



Karbon elyaf takviyeli karbon nanotüp katkılı epoksi kompozit helisel yayların mekanik davranışları

Yahya Kara*, Hamit Akbulut

Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Epoksi reçineye değişik oranlarda KNT katkısı
- Nanokompozit yay geometrisinin mekanik özelliklere etkisi
- Nanokompozit helisel yayların nümerik ve analitik incelenmesi

Makale Bilgileri

Geliş:10.03.2016
Kabul: 18.01.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.300607

Anahtar Kelimeler:

Karbon nanotüp,
karbon elyaf,
nanokompozit helisel yay,
mikromekanik

ÖZET

Bu çalışmada, makinelerde titreşim sönümleyici olarak kullanılan çelik yaylara alternatif olarak karbon nanotüp (KNT) katkılı ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerden üretilmiş helisel yayların mekanik davranışları araştırılmıştır. Özellikle KNT katkısının helisel yayların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Öncelikle helisel yayların boyutlandırılması ile ilgili dizayn parametreleri üzerinde durulmuştur. Çalışmanın analitik kısmı için, epoksi reçinesine % 0,00, % 0,05, % 0,10 ve % 0,15 KNT katılmış ve karbon elyaf ile takviye edilerek kompozit yapılar elde edilmiştir. Mikromekanik yöntemle kompozit yapıların elastisite modülü, kayma modülü, Poisson oranı değerleri hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında, yay tel çapı ve yay rijitliği değerlerinin tasarım parametreleri üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Ayrıca, kompozit yayla ilgili elde edilen sonuçlar, eş değer geometriye sahip çelik helisel yaylardan elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Çalışmanın nümerik analiz kısmında ANSYS yazılımı kullanılarak, yayların deformasyon değerleri ve kayma gerilmesi dağılımları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, çelik yaylardan çok daha hafif olan karbon elyaf takviyeli ve KNT katkılı epoksi kompozit helisel yayların, hem deformasyon hem de kayma gerilmesi açısından üstün özellikler gösterdiği görülmüştür.

Mechanical behavior of helical springs made of carbon nanotube additive epoxy composite reinforced with carbon fiber

H I G H L I G H T S

- CNT addition to epoxy resin in variable rate
- Effect of nanocomposite spring geometry on mechanical properties
- Numerical and analytical investigation of nanocomposite helical spring

Article Info

Received: 10.03.2016
Accepted: 18.01.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.300607

Keywords:

Carbon nanotube,
carbon fiber,
nanocomposite helical
spring,
micromechanics

ABSTRACT

In this study, mechanical behaviors of helical springs made of carbon nanotube (CNT) additive epoxy resin composite reinforced with carbon fiber, instead of steel springs used vibration damping in machines, were investigated. Especially, effect of CNT addition on the mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy composite springs were examined. Firstly design parameters related to dimensioning of the helical springs were determined. For the analytical part, composite structures were obtained with addition of CNT of 0.00 %, 0.05 %, 0.10 % and 0.15 % into epoxy resin and reinforcing with carbon fiber. Mechanical properties of the composite structures (Young's moduli, shear modulus, Poisson ratio) were computed by micromechanics. Also, in the study, effects of the spring wire diameters and the spring stiffness values on the design parameters were investigated. The results obtained for composite springs were also compared with those of the geometrically equivalent steel ones. In the numerical part of the study, deformation values and distributions of shear stress were determined by using ANSYS software. According to the obtained results, it was seen that carbon fiber reinforced and CNT additive epoxy composite springs, known as lighter than steel springs, had better properties in terms of both deformations and shear stresses.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: / yahyakara06@gmail.com / Tel: +90 442 231 48 37

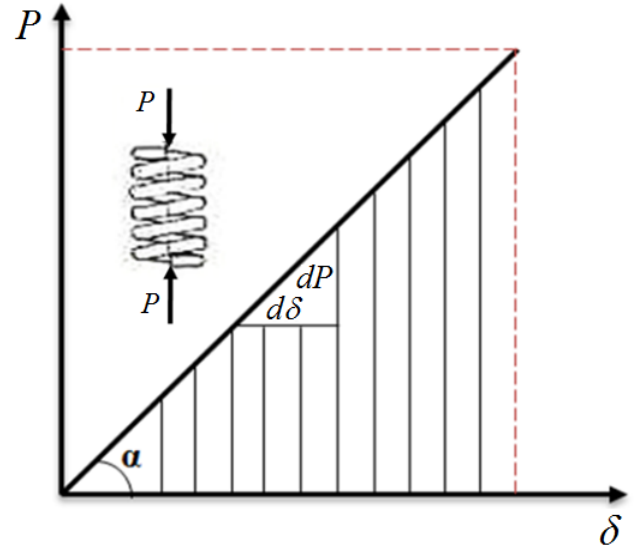
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Makinelerin daha az enerji tüketmeleri için hafif olmaları bilinen bir durumdur. Çelik, alüminyum, bakır gibi geleneksel mühendislik malzemelerinden üretilmiş makine elemanları ise daha ağır bir yapıya sahiptirler. Bundan dolayı, alternatif malzemeler üzerindeki çalışmalar mütemediyen devam etmekte ve buna yönelik olarak kompozit malzeme teknolojisi de geçen yüzyıldan itibaren büyük bir hızla gelişmektedir. Kompozit malzeme teknolojisindeki bu hızlı yükseliş, birçok sektörde gittikçe artan oranlarda kullanılmalarını sağlamıştır [1]. Özellikle havacılık sanayindeki ihtiyaçların daha etkin bir şekilde giderilmesi amacıyla kompozit malzeme kullanımı giderek artmaktadır. Bundan dolayı, Malzeme ve Mekanik Bilimi öncülüğünde, daha yüksek mekanik özelliklere sahip malzemeler ve özellikle kompozit malzemeler üzerindeki araştırmalar önemli ölçüde artmıştır [2]. Daha hafif yapıya sahip olan elyaf takviyeli polimerik kompozit malzemeler, geleneksel mühendislik malzemeleri ile kıyaslandığında, gösterdiği bazı üstün özellikleri dolayısıyla iyi bir alternatif oluşturmaktadırlar [3]. Metal ve türevleri; korozyon dirençleri, yorulma dayanımları gibi [4] hususlarda yetersiz kalmaları polimerik kompozitlerin gelişiminde önemli rol oynamıştır [5]. Açık literatürde kompozit helisel yaylarla ilgili çok fazla çalışmaya rastlanmamakla birlikte, B. L. Choi ve B. H. Choi [6] karbon elyaf takviyeli epoksi ile imal ettikleri kangal yayını analitik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında kompozit bir yay optimize ederek, çelik yaya göre ağırlık bakımından %55 civarında daha hafif bir yay elde etmişlerdir. Helisel yayların yaygın olarak kullanıldığı alanlarda; titreşim, tekrarlanan ve dengesiz yükler gibi dinamik etkiler altında, çatlaklar oluşmakta ve akabinde kırılmalar meydana gelmektedir. Yayların yorulma ve titreşim performanslarına etki eden başlıca faktörler; çalışma gerilmeleri, malzeme yüzey kaliteleri ve aşınma olarak ele alınabilir. Bu kısıtlar, geleneksel malzemelerden üretilen helisel yaylarda önemli ölçüde olumsuzluk oluşturmaktadır. Elyaf takviyeli kompozitlerin bu tip kısıtlara ve olumsuzluklara karşı yüksek direnç gösterdiği yapılan araştırmalardan anlaşılmaktadır [2, 7]. Chiu vd. [7] elyaf takviyeli polimer kompozit yay üzerinde çalışmışlar ve bu yayların bilhassa titreşimli ortamlarda daha iyi elastik davranışlar sergilediklerini görmüşlerdir. Çolakoğlu [8], yayların sönüm kabiliyetlerini incelediği araştırmasında; elyaf takviyeli polimer kompozitlerin, metal ve alaşımlarına oranla, titreşim frekansı sönüm kabiliyetinin oldukça yüksek olduğunu gözlemlemiştir. Chandra vd. [9], elyaf takviyeli kompozitlerin hafif, yüksek dayanımlı ve yüksek titreşim sönüm kabiliyetleri ile bu alanda önemli birer alternatif olduklarını belirlemişlerdir. Son zamanlarda otomotiv şirketi Audi firması, cam elyaf takviyeli epoksi kompozitten (GFRP) üretilmiş amortisör yaylarının çelik yaylara göre çok daha üstün mekanik özellikler sergilediklerini belirlemiştir [10]. Bu çalışma kapsamında, karbon elyaf takviyeli ve KNT katkılı epoksi kompozitten imal edilmiş helisel yayların yay rijitliği, deformasyon ve kayma gerilmelerini ihtiva eden

