

Eriyik Biriktirme Yöntemi ile Üretilen Poliamid ve Karbon Fiber Takviyeli Poliamid Kompozitlerin Darbe Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi

Ümran ESENDEMİR^{*1}, Gamze GÜNAYDIN²

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye
(ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6947-9310>)

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, 32260, Isparta, Türkiye
(ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9702-7675>)

(Alınış / Received: 04.05.2026, Kabul / Accepted: 18.06.2026, Online Yayınlanma / Published Online: 20.07.2026 DOI: 10.35354/tbed.1944120)

*Sorumlu Yazar Eposta: umranesendemir@sdu.edu.tr

ATIF/REFERENCE: Esendemir, Ü. & Günaydın, G. (2026). Eriyik Biriktirme Yöntemi ile Üretilen Poliamid ve Karbon Fiber Takviyeli Poliamid Kompozitlerin Darbe Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi. *Teknik Bilimler Dergisi*, 16 (2), 96-116.

Anahtar Kelimeler

Kısa karbon fiber 1,
Poliamid (PA) 2,
Kompozit 3,
Eklemeli İmalat 4,
Darbe davranışı 5.

Öz: Kompozit malzemeler, yüksek mukavemete sahip olması ve özelleştirilebilir mekanik özellikleri sayesinde özellikle otomotiv, havacılık ve savunma sanayi gibi farklı alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Eklemeli imalat teknolojisinin kompozit malzeme üretiminde, şekilsel esneklik, düşük üretim maliyetleri ve kişiselleştirilmiş üretim olanakları bu yöntemi diğer yöntemler arasında tercih edilir bir yöntem haline getirmiştir. Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemi ile üretilen karbon fiber takviyeli poliamid kompozit malzemelerin, düşük hızlı darbe davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Bu bağlamda poliamid (PA) ve %20 karbon fiber takviyeli poliamid (CPA) kompozitlerin düşük hızlı darbe testleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde darbe davranışının özelliklerini ortaya koymak amacıyla 20 J ve 30 J darbe enerjileri altındaki kuvvet çökme eğrileri, kuvvet-zaman, absorbe edilen enerji-zaman ve hız-zaman grafikleri çizilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda eklemeli imalat yöntemiyle üretilen %20 karbon eklenmesi ile üretilen CPA numunelerinin darbe dayanımlarının PA numunelerine göre daha düşük olduğu görülmüştür. Hem 20 J hem de 30 J darbe enerjilerinde CPA numunelerinde delinme hasarı oluşurken PA numunelerinde matris ezilmesi şeklinde bir hasar oluşmuştur.

Experimental Investigation of Impact Performance in Polyamide and Carbon Fiber Reinforced Polyamide Composites Fabricated by Melt Joining Method

Keywords

Short carbon fiber 1,
Polyamide (PA) 2,
Composite 3,
Additive
manufacturing 4,
Impact behavior 5.

Abstract: Composite materials are widely used in various sectors, particularly in the automotive, aerospace, and defense industries, due to their high strength and customizable mechanical properties. In the production of composite materials, additive manufacturing technology has become a preferred method over conventional manufacturing techniques because of its design flexibility, low production costs, and capability for customized fabrication. In this study, the low-velocity impact behavior of carbon fiber-reinforced polyamide composite materials manufactured using additive manufacturing was experimentally investigated. In this context, low-velocity impact tests were conducted on polyamide (PA) and 20% carbon fiber-reinforced polyamide (CPA) composites. To characterize the impact response, force-displacement, force-time, absorbed energy-time, and velocity-time curves were obtained under impact energies of 20 J and 30 J. The experimental results revealed that the impact resistance of the CPA specimens produced with 20% carbon fiber reinforcement was lower than that of the PA specimens. While perforation damage was observed in the CPA specimens at both 20 J and 30 J impact energies, the PA specimens primarily exhibited matrix crushing damage.

1. Giriş

Son yıllarda gelişimi hızlanan ve gelişen üretim teknolojileri; maliyet özgürlüğü sağlaması, malzeme israfının azaltılması ve tasarım özgürlüğü sağlaması ile eklemeli imalat yöntemlerinin yaygın kullanılmasında önemli rol oynamıştır. Eklemeli imalat teknolojisi, üç boyutlu ürünlerin katmanlı üretim yöntemiyle bilgisayar destekli tasarım verileri kullanılarak doğrudan üretimini sağlamaktadır. Uygulanan bu yöntem sayesinde daha karmaşık geometrideki parçaların üretimi geleneksel üretim yöntemlerine göre kolaylaşmış, bunun dışında üretimlerde ürünü kişiselleştirme imkanları da artmıştır. Polimer malzemeler ile eklemeli imalat teknolojisinin uygulanabilmesi, mühendislik plastiklerinin ve kompozitlerin kullanım alanlarını genişletmiştir. Özellikle PA (poliamid) gibi mühendislik termoplastikleri, eklemeli imalatla üretime uygunlukları ve mekanik özellikleriyle öne çıkmaktadır. PA matris içerisinde karbon fiber gibi yüksek mukavemetli fiberlerin takviye edilmesi ile üretilen kompozit malzemeler; taşıma kapasitesi yüksek, rijit ve hafif ürünlerin üretimine olanak sağlamaktadır. Karbon fiberin yoğunluğunun az olması, yüksek çekme ve elastik modül değerleri sayesinde poliamid bazlı kompozit malzemelerde performansı büyük oranda artmaktadır.

Rashid vd. (2022) eklemeli imalat yöntemiyle üretilen karbon fiber takviyeli poliamid-6 (PA6) kompozitlerin mekanik performansına dolgu desenlerinin ve dolgu yoğunluklarının etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı çekirdek tasarımlarına (üçgen, altıgen, dikdörtgen) ve dolgu yoğunluklarına (değişen %18-62) sahip sandviç yapılar, erimiş filament imalatı (FFF) işlemi kullanılarak üretilmiştir. Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen çekme test numuneleri test edilmiştir. Hem dolgu desenleri hem de dolgu yoğunlukları, 3 boyutlu baskı

kompozitlerinin mekanik davranışını önemli ölçüde etkilemiştir. Üçgen ve altıgen dolgu desenlerinin daha düşük dolgu yoğunluklarında daha iyi performans gösterdiği, dikdörtgen dolgu desenlerinin ise daha yüksek dolgu yoğunluklarında daha iyi mekanik dayanım ve uzama sağladığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, malzeme tasarrufu öncelikli ise, altıgen desenler tercih edilebileceğini belirtmişlerdir.

Kazemianfar ve Nani (2021) çeşitli cam/doymamış polyester kompozit numuneleri, 0°, 10°, 20°, 30° ve 40° olmak üzere farklı açılarda düşme ağırlıklı darbe test makinesi kullanılarak test etmişlerdir. Çalışmalarında emilen enerji, hasar başlangıç zamanı ve kuvveti ile numunelerin ön yüzündeki hasar alanının darbe açısı arttıkça arttığını, buna karşılık kompozitlerin arka yüzündeki hasar yoğunluğu, hasar derinliği ve hasar alanının azaldığını belirtmişlerdir.

Aderinan vd. (2022) eklemeli imalat tekniğiyle üretilen kısa lifli CFRP kompozitlerden oluşan parçaların mekanik performansını etkileyen malzeme faktörleri ve eklemeli imalat yönteminde malzeme faktörlerinin simülasyon modellemesi üzerine literatür çalışması yapmışlardır. Termoplastik matris bileşimleri, zincir düzenlemeleri ve yapısal morfoloji etkileri, üretilmiş kompozitlerin işleme kolaylığı ve nihai mekanik performansı ile ilişkili olarak tartışılmıştır.

Esendemir ve Erbil (2022) cam elyaf takviyeli epoksi kompozit plakaların darbe davranışına; darbe enerjisi, numune kalınlığı, vurucu ucu geometrisi ve ortam şartlarının etkisini incelemiştir. Çalışmalarında, darbe enerjisinin artması, numune kalınlığının azalması ve ince numunelerde vurucu ucu çapının küçük seçilmesi durumlarında numunelerin darbe dayanımının azaldığını belirtmişlerdir.

Esendemir ve Başaran (2023) farklı mesafelerde dairesel delikler içeren plakalara 15 J ve 25 J darbe enerjisi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, delikler arası mesafenin artmasıyla birlikte darbe dayanımının arttığı ve hasar alanının azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, farklı mesafelerde açılan tek ve çift dairesel delikli kompozit numuneler ile deliksiz numunelerde delinme hasarının meydana gelmediği rapor edilmiştir.

