

## Hibrit Kompozit Kirişlerin Yanal Burkulma Davranışlarına Soğuk Ortamın Etkisi

Ayşe ÖNDÜRÜCÜ\*<sup>1</sup>, Hüseyin Fırat KAYIRAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta

<sup>2</sup>Tarım ve Kırsal Kalkınmayı Destekleme Kurumu, Mersin İl Koordinatörlüğü, 33110, Mersin

(Alınış / Received: 29.12.2017, Kabul / Accepted: 30.04.2018, Online Yayınlanma / Published Online: 26.05.2018)

### Anahtar Kelimeler

Hibrit kompozit,  
Yanal burkulma,  
İstifleme dizilimi,  
Soğuk ortam etkisi

**Özet:** Bu çalışmada, hibrit kompozit kirişlerin yanal burkulma davranışları üzerine soğuk ortamın ve farklı fiber kombinasyonlarının etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Yanal burkulma deneyleri için, karbon, E-cam ve aramid fiberlerin farklı kombinasyonları ve matris olarak da Araldite LY1564/Aradur 3486 reçine sistemi kullanılarak 12 tabakalı hibrit kompozit plakalar üretilmiştir. Hibrit kompozit numuneler 90 gün oda koşulları, 90 gün soğutucu ve 150 gün soğutucuda bekletildikten sonra yanal burkulma deneyine tabi tutulmuşlardır. Deneyler sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda tabakalı hibrit kompozit kirişlerin yanal burkulma davranışları incelenmiştir. En yüksek kritik yanal burkulma yükü  $[(30/-60)_3]_s$  istifleme dizilimine sahip CAG<sup>30</sup> numunelerinde, en düşük kritik yanal burkulma yükü ise  $[(0/90)_3]_s$  istifleme dizilimine sahip GAC numunelerinde meydana gelmiştir. Çalışma sonucunda, soğuk ortamda bekletilen numunelerin kritik yanal burkulma yüklerinin oda koşullarında bekletilen numunelerin kritik yanal burkulma yüklerine göre arttığı belirlenmiştir.

## Effect of Cold Environment on Lateral Buckling Behavior of Hybrid Composite Beams

### Keywords

Hybrid composite,  
Lateral buckling,  
Stacking sequence,  
Cold environment effect

**Abstract:** In this study, the effects of cold environment and different fiber combinations on lateral buckling behavior of hybrid composite beams were investigated, experimentally. For the lateral buckling tests, 12-layered hybrid composite plates were produced using different combinations of carbon, E-glass and aramid fibers, with an epoxy resin system as the matrix (Araldite LY1564/Aradur 3486). The hybrid composite samples were subjected to lateral buckling test after waiting for 90 days in room conditions, 90 days and 150 days in a cooler, respectively. The lateral buckling behaviors of layered hybrid composite beams were investigated in the direction of the data obtained from the lateral buckling tests. The highest critical lateral buckling load was obtained in the CAG30 specimens with the stacking sequence  $[(30/-60)_3]_s$ . The lowest critical lateral buckling load was obtained in GAC samples with the stacking sequence  $[(0/90)_3]_s$ . It has been observed that critical lateral buckling loads of specimens kept in cold environment increased with critical buckling loads of samples in room conditions. As a result of the study, it was determined that the critical lateral buckling loads of the hybrid specimens kept in the cold environment increased with respect to the critical lateral buckling loads of the hybrid specimens kept in room conditions.

### 1. Giriş

İki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşan kompozit malzemelerin oluşturulmasındaki asıl amaç, kullanılan malzemelerin birbirlerinin zayıf kalan özelliklerini iyileştirmek ve istenilen yönde daha üstün özellik sağlayan bir malzeme elde etmektir. Hibrit kompozitler, iki veya daha fazla farklı fiber takviyesinin aynı matris içinde bulunduğu kompozit

malzeme grubudur. Bu malzemeler yüksek mukavemetli ve darbe yüklerine karşı dirençleri yüksek olan malzemelerdir. Çok farklı matris ve fiber kombinasyonlarının kullanıldığı hibrit kompozitlerde en çok tercih edilen sistem, karbon ve cam elyafın birlikte bulunduğu polimer matristen oluşan kombinasyondur. Karbon fiber güçlü ve daha yüksek rijitliğiyle düşük yoğunluklu takviye imkanı sağlar, ancak maliyeti yüksektir. Cam elyaf ise ucuz olmasına rağmen, karbonun sağladığı rijitliğe sahip değildir.

Cam - karbonun birlikte bulunması, daha güçlü, daha tok ve daha yüksek darbe dayanımı sağlar [1]. Bu yüksek mukavemetli malzemelerin kullanılması sebebiyle elemanların kesit alanları küçüldüğü için, yapı elemanlarında çok daha çabuk burkulma meydana gelebilmektedir. Bu nedenle kompozit malzemelerde bazı stabilite problemleri öne çıkmaktadır. Bu problemlerden biri, uzun ve ince numunelerde yanal yük altındaki kararlılık durumudur. Eğer numunenin bir eksene göre rijitliği diğerine göre küçük ise eğilme ve burulma aynı anda meydana gelerek çarpılma oluşur. Yanal burkulma, yapının bozulmasına sebep olabilir ve parça üzerindeki maksimum yük taşıma kapasitesini azaltır. Çekme kuvvetine karşı oldukça dayanıklı olan ince levhalar basınç naklederken oldukça zayıftırlar. İnce cidarlı bir tüp burulmaya maruz bırakıldığında ince bir kağıt gibi buruşur. Denizaltı gemileri gibi vakum tankları uygun şekilde inşa edilmedikleri takdirde dış basınç altında burkulur ve kullanılamaz hale gelirler. Bu ve benzeri problemler mühendislik dizaynlarında üzerinde durulması gereken konulardır. Yüklü elemanların burkulması genellikle aniden oluşan olaylardır. Bu bakımdan birçok yapı elemanı stabilite bozukluğu nedeniyle çökme gibi büyük bir tehlike ile karşı karşıyadır [2].

Literatürde kompozit malzemelerin burkulma davranışlarının incelenmesiyle ilgili çalışmalar mevcuttur; Okutan Baba, tabakalı kompozit plakların burkulma yükleri üzerine oryantasyon açıları, sınır koşulları ve uzunluk/kalınlık oranı gibi değişkenlerin etkilerini incelemiştir [3]. Brooks ve Turvey, dairesel kesitli kompozitlerde burkulma sonrası oluşan problemleri araştırmışlardır [4]. Eryiğit, dairesel delikli tabakalı kompozit kirişlerde burkulma davranışını araştırmıştır [5]. Bir başka çalışmada, yayılı yüke maruz kirişlerin yanal burkulma davranışı üzerine çalışılmıştır [6]. Karbon-fiber, grafit-fiber ve çapraz takviyeli karbon-grafit fiber ile polyester matristen üretilmiş farklı oryantasyon açılarına sahip simetrik ve antisimetrik, farklı delik geometri tabakalı kompozit levhaların burkulma davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Tabaka dizilimi göz önüne alındığında, simetrik tabaka dizilimine sahip kompozit levhaların burkulma yüklerinin, antisimetrik tabaka dizilimine sahip levhalara göre daha düşük olduğu görülmüştür [7]. Tabakalı kompozitlerde meydana gelen delaminasyon hasarının kompozit malzemelerin yanal burkulma yüküne etkileri incelenmiştir [8, 9]. Tabakalı kompozit malzemelerde basma yükünün artmasından sonra başlayan delaminasyonun büyümesi ile kompozit tabakada meydana gelen hasar ilerlemesi araştırılmıştır [10]. Bunun yanı sıra farklı geometrik şekillere sahip tabakalı kompozit ankastre kirişlerin yanal burkulma davranışı üzerine delik boyutu, delik şekli ve delik pozisyonunun etkilerinin araştırıldığı çalışmalar mevcuttur [11, 12]. Sırf cam/epoksi, sırf karbon/epoksi ve karbon/cam hibrit kompozitlerin sıcak ortam (90°C), soğuk ortam

