

**Araştırma / Research****KOMPOZİT MALZEMEYLE KAPLI ALÜMİNYUM KİRİŞİN STATİK VE BURKULMA ANALİZİ****Yusuf CUNEDİOĞLU (ORCID: 0000-0002-3424-0454)\****Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, Türkiye**Geliş / Received: 06.03.2017**Düzeltilmelerin gelişi / Received in revised form: 09.05.2017**Kabul / Accepted: 10.05.2017***ÖZ**

Bu çalışmada yüzeyi elyaf takviyeli kompozit malzemeyle kaplanmış alüminyum kirişin statik ve burkulma analizi incelenmiştir. Çalışmada Euler-Bernoulli kiriş teorisi kullanılarak problemin çözümü sonlu elemanlar metoduyla gerçekleştirilmiştir. Problemin analizi için MATLAB'ta sonlu elemanlar kodu yazılarak deplasman ve burkulma yükleri hesaplanmıştır. Çalışmada yüzey ve çekirdek tabaka kalınlığının, kompozit malzeme hacim oranının, lif oryantasyon açısının, farklı kiriş konfigürasyonlarının ve farklı boy kalınlık oranlarının deplasman ve burkulma yükleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. İncelenen bu parametrelerin kirişin deplasman ve burkulma yüklerini önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kompozit kaplama, burkulma yükü, deplasman, sonlu elemanlar metodu

**STATICS AND BUCKLING ANALYSIS OF ALUMINUM BEAMS WITH COMPOSITE COATS****ABSTRACT**

In this study, static and buckling analysis of an aluminum beam coated with fiber reinforced composite material was investigated. Solution of the problem obtained via finite element method by using Euler-Bernoulli beam theory. Finite element simulation code is developed in MATLAB to calculate the displacement and buckling loads. The effect of surface and core layer thickness, composite material volume ratio, fiber orientation angle, different beam configurations and different aspect ratios on displacement and buckling loads was investigated in the study. It has been observed that these parameters have a significant effect on the displacement and buckling loads of the beam.

**Keywords:** Composites coats, buckling load, displacement, finite element methods

**1. GİRİŞ**

Çelik, alüminyum gibi geleneksel metal malzemeler mühendislik uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak bu geleneksel malzemelerde aşınma probleminin yanı sıra ağırlığı azaltmak, yapının mukavemetini arttırmak ve yapıya estetiklik kazandırmak açısından bu malzemeler genellikle kompozit malzemelerle kaplanarak sandviç tipi yapılar oluşturulur. Bu sandviç tipi yapısal elemanlar otomotiv, inşaat ve havacılık gibi sektörlerde kullanımı yaygınlaşmıştır. Haliyle kaplama yoluyla oluşturulan sandviç yapı sistemin yer değiştirme ve burkulma yükü karakteristiğini etkilemektedir. Bu nedenle tasarım esnasında bu durumun göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Literatürde kompozit tabakalı kirişlerin burkulma ve dinamik davranışları ile ilgili pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları şöyledir; Hamada [1] çalışmasında izotrop malzemeli

\*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 388 225 2303; e-mail / e-posta: ycunedioğlu@ohu.edu.tr

alt ve üst yüzeyleri kompozit kaplı kirişin dinamik davranışını sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada doğal frekans ve sönüm özelliklerinin değişimi farklı kiriş tasarımları ve farklı sınır şartları altında incelenmiştir. Tekili ve ark. [2] karbon/epoksi malzemeye güçlendirilmiş alüminyum kirişlerin hareketli yük ve sabit hız etkisi altında dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Zibdeh ve Ebu-Hilal [3] basit mesnetli alt ve üst yüzeyleri kompozit malzemeye kaplı kirişin rastgele hareketli yük etkisindeki rastgele titreşimlerini araştırmışlardır. Tekili ve ark. [4] cam/epoksi malzemeye kaplı kirişlerin serbest titreşimleri için sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır. Bu çalışmada iki farklı sandviç kiriş modeli ele alınarak doğal frekans ve mod şekillerinin değişimi farklı kiriş sınır şartları, farklı lif oryantasyon açıları ve farklı tabaka kalınlıkları için incelenmiştir. Khdeir ve Reddy [5] çalışmalarında çapraz tabakalı dikdörtgen kesitli kompozit kirişlerin keyfi sınır koşulları altında burkulma yüklerini tayin etmek için farklı kiriş teorilerine analitik çözümler sunmuşlardır. Aydoğdu [6] çalışmasında çapraz tabakalı kompozit kirişlerin burkulma yüklerini farklı sınır koşulları altında incelemiştir. Çalışmada Ritz metodu kullanılarak hesaplanan burkulma yükleri literatürle karşılaştırılmıştır. Emam ve Nayfeh [7] kompozit kirişlerin titreşim ve burkulma analizlerini sınır şartları ve farklı kiriş tasarımları için incelemişlerdir. Douville ve Grocneec [8] sandviç yapıdaki kiriş ve kolonların farklı yüklemeler altında burkulma durumlarını analitik olarak formülize ederek parametrik analizler yapmışlardır. Hu ve ark. [9] sandviç yapıdaki kompozit kirişlerin modellenmesinde kullanılan değişik kiriş teorilerini analiz etmişlerdir. Çalışmada klasik laminasyon teorisi, birinci mertebeden kayma deformasyon teorisi, yüksek mertebeden kayma deformasyon ve zikzak temelli teori modelleri dikkate alınmıştır. Mantarı ve Canales [10] çalışmalarında kompozit kirişlerin burkulma ve serbest titreşim analizler için analitik çözümler sunmuşlardır. Rayleigh quotient ve the Ritz methodları kullanılarak özdeğer eşitliği elde edilmiştir. Çalışmada boyutsuzlaştırılmış frekans ve burkulma yükleri farklı kiriş tasarımları için gerçekleştirilmiştir. Nguyen ve ark. [11] kompozit kirişlerin statik, burkulma ve serbest titreşim analizlerine yönelik yüksek mertebeli kiriş teorisi temelinde yeni bir analitik çözüm sunmuşlardır. Çalışmada kirişin hareket denklemi Lagrange eşitlikleriyle türetilmiştir. Çalışmada kiriş boy/kalınlık oranı, fiber açısı ve malzeme anizotropisinin kirişin deplasman, gerilme, doğal frekans ve kritik burkulma yüklerine olan etkileri farklı kiriş konfigürasyonları için analiz edilmiştir.

