

## PETEK DOKULU KOMPOZİTLERDE ÇEKİRDEK TASARIMI VE ANALİZİ

Adem Yasin ÇIPLAK / Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi / Zonguldak

Emre Can AÇIKGÖZ / Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi / Zonguldak

Engin DEMİRCİ / Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi / Zonguldak

Mehmet YETMEZ / Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi / Zonguldak

### ÖZET

*Bu çalışmada önerilen bal peteği yapısal tasarımında, ağırlık/mukavemet oranını ve geometri kaynaklı absorbe ettiği enerjiyi artırmak için altıgen yapısını iç bükey eğriler ile birleştirerek yapısal performansın iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, 3 farklı çekirdek hücre geometrisi tasarlanmış, her bir tasarıma bağlı çekirdek plakaların, yapısal analizleri deneysel ve sayısal modellerle elde edilerek kıyaslanmıştır. Modal analiz yardımıyla elde edilen deneysel sonuçlarla birebir uyumlu olduğu belirlenen sayısal modeller üzerinde (i) eğilme ve (ii) aksenal basma analizleri sonuçlandırılmış; elde edilen sayısal değerler deneysel gerilme analizi sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Sonuçlar tablo ve grafik olarak sunulmuştur. Kıyaslama sonucunda TPU (%3 karbon Fiber) çekirdek grubunun diğer gruplara göre yüksek mukavemetli olduğu belirlenmiştir.*

### GİRİŞ

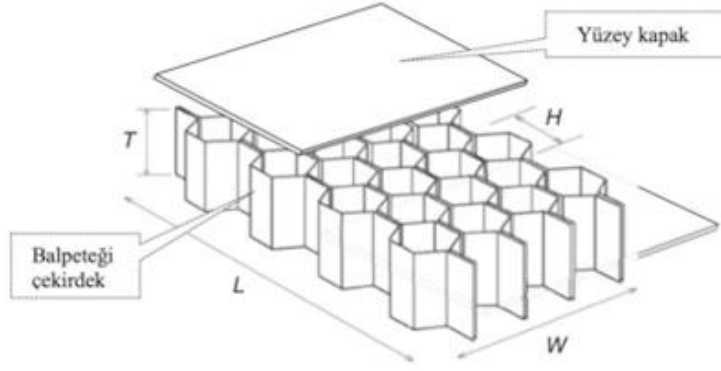
Petek yapılı kompozit levhaların üretimi zor ve pahalı olmasına rağmen; yüksek enerji sönmeme kabiliyeti, hafiflik, yüksek kayma ve eğilme rijitliği gibi özellikleri nedeniyle kullanım alanını havacılık, uzay ve otomotiv endüstrisinde hızla arttırmaktadır. Petek yapılı kompozit levhaların çekirdek kısmını altıgen petek ya da bal peteği denilen hafif yoğunluklu kısım oluşturmaktadır (Şekil 1). Petek hücre geometrisi, levha yoğunluğunun belirleyici unsurudur. Dolayısıyla, hücre yoğunluğu geometri ve malzeme doğrusallığı imkânı vermesinin yanında; yüzey plaka ya da örtü seçiminde de tasarımcılara çeşitli seçenekler sunma imkânı vermektedir. Bu noktada, petek dokulu kompozit tasarımı ve analizine verilebilecek en iyi örneklerden birisi Paik ve ark. (1999) yaptığı çalışma verilebilir. Deneysel ve analitik olarak gerçekleştirdikleri çalışmalarında, Paik ve arkadaşları alüminyum petek hücreli kompozit levhaların dayanımlarını tespit etmişlerdir. Basitleştirilmiş sayısal bağıntılardan yararlanarak buldukları levha dayanımlarını üç nokta eğme, aksenal basma ve yanal ezilme deneyleri sonucunda elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırmışlar ve sonuçları grafikler halinde sunarak kompozit levhalarda oluşan hasar karakteristiklerini belirlemişlerdir. Bu çalışmada, farklı hücre yapılarına farklı hacme sahip TPU (Termoplastik Polyüretan), PLA (Polilaktik Asit) termoplastik malzemeler ve alüminyum petek hücreli çekirdek üretilmiştir. Hücrelerinden elde edilmiş bu numuneler üç nokta eğme deneyine tabi tutulmuştur. Eğme deneyi sonucunda hücrelerin eğilme dayanımları ve hücre yapılarının kayma rijitlikleri tespit edilmiştir.

<sup>1</sup> Prof. Dr. Makine Müh. Böl. [yetmez@beun.edu.tr](mailto:yetmez@beun.edu.tr)

<sup>2</sup> Sn. Makine Müh. Böl. [a.y.ciplak@hotmail.com](mailto:a.y.ciplak@hotmail.com)

<sup>3</sup> Sn. Makine Müh. Böl. [emreacanacikgoz6767@outlook.com](mailto:emreacanacikgoz6767@outlook.com)

<sup>4</sup> Sn. Makine Müh. Böl. [edc.engin@gmail.com](mailto:edc.engin@gmail.com)



