

## KOMPOZİT YAPILARDA FİBER OPTİK ALGILAYICILARIN YARATTIĞI GERİLME YIĞILMALARININ İNCELENMESİ

Boray DEĞERLİYURT<sup>1</sup>, Melin ŞAHİN<sup>2</sup> ve Yavuz YAMAN<sup>3</sup>  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

### ÖZET

*Gömülü Fiber Bragg Izgara (FBG) gerinim ölçerler (strain gages), kompozit malzemelerin yapısal sağlık izleme uygulamalarında kullanılmaktadır. Bir yapı içinde gömülü bulunan yabancı bir malzeme, gerilme yığılması yaratmakta ve bu bağlamda fiber optik tellerin, malzemenin içinde yarattığı gerilme yığılmalarının hasar yaratıp yaratmadığından da emin olunmalıdır. Havacılık sektöründe sıklıkla kullanılan cam elyafı kompozit yapılarda, gömülü FBG algılayıcıların yarattığı gerilme yığılmaları incelenmiştir. İncelenen cam elyafı kompozit yapı, çekme yüküne maruz bırakılmış ve model, ASTM kompozit malzemelerin çekme testi standartlarına uygun olarak tasarlanmıştır. Ayrıca fiber optik tel tahliye bölgelerinde tele çekme yükü uygulanmış olup, bu şekilde taşıma ve kablolama sırasında oluşabilecek istenmeyen yükler modellenmiştir. Bu yüklerle karşı koruma için teflon tüpler eklenmiş ve gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmada, farklı konumlarda ve doğrultularda gömülü FBG algılayıcılarının yapı üzerinde yarattığı gerilme yığılmaları, ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı ile karşılaştırılmıştır. Farklı malzemelerde gerilme değerleri, farklı sonuçlar vermektedir. Bir gerilme altında bir malzeme hasara maruz kalırken, bir başka malzeme hasar koşuluna uzak, elastik bölgede deformasyonlar gösterebilmektedir. Farklı malzemelerin gerilme değerlerinin birbiriyle karşılaştırılması için, her malzemeye özel hasar indisleri kullanılmıştır. Bunlar, izotropik malzemeler için von Mises hasar indisinin karesi, kompozit malzemeler için Tsai-Wu hasar indisleridir. Tüm çekme yükü koşullarında, tahliye bölgelerinin yük taşınamasından ötürü buralarda gerilme yığılması görülmemiştir. Ayrıca numuneye makine tarafından uygulanan çekme yükü altında, tahliye bölgelerinde teflon tüplerle koruma gerekmesi de, dışarıdan gelen ve fiber optik üzerine uygulanan istenmeyen çekme yüklerine karşı teflon tüplerin koruma sağladığı görülmüştür.*

### GİRİŞ

Havacılıkta yapısal sağlık, mal ve özellikle can güvenliği açısından ciddi önem taşımaktadır. Hasar görmüş yapı içeren hava aracı, güvenlik bakımından ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu tehdidi en aza indirmek için yapının sağlığının sürekli izlenmesi gerekmektedir. Yapısal sağlık uygulamaları için yapılara algılayıcı monte edilmesi bu yaklaşımlardan biridir. Algılayıcılar, yüzeye monte edilebilirler veya yapının içine gömülebilirler. Yüzeye uygulanan algılayıcılar, dış koşullara karşı savunmasız hale gelmektedirler. Havacılık uygulamalarında dış koşullar son derece sert olmakta ve yüzeye uygulanan algılayıcıların ömrü de bu bağlamda oldukça kısalmaktadır. Bu sorunu aşmak için, gömülü algılayıcı uygulamaları geliştirilmektedir. Kompozit malzemeler, gömülü algılayıcılar için oldukça uygundur ve üretim aşamasında, katmanlar arasına bu tip algılayıcılar kolaylıkla gömülebilirler. Fiber Bragg Izgara gerinim ölçerler, yüksek hassasiyetli, düşük gürültülü, yüksek çözünürlüklü ölçüm ve kompozit malzemelerin arasına gömülme olanağı sağlaması nedeniyle, son yıllarda kompozit malzemelerin yapısal sağlık izleme uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu algılayıcılar, son derece ince tellerden oluşmaları sebebiyle gömülen yapının geometri ve malzeme bütünlüğünü de en alt düzeyde etkilemektedirler. Ancak kompozit malzemenin içine yabancı bir madde gömüldüğünde, ek gerilme yığılmalarının olması da olası olumsuz sonuçlardandır. Yapısal sağlık izleme uygulamaları, hasar olasılığını en aza indirmek için

<sup>1</sup> Y. Lisans Öğrencisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: boray.degerliyurt@metu.edu.tr

<sup>2</sup> Doç. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: msahin@metu.edu.tr

<sup>3</sup> Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: yyaman@metu.edu.tr

yapılmaktadır. Bu uygulama için gömülen algılayıcı, yapısal sağlık izlemenin amacına ters düşecek şekilde, yapıda hasar yaratmamalıdır. Bundan ötürü, gömülü fiber optik algılayıcının yarattığı gerilme yığılmalarının ek olarak hasar yaratıp yaratmadığı da incelenmeli ve uygun test ortamı oluşturulmalıdır.

Kompozit yapıların mukavemet ölçümleri için, çekme testleri en çok tercih edilen yöntemdir. Bu çalışmada, çekme yükü altında oluşan gerilme yığılmaları incelenmiştir. Bunlara ek olarak fiber optik tel tahliye bölgelerinde, taşınma, montaj ve test esnasında fiber optik teli kırabilecek istenmeyen yükler de oluşabilmektedir. Test koşullarından bağımsız olarak fiber optik tellere çekme yükü uygulanmış ve tahliye bölgelerindeki eğilimler de gözlemlenmiştir. Bu yüklerin etkisini azaltmak için koruyucu teflon tüpler eklenmiş ve tahliye bölgelerinde hasar indislerinin düşüşü düşmediği irdelenmiştir.