Bu çalışmada Euler-Bernoulli kiriş teorisi kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle çözümler yapılmıştır. Çalışmada basit mesnetli kiriş ele alınarak deplasman ve kritik burkulma yüklerinin hesaplanması MATLAB'ta yazılan sonlu elemanlar kodu ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada literatürden farklı olarak alüminyum kiriş grafit elyafla güçlendirilmiş polyamid kompozitle kaplanmıştır. Literatürde analizler alt ve üst yüzey kaplamaları sabit hacim oranları için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ise yüzey kaplamasının farklı hacim oranlarında tek ve çift tabaka olması durumunda deplasman ve kritik burkulma yükü analizleri incelenmiştir. Çalışmada alüminyum tabaka ve kompozit tabaka kalınlık oranlarının (h/H), elyaf oryantasyon açılarının, kiriş boy/kalınlık oranının ve farklı kiriş tasarımlarının deplasman ve burkulma yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Kirişin Sonlu Elemanlar Modellemesi

Çalışmada kirişin sonlu elemanlar modellenmesinde kiriş eleman iki düğümlü ve her düğümü düşey yer değiştirme ve dönmeye sahip iki serbestlik dereceli bir elemandır. Bernoulli kiriş eleman için rijitlik ve geometrik rijitlik matrisleri sırasıyla aşağıdaki denklemlerle verilmiştir [12].

$$k = \frac{1}{l^3} EI \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$k_g = \frac{1}{30l} \begin{bmatrix} 36 & 3l & -36 & 3l \\ 3l & 4l^2 & -3l & -l^2 \\ -36 & -3l & 36 & -3l \\ 3l & -l^2 & -3l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada  $E$  elastiklik modülünü,  $I$  alan atalet momentini ve  $l$  eleman uzunluğunu ifade etmektedir. Eksenel basma kuvvetlerine maruz kirişin burkulma yük değeri aşağıdaki öz değer ifadesi ile hesaplanır [13];

**KOMPOZİT MALZEMEYLE KAPLI ALÜMİNYUM KİRİŞİN STATİK VE BURKULMA ANALİZİ**

$$[K - \lambda K_g] X = 0 \tag{3}$$

Burada,  $K$  ve  $K_g$  sırasıyla sistemin global halde katılık ve geometrik rijitlik matrislerini,  $\lambda$  kritik yükü ve  $X$  burkulma modlarını ifade etmektedir. Basit mesnetli kirişe ait burkulma yük ifadesi aşağıdaki denklemlerle belirtilmiştir [13].

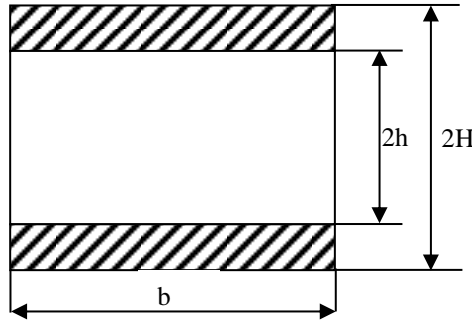
$$\lambda_{kr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \tag{4}$$

Ortasından sabit yüke maruz kirişin maksimum yer değiştirme ifadesi aşağıdaki denklemlerle tanımlanmıştır [14].

$$\delta = \frac{FL^3}{48EI} \tag{5}$$

**2.2. Kompozit Kirişin Modellenmesi**

Kompozit kirişler genellikle farklı mekanik özelliklere sahip bir çok tabakanın bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Bu çalışmada kompozit kiriş ortası alüminyum, üst ve alt tabakaları grafit/polyamid mazemeden yapılmıştır. Çalışmada kullanılan basit mesnetli kirişe ait kesit Şekil 1’de verilmiştir



**Şekil 1.** Yüzeyleri kompozit tabakalarla kaplı alüminyum kirişin kesiti

Kompozit kirişe ait eşdeğer rijitlik ifadesi aşağıdaki denklemlerle verilmiştir [2].