bazı mekanik davranışları üzerinde çalışılmıştır. Ayrıca, yay teli çapı ve KNT katkısı gibi parametrelerin mekanik davranışa etkileri, analitik ve numerik (sonlu elemanlar metodunu baz alan ANSYS yazılımı ile) olarak incelenmiştir. Nanopartikül katkısı kompozitin mukavemetini artırmakla [11], birlikte kırılma dayanımını da yükseltmektedir [12]. Bundan dolayı bu çalışma kapsamında, KNT katkısı %0,15 ile sınırlandırılmıştır. Ayrıca, çelikten yapılmış yayların mekanik davranışları da çalışılarak, kompozit yaylarla karşılaştırmalar yapılmış ve kompozit yapıların geleneksel mühendislik malzemelerine göre üstün mekanik özellikleri belirlenmiştir.

2. YAYIN MEKANİK ANALİZİ (MECHANICAL ANALYSIS OF A SPRING)

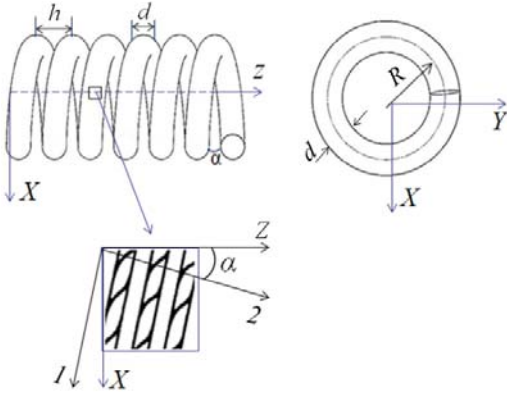
Helisel yaylar; yay telinin, bir silindir üzerine helisel bir şekilde sarılması ile elde edilmektedir. Genellikle dairesel kesitli tellerin bükülmesiyle elde edilen bu yaylar, yaygın olarak otomobil endüstrisinde kullanılırlar. Bu çalışma kapsamında, geniş kullanıma sahip helisel yay modelleri üzerinde çalışılmıştır. Yüklere maruz kalan yaylarda meydana gelen şekil değiştirmeler (boy değişimi ve dönme açısı gibi) ile yükler arasındaki ilişkiye yay karakteristiği adı verilir ve bu ilişkiye göre yay özelliği belirlenir [13]. Helisel bir yayın tasarımında yay teli çapı, ortalama yay (yarı) çapı, serbest yay uzunluğu gibi boyutlar temel parametrelerdir. Şekil 1'de doğrusal karakteristiğe sahip helisel bir yayın yük-şekil değiştirme grafiği görülmektedir [14].



Şekil 1. Doğrusal yay karakteristiği (Linear spring characteristics)

Şekil 2'de görülen yay için, h hatve, d tel çapı, α helis açısı ve R ortalama yay yarıçapını temsil etmektedir. Helis açısı α , Eş. 1 ile belirlenir:

$$\tan \alpha = \frac{h}{2\pi R} \quad (1)$$



Şekil 2. Elyaf takviyeli helisel yay geometrisi
(Geometry of fiber reinforced helical spring)

Maksimum Kayma gerilmesi: P eksenel yüküne maruz helisel yayın her hangi kesitinde, Şekil 3-a'da görülen kesit tesirleri (kesme kuvveti V ve burulma momenti T) meydana gelir. Kesit tesirleri Eş. 2'deki gibi belirlenir:

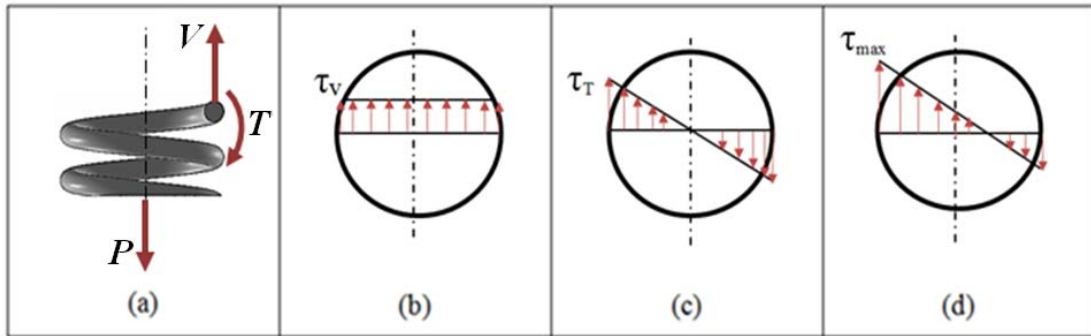
$$V = P \quad \text{ve} \quad T = PR \quad (2)$$

V kesme kuvvetinin etkisinde meydana gelen kayma gerilmesi Şekil 3-b'de ve T burulma momentinin etkisindeki kayma gerilmesi Şekil 3-c'de görülmektedir. Bunların bileşkesi ise Şekil 3-d'de verilmektedir. Bileşke kayma gerilmesi süperpozisyon ile aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\tau_{\max} = \tau_V + \tau_T = \frac{16P}{3\pi d^2} + \frac{16PR}{\pi d^3} = \frac{16PR}{\pi d^3} \left(1 + \frac{d}{3R}\right) \quad (3)$$

Yaydaki maksimum kayma gerilmesini bulmak için Eş. 3'te verilen bağıntı yeterli olmamaktadır. Bundan dolayı deneysel çalışmalardan elde edilmiş ampirik K_w düzeltme faktörü (Wahl correlation factor) ile gerçeğe daha yakın bir kayma gerilmesinin bulunabileceği önerilmiştir [15] ve Eş. 4 ile verilmiştir.

$$\tau_{\max} = K_w \frac{16PR}{\pi d^3} \quad (4)$$



Şekil 3. a) Yaydaki kesit tesirleri b) kesme kuvvetinin etkisindeki kayma gerilmesi c) burulma etkisindeki kayma gerilmesi d) bileşke kayma gerilme

