PU bant/SS304 ve PU bant/Ni malzemeli hibrit kompozit aşınma kalkanı tasarımının helikopter rotor palinin katı parçacık erozyon direncine etkisi aynı çalışma şartları için sayısal olarak belirlenmiştir. İkinci kısımda, düzlem içi ve düzlem dışı yönlerde bal petek ve ökzetik desenli çekirdek yapılar 3D yazıcıda başarılı bir şekilde üretilmiş ve vakum infüzyon yöntemiyle üretilen KETP kompozit yüzey plakaları ile birleştirilerek kompozit sandviç paneller elde edilmiştir. Kompozit sandviç panellerin düşük enerjili (20 J, 40 J ve 70 J) darbe etkisi altındaki enerji sönmeme ve hasar davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Üçüncü kısımda, içi boş ve hücreli (kare ve altıgen) dolgu kare, altıgen ve silindirik dış duvarlı olarak tasarlanan KETP kompozit çarpışma kutuları el yatırılabilir vakum torbalama yöntemiyle üretilmiştir. Kompozit çarpışma kutularının statik basma yükü altındaki ezilme karakteristikleri ve hasar davranışları deneysel ve sayısal olarak belirlenmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- 1) Şekil 3.1 ve 3.2' ye göre, CETP kompozit malzeme 60° çarpma açısında maksimum erozyon oranına sahip olarak yarı sünek-yarı gevrek hasar davranışı sergilerken KETP kompozit malzeme 90° çarpma açısında maksimum erozyon oranıyla gevrek hasar davranışı göstermiştir.
- 2) SS304, Ni ve PU bant malzemeli plaka numuneler sırasıyla 20° , 20° ve 30° çarpma açılarındaki maksimum erozyon oranı değerlerine sahip olarak sünek hasar davranışı sergilemişlerdir (Şekil 3.4).

- 3) KETP ve CETP kompozit malzemelere göre, PU bant malzeme çok daha düşük erozyon oranı değerlerine sahip olmuştur (Şekil 3.3).
- 4) Şekil 3.3 ve 3.4' e göre, KETP kompozit, CETP kompozit, PU bant, SS304 ve Ni malzemeli plaka numunelerin erozyon oranı parçacık çarpma hızındaki artışa bağlı olarak önemli derece artmıştır.
- 5) PU bant malzemeye göre, CETP kompozit malzemeki aşınma kalkanı yüksek çarpma hızlarında (190 ve 230 m/s) 10 kat daha fazla ortalama erozyon oranı değerlerine sahip olmuştur (Şekil 3.15).
- 6) Şekil 3.18' e göre, PU bant malzeme SS304 ve Ni malzemelerle birlikte aşınma kalkanında hibrit olarak kullanıldığında, aşınma kalkanının erozyon performansı 150 m/s parçacık çarpma hızına kadar iyileşmiştir. Daha yüksek parçacık çarpma hızlarında (190 ve 230 m/s) ise, PU bant malzeme hibrit aşınma kalkanının erozyon performansını kötüleştirmiştir.
- 7) SEM altında elde edilen erozyon hasar görüntülerine (Şekil 3.19) göre, KETP ve CETP kompozit malzemeli plaka numunelerin yüzeylerindeki hasar mekanizmaları düşük açılı (30°) parçacık çarpmasında elyaf-matris ayrılması ve elyaf kırılması şeklinde gerçekleşirken yüksek açılı (90°) parçacık çarpmasında ise bu hasar mekanizmaları matris plastik deformasyonu ve elyaf parçalanması şeklinde oluşmuştur.
- 8) SS304, Ni ve PU bant malzemeli plaka şeklindeki numune yüzeylerinden alınan SEM görüntülerine göre, düşük açılı parçacık çarpmasında numune yüzeylerinde hasar mekanizmaları temel olarak kesme ve kazıma meydana gelirken yüksek açılı katı parçacık çarpmasında ise bu hasar mekanizmaları plastik deformasyon ve mikro kesilme şeklinde gerçekleşmiştir.
- 9) Düzlem içi yönlü bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panelin çekirdek yapısının duvarları darbe sırasında çarpma bölgesinden dışarı doğru açıldığı için ökzetik desen çekirdekli sandviç panele göre daha iyi enerji sönümleme kabiliyeti sergilemiştir.
- 10) Düzlem içi yönlü ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panelin çekirdek yapısının duvarları darbe sırasında çarpma bölgesinin merkezine doğru kapandığı için bal peteği desen çekirdekli sandviç panele göre daha iyi enerji yayma kabiliyeti göstermiştir.

- 11) Düzlem içi yönlü ökzetik desenli çekirdek yapının duvarları çarpma sırasında eksenel deformasyona maruz kaldığı için bu çekirdek yapıya sahip kompozit sandviç panelin maksimum tepki kuvveti düzlem içi bal peteği desen çekirdekli sandviç panele göre daha yüksek elde edilmiştir.
- 12) Düzlem dışı yönlü desen tasarımı göre, ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panel 20 J darbe enerjisi altında daha iyi enerji yayma kabiliyeti sergilerken 40 J ve 70 J çarpma enerjilerinde bal peteği desen çekirdekli kompozit sandviç panel daha iyi enerji sönümleme kabiliyeti göstermiştir
- 13) Şekil 3.29 ve 3.30' a göre, düzlem içi yönlü bal petek ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panel numunelerinin 20 J çarpma enerjisi altında üst yüzey plakalarında delemantasyon, tabakalar arası çatlaklar, elyaf kırılmaları, matris çatlaması ve çekirdek yapılarında ezilme hasarı oluşmuştur. 40 J' lük çarpma enerjisine sahip vurucu uç kompozit sandviç panel numunesinin içine daha fazla girerek üst kompozit yüzey plakalarında elyaf kopmasına, çekirdek yapılarda ezilme, kesilmeler ve çatlamalara neden olmuştur. 70 J' lük çarpma enerjisinde ise vurucu uç kompozit sandviç panellerin çekirdek yapılarında daha fazla ezilme ve kırılma hasar mekanizmaları oluşturmuştur.
- 14) Şekil 3.31 ve 3.32' ye göre, düzlem dışı bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panel numunelerinin 20 J ve 40 J çarpma enerjisi altında üst kompozit yüzey plakalarında elyaf kırılmaları ve elyaf kopmaları oluşurken çekirdek yapılarında ise ezilme, bükülme ve kırılma hasar mekanizmaları ortaya çıkmıştır. Artan çarpma enerjisiyle birlikte (70 J), kompozit sandviç panel numuneleri tamamen delinerek kompozit yüzey plakalarında elyaf kopmaları, elyaf kırılmaları, delemantasyon hasarları meydana gelirken sandviç panellerin çekirdek yapılarında ise ciddi derecede kırılma ve bükülmeler oluşmuştur.
- 15) Tablo 3.4 ve Tablo 3.5' e göre, içi boş silindir (BS) tip kompozit çarpışma kutusu içi boş kare (BK) ve altıgen (BA) tip kompozit çarpışma kutularına göre daha iyi enerji sönümleme performansı göstermiştir.
- 16) Şekil 3.43' e göre, kare ve altıgen hücre dolgulu kare dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının enerji sönümleme performansı içi boş muadillerine göre çok daha yüksek seviyelerde olmuştur. BK tip kompozit çarpışma kutusunun enerji sönümleme değerleriyle kıyaslama yapıldığında, AHDK tip çarpışma kutusu

%391,112, KHDK tip çarpışma kutusu %261,912, HHDK çarpışma kutusu %294,613 daha fazla enerji sönümleme kapasitesine sahip olmuştur.