(-50°C) ve oda koşullarında tam delinme gerçekleşene kadar ağırlık düşürme darbe test cihazında darbe testleri yapılarak bu malzemelerin farklı ortam koşullarındaki darbe davranışları incelenmiştir. Enerji seviyesi sabit tutulup sıcaklık düşürüldüğünde (örneğin 20°C' den -50°C'ye) matris kırılmalarının yoğunlaştığı, delaminasyon alanlarının ve alt tabakalardaki fiber matris ayrılmalarının büyüdüğü görülmüştür. Testlerin yapıldığı tüm koşullarda; dış tabakalarda karbon, iç tabakalarda cam takviyeli karbon/cam hibrit kompozitlerin hem rijitlik hem de darbe direnci açısından sırf karbon ve sırf cam takviyeli kompozitlere göre daha üstün olduğu belirtilmiştir [13].

Kompozit malzemeler uygulama alanlarında farklı iklim koşullarında kullanıldıklarından, farklı ortam şartlarına ve sıcaklık değişimlerine maruz kalabilmektedirler. Günümüzde kullanım alanı hızla artmakta olan tabakalı kompozit malzemelerin düşük sıcaklık ortamlarındaki mekanik davranışını doğru tanımlamak büyük önem taşır. Bundan dolayı bu çalışmada, soğuk ortam koşullarının hibrit kompozit malzemenin burkulma davranışı üzerine etkisi araştırılmıştır. Yanal burkulma deneyleri için üç farklı fiber (karbon dimi, E-cam dimi ve aramid dimi) ve matris olarak da epoksi reçine kullanılarak 12 tabakalı hibrit kompozit plakalar üretilmiştir. Hibrit kompozit plakalar 90 gün oda koşullarında, 90 gün soğutucuda (-18 °C) ve 150 gün soğutucuda (-18 °C) bekletilmişlerdir. Bekleme süreleri dolduktan sonra numuneler soğuk ortamdan çıkarılarak bekletilmeden yanal burkulma deneyine tabii tutularak, hibrit kompozitlerin yanal burkulma davranışı üzerine soğuk ortamın ve farklı istifleme diziliminin etkileri araştırılmıştır.

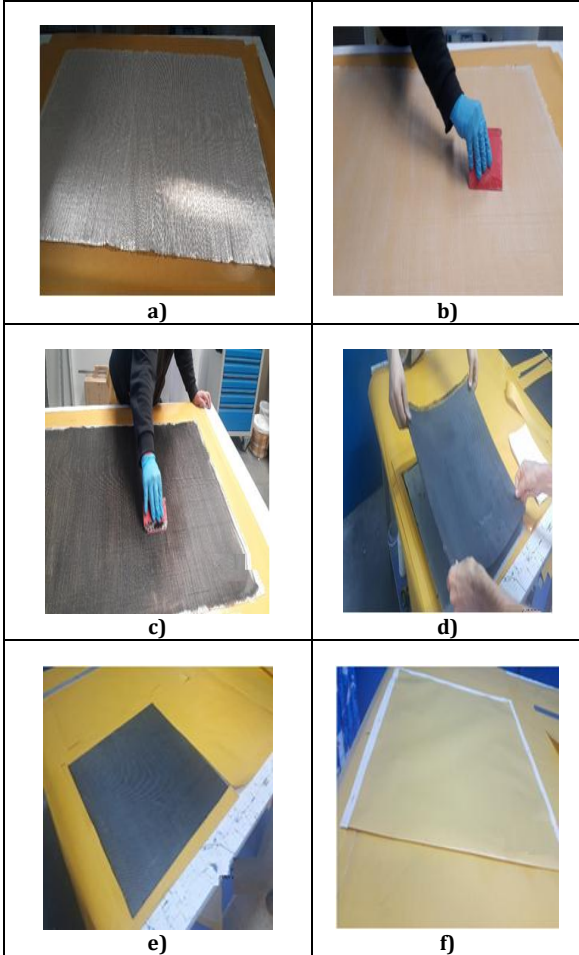
## 2. Malzeme ve Metot

Hibrit kompozit malzemelerin yanal burkulma davranışına soğuk ortamın etkisini araştırmak amacıyla  $[(0/90)_3]_s$ ,  $[(30/-60)_3]_s$ ,  $[(45/-45)_3]_s$  simetrik ve  $[(0/90)_3]_{as}$  antisimetrik yönlenme açılarına sahip 12 tabakalı hibrit kompozit plakalar üretilmiştir. Hibrit kompozit malzemelerin üretiminde fiber olarak karbon dimi (twill) dokuma, E-cam dimi (twill) dokuma, aramid dimi (twill) dokuma olmak üzere üç farklı fiber; matris malzemesi olarak da Araldite LY1564 / Aradur 3486 reçine sistemi kullanılmıştır. Tablo 1'de hibrit kompozit üretiminde kullanılan fiberlerin genel özellikleri yer almaktadır.

**Tablo 1.** Hibrit kompozit üretiminde kullanılan fiber malzemelerin genel özellikleri [14]

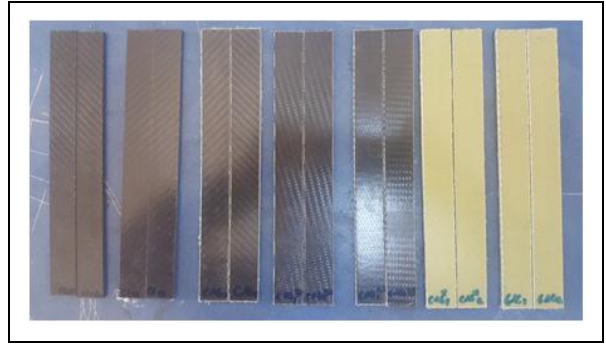
Mekanik özellikler	Karbon	E-Cam	Aramid
Ağırlık (g/m <sup>2</sup> )	245	300	300
Çekme dayanımı (MPa)	3800	2306	3000
Elastisite modülü (GPa)	240	81.50	112
Şekil değiştirme oranı (%)	1.60	2.97	2.40
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1.78	2.58	1.44

