

CAM ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT ÇARPIŞMA KUTULARININ BURKULMA VE ÇARPIŞMA YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Uğur Kayacan¹
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Sinan Ali Bilmez²
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Erdem Akay³
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Halit Süleyman Türkmen⁴
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

ÖZET

Günümüzde, mühendislik alanında yapılan çalışmalarda kullanılan malzemelerin performans ve maliyeti büyük önem taşımaktadır. Bu yüzden üretilen parçaların yüksek mukavemetli ve hafif yapılar olması gerekmektedir. Bu amaca yönelik kompozit malzemeler her geçen gün gelişmekte ve farklı endüstriyel alanlardaki kullanımları yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada, vakum infüzyon yöntemi kullanılarak cam elyaf ile güçlendirilmiş polimer matrisli monolitik çarpışma kutuları üretilmiştir. Çarpışma kutularının temel görevi bağlı oldukları yapının maruz kalabileceği muhtemel çarpışma durumlarında oluşacak ani yükleri ve çarpışma enerjisini soğurarak yapının bütünlüğünü korumaktır. Çalışma esnasında üretilen silindirik çarpışma kutuları universal test cihazı ile basma yüküne tabii tutularak davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Aynı malzemeden üretilmiş numuneler ile elde edilen malzeme özellikleri sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmış ve analiz sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Hem deneysel hem de sayısal olarak gerçekleştirilen çalışmalar ile monolitik cam fiber kompozit çarpışma kutularının statik basma yükleri altındaki burkulma davranışları ve dinamik çarpışma davranışları incelenmiştir.

GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte kompozit malzemelere duyulan ihtiyaç ve kompozit malzemelerin kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Günümüzde, kompozit malzemelere en büyük talebi otomotiv ve havacılık sektörleri oluşturmaktadır. Kompozitler, farklı malzemelerin bir araya getirilmesi ile birlikte içeriğindeki bileşenlerine kıyasla yapısal ve fonksiyonel olarak çok daha üstün özellikler göstermektedirler. Günümüzde kullanılan mühendislik kompozitlerinin oldukça yaygınlaşmasının ana sebepleri metallere göre yüksek rijitlik/ağırlık oranına, yüksek enerji soğurma kapasitesine, yüksek korozyon direncine ve yüksek yorulma ömrüne sahip olmalarıdır [Tobby,2015].

Kompozit malzemelerin yaygın kullanım alanlarından biri çarpışma kutularıdır. Metalik ve kompozit malzemelerden üretilmiş çeşitleri olan çarpışma kutuları otomotiv ve havacılık uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Çarpışma kutuları, çarpışmalar sırasında hasarı azaltan ve güvenliği artıran yapılardır. Genellikle içi boş silindir (tüp) olarak üretilirler ve hasar olasılığının yüksek olduğu bölgelere yerleştirilirler. Çarpışma kutularının en önemli özelliği, hasara sebep olacak çarpışma enerjisinin belirli bir zaman dilimine yayılarak sönmelenmesini sağlama yetenekleridir, çünkü enerjinin anlık olarak soğurulması hasarı azaltmadığı gibi daha da

¹ Yüksek lisans öğrencisi, Uçak ve Uzay Müh. Böl., E-posta: kayacan@itu.edu.tr

² Yüksek lisans öğrencisi, Uçak ve Uzay Müh. Böl., E-posta: bilmez@itu.edu.tr

³ Dr., Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, E-posta: erdemakay@itu.edu.tr

⁴ Prof. Dr., Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, E-posta: halit@itu.edu.tr

arttırabilmektedir. Havacılık ve uzay araçlarında kullanılan çarpışma kutularının hafif olması istenmektedir ve bu nedenle genellikle kompozit malzemelerden imal edilmektedirler. En önemli çarpışma direnci parametresi spesifik enerji soğurma özelliğidir (specific energy absorption/SEA) [Xiao, 2014]. Hafif bir çarpışma kutusu tasarlanırken spesifik enerji soğurma özelliği yeterince yüksek olmalıdır.

Çarpışma kutularının maruz kaldığı yükleme çeşitlerinin başında basma yükleri gelir. Basma yüklerine maruz kalan yapılarda görülen en önemli yapısal kararsızlıklardan biri ise burkulmadır. Burkulma, basma yükü altındaki yapının yanıl doğrultuda biçim değiştirmesi ve eksenel doğrultuda kısalıp deformasyona uğramasıyla gerçekleşir. Burkulmaya sebep olan kritik yük değeri, yapının dayanımından ziyade rijitliğine (stiffness) bağlıdır [Calvert, J.B ,2007].

