

## Tek-katlı kompozit dalgalı yayların tasarımı, modellenmesi ve yapısal analizi

### Design, modeling and structural analysis of single-turn composite wave springs

Bertan BEYLERGİL<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Antalya, Türkiye.  
bertan.beylergil@alanya.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 13.08.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 20.06.2019  
\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2019.65890  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Bu çalışmada, tek-katlı kompozit dalgalı yayların bası yükü altındaki mekanik davranışları nümerik olarak incelenmiştir. Nümerik analizler, Ansys Workbench ve ACP Modülü sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılmıştır. Nümerik doğrulama çelik dalgalı yay probleminin nümerik sonuçları ile analitik sonuçlar karşılaştırılarak yapılmıştır. Doğrulamadan sonra, sonlu elemanlar modeli bu çalışma için genişletilmiştir. Kompozit malzeme olarak karbon fiber/epoksi ve cam fiber/epoksi seçilmiştir. Tasarım parametreleri olarak dalga sayısı (4, 6 ve 8) ve kompozit kalınlığı (tabaka sayısı; 4, 6, 8, 10 ve 12) ele alınmıştır. Bu tasarım parametreleri ve malzeme türleri için yay rijitlikleri hesaplanmış ve çelik yay ile kıyaslamalar yapılmıştır. Yayların hasar yükleri, Tsai-Wu hasar kriteri kullanılarak belirlenmiştir. Buna ek olarak, hibritleştirme etkisinin yayın mekanik davranışa etkisi incelenmiştir. Nümerik sonuçlar, kompozit tasarım parametreleri doğru olarak seçildiğinde çeliğe yakın rijitlik değerlerinin ve yayda önemli ağırlık azaltımının sağlanabileceğini göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:**Kompozit, Dalgalı yay, Rijitlik, Sonlu elemanlar analizi

#### Abstract

In this study, the mechanical behavior of single-turn composite wave springs under compressive loads were investigated numerically. Numerical verification of the finite element (FE) model was carried out by comparing the numerical results against analytical calculations. After verification, the FE model was extended to this study. As spring material, carbon fiber/epoxy and E-glass fiber/epoxy were selected. As design parameters, the number of waves (4, 6 and 8) and the thickness of the wave spring (number of plies; 4, 6, 8, 10 and 12) were considered. The stiffness of the composite wave springs was determined by varying these design parameters and material types. The composite spring stiffness values were compared with those made of steel. The failure loads of the wave springs were determined by using Tsai-Wu failure criteria. Additionally, the hybridization effect on the mechanical response of wave springs was investigated. The numerical results showed that it was possible to obtain stiffness values which is comparable with that of steel spring and significant reduction in spring weight if the composite design parameters were selected properly.

**Keywords:** Composite, Wave spring, Stiffness, Finite element analysis

## 1 Giriş

Polimer matrisli fiber takviyeli kompozitler, yüksek özgül mukavemet ve rijitlikleri, korozyon dayanımları ve iyi sönümleme kabiliyetleri nedeniyle ağırlık azaltımının önemli olduğu otomobil, uzay ve havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bilim insanları, çelik ve alüminyum gibi geleneksel malzemeler yerine kompozit malzemelerin kullanıldığı mühendislik alanlarını genişletmek için çalışmalarını sürdürmektedir [1],[2].

Mekanik yaylar, yollardaki düzensizlikler nedeniyle araç şasisini hasara uğramaktan koruyan süspansiyon sistemlerinin önemli elemanlarından biridir. Bu yaylar, şok emici işlevi görerek, oluşan kinetik enerjinin dağıtılmasını bu sayede araca ve dolayısıyla yolcuya geçmesine engel olarak sürüş konforu sağlamaktadırlar. Günümüzde bu amaç için farklı tip yaylar kullanılmaktadır. Bunlar; helisel, yaprak ve dalgalı yaylardır. Helisel yaylar, kompozit malzemedan yapılmaları halinde yüklem durumunda yüksek kayma (burulma) gerilmelerine maruz kalmaları nedeniyle delaminasyon hasarına uğramaktadırlar. Dalgalı yaylar ise düzensiz şekilli diskler olup, düşük ve orta büyüklükteki statik yükler için kullanılmaktadır. Bu yaylar, helisel yaylara göre yarı oranda yer kaplamaları nedeniyle dar ve sınırlı alanlarda birçok uygulamada tercih edilmektedirler [3]-[5].

Anizotropik yapıları nedeniyle kompozit malzemelerin helisel yaylarda kullanım alanları sınırlıdır. Bu nedenle, kompozit malzemelerin daha çok yaprak yay formunda kullanıldığı görülmektedir. Literatürde kompozit yaprak yaylar ile ilgili çok sayıda deneysel ve nümerik çalışma bulunmaktadır. 2018 yılında Ashwini ve Mohan Rao [6] yaptıkları çalışmada kompozit yaprak yay ile ilgili deneysel ve nümerik çalışmaları derlemişlerdir. Literatürde, helisel ve yaprak yaylar dışında, farklı geometrilere sahip kompozit yayların (eliptik ve yarı-eliptik yaylar) statik analizleri ve yorulma ömürlerinin optimizasyonu ile ilgili çalışmalara rastlanmaktadır [7],[8]. Tek-katlı kompozit dalgalı yaylar ile ilgili literatürde az sayıda çalışma bulunmaktadır. Erfain-Naziftoosi ve diğ. [2] yaptıkları çalışmada dokuma karbon fiber/epoksi kumaştan üretilmiş kompozit yayların mekanik davranışlarını analitik ve nümerik olarak incelemişlerdir. Yayın dalga sayısının ve hibritleştirilmenin kompozitin rijitliği üzerine etkisiyle ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu yayların mekanik davranışının daha iyi anlaşılabilmesi ve literatürdeki boşluğu doldurabilmek için daha çok çalışma yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, tek-katlı kompozit dalgalı yayların mekanik davranışları nümerik olarak incelenmiştir. Tasarım değişkenleri olarak kompozit malzemenin türü (karbon fiber/epoksi, cam fiber/epoksi), kompozit kalınlığı (tabaka sayısı) ve dalga sayısı ele alınmıştır.

