



**FARKLI UÇ GEOMETRİSİNE SAHİP VURUCULARIN
HİBRİD KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZLI DARBE
DAVRANIŞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EDA KEPİR

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NANOTEKNOLOJİ VE İLERİ MALZEMELER
ANABİLİM DALI**

**MERSİN
ŞUBAT - 2025**

**FARKLI UÇ GEOMETRİSİNE SAHİP VURUCULARIN
HİBRİD KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZLI DARBE
DAVRANIŞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EDA KEPİR
ORCID ID: 0009-0008-9597-9528

MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NANOTEKNOLOJİ VE İLERİ MALZEMELER
ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
PROF. DR. MEMDUH KARA
ORCID ID: 0000-0002-5201-5453

MERSİN
ŞUBAT – 2025

ÖZET

FARKLI UÇ GEOMETRİSİNE SAHİP VURUCULARIN HİBRİD KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Kompozit malzemeler, yüksek mukavemet ve rijitlikle birlikte hafiflik, etkili enerji sönümleme özellikleri, üstün korozyon direnci ve yüksek yorulma performansı gibi avantajlar sunmaktadır. Bu üstün özellikleri sayesinde kompozit malzemelerin kullanım alanları giderek genişlemekte ve endüstriyel uygulamalardan taşıtlara, inşaat projelerinden spor ekipmanlarına kadar çeşitli sektörlerde tercih edilmektedir. Kompozit borular ise, birçok endüstri alanında hızla artan bir kullanıma sahiptir. Bu borular, yüksek basınç ve korozyona karşı dayanıklı malzemeler olmalarıyla öne çıkar. Özellikle basınçlı hava, sıvılaştırılmış petrol gazı, sıkıştırılmış doğalgaz, su ve kimyasal maddelerin iletiminde geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Birçok akışkan iletim hatlarında kullanılan kompozit borular üretim, servis ve bakım işlemleri sırasında yabancı cisimlerin darbesine maruz kalabilirler. Bu yabancı cisimler farklı geometrilere sahip olabilir. Bu çalışmada karbon/karbon/karbon (KKK), cam/cam/cam (CCC), bazalt/bazalt/bazalt (BBB), karbon/bazalt/karbon (KBK), karbon/cam/karbon (KCK), cam/karbon/cam (CKC), cam/bazalt/cam (CBC), bazalt/karbon/bazalt (BKB) ve bazalt/cam/bazalt (BCB) istif sıralarına sahip $\pm 55^\circ$ sarım açısında 6 tabakalı dokuz çeşit kompozit boru numuneler üretilmiştir. Farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J enerji seviyesinde düşük hızlı darbe davranışları incelenmiştir. Deneylerde kullanılan vurucular 24 mm çaplı yarı küresel, 90° konik ve 120° piramit uca sahip vuruculardır. Darbe testlerinden elde edilen kuvvet-zaman ve kuvvet-deplasman değişimleri incelenmiştir. Ayrıca numuneye yapılan darbenin etkisiyle oluşan hasar mekanizmaları detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada, karbon, cam ve bazalt takviyesinin ve hibritleme durumunun kompozit numunelerin darbe cevabına etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hibrid kompozit, hasar davranışı, farklı uç geometrisi, düşük hızlı darbe testi, kompozit boru

Danışman: Prof. Dr. Memduh KARA, Mersin Üniversitesi, Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler Anabilim Dalı, Mersin.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF STRIKERS WITH DIFFERENT TIP GEOMETRY ON THE LOW-VELOCITY IMPACT BEHAVIOR OF HYBRID COMPOSITES

Composite materials offer advantages such as lightness, effective energy absorption properties, superior corrosion resistance and high fatigue performance along with high strength and rigidity. Thanks to these superior properties, the areas of use of composite materials are gradually expanding and are preferred in various sectors from industrial applications to vehicles, from construction projects to sports equipment. Composite pipes, on the other hand, have a rapidly increasing use in many industrial areas. These pipes stand out as materials resistant to high pressure and corrosion. They have a wide range of use, especially in the transmission of compressed air, liquefied petroleum gas, compressed natural gas, water and chemical substances. Composite pipes used in many fluid transmission lines may be exposed to impacts from foreign objects during production, service and maintenance operations. These foreign objects may have different geometries. In this study, nine types of composite pipe samples with 6 layers at $\pm 55^\circ$ winding angles with carbon/carbon/carbon (KKK), glass/glass/glass (CCC), basalt/basalt/basalt (BBB), carbon/basalt/carbon (KBK), carbon/glass/carbon (KCK), glass/carbon/glass (CKC), glass/basalt/glass (CBC), basalt/carbon/basalt (BKB) and basalt/glass/basalt (BCB) stacking orders were produced. Low-velocity impact behaviors at 20J energy level were investigated with impactors with different tip geometries. The impactors used in the experiments were 24 mm diameter hemispherical, 90° conical and 120° pyramid tip impactors. Force-time and force-displacement changes obtained from the impact tests were investigated. In addition, the damage mechanisms formed by the impact applied to the sample were investigated in detail. In the study, the effects of carbon, glass and basalt reinforcement and hybridization status on the impact response of the composite samples were investigated in detail.

Keywords: Hybrid composite, damage behavior, different tip geometry, low-velocity impact test, composite pipe

Advisor: Prof. Dr. Memduh KARA, Mersin University, Department of Nanotechnology and Advanced Materials, Mersin.

TEŞEKKÜR

Her şeyden önce bu çalışmanın yapılmasında ve tamamlanmasında her türlü desteğini esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Memduh KARA'ya en içten minnet ve şükranlarımı sunarım. Prof. Dr. Memduh KARA'nın öğrencisi olmak benim için büyük bir onur.

Çalışmanın yapılması esnasında bilgilerinden ve tecrübelerinden faydalandığım değerli eşim Öğr. Gör Yusuf KEPİR'e tüm değerli katkılarından ötürü teşekkürlerimi sunarım.

Tez değerlendirme jüri üyeleri Dr. Öğr. Üyesi Alper GÜNÖZ'e ve Dr. Öğr. Üyesi Şeref ÖCALIR'a katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışma Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimince 2024-TP2-5034 proje numarası ile desteklenmiştir. Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine finansal desteklerinden dolayı teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK	i
ONAY	ii
ETİK BEYAN	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR ve SİMGELER	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Kompozit Malzemeler	1
1.1.1. Matris Fazı	1
1.1.2. Takviye Fazı	2
1.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	2
1.3. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	4
1.3.1. Filaman Sarım Yöntemi	5
1.4. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	6
1.5. Hibrid Kompozit Malzemeler	6
1.6. Düşük Hızlı Darbe Testi	7
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	9
3. MATERYAL ve YÖNTEM	15
3.1. Kompozit Boruların Filaman Sarım Metodu İle Üretimi	15
3.2. Numunelerin Kesim İşlemi	16
3.3. Düşük Hızlı Darbe Deneyi	16
3. 3.1. Darbe Deneylerinin Yapılması	17
3. 3.2. Darbe Sonrası Hasarın İncelenmesi	18
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	21
4.1 . Düşük Hızlı Darbe Testi Sonuçları	21
4.1.1. Kuvvet -Zaman Eğrileri	21
4.1.2. Kuvvet-Deplasman Eğrileri	29
4.2. Düşük Hızlı Darbe Testi Hasar Analizi	36
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	55
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Kompozit malzeme	1
Şekil 1.2. Kompozit malzemenin matris ve takviye fazının gösterimi	2
Şekil 1.3. Hibrid kompozit malzeme şematik gösterimi	7
Şekil 3.1. Kompozit boruların filaman sarım yöntemi şematik gösterimi	15
Şekil 3.2. Düşük hızlı darbe test cihazı	17
Şekil 3.3. a) 24 mm yarıküresel uç b) 120° piramit c) 90° konik uç	18
Şekil 4.1. 20 J enerji seviyesinde a) bazalt, b) karbon, c) cam elyaf epoksi numune için farklı uç geometrilerinde elde edilen kuvvet zaman değişimleri	23
Şekil 4.2. 20 J enerji seviyesinde a) karbon-bazalt-karbon b) karbon-cam-karbon elyaf hibrid numune için farklı uç geometrilerinde elde edilen kuvvet zaman değişimleri	25
Şekil 4.3. 20 J enerji seviyesinde a) Cam-Karbon-Cam b) Cam-Bazalt-Cam elyaf hibrid numune için farklı uç geometrilerinde elde edilen kuvvet zaman değişimleri	27
Şekil 4.4. 20 J enerji seviyesinde a) Bazalt-Karbon-Bazalt b) Bazalt-Cam-Bazalt elyaf hibrid numune için farklı uç geometrilerinde elde edilen kuvvet zaman değişimleri	28
Şekil 4.5. 20 J enerji seviyesinde a) bazalt, b) karbon, c) cam elyaf epoksi numune için farklı uç geometrilerinde elde edilen kuvvet deplasman değişimleri	31
Şekil 4.6. 20 J enerji seviyesinde a) karbon-bazalt-karbon b) karbon-cam-karbon elyaf hibrid numune için farklı uç geometrilerinde elde edilen kuvvet deplasman değişimleri	33
Şekil 4.7. 20 J enerji seviyesinde a) Cam-Karbon-Cam b) Cam-Bazalt-Cam elyaf hibrid numune için farklı uç geometrilerinde elde edilen kuvvet deplasman değişimleri	34
Şekil 4.8. 20 J enerji seviyesinde a) Bazalt-Karbon-Bazalt b) Bazalt-Cam-Bazalt elyaf hibrid numune için farklı uç geometrilerinde elde edilen kuvvet deplasman değişimleri	36
Şekil 4.9. Bazalt numunesinin a) 90° konik, b) 24 mm yarı küresel, c) 120° piramit uçlara sahip 3 farklı ucla vurulduktan sonra oluşan hasar görüntüleri	38
Şekil 4.10. Karbon numunesinin a) 90° konik, b) 24 mm yarı küresel, c) 120° piramit uçlara sahip 3 farklı ucla vurulduktan sonra oluşan hasar görüntüleri	40
Şekil 4.11. Cam numunesinin a) 90° konik, b) 24 mm yarı küresel, c) 120° piramit uçlara sahip 3 farklı ucla vurulduktan sonra oluşan hasar görüntüleri	42
Şekil 4.12. Bazalt-cam-bazalt numunesinin a) 90° konik, b) 24 mm yarı küresel, c) 120° piramit uçlara sahip 3 farklı ucla vurulduktan sonra oluşan hasar görüntüleri	44
Şekil 4.13. Bazalt-karbon-bazalt numunesinin a) 90° konik, b) 24 mm yarı küresel, c) 120° piramit uçlara sahip 3 farklı ucla vurulduktan sonra oluşan hasar görüntüleri	46
Şekil 4.14. Cam-bazalt-cam numunesinin a) 90° konik, b) 24 mm yarı küresel, c) 120° piramit uçlara sahip 3 farklı ucla vurulduktan sonra oluşan hasar görüntüleri	48
Şekil 4.15. Cam-karbon-cam numunesinin a) 90° konik, b) 24 mm yarı küresel, c) 120° piramit uçlara sahip 3 farklı ucla vurulduktan sonra oluşan hasar görüntüleri	49
Şekil 4.16. Karbon-bazalt-karbon numunesinin a) 90° konik, b) 24 mm yarı küresel, c) 120° piramit uçlara sahip 3 farklı ucla vurulduktan sonra oluşan hasar görüntüleri	51
Şekil 4.17. Karbon-cam-karbon numunesinin a) 90° konik, b) 24 mm yarı küresel, c) 120° piramit uçlara sahip 3 farklı ucla vurulduktan sonra oluşan hasar görüntüleri	53

KISALTMALAR ve SİMGELER

Kısaltma/Simge	Tanım
B	Bazalt
K	Karbon
C	Cam
BKB	Bazalt-Karbon-Bazalt
BCB	Bazalt-Cam-Bazalt
KBK	Karbon-Bazalt-Karbon
KCK	Karbon-Cam-Karbon
CKC	Cam-Karbon-Cam
CBC	Cam-Bazalt-Cam
PMC	Polimer Matrisi Kompozit
MMC	Metal Matrisli Kompozit
CMC	Cam Matrisli Lompozit
RTM	Reçine Transfer Kalıplama

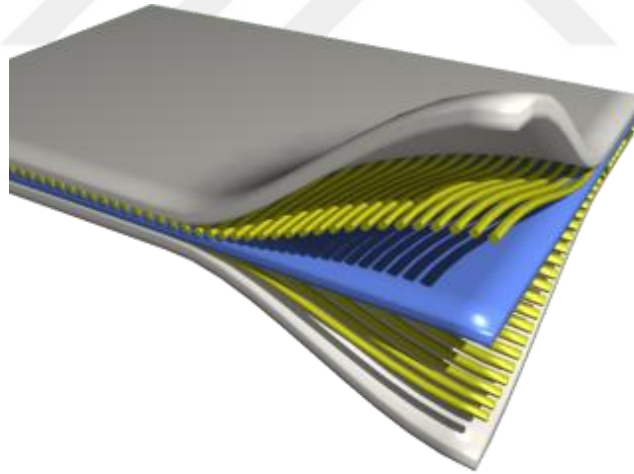


1. GİRİŞ

1.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, birbiri içerisinde çözünmeyen iki veya daha fazla malzemenin bir araya gelmesiyle oluşan, üstün performans sunan yapılar olarak tanımlanır. Bu malzemeler, bileşenlerin her birinin fiziksel özelliklerini koruduğu, ancak çözünme olmaksızın bir ara yüz oluşturduğu özgün bir yapıdadır. Kompozit malzemelerde "matris" adı verilen sürekli faz, yapının ana bileşenini oluştururken, "takviye" bileşeni lif, pul veya parçacık formunda matris içinde yer alır. Bu yapı sayesinde kompozit malzemeler, yalnızca bir malzeme ile elde edilemeyecek dayanım, sertlik ve hafiflik gibi özellikler sunar (Yudar, 2023).

Matris bileşenleri, takviye bileşenlerini bir arada tutarak onları çevresel etkilere karşı korur. Ayrıca, ara yüz olarak bilinen bölge, takviye bileşenine iletilen gerilimi kontrol ederek, malzemenin genel dayanımını artırır. Bu ara yüzün dayanımı, kompozit malzemenin mekanik performansını doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Kompozit yapıdaki bu özel etkileşimler sayesinde, malzemeler aşınma dayanımı, termal ve elektriksel iletkenlik gibi çok çeşitli özelliklerde üstün performans gösterebilir (Özmeral, 2023). Şekil 1.1. de kompozit malzemeye bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Kompozit malzeme (Callister vd, 2020).

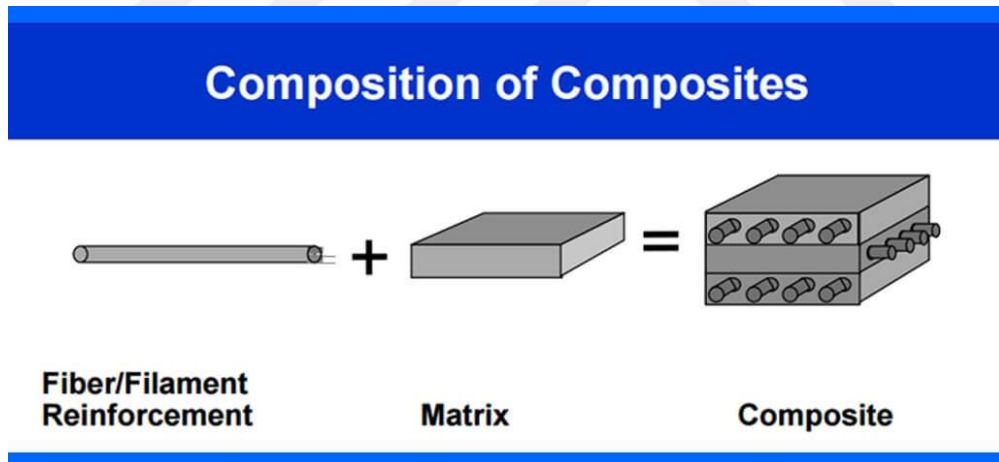
1.1.1. Matris Fazı

Kompozit malzemelerin temel yapı taşı olan matris fazı, kompozit yapının sürekli bileşenini oluşturur ve takviye fazını çevreleyerek bir arada tutar. Matris, genellikle polimer, metal veya seramik esaslı malzemelerden seçilir ve kompozitin genel mekanik özelliklerini belirlemede kritik bir rol oynar. Matrisin en önemli görevlerinden biri, takviye fazını dış etkenlere karşı korumak ve yükleri takviye

elemanlarına etkin bir şekilde iletmektir. Matris, malzemenin şekil alabilme kabiliyetini artırırken, gerilme altında enerji absorbe ederek kompozitin çatlama direncini de yükseltir. Matris fazının dayanımı ve sertliği, kompozitin nihai performansını büyük ölçüde etkilerken, çevresel faktörlere karşı gösterdiği direnç de kompozitin uzun ömürlü olmasında önemli bir faktördür (Özmeral, 2023).

1.1.2. Takviye Fazı

Takviye fazı, kompozit malzemenin mekanik dayanımını ve rijitliğini artıran elemandır. Genellikle lif, pul veya parçacık formunda bulunan takviye fazı, matris içinde dağılarak malzemenin gerilme altındaki performansını optimize eder. Lif takviyeleri, yüksek çekme mukavemeti sunarak kompozitin mukavemetini artırırken, parçacık veya pul takviyeleri, aşınma direnci gibi spesifik özellikleri iyileştirebilir. Takviye fazı, kompozitin yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırırken, matris içinde homojen bir şekilde dağıldığında maksimum performans sağlar. Ayrıca, takviye elemanlarının uzunluğu, yönelimi ve malzemesi, kompozitin nihai özelliklerinde belirleyici bir rol oynar. İdeal bir takviye fazı, matrisle güçlü bir ara yüz oluşturur ve uygulanan yükleri etkili bir şekilde paylaşarak malzemenin mekanik davranışını optimize eder (Asi, 2018). Şekil 1.2. te kompozit malzemeyi oluşturan matris ve takviye fazı gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Kompozit malzemenin matris ve takviye fazının gösterimi (Arusan vd, 2022).

1.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, farklı sınıflandırmalara tabi tutulabilen karmaşık yapılardır. Bu sınıflandırmalar genellikle bileşenlerin türüne, takviye elemanlarının şekline ve matris yapısına göre yapılır (Kaya, 2016).

Aşağıda, kompozit malzemelerin yaygın sınıflandırma yöntemleri ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır:

Kompozitler, matris fazının kimyasal yapısına göre üç ana kategoriye ayrılabilir: polimer matrisli, metal matrisli ve seramik matrisli kompozitler. Her bir matris türü, kompozitin mekanik, termal ve kimyasal özelliklerini belirler. Polimer Matrisli Kompozitler (PMC), en yaygın kullanılan kompozit türüdür. Matris fazı genellikle termoset (epoksi, polyester) veya termoplastik (polipropilen, polikarbonat) polimerlerden oluşur. Polimer matrisli kompozitler, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve kolay işlenebilirlikleri nedeniyle uçak, otomotiv ve spor ekipmanları gibi alanlarda kullanılır. Polimerler düşük sıcaklık dayanımına sahip olsa da, maliyet ve üretim kolaylığı açısından avantaj sağlar (İpekçi, 2022). Metal Matrisli Kompozitler (MMC), metal matrisli kompozitlerde, genellikle alüminyum, magnezyum veya titanyum gibi hafif ve dayanıklı metaller kullanılır. Metal matrisler, yüksek sıcaklıklarda stabilite, iyi elektriksel ve termal iletkenlik sunar. MMC'ler, yüksek sıcaklık dayanımının gerekli olduğu uzay ve savunma sanayi gibi alanlarda yaygın olarak tercih edilir. Seramik Matrisli Kompozitler (CMC), seramik matrisli kompozitler, aşırı sıcaklıklarda ve oksidatif ortamlarda dayanıklılık sunar. Matris fazı olarak seramik kullanıldığı için bu malzemeler yüksek sıcaklıklarda bile mukavemetlerini korur. Seramik matrisli kompozitler, ısıya dayanıklı yapılar, uçak motor parçaları ve uzay araçlarında tercih edilir.

Kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanları, malzemenin özelliklerini belirleyen en önemli unsurlardan biridir. Takviye malzemeleri, genellikle lif, parçacık veya pul formunda olabilir (Kaya, 2016).

Lif takviyeli kompozitlerde takviye malzemesi lif formundadır. Lifler genellikle cam, karbon, aramid, bazalt gibi yüksek dayanımlı ve düşük yoğunluklu malzemelerden seçilir. Lif takviyeli kompozitler, yüksek çekme mukavemeti ve rijitlik sunarak özellikle uzay, otomotiv ve inşaat sektörlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Lifler, sürekli veya kısa formda olabilir ve sürekli lifler daha yüksek performans sağlar. Parçacık takviyeli kompozitlerde, matris fazına homojen olarak dağıtılmış takviye elemanları küçük parçacık formundadır. Bu parçacıklar genellikle metal oksitler, karbürler veya nitrürler gibi sert ve dayanıklı malzemelerden oluşur. Parçacık takviyeli kompozitler, özellikle aşınma dayanımı ve sertlik istenen uygulamalarda tercih edilir. Pul şeklinde takviye elemanları, genellikle metal veya seramik pulcukları şeklinde matris içinde dağılır. Bu kompozitler, yönlü özellikler göstermez ve takviye elemanlarının yönlendirilmediği izotropik bir yapı oluşturur. Pul takviyeli kompozitler, genellikle düşük maliyetli ve geniş yüzey alanlarına sahip malzemelerde kullanılır (Kaya, 2016).

Kompozit malzemeler, takviye elemanlarının geometrik düzenine göre de sınıflandırılabilir. Takviye elemanlarının dağılımı ve düzeni, kompozitin mekanik performansını doğrudan etkiler (Kaya, 2016).

Tek yönlü lifli kompozitlerde takviye lifleri matris içinde yalnızca bir yönde dizilmiştir. Bu tür kompozitler, lif yönünde yüksek mukavemet sağlar, ancak diğer yönlerde daha zayıf olabilirler. Tek yönlü lifli kompozitler, özellikle belirli yüklerin uygulandığı ortamlarda avantaj sunar. Çok yönlü lifli kompozitlerde lifler birden fazla yönde düzenlenmiştir ve bu sayede her yönde daha dengeli mukavemet

sunar. Çok yönlü lifli kompozitler, kompleks yüklerin uygulandığı yapıların tasarımında kullanılır. İzotropik kompozitlerde takviye elemanlarının rastgele dağılması ile oluşturulan bu kompozitler, her yönde aynı mekanik özellikleri gösterir. İzotropik kompozitler, homojen dayanım isteyen uygulamalarda tercih edilir (Kaya, 2016).

1.3. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Polimer matrisli kompozit malzemeler (PMC), hafifliği, yüksek mukavemeti ve korozyon direnci gibi özellikleri sayesinde birçok endüstride yaygın olarak kullanılır. PMC'lerin üretim yöntemleri, uygulama alanına, istenen malzeme özelliklerine ve üretim maliyetine bağlı olarak değişir (İpekçi, 2022).

