

Kompozit Malzemelerde Üretim Süreçlerinin Gözetimi İçin Fiber Optik Tabanlı Sensör Sistemi Tasarım ve Analizi

Design and Analysis of a Novel Fiber Optic Sensing System for Process Monitoring of Composite Materials

Anıl YILMAZ¹, Osman KARTAV², Kıvılcım YÜKSEL¹

1. Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,
2. Makina Mühendisliği Bölümü,
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (İYTE)
kivilcimyuksel@iyte.edu.tr

Özetçe —Kompozit malzemelerde imalat kalitesini arttırmak için, malzeme davranışının tüm üretim aşamalarında izlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla fiber optik sensörlerin kullanılması, özellikle de fiber Bragg ızgaraların (*Fiber Bragg Grating, FBG*) kompozit malzemelere yerleştirilmesi hızla yaygınlaşmaktadır. Bu bağlamda çalışmamızda, FBG tabanlı alternatif bir sensör sorgulama düzeneği tasarlanmış ve kompozit malzemelerin üretimi sırasında ortaya çıkan kalıcı (*residual*) streslerin tespit edilmesi yönündeki teorik analizleri tamamlanmıştır. Makale kapsamında ayrıca fiber takviyeli termoset kompozit malzemelere FBG sensörler yerleştirilerek üretim süreçlerinin gözetimi yönünde deneysel ön-hazırlıklar gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler—*Fiber Bragg ızgara, fiber optik sensörler, üretim süreçlerinin gözetimi, kompozit malzemeler.*

Abstract—It is essential to monitor the behavior of composite materials during manufacturing process to ensure the high quality of manufactured materials. For this purpose, the use of optical fiber sensing, particularly the embedding of fiber Bragg grating (FBG) sensors into composite materials has been gaining growing popularity. In this context, we design a FBG-based alternative sensor interrogation system and completed the theoretical analysis for the prospect of providing the residual stresses appearing during fabrication process of composite materials. It has been also realized, in this paper, the preliminary experimental trials by monitoring FBG sensors embedded into fiber reinforced thermo-set composites for the purpose of process monitoring.

Keywords—*Fiber Bragg grating, fiber optic sensors, process monitoring, composite material.*

I. GİRİŞ

Kompozit malzemelerin çeşitli yük taşıyıcı yapılarda (uçak kanatları, insansız hava araçları, rüzgar türbinleri, vb.) ve

endüstriyel uygulamalarda kullanımı, bu malzemenin sağladığı, hafiflik, darbe dayanımı, yüksek mukavemet, termal kararlılık, ve korozyon dayanımı gibi özellikleri sayesinde gün geçtikçe artmaktadır. Dünya çapında pek çok araştırma grubu kompozit yapılardaki mekanik yükleri izlemek ve olası hasarları erken tespit edebilmek amacıyla fiber optik sensör tabanlı ölçüm teknikleri geliştirmeye çalışmaktadır [1], [2]. Bu çalışmaların önemli bir bölümü ise kurlenme aşamasının izlenmesine yoğunlaşmıştır. Kompozitlerin üretim aşamalarında fiziksel ve termo-mekanik davranışının takibi ve proses koşullarının kontrol edilebilmesi, daha yüksek kalitede kompozit üretimini mümkün kılarak kompozitlerin daha yaygın ve maliyet-etkin bir şekilde kullanılabilmesinde kritik rol oynayacaktır. Kurlenme sırasında takviye malzemesi (elyaflar), yüzeylerinde yer alan nanometrik kalınlıktaki kaplamalar hariç, herhangi bir kimyasal ve fiziksel değişikliğe uğramadığı halde, matriks malzemesi molekülleri kurlenme sürecinde kimyasal (örn; epoksi ve sertleştirici moleküllerinin çapraz bağlanma reaksiyonu) ve fiziksel değişimlere tabi olmaktadır. Polimerin sıvıdan katı forma dönüşümü, ekzotermik reaksiyonlar sonucu ısı açığa çıkarmakta ve hacimsel değişimler oluşturmaktadır. Bu hacimsel değişiklikler, matris ile takviye malzemesi arasındaki mekanik ve kimyasal etkileşimler sonucunda malzemede gerilmeler ve kalıcı deformasyonlara neden olur. Meydana gelen bu kalıcı stresler, üretilen parça içerisinde lokal stres konsrasyon bölgelerinin oluşmasına, parçanın mukavemetinin zayıflamasına, mikro hasarların oluşmasına ve böylece erken gelişen hasara, yorulma ve yaşlanma performansının negatif yönde etkilenmesine sebebiyet verebilir [3].