Kompozit numuneler [Karataş, Yaman ve Şahin, 2016], ASTM çekme testi standartlarına uygun olacak ve gömülü fiber optik algılayıcılarını içerecek şekilde modellenmiştir.

## YÖNTEM

Genelde karmaşık yapılarla ilgili analitik çalışmalar fazla değildir. Daha çok basitleştirilmiş ve özdeş katmanlardan oluşan yapılarla ilgili analitik çalışmalar mevcuttur [Lau, Yuan, Zhou, Wu ve Woo, 2001; Green, Zaidman, Shafir, Tur ve Gali, 2000; Balać, Milovančević, Uskoković ve Aleksić, 2006]. Söz konusu modellerde analitik çözümlerin elde edilememesinden ötürü, farklı fiber optik gömülü kablolu senaryolarını içeren sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuş ve bu modellere sonlu elemanlar analizi uygulanarak gerilme yığılmaları çıkarılmıştır. Literatürde termoplastik [Sorensen, 2006] ve mekanik [Eaton, Drew ve Geiger, 1995] yükler altında fiber optik telin yarattığı gerilme yığılması sonlu elemanlar analizleri de mevcuttur. Ancak bu modeller 2 boyutlu, özdeş katmanlı ve güçlendirme içermeyen yapılardır. Çalışmadaki söz konusu modeller ise, 3 boyutlu, güçlendirme bulunduran, farklı malzeme katmanlardan oluşan modellerdir. Literatürde ise bu özelliklere sahip gömülü FBG içeren benzer modellerin sonlu elemanlar analizleri mevcut değildir. Bu nedenden ötürü, bu çalışmada söz konusu modellerin sonlu elemanlar analizlerinin bahsi geçen şekilde ve detayları ileriki bölümlerde verilmiş olarak incelenmesi yapılmıştır.

### Gerilme Değerlerinin Hasar İndisleri Kullanılarak Karşılaştırılması

Gerilme değerleri, malzemeden malzemeye ciddi farklılıklar göstermekte ve çok düşük düzeydeki gerilme değerleri, bir malzemeye hasar verirken, çok yüksek düzeydeki gerilmeler başka bir malzemede hasar yaratmayabilmektedir. Bundan ötürü, hasar indisleriyle, gerilme değerleri normalize edilmiş ve malzemeler arası analiz sonuç karşılaştırmaları da yapılmıştır.

Analizler sonucunda elde edilen gerilme değerlerinden hasar indisleri çıkarılmış; ancak kompozit ve izotropik malzemeler için ortak sonuç verebilen ve mukayeseyi mümkün kılan hasar indisleri seçilmesi gerektiğinden kompozit malzemeler için Tsai-Wu hasar indisi kullanılmıştır.

İzotropik malzeme varsayımıyla mukavemet değerleri Tsai-Wu hasar indisine konulduğunda, (1) numaralı denklemde verilen von Mises hasar indisinin karesi elde edilmektedir [Ugural ve Fenster, 2012].

$$FI = \frac{\sigma_{von Mises}^2}{\sigma_y^2} \quad (1)$$

$\sigma_y$  izotropik malzemenin akma mukavemetidir. von Mises ve Tsai-Wu hasar indisleri bir arada kullanılarak farklı malzemelerin mukavemetleri karşılaştırılmış ve hasar indisleri 1'den büyük olduğu değerlerde, malzemelerin hasar göreceği varsayılmıştır. Hasar indisleri ne kadar büyük olursa, hasar olasılığı o kadar artmaktadır. Bütün analizlerde, fiber optik tel çevresindeki hasar indislerinin küçük olması istenmekte aksi takdirde malzemede gömülü fiber optik uygulaması sonucunda erken hasarlar olabileceği varsayılmaktadır.

## Sonlu Elemanlar Modeli

Sonlu elemanlar modeli ABAQUS CAE arayüzüyle oluşturulmuştur

**Kompozit Yapı Modeli:** ASTM standartlarına göre oluşturulmuş kompozit yapı modeli, tek yönlü fiberli cam-elyafı, örgü cam elyafı ve yapıştırıcı film katmanlarından oluşmuş olup,  $[0_8/\text{Film}/(\pm 45)_w/(\pm 45)_w/\text{Film}/0_8]$  serim düzenine sahiptir. Yapıda ayrıca kavrama bölgelerinde eğik kesit içeren örgü cam elyafı kompozit malzemeli güçlendirme kısımları bulunmaktadır. Bu güçlendirmeler ana yapıya yapışkan film katmanlarıyla bağlanmıştır.

ASTM standartlarına göre oluşturulmuş güçlendirmeler içeren kompozit numune modeli, ağ yapısıyla Şekil 1'de verilmiştir. Tüm yapı, 3 düğüm serbestlik dereceli, 8 düğüm noktası bulunduran (HEX8) katı elemanlardan oluşmuştur. Tek yönlü fiberli cam elyafı ve örgü cam elyafı kompozit malzemeler ortotropik, yapışkan film malzemeler ise, izotropik malzeme özelliğiyle tanımlanmıştır. Çizelge 1'de sonlu eleman örgüsünde bulunan her malzeme için toplam eleman ve düğüm noktası sayısı verilmiştir. [Karataş, Yaman ve Şahin, 2016] .