Bu çalışmada, çarpışma kutusu olarak literatürde örneğine çok rastlanılmayan polimer matrisli cam elyaf kompozit yapısına sahip ince cidarlı silindirik tüpler vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Deneysel olarak statik basma testi uygulanarak monolitik yapıların basma yükleri altındaki kritik burkulma yükü ve hasarın başladığı yük değerleri incelenmiştir. Deneysel veriler, ABAQUS 6.13.1 programı ile oluşturulan modellerin sonlu elemanlar analizlerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ek olarak LS-DYNA programı ile dinamik çarpışma analizleri gerçekleştirilmiştir.

Analizlerden elde edilecek sonuçlar, programlara girilen malzeme özelliklerine bağlı olarak ciddi ölçüde değişkenlik gösterebilmektedir. Bu bağlamda doğru sonuçlar elde edebilmek adına silindirik tüplerin üretiminde kullanılan aynı kompozit malzemeler ve aynı üretim tekniği kullanılarak düz bir plaka üretilmiş ve bu plakadan ASTM standartlarına uygun şekilde numuneler kesilmiştir. Kesilen numuneler kullanılarak ASTM D3039 ve D3410 standartlarına uygun şekilde üçer adet basma ve çekme testleri gerçekleştirilmiştir[“Tensile Testing”,t.y.]. Bu testler ile elde edilen sonuçlar ABAQUS ve LS-DYNA programında girdi olarak kullanılmıştır.

VAKUM İNFÜZYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİM

Tüp Üretimi

Vakum infüzyon yöntemi ile gerçekleştirilen üretim esnasında kullanılan malzeme ve aparatlar Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1: Monolitik yapı için kullanılan malzemeler

Malzeme	Boyut(cm)	Adet/Miktar
Silindir Alüminyum Kalıp	Uzunluk:15 Çap:7	1
Cam Fiber Dokuma Kumaş(0°/90°)	Genişlik: 10 Uzunluk: 264 Kalınlık: 0.0083	1
Vakum Poşeti	Genişlik: 20 Uzunluk: 44	1
Vakum Poşeti	Genişlik: 40 Uzunluk: 60	1
Peel Ply	Genişlik:12 Uzunluk:44	2
Flow Mesh	Genişlik: 12 Uzunluk: 22	1
İzopropil Alkol	-	Yeteri Miktarda
Plastik Vakum Hortum	-	2
Kalıp Ayırıcı	-	Yeteri Miktarda
Hortum Kelepçesi	-	2
Sızdırma Macun Bandı	-	Yeteri Miktarda
Epoksi(Resin)	-	150 gr
Sertleştirici(Hardener)	-	60 gr

Çarpışma kutularının üretimi sırasında takip edilen süreç aşağıdaki gibidir:

- Uygun ölçülerde ve pürüzsüz bir yüzeye sahip alüminyum silindirik bir kalıp (Şekil 1) temin edilmiş ve bu kalıbın yüzeyinde toz veya yağ gibi yabancı maddeler bulunmaması için alkol ile iyice temizlenmiştir.



Şekil 1: İnce cidarlı metal silindirik kalıp

- Üretim sonunda kalıbın malzemeden iyi ayrılmasını sağlamak için kalıp vakum torbası ile kaplanmış (Şekil 2) ve üzerine kalıp ayırıcı uygulanmıştır.



Şekil 2: Kalıbın vakum torbasıyla sarılması

- Kullanılacak elyafın yüzeyden ayrılmasını kolaylaştırmak ve yüzey pürüzlülüğünü önlemek amacıyla kalıp üzerindeki ilk katman 2 kat peel ply (soyma kumaşı) ile sarılmış ve yapıştırıcı ile sabitlenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3: Kalıbın peel ply ile sarılması

- Üretim için takviye malzemesi olarak 0°/90° fiber oryantasyonuna sahip cam fiber dokuma kumaş 12 kat olacak şekilde dikkatlice silindir kalıp etrafında sarılmıştır.

•Cam elyaf sarım işlemi sonunda en üst katman tekrar 2 kat peel-ply ile kaplanmıştır. Silindir kalıbın kenarları vakum esnasında hava kaçağı olmaması için infüzyon macunu ile çevresel olarak sarılmıştır(Şekil 4).



Şekil 4: Kalıbın cam fiber ve peel ply kumaşıyla sarılıp uçların macunlanması

•Tüm silindir, reçinenin infüzyon işlemi sırasında düzgün yayılmasını sağlamak için delikli ızgara benzeri bir dokuya sahip esnek bir katman olan flow-mesh ile sarılmıştır(Şekil 5).



Şekil 5: Mesh parçası

•Tüm parça vakum torbası içerisine alınmış, açık olan tüm kenarlar üretim sonunda elde edilmek istenen şeklin korunması için dikkatlice macunlanarak sızdırmazlık sağlanmıştır. Son olarak poşet üzerinde reçine giriş ve çıkışı için iki adet delik açılıp bu deliklerden içeri bağlantı hortumları yerleştirilmiş ve düzenek vakum işlemine hazır hale getirilmiştir(Şekil 6).