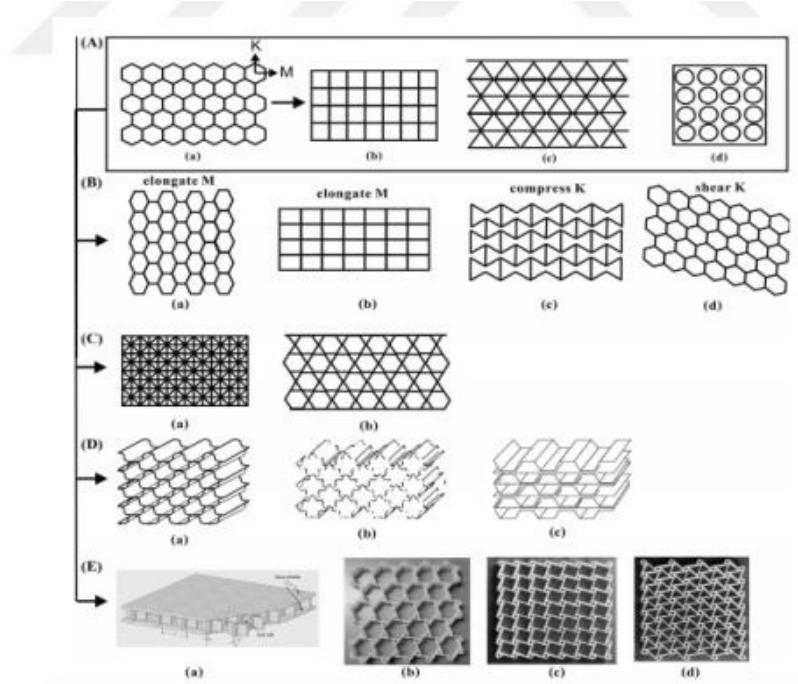
Şekil 1: Petek Dokulu Kompozit

## MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, 3 farklı çekirdek hücre geometrisi tasarlanmıştır. Her bir tasarıma bağlı çekirdek plakaların, mekanik karakterizasyon ve analizleri deneysel ve sayısal modellerle elde edilerek kıyaslanmıştır.

### Çekirdek

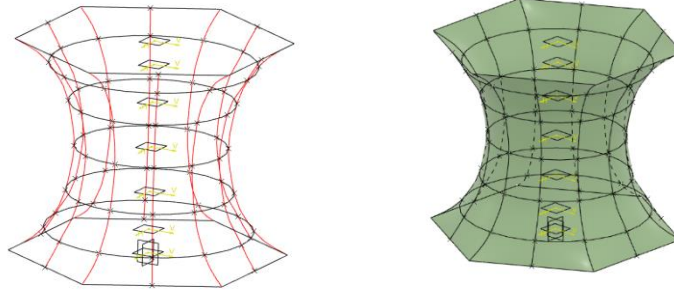
Petek dokulu kompozitlerde, bal peteği çekirdek yapı esas mekanik davranışı karşılayan kısımdır. Bu çekirdekler doğrusal ya da doğrusal olmayan farklı geometrilere (altıgen, kare, dikdörtgen, zikzak, elipsoit, yumurta kolisi vb.); içi boşluklu, içi dolu, farklı malzemelerde (köpük, alüminyum, balsa ağacı, bakır, kâğıt, epoksi vb.) ve üretim tekniği olarak farklı birleştirme yöntemleriyle (yapıştırma, kalıplama vb.) oluşturulmaktadır. Şekil 2.1'de kullanılan farklı çekirdek yapıları özet olarak sunulmaktadır.



Şekil 2.1: Farklı Çekirdek Yapıları (Zhang ve ark., 2014)

### **Çekirdek Tasarımı**

Bu çalışmada önerilen bal peteği yapısal tasarımında, ağırlık/mukavemet oranını ve geometri kaynaklı absorbe ettiği enerjiyi artırmak için altıgen yapısını iç bükey eğriler ile birleştirerek yapısal performansın iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çekirdek tasarımı 3DEXPERIENCE CATIA V6 programında Generative Wireframe & Surface ile elde edilmiştir. Şekil 2.1.1’de tasarlanan çekirdek tel kafes yapı ve yüzey yapısı görülmektedir.

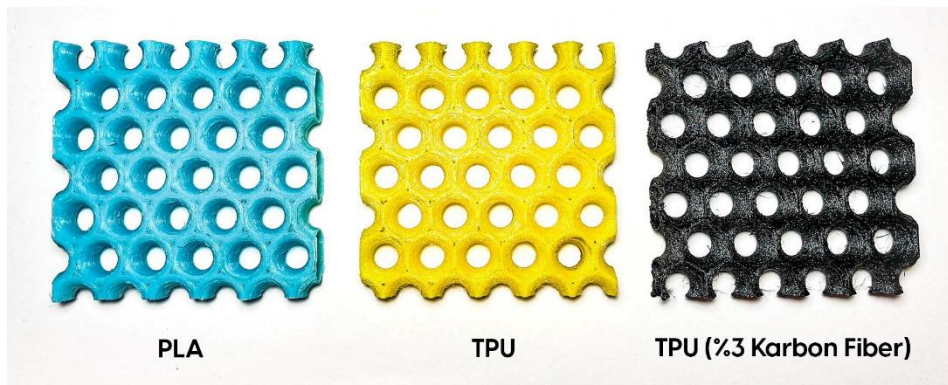


Şekil 2.1.1: Çekirdek Tel Kafes ve Yüzey

### **Numune**

Tasarlanan çekirdek yapılarının mekanik özellikleri Tablo 1’de verilen 1.75 mm çapında PLA , TPU (%3 oranında karbon fiber bulunmaktadır) ve TPU ergiyik biriktirme yöntemi ile imal edilmiştir. Çekirdek yapı alüminyum mekanik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Plastik deney numuneleri Şekil 2.2.1’ de ve alüminyum deney numuneleri Şekil 2.2.2’ de görülmektedir.

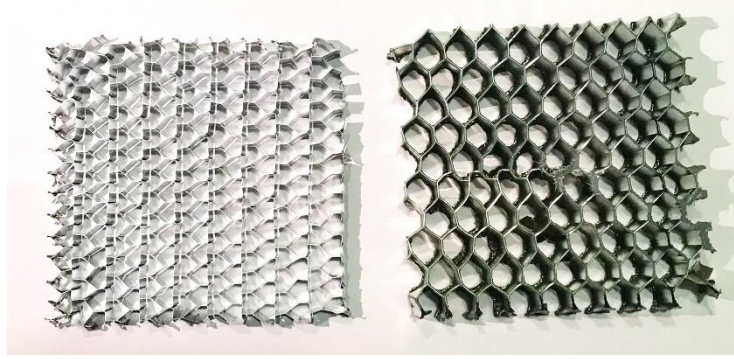
	PLA	TPU	TPU-Karbon Fiber
<b>Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1.24	1.22	1.23
<b>Elastisite Modülü (MPa)</b>	850	90	400
<b>Çekme Mukavemeti (MPa)</b>	65	43	40
<b>Kopma Uzaması (%)</b>	7.5	810	520
<b>Eğilme Mukavemeti (MPa)</b>	97	102	205