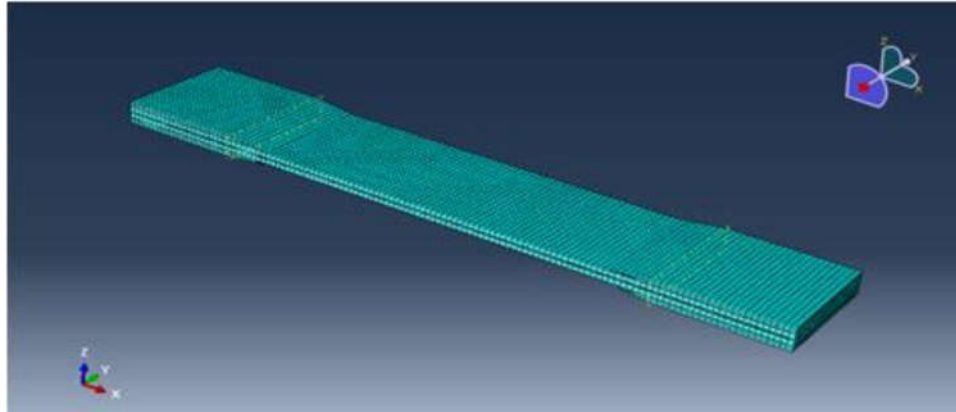
Çizelge 1: Kompozit Numune Sonlu Elemanlar Modelinin Özellikleri

Malzeme	Tek yönlü Fiberli Cam Elyafı	Örgü Cam Elyafı		Yapışkan film	
		Ana Kiriş	Güçlendirme	Ana Kiriş	Güçlendirme
<b>Eleman Sayısı <math>N_e</math></b> ( $N_{e,x} \times N_{e,y} \times N_{e,z}$ )	15600 (130x30x4)	3900 (130x30x1)	7800 (65*x30x4)	7800 (130x30x2)	3960 (66x30x2)
<b>Düğüm Noktası Sayısı</b> $N_n$ ( $N_{n,x} \times N_{n,y} \times N_{n,z}$ )	24366 (131x31x6)	8122 (131x31x2)	12400 (66.7*x31x6)	16244 (131x31x4)	8432 (68x31x2)

\*Güçlendirmenin açılı bölgesinden dolayı x yönündeki eleman sayıları kalınlık (z) yönünde değişkendir. Verilen değerler x yönünde ortalama eleman sayısını vermektedir.

Modelde toplam 39060 adet 8 düğüm noktalı katı sonlu eleman bulunmaktadır. Çizelge 1'de verilen düğüm sayılarının bir bölümü kesişmektedir. Bu kesişimler dikkate alındığında toplam 44888 düğüm noktası bulunmaktadır. Her düğüm noktası 3 öteleme serbestlik derecesine sahiptir. Modelin toplam serbestlik derecesi 134664 olmaktadır.

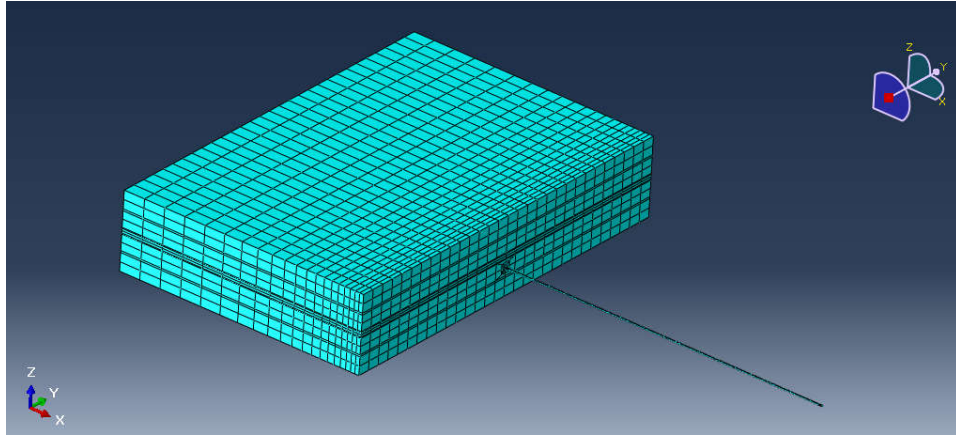
Bu modele gömülü FBG'ler farklı senaryolarla eklenmiştir. FBG içeren modellerle, içermeyen modelin analizleri yapılarak karşılaştırmalı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 1: Kompozit Yapının Sonlu Elemanlar Modeli [Karataş, Yaman ve Şahin, 2016]

FBG tahliye bölgelerinde çekme testi koşullarından bağımsız olarak taşınma, montaj ve kablolama esnasında FBG algılayıcıların üzerine istenmeyen yükler uygulanmaktadır. Bu analizleri çekme yükünden bağımsız olarak değerlendirmek için tahliye bölgelerini temsil eden sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. FBG'nin serbest ucuna çekme yükü uygulanmıştır. Bu yükler altında tüm modelin tahliye bölgesine çok yakın bir bölümünde gerilmeler görülmektedir. Modelin uzak kısımlarında gerilme değerleri ihmal edilecek kadar küçüktür. Hesap sürelerinin kısalması için

