



İnce Cidarlı Kompozit Kirişlerin Yanal Burkulma Davranışına Şerit Delaminasyonun Etkisi

Effect of Strip Delamination on Lateral Buckling Behavior of Thin-Walled Composite Beams

Yusuf Arman^{1*} 

¹Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Tınaztepe Kampüsü, Buca, İzmir, Türkiye

Sorumlu Yazar / Corresponding Author: yusuf.arman@deu.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 15.11.2018

Kabul Tarihi / Accepted: 01.12.2018

DOI:10.21205/deufmd.2019216126

Araştırma Makalesi/Research Article

Atıf şekli/ How to cite: ARMAN, Y.(2019). İnce Cidarlı Kompozit Kirişlerin Yanal Burkulma Davranışına Şerit Delaminasyonun Etkisi. DEUFMD, 21(61), 271-278.

Öz

Bu çalışmada, şerit halinde süreksizlik bölgesine (delaminasyona) sahip kompozit konsol kirişlerin yanıl burkulma yükleri deneysel olarak ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Deneylerde kullanılacak kompozit numunelerin çıkarıldığı levhalar vakum destekli reçine infüzyonu yöntemi ile tek yönlü fiber kumaşlar kullanılarak üretilmiştir. Sekiz tabaka kullanılan levhalarda fiber yönlenme açıları üç farklı açıda $[(0^\circ/90^\circ)_2]_s$, $[(30^\circ/-60^\circ)_2]_s$ ve $[(45^\circ/-45^\circ)_2]_s$ olarak seçilmiştir. Numuneler bir ucu ankastre diğer ucu serbest olacak şekilde mesnetlenmiş ve uygulanan basma testi sonucunda kritik yanıl burkulma yükleri elde edilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde ANSYS 19.1 paket programı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda $(30^\circ/-60^\circ)$ ve $(45^\circ/-45^\circ)$ fiber yönlenme açılarına sahip kirişlerin kritik yanıl burkulma yüklerinin, $(0^\circ/90^\circ)$ fiber yönlenme açısına sahip kirişlere göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bunun yanında delaminasyon yüksekliğinin artması da kritik yanıl burkulma yüklerinin azalmasına sebep olmuştur. Ayrıca test sonuçları ve sonlu elemanlar analiz sonuçları karşılaştırılmış ve birbirine yakın değerler elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İnce cidarlı kompozit, yanıl burkulma, şerit delaminasyon, sonlu elemanlar yöntemi

Abstract

In this study, lateral buckling load was obtained in a composite beam with strip delamination by using experimental and finite element method. The plates of composite samples used in experiments were produced by using unidirectional fiber fabrics with vacuum assisted resin infusion method. In the plates with eight layers, the fiber orientation angles were chosen at three different angles as $[(0^\circ/90^\circ)_2]_s$, $[(30^\circ/-60^\circ)_2]_s$ and $[(45^\circ/-45^\circ)_2]_s$. The samples are supported so as to be one end is fixed and the other end is free, and critical lateral buckling loads were obtained as a result of the compression test applied. ANSYS 19.1 package program was used for finite element analysis. As a result of the study, it was observed that the critical lateral buckling loads of the beams with $(30^\circ/-60^\circ)$ and $(45^\circ/-45^\circ)$ fiber orientation angles were higher than the beams with $(0^\circ/90^\circ)$ fiber orientation angles. Furthermore, the increase in delamination height caused the reduction of critical lateral buckling loads. In addition, test results and finite element analysis results were compared and similar values were obtained.

Keywords: Thin walled composites, lateral buckling, strip delamination, finite element method

1. Giriş

Fiber takviyeli kompozitler, düşük ağırlık, yüksek mukavemet, yüksek sertlik, korozyon direnci ve yorulma direnci gerektiren çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin yapısal uygulamalarda kiriş olarak tercih edilmesi, yapıya yukarıda bahsi geçen avantajlardan birçoğunu kazandırmaktadır. İnce cidarlı kompozit kirişler de bu tür yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, fiber takviyeli kompozitler, kompozit yapılarda karşılaşılan çeşitli hasar mekanizmalarına karşı hassastırlar. Bu hasar mekanizmalarından en önemlilerinden biri delaminasyon olarak adlandırdığımız tabakalar arası meydana gelen süreksizlik bölgeleridir [1]. İnce cidarlı kirişlerin tasarımı narinliklerinden dolayı delaminasyona verecekleri tepki çok daha fazla olacaktır. Delaminasyon; imalat nedeni ile oluşan kusurlar, darbe hasarları, tabakalar arası üç boyutlu gerilmeler ve basınçlı yüklemeler gibi çeşitli nedenlerden dolayı ortaya çıkabilir. Delaminasyonların varlığı kompozit yapının dayanımını ve yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde düşürebilir. Buna ek olarak yük uygulandığı anda yapının stabilitesi ile ilgili sorunlar (burkulma davranışları) meydana gelebilir. Burkulma yükünün seviyesi, tabakalı kompozit malzemenin sahip olduğu delaminasyonun boyut, konum ve şekline bağlıdır. Birçok araştırmacı deneysel, analitik veya sonlu elemanlar yöntemlerini kullanarak kompozit yapıların yük taşıma kapasitesine delaminasyonun etkisini incelemiştir.

