

YÜKSEK DERECEDE KONİK LAMİNATLARIN YÜK TAŞIMA KAPSİTELERİNİN İNCELENMESİ

Fırat Ergin¹
ODTÜ, Ankara

Prof. Dr. Altan Kayran²
ODTÜ, Ankara

ÖZET

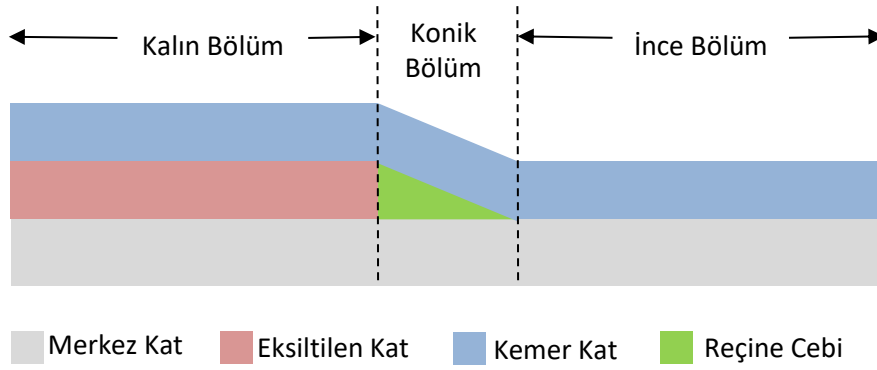
Yüksek derecede konik laminatlar özellikle kısa mesafede çok fazla katman azaltılması gerekli olan kompozit yapılarda kullanılır. Yüksek konik açısı ve katmanlardaki süreksizlikten dolayı erkenden oluşan katmanlar arası ayrılma yapının dayanımını azaltır. Bu tarz yapıların dayanımını incelemek için detaylı modellerin oluşturulması gerekir. Bu çalışmada, eksenel çekme yükü altındaki yüksek konik açılara sahip farklı laminatların yük taşıma kapasitesi iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmektedir. Farklı katman azaltma aralıklarına ve konik açılara sahip çeşitli modeller Python programlama dili kullanılarak ABAQUS ortamında oluşturulmuştur. Katmanlar arası ayrılma kohesiv bölge modellemesi yöntemi ile tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar kalın bölge katman ayrılmasının yapıyı işlevsiz hale sokarken ince bölümdeki hasar sonrasında bile yapının yük taşımaya devam edebildiğini göstermiştir. Ayrıca hasar modlarının ve yapının yük taşıma kapasitesinin konik açısına göre nasıl değiştiği parametrik çalışma sonucunda gözlemlenmiş olup, konik bölge uzunluğunu düşürecek tasarım önerisinde bulunulmuştur.

GİRİŞ

Kompozit malzemeler, yüksek mukavemet ve düşük ağırlıklarının yanı sıra esneklik ve dayanım gereksinimlerini karşılayacak kalınlık dağılımının kolayca elde edilebilmesinden dolayı havacılık ve uzay gibi endüstrilerde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapıdaki bu kalınlık değişimi bazı katmanların azaltılması sonucu elde edilebilir. Bu katman azaltma noktalarındaki malzeme süreksizliği ve geometrik etkilerden dolayı katmanlar arası yüksek gerilim değerleri gözlemlenmekte ve sonuç olarak erkenden yaşanan katmanlar arası ayrılma olayı meydana gelmektedir. Simetrik olmayan bir katman azaltma bölgesine ait terminoloji Şekil 1’de gösterilmiştir. Özellikle helikopter pervanelerindeki esnek kirişlerin esneklik gereksiniminden dolayı birçok katman azaltılmasının yapılması gerekmektedir [Murri ve Schaff, 2006]. Çok sayıdaki katman azaltmaları yüksek dereceli konik açılara sahip laminatlarla sonuçlanabilir. Başka bir çalışmada ise konik açısındaki artışın, katman azaltmalı yapıların doğal frekansını arttırdığı numerik hesaplar sonucunda gösterilmiştir [Ganesan ve Zabihollah, 2007]. Bu da demek oluyor ki gerek esneklik gereksinimi gerek yüksek doğal frekans ihtiyacından dolayı katman azaltmalı yapılarının yüksek konik açılara sahip olmasına ihtiyaç vardır. Ancak konik açısındaki artışın, hasar başlangıç noktasını kalın bölümden ince bölüme taşıdığı ve katmanlar arası ayrılma başlangıç yük seviyesini düşürdüğü analiz sonuçları ile gösterilmiştir [Gan, Allegri, ve Hallett, 2016]. Bu sebepten yüksek konik açılara sahip laminatların yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesinde ince bölüm hasar oluşum mekanizmasının doğru bir şekilde anlaşılması gerekmektedir.