Şekil 2.2.1: PLA, TPU ve TPU (%3 Karbon Fiber ) Deney Numuneleri

	Alüminyum 3003
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2.73
Elastisite Modülü (MPa)	68900
Çekme Mukavemeti (MPa)	41.4
Kopma Uzaması (%)	30

Tablo 2: Alüminyum 3003 Mekanik Özellikleri



Şekil 2.2.2: Alüminyum Deney Numuneleri

## Metod

Çalışmanın deneysel kısmında, ankastre sınır koşullarında ele alınan her bir petek dokulu çekirdek grupları modal analiz yaklaşımıyla ele alınmıştır. Deneysel olarak elde edilen doğal frekans değerleri ile çekirdek grupların sonlu elemanlar modellerinden elde edilen sayısal sonuçlarla kıyaslanmıştır. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen sonuçlar Tablo 2.3.1’te verilmiştir. Sonuçlar arasında mükemmel bir uyum elde edilmiştir. Genel amaçlı sonlu elemanlar programı ANSYS (ANSYS 2022 R2) modeli Şekil 3.2’de, eleman tipi ve düğüm sayıları Tablo 2.3.2’de verilmiştir.



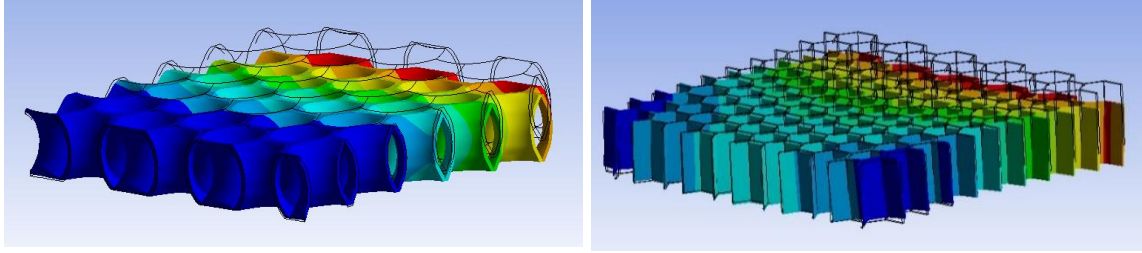
Şekil 2.3.1: Doğal Frekans Deneyi

	Alüminyum	Alüminyum HC	TPU-Karbon Fiber	PLA	TPU
$\omega_1$ deneysel (Hz)	73.99	156.86	112.28	147.74	44.84
$\omega_1$ sayısal (Hz)	74.27	165.98	113.17	160.59	49.32

Tablo 2.3.1: Doğal Frekans Deney Sonuçları

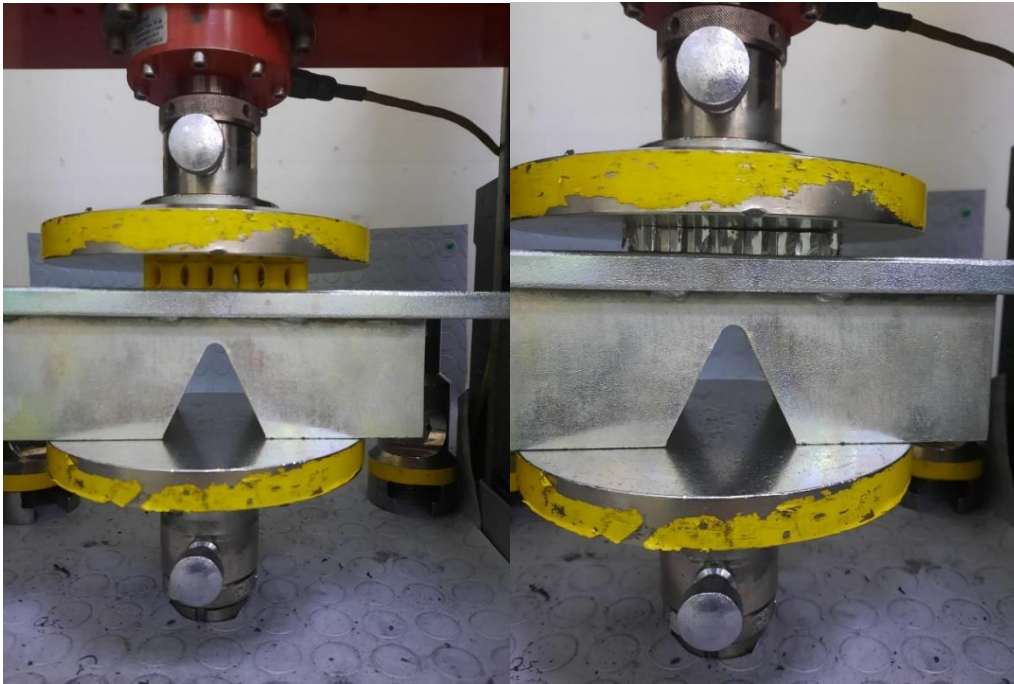
Alüminyum HC: 850887 (Düğüm Elemanı)	Alüminyum: 1600476 (Düğüm Elemanı)	PLA, TPU, TPU-Karbon: 1743525 (Düğüm Elemanı)
127488 Hexacore	797525 Tetrahedral	1035566 Tetrahedral