Bu çalışmada, kompozit malzemelerin kurlenme aşamasında meydana gelen kalıcı streslerin izlenmesine yönelik özgün bir sistem tasarlanmış ve simülasyonlar yoluyla doğrulanmıştır. Önerilen sistemin pratikteki uygulamasına hazırlık niteliğindeki deneysel çalışmalar, Üniversitemiz bünyesindeki Kompozit Malzeme Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

II. TEORİ

A. Fiber Bragg Izgara Sensörlerin Işığın Polarizasyon Durumuna (State of Polarisation) Gösterdiği Spektrum Cevabı

Fiber Bragg ızgaralar, fiber optik çekirdek (*core*) kırılma indisinin kalıcı bir şekilde ve periyodik olarak değiştirilmesiyle elde edilir. Fiber çekirdek indisindeki bu modülasyon sonucu, aksi yönlerde ilerleyen iki mod arasında rezonans dalga boyu (Bragg dalgaboyu) çevresinde enerji aktarımı meydana gelir [4]. Bragg dalga boyu matematiksel olarak

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

ifadesi ile hesaplanabilir (n_{eff} fiber çekirdeğinin etkin kırılma indisi, Λ FBG kırılma indis değişiminin periyodudur). Izgaraya uygulanacak bazı fiziksel etkiler (sıcaklık, gerilme vb.) Bragg dalga boyunun değişimi ile gözlenebilir.

Fiber Bragg ızgaraların üretimi sırasında, mor ötesi (UV) lazere yalnızca bir yönden maruz kalmasından dolayı fiberin dairesel kesiti boyunca kırılma indisi sabit değildir. Kırılma indisindeki bu düzensizlik ışıkla indüklenen çiftkırılıma (*photo-induced birefringence*) neden olur ve fiberin halihazırda sahip olduğu (eliptik şekilden kaynaklanan) çiftkırılım ile birleşerek global çiftkırılımı oluşturur (Δn). Polarizasyona Bağlı Kayıp (*Polarisation Dependent Loss*, PDL), belli bir dalgaboyunda, bir optik cihazın girişine gelen ışık, olası bütün polarizasyon durumlarını taradığında, cihazın (burada FBG) çıkışında ölçülen minimum ve maksimum iletim kayıpları arasındaki oran olarak tanımlanır. Bilindiği gibi rastgele polarizasyon durumuna sahip ışık fiberde, x ve y yönlerinde polarize olmuş iki bileşene ayrılır. Fiberin çekirdeğine yazılmış FBG'nin PDL değeri de x ve y yönlerindeki iletim kayıplarının (T_x ve T_y) birbirine oranıdır. Dolayısıyla, FBG'nin herhangi bir dalgaboyundaki PDL değeri şu ifade ile hesaplanabilir [5]:

$$PDL(\lambda) = \left| 10 \log_{10} \frac{T_x(\lambda)}{T_y(\lambda)} \right| \quad (2)$$

Global çiftkırılım (Δn) ve n_{eff} değerleri kullanılarak, FBG'nin iki ayrı polarizasyon moduna ait kırılma indisleri (x ve y modları için sırasıyla)

$$n_{eff,x} = n_{eff} + \frac{\Delta n}{2} \quad (3)$$

$$n_{eff,y} = n_{eff} - \frac{\Delta n}{2} \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir. Δn hesaba katılacak olduğunda FBG'ye ait genlik spektrumu aslında x ve y modlarına ait genlik spektrumlarının bileşenidir. Fakat bu bileşenlerin (T_x ve T_y), konvansiyonel cihazlarla gözlenmesi dalgaboyu çözünürlüğünün yetersizliği nedeniyle ciddi pratik zorluklar içerir (standard tek modlu fibere yazılmış FBG için Δn , 10^{-5} ile 10^{-6} arasında değişir. T_x ve T_y arasındaki spektral fark bu durumda sadece birkaç pm değerindedir).