İnce cidarlı kirişlerin yanal burkulma analizi literatürde ayrıntılı olarak çalışılmıştır [2, 3]. I-kiriş kenarlarının esnek olmayan lokal kenar burkulması için analitik bir modelleme önerilmiştir [4]. Bu modelleme burkulma sürecinin iki kısımdan oluştuğunu kabul etmektedir. Model farklı gerilme-şekil değiştirme ilişkileri için lokal kısa kenar burkulmalarının kuvvet deformasyon ilişkisini öncesinde yaklaşık olarak tahmin edebilmektedir. Esnek olmayan çözümler için Von-Mises akma kriteri kullanılmıştır.

I kesitli tabakalı bir kompozit kirişin yanal burkulması için önerilen çalışma klasik tabaka teorisi yöntemine dayanmaktadır [5]. Bu çalışma ile ince cidarlı kompozitler için merkezi nokta yükü, basit eğilme ve üniform yayılı yük altında nümerik sonuçlar elde edilmiştir.

Tabakalı bir kompozit kirişin burkulması için sunulan çalışmada kesitin yanal burkulmasını incelemek amacıyla genel bir analitik çözüm önerilmiştir [6]. İnce cidarlı kompozitler için merkezi nokta yükü, basit eğilme ve üniform yayılı yük altında açılı tabakalar ve katmanlar ile nümerik sonuçlar elde edilmiştir.

Düzlem içi burkulma öncesi deformasyonların yanı sıra kesme esnekliğinin, çift simetrik ince cidarlı kompozit kirişlerin yanal burkulması üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmada [7], problemi çözmek için Ritz varyasyon yöntemi kullanılmıştır. Sayısal sonuçlar, klasik yanal burkulma öngörülerinin yanlış olduğunu ve güvenilir sonuçların elde edilmesi için dikkate alınan etkilerin hesaplamalara alındığını göstermektedir. Ayrıca, farklı kompozit tabakaları için yük noktasının mesafe boyu ve yüksekliğinin etkileri de araştırılmıştır.

Mono simetrik kesitli ince cidarlı bir kompozit kirişin yanal burkulması üzerine yapılan çalışmada ise klasik tabaka teorisi kullanılarak, rasgele açık enine kesitlerle ve genel tabaka dizilişleriyle ince cidarlı tabakalı kompozitler için genel, geometrik olarak doğrusal olmayan bir model önerilmiştir [8]. Problemi formüle etmek için genel doğrusal olmayan ana denklemler ve yanal burkulma denklemleri türetilmiştir. Mono-simetrik kesitli kompozit kirişin yanal burkulmasını incelemek için tek boyutlu sonlu elemanlar geliştirilmiştir.

Simetrik ve rastgele tabakalarla uç momentlere maruz I ve kanal kesitli ince cidarlı kompozit kirişlerin, yanal burkulma analizi için bir sayısal yöntem geliştirilmiştir [9]. Ayrıca, çeşitli sınır koşullarına sahip tek yönlü ve çapraz katmanlı lamine kompozit kirişlerin yanal burkulma momentleri için analitik çözümler elde edilmiştir.

I kesitli basit mesnet kiriş-kolon elemanları için birleşik eğilme ve eksenel kuvvetler altında, doğrusal olmayan stabilite modeline dayanan analitik bir çözüm türetilmiştir [10]. Ayrıca kabuk elemanlarının kullanıldığı doğrusal olmayan bir sonlu elemanlar yöntemi yazılımı da geliştirilmiştir.

Dokuma kumaş tabakalı kompozit konsol kirişin yanal burkulması üzerine kiriş üzerinde bulunan deliklerin etkisi deneysel bir çalışma ile incelenmiştir [11]. Deneysel çalışma sonlu elemanlar çözümüyle karşılaştırılmıştır. Çalışmada delik konumunun kirişin serbest ucuna yaklaşması durumunda delik etkisinin

azaldığı gözlemlenmiştir. Son aşamada deneysel sonuçlarla sonlu elemanlar analizi sonuçları birbiri ile uyumlu olarak elde edilmiştir.

Birleşik eğilme ve eksenel kuvvetler altında çapraz tabakalı ince cidarlı kirişlerin yanal stabilite analizi analitik bir çözüm ile sunulmuştur [12]. Çözüm büyük yer değiştirmeler ve rotasyonların şartlarında formüle edilmiştir. Kapalı form analitik çözüm basit mesnetli çift simetrik kirişler için geçerlidir.

Epoksi reçine ile güçlendirilmiş farklı ağırlıkta nano-kil partiküller içeren S-cam elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerin, farklı ağırlıkta nano-kil partikül içerikleri için kritik yanal ve eksenel burkulma yükleri deneysel olarak tespit edilmiştir [13]. Aynı zamanda fiber oryantasyonunun yanal ve eksenel burkulma yükleri üzerine etkisi incelenmiştir.

