

GÜÇLENDİRİLMİŞ BİR KOMPOZİT KİRİŞ TASARIMI

Cansu KARATAŞ¹, Yavuz YAMAN² ve Melin ŞAHİN³
ODTÜ - Havacılık ve Uzay Müh., Ankara

ÖZET

Bu bildiride güçlendirilmiş bir kompozit kirişin tasarımı ve sonlu eleman analizleri sunulmuştur. Kompozit kiriş çekme ve burulma yükleri taşıyan gerçek bir parçanın ASTM standartlarına uygun olarak ölçeklendirilmesiyle elde edilmiştir. Kompozit kirişi koruyacak ve yükleri düzgün bir şekilde kirişe iletecek güçlendirmenin tasarımı, güçlendirmenin kirişte oluşturduğu gerilme yığılmalarına göre yapılmıştır. Güçlendirme tasarım sürecinde FAA güçlendirme kılavuzunda listelenmiş olan güçlendirme kalınlığı, pah açısı, malzemesi, kirişle temas eden uzunluğu, güçlendirme ve kirişi birbirine bağlayan yapıştırıcının kalınlığı incelenmiştir. Katı modelleme ve sonlu eleman analizleri ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılmıştır. Tasarımın uygunluğu kompozit malzemeler için geçerli hasar kriterleri kullanılarak belirlenmiştir.

GİRİŞ

Kompozit malzemeler dayanım/yoğunluk oranlarının yüksek olması, serimlerinin değiştirilerek mekanik özelliklerinin değiştirilebilmesi, yorulma ömürlerinin uzunluğu ve korozyona dirençlerinin yüksek olması gibi nedenlerden dolayı havacılık sektöründe tercih edilmektedir. Özellikle kompozit katmanlı helikopter palleri giderek yaygınlaşmaktadır.

Bu çalışmada bir kompozit kirişin çekme testlerinde kullanılabilmesi için gerekli güçlendirmesiyle birlikte, tasarım ve doğrulamaları yapılacaktır. Kompozit kiriş cam-epoksi ve yapıştırıcı film katmanlarından $[0_8/\text{Film}/(\pm 45)_d/(\pm 45)_d/\text{Film}/0_8]$ serimiyle oluşmaktadır. Kiriş boyutları gerçek bir kompozit parçanın çekme ve burulma yüklerini taşıması beklenen kısmından, ASTM standartları ve çalışma sınırlamaları göz önünde bulundurularak elde edilmiştir. Bu çalışma sadece çekme yükü göz önüne alınarak yapılmıştır. Burulma ile ilgili hesaplamalar çalışmanın ilerleyen kısımlarında eklenecektir. Çekme yükü deneyi sırasında, yük kirişe yüzey boyunca olan kesme kuvveti şeklinde uygulanır. Hidrolik güçle çalışan çeneler kirişi sıkıştırır ve çeneler ile kiriş arasındaki sürtünme sayesinde kesme kuvveti uygulanır. Yeterli sürtünme sağlanmazsa, kirişin kaymaması için kirişe zarar verecek boyutlarda basınç uygulanması gerekebilir. Önlem olarak çeneler daha pürüzlü üretilebilir ancak bu pürüzler de kirişin yüzeyine zarar verebilir. Bu nedenle çekme testlerinde en yaygın kullanılan çözüm kiriş uçlarına güçlendirmeler yapıştırılmaktır. Güçlendirme yerleştirilmesinin diğer bir faydası da kirişin ölçüm yapılacak kısmının kesit alanının güçlendirilen uç kısımlara göre küçük olmasıdır. Bu durumda gerilmelerin kesit alanıyla ters orantılı olduğu düşünüldüğünde kirişin ilk olarak güçlendirilmiş kısımlardan değil gerilmelerin daha yüksek olduğu ölçüm yapılacak kısımdan hasar alması beklenir. İlk hasar görülen kısım kirişin yük uygulanan kısmı olursa ölçüm yapılacak kısım sağlıklı olsa bile teste devam edilemeyeceğinden yükün uygulandığı kısımdaki gerilmeleri azaltmak adına kesit alanını büyütecek güçlendirme yerleştirilir. Kiriş uçlarındaki güçlendirmeler sıkıştırmadan dolayı oluşabilecek hasarları önlerken, kendileri de gerilme yığılmasına neden olabilirler, bu da güçlendirmelerin uçlarına belli bir açıda pah verilerek önlenir [Adams, Adams, 2002].

Güçlendirilmiş kiriş tasarımının uygunluğu ölçüm yapılacak kısımdaki gerilme yığılma değerlerinin kirişin herhangi bir yerindeki gerilme yığılma değerlerinden daha yüksek olmasıyla ölçülür. Böylece kirişin ölçüm yapılan kısmı henüz sağlıklıyken yük uygulanan kısımlar da dahil diğer kısımları hasar gördüğünden dolayı testin durdurulması durumu önlenir. Bu çalışmada kompozit malzemeler için Tsai-Wu, izotropik malzemeler için ise von Mises hasar kriterleri kullanılmıştır. Kirişte gözlemlenen en yüksek hasar indisinin ölçüm yapılacak kısımdaki hasar indisine oranı, güçlendirmenin kalınlığı, güçlendirmeye verilen pah açısı, güçlendirme malzemesi, güçlendirmenin kirişle temas eden

uzunluğu, güçlendirme ve kirişi birbirine bağlayan yapıştırıcının kalınlığı gibi değişkenler göz önünde tutularak karşılaştırılacak ve en küçük orana sahip olan güçlendirilmiş kiriş seçilecektir.

