

SANDVIÇ YAPILI ÇARPIŞMA KUTULARININ BURKULMA VE ÇARPIŞMA YÜKLERİ ALTINDA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Sinan Ali Bilmez¹
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Uğur Kayacan²
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 fiberle güçlendirilmiş polimer matrisli sandviç silindirik çarpışma kutuları üretilmiştir. Sandviç yapıda çekirdek olarak Nomex tipi bal peteği kullanılmıştır. 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 sandviç 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].

Sandviç kompozit malzemeler havacılık sektöründe oldukça yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Sandviç kompozitlerin yüzeyleri ince kompozit katmanlardan oluşur ve dolgu kısımlarında ise genellikle nomex, alüminyum veya fiberglas gibi malzemelerden imal edilmiş bal peteği ya da köpük malzemeler kullanılır. Bal peteği sandviçleri, yapının basma ve eğilme dayanımı gibi

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

² Yüksek lisans öğrencisi, Uçak ve Uzay Müh. Böl., E-posta: kayacan@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

özelliklerini arttırarak kompozit yapıların performansını geliştirmek için kullanılır. Ancak sandviç kompozitlerin üretimi ve analizi monolitik kompozitlere kıyasla daha zordur [Hsu, 2013].

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 sönmülmesini sağlama yetenekleridir, çünkü enerjinin anlık olarak soğurulması hasarı azaltmadığı gibi daha da 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 yanal 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 sandviç yapılı cam elyaf kompozit yapısına sahip ince cidarlı silindirik tüpler vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Deneysel olarak statik basma testi uygulanarak yapıların basma yükleri altındaki kritik burkulma yükü ve hasarın başladığı yük değerleri incelenmiştir. Ek olarak LS-DYNA programı ile dinamik çarpışma analizleri gerçekleştirilmiştir. Çarpışma analizi için sıkça kullanılan LS-DYNA ve LS-PREPOST programından alınan sonuçlar statik basma testi ile kıyaslanmıştır. Analizler sonucunda üretilen çarpışma kutularının enerji soğurma kapasiteleri de hesaplanmıştır.

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 LS-PREPOST programında girdi olarak kullanılmıştır.

VAKUM İNFÜZYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİM

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

Tablo 1: Sandviç 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
Nomex Balpeteği Çekirdek	Genişlik: 10 Uzunluk: 23	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 kutuları üretim sırasında aşağıdaki aşamalardan geçmiştir:

- 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 ve üzerine kalıp ayırıcı uygulanmıştır (Şekil 2).



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.
- Üretim için takviye malzemesi olarak 0°/90° fiber oryantasyonuna sahip cam fiber dokuma kumaş 5 kat olacak şekilde dikkatlice silindir kalıp etrafına sarılmış, ardından sandviç dolgu malzemesi olarak tek kat nomex bal peteği (Şekil 3) yerleşimi yapılmış ve son olarak tekrar 0°/90° fiber oryantasyonuna sahip cam elyaf dokuma kumaşın sarımı 5 kat olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3: Kullanılan bal peteği

- 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.
- Tüm silindir, reçinenin infüzyon işlemi sırasında düzgün yayılmasını sağlamak için delikli ızgara benzeri bir dokuya sahip esnek bir katman olan flow-mesh Şekil 4) ile sarılmıştır.



Şekil 4: Mesh parçası

- Tüm parça vakum torbası içerisine alınmış (Şekil 5), 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 5: Vakum infüzyon deneyi