$$(EI)_{eşdeğer} = \frac{2b}{3} [E_a h^3 + E_k (H^3 - h^3)] \tag{6}$$

Burada  $E_a$  ve  $E_k$  sırasıyla alüminyum ve kompozitin elastiklik modülleridir. Yüzey kaplaması grafit/polyamid malzemesine ait malzeme sabitlerinin hesaplanması aşağıdaki denklemlerle belirlenmektedir [15].

$$\rho = \rho_f V + \rho_m (1-V) \tag{7}$$

$$E_{11} = E_f V + E_m (1-V) \tag{8}$$

$$E_{22} = E_m \left[ \frac{E_f + E_m + (E_f - E_m)V}{E_f + E_m - (E_f - E_m)V} \right] \tag{9}$$

$$\nu_{12} = \nu_f V + \nu_m (1-V) \tag{10}$$

$$G_{12} = G_m \left[ \frac{G_f + G_m + (G_f - G_m)V}{G_f + G_m - (G_f - G_m)V} \right] \tag{11}$$

Burada,  $\rho$  yüzeyleri kompozit tabakalarla kaplı alüminyum kirişin yoğunluğunu,  $E_{11}$  kompozit malzemenin lif doğrultusundaki,  $E_{22}$  malzemenin lif doğrultusuna dik yöndeki,  $G_{12}$  kayma rijitlik modülünü,  $\nu_{12}$  Poisson oranını,

Y. CUNEDİOĞLU

$E_f, E_m$  sırasıyla lif ve matrisin elastiklik modülleridir.  $V$  kompozit malzemenin hacim oranını,  $\nu_f, \nu_m$  sırasıyla lif ve matris malzemesinin Poisson oranlarını,  $\rho_f, \rho_m$  sırasıyla lif ve matris malzemesinin yoğunluklarını,  $G_f, G_m$  ise sırasıyla lif ve matris malzemesinin rijitlik modüllerini belirtmektedir.

Lif doğrultularının  $x$  eksenine yaptığı herhangi bir  $\theta$  açısındaki kompozit malzeme elastiklik sabitinin hesaplanması aşağıdaki denklemlerle tayin edilir [16];

$$(E_x)_i = \frac{E_{11}}{m^4 + \left(\frac{E_{11}}{G_{12}} - 2\nu_{12}\right)n^2m^2 + \frac{E_{11}}{E_{22}}n^4} \quad (12)$$

Burada  $(E_x)_i$   $i$ . tabakanın  $x$  eksenine doğrultusundaki elastiklik modülünü,  $m = \cos \theta$ ,  $n = \sin \theta$  ve  $\theta$  fiber oryantasyon açısını ifade etmektedir.

### 2.2.1. Kompozit Malzemeyle Kaplı Alüminyum Kiriş Modelin Doğrulanması

Bu çalışmada kompozit malzemeyle kaplı kirişin tarafsız eksene göre simetrik olduğu farz edildiğinden düzlem içi deformasyonlarla eğilme deformasyonları arasında bir bağlantı yoktur. Bu nedenle Euler-Bernoulli kiriş teorisinin sonlu elemanlar modellemesi tabakalı kompozit kirişlere doğrudan uygulanabilir.

**Örnek 1:** Kompozit kirişin MATLAB’da yazılan sonlu elemanlar kodunun doğrulanması için literatürde yer alan bir örnek ele alınmıştır. Kompozit malzemeye ait malzeme özellikleri  $E_{11} = 155 \text{ GPa}$ ,  $E_{22} = 12,1 \text{ GPa}$ ,  $G_{12} = 4,4 \text{ GPa}$ ,  $\nu_{12} = 0,248$  ve  $\rho = 1560 \text{ kg/m}^3$ . Kirişe ait uzunluk  $L = 0,25 \text{ m}$ , genişlik  $b = 0,01 \text{ m}$  ve kalınlık  $h = 0,001 \text{ m}$ ’dir [7]. Çalışmada kompozit kirişin tek tabaka ve lif oryantasyon açısının  $0^\circ$  ve  $90^\circ$  durumları için literatürle kıyas yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Tek tabakalı  $\theta = 0^\circ$  ve  $90^\circ$ ’li kompozit kirişin burkulma yük değerleri

Burkulma yükü $\lambda$ (N)	$\theta = 0^\circ$ [7]	Bu çalışma	$\theta = 90^\circ$ [7]	Bu çalışma
$\lambda_1$	20,495	20,397	1,599	1,592
$\lambda_2$	81,982	81,589	6,399	6,369
$\lambda_3$	184,46	183,587	14,399	14,331
$\lambda_4$	327,929	326,424	25,599	25,482
$\lambda_5$	512,39	510,190	39,999	39,827

Tablo 1’den görüleceği üzere bu çalışmada bulunan sonuçların literatürle uyum içinde oldukları anlaşılmaktadır.

