

Raylı Sistemlerde Fiber Bragg Izgaralar ile Hareketli Objeye ve Hat Durumu Takibi

Moving Object and Track Line Monitoring with Fiber Bragg Gratings in Railway Systems

Serhat Boynukalin¹, Selçuk Parker², Ahmad Atieh³

¹İletişim Sistemleri
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İstanbul Teknik Üniversitesi
boynukalin@itu.edu.tr

²Elektrik Elektronik Fakültesi
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi,
spaker@itu.edu.tr

³Optiwave System Inc., Ottawa,
ON K2E 8A7, Canada,
ahmad.atieh@optiwave.com

Özetçe

Demiryolu taşımacılığında trenlerin takibi için farklı tip elektronik algılayıcılar (ray devreleri, dingil sayıcı ve aktif baliz) yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat bu sistemler elektromanyetik alanlardan ve çevresel faktörlerden etkilenebilmektedirler. Fiber optik algılayıcılar (FOS) ise birçok fonksiyonu tek sistem üzerinden sağlayabilmekte ve elektromanyetik dirençleri de oldukça iyi seviyededir. Ayrıca çevresel etkilere karşı tepkileri ise kategorize edilip tespit edilebilmektedir. Standart yöntemlerde olası her olayın tespitini yapmak (raylara taş düşmesi gibi vb.) mümkün değildir. Ancak FOS, tek bir sistemle hareketli nesnelerin konumunu uzun mesafelerden algılayabilmekle birlikte bu olayları hız ve boyutlarına göre gruplandırarak genel veya özel uyarılar üretilmesine yardımcı olabilecek potansiyele sahiptir. Raylı sistemler dikkate alınarak OptiSystem yazılımıyla tasarlanan algılama sistemi sayesinde hem tren takibi hem de süpürme treni görevinin çok kolay bir şekilde gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. Kaynak, modülatör seçimiyle hatta göre optimize edilmiş Fiber Bragg Izgara (FBG) tasarımı sayesinde optimum bir raylı sistem algılama yapısı bu çalışmada önerilmiştir.

Abstract

In railway transportation, various electronic sensors, such as track circuits, axle counters, and active balises, are commonly used to monitor train movements. However, these systems are susceptible to electromagnetic interference and environmental effects. In contrast, fiber optic sensors (FOS) offer the advantage of integrating multiple functions into a system while exhibiting strong resistance to electromagnetic interference.

Furthermore, their responses to environmental effects can be categorized and identified.

Traditional methods may not detect certain events effectively, such as objects falling onto the tracks. However, FOS has the potential to accurately detect the positions of moving objects over long distances using a unified system. Additionally, these sensors could generate general or specific alerts by categorizing incidents based on their speed and dimensions. Considering rail systems, a detection system designed using OptiSystem software demonstrates the feasibility of easily achieving train tracking and cleaning train tasks. The proposed approach suggests an optimized rail system detection structure achieved through modulator selection and a specifically designed fiber Bragg grating (FBG) tailored to rail system characteristics.

1. Giriş

Şehirlerarası demiryolu hatlarının kontrolü ve yönetimi çok zordur. Özellikle bakımlardan sonra sistemin herhangi bir arızası olmaması durumunda dahi işletmenin başlatılabilmesi için hattın kontrolünün yapılması gerekmektedir. Hattın kontrolünden sonra herhangi bir hata olmaması durumunda işletme güvenli bir şekilde başlayabilmektedir. Hatlarda hattın meşguliyeti genellikle boş bir aracın hat üzerinde hareket ettirilmesi veya bir çalışanın görsel olarak hattı incelemesinden sonra problem olmadığını iletmesi ile yapılabilmektedir. Raylı sistemlerde aktif olarak kullanılan ray devresi, dingil sayıcı veya aktif baliz sistemleri özellikle raylı sistemlere ait olmayan, doğal afetlerden, kaynaklanacak problemlerin algılanmasında çok pasif kalabilmektedir. Örnek olarak Çorlu'da meydana gelen tren kazası verilebilir. Hat bozulmalarının takibi ve