YÖNTEM

Kompozit Kiriş Boyutlarının Belirlenmesi

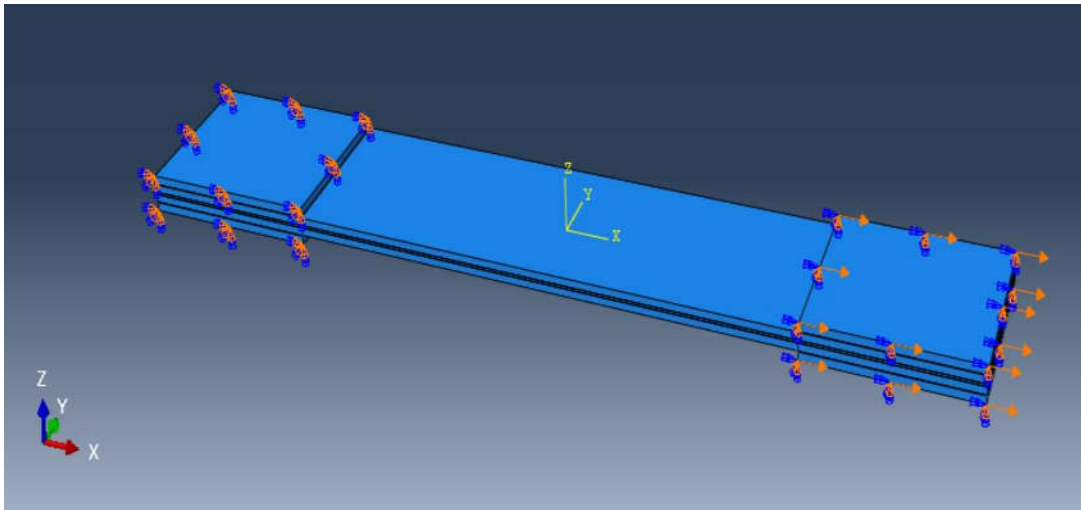
ASTM standartlarında çekme testi yapılacak kompozit parçalar için gerekli boyutlar listelenmiştir. En az uzunluk çene uzunluğu, genişliğin iki katı ve ölçüm yapılacak yerin uzunluğunun toplamı olarak belirlenmiştir. Kompozit parçaların kalınlığı ve genişliği ise sınırlandırılmamıştır [ASTM D3039/D 3039M-0]. Tüm bunlara uygun olarak kompozit kirişin uzunluk, genişlik ve kalınlığı birimsiz olarak sırasıyla 1, 0.18, 0.018 şeklinde belirlenmiştir.

Güçlendirme Tasarımı için İncelenecek Değişkenler

FAA güçlendirme kılavuzunda belirtilen değişkenlere göre güçlendirme kalınlığı, güçlendirme pah açısı, güçlendirme malzemesi, güçlendirme uzunluğu ve güçlendirmeye kirişi birbirine bağlayan yapıştırıcının kalınlığının kiriş üzerinde oluşturacağı gerilme yığılmaları hesaplanmıştır. Güçlendirme kalınlığına ait gerilme yığılmaları 1 mm, 2 mm ve 3 mm değerleri ile incelenmiştir. Güçlendirme pah açıları ise kılavuzda önerilen değer aralığındaki 8°, 10°, 12° ve 14° olarak ele alınmıştır. Güçlendirme malzemesi elastikiyet modülü olarak 30 GPa, 70 GPa, 150 GPa ve 210 GPa değerleri verilmiştir. Güçlendirme uzunluğunun etkisi değerlendirilirken, çekme testi makinesinde kullanılabilen çene boyutları olan 50 mm, 60 mm ve 90 mm değerleri incelenmiştir. Bunların yanında yapıştırıcı kalınlığı olarak da 0.11 mm, 0.22 mm, 0.33 mm, 0.55 mm ve 1.1 mm değerleri belirlenmiştir.

Güçlendirilmiş Kompozit Kirişin Modellenmesi ve Sonlu Elemanlar Analizi

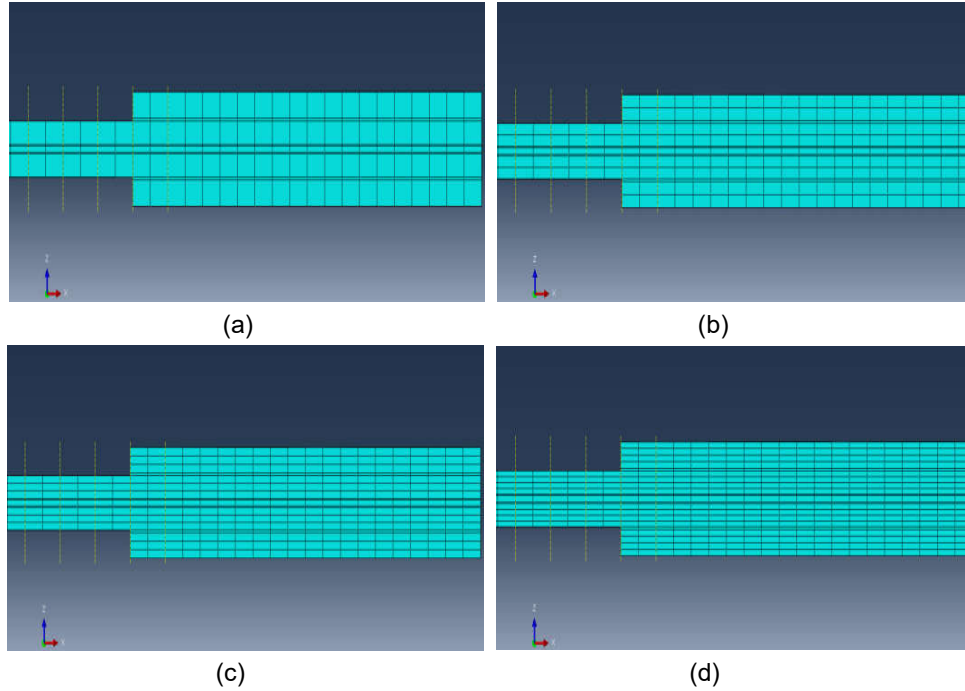
Güçlendirilmiş kompozit kiriş ABAQUS Sonlu Elemanlar Paket programı kullanılarak ve üç boyutlu olarak modellenmiştir. Sınır koşulları güçlendirmenin test makinesinin çenesiyle temasta bulunacak dış yüzeyleri boyunca uygulanmıştır. Kirişin bir tarafı bütün öteleme (translational) ve dönme (rotational) yönlerindeki serbestlik derecelerinde sabitlenmiş, diğer tarafı ise aksel yön dışındaki öteleme serbestlik derecelerinde ve bütün dönme serbestlik derecelerinde sabitlenmiştir. Aksel yönde uygulanan yer değiştirme (imposed displacement) ile çekme testi deneyi şartları oluşturulmuştur. Şekil 1 güçlendirilmiş kirişin üç boyutlu katı modeli ile birlikte modele uygulanan sınır koşullarını ve uygulanan yer değiştirmeyi göstermektedir.