Şekil 6: Vakum infüzyon deneyi

•Daha önceden tartılan cam elyafa uygun ve yeterli miktarda reçine hazırlanmıştır. Bu karışımın içinde reçine ve sertleştirici kullanılmıştır. Karışımın reçine kütlege % 72, sertleştirici kütlege % 28 oranında bulunmaktadır. Karışım hazırlandıktan sonra sistem bir kısmından vakum makinesine bağlanıp diğer kısmında reçine kovasına bağlanarak vakum infüzyon işlemi başlatılmıştır.

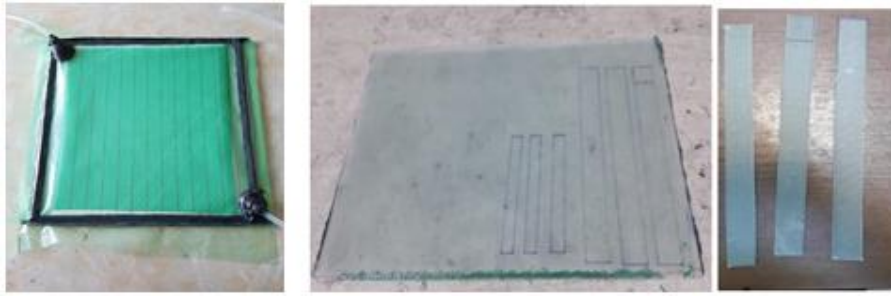
•Vakum işlem yaklaşık 1 gün boyunca devam ettirilip sistemin vakumda kalması ve reçinenin kurumması sağlanmıştır. Üretim sonucunda elde edilen bazı tüpler Şekil 7 'de verilmiştir.



Şekil 7: Vakum infzyon ile üretilmiş cam fiber takviyeli polimer matrisli silindirik çarpışma kutuları

Plaka Üretimi

Cam fiberden üretilen silindirik tüpün malzeme özelliklerini öğrenmek amacıyla, aynı yöntem ile 24 kat cam fiberden oluşan kalınlığı yaklaşık 2 mm, boyutları 30 x 40 cm olan düz plaka üretilmiştir. Üretilen plakadan ASTM D3034 ve D3039 standartlarına uygun olarak numuneler kesilmiş ve test için hazırlanmıştır(Şekil 8).

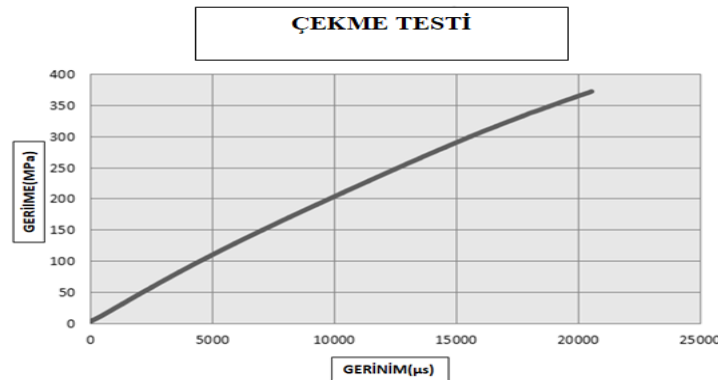


Şekil 8: Basma ve çekme testleri için üretilen düz cam fiber plak ve testler için hazırlanan numuneler

Testler ve Sonuçları

Basma testi ve çekme testi, servo-hidrolik veya elektromekanik test makinesinin kulplarına yerleştirilmesi ve numunenin başarısızlığa uğrayana kadar kontrollü basma yüküne maruz bırakılmasıyla gerçekleştirilir. Standart test örnekleri için tipik test hızı 2 mm / dk'dır (0,05 in / dk) [“Tensile Properties”, 2016].

Çekme testi sırasında alınan veriler ve ilgili formülasyonlar yapılarak Şekil 9'daki gerilme-gerinim grafiği elde edilmiştir.



Şekil 9: Gerinim-ölçer takılıyken çekme testi grafiği

Bu grafiklerden analizde kullanılmak amacıyla kopma mukavemeti, elastisite modülü (young modülü) ve gerinim-ölçer kullanılan testten Poisson oranı hesaplanarak bulunmuştur. Ayrıca basma testi için, ilgili formülasyonlar yardımıyla düzenlenen verilerden kopma mukavemeti değerleri elde edilmiştir. Tüm bu değerler Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2: Çekme ve Basma Testleri Sonucunda Elde Edilen Mekanik Özellikler

Çekme Testi Verileri		
Kopma Mukavemeti (MPa)	Young Modülü (GPa)	Poisson Oranı
376.8606	17.992	0.166339
Basma Testi Verileri		
Kopma Mukavemeti (MPa)		
405.753		