**Örnek 2:** Kompozit kaplı alüminyum kirişin MATLAB’da yazılan sonlu elemanlar kodunun doğrulanması için literatürde yer alan kesiti Şekil 1’de verilen basit mesnetli bir kiriş örneği ele alınmıştır. Kirişe ait uzunluk  $L = 0,5 \text{ m}$ , genişlik  $b = 0,025 \text{ m}$  ve kalınlık  $H = 0,004 \text{ m}$ ’dir. Kiriş malzemesi çekirdek olarak alüminyum ve yüzey kaplaması olarak karbon/epoksi kullanılmıştır. Alüminyumun elastiklik modülü  $E_a = 70 \text{ GPa}$ , yoğunluğu  $\rho_a = 2800 \text{ kg/m}^3$ , Poisson oranı  $\nu = 0,29$ , karbon/epoksi malzemeye ait mekanik özellikler ise  $E_{11} = 147 \text{ GPa}$ ,  $E_{22} = 5 \text{ GPa}$ ,  $G_{12} = 5 \text{ GPa}$ ,  $\rho = 1580 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu = 0,3$  şeklindedir [2]. Analizlerde 40 eleman kullanılarak  $h/H$  oranına bağlı olarak bulunan deplasman ve 1. burkulma yük değerleri ile teorik olarak hesaplanan değerler Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Kompozit malzemeyle kaplı alüminyum kirişin teorik ve nümerik deplasman ve burkulma yük değerleri

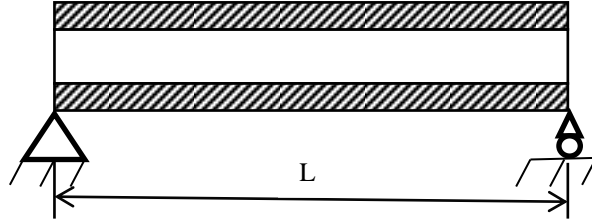
Kiriş	h/H	Teorik Deplasman (m)	Bu Çalışma	Teorik Burkulma Yükü (N)	Bu Çalışma
Tamamen Alm.	1	0,00174386	0,00174386	2947,721	2947,722
$\theta = 0^\circ$ Karbon/Epoksi ile Kaplı	0,75	0,00106597	0,00106597	4822,288	4822,288
	0,50	0,00088859	0,00088859	5784,904	5784,904
	0,25	0,00083726	0,00083726	6139,551	6139,552
Tamamen Komp. ( $\theta = 0^\circ$ )	0	0,00083041	0,00083041	6190,215	6190,216

## KOMPOZİT MALZEMEYLE KAPLI ALÜMİNYUM KİRİŞİN STATİK VE BURKULMA ANALİZİ

Tablo 2'den görüleceği üzere teorik ve sayısal sonuçların iyi bir uyum içerisinde olduğu anlaşılmaktadır. Örnek 2'den anlaşılacağı üzere  $h/H = 0$  oranı kirişin tamamen kompozitten ve tek tabakalı olduğu duruma karşılık gelmektedir. Dolayısıyla Örnek 1'deki doğrulama burada geçerli olmaktadır.

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

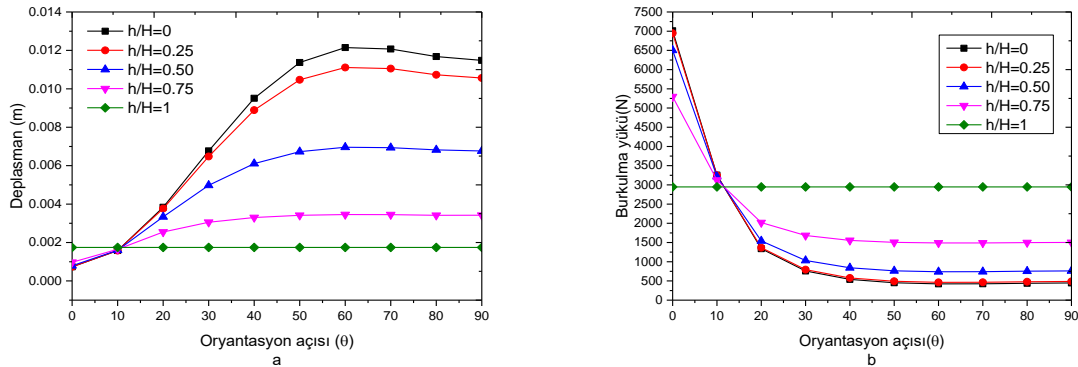
Bu çalışmada çekirdek olarak alüminyum ve yüzey kaplama malzemesi grafit/polyamid olan kesiti Şekil 1'deki gibi olan basit mesnetli bir kiriş Şekil 2'deki gibidir.



Şekil 2. Basit mesnetli kompozit malzemeyle kaplı alüminyum kiriş

Kirişe ait geometrik boyutlar; uzunluk  $L=0,5$  m, genişlik  $b=0,025$  m ve kalınlık  $H=0,004$  m'dir. Grafit/polyamid malzemesine ait mekanik özellikler  $E_m = 2,756$  GPa,  $E_f = 275,6$  GPa,  $G_m = 1,036$  GPa,  $G_f = 114,8$  GPa,  $\nu_f = 0,2$ ,  $\nu_m = 0,33$ ,  $\rho_f = 1900$  kg/m<sup>3</sup> ve  $\rho_m = 1600$  kg/m<sup>3</sup> olarak alınmıştır [17]. Analizlerde kiriş 40 elamana bölünmüş olup bu eleman sayısında sonuçların yakınsaması sağlanmıştır. Çalışmada literatürden farklı olarak alüminyum kiriş grafit elyafla güçlendirilmiş polyamid kompozitle kaplanmıştır. Literatürde analizler alt ve üst yüzey kaplamaları tek bir tabaka ve farklı oryantasyon açıları için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ise yüzey kaplamasının farklı hacim oranlarında tek ve çift tabaka olması durumunda serbest titreşim durumu incelenmiştir. Çalışmada alüminyum ve kompozit tabaka kalınlık oranlarının ( $h/H$ ), lif oryantasyon açılarının ( $\theta$ ), kiriş boy/kalınlık ( $L/2H$ ) oranının ve farklı kiriş tasarımlarının doğal frekanslar üzerindeki etkisi incelenmiştir.