Şekil 1: Kompozit Kirişin Üç Boyutlu Katı Modeli, Sınır Koşulları, Uygulanan Yer Değiştirme

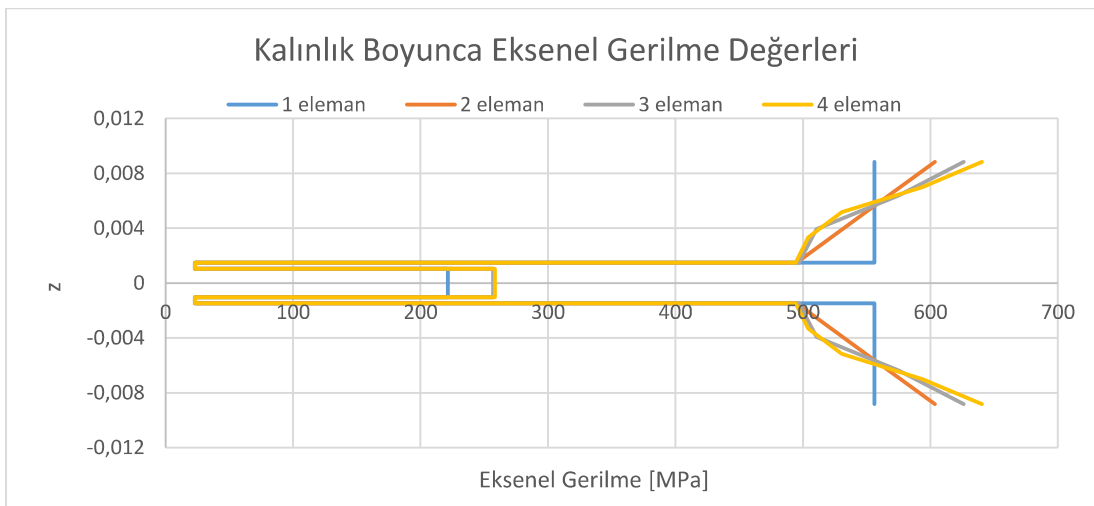
Çözüm ağında 8 düğümlü HEX8 geometrisinde her düğüm için 3 serbestlik derecesi içeren SOLID C3D8R elemanları kullanılmıştır. Çalışmada kullanılacak en uygun sonlu elemanlar ağını oluşturmak amacıyla kirişin sırasıyla kalınlık, uzunluk ve genişlik yönlerindeki elemanlarına ait yakınsama analizi yapılmıştır.

Kirişe öncelikle kalınlık yönünde sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 eleman atanmış ve Şekil 2 de gösterilmiştir.



Şekil 2: Kalınlık Yönünde (a) 1 Eleman (b) 2 Eleman (c) 3 Eleman (d) 4 Eleman

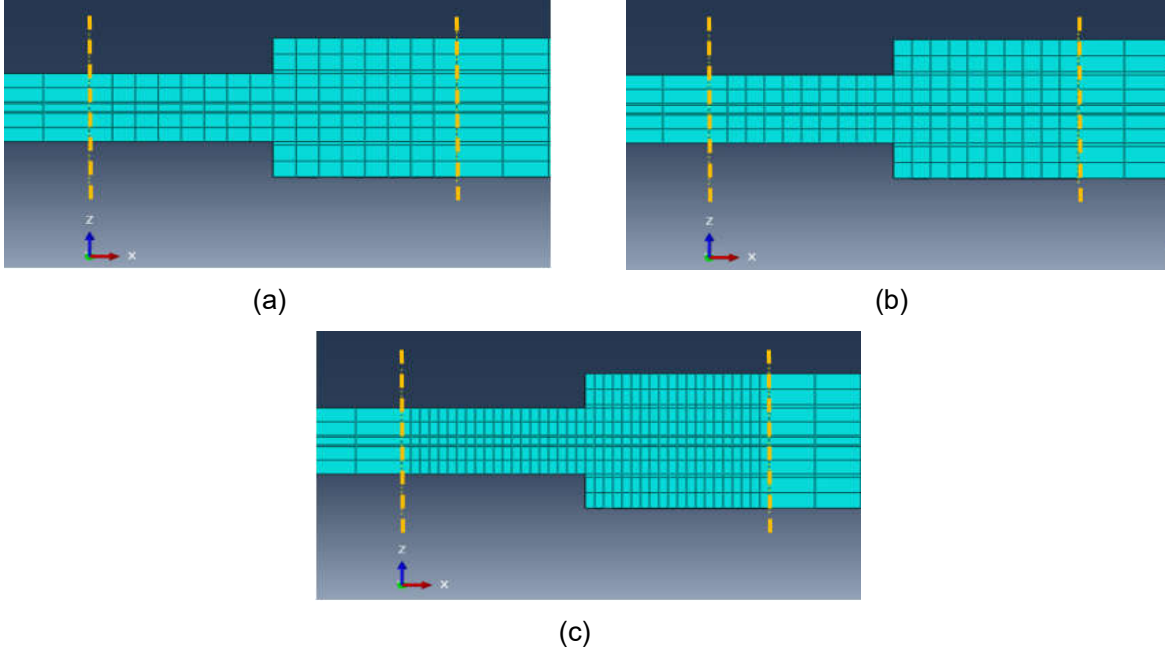
Kalınlık yönündeki eleman sayısı değişimi için aksenal gerilme değerleri incelenmiştir ve Şekil 3 te gösterilmiştir. Bu değerler güçlendirmenin sonlandığı ve dolayısıyla gerilme yığılmasının beklendiği bölgeden alınan bir kesitten elde edilmiştir.