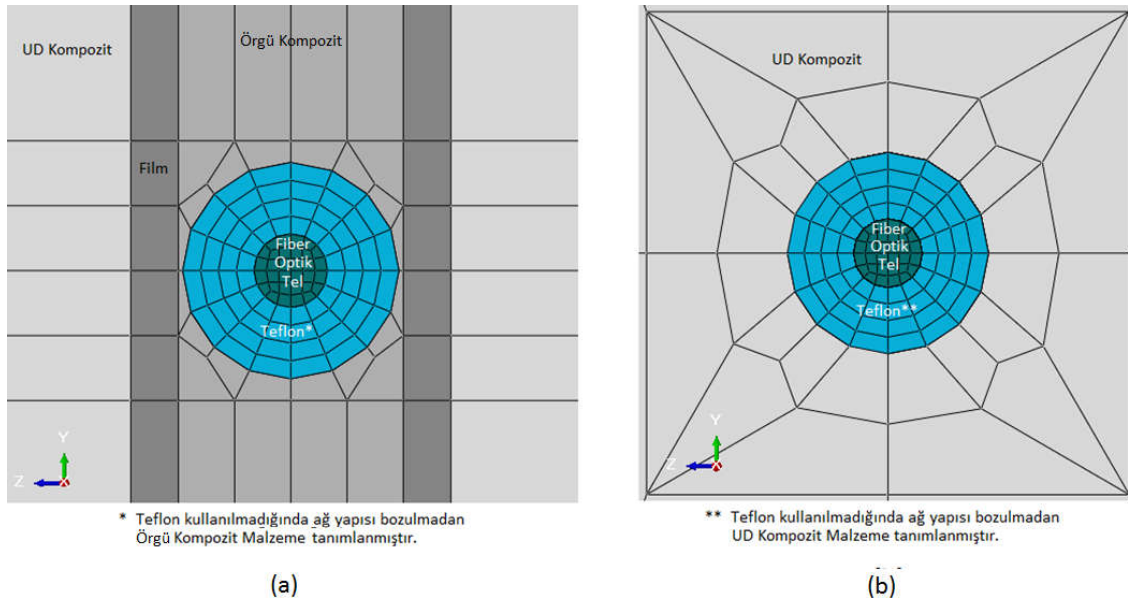
sadece tahliye bölgesi civarı modellenmiştir. Tahliye bölgesi, ana modelin ucundan bir bölüm kesilerek elde edilmiştir. Tahliye bölgesi modeli Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2: Kompozit Numune Fiber Optik Tel Tahliye Bölgesi Modeli

**Gömülü FBG Algılayıcı Modelleri:** Fiber optik teller, izotropik malzeme olarak modellenmiştir. Klasik FBG algılayıcılar, 125 $\mu\text{m}$  çapında polimide veya akrilat kaplamalı olmakta ve fiber çapı da büyümektedir. Kaplamalı fiberlerin çapı yaklaşık olarak 170  $\mu\text{m}$ ' dir. Kaplamalı fiber optik tel modelleri kullanılmış ve Young Modülü 71 GPa, Poisson Oranı ise 0.17 alınmıştır. Kaplamalı ve kaplamasız fiberlerde akma mukavemetleri benzer olup yaklaşık 530 MPa'dır [Antunes, Domingues, Granada ve André, 2012].

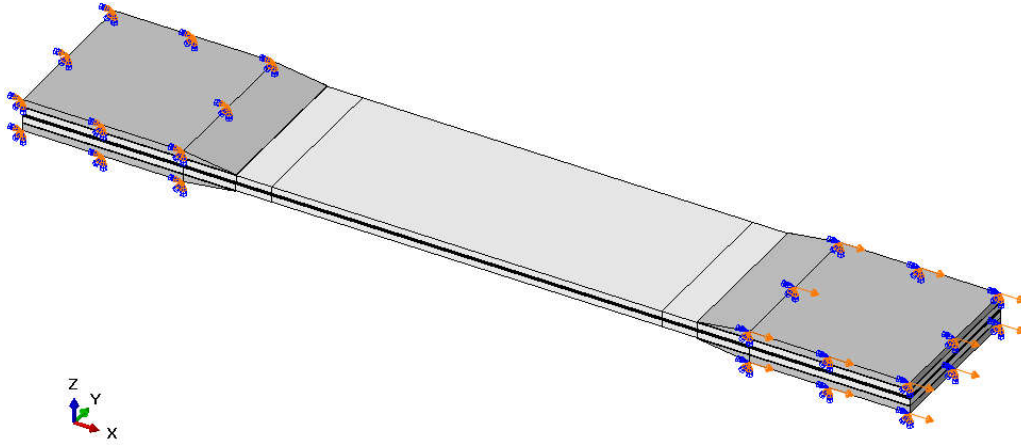
Gömülü algılayıcı civarında, daha yüksek çözünürlüklü gerilme dağılımı elde etmek için ağ yapısı sıklaştırılmıştır. Ağ yapısında 8 düğümlü katı elemanlar (HEX8) kullanılmıştır. Gömülü algılayıcı civarındaki ağ yapısı kesiti Şekil 3'te verilmiştir. Gömülü fiber optik teller, izotropik malzeme özelliğiyle tanımlanmıştır.