Sinüs biçimli kıvrımlı ağ ahşap kompozit I-kirişlerin burkulma yükü kapasitesine geometrinin etkisini belirlemek amacıyla teorik bir model geliştirilmiştir [14]. Kritik burkulma yükünü elde etmek amacıyla Rayleigh-Ritz yöntemi kullanılmış ve teorik sonuçlar deneysel ve nümerik simülasyon çalışmaları ile doğrulanmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular ile sinüs biçimli kıvrımlı ağ ahşap kompozit I-kirişler için en uygun tasarım oranları belirlenmiştir.

Birleşik eğilme ve eksenel kuvvetler altında konik ince cidarlı açık ve kapalı çift simetrik kesitli kirişlerin elastik yanal burkulmasına kayma deformasyonlarının etkisini incelemek amacıyla doğrusal olmayan geometrik bir giriş teorisi sunulmuştur [15]. Eksenel ve eğilme yüklerinin denge denklemlerini elde etmek amacıyla Ritz yöntemi kullanılmıştır.

Cam/epoksi kompozitlerin burkulma ve burkulma davranışı üzerine delaminasyonun yer, kalınlık ve sayısının mekanik ve akustik emisyon analizi ile etkileri sunulan çalışma ile araştırılmıştır [16]. Mekanik sonuçlar, yapay delaminasyonun numunenin yüzeyine daha yakın olduğu durumlarda; maksimum yükten sonra yükün daha hızlı düştüğünü ve son bozulmadan önceki son yer değiştirmenin azaldığını göstermiştir. Kritik ve maksimum yükler de, teflon filmin kalınlığının, yani yapay delaminasyonun kalınlığının artırılmasıyla azaltılmıştır.

Tek delaminasyonlu cam elyaf kompozit plakaların burkulması üzerine deneysel ölçümler ve sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir [17]. İmalat işlemi sırasında, makro kusuru oluşturmak için $13 \mu\text{m}$ kalınlığındaki dikdörtgen teflon filmler farklı yönelimli katmanlar arasına sokulmuştur. Sonlu eleman çözümleri ile deneysel ölçümler arasında yakın değerler elde edilmiştir.

Tabakalı kompozitlerde delaminasyon boyut ve yerinin burkulma davranışlarına etkilerini incelemek amacıyla deneysel çalışma yapılmıştır [18]. Kompozit plakalar, farklı delaminasyon boyutlarına ve tabakalar arasındaki pozisyonlara uygun olarak üretilmiştir. Bu plakalar $a/L=0.3, 0.5, 0.7$ (a : Delaminasyon genişliği ve L : Burkulma uzunluğu) delaminasyon oranlarından oluşturulmuştur. Elde edilen yük-deplasman grafiğinden kritik burkulma yükleri belirlenmiştir. Buna ek olarak, tabakanın kalınlığına göre delaminasyon alanında uygulanan yükün etkisiyle oluşan yanal deplasmanlar elde edilmiştir. Elde edilen değerler kıyaslanarak optimum delaminasyon boyutu belirlenmeye çalışılmıştır.

Yanal sapmalara maruz kalan dikdörtgen gömülü delaminasyonlar içeren plakalar için bir teori geliştirilmiştir [19]. Kompozit laminat ve delaminasyon alanı gibi farklı parametrelerin etkileri, burkulma yükü altında analitik olarak incelenmiş ve sonuçlar üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, delaminasyon alanı ve kalınlıklarının farklı geometrik parametreleri için kompozit levha üzerindeki sapmalara etkileri elde edilmiştir.

Bu çalışmada ise, şerit süreksizlik bölgesine (delaminasyona) sahip cam lifi-epoksi kompozit konsol kirişlerde yanal burkulma davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Kompozit kirişler vakum destekli reçine infüzyonu yöntemi ile üretilen levhalardan elde edilmiştir. Bu amaçla, farklı fiber yönlenme açılarında simetrik olarak yerleştirilmiş sekiz tabakalı kompozit levhalar üretilmiştir. Fiber yönlenme açıları olarak $[(0^\circ/90^\circ)_2]_s$, $[(30^\circ/-60^\circ)_2]_s$ ve $[(45^\circ/-45^\circ)_2]_s$ açıları seçilmiştir. Şerit delaminasyonu oluşturmak için üretim esnasında levhanın orta düzlemine teflon film yerleştirilmiştir. Levhalardan çıkarılan deney numuneleri bir ucu ankastre diğer ucu serbest olacak şekilde, konsol kiriş olarak, mesnetlenmiş ve serbest uçlarından basma yükü uygulanmıştır. Deneylerden elde edilen yük-

deplasman eğrileri üzerinden kritik yanal burkulma yükleri (P_{kr}) tespit edilmiştir. Sonuç olarak, şerit delaminasyonun yüksekliğinin artmasının ve fiber yönlenme açılarının değişmesinin kritik yanal burkulma yükünü etkilediği belirlenmiştir. Ayrıca, deneylerden elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar analizi sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve her iki sonucunda birbiri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışma deneysel ve nümerik olarak gerçekleştirilmiş, deneylerden elde edilen sonuçlar sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