(a) Internal forces in spring b) shear stress due to shear force c) torsional stress due to torsion d) resultant shear stress due to combined loading

Burada K_w düzeltme faktörü olup Eş. 5 ile belirlenir:

$$C = \frac{2R}{d} \quad \text{ve} \quad K_w = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C} \quad (5)$$

Yayın Şekil Değiştirmesi: İzotropik bir malzemeden yapılmış bir yayda meydana gelen deformasyonu belirlemek için Şekil 4'te görülen R yarıçaplı, ds uzunluğundaki yay parçasının serbest cisim diyagramından yararlanır. Buna göre, yay açısı da ve K_1 kesitinin K_2 kesitine göre rölatif sehimi $d\delta = OO'$ olup, Eş. 6 ile hesaplanır:

$$d\delta = \frac{PR^2}{GJ} ds \quad \rightarrow \quad \delta = \frac{PR^2}{GJ} s \quad (6)$$

Burada G kayma modülü, J polar atalet momenti olup dairesel kesitler için

$$J = \frac{\pi d^4}{32} \quad (7)$$

formülü ile hesaplanır ve n sarım (halka) sayısı olmak üzere yayın toplam uzunluğu ise Eş.8 ile hesaplanabilir.

$$s = n(2\pi R) \sqrt{1 + \frac{h^2}{4\pi^2 R^2}} \cong 2n\pi R \quad (8)$$

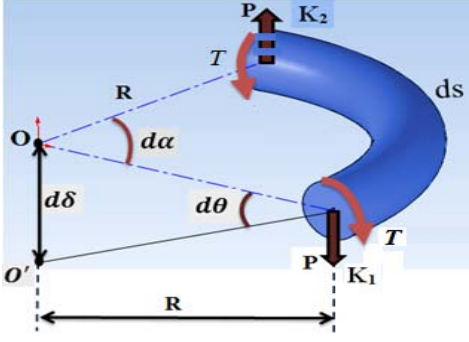
Eş. 6, Eş. 7 ve Eş. 8 birlikte değerlendirildiğinde helisel bir yaydaki şekil değiştirmesi-kuvvet veya kuvvet-şekil değiştirmesi ilişkileri Eş. 9 ile belirlenir:

$$\delta = \frac{64nR^3}{Gd^4} P \quad \text{veya} \quad P = \frac{Gd^4}{64nR^3} \delta \quad (9)$$

Bu bağıntıda G , d , n ve R sabit değerler olduğundan yayda kuvvet-şekil değişimi doğrusaldır. İzotropik malzemelerde $(Gd^4) / (64nR^3) = k$ kısaltması yapıldığında kuvvet-şekil değişimi ilişkisi Eş. 10'da verildiği gibi yazılabilir:

$$P = k \delta \quad (10)$$

burada k yay sabiti veya yay katsayısıdır.



Şekil 4. Yayın uzaması için diferansiyel yay parçası
(Differential spring element for spring extension)

Elyaf takviyeli kompozit malzemeden yapılmış yayların kuvvet-şekil değiştirme ilişkisinde G kayma modülü yerine eşdeğer kayma modülü \hat{G} kullanılarak Eş. 11 ile hesaplama yapılabilir [6].

$$\hat{G} = 2 \frac{G_{xy} G_{xz}}{G_{xy} + G_{xz}} \quad (11)$$

Eşdeğer kayma modülü ile birlikte elyaf takviyeli kompozit bir yayda eşdeğer yay sabiti \hat{k} belirlenerek, kuvvet-şekil değiştirme ilişkisi Eş. 12 ile belirlenir:

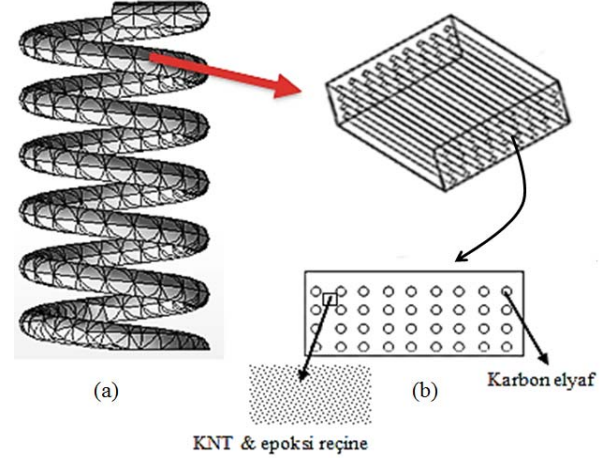
$$\hat{k} = \frac{\hat{G} d^4}{64nR^3} \rightarrow P = \hat{k} \delta \quad (12)$$

Yay teli çapları TS EN ISO 4126-7 nolu standarda göre belirlenmiştir. Bu standarda göre, yay çapının yay teli çapına oranıyla tanımlanan yay indeksi ($C=2R/d$) değeri göz önüne alınmaktadır. Buna göre, yay indeksinin 3-12 değer aralığında olması gerekmektedir [16]. Çalışmada araştırılan yayların indeksleri 5-10 aralığında seçilmiştir.

3. KOMPOZİT YAYIN MİKROMEKANİK ANALİZİ (MICROMECHANICAL ANALYSIS OF COMPOSITE SPRING)

Karbon elyaf takviyeli ve KNT katkılı epoksi kompozitten yapılmış helisel yayların, aksenal yükler altındaki mekanik

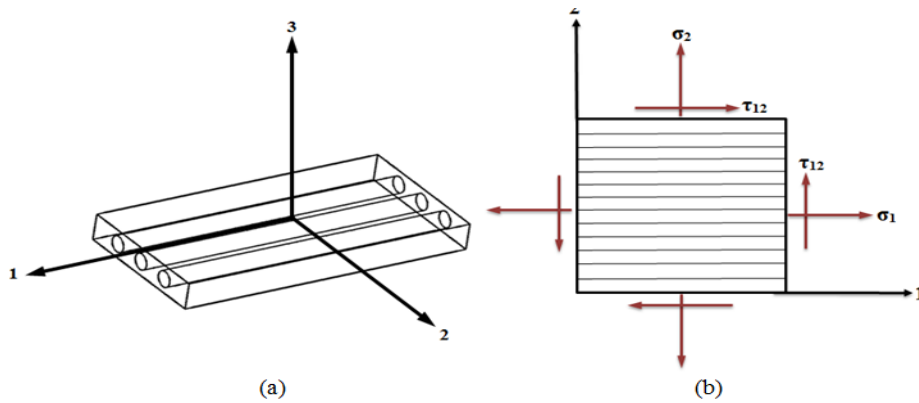
davranışlarını belirleyebilmek için bazı mekanik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu özellikler teorik veya deneysel olarak belirlenebilir. Bu çalışma kapsamında mekanik özellikler mikromekanik yardımıyla belirlenmiştir. Bu amaçla, mikromekanik hesaplamalar yapabilmek amacıyla, Şekil 5'de görülen helisel yaydan çıkarılmış temsili hacim elemanı kullanılmıştır.