Şekil 3: (a) Örgü Kompozite (b) Tek Yönlü (UD) Kompozite Gömülü Fiber Optik Kesiti Sonlu Elemanlar Ağ Yapısı

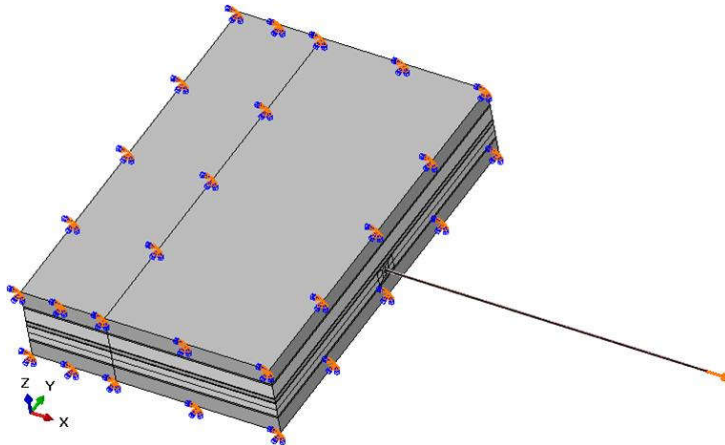
**Sınır Koşulları:** Şekil 4'te çekme testi için ana numune üzerindeki sınır koşulları verilmiştir. Çekme yer değiştirme sınır koşulları, makinenin temas edeceği güçlendirme yüzeylerine verilmiştir. Bir tarafta x yönündeki yer değiştirme değerleri sıfır olarak alınırken, diğer tarafta ise bu değer, fibersiz yapıda maksimum hasar indisi 1 olacak şekilde alınmıştır. Bu şekilde daha rahat kıyaslama

yapılabilecektir. Bu yüzeylerde, y ve z yönündeki yer değiştirmeler ve üç eksen çevresinde açılma yer değiştirmeler engellenmiştir. Yapı doğrusal elastik olduğundan ve geometrik doğrusalsızlık koşulları oluşmadığından, tüm gerilme değerleri yer değiştirme değerleriyle doğru orantılı çıkmaktadır. Güçlendirme yüzeyleri Şekil 4'te turuncu sınır koşulları imleriyle gösterilmiştir. Yan yüzeyler makineyle temas etmediği için, bu yüzeylere sınır koşulu atanmamıştır.



Şekil 4: Çekme Testine Uygun Kompozit Yapı İçin Sınır Koşulları

Tahliye bölgesi modelinde ise benzer şekilde güçlendirme yüzeyleri her yönde sabitlenmiştir. Farklı senaryolarda farklı konumlarda olan fiber optik tellerin ucuna, çekme yükü uygulanmıştır. Yükler fiber optik telin ucundaki dairesel yüzeye düzgün dağılmış gerilme yükü olarak uygulanmıştır. Yük büyüklükleri, tüm senaryolar için bütün malzemeler arasında maksimum hasar indisi 1 olacak şekilde ve her senaryo için aynı sabit değerde seçilmiştir. Tahliye bölgesi için çekme sınır koşulları Şekil 5'te verilmiştir.