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: fergin@metu.edu.tr

² Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: akayran@metu.edu.tr



Şekil 1: Katman azaltma bölgesi terminolojisi

Konik kompozit yapıların ilk tasarım aşamalarında tasarım kılavuzlarından faydalanılabilir. Bu tasarım kılavuzları, rijitliği yüksek olan katmanın ilk olarak azaltılması, katman eksiltmeleri arasında belirli mesafelerin bırakılması gibi tasarım tavsiyeleriyle farklı seçenekler arasında göreceli kıyaslama yapılmasında yardımcı olabilmektedir [Mukherjee ve Varughese, 2001]. Ancak bu kılavuzlar konik yapının yük taşıma kapasitesi hakkında sayısal bir bilgi vermemektedir. Yapılan bir çalışmada Timoshenko kiriş teorisi kullanılarak geliştirilmiş analiz yöntemiyle farklı konik laminat seçenekleri arasında en avantajlı olan tespit edilebilmiş ancak yük taşıma kapasiteleri neredeyse %30 seviyelerinde hesaplanmıştır [Gan, Allegri ve Hallett, 2016]. Daha sonra yapılan ve taratılmış konik numunelerin bire bir sonlu elemanlar modeli kullanılarak yapılan analizlerde hasar başlangıç yük seviyeleri ve konumları doğru bir şekilde tahmin edilmiştir [Zhang, Kawashita, Jones, Lander ve Hallett, 2020]. Bu çalışmalardan konik yapıların yük taşıma kapasitelerinin ve hasar modlarının doğru tahmin edilebilmesi için detaylı sonlu eleman modellerinin oluşturulmasının günümüzde gerekliliğini koruduğu anlaşılmaktadır.

Literatürdeki birçok çalışma yapının yük taşıma kapasitesini azaltmamak için konik açısının düşük tutulmasını önermektedir. Irisari ve takım arkadaşları, yaptıkları konik bölge katman azaltma konfigürasyonu en iyileme çalışmasında, tasarım kılavuzlarından yola çıkarak konik bölge açısının 7 derecenin üzerine çıkmasına izin vermemiştir [Irisarri, Lasseigne, Leroy ve Le Riche, 2014]. Bu da benzer bir çalışmanın yüksek konik açılı katman eksiltme yapılarında geçersiz olacağı anlamına gelmektedir. Çelik ve Parnas, gerçekleştirdikleri en iyileme çalışmasında konik bölge uzunluğunu da bir değişken olarak kullanmış ve yük taşıma kapasitesi en yüksek olan yapının en yüksek konik bölge uzunluğuna sahip olduğunu gözlemlemiştirler [Çelik ve Parnas, 2017]. Konik bölge uzunluğu arttıkça konik açısının azaldığı göz önünde bulundurulursa, hem tasarım kılavuzlarının hem de en iyileme çalışmalarının katman azaltılan bölgelerde konik açılarının düşük tutulmasını önerdiği anlaşılabilir. Ancak yapılan bu çalışmaların hepsinde konik açısı, katman azaltma bölgesi boyunca sabit tutulmuştur ve kademeli olarak değişken konik yapıların incelendiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yapıların yük taşıma kapasitelerini doğru tahmin edebilmek ve konik bölge uzunluklarını ayarlarken tasarım esnekliklerine sahip olabilmek için değişken konik açılı katman azaltmalı yapıların incelenmesine gerek vardır. Bu sebepten, bu çalışmada parametrik olarak oluşturulan, hem sabit hem de kademeli olarak değişen yüksek dereceli konik yapıların detaylı sonlu elemanlar modelleri kullanılarak hasar başlangıçları ve yük taşıma kapasiteleri incelenecektir.

YÖNTEM

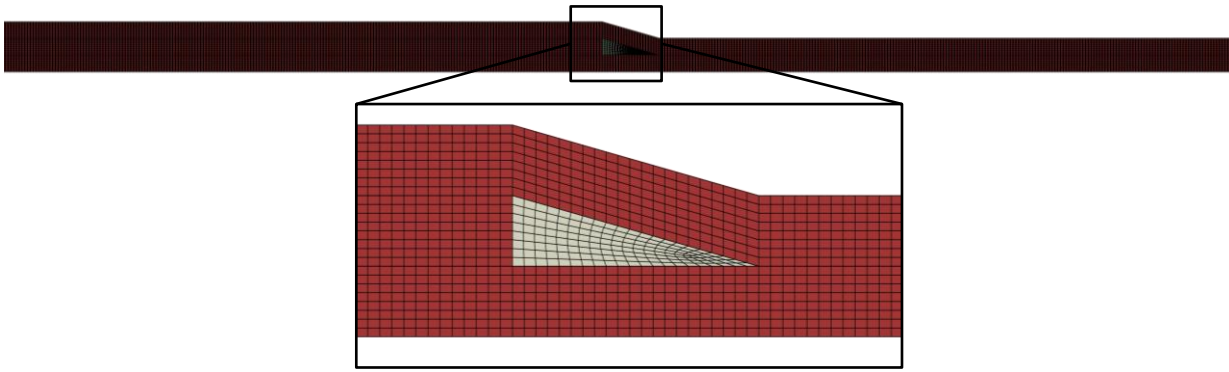
Bu çalışmada ABAQUS kullanılarak sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Problemi daha basit bir hale getirmek için iki boyutlu modeller kullanılmış ve sadece tek yönlü fiberlerin yüklemeye yönünde olduğu paralel katmanlardan oluşan katman düşüş bölgeli yapılar incelenmiştir. Hem hasar başlangıcını hem de ilerleyişini hesaba katabildiği için kohesiv bölge modelleme yöntemi katmanlar arası ayrılmayı tahmin etmek için kullanılmıştır. Şekil 1'de gösterilen bütün katmanların arasına ve reçine cebinin etrafındaki arayüzlere kalınlığı olmayan kohesiv elemanlar yerleştirilmiştir. Farklı konik açılarının, katman azaltma aralıklarının ve çeşitli laminatların

inceleneyeceği farklı modellerin kolayca oluşturulması için Python yazılım dili kullanılarak parametrik modelleme aracı geliştirilmiştir.

