POLİMER ÇARPIŞMA KUTULARININ DARBE YÜKLEMESİ ALTINDAKİ MEKANİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Merve AKMAN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POLİMER ÇARPIŞMA KUTULARININ DARBE YÜKLEMESİ ALTINDAKİ MEKANİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Merve AKMAN
0000-0002-7731-5524

Doç.Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

POLİMER ÇARPIŞMA KUTULARININ DARBE YÜKLEMESİ ALTINDAKİ MEKANİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Merve AKMAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN

Günümüzde otomobil sayısının artmasıyla birlikte yolculuk esnasında meydana gelen trafik kazaları da artış göstermektedir. Olası kaza durumunda hem araç hem de yolcu güvenliğini sağlayabilmek amacıyla araçta aktif ve pasif güvenlik elemanları kullanılmaktadır. Pasif güvenlik elemanlarından biri olan çarpışma kutuları, kaza anında ortaya çıkan çarpışma enerjisini sönümleyerek güvenliği sağlamaktadır. Son zamanlarda kullanım alanları giderek artan polimer malzemeler, otomobillerde de hafifliği ve özellikle de yakıt tasarrufu konusunda sağladığı üstün özelliklerle sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, mühendislik polimerlerinden biri olan takviyesiz polyamid PA66 ve %35 oranında cam elyaf takviyeli PA66-GF35 malzemesi ile hazırlanan kübik yapıya sahip çarpışma kutuları deneysel olarak incelenmiştir. İncelemeler sonucunda takviyeli çarpışma kutusunun takviyesiz olana kıyasla daha yüksek dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Boş çarpışma kutuları ile poliüretan köpük ve 301 paslanmaz çelik sac takviyesi yapılmış çarpışma kutularının, mekanik performansını karşılaştırmak amacıyla düşürme testleri yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda cam elyaf takviyeli çarpışma kutusunun takviyesiz olana göre daha fazla enerji sönümlediği görülmüştür. Poliüretan köpük takviyesinin cam elyaf takviyeli çarpışma kutularında pek etkisi olmadığı, takviyesiz kutuda ise deformasyon davranışı ve enerji emilimi yönünden avantajlar sağladığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çarpışma kutusu, polimer, cam elyaf takviyesi, poliüretan köpük, paslanmaz çelik sac, düşürme testi

2022, x + 62 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF POLYMER CRASH BOXES UNDER IMPACT LOADING

Merve AKMAN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN

Today, with the increase in the number of automobiles, traffic accidents that occur during travel also increase. Active and passive safety elements are used in the vehicle in order to ensure both vehicle and passenger safety in case of a possible accident. Crash boxes, which are one of the passive safety elements, provide safety by absorbing the collision energy that occurs in the event of an accident. Polymer materials, whose usage areas have been increasing recently, have started to be used frequently in automobiles with their lightness and especially superior properties about fuel economy. In this study, crash boxes with cubic structure prepared with non-reinforced polyamide PA66, which is one of the engineering polymers, and 35% glass fiber reinforced PA66-GF35 material were experimentally investigated. As a result of the examinations, it was seen that the reinforced crash box had higher strength compared to the non-reinforced one. Drop tests were conducted to compare the mechanical performance of empty crash boxes and crash boxes made of polyurethane foam and 301 stainless steel sheet reinforcement. As a result of the tests, it was seen that the glass fiber reinforced crash boxes absorbs more energy than the non-reinforced one. It was concluded that the polyurethane foam reinforcement did not have much effect in glass fiber reinforced crash boxes, while it provided advantages in terms of deformation behavior and energy absorption in the unreinforced box.

Key words: Crash boxes, polymer, glass fiber reinforcement, polyurethane foam, stainless steel sheet, drop test

2022, x + 62 pages.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca beni yönlendiren, teknik olarak bilgilendiren ve beni destekleyen değerli hocam Doç.Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN'a ve deneylerde yardımlarını esirgemeyen, her zaman bilgi ve tecrübelerini aktaran Dr.Cihat ENSARİOĞLU'na ve Dr.Öğr.Üyesi Mümin TUTAR Hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.
Bu çalışmada firmanın tüm imkanlarını sunan, bilgi ve tecrübeleri ışığında yardımlarını esirgemeyen ABV Kalıp ve Plastik San. Tic. Ltd. Şti şirketinin değerli Genel Müdürü Zekeriya AHMETOĞLU'na, polimer malzeme temini sağlayan Ünver Group Otomotiv San. ve Tic. A.Ş.'ye ve teşekkürlerimi sunarım.
Her zaman yanımda olan, okul arkadaşım, meslektaşım, kıymetli eşim Makine Yüksek Mühendisi Hasan AKMAN'a destekleri, sabrı ve inancı için teşekkür ederim. Ve son olarak beni her daim destekleyen, başarıya yönlendiren aileme ve varlığıyla güç bulduğum biricik kızım Ahsen AKMAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Merve AKMAN
…/…/2022

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Mühendislik Plastikleri ve Polimer Malzemeler	3
2.2. Otomotiv Sektöründe Plastik ve Polimer Malzemelerin Yeri	9
2.3. Çarpışma Kutusu	13
2.3.1. Enerji emilimi ile ilgili kavramlar	16
2.3.2. Polimer çarpışma kutusu	20
2.3.3. Çarpışma kutuları üzerine yapılan çalışmalar	21
3. MATERYAL ve YÖNTEM	24
3.1. Malzeme Seçimi ve Numune Üretimi	24
3.1.1. Poliüretan köpük ilavesi	31
3.1.2. Poliüretan köpük ilaveli düşürme test numunelerine çelik sac ilavesi	33
3.2. Çekme Test Cihazı	34
3.3. Basma Test Cihazı	35
3.4. Düşürme Test Cihazı	36
4. BULGULAR	38
4.1. Çekme Testi Sonuçları	38
4.2. Basma Testi Sonuçları	39
4.3. Düşürme Testi Sonuçları	43
4.3.1. Boş kutular	43
4.3.2. Poliüretan köpük ile doldurma	47
4.3.3. Paslanmaz çelik sac ilavesi	53
5. SONUÇ	58
KAYNAKLAR	60
ÖZGEÇMİŞ	62

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
E_m	Özgül enerji sönümleme kapasitesi
E_T	Toplam sönümleme enerjisini
F	Kuvvet
F_{maks}	Maksimum kuvvet
F_{ort}	Ortalama ezilme kuvveti
J	Joule
Kg	Kilogram
kN	Kilonewton
kJ	Kilojoule
l	Çarpışma kutusunun ilk boyu
m	Kütle
S_b	İlk deformasyon miktarı
S_{maks}	Maksimum deformasyon miktarı
S_s	Son deformasyon miktarı
η_F	Ezilme kuvveti verimi

Kısaltmalar	**Açıklama**
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
ÇKV	Çarpışma kuvvet verimliliği
GF35	%35 cam elyaf takviyeli
H	Hidrojen
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
HDT	Isıda Eğilme Sıcaklığı
N	Azot
O	Oksijen
PA66	Polyamid66
PAGEV	Türk Plastik Sanayicileri Araştırma Geliştirme ve Eğitim Vakfı
PBT	Polibütilen Tereftalat
PC	Polikarbonat
PE	Polietilen
PEEK	Polieteretherketon
PEI	Polieterimid
PET	Polietilen Tereftalat
PMMA	Polimetil Metakrilat
PP	Polipropilen
PS	Polistiren
PSU	Polisülfon
PU	Poliüretan
PVC	Polivinil Klorür
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
SS	Paslanmaz Çelik
Tg	Geçiş Sıcaklığı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Yüksek performanslı plastik malzeme grupları (Park 2002'den değiştirilerek alınmıştır) 3
Şekil 2.2. Polimer malzeme grupları (Friedrich 2018'den değiştirilerek alınmıştır)..... 4
Şekil 2.3. Amorf polimerlerin zincir yapısı ve yarı kristal polimerlerin zincir yapısı (Raniel, 2010)..... 6
Şekil 2.4. Polimer malzemelerin günlük hayattaki kullanım yerleri (Anonim 2015'den değiştirilerek alınmıştır) 9
Şekil 2.5. Gelecek yıllar için plastiklerin kullanım oranındaki artış öngörüsü (Pagev 2016'dan değiştirilerek alınmıştır) 11
Şekil 2.6. Plastik malzemelerin binek araçtaki bazı kullanım yerleri (Akay, 2014)..... 12
Şekil 2.7. Kaza durumunda parçalar üzerindeki enerji dağılımı (Altın 2017'den değiştirilerek alınmıştır) 14
Şekil 2.8. Bir aracın ön tampon grubu (Altın, 2017) 14
Şekil 2.9. Otomobilin ön uç yapı bileşenleri (Li ve diğerleri, 2017'den değiştirilerek alınmıştır) 15
Şekil 2.10. Otomobilin ön uç yapısı: kuvvet akış diyagramı (Li ve ark. 2017'den değiştirilerek alınmıştır) 15
Şekil 2.11. Boş ve köpük dolu çarpışma kutularının deformasyon kuvvetleri (Altın, 2017) 18
Şekil 3.1. Deneyde kullanılan hammaddeler a) Polyamit 66 (PA66) b) %35 cam elyaf takviyeli polyamit 66 (PA66-GF35)..... 24
Şekil 3.2. Plastik enjeksiyon makinesi..... 26
Şekil 3.3. Kalıbın revize edilmesi..... 26
Şekil 3.4. Enjeksiyon makinesi üzerine bağlanmış kalıp..... 27
Şekil 3.5. Fırınlama işlemi..... 27
Şekil 3.6. Enjeksiyon kontrol ünitesi..... 28
Şekil 3.7. Numunenin 3B teknik resmi..... 28
Şekil 3.8. Takviyesiz ve takviyeli numune kütleleri..... 29
Şekil 3.9. Çekme testi için hazırlanan numuneler 30
Şekil 3.10. Basma testi için hazırlanan numuneler..... 30
Şekil 3.11. Deneyde kullanılan poliüretan köpük..... 31
Şekil 3.12. Poliüretan sıkılmış numune 32
Şekil 3.13. Katılaşan poliüretan köpük..... 32
Şekil 3.14. Boş numunelere poliüretan köpük ilavesi 33
Şekil 3.15. Çelik sac ve poliüretan köpük ilaveli kutular 34
Şekil 3.16. Video ekstansometre ve numune üzerinde ölçüm aralığının işaretlenmesi 35
Şekil 3.17. Basma testlerinin yapıldığı a) üniversal test cihazı b) basma plakaları. 35
Şekil 3.18. Düşürme test cihazı 37
Şekil 4.1. PA ve PA-GF35 için elde edilen mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve PA için kırılmış örnek bir numune 38
Şekil 4.2. PA için a) 2 mm/dk b)10 mm/dk c) 50 mm/dk hızda gerçekleştirilen basma testi gerilme-gerinim grafiği..... 40

Şekil 4.3. PA-GF35 için a) 2 mm/dk b)10 mm/dk c) 50 mm/dk hızda gerçekleştirilen basma testi gerilme-gerinim grafiği 41
Şekil 4.4. PA ve PA66-GF35 basma testi ortalama eğrileri 42
Şekil 4.5. Basma testi sonrası takviyeli ve takviyesiz numune görüntüleri..... 43
Şekil 4.6. Düşürme testi deformasyon davranışları a) PA66 test görüntüsü b) GF35 test görüntüsü..... 44
Şekil 4.7. Düşürme testi sonrası numunelerin son görüntüsü..... 45
Şekil 4.8. Takviyeli ve takviyesiz polimer kutuların kuvvet-zaman grafiği..... 46
Şekil 4.9. Takviyeli ve takviyesiz polimer kutuların kuvvet-deplasman ve enerji grafiği..... 47
Şekil 4.10. PU takviyeli numunelerin görüntüleri a) Üstten çapraz görünüş b) Önden görünüş..... 48
Şekil 4.11. PU köpük ilaveli PA-GF takviyeli çarpışma kutusunun a) kuvvet-zaman b) kuvvet, enerji – deplasman grafikleri 49
Şekil 4.12. PU köpük ilaveli PA takviyesiz çarpışma kutusunun a) kuvvet-zaman b) kuvvet, enerji – deplasman grafikleri..... 51
Şekil 4.13. PU köpük ilaveli takviyeli ve takviyesiz çarpışma kutularının kuvvet-zaman grafiği 52
Şekil 4.14. Poliüretan köpük ilaveli takviyesiz ve içi boş takviyeli kutu kütleleri.. 52
Şekil 4.15. Numunelerin test sonrası görüntüleri 53
Şekil 4.16. PU köpük ve SS sac ilaveli takviyesiz kutu kuvvet-zaman grafiği 54
Şekil 4.17. PU köpük ve SS sac ilaveli takviyesiz kutu kuvvet-deplasman-enerji grafiği..... 55
Şekil 4.18. PU köpük ve SS sac ilaveli takviyeli kutu kuvvet-zaman grafiği 55
Şekil 4.19. PU köpük ve SS sac ilaveli takviyeli kutu kuvvet-deplasman-enerji grafiği..... 56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Bazı polimer malzemelerin özellikleri ve uygulama alanları 8
Çizelge 3.1. Kullanılan hammaddelerin mekanik özellikleri..... 25
Çizelge 3.2. Düşürme testinde kullanılan numuneler ve kütleleri 37
Çizelge 4.1. Düşürme testi sonrası elde edilen değerler 57

1. GİRİŞ

İcadıyla birlikte ulaşımda çığır açan otomobiller, geçmişten günümüze kadar insan ve yük taşımacılığında kullanılan en temel vasıtalardan biri olması nedeniyle toplumda ve dünya otomotiv sanayinde çok önemli bir yer tutmaktadır. Sosyal, ekonomik ve kültürel anlamda gelişime olan büyük ölçüdeki katkısıyla her geçen gün önemi giderek artmakta ve otomotiv sektörünün büyümesini sağlamaktadır. Bu artış kullanıcılar ve toplum tarafından yeniliklere ve gelişime olan ihtiyacı da beraberinde getirmektedir. Günlük hayatta çok önemli bir yere sahip olan otomobillerin, sürücüler tarafından her geçen gün artan yeni talepleri arasında; daha az maliyetli, daha yüksek performanslı ve daha kaliteli olması, yakıt tasarrufu sağlaması, çevreci olması, hafif ve kullanışlı bileşenler içermesi, kaza durumunda daha az hasar alması ve güvenilir sürüş sağlaması, daha konforlu ve ergonomik olması, farklı dizayn ve estetik tasarımın iyi olması gibi çeşitli özellikler yer almaktadır.

Otomotiv sanayindeki teknolojik gelişmelerle birlikte istenen taleplere daha hızlı cevap verilmekte ve pek çok ihtiyaçta malzeme seçimiyle doğrudan bağlantı oluşturmaktadırlar. Aracın performansını büyük ölçüde etkileyen yakıt tüketimi, ağırlık, dinamik ve toplam maliyet gibi kriterler ile sürücüler tarafından araçta istenen diğer özellikleri en üst seviyelerde yerine getirme hususunda plastikler, malzeme seçiminde kullanılabilecek en önemli unsurlar haline gelmektedirler.

Plastik malzemelerin sağladığı üstün özelliklerden bazıları; hafif olmalarından dolayı yakıt tasarrufu sağlamaları, esnek ve daha kullanışlı olmaları, üretim ve kullanım maliyetlerinin düşük olması, bazı metallere kıyasla daha yüksek mekanik özelliklere sahip olması, daha düşük kuvvetlerle şekillendirilmeleri ve daha kolay işlenebilmeleri, yüzey işlemlerine pek fazla ihtiyaç duymadan kolay üretilebilir olmaları, ısı ve elektrik iletkenliğin düşük olmasından dolayı yalıtım amaçlı da kullanılabilmeleri, yüksek ısı dayanımına sahip olmaları, korozyon ve kimyasal dirençlerinin yüksek olması, geri dönüştürülebilir olması sayesinde yeniden kullanıma imkan sağlamaları ve böylece çevreye katkıda bulunmalarıdır.

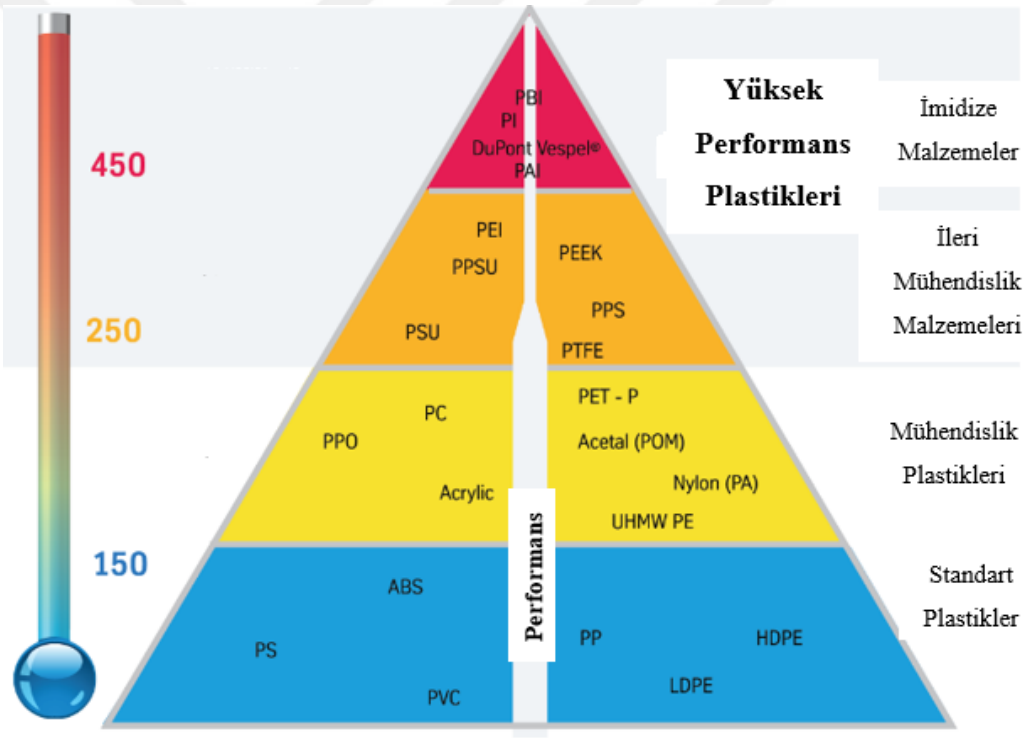
Otomotiv endüstrisindeki en önemli tasarım kriterlerinden biri kaza anında çarpışma güvenliğini sağlamaktır. Çarpışma güvenliğini sağlamak amacıyla araçlarda aktif ve pasif güvenlik sistemleri kullanılmaktadır. Aktif güvenlik sistemleri kazaların oluşmasını önlemek amacıyla kullanılan sistemler iken, pasif güvenlik sistemleri kazanın etkilerini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Pasif güvenlik sistemlerinden biri olan çarpışma kutuları, kazanın kaçınılmaz olduğu durumlarda devreye girmekte ve hayati önem taşımaktadır.

Kaza esnasında meydana gelen çarpışmada, ön tampon; hem yolcuları hem de aracı koruyan sistem olarak görev almaktadır. Araç ön tamponu; ön tampon rayı ve çarpışma kutusu olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır. Çarpışma kutuları, çarpışma anında açığa çıkan enerjinin bir kısmını üzerine alarak sönümleyici bir rol oynamakta ve bu enerjinin otomobil içerisine en az seviyede iletilmesini sağlamaktadır (Nakazawa ve diğerleri, 2005).

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Mühendislik Plastikleri ve Polimer Malzemeler

Yapısında bulunan çok sayıdaki atomun birbirlerine kimyasal bağlarla bağlamasıyla oluşan uzun zincirli moleküller, polimer olarak adlandırılmaktadır. Polimer malzemeler; termosetler, termoplastikler ve elastomerler olmak üzere üç gruba ayrılmaktadırlar. Fiziksel ve mekanik özelliklerine göre ise endüstride polimer malzemeler; plastikler, kauçuklar ve fiberler olmak üzere yine üç grupta incelenmektedirler. Günümüzde pek çok alanda karşımıza çıkan polimerik malzemelerden, kauçuk ve plastiklerin tümünün de polimer esaslı olduğu görülmektedir (Savaşçı ve diğerleri, 2002)

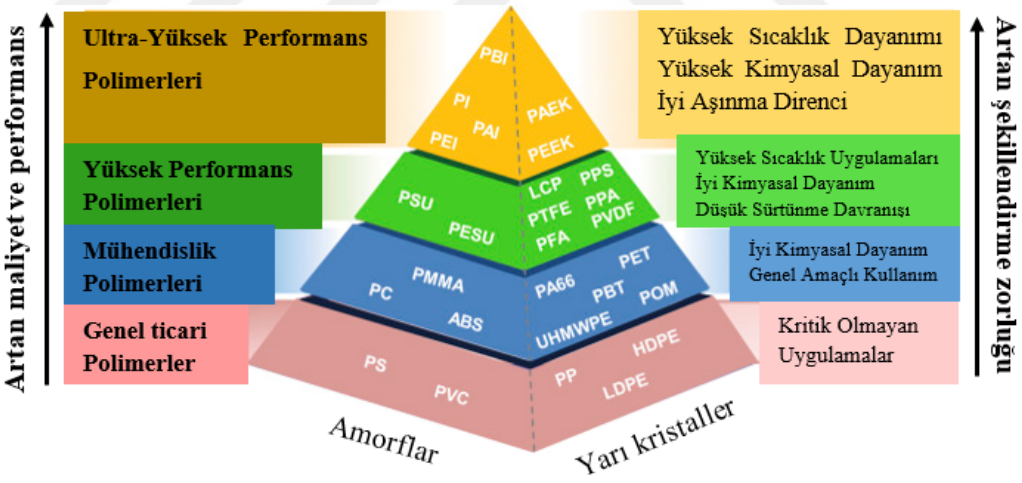


Şekil 2.1. Yüksek performanslı plastik malzeme grupları (Park 2002'den değiştirilerek alınmıştır)

Yüksek performanslı plastik malzeme grupları Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Plastik malzemeler, karbon elementinin ametal elementler (N, H, Cl, O gibi) ile oluşturduğu büyük moleküllü organik bileşikler olarak tanımlanmaktadır. Sentetik polimerler olarak da bilinen plastikler doğada hazır bulunmamakta ve çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Mühendislik plastikleri ise termoplastikler grubu içerisinde ele

alınmaktadır. Bu plastikler, ısının etkisiyle yumuşayarak kolay şekil almaktadırlar ve geri dönüştürülebilir olmaları sayesinde tekrar tekrar kullanılmaktadırlar. Artan sıcaklıkla birlikte ilk olarak viskoz sıvı daha sonrasında ise sıvı hale geçmektedirler ve genellikle lineer yapıda oldukları görülmektedir. Darbelere ve ısıya dayanaklı olması, kimyasallara karşı direnç göstermesi, yüksek sıcaklıklarda çalışmaya imkân sağlaması gibi pek çok özellikler termoplastik malzemeleri üstün kılmaktadır (Park, 2002).