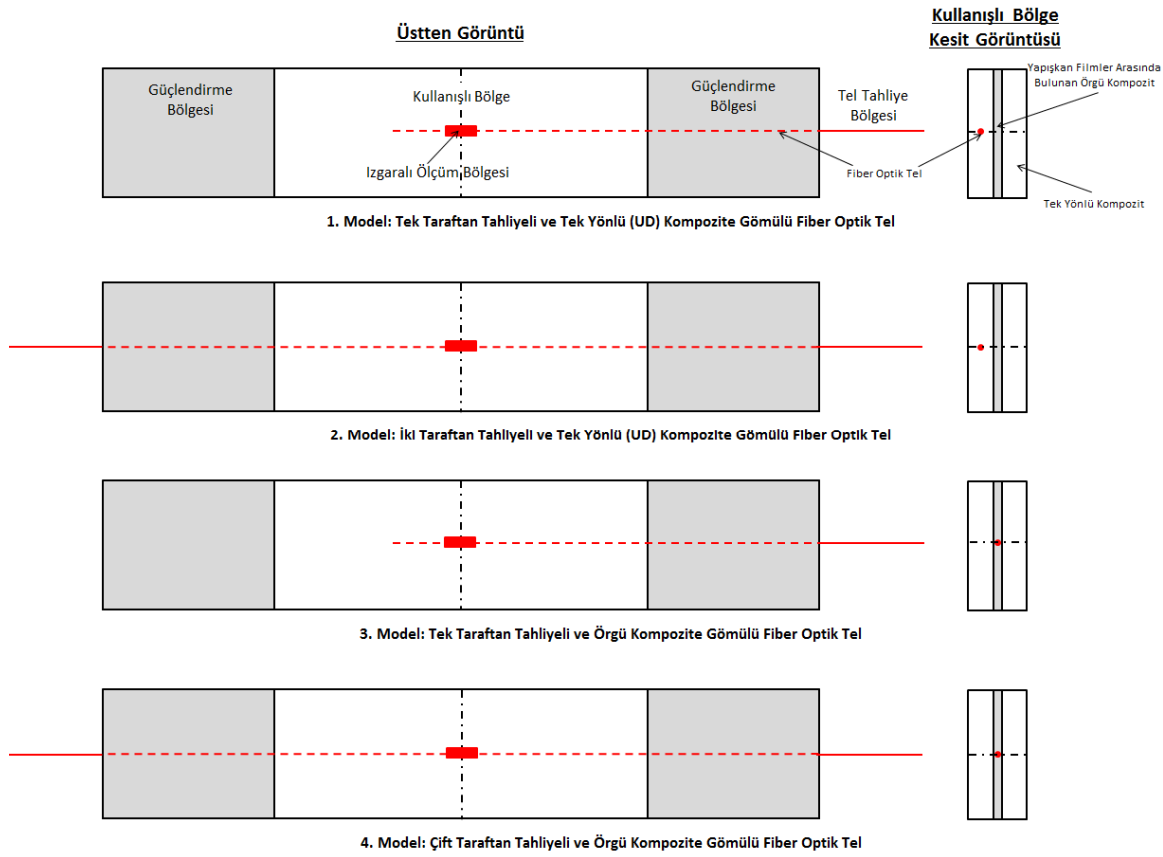


Şekil 5: Kompozit Yapı Tahliye Bölgesi için Sınır Koşulları

## UYGULAMALAR

### Güçlendirmelere Uygulanan Çekme Yükü Altındaki Kompozit Numune Analizleri

Bu bölümde, tipik bir gömülü fiber optik tel uygulamasının analizleri verilmiş ve bu uygulamada kullanılan fiber optik telin yapı içerisinde izlediği yolların gösterildiği farklı modeller Şekil 6'da açıklanmıştır. Şekil 6'da da gösterildiği gibi, fiber optik tel, üstten bakıldığında numunenin tam ortasından çekme eksenine paralel olacak şekilde geçmektedir. FBG algılayıcının ızgaralı ölçüm bölgesi, üstten görüntüye göre modelin tam merkezinde bulunmaktadır. Telin bir ucu tahliye olup sorgulayıcıya bağlanmaktadır. Telin diğer ucu ise ya aynı şekilde tahliye olmakta ya da numunenin içinde sonlanmaktadır. Tel tahliye olduktan sonra oldukça uzun bir yol izlese de, 4 cm'lik kısımlar tahliye bölgesinde modellenmiştir. Telin numune içinde kalan ucu ise ızgaralı ölçüm bölgesinden 2 cm ötede modellenmiştir.



Şekil 6: Fiber Optik Tellerin (FBG) Gömülme Senaryoları

1. ve 2. Modellerde fiber optik tel, orta katmanları oluşturan örgü kompozitin bir tarafında, tek yönlü cam elyaf katmanların tam ortasına yerleştirilmiştir. 1. Modelde fiber optik telin bir ucu tahliye olurken diğer ucu numune içinde kalmaktadır. 2. Modelde ise fiber optik telin iki ucu da tahliye edilmiştir. Benzer şekilde 3. ve 4. model kalınlık yönünde numunenin tam ortasında olan örgü kompozit katmanların arasına gömülmüştür. 3. Modelde fiber uçlarından bir tanesi tahliye olurken, 4. Modelde iki uç da tahliye olmuştur. Fiber optik telin yapıda nasıl bir değişiklik yaptığı, mukayeseli olarak gözlenmiş ve fiber optik tel içermeyen yapı analizleri, fiber optik telin nasıl bir etki yaratacağına referans olmuştur. Bundan ötürü, fiber optik tel içermeyen yapı analizleri de yapılmıştır. Bu şekilde fiberli yapıyı, fibersiz yapıyla sağlıklı bir şekilde karşılaştırmak mümkün olmuştur. Her model için ve her farklı malzeme için, tüm numunede görülen hasar indisi sonuçları Çizelge 2’de özetlenmiştir.

Çizelge 2: Çekme Testi için Gömülü Fiber Optik Algılayıcı İçeren Modellerin Hasar İndislerinin Karşılaştırılması

Malzeme	Fibersiz	1. Model	2. Model	3. Model	4. Model
Fiber Optik	-	0.6300	0.6300	0.6497	0.6464
Örgü	1.0000	1.0002	0.9997	1.1650	1.1388
Tek Yönlü	0.5627	0.5911	0.5909	0.5639	0.5639
Film	0.0190	0.0190	0.0191	0.0190	0.0190



FBG gömülmemiş yapıda maksimum hasar indisi örgü kompozitte oluşmaktadır. Dolayısıyla kritik olarak incelenmesi gereken malzeme örgü kompozittir.

İlk olarak fiber optik telin hasar indisleri her koşulda aynı olup örgü kompozitten düşüktür. Fiber optik telde maksimum hasar indisi telin kompozit içinde kalan bölümünün ortalarında oluşmaktadır. Telin maksimum hasar indisi değerleri, kompozit yapıda oluşan maksimum hasar indisinden düşük kalmaktadır. Bu koşulda kompozit malzeme ilk hasarı gördüğünde, hasar uyarısında kullanılacak olan gerinim verisi sağlıklı bir şekilde alınabilecektir.

Örgü kompozitte maksimum hasar değerleri görülmektedir. 1. ve 2. Modellerde fiber optik tel örgü kompozitten uzak konumda gömüldüğü için hasar indis değerleri değişmemiştir. Ancak Fiber optik tel kritik olan örgü kompozitlerin arasına gömüldüğünde, örgü kompozit hasar indisleri %14-17 mertebesinde artmaktadır. Bu değer artışları numunenin maksimum hasar indis artışına tekabül etmekte ve global ilk hasar olasılığını artırmaktadır. Bundan ötürü örgü kompozitlerin arasına gömülme sakıncalı görünmektedir.

Tek yönlü kompozit hasar indisi değerleri 3. ve 4. Modellerde, fiber optik içermeyen yapıyla kıyaslandığında aynı kalmaktadır. Bunun nedeni benzer şekilde fiber optik telin uzak konumda gömülmüş olmasıdır. 1. ve 2 Modeler için geçerli, tek yönlü kompozit içine gömülen fiber optik teller ise %5 mertebesinde hasar indisi artışı yaratmaktadır. Bu artış örgü kompozit artışına kıyasla ciddi değildir. Ayrıca tek yönlü kompozitin hasar indisi değerleri hâlâ örgü kompozite göre düşük kalmaktadır. Bu nedenlerden ötürü fiber optik telin tek yönlü kompozite gömülmesi uygun görülmektedir.