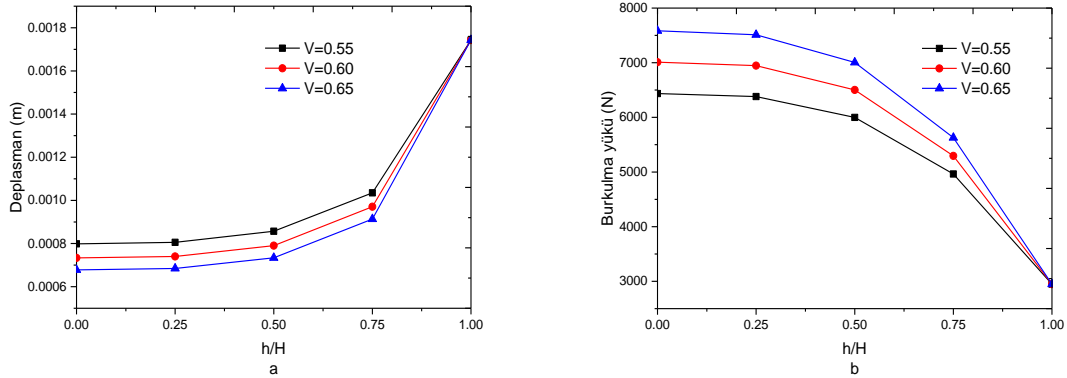
Alüminyum ve kompozit tabaka kalınlık oranlarının ( $h/H$ ) deplasman ve burkulma yükü üzerindeki etkilerini görmek için  $h/H = 0, 0,25, 0,50, 0,75, 1$  oranları seçilmiştir.  $h/H = 0$  durumu kirişin tamamen kompozit,  $h/H = 1$  durumu ise kirişin tamamen alüminyum olduğuna karşılık gelmektedir. Şekil 3a'dan görüleceği gibi lif hacim oranı  $V = 0,6$  ve lif oryantasyon açılarının  $0^\circ$  ve  $10^\circ$  değerlerinde kiriş deplasmanının alüminyum kiriş deplasmanından daha düşük değerde olduğu gözlemlenirken,  $20^\circ$  ile  $90^\circ$  değerleri arasında deplasman değerlerinin kirişin tamamen alüminyumdan tamamen kompozite doğru giderken deplasman değerlerinde bir artış gerçekleşmiş olup maksimum yer değiştirme  $\theta = 60^\circ$  olmuştur. Şekil 3b'den görüleceği üzere  $V = 0,6$  ve lif oryantasyon açılarının  $0^\circ$  ve  $10^\circ$  değerlerinde kiriş burkulma yüklerinin alüminyum kiriş burkulma yükünden daha yüksek olurken,  $20^\circ$  ile  $90^\circ$  değerleri arasında burkulma yük değerlerinin tamamen alüminyum kiriş burkulma yük değerinin altında kaldığı görülmüştür. Ayrıca oryantasyon açısının  $0^\circ$  ile  $60^\circ$  aralığında kompozit kiriş burkulma yük değerlerinde bir düşüş gözlemlenirken bu aralıktan sonra burkulma yük değerlerinde çok az bir artış gerçekleşmiştir. Kompozit kirişteki deplasman ve burkulma yükü değerlerindeki bu değişimler elastiklik modülünün açığa bağlı olarak değişiminden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.  $V = 0,6$  ve değişik  $h/H$  oranlarında deplasman ve burkulma yüklerinin oryantasyon açısıyla değişimi

Y. CUNEDİOĞLU

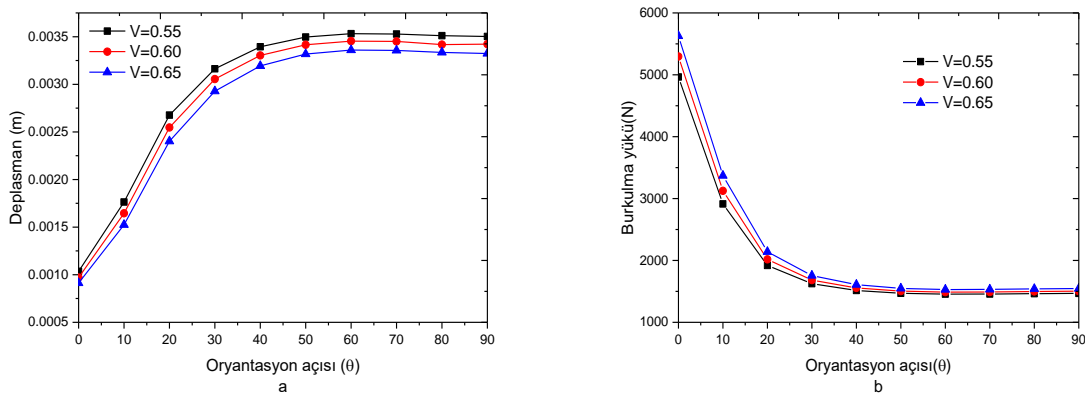
Alüminyum ve kompozit tabaka kalınlık oranlarının ( $h/H$ ) deplasman ve burkulma yük değerlerinin kompozit tabaka hacim oranıyla değişimi  $\theta = 0^\circ$  için Şekil 4 a ve b’de verilmiştir.