Tablo 2.3.2: Sonlu Elemanlar Düğüm Noktası ve Eleman Tipi



Şekil 2.3.2: ANSYS Sonlu Elemanlar Modal

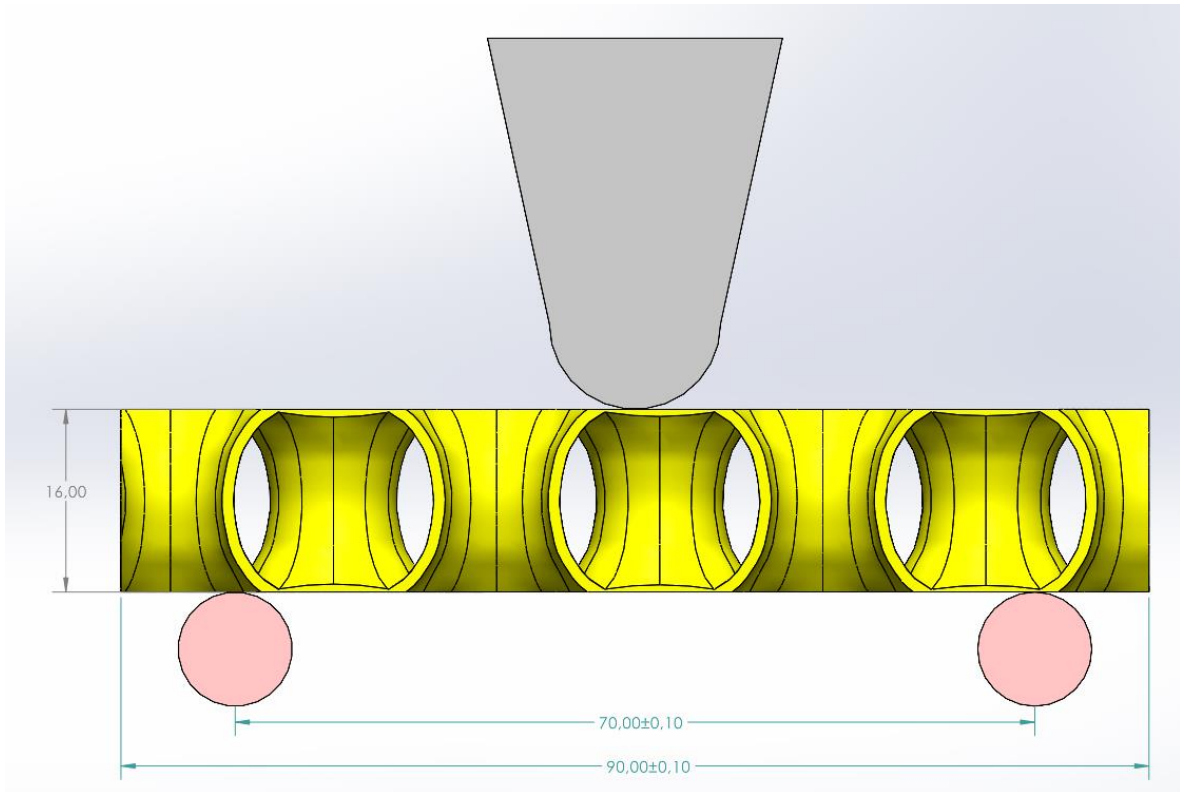
Üç nokta eğilme deneylerinde mesnetler arası uzunluk numune yüksekliğine bağlı olarak değiştiğinden numunelerin mesnetler arası uzunluğu ve her bir hücre yüksekliğine uygun eğilme numuneleri üretilmiştir. Petek dokulu kompozit levhaların eğilme dayanımlarının ölçülebilmesi için üç nokta eğilme testleri yapılmıştır. Üç nokta eğilme ve eksenel basma testleri ASTM D790 standardına uygun olarak ZwickRoell marka 100 kN kapasiteli çekme-basma test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde basma hızı 0.5 mm/dk olarak sabit tutulmuştur. Deney hatalarının önüne geçmek için tüm deneyler üçer kez tekrarlanmış ve ortalaması alınarak kullanılmıştır. Eksenel basma deneyinde kullanılan numunelerin ve boyutları ve deneye ait yükleme koşulları Şekil 2.3.3'de verilmiştir. Üç nokta eğilme deneyinde kullanılan numunelerin boyutları ve deneye ait yükleme koşulları Şekil 2.3.3' de verilmiştir. Üç nokta eğilme sayısal modelin boyutları ve deneye ait yükleme koşulları Şekil 2.3.4' de verilmiştir.



Şekil 2.3.3 : Eksenel Basma Deneye Ait Yükleme Koşulları



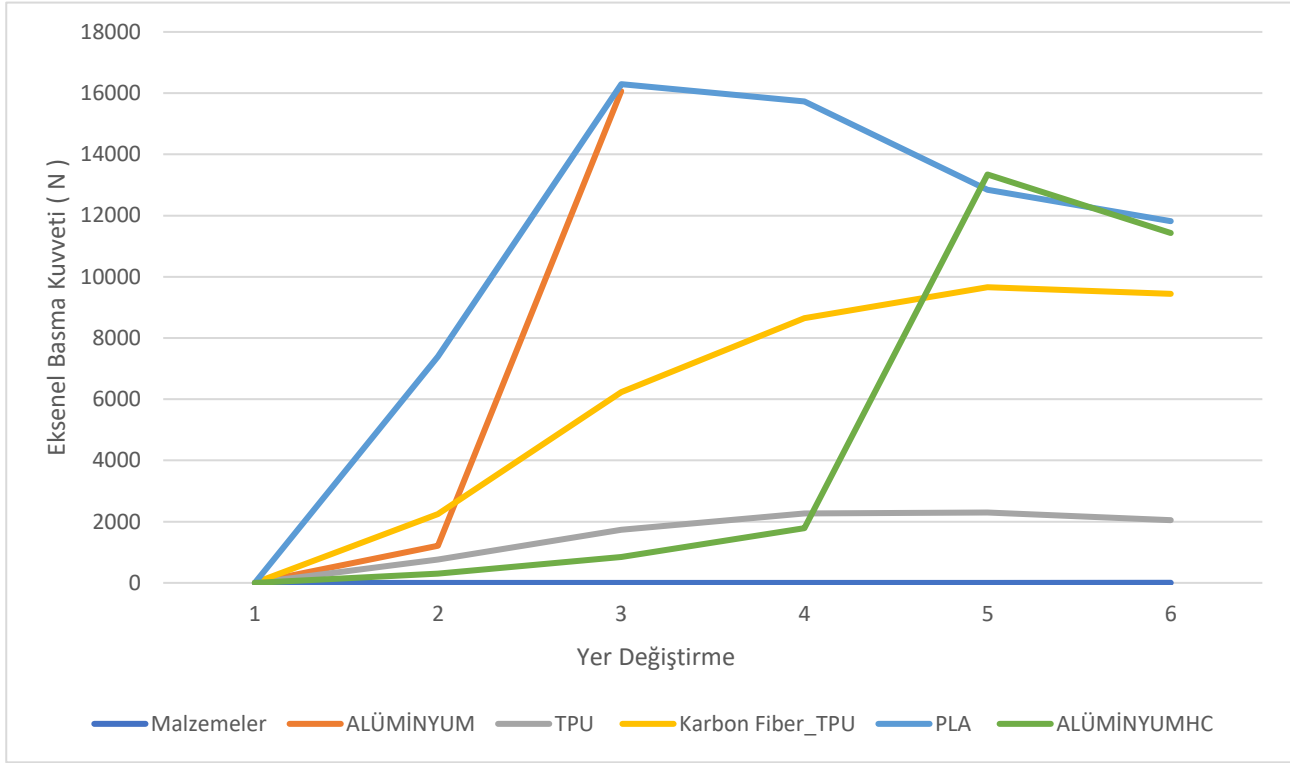
Şekil 2.3.4: Üç Nokta Eğme Deneye Ait Yükleme Koşulları