Hibrit kompozit malzemelerin üretiminde sıcak presleme yöntemi kullanılmıştır. Sıcak presleme, ısı ve basınçla matris malzeme arasında bir bağ oluşumu sağlar. Öncelikle silikon kaplı kağıt üzerine fiber kumaşlar, her fiber tabaka üzerine (Araldite LY1564/ Aradur 3486) epoksi-sertleştirici karışımı sürülmek kaydıyla istenen kombinasyona uygun dizilimde 12 tabaka olacak şekilde üst üste yerleştirilmiştir. Kompozit üretimine başlanmadan önce istiflenen kumaşların bünyesinde olması muhtemel nemin giderilmesi amacıyla kumaşlar bir fırında 60°C'de sıcaklıkta 4 saat boyunca bekletilerek kurumaları sağlanmıştır. Bu işlemden sonra kumaş fiber malzemeler 120°C'de sıcaklıkta 1 saat boyunca 6 bar sabit pres basıncı altında bekletilmişlerdir. Kürleme işleminden sonra basınç kaldırılarak hibrit kompozit plakalar oda sıcaklığına ulaşıncaya kadar yavaş şekilde soğumaya bırakılmışlardır. 400mmx400mm ebatlarında üretilen hibrit kompozit plakaların kalınlıkları 2.5 ila 3.5 mm arasında değişkenlik göstermektedir. Şekil 1'de hibrit kompozit malzemenin üretim aşamaları verilmiştir.



Şekil 1. Hibrit kompozit malzemenin üretim aşamaları

Daha sonra üretimi yapılan hibrit kompozit plakalardan Rubi Diamant DS-300-1500 profesyonel kesme makinesi (sulu kesim) yardımıyla 20mmx200mm ebatlarında numuneler kesilmiştir. Şekil 2'de kesimi yapılan farklı konfigürasyona sahip hibrit kompozit deney numuneleri görülmektedir.



Şekil 2. Gruplara ayrılan deney numuneleri

Üretimi yapılan hibrit kompozitlerin kısa gösterimleri ve malzeme diziliş açıları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Gruplara ayrılan hibrit kompozitler

Grup adı	İstifleme dizilimi	Malzeme diziliş açıları
C <sub>12</sub>	[(0/90) <sub>3</sub> ] <sub>s</sub>	[0 <sub>c</sub> /90 <sub>c</sub> /0 <sub>c</sub> /90 <sub>c</sub> /0 <sub>c</sub> /90 <sub>c</sub> ] <sub>s</sub>
CG	[(0/90) <sub>3</sub> ] <sub>s</sub>	[0 <sub>c</sub> /90 <sub>c</sub> /0 <sub>G</sub> /90 <sub>G</sub> /0 <sub>c</sub> /90 <sub>c</sub> ] <sub>s</sub>
CAG	[(0/90) <sub>3</sub> ] <sub>s</sub>	[0 <sub>c</sub> /90 <sub>c</sub> /0 <sub>A</sub> /90 <sub>A</sub> /0 <sub>c</sub> /90 <sub>c</sub> ] <sub>s</sub>
CAG <sup>30</sup>	[(30/-60) <sub>3</sub> ] <sub>s</sub>	[30 <sub>c</sub> /-60 <sub>c</sub> /30 <sub>A</sub> /-60 <sub>A</sub> /30 <sub>G</sub> /-60 <sub>G</sub> ] <sub>s</sub>
CAG <sup>45</sup>	[(45/-45) <sub>3</sub> ] <sub>s</sub>	[45 <sub>c</sub> /-45 <sub>c</sub> /45 <sub>A</sub> /-45 <sub>A</sub> /45 <sub>G</sub> /-45 <sub>G</sub> ] <sub>s</sub>
CAG*	[(0/90) <sub>3</sub> ] <sub>as</sub>	[0 <sub>c</sub> /90 <sub>c</sub> /0 <sub>A</sub> /90 <sub>A</sub> /0 <sub>G</sub> /90 <sub>G</sub> /0 <sub>c</sub> /90 <sub>c</sub> /0 <sub>A</sub> /90 <sub>A</sub> /0 <sub>G</sub> /90 <sub>G</sub> ] <sub>s</sub>
GAC	[(0/90) <sub>3</sub> ] <sub>s</sub>	[0 <sub>G</sub> /90 <sub>G</sub> /0 <sub>A</sub> /90 <sub>A</sub> /0 <sub>c</sub> /90 <sub>c</sub> ] <sub>s</sub>

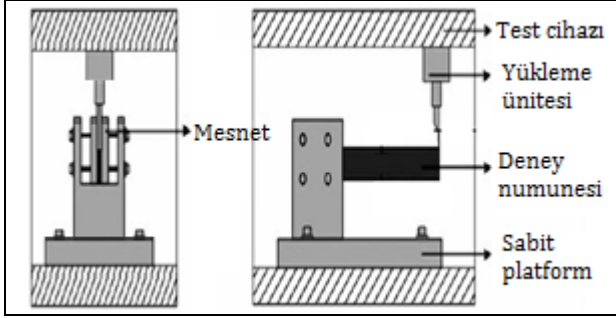
C: karbon fiber, G: cam fiber, A: aramid fiber, s: simetrik, as: antisimetrik, <sup>30</sup>: [(30/-60)<sub>3</sub>]<sub>s</sub> istifleme dizilimi, <sup>45</sup>: [(45/-45)<sub>3</sub>]<sub>s</sub> istifleme dizilimi, \*: antisimetrik konfigürasyonu ifade etmektedir.

Yanal burkulma davranışı üzerine soğuk ortamın etkisini araştırmak amacıyla hibrit kompozit numuneler 3 gruba ayrılmıştır: 1. grup numuneler 90 gün oda koşulunda, 2. grup numuneler 90 gün soğutucuda (soğuk ortam 1), 3. grup numuneler ise 150 gün soğutucuda (soğuk ortam 2) bekletilmişlerdir. Bekleme süreleri sonunda hibrit kompozit numuneler Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan 100 kN'luk Shimadzu AG-X universal çekme cihazı kullanılarak yanal burkulma deneyine tabii tutulmuşlardır (Şekil 3).



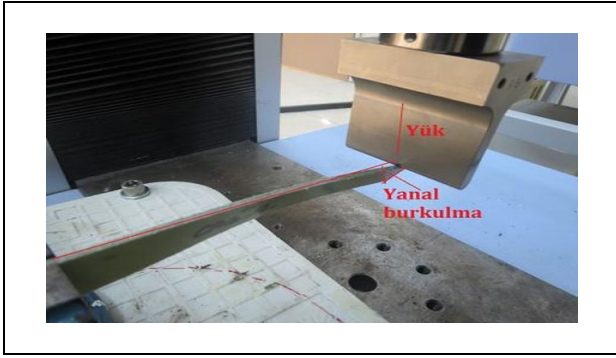
Şekil 3. Shimadzu AG-X çekme test cihazı ve datalogger

Bir ucundan ankastre kiriş davranışı sergileyecek şekilde mesnetlenmiş deney numunesinin, diğer ucundan düşey doğrultuda yük uygulanarak yapılan yanal burkulma deneyinin uygulaması Şekil 4'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4. Yanal burkulma testi şematik resmi

Deneyler 1 mm/dk basma hızı ile gerçekleştirilmiştir. Her grup numune tipi için üç deney yapılarak elde edilen sonuçların ortalamaları alınmıştır. Şekil 5'te yanal yük uygulanması sonucu numunede oluşan deformasyon görülmektedir.