Şekil 4. Değişik hacim oranlarında deplasman ve burkulma yüklerinin  $h/H$  oranıyla değişimi

Şekil 4a’dan görüleceği üzere hacim oranının artmasıyla birlikte deplasman değerlerinde bir düşüş gerçekleşirken,  $h/H$  oranının artmasıyla birlikte deplasman değerlerinde bir artış gerçekleşmiştir. Şekil 4b’den görüldüğü üzere hacim oranının artmasıyla beraber burkulma yük değerlerinde bir artış gerçekleşmiş olup  $h/H$  oranının artmasıyla beraber burkulma yük değerlerinde bir düşüş görülmüştür. Deplasman ve burkulma yükü değerlerindeki bu değişimler hacim oranı ve  $h/H$  oranındaki değişimlerle izah edilebilir. Hacim oranının artırılması yapının rijitliğini artırdığından dolayı deplasman değerlerinde düşüşe neden olurken burkulma yükü değerlerinde artışa neden olmaktadır.  $h/H$  oranının artırılması yapının tamamen kompozitten tamamen alüminyuma doğru geçişi ifade ettiğinden giderek kompozit tabaka kalınlığı azaldığından yapının rijitliğinde düşüşe neden olmaktadır. Rijitlik düşüşü deplasman değerlerinde artışa neden olurken burkulma yükü değerlerinde azalmaya neden olmaktadır.

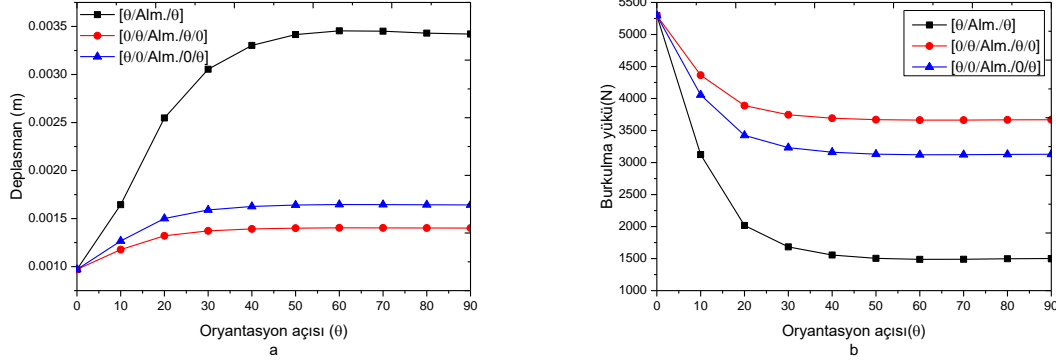
Değişik hacim oranlarında deplasman ve burkulma yüklerinin oryantasyon açısıyla değişimleri için analizler yapılmıştır.  $h/H = 0, 0,25, 0,50$  ve  $0,75$  oranlarında hacim oranının artmasıyla birlikte deplasman değerlerinin düştüğü,  $0^\circ$ ’den  $60^\circ$ ’ye kadar oryantasyon açısının artırılmasıyla birlikte deplasman değerlerinde bir artış kaydedilirken  $60^\circ$ ’den sonra hafif düşüş görülmüştür. Burkulma yükü açısından değerlendirildiğinde  $0^\circ$ ’den  $60^\circ$ ’ye kadar oryantasyon açısının artırılmasıyla birlikte burkulma yükü değerlerinde bir düşüş kaydedilirken  $60^\circ$ ’den sonra hafif artış tespit edilmiştir. Hacim oranının artırılması yapının rijitliğini artırdığından dolayı deplasman değerlerinde düşüşe neden olurken burkulma yük değerlerinde artışa neden olmaktadır. Ancak burada  $h/H = 0,75$  oranı için deplasman ve burkulma yükü grafikleri Şekil 5a ve b’de verilmiştir.