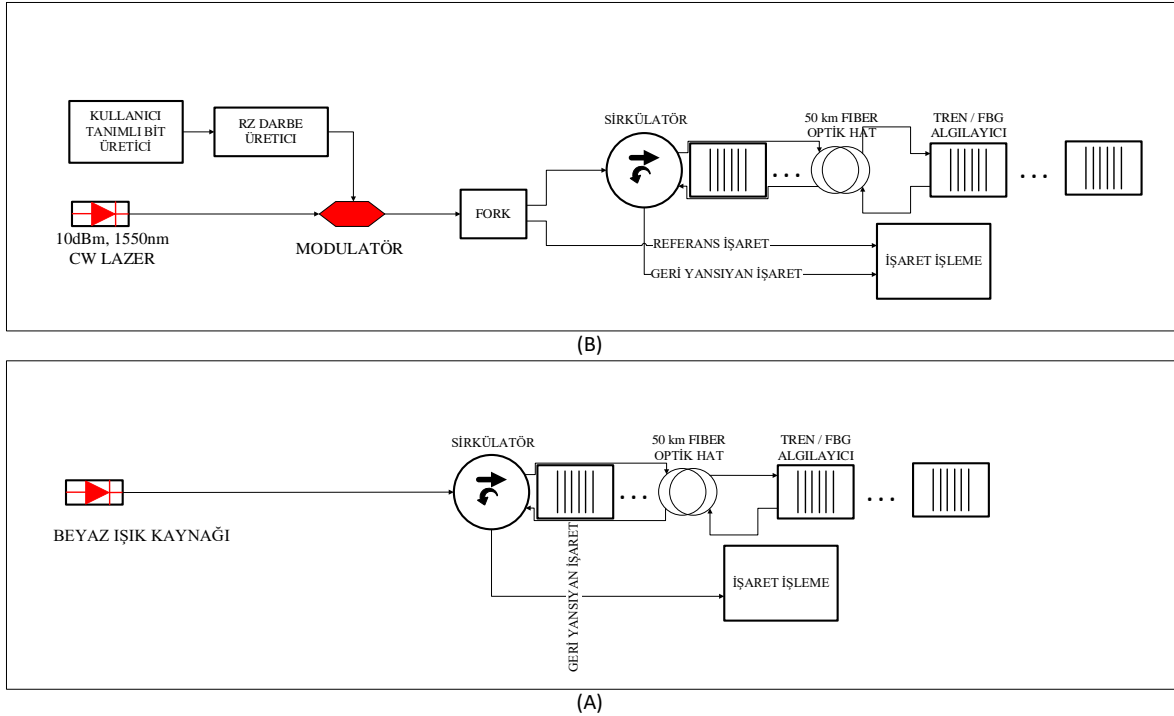
yönetimi eski tip sistemler ile tehlikeli ve hatalara açıktır olmaktadır [1-4].

FOS sistemlerinde uygun FBG tasarımı ve gelişmiş kodlama teknikleri sayesinde makalenin ilerleyen kısımlarında gösterileceği gibi anlık olarak hareketli objelerin ve hattın takibine olanak sağlamakta, ayrıca süpürme treninin yapacağı işlemi yapılabilmektedir. Fiber optik sistemlerinin diğer bir önemli avantajı ise elektromanyetik alanlara karşı olan dirençleridir [1].

FBG, fiber kılını içine direk üretim aşamasında veya haricen kıl kesilerek ara kısmına yerleştirilen, geçirdiği ve yansıttığı frekans aralığı ayarlanabilen bir algılayıcıdır. Hareketli objelerin oluşturacağı basınçtan kaynaklı fiziki hareket sonucunda yansıtma katsayısındaki değişim ile gelen işarette değişime neden olurlar. Genellikle tek modlu fiberlere entegre edilirler.

Fiziki hareketten dolayı geri yansıyan işaret çevresel etkilere (sıcaklık, gerilme, basınç vs.) duyarlıdır ve bunların kategorize edilebilmesine imkân vermektedir. Medikal, ulaştırma, hava araçları, petrol sahaları gibi birçok alanda uygulamaları bulunmaktadır [5].