Şekil 5. Yanal yük uygulanması sonucu numunede oluşan deformasyon

### 3. Bulgular

#### 3.1. Yanal burkulma deney sonuçları

Hibrit kompozit numunelerin oda koşulları, soğuk ortam 1 ve soğuk ortam 2'de bekleme süreleri dolduktan sonra  $E_1$  elastisite modülleri belirlenerek Tablo 3'te verilmiştir.

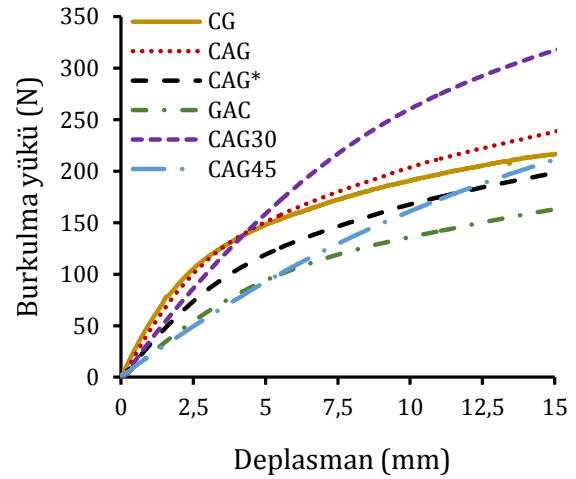
Tablo 3. Gruplara ayrılan hibrit kompozitler [15]

Konfigürasyonlar	$E_1$ (GPa)		
	Oda koşulları	Soğuk ortam-1	Soğuk ortam-2
C <sup>12</sup>	68.64	72.15	75.83
CG	50.70	55.62	66.10
CAG	39.47	42.50	43.47
CAG <sup>30</sup>	30.80	31.70	33.10
CAG <sup>45</sup>	10.71	11.67	12.15
CAG*	38.59	40.62	42.39
GAC	35.08	37.87	39.75

Tablo 3'ten soğuk ortamda bekletilen hibrit kompozitlerin  $E_1$  elastisite modüllerinin arttığı görülmektedir. Bu sonuç literatür ile örtüşmektedir.

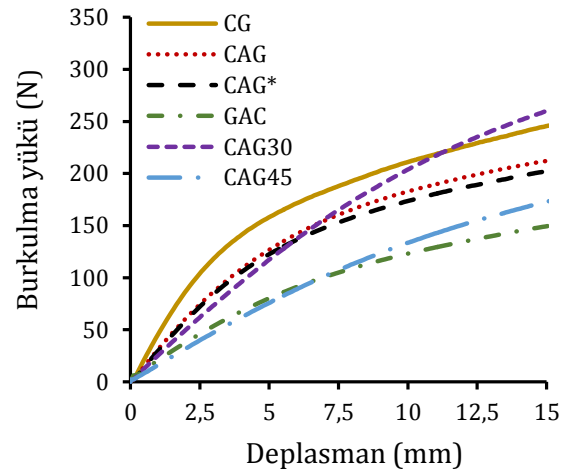
Torabizadeh tarafından yapılan çalışmada, statik yük altındaki farklı oryantasyon açlarına sahip tek yönlü cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin farklı sıcaklıklardaki (25°C, -20°C ve -60°C) mekanik davranışları incelenmiştir. Sıcaklığın düşmesiyle kompozitin çekme ve basma dayanımlarının arttığı belirtilmiştir. Çekme yükleri altında sıcaklık -60°C'a kadar azaldığında boylamasına dayanımın %12 arttığı, basma yükleri altında ise sıcaklığın azalmasıyla boylamasına basma dayanımının %28, enine basma dayanımının %50 arttığı rapor edilmiştir [16].

Hibrit kompozit kirişlerin yanal burkulma deneyleri sonucunda [(0/90)<sub>3</sub>]<sub>s</sub>, [(30/-60)<sub>3</sub>]<sub>s</sub>, [(45/-45)<sub>3</sub>]<sub>s</sub> ve [(0/90)<sub>3</sub>]<sub>as</sub> dizilimine sahip malzemelerin yanal burkulma yük-deplasman grafikleri çizilmiştir. Şekil 6'da 90 gün oda koşullarında bekletilen (1. grup) hibrit kompozitlerin yanal burkulma yükü-deplasman grafiği yer almaktadır.



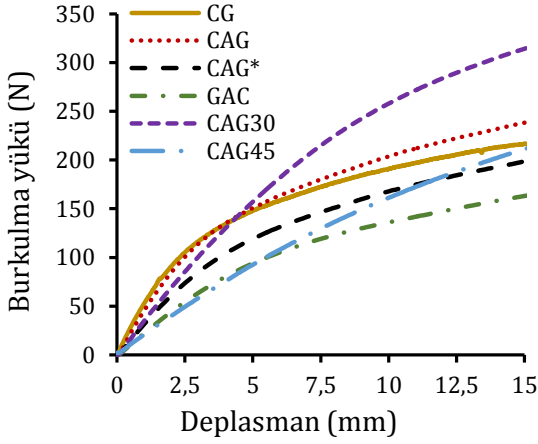
Şekil 6. 90 gün oda koşullarında bekletilen hibrit kompozitlerin yanal burkulma yükü-deplasman grafiği

Şekil 7'de 90 gün soğutucuda bekletilen (2. grup) hibrit kompozit numunelerin burkulma yükü-deplasman grafiği görülmektedir.



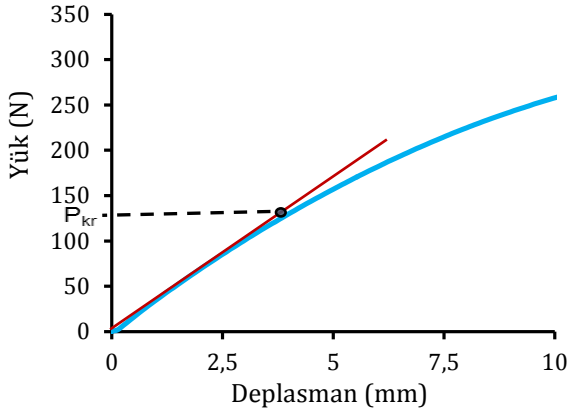
Şekil 7. 90 gün soğuk ortamda bekletilen hibrit kompozitlerin yanal burkulma yükü-deplasman grafiği

Şekil 8'de 150 gün soğutucuda bekletilen (3. grup) hibrit kompozit numunelerin yanal burkulma yükü-deplasman grafiği yer almaktadır.