Aşağıda, polimer matrisli kompozit malzemelerin en yaygın kullanılan üretim yöntemleri detaylandırılmıştır:

El yatırması, polimer matrisli kompozit üretiminin en basit ve düşük maliyetli yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, takviye elemanları (genellikle cam, karbon veya aramid lifleri) bir kalıp yüzeyine elle yerleştirilir. Daha sonra üzerine sıvı haldeki matris malzemesi (genellikle termoset reçineler, örneğin epoksi veya polyester) fırça veya rulo ile uygulanır. Matris, liflerin her tarafına nüfuz eder ve kurlenme işlemiyle sertleşir (İpekçi, 2022).

Vakum torbalama yöntemi, el yatırması yönteminin daha gelişmiş bir versiyonudur. Lif takviyeleri kalıp üzerine yerleştirildikten sonra, matris malzemesi uygulanır. Üzerine bir vakum torbası yerleştirilir ve kalıp içindeki hava vakumlanarak dışarı çekilir. Bu işlem, reçinenin takviye malzemesine daha iyi nüfuz etmesini sağlar ve daha homojen bir yapı elde edilir (İpekçi, 2022).

Reçine transfer kalıplama, kapalı kalıp sisteminde uygulanan bir yöntemdir. Lif takviyeleri kalıp içerisine yerleştirildikten sonra, sıvı halindeki polimer reçinesi düşük basınç altında kalıba enjekte edilir. Reçine liflerin etrafını sarar ve kalıp içinde kurlenir. RTM yöntemi, yüksek kaliteli ve kompleks geometrilere sahip kompozit parçaların üretiminde kullanılır (İpekçi, 2022).

Pultrüzyon yöntemi, sürekli olarak üretilen kompozit parçalar için kullanılan bir üretim yöntemidir. Lif takviyeleri sürekli bir şekilde reçine banyosundan geçirilerek matris malzemesi ile kaplanır. Ardından, lifler bir kalıp içinden çekilerek şekillendirilir ve kurlenir. Bu yöntem, uzun ve düzgün kesitli (örneğin boru, profil) kompozit parçaların üretiminde idealdir (İpekçi, 2022).

Filament sarma, silindirik veya küresel şekillere sahip kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Sürekli lifler, reçine banyosuna daldırılır ve ardından bir döner mandrel üzerine belirli bir açıyla sarılır. Lifler, matris malzemesi ile kaplanmış olarak mandrel etrafında düzgün bir şekilde sarılır ve kurlenme işlemiyle sertleştirilir. Bu yöntemle genellikle boru, tank, silindirik yapı gibi parçalar üretilir (Kara ve Uyaner, 2017).

Sıcak presleme, kalıplar arasında lif takviyeleri ile doldurulmuş reçine karışımının yüksek basınç ve sıcaklık altında şekillendirilip kurlendiği bir yöntemdir. Bu süreç, genellikle kısa lifler ve

takviyeli termoplastik reçineler kullanılarak uygulanır. Yüksek basınç sayesinde lifler reçineye tam olarak gömülür ve homojen bir kompozit yapı elde edilir (İpekçi, 2022).

Vakum infüzyon yöntemi, kompozit üretiminde kullanılan gelişmiş bir teknolojidir. Lif takviyeleri kalıba yerleştirildikten sonra, kalıp üzeri bir vakum torbası ile kapatılır ve vakum uygulanır. Bu sırada, sıvı reçine vakum yardımıyla takviye liflerine enjekte edilir. Reçine liflere tamamen nüfuz ettikten sonra kürlenme işlemi başlar (İpekçi, 2022).

Termoform kalıplama, genellikle termoplastik polimerlerin şekillendirilmesi için kullanılır. Takviye edilmiş termoplastik levhalar, bir ısı kaynağı ile yumuşatılır ve ardından bir kalıp üzerine yerleştirilerek basınç veya vakum yardımıyla şekillendirilir. Bu yöntem, otomotiv ve havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılır (İpekçi, 2022).

Otoklav yöntemi, yüksek basınç ve sıcaklık altında kompozit malzemelerin üretildiği bir yöntemdir. Genellikle vakum torbalama ile birlikte kullanılır. Lif takviyeleri ve reçine, kalıba yerleştirildikten sonra bir vakum torbası içinde otoklava yerleştirilir ve yüksek sıcaklık ve basınçta kürlenir. Bu yöntem, en yüksek performanslı kompozit parçaların üretiminde kullanılır (İpekçi, 2022).

1.3.1. Filaman Sarım Yöntemi

Filament sarım yöntemi, özellikle silindirik veya simetrik yapıya sahip kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan bir teknik olarak öne çıkar. Bu yöntem, yüksek mukavemet ve rijitlik gibi özelliklerin sağlanmasında etkili olduğu için genellikle basınçlı kaplar, borular, tanklar ve roket gövdeleri gibi uygulamalarda tercih edilir. Filament sarım yöntemi, sürekli liflerin reçineyle kaplanarak belirli bir düzende bir mandrel üzerine sarılmasıyla gerçekleştirilir (Kara ve Uyaner, 2017).

Filament sarım süreci şu şekildedir;

Sürekli lifler, üretilcek kompozit malzemenin istenen özelliklerine göre seçilir. Genellikle karbon, cam veya aramid lifleri tercih edilir. Lifler, bu süreçte mukavemeti ve yük taşıma kapasitesini artırmak amacıyla kritik rol oynar.

Lifler, üretim sürecinde reçineyle kaplanmak üzere bir reçine banyosundan geçirilir. Reçine, liflerin yüzeyine yapışarak matris fazını oluşturur ve kürlenme sonrası kompozit malzemenin yapısını oluşturur. En yaygın kullanılan reçineler epoksi, polyester ve vinilesterdir.

Reçineyle kaplanmış lifler, döner bir mandrel üzerine belirli bir açıyla sarılır. Sarım açısı, üretilcek parçanın mekanik özelliklerini etkiler; örneğin, düşük açılarda sarım, eksenel mukavemeti artırırken, yüksek açılarda sarım çevresel mukavemeti güçlendirir. Bu sayede hem eksenel hem de çevresel yükler altında dayanıklı yapı elde edilir.

Lifler mandrel üzerine sarıldıktan sonra, kompozit yapı kürlenerek sertleştirilir. Kürleme işlemi genellikle oda sıcaklığında başlar, ancak yüksek performans gerektiren uygulamalarda otoklav gibi

yüksek sıcaklık ve basınç uygulamaları ile gerçekleştirilir. Bu işlem, reçinenin polimerizasyonunu tamamlar ve liflerle matris arasındaki bağları güçlendirir.

Kompozit malzeme tamamen sertleştikten sonra, mandrel üzerinden dikkatlice çıkarılır. Bu aşamada malzemenin nihai şekli ve boyutları elde edilmiş olur. Üretim sonrası gerekli son işlemler (kesme, yüzey bitirme) yapılabilir (Kara ve Uyaner, 2017).

1.4. Filaman Sarım Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Filaman sarım kompozit malzemeler, yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve dayanıklılık özellikleriyle birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Havacılık ve uzay sanayisinde roket motor kovanları, yakıt tankları ve uzay araçlarında; otomotiv endüstrisinde basınçlı gaz tankları, tahrik şaftları ve süspansiyon sistemlerinde; enerji sektöründe rüzgar türbin kanatları, basınçlı boru hatları ve depolama tanklarında tercih edilmektedir. Savunma sanayisinde füze ve mühimmat gövdeleri, zırh sistemleri ve radar sistemlerinde, denizcilikte ise yat ve tekne gövdeleri, dalgıç tüpleri ve deniz altı yapılarında kullanılır. İnşaat sektöründe yapısal güçlendirme, boru ve kanal sistemleri için dayanıklı çözümler sunarken, spor malzemelerinde de bisiklet kadroları, golf sopaları ve balıkçılık malzemeleri gibi hafif ve performans gerektiren ürünlerde tercih edilir (Kara ve Uyaner, 2017).

1.5. Hibrid Kompozit Malzemeler

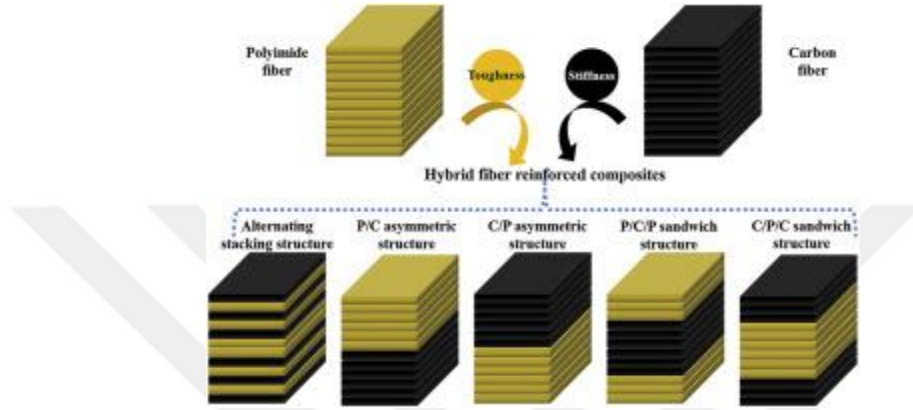
Hibrid kompozit malzemeler, farklı türdeki kompozitlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan ve her iki türün de avantajlarını bir arada sunan malzemelerdir. Genellikle, bu malzemeler birden fazla lif türü (örneğin, karbon ve cam lifleri) ile matris malzemelerinin kombinasyonunu içerir. Hibrid kompozitler, malzemenin performansını özelleştirme ve optimize etme imkanı sağlar (Geleneksel, 2017).

Hibrid kompozitler, iki veya daha fazla farklı tipte takviye lifinin (örneğin, karbon fiber ve cam fiber) birlikte kullanılmasıyla oluşturulur. Bu lifler, matris malzemesi (genellikle bir reçine türü) ile birleştirilir. Karbon fiberler yüksek mukavemet ve rijitlik sağlarken, cam fiberler daha düşük maliyetli ve darbe dayanımını artırır. Hibrid yapılar, her iki lifin avantajlarını bir arada sunarak, optimize edilmiş performans ve maliyet dengesini sağlar (Geleneksel, 2017).

Maliyet ve performans dengesi açısından incelendiğinde karbon fiber gibi yüksek maliyetli liflerle, cam fiber gibi daha ekonomik liflerin kombinasyonu, hem performans hem de maliyet açısından avantaj sağlar. Bu, ürünlerin maliyetini düşürürken performansını artırabilir. Geliştirilmiş mekanik özellikler, karbon lifler, yüksek mukavemet ve hafiflik sağlarken, cam lifler darbe dayanımını artırır ve kırılma direncini iyileştirir. Hibrid kompozitler, bu iki özelliği bir araya getirerek, genel mekanik performansı artırabilir. Farklı liflerin kombinasyonu, malzemenin ağırlığını azaltırken performans özelliklerini optimize eder. Bu, otomotiv ve havacılık sektörlerinde önemli bir avantaj sağlar. Hibrid

kompozitlerde darbe ve aşınma direncini artırarak, malzemenin uzun ömürlü ve dayanıklı olmasını sağlar (Geleneksel, 2017).

Hibrid kompozit malzemeler, farklı lif türlerinin ve matris malzemelerinin kombinasyonu sayesinde, malzemenin hem maliyetini hem de performansını optimize etme olanağı sağlar. Bu tür kompozitler, geniş bir uygulama yelpazesinde avantajlar sunarak, çeşitli endüstrilerde yüksek performans ve ekonomik çözümler sağlar (Geleneksel, 2017). Şekil 1.5. te hibrid kompozit malzemelerin üretim şekli şematik olarak anlatılmıştır.



Şekil 1.3. Hibrid kompozit malzeme şematik gösterimi (He, 2020).

1.6. Düşük Hızlı Darbe Testi

Düşük hızlı darbe testi, malzemelerin düşük hızda gerçekleşen darbelere karşı dayanıklılığını ve performansını değerlendirmek için kullanılan kritik bir yöntemdir. Bu test, özellikle kompozit malzemeler ve polimerler gibi malzemelerin gerçek dünya koşullarında nasıl davrandığını anlamak amacıyla uygulanır. Test, malzemenin darbe altında ne kadar enerji absorbe edebileceğini, hasar eşiğini ve performansını belirler. Test sırasında, bir darbe kaynağı kullanılarak malzemenin yüzeyine belirli bir enerjide darbe uygulanır ve malzemenin tepkisi gözlemlenir. Bu süreçte, darbenin enerjisi, uygulama şekli ve malzemenin tepkisi dikkatle ölçülür, bu da malzemenin dayanıklılığı ve güvenilirliği hakkında değerli bilgiler sağlar (Esendemir ve Caner, 2018).



2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

Mahesh ve arkadaşları (2019) gerçekleştirdikleri çalışmada, farklı darbe hızları ve kalınlıklara sahip jüt/epoksi (JE) kompozit laminatların düşük hızlı darbe (LVI) davranışını incelemişlerdir. Çalışma sırasında, yarım küre (HS), düz (F) ve konik (C) geometrilere sahip çarpıcılar kullanılmıştır. Laminat kalınlıkları 6 mm ile 10 mm arasında değişmektedir. Konik çarpıcı ile darbe alan laminatlar maksimum enerji soğurumu gösterirken, düz çarpıcı ile darbe alan laminatlar daha büyük ve anında oluşan hasarlarla karşılaşmıştır. Hasar incelemeleri, düz çarpıcıların daha büyük hasara yol açtığını göstermektedir. Darbe sonucunda oluşan hasar sıralaması ise $F > HS > C$ şeklindedir; bu, temas alanının büyüklüğü ile laminattaki hasarın arttığını ortaya koymaktadır.

Doğan (2019), yaptığı çalışmada termoset (TS) ve termoplastik (TP) matrisli kompozitlerin düşük hızlı darbe (LVI) davranışlarına odaklanmıştır. Araştırmada, farklı matris malzemelerine sahip kompozit panellerin düşük hızlı darbelerle verdikleri tepkiler, darbe şekillerinin etkisiyle incelenmiştir. TS kompozitler, 300 g/m² alan yoğunluğuna sahip tek yönlü E-cam elyaf kumaşları ve epoksi matrisi kullanılarak üretilmiştir. Üretim süreci, vakum destekli reçine infüzyon kalıplama (VARIM) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. TP kompozit paneller ise E-cam elyaf takviyeli polipropilen prepreglerden oluşmaktadır. TS matrisli kompozitlerin çekme dayanımı, aynı elyaf hacmi oranına sahip TP matrisli kompozitlerden daha yüksektir. Aynı darbe enerjisi uygulanmasına rağmen, TP kompozitler TS kompozitlere göre daha yüksek delme direnci göstermiştir. Darbe şeklinin, delme direncini önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Özellikle konik şekilli darbeleri kırıcının neden olduğu darbe sayısında önemli bir azalma tespit edilmiştir. İki farklı darbe geometrisi kullanılmıştır; bunlardan biri 12,7 mm çapında yarım küre (HS), diğeri ise konik şekilli darbeleri kırıcılardır. Konik darbe uygulandığında, polipropilen matrisli kompozitler için delme yalnızca 3 darbe ile gerçekleşirken, yarım küre darbe uygulandığında bu sayı 36'ya çıkmıştır. Elyaf hacim oranının darbe dayanımına etkisi de dikkate değer bulunmuştur. Cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitler için %40 ve %50 elyaf hacim oranına sahip numunelerin delme eşiği sırasıyla 61 J ve 98 J olarak ölçülmüştür. Aynı katman yapısına sahip TS ve TP numuneleri için HS darbe uygulandığında, delme eşikleri sırasıyla 55 J ve 61 J olarak tespit edilmiştir.

Elaldi ve arkadaşları (2017) çalışmasında, farklı temas alanlarına sahip dört darbe geometrisinin, üç farklı kalınlıktaki örme karbon fiber takviyeli kompozit plakalar üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Darbe geometrileri olarak düz uçlu, ojiv, konik ve yarım küresel şekiller kullanılmıştır. İlk aşamada, kompozit plakalar $[45/-45/0/90/45/-45]_{2s}$, $[45/-45/0/90/45/-45]_{3s}$ ve $[45/-45/0/90/45/-45]_{4s}$ yönelimleriyle üretilmiştir. İkinci aşamada ise, karbon fiber takviyeli kompozit paneller düşük hızlı darbe testlerine tabi tutulmuş ve kuvvet-zaman, enerji-zaman ile kuvvet-yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Son olarak, panellerin yarı ve tam delinme durumları ile hasar büyüklüğü analiz edilmiştir. Sonuçlar, daha dar temas alanına sahip konik ve ojiv darbe geometrilerinin, diğer geometrilere kıyasla kompozit plakalar üzerinde daha fazla nüfuz sağladığını ancak darbe bölgesinde daha büyük bir hasar

oluşturduğunu göstermiştir. En yüksek penetrasyon, konik geometriden elde edilirken, ojiv, yarım küresel ve düz uçlu geometriler bu sıralamayı takip etmiştir.

Farhood ve arkadaşları (2019) çalışmalarında, karbon fiber hibridizasyonunun cam-karbon/epoksi hibrid filament sarımlı boruların düşük hızlı darbe öncesi ve sonrası basınç dayanımına olan etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, farklı katmanlama düzenleri ve elyaf oranlarının hibrid cam-karbon fiber takviyeli polimer boruların basınç dayanımı ve darbe sonrası basınç dayanımına (CAI) etkileri analiz edilmiştir. Filament sarma yöntemiyle üretilen ince HDPE astarlı ve sekiz katmandan oluşan hibrid kompozit borular, 100 J darbe enerjisi altında test edilmiştir. Darbe uygulanmamış ve uygulanmış numunelere yönelik çeşitli eksenel basınç testleri gerçekleştirilmiş, bu numunelerin hasar toleransları, kalan basınç dayanımları ve arıza modları detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Görsel analizler, darbe öncesi ve sonrası boruların basınç yüklemesi altındaki arıza modlarını ortaya koymuştur. Sonuçlar, farklı elyaf içerik oranlarına rağmen alternatif elyaf dizilimlerinin daha iyi darbe dayanımı sağladığını göstermiştir. Ayrıca, karbon fiber takviyeli epoksi borular, darbe öncesinde en yüksek basınç dayanımına sahip olmalarına rağmen, darbe sonrası en düşük hasar toleransını göstermiş ve basınç dayanımlarında %62'lik bir azalma yaşamıştır. 100 J darbe enerjisi uygulamak için 5,1 kg sabit kütleyle sahip 16 mm çapında yarım küre şeklinde bir darbe cihazı kullanılmıştır.

Farhood ve arkadaşları (2020) çalışmasında, karbon fiber boruların cam elyaflarla hibrid hale getirilmesi yoluyla düşük hızlı darbe altında darbe hasar direncini artırmayı amaçlayan bir çalışma sunmuşlardır. İnce HDPE iç astarla güçlendirilen kompozit borular, filament sarma yöntemi ile üretilmiştir. Farklı katman dizilimlerine ve elyaf içerik oranlarına sahip sekiz farklı boru konfigürasyonu, sabit $+55^{\circ}/-90^{\circ}$ sarma açısıyla tasarlanmış ve 50 ile 100 J darbe enerjileri altında test edilmiştir. Hasar analizi, optik görüntüleme ve mekanik mikrograf incelemeleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, hibrid boru konfigürasyonlarının 50 J darbe enerjisi uygulandığında, referans karbon fiber numunelere kıyasla daha iyi enerji absorpsiyonu sağladığını ortaya koymuştur. Özellikle, dış katmanda cam elyaf bulunan numuneler ile karbon ve cam elyaflarının alternatif katmanlaması, daha az hasar meydana getirerek daha iyi darbe dayanımı sergilemiştir. Bununla birlikte, dış katmanda cam elyaf bulunan numuneler, 100 J darbe enerjisi altında hem enerji emiliminde hem de maksimum yer değiştirmede artış göstererek ciddi hasarlara maruz kalmıştır. Düşük hızlı darbe testlerinde kullanılan cihaz, 16 mm çapında yarım küresel bir çarpıcı, kuvvet sensörü ve 5,101 kg toplam kütleyle sahip bir vurucu ile gerçekleştirilmiştir.

Gemi ve arkadaşları (2018) gerçekleştirdikleri çalışmada ($\pm 55^{\circ}$)³ filament sarımlı E-cam/epoksi kompozit boruların düşük hızlı darbeye karşı verdiği tepkileri incelemişlerdir. Borular, çeşitli darbe enerjilerine maruz bırakılarak ağırlık düşürme yöntemiyle test edilmiştir. Testler sırasında kuvvet-zaman ve kuvvet-yer değiştirme grafikleri analiz edilmiştir. Ayrıca, darbe sonucu oluşan hasar gelişimi de değerlendirilmiştir. Sonuçlar, borulardaki hasarların radyal yer değiştirme ile ilişkili olarak geliştiğini göstermektedir. İstatistiksel analizler, Weibull dağılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Mikroskop altında yapılan incelemeler, başlıca hasar modlarının debonding, radyal çatlaklar, transfer çatlakları ve delaminasyon olduğunu ortaya koymuştur. Darbeyi uygulayan çarpıcı, 12 mm çapında ve 5,1 kg kütleye sahip bir yarım küre şeklinde tasarlanmıştır. Çarpıcı, boruya 75 J darbe enerjisi uygulamak üzere sabit bir yükseklikten düşürülmüştür.

Rajan ve arkadaşları (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, hibrid kompozit boruların üretiminde karbon ve cam elyaflar kullanılmıştır. Hibrid kompozit boruların darbe davranışı, iç çap sabit tutulmak suretiyle farklı yönelim ve kalınlıklarda sonlu elemanlar analizi (FEA) yöntemi ile incelenmiştir. Deneysel doğrulama, belirli bir yönelim için yapılmış ve sonuçlar FEA verileriyle kıyaslanmıştır. Elde edilen bulgular, deneysel ve analiz sonuçlarının oldukça yakın olduğunu göstermektedir. Malzemelerin mekanik özellikleri, gerinim ölçerlerin kullanıldığı çekme testleri ile belirlenmiştir. Düşük hızlı darbe analizleri, farklı yönelimlere sahip ve çeşitli darbe enerjisi seviyelerinde test edilen değişken kalınlıktaki numuneler üzerinde sonlu elemanlar analiziyle gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma, çeşitli darbe enerjisi seviyelerinin etkilerini doğrulamak amacıyla numunelerden birinin yönelimine odaklanarak yapılmıştır. Bu çalışma, darbe sırasında elde edilen maksimum iletim kuvveti, yer değiştirme miktarı ve maksimum enerji değerlerini ortaya koymaktadır.

Kazemianfar ve arkadaşları (2020) ise 3D dokuma kompozitlerin düşük hızlı darbe tepkilerini hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle incelemiştir. Numuneler, E-cam elyafları ve doymamış polyester reçinesi kullanılarak üretilmiştir. Testlerde konik, yarım küre ve düz uçlu darbe uygulayıcıları kullanılmıştır. Hasar modları ve hasar alanları, mikroskobik ve optik görüntüleme teknikleriyle analiz edilmiştir. Darbe olayının simülasyonu, sonlu elemanlar yazılımı ABAQUS ile gerçekleştirilmiştir. Farklı darbe şekillerinin temas kuvveti, yer değiştirme miktarı ve dağıtılan enerji değerleri karşılaştırılmıştır. Deneysel bulgular ile sayısal analiz sonuçları arasında iyi bir uyum sağlanmıştır. Bulgular, daha yuvarlak darbe uygulayıcılarının daha geniş hasar alanları ve daha yüksek eşik yükleri oluşturduğunu ortaya koymakla birlikte, hasarın başlamasının darbe şekline bağlı olarak değişmediğini göstermektedir. Ayrıca, kompozitlerin hasar yoğunluğunun darbe şekli ve z-fiber hacim oranı tarafından büyük ölçüde etkilendiği tespit edilmiştir.