B. FBG sensör PDL spektrumunun enine gerilim cevabı

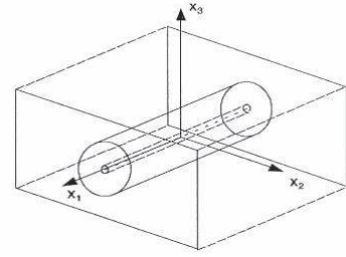
FBG üzerine boyuna gerilim (*axial strain*) etkidiğinde, genlik spektrumunda dalgaboyu kayması meydana getirir. Bu etkiyi ölçerek kompozit malzemelerdeki gerilim dağılımlarını tespit etmeye çalışmak literatürde ilk uygulanan yaklaşım olmuştur. Fakat FBG üzerinde boyuna gerilimin yanısıra enine gerilimler de mevcuttur. Enine gerilim FBG üzerine

etkidiğinde bölüm II.A'da açıklanan global çift kırılım etkisinin artmasını sağlar. Dolayısıyla genlik spektrumları (T_x ve T_y) birbirinden uzaklaşmaya başlar. Şekil 1'de görüldüğü gibi malzemeye entegre edilmiş standard tek modlu optik fiberin çekirdeğinde standard bir FBG yazılmış olsun. Fiber boyuna (ε_1) ve enine ($\varepsilon_2, \varepsilon_3$) gerilim altındayken, x - ve y - polarizasyon yönlerindeki Bragg dalgaboyları şu ifadelerle hesaplanabilir [6]: (p_{11} ve p_{12} optik-gerilim katsayıları)

$$\frac{\Delta \lambda_{Bx}}{\lambda_{Bx}} = \varepsilon_1 - \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{11}\varepsilon_2 + p_{12}(\varepsilon_1 + \varepsilon_3)] \quad (5)$$

$$\frac{\Delta \lambda_{By}}{\lambda_{By}} = \varepsilon_1 - \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{11}\varepsilon_3 + p_{12}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)] \quad (6)$$

Denklem 5 ve 6'dan anlaşılacağı üzere, radyal yönlerdeki ε_2 ve ε_3 arasındaki fark çift kırılıma, dolayısıyla λ_{Bx} ve λ_{By} arasında ayrılmaya neden olmaktadır.



Şekil 1: Malzemeye uygulanmış optik fiberin x_1, x_2, x_3 koordinat sistemindeki görüntüsü [6].

T_x ve T_y birbirinden tamamen ayrıldığında ise iki spektrum tepe değerleri arasındaki mesafeden çift kırılım değeri, dolayısıyla da FBG üzerine etkiyen enine gerilim değeri hesaplanabilir. Ne var ki, standard tek modlu fibere yazılmış FBG kullanıldığında, sözkonusu spektrum ayrışmasının gözlemlenebilmesi için malzemeye onlarca Newton değerinde kuvvet uygulanması gerekir [7]. Bu değer, residual stresleri tespit edebilmek için çok yüksek bir eşik değeridir. Bu nedenle literatürde residual streslerin ölçülmesi için çift kırılım etkisi daha fazla olan FBG tiplerinin kullanılması önerilmiştir (örneğin, polarizasyon sabitleyici fibere (*bow-tie*) yazılmış FBG veya yüksek çift kırılımlı fotonik kristal fibere (Hi-Bi PCF) yazılmış FBG) [8], [9]. Fakat bu tür FBG sensörler standard değildir, pahalıdır, üretimi ve uygulanması pratik zorluklar taşır (yöne bağımlılık, fiber eklerinin kontrollü olması gerekliliği, vb).