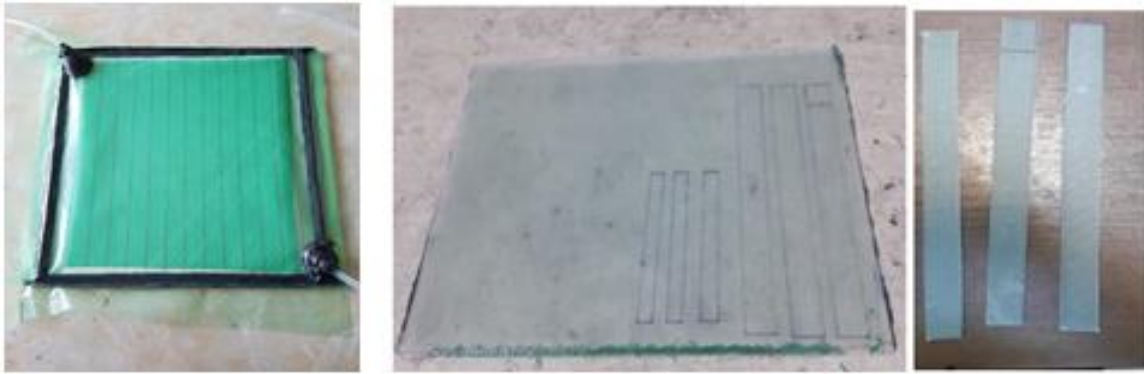
- Daha önceden tartılan cam elyafa uygun ve yeterli miktarda reçine hazırlanmıştır. Bu karışımın içinde reçine ve sertleştirici kullanılmıştır. Karışımda reçine kütlece % 72, sertleştirici kütlece % 28 oranında bulunmaktadır. Karışım hazırlandıktan sonra sistem bir kısmından vakum makinesine bağlanıp diğer kısmında reçine kovaına bağlanarak vakum infüzyon işlemi başlatılmıştır.
- Vakum işlem yaklaşık 1 gün boyunca devam ettirilip sistemin vakumda kalması ve reçinenin kuruması sağlanmıştır. Üretim sonucunda elde edilen bazı tüpler Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6: Vakum infizyon ile üretilmiş cam fiber ve bal peteği tavviyeli 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 Şekil 7’de olduğu gibi ASTM D3034 ve D3039 standartlarına uygun olarak numuneler kesilmiş ve test için hazırlanmıştır.

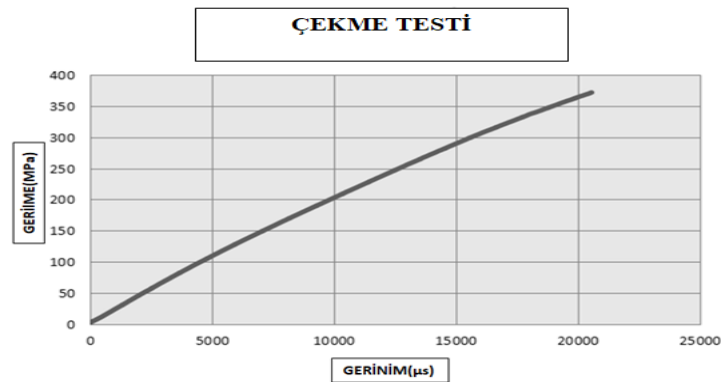


Şekil 7: Basma ve çekme testleri için üretilen düz cam fiber plak ve testler için hazırlanan numuneler

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 8’deki gerilme-gerinim grafiği elde edilmiştir.



Şekil 8: 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

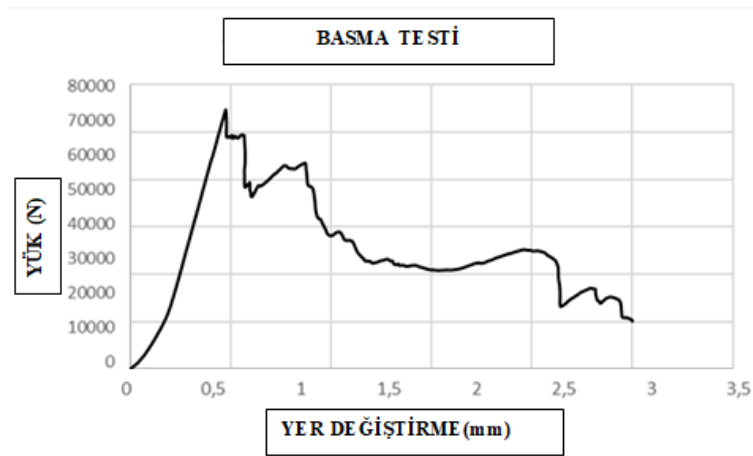
Sandviç Yapının Basma Testi

Bal peteği ile desteklenmiş cam elyaf takviyeli kompozit silindirik çarpışma kutularının basma deneyi 1.3 mm/s hız ile gerçekleştirilmiştir. . Şekil 9, test anı ve testten sonra tüpteki meydana gelen hasarı göstermektedir.