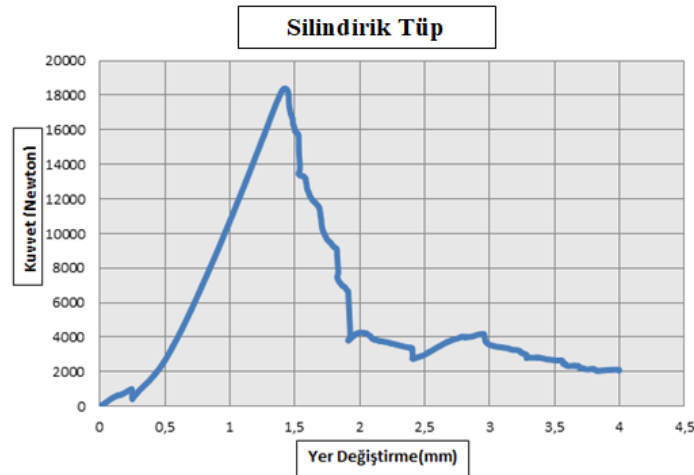
SİLİNDİRİK TÜPLERİN BASMA TESTLERİ

Monolitik Yapının Basma Testi

Cam elyaf takviyeli kompozit silindirik çarpışma kutularının basma deneyi MTS marka universal test cihazı kullanılarak 1.3 mm/s hız ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 10, test anı ve testten sonra tüpteki meydana gelen hasarı göstermektedir.

**Şekil 10:** Test makinası ve test sonrası tüpte meydana gelen hasarlar

Elde edilen veriler sonucunda basma testine ait kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 11’de verilmiştir.

**Şekil 11:** Basma testi sonuçları

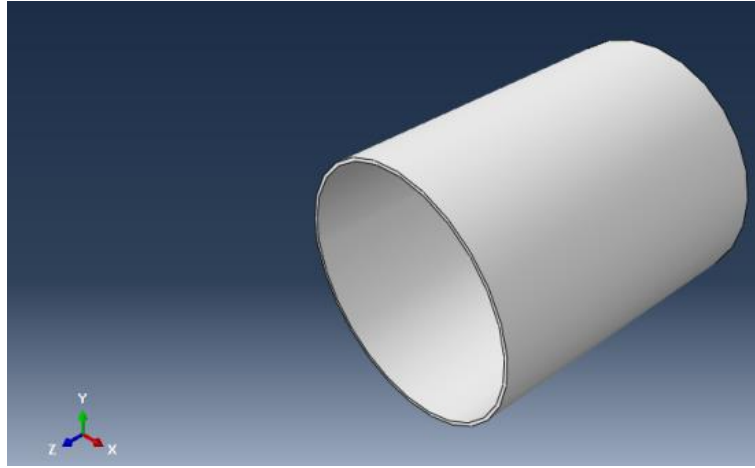
Gerçekleştirilen testler sonucunda silindirik çarpışma kutularının dayandığı maksimum kuvvet, ortalama kuvvet ve maksimum kuvvette meydana gelen deformasyon değerleri Tablo 3’deki şekilde elde edilmiştir.

Tablo 3: Basma Testi Sonuçları

Maksimum kuvvet(kN)	Maksimum kuvvet değerindeki toplam deformasyon(mm)	Ortalama kuvvet(kN)
18.395	1.423	5.587

SONLU ELEMENLAR ANALİZLERİ**Statik Analiz**

Model Oluşturma: İlk olarak parçanın modeli ABAQUS 6.13.1 programında oluşturulmuştur(Şekil 12). Silindirik yapının iç çapı 70 mm, dış çapı 72 mm, uzunluğu 90 mm ve et kalınlığı 1mm olarak belirlenmiştir. Parçanın kalınlık / uzunluk oranı (1/90) dikkate alındığında en uygun modelleme şekli kabuk model olarak belirlenmiştir. Kalınlık uzunluğun yanında çok küçük olduğu için katı modellemeye gerek duyulmamıştır. Genellikle, kabuk model oluşturulurken geometrinin orta yüzeyi kullanılır. Bu nedenle parçanın kalınlığı orta yüzeyin konumu baz alınarak sağlanmıştır.

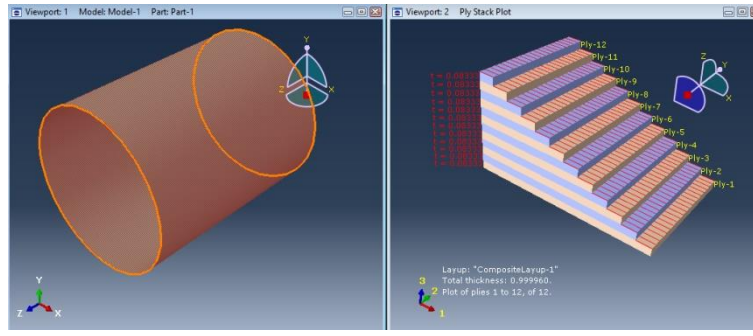
**Şekil 12:** Parçanın geometrik yapısı

Oluşturulan modelin malzeme bilgisi girilmesi gerekmektedir. GFRP 'ten üretilen bu parçanın yapılan testler sonucu elde edilen malzeme bilgileri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4: Malzeme özellikleri