Havacılık ve otomotiv sektörlerinde kullanılan karbon fiber/epoksi matrisli kompozitler, darbe yüklemeleri gibi kritik yükleme koşullarına karşı oldukça duyarlıdır. Liu ve arkadaşları (2020) bu tür kompozit laminatların düşük hızlardaki (10 m/s'den düşük) darbe davranışını hem deneysel hem de sayısal olarak ayrıntılı bir şekilde incelemiştir. Özellikle, darbe uygulayıcısının geometrisinin etkileri araştırılmış ve iki farklı çarpıcı tipi değerlendirilmiştir: (a) yarım küre başlı çelik bir darbe uygulayıcı ve (b) düz uçlu çelik bir darbe uygulayıcı. Her iki çarpıcı, kompozit numunelere 15 J darbe enerjisi uygulamak için kullanılmıştır. Darbe testleri sonrasında, kompozit laminatlarda meydana gelen hasar, ultrasonik C-tarama yöntemi ile değerlendirilmiştir. Ayrıca, elastik-plastik hasar modelini içeren ve VUMAT alt programı ile uygulanan üç boyutlu sonlu elemanlar (FE) modeli, çarpma olayının simülasyonunda ve çarpıcı geometrisinin etkilerinin araştırılmasında kullanılmıştır. Yük-tepki ve hasar

dağılımı gibi sayısal tahminler, deneysel sonuçlarla büyük ölçüde uyum göstermiştir. Yarım küre şekilli çarpıcı (RNS) ve düz uçlu çarpıcı (FFS) kullanılarak yapılan testlerde, düz uçlu çarpıcı ile darbe alan kompozitlerin, yarım küre çarpıcıya kıyasla daha yüksek maksimum yük altında kaldığı, ancak daha düşük düzlem dışı yer değiştirme gösterdiği tespit edilmiştir.

Gemi ve arkadaşları (2021) çalışmasında, filament sarma yöntemi ile üretilen cam takviyeli polimer (GRP) kompozit borular, kimyasal sıvıların, petrol ve doğal gazın taşınması gibi çeşitli endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu borular, hem montaj aşamasında hem de kullanım sırasında düşük hızlı darbelere maruz kalabilir. Bu tür darbeler, boru duvarında görünmeyen hasarlara neden olabilir; bu hasarlar arasında matris çatlakları, elyaf kırılmaları, delaminasyon ve katmanlar arası ayrılmalar yer alır. Bu görünmeyen hasarlar, kompozit borunun mukavemetinde ciddi azalmalar meydana getirir ve borunun beklenen servis koşullarında dayanıklılığını olumsuz etkileyebilir. Düşük hızlı darbenin neden olduğu hasarları incelemek ve bu hasarların kompozit boruların mukavemeti üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, farklı çaplara sahip (Ø54, Ø72 ve Ø96 mm) üç farklı boru üretilmiştir. ASTM D 7136 standardına uygun olarak, bu borular 1,5, 2, 2,5 ve 3 m/s hızlarında darbe testlerine tabi tutulmuş ve önceden hasarlandırılmıştır. Darbe testleri sonucunda, kuvvet-zaman, kuvvet-yer değiştirme ve enerji-zaman grafiklerine dayanarak boruların dinamik tepkileri analiz edilmiştir. Çap büyüdükçe, düşük hızda darbenin etkisinin azaldığı ve hasarın çoklu hasarlardan delaminasyona doğru bir dönüşüm gösterdiği tespit edilmiştir. Kullanılan darbecinin 12 mm yarıçaplı yarı küresel bir uca ve 5,6 kg ağırlığa sahip olduğu belirtilmiştir.

Sahu ve Ansari (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, AA1100 sınıfı alüminyum ince levhanın düşük hızlı darbe özellikleri, künt, yarım küre, ojiv ve konik şekilli darbeleri kırıcılar altında incelenmiştir. AA1100 alaşımı, yüksek süneklik özelliği sayesinde büyük plastik deformasyona uğrayabilmekte ve ardından kırılma veya delme riski taşımaktadır. Araştırmada, darbeleri kırıcı şeklinin temas kuvveti, emilen enerji dağılımı, delme ve arıza modları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sayısal simülasyonlar için Johnson-Cook malzeme modeli kullanılarak, malzeme sabitleri deneysel yöntemlerle belirlenmiştir. Analiz süreci, sonlu eleman çözüm aracı olarak ABAQUS/CAE kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 1,15–3,80 m/s hız aralıklarıyla 2, 4, 6, 10, 14, 16, 18 ve 22 J darbe enerjileri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, darbeleri kırıcıların burun yarıçapının artışının temas kuvvetini artırarak delme süresini azalttığını göstermektedir. Künt darbeleri kırıcılar yüksek darbe dayanımı sunarken, yarım küre şekline sahip kırıcılar büyük enerji emme kapasitesine sahiptir; bu tür kırıcıları ojiv ve konik şekiller izlemektedir.

Günöz ve Kara (2024) tarafından yapılan çalışmada, poliamid 6.6 (PA 6.6) nanofiber ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) ile takviye edilmiş kevlar kumaş (KF) ve karbon kumaş (CF) bazlı epoksi matris nanokompozit levhalar üretilmiştir. PA 6.6 nanofiberler elektrospinning yöntemiyle elde edilerek katmanlar arasına yerleştirilmiş, MWCNT'ler ise epoksi matrise %0,3 ağırlık oranında eklenmiştir. Vakum destekli el yatırma yöntemiyle hazırlanan 12 katmanlı nanokompozit levhalar, takviyesiz, yalnızca PA 6.6, yalnızca MWCNT veya PA 6.6-MWCNT kombinasyonlarıyla üretilerek

toplamda 16 farklı kompozit plaka elde edilmiştir. Düşük hızlı darbe testleri (20, 40 ve 60 J) sonucunda nanofiber ve MWCNT takviyesinin darbe dayanımını önemli ölçüde artırdığı ve hasar miktarını azalttığı gözlemlenmiştir. Takviye türlerinin darbe dayanımı ve hasar oluşumu üzerindeki etkileri, optik mikroskop ve yüksek çözünürlüklü görüntülerle analiz edilmiştir.

Gemi ve arkadaşları (2022) tarafından yapılan çalışmada, filament sarma tekniğiyle üretilen cam takviyeli polimer (GRP) kompozit boruların düşük hızlı darbeler sonucu görünmeyen hasarlar (matris çatlağı, lif hasarı, delaminasyon vb.) oluşabildiği ve mukavemet kaybına uğradığı tespit edilmiştir. Üç farklı çapta (Ø54, Ø72 ve Ø96 mm) üretilen borular, ASTM D 7136 standardına uygun olarak 1,5, 2, 2,5 ve 3 m/s hızlarında darbelere tabi tutularak ön hasar oluşturulmuş, darbe etkilerinin dinamik davranışlara etkisi incelenmiştir. Çap büyüdükçe darbe etkisinin azaldığı ve hasar türünün çoklu hasar yerine delaminasyona dönüştüğü belirlenmiştir. Bu incelemelerde Kuvvet-Zaman, Kuvvet-Deplasman ve Enerji-Zaman grafikleri değerlendirilmiştir.

Günay (2022) yapmış olduğu çalışmada, prepreg karbon ve cam elyaf malzemelerle üretilen CGC ve GCG dizilimli hibrid kompozitlerin darbe hasarları incelenmiştir. Katkılı ve katkısız numuneler, 5, 10 ve 15 J enerjilerinde test edilmiş, CGC diziliminin daha kararlı bir yapı sergilediği ve nanolu numunelerin daha öngörülebilir hasar mekanizmalarına sahip olduğu belirlenmiştir. Artan darbe enerjisiyle matris çatlaması, fiber kırığı ve tabaka ayrılması gibi hasarlar gözlenmiştir.

Keküç (2022) yapmış olduğu çalışmada, $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip farklı çaplarda (Ø54, Ø72, Ø96 mm) karbon takviyeli polimer (KTP) kompozit boruların darbe ve çekme yükleri altındaki davranışları incelenmiştir. ASTM D 2290 standardına göre halka çekme testleri ve ASTM D 7136 standardına göre düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Çap artışının yer değiştirme miktarını artırırken çekme dayanımını azalttığı, hız artışıyla darbe bölgesindeki hasarların arttığı belirlenmiştir. Darbe sonrası analizlerde, matris çatlağı, debonding, elyaf hasarı, transfer çatlağı ve delaminasyon gibi hasar modları tespit edilmiştir.

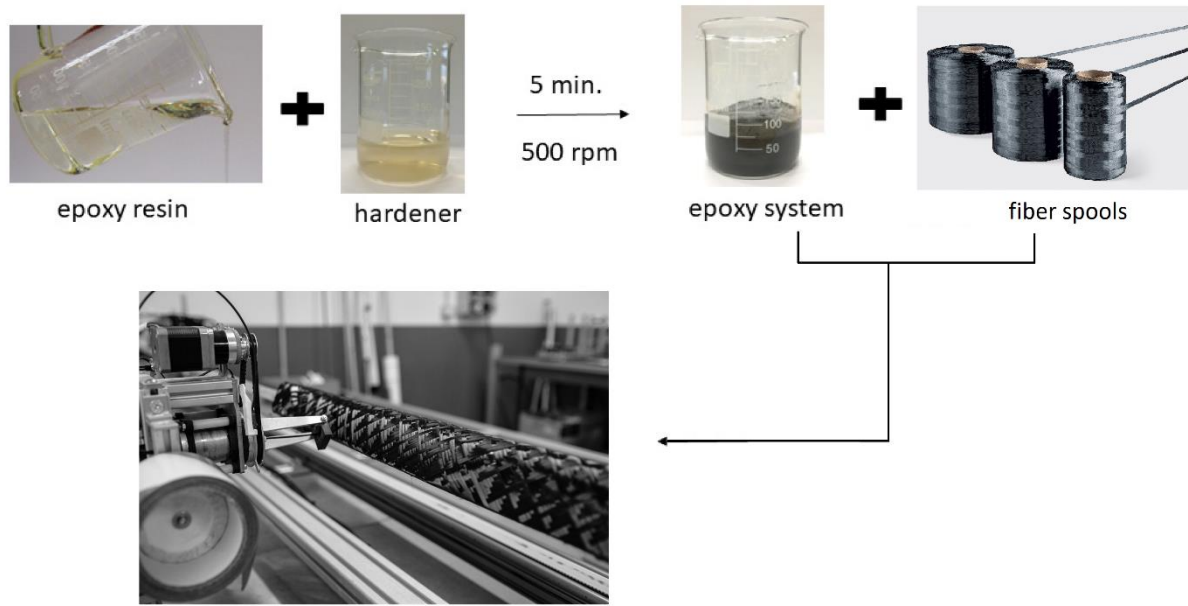
Akın (2018) yapmış olduğu çalışmada, cam elyaf takviyeli plastik (CTP) kompozit boruların hidrotermal yaşlandırma etkisiyle değişen mekanik özellikleri incelenmiştir. Filaman sarım yöntemiyle $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip 6, 8 ve 10 tabakalı CTP borular, 80 °C saf suda belirli sürelerle yaşlandırılmıştır. ASTM D 2290 standardına uygun halka çekme testleri ile boruların teğetsel dayanımı ölçülmüştür. Sonuçlar, yaşlandırma süresi uzadıkça teğetsel dayanımın azaldığını ve borularda meydana gelen hasar miktarının arttığını göstermiştir. Hasar türleri arasında matris çatlaması, tabaka ayrılması ve lif hasarları dikkat çekmiştir.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Kompozit Boruların Filaman Sarım Metodu İle Üretimi

Kompozit boruların filaman sarım yöntemiyle üretimi, yüksek mukavemet, hafiflik ve dayanıklılık gibi üstün mekanik özellikler sunan boruların üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemin temel prensibi, sürekli fiberlerin (cam, karbon, bazalt gibi) reçine ile ıslatılıp, belirli bir açıda bir mandrel (şekil verme kalıbı) üzerine sarılmasıdır. Bu işlem, borunun istenen özelliklerine göre özelleştirilebilir (Doğan, 2022). Şekil 3.1. de kompozit boruların filaman sarım yöntemi anlatılmıştır.



Şekil 3.1. Kompozit boruların filaman sarım yöntemi şematik gösterimi (Matykiewiww ve D, 2020).

Malzeme seçiminde karbon, cam, bazalt, aramid gibi yüksek dayanımlı lifler tercih edilir. Epoksi, polyester veya vinil ester reçineler, liflerle birlikte kullanılır. Reçine, liflerin birbirine yapışmasını sağlar ve son ürünün mekanik özelliklerini belirler. Boru şekli ve boyutları belirlenen mandrel, liflerin üzerine sarılacağı kalıptır. Bu mandrel silindirik bir yapıdadır ve üretim sonunda kalıptan çıkartılır. Sürekli lifler, bir havuz içinde bulunan reçineye daldırılır. Bu süreçte lifler reçine ile tamamen kaplanır ve sarım işlemine hazır hale gelir. Sarım işleminde lifler, mandrel üzerine belirli açılarla (genellikle 0°, 45°, 90° gibi) sarılır. Bu açılar, borunun mekanik özelliklerini (örneğin eksenel ve çevresel yük taşıma kapasitesi) belirler. Liflerin sarım yönü, borunun son dayanım performansı için kritik öneme sahiptir. Sertleşme işlemi reçine ile kaplanmış liflerin sarımı tamamlandıktan sonra, boru genellikle ısıtıl işlem uygulanarak (fırınlama) sertleşir. Bu aşama, kompozitin mukavemet kazanmasını sağlar.

sağlar. Sarım ve sertleşme işlemi bittikten sonra, mandrel borunun içinden dikkatlice çıkarılır ve boru kullanıma hazır hale gelir (Kara, 2012).

3.2. Numunelerin Kesim İşlemi

Numunelerin kesim işlemi, malzemelerin fiziksel ve mekanik testlere hazırlanması sürecinde önemli bir adımdır. Doğru kesim işlemi, numunenin yapısal bütünlüğünü koruyarak test sonuçlarının güvenilir olmasını sağlar. Genellikle metal, seramik, kompozit veya polimer malzemelerden yapılan numunelerin kesim işlemi, kullanılan malzemeye ve test türüne göre değişiklik gösterebilir (Kara vd, 2022).

Test numunelerinin çoğu, taşlama, bıçak veya testere ile mekanik olarak kesilir. Ancak, mekanik kesim sırasında oluşabilecek mekanik stresler ve sıcaklık artışı, malzeme özelliklerini değiştirebilir. Kesilecek numune, testin gerektirdiği boyutlara ve şekillere uygun olarak belirlenmelidir. Kesim esnasında numunenin stabil ve doğru pozisyonda olması önemlidir. Numunenin yanlış hizalanması, yanlış kesim veya malzemede hasara yol açabilir. Ayrıca kesim yapılacak yüzeyin pürüzsüz ve temiz olması, doğru bir kesim için önemlidir. Kesim sonrasında numunede kalan çapak ve pürüzler giderilir. Bu işlem, özellikle mikroskobik analiz veya mekanik testlerde numunenin yüzey kalitesini iyileştirmek için gereklidir. Teste hazırlanacak numunenin yüzeyi, eğer gerekli ise zımparalama veya cilalama işlemlerinden geçirilir. Bu, özellikle mikroyapı incelemesi veya optik analiz için önemlidir. Kesim sonrası numunenin boyutları kontrol edilir ve test için uygun olup olmadığına bakılır (Kara vd, 2022).

3.3. Düşük Hızlı Darbe Deneyi

Uçak kanatları, gövde parçaları ve diğer kompozit yapılar, kuş çarpması, dolu veya bakım sırasında oluşabilecek darbeler gibi düşük hızlı darbelere karşı dayanıklı olmalıdır. Bu testler, havacılık malzemelerinin güvenliğini ve dayanıklılığını değerlendirmek için yapılır (Kaveloğlu vd, 2024).

Araç gövdeleri, tamponlar ve diğer yapısal parçalar, düşük hızda çarpışmalar veya darbeler sırasında enerji soğurabilmelidir. Bu nedenle, malzemelerin darbe dayanımı otomotiv tasarımında kritik bir parametredir (Kaveloğlu vd, 2024).

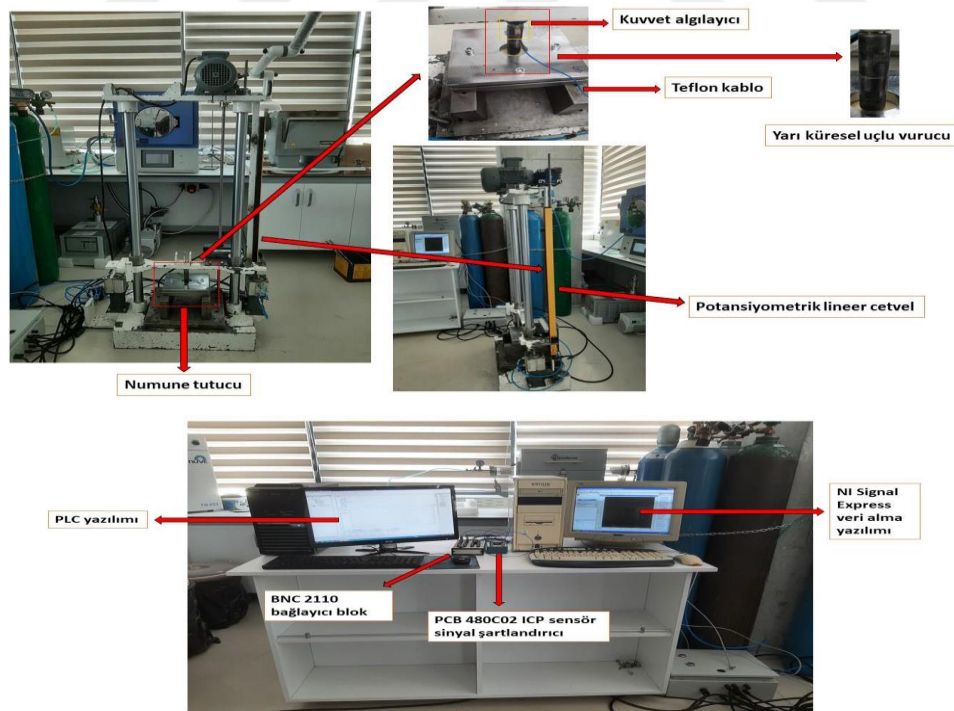
Kompozit ve polimer bazlı yapı malzemeleri, düşük hızda düşen yükler veya darbelere karşı dayanıklı olmalıdır. Bu testler, yapı malzemelerinin güvenliğini ve dayanıklılığını artırmak için yapılır. Kasklar, koruma ekipmanları ve diğer spor malzemeleri, düşük hızda darbeye maruz kaldığında kullanıcının güvenliğini sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Düşük hızlı darbe testleri, bu malzemelerin yeterince koruma sağlayıp sağlamadığını ölçmek için kullanılır (Kaveloğlu vd, 2024).

Düşük hızlı darbe testleri, malzemelerin günlük kullanımda karşılaşılabileceği darbe etkilerini simüle ederek gerçek hayatta karşılaşılabilecek hasarları öngörmeyi sağlar. Malzemelerin darbe anında ne tür hasarlar oluşturabileceği (örneğin çatlama, delaminasyon, yüzey kırılması) belirlenir. Bu testler sayesinde malzemelerin darbeye karşı daha dayanıklı olacak şekilde optimize edilmesi sağlanır (Kaveloğlu vd, 2024).

3. 3.1. Darbe Deneylerinin Yapılması

Teste tabi tutulacak malzeme numuneleri, belirli standartlara uygun şekilde hazırlanır. ASTM, ISO gibi uluslararası standartlar, test numunelerinin boyutları ve şekilleri hakkında rehberlik eder. Kompozit malzemeler gibi çok katmanlı malzemeler test edilecekse, katman sayısı, fiber yönelimi gibi faktörler dikkate alınır. Darbe çekici serbest bırakılarak numuneye çarptırılır. Darbe sırasında numune üzerine anlık bir yük uygulanır. Darbe anında uygulanan kuvvet, numunenin deformasyon miktarı ve enerji soğurması gibi veriler sensörler aracılığıyla kaydedilir. Deney sırasında, malzemenin üzerine uygulanan darbe kuvveti ile malzemenin gösterdiği deformasyon arasındaki ilişki grafiksel olarak gösterilir (Günöz, 2022).

Şekil 3.2’de çalışmada kullanılan düşük hızlı darbe test cihazı gösterilmiştir.



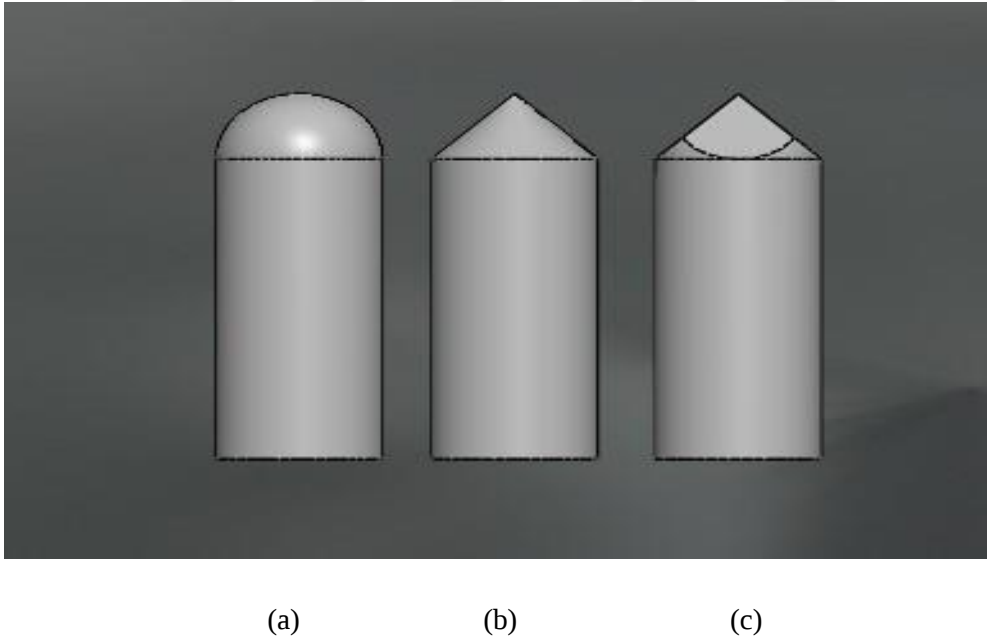
Şekil 3.2. Düşük hızlı darbe test cihazı (Günöz, 2022).

3. 3.2. Darbe Sonrası Hasarın İncelenmesi

Darbe sonrası numune gözle ve mikroskopik yöntemlerle incelenir. Numune üzerindeki hasar, malzemenin türüne göre farklılık gösterebilir (Uyaner vd, 2023). Delaminasyon, kompozit malzemelerde katmanlar arasında ayrılma olabilir. Çatlama veya kırılma, metal ve plastik malzemelerde darbe sonucu çatlama veya kırılma meydana gelebilir. Yüzey hasarı, yüzeyde çökme, çatlak ya da delik oluşumu gözlemlenir. Oluşan hasar türleri ve boyutları, malzemenin darbeye karşı dayanımını belirlemede kritik öneme sahiptir.