- 17) Kare ve altıgen hücre dolgulu kompozit çarpışma kutularının ezilme kuvveti verim değerleri (deneysel 0,527-0,731 aralığında) içi boş muadillerine (deneysel 0,351-0,543) göre daha yüksek belirlenmiştir (Şekil 3.51).
- 18) Altıgen hücre dolgulu kare (AHDK), altıgen (AHDA) ve silindir (AHDS) tip kompozit çarpışma kutuları kare hücre dolgulu muadillerine göre daha iyi ezilme dayanımı, enerji sönümleme ve özgül enerji sönümleme performansı sergilemiştir (Şekil 3.52).
- 19) İçi boş kare (BK) dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutusunun içerisine yerleştirilen hücre dolgusu sayesinde AHDK, KHDK ve HHDK tip kompozit çarpışma kutularının özgül enerji sönümleme değerleri sırasıyla yaklaşık %140, %93 ve %72 artmıştır.
- 20) İçi boş altıgen dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutusunun içerisine yerleştirilen hücre dolgusu sayesinde AHDA ve KHDA tip kompozit çarpışma kutularının toplam özgül enerji sönümleme değerlerinde sırasıyla %49 ve %14 artış olurken HHDA tip kompozit çarpışma kutusunun toplam enerji sönümleme değeri yaklaşık %14 azalmıştır.
- 21) İçi boş silindir dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutusunun içerisine yerleştirilen hücre dolgusu sayesinde AHDS ve KHDS tip kompozit çarpışma kutularının toplam özgül enerji sönümleme değerlerinde sırasıyla yaklaşık %21 ve %11 artarken HHDA tip kompozit çarpışma kutusunun enerji sönümleme değeri yaklaşık %8 daha az elde edilmiştir.
- 22) Şekil 3.51’de gösterilen deneysel ve sayısal özgül enerji sönümleme (ÖES) değerleri karşılaştırıldığında, en yüksek ÖES değerleri sırasıyla AHDA, AHDS, AHDK ve KHDS tip kompozit çarpışma kutularında 35,375-39,596 J/g aralığında olmuştur.
- 23) Şekil 3.54-3.67’ ye göre, içi boş kare, altıgen ve silindir dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının duvarlarında içe dışa doğru katlanmalı hasar oluşurken hücre dolgulu kare, altıgen ve silindir dış duvarlı tip kompozit çarpışma kutularının dış duvarları, ezilme sırasında hücre dolgusu duvarlarının uyguladığı baskı nedeniyle yaprak şeklinde dışa doğru açılıp kendi üzerine katlanarak hasara uğramıştır.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmaların geliştirilmesine yönelik olarak ileride yapılacak olan çalışmalar için aşağıdaki öneriler düşünülmüştür:

- 1) Havacılıkta kullanılan karmaşık geometrili kompozit yüzeylerdeki katı parçacık erozyon performansının artırılmasına yönelik optimizasyon çalışmaları yapılabilir
- 2) Bal peteği ve ökzetik desen çekirdekli kompozit sandviç panellerde kullanılan malzemelerin şekil değiştirme hızına bağlı hasar parametreleri belirlenerek, balistik çarpma veya şok yükü altında enerji sönümleme ve hasar davranışı sayısal olarak incelenebilir.
- 3) Kompozit sandviç panellerin kompozit yüzey plaka kalınlığı, çekirdek yüksekliği ve çekirdek hücresi bağıl yoğunluğu gibi parametrelerin enerji sönümleme ve hasar davranışına etkisini belirlemek için optimizasyon çalışmaları yapılabilir.
- 4) Kompozit çarpışma kutularının dış cidar kalınlığı, hücresel dolgu tipleri, duvar kalınlıkları gibi parametrelerin ezilme karakteristikleri ve hasar davranışına etkisi optimize edilebilir.
- 5) Farklı türden kompozit malzemelerin şekil değiştirme hızına bağlı hasar parametreleri belirlenerek sonlu elemanlar yazılımında ilgili kompozit hasar modelleriyle birlikte kompozit çarpışma kutularının dinamik yük altındaki çarpışma karakteristikleri ve hasar davranışı araştırılabilir.

5. KAYNAKLAR

- 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, 3, 271–285.
- Ahmed, T., J., Nino, G. F., Bersee, H., E., N., ve Beukers, A., 2009. Improving Erosion Resistance of Polymer Reinforced Composites, Journal of Thermoplastic Composite Materials, 22, 6, 703–725.
- Ali, I. ve Jun, Y., J., 2014. Mathematical Models for in-Plane Moduli of Honeycomb Structures -A Review, Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol., 7, 581–592.
- Andersson, M. ve Liedberg, P., 2014. Crash Behavior of Composite Structures, Yüksek Lisans Tezi, Chalmers University of Technology, Göteborg, İsveç.
- Antil, R., Amit, R., Garvit, R. ve Ritesh, R., 2015. Applications of Composite Materials in Aerospace, International Journal of Science Technology and Management, 4, 11, 246-252.
- Arabnejad, H., Mansouri, A., Shirazi, S. A. ve McLaury, B., S., 2015. Development of Mechanistic Erosion Equation for Solid Particles, Wear, 332–333, 1044–1050.
- Arnoldt, J., C., ve Hutchings, I., M., 1992. A Model for the Erosive Wear of Rubber at Oblique Impact Angles, Journal of Physics D: Applied Physics, 25, 1, A222–A229.
- ASTM, 2013. G76-07, Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets, West Conshohecken, USA.
- ASTM, 2010. F1864-05, Standard Test Method for Dust Erosion Resistance of Optical and Infrared Transparent Materials and Coatings, West Conshohecken, USA.
- ASTM, 2014. D3039/D3039M, Standart Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Compozite Materials, West Conshohecken, USA.
- ASTM, 2007. D3518/D3518M, Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a 45° Laminate, West Conshohecken, USA.
- ASTM, 2014. D638-14, Standart Test Method for Tensile Properties of Plastics, West Conshohecken, USA.
- ASTM, 2016. D6641/D6641M, Standart Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture, West Conshohecken, USA.
- ASTM, 2003. D790-03, Standart Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, West Conshohecken, USA.