Yüksek performanslı polimer gruplarından biri olan mühendislik polimerleri (Şekil 2.2), hem pek çok mühendislik uygulaması için ideal olarak görülen hem de gelişmiş mekanik ve termal özelliklere sahip olan plastik malzeme grubunda yer almaktadır. Naylon; asit ve amin grubundan oluşan monomerlerin birbirlerine peptid bağlarıyla bağlanmaları sonucunda oluşan sentetik polyamidlerden biridir. Bu sentetik polyamid, mühendislik polimerleri içinde birçok farklı uygulamada kullanılan polimerlerdir: Halı ve giyim gibi tekstil endüstrisinde, müzik aletlerinin tellerinde, ve iplik endüstrisinde kullanımı yaygındır (Kelly ve diğerleri, 2000).



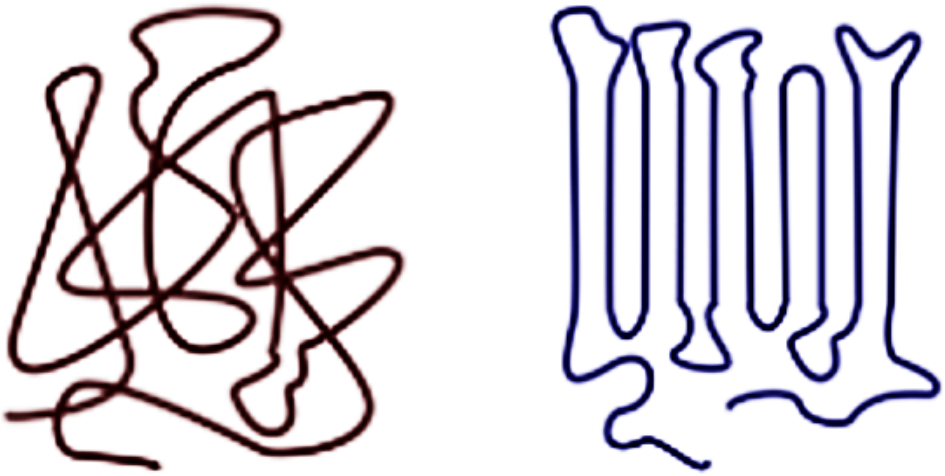
Şekil 2.2. Polimer malzeme grupları (Friedrich 2018'den değiştirilerek alınmıştır)

Genellikle elyaf olarak üretilen polyamitlerin en karakteristik özellikleri; yıpranmaya, kimyasallara ve aşınmaya karşı dayanıklı olmaları, yüksek sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklere ve düşük gaz geçirgenliğine sahip olmalarıdır. Cam elyaflarla güçlendirilen naylon polimerler, daha yüksek yapısal mukavemet, darbe dayanımı ve sertlik sağlamaktadırlar. Belirli oranlarda cam elyafla güçlendirilen naylon kompozit malzemeler yüksek ısı direnci sayesinde otomotiv endüstrisinde, emme manifoldu gibi

motor yarı elemanları olarak kullanılmaktadır. Naylon66 (PA66) polimeri orta derecede kristalliğe sahiptir. Amorf halde bulunan zincirler de olduğu için polyamidler yarı-kristal polimerlerdir (Harper, 2004).

Yarı kristal malzemeler, keskin ergime noktalarına sahiptir ve oldukça düzenli bir moleküler yapıya sahiptir. Sıcaklığın yükselmesi ile birlikte kademeli olarak yumuşamadan belirli bir düzeyde ısı emilinceye kadar katı durumda bulunur ardından hızlı bir şekilde düşük viskoziteli bir sıvıya dönüşmektedir. Bu polimerler akışta anizotropiktir, bu nedenle akıştan ziyade akışa çapraz bir şekilde daha büyük bir büzülme sergilerler, bunun sonucunda bazı zamanlar bir takım boyutsal kararsızlığa neden olabilmektedirler. Yarı kristal malzemeler son derece iyi aşınma ve kimyasal dirence sahip iken tipik olarak darbe dirençlerinin düşük olduğu bilinmektedir. Ancak bu malzemeler güçlendirildiklerinde cam geçiş sıcaklıklarının (Tg) çok daha ötesinde faydalı mukavemet ve sertlik seviyelerini koruduklarında HDT'lerinde (ısıda eğilme sıcaklığı) önemli gelişme göstermektedirler. Ambalajlama sektöründe kullanılan yüksek yoğunluklu polietilen HDPE ve polietilen (PE), polipropilen (PP), polibütilen tereftalat (PBT), polietilen tereftalat (PET) ve polieteretherketon (PEEK) gibi popüler polimerler bu gruba örnek olarak gösterilebilmektedir (Oktay & Gürses, 2013).

Yüksek sıcaklık malzemelerinden olan farklı termoplastik polimerleri ayıran, tanımlayıcı bir özellik, moleküler yapılarındaki ayrıma göre yarı kristal veya amorf yapıda olmalarıdır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Amorf polimerlerin zincir yapısı ve yarı kristal polimerlerin zincir yapısı (Raniel, 2010)

Amorf malzemelerin polimer zincir yapısı yarı kristallere göre daha düzensizdir ve bu malzemeler, sıcaklığın artmasıyla birlikte kademeli bir şekilde yumuşamaktadırlar. Keskin ergime noktasına sahip olmayan bu tip malzemelerde moleküller rastgele sıralıdır ve bu durum, bir sıcaklık aralığında ergimelerine neden olmaktadır. Bu durum ayrıca ısıyla daha kolay şekillendirme sürecini de sağlamaktadır. Bu polimerler akışta izotropiktir, bu sebeple akış yönünde küçülmekte ve akışa karşı çapraz durumda bulunmaktadırlar. Neticede amorf malzemeler, yarı kristal malzemelere kıyasla hem daha azami kalıp büzülmesi hem de daha az eğilme yönelimi sergilemektedirler. Özellikleri açısından, amorf polimerler iyi darbe direncine sahiptirler, ancak gerilim çatlamasına daha yatkındırlar ve yorulma direncinin de düşük olduğu bilinmektedir. Şeffaf halde bulunan amorf malzeme grubuna polistiren (PS), polimetil metakrilat (PMMA/akrilik), polikarbonat (PC), polisülfon (PSU), polivinil klorür (PVC), akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve polieterimid (PEI) polimerleri örnek olarak gösterilebilmektedirz (Özyurt, 2003).

Mühendislik uygulamalarında plastik malzemelerin tercih edilmesinin nedenlerinden bazıları;

- Dayanıklılık ve hafiflik gibi temel ihtiyaçları karşılaması,
- Yüzey sertliği ve istenilen görünüme kolay ulaşabilmesi,

- Yüksek sıcaklıklara dayanıklı olması,
- Montaj kolaylığı sağlaması,
- Maliyetinin düşük olması,
- Darbe ve kimyasal mukavemetinin iyi olması,
- Aşınmaya ve sürtünmeye karşı direnç göstermesidir.

Yaygın bir şekilde kullanılan bazı polimer malzemelerin özellikleri ve uygulama alanları Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Bazı polimer malzemelerin özellikleri ve uygulama alanları

Polimer Malzemeler	Özellikler	Uygulama Alanları
Polietilen (PE)	Yüksek ve Alçak yoğunluk olarak iki türü vardır; LDPE, HDPE. Ucuz ve hafiftirler. Farklı yoğunluklara, kaba bir yapıya ve iyi kimyasal dayanıma sahiptir.	Film, çanta, torba, buzdolabı kutuları, endüstriyel kovalar, kablo, tel yalıtımı
Polipropilen (PP)	Aşınmaya karşı oldukça dayanıklıdırlar. Ucuz ve yapısal olarak kabadır. Isı dayanımı ve yüzey sertliği fazladır. Bazı solventlere karşı hassas olmalarına rağmen elektriksel özellikleri iyidir.	Otomobil parçaları, oyuncaklar, sandalye, hastane gereçleri
Poliamid (PA)	Naylon adıyla da bilinmektedir. Toksik değildir. Yüksek ısı performansın sahiptir ve sürtünmeden az etkilenirler. Mekanik özellikleri iyidir. Mekanik dayanımı daha fazla artırmak için cam ile güçlendirilebilirler.	Perde bağlantı parçaları, takım kutuları, konnektörler, fan kapakları
PA6	Bu yarı kristalli termoplastik, mukavemet, sertlik ve kimyasal dirençte iyi dengelenmiş özellikler sağlayarak en yaygın kullanılan mühendislik termoplastiklerinden biridir.	Motor kapakları, terminal blokları, ambalaj filmleri, jant kapakları
PA 66	Çok iyi mekanik özellikler (mukavemet, sertlik, darbe emilimi) ve ısı / kimyasal direnç dengesi sunar. Bu nedenle PA 66, çoğu zaman metal yerine ikame için olağanüstü bir malzeme olarak kabul edilir.	Hava giriş manifoltları, hava kanalları, vites dişlileri, kapı tutamakları
Polikarbonat (PC)	Son derece yüksek darbe direncine sahip şeffaf bir termoplastiktir. Yüksek performans özellikleri, onu yüksek çalışma sıcaklıkları ve güvenlik özellikleri gerektiren çeşitli uygulamalar için üstün bir plastik yapmaktadır.	Lamba gövdeleri, konnektörler, elektrik/elektronik buzdolabı kapakları
Polivinilklorit (PVC)	Aşınmaya ve kimyasallara karşı dayanımları yüksek olan bir gruptur. Çok geniş alanlarda çeşitli şekillerde kullanılabilir. Ucuz ve şeffaf türleri de bulunmaktadır.	Paketleme, film, şişe, eldiven kaplama, ayakkabı, duvar kaplama

Artan plastik tüketimi, hafif ve düşük maliyetli ürün tercihi ile birlikte polimerlere olan talep de artış göstermektedir. Otomotiv sektörü başta olmak üzere tarım, bahçecilik, tüketim malları, paketleme, inşaat, medikal, ulaşım, gıda endüstrisi ve elektronik ve iletişim gibi endüstriyel sektörlerde de kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Polimer malzemelerin günlük hayattaki kullanım yerlerinden bazıları Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Polimer malzemelerin günlük hayattaki kullanım yerleri (Anonim 2015'den değiştirilerek alınmıştır)

2.2. Otomotiv Sektöründe Plastik ve Polimer Malzemelerin Yeri

Malzemeler birbirleriyle kıyaslandığında kullanım yeri ve amacına göre, bazı noktalarda üstün özellikler gösterebilmekte bazı noktalarda ise daha düşük performanslar sergilemektedirler. Polimer malzemelerin çok yönlü olması, kullanım alanı özgürlüğünün geniş olması ve plastik teknolojisindeki gelişmeler sayesinde, bir aracın gereksinimlerini karşılamada son derece başarılı olduğu bilinmektedir.

Otomotivde plastik malzemeler; temel güvenlik elemanlarından birkaçı olan emniyet kemeri, yan darbe korumaları ve kaza kutusunda kullanılmalarının yanı sıra hafifliği, esnekliği ve görsel tasarıma uygunluğu açısından da sektörde önemli bir yer edinmektedirler.

Üretimleri sırasında plastiklerin içerisine çeşitli takviyeler ilave edilerek farklı özellikler elde edilmektedir. Bu özelliklerden bazıları;

- Korozyona karşı daha iyi koruma,
- Çürümelere karşı bariyer oluşturma,
- Daha ince ve hafif yapılı parçalar,
- Güneş ışınlarına karşı direnç gösterme,
- Geri dönüşüm ile tekrar hammadde elde edilmesi,
- Parlaklık, matlık ve geniş renk skalası gibi görsel değişimleri kolayca elde edebilme,
- Yüksek ısıl dayanım

ile motor gibi daha ağır parçalarda da metaller yerine plastik kullanımı hem hafiflik hem de mekanik anlamda dayanım sağlamaktadır.

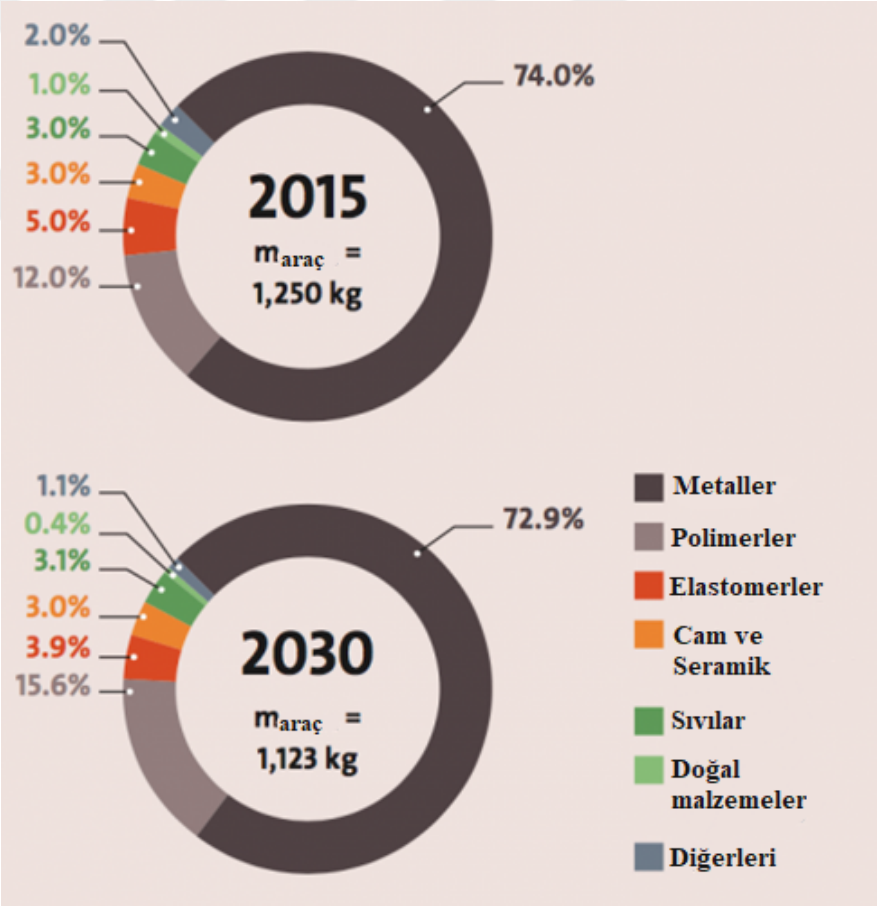
Otomotiv sanayinin temel hedefleri arasında toplum için en az maliyetle en yüksek verimi elde etmek ve çevresel kazanç sağlamak bulunmaktadır. Plastik malzemeler de sağladığı tüm bu avantaj dolu özellikleri ile sürdürülebilir gelişime, yeniliklere ve çevreye, topluma, sürücülere birçok farklı yöndeki katkılarından dolayı otomotiv sektörü başta olmak üzere neredeyse tüm sektörlerin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiş bulunmaktadır.

Tüm otomobil tasarımcıları her geçen gün otomobilde kullanılan plastik malzemelerin sağladığı faydaların bilincine vararak ürün çeşitliliğini arttırma yolunda ilerlemektedir. Ülkemizde üretilen ve üretilecek olan tüm ticari araç ve binek otomobillerde daha hafif, daha çevreci, daha güvenli ve güvenilir araçların kullanımının ancak yeni gelişen teknolojileri yakından takip ederek bu kapsamda polimer malzemelerin tam olarak anlaşılması ve daha fazla uygulama alanına yer verilmesi ile mümkün olacağı düşünülmektedir (Szeteiovà, 2010).

Plastikler, son zamanlarda sağladığı yüksek performansı ile birlikte dünya genelinde kullanılan temel malzemelerden biri haline gelmektedir. Plastik tüketimindeki bu artış, yakıt verimliliği için hafiflik yönelimleri ve dolayısı ile daha düşük sera gazı emisyonları tarafından da yönlendirilmektedir. Plastiklerin yüksek enerji emilimi özellikleri aynı

zamanda aracın daha sağlam güvenlik standartlarını karşılamasına izin verirken, mühendislik plastiklerinin kullanılması, metallere kıyasla daha fazla tasarım özgürlüğü sundukları için araçlarda kullanılan parçaların kütlesinin en aza indirilmesine olanak sağlamaktadır (Yaşar, 2001).

Bir binek otomobilde yaklaşık olarak 30.000 parça bulunmaktadır ve bu parçaların neredeyse 10.000'i plastik malzemelerden yapılmaktadır. Totalde, bir otomobil yapımı için yaklaşık 39 farklı temel plastik ve polimer türü kullanılmaktadır. Otomobillerde kullanılan plastiğin %70'inden fazlasını dört polimer oluşturmaktadır, bunlar: polipropilen, poliüretan, polyamitler ve PVC'dir. Gelecek yıllarda plastiklerin kullanım oranındaki artış miktarı için Şekil 2.5'te gösterildiği gibi tahminler bulunmaktadır (Pagev, 2016).

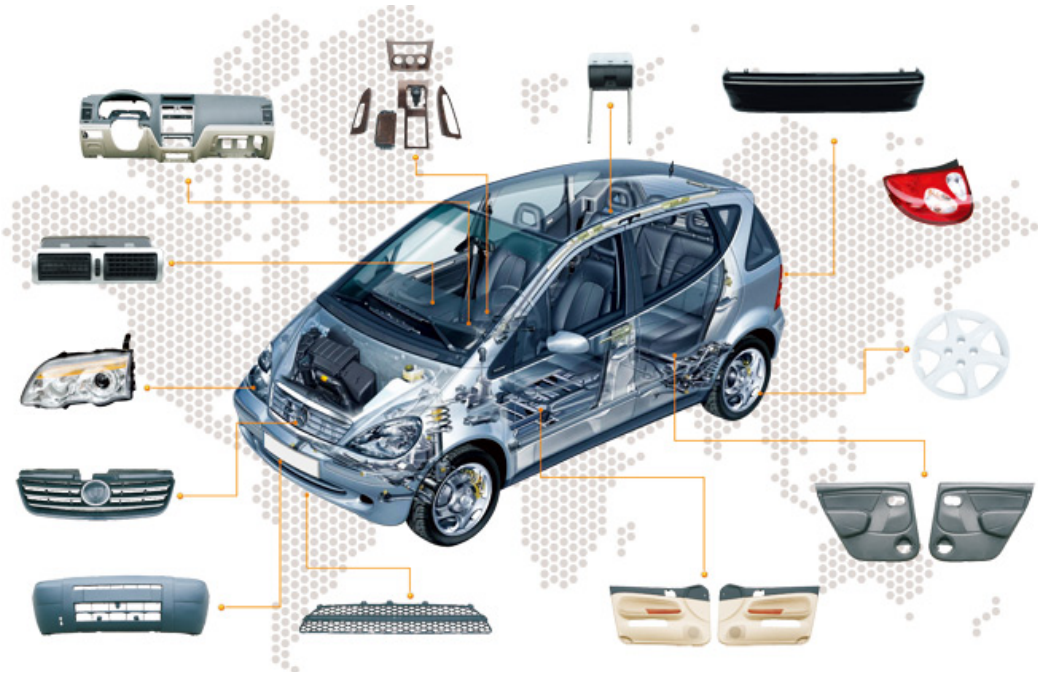


Şekil 2.5. Gelecek yıllar için plastiklerin kullanım oranındaki artış öngörüsü (Pagev 2016'dan değiştirilerek alınmıştır)

Türk Plastik Sanayicileri Araştırma Geliştirme ve Eğitim Vakfı (PAGEV) 2016 yılında yayınlamış olduğu Türkiye Otomotiv Plastikleri Sektörü Raporu'nda; araç üretimindeki plastik malzeme kullanımında yüzdelik oranda her geçen yıl bir önceki yıla göre artış gözlendiğini ve 2016 yılında 419.000 ton olan otomotiv plastiklerinin 2020 yılında %18 oranında artarak 496.000 tonlara ulaşacağını belirtmiştir.

Otomotiv sektöründe sahip olduğu alanı giderek genişleten polimer malzemeler, kullanıcı taleplerini karşılaması ve uygulama alanlarının çok çeşitli olması sebebiyle pek çok yönden avantaj sağlamaktadır. Araçların hem kritik hem de tasarımına yönelik önemli noktalarında yer alarak toplam ağırlığın yaklaşık olarak %10 ila %15'ini oluşturmaktadırlar (Pagev, 2016).

Plastiklerin, otomobillerin içinde daha çok yolcu bölümünde kullanılmasının yanı sıra ışıklandırma sistemlerinde, gösterge panellerinde, kaput altı parçalarında, bagaj kapakları, jant kapakları, döşemelerde, motor bölmesinde, yağ kütüklerinde, kapı panellerinde, havalandırma ve su boruları gibi pek çok çeşitli iç ve dış aksamlarının üretiminde kullanıldığı görülmektedir (Şekil 2.6) (Szeteiovà, 2010).