Şekil 5. Değişik hacim oranlarında deplasman ve burkulma yüklerinin oryantasyon açısıyla değişimi

Farklı kiriş tasarımlarının deplasman ve burkulma yükü üzerindeki etkilerini araştırmak için  $V = 0,6$  ve  $h/H = 0,75$  oranı için tasarımlar gerçekleştirilmiştir.  $h/H = 0,75$  oranı için alt ve üst yüzey kaplama malzemesinin kalınlıklarının 1 mm olduğu durumdur. Bu duruma ait kiriş tasarımı  $[\theta/Alm./\theta]$ , yüzey kaplama malzemesinin 0,5 mm’lik 2 tabakadan oluşması durumunda kirişe ait tasarımlar  $[0^\circ/\theta/Alm./\theta/0^\circ]$  ve  $[\theta/0^\circ/Alm./0^\circ/\theta]$  şeklinde seçilmiştir. Bu tasarımlara ait analizler gerçekleştirildiğinde elde edilen deplasman ve burkulma yükü değerlerinin oryantasyon açısıyla değişimleri Şekil 6a ve b’de verilmiştir.

**KOMPOZİT MALZEMEYLE KAPLI ALÜMİNYUM KİRİŞİN STATİK VE BURKULMA ANALİZİ**

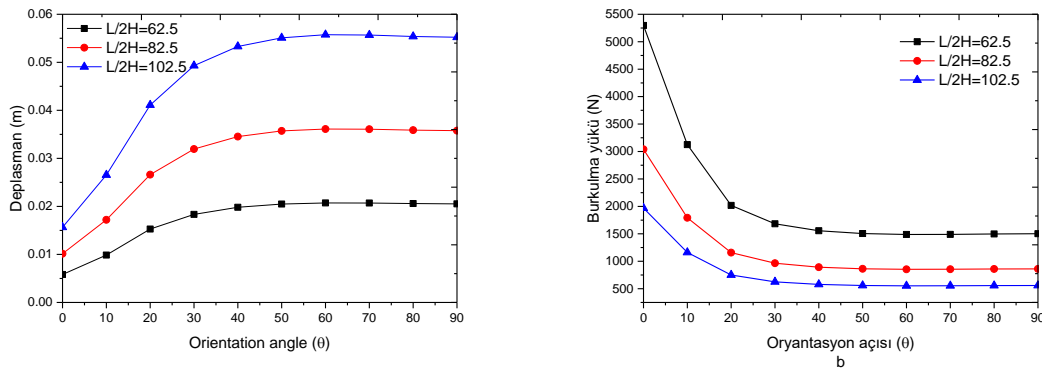


**Şekil 6.** Farklı kiriş tasarımlarının deplasman ve burkulma yükü değerlerinin oryantasyon açısıyla değişimi

Şekil 6a'dan görüleceği üzere tabaka sayısının artırılmayla birlikte deplasman değerlerinde bir düşüş gerçekleşmiştir. Oryantasyon açısının 60°'ye kadar artırılmasıyla deplasman değerlerinde bir artış, 60°'den sonra ise hafif bir düşüş gözlemlenmiştir. Şekil 6b'den görüldüğü gibi tabaka sayısının artırılmayla birlikte burkulma yükü değerlerinde bir artış gerçekleşmiştir. Oryantasyon açısının 60°'ye kadar artırılmasıyla burkulma yükü değerlerinde bir düşüş, 60°'den sonra ise hafif bir artış gözlemlenmiştir. Maksimum burkulma yükü ve minimum deplasman [0°/theta/Alm./theta/0°] dizilimine ait tasarımda gerçekleşmiştir. Bunun nedeni ise dış kaplama tabakasının 0° olması diğer tasarımlara göre daha yüksek bir rijitlik oluşturmamasından kaynaklanmaktadır.

Kiriş boy/kalınlık (L/2H) oranının deplasman ve burkulma yükü üzerindeki etkisini araştırmak için L/2H = 62,5, 82,5 ve 102,5 oranları seçilmiştir. Analizler V = 0,6, h/H = 0,75 için [theta/Alm./theta] tasarımına ait kiriş için yapılmıştır. Deplasman ve burkulma yükü değerlerinin oryantasyon açısıyla değişimi farklı L/2H oranları için Şekil 7a ve b'de verilmiştir.

Şekil 7a'dan görüldüğü gibi L/2H oranının artmasıyla beraber deplasman değerlerinde bir artış görülmüştür. Ayrıca oryantasyon açısının 60°'ye kadar artırılmasıyla deplasman değerlerinde bir artma olurken 60°'den sonra hafif bir düşüş olmaktadır. Şekil 7b'den görüleceği üzere L/2H oranının artmasıyla beraber burkulma yükü değerlerinde bir düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca oryantasyon açısının 60°'ye kadar artırılmasıyla burkulma yükü değerlerinde bir azalma gerçekleşirken 60°'den sonra hafif bir artış tespit edilmiştir. Deplasman ve burkulma yükü değerlerindeki bu değişimler 4 ve 5 numaralı denklemlerle izah edilebilir. Deplasman ve burkulma denklemleri uzunluğun bir fonksiyonu olduğundan dolayı boy artışı deplasman değerlerinde artışa neden olurken burkulma yükü değerlerinde düşüşe neden olmaktadır.