Şekil 2.3.3: Üç Nokta Eğme Sayısal Modele Ait Yükleme Koşulları

## ARAŞTIRMA BULGULARI

Petek yapıları kompozit levhaların aksel basma deneyi sonucunda elde edilen yük-yer değıştirme grafikleri Şekil 3.1’de verilmiştir.

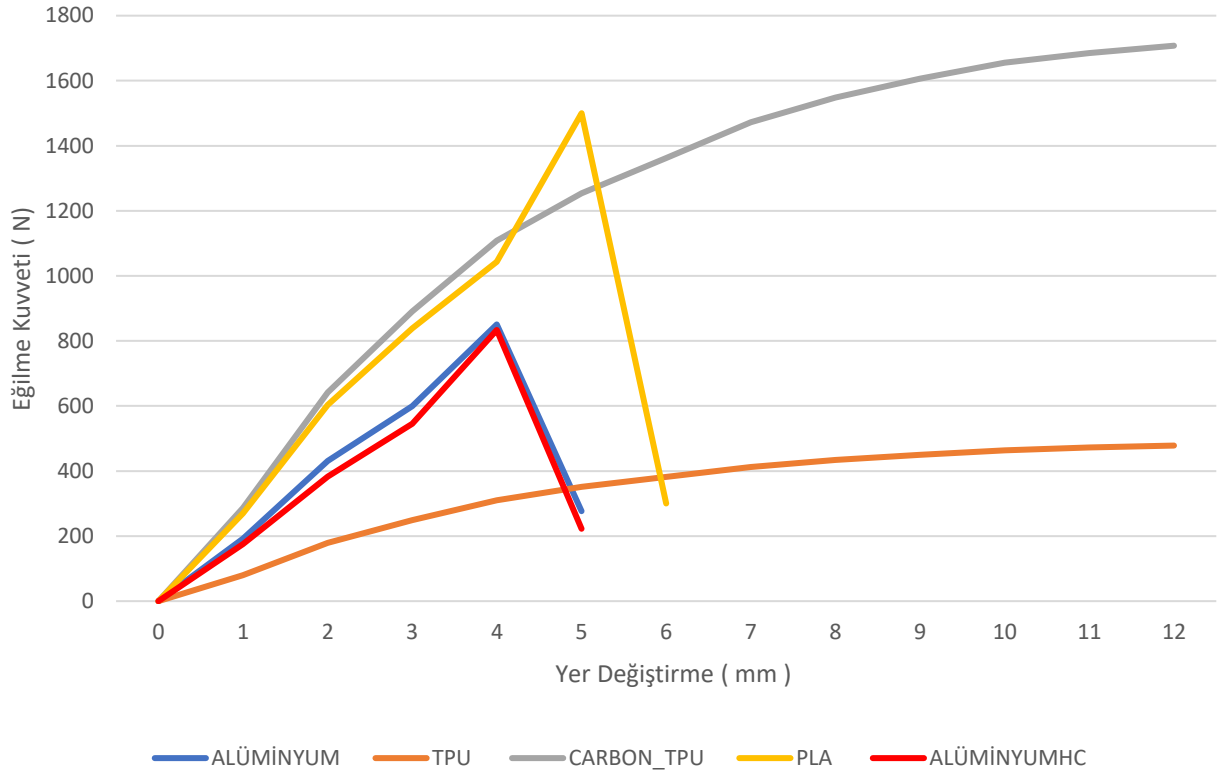


Şekil 3.1 : Aksel Basma Deneyi Yük – Yer Değiştirme

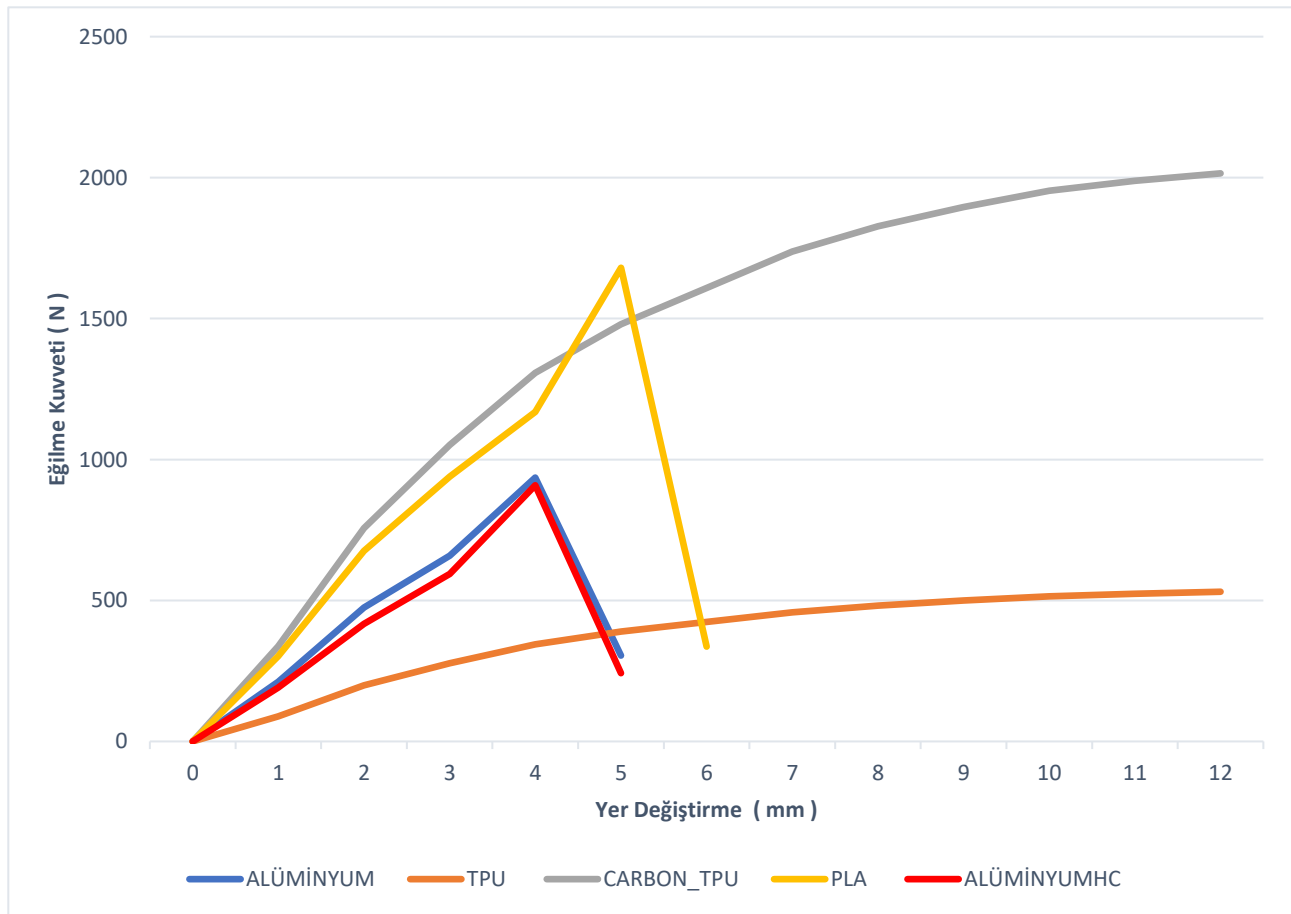
Petek yapıları kompozit levhaların üç nokta eğilme deneyi sonucunda elde edilen yük - yer değıştirme grafikleri Şekil 3.2’de verilmiştir. Sayısal modele ait üç nokta eğilme yük - yer değıştirme grafikleri Şekil 3.3’de verilmiştir. Deneysel olarak elde edilen aksel basma ve üç nokta eğilme değeri ile çekirdek gruplarının sonlu elemanlar modellerinden elde edilen sayısal sonuçlarla kıyaslanmıştır. Genel amaçlı sonlu elemanlar programı ANSYS (ANSYS 2022 R2) modeli Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de, eleman tipi ve düğüm sayıları Tablo 3.1’de verilmiştir. Petek yapıları kompozit malzemenin deneysel hasar modelleri Şekil 3.6’dan Şekil 3.9’a kadar verilmiştir. Petek yapıları kompozit malzemenin sayısal hasar modeli Şekil 3.10’dan Şekil 3.13’e kadar verilmiştir.

Alüminyum HC: 1021064 (Düğüm Elemanı)	Alüminyum: 1920571 (Düğüm Elemanı)	PLA, TPU, TPU-Karbon: 2733758 (Düğüm Elemanı)
152985 Hexacore	957030 Tetrahedral	1666848 Tetrahedral