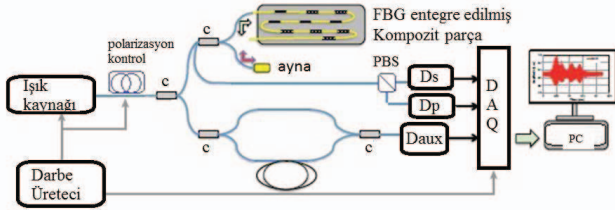
Caucheteur ve arkadaşları, PDL spektrum genliğini kullanarak çift kırılım değerinin hesaplandığı yenilikçi bir yaklaşım önermiş [7] ve bu fikri kalıcı gerilim ölçmek amacıyla uygulamışlardır [3]. PDL genliğini kullanarak, karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerde kurlenme sırasında oluşan ($0\mu\varepsilon$ 'den başlayıp 1400 $\mu\varepsilon$ kadar artan) enine gerilim farklarını ölçmüşler ve hassasiyeti 60 $\mu\varepsilon$ olarak raporlamışlardır. Literatürdeki bu ve benzeri çalışmalarda FBG sensörler ayrı fiberlere yazılmakta ve oldukça gelişmiş ve pahalı ticari cihazlar kullanılarak sorgulanmaktadır (*Optical Vector Analyser*). Bu tür bir yöntem, bir taraftan maliyetli, diğer taraftan ise test kuponunun her bir katmanından sadece tek bir gerilim değeri elde edilmesi nedeniyle (özellikle test edilecek parçanın boyutları gerçekçi şekilde arttırıldığında) malzeme kalitesini doğrulamakta yeterli değildir.

III. ÖNERİLEN YÖNTEM VE SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu çalışmada, Bölüm II.B'de anlatılan kısıtlara çözüm olarak alternatif bir sorgulama yöntemi önerilmektedir. Bu yöntem sayesinde aynı fibre yazılmış eşdeğer sensörlerin hem genlik hem de PDL spektrumları polarizasyona hassas frekans bölgesinde optik yansıtıcı (*Optical Frequency Domain Reflectometer, OFDR*) tabanlı sorgulayıcı ünite kullanılarak elde edilir. Önerilen yöntem sayesinde:

- standard, ucuz (*uniform*) ve birbirine eşdeğer FBG'ler kullanılır (üretim ve stoklama kolaylığı),
- aynı fibre yazılmış birden çok FBG, tek bir ölçümde (saniyeler mertebesinde) sorgulanabilir,
- tek ölçüm ile hem enine hem boyuna gerinim bilgisi tespit edilebilir.

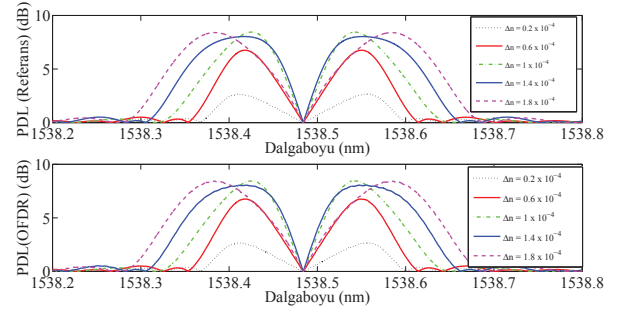
Şekil 2'de şematik olarak gösterilen sistemin çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir: lazer kaynağının çıkışındaki CW (sürekli dalga) sinyalin optik frekansı, hızlı (100 ms), mode-sıçramasız (*mode-hop free*) ve doğrusal bir şekilde modüle edilir. Modüle edilmiş optik sinyal, paralel olarak test ve yardımcı (*auxiliary*) interferometrelere gönderilir. Interferometre çıkışlarındaki optik sinyal, fotodetektörler ile elektriksel sinyale dönüştürülüp DAQ analog girişlerinden toplanır. Zamanın fonksiyonu olarak toplanan sinyal, frekans uzayına çevrilerek OFDR izi elde edilir. Yardımcı interferometrenin kullanım amacı, ışık kaynağının doğrusal olmayan optik frekans etkisinin test interferometre (FBG sensörlerin bağlı olduğu IF) çıkışındaki sinyalden arındırılmasıdır (bunun için OFDR izi ilave sinyal işleme aşamalarından geçirilir). Bu işlem, milimetrik uzaysal çözünürlük mertebelerine ulaşılmasını sağlar. Her bir OFDR izi için Polarizasyon Kontrol cihazı marifetiyle tüm polarizasyon durumları taranır. Bu sayede, x ve y modlarındaki genlik spektrumlarının tüm değerleri ölçülebilir ve her bir FBG için PDL spektrumu hesaplanır.