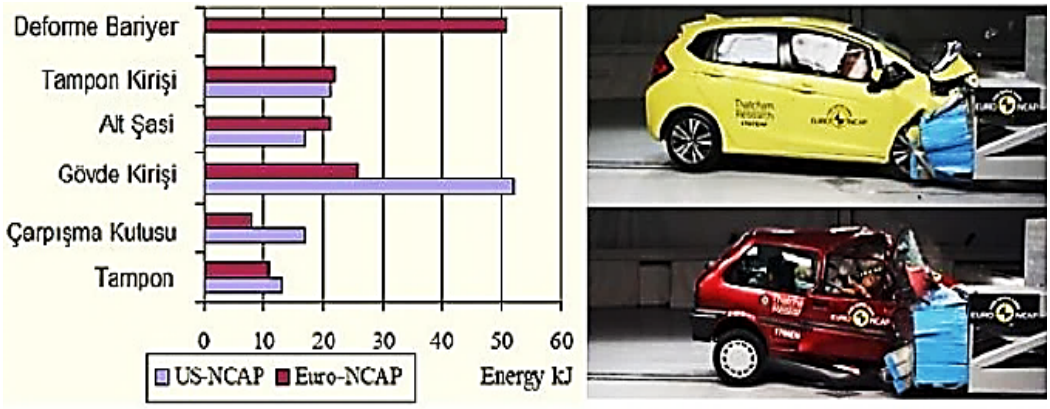
Şekil 2.6. Plastik malzemelerin binek araçtaki bazı kullanım yerleri (Akay, 2014)

Özellikle de hava manifoltlarında ve kaput altı parçalarında kullanımın avantajı oldukça fazladır. Bu bölgede kullanılan cam elyaf takviyeli ve naylondan kalıplanan plastik malzemeler, metallere kıyasla neredeyse yüzde elli daha hafif olmaları ve yeni nesil manifoltların hava akışının üst seviyelerde kontrol edilmelerine fırsat vermesi sayesinde motor verimine de ciddi katkı sağladığı için ve gürültü kirliliğini de büyük ölçüde engellediğinden dolayı ayrıca tercih edilmektedirler. Plastikler, otomobil ve diğer vasıtaların yapısal kimliğine de önemli katkılar sağlamaktadır (Ternore, 2015).

2.3. Çarpışma Kutusu

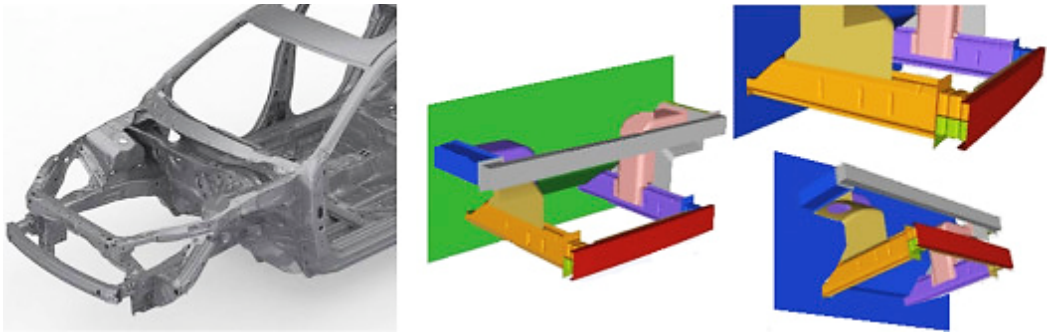
Otomobiller, icadı ile birlikte bize sundukları yararlardan ve sağladığı pek çok kolaylıklardan dolayı hayatımızda önemli bir yere sahip olmaktadırlar. En temel ulaşım aracı olan ve toplumun her kesimine hitap eden otomobiller, hayatımızın vazgeçilmez bir parçası olarak yerini yüzyıllardır korumaktadır. Temel ihtiyaç olan otomobillerin kullanımının artması beraberinde trafik kazalarına da sebep olmaktadır. Yapılan araştırmalara göre dünya genelinde yapılan trafik kazalarının büyük bir kısmı önden çarpma şeklinde meydana gelmektedir. Bunun sonucunda otomobillerdeki en büyük darbelerin de aracın ön kısımda olduğu görülmektedir. Kaza anında bu darbe ile ortaya çıkan çarpışma enerjisini absorbe ederek araç ve yolcu güvenliğini sağlayan çarpışma kutuları, her açıdan ciddi bir öneme sahip olmaktadır. Çarpışma kutuları hasar etkisinin derecesini minimum düzeylere düşürerek, sadece araç içindeki yolcuları korumakla kalmayıp yayalara, diğer araçlara ve çevreye olan zararı da en aza indirmektedir. Ayrıca kaza sonrası oluşan ciddi maddi kayıpların da önüne geçmeyi sağlamaktadır.

Şekil 2.7'de dünya genelinde en güvenilir verilere sahip olan US-NCAP ve EURO-NCAP' ın yapmış oldukları çarpışma testi sonuçları, otomobillerde kaza anında açığa çıkan enerjinin parçalar üzerindeki dağılımları hakkında fikir vermektedir (Griškevičius ve diğerleri, 2002). Testler sonucunda çarpışma kutularının enerjiyi önemli bir ölçüde absorbe ettiği görülmektedir (Altın, 2017).



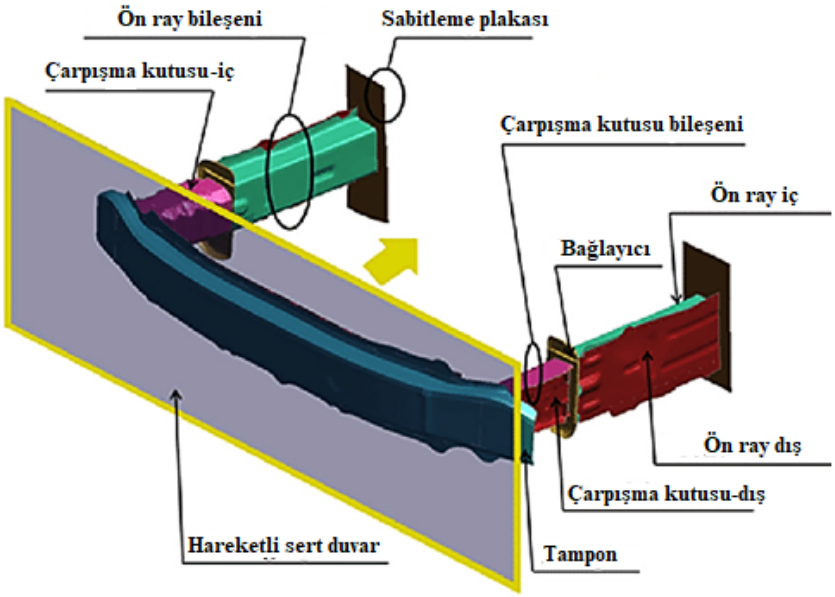
Şekil 2.7. Kaza durumunda parçalar üzerindeki enerji dağılımı (Altın 2017'den değiştirilerek alınmıştır)

Bir binek otomobilde, enerjiyi emecek şekilde tasarlanmış yapılar, ön tampon ile yolcu bölmesi arasına yerleştirilmektedir. Şekil 2.8 'de ön yapı genellikle, aracın her iki tarafı için iki tane olmak üzere dört uzunlamasına ince duvarlı kirişten oluşmaktadır; ikisi motor bölmesinin üst kısmında, kaputun hemen altında ve ikisi, genellikle daha büyük boyutlarda, tamponun arkasında bir ara yükseklikte konumlandırılmaktadır. Son araçlarda, bu iki ana kirişin ön ucunda, her iki tarafta birer tane olmak üzere iki çarpışma kutusu yerleştirilmektedir (Altın, 2017).



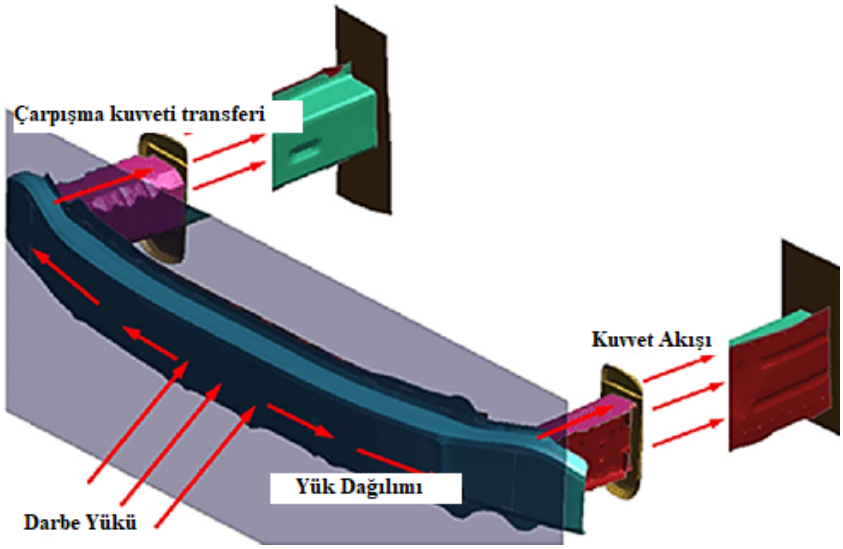
Şekil 2.8. Bir aracın ön tampon grubu (Altın 2017'den değiştirilerek alınmıştır)

Bu çarpışma kutuları, düşük hızda darbe durumunda enerjiyi emecek şekilde tasarlanmaktadır. Böylece, ön yapının diğer kısımlarında büyük yapısal hasarlardan kaçınılmaktadır. Ön tamponun hemen arkasında, tamponu konumlandırma ve destekleme görevine sahip bir enine kiriş vardır ve uçlarında uzunlamasına ana kirişlere bağlanmaktadır. Şekil 2.9'da bir otomobilin ön uç yapı bileşenleri temel olarak; tampon ve kiriş, çarpışma kutusu elemanları, aks ve ray bileşenlerinden meydana geldiği görülmektedir (Boria, 2016).



Şekil 2.9. Otomobilin ön uç yapı bileşenleri (Li ve diğerleri, 2017'den değiştirilerek alınmıştır)

Düşük hızlı çarpışmadan sonra, tampon veya çarpışma kutusunun değiştirme maliyetleri ön rayın onarım maliyetine göre nispeten düşüktür. Araçta önden çarpışma anında makul olan enerji aktarım yolu, tamponun enerjiyi hem sol hem de sağdaki çarpışma kutularına dağıtması ve çarpışma kutusunun sıkıştırılmış deformasyonunu sağlamasıdır (Altın, 2017). Böylece 'kuvvet akışı' öne doğru aktarılabilmektedir. Kuvvetler, Şekil 2.10 'da gösterildiği gibi bağlantı plakası üzerinden ön raya aktarılabilmektedir.



Şekil 2.10. Otomobilin ön uç yapısı: kuvvet akış diyagramı (Li ve ark. 2017'den değiştirilerek alınmıştır)

Çarpışma kinetik enerjisi, çarpışma kutusunun enerji emme sınırından düşükse, ön ray iyi korunacak; aksi takdirde, ön ray büyük sapma ile hasar görecek ve buna, yolcu bölmesine aktarılan büyük bir çarpışma kuvveti eşlik edecektir.

Binek otomobilin düşük hızda çarpışması sırasında, ön ray önemli bir rol oynamaktadır. Bu sebeple, ön ray da dahil olmak üzere diğer bileşenleri hasardan koruma işlevi gören tampon ve çarpışma kutusu ile entegre edilmelidir. Bu arada, otomobil gövdesi, tampon ve çarpışma kutusunun yapısal aksesuarları, iyi çarpışma dayanıklılığının yanı sıra hafiflik gereksinimine sahiptir. Hafiflik ve çarpışma dayanıklılığı, oto yapısal tasarımında çelişen hedeflerdir; bu nedenle, enerji emilimi, pik çarpışma kuvveti gibi ölçütlere dayanarak, hafiflik ve çarpışma kabiliyetlerinin kapsamlı performanslarını optimize etmek büyük bir zorunluluk haline gelmektedir (Li, 2017).

2.3.1. Enerji emilimi ile ilgili kavramlar

Çarpışma kutularının yapıları incelenirken genel olarak üzerinde durulan konular; enerji sönümleme, maksimum ezilme kuvveti, ortalama ezilme kuvveti, toplam yer değiştirme, özgül enerji sönümleme ve ezilme kuvveti verimliliği olarak ifade edilebilir (Cerit, 2011). Çarpışma kutularının darbe yüklemesi altında enerji sönümleme kapasitelerinin belirlenebilmesi için birçok kavram ortaya konulmaktadır. Çarpışma kutularında kullanılan en temel kavramlardan olan enerji emilimi ve ezilme kuvveti verimi değerlerinin yüksek olması beklenmektedir. Başka bir deyişle çarpışma kutusunun yüksek enerji emilimi yapması beklenirken aynı zamanda çarpışma bölgesinde oluşan kuvvetlerin de birbirine yakın olması istenmektedir.

Toplam Enerji Emilimi:

Çarpışma kutusunun sönümlediği enerji miktarı toplam enerji emilimi olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir tanımında ise çarpışma anında oluşan kuvvetlerin yaptığı iş olarak bahsedilmektedir. Bu tanımlama Denklem 2.1 ’de verilen formül ile ifade edilir (Chathbai, 2007).

$$E_T = \int_{S_b}^{S_s} F * dS \quad (2.1)$$

Burada, F (kN) çarpışma bölgesindeki eksenel doğrultuda oluşan ezilme kuvvetini ve S (mm) ise çarpışma kutusunda meydana gelen ezilme (deformasyon) miktarını ifade etmektedir.

Maksimum Deformasyon Kuvveti:

Çarpışma kutularında, çarpışma bölgesinde meydana gelen en büyük eksenel kuvvet olarak ifade edilebilir. Genellikle ezilmenin ilk başladığı alanda bu kuvvet oluşmaktadır. İdeal bir çarpışma kutusunda maksimum kuvvetin çok yüksek olması istenmemektedir. Çünkü bu değerin büyük olması çarpışma anından yolculara iletilen kuvvetin de yüksek olması anlamına gelmektedir. Çarpışma anında iletilen kuvvetlerin büyük olması yolculara zarar verebilmektedir.

Ortalama Ezilme Kuvveti:

Ortalama ezilme kuvveti çarpışma bölgesinde oluşan kuvvetlerin ortalaması olarak ifade edilir. Ortalama kuvvet Denklem 2.2'de belirtildiği gibi toplam sönümlenen enerjinin deformasyon miktarına bölünmesi ile bulunabilir (Yıldız & Demirci, 2015).

$$F_{ort} = \frac{E_T}{S_s - S_b} \quad (2.2)$$

Burada; Fort ortalama ezilme kuvveti, ET toplam sönümleme enerjisini, Ss son deformasyon miktarını, Sb ise ilk deformasyon miktarını göstermektedir.

Ezilme Kuvveti Verimi:

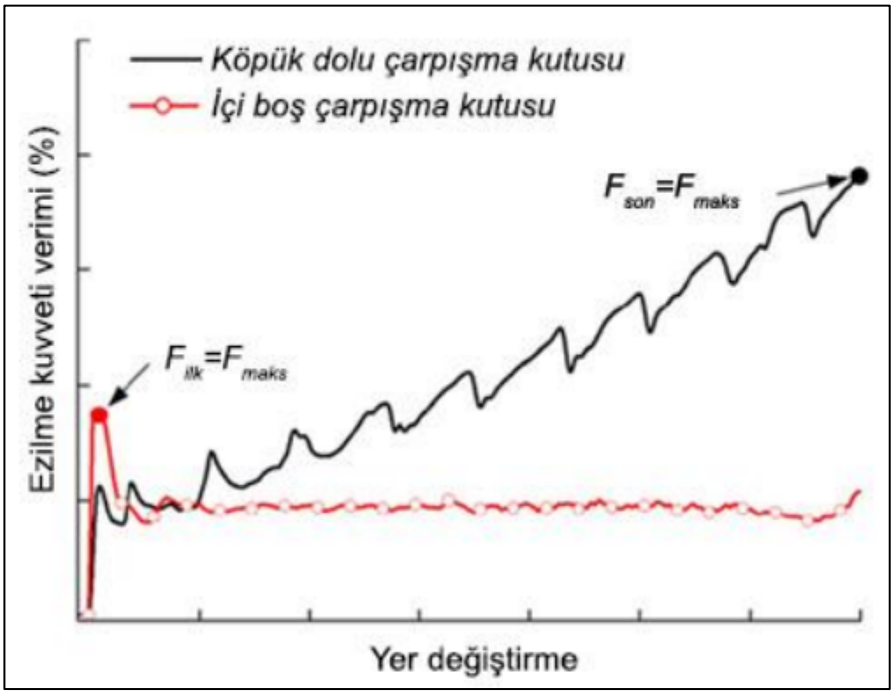
Araçların çarpışma kutularında kaza anında oluşacak darbelerin yolculara en az seviyede iletilmesi için bu çarpışma kutularının ezilme kuvveti verimlerinin yüksek olması beklenmektedir. Denklem 2.3'te belirtildiği üzere ezilme kuvveti verimi (η_F), çarpışma

bölgesinde oluşa ortalama kuvvetinin (F_{ort}) maksimum kuvvete (F_{maks}) bölünmesi ile elde edilir.

$$\eta_F = \frac{F_{ort}}{F_{maks}} \tag{2.3}$$

Ezilme kuvveti veriminin yüksek olması için çarpışma anında çarpışma noktasında oluşan maksimum kuvvetin ortalama kuvvete yakın olması gerekmektedir. Ezilme kuvveti veriminin yüksek olması çarpışma kutusunun yüksek enerji emilimi yaptığı anlamına gelmez. Sönümleme enerjisinin yüksek olması için oluşan ortalama kuvvetlerin de yüksek olması gerekmektedir. Çarpışma kutularında çarpışma performansının yüksek olması için ezilme kuvveti veriminin de yüksek olması gerekmektedir (Altın ve diğerleri, 2017).

Boş çarpışma kutularında maksimum ezilme kuvveti deformasyonun ilk başladığı anda, köpük dolu çarpışma kutularında ise deformasyonun ilerlemesiyle birlikte sonlara doğru oluşmaktadır. Şekil 2.11 'de eksenel yük altında boş ve köpük dolu çarpışma kutularının maksimum deformasyon kuvvetlerinin meydana geldiği noktalar görülmektedir.



Şekil 2.11. Boş ve köpük dolu çarpışma kutularının deformasyon kuvvetleri (Altın, 2017)

Özgül Enerji Emilimi:

Çarpışma kutularında emilen toplam enerjinin çarpışma kutusunun ağırlığına oranı olarak ifade edilmektedir. Çarpışma kutusunun birim kütlesi başına düşen enerji emilimi olarak da ifade edilebilir.

$$\mathrm{E}_m = \frac{E_T}{m} \tag{2.4}$$

Burada (Denkem 2.4) E_m, Özgül Enerji Sönümleme kapasitesi, E_T, enerji sönümleme kapasitesi ve m ise çarpışma kutusunun deformasyona uğramadan önceki kütlesi olarak ele alınmaktadır. Tasarım esnasında malzeme seçimi çarpışma kutularının enerji sönümleme kapasitelerini direk olarak etkileyeceğinden önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Çarpışma kutusunu kütlesi ne kadar hafif olursa özgül enerji sönümleme o kadar yüksek olacaktır.

Özgül enerji emilimi, çarpışma kutularının performansının belirlenmesindeki en önemli kavramlarından biridir. Özellikle son zamanlarda araçların yakıt tüketimini azaltılmasına yönelik yapılan çalışmalarda çarpışma kutularının da hafifletilmesi üzerine de durulmaktadır. Bu nedenle çarpışma kutusunun enerji emilimini artırırken ayrıca çarpışma kutularının ağırlıklarının da azaltılması gerekmektedir. Özgül enerji emiliminin yüksek olması çarpışma kutularının performansının da yüksek olduğu söylenebilir (Baykasoğlu ve diğerleri, 2014).

Deformasyon verimi:

Bir çarpışma kutusunun ne kadar deformasyona uğradığını belirlemek maçı ile kullanılan bir kavramdır. Denklem 2.5'te belirtildiği üzere deformasyon verimi (η_S), maksimum deformasyon miktarının (S_{maks}), çarpışma kutusunun ilk boyuna (l) bölünmesi ile elde edilir.

$$\eta_S = \frac{S_{maks}}{l} \tag{2.5}$$

Çarpışma kutularında enerji emiliminin yüksek olması için deformasyon miktarının da yüksek olması beklenir. Bu neden le deformasyon veriminin yüksek olması çarpışma kutusunun performansını olumlu yönde etkilemektedir.

2.3.2. Polimer çarpışma kutusu

Uzun yıllardır otomobillerde kullanılan pasif güvenlik elemanlarından biri olan çarpışma kutularının, genellikle silindirik ve prizmatik kutular olarak çelik veya alüminyum gibi metal bazlı malzemelerden yapıldığı bilinmektedir. Ancak, düşük üretim maliyetleri, üretim kolaylığı ve çok karmaşık geometrilerde üretilebilme yetenekleri nedeniyle polimer esaslı çarpışma kutuları son yıllarda hızla yaygınlaşarak birçok alanda metalik malzemelerin yerini almaktadır.

Polimer çarpışma kutularının ana avantajları, çarpışma performansını optimize edebilecek karmaşık geometrilerde üretilebilmeleri ve elastik özellikleri sayesinde, değiştirilme ihtiyacı olmaksızın kullanılabilmeleridir.