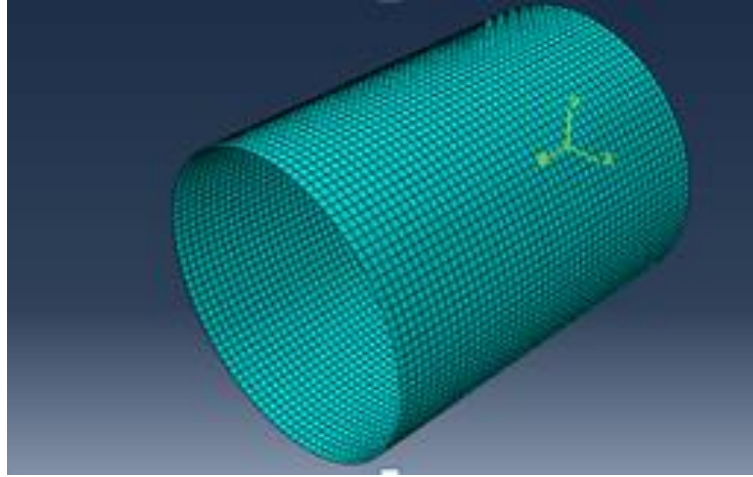
CAM FİBERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ POLİMER(GFRP)			
	$E_1(\text{GPa})$	$E_2(\text{GPa})$	$E_3(\text{GPa})$
Young Modülü	17.992	17.992	17.992
	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
Poisson Oranı	0.166339	0.166339	0.166339
	$G_{12}(\text{GPa})$	$G_{13}(\text{GPa})$	$G_{23}(\text{GPa})$
Kesme Modülü	7.714	7.714	7.714

Malzeme bilgisi tanımlandıktan sonra, bu malzeme kullanılarak her bir eleman için özellik tanımlanmıştır. Malzeme kompozit olduğu için özellikler tabaka şeklinde tanımlanmıştır(Şekil 13). Parçanın kalınlığı 1 mm olup toplam 12 katmandan oluşmuştur. Böylelikle her bir katmanın kalınlığı 0.0833 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 13: Silindirik tüpün katman yapısı

Analiz yapılırken 2 mm ve 5 mm'lik boyutlara sahip çözüm ağı (mesh) arasında kıyaslama yapılmış ve analiz süreleri ile geometrik şekil dikkate alınarak yapılan değerlendirme sonucunda 2 mm'lik çözüm ağı tercih edilmiştir (Şekil 14). Çözüm ağı boyutu küçüldükçe model daha iyi bir hal almakta ve sonuçlar daha doğru çıkmaktadır. Fakat karmaşık modellerde küçük boyutta çözüm ağı kullanımı analiz süresini ve iterasyon sayısını artırmaktadır. Bu nedenle karmaşık yapılarda minimum eleman sayısı tercih edilmektedir.



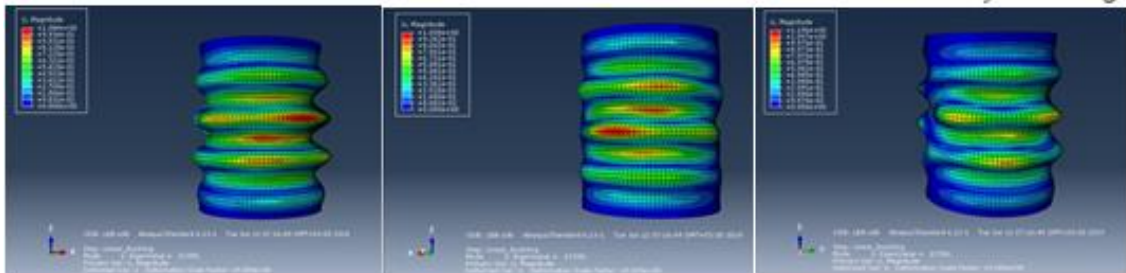
Şekil 14: Çözüm ağı modeli

Burkulma analizinde, bir kenar sabitlenerek diğer kenardan basma kuvveti uygulanmıştır. Z-eksenindeki hareket dışında tüm serbestlik dereceleri kısıtlanarak analiz gerçekleştirilmiştir.

Burkulma analizi iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada lineer burkulma analizi yapılarak öz değerler belirlenmiştir. İkinci aşamada ise statik riks methodu kullanılarak, lineer olmayan burkulma analizi gerçekleştirilmiştir. Lineer olmayan burkulma analizinde, lineer analizde elde edilen öz değerler ve girdiler kullanılmış olup çözüm implicit olarak gerçekleştirilmiştir.