2.1. Deneysel metot

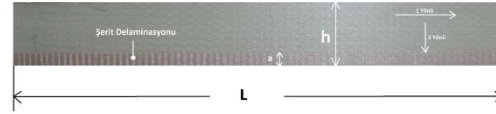
Çalışmanın deneysel kısmında öncelikle vakum destekli reçine infüzyonu yöntemi kullanılarak cam lifi-epoksi kompozit levhalar üretilmiştir. Üretimde takviye elemanı olarak 300 gr/m² lik tek yönlü E-cam lifi, matris malzemesi olarak da Duratek DT E 1000 tipi reçine ve bu reçineye uygun DT S 1105 tipi sertleştirici kullanılmıştır. Delaminasyon oluşturmak üzere tabakaların orta düzlemine (4. ve 5. tabakalar arasında) şerit halinde 5 mikron kalınlığında teflon filmler yerleştirilmiştir. Her bir fiber oryantasyonu için ayrı kompozit levhalar üretilmiştir. Üretimler sonunda kompozit plakaların kalınlığı 2.5 mm olarak elde edilmiştir.

Üretimi yapılan kompozit levhalar üzerinden, mekanik özelliklerin tespit edilmesi için standart test numuneleri çıkarılmıştır (Mekanik özellikler sonlu elemanlar analizlerinde kullanılacaktır). Bu amaçla (0°/90°) temel fiber yönlenme açısına sahip kompozit levhanın delaminasyon içermeyen bölgesinden numuneler alınmış ve standart test yöntemleri (çekme, basma ve kayma testleri) uygulanarak malzemenin temel fiber yönlenme açılarındaki mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Elde edilen mekanik özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Tabloda verilen 1 ve 2 yönleri (0°/90°) fiber yönlenme açısına sahip kompozit levhada sırası ile 0° ve 90° yi temsil etmektedir (Şekil 1).

Tablo 1. Temel fiber yönlenme açılarında kompozit levhanın mekanik özellikleri

Boyuna yöndeki (1 yönlü) <u>elastisite modülü</u>	E_1	(GPa)	31.4
Enine yöndeki (2 yönlü) <u>elastisite modülü</u>	E_2	(GPa)	22.8
<u>Poisson</u> oranı	ν_{12}	-	0.25
<u>Kayma modülü</u>	G_{12}	(GPa)	7.5
Boyuna yöndeki çekme mukavemeti	X_c	(MPa)	677
Enine yöndeki çekme mukavemeti	Y_c	(MPa)	380
Boyuna yöndeki basma mukavemeti	X_c	(MPa)	429
Enine yöndeki basma mukavemeti	Y_c	(MPa)	211
Kayma mukavemeti	S	(MPa)	68

Yanal burkulma testlerinde kullanılmak üzere, kompozit levhalar üzerinden çıkarılan test numunelerinin bir örneği Şekil 1'de gösterilmiştir. Burada, kirişin uzunluğu (L) ve yüksekliği (h) sırasıyla 300 mm ve 40 mm olarak seçilmiştir. Şekil 1'de gösterildiği gibi delaminasyon yüksekliği " a " olarak tanımlanmış ve kritik yanal burkulma yüküne delaminasyon alanının etkisini incelemek için 0 mm (delaminasyonsuz) ile 18 mm arasında ($a=0, 3, 6, 9, 12, 15, 18$ mm olarak) değiştirilmiştir.

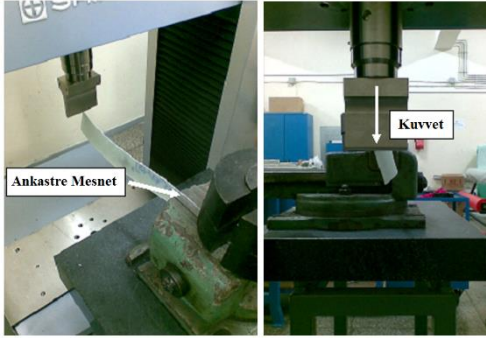


Şekil 1. Delaminasyonlu kompozit kiriş test örneği

Her bir fiber yönlenme açısı ve her bir a değeri için üçer adet test numunesi hazırlanmış ve toplamda 63 adet numune üzerinde yanal burkulma testleri uygulanmıştır.