Makalenin birinci bölümünde kaynak seçiminin nasıl yapıldığı, sonrasında da örnek sistem tasarımı ve bu tasarıma entegre edilen yeni bakış açısıyla birlikte geliştirilen yöntem ele alınacaktır. Ardından da geliştirilen yöntemin artıları ve eksilerine değinilip sonuç verilecektir. Şekil 1 (A) kodlama tekniği ile hattın takibi için kullanılacak genel tasarım şablonudur. Beşinci bölümde bu tasarımın detaylarına girilecektir.



Şekil 1. Genel modülatörlü FOS tasarımı (A), Genel Beyaz Işık kaynaklı FOS Tasarımı (B).

Şekil 1 (B) hatta gönderilen sabit bütün frekans bölgelerinde aynı genlikte olan işaretin FBG'lerden geri saçılan kısmının irdeleyen genel tasarım şablonudur.

2. Kaynak Seçimi

FBG bazlı sistem tasarlanırken ilk önce kaynak seçimi ile başlanmıştır. Burada amaç endüstriye hitap edebilecek gerçek bir sistem önerisi sunmak olduğu için mümkün mertebe maliyeti uygun olan en doğru parçalar tercih edilmiştir. Örnek olarak modülasyonlu ve kodlu sistem için piyasada kolaylıkla temin edilen basit bir 10-dBm lazer kaynak tercih edildi. İlgili geliştirmeler daha çok yazılımsal tarafta yapılarak sistemin verimliliği artırılmak istenmiştir. Tablo 1' de kullanılan OptiSystem programının genel parametreleri gösterilmiştir.

Tablo 1: OptiSystem programının genel parametreleri

Parametre Adı	Değeri	Birimi
Reference bit rate	1.00E+04	
Bit rate	1.00E+04	bit/s
Time window	0.0008	s
Sample rate	1.31E+09	Hz
Sequence length	8	bits
Samples per bit	131072	
Guard Bits	0	
Symbol rate	2000	symbols/s
Number of samples	1048576	
Reference wavelength	1550	nm
Refractive Index	1.467	
Speed of Light in Space	299.792	m/μs
Fiber length	50	km
Laser Power	10	dBm
Laser Frequency	1550	nm

3. Modülör seçimi

Şekil 1'e göre OptiSystem programı ile Tablo 1'deki parametrelere göre yapılan simülasyonlar sonucunda modülör seçimi sonuçları Tablo 2 de verilmiştir. Görüldüğü üzere en performanslı modülör "Dual-drive MZM" 'dir. En kötü performans ise "Direct Modulator" tarafından gösterilmiştir.

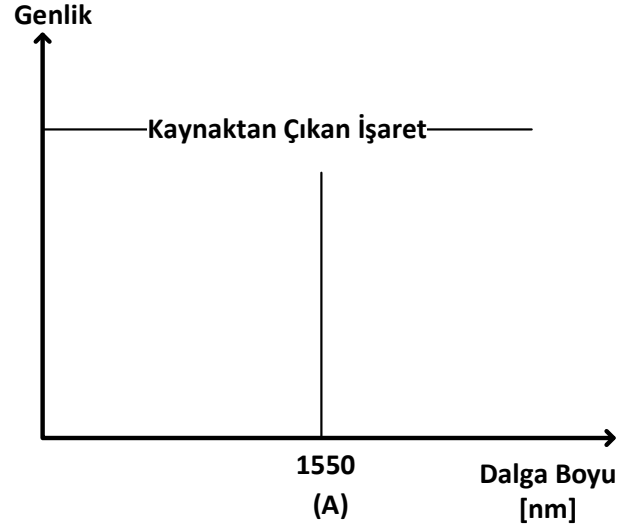
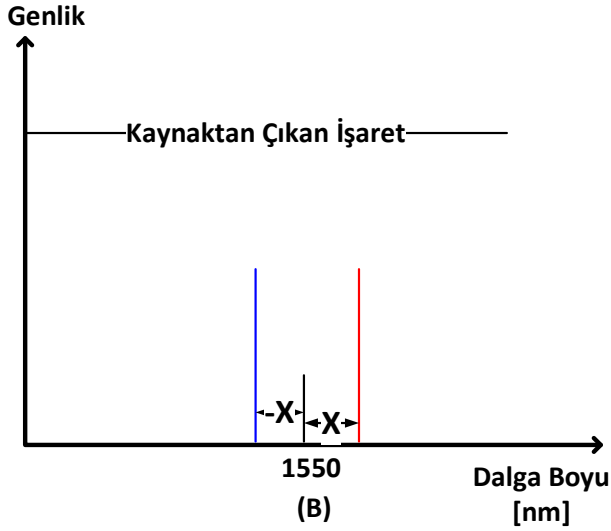
Tablo 2. Seçilen modülör tipine göre işaret kalitesinin incelendiği tablo, rastgelelik ekli.