Test sırasında elde edilen enerji soğurma kapasitesi, maksimum kuvvet, deformasyon ve hasar mekanizmaları değerlendirilir. Malzemenin darbe sırasında ne kadar enerji soğurduğu hesaplanır. Bu, malzemenin darbeye karşı dayanıklılığını belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Oluşan hasarın büyüklüğü ve türü, malzemenin uygulama alanındaki performansı hakkında bilgi verir (Uyaner vd, 2023).

Uç geometrileri, darbe testlerinde kullanılan vurucu başlıklarının şeklini ve tasarımını ifade eder. Farklı uç geometrileri, kompozit malzemelerin darbeye nasıl tepki verdiğini anlamak için kullanılır (Kara vd, 2016). Şekil 3.3'te farklı uç geometrileri gösterilmiştir.



Şekil 3. 3. a) 24 mm yarıküresel uç b) 90° konik uç c) 120° piramit (Uyaner ve Kara, 2012).

Çalışmamızda kullandığımız uç geometrileri ; Küresel uç (Hemisferik veya Küresel Uçlu Vurucu), bu tür vurucular, malzemeye eşit dağılan bir kuvvet uygular ve daha geniş bir alana darbe yapar. Yumuşak yüzeyli kompozitlerde yaygın olarak kullanılır. Konik uç, sivri uçlu vurucular, darbenin tüm enerjisini malzemenin küçük bir noktasına yoğunlaştırır. Bu, malzeme üzerinde delinme

ve çatlamaya neden olabilir. Daha yüksek penetrasyon kapasitesine sahiptir. Piramidal uç, piramit şeklindeki vurucular, genellikle sivri ve köşeli vuruculardır. Daha keskin bir darbe ile malzemede kesilme ve çatlamaya yol açabilir (Kara vd, 2016).

Her bir geometri, darbe sırasında malzemenin nasıl deformasyon ve hasar aldığını farklı şekillerde etkiler. Bu uç geometrilerinin malzeme üzerindeki etkileri, düşük hızlı darbe testlerinde incelenerek, hibrid kompozitlerin dayanıklılığı ve mekanik performansına dair önemli veriler elde edilir. Biz bu çalışmamızda 24 mm yarıküresel, 90⁰ konik ve 120⁰ piramit ucu kullandık.





4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1 . Düşük Hızlı Darbe Testi Sonuçları

Üretilen, karbon/karbon/karbon (KKK), cam/cam/cam (CCC), bazalt/bazalt/bazalt (BBB), karbon/bazalt/karbon (KBK), karbon/cam/karbon (KCK), cam/karbon/cam (CKC), cam/bazalt/cam (CBC), bazalt/karbon/bazalt (BKB) ve bazalt/cam/bazalt (BCB) istif sıralarına sahip altı tabakalı dokuz çeşit kompozit boru numuneler öncelikle darbe testleri için uygun ölçülere getirilmiştir.

Saf karbon/epoksi, cam/epoksi, bazalt/epoksi ve farklı elyaf takviyeli hibrid kompozit numunelerin 20J enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Darbe testlerinde 24 mm yarı küresel, 90° konik ve 120° piramit uçlu geometriye sahip üç farklı vurucu kullanılmıştır. Yapılan darbe testleri ile karbon, cam ve bazalt takviyesinin ve hibritleme durumunun kompozit numunelerin darbe cevabına etkisi ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Her bir testten elde edilen kuvvet-zaman ve kuvvet-deplasman değişimleri ayrıntılı olarak sunulmuştur.

4.1.1. Kuvvet -Zaman Eğrileri

Üretimi gerçekleştirilen saf karbon/epoksi, cam/epoksi ve bazalt/epoksi kompozit numunelerin farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J darbe enerji seviyesinde elde edilen temas kuvveti-zaman değişimleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.1 incelendiğinde tüm vurucu geometrileri için, düşük hızlı darbe testi esnasında vurucunun numune yüzeyine temas etmesi ile kuvvetin hızla arttığı, en büyük değerine ulaştığı ve daha sonra sıfıra düştüğü görülmektedir. Kuvvet-zaman değişimleri çingirak eğrisi şeklinde gerçekleşmiştir. Tüm vurucu geometrileri için kuvvet-zaman grafiklerinde temas kuvvetinin hızla arttığı başlangıç bölgesinde salınımlar meydana geldiği görülmektedir. Bu salınımlar kompozit numunelerde farklı hasar mekanizmalarının oluştuğuna işaret eder (Kara, 2006). Kuvvet en büyük değerine ulaşınca kadar hasar gelişimi devam etmektedir.

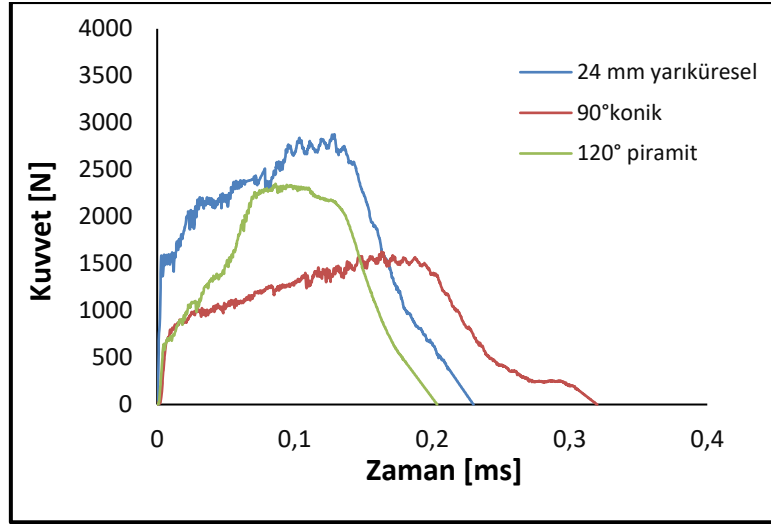
Şekil 4.1-a’da karbon-epoksi kompozit borulara farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J enerji seviyesinde yapılan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet zaman değişimleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde en büyük temas kuvvetinin 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. En küçük temas kuvveti ise 90° konik uçlu vurucudan elde edilmiştir. Bu durum vurucunun sivrilmesi arttıkça temas kuvvetinin düştüğünü göstermektedir (Uyaner 2012). Daha sivri geometriye sahip vurucu darbe esnasında, kompozit numuneye batmaya başladığı için temas kuvvetinin daha yüksek değerlere ulaşmasına izin vermemiştir. Temas süresi değerleri incelendiğinde ise en büyük temas süresi değerinin 90° konik uçlu vurucudan, en küçük temas süresi değerinin ise 120° piramit uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir.

Şekil 4.1-b’de cam-epoksi kompozit borulara farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J enerji seviyesinde yapılan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet zaman değişimleri

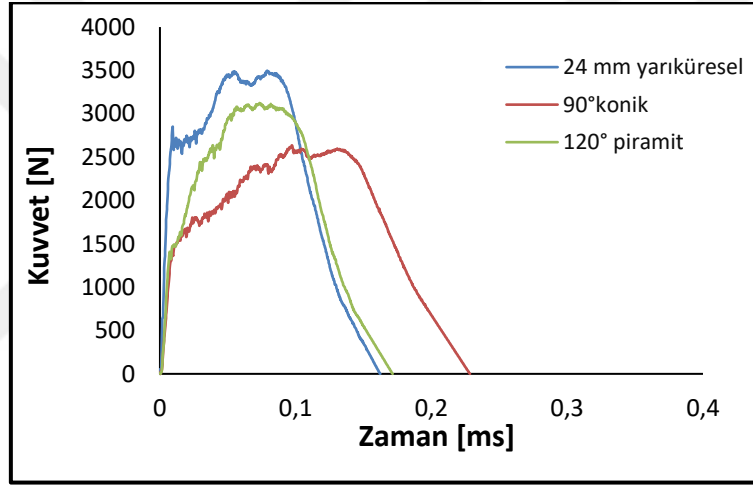
verilmiştir. Grafik incelendiğinde karbon numunede olduğu gibi, en büyük temas kuvvetinin 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. En küçük temas kuvveti ise 90° konik uçlu vurucudan elde edilmiştir. Temas süresi değerleri incelendiğinde ise en büyük temas süresi değerinin karbon numunede olduğu gibi 90° konik uçlu vurucudan elde edildiği ancak en küçük temas süresi değerinin ise karbon numuneden farklı olarak 24mm yarıküresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir.

Şekil 4.1-c’de bazalt-epoksi kompozit borulara farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J enerji seviyesinde yapılan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet zaman değişimleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde karbon ve cam numunede olduğu gibi, en büyük temas kuvvetinin 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. En küçük temas kuvveti ise diğerlerinde olduğu gibi 90° konik uçlu vurucudan elde edilmiştir. Temas süresi değerleri incelendiğinde ise en büyük temas süresi değerinin karbon numunede olduğu gibi, 90° konik uçlu vurucudan elde edildiği en küçük temas süresi değerinin ise yine karbon numunede olduğu gibi 120° piramit uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir.

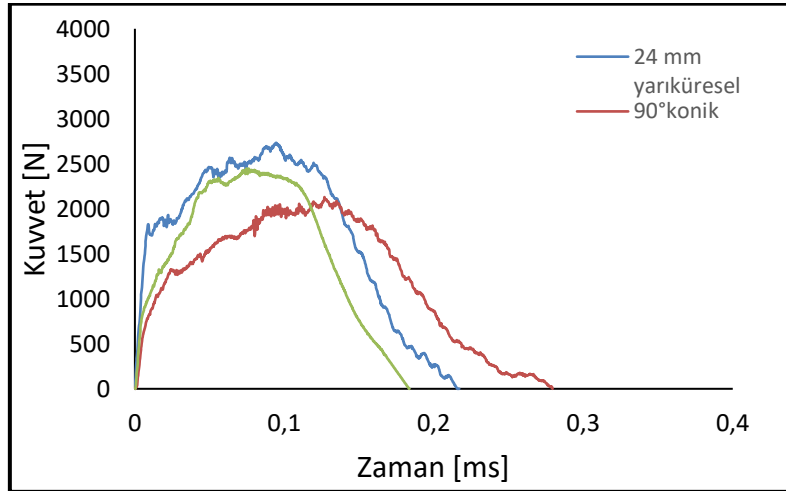
Karbon/epoksi, cam/epoksi ve bazalt/epoksi kompozit numunelerin farklı uç geometrilerine sahip vuruculardan elde edilen kuvvet zaman değişimleri karşılaştırıldığında üç farklı vurucu geometrisi için de en büyük temas kuvveti değerleri cam/epoksi numuneden elde edilmiştir. En düşük temas kuvveti değerleri ise genel olarak karbon/epoksi numunelerden elde edilmiştir. Bunun en önemli nedeni karbon/epoksi kompozit numunelerin daha gevrek yapıya sahip olmalarıdır. Daha gevrek yapıya sahip oldukları için darbe anında oluşan iç kırılmalar temas kuvveti değerlerinin çok yükselmesine engel olmuştur. Cam/epoksi numunenin gevreklik değeri diğer numunelere göre daha az olduğu için darbe esnasında daha büyük kuvvet değerlerine ulaşılmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.1. 20 J enerji seviyesinde a) karbon, b) cam ve c) bazalt elyaf epoksi numune için farklı uç geometrilerinde elde edilen kuvvet zaman değişimleri.

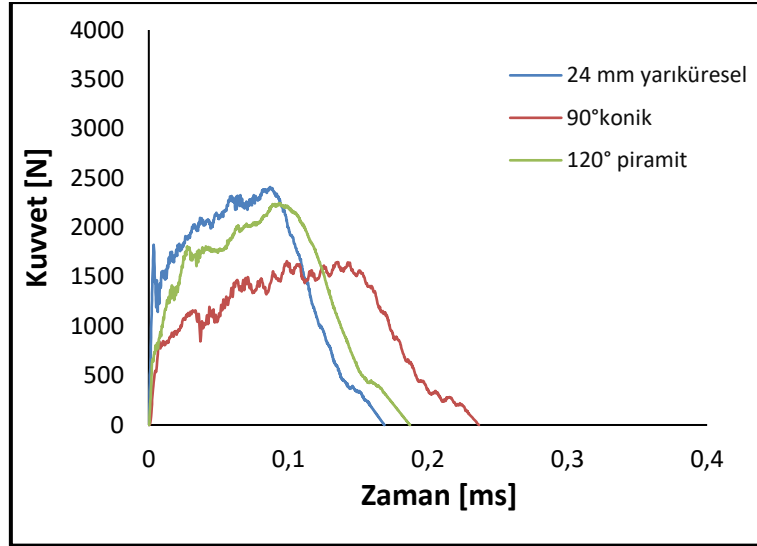
Şekil 4.2-a’da KBK hibrid kompozit borulara farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J enerji seviyesinde yapılan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet zaman değişimleri verilmiştir.

Grafik incelendiğinde hibrid olmayan numunelerde olduğu gibi, en büyük temas kuvvetinin 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. En küçük temas kuvveti ise 90° konik uçlu vurucudan elde edilmiştir. Temas süresi değerleri incelendiğinde ise en büyük temas süresi değerinin hibrid olmayan numunelerde olduğu gibi 90° konik uçlu vurucudan elde edildiği ve en küçük temas süresi değerinin ise saf cam/ epoksi numunesinde olduğu gibi 24mm yarıküresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir.

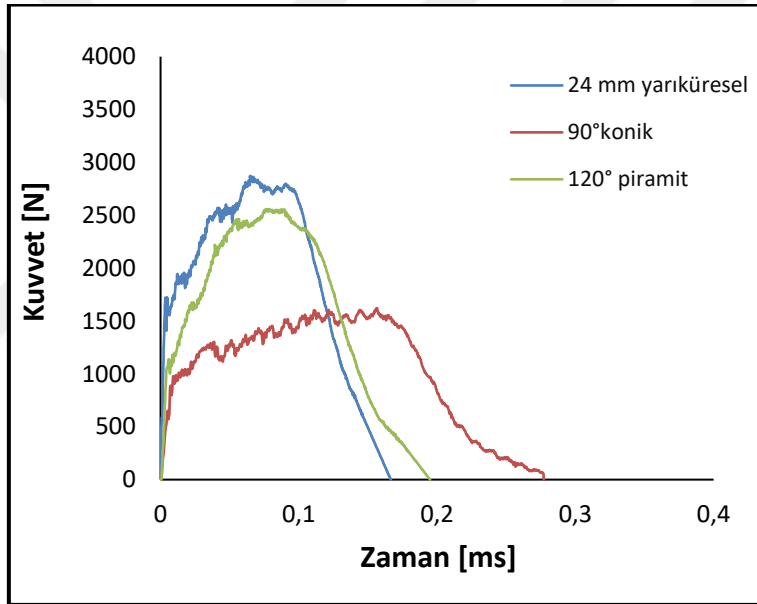
Şekil 4.2-b’de KCK hibrid kompozit borulara farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J enerji seviyesinde yapılan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet zaman değişimleri verilmiştir.

Grafik incelendiğinde KBK numunesinde olduğu gibi, en büyük temas kuvvetinin 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. En küçük temas kuvveti ise 90° konik uçlu vurucudan elde edilmiştir. Temas süresi değerleri incelendiğinde ise en büyük temas süresi değerinin KBK numunesinde olduğu gibi 90° konik uçlu vurucudan elde edildiği ve en küçük temas süresi değerinin ise KBK numunesinde olduğu gibi 24mm yarıküresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir.

KBK ve KCK numunelerin farklı uç geometrilerine sahip vuruculardan elde edilen kuvvet zaman değişimleri karşılaştırıldığında üç farklı vurucu geometrisi için de en büyük temas kuvveti değerleri KCK numunelerinden elde edilmiştir. En düşük temas kuvveti değeri ise KBK numunelerinden elde edilmiştir. Bunun en önemli nedeni KBK hibrid kompozit numunelerin daha gevrek yapıya sahip olmalarıdır. Daha gevrek yapıya sahip oldukları için darbe anında oluşan iç kırılmalar temas kuvveti değerlerinin çok yükselmesine engel olmuştur. KCK numunelerinin gevreklik değeri diğer numunelere göre daha az olduğu için darbe esnasında daha büyük kuvvet değerlerine ulaşılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.2. 20 J enerji seviyesinde a) karbon-bazalt-karbon b) karbon-cam-karbon elyaf hibrid numune için farklı uç geometrilerinde elde edilen kuvvet zaman değişimleri.

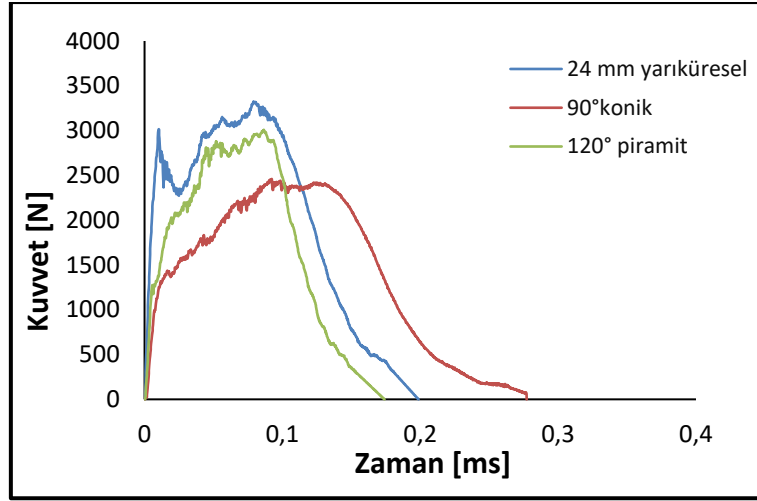
Şekil 4.3-a'da CKC hibrid kompozit borulara farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J enerji seviyesinde yapılan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet zaman değişimleri verilmiştir.

Grafik incelendiğinde KBK ve KCK numunelerinde olduğu gibi, en büyük temas kuvvetinin 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. En küçük temas kuvveti ise 90° konik uçlu vurucudan elde edilmiştir. Temas süresi değerleri incelendiğinde ise en büyük temas süresi değerinin KBK ve KCK numunelerinde olduğu gibi 90° konik uçlu vurucudan elde edildiği ve en küçük temas süresi değerinin ise KBK ve KCK numunelerinden farklı olarak saf karbon/epoksi ve saf bazalt/epoksi numunelerinde olduğu gibi 120° piramit uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir.

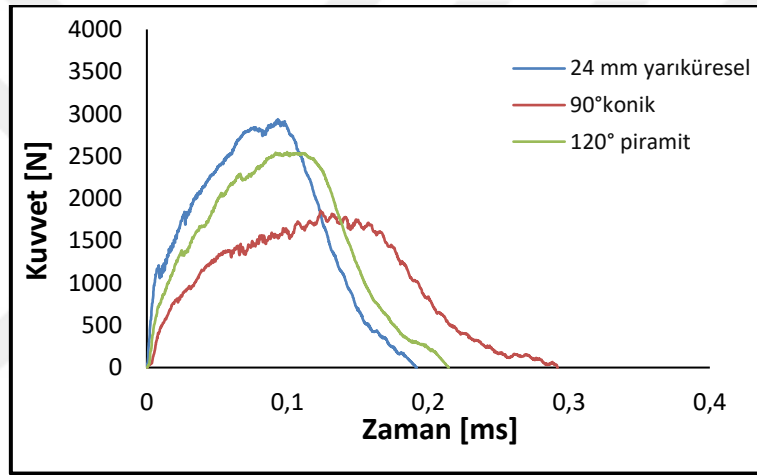
Şekil 4.3-b’de CBC hibrid kompozit borulara farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J enerji seviyesinde yapılan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet zaman değişimleri verilmiştir.

Grafik incelendiğinde CKC numunesinde olduğu gibi, en büyük temas kuvvetinin 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. En küçük temas kuvveti ise 90° konik uçlu vurucudan elde edilmiştir. Temas süresi değerleri incelendiğinde ise en büyük temas süresi değerinin CKC numunesinde olduğu gibi 90° konik uçlu vurucudan elde edildiği ve en küçük temas süresi değerinin ise CKC numunesinden farklı olarak aynı saf cam/epoksi numunesinde olduğu gibi 24mm yarıküresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir.

CBC ve CKC numunelerin farklı uç geometrilerine sahip vuruculardan elde edilen kuvvet zaman değişimleri karşılaştırıldığında üç farklı vurucu geometrisi için de en büyük temas kuvveti değerleri CKC numunelerinden elde edilmiştir. En düşük temas kuvveti değeri ise CBC numunelerinden elde edilmiştir. Bunun en önemli nedeni CBC hibrid kompozit numunelerin daha gevrek yapıya sahip olmalarıdır. Daha gevrek yapıya sahip oldukları için darbe anında oluşan iç kırılmalar temas kuvveti değerlerinin çok yükselmesine engel olmuştur. CKC numunelerinin gevreklik değeri diğer numunelere göre daha az olduğu için darbe esnasında daha büyük kuvvet değerlerine ulaşılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.3. 20 J enerji seviyesinde a) Cam-Karbon-Cam b) Cam-Bazalt-Cam elyaf hibrid numune için farklı uç geometrilerinde elde edilen kuvvet zaman değişimleri.

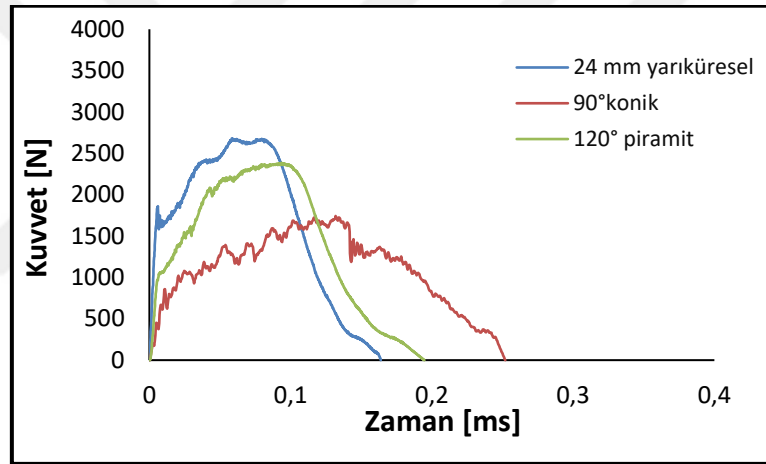
Şekil 4.4-a'da BKB hibrid kompozit borulara farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J enerji seviyesinde yapılan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet zaman değişimleri verilmiştir.

Grafik incelendiğinde CKC ve CBC numunelerinde olduğu gibi, en büyük temas kuvvetinin 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. En küçük temas kuvveti ise 90° konik uçlu vurucudan elde edilmiştir. Temas süresi değerleri incelendiğinde ise en büyük temas süresi değerinin CKC ve CBC numunelerinde olduğu gibi 90° konik uçlu vurucudan elde edildiği ve en küçük temas süresi değerinin ise CBC numunesinde olduğu gibi 24mm yarıküresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir.