## 2 Çelik malzemeden üretilmiş dalgalı yayların sonlu elemanlar analizi ve nümerik doğrulama

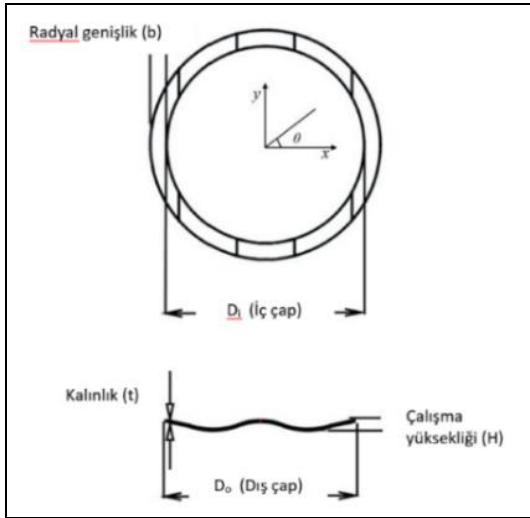
### 2.1 Analitik çözüm

İzotropik malzemeden üretilmiş dalgalı bir yayın çalışma gerilmesi değerleri (MPa) ve çökme miktarı (mm) sırasıyla Denklem (1) ve Denklem (2)'de verilmiştir [9].

$$\sigma = \frac{3\pi P D_m}{4bt^2 N^2} \quad (1)$$

$$\frac{\lambda}{K} = \frac{P D_m^3 D_i}{E b t^3 N^4 D_o} \quad (2)$$

Burada, sırasıyla  $E$ , izotropik malzemenin elastik modülü (MPa),  $b$  radyal yöndeki yay genişliği (mm),  $D_o$  yayın dış çapı (mm),  $D_i$  yayın iç çapı (mm),  $D_m$  ortalama çap (mm),  $N$  tek turdaki dalga sayısı ve  $K$  ise yay katsayısı faktörüdür (-).  $K$  değeri, bu çalışmada  $N = 4, 6$  ve  $8$  değerleri için sırasıyla 3.88, 2.90 ve 2.30 olarak alınmıştır[9].  $N$  değeri (tek kattaki dalga sayısı) 4, 6 ve 8 olarak alınmıştır.  $P$  yaya uygulanan sıkıştırma yükü (Newton)'dür. Paslanmaz çelik yay malzemesinin (DIN X7CrNiAl 17-7) elastik modülü ( $E$ ) ve yoğunluğu, sırasıyla 200 GPa ve 7900 kg/m<sup>3</sup> olarak alınmıştır. Şekil 1'de ele alınan dalgalı yayın geometrik özellikleri gösterilmiştir.

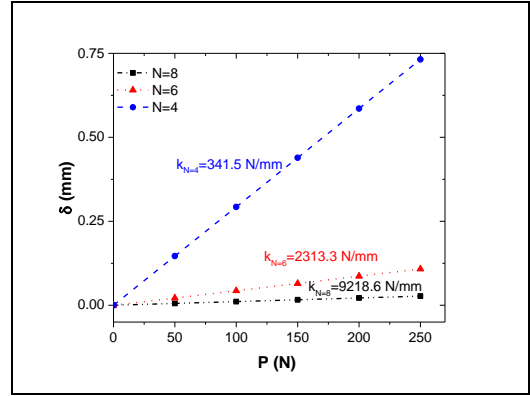


Şekil 1: Tek katlı dalgalı yayın geometrisi (N=4) [2].

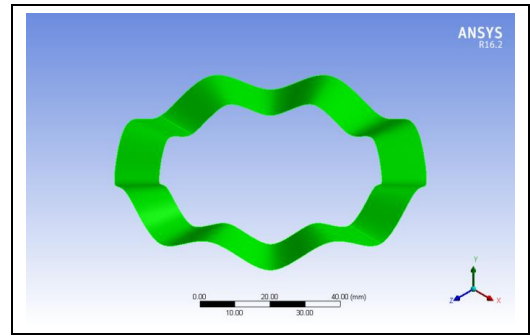
İç çap ( $D_i$ )=63.5 mm, dış çap ( $D_o$ )=88.9 mm, radyal yönde genişlik  $b=12.7$  mm, kalınlık ( $t$ )=0.864 mm, çalışma yüksekliği ( $H$ )=8.13 mm ve ortalama çap ( $D_m$ )=76.2 mm'dir. Buna göre, çelik malzemeden üretilmiş, tek-turlu ve 4, 6 ve 8 dalgalı yayın yük-deplasman karakteristikleri, Denklem (1) kullanılarak elde edilmiş ve Şekil 2'de verilmiştir. Çelik malzeme için 4, 6 ve 8 dalgalı yayların rijitlikleri analitik olarak sırasıyla 341.5, 2313.3 ve 9218.6 N/mm olarak belirlenmiştir.

### 2.2 Tek katlı çelik dalgalı yayın modellenmesi ve sonlu elemanlar analizleri

Bu çalışmada incelenen çelik malzemeden üretilmiş tek-turlu dalgalı yayların katı modeli, Solidworks programı kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 3). Daha sonra, bu model üzerinde ANSYS Workbench 16.2 sonlu elemanlar programı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2: Çelik malzemeden oluşan tek katlı dalgalı yayın N=4, 6 ve 8 için yük-deplasman (P-δ) karakteristiği.



Şekil 3: Dalgalı çelik yayın (N=8) katı modelinin görüntüsü.

Yayın sonlu elemanlar modeli, üç serbestlik dereceli (x, y ve z yönünde ötelenme) SOLID 185 elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Yay kalınlığı boyunca dört elemana bölünmüştür.

Yayın ağ yapısında toplam 13416 SOLID 185 eleman (18060 düğüm noktası) kullanılmıştır. Şekil 4'te dalgalı yayın ağ yapısı gösterilmiştir. Yayın ağ yapısı oluşturulduktan sonra, yayın sıkıştırılmasında kullanılmak üzere için üst ve alt plakaların ANSYS Workbench 16.2 kullanılarak 3D modeli oluşturulmuştur. Daha sonra hem üst hem de alt plakaların SOLID 185 elemanlar kullanılarak sonlu elemanlar ağ yapıları oluşturulmuştur. Plakaların ağ yapısında toplam 62568 SOLID 185 eleman (283,926 düğüm noktası) kullanılmıştır. Şekil 5'te genel ağ görüntüsü verilmiştir. Modelde toplam 75984 eleman ve 301986 düğüm noktası kullanılmıştır. Plakalar ile yay arasındaki temas durumu, analizde plakalar ve yay arasında bir ayrılma olmadığı kabulü ile no-separation olarak tanımlanmıştır.