Şekil 2: Tasarlanan FBG sorgulayıcı ünitenin şematik gösterimi. PBS: Polarisation Beam Splitter, DAQ: Data Acquisition Card (Veri toplama kartı).

Önerilen sistemin tasarım parametreleri simülasyonlar yoluyla test edilmiştir. Art arda bağlanmış ve polarizasyona hassas OFDR ile sorgulanan fiber Bragg ızgaraların iletim, yansıma, ve PDL spektrumları simülasyonlar yoluyla analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları, fiber Bragg ızgarasının polarizasyon özelliklerinin P-OFDR tarafından sorgulanabilir olduğunu göstermiştir. P-OFDR izini modellerken transfer matris metodu ile *two beam interference* yaklaşımı incelenen probleme uyarlanmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları literatürdeki analitik hesaplamalar ile karşılaştırılmış, literatür ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 3'de (farklı FBG çift kırınım değerleri için) bu karşılaştırmalara bir örnek görülmektedir.

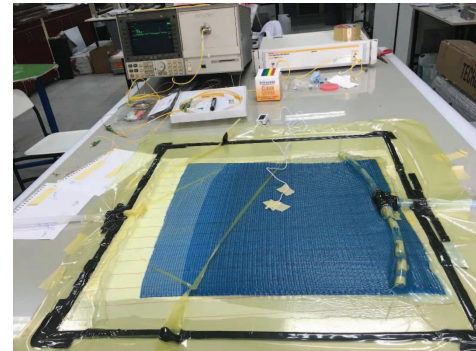
Simülasyonlarda şu parametreler kullanılmıştır: Lazer kaynağının doğrusal değiştirilen dalgaboyu aralığı, 1538 – 1539 nm; test IF boyu, 4 m; tek bir fibre yazılı FBG sayısı, 3; FBG boyu, 1cm; Λ , $530 \cdot 10^{-9}$; FBG index modülasyon değeri, $2 \cdot 10^{-5}$; FFT işleminde kullanılan nokta sayısı, 2^{14} .



Şekil 3: (a) Literatürdeki analitik hesaplamalar ile elde edilen PDL spektrumları [7] (b) modellediğimiz P-OFDR ile sorgulanarak elde edilen PDL spektrumları (5 farklı çift kırınım değeri için).

IV. DENEYSEL ÇALIŞMA

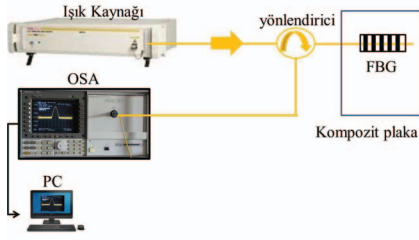
Deneysel çalışmalarda iki farklı elyaf çeşidiyle (karbon ve cam) mukavemetlendirilmiş epoksi polimer kompozit yapılar vakum infüzyon tekniği uygulanarak proses edilmiştir. Karbon (veya cam) fiber dokumalar bir kalıp yüzeyine tabakalandırılmıştır. 4 adet FBG sensör elyaf tabakaları arasına yerleştirilmiştir; vakum torbası ve vakum pompası kullanılarak vakum altına alınmıştır. Reçine enjeksiyonu aşamasında, sıvı reçinenin kalıp boşluğuna akışı ve parçayı doldurması sağlanmıştır (bakınız Şekil 4).