- ASTM, 2012. D7136/D7136M - 12, Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, USA.
- Atthapreyangkul, A. ve Prusty B., G., 2017. Experimental and Numerical Analysis on the Geometrical Parameters Towards the Maximum SEA of CFRP Components, Compos. Struct., 164, 229–236.
- Azimian, M. ve Bart, H., J., 2013. CFD Simulation and Experimental Analysis of Erosion in a Slurry Tank Test Rig, EPJ Web of Conferences.
- Bagci, M. ve Imrek, H., 2011. Solid Particle Erosion Behaviour of Glass Fibre Reinforced Boric Acid Filled Epoxy Resin Composites, Tribology International, 44, 12, 1704–1710.
- Barkoula, N. M. ve Karger-Kocsis, J., 2002. Effects of Fibre Content and Relative Fibre-Orientation on the Solid Particle Erosion of GF/PP Composites, Wear, 252, 1–2, 80–87.
- Bernard, L., A., 2011. Low Velocity Impact Testing of Sandwich Panels with Polymeric Cores, University of New South Wales, Australia.
- Bhagyashekar, M., S. ve Rao, R., 2007. Effects of Material and Test Parameters on the Wear Behavior of Particulate Filled Composites Part 1: SiC-Epoxy and Gr-Epoxy Composites, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 26, 17, 1753–68.
- Biswas, S., Satapathy, A. ve Patnaik A., 2010. Erosion Wear Behavior of Polymer Composites: A Review, Journal of Reinforced Plastics Composites, 29, 2, 898–924.
- Bitter, J., G., A., 1963. A Study of Erosion Phenomena, Part I, Wear, 6, 1, 5–21.
- Blanchard, D., J., Griffith, P. ve Rabinowicz, E., 1984. Erosion of a Pipe Bend by Solid Particle Entrained in Water, Journal of Engineering for Industries, 106, 3, 213–217.
- Buizer, C., A., 2010. Low-Velocity Impact Analysis of Composite Plates with a Buffer-Zone Interface between micro- and Macro-Modeling, Yüksek Lisans Tezi, Eindhoven.
- Buragohain, M., K. 2017. Composite Structures: Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing, Taylor & Francis Group, Florida, USA.
- Cai, F., Gao, F., Pant, S., Huang, X. ve Yang, Q., 2016. Solid Particle Erosion Behaviors of Carbon-Fiber Epoxy Composite and Pure Titanium, Journal of Materials Engineering and Performance, 25, 1, 290–296.
- Campos-Amezcu, A., Gallegos-Muñoz, A., Alejandro Romero, C., Mazur-Czerwicz, Z. ve Campos-Amezcu, R., 2007. Numerical Investigation of the Solid Particle Erosion Rate in a Steam Turbine Nozzle, Applied Thermal Engineering, 27, 14–15, 2394–2403.
- Castorrini, A., Corsini, A., Rispoli, F., Venturini, P., Takizawa, K. ve Tezduyar, T. E., 2016. Computational Analysis of Wind-Turbine Blade Rain Erosion, Computers and Fluids, 141, 175–183.

- Chang, F., K. ve Chang, K., Y., 1987. A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations, Journal of Composite Materials, 21, 9, 834–855.
- Chatla, P., 2012. Ls-Dyna for Crashworthiness of Composite Structures, Yüksek Lisans Tezi, University of Cincinnati, Hindistan.
- Chen, Y., Fu, K., Hou, S., Han, X. ve Ye, L., 2018. Multi-Objective Optimization for Designing A Composite Sandwich Structure Under Normal And 45° Impact Loadings, Composites Part B: Engineering, 142, 159–170.
- Chen, Y., Hou, S., Fu, K., Han, X. ve Ye, L., 2017. Low-Velocity Impact Response of Composite Sandwich Structures: Modelling and Experiment, Composite Structures, 168, 322–334.
- Choi, J., B., 1996. Fracture Toughness of Re-Entrant Foam Materials with a Negative Poisson's Ratio: Experiment and Analysis, Int. J. Fract., 80, 73–83.
- Corsini, A., Castorrini, A., Morei, E., Rispoli, F., Sciulli, F. ve Venturini, P., 2015. Modeling of Rain Drop Erosion in a Multi-MW Wind Turbine, Proceedings of the ASME Turbo Expo, Montreal, Kanada.
- Deka, L., J. ve Vaidya, U., K., 2008. LS-DYNA Impact Simulation of Composite Sandwich Structures, 10. Uluslararası LS-DYNA Kullanıcıları Konferansı, Michican, USA.
- Di Caprio, F., Cristillo, D., Saputo, S., Guida, M. ve Riccio, A. 2019. Crashworthiness of Wing Leading Edges Under Bird Impact Event, Composite Structures, 216, 39–52.
- Dlugosch, M., Fritsch, J., Lukaszewicz, D. ve Hiermaier, S., 2017. Experimental Investigation and Evaluation of Numerical Modeling Approaches for Hybrid-Frp-Steel Sections Under Impact Loading for the Application in Automotive Crash-Structures, Compos. Struct., 2017, 174, 338–47.
- Doğan, F., Hadavinia, H., Donchev, T. ve Bhonge, P., S., 2012. Delamination of Impacted Composite Structures by Cohesive Zone Interface Elements and Tiebreak Contact, Central European Journal of Engineering, 2, 4, 612–626.
- DNV (Det Norske Veritas), 2007. Erosive Wear in Piping Systems, Recommended Practice RP 0501, Hamburg, Germany.
- Durgun, İ., Vatansever, O., Ertan, R., Yavuz, N., 2014. Otomotiv Sektöründe Kullanılan Kompozit Parça İmalat Yöntemlerinin Deneysel Olarak Karşılaştırılması, Mühendis ve Makina, 55, 649, 58-63.
- Elmarakbi, A. 2014. Advanced Composite Materials for Automotive Applications, Wiley, New Delhi, Hindistan.
- Farley, G., L. ve R. M. Jones, R., M., 1989. Energy-Absorption Capability of Composite Tube and Beams, Nasa Technical Publications, TM 101634.
- Feraboli, P., Acsl, A. L. ve Llc, G., C., 2017. Simulating Laminated Composite Materials Using LS-DYNA Material Model MAT54: Single-Element Investigation Simulating Laminated Composite Materials Using LS-DYNA Material Model MAT54, U.S. Department of Transportation, USA.