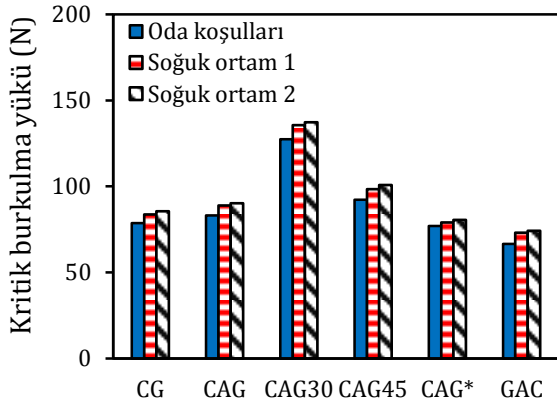
Şekil 8. 150 gün soğuk ortamda bekletilen hibrit kompozitlerin yanal burkulma yükü-deplasman grafiği

Southwell Plot metodu kullanılarak yük-deplasman eğrisinden kritik burkulma ( $P_{kr}$ ) yükü belirlenmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. Kritik yanal burkulma yükünün belirlenmesi

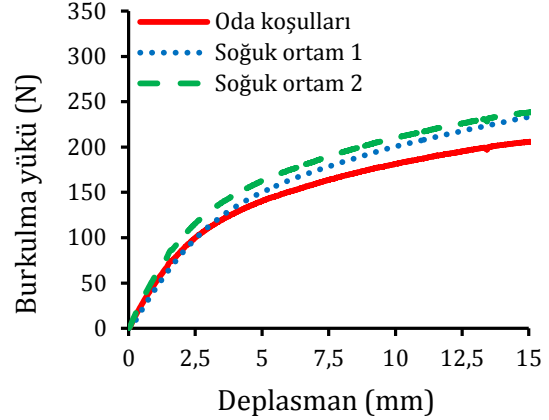
Şekil 10'da tüm ortam koşulları için hibrit kompozit konfigürasyonlarına ait kritik yanal burkulma yükleri verilmiştir.



Şekil 10. Tüm ortam koşulları için hibrit kompozitlerin kritik yanal burkulma yükleri

Bu grafikten görüldüğü üzere, soğuk ortamda bekletilen numunelerin kritik yanal burkulma yük değerleri oda koşullarında bekletilen numunelere göre daha yüksektir. Bütün ortam koşulları için en yüksek kritik yanal burkulma yükü  $[(30/-60)_3]_s$  istifleme dizilimine sahip CAG<sup>30</sup> konfigürasyonunda, en düşük kritik yanal burkulma yükü ise  $[(0/90)_3]_s$  istifleme dizilimine sahip GAC konfigürasyonunda meydana gelmiştir.

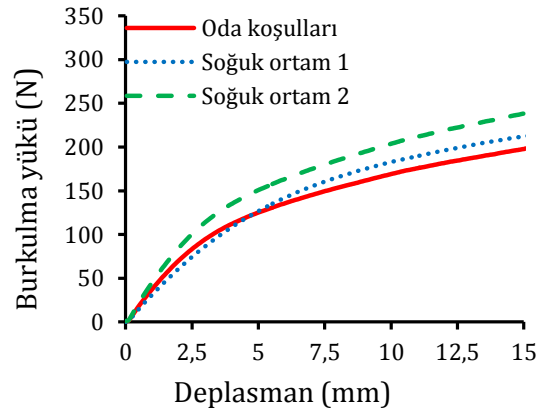
CG için elde edilen yanal burkulma yükü-deplasman grafiği şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. CG için yanal burkulma yükü-deplasman grafiği

Şekil 11'den CG'nin soğuk ortam 1 için kritik yanal burkulma yükü 83.638 N olarak belirlenmiştir. CG kritik burkulma yüküne ulaştıktan sonra numunede kopma gerçekleşene kadar burkulmadan dolayı delaminasyon oluşumu artarak devam etmektedir. Deplasman değeri 15 mm olduğunda 238N yük uygulandığı ve henüz kopmanın gerçekleşmediği görülmektedir.

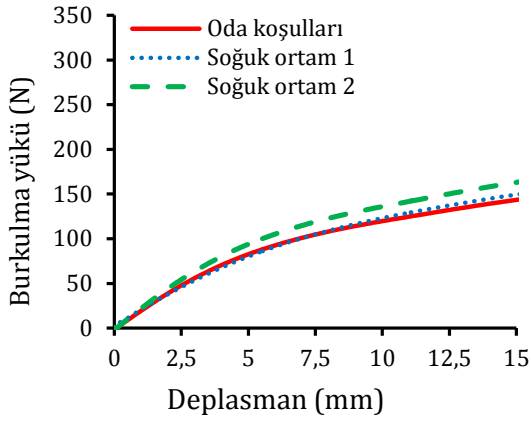
CAG için elde edilen yanal burkulma yükü-deplasman grafiği şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12. CAG için yanal burkulma yükü-deplasman grafiği

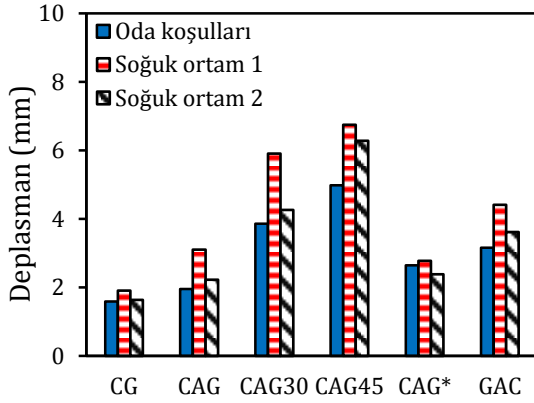
Şekil 12'den CAG için kritik yanal burkulma yükünün soğuk ortam 1 için 88.930 N olduğu belirlenmiştir. Burkulma gerçekleştikten sonra deplasman değeri 15 mm olduğunda 211 N yük uygulandığı ve henüz kopmanın gerçekleşmediği görülmektedir.

GAC için yanal burkulma yükü-deplasman grafiği Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. GAC için yanal burkulma yükü - deplasman grafiği

Şekil 14'te yanal yük uygulanması sonucu hibrit kompozitlerde oluşan deplasmanların ortamlara göre değişimi verilmiştir.



Şekil 14. Hibrit konfigürasyonlarda oluşan deplasmanlar

Şekil 14'ten görüldüğü üzere deplasman değerleri ortamlara göre değişiklik göstermektedir. En yüksek deplasman değerinin 90 gün soğutucuda bekletilen CAG<sup>45</sup>'te meydana geldiği görülmektedir. En düşük deplasman değeri ise 150 gün oda koşullarında bekletilen CG'de görülmüştür.