Şekil 5. (a) Helisel yay modeli b) Yaydan çıkarılmış temsili hacim elemanı

(a) Model of helical spring b) Representative volume element from spring)

Temsili elemanın mikromekanik analizleri için Şekil 6'da görülen eksen takımı esas alınmıştır. Burada, 1-2-3 eksenleri asal eksenleri göstermektedir. 1 eksen elyaf doğrultusu olup 2 ve 3 elyafa dik doğrultulardır. Kompozit yapının bu doğrultulardaki bazı elastik özellikleri belirlemek için Tablo 1'deki kompozit malzeme bileşenlerinin özellikleri kullanılmıştır. *Karbon elyaf Hacim Oranı % 60 ($V_f=0.6$) ve Matris Hacim Oranı % 40 ($V_m=0.4$) olarak belirlenmiştir. Çalışmada, KNT katkısının epoksi reçine içinde homojen olduğu ve kendi başına ayrı bir kompozit yapı olduğu kabul edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan KNT katkılı epoksi kompozit malzemenin elastisite modülü mikromekanik yöntem ile Eş. 13 kullanılarak hesaplanmıştır [17].



Şekil 6. a) Tek yönlü takviye edilmiş tabaka b) Bir tabakadaki gerilme bileşenleri
(a) Unidirectionally reinforced lamina b) Stress components for a lamina)

Tablo 1. Kompozit malzeme bileşenlerinin özellikleri (Properties of components of composite materials)

Malzeme Özellikleri	Karbon Elyafı	Matris	Karbon Nanotüp (KNT)
Elastik Modülü (GPa)	E_{f11} 230	E_m 3,393	E_{NT} 1 TPa
	E_{f22} 15,41		$E_{eq} = \frac{2t}{r_{NT}} E_{NT}$ 680 GPa
Poisson Oranı	ν_{f23} 0,46	V_m 0,34	l_{NT} 10 μ m
	ν_{f12} 0,29		d_{NT} 2 nm
Kayma Modülü (GPa)	G_{f12} 10,04	G_m 1,266	r_{NT} 1 nm
	G_{f23} 5,287		t_{NT} 0,34 nm

Tablo 2. Asal yönlerdeki elastik özellikler (Elastic properties in principle directions)

Malzeme özellikleri	KNT katkı oranlarına göre elastik özellikleri				Çelik malzeme (55Cr3)
	% 0,00	% 0,05	% 0,10	% ,15	
E_1 (GPa)	139,36	144,47	149,61	154,77	200
E_2 (GPa)	17,12	62,61	91,71	112,53	200
G_{12} (GPa)	3,47	19,44	37,11	50,03	80
G_{23} (GPa)	7,13	16,29	16,30	41,92	80
ν_{12}	0,3	0,31	0,31	0,31	0,25
ν_{23}	0,40	0,49	0,46	0,4578	0,25

$$E_{cnt-m} = \left[\frac{3E_m}{8} \frac{1 + 2 \left(\frac{l_{NT}}{d_{NT}} \right) \left(\frac{\frac{E_{eq}}{E_m} - 1}{\left(\frac{E_{eq}}{E_m} \right) + 2 \left(\frac{l_{NT}}{d_{NT}} \right)} \right) V_{NT}}{1 - \left(\frac{\frac{E_{eq}}{E_m} - 1}{\left(\frac{E_{eq}}{E_m} \right) + 2 \left(\frac{l_{NT}}{d_{NT}} \right)} \right) V_{NT}} \right] + \left[\frac{5E_m}{8} \frac{1 + 2 \left(\frac{\frac{E_{eq}}{E_m} - 1}{\left(\frac{E_{eq}}{E_m} \right) + 2} \right) V_{NT}}{1 - \left(\frac{\frac{E_{eq}}{E_m} - 1}{\left(\frac{E_{eq}}{E_m} \right) + 2} \right) V_{NT}} \right] \quad (13)$$

E_{cnt-m} ile birlikte elyaf elastisite modülü ve hacim oranları göz önüne alınarak, karbon elyaf takviyeli KNT katkıli epoksi kompozit yapının elyaf doğrultusundaki elastisite modülü karışım kuralı, Eş. 14 ile hesaplanabilir [18]:

$$E_1 = E_f V_f + E_{cnt-m} V_{m-cnt} \quad (14)$$

burada V_f ve V_{m-cnt} elyafın ve matrisin hacim oranlarıdır. Poisson oranı ν_{12} de E_1 'e benzer şekilde hesaplanabilmektedir. Ancak, diğer elastik özellikler (E_2 , G_{12} , G_{23} ve ν_{23}) karışım kuralıyla hesaplandığında, deneysel sonuçlarla yeterince uyumlu olmadıkları görülmektedir [19]. Bundan dolayı, Halpin-Tsai tarafından geliştirilen eşitlikler

kullanılarak daha uygun sonuçlar elde edilebilmektedir. Halpin-Tsai eşitliği Eş. 15 ile verildiği gibi geliştirilmiştir[20]:

$$\frac{M}{M_m} = \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad (15)$$

burada M_m matrisin özellikleri olup, M kompozitin elastik özellikleri E_2 , G_{12} , G_{23} ve ν_{23} değerlerini ihtiva etmektedir. η ise deneysel bir faktör olup Eş. 16 ile hesaplanır:

$$\eta = \frac{M_f - M_m}{M_f + \xi M_m} \quad (16)$$

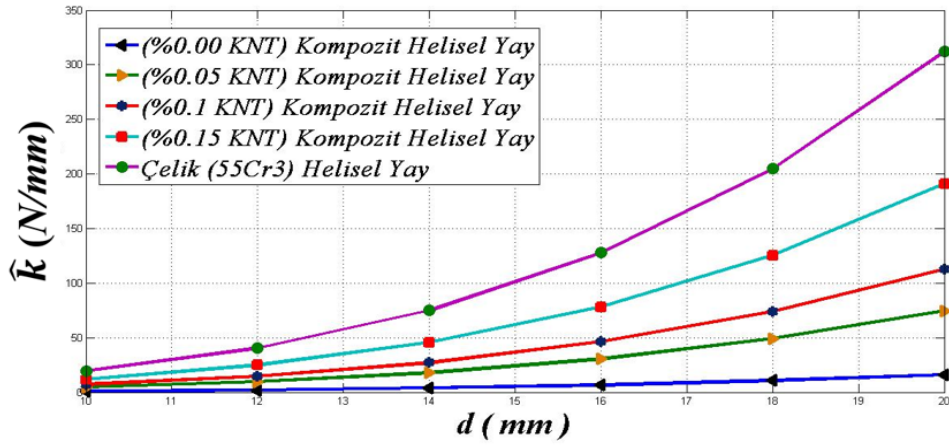
Yukarıdaki eşitliklerde ξ faktörü, yükleme durumuna bağlı takviye geometri ölçüsü [19] ve ηV_f değeri indirgenmiş elyaf hacim oranı olarak tanımlanır [20]. Karbo elyaf takviyeli % 0,00, % 0,05, % 0,10 ve % 0,15 KNT katkıli epoksi kompozit malzemelerin ve çelik malzemenin elastik özellikleri Tablo 2'de verilmiş olup, bu özellikler asal yönlerdeki özelliklerdir. Tablo 3'teki özellikler ise helis açısı kadar dönüşmüş yönlerdeki özellikleri göstermektedir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