- Feraboli, P., Deleo, F., Wade, B., Rassaian, M., Higgins, M. ve Byar, A., 2010. Predictive Modeling of an Energy-Absorbing Sandwich Structural Concept Using the Building Block Approach, Compos. Part. A Appl. Sci. Manuf., 41, 774–86.
- Feraboli, P., Wade, B., Deleo, F., Rassaian, M., Higgins, M. ve Byar, A., 2011. LS-DYNA MAT54 Modeling of the Axial Crushing of a Composite Tape Sinusoidal Specimen, Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., 42, 1809–1825.
- Finnie, I., 1958. The Mechanism of Erosion of Ductile Metals, In: Proceedings of 3rd US national congress of applied mechanics, USA.
- Finnie, I., 1960. Erosion of Surfaces by Solid Particles, Wear, 3, 2, 87–103.
- Finnie, I., 1995. Some Reflections on the Past and Future of Erosion, Wear, 186-187, 1–10.
- FLUENT Manual, 2010. ANSYS FLUENT Theory Guide, PA, ANSYS, Canonsburg, USA.
- Friedrich, K. ve Almajid, A., A., 2013. Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications, Applied Composite Materials, 20, 107-128.
- Fuchs, E., R., H., Field F., R. ve Roth, R., 2008. Kirchain RE. Strategic Materials Selection in the Automobile Body: Economic Opportunities for Polymer Composite Design, Compos. Sci. Technol., 68, 1989–2002.
- Gan, N., Feng, Y., Yin, H., Wen, G., Wang, D. ve Huang, X., 2016. Quasi-Static Axial Crushing Experiment Study of Foam-Filled CFRP And Aluminum Alloy, Thin-Walled Structures, Compos. Struct., 157, 303–19.
- Garattoni, F., 2011. Crashworthiness and Composite Materials: Development of An Experimental Test Method for the Energy Absorption Determination and Implementation of the Relative Numerical Model, Doktora Tezi, University of Bologna, Bologna, İtalya.
- Gibson, L., J., 1997. Cellular Solids: Structure and Properties, 2nd ed. Cambridge University Press, İngiltere.
- Gomes-Ferreira, C., Ciampini, D ve Papini M., 2004. The Effect of Inter-Particle Collisions in Erosive Streams on the Distribution of Energy Flux Incident to a Flat Surface, Tribology International, 37, 10, 791–807.
- Goretta, K., C., Burdt, M., L., Cuber, M., M., Perry, L., A, Singh, D. ve Wagh, A.S., 1999. Solid-Particle Erosion of Portland Cement and Concrete, Wear, 224, 1, 106–112.
- Grant, G. ve Tabakoff, W., 1975. Erosion Prediction in Turbomachinery Resulting from Environmental Solid Particles, Journal of Aircraft, 12, 5, 471–478.
- Hadavinia, H., England, J., C., Marchant, D., R. ve Aboutorabi, A., 2010. Design of Automotive Metal and Composite Chassis Structures, Recent Patents on Mechanical Engineering, 3, 211-225.
- Harsha, A., P. ve Jha, S., K., 2008. Erosive Wear Studies of Epoxy-Based Composites at Normal Incidence, Wear, 265, 7–8, 1129–1135.

- Harsha, A., P., Tewari, U., S. ve Venkatraman, B., 2003. Solid Particle Erosion Behaviour of Various Polyaryletherketone Composites, Wear, 254, 7, 693–712.
- Hashim, N., Majid, D., L., Uda, N., Zahari, R. ve Yidris, N., 2017. Vacuum Infusion Method for Woven Carbon/Kevlar Reinforced Hybrid Composite, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.
- Hashin, Z., 1980. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites, J. of Appl. Mech., 47, 329–334.
- He, W., Yao, L., Meng, X., Sun, G., Xie, D. ve Liu, J., 2019. Effect of Structural Parameters on Low-Velocity Impact Behavior of Aluminum Honeycomb Sandwich Structures with CFRP Face Sheets, Thin-Walled Structures, 137, 411–432.
- Hebbar, A., Ouinas, D., Lousdad, A. ve Bouiadjra, B., B., 2010. Erosive Wear Modeling of Polymeric Composite Materials.” Journal of Reinforced Plastics Composites, 29, 12, 1893–1899.
- Heimbs, S., 2012. Energy Absorption in Aircraft Structures, 1st Int Work Hydraul Equip Support Syst.
- Heimbs, S., Middendorf, P. ve Maier, M., 2006. Honeycomb Sandwich Material Modeling for Dynamic Simulations of Aircraft Interior Components, Proceedings of the 9th International LS-DYNA Users Conference, Dearborn, MI.
- Herrmann, H., G., Mohrdieck, C. ve Bjekovic, R., 2002. Materials for the Automotive Lightweight Design, Daimler Chrysler Research & Technology (Research Center Ulm) presentation to FKA/IKA conferences New Advances in Body Engineering, Aachen.
- Hosseinzadeh, R., Shokrieh, M., M. ve Lessard, L., 2006. Damage Behavior of Fiber Reinforced Composite Plates Subjected to Drop Weight Impacts, Compos. Sci. Technol., 66, 61–68.
- Hou, S., Li, T., Jia, Z. ve Wang, L., 2018. Mechanical Properties of Sandwich Composites with 3D-Printed Auxetic and Non-Auxetic Lattice Cores Under Low Velocity Impact, Materials and Design, 160, 1305–1321.
- Hou, X., Deng, Z., and Zhang, K., 2016. Dynamic Crushing Strength Analysis of Auxetic Honeycombs, Acta Mechanica Solida Sinica, 29, 5, 490–501.
- Hou, Y., Neville, R., Scarpa, F., Remillat, C., Gu, B. ve Ruzzene, M., 2014. Graded Conventional-Auxetic Kirigami Sandwich Structures: Flatwise Compression and Edgewise Loading, Composites Part B: Engineering, 59, 33–42.
- Huang, Z., Li, Z., Z ve Yuan, X., 2001. The Effect of Reinforcing Particles on the Erosive Wear Behavior of Particles Reinforced Silicone Matrix Composite Coating, Wear, 249, 12, 1046–1050.
- Humphrey, J., A., C., 1990. Fundamentals of Fluid Motion in Erosion by Solid Particle Impact, International Journal of Heat and Fluid Flow, 11, 3, 170-195.