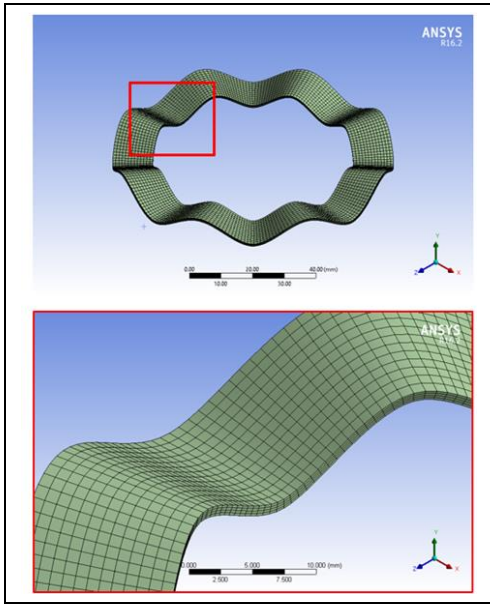
Analizlerde, alt plakanın alt yüzeyinin hareketi x, y ve z yönünde harekete kısıtlanmış (fixed support), üst plakaya -y yönünde 50 Newton yük uygulanmıştır. Şekil 6'da yükleme koşulları gösterilmiştir.

Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da sırasıyla N=4, 6 ve 8 için analiz sonucunda yayda meydana gelen deplasman değerleri gösterilmiştir. Tablo 1'de 50 Newton yük altında oluşan sehim miktarları ve yay çalışma gerilme değerleri gösterilmiştir. N=4, 6 ve 8 için yayda meydana gelen deplasman değerleri sırasıyla 0.14148, 0.026101, 0.005374 mm olarak belirlenmiştir. Görüldüğü gibi, yaydaki dalga sayısı arttıkça yayın çökme miktarında azalma görülmektedir. Bunun nedeni, dalga sayısı arttıkça yüke maruz kalan yay temas yüzey alanının artmasıdır.

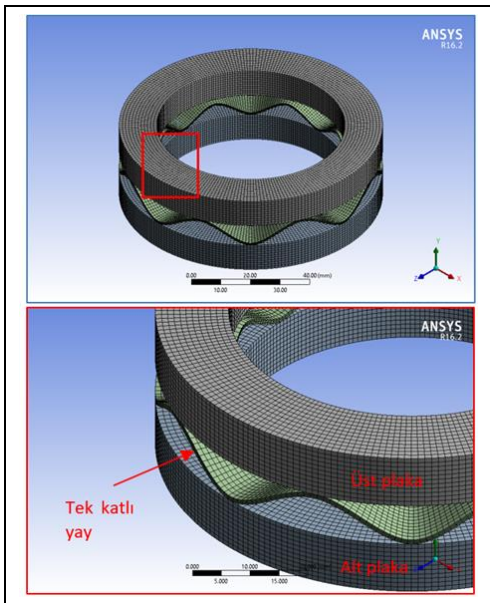
Tablo 1: N=4, 6 ve 8 olması durumunda yayda meydana gelen çökme değerleri, çalışma gerilmesi ( $\sigma_x$ ) ve eşdeğer von-Mises ( $\sigma_{eqv}$ ) gerilme değerleri.

N	F (Newton)	$\delta$ (mm)	Çalışma gerilmesi ( $\sigma_x$ , MPa)	Eşdeğer von-Mises gerilmesi ( $\sigma_{eqv}$ , MPa)
4	50	0.1414	53.9	56.8
6	50	0.026	22.9	24.6
8	50	0.00537	14.8	17.6

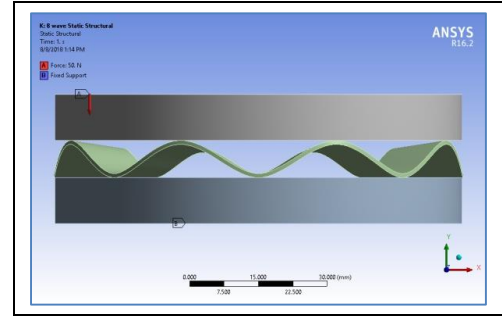
Yüke direnç gösteren yüzey alanının artmasıyla aynı yük altında daha az çökme görülmektedir. N=4, 6 ve 8 için yayda meydana gelen çalışma gerilme değerleri ( $\sigma_x$ ) sırasıyla 53.92, 22.9, 14.83 MPa olarak belirlenmiştir. Çökme miktarındaki düşüğe paralel olarak, yay üzerinde oluşan eşdeğer gerilmelerde de azalma görülmektedir.



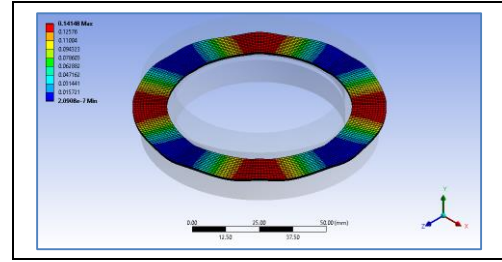
Şekil 4: Tek katlı N=8 dalgali çelik yayın 3D mesh (ağ) yapısı.



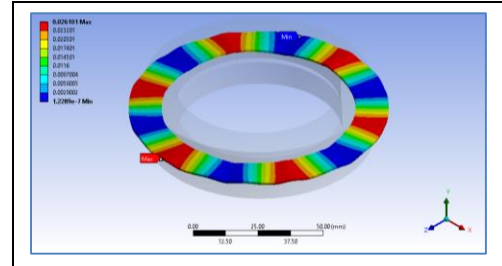
Şekil 5: Tek katlı dalgali çelik yay ve plakaların ağ yapısı görüntüsü.



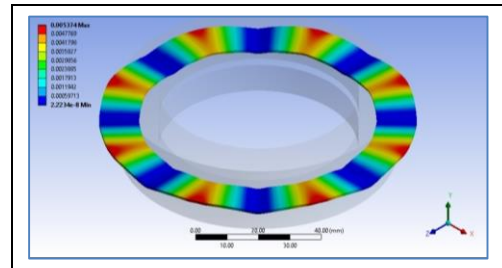
Şekil 6: Yükleme koşulları (A: 50 Newton, -y yönünde, B:sabitlenmiş).



Şekil 7: Yayda y yönünde meydana gelen sehim miktarı ( $\delta$ ) (N=4).



Şekil 8: Yayda y yönünde meydana gelen sehim miktarı ( $\delta$ ) (N=6).



Şekil 9: Yayda y yönünde meydana gelen sehim miktarı ( $\delta$ ) (N=8).