Wang vd. (2022) yenilikçi 3 boyutlu baskı ile üretilmiş auxetik kompozit panellerin düşük hızlı darbe davranışını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, kompozit panelin auxetik davranışının yüksek hızlı kamera kullanılarak gözlemlenebileceği belirtilmiştir. Ayrıca, darbe enerjisi arttıkça panelin daha kırılgan bir şekilde kırıldığı veya tamamen tahrip olduğu ifade edilmiştir.

Charekhli-Inanllo ve Mohammadimehr (2023) FDM yöntemiyle üretilen çeşitli şekillerdeki çekirdek malzemelerinin, sandviç kompozit plakaların düşük hızlı darbe davranışı üzerindeki etkisi incelemiştir. Numuneler vakum pompası yöntemi kullanılarak cam elyaf takviyeli polimerden (GFRP) yapılmış iki kompozit yüzey tabakası ile eriyik biriktirme modellemesi (FDM) yöntemi ile polilaktik asitten (PLA) üretilmiş farklı çekirdek yapılardan oluşmaktadır. Yazarlar

çalışmalarında darbeye karşı daha fazla enerji depolayabilen numunelerin tasarlanması ve üretilmesi ile hafif sandviç yapıların geliştirilmesini amaçlamışlardır. Bu kapsamda, petek, boru ve kafes olmak üzere üç farklı çekirdek geometrisi ile petek çekirdeğinde iki farklı kalınlıkta olmak üzere toplam dört farklı çekirdek yapısı üretilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kafes çekirdek yapısının depolanan enerji miktarını petek ve boru şeklindeki çekirdeklere göre sırasıyla %47 ve %53 daha fazla artırdığını belirtmişlerdir.

Andrew vd. (2024) eklemeli imalat yöntemiyle üretilen karbon fiber/PA12 hibrit peteklerin mekanik ve piezorezistif performansını incelemişlerdir. Çalışmada kısa karbon fiber (CF)/poliamid 12 (PA12) kompozit filamentler, %0, %5 veya %15 CF içeriğiyle, petek yapılarını Erimiş Filament Üretimi (FFF) yöntemiyle üretilmesinde kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, hibrit altıgen/girintili (HR) petek yapıların, düzlem içi yükleme altında hibrit olmayan çift katmanlı ve tek katmanlı muadillerine göre mekanik olarak daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, çökme dayanımı ve enerji emiliminde sırasıyla 1,64 ve 2,25 kat artış sağladığı belirtilmiştir.

Kong vd. (2024) 3B baskı yöntemiyle üretilen kısa ve sürekli karbon fiber hibrit takviyeli kompozitler üzerine deneysel ve teorik çalışmalar yapmışlardır. Farklı elyaf içeriklerine ve baskı yönelimlerine sahip sürekli ve kısa elyaf dolgulu kompozitler için elde edilen tahmin sonuçlarının deneysel verilerle uyumlu olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, tahmin hatasının %30'dan %5'in altına büyük ölçüde düştüğünü ifade edilmiştir.

Ferreira vd. (2023) eriyik biriktirme modelleme yöntemiyle üretilen 3 boyutlu baskı sürekli karbon fiber takviyeli kompozitlerin düşük hızlı darbe performansını analiz etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, 5 J darbe enerjisi altında yaşlanmanın darbe özellikleri ve görsel hasar üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Baskaran vd. (2024) reçine transfer kalıplama yöntemiyle karbon fiber takviyeli poliamid-6 kompozit (CF-PA6) üretilmiş ve darbe performansı eşdeğer bir otomotiv sınıfı epoksi matrisli kompozit (CF-Epoksi) ile karşılaştırılmıştır. 25 J darbe enerjisiyle hasar gören numunelerin darbe sonrası kalıcı özelliklerine bakıldığında, CF-PA6 sertliğinin %62'sini, mukavemetinin %84'ünü ve enerji dağıtım kapasitesinin %67'sini koruduğu buna karşılık, CF-Epoksi aynı özellikler için sırasıyla %46, %44 ve %40'ını koruduğu belirtilmiştir.

Tur ve Shokrani (2025), Markforged FX20 yazıcı kullanılarak üretilen Onyx FR-A kompozitlerinin mekanik performansı üzerine karbon fiber yöneliminin etkisi araştırılmıştır. Yükleme eksenine göre 0° ve 90° olmak üzere farklı lif yönelimlerine sahip numuneler üzerinde çekme, basma, açık delikli çekme ve ara katmanlı kayma gerilimi testleri yapılmıştır. Çalışmada, lif yöneliminin malzeme davranışını belirlemede çok önemli bir rol oynadığını ve 0° yönelimlerin 90° yönelimlere kıyasla daha yüksek çekme ve basma dayanımı sağladığı

belirtilmiştir. Ayrıca eklemeli imalatın, liflere zarar verebilecek delme gibi ikinci işlemler olmadan açık delikli numuneler gibi karmaşık geometrilerin üretilmesine olanak sağlayarak geleneksel yöntemlere göre önemli avantajlar sunduğu da ifade edilmiştir.

Niamul Islam vd. (2026) kısa ve sürekli karbon liflerle güçlendirilmiş naylon bazlı eklemeli imalat (AM) kompozitlerin yarı statik ve düşük hızlı darbe altındaki eğilme davranışı incelenmiştir. Lif tipinin (kısa ve sürekli) ve yöneliminin (boyuna, enine, yarı izotropik) etkileri, üç noktalı eğme ve sarkaç darbe testleri kullanılarak birden fazla enerji seviyelerinde incelenmiştir. Ek olarak, dayanıklılığı ve kademeli hasar gelişimini incelemek amacıyla tekrarlanan darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, lif mimarisinin sertlik, mukavemet ve enerji emilimi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu ortaya konmuştur. Kısa lifli kompozitlerin daha yüksek başlangıç eğilme sertliği sergilediği, buna karşılık sürekli lifli laminatların üstün mukavemet ve darbe direnci sağladığı belirlenmiştir.

Zhu vd. (2026) iki tip sürekli karbon elyaf (CCF) filament, ham ve basılmış halleri ile mikro yapısal özellikler, yarı statik ve dinamik mekanik özellikler ile hasar mekanizmaları açısından karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, filament içi boşlukların malzeme performansı üzerindeki etkisi detaylı olarak değerlendirilmiştir.

Havacılık ve otomotiv endüstrilerinde, fonksiyonel bileşenlerin tasarımında malzeme kullanımının azaltılmasına paralel olarak, yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip malzemelere olan ihtiyaç sürekli artmaktadır. Karmaşık geometrilere sahip yapıların tasarım ve üretiminde sağladığı esneklik nedeniyle, eklemeli imalat süreçleri bu endüstriyel uygulamalarda önemli bir araştırma ve geliştirme alanı haline gelmiştir. Bu kapsamda, söz konusu uygulamalara daha iyi uyum sağlanabilmesi için, Eklemeli imalat teknikleri kullanılarak üretilen hafif yapıların geliştirilmesi ve kapsamlı bir şekilde karakterize edilmesi kritik bir öneme sahiptir. Eriyik biriktirme yöntemi (FDM), karmaşık geometrilerin zaman ve maliyet açısından etkin biçimde üretilmesine olanak tanıyan eklemeli imalat yöntemlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Ancak literatür incelendiğinde, FDM yöntemiyle üretilen poliamid (PA) ve karbon fiber takviyeli poliamid (CPA) kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışlarına yönelik çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Özellikle %20 kısa karbon fiber takviyeli poliamid kompozitlerin darbe performansının, aynı üretim koşullarında üretilen saf poliamid numuneler ile karşılaştırmalı olarak değerlendirildiği çalışmaların oldukça yetersiz olduğu dikkat çekmektedir. Bu bağlamda, mevcut çalışmada eklemeli imalat yöntemi ile üretilen poliamid (PA) ve %20 kısa karbon fiber takviyeli poliamid (CPA) kompozitlerin düşük hızlı darbe performansı deneysel olarak incelenmiştir. 20 J ve 30 J darbe enerjileri altında gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen kuvvet-zaman, hız-zaman ve enerji-zaman

eğrileri ile maksimum kuvvet, maksimum yer değiştirme ve enerji absorpsiyonu parametreleri analiz edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Darbe Test Düzeneği ve Numune Hazırlığı

Bu çalışmada; FDM yöntemi ile üretilen PA ve CPA kompozit malzemelerin düşük hızlı darbeler altındaki davranışları incelenerek, darbe performansları değerlendirilmiştir. Darbe testleri, 20J ve 30J seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Numuneler, 100×100×2 mm boyutlarında hazırlanmış olup, testlerde kullanılan darbe cihazı düşen ağırlık prensibiyle çalışan, hız ve enerji parametrelerini kontrol edilebilen Instron CEAST 9350 modelidir. Deneyler oda sıcaklığında yapılmış ve her enerji seviyesi için hem darbe uygulanan yüzey hem de arka yüzey görüntülerinin fotoğrafı alınmıştır. Darbe testleri ISO 6603-2 standardına göre yapılmıştır. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri yardımıyla numunelerin darbe sırasında enerji yutma kapasiteleri değerlendirilmiş, görsel analizlerle yüzeylerde oluşan çatlak, ezilme ve delaminasyon gibi hasar türleri belirtilmiştir. Bu deneysel düzenleme sayesinde, farklı enerji seviyelerinde PA ve CPA kompozitlerin darbe altındaki davranışları kıyaslanmıştır.