- Hussein, R., D., Ruan, D., Lu, G. ve Sbarski, I., 2016. Axial Crushing Behaviour of Honeycomb-Filled Square Carbon Fibre Reinforced Plastic (CFRP) Tubes, Compos. Struct., 140, 166–79.
- Hussein, R., D., Ruan, D., Lu, G., Guillow, S. ve Yoon, J., W., 2017. Crushing Response of Square Aluminium Tubes Filled with Polyurethane Foam and Aluminium Honeycomb, Thin-Walled Struct., 110, 140–154.
- Hussein, R. D., Ruan, D. ve Lu, G., 2017. Cutting and Crushing of Square Aluminium/CFRP tubes, Compos Struct., 171, 403–418.
- Hutchings, I. M. ve Winter, R., E., 1974. Particle Erosion of Ductile Metals: A Mechanism of Material Removal, Wear, 27, 1, 121–128.
- Hutchings, I., M., 1981. A Model for the Erosion of Metals by Spherical Particles at Normal Incidence, Wear, 70(3), 269–281.
- Ilyas, M., 2010. Damage Modeling of Carbon Epoxy Laminated Composites Submitted to Impact Loading, Doktora Tezi, University of Toulouse, Toulouse, Fransa.
- Jiang, L. ve Hu, H., 2017. Low-Velocity Impact Response of Multilayer Orthogonal Structural Composite with Auxetic Effect, Composite Structures, 169, 62–68.
- Jyothish Kumar, L. ve Krishnadas Nair, C. G., 2016. Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry, Advances in 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies, Springer, Singapore.
- Kamae, T., Kochi, S., Wadahara, E., Shinoda, T. ve Yoshioka, K., 2009. Advanced-VARTM System for Aircraft Structures - Material Technologies, ICCM Int. Conf. Compos. Mater.
- Kaw, A., A., 2005. Mechanics of Composite Materials, Taylor & Francis Group, Second Edition, Boca Raton, USA.
- Kellas, S. ve Jackson, K. E., 2010. Full-Scale Test of an MD-500 Helicopter with Deployable Energy Absorbers, American Helicopter Society 66th Annual Forum, Phoenix.
- Kim, A. ve Kim, I., 2009. Solid Particle Erosion of CFRP Composite with Different Laminate Orientations, Wear, 267, 1922–1926
- Kim, J., H., Joo, H., G. ve Lee, K., Y., 2015. Simulation of Solid Particle Erosion in WC-Ni Coated Wall Using CFD, Journal of Materials Processing Technology, 224, 240–245.
- Kreculj, D. ve Rašuo, B., 2013. Review of Impact Damages Modelling in Laminated Composite Aircraft Structures, Tehnički vjesnik, 20, 3, 485–495.
- Lakes, R, S. ve Elms, K., 1993. Indentability of Conventional and Negative Poisson's Ratio Foams, J. Compos. Mater., 27
- Lakshya, J., D., 2008. Quasi-Static and Multi-Site High Velocity Impact Response of Composite Structures, Doktora Tezi, University of Alabama, Birmingham, Alabama.
- Li, J. ve Hutchings, I., M., 1990. Resistance of Cast Polyurethane Elastomers to Solid Particle Erosion, Wear, 135, 2, 293–303.

- Li, W.,Y., Yin ,S. ve Wang, X.,F., 2010. Numerical Investigations of the Effect of Oblique Impact on Particle Deformation in Cold Spraying By the SPH Method, Applied Surface Science, 256, 3725–3734.
- Lindsley, B., A. ve Marder, A. R., 1999. The Effect of Velocity on the Solid Particle Erosion Rate of Alloys, Wear, 225–229, 510–516.
- Liu, Q., Lin, Y., Zong, Z., Sun, G., ve Li, Q., 2013. Lightweight Design of Carbon Twill Weave Fabric Composite Body Structure For Electric Vehicle, Compos. Struct., 97, 231–238.
- Liu, Q., Fu, J., Ma, Y., Zhang, Y. ve Li, Q., 2020. Crushing Responses and Energy Absorption Behaviors of Multi-Cell CFRP Tubes, Thin-Walled Struct., 2020, 155, 1-15.
- Liu, Q., Mo, Z., Wu, Y., Ma, J, Pong Tsui, G., C. ve Hui, D., 2016. Crush Response of CFRP Square Tube Filled with Aluminum Honeycomb, Compos. Part B Eng., 98, 406–414.
- Liu, W., Wang, N., Luo, T. ve Lin, Z., 2016. In-Plane Dynamic Crushing of Re-Entrant Auxetic Cellular Structure, Materials and Design, 100, 84–91.
- LSTC., 2009. LS-DYNA Keywords Manual - Volume II: Material Models, Version 971.
- Lu, R., Liu, X., Fu, S., Xu, Z., Chen, S. ve Hu, X., 2018. Experiment and Simulation for the Crushing of Tailor Rolled Tubes with Various Geometric Parameters, Int. J. Mech. Sci., 136, 371–395.
- Luo, R., Qu, J., Ding, H. ve Xu, S., 2004. Static Friction Properties of Carbon/Carbon Composites, Materials Letters, 58, 7–8, 1251–1254.
- Mahbod, M. ve Asgari, M., 2018. Energy Absorption Analysis of a Novel Foam-Filled Corrugated Composite Tube Under Axial and Oblique Loadings, Thin-Walled Struct., 129, 58–73.
- Mansouri, A., Arabnejad, H., Shirazi, S. A. ve McLaury, B., S., 2015. A Combined CFD/Experimental Methodology for Erosion Prediction, Wear, 332–333, 1090–1097.
- McLaury, B., S., Wang, J., Shirazi, S., A., Shadley, J., R. ve Rybicki, E., F., 1997. Solid Particle Erosion in Long Radius Elbows and Straight Pipes, Society of Petroleum Engineers, 977–986.
- Megan, L., Brian, C. ve Hubert L., 2015. Comparison of Crash Models for Ductile Plastics, 10th European LS-DYNA Conference, Würzburg, Germany.
- Menter, F., R., Kuntz, M. ve Langtry, R., 2003. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model, Turbulence Heat and Mass Transfer 4, Begell House, Connecticut, USA.
- Mathias, P. J., Wu, W., Goretta, K. C, Routbort, L. J, Groppi, D., P. ve Karasek, K. R., 1989. Solid Particle Erosion of a Graphite-Fiber Reinforced Bismaleimide Polymer Composite, Wear, 135, 1, 161-169.
- Meng, H., C. ve Ludema, K., C., 1995. Solid Particle Erosion Resistance of Ductile Wrought Super Alloys and Their Weld Overlay Coatings, IBID, 181–183, 443.