N=4, 6 ve 8 için yayda meydana gelen eşdeğer gerilme von-Mises gerilme değerleri sırasıyla 56.87, 24.60, 17.56 MPa olarak belirlenmiştir. Çökme miktarındaki düşüğe paralel olarak, yay üzerinde oluşan eşdeğer von-Mises gerilmeleri de azalma görülmektedir. Yay kütleleri (M), N=4, N=6 ve N=8 için sırasıyla 21.29 gram, 22.17 gram ve 22.66 gram olarak belirlenmiştir.

### 2.3 Nümerik doğrulama

Analizler sonucunda elde edilen veriler ile analitik sonuçların karşılaştırılması Tablo 2'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, analiz sonuçları analitik sonuçlarla uyum göstermektedir.

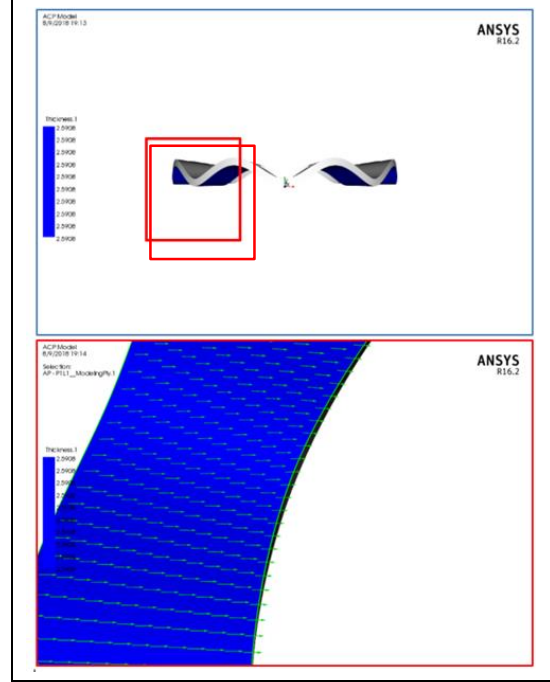
Çalışma gerilmeleri açısından tüm analiz sonuçları için hata oranı %13 mertebesinde düşüktür. Yay rijitliğinde görülen N=6 için %20 mertebesindeki hata, analitik hesaplamada kullanılan K faktörü ile ilgilidir. Analitik hesaplamalarda dikkate alınmayan üst ve alt plaka ile yay arasındaki temas durumu bu farkın bir diğer sebebidir. Ayrıca, literatürde mevcut olan çalışmalar incelendiğinde bu hata oranının (yalnız N=6'da yüksek hata oranı görülmüştür) kabul edilebilir seviyede olduğu görülmektedir. Erfain-Naziftoosi ve diğ. [2], yaptıkları analitik ve nümerik karşılaştırmalarda %23 civarında hata oranı tespit etmişlerdir. N=4 ve N=8 için yay rijitliği nümerik değerleri, analitik sonuçlarla önemli ölçüde uyum göstermektedir. Nümerik doğrulama işleminden sonra, çelik yay için yapılan analizler farklı tipteki kompozit malzemeler için tekrar edilerek tek-katlı kompozit yay performansı ile çelik yay performansı kıyaslanacaktır.

### 3 Tek-katlı kompozit yaprak yayların sonlu elemanlar analizi

#### 3.1 Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

Bu bölümde, Tablo 3'te mekanik özellikleri verilen, tek yönlü karbon fiber/epoksi (KF/EP) ve cam fiber/epoksi (CF/EP) malzemeden oluşan kompozit yayların statik analizleri gerçekleştirilmiştir. N=4, 6 ve 8 olarak değiştirilmiştir. Yayın geometrik özellikleri, çelik malzemeden üretilmiş yay verileri ile kıyaslama yapılabilmesi için aynen alınmıştır. Parametrik olarak, kompozit tabaka sayısı n=4, 6, 8, 10 ve 12 olarak alınmıştır. Buna göre, tabaka dizilişi ise [(0/90)<sub>n-2</sub>]<sub>anti-simetrik</sub>'dir. Tabaka kalınlığı 0.2159 mm olarak alınmıştır. Yay kalınlığı 4, 6, 8, 10 ve 12 tabaka için sırasıyla 0.8636, 1.2954, 1.7272, 2.159 ve 2.5908 mm olarak belirlenmiştir. Analiz aşamalarında, çelik yay için yapılan işlem sırası takip edilmiştir. Çelik yay modelinden farklı olarak üst plaka ve alt plaka oluşturulduktan sonra, ACP-Pre modülü kullanılarak kompozit tabaka sayısı, kalınlığı ve fiber oryantasyonları tanımlanmıştır. Şekil 10'da kompozit yaydaki fiber dizilimleri gösterilmiştir. ACP-Post modülünde ise belirlenen hasar kriterine göre maksimum

çalışma aralığı tespit edilmiştir. Maksimum çalışma aralığının belirlenmesi ile detaylı bilgi altta verilmiştir.



Şekil 10: Kompozit yaprak yay modeli ve 0° fiber dizilimine sahip 1. No.lu tabaka (N=8, n=12) (Yeşil oklar fiber dizilimini göstermektedir).

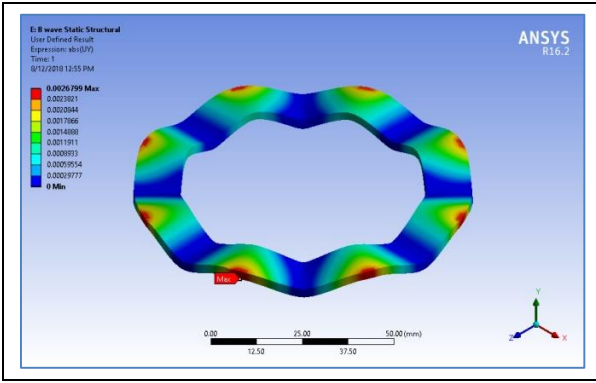
Analizlerde, alt plakanın alt yüzeyinin hareketi x, y ve z yönünde harekete kısıtlanmış (fixed support), üst plakaya -y yönünde 50 (Newton) yük uygulanmıştır. Şekil 11 ve Şekil 12'de sırasıyla karbon fiber/epoksi ve cam fiber/epoksi malzemeden üretilmiş (N=8, n=12) tabakalı kompozit yayın analiz sonuçları (sehim miktarları) gösterilmiştir.

Tablo 2: Çelik tek-katlı yay için elde edilen analitik ve nümerik sonuçların karşılaştırılması.