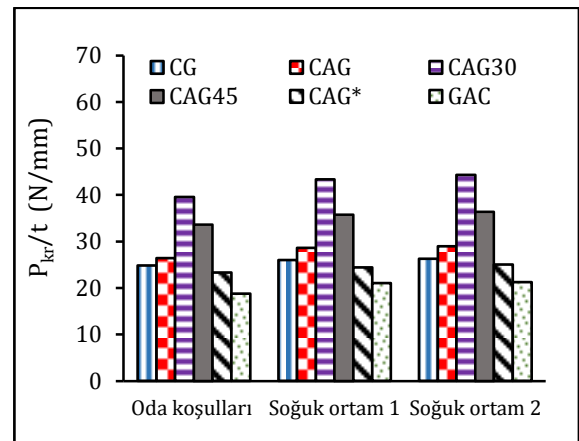
Tablo 4'te hibrit kompozitlerin kritik yanal burkulma yükleri ve deplasman değerleri verilmiştir.

Tablo 4. Hibrit kompozitlerin kritik yanal burkulma yükleri ve deplasman değerleri

Konfigürasyon	Oda koşulları		Soğuk ortam-1		Soğuk ortam-2	
	P <sub>kr</sub> (N)	Deplasman (mm)	P <sub>kr</sub> (N)	Deplasman (mm)	P <sub>kr</sub> (N)	Deplasman (mm)
C <sub>12</sub>	86	2.0	91	2.2	93	2.1
CG	79	1.5	84	1.9	85	1.7
CAG	83	1.9	89	3.1	90	2.2
CAG <sup>30</sup>	127	3.8	136	5.9	138	4.3
CAG <sup>45</sup>	92	4.9	98	6.7	100	6.2
CAG*	77	2.6	80	2.8	81	2.3
GAC	68	3.1	72	4.4	73	3.6

Bu tablodan görüldüğü üzere, bütün ortamlar için en yüksek kritik yanal burkulma yükü CAG<sup>30</sup>'da, en düşük kritik yanal burkulma yükü ise GAC'de meydana gelmiştir. Bütün konfigürasyonlar için soğuk ortamda bekletilen numunelerin kritik yanal burkulma yüklerinin oda koşullarında bekletilen numunelerin yanal burkulma yüklerine göre arttığı görülmektedir. Örneğin 90 gün soğutucuda kalan C<sub>12</sub>'nin kritik yanal burkulma yükünün oda koşullarına göre % 6.47 oranında arttığı, 150 gün soğutucuda kalan C<sub>12</sub>'nin kritik yanal burkulma yükünün ise oda koşullarına göre % 8.62 oranında arttığı belirlenmiştir. 90 gün soğutucuda bekletilen CAG<sup>30</sup>'un kritik yanal burkulma yükünde oda koşullarına göre % 6.41 oranında bir artış gözlenirken, 150 gün soğutucuda bekletilen CAG<sup>30</sup>'un kritik yanal burkulma yükünde % 7.69 oranında bir artış görülmüştür. 90 gün soğutucuda bekletilen CAG<sup>45</sup>'in kritik yanal burkulma yükünde oda koşullarına göre % 6.74 oranında bir artış gözlenirken, 150 gün soğutucuda bekletilen CAG<sup>45</sup>'in kritik yanal burkulma yükünde % 9.18 oranında bir artış görülmüştür. 90 gün soğuk ortamda kalan CAG'nin kritik yanal burkulma yükü oda koşullarına göre % 7.02 oranında artarken, 150 gün soğuk ortamda kaldığında kritik yanal burkulma yükündeki artış oranı % 8.63 olmuştur. 90 gün soğutucuda kalan CG'nin kritik yanal burkulma yükünün oda koşullarına göre % 6.40 oranında arttığı, 150 gün soğutucuda kalan CG'nin kritik yanal burkulma yükünün ise % 8.96 oranında arttığı belirlenmiştir. 90 gün soğutucuda kalan GAC'nin kritik burkulma yükünün oda koşullarına göre % 6.05 oranında arttığı, 150 gün soğutucuda kalan GAC'nin kritik yanal burkulma yükünün ise % 8.51 oranında arttığı belirlenmiştir.

Hibrit kompozit malzemelerin tamamı 12 tabakalı olmasına rağmen farklı fiber konfigürasyonlarından oluştuğu için aynı kalınlıkta üretim mümkün olmamıştır. Konfigürasyonlar arasındaki kalınlık farkını ortadan kaldırmak adına her bir hibrit konfigürasyonunun P<sub>kr</sub> değerleri kalınlığa bölünmüş ve elde edilen P<sub>kr</sub>/t değerleri Şekil 15'te verilmiştir.

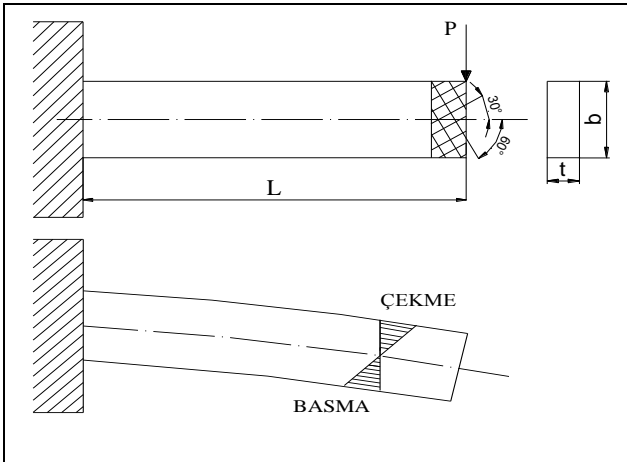


Şekil 15. Hibrit konfigürasyonlarının P<sub>kr</sub>/t değerleri

Şekil 15'ten görüldüğü üzere, tüm ortam koşulları için belirlenen kritik yanal burkulma yüklerinin büyükten küçüğe doğru sıralaması CAG<sup>30</sup>-CAG<sup>45</sup>-CAG-CG-CAG\* ve GAC şeklindedir. En yüksek kritik yanal burkulma yükünün  $[(30/-60)_3]_s$  istifleme dizilimine sahip CAG<sup>30</sup>'da, en düşük kritik yanal burkulma yükünün ise  $[(0/90)_3]_s$  istifleme dizilimli GAC'de olduğu görülmektedir. Soğuk ortam 2'de (150 gün) bekletilen kompozitler için de oda koşullarına göre kritik burkulma yükünde artış olduğu gözlenmektedir. Fakat bu artış oranının soğuk ortam 1'de (90 gün) bekletilen kompozitlere göre düşük olduğu görülmektedir.

$[(0/90)_3]_s$  simetrik ve  $[(0/90)_3]_{as}$  antisimetrik dizilimli hibrit kompozitler karşılaştırıldığında, simetrik dizilimli CAG'nin, antisimetrik dizilimli CAG\*'ye nazaran daha yüksek kritik burkulma yüküne sahip olduğu görülmektedir.