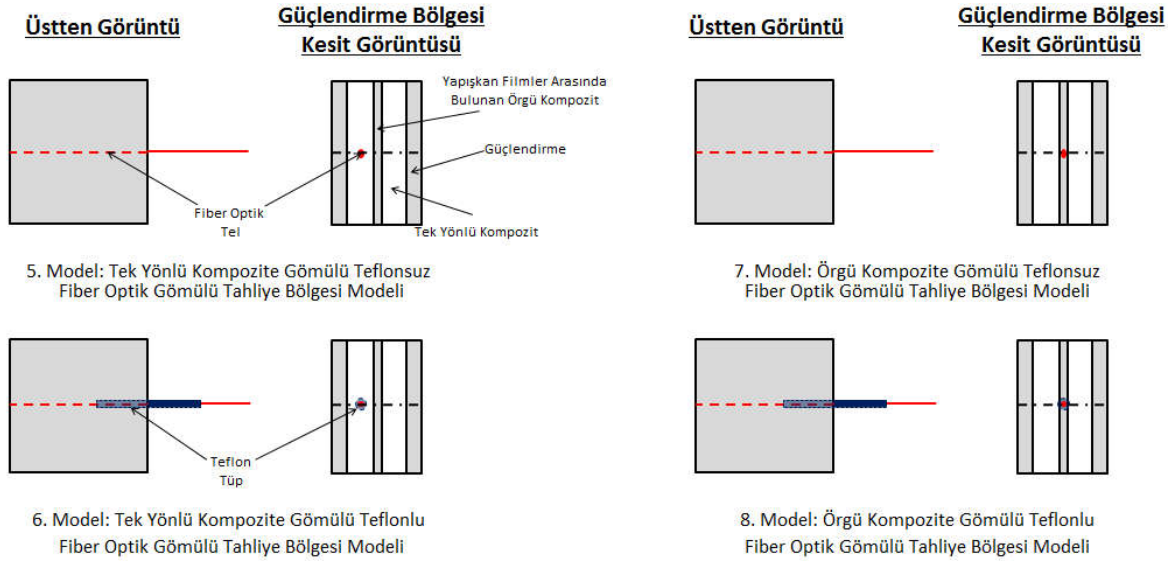
Yapışkan film değerleri için hasar indisi değerleri, fibersiz yapıyla farklılık göstermemiştir. Örgü kompozit katmanların arasına gömülen fiber optik tel konumu nispeten filmlere yakın olsa da film hasar indislerine hiçbir etkisi olmamıştır.

Fiber optik telin tek ucunun numune içinde kalması veya iki ucunun da tahliye olması hasar indislerinde ciddi fark yaratmamıştır. Örgü kompozit için 3. ve 4. Model kıyaslandığında, fiber optik telin numune içinde sonlanması %2 ek artış yarattığı görülmektedir. Ancak bu artış ciddi büyüklükte değildir. Tek yönlü kompozite fiber optik gömülü modellerde (1. ve 2. Model), hiçbir değişiklik olmamıştır. Sonuçta fiber optik telin numune içinde sonlanıp sonlanmaması belirgin bir fark yaratmamaktadır.

### **Fiber Optik Tele Uygulanan Çekme Yüğü Altında Tahliye Bölgesi Analizleri**

Tahliye bölgelerinde fiber optik tel savunmasız olup kolayca kırılılabildiğinden dolayı bu bölgelere korunma uygulanmalıdır [Pedrazzani, Klute, Gifford, Sang ve Froggatt 2012; Sorensen, 2006]. Bundan ötürü tahliye bölgesinde fiber optik telin uçtan yüklendiği sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Koruma amaçlı olarak bu bölgelerde fiber optik tel tipik olarak teflon tüplerle örtülerek korunabilmektedir. Teflon tüplerin ucuz olması, mekanik ve termal olarak dayanıklı olması ve fiber optik tele esneklik kazandırmasından ötürü tercih edilmektedir. Bu uygulamalarda teflon kullanmanın yanı sıra ısı büzüşmeli kablo tüpleri veya silikon emdirilmiş termoplastik örgü tüpler de kullanılabilir [Beukema, 2012]. Teflon tüplerin de eklendiği modeller oluşturulmuş ve teflonsuz modellerle karşılaştırılmıştır. Şekil 7'de bu analizler için oluşturulmuş dört farklı model özetlenmiştir.

Dört modelin ikisindeki fiberler ana modelde gösterildiği gibi, tek yönlü kompozitin arasına gömülmüştür. Bu iki modelden birincisinde (5. Model) teflon tüp bulunmamakta, ikincisinde (6. Model) teflon tüp bulunmaktadır. Aynı şekilde diğer iki modelde fiberler örgü kompozitlerin arasına gömülmüş olup ve birinde teflon tüp bulunmazken (7. Model) diğerinde bulunmaktadır (8. Model). Çizelge 3'de bu modellerin sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen hasar indisleri özetlenmiştir. Kritik olan fiber optik telin hasar indisleri, hem örgü kompozite hem de tek yönlü kompozite gömülme koşunda, teflon tüplerin eklenmesiyle çok düşük seviyelere inmiştir. Teflon tüplerin fiber optik telleri koruduğu görülmektedir.