Bir aracın önü ve arkası, bir çarpışma olayında, deformasyon yolcu bölmesine ulaşmadan önce çarpışma sırasında üretilen enerji miktarını emme, dağıtma ve azaltma amacıyla kontrollü olarak deforme olacak şekilde tasarlanmaktadır. Dahası, deformasyon süreci, yolculara bir kazada güvenli bir şekilde yavaşlamak için gerekli ek zamanı verir. Çarpışma kutularının, çarpışma esnasında ortaya çıkan enerjiyi ne kadar absorbe ettiklerini belirlemek amacıyla, dijital ortamlardaki simülasyon ve deneysel olmak üzere iki farklı metot kullanılmaktadır. Bu bağlantı elemanlarının enerji sönümleme kapasitesini arttırmak amacı ile her geçen gün yeni ve farklı çalışmalar yapılmaktadır. Çarpışma kutularının dizaynı konusu üzerinde oldukça fazla durulmaktadır. Bu konuda kare, dikdörtgen ya da dairesel gibi şekillerin yanı sıra çok farklı geometriler de incelenmektedir. Geometrik şekillerin seçimi, enerji absorbe edilmede etkili olma durumu açısından önem teşkil etmektedir ve bunun yanı sıra kullanılacak olan malzeme, malzeme kalitesi, et kalınlığı gibi faktörler de ele alınmaktadır.

Önceden oluşturulmuş yapısal takviyeler, büyük avantajın ağırlık olduğu çarpışma testlerinde iyi performans göstermiştir. Bu takviyeler, büyük deformasyonlara sahip bölgelerin rijitliğini arttırmak, böylece darbe sırasında yük yolu olarak çalışan araç bölümlerini stabilize etmek amacıyla tasarlanmıştır. Kalınlık boyunca takviyelerin bir kompozit materyalin ezilme yükü üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir.

2.3.3. Çarpışma kutuları üzerine yapılan çalışmalar

Lanzerath ve Schilling (2003), alüminyum, poliüretan ve epoksi yapısal köpükler kullanmışlar ve bir telafi edilebilirlik çalışmasında düşük hızda ön ve yan etkilere maruz kalan araçların performansını analiz etmişlerdir. Yazarlar köpüğün deforme olmuş bileşen sayısını azaltarak sigorta maliyetini azaltabileceği sonucuna varmışlardır.

Zarei ve diğerleri (2006), içi boş ve içi alüminyum köpük dolgulu profillerin eksenel ve radyal yükler altındaki mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Çalışma esnasında yapılan testlerle alüminyum köpük malzeme dolgulu çarpışma kutularının özgül enerji sönümleme kapasitesinin diğerlerine göre daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Buna karşılık, kullanılan köpük malzemenin yoğunluğunun istenen seviyeden fazla olmasının, ezilme kuvveti verimi ile özgül enerji sönümleme kapasitesinin düşmesine sebep olacağını belirtmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmanın sonucunda içi boş çarpışma kutularına göre içerisine alüminyum köpük malzeme yerleştirilen çarpışma kutularının enerji sönümleme kapasitesini önemli derecede arttırdığını tespit etmişlerdir.

Öztürk ve diğerleri (2008), sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanarak LS-DYNA yazılımıyla darbe sönümleyici sistemler ile ilgili nümerik bir çalışma yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışma sonucunda kullandıkları model için analiz edilen 10 m/s'lik hız için çarpışma kutularının çarpışma sonunda sönümlediği toplam enerji $4{,}21\times10^{6}$ J olarak bulunmuştur. Bunun yanısıra 1 tonluk kütleye sahip bir cismin 15,8 m/s'lık hızla tampona çarptığı düşünülürse bu esnada meydana gelen toplam enerjinin yaklaşık %3,5'lik kısmının çarpışma kutusu tarafından sönümlendiği belirlenmiştir.

Lademo ve ark. (2008), bir tampon sistemini incelemiş ve genellikle alüminyum ekstrüzyonları içeren şekillendirme işlemlerinin etkisini göz önünde bulundurarak yeni bir malzeme modeli önermişlerdir.

Toksoy (2009), basma altında yüksek oranda enerji sönümleme kapasitesi olan kapalı hücreli alüminyum köpük malzeme dolgulu çarpışma kutuları üzerine çalışmıştır. Küp şeklinde numunelerden kare kesitler alarak çarpışma kutularının deformasyonları üzerine inceleme yapmıştır. Toksoy çalışmasında kullanacağı çarpışma kutularının et kalınlığını 2 mm, 2,5 mm ve 3 mm olmak üzere 3 farklı kalınlıkta, boyutlarını ise 70,6×73,2×125,2 mm ve 60×70,4×122,6 mm olarak belirlemiştir. Yapmış olduğu çalışmanın sonucu olarak içi dolu numunelerdeki ortalama ezilme miktarının içi boş kutulara kıyasla %55, sönümlenen enerjinin çarpışma kutusunun deformasyona uğramadan önceki kütlesine oranının ise % 9,8 arttığını tespit etmiştir. Maksimum enerji sönümleme kapasitesinin 3 mm et kalınlığında ve kapalı hücreli alüminyum köpük dolgulu çarpışma kutusunun sağladığı sonucuna varılmıştır.

Polanco-Loria (2010), termoplastikler için bir model önermiştir. Moura ve ark. [2010], kauçuk-partikülü takviyeli bir polipropilenin davranışını incelemişlerdir.

Hake'e göre (2011), Bilgisayar Destekli Mühendislik (BDM) analizinin aslına uygunluğunu artırmak için plastik bileşenlerin uygun malzeme verilerini göz önünde bulundurmak gerekmektedir.

Demirci ve diğerleri (2014), farklı şekillerdeki çarpışma kutularının ön taraftan çarpışma anlarında enerji sönümleme kapasitelerini saptayabilmek amacı ile SEM analiz yöntemini kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada malzeme olarak çelik seçilmiş ve 15,6 m/s'lik hızda 0,08 tonluk kütleye sahip sert bir engele eksenel doğrultuda çarptırarak LS-DYNA yazılımı ile sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Modellenen tasarımın halihazırdaki modele göre daha üstün olduğunu, enerji sönümleme kapasitesinin %0,6 arttığını ve optimum deformasyon kuvvetinin $1,07\times10^5$ N'dan $1,06\times10^5$ N'a düştüğünü saptamışlardır.

Jahani ve ark. (2019), kompozit silindirik bir çarpışma kutusunun eksenel yükler altındaki davranışını, malzemenin çap ve kalınlığını değiştirerek ve polimerik köpük dolgusu yaparak incelemişlerdir. Yapmış olduklarını araştırmada, ticari bir sonlu elemanlar yazılımı olan Abaqus' ta, hasar başlangıcını tespit etmek için Hashin başarısızlık kriterini kullanan bir çarpışma kutusu modellemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, tetikleyici içermeyen çarpışma kutusuna nazaran üç farklı tetikleme geometrisinin (pah, yuvarlatma ve lale) maksimum yükü yaklaşık %7-33 ve enerji emilimini yaklaşık %40-86 azalttığını görmüşlerdir. Tetikleme geometrisine sahip bir çarpışma kutusunun polimerik köpükle doldurulmasının da enerji emilimini yaklaşık %20 arttırdığını gözlemlemişlerdir. Bir çarpışma kutusuna aynı anda hem tetikleyici hem de köpük dolgu uygulamasının daha iyi bir performans elde etmek için önemli bir rol oynadığı sonucuna varmışlardır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Malzeme Seçimi ve Numune Üretimi

Bu çalışmada kullanılmak üzere amit bağları ile bağlanmış uzun zincir bir polimer olan polyamit malzeme seçilmiştir (Şekil 3.1). Polyamitler, ergime sıcaklıkları yüksek olduğu için yüksek sıcaklıklarda sertliklerini korurlar. Ayrıca yüksek kimsayal dayanım, sürtünme katsayısının düşük olması, ısıl deformasyona karşı gösterdiği direnç, kolay şekillendirme, tokluk, sünme ve yorulma dayanımı gibi üstün özellikleri de bulunmaktadır (Yılmaz, 2018).



(a) (b)

Şekil 3.1. Deneyde kullanılan hammaddeler a) Polyamit 66 (PA66) b) %35 cam elyaf takviyeli polyamit 66 (PA66-GF35)

Çizelge 3.1' de bu çalışmada kullanılan polyamit hammaddelerin (PA66 ve PA66-GF35) mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kullanılan hammaddelerin mekanik özellikleri

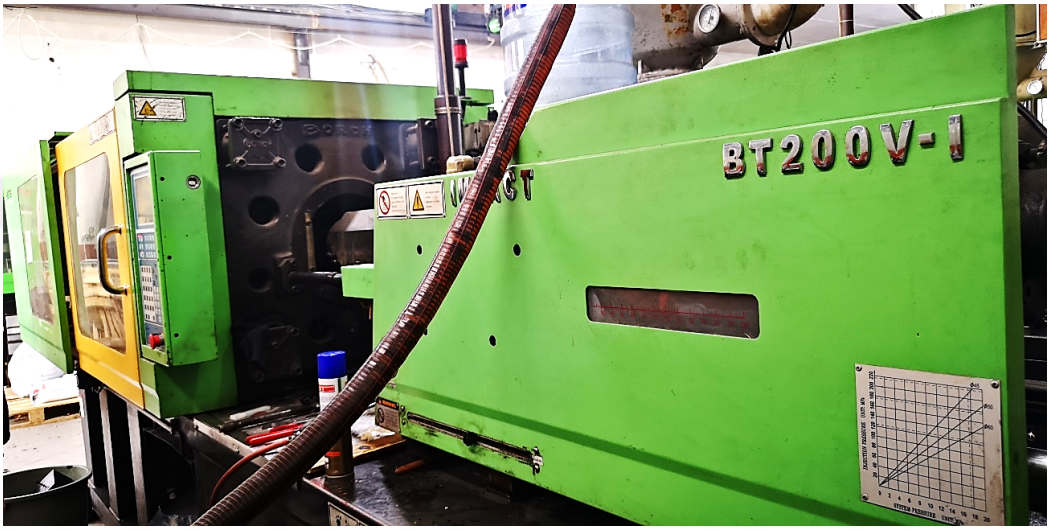
Mekanik Özellikler	PA66	PA66-GF35
Yoğunluk (g/cm^3) Density	1,1	1,418
Katkı Oranı (%) Ash Content	-	35,12
Nem (%) Moisture Content	2,4-3,0	0.11
Esneklik Modülü (MPa) Elastic Modulus Tension	1587-2795	8000-11000
Kopmadaki Çekme Direnci (MPa) Tensile Stress At Break	60	160-180
Kopmadaki Uzama (%) Tensile Strain At Break	40	>2
Sertlik (Shore-D) Hardness	-	83
Erime Noktası (°C) Melting Point	260	260
Yanmazlık Sınıfı Flammability	HB	HB
Çentikli İzod Darbe (kJ/m^2) Notched Izod Impact Strenght	16	8

Polimer malzeme gruplarının üretiminde pek çok farklı üretim metodu bulunmaktadır. Termoplastik malzemelerin çok rijit bir yapısı olmaması, ısıtıldıklarında viskozitelerinin düşmesi ve böylece akışkan bir hale gelmeleri nedeniyle enjeksiyon kalıplama bu malzeme grubunda oldukça yaygın olarak kullanılan bir imalat yöntemidir (Lewis & Gertsakis, 2001).

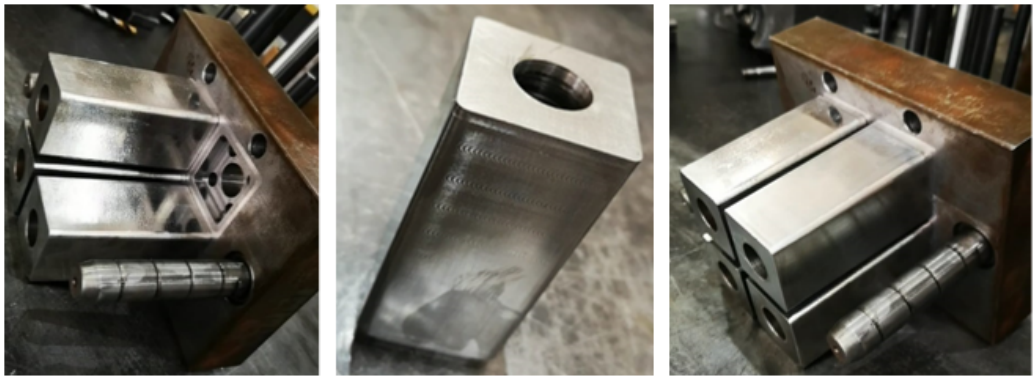
Enjeksiyon kalıplamada çalışma prensibi şu şekildedir: Polimer hammadde yüksek sıcaklıklarda ısıtılarak eriyik hale getirilir ve ardından yüksek basınç ile birlikte kalıp boşluğuna itilir. Belirli bir süre sonra katılaşan parça, itici sistem yardımıyla kalıptan

çıkarılır. Kalıplama çevrim süresi parçanın yapısı, şekli ve kullanılan hammaddeye göre 10 saniyeden yaklaşık 2 dakikaya kadar çıkmaktadır.

Bu çalışmadaki numuneleri basmak için kullanılan enjeksiyon makinesi Şekil 3.2' de gösterilmektedir. Numuneler basılmadan önce, daha önce kesik olarak kullanılan maça revize edilerek diğer maçalarla aynı uzunluğa getirilmiştir (Şekil 3.3). Ardından kalıp caraskal yardımı ile enjeksiyon makinesine bağlanmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.2. Plastik enjeksiyon makinesi



Şekil 3.3. Kalıbın revize edilmesi



Şekil 3.4. Enjeksiyon makinesi üzerine bağlanmış kalıp

Malzemeye öncelikle 120°C'de 3 saat boyunca fırınlama işlemi uygulanmıştır (Şekil 3.5). Ardından plastik enjeksiyon makinesinde her birinin çevrimi yaklaşık 2 dakika olmak üzere 300°C sıcaklıkta basılmışlardır. Deneylerde, üretimi ABV Kalıp ve Plastik San. Tic. Ltd. Şti'de yapılan 6 adet PA66 GF35 (takviyeli polimer) ve 6 adet PA66 (takviyesiz polimer) malzemeden yapılan içi boş çarpışma kutuları kullanılmıştır.



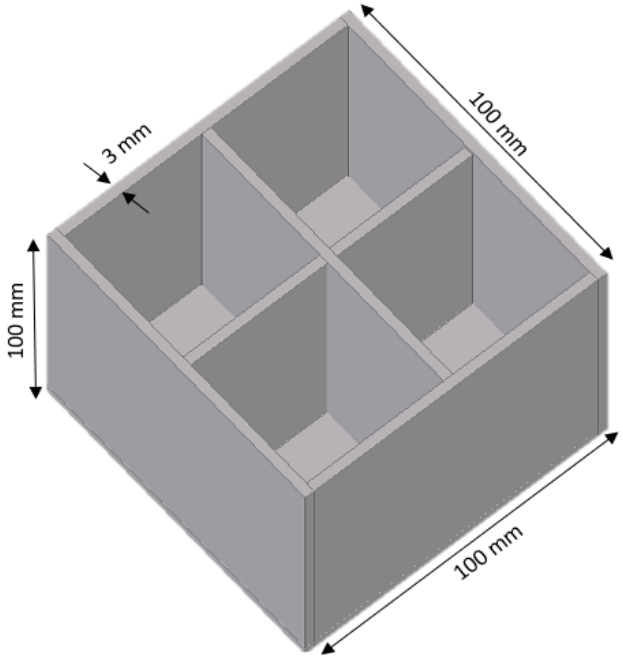
Şekil 3.5. Fırınlama işlemi

Seçilen hammaddeye uygun parametreler (enjeksiyon sıcaklığı 240-320 °C ve kalıp sıcaklığı 40-120 °C aralığında olmak üzere) kontrol ünitesinden ayarlanarak basma işlemi başlatılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Enjeksiyon kontrol ünitesi

Deneylerde kullanılan çarpışma kutuları boyutları 10*10*10 cm ve ortalama et kalınlığı 3 mm olan içi boş kübik bir kutu şeklindedir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Numunenin 3B teknik resmi

Takviyesiz kutu kütlesinin yaklaşık 251 g, cam elyaf takviyeli kutu kütlesinin yaklaşık 330 g olduğu görülmektedir (Şekil 3.8).

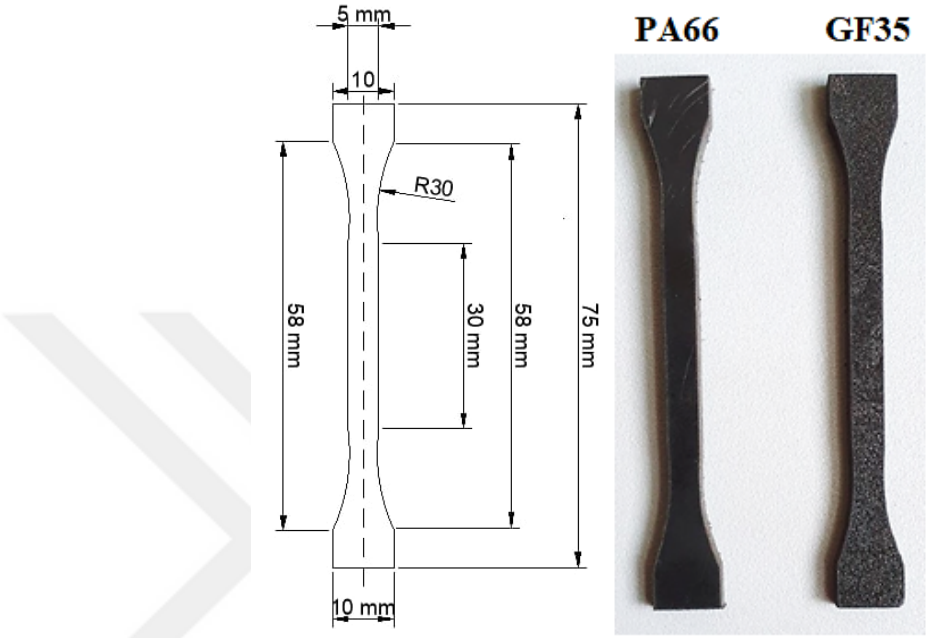


Şekil 3.8. Takviyesiz ve takviyeli numune kütleleri

Numunelere basma ve çekme testi uygulayabilmek için su jeti ile kesim yapılarak standartlara uygun ölçülerde parçalar alınmıştır. İleri teknolojinin bir ürünü olan su jeti; en verimli kesme yöntemlerinden biri olarak bilinmektedir. Hiç aşınmayan, köşelerde hiç çapak bırakmayan, kesme sırasında malzemeyi deformasyona uğratacak kuvvetler oluşturmayan, sıcaklık etkisi olmayan böylelikle; yapısal bozulma, kararma, çarpılma, erime, damlama oluşması ve yanma sorunları asla söz konusu olmayan bir kesici takım olan su, en karışık biçimleri dahi, yüksek hassasiyet ve çok temiz kesim kenarları ile elde edilebilmektedir (Haylock, 1987).

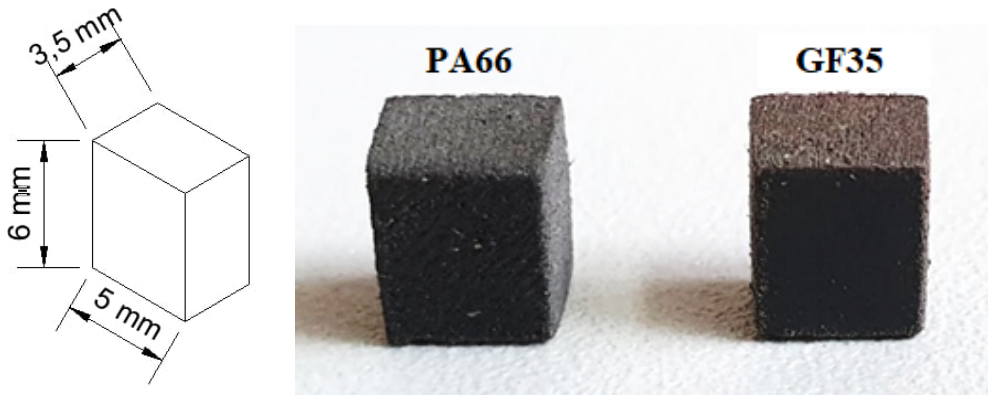
Bu teknolojinin en büyük avantajı yüksek sıcaklıkların oluştuğu bir kesme işlemi olmamasıdır. Böylelikle kesilen malzemelerde ısıl gerilmeler oluşmamakta dolayısıyla işleme sonrası bir gerilme giderme işlemine gerek duyulmamaktadır. Tüm malzemeler sıcaklık oluşmadan kesilebilmektedir (Hunziker, 1990).

Deneyde ISO 527 “Plastiklerde çekme testi” standardı uygulanmıştır. Standart numune (1A/1B) boyutunda tercih edilen numune kalınlığı 4 mm, çalışmadaki kalıptan çıkan numunelerin et kalınlığı 3 mm olduğu için Tip 1BA küçük numune boyutları kullanılmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Çekme testi için hazırlanan numuneler

Basma testi numuneleri ISO 604 standardına uygun olarak hazırlanmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Basma testi için hazırlanan numuneler

3.1.1. Poliüretan köpük ilavesi

Poliüretan malzemeler, üretim yöntemlerindeki avantajlar ve gösterdikleri üstün mekanik ve termal özelliklerden dolayı son zamanlarda daha çok kullanılmaya başlanmıştır. Poliüretan köpük tek komponentli, havadaki nem ile kürleşen, kürleşirken genleşen, aerosol formunda yarı sert bir montaj, derz dolgu ve izolasyon malzemesidir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Deneyde kullanılan poliüretan köpük

İçi boş numune testlerinin ardından yukarıda saydığımız poliüretan köpük malzemenin faydalarından dolayı, boş numunelerin içerisine malzeme dayanımını artırmak amacıyla poliüretan köpük sıkılmıştır (Şekil 3.12).