Şekil 9: Test makinası ve test sonrası tüpte meydana gelen hasarlar

Elde edilen veriler sonucunda basma testine ait kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10: 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.

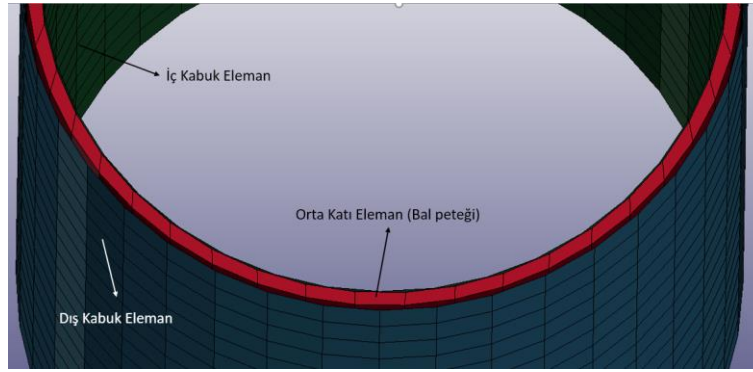
Tablo 3: Basma Testi Sonuçları

Maksimum kuvvet(kN)	Maksimum kuvvet değerindeki toplam deformasyon(mm)	Ortalama kuvvet(kN)
70,906	1.902	24.528

SONLU ELEMENLAR ANALİZLERİ

Statik Analiz

Model Oluşturma: Analizler 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 74 mm, uzunluğu 90 mm ve et kalınlığı 2 mm olarak belirlenmiştir. Çarpışma kutusunun cam elyaftan oluşan iç ve dış yüzeyleri için kabuk elemanlar seçilmiş, bal peteği çekirdeği içinse katı eleman kullanılmıştır. Model için 4.5 mm tetra çözüm ağı tercih edilmiş olup kuvvet eğrisi (curve) ile statik yükleme yapılmıştır. Modellenen bal peteği yapısı Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11: Modellenen sandviç yapı

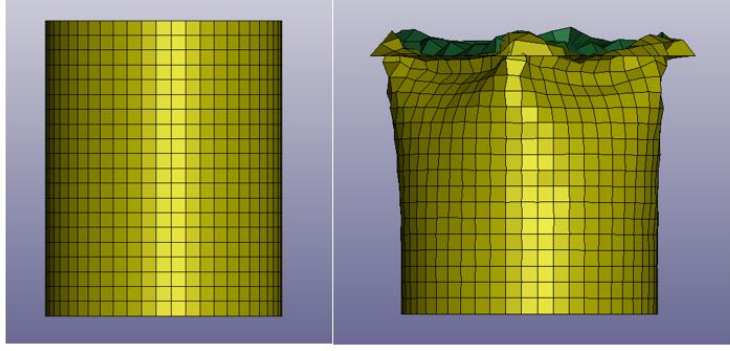
Oluşturulan modelin malzeme bilgisi girilmesi gerekmektedir. GFRP 'ten üretilen bu parçanın yapılan testler sonucu elde edilen malzeme bilgileri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4: Malzeme özellikleri

Malzeme	Elastik Modül (GPa)	Poisson's Oranı	Kayma Modülü (GPa)
Fiberglas	17.992	0.166339	7.714
Bal peteği çekirdeği	0.2	0.2	-

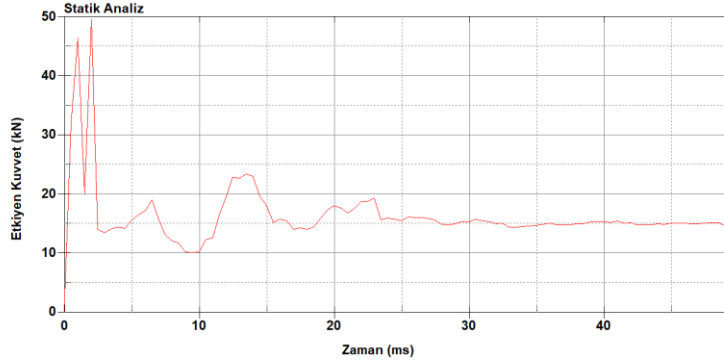
Lineer Olmayan Burkulma Analizi: Burkulma analizinde, bir kenar sabitlenerek diğer kenardan basma kuvveti uygulanmıştır. Z-eksenindeki hareket dışında tüm serbestlik dereceleri kısıtlanarak analiz gerçekleştirilmiştir.