No	Modülör Seçimi	Tx Max. Q Etkisi
1	MZ Modulator	546.52
2	Single Drive MZ Modulator Absorption-Phase	554.24
3	Dual Drive MZ Modulator-Phase	556.84
4	Amplitude Modulation	544.81
5	EA Modulator Measured	568.43
6	Dual Port MZ Modulator Measured	602.50
7	Dual Port Dual Drive MZ Modulator Absorption-Phase	551.92
8	Dual Drive MZ Modulator-Phase with QAM	3.27
9	Direct Modulator	544.82

No	Tx Signal Gücü [dBm]	Rx Max. Q Etkisi	Rx Sinyal Gücü [dBm]	Hata Miktarı [m], 50 km için
1	-22.85	2.98	-126.09	0.12
2	-12.84	2.43	-116.20	0.12
3	-12.27	2.78	-115.77	0.12
4	-22.86	3.11	-126.11	0.12
5	-22.86	3.45	-125.90	0.12
6	-20.21	0.00	-121.44	0.12
7	-15.72	1.00	-118.36	0.12
8	-17.40	0.00	-119.70	4.71
9	-24.94	0.00	-126.65	NA

4. İşaret Seviyesi ve Frekans Kaymasının Takibi

Şekil 2' deki tasarıma göre FBG algılayıcıları herhangi bir dış etkiye maruz kaldıklarında standart yansıtma bölgesinde bir kayma meydana gelmektedir. Şekil 2 (A) da görüldüğü gibi normalde 1550nm de tasarlanmış bir işaretin geri saçılımı yine 1550 nm' de olmaktadır fakat FBG algılayıcısına pozitif (kırmızı) veya negatif (mavi) bir basınç uygulandığında Şekil 2 (B) deki gibi geri saçılan işaretin enerjisinde ve frekansında kayma ve 1550nm bölgesinde geri yansıtma kısmında enerji azalması görülmektedir [1].



Şekil 2. FBG algılayıcısı işaret kayması.

5. Kodlama (PN-Code) yöntemi ile algılama

Bu yöntemin amacı özellikle GPS sistemlerinde kullanılan benzersiz kodlama tekniği sayesinde kendisi ile korelasyonu en yüksek genlik değerini veren kodun FOS uygulamalarına entegrasyonu ile konum saptamasının yapılmasıdır. Bu teknik sayesinde 50 km menzilde bir objenin hareketi yüksek gürültü altında kod

seviyelerinin 1, 2, 4, 8, 16, 16, 32, 64, 128 ve 256 bit olduğu durumda konum algılamada hata miktarı sırası ile 124, 86, 16, 4.5, 3.7, 0.35, 0.17, 0.05, 0.01 m şeklinde olmaktadır. Daha yüksek kodlama biti kullanımının çözünürlüğü ciddi oranda iyileştirdiği görülmekle birlikte kodun uzamasının ciddi miktarda işlemci gücü getirdiği de göz ardı edilmemelidir [1]. Kodlu işaretin bit sayısı arttıkça sistemde bulunan gürültüden de etkilenme

oranı çok ciddi şekilde azalmaktadır. 256-bit'lik kodda gürültü gücü işaretin çok üstünde olsa da işaret çapraz korelasyon sayesinde konum saptamada çok yüksek hassasiyet imkânı vermektedir [1].