Şekil 7: Fiber Optik Tel Tahliye Bölgesi Modelleri

Çizelge 3: Tahliye Bölgesi Hasar İndisi Sonuçları

Malzeme	5. Model	6. Model	7. Model	8. Model
Fiber Optik Tel	1.0000	0.0038	0.3638	0.0037
Örgü Kompozit	0.0017	0.0000	0.2127	0.0659
Tek Yönlü Kompozit	0.1335	0.0007	0.0106	0.0169
Film	0.0000	0.0000	0.0021	0.0032

Örgü kompozit hasar indisleri, 5. ve 6. modellerde oldukça düşük kalmaktadır. Bunun nedeni fiber optik tellerin uzak konumdan tahliye olmasıdır. 7. ve 8. modeller göz önüne alındığında ise teflon tüp örgü kompozit hasar indisi değerini düşürse de, en kritik malzeme örgü kompozit haline gelmektedir. Bu koşulda düşük hasar indislerine rağmen, daha yüksek bir kuvvette fiber kopmadan önce numunedeki örgü kompozit malzeme zarar görecektir. Bu malzemelerin havacılık uygulamalarında kullanıldığı göz önüne alındığında, fiber optik tel yerine numunenin hasar görmesi çok daha sakıncalıdır. Teflonsuz koşulda fiber optik telin savunmasız kalması ve teflonlu koşulda fiber yerine numunenin hasar görme olasılığından ötürü, örgü kompozite fiber gömülmesi sakıncalı görülmektedir. Öte yandan film üzerinde her koşulda ciddi bir hasar indisi değeri oluşmamıştır. Kritik olan fiber optik telin kırılma indisleri, her koşulda, teflon tüplerin eklenmesiyle çok düşük seviyelere inmiştir. Teflon tüplerin fiber optik telleri koruduğu görülmektedir. Sonuçta bu analizler sonucunda, teflon tüplerin fiber optik tele ciddi koruma sağladığı görülmüştür.

## SONUÇ

Yapılan çalışmalarda ilk olarak söz konusu yapı modeline farklı gömme senaryoları için çekme yükü uygulanmıştır. Modelin en kritik malzemesinin örgü kompozit olduğu görülmüş ve bu malzemeler arasına fiber optik telin gömülmesi bu kritik parçayı hasara daha açık hale getirmiştir. Bundan ötürü örgü kompozite fiber gömülmesi sakıncalı görülmektedir. Öte yandan tek yönlü kompozite fiber gömülmesinin ciddi bir sıkıntı yaratmadığı saptanmış ve böyle bir uygulama yapılmıştır.



Daha sonra tahliye bölgesine yoğunlaşmıştır. Çekme testi koşulunda tahliye bölgesinde yük birikmemiş ve dolayısıyla hiçbir gerilme yığılması görülmemiştir. Çekme testi sınır koşulları altında, tahliye bölgesinin mukavemetinin yeterli olduğu görülmektedir. Ancak tahliye bölgesindeki mukavemet zaafı, fiber optik tele dışarıdan uygulanan istenmeyen yükler sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bundan ötürü hassas olan fiber optik telin üstüne gelebilecek istenmeyen çekme yükleri ayrıca modellenmiş ve tahliye bölgesindeki etkileri incelenmiştir. Aynı yük altında teflon tüp takviyesiyle, hasar indislerinin oldukça aşağıya indiği de saptanmıştır. Bundan ötürü fiber optik tahliye bölgelerine koruyucu teflon tüplerin eklenmesinin gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.

Daha sonraki çalışmalarda, eğilme ve burulma yükleri altında oluşacak davranışların analizleri de yapılacaktır. Ayrıca, fiber optik tel çevresinde oluşacak reçine bakımından zengin bölgelerin modellenmesi ve reçine etkilerinin irdelenmesini içeren çalışmalar da amaçlanmaktadır.

### Teşekkür

Bu çalışma, DKTM projesi kapsamında TUSAŞ tarafından desteklenmektedir.

### Kaynaklar

- Antunes, P., Domingues, F., Granada, M. ve André, P., 2012. *Mechanical Properties of Optical Fibers*, INTECH Open Access Publisher, s.538-541.
- Balać, I., Milovančević, M., Uskoković, P. ve Aleksić, R., 2006. *Stress Field Analysis around Optical Fiber Embedded in Composite Laminae under Transverse Loading*, FME Transactions, Cilt 34, s. 53-56.
- Beukema, R. P., 2012. *Embedding Technologies of FBG Sensors in Composites: Technologies, Applications and Practical Use*, 6th European Workshop on Structural Health Monitoring, Dresden, Almanya, 3-6 Temmuz.
- Eaton, N.C., Drew, R.C. ve Geiger, H., 1995. *Finite Element Stress And Strain Analysis in Composites with Embedded Optical Fiber Sensors*. Smart Materials and Structures, Cilt 4(2), s.113-117.
- Green, A. K., Zaidman, M., Shafir, E., Tur, M. ve Gali, S., 2000. *Infrastructure development for incorporating fibre-optic sensors in composite materials*, Smart Materials and Structures, Cilt 9, s. 316-321.
- Karataş, C., Yaman, Y. ve Şahin, M., 2016. *Güçlendirilmiş bir Kompozit Kiriş Tasarımı*, VI. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Kocaeli, 28-30 Eylül.
- Lau, K., Yuan, L., Zhou, L., Wu, J. ve Woo, C., 2001. *Strain monitoring in FRP laminates and concrete beams using FBG sensors*, Composite Structures, Cilt 51, s. 9-20.
- Pedrazzani, J. P., Klute, S. M., Gifford, D. K., Sang, A. K. ve Froggatt, M. F, 2012. *Embedded and Surface Mounted Fiber Optic Sensors Detect Manufacturing Defects and Accumulated Damage as a Wind Turbine Blade is Cycled to Failure*, SAMPE Spring Technical Conference, Baltimore, MD, ABD, 21-24 Mayıs.
- Sorensen, L., 2006. *The Response of Embedded FBG Sensors to Nonuniform Strains in CFRP Composites during Processing and Delamination*, Master Tezi, Makine Müh. Böl, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Ugural A.C., Fenster, S. K., 2012, *Advanced Mechanics of Materials and Applied Elasticity (5<sup>th</sup> Edition)*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, ABD.