**Şekil 7.** Farklı kiriş boy/kalınlık (L/2H) oranlarında deplasman ve burkulma yükü değerlerinin oryantasyon açısıyla değişimi

**4. SONUÇLAR**

Bu çalışmada Euler-Bornoulli kiriş teorisi kullanılarak yüzeyleri grafit/polyamid malzemeyle güçlendirilmiş alüminyum bir kirişin deplasman ve burkulma yük durumu incelenmiştir. Analizler alüminyum ve kompozit

tabaka kalınlık oranlarının ( $h/H$ ), lif oryantasyon açılarının ( $\theta$ ), kiriş boy/kalınlık ( $L/2H$ ) oranının ve farklı kiriş tasarımları için gerçekleştirilmiştir. Bulunan sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur;

- kompozit kirişte kompozit tabaka kalınlığının artırılması oryantasyon açısına bağlı olarak deplasman ve burkulma yükü değerlerinde düşüşe ve artışa neden olmaktadır.
- $h/H$  oranının deplasman ve burkulma yükü değerlerini önemli ölçüde etkilediği ve oryantasyon açısının  $20^\circ$ - $90^\circ$  aralığında en küçük deplasman ve en büyük burkulma yükü alüminyum kirişte tespit edilmiştir.
- kompozit tabaka hacim oranının artmasıyla birlikte burkulma yükü değerlerinde bir artış buna karşın deplasman değerlerinde bir düşüş görülmüştür.
- kompozit tabaka sayısının deplasman ve burkulma yükü değerlerini önemli ölçüde etkilediği ve en büyük deplasman değerlerinin  $[\theta/Alm./\theta]$  ve en büyük burkulma yükü değerlerinin  $[0^\circ/\theta/Alm./\theta/0^\circ]$  tasarımına ait kirişte gerçekleştiği görülmüştür.
- $L/2H$  oranının artmasıyla burkulma yükü değerleri düşerken, deplasman değerleri artmıştır.
- incelenen bütün parametrelerde en büyük deplasman ve en küçük burkulma yükü değerleri oryantasyon açısının  $60^\circ$  olduğu durumdur.
- incelenen parametrelerde değişiklikler yaparak arzu edilen tasarım gerçekleştirilebilir

## KAYNAKLAR

- [1] HAMADA, A., “Vibration and Damping Analysis of Beams with Composite Coats”, Composite Structures, 32, 33-38, 1995.
- [2] TEKILI, S., KHADRI, Y., MERZOUG, B., DAYA, E.M., DAOUADJI, A., “Free and Foced Vibration of Beams Strengthened by Composite Coats Subjected to Moving Loads”, Mechanics of Composite Materials, 52(6), 789-798, 2017.
- [3] ZIBDEH, H.S., ABU HILAL, M., “Stochastic Vibration of Laminated Composite Coated Beam Traversed by A Random Moving Load”, Engineering structures, 25, 397-404, 2003.
- [4] TEKILI, S., KHADRI, Y., MERZOUG, B., “Finite Element Analysis of Free Vibration of Beams with Composite Coats”, Mechanika, 21(4), 290-295, 2015.
- [5] KHDEIR, A.A., REDDY., J.N., “Buckling of Cross- Ply Laminated Beams with Arbitrary Boundry Conditions”, Composite Structures , 37(1), 1-3, 1997.
- [6] AYDOĞDU, M., “Buckling Analysis of Cross-Ply Laminated Beams with General Boundary Conditions by Ritz Method”, Composites Science and Technology, 66, 1248-1255, 2006.
- [7] EMAM, S.A., NAYFEH, A.H., “Postbuckling and Free Vibrations of Composite Beams”, Composite Structures, 88, 636-642, 2009.
- [8] DOUVILLE, M.A., GROGNEC, P.L., “Exact Analytical Solutions for the Local and Global Buckling of Sandwich Beam- Columns Under Various loadings”, International Journal of Solids and Structures, 50, 2597-2609, 2013.
- [9] HU, H. A., BELOUETTAR, S., FERRY, M.P., DAYA E. M., “Review and Assessment of Various Theories for Modelling Sandwich Composites”, Composite Structures, 84, 282-292, 2008.
- [10] MANTARI, J.L., CANALES, F.G., “Free Vibration and Buckling of Laminated Beams via Hybrid Ritz Solution for Various Penalized Boundary Conditions”, Composite Structures, 152, 306-315, 2016.
- [11] NGUYEN, T.K., NGUYEN, N.D., VO, T.P., THAI, H.T., “Trigonometric Series Solution for Analysis of Laminated Composite beams”, Composite Structures, 160, 142-151, 2017.
- [12] CUNEDİOĞLU, Y., “Elastik Ortama Oturan Kompozit Kirişlerin Farklı Sıcaklık ve Eksenel Yük Altında Burkulma ve Serbest Titreşimi”, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6 (1), 180-190, 2017.
- [13] OREH, A.M., KARKON, M., “Finite Element Formulation for Stability and Free Vibration Analysis of Timoshenko Beam”, Advances in Acoustics and Vibration, 1-7, 2013.
- [14] SAYMAN, O., KARAKUZU, R., AKTAŞ, A., Mukavemet 2, Sürat Üniversite yayınları, 2012.
- [15] CUNEDİOĞLU, Y., BEYLERGİL B., “Free Vibration Analysis of Damaged Composite Beams”, Structural Engineering and Mechanics, 55(1), 79-92, 2015.
- [16] CUNEDİOĞLU, Y., “Analyses of Laminated Cantilever Composite Beams by Model Order Reduction Techniques”, Mechanics Based Design of Structures and Machines, 39, 22-45, 2011.