Şekil 3: Kalınlık Boyunca Aksenal Gerilme Değerleri

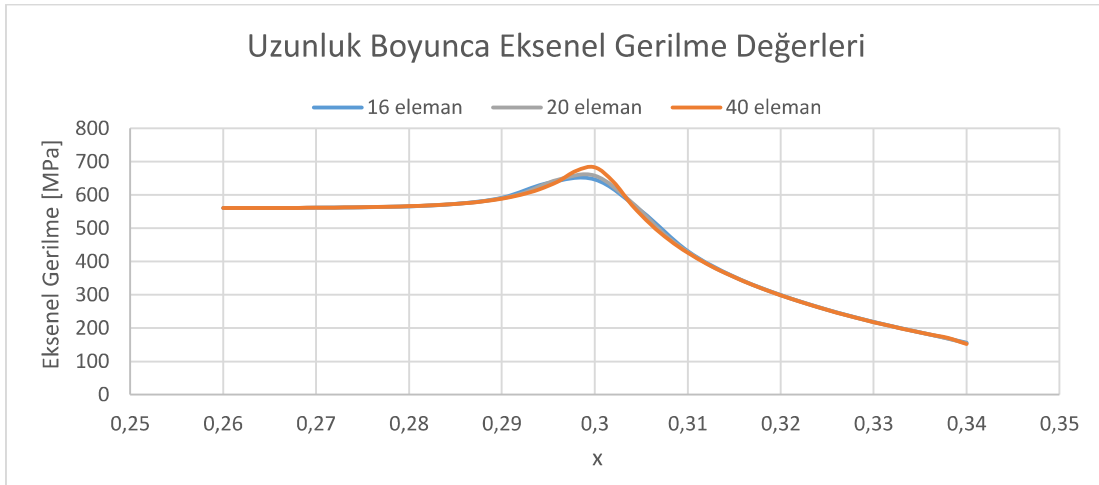
Bu bölgede kalınlık yönünde 2, 3 veya 4 eleman kullanıldığında fazla fark göstermeyen sonuçlar bulunmuştur. Bu durumda hesaplama süresi göz önüne alınarak kalınlık yönünde 2 eleman kullanımına karar verilmiştir.

Uzunluk yönündeki eleman sayısı değişimi için; gerilme yığılımlarının yüksek olması beklenen ve Şekil 4 te sarı çizgiler arasında gösterilen bölgedeki eleman sayıları 16, 20 ve 40 olarak incelenmiştir.

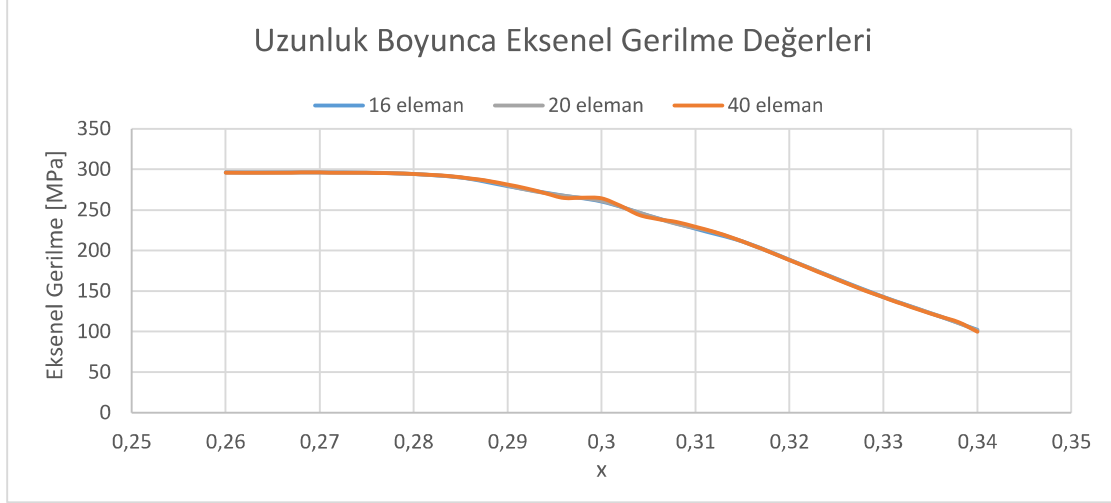


Şekil 4: Uzunluk Yönünde (a) 16 Eleman (b) 20 Eleman (c) 40 Eleman

Uzunluk boyunca aksenal gerilme değerleri incelenirken, tek yönlü kompozit ve örgü katmanların değerlendirmeleri, güçlendirmenin bittiği kısımda, ayrı ayrı yapılmış ve sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6 da sunulmuştur.