6. Süpürme Treni Özelliği

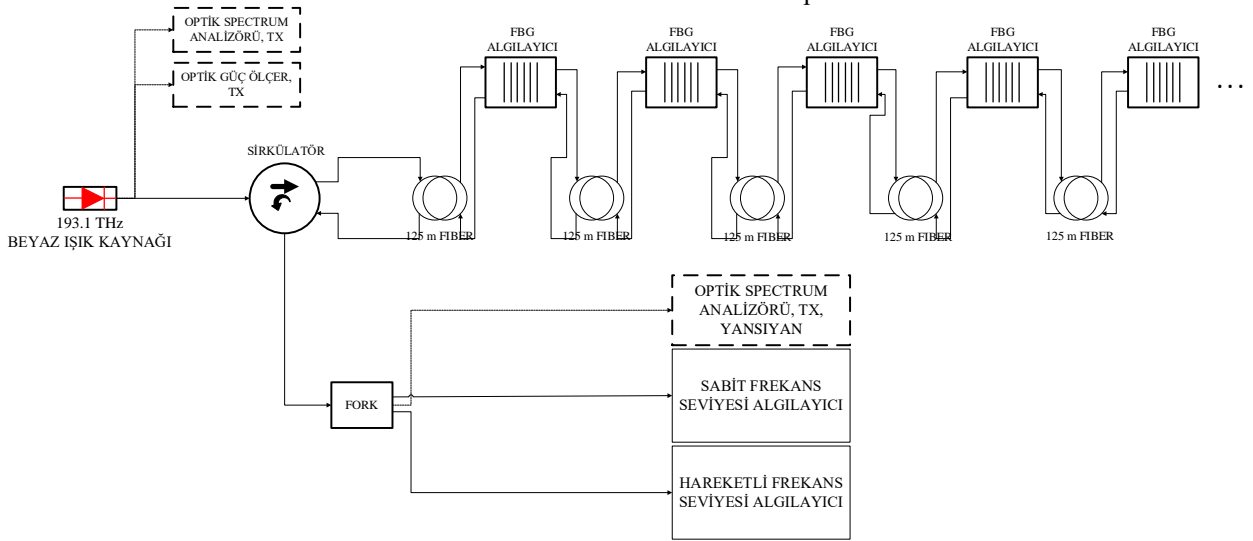
Raylı sistemlerde hatların sağlamlık ve işletmeye uygunluğunun test edilmesi için işletmeye açılmadan önce hatta boş bir süpürme treni gönderilerek güvenlik önlemi alınmaktadır. Burada amaç insanlı veya yük taşımacılığı yapılmadan önce güvenlik önlemi olarak hattın olması gereken fiziksel kondisyonda olduğunun ve varsa sinyalizasyon sisteminin beklendiği gibi çalıştığının (boş bir trenin hattan geçirilerek) ve hatta bir problem olup olmadığının teyit edilmesidir. Güvenlik açısından bakıldığında süpürme/kılavuz treni de tehlike altındadır. Şekil 3 de görülen kaza buna örnektir. Kılavuz tren altı boşalan hattan dolayı raydan çıkarak kaza yapmıştır.



Şekil 3. Yüksek Hızlı Tren (YHT) Ankara-Sivas hattında kılavuz lokomotifinin raydan çıkması, 2023.06

Tam da bu nokta özellikle hattın fiziki yapısında meydana gelen problemlerin hızlı şekilde tespiti noktasında FOS uygulamaları önemli bir yer tutabilir. İstenirse kritik bölgeler istenirse de belli aralıklar ile hattın tamamına yerleştirilebilecek FBG algılayıcıları sayesinde hattaki algılayıcıları işaret seviyelerinin takibi ile hattın durumu her bir işaret inceleme döngüsünde belirlenebilir.