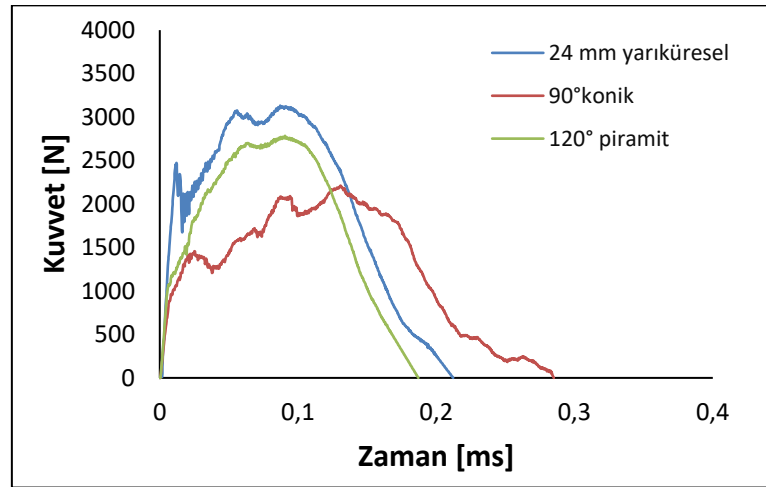
Şekil 4.4-b'de BCB hibrid kompozit borulara farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J enerji seviyesinde yapılan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet zaman değişimleri verilmiştir.

Grafik incelendiğinde CKC numunesinde olduğu gibi, en büyük temas kuvvetinin 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. En küçük temas kuvveti ise 90° konik uçlu vurucudan elde edilmiştir. Temas süresi değerleri incelendiğinde ise en büyük temas süresi değerinin CKC numunesinde olduğu gibi 90° konik uçlu vurucudan elde edildiği ve en küçük temas süresi değerinin ise CKC numunesinde olduğu gibi 120° piramit uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir.

BCB ve BKB numunelerin farklı uç geometrilerine sahip vuruculardan elde edilen kuvvet zaman değişimleri karşılaştırıldığında üç farklı vurucu geometrisi için de en büyük temas kuvveti değerleri BCB numunelerinden elde edilmiştir. En düşük temas kuvveti değeri ise BKB numunelerinden elde edilmiştir. Bunun en önemli nedeni BKB hibrid kompozit numunelerin daha gevrek yapıya sahip olmalarıdır. Daha gevrek yapıya sahip oldukları için darbe anında oluşan iç kırılmalar temas kuvveti değerlerinin çok yükselmesine engel olmuştur. BCB numunelerinin gevreklik değeri diğer numunelere göre daha az olduğu için darbe esnasında daha büyük kuvvet değerlerine ulaşılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.4. 20 J enerji seviyesinde a) Bazalt-Karbon-Bazalt b) Bazalt-Cam-Bazalt elyaf hibrid numune için farklı uç geometrilerinde elde edilen kuvvet zaman değişimleri.

4.1.2. Kuvvet-Deplasman Eğrileri

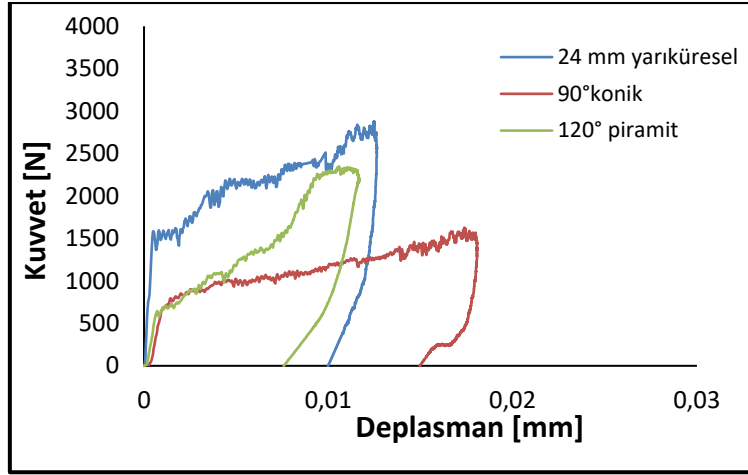
Düşük hızlı darbeye maruz kalan kompozit malzemelerin dinamik cevabını ve darbe davranışını incelemek için kullanılan bir diğer değişim grafiği kuvvet-deplasman (kuvvet-çökme) grafikleridir. Üretimi gerçekleştirilen saf karbon/epoksi, cam/epoksi ve bazalt/epoksi kompozit numunelerin farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J darbe enerji seviyesinde elde edilen temas kuvveti-deplasman değişimleri Şekil 4.5'te verilmiştir. Şekil 4.5 incelendiğinde tüm vurucu geometrileri için düşük hızlı darbe testi esnasında vurucunun kompozit numuneye temas etmesi ile numunede deplasman (çökme) başlamış ve kuvvet en büyük değerine ulaşıncaya kadar devam etmiştir. Daha sonra vurucunun kompozit numuneden geri sekmesine bağlı olarak kuvvet değeri sıfıra doğru düşmüş ancak deplasman değeri sıfıra düşmemiştir. Numunede bir miktar kalıcı deplasman oluşmuştur. Kuvvet-deplasman eğrisinin artış kısmındaki eğim, darbe yüküne karşı numunenin göstermiş olduğu dirençten dolayı eğilme rijitliği olarak adlandırılır. Eğilme rijitliğindeki salınımlar ve değişimler hasarlanmayı göstermektedir (Kara, 2012). Vurucu geometrisinin değişmesiyle kuvvet deplasman değişiminden elde edilen en büyük temas kuvveti ve en büyük deplasman değerleri değişim göstermiştir. Buna bağlı olarak eğilme rijitliği değerlerinde de farklılık ortaya çıkmıştır.

Şekil 4.5-a'da karbon-epoksi kompozit borulara farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J enerji seviyesinde yapılan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet-deplasman değişimleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde en büyük temas kuvvetinin 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. En büyük deplasman değeri 90° konik uçlu vurucudan elde edilirken en küçük deplasman değerinin 120° piramit uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. Bunun en önemli nedeni vurucunun sivri olmasından dolayı numuneye batmasıdır. Numuneye batma gerçekleşince deplasman değerinde artış görülmüştür. En büyük eğilme rijitliği değeri ise 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edilmiştir. Numuneye batma olmadığı için bu vurucuya karşı kompozit yapı daha fazla direnç göstermiştir. Diğer taraftan 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edilen en büyük deplasman değerinin piramit vurucudan yüksek olması karbon epoksi numunede çökmeye bağlı olarak oluşan hasarların daha fazla olması ile ifade edilebilir.

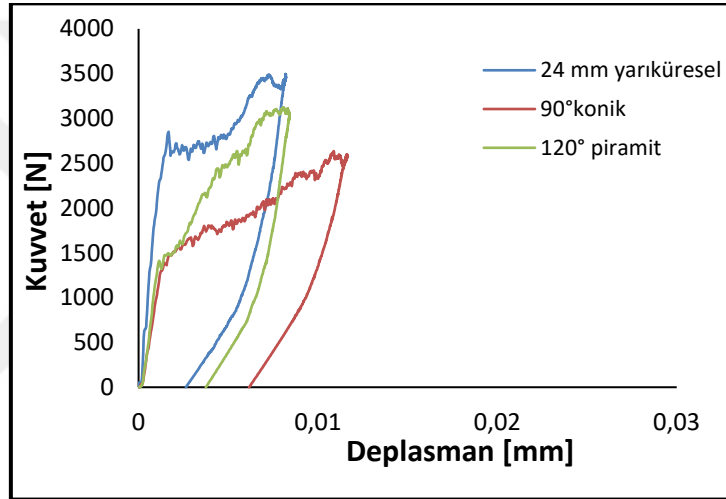
Şekil 4.5-b'de cam-epoksi kompozit borulara farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J enerji seviyesinde yapılan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet-deplasman değişimleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde en büyük temas kuvvetinin karbon-epoksi numunede olduğu gibi 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. En büyük deplasman değeri karbon-epoksi numunede olduğu gibi 90° konik uçlu vurucudan elde edilirken en küçük deplasman değeri karbon-epoksi numuneden farklı olarak 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edilmiştir. Piramit uçlu vurucuda sivri yapıdan dolayı yarı küresel vurucuya göre batma daha fazla gerçekleştiği için deplasman değerinde artış görülmüştür. En büyük eğilme rijitliği değeri ise karbon-epoksi numunede olduğu gibi 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edilmiştir.

Şekil 4.5-c’de bazalt-epoksi kompozit borulara farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J enerji seviyesinde yapılan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet-deplasman değişimleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde en büyük temas kuvvetinin önceki numunelerde olduğu gibi 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. En büyük deplasman değeri de önceki numunelerde olduğu gibi 90⁰ konik uçlu vurucudan elde edilmiştir. Bazalt-epoksi numunede 90⁰ konik uçlu vurucu önceki numunelere göre çok daha fazla batmış ve karakteristik olarak daha farklı bir grafik elde edilmiştir. En küçük deplasman değeri karbon-epoksi numunede olduğu gibi 120⁰ piramit uçlu vurucudan elde edilmiştir. En büyük eğilme rijitliği değeri ise önceki numunelerde olduğu gibi 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edilmiştir.

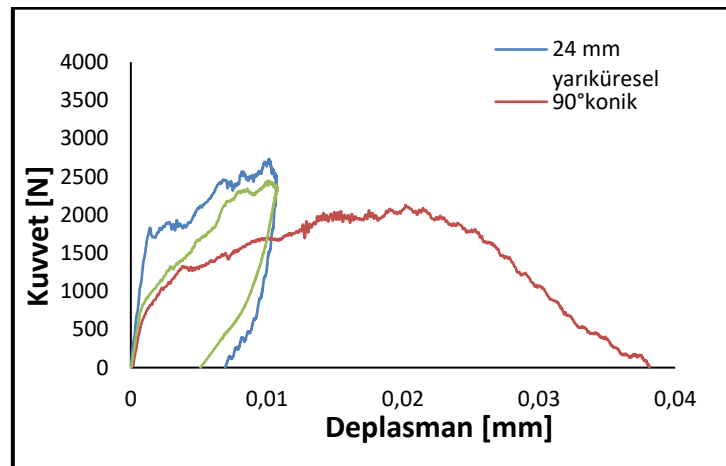
Karbon/epoksi, cam/epoksi ve bazalt/epoksi kompozit numunelerin farklı uç geometrilerine sahip vuruculardan elde edilen kuvvet zaman değişimleri karşılaştırıldığında üç farklı vurucu geometrisi için de en büyük temas kuvveti değerleri cam/epoksi numuneden elde edilmiştir. Tüm vurucu geometrileri için en büyük deplasman değerleri cam-epoksi numunelerden elde edilmiştir. En düşük deplasman değerleri ise genel olarak karbon numunelerden elde edilmiştir. Bunun en önemli nedeni karbon/epoksi kompozit numunelerin daha gevrek yapıya sahip olmalarıdır. Daha gevrek yapıya sahip oldukları için darbe anında oluşan çökme miktarı değerlerinin çok yükselmesine engel olmuştur. Cam/epoksi numunenin gevreklik değeri diğer numunelere göre daha az olduğu için darbe esnasında daha büyük deplasman değerlerine ulaşmıştır.



(a)



(b)

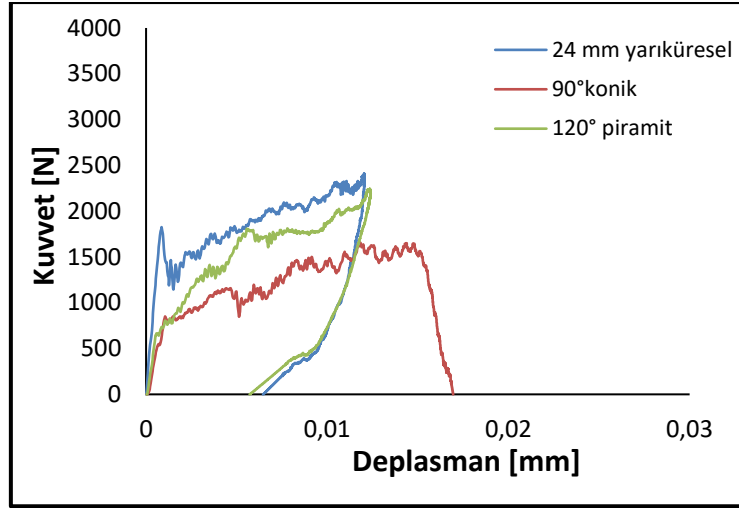


(c)

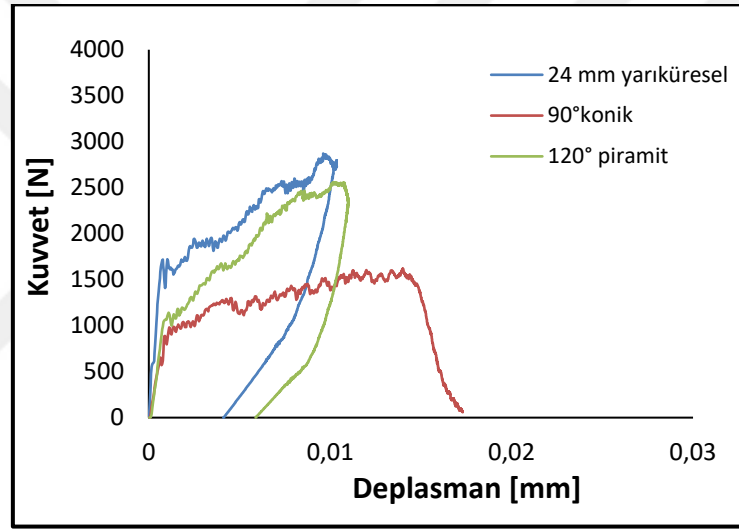
Şekil 4.5. 20 J enerji seviyesinde a) Karbon, b) Cam Ve c) Bazalt elyaf epoksi numune için farklı uç geometrilerinde elde edilen kuvvet deplasman değişimleri.

Şekil 4.6-a’da KBK kompozit borulara farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J enerji seviyesinde yapılan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet-deplasman değişimleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde en büyük temas kuvvetinin 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. Aynı karbon-epoksi numunesinde olduğu gibi en büyük deplasman değeri 90° konik uçlu vurucudan elde edilirken en küçük deplasman değerinin 120° piramit uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. Bunun en önemli nedeni vurucunun sivri olmasından dolayı numuneye batmasıdır. Numuneye batma gerçekleşince deplasman değerinde artış görülmüştür. En büyük eğilme rijitliği değeri ise 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edilmiştir. Numuneye batma olmadığı için bu vurucuya karşı kompozit yapı daha fazla direnç göstermiştir. Diğer taraftan 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edilen en büyük deplasman değerinin piramit vurucudan yüksek olması KBK numunesinde çökmeye bağlı olarak oluşan hasarların daha fazla olması ile ifade edilebilir.

Şekil 4.6-b’de KCK kompozit borulara farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J enerji seviyesinde yapılan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet-deplasman değişimleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde en büyük temas kuvvetinin KBK numunede olduğu gibi 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. En büyük deplasman değeri KBK numunede olduğu gibi 90° konik uçlu vurucudan elde edilirken en küçük deplasman değeri KBK numuneden farklı olarak cam-epoksi numunede olduğu gibi 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edilmiştir. Piramit uçlu vurucuda sivri yapıdan dolayı yarı küresel vurucuya göre batma daha fazla gerçekleştiği için deplasman değerinde artış görülmüştür. En büyük eğilme rijitliği değeri ise KBK numunede olduğu gibi 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edilmiştir.



(a)



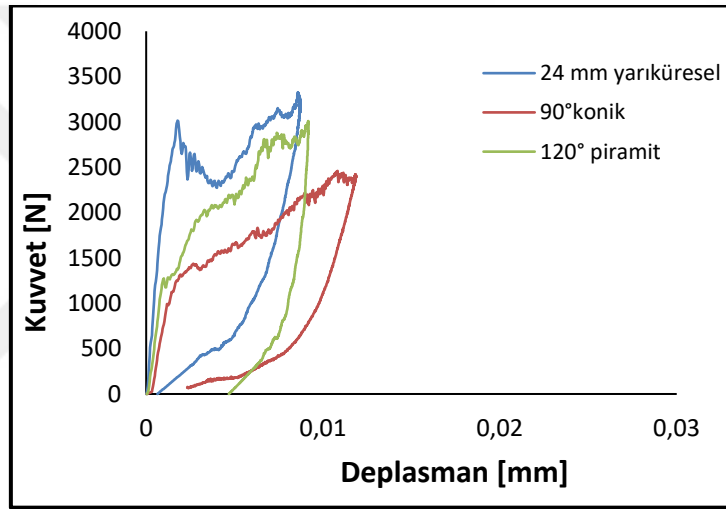
(b)

Şekil 4.6. 20 J enerji seviyesinde a)Karbon-Bazalt-Karbon b)Karbon-Cam-Karbon elyaf hibrid numune için farklı uç geometrilerinde elde edilen kuvvet deplasman değişimleri.

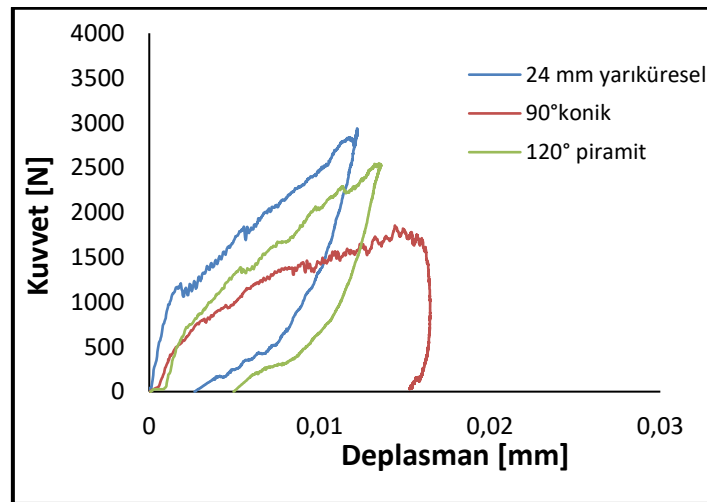
Şekil 4.7-a’da CKC kompozit borulara farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J enerji seviyesinde yapılan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet-deplasman değişimleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde en büyük temas kuvvetinin 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. Aynı karbon-epoksi numunesinde olduğu gibi en büyük deplasman değeri 90⁰ konik uçlu vurucudan elde edilirken en küçük deplasman değerinin 120⁰ piramit uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. Bunun en önemli nedeni vurucunun sivri olmasından dolayı numuneye batmasıdır. Numuneye batma gerçekleşince deplasman değerinde artış görülmüştür. En büyük eğilme rijitliği değeri ise 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edilmiştir. Numuneye batma olmadığı için bu vurucuya karşı kompozit yapı daha fazla direnç göstermiştir. Diğer taraftan 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan

elde edilen en büyük deplasman değerinin piramit vurucudan yüksek olması KBK numunesinde çökmeye bağlı olarak oluşan hasarların daha fazla olması ile ifade edilebilir.

Şekil 4.7-b’de CBC kompozit borulara farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J enerji seviyesinde yapılan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet-deplasman değişimleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde en büyük temas kuvvetinin CKC numunede olduğu gibi 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. En büyük deplasman değeri KCK numunede olduğu gibi 90° konik uçlu vurucudan elde edilirken en küçük deplasman değeri yine KCK numunede olduğu gibi 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edilmiştir. Piramit uçlu vurucuda sivri yapıdan dolayı yarı küresel vurucuya göre batma daha fazla gerçekleştiği için deplasman değerinde artış görülmüştür. En büyük eğilme rijitliği değeri ise CBC numunede olduğu gibi 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edilmiştir.



(a)

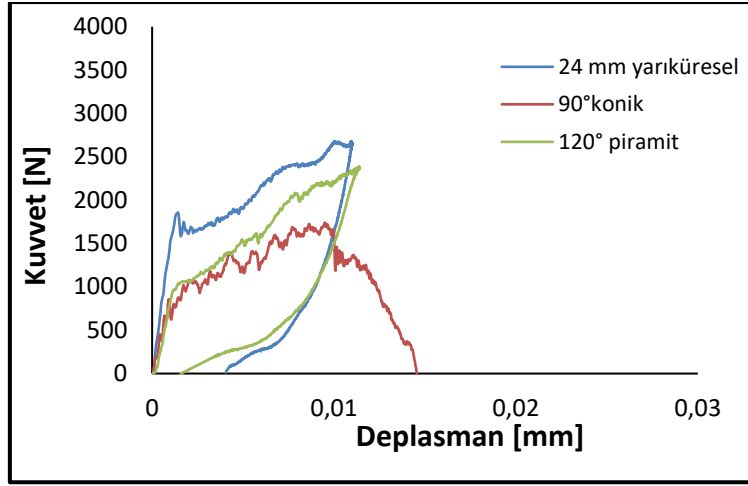


(b)

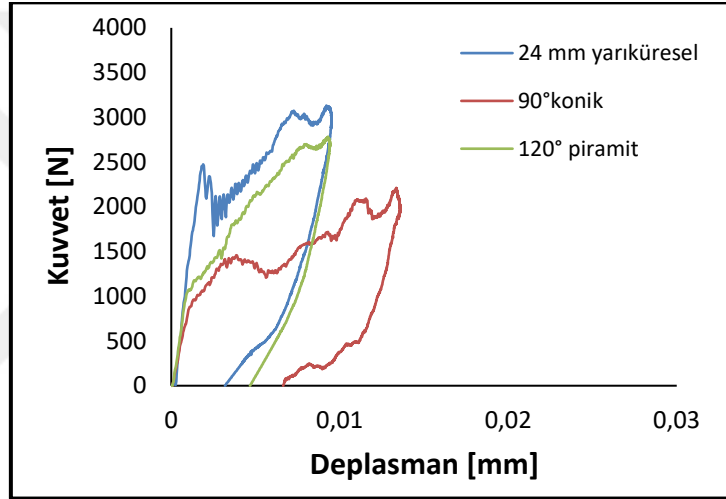
Şekil 4.7. 20 J enerji seviyesinde a) Cam-Karbon-Cam, b) Cam-Bazalt-Cam elyaf hibrid numune için farklı uç geometrilerinde elde edilen kuvvet deplasman değişimleri.

Şekil 4.8-a’da BKB kompozit borulara farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J enerji seviyesinde yapılan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet-deplasman değişimleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde en büyük temas kuvvetinin 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. Aynı CBC numunesinde olduğu gibi en büyük deplasman değeri 90⁰ konik uçlu vurucudan elde edilirken en küçük deplasman değeri CBC numuneden farklı olarak 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. Bunun en önemli nedeni vurucunun sivri olmasından dolayı numuneye batmasıdır. Numuneye batma gerçekleşince deplasman değerinde artış görülmüştür. En büyük eğilme rijitliği değeri ise 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edilmiştir. Numuneye batma olmadığı için bu vurucuya karşı kompozit yapı daha fazla direnç göstermiştir.

Şekil 4.8-b’de BCB kompozit borulara farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J enerji seviyesinde yapılan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet-deplasman değişimleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde en büyük temas kuvvetinin BKB numunede olduğu gibi 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edildiği görülmektedir. En büyük deplasman değeri BKB numunede olduğu gibi 90⁰ konik uçlu vurucudan elde edilirken en küçük deplasman değeri yine CBC numunede olduğu gibi 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edilmiştir. Piramit uçlu vurucuda sivri yapıdan dolayı yarı küresel vurucuya göre batma daha fazla gerçekleştiği için deplasman değerinde artış görülmüştür. En büyük eğilme rijitliği değeri ise BCB numunede olduğu gibi 24 mm yarı küresel uçlu vurucudan elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.8. 20 J enerji seviyesinde a) Bazalt-Karbon-Bazalt, b) Bazalt-Cam-Bazalt elyaf hibrid numune için farklı uç geometrilerinde elde edilen kuvvet deplasman değişimleri.