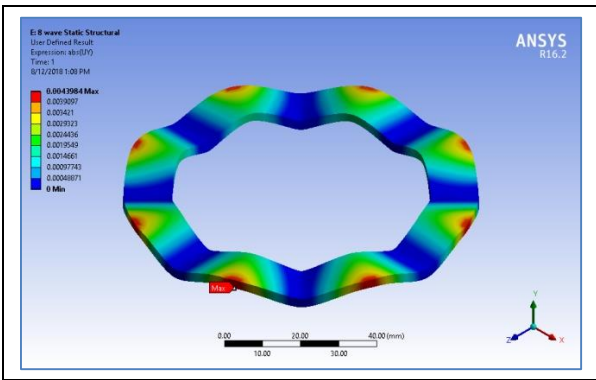
N	Yay rijitliği (N/mm) $k_{analitik}$	Yay rijitliği (N/mm) $k_{nümerik}$	Çalışma gerilmesi (MPa)		% hata (Yay rijitliği)	% hata (Çalışma gerilmesi)
			$\sigma_{analitik}$	$\sigma_{nümerik}$		
4	341.5	353.6	59.2	53.9	3.54	8.9
6	2313.3	1923.0	26.3	22.9	20.2	12.9
8	9218.6	9310.9	14.81	14.80	1.0	0.06

Tablo 3: Karbon fiber/epoksi ve cam fiber/epoksi malzemenin mekanik özellikleri[10],[11].

Tek yönlü KF/EP					
$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$E_3$ (GPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	
129.0	9.5	9.5	0.34	0.52	
$\nu_{23}$	$G_{12}$ (GPa)	$G_{23}$ (GPa)	$G_{13}$ (GPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	
0.34	4.7	3.2	4.7	1600	
Tek yönlü CF/EP					
$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$E_3$ (GPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	
41.0	10.4	10.4	0.28	0.50	
$\nu_{23}$	$G_{12}$ (GPa)	$G_{23}$ (GPa)	$G_{13}$ (GPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	
0.28	4.3	3.5	4.3	1900	



Şekil 11: KF/EP malzemeden yapılmış kompozit yayda oluşan sehim miktarı (N=8, n=12).



Şekil 12: CF/EP malzemeden yapılmış kompozit yayda meydana gelen sehim miktarı (N=8, n=12).

### 3.2 Tek-katlı karbon fiber/epoksi kompozit dalgalı yayın rijitliği ve çelik yay ile performans karşılaştırması

Tablo 4'te farklı tabaka ve dalga sayıları için karbon fiber epoksi ve cam fiber/epoksi malzeme için kompozit yayın rijitlik değerleri verilmiştir.

Tablo 4: Karbon fiber/epoksi ve cam fiber/epoksi malzemeden yapılmış tek-katlı kompozit dalgalı yayın rijitlik değerlerinin (N/mm) tabaka sayısı (n) ve dalga sayısı (N)'e göre değişimi.

k (N/mm) KF/EP	$t_{\text{kompozit}}/t_{\text{çelik}}$	N (Dalga sayısı)		
		4	6	8
n=4	1.0	60.29 (353.6)	340.13 (1923.0)	1655.35 (9310.9)
n=6	1.5	164.65	939.32	4425.95
n=8	2.0	329.09	1883.24	8225.04
n=10	2.5	555.76	3194.07	13107.19
n=12	3.0	845.86	4851.07	18657.4

k (N/mm) CF/EP	$t_{\text{kompozit}}/t_{\text{çelik}}$	N (Dalga sayısı)		
		4	6	8
n=4	1.0	33.46 (353.6)	190.72 (1923.0)	885.3 (9310.9)
n=6	1.5	90.08	309.06	2435.22
n=8	2.0	182.08	543.49	4668.97
n=10	2.5	311.60	1772.92	7734.19
n=12	3.0	481.83	2771.0	11367.77

Görüldüğü gibi, tabaka sayısı arttıkça yani yayın kalınlığı arttıkça malzemenin rijitliğinde artış görülmektedir. Tabaka sayısının üç kat artması ile rijitlik değerlerinde 10-13 kat mertebesinde artış sağlanmaktadır. Bu da kompozitin eğilme rijitliğini belirleyen eğilme matrisindeki artış ile açıklanabilir. Dalga sayısı arttıkça yüke direnç gösteren yüzey alanı artmakta ve böylece malzemenin direngenliği artmaktadır. Buna ek olarak, Tablo 4'te yay malzemesinin aynı kalınlıkta alınan çelik olması durumunda elde edilen değerler karşılaştırma amacıyla parantez içerisinde verilmiştir. Görüldüğü gibi, n=4 dalga sayısı alındığında kompozit malzemeden yapılmış yayın rijitlik değerleri, çelik yaya kıyasla düşüktür. Ancak, tabaka sayısı arttıkça, kompozit yayın rijitliğinde artış meydana gelmektedir. Cam fiber/epoksi malzeme ele alındığında, karbon fiber/epoksiye göre elastik modül değerlerinin daha düşük olması nedeniyle, elde edilen yay rijitlikleri de daha düşüktür. Buna ek olarak, cam fiber/epoksi kompozitten yapılmış yayın, kalınlık üç kat arttırıldığında aynı dalga sayısına sahip çelik yayla kıyasla %22-%44 oranında daha yüksek yay rijitliğine sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 5'te karbon fiber/epoksi ve cam fiber/epoksi malzemeden yapılmış tek-katlı kompozit dalgalı yayın kütlelerinin tabaka sayısı (n) ve dalga sayısı (N)'e göre değişimi.

Tablo 5: Karbon fiber/epoksi ve cam fiber/epoksi malzemeden yapılmış tek-katlı kompozit dalgalı yayın kütlelerinin (gram) tabaka sayısı (n) ve dalga sayısı (N)'e göre değişimi.

M (gram) KF/EP	$t_{\text{kompozit}}/t_{\text{çelik}}$	N (Dalga sayısı)			% ağırlık azaltımı
		4	6	8	
n=4	1.0	4.34	4.52	4.61	79.6
n=6	1.5	6.51	6.78	6.93	69.4
n=8	2.0	8.68	9.04	9.22	59.2
n=10	2.5	10.85	11.29	11.54	49.0
n=12	3.0	13.03	13.55	13.84	38.9

M (gram) CF/EP	$t_{\text{kompozit}}/t_{\text{çelik}}$	N (Dalga sayısı)			% ağırlık azaltımı
		4	6	8	
n=4	1.0	5.15	5.36	5.48	75.8
n=6	1.5	7.73	8.05	8.23	63.6
n=8	2.0	10.31	10.72	10.97	51.5
n=10	2.5	12.88	13.41	13.71	39.5
n=12	3.0	15.46	16.08	16.45	27.4

Aynı tabloda, çelik yaya göre sağlanan yüzdece ağırlık azaltımı değerleri verilmiştir. Çelik yaya kıyasla hem karbon fiber/epoksi hem de cam fiber/epoksi kompozit malzeme kullanılması durumunda önemli ağırlık azaltımı sağlandığı görülmektedir. Görüldüğü gibi tabaka sayısı arttıkça kompozitin ağırlığı artmakta buna bağlı olarak da elde edilen ağırlık azaltımı yüzdeleri düşmektedir. Çelik yay yerine cam fiber/epoksi malzeme kullanılması durumunda %27 oranında bir ağırlık azaltımı sağlanmaktadır. Bu değer, 10 tabakalı karbon fiber/epoksi kompozit yay olması durumunda %49 değerine ulaşmaktadır. Yayın rijitliği ise 1.41 kat artmaktadır.