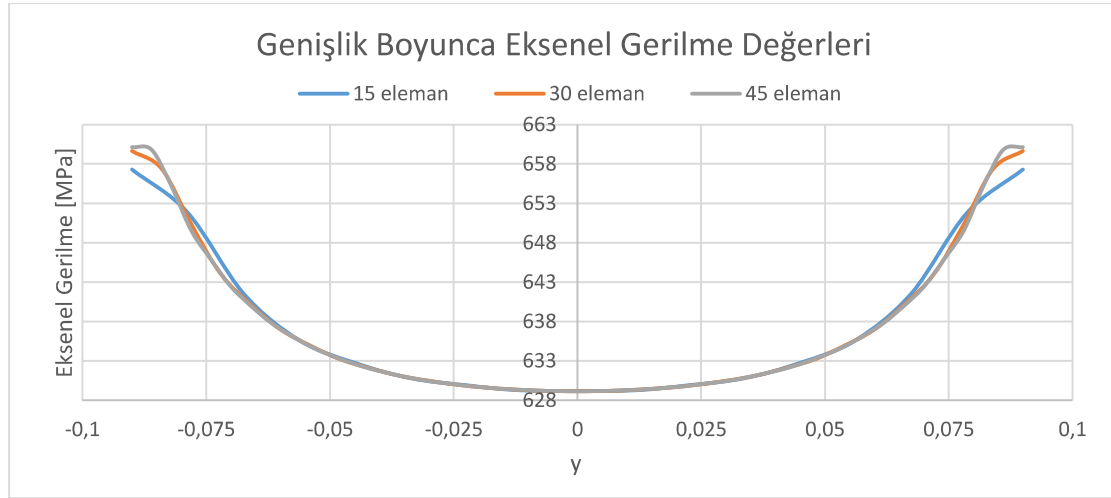


Şekil 5: Uzunluk Boyunca Tek Yönlü Kompozit Katmandaki Aksenal Gerilme Değerleri

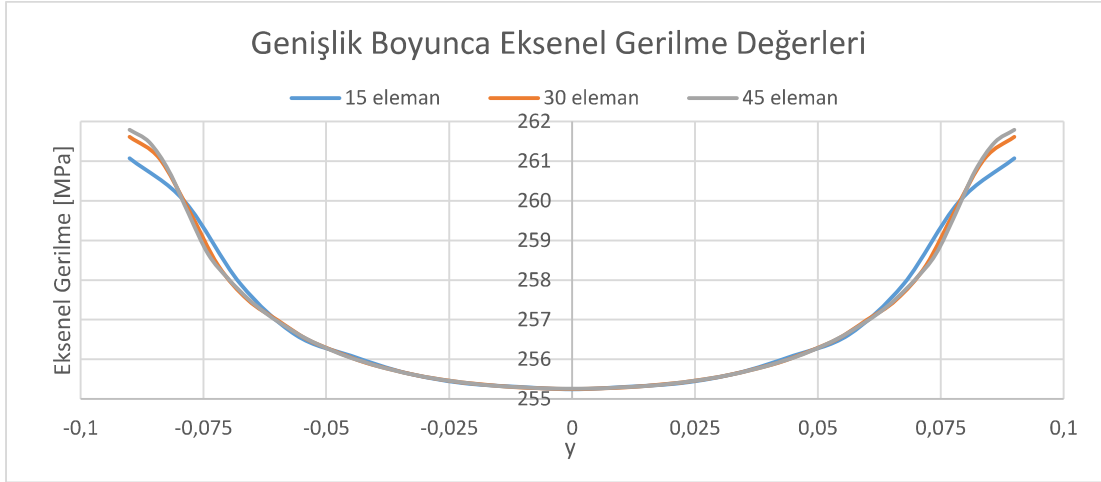


Şekil 6: Uzunluk Boyunca Örgü Kompozit Katmandaki Eksenel Gerilme Değerleri

Genişlik boyunca eleman sayısı değişimi için bütün parçada genişlik boyunca 15, 30 ve 45 eleman kullanılarak güçlendirilmenin bittiği, dolayısıyla gerilme yığılması beklenen bölgedeki eksenel gerilme değerleri tek yönlü kompozit ve örgü kompozit katmanlarda incelenmiş ve sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8 de sunulmuştur.



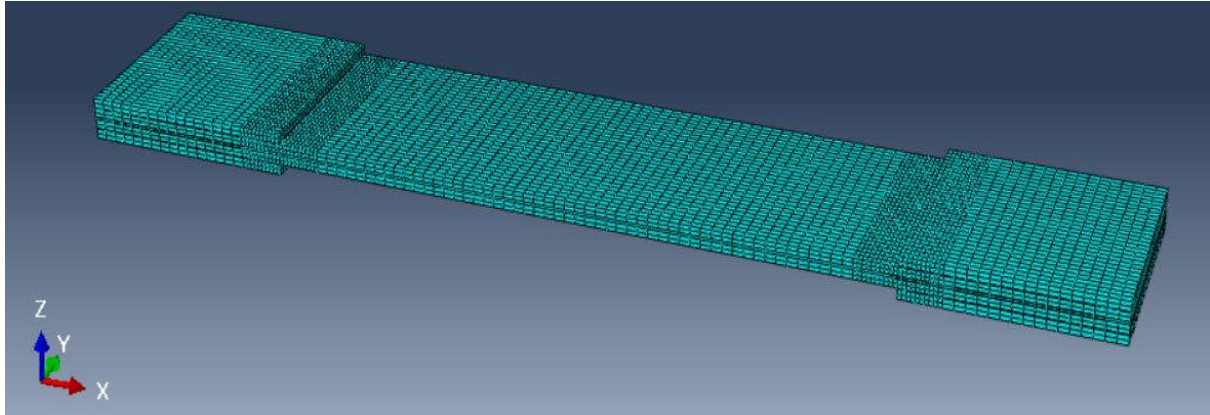
Şekil 7: Genişlik Boyunca Tek Yönlü Kompozit Katmandaki Eksenel Gerilme Değerleri