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Tek Kademeli Katman Azaltma Çalışması

İlk aşama olarak tek katman azaltma noktası içeren 7 ve 14 derecelik konik açısına sahip iki model incelenmiştir. 12 kattan 8 kata azaltılan konik yapının incelendiği modelde merkez kat, kemer kat ve eksiltile katlarda 4'er tane katman bulunmaktadır ve her bir katmanın kalınlığı 0.159 mm alınmıştır. Bütün modelin uzunluğu 140 milimetre iken kalın bölümün uzunluğu 70 milimetredir. Kompozit parçada 0.124mm x 0.08mm boyutlarında CPS4I eleman tipi kullanılırken arayüzlerde katmanlar arası ayrılmayı modellemek için COH2D4 kohesiv elemanlar kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan ağ yapısı Şekil 2'de gösterilmiştir. Yapılan analiz sonuçları modeli doğrulamak amacı ile literatürdeki bir çalışma ile Tablo 1'de kıyaslanmıştır. Analizde kullanılan malzeme özelliklerine de aynı makaleden ulaşılabilir.

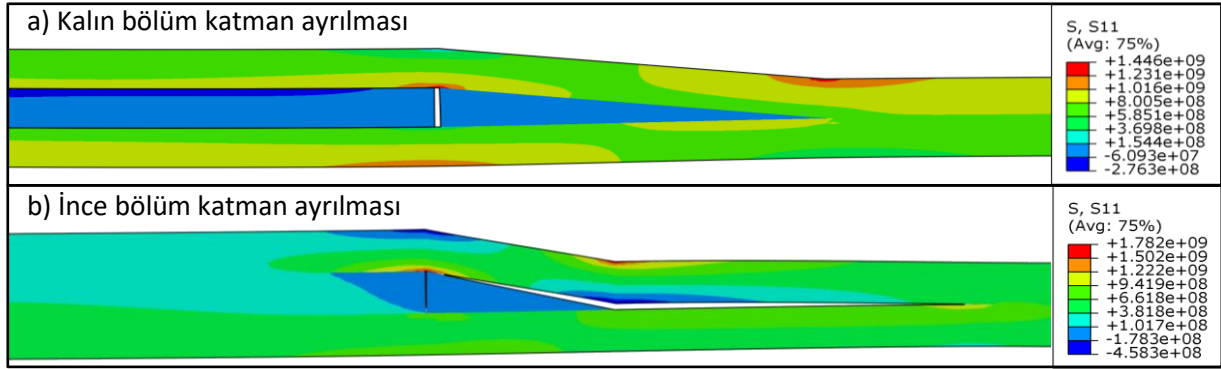


Şekil 2: Sonlu elemanlar modelinde kullanılan ağ yapısı.

Tablo 1. Düşük ve yüksek konik açılı laminatların hasar konum ve başlangıç bilgileri.

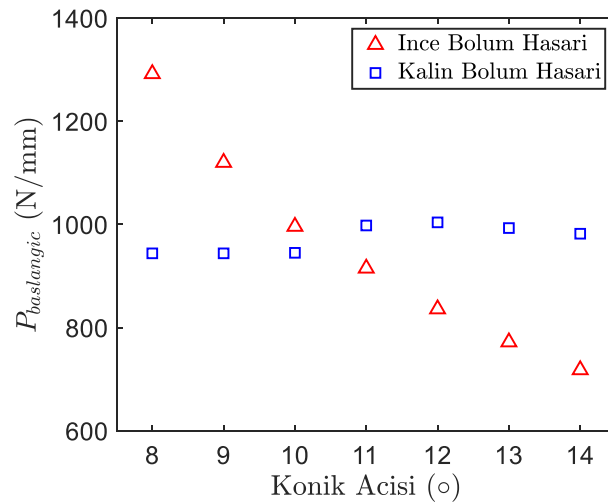
Konik Açısı	Şu anki çalışma		[Gan , Allegri ve Hallett, 2016]	
	Hasar başlangıç Yüğü (N/mm)	Hasar Başlangıç Konumu	Hasar başlangıç Yüğü (N/mm)	Hasar Başlangıç Konumu
7°	937	Kalın Bölüm	938	Kalın Bölüm
14°	718	İnce Bölüm	761	İnce Bölüm

Tablo 1'de de görüldüğü gibi hem hasar başlangıç konumu hem de hasar başlangıç yük değeri kabul edilebilir bir seviyede doğru tahmin edilebilmiştir ve bu değerler oluşturulan modeli doğrulamaktadır. Ayrıca kalın ve ince bölümlerde oluşan katman ayrılması sonrasındaki fiber yönündeki gerilim dağılımı Şekil 3'de gösterilmiştir. Kalın bölüm katman ayrılması eksiltile katın, kemer kat ve merkez kattan kayarak ayrılması sonucu oluşurken, ince bölüm katman ayrılması, kemer katın çekme yükü altında düzleşerek merkez kat ve reçine cebinden ayrılması sonucu oluşmaktadır. Şekil 3a'da görüldüğü gibi kalın bölümde oluşan katman ayrılması sonucu eksiltile kat yük taşıyamaz duruma gelmekte ve çatlak kalın bölüm boyunca numunenin sonuna kadar ilerlemektedir. Bu yüzden kalın bölüm hasarı yapının tamamen işlevini yitirmesiyle sonuçlanabilir. Ancak Şekil 3b'de görüldüğü gibi ince bölüm katman ayrılması sonucunda hasar bölgesindeki kemer kat, eksiltile kat ve merkez kat yük taşımaya devam etmektedir ve oluşan çatlak sadece belirli bir yere kadar ilerlemekte ve durmaktadır. Bu da yapının ince bölüm hasarından sonra bir müddet daha yük taşıyabileceğini göstermektedir.