% 0,00, % 0,05, % 0,10 ve % 0,15 KNT katkıli epoksi kompozit helisel yaylar ve bunların geometrik eşdeğeri çelik helisel yay için, Tablo 3'teki elastik özellikler kullanılarak eş değer yay rijitlik (\hat{k}) değerleri, yay teli (d) çapına bağlı olarak hesaplanmış olup, Şekil 7'de verilmektedir. Kompozit

Tablo 3. Dönüştürülmüş elastik özellikler (Transformed elastic properties)

Dönüştürülmüş Elastik özellikler	Karbon elyaf takviyeli KNT katkılı kompozit			
	0,00 %	0,05 %	0,10 %	0,15 %
E_x (GPa)	104,31	138,50	146,54	154,11
E_y (GPa)	16,69	62,17	91,17	112,73
G_{xy} (GPa)	3,57	19,77	30,57	50,08
G_{xz} (GPa)	4,67	17,73	29,05	45,62
ν_{xy}	0,4353	0,33	0,32	0,31



Şekil 7. Karbon elyaf takviyeli % 0,00, % 0,05, % 0,10 ve % 0,15 KNT katkılı epoksi kompozit helisel yayların ve eşdeğer geometriye sahip çelik helisel yayın, yay teli çapına göre yay rijitliğinin değişimi
(Spring stiffness variation of carbon fiber reinforced % 0.00, % 0.05, % 0.10 and % 0.15 CNT additive epoxy composite helical springs and geometrically equivalent steel helical spring versus wire diameter)

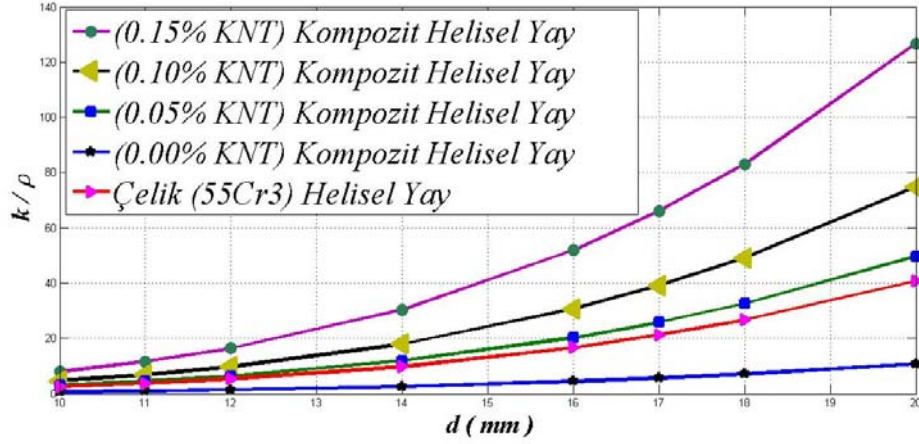
yaylardan elde edilen değerlere göre çizilen grafiklere bakıldığında, rijitlik değerlerinin % 0,15 KNT katkılı olan yayda daha büyük olduğu görülmektedir. Burada helisel yay modellerine $P=1 \text{ kN}$ 'luk kuvvetler uygulanmıştır. Yay teli çapının artmasına bağlı olarak yayların rijitliklerinin arttığı ancak çelik yayda bunun daha büyük oranda arttığı görülmektedir. Buna göre, % 0,05 KNT katkılı epoksi kompozit helisel yayın tel çapı % 45 oranında büyütülmesi halinde, çelik yaya denk rijitlik meydana gelmektedir. Benzer şekilde, % 0,10 KNT katkılı yayın tel çapı % 30 büyütüldüğünde ve % 0,15 KNT katkılı yayın tel çapı % 15 büyütüldüğünde çelik yaya denk rijitliğe sahip olmaktadır. Bu artışlarla birlikte, nanotüp katkılı yaylar çelik yaya göre daha hafif ve buna rağmen daha mukavemetli olmaktadır. Ayrıca karbon nanotüp katkılı kompozit bir yapının yorulma ve korozyon dayanımının daha yüksek olduğu literatürde verilmektedir [21]. Şekil 7'deki kompozit ve çelik helisel yayların rijitlik-deformasyon ilişkilerine göre çelik yayların daha rijit olduğu gibi yanılısma ortaya çıkmaktadır.

Ancak bu değerler malzeme yoğunluk değerlerine oranlanarak (bunlara özgül değer denmektedir) daha uygun bir karşılaştırma yapılabilir. Bu amaçla, Şekil 8'de de, özgül yay rijitliği (rijitliğin malzeme yoğunluğuna oranı) değeri ile yay teli çapı arasındaki ilişkiler verilmiştir. Buna göre, KNT katkılı kompozit yayların özgül yay rijitliği değeri çelik

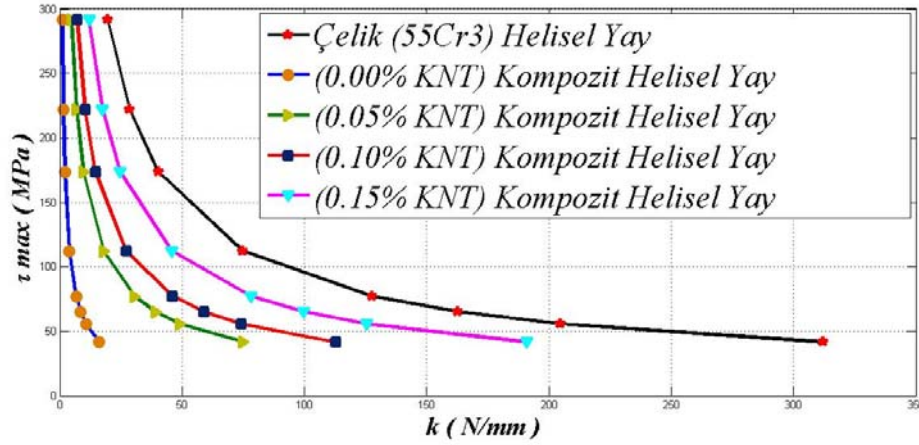
yaylara göre oldukça yüksektir. Bununla birlikte, %0,00 KNT katkılı kompozit yay çeliğe göre daha düşük özgül yay rijitliğine sahiptir. Elyaf takviyeli epoksi kompozit helisel yaylar KNT katkısı ile daha hafif, gerilme ve deformasyona karşı daha mukavemetli oldukları sonucuna varılabilir. Karbon elyaf takviyeli ve % 0,00 % 0,05, % 0,10 ve % 0,15 oranlarında KNT katkılı epoksi kompozit ve çelik helisel yaylarda yay rijitliğine bağlı olarak kayma gerilmesi değişimleri Şekil 9'da verilmektedir. Burada, yay teli çapına göre yay rijitliği küçükken kayma gerilmelerinin daha büyük olduğu, bununla birlikte yay teli çapı artırıldığında kayma gerilmesinin parabolik bir şekilde azaldığı görülmektedir. KNT katkısı yay rijitliğini artırırken kayma gerilmelerinin belirli oranda azalmasına yol açmıştır.