2.2. Numunelerin Üretim Parametreleri

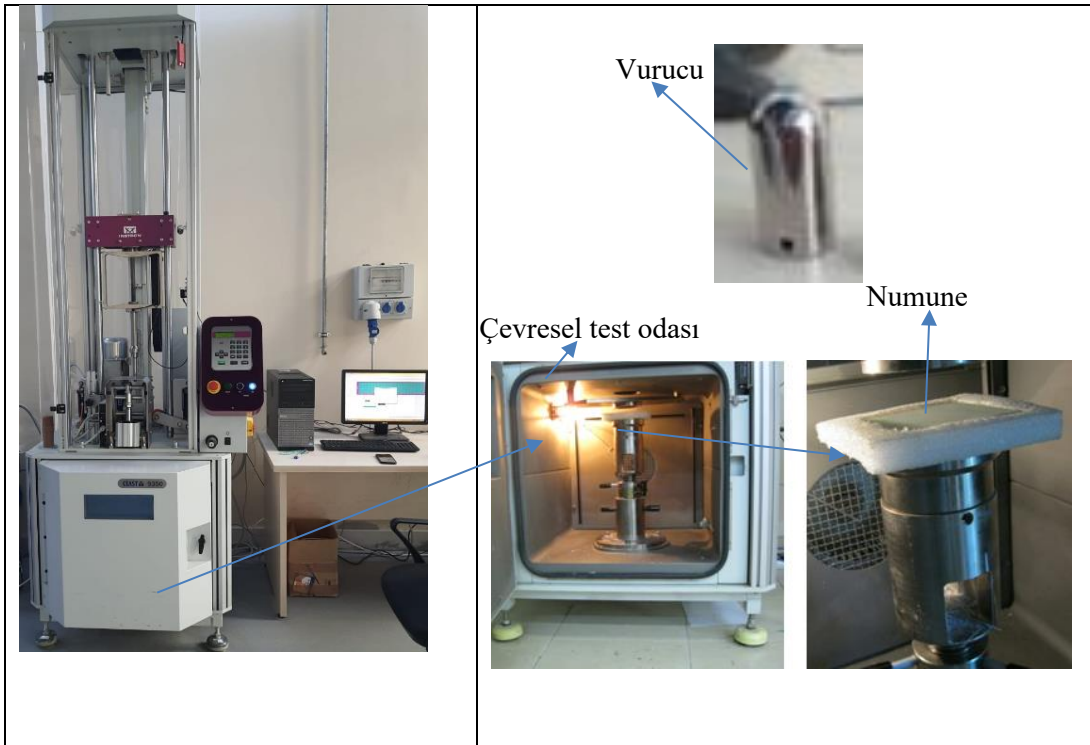
PA ve CPA numunelerinin 3 boyutlu yazıcılarda üretilebilmesi için modeller STL formatında kaydedilerek Creality Ender-3 S1 marka yazıcılarda dilimleme işlemini yapan ve diğer üretim parametrelerinin düzenlenmesinde kullanılan Cura yazılım programını gönderilmiştir. Filamentlerin baskıları için farklı extruder ve platform sıcaklıklarına ihtiyaç duyulduğu için her bir filamentte teknik veri formunda önerilen extruder ve platform sıcaklıkları dikkate alınarak CPA filament için 0,4 mm çapında çelik nozzle ve PA filament için 0.4 mm çapında pirinç nozzle kullanılarak üretimler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan filamentler eSUN marka 1,75 mm çapında PA ve ağırlının %20 oranında karbon fiberle takviye edilmiş CPA filamentler olup üretim esnasında kullanılan yazdırma parametreleriyle ilgili bilgiler Tablo 1’de verilmiştir. Numuneler %100 dolgu oranında ve 0° baskı açısında üretilmiştir.

Tablo 1. Üretim esnasında kullanılan yazdırma parametreleri

Yazdırma Parametreleri	PA ve CPA
Extruder Sıcaklığı (°C)	260
Tabla Platform Sıcaklığı (°C)	85
Baskı Hızı (mm/s)	80
Hareket Etme Hızı (mm/s)	80
Nozzle Akışı (%)	100

Filament Dolgu Yoğunluğu (%)	100
Katman Kalınlığı (mm)	0.2
Kenar Hattı Sayısı	3
Duvar Kalınlığı (mm)	1,2

Darbe testleri, Instron CEAST 9350 modeli düşen ağırlık cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.). Cihaz, 0.59 J ile 1800 J arasında enerji uygulayabilen serbest düşüş prensibine dayalı, yazılım destekli ve yüksek hassasiyetli bir sistemdir. Darbe test cihazında kullanılan vurucu çelik malzemeden üretilmiş olup, 20 mm çapında küresel uca ve 4.926 kg kütleye sahiptir. Darbe hızları seçilen enerji seviyelerine göre ayarlanmış ve 20J darbe için yaklaşık 2.6 m/s, 30J darbe için yaklaşık 3.2 m/s olarak ölçülmüştür. Deneyler süresince her numune sabit pozisyonda olacak şekilde yerleştirilmiş ve test sonrası yüzey deformasyonları hem üstten hem de alttan fotoğraf görüntüleri alınmıştır. Deneysel çalışmada her bir darbe enerjisi seviyesi için üç tekrar gerçekleştirilmiş olup, toplam 12 adet numune üzerinde darbe testi uygulanmıştır.