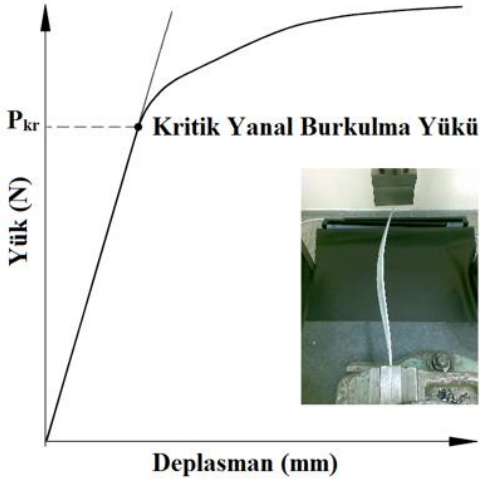
Yanal burkulma testlerinde, Şekil 2'de gösterilen test düzeneği kullanılmıştır. Numuneler bir ucu ankastre diğer ucu serbest sınır şartı sağlanacak şekilde düzeneğe bağlanmıştır. Ankastre sınır şartını sağlamak amacıyla bir mengene kullanılmıştır. Yanal burkulma testleri, Shimadzu AG-X 100 kN üniversal çekme-basma test cihazının basma modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelere serbest uçlarından Şekil 2'de gösterildiği gibi basma yükü uygulanmış ve deney sonucunda yük-deplasman grafikleri elde edilmiştir (Şekil 3)

Şekil 3'de bir örneği gösterilen yük-deplasman grafikleri üzerinde, doğrusallığın bozulduğu nokta kritik yanal burkulma yükü (P_{kr}) olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 2. Yanal Burkulma Test Düzenegi

Bunun için grafik üzerine lineer bölgeye paralel olacak şekilde bir doğru çizilmiş ve bu doğrunun grafikten ayrıldığı nokta belirlenmiştir. Literatürde sunulan çalışmalarda da kritik yanal burkulma yüklerini enzer bir şekilde elde edilmiştir [11, 18]. Yanal burkulma testleri, her bir parametre değeri (fiber yönlenme açısı ve delaminasyon yüksekliği) için üçer adet numune üzerinde uygulanmış ve kritik yanal burkulma yükleri bu üç numuneden elde edilen değerlerin ortalaması alınarak elde edilmiştir.

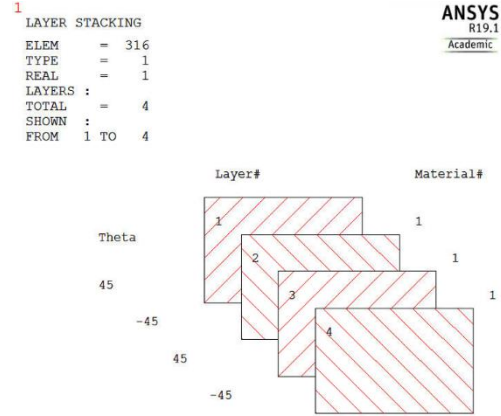


Şekil 3. Kritik Yanal Burkulma Yükünün Tespit Edilmesi [11, 18]

2.2. Sonlu elemanlar metodu

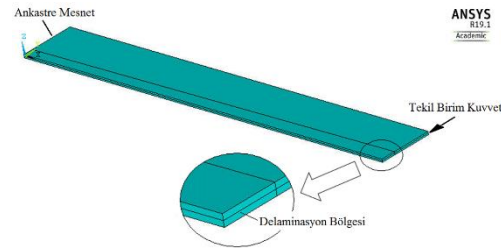
Sonlu elemanlar metodu ile çözümde ANSYS paket programı kullanılmıştır. Model oluşturulurken öncelikle bir alan tanımlanmış ve bu alandan Şekil 4'te görüldüğü gibi zıt yönlerde (+z ve -z) iki ayrı hacim oluşturulmuştur. Hacimlerin her biri dört tabakadan oluşmakta olup tabakaların özellikleri (mekanik özellikleri

ve fiber yönlenme açıları) Şekil 4'de verilen örnekteki gibi tanımlanmıştır.



Şekil 4. Tabaka dizilişlerinin ANSYS'de modellenmesine ait bir örnek

Oluşturulan hacmin toplam kalınlığı, deneysel çalışmalarda kullanılan numune kalınlığı ile aynıdır (2.5 mm). Şerit delaminasyon, orta düzlem üzerinde ayrı bir alan olarak tanımlanmıştır. Delaminasyon modellenirken delaminasyon bölgesindeki hacimlerin yapışmaması sağlanmış, delaminasyon bulunmayan bölgelerde ise hacimler birbirine yapıştırılmıştır. Bu şekilde yük uygulandığında delaminasyon bölgesinde tabakaların birbirinden ayrılması gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, kiriş modeli bir tarafından ankastre olarak mesnetlenmiş, serbest uçtan da -y doğrultusunda tekil birim kuvvet uygulanarak burkulma analizi yapılmıştır. (Şekil 5).



Şekil 5. Sonlu Elemanlar Modeli

Analizler sonucunda, birinci burkulma modu olarak elde edilen sonuçlar kritik yanal burkulma yükü olarak değerlendirilmiştir. Literatürde ara yüzey çatlağı bulunan kompozit kirişlerin yanal burkulma yükleri sonlu eleman analizleri ile incelenmiş ve kritik yanal burkulma yükleri benzer bir şekilde tespit edilmiştir [20].

3. Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu çalışmada, şerit delaminasyona sahip cam lifi-epoksi kompozit konsol kirişlerde yanal burkulma davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar için delaminasyon yüksekliği $a=0$ (delaminasyonsuz), 3, 6, 9, 12, 15, 18 mm olarak seçilmiş ve burkulma deneyleri sonucunda kritik yanal burkulma yükleri elde edilmiştir. Aynı delaminasyon yükseklikleri için sonlu eleman analizleri de yapılmıştır. Deneysel olarak elde edilen ortalama kritik yanal burkulma yükleri ve sonlu eleman analizlerinden elde edilen kritik yanal burkulma yükleri Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'de verilen değerler, ayrıca, kritik yanal burkulma yüklerinin delaminasyon yüksekliğine bağlı olarak değişimlerini ifade edebilmek için fiber yönlenme açlarına göre Şekil 6-8'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Tablo 2. Kritik yanal burkulma yükleri

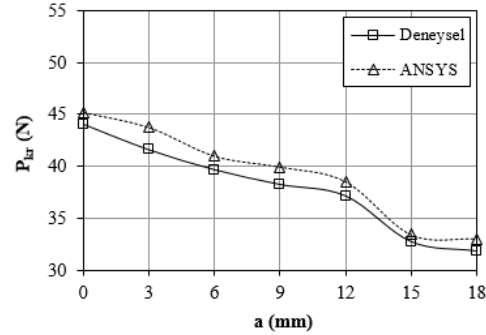
Delaminasyon Yüksekliği a (mm)	Kritik Yanal Burkulma Yükleri P_{cr} (N)					
	Fiber Yönlenmesi					
	[[0°/90°] ₂] _s		[[30°/-60°] ₂] _s		[[45°/-45°] ₂] _s	
	Dency	ANSYS	Dency	ANSYS	Dency	ANSYS
0	44,09	45,20	48,39	47,78	50,71	49,60
3	41,64	43,75	45,46	45,86	47,03	48,01
6	39,72	41,00	43,74	43,05	45,01	45,48
9	38,31	39,96	42,03	41,73	45,10	44,55
12	37,20	38,55	34,01	36,53	39,05	40,27
15	32,80	33,45	32,58	35,31	37,67	39,46
18	31,90	33,06	32,30	34,50	37,34	39,34

Tablo 2'de ve Şekil 6-8'de görüldüğü gibi deneysel olarak elde edilen ortalama kritik yanal burkulma yükleri ve sonlu eleman analizlerinden elde edilen kritik yanal burkulma yükleri uyum göstermektedir. Bu sonuç sonlu eleman analizlerinin gerek oluşturulan model ve gerekse uygulanan yöntem açısından doğru olduğunu ispatlamıştır.

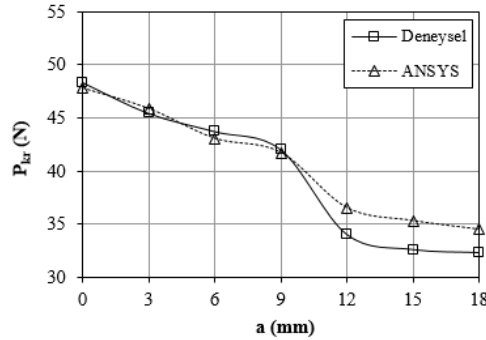
Genel olarak grafiklerden görüldüğü üzere kirişe ait kritik yanal burkulma yükleri delaminasyon yüksekliği arttıkça azalma davranışı göstermektedir. Bu davranış belli bir delaminasyon yüksekliğine ulaşıldığında şiddetli bir şekilde olmakta, daha sonra azalma davranışı da yavaşlamaktadır. Ayrıca grafiklerden en yüksek kritik burkulma yüküne (45°/-45°) ve en düşük kritik burkulma yüküne de (0°/90°) fiber yönlenme açısına sahip kirişlerin sahip olduğu görülmektedir.

Şekil 6'da (0°/90°) fiber yönlenme açısına sahip kirişin deneysel olarak elde edilen ortalama

kritik yanal burkulma yükünün ve sonlu eleman analizlerinden elde edilen kritik yanal burkulma yükünün delaminasyon yüksekliğine bağlı değişimi gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi kirişin delaminasyonsuz ($a=0$) durumdaki kritik yanal burkulma yükü yaklaşık 45 N seviyesinde iken $a=18$ mm delaminasyon yüksekliğine ulaşıldığında bu değer %28'lik azalma ile yaklaşık 32 N'a düşmektedir. Yine grafikten görüldüğü gibi özellikle $a=12$ mm delaminasyon yüksekliğine ulaşıldığında kritik yanal burkulma yükünde şiddetli bir azalma meydana gelmektedir. Bu azalma $a=15$ mm delaminasyon yüksekliğine ulaşıldığında ise yavaşlamaktadır. Bu durum $a=15$ mm'lik delaminasyon yüksekliğinden sonra delaminasyonun kritik yanal burkulma yükü üzerine etkisinin azaldığını göstermektedir.