Şekil 3: Sonlu elemanlar analizi sonunda kalın ve ince bölüm de katman ayrılması sonucu elde edilen fiber yönündeki gerilme dağılımı (Pa)

Bu çalışmanın devamında 7 ile 14 derece arası konik açılara sahip katman azalma seçeneklerinin incelendiği parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonucundan elde edilen ince bölüm ve kalın bölüm katman ayrılması başlangıç yükleri farklı konik açı değerleri için Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere konik açılarındaki artış ince bölüm hasar başlangıç yük değerini azaltırken kalın bölüm hasar başlangıç değeri konik açılarından pek etkilenmemektedir. Bu yüzden konik açılarındaki artış katmanlar arası ayrılma hasar başlangıcını kalın bölümden ince bölüme taşımaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi kalın bölüm hasarı yapının işlevsiz hale gelmesiyle sonuçlanmaktadır, ayrıca kalın bölüm hasarı konik açılarından etkilenmediği için katman azaltmalı yapıların taşıyabileceği en yüksek yük değeri kalın bölüm hasarı ile sınırlanabilir. Ancak Şekil 4'ten anlaşılacağı gibi yüksek konik açılarındaki erkenden oluşan ince bölüm katman ayrılması yapıdan elde edilebilecek en yüksek yük taşıma seviyesine ulaşmadan hasar oluşmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple yapının yük taşıma seviyesini azaltmayacak şekilde en yüksek konik açısını belirlemek için konik açısı öyle bir ayarlanmalıdır ki hem kalın bölüm hem de ince bölüm katman ayrılması aynı yük seviyelerinde gerçekleşsin. Bu yaklaşıma dayanarak şu anki çalışmada incelenen konik yapının en yüksek konik açısı Şekil 4'e göre 10 ile 11 derece arasında olmalıdır. Bu sayede katman düşüş bölgesi kompozit yapının yük taşıma kapasitesi azalmamaktadır. Bu bahsi geçen açı, çalışmanın ilerleyen kısımlarında hasar modu geçiş açısı olarak adlandırılacaktır.

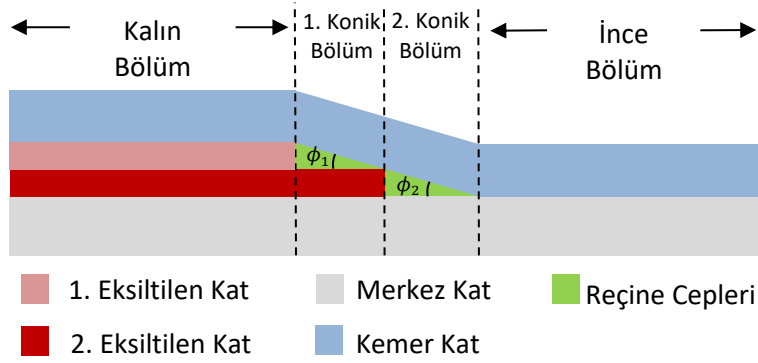


Şekil 4: Hasar başlangıç yük değerlerinin konik açısına göre değişimi.

İki Kademeli Katman Azaltma Çalışması

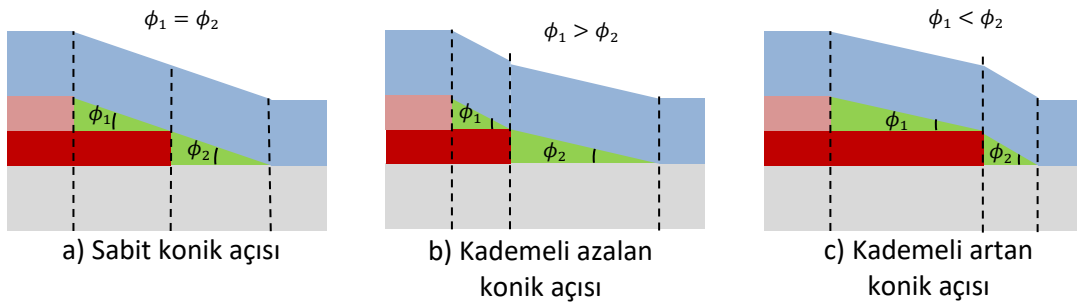
Bir önceki tek kademede katman azaltma çalışması ince ve kalın bölge hasarlar başlangıçlarının konik açılarından nasıl etkilendiği ile ilgili faydalı fikirler vermektedir. Ancak, tek seferde bütün katmanların azaltılması konik yapıların yük taşıma değerini azaltacağından dolayı bu yapılarda katmanlar kademeli olarak azaltılmalıdır [Mukherjee ve Varughese, 2001]. Bu yaklaşımdan yola çıkarak birden fazla kademeli katman azaltma tasarımındaki ince ve kalın bölge hasar

başlangıçları bu bölümde incelenecektir. Şekil 5'te iki kademeli katman azaltma bölgesi gösterilmektedir. Birinci konik bölgedeki konik açısı ϕ_1 ile ifade edilirken, ikinci bölgenin konik açısı için ϕ_2 kullanılmıştır.