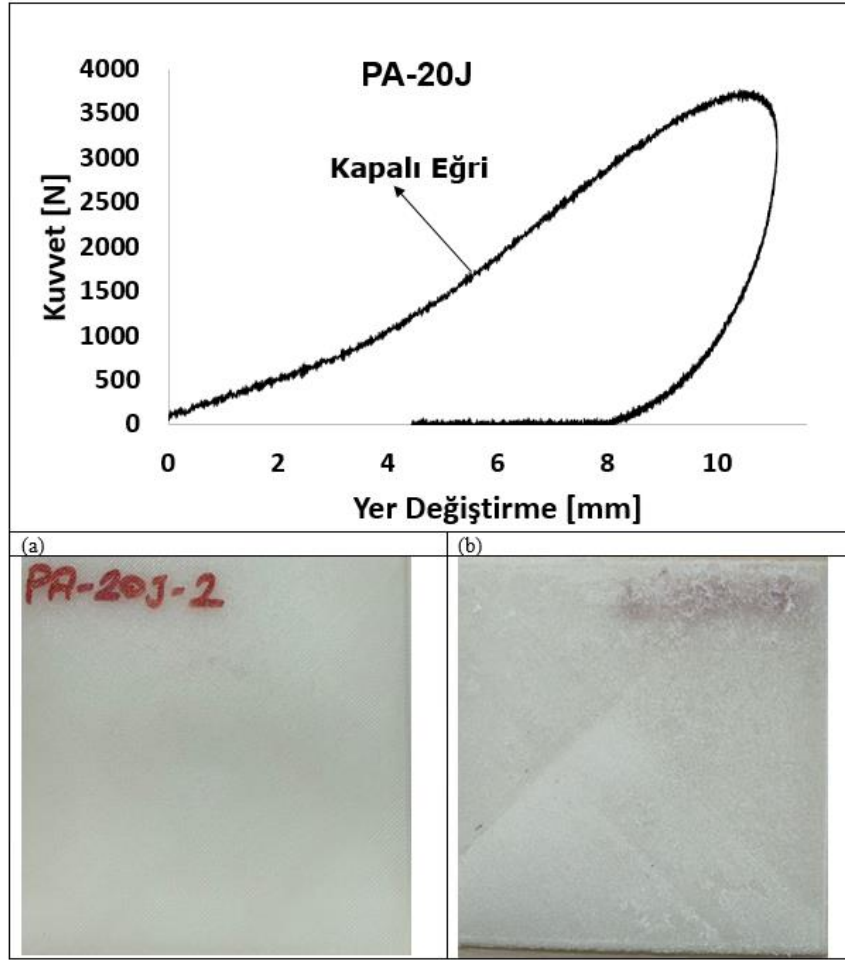
Şekil 1. Darbe Test Cihazı

3. Bulgular

3.1. Kuvvet Çökme Eğrileri

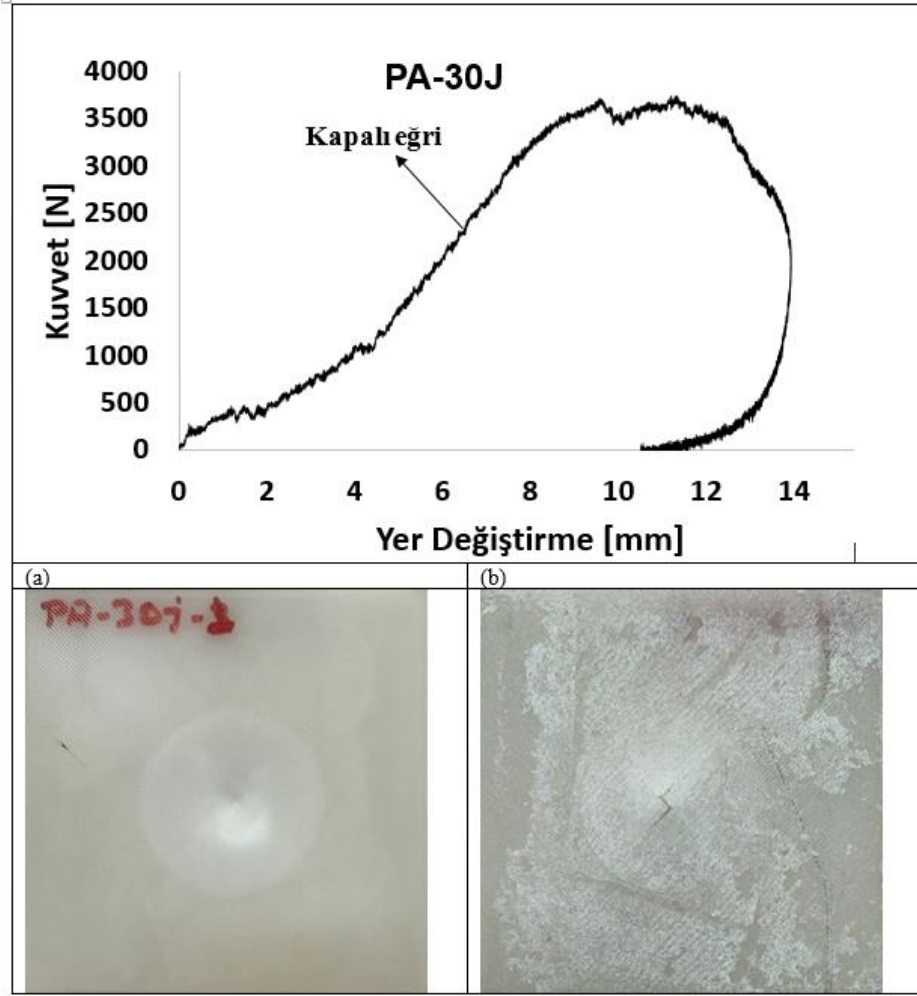
Kuvvet-çökme (F-d) eğrileri darbe olayı esnasındaki kompozit plakalara ait darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerden bir tanesidir. Deneysel çalışmada elde edilen kuvvet-çökme eğrileri, darbe enerjisinin etkisiyle numunelerin ne ölçüde deformasyona uğradığını ve maksimum yük taşıma kapasitelerini göstermektedir. Kuvvetin çökme mesafesine göre değişimi, numunenin rijitlik derecesi ve darbe enerjisini sönümleme performansı hakkında doğrudan bilgi sağlamaktadır. Bu çalışmada PA ve CPA numunelerine 20J ve 30J darbe enerjisi uygulanmıştır. 20J darbe enerjisi altında PA' nın kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve darbe uygulanan yüzey (a) ve arka yüzeyin fotoğraf görüntüsü (b) Şekil 2'de gösterilmiştir.

PA numunesi 20J darbe enerjisi altında kapalı eğri oluşturduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak ön yüzey (a) ve arka yüzey (b) fotoğraflarından görüleceği üzere numunenin üst ve arka yüzeylerinde kayda değer bir hasar oluşmadığı görülmüştür.



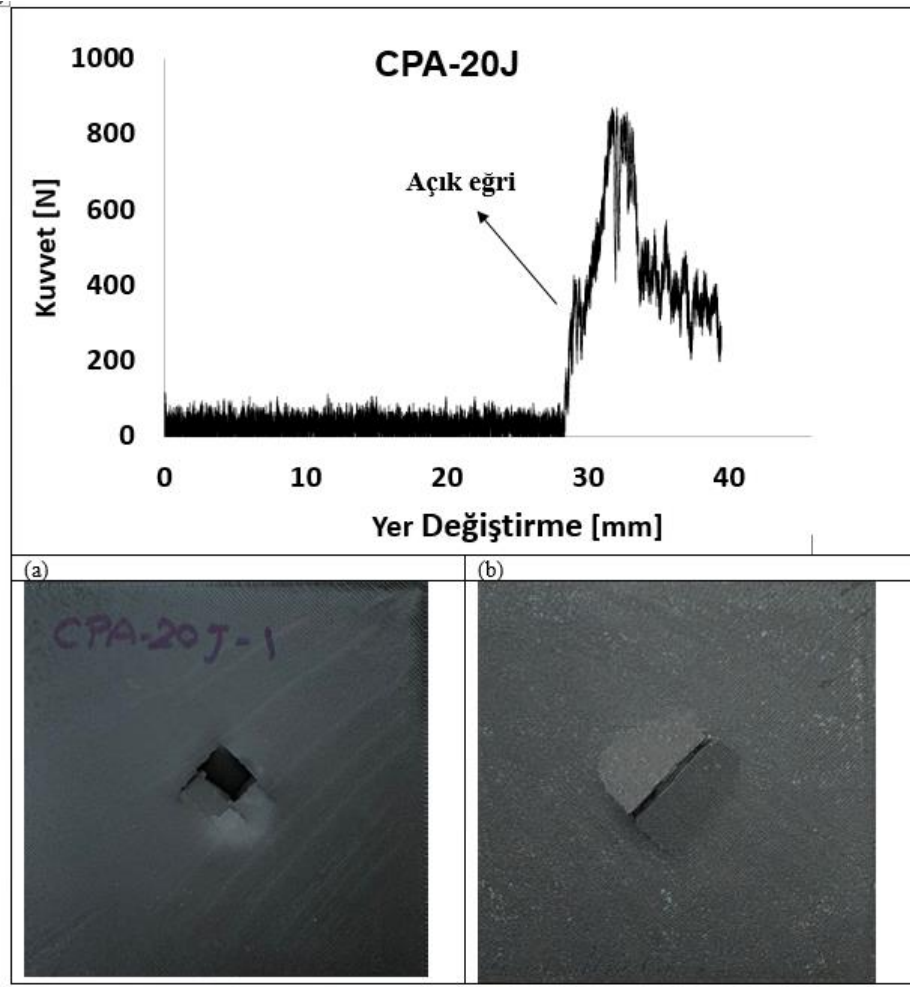
Şekil 2. 20J darbe enerjisi altında PA'nın kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve darbe uygulanan yüzey (a) ve arka yüzeyin fotoğraf görüntüsü (b)

PA numunesinin 30J darbe enerjisi altında da kapalı eğri oluşturduğu görülmüştür (Şekil 3). Şekil 3'deki darbe uygulanmış ön yüzey (a) ve arka yüzey (b) fotoğraflarından görüleceği üzere numunenin üst yüzeyinde matriks ezilmesi, arka yüzeyinde ise matriks çatlağı olduğu görülmüştür. Darbe uygulanan üst yüzlerdeki hasar alanının darbe uygulanmamış arka yüzeye göre daha az olduğu görülmüştür.