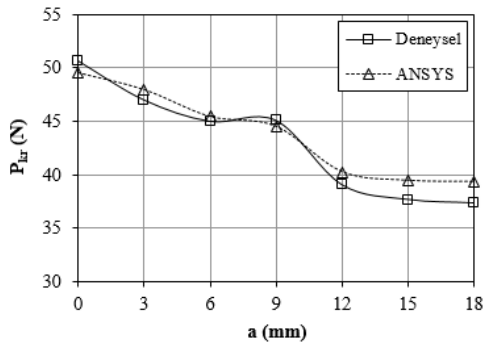
Şekil 6. [(0°/90°)₂]_s fiber yönlenme açısına sahip kiriş için kritik burkulma yüklerinin delaminasyon yüksekliğine göre değişimi



Şekil 7. [(30°/-60°)₂]_s fiber yönlenme açısına sahip kiriş için kritik burkulma yüklerinin delaminasyon yüksekliğine göre değişimi

(30°/-60°) fiber yönlenme açısına sahip kiriş için kritik burkulma yüklerinin delaminasyon

yüksekliğine göre değişimi Şekil 7'de gösterilmiştir. Grafiğe göre, kritik yanıl burkulma yükü delaminasyonsuz durumdakine oranla %33 azalma göstermektedir. Bu durum ($0^\circ/90^\circ$) fiber yönlenme açısına sahip kirişler ile benzerlik göstermesine rağmen azalma oranı daha yüksektir. Yine $a=9$ mm delaminasyon yüksekliğinden itibaren kritik yanıl burkulma yükündeki azalmanın şiddetli olduğu, yaklaşık $a=13$ mm delaminasyon yüksekliğinden itibaren delaminasyon yüksekliğinin kritik yanıl burkulma yükündeki azalmaya etkisinin olmadığı grafikten görülmektedir.



Şekil 8. [(45/-45)₂]_s fiber yönlenme açısına sahip kiriş için kritik burkulma yüklerinin delaminasyon yüksekliğine göre değişimi

Şekil 8, ($45^\circ/-45^\circ$) fiber yönlenme açısına sahip kiriş için kritik burkulma yüklerinin delaminasyon yüksekliğine göre değişimini göstermektedir. Grafiğe göre, en yüksek kritik yanıl burkulma yüklerine bu fiber yönlenme açısında ulaşılmıştır. En büyük delaminasyon yüksekliğindeki kritik yanıl burkulma yükünün delaminasyonsuz durumdakine oranla azalması yaklaşık %27 seviyelerindedir. ($30^\circ/-60^\circ$) fiber yönlenme açısına sahip kirişlere benzer şekilde $a=9$ mm delaminasyon yüksekliğine ulaşıldığında kritik yanıl burkulma yükünde şiddetli bir azalma başlamakta, $a=13$ mm delaminasyon yüksekliğinden itibaren azalmanın şiddeti yavaşlamaktadır. Grafikten görüleceği üzere, $a=13$ mm delaminasyon yüksekliğinden sonra kritik yanıl burkulma yükünde azalma meydana gelmemekte, delaminasyon yüksekliğinin etkisi ortadan kalkmaktadır.

Tüm bu değerler dikkate alındığında, çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Tabakalar arası süreksizlik olarak ifade edilen delaminasyon, kritik yanıl burkulma yüklerine olumsuz yönde etki etmektedir.
- Delaminasyon yüksekliğinin dolayısıyla delaminasyon alanının artması kritik yanıl burkulma yükünü azaltmakta, bu azalma belli delaminasyon yüksekliğinde şiddetli bir şekilde olmaktadır. Bu durumda kirişler için kritik delaminasyon yüksekliğinin belirlenmesi önem arz edebilir.
- Fiber yönlenme açısının değişimi kirişin kritik yanıl burkulma yükünü etkilemektedir. Bu durum kirişin stabilitesini etkileyebilecek bir durumdur. ($45^\circ/-45^\circ$) fiber yönlenme açısına sahip kirişlerde en yüksek kritik yanıl burkulma yüklerine ulaşıırken, en düşük kritik yanıl burkulma yükü ($0^\circ/90^\circ$) fiber yönlenme açısına sahip kirişlerde elde edilmektedir.
- Fiber yönlenme açısı aynı zamanda kritik delaminasyon yüksekliğini de etkilemektedir. ($30^\circ/-60^\circ$) ve ($45^\circ/-45^\circ$) fiber yönlenme açılarında kritik yanıl burkulma yükleri ($0^\circ/90^\circ$) fiber yönlenme açısına oranla artış göstermesine rağmen kritik delaminasyon yükseklikleri azalma davranışı göstermiştir.
- Çalışmada kullanılan sonlu elemanlar yöntemi deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında iyi bir uyum gözlenmiştir. Bu durum kullanılan yöntemin doğruluğunu göstermektedir. Bu nedenle daha farklı delaminasyon şekilleri (dairese, eliptik vb.) ve daha farklı delaminasyon alanları için yapılacak benzer çalışmalarda sonlu elemanlar yöntemi kullanılabilir.