Burkulma analizi tek aşamadan oluşmuş olup, lineer olmayan burkulma analizi yapılmıştır. 100000N'luk bir yük uygulanarak yapının burkulma sonrası (post buckling) davranışı da incelenmek istenmiştir.



Şekil 11:Yükleme öncesi ve sonrası FEM modeli

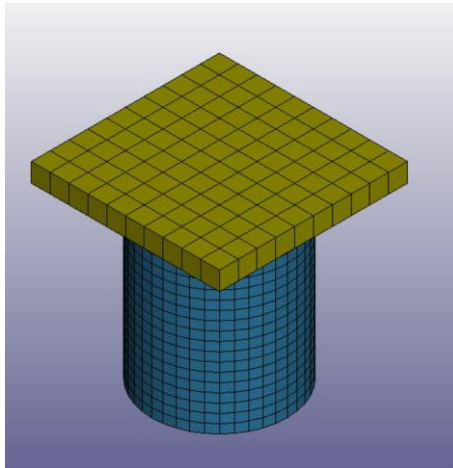
Analiz sonucu alınan verilen doğrultusunda Şekil 12’de verilen grafik elde edilmiştir. Çarpışma kutusu statik yüklemeye bazı noktalarda oluşan burkulma direnci ile karşı gelmiştir. Şekil 12’de, lineer artışın bittiği ilk yer burkulmanın başladığı yer olarak saptanmıştır. Bu nokta kritik burkulma noktası 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. Grafikten yapılan yorumlama doğrultusunda kritik burkulma yükü 46.5 kN, hasar yükü ise 49.6 N olarak bulunmuştur.



Şekil 12:Kuvvet-zaman grafiği

Çarpışma Analizi

Statik analizde olduğu gibi LS-DYNA programı kullanılmıştır. Analiz için iki kabuk (Shell) ve iki katı (solid) eleman kullanılmıştır. Çarpışma kutusunun cam elyaftan oluşan iç ve dış yüzeyleri için kabuk elemanlar seçilmiş, katı elemanlar ise çarpma tertibatı ve bal peteği çekirdeği için kullanılmıştır. Çarpışma kutusu için 4.5 mm tetra çözüm ağı ve çarpma tertibatı için 10 mm tetra çözüm ağı tercih edilmiştir (Şekil 13).



Şekil 13: Çarpışma kutusunun ve çarpma tertibatının sonlu elemanlar modeli

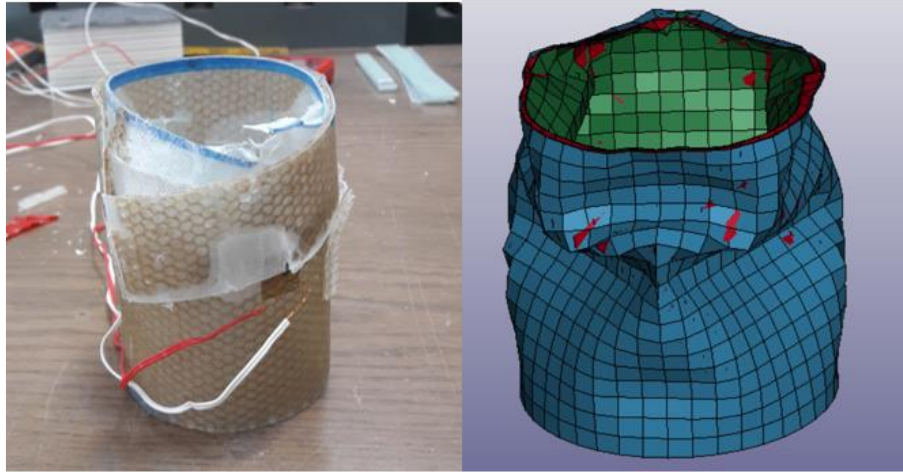
Çarpışma kutusu alt yüzeyinden sabitlenmiş olup ve çarpışma tertibatı z-öteleme serbestlik derecesi haricinde sabitlenmiştir. Fiberglas ve petek çekirdeği arasındaki temas (contact) için "Automatic-One-Way-Surface-to-Surface-Tiebreak" seçilmiştir. Diğer temas (contact) ise çarpışma kutusu ve çarpma tertibatı arasında "Automatic-Nodes-to-Surface" olarak seçilmiştir.