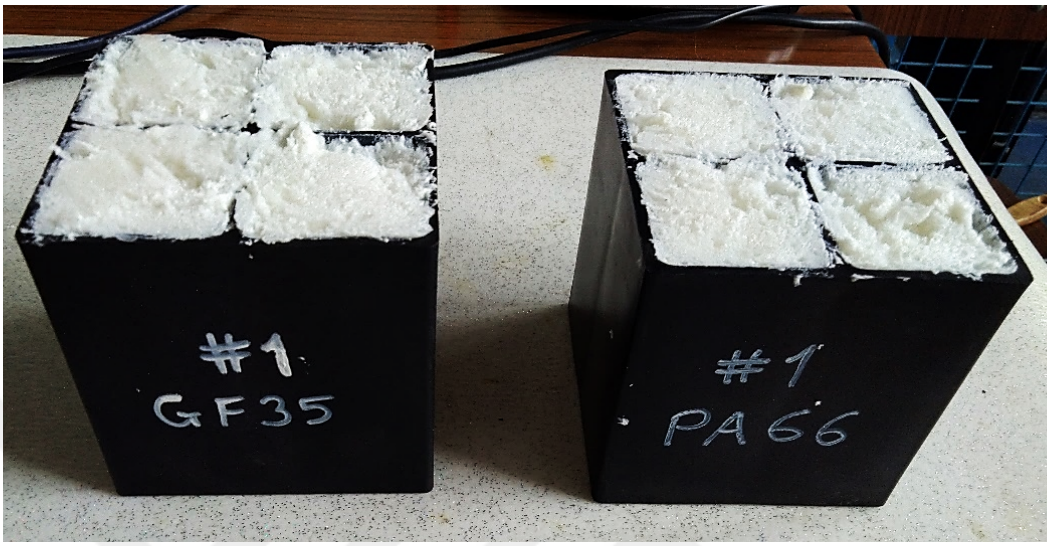
Şekil 3.12. Poliüretan sıkılmış numune

Poliüretan köpüğün kullanma talimatları doğrultusunda 24 saat boyunca bekletilmiştir ve Şekil 3.13'de görüldüğü gibi katı bir hale gelerek hacmi artmıştır.



Şekil 3.13. Katılaşan poliüretan köpük

Ardından Şekil 3.14'te görüldüğü gibi polüretan köpüğün fazlalıkları falçata yardımıyla kesilerek hassas tartıda ağırlık ölçümleri gerçekleştirildikten sonra düşürme testlerine geçilmiştir.



Şekil 3.14. Boş numunelere poliüretan köpük ilavesi

3.1.2. Poliüretan köpük ilaveli düşürme test numunelerine çelik sac ilavesi

Kuvvetleri biraz daha kararlı hale getirmek ve ayrıca daha yüksek enerji sönümleyebilmek amacıyla numunelerin içerisine poliüretan köpük ile 100*100 mm boyutlarında 0,2 mm kalınlığında 301 paslanmaz çelik sac, silindirik hale getirilerek çarpışma kutusunun 4 gözünün her birine takviye elemanı olarak ilave edilmiştir.

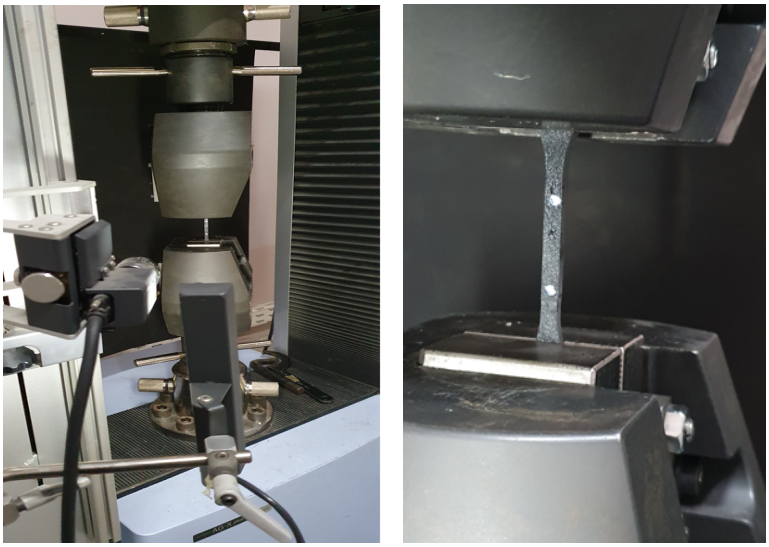
İçi boş olan takviyeli ve takviyesiz polimer kutuların içerisine hazırlanan çelik saclar ilave edilerek ağırlık ölçümleri yapılmıştır. İçerisine çelik sac yerleştirilen kutulara tekrar poliüretan köpük takviyesi yapılmıştır (Şekil 3.15). Yapılan düşürme darbe testlerinde 2 adet PA66 ve 2 adet PA66-GF35 (cam elyaf takviyeli) kutu kullanılmıştır.



Şekil 3.15. Çelik sac ve poliüretan köpük ilaveli kutular

3.2. Çekme Test Cihazı

Malzemelerin çekme yüklemesi altındaki mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme testleri yapılmıştır. Testler, SHIMADZU Üniversal Test cihazında 250 kN kapasiteli yük hücresi ve video ekstansometre (Şekil 3.16) kullanılarak yapılmıştır. Test öncesinde, numuneler üzerinde uzamanın ölçüleceği ölçüm alanı beyaz kalemle işaretlenmiştir. Ölçülen değerler ile mühendislik gerilmesi ve birim şekil değiştirme, test cihazının yazılımı tarafından hesaplanmaktadır.



Şekil 3.16. Video ekstansometre ve numune üzerinde ölçüm aralığının işaretlenmesi

3.3. Basma Test Cihazı

Bu deneyde Şekil 3.17'de gösterilen UTEST üniversal test cihazı ve 250 kN kapasiteli yük hücresi kullanılmıştır.



(a) (b)

Şekil 3.17. Basma testlerinin yapıldığı a) üniversal test cihazı, b) basma plakaları

Hazırlanan numuneler basma testi cihazının çeneleri arasına konumlandırılan paralel çelik plakalar arasına yatay olarak yerleştirilmiştir. Test standardında belirtildiği gibi

basma hızı sırasıyla 2, 10 ve 50 mm/dk olarak ayarlanmış ve tüm toplam numune boyunun %70'ine kadar basmaya maruz bırakılmıştır. Basma testi başlamadan numunelerin plakalarla düzlemsel olarak temasın sağlandığına emin olmak amacıyla 0,02 kN gibi düşük bir ön yükleme uygulanmıştır.

3.4. Düşürme Test Cihazı

Polimer malzemeler yüksek özgül dayanımlarıyla beraber düşük üretim maliyetleri sayesinde otomotiv ve uçak sanayinde yaygın kullanılmaktadır. Polimer malzemelerin kullanım alanlarının artmasıyla birlikte çalışma şartlarında maruz kaldıkları yüklerin çeşitliliğini artış göstermektedir. Polimerlerin maruz kaldıkları düşük veya yüksek hızlı darbeler sonrası yapılarında ortaya çıkan hasar mekanizmalarını tespit etmek ve nedenleriyle sonuçlarının deneysel incelemeleri, bu malzemelerden imal edilen parçaların darbe-yorulma ömrü, darbe direnci gibi olguların anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.

Polimer malzemelerin darbe dayanıklılığını ölçmek için öncelikle cisme şok ya da darbe şeklinde tesir eden yüklere karşı cisimde oluşan darbe direnci değerinin bulunması gerekmektedir. Polimer malzemelerin darbe özellikleri pek çok farklı yöntemle belirlenebilir.

Düşük hızlardaki darbe uygulamaları esnasında üretimdeki kayıpların önüne geçmek ve üretim parametrelerini iyileştirmek adına polimer malzemelerde meydana gelen değişimler ve darbe yüklemesinin ardından ürünün iç yapısında görülen hasar mekanizmalarının tespitinin öneminin son derece yüksek olduğu belirtilmektedir. Polimer malzemelerde en önemli hususlardan biri darbe yüklemelerine karşı dirençli olmasıdır.

Bir cismin uygulanan kuvvetlere karşı göstermiş olduğu tepki, mekanik davranış olarak tanımlanmaktadır. Bu davranış biçimini malzemenin mekanik özellikleri belirler.

Düşürme test cihazı ile çeşitli malzemelerin darbe dirençleri belirlenebildiği gibi, çarpma anından darbenin enerjisinin sönümlendiği zamana kadar dijital ortamda verileri kayıt

altına alarak grafiksel sonuçlar gösterebilmektedir. Belli bir yükseklikten serbest olarak bırakılan ağırlık sonucu çarpma başlığı üzerindeki kuvvet ve deplasman sensörleri yardımıyla çarpışma kutusu ile çarpan kütle arasında ortaya çıkan kuvveti ve kutunun ezilme miktarını (deplasman) kaydetmektedir. Bu çalışmada Şekil 3.18'de görülen düşürme test cihazı kullanılmaktadır ve numunelerin üzerine 267 kg yük düşürülerek numunelerin 3 kJ enerjiyi sönümlemesi beklenmektedir.



Şekil 3.18. Düşürme test cihazı

Düşürme testinde kullanılan tüm numunelerin kütleleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Düşürme testinde kullanılan numuneler ve kütleleri

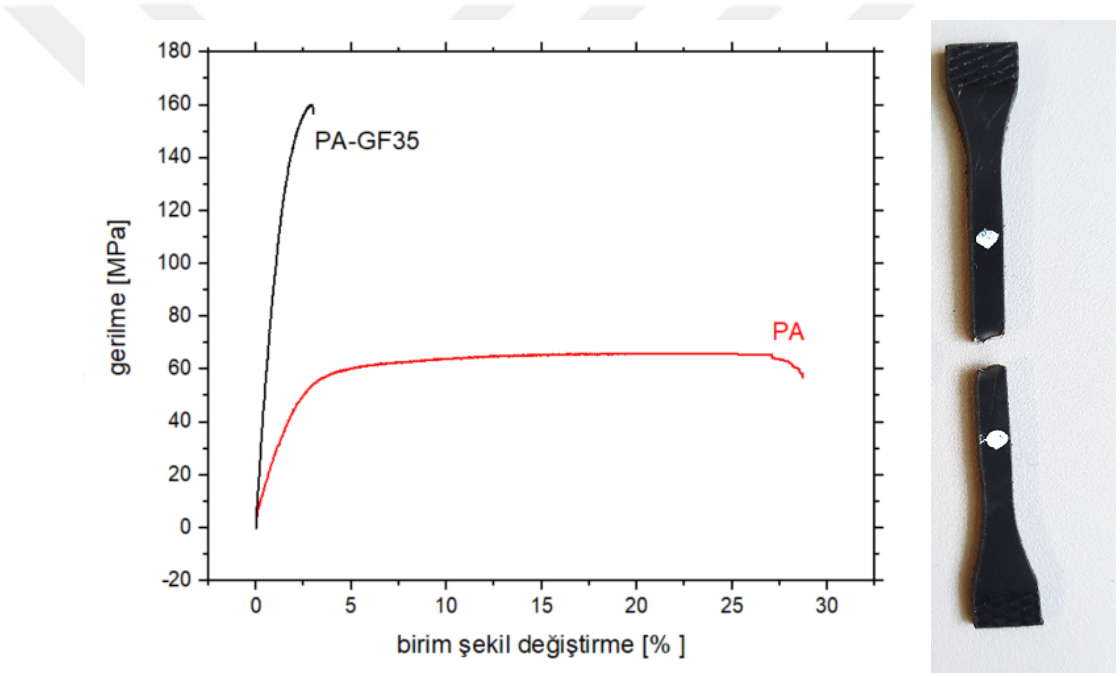
Numune	Kütle [g]
PA66	251
PA-GF35	330
PA66+PU	266
PA-GF35+PU	349
1-PA66+PU+SS	363
2-PA66+PU+SS	352
1-PA66-GF35+PU+SS	439
2-PA66-GF35+PU+SS	433

4. BULGULAR

Çarpışma kutularından alınan numunelere tek eksenli çekme, basma ve düşürme testleri uygulanmıştır.

4.1. Çekme Testi Sonuçları

Çekme testi sonucunda elde edilen takviyeli PA-GF35 ve takviyesiz PA numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 4.1 'de verilmiştir. Cam elyaf takviyeleri sürekli ve çekme doğrultusunda yönlenmiştir.

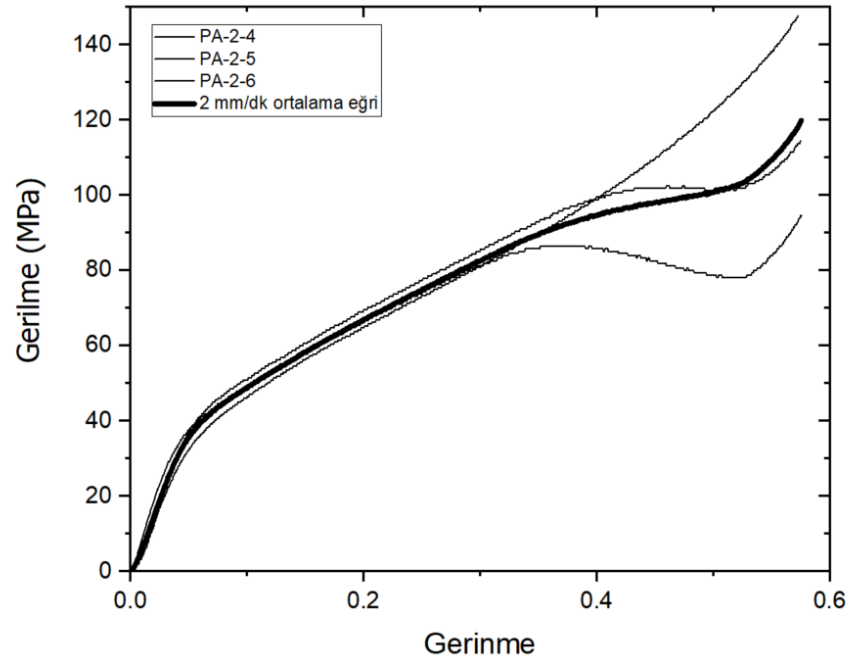


Şekil 4.1. PA ve PA-GF35 için elde edilen mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve PA için kırılmış örnek bir numune

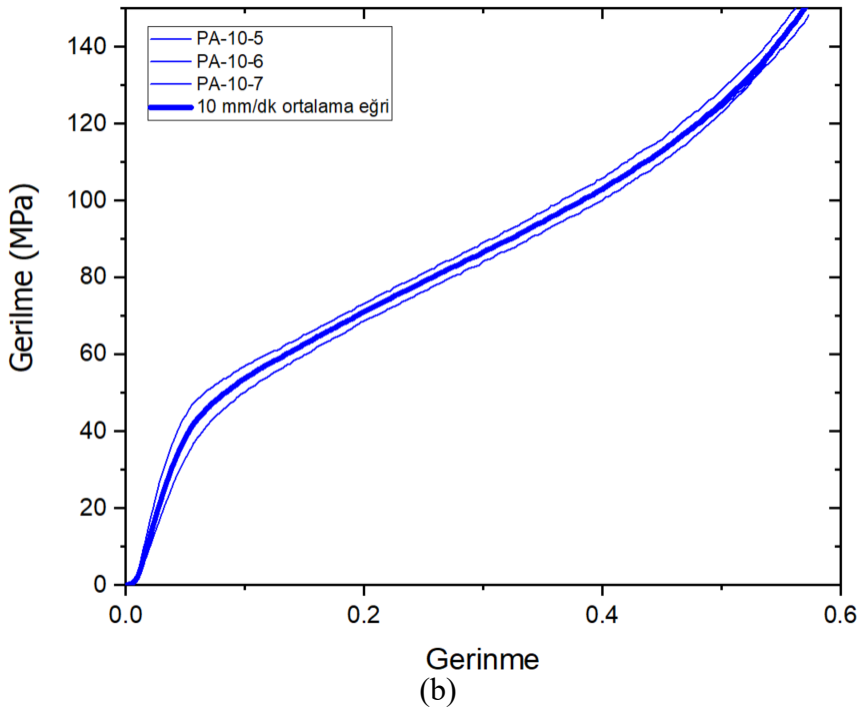
Eğriler incelendiğinde takviyesiz PA66 malzemenin takviyeliye göre sünek davranış gösterdiği, %35 karbon elyaf takviyesinin ise mukavemeti arttırmakla beraber malzemeyi oldukça kırılgan hale getirdiği açıkça görülmektedir. Malzemelerin üreticisinden sağlanan teknik datalarda PA için çekme mukavemeti 60 MPa ve maksimum birim şekil değiştirme %40 olarak, PA-GF35 için ise maksimum gerilme 160-180 MPa ve kırılma birim şekil değiştirmesi ise %2 olarak belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen eğrilerin bu değerlerle uyumlu olduğu görülmektedir.

4.2. Basma Testi Sonuçları

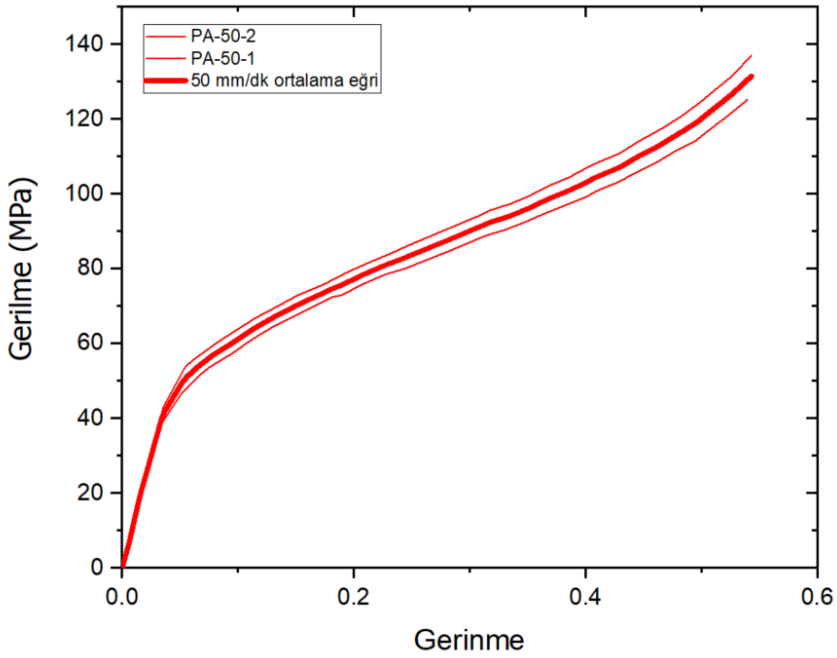
PA malzemesi için 2, 10 ve 50 mm/dk hızlarda gerçekleştirilen basma testi gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 4.2'de verilmiştir.