### 3.3 Kompozit yaydaki maksimum hasar yüklerinin belirlenmesi

Bu bölümde yukarıda ele alınan karbon fiber/epoksi ve cam fiber/epoksi kompozit yayların maksimum hasar yükleri Denklem (3)'te verilen Tsai-Wu kriteri (e) kullanılarak bulunmuştur [12]. Denklem (3)'teki malzemenin X (fiber doğrultusu), Y (fibere dik doğrultu) ve Z (fibere dik doğrultu) yönlerindeki mukavemet değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6: KF/EP ve CF/EP malzemenin mukavemet (MPa) değerleri [10],[11].

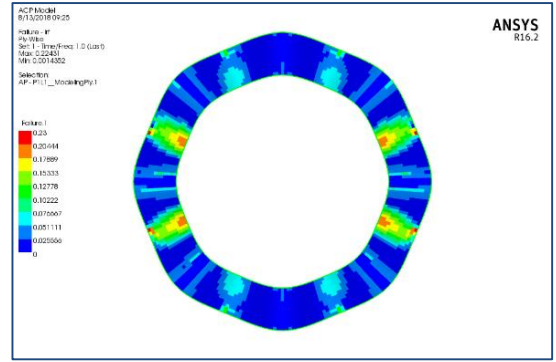
Tek yönlü KF/EP				
X <sub>t</sub> (MPa)	Y <sub>t</sub> (MPa)	Z <sub>t</sub> (MPa)	X <sub>c</sub> (MPa)	Y <sub>c</sub> (MPa)
1439	98	98	-1318	-125
Z <sub>c</sub> (MPa)	S <sub>xy</sub> (MPa)	S <sub>yz</sub> (MPa)	S <sub>xz</sub> (MPa)	
-125	79	79	79	
Tek yönlü CF/EP				
X <sub>t</sub> (MPa)	Y <sub>t</sub> (MPa)	Z <sub>t</sub> (MPa)	X <sub>c</sub> (MPa)	Y <sub>c</sub> (MPa)
1140	39	39	-620	-128
Z <sub>c</sub> (MPa)	S <sub>xy</sub> (MPa)	S <sub>yz</sub> (MPa)	S <sub>xz</sub> (MPa)	
-128	89	89	89	

Kompozit yaydaki her tabaka için Tsai-Wu hasar indeksi hesaplanmış ve hasar yükü uygulanan yükün (50 Newton),maksimum hasar indeksine bölünmesiyle elde edilmiştir.

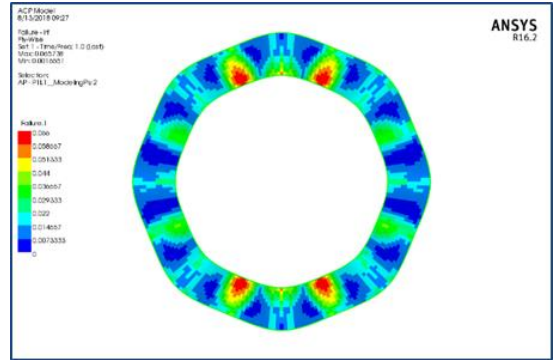
$$\frac{\sigma_x^2}{X_c X_t} + \frac{\sigma_y^2}{Y_c Y_t} + \frac{\sigma_z^2}{Z_c Z_t} + \frac{\tau_{xy}^2}{S_{xy}^2} + \frac{\tau_{yz}^2}{S_{yz}^2} + \frac{\tau_{xz}^2}{S_{xz}^2} + \sigma_x \left( \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \right) + \sigma_y \left( \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \right) + \sigma_z \left( \frac{1}{Z_t} - \frac{1}{Z_c} \right) + f_{xy} \sigma_x \sigma_y + f_{yz} \sigma_y \sigma_z + f_{xz} \sigma_x \sigma_z = e^2 \begin{cases} e < 1, \text{hasar yok} \\ e > 1, \text{hasar} \end{cases} \quad (3)$$

Şekil 13'te dalga sayısı (N=8) ve dört tabakalı (n=4) cam fiber/epoksi kompozit yayın Tsai-Wu hasar indeks (e) değerleri dağılımı gösterilmiştir. Şekil 14'te görüldüğü gibi, maksimum Tsai-Wu indeks değerleri 1. tabaka (e=0.22431) ve 4. Tabakada (e=0.2548) elde edilmiştir. Tarafsız eksenenden uzaklaştıkça hasar indeks değerlerinin arttığı görülmektedir. Kritik tabakalar, yani kompozitin daha önce hasara uğraması beklenen tabakalar, 1. ve 4. tabakalardır.

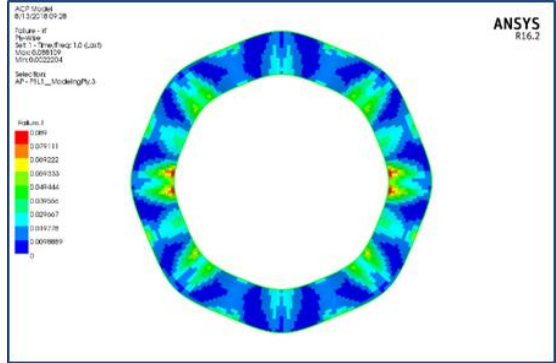
Tablo 7'de karbon fiber/epoksi ve cam fiber/epoksi malzemeden yapılmış tek-katlı kompozit dalgalı yayın Tsai-Wu hasar indeks (e) değerlerinin tabaka sayısı (n) ve dalga sayısı (N)'e göre değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi, tabaka sayısı arttıkça hasar indeksi değerleri düşmekte buna bağlı olarak da hasar yüklerinde artış görülmektedir. Şekil 14'te KF/EP ve CF/EP malzemeden üretilmiş kompozit yayların farklı tabaka sayısı (n) ve dalga sayısı (N) için hesaplanan hasar yük değerleri gösterilmiştir. Beklendiği gibi, karbon fiber/epoksi kompozitlerin hasar yükleri cam fiber/epoksiye kıyasla daha yüksek elde edilmiştir. Hasar yükleri dalga sayısına göre artış göstermektedir. Bu etki, tabaka sayısı 8, 10 ve 12 olduğunda negatif olmuştur. Yük değerleri, dalga sayısı 6'dan 8'e artırıldığında hasar yüklerinde %15-%22 aralığında düşüş gözlemlenmiştir.