- Mil, 2010. STD-3033, Particle/Sand Erosion Testing of Rotor Blade Protective Materials, Washington.
- Mills, D., 1992. Erosive wear. In: Pneumatic Conveying Design Guide, 2nd ed. Elsevier, Butterworth-Heinemann, İngiltere
- Miyazaki, N. ve Hamao, T., 1994. Solid Particle Erosion of Thermoplastic Resins Reinforced by Short Fibers, Journal of Composite Materials, 28, 9, 871-883.
- Morada, G., Vadean, A. ve Boukhili, R., 2017. Failure Mechanisms of a Sandwich Beam with An Ath/Epoxy Core Under Static and Dynamic Three-Point Bending, Composite Structures, 176, 281-293.
- Muflahi, S., A., Mohamed, G. ve Hallett, S., R., 2014. Investigation of Delamination Modeling Capabilities for Thin Composite Structures in LS-DYNA, 13. Uluslararası LS-DYNA Kullanıcıları Konferansı, Dearborn, USA.
- Neilson, J., H. ve Gilchrist, A., 1968. Erosion by a Stream of Solid Particles, Wear, 11, 2, 111-122.
- Nesic, S., 1991. Computation of Localized Erosion-Corrosion in Disturbed Two Phase Flow, Doktora Tezi, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.
- Nguyen, Q., B., Nguyen, V., B., Lim, C., Y., H., Trinh, Q., T., Sankaranarayanan, S., Zhang, Y., W. ve Gupta, M., 2014. Effect of Impact Angle and Testing Time on Erosion of Stainless Steel at Higher Velocities, Wear, 321, 87-93.
- Nguyen, V., B., Nguyen, Q., B., Zhang, Y., W., Lim, C., Y., H. ve Khoo, B., C., 2016. Effect of Particle Size on Erosion Characteristics, Wear, 348-349, 126-137.
- Oka, Y. I., Okamura, K. ve Yoshida, T., 2005. Practical Estimation of Erosion Damage Caused by Solid Particle Impact: Part 1: Effects of Impact Parameters on a Predictive Equation, Wear, 95-101.
- Özen, İ. ve Gedikli, H., 2019. Solid Particle Erosion on Shield Surface of a Helicopter Rotor Blade Using Computational Fluid Dynamics, Journal of Aerospace Engineering, 32, 1.
- Öztürk, B., Gedikli, H. ve Kılıçarslan, Y., S., 2020. Erosive Wear Characteristics of E-Glass Fiber Reinforced Silica Fume and Zinc Oxide-Filled Epoxy Resin Composites, Polymer Composites, 41, 1, 326-337.
- Patnaik, A., Satapathy, A., Chand, N., Barkoula, N., M. ve Biswas, S., 2010. Solid Particle Erosion Wear Characteristics of Fiber and Particulate Filled Polymer Composites: A review, Wear, 268, 1, 249-263.
- Parsi, M., Agrawal, M., Srinivasan, V., Vieira, R., E., Torres, C., F., Brenton, S., McLauryd, S., B. ve Shirazi, S., A., 2015. CFD Simulation of Sand Particle Erosion in Gas-Dominant Multiphase Flow, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 27, 706-718.
- Pollard, D., Ward, C., Herrmann, G. ve Etches, J., 2017. The Manufacture of Honeycomb Cores Using Fused Deposition Modeling, Advanced Manufacturing: Polymer and Composites Science, 3, 1, 21-31.
- Pool, K., V., Dharan, C., K., H. ve Finnie, I., 1986. Erosive Wear of Composite Materials, Wear, 107, 1, 1-12.

- Prasad, B., K., 2002. Abrasive Wear Characteristics of a Zinc-Based Alloy and Zinccalloy/ SiC Composite, Wear, 252, 3-4, 250-263.
- Rajesh, J., J., Bijwe, J., Tewari, U., S. ve Venkataraman, B., 2001. Erosive Wear Behavior of Various Polyamides, Wear, 249, 8, 702–714.
- Rattan, R. ve Bijwe, J., 2007. Influence of Impingement Angle on Solid Particle Erosion of Carbon Fabric Reinforced Polyetherimide Composite, Wear, 262, 5–6, 568–574.
- Riccio, A., Raimondo, A., Saputo, S., Sellitto, A., Battaglia, M. ve Petrone, G., 2018. A Numerical Study on the Impact Behaviour of Natural Fibres Made Honeycomb Cores, Composite Structures, 202, 909–916.
- Rabiee, A., 2018. Lightweight Design of Multi-Stitched Composite Crash Absorbers to Improve Specific Energy Absorption Capability under Quasi-Static and Impact Loading, Doktora Tezi, Cranfield University, Bedford, İngiltere.
- Rattan, R., Bijwe, J., 2007. Influence of Impingement Angle on Solid Particle Erosion of Carbon Fabric Reinforced Polyetherimide Composite, Wear, 262, 568–574.
- Reuter, C., Sauerland, K., H. ve Tröster, T., 2017. Experimental and Numerical Crushing Analysis of Circular CFRP Tubes under Axial Impact Loading, Composite Structures, 174, 33–44.
- Rodriguez, C., 2012. CFD Analysis on the Main-Rotor Blade of A Scale Helicopter Model Using Overset Meshing, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, İsveç.
- Ruff, A., W. ve Ives, L., K., 1975. Measurement of solid particle velocity in erosive wear, Wear, 35, 195–199.
- Ruff, A., W. ve Wiederhorn, S., M., 1979. Erosion by Solid Particle Impact, Treatise on Materials Science and Technology, 16, 69–125.
- Shin, B., G., 2010. Prediction of Sand Particle Trajectories and Sand Erosion Damage on Helicopter Rotor Blades, Doktora Tezi, Pennsylvania State University, USA.
- Saputra, A., H., Hasrin, A., Kubouchi, M., Tsuda, K. ve Arai, K., 1998. Effect of Surface Treatment on Sand Erosion Behavior of Glass Beads-Filled Epoxy Resin, Composite Interface, 6, 6, 531–41.
- Shoemaker, A., C. ve Kackar, R., N., 1988. A Methodology for Planning Experiments in Robust Product and Process Design, Quality Reliable Engineering International, 4, 95–103.
- Soboyejo, W., 2003. Mechanical Properties of Engineered Materials, Marcel Dekker, Inc., New York.
- Spuzic, S., Zec, M., Abhary, K., Ghomashchi, R. ve Reid, I., 1997. Fractional Design of Experiments Applied to A Wear Simulation, Wear, 212, 1, 131-139.
- Stachowiak, G., W. ve Batchelor A., W., 2001. Abrasive, Erosive, and Cavitation Wear, Engineering Tribology, Butterworth-Heinemann, Boston.