Şekil 5: İki kademeli katman azaltma bölgesi terminolojisi

Şekil 5'te gösterilen iki kademeli katman azaltma bölgesi, konik açıların değerlerine göre, Şekil 6'da gösterildiği gibi üç farklı grupta incelenebilir. Sabit konik açısı, modelleme ve tasarım kolaylığından dolayı birçok çalışmada incelenmiştir. Yapılan bir çalışmada farklı katman eksiltme alternatiflerinin konik yapının yük taşıma kapasitesine etkisi ve hasar başlangıç noktaları sabit konik açılı tasarımlarda incelenmiştir [Hosseinpour Dashatan, 2021]. Zhang ve ekip arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada ise iki farklı konik numune tipinde farklı konik açıların hasar başlangıcı konumuna ve yük taşıma kapasitesine olan etkisi deneysel olarak incelenmiş fakat iki numune tipinde de konik açısı, katman azaltma bölgesi boyunca sabit tutulmuştur [Zhang, Kawashita, Jones, Lander ve Hallet, 2020]. Hem modelleme karmaşıklığı hem de tasarım zorluğundan dolayı kademeli değişen konik açılı yapılarla ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ancak, kademeli azalan konik açılı tasarım, küçük ϕ_2 açısından dolayı ince bölüm hasar başlangıcını geciktirebilir ve yüksek ϕ_1 açısından dolayı da toplam konik bölge uzunluğunu azaltabilir. Bu sebepten kademeli azalan konik açılı tasarımının hasar başlangıç yüklerine olan etkisinin incelenmesinde fayda vardır. Bunun aksine, kademeli artan açılı konik tasarımındaki yüksek ϕ_2 açısı ince bölge hasar başlangıcı erkene çekerken, düşük ϕ_1 açısı da konik bölge uzunluğunu artırmaktadır. Bu nedenle kademeli artan konik tasarımı mantıklı bir tercih değildir. Bahsi geçen kriterler göz önünde bulundurularak, bu çalışmada sadece sabit konik açısı ve kademeli azalan konik açısı tasarımları incelenmiştir.



Şekil 6: İki kademeli katman azaltma seçenekleri

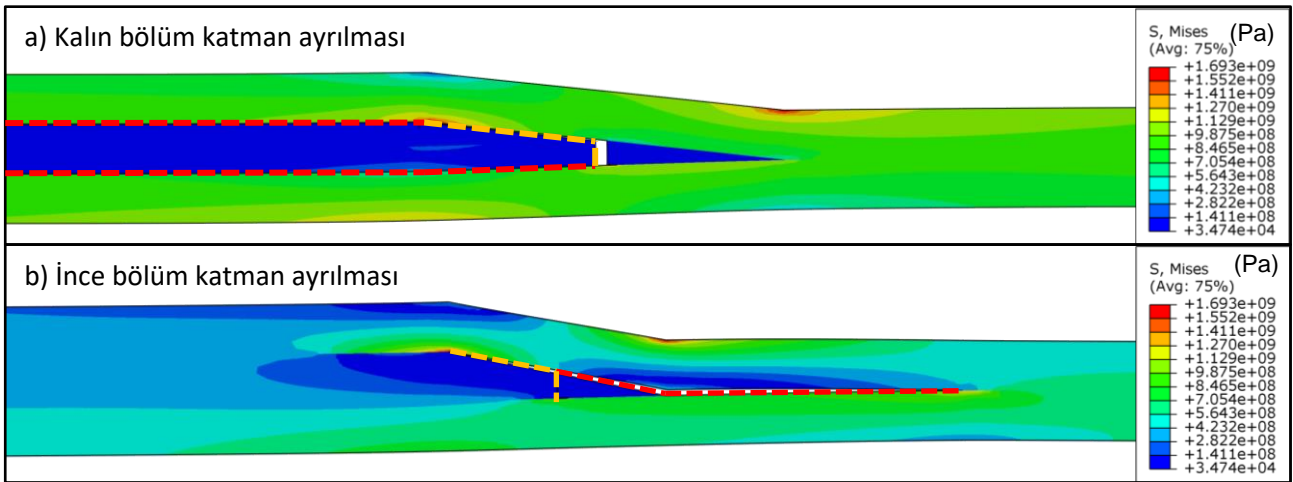
7° ile 14° arası tam sayı açı değerlerinin farklı kombinasyonları Tablo 2'de gösterilmektedir. Bu kombinasyonlardan sabit konik açısı, kademeli azalan konik açısı ve kademeli artan konik açısı tasarımlarına denk gelenler farklı renklerle ifade edilmiş olup, şu anki çalışmada incelenen modellere onay işareti konulmuştur. Toplamda 21 farklı iki kademeli katman azaltma kombinasyonu incelenmiştir.