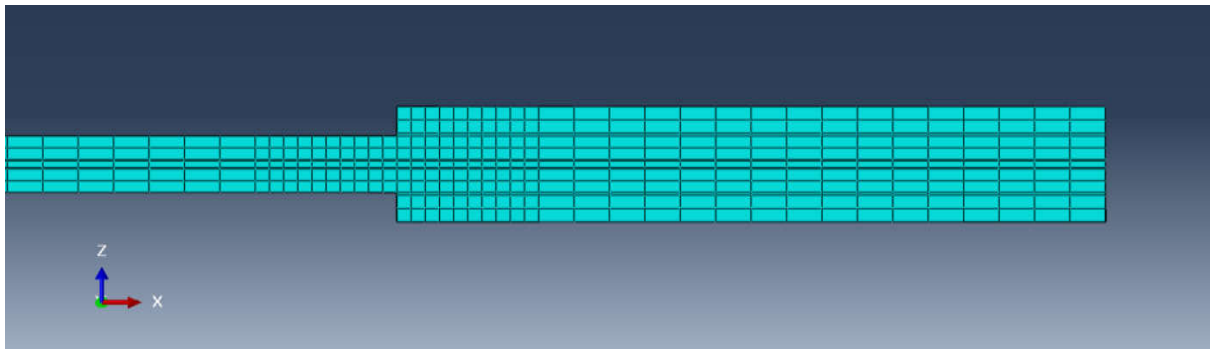
Şekil 8: Genişlik Boyunca Örgü Kompozit Katmandaki Eksenel Gerilme Değerleri

Şekiller 3 – 8 değerlendirildiğinde en uygun eleman sayısı olarak kalınlık boyunca 2 eleman, uzunluk boyunca 20 eleman, genişlik boyunca ise 30 eleman kullanılmıştır.

Sonlu eleman analizleri yakınsama analizlerinden sonra tasarım için kullanılacak 35400 elemandan oluşan sonlu elemanlar örgü ağı da Şekil 9.a ve Şekil 9.b de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 9: (a) Sonlu Elemanlar Örgü Ağı (b) Gerilme Yığılması Beklenen Bölgede Yakınlaştırılmış Sonlu Elemanlar Örgü Ağı

Tsai-Wu ve von Mises Hasar Kriterleri

Tek yönlü kompozit malzeme için kullanılacak Tsai-Wu hasar indisi formülü (1) numaralı denklemde verilmiştir [Camanho, 2002; Hansen, 1993].

$$FI = f_1\sigma_x + f_2\sigma_y + f_3\sigma_z + f_{11}\sigma_x^2 + f_{22}\sigma_y^2 + f_{33}\sigma_z^2 + 2f_{12}\sigma_x\sigma_y + 2f_{13}\sigma_x\sigma_z + 2f_{23}\sigma_y\sigma_z + f_{44}\tau_{yz}^2 + f_{55}\tau_{xz}^2 + f_{66}\tau_{xy}^2 \quad (1)$$

Kompozit ve izotropik yapılarda birbiriyle uyumlu hasar kriterlerinin kullanılması, malzemelerin hasar olasılığı mukayesesi açısından önemlidir. İzotropik malzemeler için her üç düzlemdeki kesme dayanımları eşit kabul edilebilir. Bunun yanında, çekme ve sıkıştırma dayanımları da eşit kabul edilirse hasar indisi katsayıları için aşağıdaki eşitlikler geçerli olur.

$$f_1 = 0 \quad (2)$$

$$f_2 = 0 \quad (3)$$

$$f_3 = 0 \quad (4)$$

$$f_{11} = f_{22} = f_{33} \quad (5)$$

$$f_{12} = f_{13} = f_{23} \quad (6)$$

$$f_{44} = f_{55} = f_{66} \quad (7)$$

Bu durumda Tsai-Wu hasar indisi izotropik malzemeler için (8) numaralı denkleme dönüşür.

$$FI = f_{11}(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) + 2f_{12}(\sigma_x\sigma_y + \sigma_x\sigma_z + \sigma_y\sigma_z) + f_{44}(\tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{xy}^2) \quad (8)$$

Tsai-Wu hasar kriterinde tanımlanmış indis parametreleri, izotropik malzemeler için (9, 10 ve 11) numaralı denklemler gibi yazılabilir. Bu denklemlerde σ_f çekme dayanımını belirtmektedir.

$$f_{11} = \frac{1}{\sigma_f^2} \quad (9)$$

$$f_{12} = -\frac{1}{2\sigma_f^2} \quad (10)$$

$$f_{44} = \frac{3}{\sigma_f^2} \quad (11)$$

Bu değerler (8) numaralı denklemde yerine konduğunda (12) numaralı denklem elde edilir. Bu denklem von Mises gerilmesinin karesini vermektedir.

$$FI\sigma_f^2 = \frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2] + 3(\tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{xy}^2) = \sigma_{vonmises}^2 \quad (12)$$

$$FI = \frac{\sigma_{vonmises}^2}{\sigma_f^2} \quad (13)$$

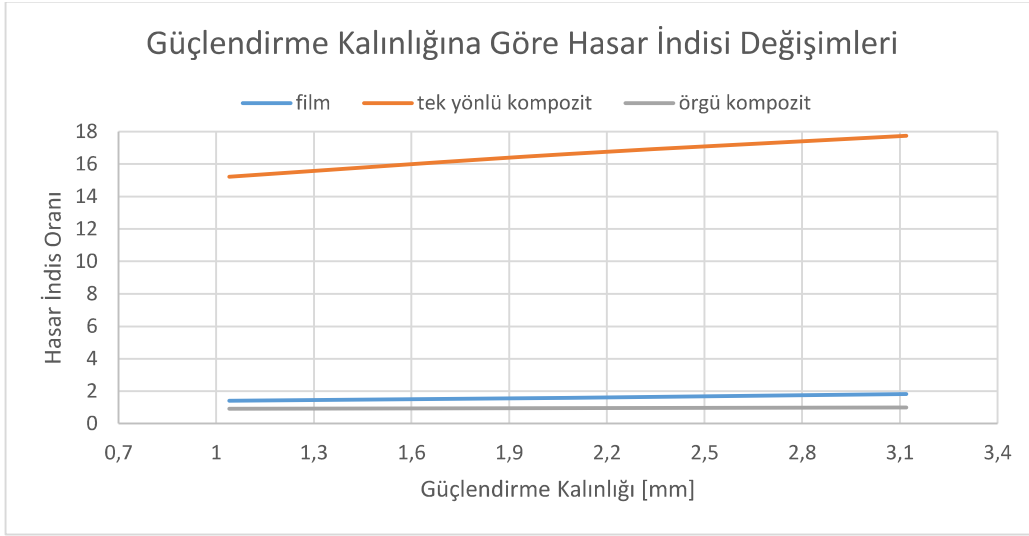
Bu şekilde kompozitler için kullanılan Tsai-Wu kriteri izotropik malzemelere uygulandığında, von Mises hasar indisinin karesine ulaşılmaktadır. Kompozit ve izotropik malzemelerin hasar indislerini karşılaştırabilmek için (1) ve (13) numaralı denklemler kullanılacaktır.