4.2. Düşük Hızlı Darbe Testi Hasar Analizi

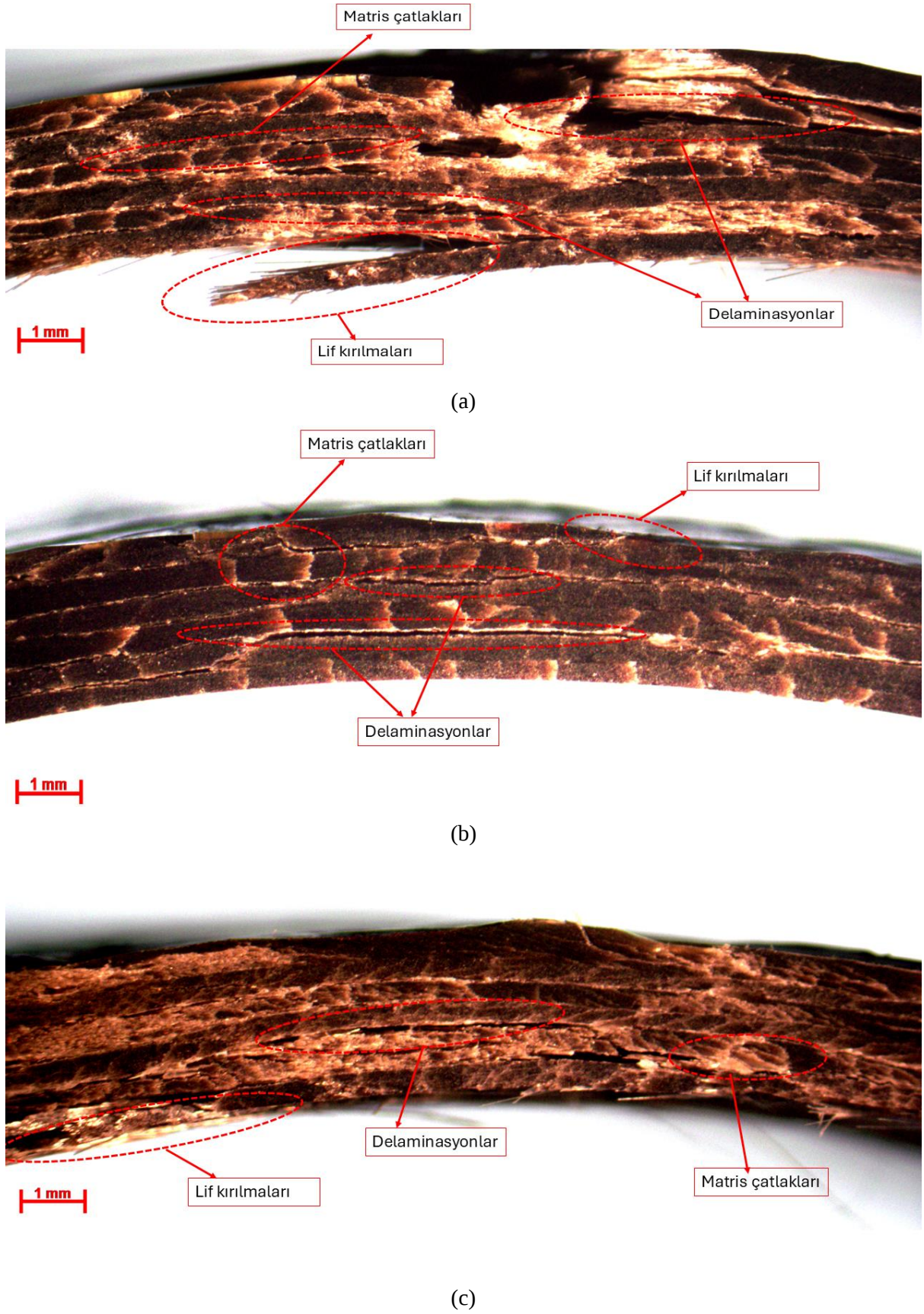
Üretimi gerçekleştirilen, karbon/karbon/karbon (KKK), cam/cam/cam (CCC), bazalt/bazalt/bazalt (BBB), karbon/bazalt/karbon (KBK), karbon/cam/karbon (KCK), cam/karbon/cam (CKC), cam/bazalt/cam (CBC), bazalt/karbon/bazalt (BKB) ve bazalt/cam/bazalt (BCB) istif sıralarına sahip altı tabakalı dokuz çeşit kompozit boru numuneler düşük hızlı darbe testlerine tabii tutulduktan sonra hasar bölgeleri detaylı olarak incelenmiştir. Hasar analizini yapılabilmesi için kompozit borular darbe merkezinden kesilmiş ve kesit görüntüleri yüksek çözünürlüklü optik mikroskop altında incelenmiştir.

Saf karbon/epoksi, cam/epoksi, bazalt/epoksi ve farklı elyaf takviyeli hibrid kompozit numunelerin 20J enerji seviyesinde üç farklı vurucudan elde edilen hasar görüntüleri

değerlendirilmiştir. Bu değerlendirilmeler ile karbon, cam ve bazalt takviyesinin ve hibritleme durumunun kompozit numunelerin hasar davranışına etkileri ortaya konmuştur. Ayrıca vurucu geometrisinin değişmesi ile ortaya çıkan hasar davranışları sunulmuştur.

Üretimi gerçekleştirilen saf bazalt/epoksi, karbon/epoksi, cam/epoksi ve farklı elyaf takviyeleri ile oluşturulmuş hibrid kompozit numunelerden farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J darbe enerji seviyesinde elde edilen kesit hasar görüntüleri Şekil 4.9-17’de verilmiştir.

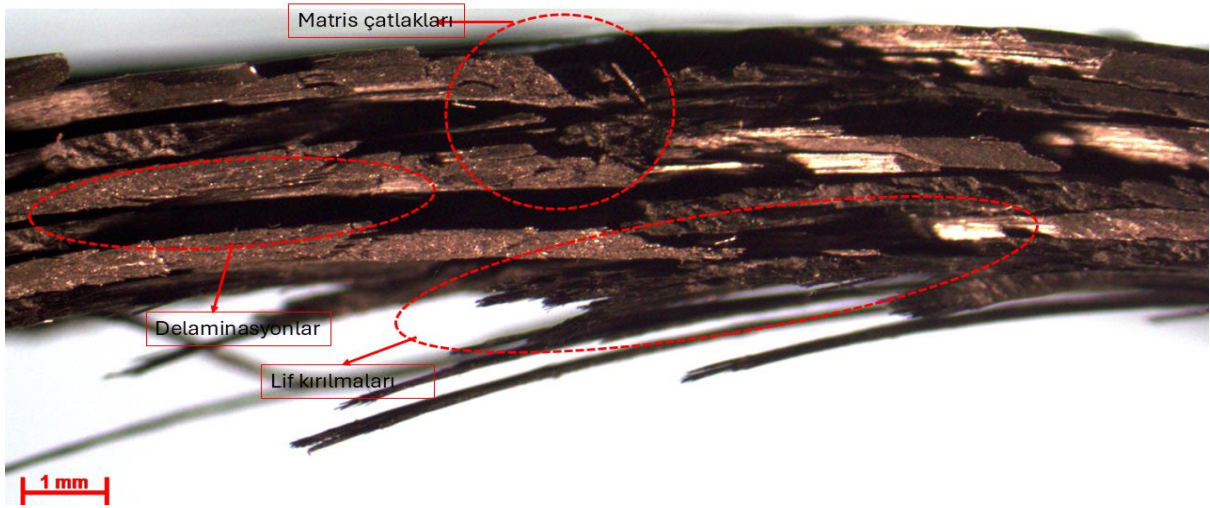
Şekil 4.9’da saf bazalt/epoksi numuneden tüm vurucu geometrileri için elde edilen kesit hasar görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.9a’da 90° konik uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde vurucunun konik yapısından dolayı numuneye battığı bölge açıkça görülmektedir. Düşük hızlı darbe esnasında vurucunun numuneye temas etmesi ile kompozit yapının üst tabakalarında yüksek basma gerilmeleri oluşurken alt tabakalarında yüksek çekme gerilmeleri ortaya çıkmaktadır. Bunlara ilaveten farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakalar arasında kayma gerilmeleri ortaya çıkmaktadır. Bütün bu gerilmelerin etkisi ile kompozit yapıda matris çatlakları, delaminasyon hasarları ve elyaf hasarları ortaya çıkmıştır. Şekil 4.9b’de 24 mm yarı küresel uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüleri, Şekil 4.9c’de ise 120° piramit uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde 24 mm yarı küresel uçlu vurucunun numuneye saplanmamasından dolayı nispeten daha az hasar olduğu görülmektedir. Piramit uçlu vurucu ise bir miktar numuneye saplanmış buna bağlı olarak hasar da artmıştır. Tüm vurucu çeşitleri için bazalt/epoksi kompozit borularda matris çatlakları, delaminasyonlar ve elyaf hasarları ortaya çıkmıştır.



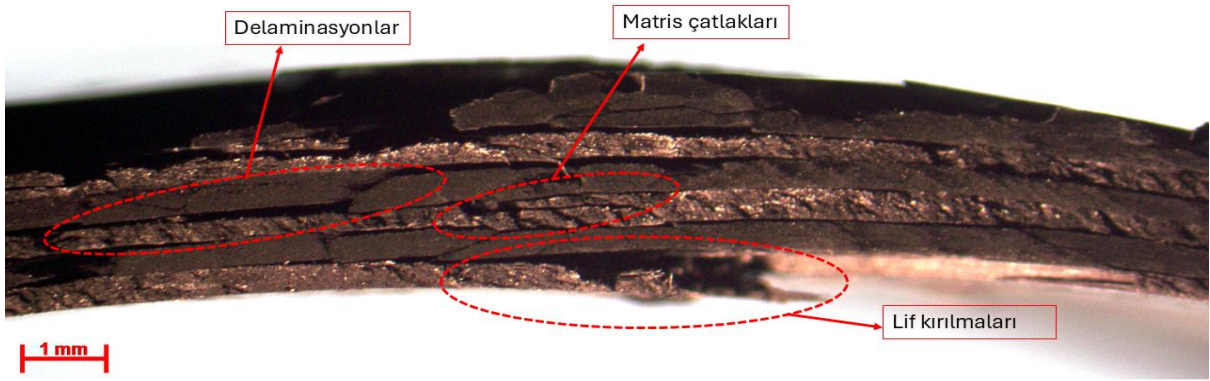
Şekil 4.9. Bazalt numunesinin a) 90° konik, b) 24 mm yarı küresel, c) 120° piramit uçlara sahip 3 farklı ucla vurulduktan sonra oluşan hasar görüntüleri.

Şekil 4.10'da saf karbon/epoksi numuneden tüm vurucu geometrileri için elde edilen kesit hasar görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.10a'da 90^0 konik uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde bazalt numunede olduğu gibi vurucunun konik yapısından dolayı numuneye battığı bölge açıkça görülmektedir. Karbon yapı ihtibari ile oldukça gevrek bir malzemedir. Bu yüzden karbon numunede oluşan hasarlar bazalt ve cam numuneye göre oldukça fazladır. Bazalt numunede olduğu gibi karbon numunede de düşük hızlı darbe esnasında vurucunun numuneye temas etmesi ile ortaya çıkan gerilmeler yoğun matris çatlakları, delaminasyonlar ve elyaf kopmalarına sebep olmuştur. Şekil 4.10b'de 24 mm yarı küresel uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüleri, Şekil 4.10c'de ise 120^0 piramit uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde bazalt numunede olduğu gibi 24 mm yarı küresel uçlu vurucunun numuneye saplanmamasından dolayı nispeten daha az hasar oluştuğu görülmektedir. Piramit uçlu vurucu ise bir miktar numuneye saplanmış buna bağlı olarak hasar da artmıştır.

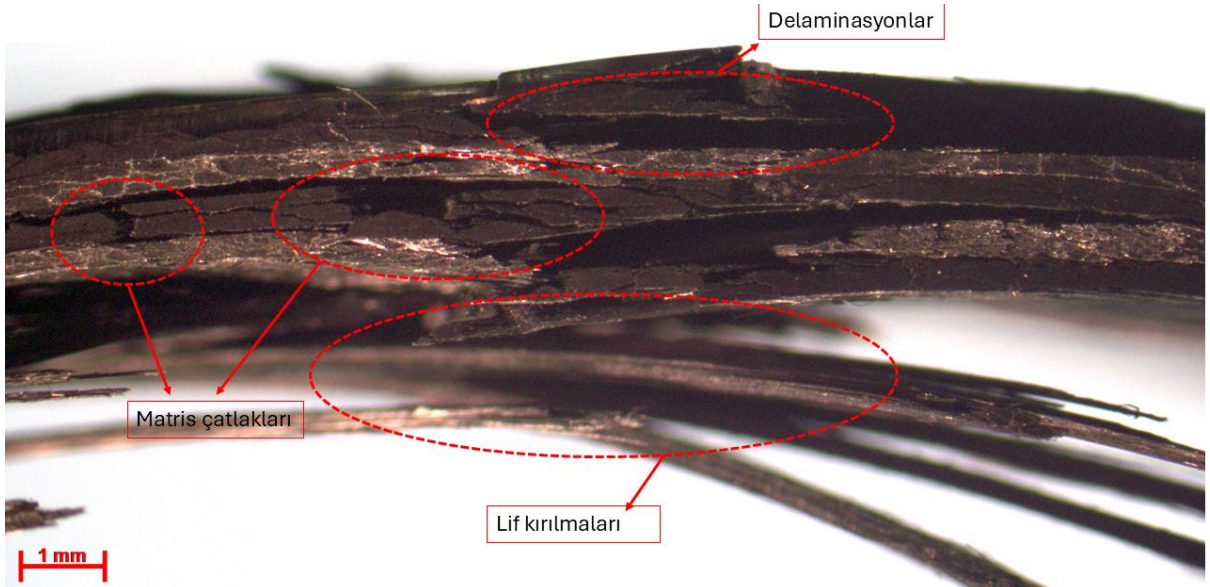




(a)



(b)



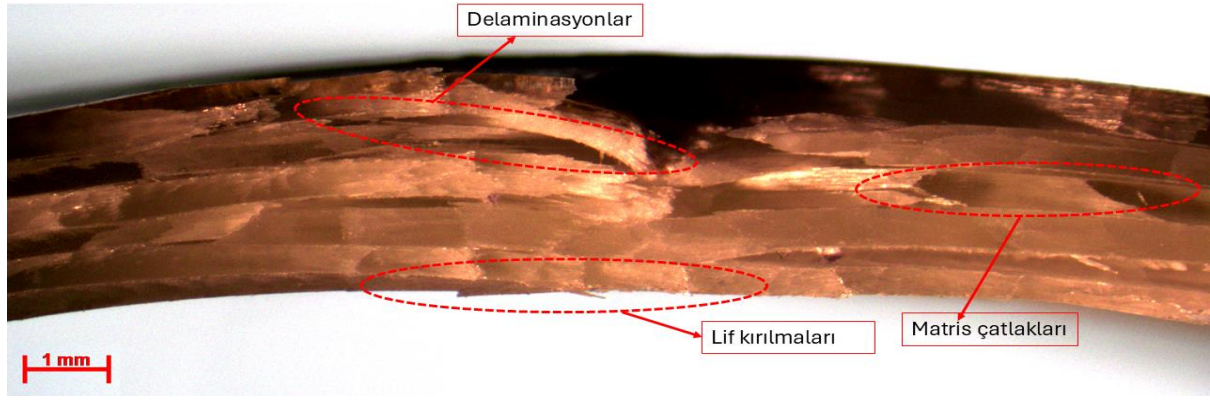
(c)

Şekil 4.10. Karbon numunesinin a) 90° konik, b) 24 mm yarı küresel, c) 120° piramit uçlara sahip 3 farklı uçla vurulduktan sonra oluşan hasar görüntüleri.

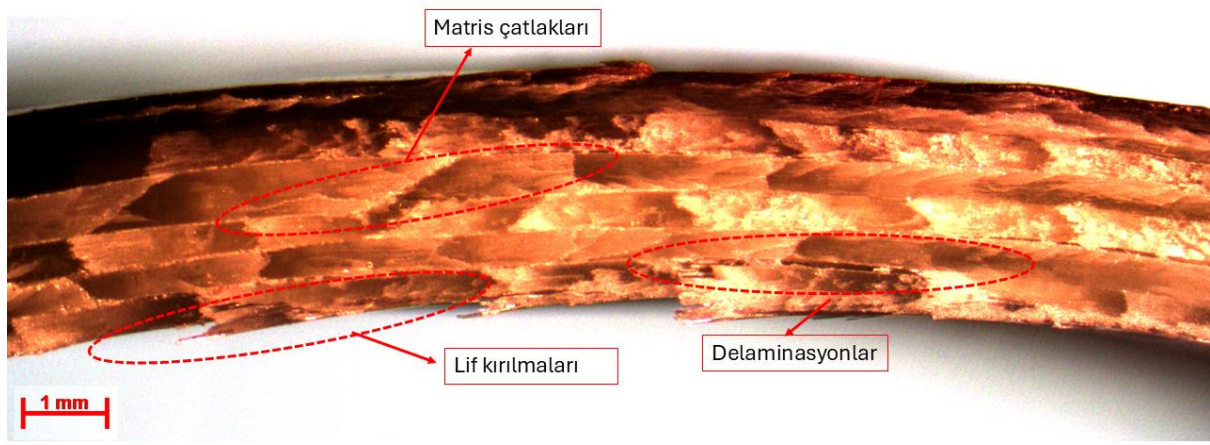
Şekil 4.11’de saf cam/epoksi numuneden tüm vurucu geometrileri için elde edilen kesit hasar görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.11a’da 90^0 konik uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde bazalt ve karbon numunede olduğu gibi vurucunun konik yapısından dolayı numuneye battığı bölge açıkça görülmektedir.

Bazalt ve karbon numunede olduğu gibi karbon numunede de düşük hızlı darbe esnasında vurucunun numuneye temas etmesi ile ortaya çıkan gerilmeler yoğun matris çatlakları, delaminasyonlar ve elyaf kopmalarına sebep olmuştur. Şekil 4.11b’de 24 mm yarı küresel uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüleri, Şekil 4.11c’de ise 120^0 piramit uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde bazalt numunede olduğu gibi 24 mm yarı küresel uçlu vurucunun numuneye saplanmamasından dolayı nispeten daha az hasar olduğu görülmektedir. Piramit uçlu vurucu ise bir miktar numuneye saplanmış buna bağlı olarak hasar da artmıştır.

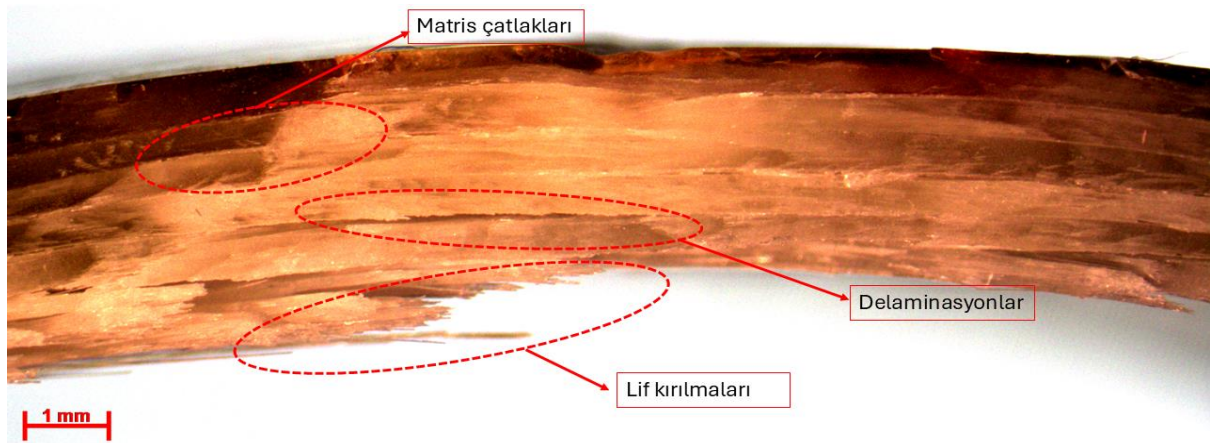




(a)



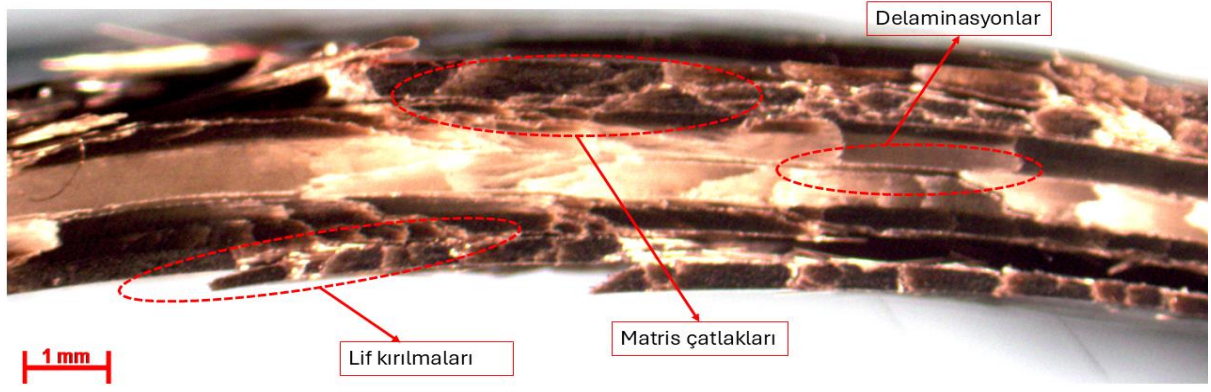
(b)



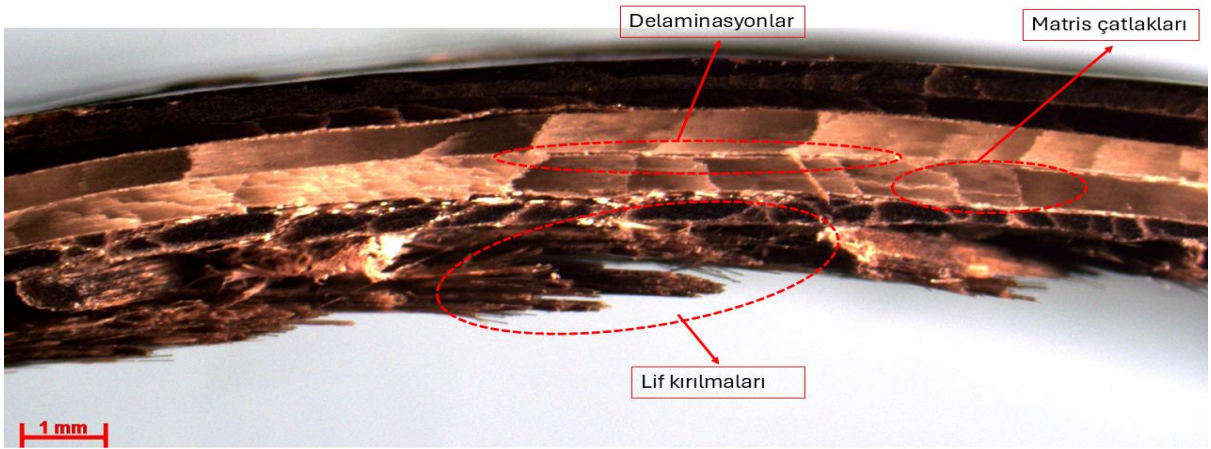
(c)

Şekil 4.11. Cam numunesinin a) 90° konik, b) 24 mm yarı küresel, c) 120° piramit uçlara sahip 3 farklı ucla vurulduktan sonra oluşan hasar görüntüleri.