Lineer Burkulma Analizi: Bu analizde, öz değerler hesaplandıktan sonra burkulma yükleri hesaplanabilmektedir. Öz değer hesabı yapılacağı için birim yük seçilmiş ve referans noktasında 1N'luk basma yükü uygulanmıştır.

$$\text{Lineer burkulma yükü} = \text{Eigen frekansı} \times \text{Uygulanan yük}$$



Şekil 15: İlk üç mod sonuçları

Lineer burkulma analizi ile yapının ilk üç özdeğeri ve davranışları hesaplanmıştır(Şekil 15). Yapının mod'larını incelediğimizde gösterdiği davranış tipik bir silindirik basma davranışdır. Bu bilgiler doğrultusunda kritik burkulma yükü denklemdaki şekilde hesaplanır.

$$\text{Kritik burkulma yükü} = 67358 \times 1 = 67358 \text{ N} = 67.358 \text{ kN}$$

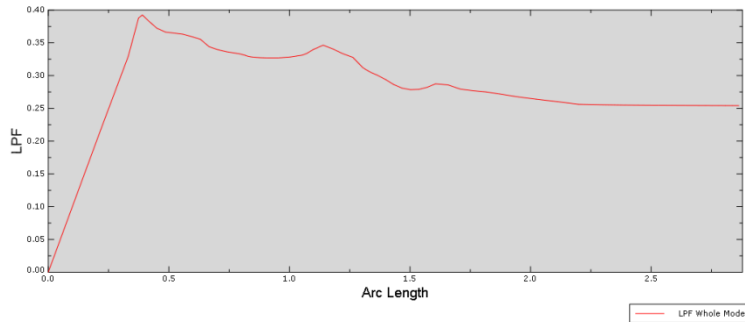
Lineer Olmayan Burkulma Analizi: Lineer olmayan burkulma analizinde lineer burkulma analizinin sonuçlarından faydalanılmıştır. Yapının hesaplanan mod'ların davranışını lineer olmayan analizde de sürdürmesi istenmektedir. Çünkü burkulma bir hasar (failure) modu olmamasına rağmen, yapı burkulmaya uğradığında yapıda oluşan şekil değişimleri yapının yük taşıma kapasitesini düşürmektedir.

Sınır şartları lineer analizdeki ile birebir aynıdır ve herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Sadece yükleme aşamasında farklı yük değeri girilmiştir. Lineer burkulma analizinde hesaplanan kritik yük değerinden daha fazla 100000N'luk bir yük uygulanarak yapının burkulma sonrası (post buckling) davranışı da incelenmek istenmiştir.

Load proportional factor(LPF), sistemin yük taşıma kapasitesinin uygulanan yüke oranı ile bulunur. Şekil 16'da, lineer artışın bittiği ilk yer burkulmanın başladığı yer olarak saptanmıştır. Bu nokta kritik burkulma noktası olarak adlandırılmaktadır. Çünkü yapı burkulmaya başladıktan sonra geometrik düzgünlük bozulmuş ve lineerlik sona ermiştir. Ayrıca, uygulanan yük artırılmaya devam etse bile, yapının yük taşıma kapasitesi belli bir değerden sonra azalmaya başlamaktadır. Yapının yük taşıma kapasitesi azalmaya başladığı bu değer yapının burkulma hasar yükü olarak adlandırılır. Kritik burkulma yükü ve hasar yükü aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

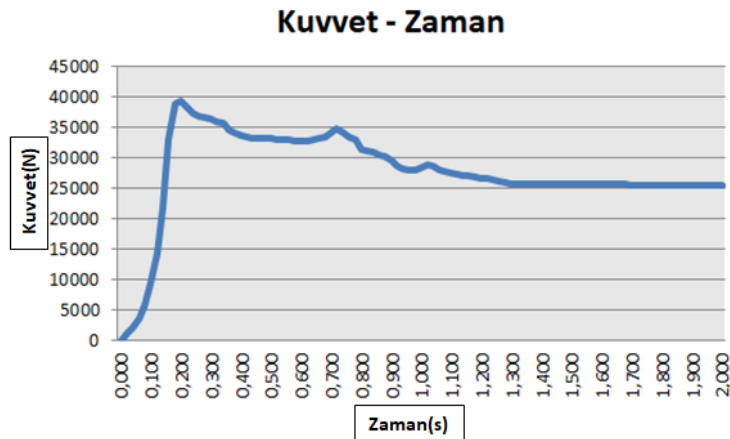
$$\text{Kritik burkulma yükü} = 0.33 \times 100000 = 33000 \text{ N}$$