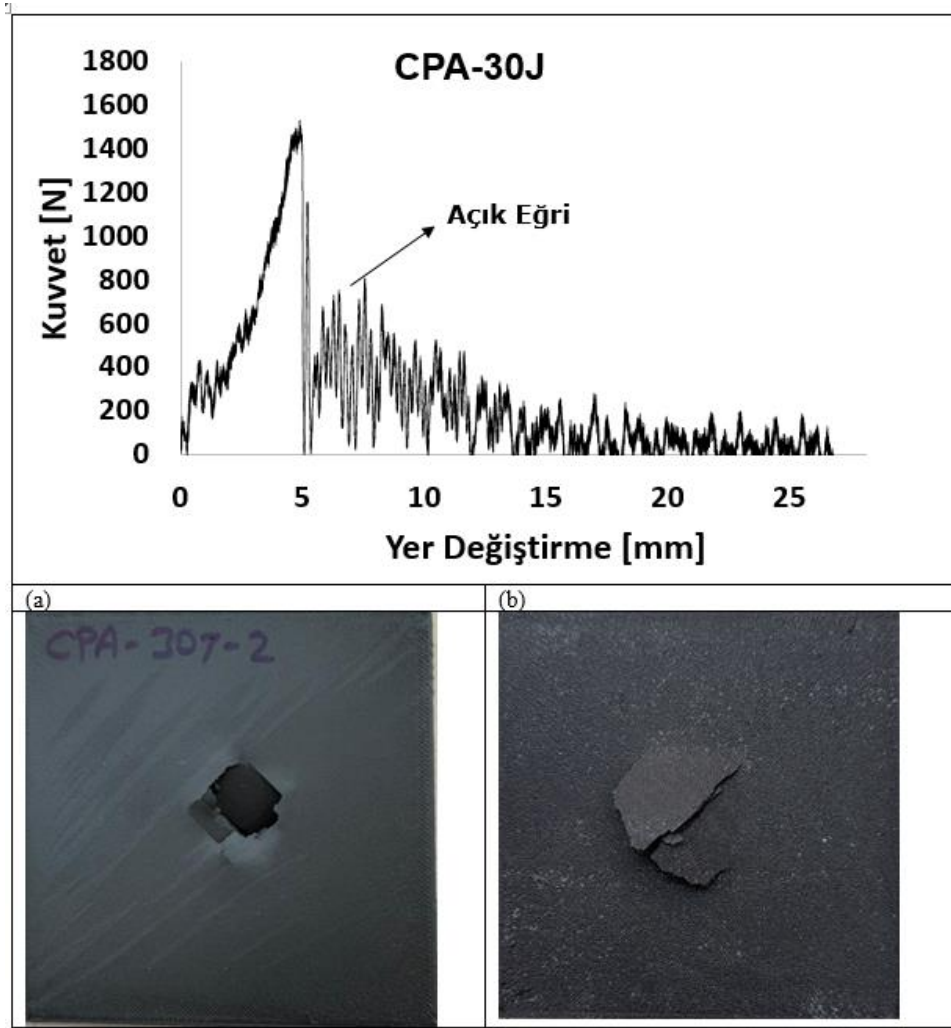
Şekil 3. 30 J darbe enerjisi altında PA'nın kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve darbe uygulanan yüzey (a) ve arka yüzeyin fotoğraf görüntüsü (b)

Şekil 4 'te 20J darbe enerjisi altında CPA kompozitin kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve darbe uygulanan yüzey (a) ve arka yüzeyin fotoğraf görüntüsü (b) verilmiştir. CPA numunesi 20J darbe enerjisi altında açık eğri oluşturduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak ön yüzey (a) ve arka yüzey (b) fotoğraflarından görüleceği üzere delinme hasarı olduğu görülmüştür.



Şekil 4. 20 J darbe enerjisi altında CPA'nın kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve darbe uygulanan yüzey (a) ve arka yüzeyin fotoğraf görüntüsü (b)

30J darbe enerjisi altında CPA kompozitin kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve darbe uygulanan yüzey (a) ve arka yüzeyin fotoğraf görüntüsü (b) Şekil 5'de gösterilmiştir.

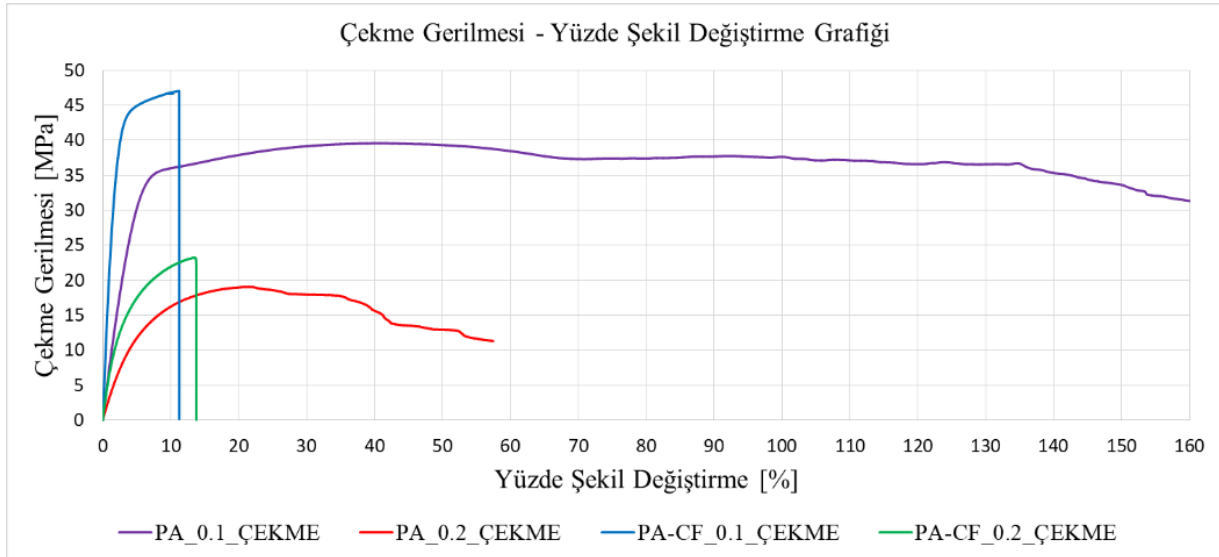


Şekil 5. 30 J darbe enerjisi altında CPA'nın kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve darbe uygulanan yüzey (a) ve arka yüzeyin fotoğraf görüntüsü (b)

CPA numunesi 30J darbe enerjisi altında açık eğri oluşturduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak ön yüzey (a) ve arka yüzey fotoğraflarından görüleceği üzere numunenin delinme hasarı oluştuğu görülmüştür.

Şekil 2-5'de PA ve CPA numunelerine ait artan darbe enerjisi altında, kuvvetin çökmeye karşı değişimini gösteren F-d grafiği görülmektedir. Her bir eğri yüklemde bir artma kısmına, ulaşılan bir maksimum kuvvet değerine ve yükten boşaltmada da bir azalma kısmına sahiptir. Kuvvet-çökme eğrisinde artma kısmı darbe yüküne karşı numunenin göstermiş olduğu dirençten dolayı eğilme rijitliği olarak adlandırılır. Artan darbe enerjisi altında oluşan bu eğriler kapalı tip (Şekil 2-3) ve açık tip eğri (Şekil 4-5) olarak iki kısma ayrılır. Kapalı tip eğri vurucunun numuneye temas etmesinden sonra vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesiyle oluşan eğrilerdir. Yani uygulanan darbe enerjisinin büyük bir kısmı numune tarafından absorbe edilmiş ve absorbe edilmeyen enerjide vurucunun