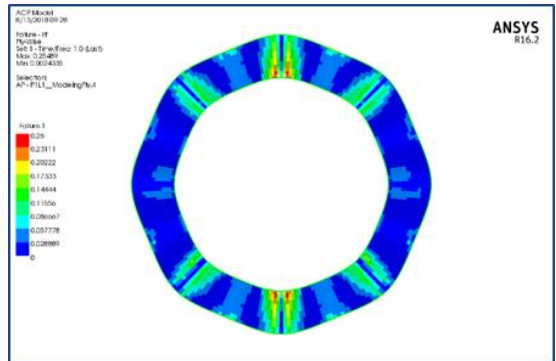
(a): 1. tabaka (e=0.22431).



(b): 2. tabaka (e=0.0657).

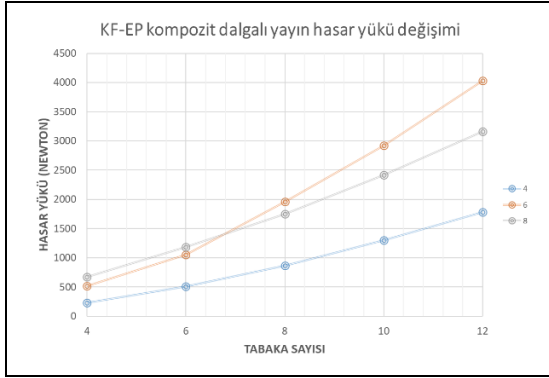


(c): 3. tabaka (e=0.088).

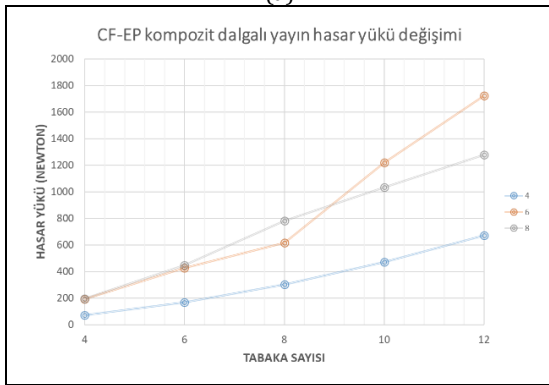


(d): 4. tabaka (e=0.2548).

Şekil 13: KF/EP kompozit yayda Tsai-Wu hasar indeksi dağılımı.



(a)



(b)

Şekil 14: KF/EP ve CF/EP kompozit yayın farklı tabaka sayısı (n) ve dalga sayısı (N) için hesaplanan hasar yük değerleri.

Tablo 7: KF/EP ve CF/EP malzemeden yapılmış tek-katlı kompozit dalgalı yaydaki maksimum Tsai-Wu hasar indeks değerleri (e).

KF/EP Maksimum Tsai-Wu hasar indeks (e) değerleri	N (Dalga sayısı)		
	4	6	8
n=4	0.216	0.09631	0.074
n=6	0.0982	0.0474	0.0421
n=8	0.0576	0.0255	0.0285
n=10	0.0385	0.0171	0.020
n=12	0.028	0.0124	0.0158
CF/EP Maksimum Tsai-Wu hasar indeks (e) değerleri	N (Dalga sayısı)		
	4	6	8
n=4	0.6860	0.2616	0.2548
n=6	0.2969	0.1174	0.1113
n=8	0.1660	0.081	0.064
n=10	0.1063	0.041	0.0483
n=12	0.0743	0.029	0.0391

### 3.4 Hibritleştirme etkisi

Bu bölümde, kompozit yay malzemesinin hibritleştirilmesinin yay rijitliğine etkisi incelenmiştir. Hibritleme işlemi, 12 tabakalı (n=12) ve dalga sayısı 8 olan (N=8) olan karbon fiber/epoksi kompozit yay üzerinde (k=18657.4 N/mm) yapılmıştır. Daha önceki bölümde de gösterildiği gibi hasar olasılığının tarafsız eksenden uzaklaştıkça arttığı bilinmektedir. Bu nedenle, tarafsız eksenden itibaren cam fiber/epoksi katmanlar karbon fiber/epoksi katmanlar çıkarılarak kompozit sisteme

Şekil 15'te gösterildiği gibi eklenmiştir. Şekil 15'te incelenen senaryolar, tabaka sayısı n=10 olması durumu için tekrar edilmiştir.

12.tabaka	KF/EP
11.tabaka	KF/EP
10.tabaka	KF/EP
9.tabaka	KF/EP
8.tabaka	CF/EP
7.tabaka	CF/EP
6.tabaka	CF/EP
5.tabaka	CF/EP
4.tabaka	KF/EP
3.tabaka	KF/EP
2.tabaka	KF/EP
1.tabaka	KF/EP

(a) Hibrid durum-1  
(10 KF/EP, 2 CF/EP)

12.tabaka	KF/EP
11.tabaka	KF/EP
10.tabaka	KF/EP
9.tabaka	KF/EP
8.tabaka	CF/EP
7.tabaka	CF/EP
6.tabaka	CF/EP
5.tabaka	CF/EP
4.tabaka	KF/EP
3.tabaka	KF/EP
2.tabaka	KF/EP
1.tabaka	KF/EP

(b) Hibrid durum-2  
(8 KF/EP, 4 CF/EP)

12.tabaka	KF/EP
11.tabaka	KF/EP
10.tabaka	KF/EP
9.tabaka	CF/EP
8.tabaka	CF/EP
7.tabaka	CF/EP
6.tabaka	CF/EP
5.tabaka	CF/EP
4.tabaka	CF/EP
3.tabaka	KF/EP
2.tabaka	KF/EP
1.tabaka	KF/EP

(c) Hibrid durum-3  
(6 KF/EP, 6 CF/EP)

(d) Hibrid durum-4  
(8 KF/EP, 4 CF/EP)

12.tabaka	KF/EP
11.tabaka	CF/EP
10.tabaka	CF/EP
9.tabaka	CF/EP
8.tabaka	CF/EP
7.tabaka	CF/EP
6.tabaka	CF/EP
5.tabaka	CF/EP
4.tabaka	CF/EP
3.tabaka	CF/EP
2.tabaka	CF/EP
1.tabaka	KF/EP

(e) Hibrid durum-5  
(2 KF/EP, 10 CF/EP)

Şekil 15: İncelenen hibrid kompozit malzeme senaryoları.