Yanal yüke maruz hibrit kompozit malzemelerde, uygulanan yanal basma yükü sonucu eğilme ve burulma aynı anda oluşur (Şekil 5). Burada eğilmenin etkisi burulmaya nazaran oldukça fazladır. Şekil 16'da gösterildiği üzere, eğilme sonucu kompozitin üst yüzeyi çekme gerilmelerine, alt yüzeyi basma gerilmelerine maruz kalır. Bütün ortam koşulları için  $[(0/90)_3]_s$  konfigürasyonunun kritik yanal burkulma yükü  $[(30/-60)_3]_s$  ve  $[(45/-45)_3]_s$  açılı konfigürasyonlara göre daha düşüktür. Yanal yük uygulanan  $[(30/-60)_3]_s$  ve  $[(45/-45)_3]_s$  dizilimine sahip hibrit kompozitlerde eğilme sonucu üst yüzeyde meydana gelen çekme gerilmelerinin büyük kısmını fiberler taşır.  $[(0/90)_3]_s$  dizilime sahip hibrit kompozitlerde ise eğilme sonucu üst yüzeyde oluşan çekme gerilmelerinin neredeyse tamamını matris taşımak durumundadır. Bu da fiber ve matris arayüzey bağının daha erken bozunmasına, dolayısıyla kompozitin dayanımının düşmesine sebebiyet vermektedir. Bu nedenle  $[(0/90)_3]_s$  dizilimine sahip hibrit kompozit malzemelerin yanal burkulma dayanımları diğer konfigürasyonlara göre düşüktür.



Şekil 16. Yanal yük uygulanması sonucu hibrit kompozit kirişte meydana gelen eğilme

Soğuk ortamın hibrit kompozitlerin burkulma davranışlarını etkilediği görülmektedir. Soğuk ortamda bekletilen hibrit kompozit malzemelerin kritik burkulma yükleri, oda koşullarında bekletilen hibrit kompozit malzemelerin kritik burkulma yüklerine göre artmıştır. Bu sonuç literatür ile benzerlik göstermektedir. Jiangbo ve Junjiang tarafından yapılan çalışmada, eksenel basma yüküne maruz ultra ince cidarlı kompozit tüpler için -80°C, 25°C ve 100°C sıcaklıklarda burkulma testi yapılmıştır. Soğuk ortamda malzemenin sertleşmesinden ötürü -80°C'de elde edilen kritik burkulma yükünün, oda sıcaklığındaki burkulma yüküne kıyasla % 2.2 oranında daha yüksek olduğu belirtilmiştir. 100 °C'de elde edilen kritik burkulma yükünün ise sıcak ortamda matris malzemenin yumuşaması nedeniyle oda sıcaklığındaki burkulma yüküne nazaran % 19.5 daha düşük olduğu belirlenmiştir [17].

Farklı fiber ve oryantasyon açılarının hibrit kompozit malzemelerin yanal burkulma davranışlarını etkilediği sonucuna varılmıştır. Literatürde de, farklı fiber ve istifleme diziliminin tabakalı kompozit malzemelerin kritik yanal burkulma yükünü doğrudan etkilediği belirtilmektedir [18].

Tüm ortam koşulları için en yüksek kritik yanal burkulma yükü  $[(30/-60)_3]_s$  dizilimine sahip hibrit kompozitlerde, en düşük kritik yanal burkulma yükü ise  $[(0/90)_3]_s$  dizilimine sahip hibrit kompozitlerde meydana gelmiştir. Literatür de bu sonucu doğrulamaktadır. Farklı oryantasyon açılarında istiflenmiş kompozit kirişler için en yüksek yanal burkulma dayanımının  $[(30/-60)_3]_s$  oryantasyon diziliminin sahip olduğu rapor edilmiştir [11, 12].

Kompozitlerde burkulma yüzeyindeki dış tabaka tam bir deformasyona maruz kalmaz. Çünkü oluşan deformasyon içteki bitişik tabakalar tarafından sınırlanır ve deformasyonun büyük bir kısmı bu şekilde karşılanmış olur. Bundan dolayı tabakalı hibrit kompozitlerde ara tabakalarda esnek özelliğe sahip aramid fiberin bulunması durumunda yükün diğer tabakalara daha homojen dağılması sağlanabilmekte, bu da matris ve fiber bağının korunmasını sağlamaktadır.

Hibrit kompozitlerde yanal burkulma davranışı istifleme dizilimi, kompoziti oluşturan fiber malzemelerinin mekanik özellikleri, çekme ve basma dayanımları, matris yapısı gibi etkenlere göre değişebilmektedir. Aramid fiberin oldukça esnek, karbon ve E-cam fiberlerin ise gevrek olduğu bilinmektedir. Karbon ve E-cam fiberlerin aramide göre rijitlikleri yüksek olduğu için dış tabaka olarak kullanılmaları uygun olacaktır. Üç farklı ortam için de, her iki dış yüzeyinde karbon bulunan CAG (karbon/aramid/cam) hibrit kompozitinin kritik yanal burkulma yükünün, her iki dış yüzeyinde de cam fiber bulunan GAC (cam/aramid/karbon) hibrit

kompozitine nazaran daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeninin, karbon fiberin güçlü ve yüksek rijitliğe sahip olmasından dolayı, uygulanan kuvveti taşıma kapasitesinin E-cam'a göre daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bütün ortamlar için CAG (karbon/aramid/cam) konfigürasyonunun kritik yanal burkulma yükünün, CG (karbon/cam) konfigürasyonunun kritik yanal burkulma yükünden daha yüksek olduğu görülmüştür. Aramid fiberlerin E-cam ile karbon arasında kullanılması durumunda sahip olduğu yüksek esneklik ve basma dayanımı özelliğinden dolayı uygulanan yükü eşit miktarda tabakalar arasında dağıtabildiği düşünülmektedir. Dolayısıyla oldukça esnek bir özellik gösteren aramid fiberin iç tabakalarda kullanılması ile, oluşan gerilmelerden kaynaklanan şekil değişimine malzemenin daha iyi uyumunu sağlamanın yanısıra kompozitin dayanımını artırdığı kanaati hasıl olmuştur. Literatürdeki çalışmalar da, aramid liflerinin yüksek mekanik özellikler sergilediğini ve mukavemeti artırdığını belirtmektedir [19, 20].

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Yapılan deneysel çalışma sonucunda, soğuk ortamın ve farklı istifleme diziliminin hibrit kompozit malzemelerin kritik yanal burkulma yükünü ve deplasman değerlerini etkilediği görülmüştür.

- İstifleme diziliminin, oryantasyon açılarının, farklı fiber kullanımının ve soğuk ortamın hibrit kompozit malzemelerin yanal burkulma davranışlarını etkilediği sonucuna varılmıştır.
- Hibrit kompozit numunelerin soğuk ortamda kalma süresi arttıkça kritik burkulma yükünün de arttığı belirlenmiştir.
- Soğuk ortamda bekletilen hibrit kompozit numunelerin  $E_1$  elastisite modüllerinin, oda koşullarında bekletilen hibrit kompozit numunelerin  $E_1$  elastisite modüllerine göre arttığı gözlenmiştir.
- Tüm ortam koşulları için belirlenen kritik yanal burkulma yüklerinin büyükten küçüğe doğru sıralaması CAG<sup>30</sup>-CAG<sup>45</sup>-CAG-CG-CAG\* ve GAC şeklindedir.
- En yüksek kritik yanal burkulma yükü [(30/-60)<sub>3</sub>]<sub>s</sub> dizilimine sahip CAG<sup>30</sup>'da, en düşük kritik yanal burkulma yükü ise [(0/90)<sub>3</sub>]<sub>s</sub> dizilimine sahip GAC'de meydana gelmiştir.
- [(0/90)<sub>3</sub>]<sub>s</sub> dizilimli hibrit kompozitlerin [(30/-60)<sub>3</sub>]<sub>s</sub> ve [(45/-45)<sub>3</sub>]<sub>s</sub> dizilimine sahip hibrit kompozitlere nazaran yanal yönden gelen yüke karşı daha zayıf olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle

tasarım yapılırken yanal burkulma sözkonusu olan yerlerde [(0/90)<sub>3</sub>]<sub>s</sub> dizilimli hibrit kompozitlerin kullanılmasının uygun olmayacağı kanaatine varılmıştır.