Tablo 2: Bu çalışma kapsamında incelenen iki kademeli konik yapı kombinasyonları

$\phi_1 \backslash \phi_2$	8°	9°	10°	11°	12°	13°
8°	✓					
9°	✓	✓				
10°	✓	✓	✓			
11°	✓	✓	✓	✓		
12°	✓	✓	✓	✓	✓	
13°	✓	✓	✓	✓	✓	✓

■ Kademeli Azalan Konik Açısı
■ Sabit Konik Açısı
■ Kademeli Artan Konik Açısı

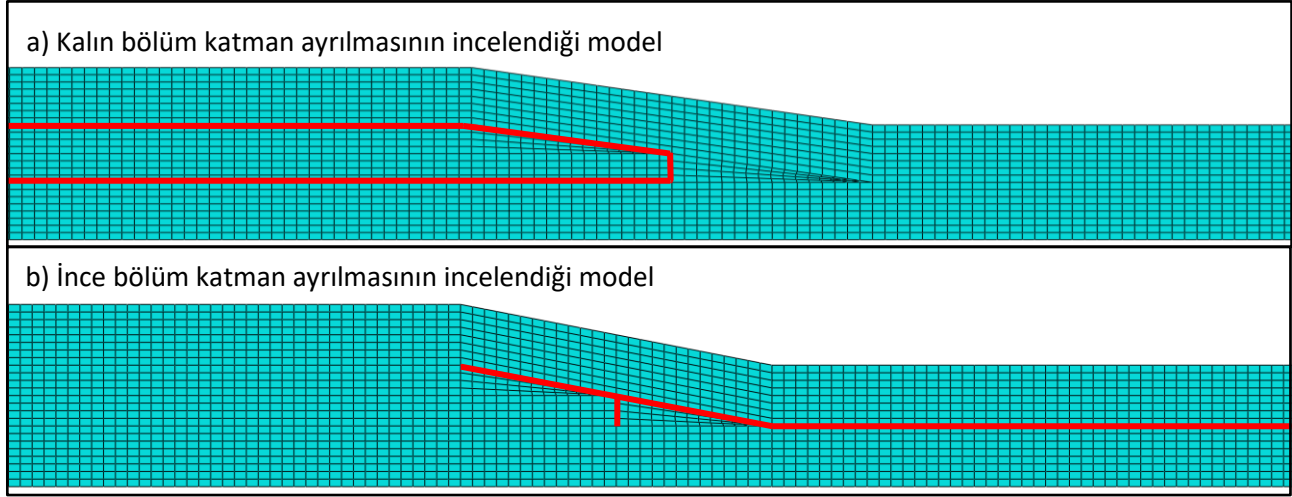
Tek kademeli katman azaltma çalışmasındaki kullanılan aynı malzeme özellikleri ve sonlu eleman model özellikleri, iki kademeli katman azaltma modellerinde de kullanılmıştır. Merkez ve kemer katlarda dörder katman bulunurken, her bir eksiltile katta ikişer katman bulunmaktadır. Farklı sabit konik açılarından elde edilen analiz sonuçları Şekil 7'de gösterilmektedir. Kırmızı ve turuncu ile gösterilen kesikli çizgiler bahsi geçen hasar modunda katmanların ayrıldığı bölgeleri göstermektedir. Her iki hasar modunda da önce turuncu kesikli çizgi ile gösterilen arayüzde ayrılma gerçekleşmiş ve ardından kesikli kırmızı çizgiler boyunca hasar ilerlemiştir. Kalın bölge hasarında eksiltile katlarla birlikte birinci bölgedeki reçine cebi kemer ve merkez kat arasından kayarken, ikinci konik bölgedeki reçine cebi kemer ve merkez katlara yapışık bir şekilde kalmaktadır. İnce bölge hasarında ise katmanlar arası ayrılma kemer kat ile merkez katın birleştiği arayüzden devam etmektedir.