Tablo 3.1 : Sonlu Elemanlar Eleman Tipi ve Düğüm Noktası

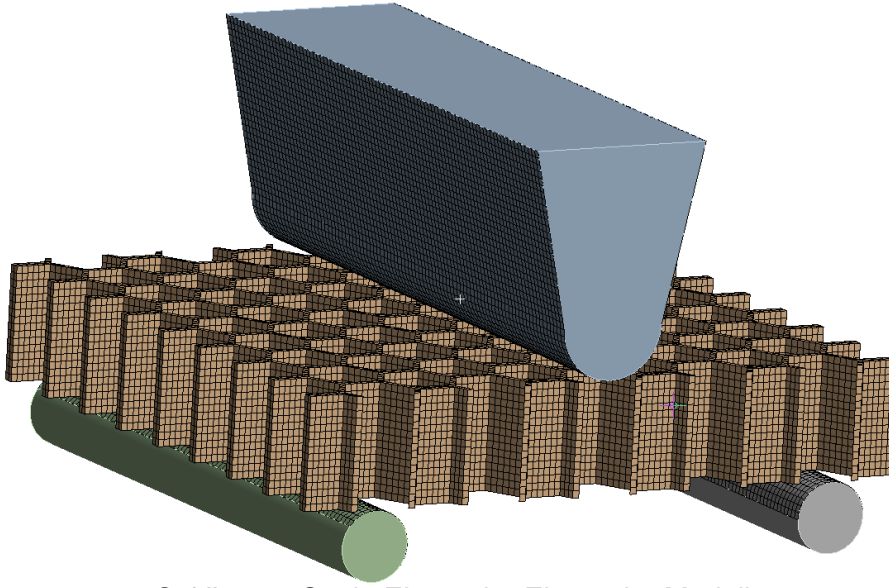


Şekil 3.2: Üç Nokta Eğilme Deneyi Yük - Yer Değiştirme Grafiği

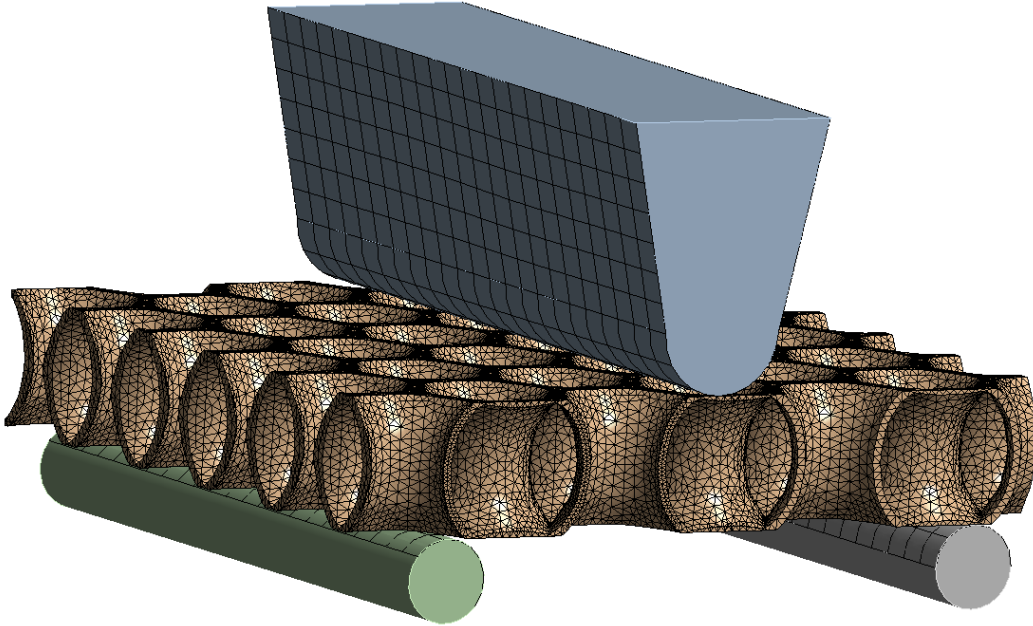


Şekil 3.3: Sayısal Modele Ait Üç Nokta Eğilme Yük - Yer Değiştirme

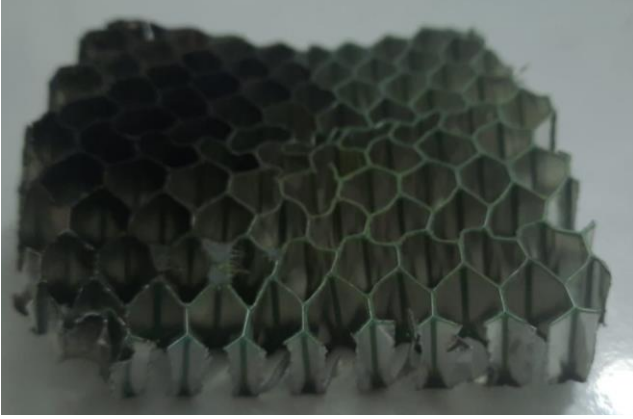




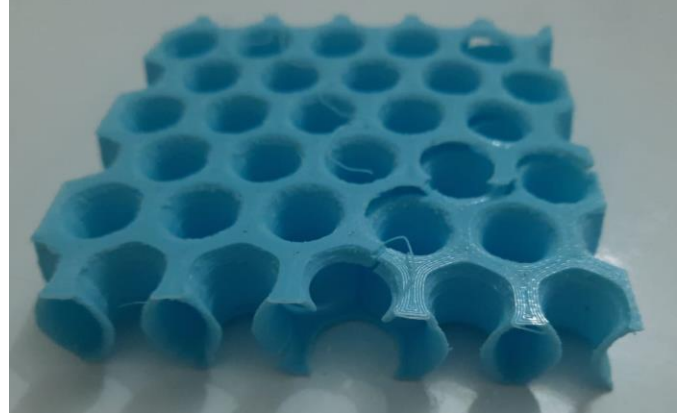
Şekil 3.4 : Sonlu Elemanlar Elemanlar Modeli



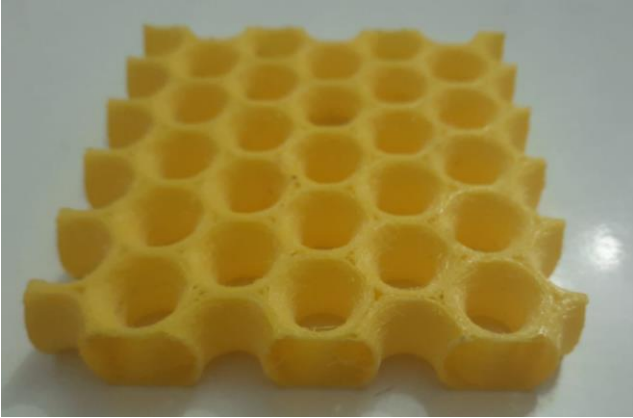
Şekil 3.5 : Sonlu Elemanlar Elemanlar Modeli



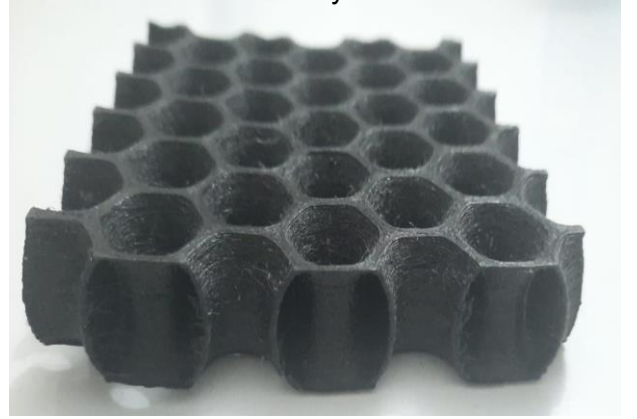
Şekil 3.6 : Deneysel Hasar Modeli  
Alüminyum HC