geri sekmesi için kullanılmıştır. PA numuneleri için kapalı eğri olmuştur. 20J ve 30J darbe enerjisi altında test edilen PA numuneleri karşılaştırıldığında darbe enerjisi arttırıldığında, geri sekme kısmı azalırken kapalı tip eğri genişler ve çökmenin arttığı görülmektedir. CPA numunelerinde için açık eğri olmuştur. Eğer bir eğri açık tip ise vurucu numuneye ya saplanmış ya da numune delinmiştir. Buna göre numuneye saplanan vurucu numune kalınlığı boyunca aşağı doğru hareket eder ve artık numune yüzeyinden geri sekme meydana gelmez. Şekil 4–5'te sunulan kuvvet–çökme eğrileri incelendiğinde, numunelerin vurucu etkisiyle delinmeye maruz kaldığı açıkça görülmektedir. Numunenin delinme sınırına ulaşmasıyla birlikte vurucu, numuneyi tamamen delerek geçmekte ve bu aşamadan sonra absorbe edilen enerji değeri büyük ölçüde sabit kalmaktadır. Delinme bölgesine girilmesiyle birlikte vurucu ile numune arasındaki etkileşim esas olarak sürtünme kuvvetleri tarafından belirlenmekte olup, uygulanan enerji artırılrsa dahi numunede meydana gelen hasarın ilerlemesinde kayda değer bir artış oluşmamaktadır. Kuvvet–çökme (F–d) eğrileri, malzemelerin darbe yüklemesi altındaki enerji yutma ve sönümleme performanslarının değerlendirilmesinde temel bir parametre olarak kullanılmaktadır. Elde edilen bulgular, PA numunelerinin CPA numunelerine kıyasla daha yüksek elastik deformasyon kabiliyetine sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, PA malzemesinin darbe enerjisinin daha büyük bir bölümünü yayarak absorbe edebilmesi ve böylece yapısal bütünlüğünü daha etkin bir şekilde koruyabilmesi ile açıklanmaktadır. Bu çalışmada elde edilen bulgular, CPA numunelerinin PA numunelerine kıyasla daha gevrek bir mekanik davranış sergilediğini göstermektedir. CPA numunelerinde darbe enerjisinin lokalize olması, çatlak oluşumu ve ilerlemesi ile kırılma mekanizmalarını tetikleyerek daha yüksek düzeyde yapısal hasara yol açmaktadır. Buna karşılık, PA numunelerinin darbe yüklemeleri altında daha yüksek dayanım sergilediği belirlenmiştir. Başaran (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, eriyik biriktirme yöntemi ile 0,1 mm ve 0,2 mm katman kalınlıklarında üretilen karbon fiber takviyeli PA kompozitlerin mekanik davranışları incelenmiştir. Söz konusu çalışmada, PA matrisine karbon fiber ilavesinin malzeme yapısında gevrekleşmeye neden olduğu belirtilmiştir (Şekil 6).



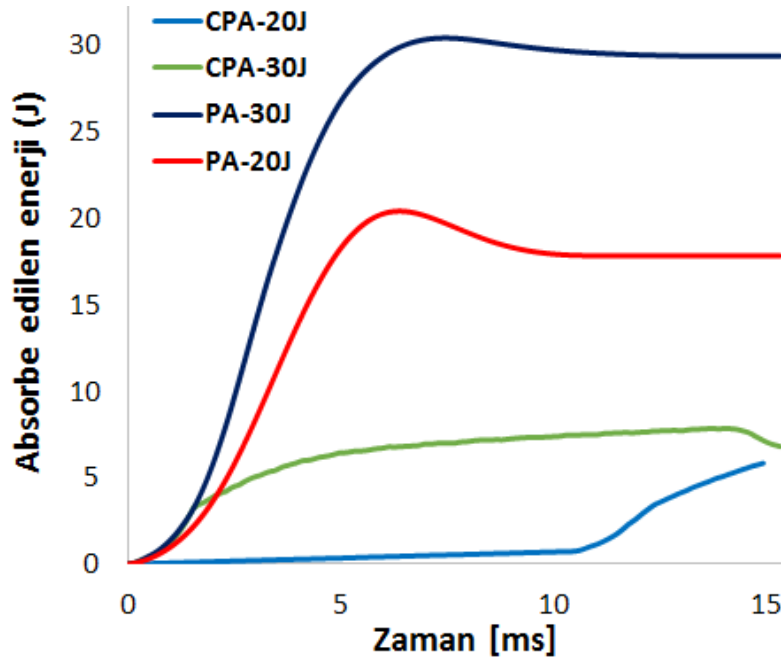
Şekil 6. Çekme gerilmesi – yüzde şekil değiştirme grafiği (Başaran 2024)

PA numunelerinde katmanlar arası bağlanmanın daha kuvvetli olduğu gözlemlenirken, kısa karbon fiber takviyesinin CPA numunelerinde katmanlar arası bağları zayıflatabileceği şeklinde değerlendirilmiştir. Ayrıca, karbon fiber ilavesi ile matris içerisinde oluşan gözenekli yapının darbe dayanımını olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir. Bu bağlamda, karbon fiber takviyesinin kırılma direncini artırmadığı, aksine enerji sönmüleme kapasitesini azalttığı sonucuna varılmıştır.

Diğer taraftan, Şekil 2–5’te görüldüğü üzere darbe enerjisindeki artışa bağlı olarak numunelerde meydana gelen hasar miktarının da arttığı tespit edilmiştir. Mathivanan ve Jerald (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı darbe enerjileri (3,14J, 4,71J, 6,28J, 7,8J ve 15,7J) altında örgü cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerin darbe davranışı deneysel olarak incelenmiş ve darbe enerjisinin artmasıyla birlikte hasar seviyesinin de arttığı rapor edilmiştir. Bu sonuçların, mevcut çalışmada elde edilen bulgularla uyumlu olduğu görülmektedir.

3.2. Absorbe edilen enerji-zaman grafiği

Şekil 7’de Poliamid (PA) ve karbon fiber takviyeli poliamid (CPA) kompozit numunelerin 20J ve 30J darbe enerjisi altındaki zaman-absorbe edilen enerji grafiği gösterilmiştir.

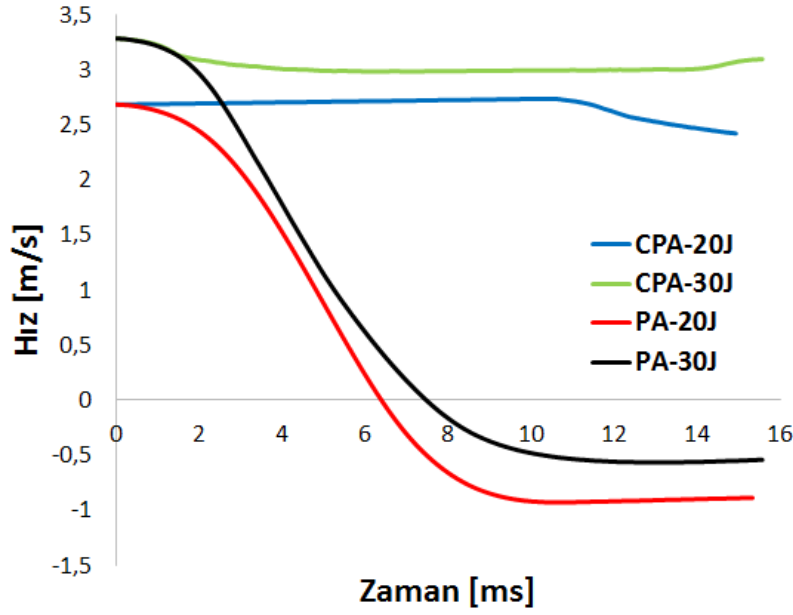


Şekil 7. Farklı darbe enerjileri altında PA ve CPA kompozitlerinin absorbe edilen enerji-zaman eğrisi

Grafiğin yatay ekseninde zaman (ms), dikey ekseninde ise absorbe edilen enerji (J) verilmiştir. Absorbe edilen enerji, F-d eğrisinin altında kalan alanın integraline eşdeğerdir. Vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi (rebound) durumunda vurucunun sahip olduğu enerjinin yalnızca bir kısmı numune tarafından kalıcı olarak absorbe edilir; geri kalan enerji vurucunun geri sekme hareketini gerçekleştirmek üzere geri verilir. Vurucunun numuneye saplanması (penetration) halinde, darbe enerjisinin büyük çoğunluğu malzeme tarafından absorbe edilir ve eğrinin son segmenti neredeyse yatay (enerji artışı) bir profil sergiler. Eğer vurucu numuneyi delip geçerse (perforation), vurucu-numune arasında gerçekleşen sürtünmeye bağlı enerji kaybı da absorbe edilen enerji hesabına eklenir; bu durum eğrinin yukarı yönlü bir kayma göstermesine yol açar.