5. NÜMERİK-ANSYS-ÇÖZÜMLER (NUMERICAL-ANSYS-SOLUTIONS)

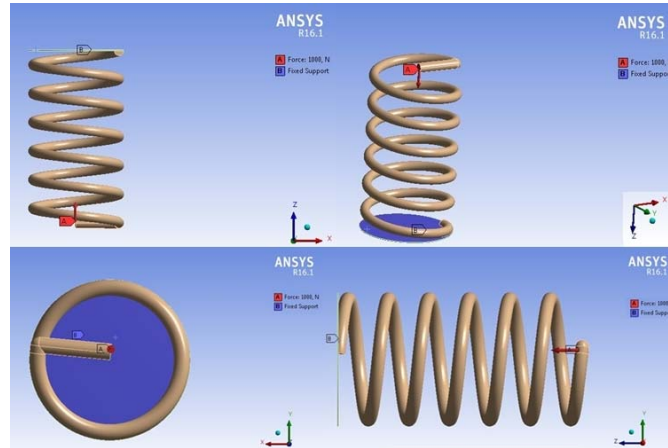
Çalışmada, eşit yay rijitliklerine sahip, çelik ve karbon nanotüp katkılı epoksi kompozit helisel yayların deformasyon ve kayma gerilmesi dağılımları ANSYS-workbench yazılımı ile yapılmıştır. Bu kapsamda, çelik yay ve çelik yaya muadil rijitliğe sahip nanotüp katkılı kompozit yaylar analiz edilmiştir. Yayların yükleme durumu ve sınır şartları Şekil 10'daki gibidir. Analiz edilen yayların mekanik özellikleri Tablo 2 ve Tablo 3'ten alınmıştır.



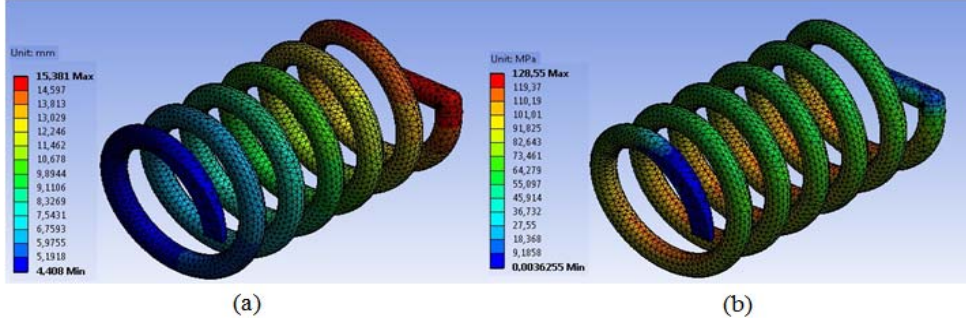
Şekil 8. Karbon elyaf takviyeli % 0,00, % 0,05, % 0,10 ve % 0,15 KNT katkıli epoksi kompozit helisel yayların ve eşdeğer geometriye sahip çelik helisel yayın, yay teli çapına göre yay rijitliği - yoğunluk oranının değişimi (Ratio of spring stiffness and density variation of carbon fiber reinforced % 0.00, % 0.05, % 0.10 ve % 0.15 CNT additive epoxy composite helical springs and geometrically equivalent steel helical spring versus wire diameters)



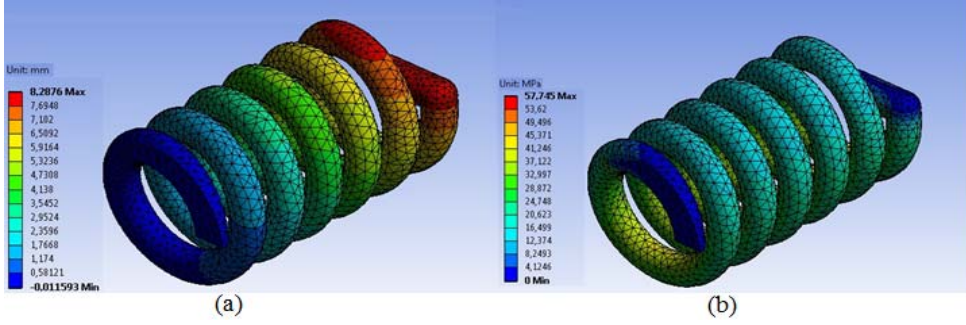
Şekil 9. Karbon elyaf takviyeli % 0,00, % 0,05, % 0,10 ve % 0,15 KNT katkıli epoksi kompozit helisel yayların ve eşdeğer geometriye sahip çelik helisel yayın, yay rijitliğine göre kayma gerilmelerinin değişimi (Shear stresses variation of carbon fiber reinforced % 0.00, % 0.05, % 0.10 ve % 0.15 CNT additive epoxy composite helical springs and geometrically equivalent steel helical spring versus spring stiffness)



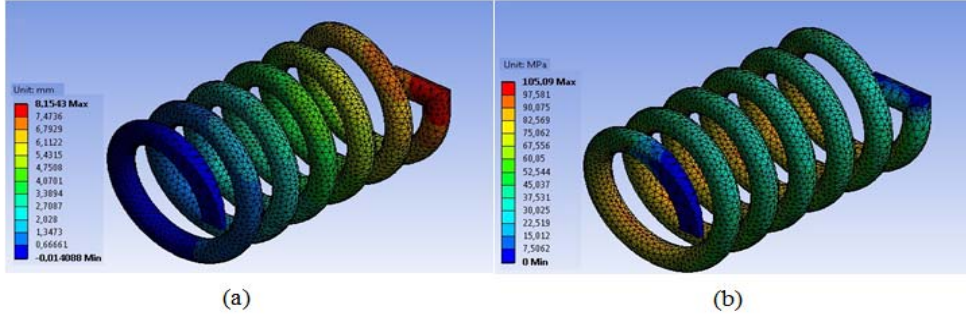
Şekil 10. Yayın yükleme durumu ve sınır şartları (Loading and boundary conditions)



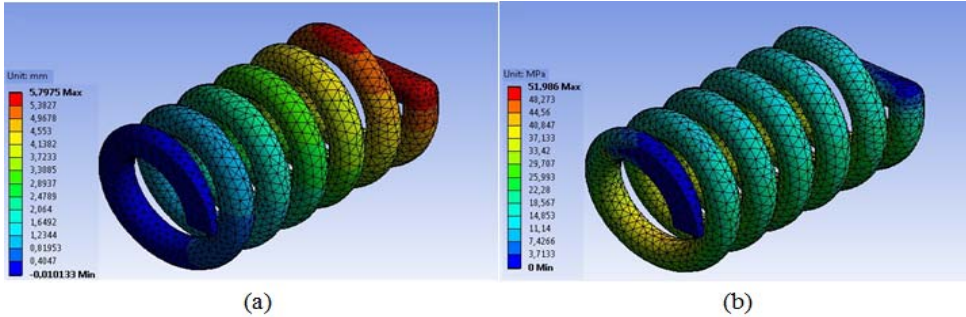
Şekil 11. Tel çapı $d=13,8$ mm olan 55Cr3 helisel yayının ANSYS analizi a) yay deformasyonu b) kayma gerilmesi dağılımı (ANSYS analysis of 55Cr3 helical spring for wire diameter $d=13,8$ mm a) spring deformation b) shear stress distribution)