- Sun, G., Wang, Z., Hong, J., Song, K. ve Li, Q., 2018. Experimental Investigation of the Quasi-Static Axial Crushing Behavior of Filament-Wound CFRP and Aluminum/CFRP Hybrid Tubes, Compos. Struct., 194, 208–25.
- Sun, G., Li, S., Liu, Q., Li, G. ve Li, Q., 2016. Experimental Study on Crashworthiness of Empty/Aluminum Foam/Honeycomb-Filled CFRP Tubes, Compos. Struct., 152, 969–93.
- Sundararajan, G. ve Roy, M., 1997. Solid Particle Erosion Behaviour of Metallic Materials at Room and Elevated Temperatures, Tribology International, 30, 5, 339–359.
- Suresh, A., Harsha, A. P. ve Ghosh, M. K., 2009. Solid Particle Erosion of Unidirectional Fibre Reinforced Thermoplastic Composites, Wear, 267, 9–10, 1516–1524.
- Suresh, A., Harsha, A., P. ve Ghosh, M., K., 2010. Erosion Studies of Short Glass Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites and Prediction of Erosion Rate Using ANNs., Journal of Reinforced Plastics and Composites, 29, 11, 1641–1652.
- Taguchi, G. ve Konishi, S., 1987. Taguchi Methods: Orthogonal Arrays and Linear Graphs; Tools for Quality Engineering, American Supplier Institute Inc., Dearborn, MI.
- Taguchi, G., 1990. Introduction to Quality Engineering, Asian Productivity Organization, Tokyo.
- Takaffoli, M. ve Papini, M., 2012. Material Deformation and Removal Due to Single Particle Impacts on Ductile Materials Using Smoothed Particle Hydrodynamics, Wear, 274–275, 50–59.
- Takeda, F., Nishiyama, S., Hayashi, K., Komori, Y., Suga, Y. ve Asahara, N., 2005. Research in the Application of the VARTM Technique to the Fabrication of Primary Aircraft Composite Structure.Pdf, Mitsubishi Heavy Ind. Ltd. Tech. Rev. 42, 1–6.
- Taslim, M. E., Khanicheh, A. ve Spring, S., 2009. A Numerical Study of Sand Separation Applicable to Engine Particle Separator Systems, Journal of the American Helicopter Society, 54, 4.
- Tewari, U., S., Harsha, A., P., Häger, A., M. ve Friedrich, K., 2003. Solid Particle Erosion of Carbon Fibre and Glass Fibre-Epoxy Composites, Composites Science and Technology, 63, 3–4, 549–557.
- Tilly, G., P., 1969. Sand Erosion of Metals and Plastics: A Brief Review, Wear, 14, 4, 241–248.
- Tilly, G., P., 1973. A Two Stage Mechanisms of Ductile Erosion, Wear, 23, 1, 87–96.
- Tobbi, E., R. ve Bahaadini, A., 2015. Design, Analysis and Verification of Composite Components Subjected to Crash Load Cases, Doktora Tezi, Blekinge Institute of Technology, Blekinge, Sweden.

- Tomblin, J., Sherraden, J., Seneviratne W. ve Raju, K., 2002. A-Basis and B-Basis Design Allowables for Epoxy-Based Prepreg and TORAY T700SC-12K-50C/#2510 Plain WeaveFabric, Rep. AGATE-WP3.3-033051-134, Wichita State University, Wichita, USA.
- Tsai, S., W., 1965. Strength Characteristics of Composite Materials, NASA CR-224, USA.
- Tsai, S., W ve Wu, E., M., 1971. A General Theory of Strength of Anisotropic Material, J. Compos. Mat., 5, 58.
- Tsiang, T., H., 1989. Sand Erosion of Fiber Composites: Testing and Evaluation in CC. Chamis (Ed.), Test methods for Design Allowables for Fibrous Composites, American Society for Testing and Materials, (ASTM) STP I003, Philadelphia, USA.
- Tsuda, K., Kubouchi, M., Sakai, T., Saputra, A. H. ve Mitomo, N., 2006. General Method for Predicting the Sand Erosion Rate of GFRP, Wear, 260, 9-10, 1045–1052.
- URL-1, <http://www.redbackaviation.com/understanding-rotor-blades-the-rotary-wing/>, 03 Mart 2022.
- URL-2, <https://triagonal.org/services/composite-materials/>, 18 Mart 2022.
- URL-3, <https://iasj.net/iasj/download/2431ce402a9faea8>, 18 Mart 2022.
- URL-4, <https://www.melcosteel.com/composite-autoclaves.html>, 18 Mart 2022.
- URL-5, <http://www.carbonbydesign.com/infusion.htm>, 18 Mart 2022.
- Wang, J., Waas, A., M. ve Wang, H., 2013. Experimental and Numerical Study on the Low-Velocity Impact Behavior of Foam-Core Sandwich Panels, Compos. Struct., 96, 298–311.
- Wang, H., Ramakrishnan, K., R. ve Shankar, K., 2016. Experimental Study of the Medium Velocity Impact Response of Sandwich Panels with Different Cores, Materials and Design, 99, 68–82.
- Wang, Y. F. ve Yang, Z. G., 2008. Finite Element Model of Erosive Wear on Ductile and Brittle Materials, Wear, 265, 5–6, 871–878.
- Wang, Y. F., ve Yang, Z. G., 2009. A Coupled Finite Element and Meshfree Analysis of Erosive Wear, Tribology International, 42, 2, 373–377.
- Wood, K., 2011. Blade repair: closing the maintenance gap, Composites Technology, <https://www.compositesworld.com/articles/blade-repair-closing-the-maintenance-gap>.
- Wu, Y. ve Moore, W., H., 1986. Quality Engineering: Product & Process Design Optimization, American Supplier Institute Inc., Dearborn, MI.
- Xiao, X., 2009. Modeling Energy Absorption with a Damage Mechanics Based Composite Material Model, Journal of Composite Materials, 43, 5, 427–444.
- Xue, X., Zhang, C., Chen, W., Wu, M. ve Zhao, J., 2019. Study on the Impact Resistance of Honeycomb Sandwich Structures Under Low-Velocity/Heavy Mass, Composite Structures, 226.