Tablo 8'de bu hibrid malzeme senaryolarına göre yay rijitlikleri verilmiştir.

Tablo 8: Hibritleştirilmenin kompozit yay rijitliğine etkisi.

Tabaka sayısı (t=2.5908 mm)	KF/EP tabaka sayısı	CF/EP tabaka sayısı	Yay rijitliği k, N/mm	Maliyet (birim)
n=12	12	0	18657.4	100
	10	2	18427.0	86.5
	8	4	18148.8	73.1
	6	6	17857.1	60.2
	4	8	16666.0	46.3
	2	10	13888.0	32.9
0	12	11367.7	19.5	
Tabaka sayısı (t=2.159 mm)	KF/EP tabaka sayısı	CF/EP tabaka sayısı	Yay rijitliği k, N/mm	Maliyet (birim)
n=10	10	0	13107.2	100
	8	2	12945.9	83.9
	6	4	12431.0	67.8
	4	6	11900.0	51.7
	2	8	9691.4	35.6
	0	10	7734.1	19.5

Görüldüğü gibi, sistemde cam fiber/epoksi katman sayısı arttıkça cam fiber/epoksinin karbon fiber/epokside daha az rijit olması nedeniyle yay rijitliği düşmektedir. 10 tabaka cam fiber/epoksi kullanılması yerine 8 tabaka cam fiber/epoksi ve

2 tabaka karbon fiber/epoksi kullanılması durumunda dalga sayısı N=8 olan 0.8636 mm kalınlığındaki çelik yayın rijitliğine benzer rijitlik değerleri elde edilmiştir.

Tablo 8’de kompozit yayın üretim maliyetleri verilmiştir. Burada sadece takviye elemanı maliyet dikkate alınmış ve tüm yapı karbon fiber/epoksi malzemeden oluşması durumdaki maliyet 100 birim olarak kabul edilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi, hibritleştirme ile daha az maliyet ile (sadece karbon fiber/epoksi yerine) hem karbon hem de cam fiber takviye elemanı kullanılarak daha hafif yapıların istenilen rijitlikte elde edilmesi mümkündür.

#### 4 Sonuçlar

Bu çalışmada, kompozit malzemeden üretilmiş tek katlı dalgalı yayların nümerik analizleri ANSYS Workbench sonlu elemanlar programı ile gerçekleştirilmiştir. Nümerik doğrulama, çelik malzemeden üretilmiş yayın analitik sonuçları ile nümerik model sonuçları kıyaslanarak yapılmış, daha sonra model modifiye edilerek farklı dalga sayısı ve kompozit kalınlığı dikkate alınarak cam fiber/epoksi ve karbon fiber/epoksi malzemeden oluşan yayın analizleri gerçekleştirilmiştir. Hibritleştirme etkisinin kompozit yay rijitliğine etkisi araştırılmıştır. Kompozit yayın hasar yükleri Tsai-Wu hasar kriteri kullanılarak tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda madde halinde sıralanmıştır;

- Tek-katlı kompozit yayda dalga sayısı 4’ten 8’e doğru arttıkça kompozit yayın rijitliğinin önemli ölçüde arttığı görülmüştür,
- Dalga sayısı arttıkça kompozit yayın hasar yüklerinde artış görülmüştür. Bu durum, kalınlık arttıkça negatif olarak etki etmektedir,
- Tabaka sayısının artması (yay kalınlığı) ile kompozit yayın rijitliğinde artış meydana gelmektedir,
- Çelik malzemeden yay ile yapılan kıyaslamalar sonucunda, yay kalınlığı artırılarak çelik malzemeden üretilmiş yayın rijitliğinden daha yüksek rijitlik değerleri ve aynı zamanda önemli ağırlık azaltımı sağlanabildiği gösterilmiştir,
- Hibritleştirme ile istenilen rijitlik değerleri elde edilirken aynı zamanda kompozit yayın üretim maliyetlerinin azaltılabileceği gösterilmiştir.

#### 5 Kaynaklar

- [1] Zhang J, Chaisombat K, Shuai H, Chun HW. “Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures”. *Materials & Design*, 36, 75-80, 2012.
- [2] Erfain-Naziftoosi, HR, Shams SS, Elhajjar R. “Composite wave springs: Theory and design”. *Materials & Design*, 95, 48-53, 2016.
- [3] Chiu C-H, Hwan C-L, Tsai H-S, Lee W-P. “An experimental investigation into the mechanical behaviors of helical composite springs”. *Composite Structures*, 77(3), 331-340, 2007.
- [4] Jain A, Jindal A, Lakhiani P, Mishra S. “Mathematical approach to helical and wave spring used in suspension system: A review”. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 5(6), 78-82, 2017.
- [5] Gaur N, Tripathi K, Kanchwala H. “Analysis of load deflection characteristics of wave washer spring using 3D CAD modeling”. *International Journal of Applied Engineering Research*, 7(13), 1525-1535, 2012.
- [6] Ashwini K, Mohan Rao CV. “Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures”. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 5716-5721.
- [7] Talip ARA, Ali A, Goudah G, Lah NAC, Golestaneh A. “Developing a composite based elliptic spring for automotive applications”. *Materials & Design*, 31, 475-484, 2010.
- [8] Deveraj DH, Venkatesan M. “Static Analysis of Composite Semi - Elliptical Leaf Spring”. *IOSR Journal of Engineering*, 2(4), 598-603, 2012.
- [9] Dragoni E. “A contribution to wave spring design”. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 23(3), 145-153, 1988.
- [10] Camanho PP, Matthews FL. “A Progressive Damage Model for Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates”. *Journal of Composite Materials*, 33(24), 2248-2280, 1999.
- [11] Tay TE, Liu G, Tan VBC, Sun XS, Pham DC. “Progressive failure analysis of composites”. *Journal of Composite Materials*, 42(18), 1921-1946, 2008.
- [12] Beylergil B, Cunedioglu Y, Aktas A. “Experimental and numerical analysis of single lap composite joints with inter-adherend fibers”. *Composites Part: B*, 42(7), 1885-1896, 2011.