UYGULAMALAR

Çalışmada güçlendirmenin kalınlığı, güçlendirmeye verilen pah açısı, güçlendirme malzemesi, güçlendirmenin kirişle temas eden uzunluğu, güçlendirme ve kirişi birbirine bağlayacak yapıştırıcının kalınlığı incelenmiştir. Sıralanan her bir değişken için kirişte oluşan hasar indisleri karşılaştırılarak en düşük hasar indisine sahip güçlendirilmiş kiriş tasarımı elde edilmiştir.

Güçlendirme Kalınlığı

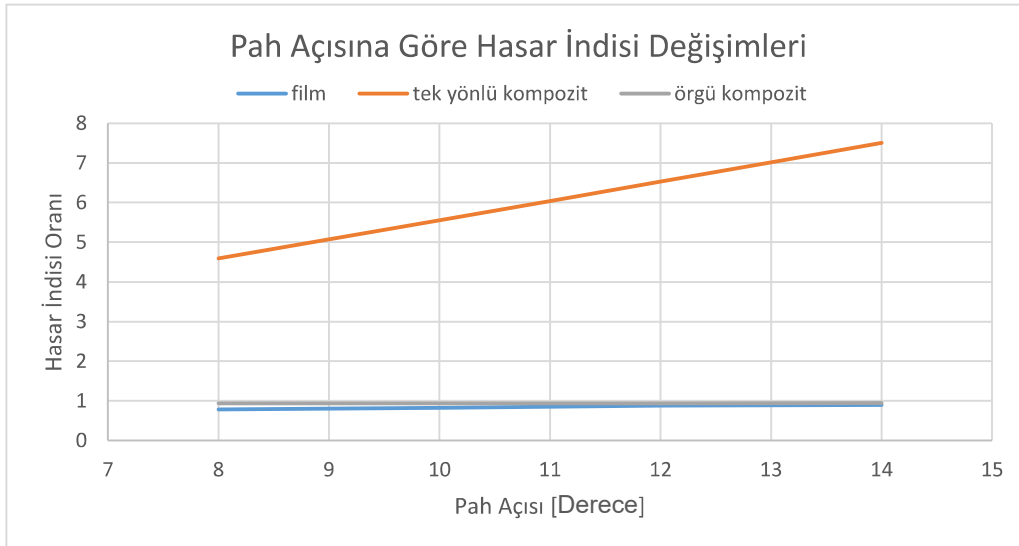
Güçlendirme kalınlığının kirişte oluşturduğu hasar indisi oranları Şekil 10 da sunulmuştur.



Şekil 10: Güçlendirme Kalınlığına Göre Hasar İndisi Değişimleri

Güçlendirme Pah Açısı

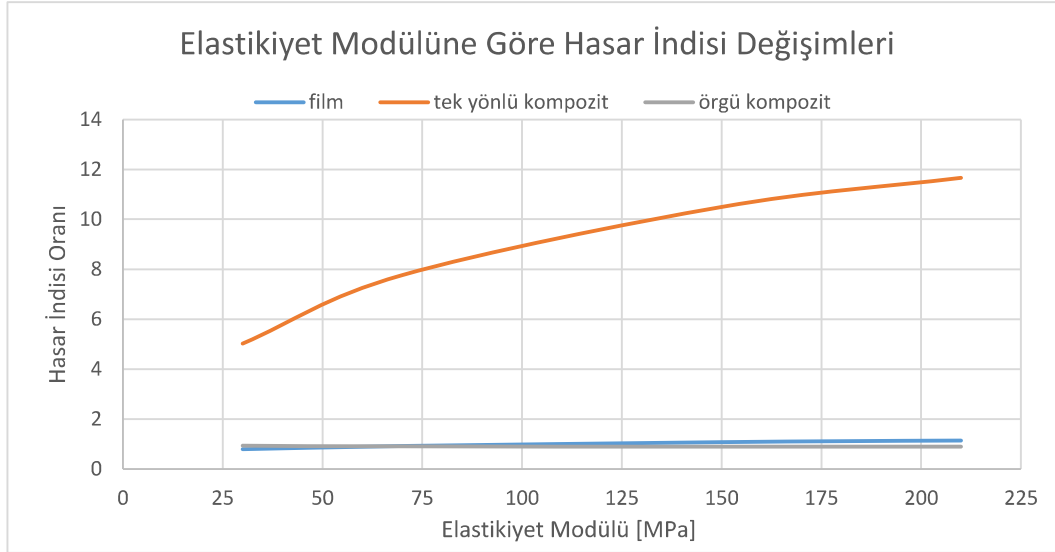
Güçlendirme pah açısının kirişteki hasar indisi oranları üzerindeki etkileri Şekil 11 de verilmiştir.