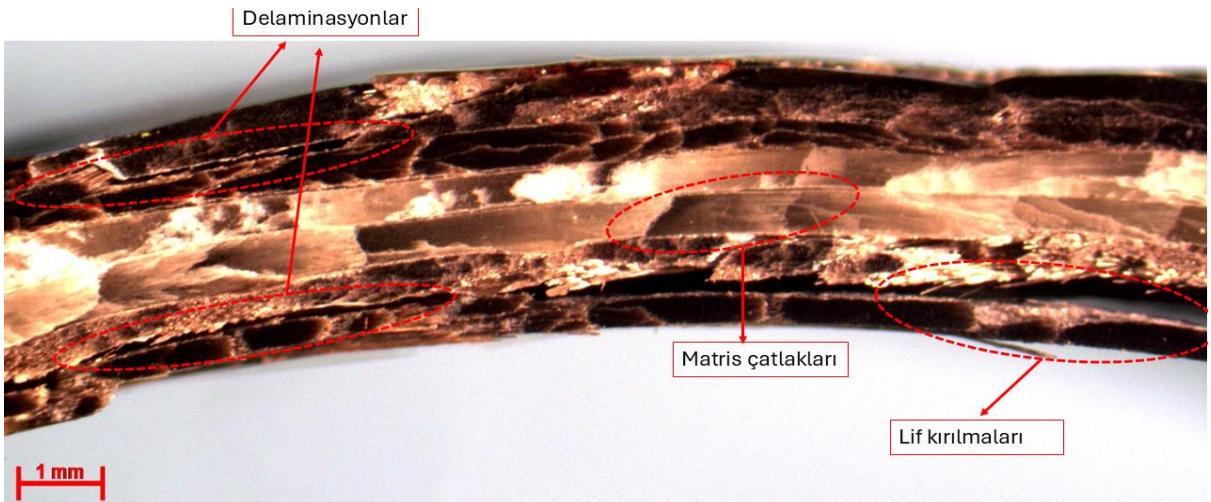
Şekil 4.12’de BCB numuneden tüm vurucu geometrileri için elde edilen kesit hasar görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.12a’da 90^0 konik uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde vurucunun konik yapısından dolayı numuneye battığı bölge açıkça görülmektedir. Düşük hızlı darbe esnasında vurucunun numuneye temas etmesi ile hibrid kompozit yapının üst tabakalarında yüksek basma gerilmeleri oluşurken alt tabakalarında yüksek çekme gerilmeleri ortaya çıkmaktadır. Bunlara ilaveten farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakalar arasında kayma gerilmeleri ortaya çıkmaktadır. Bütün bu gerilmelerin etkisi ile hibrid kompozit yapıda matris çatlakları, delaminasyon hasarları ve elyaf hasarları ortaya çıkmıştır. Şekil 4.12b’de 24 mm yarı küresel uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüleri, Şekil 4.12c’de ise 120^0 piramit uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde 24 mm yarı küresel uçlu vurucunun numuneye saplanmamasından dolayı nispeten daha az hasar olduğu görülmektedir. Elyaf kırılması da oldukça fazla olmuştur. Piramit uçlu vurucu ise bir miktar numuneye saplanmış buna bağlı olarak hasar da artmıştır. Tüm vurucu çeşitleri için BCB kompozit borularda matris çatlakları, delaminasyonlar ve elyaf hasarları ortaya çıkmıştır.



(a)



(b)



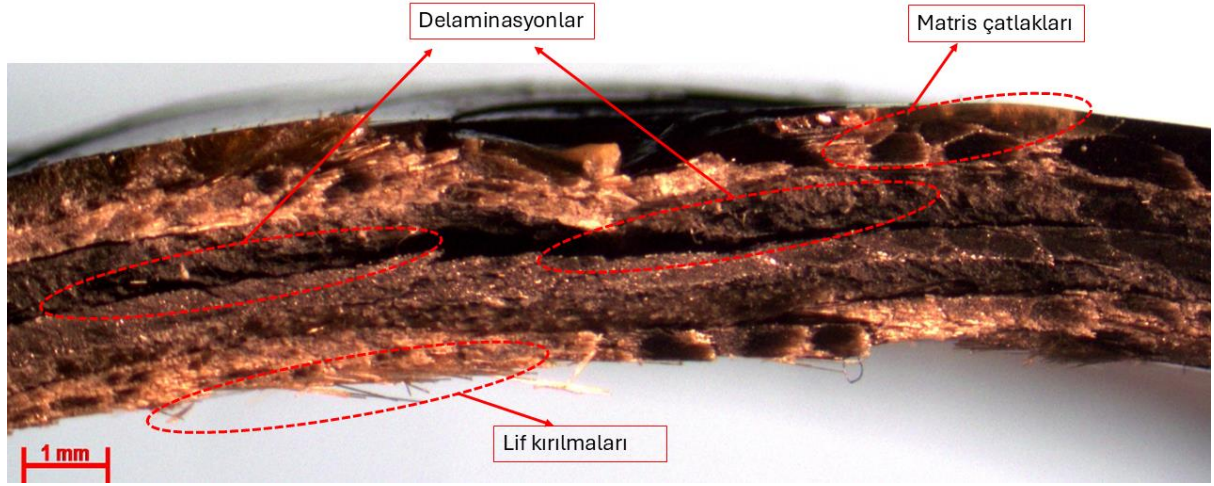
(c)

Şekil 4.12. Bazalt-Cam-Bazalt numunesinin a) 90° konik, b) 24 mm yarı küresel, c) 120° piramit uçlara sahip 3 farklı uçla vurulduktan sonra oluşan hasar görüntüleri.

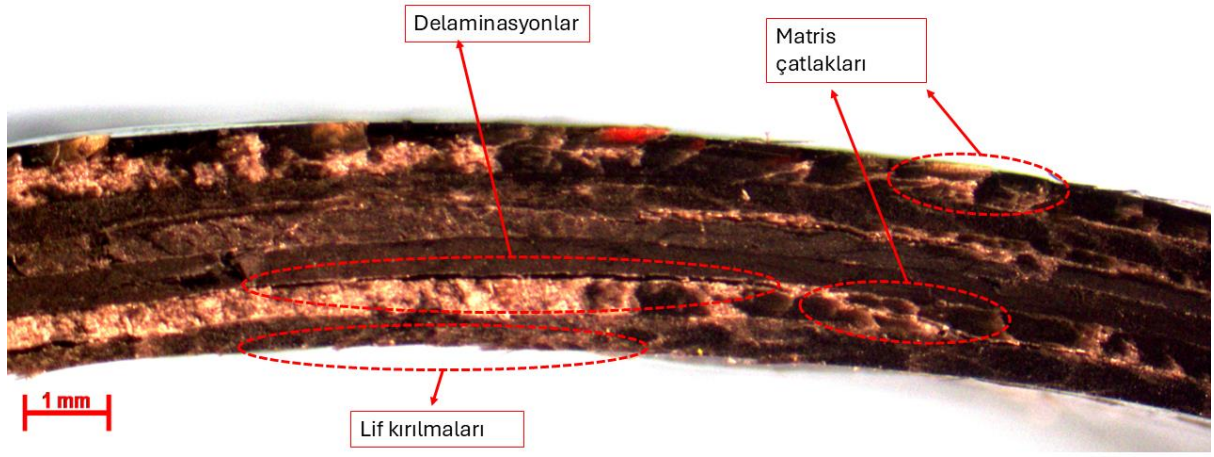
Şekil 4.13’de BKB numuneden tüm vurucu geometrileri için elde edilen kesit hasar görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.13a’da 90^0 konik uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde BCB numunede olduğu gibi vurucunun konik yapısından dolayı numuneye battığı bölge açıkça görülmektedir.

BKB numunesi karbon katkısından dolayı yoğun matris çatlakları, delaminasyonlar ve elyaf kopmalarına sebep olmuştur. Şekil 4.13b’de 24 mm yarı küresel uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüleri, Şekil 4.13c’de ise 120^0 piramit uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde bazalt numunede olduğu gibi 24 mm yarı küresel uçlu vurucunun numuneye saplanmamasından dolayı nispeten daha az hasar olduğu görülmektedir. Piramit uçlu vurucu ise bir miktar numuneye saplanmış buna bağlı olarak hasar da artmıştır.

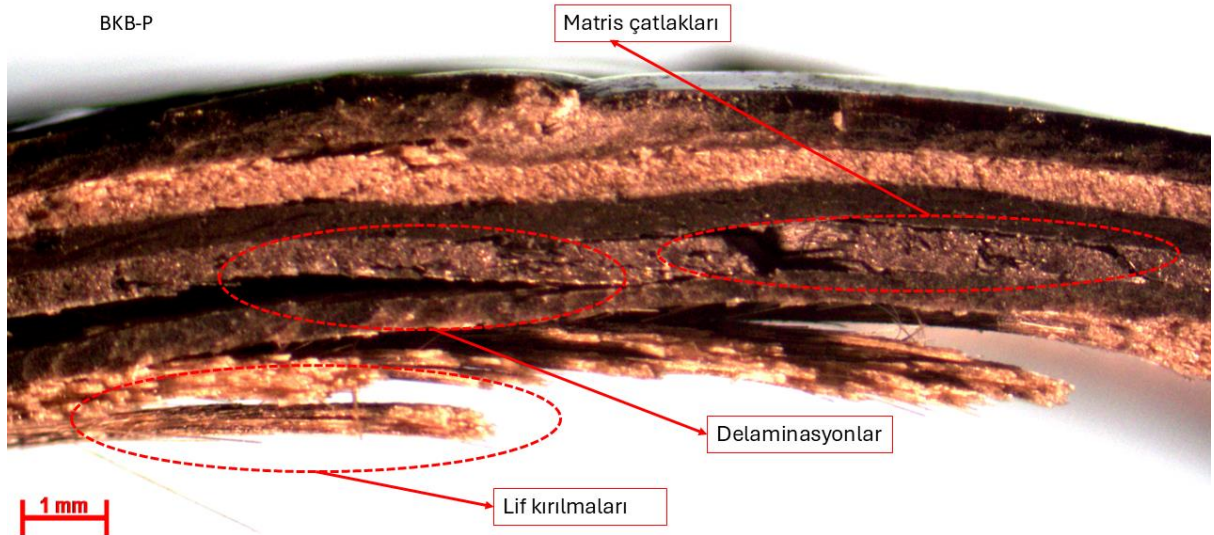




(a)



(b)



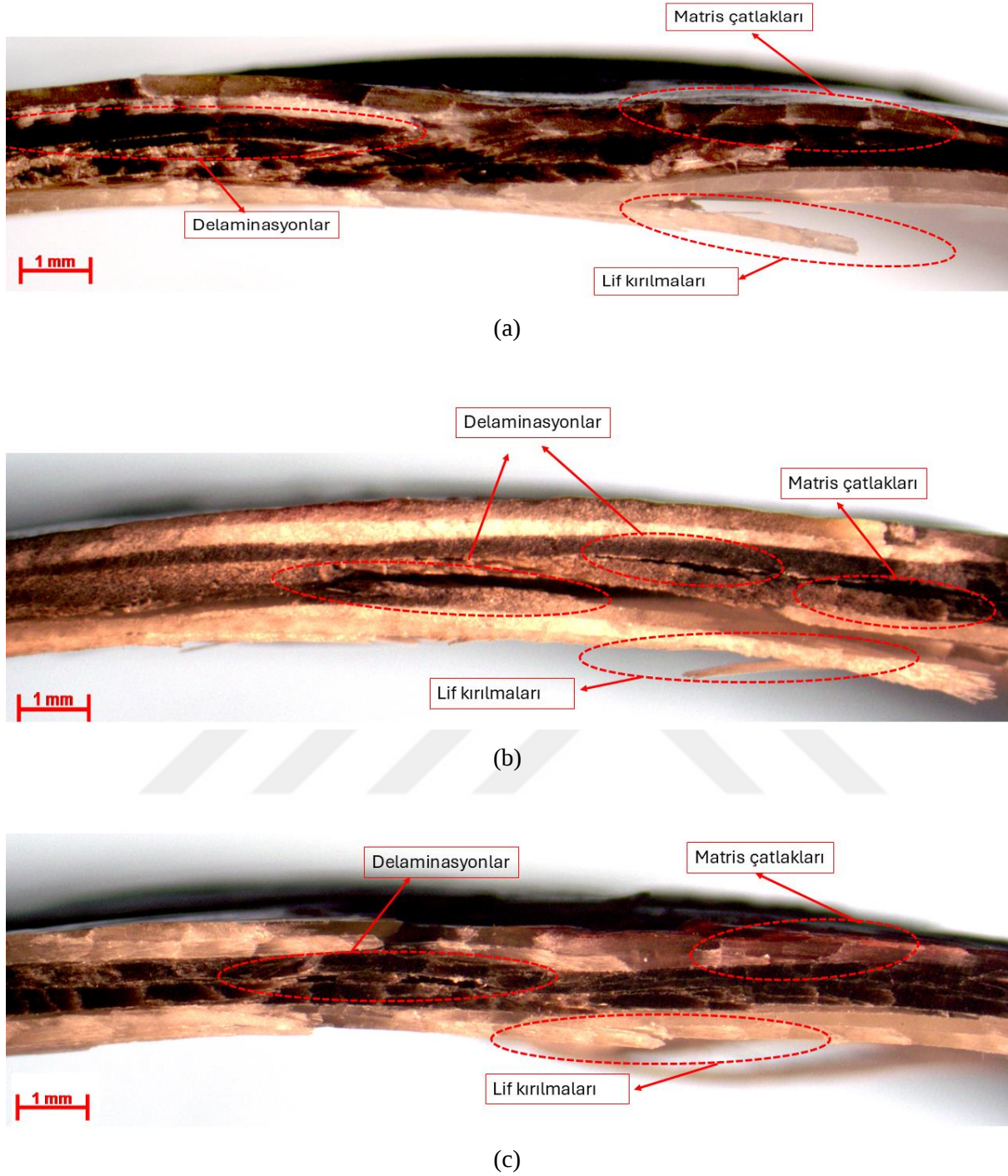
(c)

Şekil 4.13. Bazalt-Karbon-Bazalt numunesinin a) 90° konik, b) 24 mm yarı küresel, c) 120° piramit uçlara sahip 3 farklı ucla vurulduktan sonra oluşan hasar görüntüleri.

Şekil 4.14’de CBC numuneden tüm vurucu geometrileri için elde edilen kesit hasar görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.14a’da 90^0 konik uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde BKB numunede olduğu gibi vurucunun konik yapısından dolayı numuneye battığı bölge açıkça görülmektedir.

BKB numunede olduğu gibi CBC numunede de düşük hızlı darbe esnasında vurucunun numuneye temas etmesi ile ortaya çıkan gerilmeler yoğun matris çatlakları, delaminasyonlar ve elyaf kopmalarına sebep olmuştur. Şekil 4.14b’de 24 mm yarı küresel uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüleri, Şekil 4.14c’de ise 120^0 piramit uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde BKB numunede olduğu gibi 24 mm yarı küresel uçlu vurucunun numuneye saplanmamasından dolayı nispeten daha az hasar olduğu görülmektedir. Piramit uçlu vurucu ise bir miktar numuneye saplanmış buna bağlı olarak az da olsa hasar oluşmuştur.



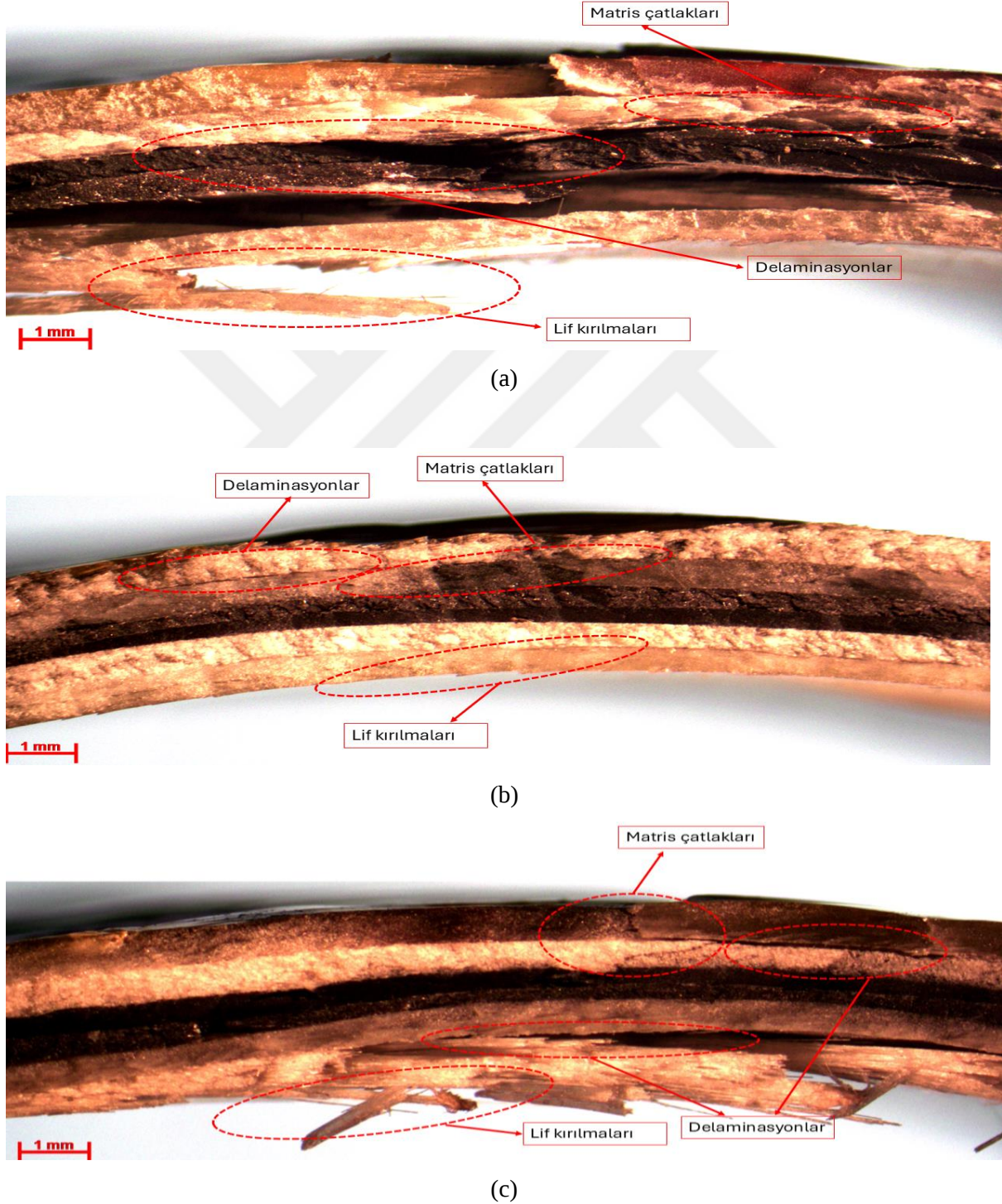


Şekil 4.14. Cam-Bazalt-Cam numunesinin a) 90° konik, b) 24 mm yarı küresel, c) 120° piramit uçlara sahip 3 farklı uçla vurulduktan sonra oluşan hasar görüntüleri.

Şekil 4.15’de CKC numuneden tüm vurucu geometrileri için elde edilen kesit hasar görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.15a’da 90° konik uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde CBC numunede olduğu gibi vurucunun konik yapısından dolayı numuneye battığı bölge açıkça görülmektedir.

CBC numunede olduğu gibi CKC numunede de düşük hızlı darbe esnasında vurucunun numuneye temas etmesi ile ortaya çıkan gerilmeler yoğun matris çatlakları, delaminasyonlar ve elyaf

kopmalarına sebep olmuştur. Şekil 4.15b’de 24 mm yarı küresel uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüleri, Şekil 4.15c’de ise 120° piramit uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde CBC numunede olduğu gibi 24 mm yarı küresel uçlu vurucunun numuneye saplanmamasından dolayı nispeten daha az hasar oluştuğu görülmektedir. Piramit uçlu vurucu ise bir miktar numuneye saplanmış buna bağlı olarak hasar da artmıştır.

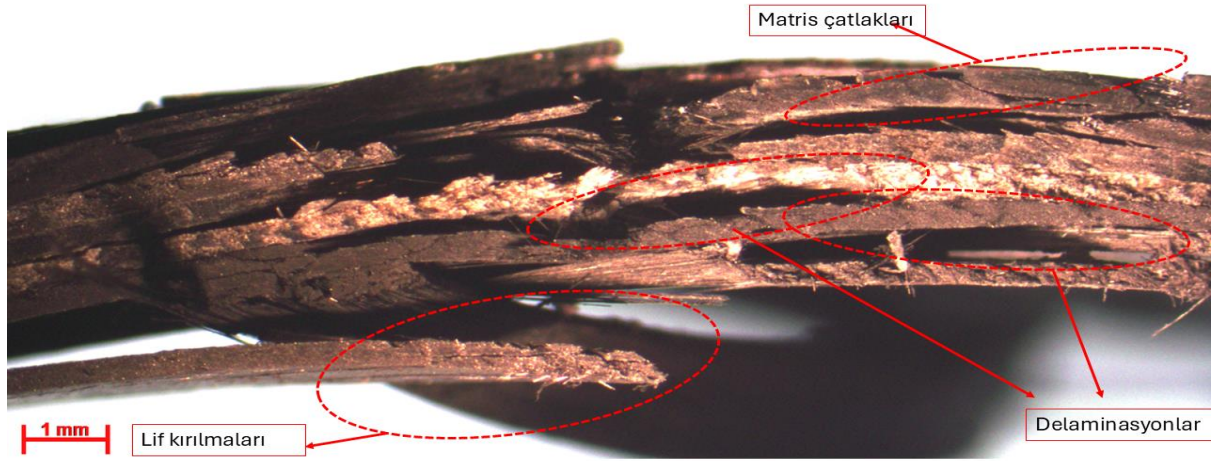


Şekil 4.15. Cam-Karbon-Cam numunesinin a) 90° konik, b) 24 mm yarı küresel, c) 120° piramit uçlara sahip 3 farklı uçlu vurulduktan sonra oluşan hasar görüntüleri.

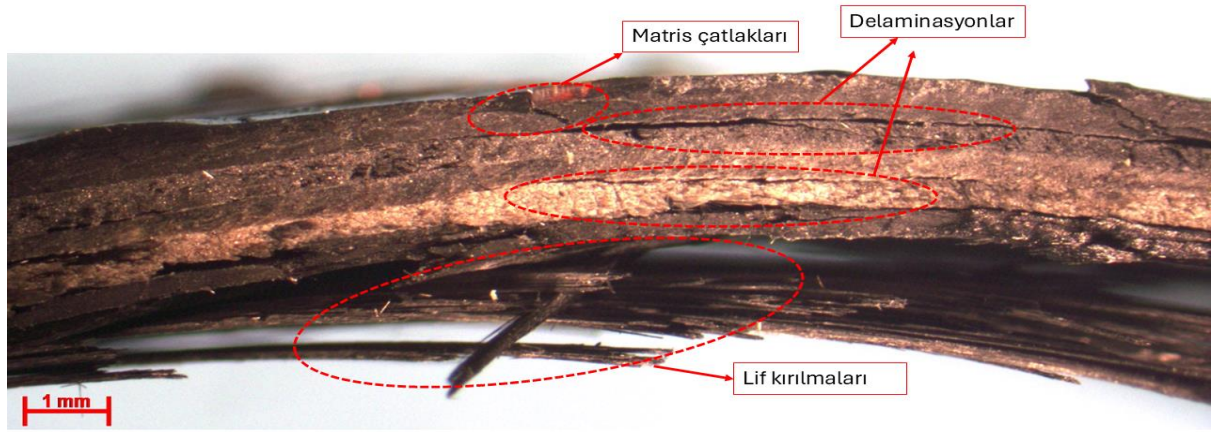
Şekil 4.16’da KBK numuneden tüm vurucu geometrileri için elde edilen kesit hasar görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.16a’da 90^0 konik uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde CKC numunede olduğu gibi vurucunun konik yapısından dolayı numuneye battığı bölge açıkça görülmektedir.