3.3. Hız-zaman grafiği

Şekil 8'da poliamid (PA) ve karbon fiber takviyeli poliamid (CPA) kompozit numunelerin 20J ve 30J darbe enerjisi altında hız-zaman grafiği verilmiştir.



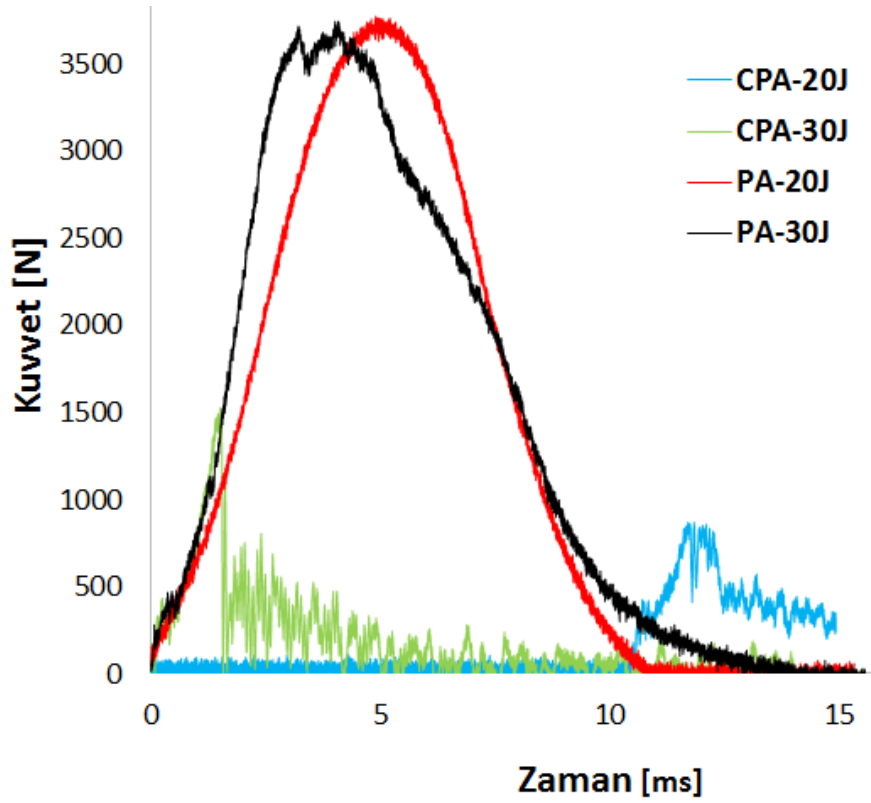
Şekil 8. Farklı darbe enerjileri altında PA ve CPA kompozit numunelerinin hız-zaman eğrisi

Şekil 8, poliamid (PA) ve karbon fiber takviyeli poliamid (CPA) kompozit numunelerinin 20J ve 30J darbe enerjileri altında, zamanla vurucunun numune üzerine uyguladığı kuvvetin değişimini göstermektedir. PA numuneleri için gerçekleştirilen darbe testlerinde, artan darbe enerjisi koşullarında başlangıçta belirli bir hıza sahip olan vurucunun numune ile ilk temasının ardından hızında bir azalma meydana geldiği gözlenmiştir. Vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi durumunda ise yukarı yönde hareket eden vurucu negatif hız değerlerine ulaşmaktadır.

CPA numunelerinde artan darbe enerjisi altında gerçekleştirilen darbe testlerinde ise vurucunun hızının pozitif yönde kaldığı görülmektedir. Vurucunun numuneyi delerek geçmesi durumunda, belirli bir hızla numuneye saplanan ve numune kalınlığı boyunca ilerleyen vurucunun hızının azalmasına neden olan temel etken, vurucu ile numune yüzeyi arasında oluşan sürtünme kuvvetidir. Bu durumda geri sekme gerçekleşmediğinden, vurucu hareketini pozitif hız değerleri ile sürdürmektedir.

3.3. Kuvvet-zaman grafiği

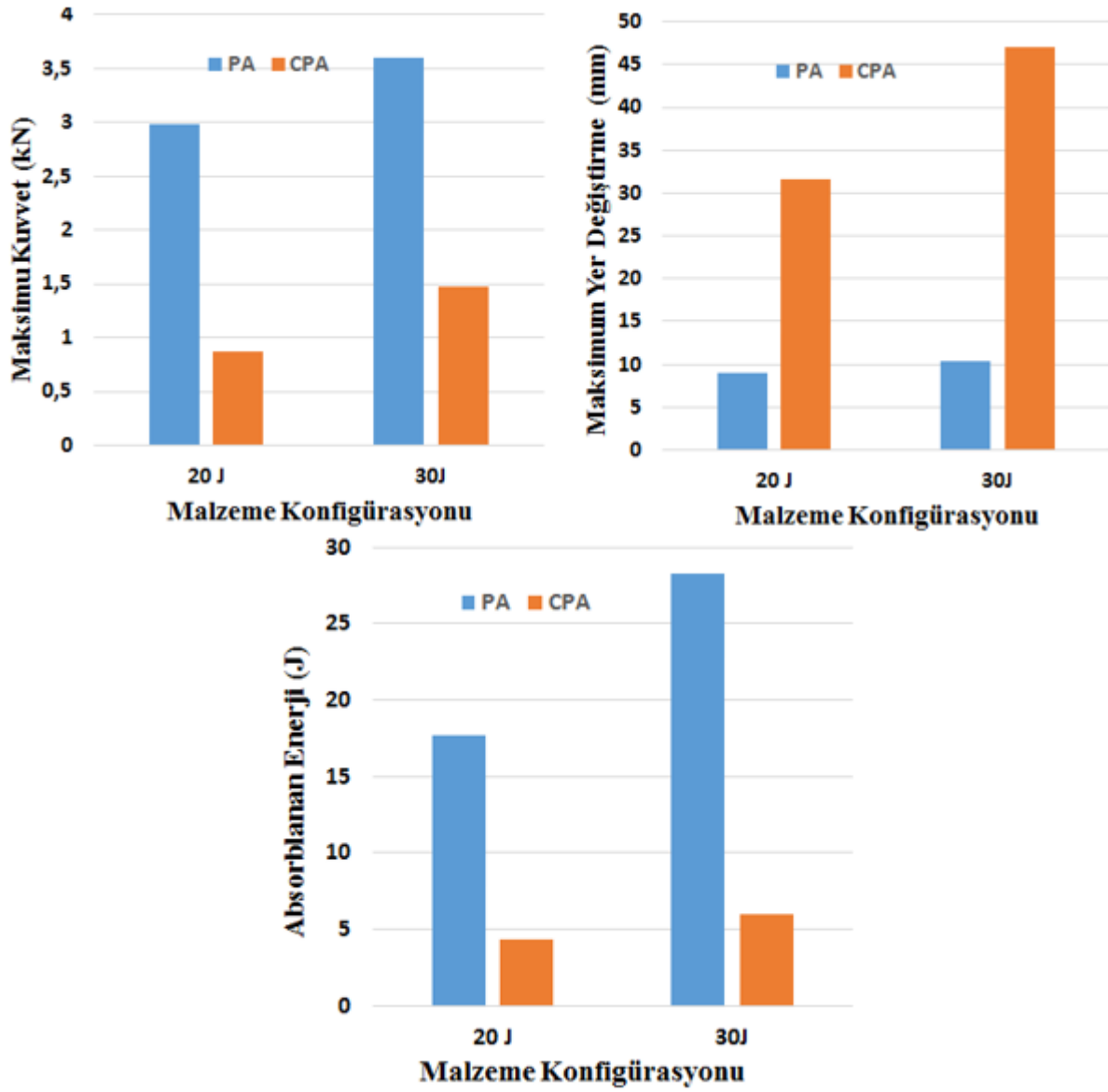
Şekil 9'da poliamid (PA) ve karbon fiber takviyeli poliamid (CPA) kompozit numunelerin 20J ve 30J darbe enerjisi altında kuvvet-zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 9. Farklı darbe enerjileri altında PA ve CPA kompozit numunelerinin kuvvet-zaman eğrisi

Şekil 9'dan görüldüğü üzere, PA numunelerine ait kuvvet-zaman eğrileri parabolik bir karakter sergilemekte ve genel olarak dağa benzer bir şekil oluşturmaktadır. CPA numunelerinde ise maksimum kuvvet değerinin yaklaşık olarak sabit bir seviyede kaldığı gözlemlenmektedir.