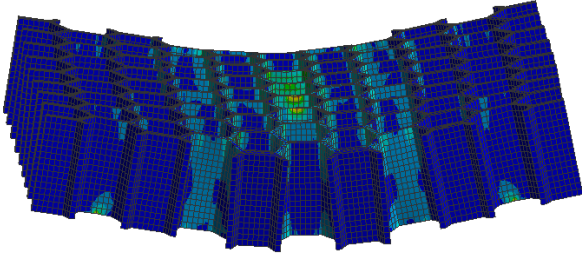
Şekil 3.7 : Deneysel Hasar Modeli  
Alüminyum PLA



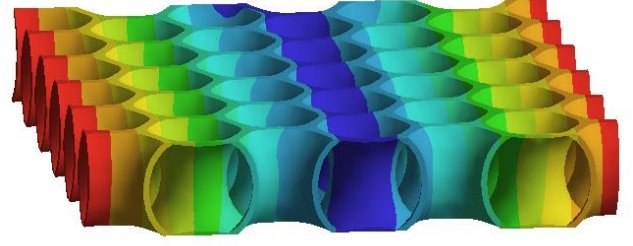
Şekil 3.8 : Deneysel Hasar Modeli  
TPU



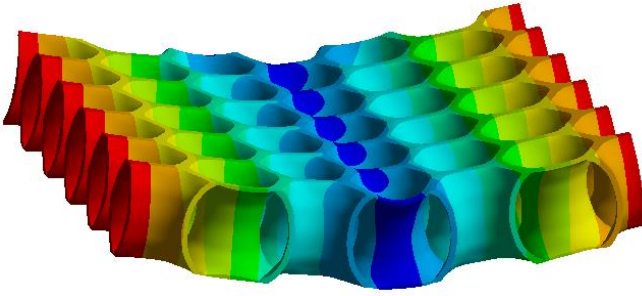
Şekil 3.9 : Deneysel Hasar Modeli  
Karbon Fiber-TPU



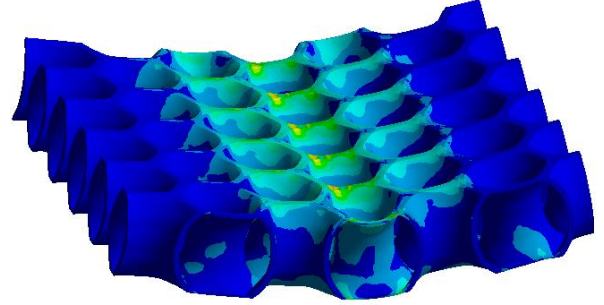
Şekil 3.10 : Sayısal Model Hasar Modeli Alüminyum HC



Şekil 3.11 : Sayısal Model Hasar Modeli PLA



Şekil 3.12 : Sayısal Model Hasar Modeli TPU



Şekil 3.13 : Sayısal Model Hasar Modeli Karbon Fiber-TPU

## SONUÇLAR

Modal analiz yardımıyla elde edilen deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu belirlenen sayısal modeller üzerinde (i) eğilme ve (ii) eksenel basma analizleri sonuçlandırılmış; elde edilen sayısal değerler deneysel gerilme analizi sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Tasarlanan petek dokulu yapının ve geleneksel honeycomb tasarımın rijit malzemelerdeki eksenel basma davranışında standart honeycomb alüminyum malzeme ile tasarlanan petek dokulu yapıda kullanılan PLA malzemenin 2-2.5 mm yer değiştirmesinde elde edilen enerji tokluk birbirine çok yakındır. Tasarlanan petek dokulu yapının geleneksel honeycomb tasarımına eksenel basma üzerinde daha verimli olduğu görülmüştür. Tasarlanan petek dokuluda yapıda kullanılan TPU (%3 karbon Fiber) malzemenin içerisindeki karbon fiber elyaf katkısından dolayı eksenel basmada diğer gruplara göre göstermiş olduğu mukavemet diğer gruplara çok yakındır. Üç nokta eğme deneyinde tasarlanan petek dokulu yapının ve geleneksel honeycomb tasarımına kıyasla absorbe ettiği toplam enerji daha fazladır. TPU (%3 karbon Fiber) malzemenin içerisindeki karbon fiber elyaf katkısından dolayı sünek bir davranış göstererek absorbe ettiği diğer gruplara göre çok fazladır. Tasarlanan petek dokulu yapının üç nokta eğme ve eksenel basmada ayrı ayrı geleneksel honeycomb tasarıma göre üstünlükleri bulunmaktadır. Petek dokulu yapının tasarımında başarılı olunmuştur. Kıyaslama sonucunda TPU (%3 karbon Fiber) çekirdek grubunun diğer gruplara göre yüksek mukavemetli olduğu belirlenmiştir.

## Kaynakça

Camirero, M. Á., Chacon J. M. et al. (2019). Additive manufacturing of PLA-based composites using fused filament fabrication: Effect of graphene nanoplatelet reinforcement on mechanical properties, dimensional accuracy and texture, *Polymers*, 11 , 799.

J.K. Paik, A.K. Thayamballi, G.S. Kim, "The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels," *Thin-Walled Struct.*, vol. 35, no. 3, pp. 205-231, 1999, doi: 10.1016/S0263-8231(99)00026-9.

L. S. Sutherland, "A review of impact testing on marine composite materials: Part I – Marine impacts on marine composites," *Compos. Struct.*, vol. 188, pp. 197–208, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.073>.

S. Laurenzi, A. Grilli, M. Pinna, F. De Nicola, G. Cattaneo, and M. Marchetti, "Process simulation for a large composite aeronautic beam by resin transfer molding," *Compos. Part B Eng.*, vol. 57, pp. 47–55, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.039>.

T. P. Sathishkumar, S. Satheeshkumar, and J. Naveen, "Glass fiber-reinforced polymer composites – a review," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 33, no. 13, pp. 1258–1275, 2014, doi: 10.1177/0731684414530790.

W. Nsengiyumva, S. Zhong, J. Lin, Q. Zhang, J. Zhong, and Y. Huang, "Advances, limitations and prospects of nondestructive testing and evaluation of thick composites and sandwich structures: A state-of-the-art review," *Compos. Struct.*, vol. 256, p. 112951, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112951>.