Kaynakça

- [1] Munian, R.K., Mahapatra, D.R., Gopalakrishnan, S. 2018. Lamb Wave Interaction with Composite Delamination, Composite Structures, Cilt. 206, s. 484-498. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.08.072.
- [2] Timoshenko, S.P., Gere, J.M. 1961. Theory of Elastic Stability. 2nd Ed. McGraw-Hill. New York, 541s.
- [3] Wang, C-T. 1953. Applied Elasticity. McGraw-Hill. New York, 537s.
- [4] Moller, M., Johansson, B., Collin, P. 1997. A New Analytical Model of Inelastic Local Flange Buckling, Journal of Constructional Steel Research, Cilt. 43, s. 43-63. DOI: 10.1016/S0143-974X(97)00025-4.
- [5] Lee, J., Kim, S-E, Hong, K. 2002. Lateral Buckling of I-Section Composite Beams, Engineering Structures, Cilt. 24, s. 955-964. DOI: 10.1016/S0141-0296(02)00016-0.
- [6] Lee, J., Kim, S-E. 2002. Lateral Buckling Analysis of Thin-Walled Laminated Channel-Section Beams, Composite Structures, Cilt. 56, s. 391-399. DOI: 10.1016/S0263-8223(02)00022-3.
- [7] Machado, S.P., Cortinez, V.H. 2005. Lateral Buckling of Thin-Walled Composite Bissymmetric Beams With Prebuckling and Shear Deformation, Engineering

- Structures, Cilt. 27, s. 1185-1196. DOI: 10.1016/j.engstruct.2005.02.018.
- [8] Lee, J. 2006. Lateral Buckling Analysis of Thin-Walled Laminated Composite Beams With Monosymmetric Sections, Engineering Structures, Cilt. 28, s. 1997-2009. DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.03.024.
- [9] Kim, N-I, Shin, D.K., Kim, M-Y. 2007. Exact Lateral Buckling Analysis for Thin-Walled Composite Beam Under End Moment, Engineering Structures, Cilt. 29, s. 1739-1751. DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.09.017.
- [10] Mohri, F., Bouzerira, C., Potier-Ferry, M. 2008. Lateral Buckling of Thin-Walled Beam-Column Elements Under Combined Axial and Bending Loads, Thin-Walled Structures, Cilt. 46, s. 290-302. DOI: 10.1016/j.tws.2007.07.017.
- [11] Eryiğit, E., Zor, M., Arman, Y. 2009. Hole Effects on Lateral Buckling of Laminated Cantilever Beams, Composites Part B: Engineering, Cilt. 40, s. 174-179. DOI: 10.1016/j.compositesb.2008.07.005.
- [12] Machado, S.P. 2010. Interaction of Combined Loads on The Lateral Stability of Thin-Walled Composite Beams, Engineering Structures, Cilt. 32, s. 3516-3527. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.07.020.
- [13] Bozkurt, Ö.Y., Bulut, M., Erklığ, A., Faydh, W.A. 2019. Axial and Lateral Buckling Analysis of Fiber Reinforced S-Glass/Epoxy Composites Containing Nano-Clay Particles, Composites Part B: Engineering, Cilt. 158, s. 82-91. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.09.043.
- [14] Jiao, P., Borchani, W., Soleimani, S., McGraw, B. 2017. Lateral-Torsional Buckling Analysis of Wood Composite I-Beams With Sinusoidal Corrugated Web, Thin-Walled Structures, Cilt. 119, s. 72-82. DOI: 10.1016/j.tws.2017.05.025.
- [15] Osmani, A., Meftah, S.A. 2018. Lateral Buckling of Tapered Thin Walled Bi-Symmetric Beams Under Combined Axial and Bending Loads With Shear Deformations Allowed, Engineering Structures, Cilt. 165, s. 76-87. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.03.009.
- [16] Sobhani, A., Saeedifar, M., Najafabadi, M.A., Fotouhi, M. 2018. The Study of Buckling and Post-Buckling Behavior of Laminated Composites Consisting Multiple Delaminations using Acoustic Emission, Thin-Walled Structures, Cilt. 127, s. 145-156. DOI: 10.1016/j.tws.2018.02.011.
- [17] Pekbey, Y., Sayman, O. 2006. A Numerical and Experimental Investigation of Critical Buckling Load of Rectangular Laminated Composite Plates With Strip Delamination, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Cilt. 25, s. 685-697. DOI: 10.1177/0731684406060566.
- [18] İpek, G., Arman, Y., Çelik, A. 2018. The Effect of Delamination Size and Location to Buckling Behavior of Composite Materials, Composites Part B: Engineering, Cilt. 155, s. 69-76. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.08.009.
- [19] Kharghani, N., Soares, C.G. 2016. Behavior of Composite Laminates With Embedded Delaminations, Composite Structures, Cilt. 150, s. 226-239. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.04.042.
- [20] Toygar, M.E., Kırıl, Z., Sayman, O., Arman, Y., Özen, M. 2012. Effect of Interface Crack on Lateral Buckling Behavior and Free Vibration Response of A Sandwich Composite Beam, Journal of Composite Materials, Cilt. 47, s. 1843-1851. DOI: 10.1177/0021998312451611.