Şekil 10'da PA ve CPA numunelerine ait maksimum kuvvet, maksimum yer değiştirme ve maksimum enerji absorpsiyonu değerleri verilmiştir. İlgili parametrelerin güvenilir bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla, her bir deney koşulu için darbe testleri üç tekrar halinde gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçların ortalama değerleri esas alınmıştır. Bu doğrultuda, şekilde verilen maksimum kuvvet, maksimum yer değiştirme ve maksimum enerji absorpsiyonu değerleri, üç bağımsız ölçümün aritmetik ortalamalarını temsil etmektedir.



Şekil 10. Farklı darbe enerjileri altında PA ve CPA kompozit numunelerinin maksimum kuvvet, maksimum yer değiştirme ve maksimum absorblanan enerji değerleri

Şekil 10'dan görüleceği üzere PA numunelerinin CPA numunelerine göre yük taşıma kapasitesinin daha yüksek, yer değiştirme miktarının daha düşük ve absorblanan enerji miktarının daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca hem PA hem de CPA numuneleri için darbe enerjisi arttıkça maksimum kuvvet değerleri, maksimum yer değiştirmeler ve absorblanan enerji değerleri de artmaktadır. .

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, poliamid (PA) ve %20 kısa karbon fiber takviyeli poliamid (CPA) kompozit numunelerin düşük hızlı darbe yüklemeleri altındaki davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Uygulanan 20J ve 30J darbe enerjileri sonucunda elde edilen kuvvet-zaman, hız-zaman ve absorbe edilen enerji-zaman eğrileri ile

malzemelerin darbe performansları analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- PA numuneleri, yüksek darbe enerjilerini daha fazla deformasyon yoluyla absorbe edebilmekte ve daha yüksek darbe kuvvetlerine karşı direnç gösterebilmektedir. CPA numunelerinde ise delinme hasarı oluşmuştur.

- Absorbe edilen enerji eğrileri incelendiğinde, PA numunelerinin toplam enerji yutma kapasiteleri CPA numunelerine göre belirgin şekilde daha yüksek bulunmuştur. Bu durum, PA malzemesinin darbe yükünü sönümleyebilme yeteneğinin fazla olmasıyla ilişkilidir.

- Aynı darbe enerjisi altında CPA numunelerin PA göre yük taşıma kapasitelerin daha az olduğu görülmüştür. 20J darbe enerjisi için CPA numunelerdeki maksimum kuvvet değerinde PA numuneye göre yaklaşık %71 oranında azalma görülürken bu azalma 30J darbe enerjisi için %59'dur.

- Aynı darbe enerjisi altında PA numunelerin CPA göre yer değiştirme değerinin daha az olduğu görülmüştür. 20J darbe enerjisi için PA numunelerdeki maksimum yer değiştirme değerinde CPA numuneye göre yaklaşık %71 oranında azalma görülürken bu azalma 30J darbe enerjisi için %78'dir.

- Aynı darbe enerjisi altında CPA numunelerin PA göre absorblanan enerji miktarının daha az olduğu görülmüştür. 20J darbe enerjisi için CPA numunelerdeki absorblanan enerji değerinde PA numuneye göre yaklaşık %75 oranında azalma görülürken bu azalma 30J darbe enerjisi için %79'dur. Sonuç olarak, PA malzemeler darbe enerjisini daha fazla sönümleyebilme özelliği göstermiştir.

- Darbe enerjisi arttıkça maksimum kuvvet değerleri artmaktadır. Bu artış PA numuneleri için %20; CPA numuneleri için %70'dır. Benzer şekilde darbe enerjisi arttıkça maksimum yer değiştirme değerleri de artmaktadır. Bu artış PA numuneleri için yaklaşık %16 iken CPA numuneleri için %49'dur.

- Hem 20J hem de 30J darbe enerjilerinde; PA numunelerinde kapalı eğri görülürken CPA numunelerinde açık eğri görülmüştür. Bu durum, PA numunelerinde geri sekme davranışının gerçekleştiğini ve numunenin delinmeden darbe enerjisini absorbe edebildiğini; CPA numunelerinde ise delinme hasarı nedeniyle vurucunun numuneyi tamamen geçtiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, düşük hızlı darbe yükleri altında PA numunelerinin CPA numunelerine kıyasla daha yüksek enerji absorpsiyonu, daha iyi hasar toleransı ve daha üstün darbe dayanımı sergilediği belirlenmiştir. Buna karşılık, karbon fiber takviyesinin CPA numunelerinin darbe yükleri altında daha gevrek bir davranış göstermesine ve delinme hasarına daha yatkın hale gelmesine neden olmuşturduğu görülmüştür.

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen

yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- Adeniran O., Cong, W., Aremu, A., (2022). Material design factors in the additive manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites: A state-of-the-art review , *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* ,5 , 100100.
- Andrew, JJ., Uddin, MA., Kumar, S., Schiffer, A., (2024). Mechanical and piezoresistive performance of additively manufactured carbon fiber/PA12 hybrid honeycombs, *Thin-Walled Structures*, 201, 111950.
- Başaran, Ö., 2024. Eriyik Biriktirme Yöntemi İle Üretilen Karbon Fiber Takviyeli PA Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 115s, Isparta.
- Baskaran, M., Calle, A., Harismendy, I., García-Arrieta, S., Elizetxea, C., Aretxabaleta, L., Aurrekoetxea, J., (2024). Impact performance comparison of carbon fiber reinforced polyamide 6 and fast-curing epoxy composites manufactured by resin transfer molding, *Polymer Composites*, 5631-5639.
- Charekhli-Inanllo, M., Mohammadimehr, M., (2023). The effect of various shape core materials by FDM on low velocity impact behavior of a sandwich composite plate , *Engineering Structures*, 294, 116721, 1-12.
- Esendemir, Ü., & Başaran, Ö. (2023). Dairesel delikli kompozit plakaların düşük hızlı darbe davranışlarının deneysel olarak incelenmesi. *Teknik Bilimler Dergisi*, 13(2), 20-27.
- Esendemir, Ü., Erbil, A. (2022). Kompozit plakaların darbe davranışını etkileyen faktörler üzerine bir çalışma, *Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 33(1), 42-55.
- Ferreira, LM., Aranda, MT., Munoz-Reja, M., Coelho, CACP., Tavara, L., (2023). Ageing effect on the low-velocity impact response of 3D printed continuous fibre reinforced composites, *Composites Part B*, 267. 111031.
- Kazemianfar, B., Nami, MR., (2021). Influence of oblique low velocity impact on damage behavior of 2D and 3D woven composites: Experimental and numerical methods, *Thin-Walled Structures* 167, 1-17.

- Kong, X., Sun, G., Luo, Q., Brykin, V., Qian; J., (2024). Experimental and theoretical studies on 3D printed short and continuous carbon fiber hybrid reinforced composites, *Thin-Walled Structures*, 205, 112406.
- Mathivanan, N.R., Jerald, J. (2010). Experimental investigation of woven E-glass composite laminates subjected to low-velocity impact at different energy levels. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 9(7): 643-652.
- Niamul Islam, Md., Baxevanakis, KP., Silberschmidt, VV:, (2026). Quasi-static and low-velocity impact bending performance of additively manufactured polymer-matrix composites: Role of filament architecture, *Composites:Part A*, 202, 109446.
- Rashid, AA., Ikram, H., Koç, M., Additive manufacturing and mechanical performance of carbon fiber reinforced Polyamide-6 composites, *Materials Today: Proceedings* 62, 6359–6363.
- Wang, L., Sun, J., Ding, T., Liang, Y., Ho, J.C.M., Lai, M.H., (2022). Manufacture and behaviour of innovative 3D printed auxetic composite panels subjected to low-velocity impact load, *Structures* 38, 910–933.
- Tur, E., Shokrani, A., (2025). Influence of fibre orientation on mechanical behaviour of Onyx-carbon fibre composites fabricated via additive manufacturing, *Procedia CIRP*, 134, 67-72.
- Zhu, X., Liu,L., Shao, C., Zhou, J., Luo, G., Zhou, Z., Chen, W., (2026). Intra-filament voids in FDM 3D-printed continuous carbon fiber composites: microstructure, quasi-static/dynamic mechanical properties, and damage mechanisms, *Composite Structures*, 381, 120050, 1-15.