(a)



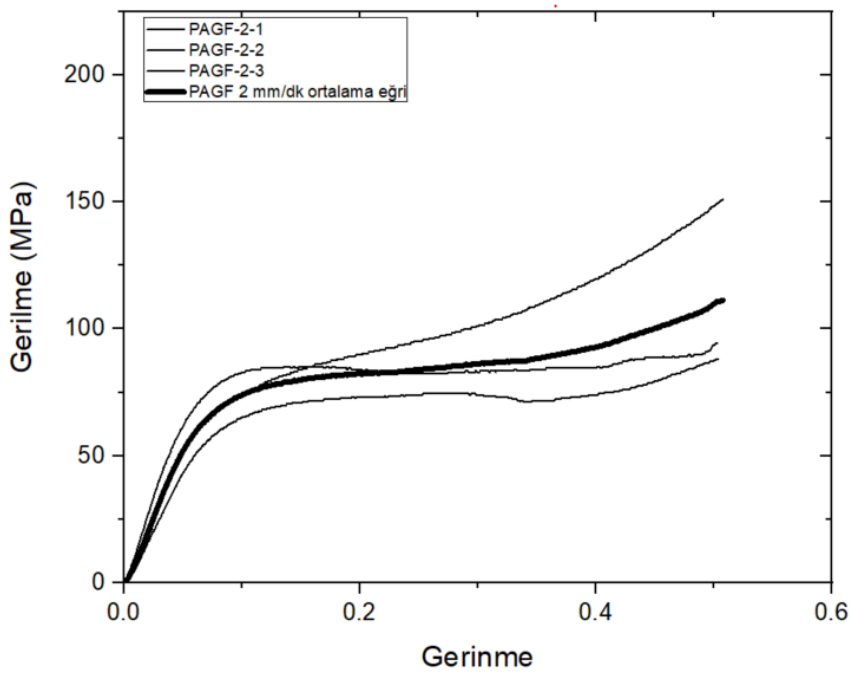
(b)



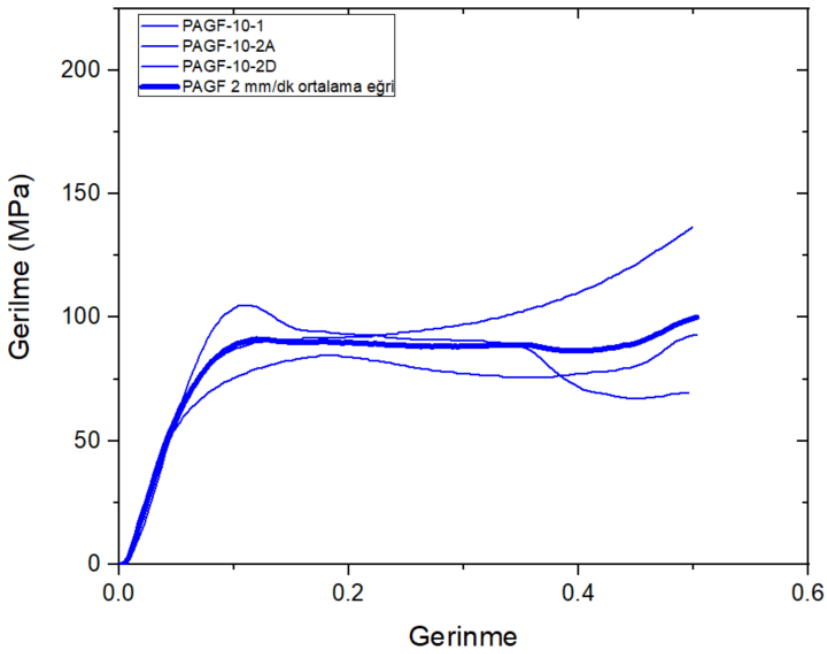
(c)

Şekil 4.2. PA için a) 2 mm/dk b)10 mm/dk c) 50 mm/dk hızda gerçekleştirilen basma testi gerilme-gerinim grafiği

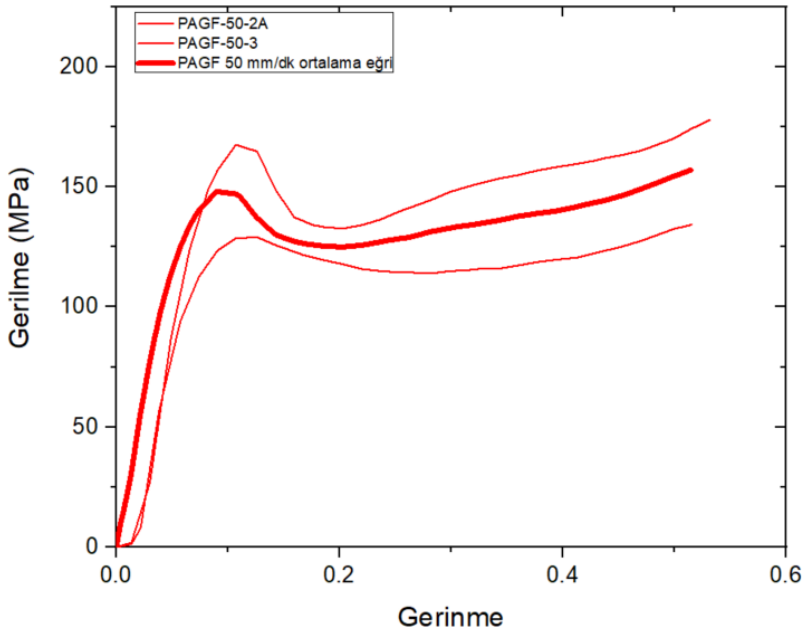
PA-GF35 malzemesi için 2, 10 ve 50 mm/dk hızlar gerçekleştirilen basma testi gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 4.3'te verilmiştir.



(a)



(b)

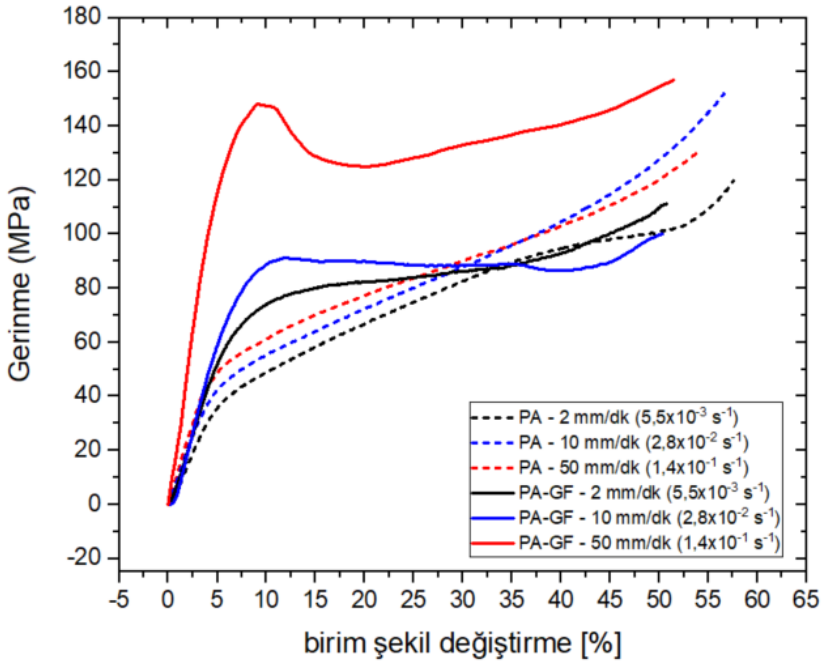


(c)

Şekil 4.3. PA-GF35 için a) 2 mm/dk b)10 mm/dk c) 50 mm/dk hızda gerçekleştirilen basma testi gerilme-gerinim grafiği

2 mm/dk, 10 mm/dk ve 50 mm/dk hızda gerçekleştirilen takviyesiz (PA) ve takviyeli (PA66-GF35) numunelere ait basma testlerinin ortalama gerilme-birim şekil değiştirme

eğrileri daha kolay karşılaştırma yapabilmek için Şekil 4.4'te tek bir grafik olarak verilmiştir.

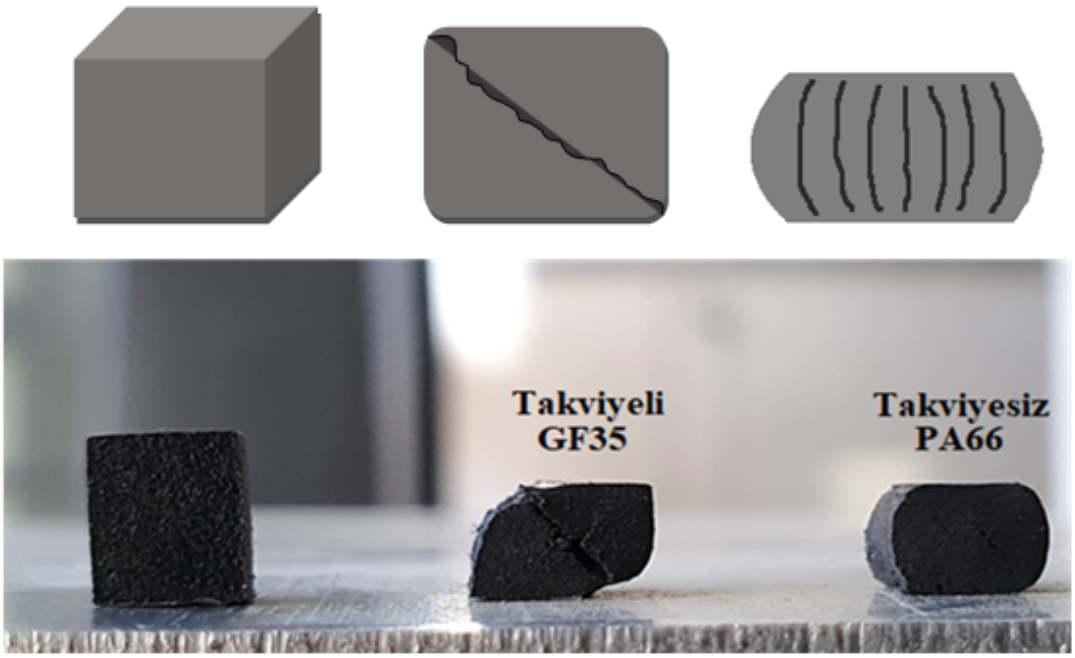


Şekil 4.4. PA ve PA66-GF35 basma testi ortalama eğrileri

Farklı hızlarda ortalama eğriler incelendiğinde deformasyon hızı arttıkça pekleşmenin arttığı dolayısıyla akma gerilmesinin de arttığı görülmüştür. Çekme test sonuçlarına benzer şekilde cam elyaf takviyesi malzemeyi daha mukavim fakat kırılgan hale getirmiştir.

Basma testlerinde, numunenin basma plakaları ile temasta olduğu alt ve üst yüzeylerde sürtünme kuvvetleri nedeniyle, deformasyon numune yüksekliği boyunca eşit değildir. Numune temas noktalarında rahatça yer değiştiremezken, orta noktada yanlara doğru rahatça akabilir. Bu sebeple numunenin sünekliğine bağlı olarak, az ya da çok bir şişkinlik yani fıçılaşma meydana gelir. Fıçılaşma arttıkça yanal yüzeylerdeki çekme gerilmeleri oluşturur ve eğer bu gerilmeler belli bir değere ulaştığında malzemede kuvvet doğrultusunda çatlaklar oluşur. Kırılgan malzemelerde, daha az deforme olmayan numune içerisinde malzeme çevreleyen malzemeye kayar ve numunenin orta kısmında çok yüksek kesme gerilmeleri sağlar. En büyük kesme gerilmeleri, basınç gerilmesi

yönüne 45°'lik bir açıda meydana geldiğinden, gevrek numuneler genellikle bu yön boyunca kırılır.



Şekil 4.5. Basma testi sonrası takviyeli ve takviyesiz numune görüntüleri

Şekil 4.5'te test öncesi ve sonrası numune görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerde daha sünek PA'da daha yüksek fıçılaşma ve gevrek davranan PA-GF malzemesinde ise bahsedildiği gibi 45°'lik bir açıda oluşan kırılma görülmektedir.

4.3. Düşürme Testi Sonuçları

Polimer çarpışma kutularının darbe yüklemesi altındaki mekanik davranışlarını incelemek amacıyla hazırlanan numunelere, 267 kg'lık yük düşürülmüştür.

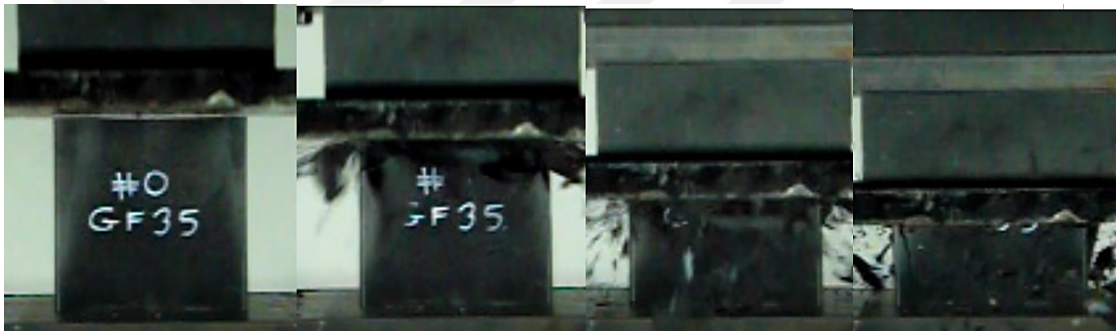
4.3.1. Boş kutular

Düşürme testi esnasında cam elyaf takviyeli ve takviyesiz içi boş numunelerin deformasyon davranışlarının görüntüsü Şekil 4.6'da verilmektedir. İdeal bir çarpışma kutusundan beklenen, hem istenilen dayanıma sahip olması hem de belli bir sünekliğe sahip olarak düzenli bir şekilde yani katlanarak deformasyona uğramasıdır. Deformasyon

görüntülerine bakılırsa, her iki malzemenin de bu şekilde deforme olmadığı, daha çok parçalanarak hasara uğradığı görülmektedir. Daha önce çekme ve basma testlerinde de statik şartlar altında da gözlemlendiği üzere PAGF35(takviyeli) numune darbe esnasında PA66 (takviyesiz)'ya göre daha gevrek davranmış, gerçekleşen kırılmalar daha fazla ve daha küçük parçalar halinde gerçekleşmiştir



(a)



(b)

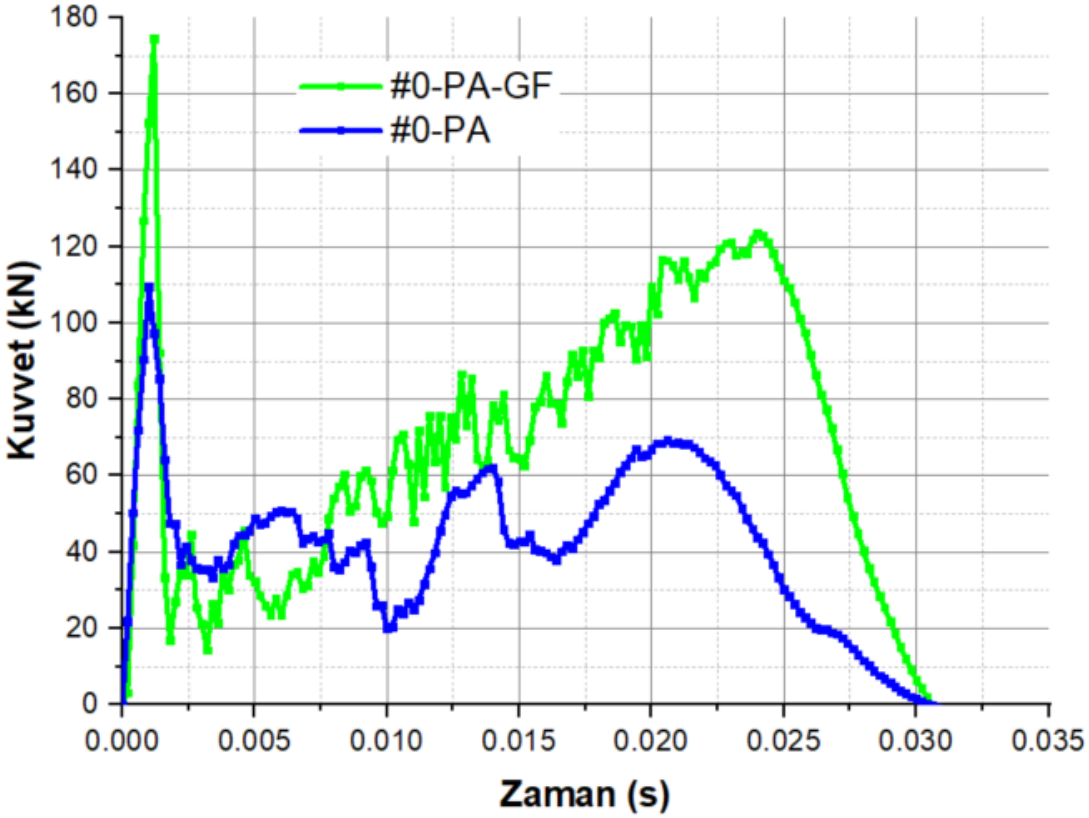
Şekil 4.6. Düşürme testi deformasyon davranışları a) PA66 test görüntüsü b) GF35 test görüntüsü

Düşürme testi sonrası cam elyaf takviyeli ve takviyesiz içi boş numunelerin görüntüsü Şekil 4.7'de görülmektedir.



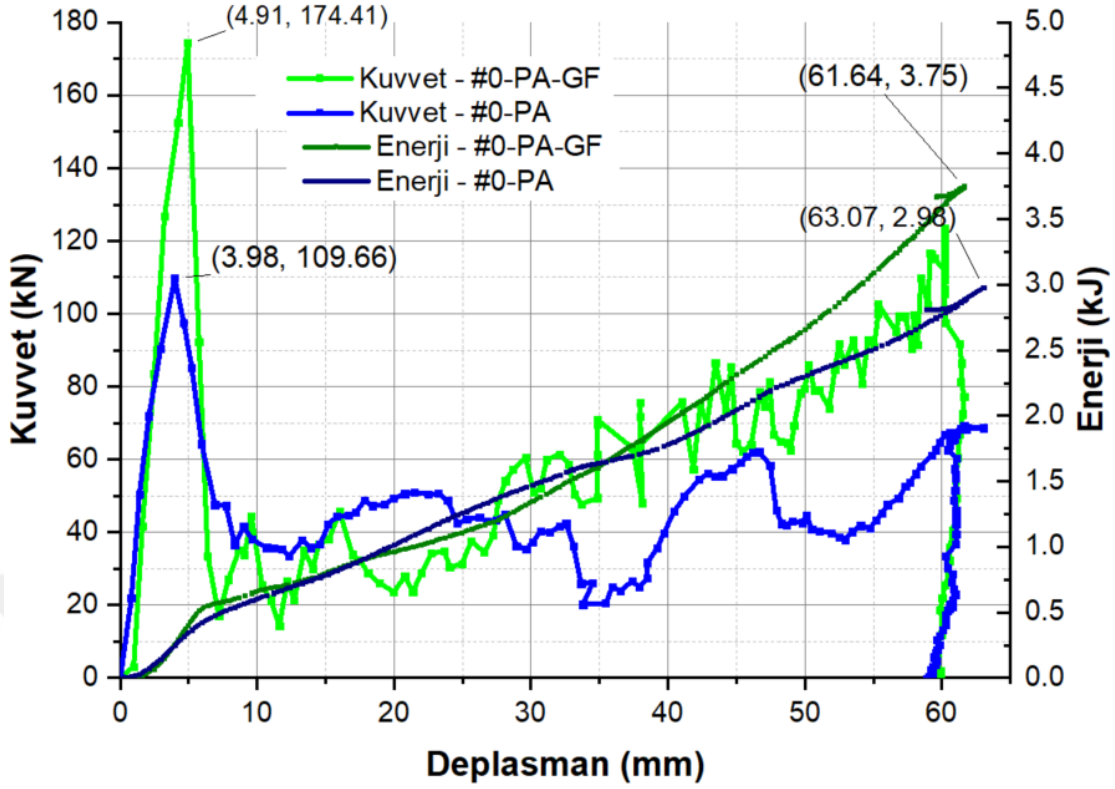
Şekil 4.7. Düşürme testi sonrası numunelerin son görüntüsü

Şekil 4.8'de takviyesiz (PA66) ve takviyeli (PA66-GF35) kutuların test sonrası elde edilen kuvvet-zaman grafiği verilmiştir. Elde edilen grafik incelendiğinde, genel olarak takviyesiz kutunun takviyeli kutuya göre daha düşük dayanıma sahip olduğu sonucuna varılabilir. Takviyeli kutunun daha rijit davrandığı dolayısıyla daha yüksek bir ilk çarpışma kuvveti ve ortalama kuvvete sahip olduğu görülmektedir. Aynı zamanda takviyeli kutu daha gevrek davrandığı için daha fazla lokal kırılmalar oluşmakta, bu da kuvvet değerlerinde daha sık iniş-çıkışlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Çarpışma süresi her iki kutu için benzer 0,030 s civarında olmuştur.



Şekil 4.8. Takviyeli ve takviyesiz polimer kutuların kuvvet-zaman grafiği

Şekil 4.9'da cam elyaf takviyeli çarpışma kutusunun emdiği enerji miktarının (3,75 J) takviyesiz kutuya göre daha fazla olduğu (2,98 J) görülmüştür. Daha yüksek kuvvet değerleri sayesinde takviyeli kutu daha fazla enerji sönümlemiştir.



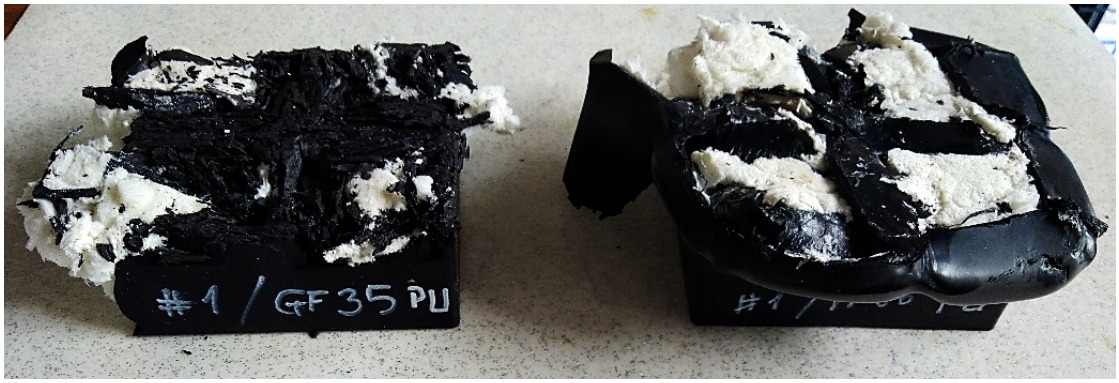
Şekil 4.9. Takviyeli ve takviyesiz polimer kutuların kuvvet-deplasman ve enerji grafiği

Yine Şekil 4.9'dan toplam deplasman yani sıkışma miktarlarının da çarpışma süreleri gibi yakın, yaklaşık 60 mm olduğu görülmektedir.