Malzeme tipi olarak; fiberglas için "MAT54-Enhanced-Composite-Damage", çarpışma tertibatı için "MAT20-Rigid" ve bal peteği çekirdeği için "MAT126-Modified Honeycomb" kullanılmıştır. Programda malzeme özelliklerine Tablo 5'te yazılı olan veriler girilmiştir.

Tablo 5: Malzeme özellikleri

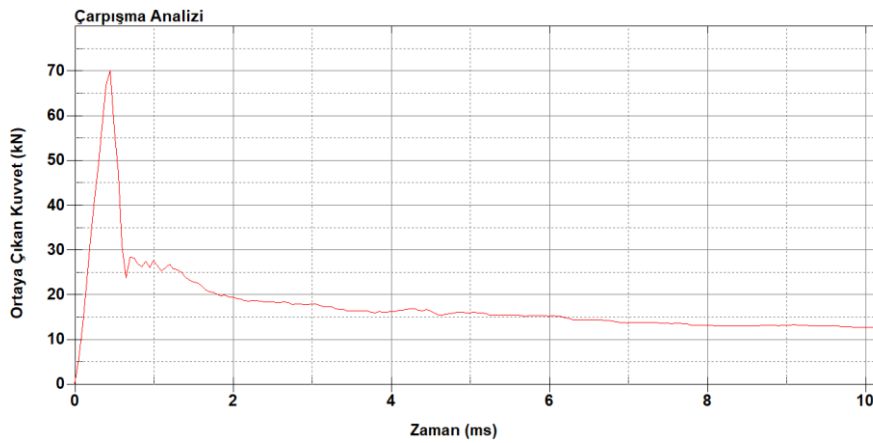
Malzeme	Elastik Modül (GPa)	Poisson's Oranı	Kayma Modülü (GPa)
Fiberglas	17.992	0.166339	7.714
Bal peteği çekirdeği	0.2	0.2	-
Çelik (çarpma tertibatı)	193	0.3	-

Analizde çarpışma tertibatının 4 m/s hızla silindirik tüpe çarpması modellenmiş olup, Şekil 14'te bu analize ait deformasyon ve deneysel olarak gerçekleşen deformasyon birlikte görülmektedir.



Şekil 14: Balpeteği yapısının deneysel ve FEM modelinin hasar görüntüsü

Analiz sonuçları incelendiğinde silindir ortalama olarak 700 MPa değerinde bir gerilmeye maruz kalmıştır. Çarpışma kutularının tasarımında gerilme değerinden çok kuvvet-zaman grafiği dikkate alınmaktadır. Şekil 15'te kuvvet-zaman grafiği verilmiş olup, Tablo 6'te bu grafikten elde edilen sonuçlar verilmiştir.



Şekil 15: Kuvvet-zaman grafiği

Grafik incelendiğinde beklenen bir sonuç ortaya çıkmıştır ve hızın artması ile birlikte Tablo 6'da yer alan değerlerin artacağı öngörülebilir.

Tablo 6: Sandviç Çarpışma Kutusunun 4m/s Hızda Çarpışma Analizi

Maksimum Kuvvet (kN)	Ortalama Kuvvet (kN)	Maksimum Kuvvette Yer Değiştirme (mm)
70.2	22.125	1.73

Sonuçlar

- Analiz sonuçları ve literatür araştırması doğrultusunda çarpışma kutularının enerji absorbe etme ve yüksek yüklere dayanma kapasitesinin yüksek olduğu kanısına varılmıştır.
- Vakum İnfüzyon Method 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 yüklemeye 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.
- Sandviç yapının çarpışma analizi ile statik basma testi sonuçları karşılaştırıldığında değerlerin birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Statik basma testleri kıyaslandığında ise sandviç yapının hem daha yüksek kuvvetlere dayandığı hem de daha yüksek enerji soğurumu gerçekleştirdiği görülmüştür. Yapının burkulma davranışının incelendiği analizler implicit ve çarpışma analizleri ise explicit olarak gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklar

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

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

Hsu, D., 2013. Non-destructive evaluation (NDE) of aerospace composites: Ultrasonic techniques. Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites, s.397-422.

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