Şekil 4: Vakum infüzyon tekniği ve sensör sorgulama düzeneği (Kompozit Malzeme Üretim Laboratuvarı, İYTE Makine Mühendisliği Bölümü)

Tüm hacmin reçine tarafından doldurulmasından sonra, reçine polimerizasyonu (*curing*) gerçekleşmiştir (reçine/sertleştirici oranı: 80:20, *Momentive MGS LI60:H160*). FBG sensörlerin kompozit malzeme imalatı sırasında zarar görmemesi için optik fiberin kompozit tabaka kenarındaki bağlantı bölgesinde fiberi koruyucu plastik kılıflar ve fiberi destekleyici yardımcı aparatlar kullanılmıştır.

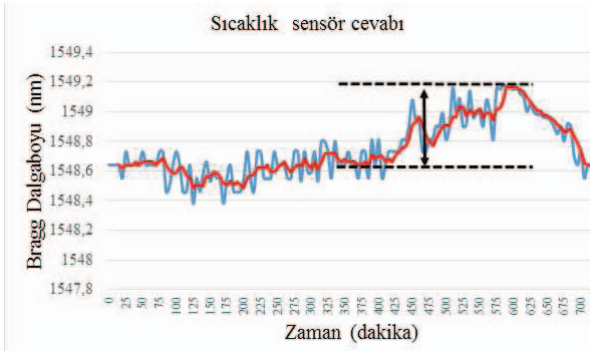
FBS sensörler, vakumlama, reçine enjeksiyonu ve kürlenme işlemleri boyunca Şekil 5’de görülen deney düzeneği yardımıyla sorgulanmıştır.



Şekil 5: FBG sorgulama deney düzeneği.

Bir adet FBG sensör, plaka içine yerleştirilirken, referans sıcaklık değerini ölçmek amacıyla, reçinenin oluşturacağı gerinimlerden etkilenmeyecek şekilde ince bir hermetik tüp içine yerleştirilmiş ve tüpün iki ucu kapatılmıştır. Şekil 6’da sıcaklık sensöründeki (OSA yardımıyla ölçülen) Bragg dalgaboyu değişimi, zamanın fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Yaklaşık 400 dakika sonra kürlenmenin başladığı tespit edilmiş ve 50°C ısınmaya karşılık gelen 500 pm değerinde bir dalgaboyu kayması ölçülmüştür. Malzeme boyutları, malzemenin çeşidi ve elyaf tabaka sayısı göz önüne alındığında bu ölçülen sıcaklık değeri gerçekçi bir değer olarak değerlendirilmiştir.

Kürlenme süreci tamamen sona erdiğinde ise sıcaklık sensörüne ait Bragg dalgaboyunun, kürlenme başlangıcındaki değerine geri döndüğü gözlenmiştir. Öte yandan gerinim sensörüne ait Bragg dalgaboyunun kürlenme başlangıç ve bitiş zamanlarında ölçülen değerleri arasındaki fark 200 pm olarak ölçülmüştür (yaklaşık 200 $\mu\epsilon$ değerindeki bir residual gerinime karşılık gelmektedir).



Şekil 6: Bragg dalgaboyunun zamanla değişimi (hermetik tüp içindeki sıcaklık sensörü için).

V. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada FBG sensörlerin polarizasyona hassas bir OFDR cihazı ile sorgulanması ve her bir FBG sensöre ait PDL spektrumunun elde edilmesini içeren yeni bir sensör sorgulama tekniği önce teorik olarak irdelenmiş ardından simülasyonlar yoluyla test edilmiştir. Yapılan modelleme çalışması sonucunda ise uygulamaya özel FBG parametrelerini (FBG uzunluğu, çift kırınım değeri vb) nümerik olarak tespit

etmeye yarayan bir platform oluşturulmuştur. Yapılan simülasyonlar, önerilen sensör sisteminin kompozit malzemelerin üretim süresince ortaya çıkan kalıcı streslerin tespit edilmesi yönünde kullanılabileceğini göstermektedir. Sistemin deneysel implamantasyonu sürecine geçilmeden önce, FBG sensörlerin kompozit malzemelere gömülmesi yönünde pratik anlamda tecrübeye ihtiyaç duyulmuş ve bu amaçla hazırlık niteliğinde deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Kompozitlerin geliştirilmesi, uzay ve havacılık başta olmak üzere, otomotiv, savunma ve enerji sanayi, robotik ve biyomedikal alanlarında ülkemiz teknolojik ilerlemesi için oldukça kritiktir. Kompozit yapılarında gelişen stress değişimlerinin, yapının davranışının ve sağlığının izlenebilmesi, kompozitlerin kırılma davranışının, mekanik, fiziksel, ve yaşlanma davranışlarının tahmin edilebilmesi yönünden kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada önerilen özgün FBG sensör sorgulama yönteminin hayata geçirilmesi, kompozit malzemelerin uygulandığı platformların; bakım sürelerinin azaltılması, işletim masraflarının azalması, daha yüksek güvenilirlik ve yeni tasarım yaklaşımlarının mümkün kılınması gibi nihai hedeflere ulaşmak için önemli bir adım olacaktır.

TEŞEKKÜR

Kompozit plaka üretiminde destek veren İYTE, Makina Mühendisliği, Kompozit Malzeme Laboratuvarı ekibine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] D. Wada, H. Murayama, H. Igawa, *Structural health monitoring by using fiber-optic distributed strain sensors with high spatial resolution*, *Photonic Sensors* **3**, 355-376 (2013).
- [2] D. Kinet, P. Megret, K.W. Goossen, D. Heider, and C. Caucheteur, *Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: challenges and solutions*, *Sensors* **14**, 7394-7419 (2014).
- [3] N. Lammens, D. Kinet, K. Chah, G. Luyckx, C. Caucheteur, J. Degrieck, and P. Mégret, *Residual strain monitoring of out-of-autoclave cured parts by use of polarization dependent loss measurements in embedded optical fiber Bragg gratings*, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **52**, 38-44 (2013).
- [4] Othonos and Kalli, *Fiber Bragg Grating Sensors in Fibre Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*, Artech House, Inc., (1999).
- [5] C. Caucheteur, S. Bette, R. Garcia-Olcina, M. Wuilpart, S. Sales, and P. Mégret, *Influence of the grating parameters on the polarization properties of fiber Bragg gratings*, *Journal of Lightwave Technology*, **27**, 8, (2009).
- [6] J.A.C. Guemes, J.M. Menendez, *Response of Bragg grating fiber-optic sensors when embedded in composite laminates*, *Composite science and technology* **62**, 959-966 (2002).
- [7] C. Caucheteur, S. Bette, R. Garcia-Olcina, M. Wuilpart, S. Sales, J. Capmany, and P. Megret, *Transverse strain measurements using the birefringence effect in fiber Bragg gratings*, *IEEE Photonics Technology Letters* **19**, (2007).
- [8] S. Sulejmani, C. Sonnenfeld, T.Geernaert, F. Berghmans, H.Thienpont, S. Eve, N.Lammens, G.Luyckx, E.Voet, J.Degrieck, W.Urbanczyk, P. Mergo, M. Becker, H.Bartelt, *Towards micro-structured optical fiber sensors for transverse strain sensing in smart composite materials*, *IEEE Sensors*, 10.1109/ICSENS.2011.6127305, 109-112 (2011).
- [9] D. Wada, H. Murayama, *Analytical investigation of response of birefringent fiber Bragg grating sensors in distributed monitoring system based on optical frequency domain reflectometry*, *Optics and Lasers in Engineering* **52**, 99-105 (2014).