Şekil 11: Güçlendirmeye Verilen Pah Açısına Göre Hasar İndisi Değişimleri

Güçlendirme Malzemesi

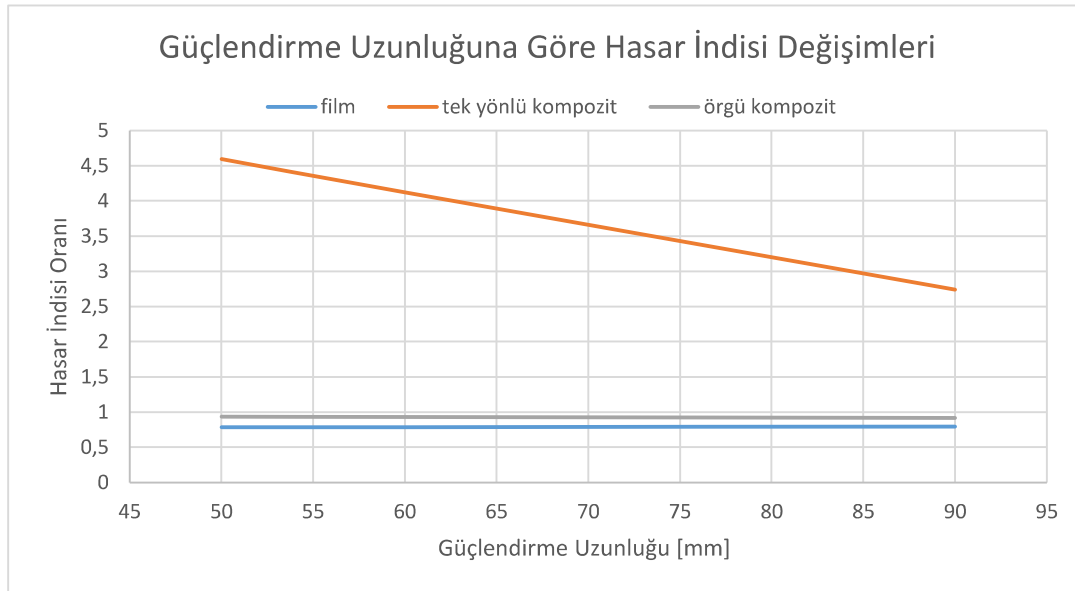
Şekil 12 güçlendirme malzemesinin elastikiyet modülünün kullanılan malzemelerde yarattığı hasar indisi değişimlerini göstermektedir.



Şekil 12: Güçlendirme Elastikiyet Modülüne Göre Hasar İndisi Değişimleri

Güçlendirme Uzunluğu

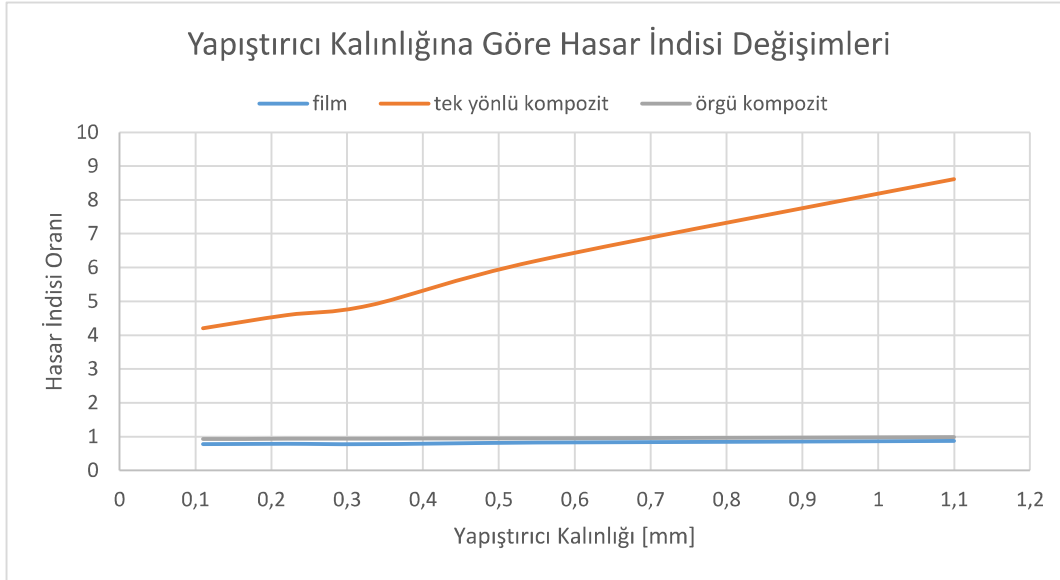
Güçlendirme uzunluğunun kirişte kullanılan malzemelerde oluşturduğu hasar indisi değişimleri Şekil 13 te verilmiştir.



Şekil 13: Güçlendirme Uzunluğuna Göre Hasar İndisi Değişimleri

Güçlendirme ile Kirişi Birbirine Bağlayan Yapıştırıcı Kalınlığı

Güçlendirme ile kirişi birbirine bağlayan yapıştırıcı kalınlığının kirişte yarattığı hasar indisi değişimleri ise Şekil 14 te gösterilmiştir.



Şekil 14: Yapıştırıcı Kalınlığına Göre Hasar İndisi Değişimleri

SONUÇ

Bu bildiriye güçlendirilmiş kompozit bir kirişin tasarımı ve sonlu eleman analizleri sunulmuştur. Çeşitli güçlendirme tasarımları sonucu elde edilen gerilmeler kompozit malzemeler için Tsai-Wu hasar kriteri ve izotropik malzeme olarak ele alınan film için de von Mises hasar kriterinde kullanılarak, tasarımların uygunluğu gösterilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma SSM, T.C. SAVUNMA SANAYİİ MÜSTEŞARLIĞI / TUSAŞ, TÜRK HAVACILIK VE UZAY SANAYİİ / DKTM, DÖNER KANAT TEKNOLOJİ MERKEZİ tarafından desteklenmektedir.

Kaynaklar

Adams, D.O., Adams, D.F. *Tabbing Guide for Composite Test Specimens*. Federal Aviation Administration. Final Report, October 2002

ASTM International, *Standart Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, D3039/D 3039M-0*

Camanho, P.P., *Failure Criteria For Fibre-Reinforced Polymer Composites*, Secção de Mecânica Aplicada, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto 2002

Hansen, W.C., *The Significance and Measurement of the Tsai-Wu Normal Interaction Parameter F12*, A Thesis Submitted to Oregon State University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Masters of Science Completed October 29, 1992 Commencement June, 1993