Şekil 7: İki kademeli katman azaltma bölgesinde farklı hasar oluşma arayüzleri

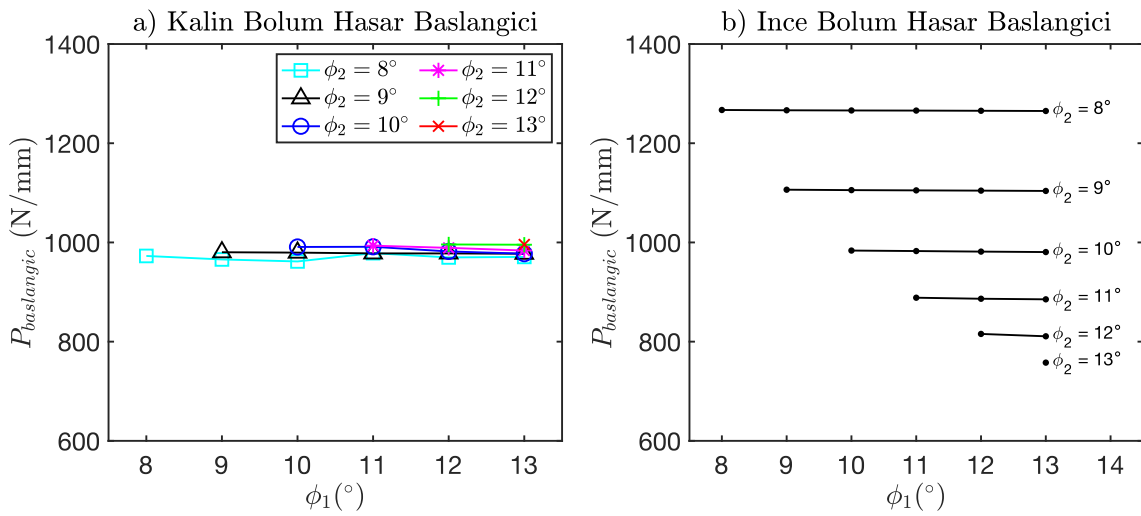
Şekil 4'te kalın bölge hasar başlangıç değerlerine yakından baktığımız zaman 11° ve sonrasındaki konik açı değerlerinde hasar başlangıç değerlerinde bir miktar artış olduğu gözlenmektedir. Bunun sebebi ise, bu konik açılarında ince bölüm hasarının kalın bölümden önce başlayıp, kalın bölgedeki katmanlar arası gerilim değerlerini bir miktar azaltmasındandır. Konik açısının, ince ve kalın bölge hasar başlangıç yük değerlerine olan etkisinin ayrı ayrı incelenmek istendiğinden dolayı, iki kademeli katman azaltma bölgelerini incelerken, iki farklı tip sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur ve Şekil 8'de gösterilmiştir. Kırmızı ile gösterilen arayüzler kohesiv elemanların yerleştirildiği bölgeleri temsil etmektedir. Şekil 8a'da gösterilen modelde sadece kalın bölge hasarında ayrılma gözlemlenen arayüzlere kohesiv eleman yerleştirilirken, Şekil 8b'de sadece ince

bölge hasarında ayrılma gözlemlenen arayüzlere kohesiv elemanlar yerleştirilmiştir. Böylelikle, bir bölgede başlayan katman ayrılması diğer hasar modunun başlangıç yük değerini etkilememektedir. Her bir iki kademeli katman azaltma kombinasyonu için iki farklı model kullanıldığından iki kademeli katman azaltma çalışmasında toplamda 42 adet sonlu eleman modeli Python yazılım dili kullanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 8: Farklı hasar şekillerinin incelendiği iki kademeli katman azaltma modelleri

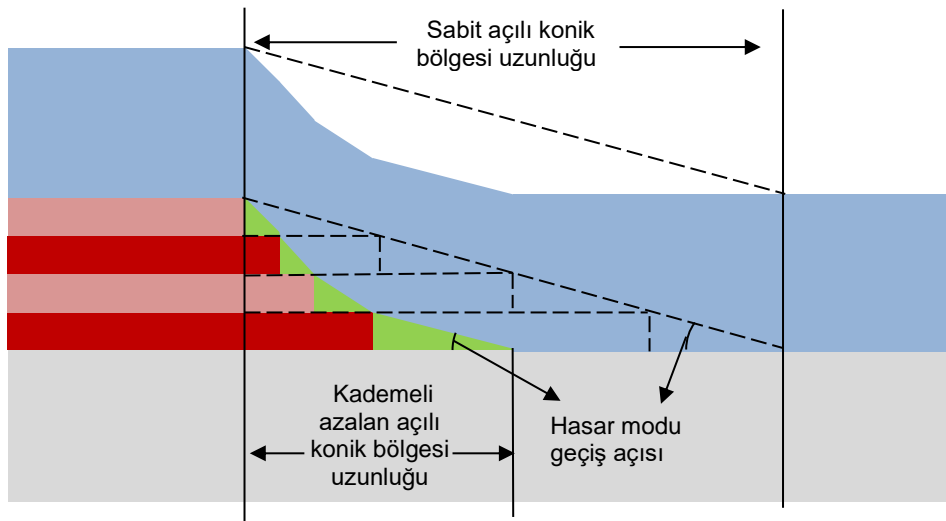
42 farklı modelden elde edilen kalın ve ince bölüm hasar başlangıç yük değerlerinin konik açılara göre değişimleri Şekil 9'de gösterilmektedir. Bir önceki tek kademeli katman azaltma çalışmasında olduğu gibi, iki kademeli katman azaltma çalışmasında da kalın bölüm hasar başlangıç yük değerlerinin konik açılarından fazla etkilenmediği Şekil 9a'da açıkça gözükmemektedir. Ancak, ince bölüm hasar başlangıç yüklerinin konik açılara göre değişiminin gösterildiği Şekil 9b ilginç bir gerçeği ortaya çıkarmaktadır. İnce bölüm hasar başlangıç değeri, ikinci konik açıdaki artışla ciddi bir oranda düşse de birinci konik açıdaki değişimden neredeyse hiç etkilenmemektedir. Bu da demek oluyor ki, çok kademeli katman azaltılan bölgelerde ince bölge hasar başlangıcı sadece en sondaki konik açıdan etkilenmektedir.