KBK numunesi karbon katkısından dolayı yoğun matris çatlakları, delaminasyonlar ve elyaf kopmaları yaşamıştır. Şekil 4.16b’de 24 mm yarı küresel uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüleri, Şekil 4.16c’de ise 120^0 piramit uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde CKC numunede olduğu gibi 24 mm yarı küresel uçlu vurucunun numuneye saplanmamasından dolayı konik uçlu vurucuya göre nispeten daha az hasar oluştuğu görülmektedir. Piramit uçlu vurucu ise bir miktar numuneye saplanmış buna bağlı olarak az da olsa hasar oluşmuştur.

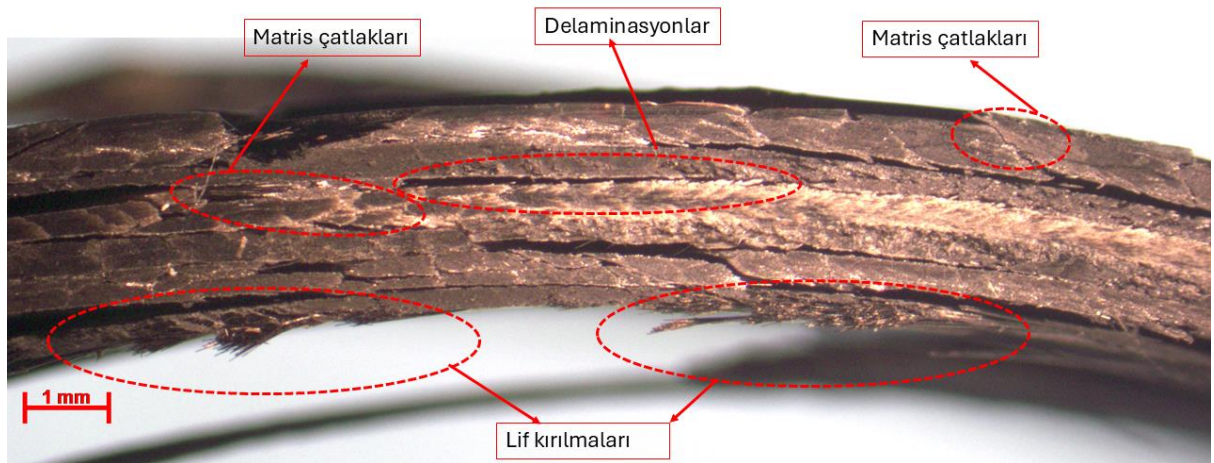




(a)



(b)

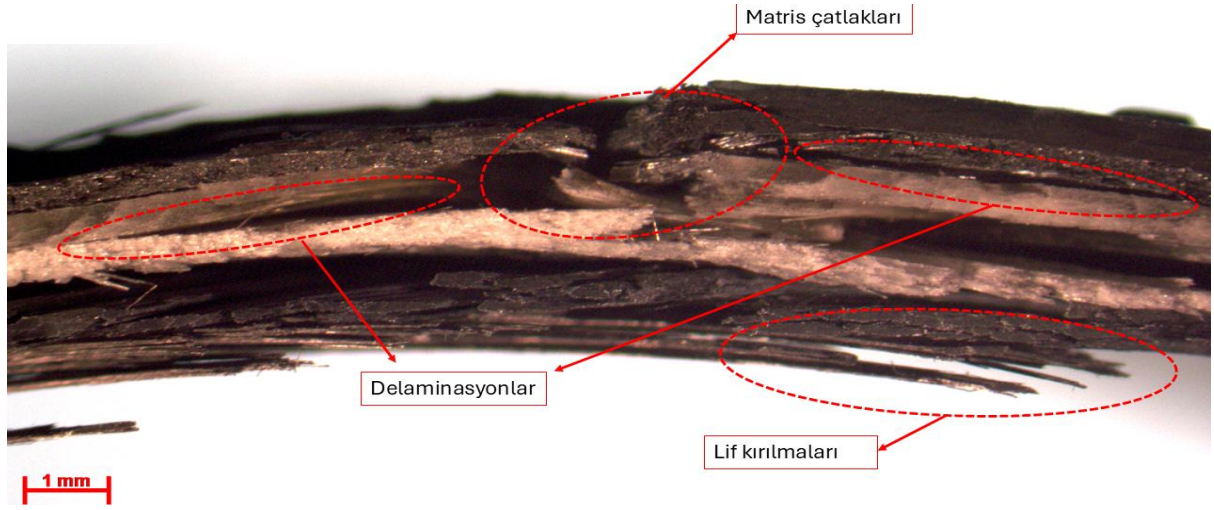


(c)

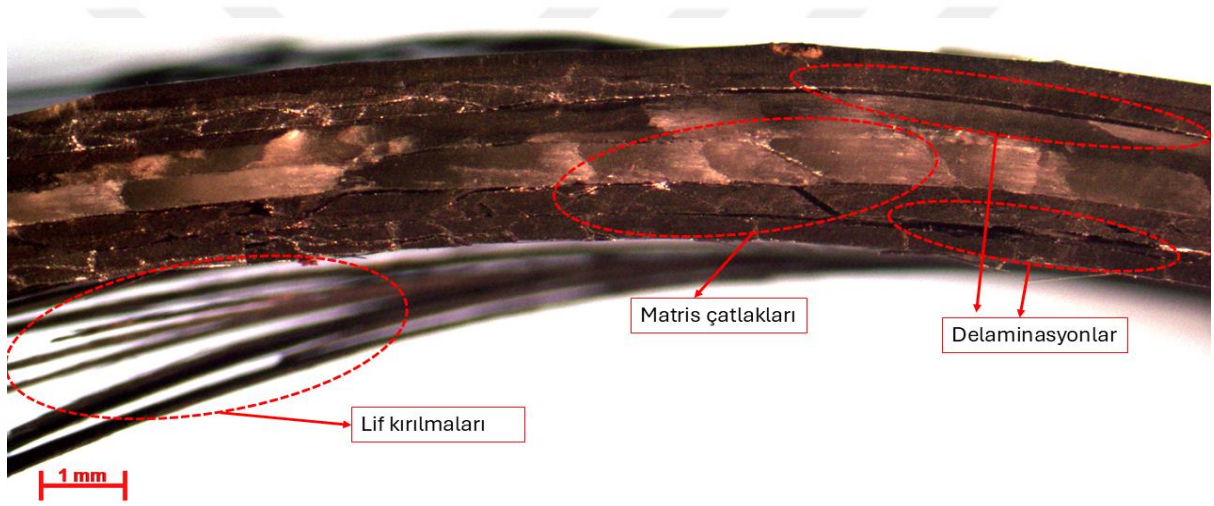
Şekil 4.16. Karbon-Bazalt-Karbon numunesinin a) 90° konik, b) 24 mm yarı küresel, c) 120° piramit uçlara sahip 3 farklı uçla vurulduktan sonra oluşan hasar görüntüleri.

Şekil 4.17’da KCK numuneden tüm vurucu geometrileri için elde edilen kesit hasar görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.17a’da 90^0 konik uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde KBK numunede olduğu gibi vurucunun konik yapısından dolayı numuneye battığı bölge açıkça görülmektedir. Karbon yapı ihtibari ile oldukça gevrek bir malzemedir. Bu yüzden karbon numunede oluşan hasarlar bazalt ve cam numuneye göre oldukça fazladır. KCK numunede olduğu gibi KCK numunede de düşük hızlı darbe esnasında vurucunun numuneye temas etmesi ile ortaya çıkan gerilmeler yoğun matris çatlakları, delaminasyonlar ve elyaf kopmalarına sebep olmuştur. Şekil 4.17b’de 24 mm yarı küresel uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüleri, Şekil 4.17c’de ise 120^0 piramit uçlu vurucunun oluşturduğu hasar görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde KBK numunede olduğu gibi 24 mm yarı küresel uçlu vurucunun numuneye saplanmamasından dolayı konik vurucuya göre nispeten daha az hasar oluştuğu görülmektedir. Piramit uçlu vurucu ise bir miktar numuneye saplanmış buna bağlı olarak az da olsa hasar oluşmuştur.

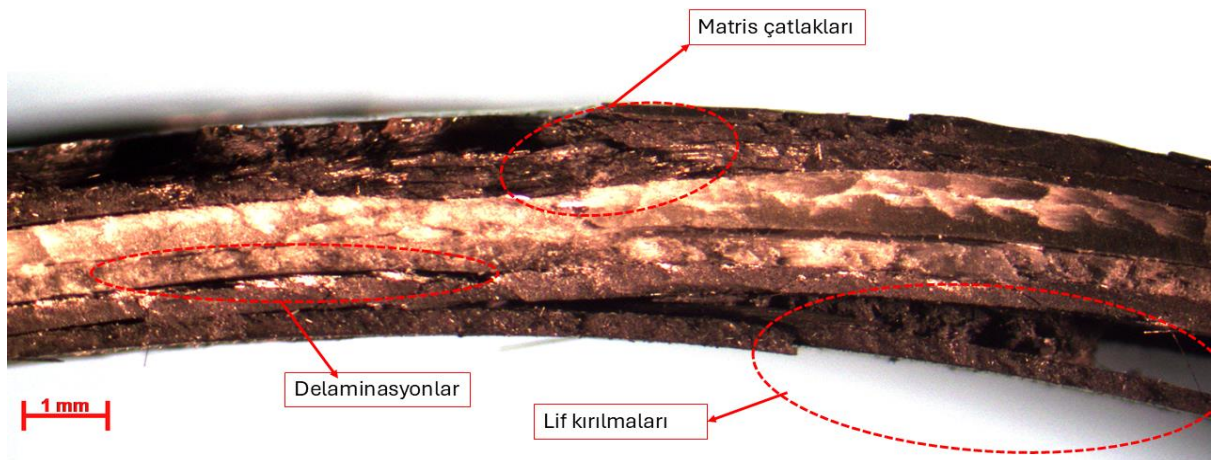




(a)



(b)



(c)

Şekil 4.17. Karbon-Cam-Karbon numunesinin a) 90° konik, b) 24 mm yarı küresel, c) 120° piramit uçlara sahip 3 farklı uçla vurulduktan sonra oluşan hasar görüntüleri.



5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, karbon/karbon/karbon (KKK), cam/cam/cam (CCC), bazalt/bazalt/bazalt (BBB), karbon/bazalt/karbon (KBK), karbon/cam/karbon (KCK), cam/karbon/cam (CKC), cam/bazalt/cam (CBC), bazalt/karbon/bazalt (BKB) ve bazalt/cam/bazalt (BCB) istif sıralarına sahip altı tabakalı dokuz çeşit kompozit boru numunelerin farklı uç geometrilerine sahip vurucularla 20J enerji seviyesinde düşük hızlı darbe davranışları incelenmiştir. Darbe testlerinde 24 mm yarı küresel, 90° konik ve 120° piramit uçlu geometriye sahip üç farklı vurucu kullanılmıştır. Yapılan darbe testleri ile karbon, cam ve bazalt takviyesinin ve hibritleme durumunun kompozit numunelerin darbe cevabına etkisi ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

Kompozit yapıda kullanılan fiber türünün değişmesi kompozit malzemenin darbe cevabını etkilemiştir. Karbon/epoksi, cam/epoksi ve bazalt/epoksi kompozit numunelerin farklı uç geometrilerine sahip vuruculardan elde edilen kuvvet zaman değişimleri incelendiğinde, üç farklı vurucu geometrisi için de en büyük temas kuvveti değerleri cam/epoksi numuneden elde edildiği görülmüştür.

Kompozit yapının hibrid olarak üretilmesi numunelerin darbe cevabı üzerinde etkili olmuştur. KBK ve KCK numunelerinde en büyük temas kuvveti değerleri KCK numunelerinde, CBC ve CKC numunelerinde en büyük temas kuvveti değerleri CKC numunelerinde, BCB ve BKB numunelerinde ise en büyük temas kuvveti değerleri BCB numunelerinde elde edilmiştir.

Düşük hızlı darbeye maruz kalan kompozit yapının kuvvet-zaman değişimlerinde farklılık olmasının en önemli nedeni numunelerin daha gevrek veya daha sünek olması durumudur. Numunelerin gevrekliği arttıkça darbe anında oluşan iç kırılmalar temas kuvveti değerlerinin çok yükselmesine engel olmuştur.

Karbon/epoksi, cam/epoksi ve bazalt/epoksi kompozit numunelerin farklı uç geometrilerine sahip vuruculardan elde edilen kuvvet deplasman değişimleri incelendiğinde, üç farklı vurucu geometrisi için de en büyük temas kuvveti değerleri cam/epoksi numuneden elde edildiği görülmüştür.

Kompozit yapının hibrid olarak üretilmesi numunelerin darbe cevabı üzerinde etkili olmuştur. KBK ve KCK numunelerinde en büyük deplasman değerleri KBK numunelerinde, CBC ve CKC numunelerinde en büyük deplasman değerleri CBC numunelerinde, BCB ve BKB numunelerinde ise en büyük deplasman değerleri BKB numunelerinde elde edilmiştir.

Düşük hızlı darbeye maruz kalan kompozit yapının kuvvet-deplasman değişimlerinde farklılık olmasının en önemli nedeni vurucunun sivri olmasından dolayı numuneye batmasıdır. Numuneye batma gerçekleşince deplasman değerinde artış görülmüştür.

Karbon/epoksi, cam/epoksi ve bazalt/epoksi kompozit numunelerin farklı uç geometrilerine sahip vuruculardan elde edilen hasar görüntüleri incelendiğinde, üç farklı vurucu geometrisi için de en fazla hasar karbon/epoksi numunede olduğu görülmüştür.

Kompozit yapının hibrid olarak üretilmesi numunelerin darbe cevabı üzerinde etkili olmuştur. KBK ve KCK numunelerinde en fazla hasar KBK numunelerinde, CBC ve CKC numunelerinde en fazla hasar CKC numunelerinde, BCB ve BKB numunelerinde ise en fazla hasar BKB numunelerinde elde edilmiştir.

Düşük hızlı darbeye maruz kalan kompozit yapının hasar davranışlarında farklılık olmasının en önemli nedeni numunelerin daha gevrek veya daha sünek olması durumudur. Numunelerin gevrekliği arttıkça darbe anında matris çatlakları, delaminasyonlar ve elyaf hasarları ortaya çıkmıştır.



KAYNAKLAR

Akın, Y. (2018). Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Boruların Mekanik Özelliklerine Hidrotermal Yaşlandırmanın Etkisi (Yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi (Türkiye)).

Arusan, Ö. E., Falay, E. Ö., & Çalışkanelli, B.(2022) sızdırmazlık teknolojilerinde kompozit malzemeler ile tasarım.

Asi, D. (2018). Polimer matrisli kompozit malzemelerde ilave olarak kullanılan parçacıkların geometrisinin kompozit malzemelerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerine etkisinin araştırılması. Uşak Üniversitesi.

Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons.

Dogan, A. (2022). Farklı darbe şekilleri için E-cam elyaf takviyeli epoksi ve polipropilen kompozitlerin tek ve tekrarlanan düşük hızlı darbe tepkisi. Termoplastik Kompozit Malzemeler Dergisi , 35 (3), 320-336.

Doğan, A. F. (2022). Kumaş sarım metodu ile üretilen aramid fiber boruların darbe dirençlerinin araştırılması (Yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi (Türkiye)).

Elaldi, F., Baykan, B. ve Akto, C. (2017). Karbon takviyeli kompozit malzemeler üzerinde darbe geometrisinin etkisine yönelik deneysel analiz. Polimerler ve Polimer Kompozitler , 25 (9), 677-682.

Esendemir, Ü., & Caner, A. Y. (2018). Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışının deneysel olarak incelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22(1), 207-215.

Farhood, NH, Karuppanan, S., Ya, HH ve Ovinis, M. (2019). Karbon fiber hibridizasyonunun düşük hızlı darbeden önce ve sonra cam-karbon/epoksi hibrid kompozit boruların basınç dayanımına etkileri. Key Engineering Materials ,

Farhood, NH, Karuppanan, S., Ya, HH, & Sultan, MTH (2021). Filament sarılı karbon bazlı kompozit boruların düşük hızlı darbe tepkisi üzerinde cam elyaf hibridizasyonunun etkilerine ilişkin deneysel araştırma. Polimerler ve Polimer Kompozitler , 29 (7), 829-841.

Geleneksel, A. M., & Kompozitlerin, A. T. H. (2017). Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi. Journal of Bartın University Engineering and Technological Sciences Vol, 5(2), 72-78.

Gemi, L., Kayrı, M., Uludağ, M., Gemi, D. S., & Şahin, Ö. S. (2018). Experimental and statistical analysis of low velocity impact response of filament wound composite pipes. Composites Part B: Engineering, 149, 38-48.

Gemi, D. S., Şahin, Ö. S., & Gemi, L. (2021). Experimental investigation of the effect of diameter upon low velocity impact response of glass fiber reinforced composite pipes. Composite Structures, 275, 114428.

Gemi, DS, Şahin, Ö. S. ve Gemi, L. (2022). Farklı çaplardaki cam elyaf takviyeli filament sarılı boruların düşük hızlı darbeden sonra eksenel basınç davranışının deneysel incelenmesi. Kompozit Yapılar , 280 , 114929.

Günay, İ. Ç. (2022). Karbon/Cam Elyaf Hibrit Kompozit Borularda Hasar Analizi (Yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi (Türkiye)).

Guno, A., & Kara, M. (2024). Damage behavior of functionally graded kevlar/carbon epoxy nanocomposites reinforced with polyamide 6.6 nanofiber and MWCNTs subjected to low-velocity impact. International Journal of Damage Mechanics, 10567895241305324.

Günöz, M.Kara, Polyamid Nanofiber Katkılı Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kevlar-Karbon/Epoksi Nanokompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Ve Hasar Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 2022.

He, B., Wang, B., Wang, Z., Qi, S., Tian, G., & Wu, D. (2020). Mechanical properties of hybrid composites reinforced by carbon fiber and high-strength and high-modulus polyimide fiber. Polymer, 204, 122830.

İpekçi, A. (2022). Production of Continuous Fiberglass Reinforced UV-Curable Polymer Matrix Composite Material with 90 Degree Elbow Products by Robotic Additive Manufacturing (Doktora tezi, Marmara Üniversitesi (Türkiye)).

Kara, M. (2012). Düşük hızlı darbe sonrası yama ile tamir edilmiş filaman sarım CTP boruların iç basınç altındaki hasar davranışı.

Kara, M., & Uyaner, M. (2016). E-camı/epoksi kompozit boruların darbe cevabına vurucu geometrisinin etkisi. *Anadolu University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 17(3), 512-520.

Kara, M., & Uyaner, M. (2017). Filaman sarım ile üretilen CTP kompozit borularda tabaka sayısının teğetsel gerilme dayanımına etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 666-672.

Kara, M., Nomer, AE, Kepir, Y., Gunoz, A., & Avcı, A. (2022). Nanopartikül takviyeli karbon fiber epoksi kompozit boruların düşük enerjili tekrarlanan darbe tepkisi. *Kompozit Yapılar* , 299 , 116100.

Kaveloğlu, S., & Temiz, Ş. (2024). 3 Boyutlu yazıcı kullanılarak üretilen sandviç kompozitlerin düşük hızda darbe performanslarının araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39(1), 139-150.

Kaya, A. İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29, 38-45.

Kazemianfar, B., Esmaeeli, M. ve Nami, MR (2020). Farklı çarpma geometrilerine sahip düşük hızlı darbe altında 3B dokuma kompozitlerin tepkisi. *Havacılık Bilimi ve Teknolojisi* , 102 , 105849.

Keküç, O. (2022). Karbon elyaf takviyeli filaman sarım kompozit boruların düşük hızlı darbe cevabının incelenmesi (Yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi (Türkiye)).

Kısaoğlu, N. (2022). Seramik takviyeli AL2024 ve AL7075 matrisli hibrit kompozitlerin vakum infiltrasyon metodu ile üretimi ve karakterizasyonu (Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Liu, H., Liu, J., Ding, Y., Zhou, J., Kong, X., Blackman, BR, ... & Dear, JP (2020). Darbeli geometrinin elyaf takviyeli kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışı üzerindeki etkileri: deneysel ve teorik bir araştırma. *Uygulamalı Kompozit Malzemeler* , 27 , 533-553.

Mahesh, V., Joladarashi, S. ve Kulkarni, SM (2020). Laminat kalınlığının ve çarpma şeklinin jüt-epoksi kompozitinin düşük hızlı darbe tepkisi üzerindeki etkisi: FE çalışması. *Materials Today: Proceedings* , 28 , 545-550.

Matykiewicz, D. (2020). Biochar as an effective filler of carbon fiber reinforced bio-epoxy composites. *Processes*, 8(6), 724.

Maziz, A., Tarfaoui, M., Gemi, L., Rechak, S. ve Nachtane, M. (2021). Düşük hızlı darbe altında basınçlı filament sarıli hibrit kompozit boru için kademeli bir hasar modeli. *Kompozit Yapılar* , 276 , 114520.

Özmeral, N. (2023). Polistirenle modifiye epoksi reçine bazlı nanokompozit ve hibrit kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu (Yüksek lisans tezi, Konya Teknik Üniversitesi).

Rajan, B. G., Padmanabhan, S., Ganesh, R. L., Chandana, K. M., & Lavanya, E. (2021). Low velocity impact analysis of carbon/glass/epoxy hybrid composite pipes. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4181-4188.

Razali, N., Sultan, MTH ve Jawaidd, M. (2019). Hibrit kompozit malzemelerin darbe hasarı analizi. *Biyokompozitlerde, Elyaf Takviyeli Kompozitlerde ve Hibrit Kompozitlerde Dayanıklılık ve Ömür Tahmini* (s. 121-132). Woodhead Yayıncılık.

Sahu, S. ve Ansari, MZ (2019). Çarpma şekillerinin Al levhanın düşük hızlı darbe özelliklerine etkisi. *Gemiler ve Açık Deniz Yapıları* , 14 (1), 53-63.

Uyaner, M., Kara, M., Kepir, Y. ve Gunoz, A. (2023). Düşük hızlı darbeye maruz bırakılan lamine kompozitlerin sanal testi. *İran Bilim ve Teknoloji Dergisi, Makine Mühendisliği İşlemleri* , 47 (2), 595-610.

Uyaner, M., & Kara, M. (2012). Experimental study of the impact behavior of laminated composites stricken by sharp impactors. *Science and Engineering of Composite Materials*, 19(3), 307-313.

Yudar, S. (2023). Uçak Motorlarında Süperalaşımın Yerine Kullanılabilecek Olan Kompozit Malzemelerin İncelenmesi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(3), 585-595.