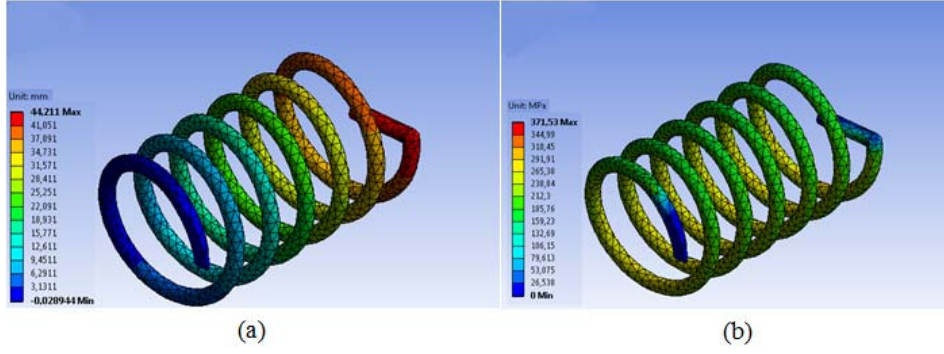
Şekil 12. Tel çapı $d=20$ mm olan karbon elyaf takviyeli % 0,05 KNT katkıli epoksi kompozit helisel yayının ANSYS analizi a) yay deformasyonu b) kayma gerilmesi dağılımı (ANSYS analysis of carbon fiber reinforced % 0,05 CNT additive epoxy composite helical spring for wire diameter $d=20$ mm a) spring deformation b) shear stress distribution)



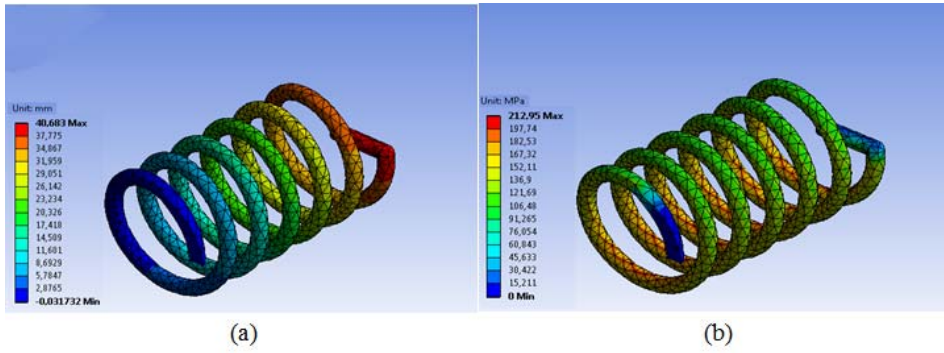
Şekil 13. Tel çapı $d=15,4$ mm olan 55Cr3 helisel yayının ANSYS analizi a) yay deformasyonu b) kayma gerilmesi dağılımı (ANSYS analysis of 55Cr3 helical spring for wire diameter $d=15,4$ mm a) spring deformation b) shear stress distribution)



Şekil 14. Tel çapı $d=20$ mm olan elyaf takviyeli % 0,1 KNT katkıli epoksi kompozit helisel yayının ANSYS analizi a) yay deformasyonu b) kayma gerilmesi dağılımı (ANSYS analysis of carbon fiber reinforced % 0,1 CNT additive epoxy composite helical spring for wire diameter $d=20$ mm a) spring deformation b) shear stress distribution)



Şekil 15. Tel çapı $d=10$ mm olan 55Cr3 helisel yayının ANSYS analizi a) yay deformasyonu b) kayma gerilmesi dağılımı (ANSYS analysis of 55Cr3 helical spring for wire diameter $d=10$ mm a) spring deformation b) shear stress distribution)



Şekil 16. Tel çapı $d=11,5$ mm olan elyaf takviyeli % 0,15 KNT katkılı epoksi kompozit helisel yayının ANSYS analizi a) yay deformasyonu b) kayma gerilmesi dağılımı (ANSYS analysis of carbon fiber reinforced % 0.15 CNT additive epoxy composite helical spring for wire diameter $d=11.5$ mm a) spring deformation b) shear stress distribution)

Yaylara, Şekil 10'da görüldüğü gibi, 1 kN büyüklüğünde yay eksenine doğrultusunda bası kuvveti uygulanarak, deformasyon ve kayma gerilmesi dağılımları hesaplanmıştır. Şekil 11-16 Şekil 11'da, tel çapı $d=13,8$ mm olan 55Cr3 helisel yayı, Şekil 12'de tel çapı $d=20$ mm olan karbon elyaf takviyeli %0,05 KNT katkılı epoksi kompozit yayı analiz edilmiş olup buradaki yaylar eşdeğer rijitliğe sahiptirler. Şekillere göre, çelik yayda hem deformasyon değerleri hem de kayma gerilmesi değerlerinin daha büyük olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Şekil 13'te tel çapı $d=15,4$ mm olan 55Cr3 yayı, Şekil 14'de tel çapı $d=20$ mm olan karbon elyaf takviyeli %0,1 KNT katkılı epoksi kompozit yayı ve Şekil 15'te, tel çapı $d=10$ mm olan 55Cr3 yayı, Şekil 16'da tel çapı $d=11,5$ mm olan karbon elyaf takviyeli %0,1 KNT katkılı epoksi kompozit yayı analiz edilmiş ve elde sonuçlar şekillerde verilmiştir. Buradaki yaylar eşdeğer rijitliklere sahip olup, ilgili şekillere göre de, çelik yayda hem deformasyon değerleri hem de kayma gerilmesi değerlerinin daha büyük olduğu görülmektedir.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında, metalik malzemelerden imal edilen helisel yaylara alternatif olarak, üstün mekanik özelliklere sahip polimerik kompozit malzemeden imal edilmiş KNT katkılı ve karbon elyaf takviyeli helisel yayların mekanik

özellikleri analitik ve nümerik olarak araştırılmış ve çelikten üretilmiş yaylarla mukayese edilmişlerdir. KNT katkılı kompozitin mekanik özellikleri mikromekanik ve Halpin-Tsai yaklaşımı ile belirlenerek analizlerde kullanılmıştır. ANSYS yazılımı ile de helisel yayların deformasyon ve kayma gerilmesi analizleri yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen bazı önemli sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir;

KNT katkılı epoksi kompozit helisel yaylarda; katkı oranı % 0,05 için yay teli çapı %45 oranında artırıldığında, katkı oranı %0,1 için yay teli çapı %30 artırıldığında ve katkı oranı %0,15 KNT olduğunda ise tel çapı %15 artırılması halinde, çelik yaya muadil rijitlikler elde edilmektedir. KNT katkılı yayların tel çapları artırıldığı halde bile özgül değerleri çelik yaya göre çok daha küçük olmaktadır. Bu durum, KNT katkılı yayların çelik yaya göre hafif olmalarına karşılık, daha rijit ve mukavim yapıya sahip olduklarını göstermektedir.