$$\text{Hasar yükü} = 0.3924 \times 100000 = 39240 \text{ N}$$



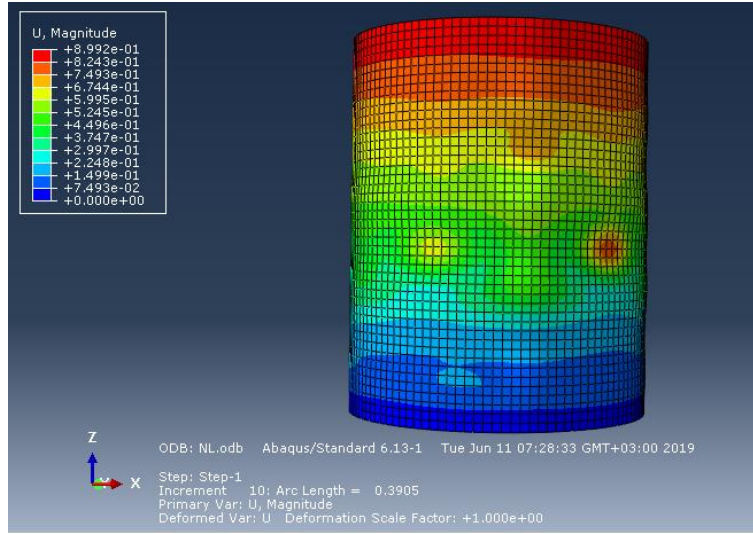
Şekil 16: LFP-Arc uzunluğu grafiği

Analiz sonucu alınan verilen doğrultusunda Şekil 17'de verilen grafik elde edilmiştir.



Şekil 17: Kuvvet-Zaman grafiği

Çarpışma kutusunun hasara uğramaya başladığı zamanki pozisyonu ve o andaki maksimum ve minimum yer değiştirmeleri gösteren görüntü Şekil 18’de verilmiştir.



Şekil 18: Burkulma anındaki yer değiştirmeler

Statik Analiz Sonuçları: Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen lineer ve lineer olmayan burkulma analizlerine ait kritik burkulma yükleri Tablo 5’te verildiği üzere sırasıyla 67.36 kN ve 33.00 kN olarak elde edilmiştir. Lineer olmayan burkulma analizi sonucunda elde edilen hasar yük değeri ise 39.24 kN olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5: Monolitik Çarpışma Kutusunun Statik Analizi

Analiz	Kritik Burkulma Yüğü (N)	Hasar Yüğü (N)
Lineer Burkulma Analizi	67358	-
Lineer Olmayan Burkulma Analizi	33000	39240

Lineer ve lineer olmayan burkulma analizlerinde farklı sonuçlar çıkmasının sebebi lineer olmayan analizde kritik burkulma yükünden itibaren rijitliğin bozulması ve yapının geometrik olarak lineer olmayan davranış göstermesidir.

Dinamik Analiz

Çarpışma Analizi: Çarpışma analizi için LS-DYNA programı kullanılmıştır. Bu analizler esnasında LS-PREPOST ön ve son işlemci olarak kullanılmış ve LS-DYNA ile ön işlemciden alınan bilgiler çözülerek son işlemciye aktarılmıştır. Silindirik yapının iç çapı 70 mm, dış çapı 72 mm, uzunluğu 90 mm ve et kalınlığı 1mm olarak belirlenmiştir.

Analiz için kabuk (Shell) yapı kullanılmıştır. Çarpışma kutusunun cam elyaftan oluşan yüzeyi için kabuk elemanlar seçilmiş, çarpma tertibatı içinse katı elemanlar kullanılmıştır. Çarpışma kutusu için 4.5 mm tetra çözüm ağı ve çarpma tertibatı için 10 mm tetra çözüm ağı tercih edilmiştir. Tablo 6’da monolitik yapının 4 m/s hızda gerçekleştirilen analiz sonuçları verilmiştir.

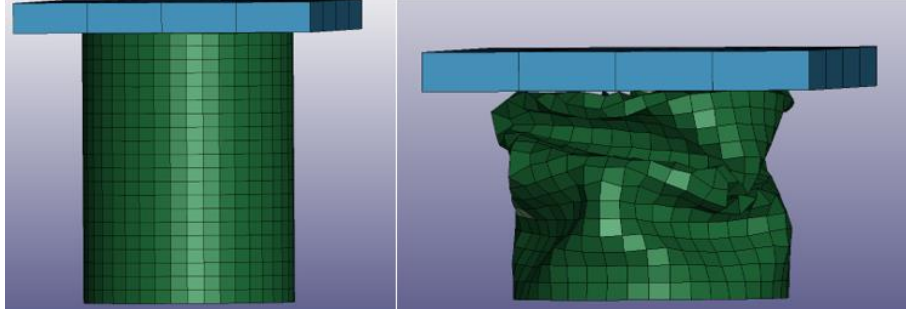
Çarpışma kutusu alt yüzeyinden sabitlenmiş olup ve çarpışma tertibatı z-öteleme serbestlik derecesi haricinde sabitlenmiştir. Fiberglas ve çarpma tertibatı arasındaki temas (contact) "Automatic-Nodes-to-Surface" olarak seçilmiştir.