- Kritik yanal burkulma yükü 30° ve 45° açılı dizilimlerde yüksek, 0° fiber dizilimine sahip numunelerde düşüktür. 30° ve 45° derece yönünde istiflenen fiberler, 0° yönünde istiflenen fiberlere nazaran daha fazla çekme yükü taşıyabilmektedirler.
- Fiber istifleme diziliminin yanal burkulma davranışına doğrudan etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Bütün ortam koşulları için, simetrik dizilime sahip CAG (karbon/aramid/cam) konfigürasyonu ile GAC (cam/aramid/karbon) hibrit konfigürasyonu karşılaştırıldığında; CAG numunelerinin kritik burkulma yüklerinin GAC numunelerinden daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak CAG'nin her iki dış yüzeyinde de yüksek rijitliğe sahip karbon fiberlerin bulunmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. En dış tabakalarda cam fiber yerine karbon fiber bulunması halinde kompozit dayanımının arttığı kanaati hasıl olmuştur.
- Bütün ortam koşullarında CAG (karbon/aramid/cam) hibrit kompozitinin kritik yanal burkulma yükünün, CG (karbon/cam) hibrit kompozitinin yanal burkulma yüküne göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bundan dolayı iç tabakalarda aramid fiber kullanımının hibrit kompozitin kritik yanal burkulma yükünü artırdığı kanaatine varılmıştır.

Meydana gelebilecek yanal burkulmayı azaltabilmek için yanal burkulmaya dayanıklı, yük taşıma kapasitesi daha fazla olan malzemelerin kullanımı tavsiye edilir. Bu nedenle tasarım yapılırken yanal burkulma sözkonusu olan yerlerde [(30/-60)<sub>3</sub>]<sub>s</sub> istifleme dizilimine sahip hibrit kompozitler daha güvenilirdir. Yanal burkulma dayanımı düşük olduğu için [(0/90)<sub>3</sub>]<sub>s</sub> dizilimli hibrit kompozitlerin kullanılması pek önerilmez. Ayrıca istifleme dizilimi açısından da hibrit kompozit dizaynında dış tabakaların yüksek rijitliğe sahip karbon fiberlerden oluşması, iç tabakaların da yüksek esneklik özelliğine sahip aramid fiberler ile düşük maliyetli cam fiberlerden oluşması önerilir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, 4681-D1-16 no'lu BAP projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu proje ile çalışmamızı maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na katkılarından dolayı teşekkür ederiz. Ayrıca deneylerde kullanılan hibrit kompozit malzemelerin üretimini gerçekleştiren Fibermak Firması çalışanlarına ve yanal burkulma



deneylerinin yapıldığı Dokuz Eylül Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü'ne teşekkür ederiz.

### Kaynakça

- [1] Genel K. ed. 2014. Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 971s.
- [2] Demiray, H. 1990. Mukavemet - Katı Cisimlerin Mekaniğine Giriş. Çağlayan Kitabevi, İstanbul, 662s.
- [3] Okutan Baba, B. 2007. Buckling Behavior of Laminated Composite Plates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 26(16), 1637-1655.
- [4] Brooks, R. J., Turvey, G. J. 1995. Lateral Buckling of Pultruded GRP I-Section Cantilever. *Composite Structures*, 32, 203-215.
- [5] Eryiğit, E. 2006. Tabakalı kompozit çubuklarda yanal yük etkisi ile oluşan burkulma davranışlarının incelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 126s, İzmir.
- [6] Ma, M., Hughes O. 1996. Lateral Distortional Buckling of Monosymmetric I - Beams under Distributed Vertical Load. *Thin Walled Structures*, 26(2), 123-145
- [7] Gençoğlu, M. 2011. Tabakalı kompozit levhalarda burkulma analizi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 182s, Elazığ.
- [8] Balcıoğlu, E. H. 2012. Delaminasyonlu tabakalı kompozitlerin yanal burkulması. Uşak Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 119s, Uşak.
- [9] Zor, M. 2003. Delamination Width Effect on Buckling Loads Simply Supported Woven-Fabric Laminated Composite Plates Made of Carbon/Epoxy. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 22(17), 1535-1546.
- [10] Suemasu, H., Kumagai, T., Gozu, K. 1998. Compressive Behavior of Multiply Delaminated Composite Laminates. *Experiment and Analytical Development. AIAA Journal*, 36(7), 1279-1285.
- [11] Pasinli, A. 2013. Shape and Position Effects of Double Holes on Lateral Buckling of Cantilever Composite Beams. *Composites: Part B*, 55, 433-439.
- [12] Erklığ, A., Yeter, E., Bulut, M. 2013. The Effects of Cut-Outs on Lateral Buckling Behavior of Laminated Composite Beams. *Composite Structures*, 104, 54-59.
- [13] Sayman, O., Benli, S., Arman, Y., Doğan, T. 2009. Karbon cam lifi hibrit kompozit malzemelerin farklı ortam koşulları altında düşük hızlardaki darbe dirençlerinin geliştirilmesi. Tübitak Projesi, Proje No: 107M332, 81s, İzmir.
- [14] Fibermak Composites, 2017. Erişim tarihi: 15.7.2016.<http://www.fibermakcomposites.com>
- [15] Kayıran, H. F. 2018. Farklı ortam koşullarına maruz hibrit kompozit plakalarda burkulma davranışının incelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 139s, Isparta.
- [16] Torabizadeh, M. A. 2013. Tensile, Compressive and Shear Properties of Unidirectional Glass-Epoxy Composites Subjected to Mechanical Loading and Low Temperature Services. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 20, 299-309.
- [17] Jiangbo, B., Junjiang, X. 2014. Temperature Effect on Buckling Properties of Ultra-Thin-Walled Lenticular Collapsible Composite Tube Subjected to Axial Compression. *Chinese Journal of Aeronautics*, 27(5), 1312-1317.
- [18] Yeter, E. 2013. Buckling effect investigation of hybrid laminated composite plate. Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 161s, Gaziantep.
- [19] Blaşcu, V. 2010. Aramid Fibres for Technical Textiles II. Forms, Availability and Applications. *Buletinul Institutului Politehnic Din, Iaşi, LVI (LX)*, 10-16.
- [20] Barut, C. 2015. Aramid esaslı kompozit malzemelerin balistik performanslarının ve mekanik davranışlarının incelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 66s, Afyonkarahisar.