Şekil 9: Kalın bölüm ve ince bölüm hasar başlangıçlarının konik açılara göre değişimi

Çok Kademeli Katman Azaltma Tasarım Önerisi

Tek kademeli katman azaltma çalışmasında yapının yük taşıma değerini düşürmeden en kısa mesafede katman azaltılabilmek için konik açısının, hasar geçiş açısına eşit olması gerektiği ve birden fazla kademeli geçişlerde ise ince bölüm hasar başlangıç yük değerinin sadece en sondaki konik açısına bağlı olarak değiştiği gösterilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda, çok kademeli katman azaltma bölgelerinin uzunluklarını en düşük seviyede tutabilmek için en sondaki konik açısı hasar modu geçiş açısına eşit tutulmalı ve diğer konik açıları mümkün olan en yüksek seviyelere çıkarılmalıdır. Bu tasarım önerisi Şekil 10'a bakılarak daha net bir şekilde anlaşılabilir. Şekildeki katman düşüş bölgesi görsel amaçlı olarak kullanılmıştır ve açı değerleri gerçekçi değildir. Renkli olarak gösterilen katman düşüş bölgesi bu çalışma sonucunda önerilen kademeli azalan konik tasarımı gösterirken, sabit konik açılı tasarım kesikli çizgilerle gösterilmektedir. İki tasarımda da ince bölüme geçişteki son açı hasar modu geçiş açısına eşit tutulmuş ancak kademeli azalan konik tasarımda kalın bölgeye doğru olan konik açıları çok daha yüksek derecelere çıkarılmıştır. Böylelikle yapının yük taşıma kapasitesinde fazla bir azalma olmadan konik bölge uzunluğu, sabit açılı konik tasarıma göre azaltılabilir. Ancak, bu tasarım önerisinin bahsedilen amaca hizmet edip etmeyeceğinin doğrulanması için çok daha kapsamlı sonlu elemanlar modellerine ve deneysel çalışmalara gereksinim vardır.



Şekil 10: Sabit açılı ve kademeli azalan açılı tasarımların konik bölge uzunluğuna olan etkisi

SONUÇ

Bu çalışmada aksenal çekme yükü altındaki yüksek konik açılara sahip katman azaltma bölgelerinin yük taşıma kapasiteleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda kalın bölümde oluşan katman ayrılmasının yapıyı işlevsiz hale getirdiği ancak ince bölümde yaşanan ayrılmadan sonra yapının yük taşımaya devam edebileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca parametrik olarak oluşturulan modellerden elde edilen sonuçlara göre kalın bölümde oluşan katman ayrılması başlangıç yük değerinin konik açılarından dikkate değer bir derecede etkilenmezken, ince bölümde yaşanan katman ayrılması hasarı, konik açılarındaki artışla birlikte ciddi oranda azalmaktadır. Bu sonuçlardan yola çıkarak yapının yük taşıma kapasitesinde azalmaya sebep olmayacak en yüksek konik açısına karar verirken ince bölüm ve kalın bölümde aynı yük seviyesinde katman ayrılmasına sebep olacak konik açısı seçilerek karar verilebileceği önerilmiştir ve bu açı hasar modu geçiş açısı olarak adlandırılmıştır.

Ayrıca kademeli olarak değişen konik açılı tasarımların yapının yük taşıma kapasitesine olan etkisini incelemek için iki kademeli katman azaltma modelleri oluşturulmuştur. Analiz sonuçları kalın bölge hasar başlangıcının önceki çalışmadaki gibi konik açılarından etkilenmediğini ancak ince bölge hasarının sadece en sondaki konik açılarından etkilendiğini göstermiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda kademeli azalan açılı konik tasarımın, yapının yük taşıma kapasitesinde fazla bir düşüşe sebep olmadan konik bölge uzunluğunu azaltmak için uygun bir tasarım olduğu değerlendirilmiş ve tasarım önerisi olarak sunulmuştur. Bu tasarım önerisinin geçerli olduğu

koşulların daha kapsamlı sonlu elemanlar modelleri ve deneysel çalışmalar yardımı ile doğrulanması gerekmektedir.

Kaynaklar

- Celik, O., & Parnas, L., 2017. Maximization of ultimate strength of unidirectional tapered composite structures considering different failure modes. *58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2017-0893>
- Gan, K. W., Allegri, G., & Hallett, S. R., 2016. A simplified layered beam approach for predicting ply drop delamination in thick composite laminates. *Materials & Design*, *108*, 570–580. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.105>
- Ganesan, R., & Zabihollah, A., 2007. Vibration analysis of tapered composite beams using a higher-order finite element. part II: Parametric study. *Composite Structures*, *77*(3), 319–330. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.07.017>
- Hosseinpour Dashatan, S., 2021. Investigation of damage in gfrp tapered composite laminates [Ph.D. Doctoral Program]. Middle East Technical University.
- Irisarri, F.-X., Lasseigne, A., Leroy, F.-H., & Le Riche, R., 2014. Optimal design of laminated composite structures with ply drops using stacking sequence tables. *Composite Structures*, *107*, 559–569. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.08.030>
- Mukherjee, A., & Varughese, B., 2001. Design guidelines for ply drop-off in laminated composite structures. *Composites Part B: Engineering*, *32*(2), 153–164. [https://doi.org/10.1016/s1359-8368\(00\)00038-x](https://doi.org/10.1016/s1359-8368(00)00038-x)
- Murri, G., & Schaff, J., 2006. Fatigue life methodology for tapered hybrid composite flexbeams. *Composites Science and Technology*, *66*(3-4), 499–508. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.06.010>
- Zhang, B., Kawashita, L. F., Jones, M. I., Lander, J. K., Hallett, S. R., 2020. An experimental and numerical investigation into damage mechanisms in tapered laminates under tensile loading. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *133*, 105862. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105862>