Malzeme tipi olarak; fiberglas için “MAT54-Enhanced-Composite-Damage”, çarpışma tertibatı için “MAT20-Rigid” kullanılmıştır. Programda malzeme özelliklerine Tablo 4’te yazılı olan statik analiz verileri girilmiştir.

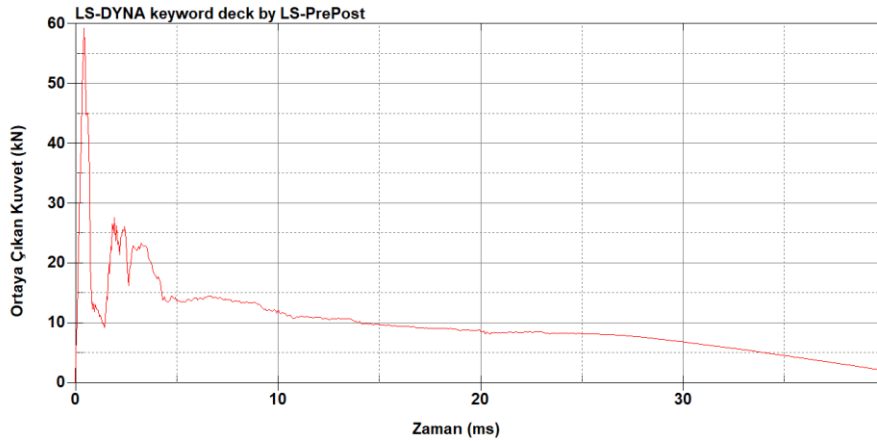
Tablo 6: Monolitik yapının 4 m/s hızda gerçekleştirilen çarpışma analizi

Maksimum Kuvvet (kN)	Ortalama Kuvvet (kN)	Maksimum Kuvvette Yer Değiştirme (mm)
59.3	19.05	1.77

Çarpışma kutusu tertibatın yüksek enerjili çarpması sonucunda 40 milisaniye içinde yüksek oranda deformasyona uğramıştır. Çarpışma öncesi ve sonrası FEM modeli şekil 19'da gösterilmektedir.

**Şekil 19:** Çarpışma öncesi ve sonrası FEM modeli

Şekil 20'de yer alan grafik incelendiğinde, çarpışma kutusu darbeyi çok çabuk absorbe etmiştir. Daha sonrasında çarpışma kutusu, görevini yerine getirerek dışarıdan etki eden kuvveti zaman içinde azaltmıştır.

**Şekil 20:** Dinamik Analize Ait Kuvvet-Zaman grafiği

Sonuçlar

- Analiz sonuçları ve literatür araştırması doğrultusunda çarpışma kutularının enerji absorbe etme ve yüksek yüklere dayanma kapasitesinin yüksek olduğu kanısına varılmıştır.
- Vakum İnfüzyon Yöntemi ile cam fiberle güçlendirilmiş silindirik çarpışma kutusu üretilmiştir. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi için numune hazırlanmış ve ASTM standartlarına uygun şekilde kesilip teste tabii tutulmuştur.
- Elde edilen veriler doğrultusunda statik ve dinamik analizler yapılmıştır. Dinamik analizde çarpışma kutusu daha yüksek kuvvetlere dayanabilme karakteri göstermiştir. Bunun sebebi ani yükleme ile birlikte çarpışma kutusunun daha büyük bir direnç göstermesidir.
- Sonlu elemanlar analizinin yapılan testlerle farklı sonuçlar vermesinin nedeni, üretim sırasında yapılan ufak hatalar, cam elyafın silindir kalıba sarılmasında sırasında elle düzeltilemeyecek hataların oluşması, yapının reçine ile homojen ıslatılamaması, üretim sonucunda yapıda oluşan katlanmalar olarak saptanmıştır. Bu hatalar sonucunda, yapının basma yükü altında rijitliği bozulduğundan ve yerel deformasyonlar gerçekleştiğinden sonlu elemanlara göre farklı sonuçlar alınmıştır.
- Üretim tekniğinde yapılan geliştirmelerle birlikte, test sonuçlarının analiz sonuçlarına yaklaşması beklenmektedir.

Kaynaklar

Calvert, J.B (2007).Buckling.Adres: <https://mysite.du.edu/~jcalvert/tech/machines/buckling.html>

EN 2597 Tensile Properties Perpendicular to the Fibre Direction of Unidirectional Carbon Fibre-Reinforced Plastics. (2016).

Tensile Testing Composite ASTM D3039. (t.y.) <http://www.intertek.com/polymers/tensile-testing/matrix-composite/>

Tobby, E.R., 2015. Design, Analysis and Verification of Composite Components subjected to Crash Load Case.

Xiao, X., 2014. Simulation of Composite Tubes Axial Impact with a Damage Mechanics Based Composite Material Model