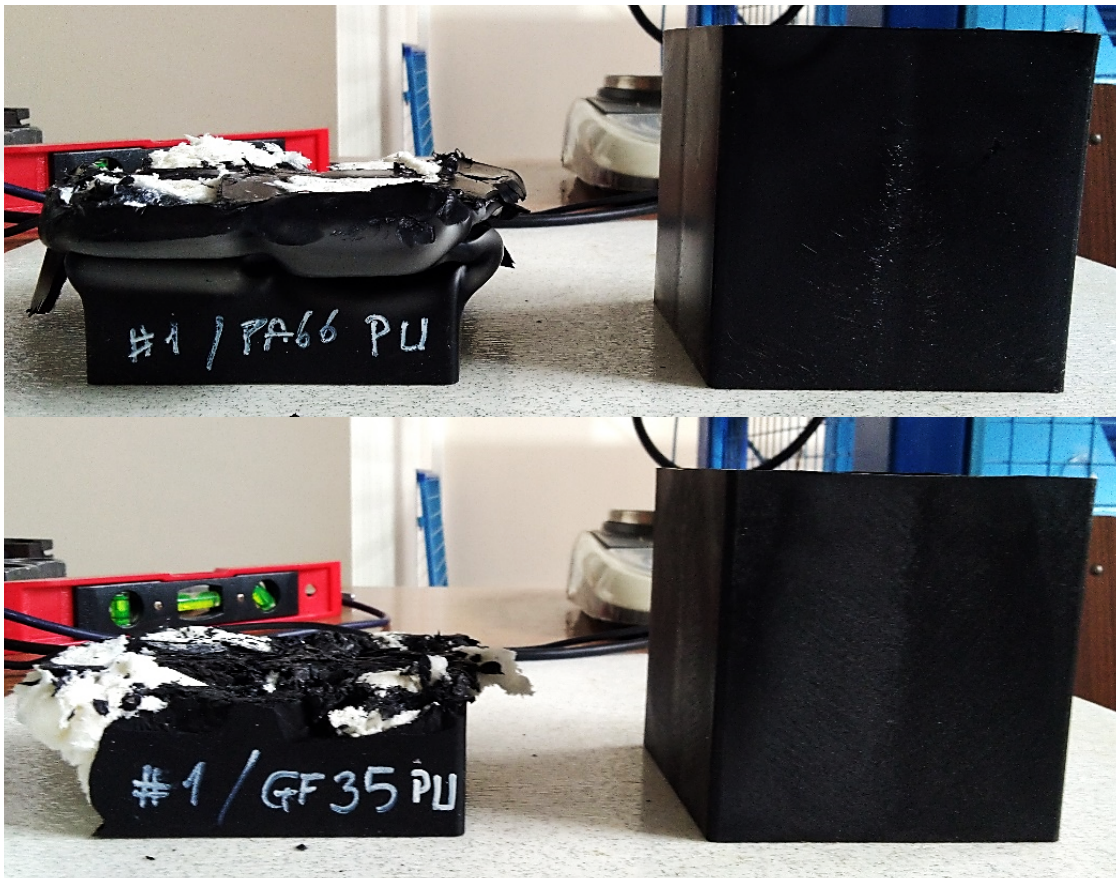
4.3.2. Poliüretan köpük ile doldurma

Düşürme darbe testleri poliüretan köpük ve çelik sac ilavesi yapılan numunelere de uygulanmış ve sonuçlar yeniden değerlendirilmiştir.

Cam elyaf takviyeli çarpışma kutusunda poliüretan köpük ilavesi performansı neredeyse değiştirmemiştir. Poliüretan takviyeli numunelerin düşürme testi öncesi ve sonrası görüntüleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Gevrek olan takviyeli kutuda, poliüretan ile doldurma da lokal kırılmaların azalmasına sebep vermemiş, kutu katlanmadan küçük parçalar halinde kırılarak deformeler oluşmuştur.



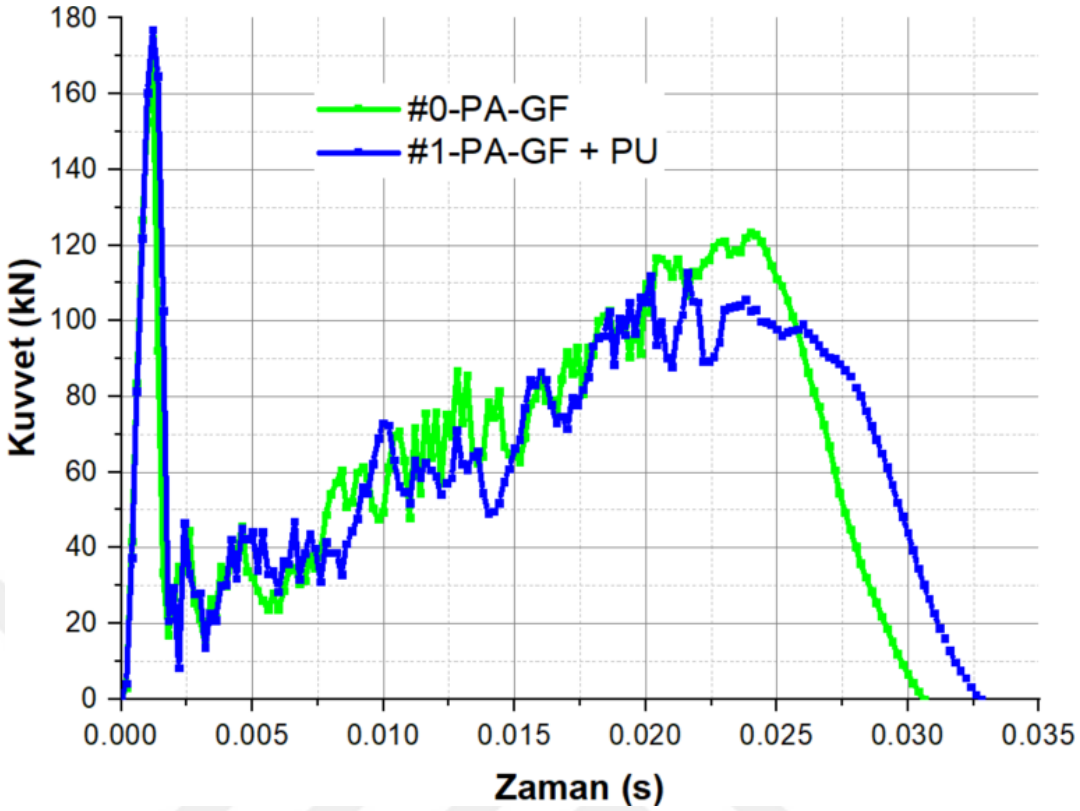
(a)



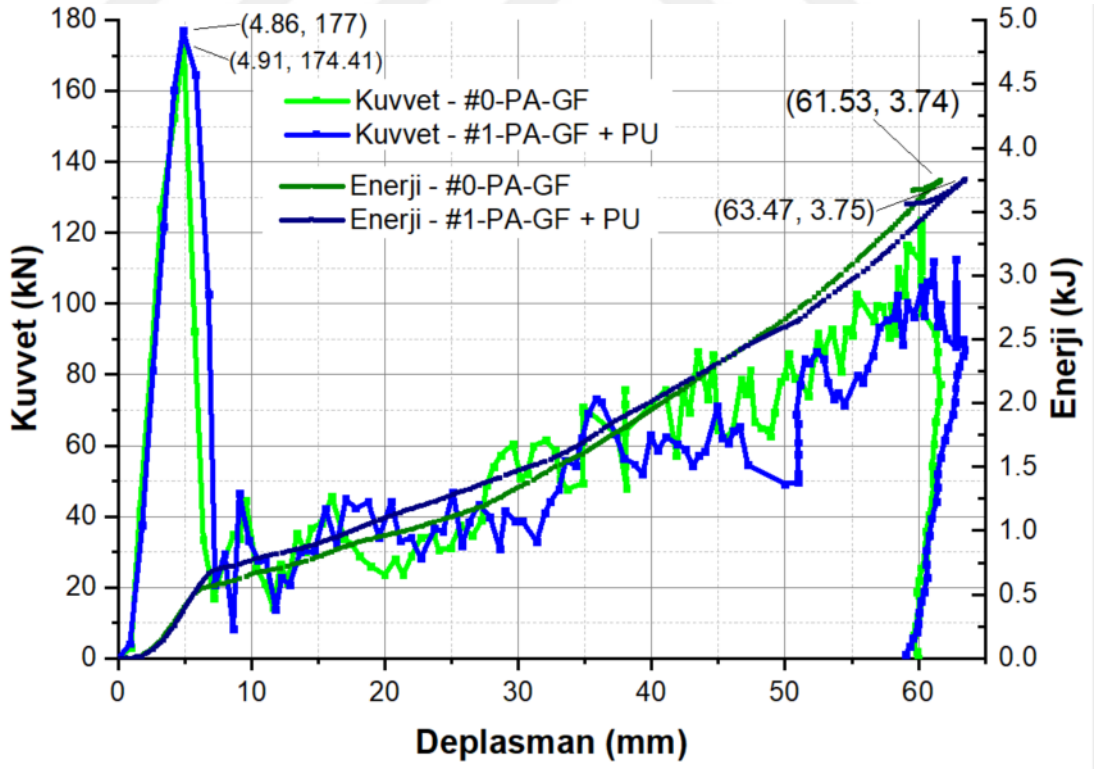
(b)

Şekil 4.10. PU takviyeli numunelerin görüntüleri a) Üstten çapraz görünüş b) Önden görünüş

Şekil 4.11' de poliüretan köpük ilaveli cam elyaf takviyeli çarpışma kutusunun kuvvet-zaman ve kuvvet, enerji – deplasman grafikleri verilmiştir.



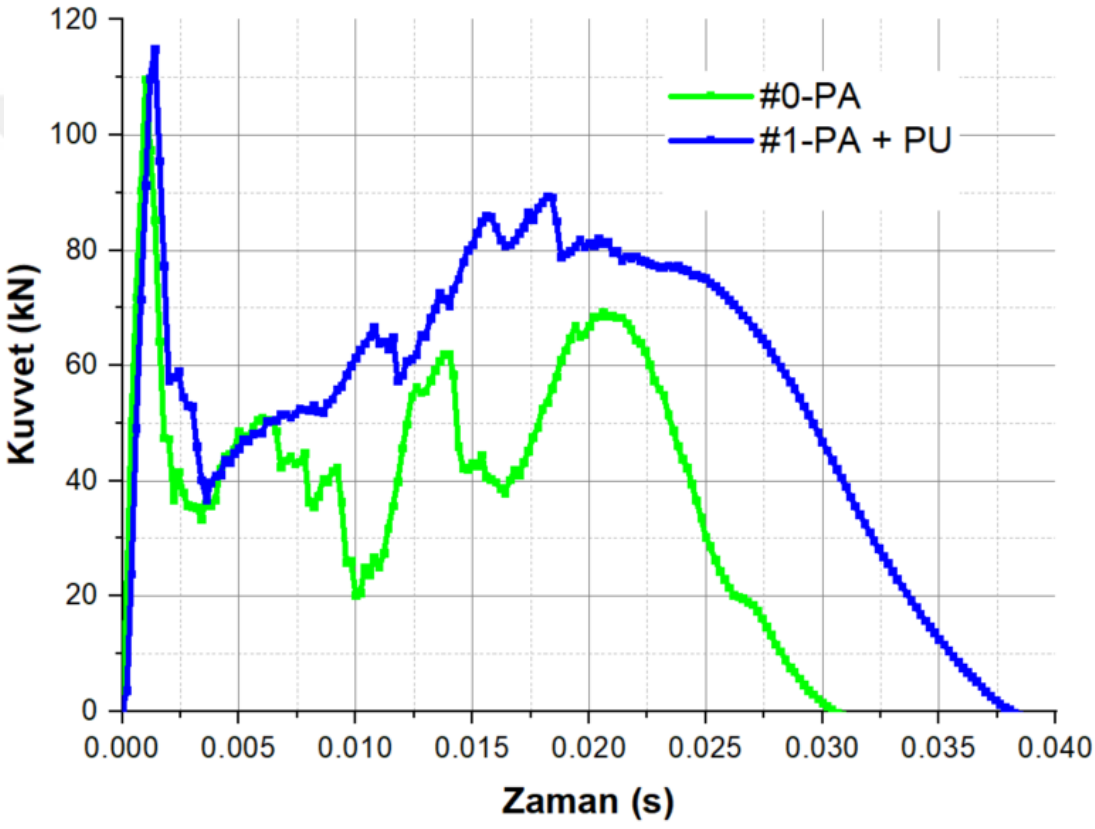
a)



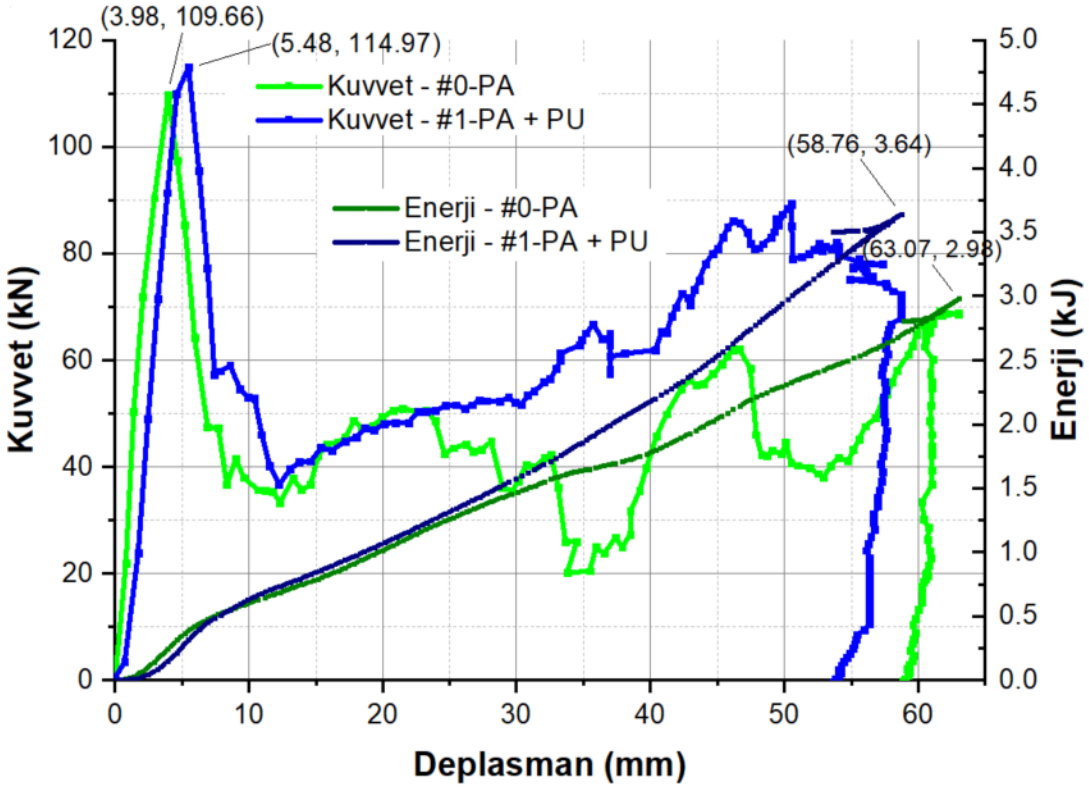
b)

Şekil 4.11. PU köpük ilaveli PA-GF takviyeli çarpışma kutusunun a) kuvvet-zaman b) kuvvet, enerji – deplasman grafikleri

Cam elyaf takviyesiz çarpışma kutusunda poliüretan köpük ilavesi çarpışma performansını arttırmıştır. Şekil 4.12' de poliüretan köpük ilaveli takviyesiz çarpışma kutusunun kuvvet-zaman grafiği verilmiştir. Takviyesiz kutunun daha sünek olması sebebiyle büyük parçalar halinde kırılarak deforme olmuştur. İlk çarpışma kuvvet değerlerinde bir fark olmamakla beraber, ortalama kuvvet değerinin poliüretan köpük ilavesiyle bir miktar arttığı görülmektedir. Bu sebeple sönümlenen enerji değeri de artmıştır. Çarpışma süresi de poliüretan köpük ilavesiyle 0,038 s'ye çıkmıştır. Toplam deplasman miktarı ise köpüğün direncinin eklenmesiyle azalmıştır.



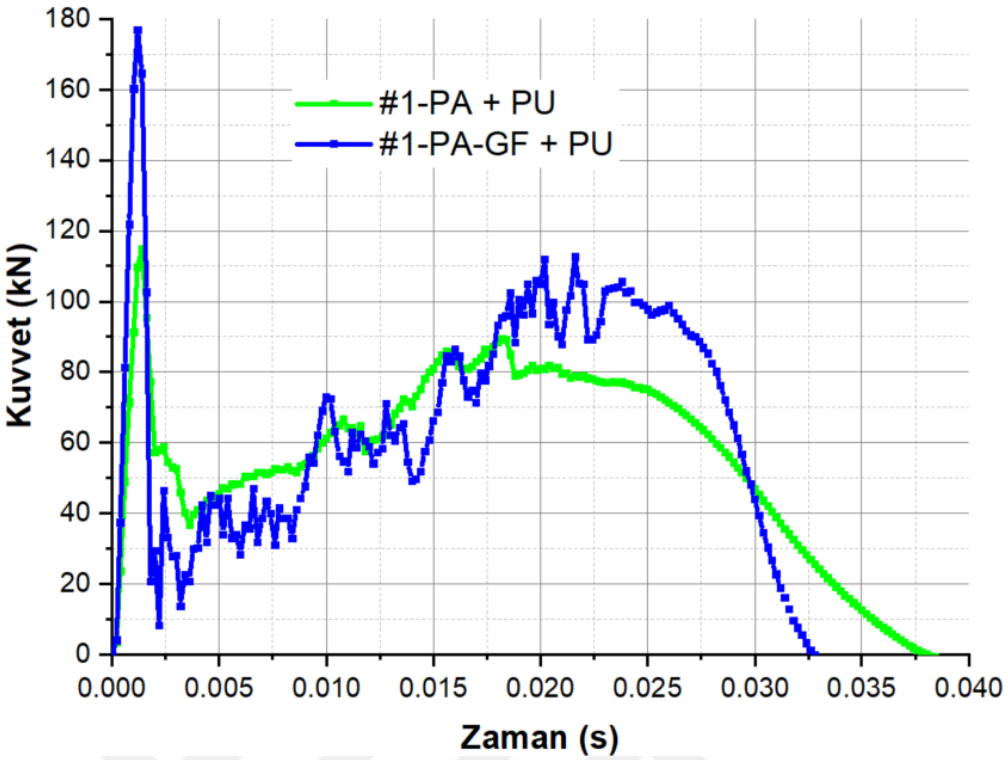
a)



b)

Şekil 4.12. PU köpük ilaveli PA takviyesiz çarpışma kutusunun a) kuvvet-zaman b) kuvvet, enerji – deplasman grafikleri

Takviyesiz çarpışma kutusuna poliüretan köpük ilavesi yapıldığında neredeyse takviyeli kutunun boş halinin performansına denk geldiği sonucuna varılmıştır. Hatta tepe kuvvet değerinin takviyesiz-poliüretan köpük ilaveli çarpışma kutusunda 60 kN daha düşük olduğu ve enerji emilim süresinin de 5 ms daha uzun olduğu görülmüştür (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. PU köpük ilaveli takviyeli ve takviyesiz çarpışma kutularının kuvvet-zaman grafiği

Şekil 4.14'te ağırlık olarak da takviyesiz-poliüretan köpük ilaveli kutunun 266 g olarak takviyeli boş kutuya göre daha avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.14. Poliüretan köpük ilaveli takviyesiz ve içi boş takviyeli kutu kütleleri

Gevrek olan takviyeli malzemede poliüretan köpük takviyesi etkili olmamıştır. Bu, poliüretan malzemenin tek başına direnç gösteremediğine anlamına gelmektedir. Gevrek malzemenin kullanıldığı kutuda plastik çeper kırılmıştır, poliüretan köpük tek başına kalarak direnç gösterememiştir.

Daha sünek olan takviyesiz malzemede poliüretan köpük takviyesi etkili olmuştur. Çeperin kırılmaması bunun sebebi olabileceği düşünülmüştür. Deformasyonun son bölgelerinde (Poliüretan köpüğün yoğunlaştığı kısım), poliüretan köpük takviyesi kuvvetleri artırmış ve dolayısıyla enerji emilimini de artırmıştır.

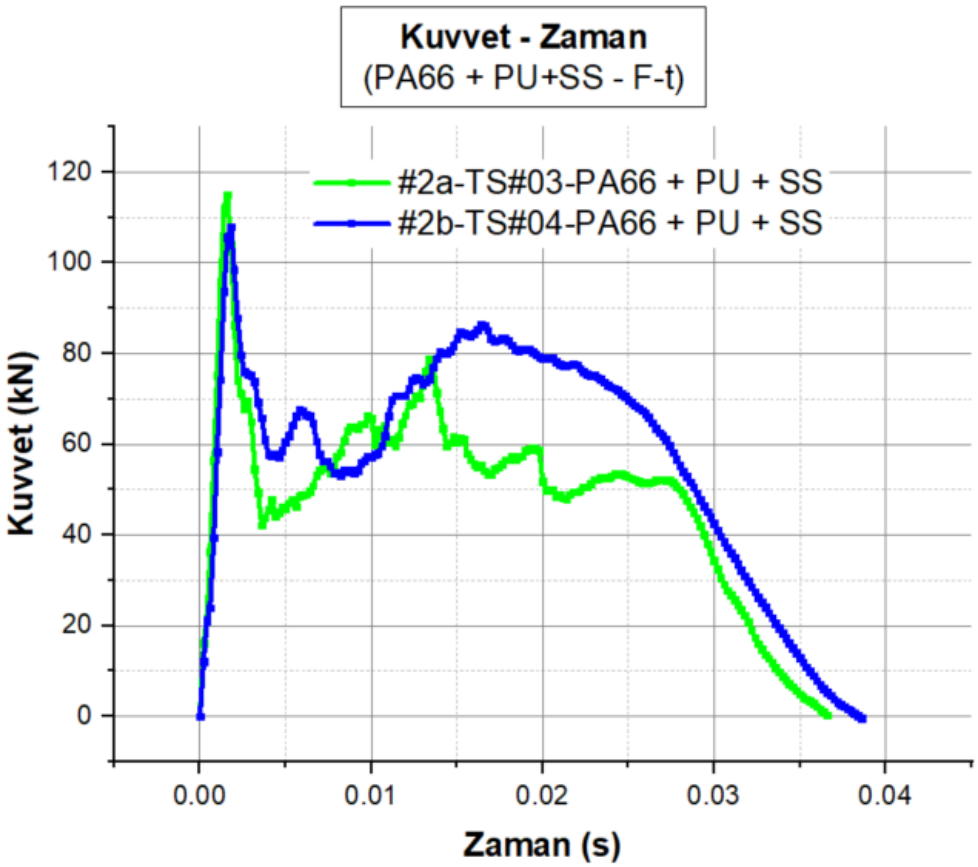
4.3.3. Paslanmaz çelik sac ilavesi

Poliüretan köpük ve paslanmaz çelik sac ilavesi yapılmış 2 adet cam elyaf takviyeli ve 2 adet cam elyaf takviyesiz kutuların düşürme darbe testi-sonrası görüntüleri Şekil 4.15'te verilmiştir.