ANSYS yazılımı ile nümerik analizlerden elde edilen deformasyon ve kayma gerilmesi sonuçları, analitik sonuçlar ile karşılaştırıldığında, nümerik sonuçların analitik sonuçlara göre bir miktar büyük oldukları görülmektedir. Oluşan bu farkın sebebi olarak, ANSYS analizlerinde, kuvvetin uygulama bölgesindeki gerilme yığılımlarının etkili olduğu düşünülmektedir. Eşdeğer geometriye sahip çelik yaylara

göre KNT katkılı kompozit helisel yayların deformasyonlara karşı rijitlikleri daha düşük olmasına rağmen daha küçük gerilmeler meydana gelmektedir. Ayrıca işlemlerde, standart çaplardaki yaylar kullanıldığında, hem deformasyon değerleri ve hem de kayma gerilmeleri açısından daha uygun sonuçlar elde edilmektedir. Polimerik kompozit helisel yaylarda KNT katkısı mukavemet ve rijitliği artırmaktadır [22]. Ancak, KNT katkısı özellikle deformasyon davranışı açısından belirli bir oranla sınırlı tutulması gerekmektedir [11]. Bundan dolayı çalışmada, KNT katkısı %0,05, %0,10 ve % 0,15 oranları ile sınırlı tutulmuş olup, en iyi mekanik özelliklerin karbon elyaf takviyeli %0,15 KNT katkılı epoksi kompozit helisel yaylarda olduğu görülmüştür. Bazı mekanik üstünlükleri olmakla birlikte, KNT katkılı karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin maliyetlerinin yüksek olması ve üretimlerindeki zorluklar en önemli dezavantajlarıdır. Ancak, bu malzemelerin yüksek mekanik özelliklerinden dolayı son yıllarda kullanımları giderek artış göstermektedir. Bundan dolayı, bu malzemeler üzerinde yapılan yoğun çalışmalara bağlı olarak, bunların daha ekonomik duruma gelmeleri sağlanacaktır.

7. SİMGELER (SYMBOLS)

KNT	: Karbon Nanotüp (<i>Carbon Nanotube</i>)
FEM	: Sonlu Elemanlar Metodu (<i>Finite Element Method</i>)
E_f	: Elyaf (Fiber) malzemesinin elastiklik modülü
E_m	: Matris malzemesinin elastiklik modülü
E_{m-ent}	: Matris-Karbon Nanotüpün elastiklik modülü
ν_f	: Fiber malzemesinin poisson oranı,
ν_m	: Matris-Karbon Nanotüp malzemesinin poisson oranı,
V_f	: Elyaf hacim oranı
V_{m-ent}	: Matris-Karbon Nanotüp hacim oranı
R	: yay ortalama yarıçapı
D	: yay telinin çapı
H	: helezon yay adımı
I_f	: yayın serbest boyu
α	: Helis açısı
I_{NT}	: Karbon Nanotüpün uzunluğu
d_{NT}	: Karbon Nanotüpün çapı
r_{NT}	: Karbon Nanotüpün yarıçapı
E_{NT}	: Karbon Nanotüpün elastik modülü
V_{NT}	: Karbon Nanotüpün hacim oranı
t_{NT}	: Karbon Nanotüpün kalınlığı
E_{eg}	: Karbon Nanotüpün eşdeğer elastik modülü

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Fırat F.K, Eren A., Investigation of FRP Effects on Damaged Arches in Historical Masonry Structures, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (4), 659-670, 2015.
2. Aricasoy O, Kompozit Sektör Raporu, <http://www.ito.org.tr/Dokuman/Sektor/1-57.pdf> Yayın tarihi Aralık 6, 2006. Erişim tarihi Ocak 15, 2016.
3. Abdul Budan D., Manjunatha, T.S., Carbon Fiber Reinforced Composite Coil Springs, Proc. of Int. Conf. on Advances in Industrial and Production Engineering, Kuala Lumpur, Malaysia, 17-21, 14-15 November 2011.
4. Ekanthappa J., Shankar, G.S., Amith, B.M., Gagan M., Fabrication and experimentation of FRP helical spring, International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Applications, 012098. Bangalore, India, 2016.
5. Shende M.A.M., Gandhare S.N., Untawale S.P., Failure Analysis of Helical Coil Spring in Automobile System Using Finite Element Method, International Journal of Research in Science & Engineering. 2 (5), 1-17, 2016.
6. Choi B.L., Cho B.H., Numerical method for optimizing design variables of carbon-fiber reinforced epoxy composite coil springs, Composites Part B., 82, 42-49, 2015.
7. 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, 331-340, 2007.
8. Çolakoğlu M., Damping and Vibration Analysis of Polyethylene Fiber Composite under Varied Temperature, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, Turkish J. Eng. Env. Sci., 30, 351 – 357, 2006.
9. Chandra R., Singh S.P., Gupta K., Damping studies in fiber-reinforced composites-a review, Composite Structures, 46, 41-51, 1999.
10. The Official Magazine of the American Composites Manufacturers Association, New Demand for Specialty Fibers, <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2013/03/new-demand-specialty-fibers/>, Yayın Tarihi 2013, Erişim tarihi Aralık 12, 2015.
11. Sales R.J.F., Composite Materials Reinforced with Carbon Nanotubes, Master Thesis, Technical University of Lisbon, Department of Civil Engineering and Architecture, Lisbon, 2013.
12. Yavari F., Rafiee M.A., Rafiee J., Yu, Z.Z., Koratkar N., Dramatic increase in fatigue life in hierarchical graphene composites, ACS applied materials & interfaces, 2 (10), 2738-2743, 2010.
13. Akkurt M., Yaylar Makine Elemanları, Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye, 1, 441-502, 1984.
14. Black P., Machine Design, 6th Edition, McGraw Hill International Student Edition, Michigan, U.S.A., 803-870, 2001.
15. Samuel A., Weir J., Introduction to Engineering Design: Modelling, Synthesis and Problem Solving Strategies, 2nd Edition, Butterworth-Heinemann, Melbourne, U.K., 136-139, 1999.
16. Türk Standartları Enstitüsü, Bölüm 7. Müşterek Veriler, Aşırı basınca karşı koruma için emniyet cihazları, (TS EN ISO 4126-7) <https://intweb.tse.org.tr/standard/standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073101078109110051084052071074100085>, Yayın Tarihi 2005, Erişim tarihi Kasım 02, 2015

17. Thostenson Erik T., Chou T.W., On the elastic properties of carbon nanotube-based composites: modelling and characterization. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36 (5), 573, 2003.
18. Rafiee M.A.J., Wang Z., Song H., Yu Z.Z., Koratkar N., Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposite at Low Graphene Content, *ACS Nano*, 3 (12), 3884-3890, 2009.
19. Halpin J.C., Kardos J.L., Halpin-Tsai Equations: A review, *Polymer Engineering and Science*, 16 (5), 344-352, 1976.
20. Robert M.J., *Macromechanical Behavior of Lamina, Mechanics of Composite Materials*, Second Edition, Taylor & Francis Inc., Philadelphia, U.S.A., 54-186, 1999.
21. Acar V., Akbulut H., Sarikanat M., Seydibeyoglu M.Ö., Seki Y., Erden S., Karbon Elyaf Takviyeli Prepreg Kompozitlerde Arayüzey Mekanizmasının Karbon Nanoyapı Katkısıyla İyileştirilmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 10 (3),43-51,2013.
22. Santos C.S., Gabriel B., Blanchy M., Menes O., García D., Blanco M., Neto V., Industrial applications of nanoparticles—a prospective overview, 5th International Conference on Advanced Nano Materials, 456-465 Aveiro, Portugal, 2015.
23. ANSYS® Workbench, Release 16.1, Help System, Mechanical Analysis Guide, ANSYS Inc., 2016 .
24. MATLAB Version 8.1.0.604, The MathWorks Inc, 2013.