- Yazdani Sarvestani, H., Akbarzadeh, A., H., Mirbolghasemi, A ve Hermenean, K., 2018. 3D Printed Meta-Sandwich Structures: Failure Mechanism, Energy Absorption and Multi-Hit Capability, Materials and Design, 160, 179–193.
- Yellur, M., R., Seidlitz, H., Kuke, F., Wartig, K. ve Tsombanis, N, 2019. A Low Velocity Impact Study on Press Formed Thermoplastic Honeycomb Sandwich Panels, Composite Structures, 225.
- Yen, C., F., 2008. Ballistic Impact Modelling of Composite Materials, 7. Uluslararası LS-DYNA Kullanıcıları Konferansı, Stuttgart-Vaihingen, Almanya.
- Zhang, C. ve Tan, K., T., 2020. Low-Velocity Impact Response and Compression After Impact Behavior of Tubular Composite Sandwich Structures, Composites Part B: Engineering, 193.
- Zhang, P. ve Zhou, D., 2007. A research on the LS-DYNA Hourglass Formulations, International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering, Shanghai, Çin.
- Zhang, Y., Reuterfors, E., P., McLaury, B., S., Shirazi, S., A. ve Rybicki, E., R., 2007. Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows, Wear, 263, 1–6, 330–338.
- Zhang, X. ve Yang, D., 2016. Mechanical Properties of Auxetic Cellular Material Consisting of Re-entrant Hexagonal Honeycombs, Materials, 9, 11.
- Zhang, Y., Zong, Z., Liu, Q., Ma, J., Wu, Y. ve Li, Q., 2017. Static and Dynamic Crushing Responses of CFRP Sandwich Panels Filled with Different Reinforced Materials, Materials and Design, 117, 396–408.
- Zhang, Z., Li, F., Cao, L., Hu, P. ve Li, Y., 2017. Research on Characteristics of Solid Particle Erosion in Governing Stage of a 600 MW Supercritical Steam Turbine, Applied thermal Engineering, 118, 471–479.
- Zahavi, J., Nativ, S. ve Schmitt, G., F., 1981. Indirect Damage in Composite Materials Due to Raindrop Impact, Wear, 72, 3, 305-313.
- Zheng, C., Liu, Y., Chen, C., Qin, J., Ji, R. ve Cai, B., 2017. Numerical Study of Impact Erosion of Multiple Solid Particle, Applied Surface Science, 423, 176–184.
- Zhu, G., Sun, G., Yu, H., Li, S. ve Li, Q., 2018. Energy Absorption of Metal, Composite and Metal/Composite Hybrid Structures Under Oblique Crushing loading, Int. J. Mech. Sci., 135, 458–483.
- 3M, A 3M Study is the First to Show the Effects of Erosion on Wind Turbine Efficiency, <https://www.pressebox.com/pressrelease/3m-deutschland-gmbh/A-3M-Study-Is-the-First-to-Show-the-Effects-of-Erosion-on-Wind-Turbine-Efficiency/boxid/445007>, 18 Mart 2022.

ÖZGEÇMİŞ

İsmail ÖZEN, İlköğrenimini Bölümlü Mehmet Akif Ersoy İlköğretim Okulu'nda, orta öğrenimini ise Of Hacı Mehmet Bahattin Ulusoy Endüstri Meslek Lisesi'nde tamamladı. 2010 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi ve 2014 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümlerinden lisans eğitimlerinden mezun oldu. 2012 yılında Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü Taşıt Tahrik ve Güç Sistemleri Bilim Dalı'na 33a kadrolu Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2010 yılında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı'nda "Yüksek Lisans" eğitimine başladı. 2012 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda "Yüksek Lisans" eğitimine devam etti. 2015 yılında hazırladığı "Bir Binek Aracın Aerodinamik Etkinliğinin Modellenmesi" başlıklı tezi ile Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl, Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Mekanik Bilim Dalına ÖYP/33a kadrolu Araştırma Görevlisi olarak atandıktan sonra Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda "Doktora" eğitimine başladı. Halen bu Anabilim Dalında doktora eğitimine ve araştırma görevlisi kadrosunda çalışmaya devam etmekte olup iyi derecede İngilizce bilmektedir. Akademik hayatı boyunca yapmış olduğu bilimsel çalışmaların listeleri aşağıda verilmiştir:

SCI, SSCI, AHCI ve ESCI İndekslerine Giren Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. **Özen İ.**, Gedikli H. ve Öztürk B., 2021. Improvement of Solid Particle Erosion Resistance of Helicopter Rotor Blade with Hybrid Composite Shield, Engineering Failure Analysis, 121
2. **Özen İ.**, Çava K., Gedikli H., Alver Ü. ve Aslan M., 2021. Low-Energy Impact Response of Composite Sandwich Panels with Thermoplastic Honeycomb and Reentrant cores, Thin-Walled Structures, 156.
3. **Özen İ.**, ve Gedikli H., 2019. Solid Particle Erosion on Shield Surface of a Helicopter Rotor Blade Using Computational Fluid Dynamics, Journal of Aerospace Engineering, 32.

4. Gedikli H. ve **Özen İ.**, 2020. Investigation of Solid Particle Erosion Behavior on Erosion Shield of a Helicopter Rotor Blade, Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 26, 1, 68-74.

Uluslararası ve Ulusal Bildiri Listesi

1. **Özen İ.**, Gedikli H. ve Aslan M., 2021. Crashworthiness Analysis of Empty and Cellular Filled Composite Crash Boxes, International Symposium on Automotive Science and Technology, Ankara, Türkiye.
2. **Özen İ.**, Çava K., Gedikli H., Alver Ü. ve Aslan M., 2019. Investigation of Impact Behavior of Sandwich Materials with 3D Printed Auxetic and Cellular Core Geometries., International Materials Technologies and Metallurgy Conference, İstanbul, Türkiye.
3. **Özen İ.** ve Varol Y., Investigation of the Effect on Aerodynamic Performance of Stepped Diffuser in a Land Vehicle, 2018. International Conference on Advances in Mechanical and Mechatronics Engineering, Ankara, Türkiye.
4. **Özen İ.** ve Gedikli H., 2016. Modeling of Solid Particle Erosion in a Metal Erosion Shield Using CFD, International Symposium on Sustainable Aviation, İstanbul, Türkiye.
5. **Özen İ.** ve Gedikli H., 2016. Helikopter Kanadında Oluşan Aşınmanın CFD İle 3D Olarak Modellenmesi, VI. Ulusal Havacılık ve Uzay Kongresi, Kocaeli, Türkiye.

Araştırmacı Olarak Çalıştığı Projeler

1. Düşük Enerjili Çarpışma Altında Aşınma Kalkanında Meydana Gelen Hasarın Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi (TUSAŞ-TAI/DKTM), Diğer Resmî Kurumlarca Desteklenen Proje, 2015-2017.
2. Örgülü Elyaf Takviyeli Kompozit Yapıların Mekanik ve Balistik Özelliklerinin İncelenmesi (BAP Alt Yapı Projesi), Yükseköğretim Kurumları Destekli Proje, 2016-2018.
3. Kompozit Yapılarda Makro ve Mikro Hasar Davranışının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi (BAP06 Doktora Projesi), Yükseköğretim kurumları Destekli Proje, 2019-2022.