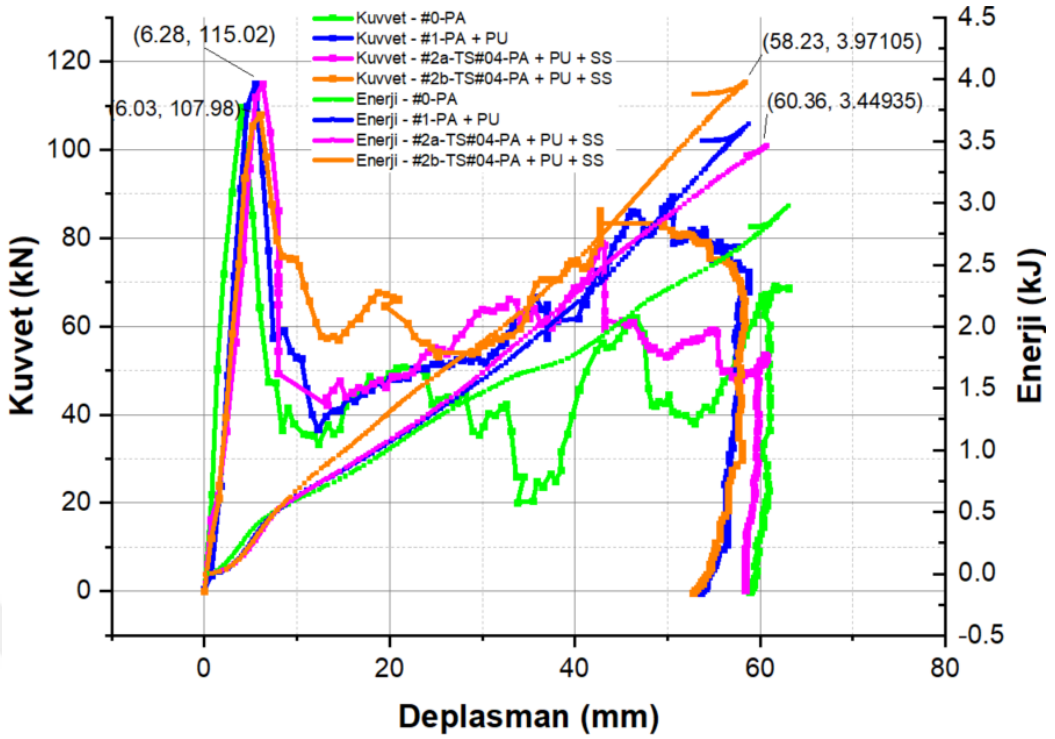
Şekil 4.15. Numunelerin test sonrası görüntüleri

Sadece poliüretan köpük ilavesinin aksine, paslanmaz çelik (SS) sac ilavesi, çeper kırılsa da etkili olmuştur. SS sac ilavesi, deformasyonun ilk bölgelerinde, hem takviyeli (PA-GF35) hem takviyesiz (PA66) malzemede kuvvetleri yaklaşık 20 kN artırmıştır. İlk bölgelerdeki bu artış, enerji emilimine de yansımıştır.

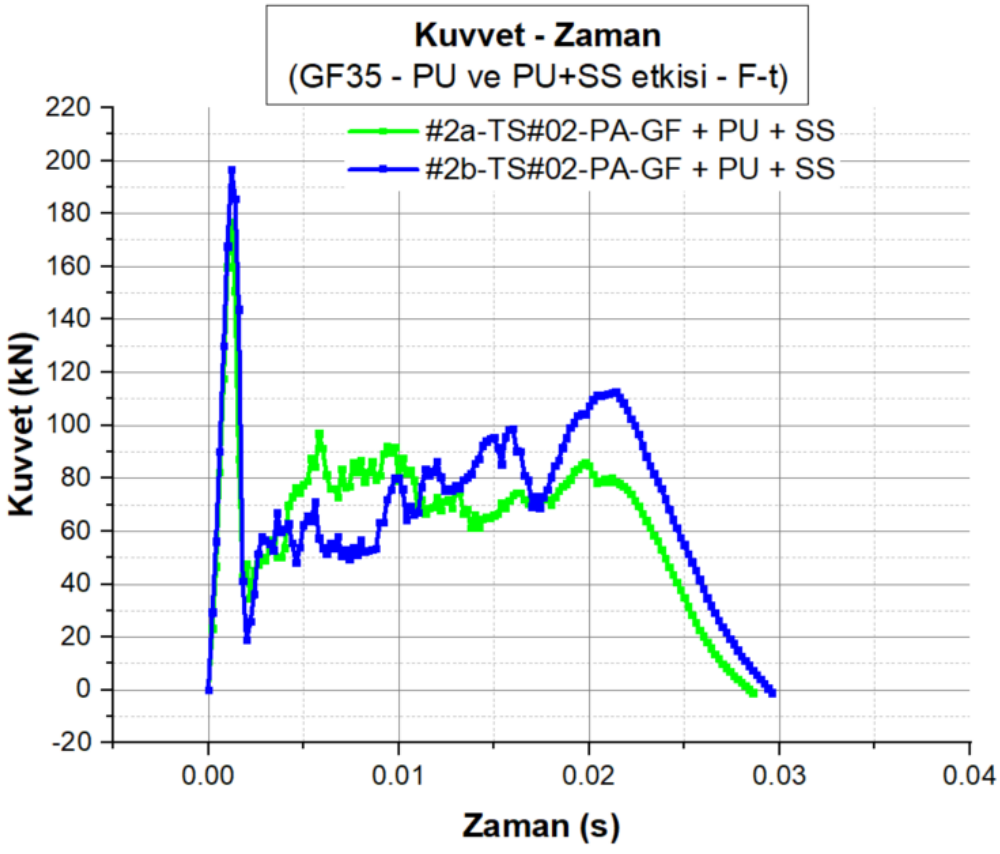


Şekil 4.16. PU köpük ve SS sac ilaveli takviyesiz kutu kuvvet-zaman grafiği

Paslanmaz çelik sac ilavesi yapılmış takviyesiz (PA66) kutuların düşürme testi sonuçları Şekil 4.16'da verilmiştir. Çeper, kırılma yerine yırtılmaya uğramıştır. Bu yırtılmanın durumuna göre, deney tekrarlarında kuvvetlerde farklılaşmalar olmuştur. Paslanmaz çelik sac ilavesi, kuvvetleri daha kararlı hale getirmiştir (Şekil 4.17).

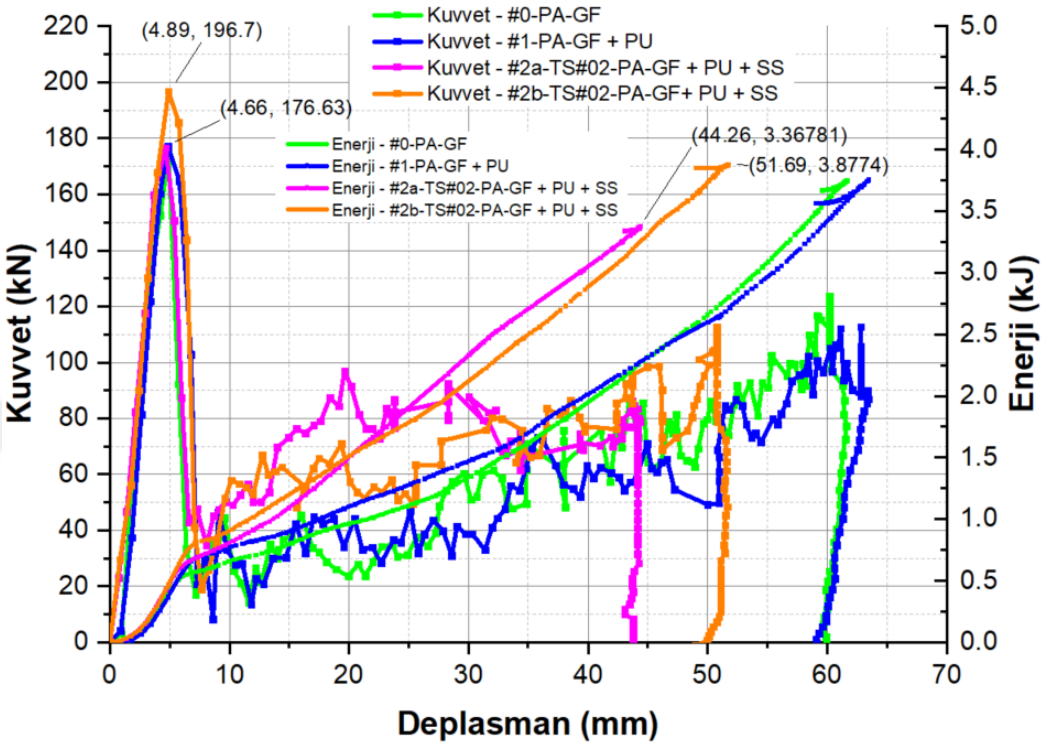


Şekil 4.17. PU köpük ve SS sac ilaveli takviyesiz kutu kuvvet-deplasman-enerji grafiği



Şekil 4.18. PU köpük ve SS sac ilaveli takviyeli kutu kuvvet-zaman grafiği

Paslanmaz çelik sac ilavesi yapılmış takviyeli (GF35) kutuların düşürme testi sonuçları Şekil 4.18'de verilmiştir. Takviyeli malzeme kırılarak deforme olmuştur. Bu sebeple, deney tekrarlarında kuvvetlerde önemli farklılıklar oluşmamıştır (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. PU köpük ve SS sac ilaveli takviyeli kutu kuvvet-deplasman-enerji grafiği

Enerji sönümleme performansı değerlendirilirken, sönümlenen enerjinin yanı sıra ortalama kuvvet (F_{ort}) ve çarpışma kuvveti verimliliği (ÇKV) gibi kriterler göz önüne alınır. Ortalama çarpışma kuvveti, Denklem 4.1'deki gibi, sönümlenen enerjinin deplasmana oranı olarak hesaplanır. Bu çalışmada, F_{ort} hesaplandıktan sonra, maksimum çarpışma kuvveti belirlenerek ortalama kuvvetin bu kuvvete oranıyla Denklem 4.2'de ÇKV değeri bulunmuştur. Bu değerin 1'e yakın olması arzu edilir. Bu değere yaklaşılması, çarpışma kuvvetlerinde ani artışların, yani ani ivmelenmelerin olmadığı ideal çarpışma halini temsil eder (Çakan ve ark, 2021).

$$F_{ort} = \frac{\text{Enerji Emilimi}}{\text{Deplasman}} \tag{4.1}$$

$$\text{ÇKV} = \frac{F_{ort}}{F_{maks}} \tag{4.2}$$

Düşürme testi sonrasında elde edilen eğrilerden hesaplanan, enerji sönümleme performansına ait sonuçlar Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Düşürme testi sonrası elde edilen değerler

Deney No	**Numune**	**Fmaks [kN]**	**Deplasman [mm]**	**Enerji [kJ]**	**Özgül Enerji Sönümleme [kJ/kg]**	**Fort [kN]**	**ÇKV**
#0	PA	109,66	63,07	2,98	11,87	47,2	0,43
#0	PA-GF	174,41	61,53	3,74	11,33	60,8	0,35
#1	PA+PU	114,97	58,76	3,64	**13,68**	61,9	0,54
#1	PA-GF+PU	177	63,47	3,75	10,74	59,1	0,33
#2a#TS	PA-GF+PU+SS	176,63	44,26	3,37	7,67	76,1	0,43
#2b#TS	PA-GF+PU+SS	196,7	51,69	3,88	8,96	75,1	0,38
#2a#TS	PA+PU+SS	115,02	60,36	3,45	9,50	57,2	0,50
#2b#TS	PA+PU+SS	**107,98**	58,23	3,97	11,28	68,2	**0,63**

.

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında deneysel yöntemler kullanılarak polimer çarpışma kutularının darbe yüklemesi altındaki mekanik davranışları incelenmiştir.

Düşürme testleri esnasında deney numunelerindeki tepki kuvveti, deplasman ve zaman verileri kaydedilmiştir. Bu veriler sonucunda numuneler takviyeli ve takviyesiz, içi boş ve içi poliüretan köpük ilaveli olarak ve son olarak hem paslanmaz çelik sac hem de poliüretan köpük ilaveli olarak karşılaştırılmıştır.

Takviyesiz (PA) ve Cam Elyaf Takviyeli (PA-GF) kutu karşılaştırması:

Tüm durumlarda PA'dan yapılan kutularda PA-GF'ye göre çok daha düşük maksimum kuvvet meydana gelmektedir. Örneğin içi boş olan kutular değerlendirildiğinde PA yerine PA-GF kullanılması maksimum kuvveti %60 arttırmaktadır. Bu oran PU takviyeli durumda %54, PU+SS takviyeli durumda ise %67 civarında olmaktadır. Yani her durumda PA-GF malzemeden yapılan kutular PA kutulara göre ilk çarpışma anında daha rijit davranmıştır. İçi boş olan kutularda maksimum kuvvet açısından GF takviyesi olumsuzluk oluştursa da ortalama kuvvetin daha yüksek olması sebebiyle sönümlenen enerjiyi yaklaşık %25 arttırmıştır. Fakat yine maksimum kuvvetin, ortama kuvvete oranı daha düşük olduğu için ÇKV açısından PA numune daha iyi performans sergilemiştir. Deplasman değerlerinde fark maksimum kuvvete göre çok kayda değer değildir. Sadece PA-GF'nin PU+SS takviyesinin diğer kutulara göre daha düşük (47,96 mm) bir deplasman sergilediği görülmektedir.

PU Takviyesi:

PA malzemeye PU takviyesinin maksimum kuvveti %5 kadar arttırsa da enerji oranını önemli oranda arttırdığı (%22) ve ortalama kuvvetin %31 arttırdığı böylece ÇKV değerinin 0,43'ten 0,54'e yani %26 arttığı görülmektedir. PU takviyesiyle kutunun kütlesindeki artış sadece 15 g yani %5 kadar olmuştur. Bu sebeple PA'ya PU takviyesinin olumlu sonuç verdiği söylenebilir. PA-GF malzemeye de PU takviyesi ilk çarpışma

kuvveti yani maksimum kuvveti olumsuz etkilememiş sadece %1,5 gibi bir artış olmuştur. Her iki durumda da sıkışma miktarı ve sönümlenen enerjiler benzer olmuştur. Yani PA malzemesindeki gibi enerji, ortalama kuvvet ve son olarak da ÇKV değerlerinde bir artış gözlemlenmemiştir. PU ilavesiyle kutuda ölçülen kütle artışı 19 g yani %6 olmuştur. Sonuç olarak PA-GF'ye için PU ilavesinin çarpışma davranışına belirgin bir etkisi olmamıştır.

SS Takviyesi:

PA için SS takviyesinin, maksimum kuvveti PA'ya göre %1,68 arttırdığı, PA+PU'ya göre %3 azalttığı, sıkışma miktarının PA+PU'ya göre çok değişmemekle beraber farkın boş PA ile en fazla olduğu onun da %6'da kaldığı görülmektedir. Bunun yanında sırasıyla PA ve PA+PU'ya göre sönümlenen enerji miktarı %24 ve %2 olmuştur. ÇKV değerleri ele alınırsa yine PA ve PA+PU'ya göre bu değerdeki artış %33 ve %5,5 olmuştur. Yani sönümlenen enerji ve ÇKV değerinin artışında SS takviyesinden çok PU takviyesi daha etkili olmuştur. Kütle artışı PA'ya göre %42, PA+PU'ya göre %34 olmuştur. Bu sebeple kütle artışı ve maliyet göz önüne alınırsa SS takviyesinin PA kutusu için uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. PA-GF'ye gelince SS takviyesinin, maksimum kuvveti PA-GF'ye göre %7, PAGF+PU'ya göre %5 arttırdığı hesaplanmıştır. Bununla beraber sıkışma miktarının PAGF'ye göre %22, PA-GF+PU'ya göre %24 azalttığı görülmektedir. SS takviyesinin sıkışma miktarının PA'ya kıyasla PA-GF'nin değerlerini önemli oranda azaltmıştır. Sonuç olarak enerji değerlerine göre PA-GF ve PA-GF+PU'ya göre sönümlenen enerji miktarı yaklaşık olarak %3 azalmıştır. Bu da toplam sıkışma miktarının azalmasından kaynaklanmaktadır. SS ilavesiyle, ortalama kuvvet değeri diğer 2 duruma göre yaklaşık olarak %26 yükselmiştir. Bu da ÇKV değerine yansımış, ÇKV değeri sırasıyla PA-GF ve PA-GF+PU'ya göre %17, %24 olarak artış göstermiştir. Kütle artışı da yine sırasıyla PAGF ve PA-GF+PU'ya göre %32 ve %25 olmuştur. Yine önemli bir kütle artışı olmuştur. Bu sebeple bu malzeme için SS ilavesi PA'ya göre çarpışma performansını daha belirgin olarak arttırsa da kütle ve maliyet artışı da göz ardı edilmemelidir.

KAYNAKLAR

Altın, M., Halis, S., & Yücesu, H. (2017). Investigation of the Effect of Corrugated Structure on Crashing Performance in Thin-Walled Circular Tubes. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 1-7.

Atakan, A. (2014). Daha Hafif Daha Çevreci Arabalar Çağı. *http://www.acikbilim.com/2014/09/dosyalar/daha-hafif-daha-cevreci-arabalar-cagi-2.html*.

Baykasoğlu, C., Tunay, M., & Yalçın, Ö. (2014). Crashworthiness Investigation of Metallic Thin-Walled Tubes Under Axial Impact Loading. *The First International Symposium on Industrial Design Engineering (ISIDE14)*.

Boria, S. (2016). Lightweight Composite Structures in Transport.

Cerit, M. (2011). Şehirler arası otobüslerde önden çarpışma enerjisini yutucu pasif güvenlik sisteminin geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi. *Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 7-19.

Chathbai, A. (2007). Parametric Study of Energy Absorption Characteristics of a Rectangular Aluminum Tube Wrapped With E-Glass-Epoxy. Licence Thesis. *Visvesvaraya Technological University, Bachelor of Engineering in Mechanical Engineering*.

Doğan, M. (2017). Tek bindirmeli cam elyaf takviyeli malzemelerin darbe davranışlarının incelenmesi.

Friedrich, K. (2018). Polymer composites for tribological applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3-39.

Griškevičius, P., & Ziliukas, A. (2003). The crash energy absorption of the vehicles front structures. *Transport*, 97-101.

Harper, C. A. (2004). Handbok of Plastics, Elastomers and Composites, 4th Edition. *McGraw-Hill*, 112-321.

Haylock, R. (1987). Waterjet Cutting – A Technology of A float On a Sea of Potential. *Manufacturing Engineering*, 37-41.

Hunziker, W. (1990). Water-jet Cutting. *BQSTRONIC LASER AG*, 336.

Kelly, A., & Zweben, C. H. (2000). Comprehensive Composite Materials (6 Volume Set) – 2: Polymer Matrix Composites. *Pergamon Press*.

Kılıç, N. (2018). Plastik Enjeksiyon Nakinalarının Endüstriyel Uygulamaları. *Yüksek Lisans Tezi*.

Lewis, H., & Gertsakis, J. (2001). Design + environment : a global guide to designing greener goods. *Greenleaf*.

Mark, H. F. (2012). Combustion of Polymers and Its Retardation. *Lewin*.

Nakazawa, Y., Tamura, K., & Yoshida, M. (2005). Development of crash-box for passenger car with high capability for energy absorption. *VIII. International Conference on Computational Plasticity*.

Oktay, H., & Gürses, E. (2013). Yarı Kristal Polimer Malzemelerin Çok Ölçekli Modellenmesi. *18. Ulusal Mekanik Kongresi*.

Özyurt, E. (2003). Plastiklerin Yorulma Davranışına Kristalinite Derecesinin Etkisi. *Diss Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*.

Park, S. (2002). High-Performance Polymer TFTs Printed on a plastic substrate. *IEEE Transactions On Electron Devices* .

Pearce, E. (2018). Flame-Retardant Polymeric Materials. *Plenum Press*, 1-15.

Savaşcı, A., Uyanık, N., & Akovalı, G. (2002). Ana Hatları ile Plastikler ve Plastik Teknolojisi. *Pagev Yayınları*.

Szeteiova, K. (2010). Automotive materials plastics in automotive markets today. *Sovak University of Technology*.

Yaşar, H. (2001). Plastikler Dünyası. *MMO Yayınları*, 3-132.

Yıldız, A., & Demirci, E. (2015). Trafik kaza ve denetim istatistikleri. *Polis Akademisi Başkanlığı*.

Yılmaz, İ. N. (2017). Cam elyaf katkılı poliamid 66/poliftalamid karışımlarının hazırlanması ve otomotiv sektöründe kullanımı. *Master's thesis*.

Yin, H., Fang, H., Xiao, Y., Wen, G., & Qig, Q. (2015). Multi-objective robust optimization of foam-filled tapered multi-cell thin-walled structures. *Structural And Multidisciplinary Optimization*, 1051-1068.

Zhaokai, L., Qiang, Y., Xuan, Z., & Man, Y. (2017). Crashworthiness and lightweightoptimization to applied multiplematerials and foam-filled front endstructure of auto-body. *Advances in Mechanical Engineering*, 1-21.

Ziel, R. (2010). Anordnung der Polymerketten in amorphen und kristallinen Bereichen. *Schematische*.