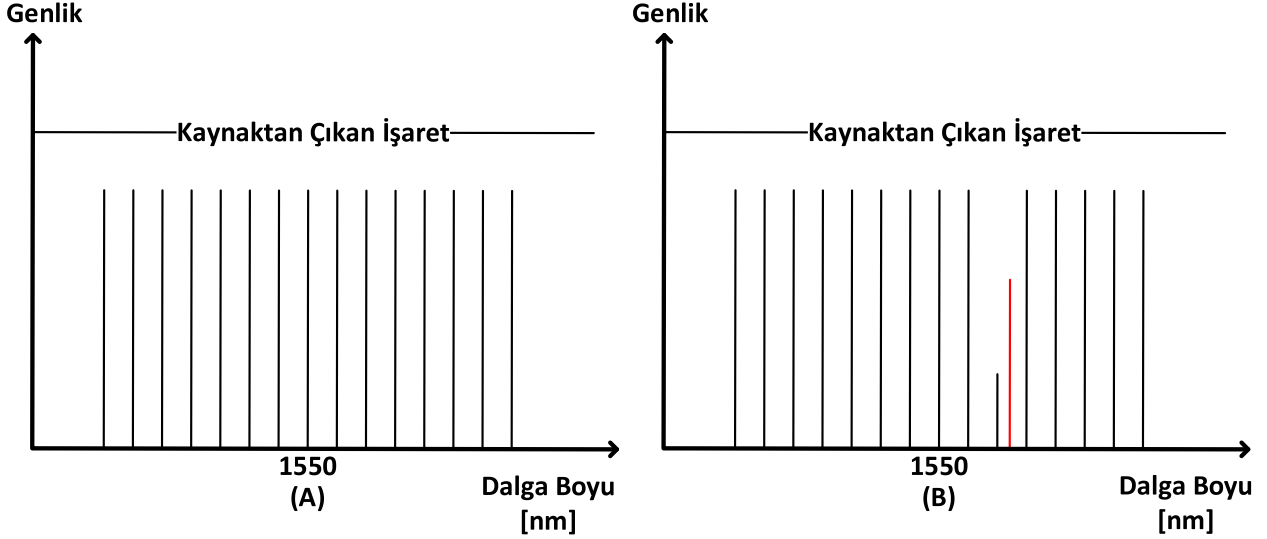
Şekil 4 de gösterilen ray hattının yakın noktasına yerleştirilen fiber hattı sayesinde hattın işaret seviyeleri sürekli olarak takip edilebilir. Bu sayede hatta meydana gelebilecek herhangi bir fizik değişim her bir sorgu zamanında tespit edilebilir.



Şekil 4. Örnek işaret takibi tasarımı.

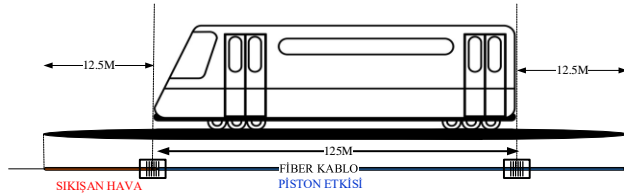
Şekil 5 (A) da işaret seviyesi kalibre edilmiş bir hattın durumu gösterilmektedir. Bu hatta Şekil 3'teki gibi bir problem meydana gelmesi durumunda Şekil 5 (B) deki gibi o bölgede olan FBG algılayıcısının geri yansiyacak işaretinde bir değişim meydana gelecektir [1,6]. Bu sabit

frekans noktaları taranırken olması gereken bir frekansta daha az güç olduğunun tespiti ile tetiklenecektir ve hareketli frekans tespiti ile de kayma ve kayma frekans genliği tespit edilerek gerçekleşen olayın şiddeti de algılanabilmektedir.



Şekil 5. FBG tasarımı genel işaret seviyesi (A) ve geri yansıyan işaretin incelenmesi (B).

Hatta meydana gelen bozulmalar Şekil 5'de tespit edilebildiği gibi aynı zamanda süpürme veya diğer trenlerin hareketleri de bu frekanslardaki kayma ile tespit edilebilir. Şekil 6'deki hareket eden bir süpürme treninin etki edeceği hat yapısı gösterilmektedir. Sağlam bir hatta trenin hareketi ile meydana gelecek geri yansımalar işaretin kayması trenin hızı ve yönü hakkında bilgi verir. Boş bir hatta hareket eden kılavuz treninin etkisi bu şekilde incelenebilir, geri yansımalarının seviyelerinin normalin dışında değişmesinin takibi ile olası gelecek problemlerin tespiti de yapılabilir.



Şekil 6. Süpürme treni

4. Sonuçlar

Hattın takibi raylı sistemlerde hayati kritik bir işlemdir. Bu açıdan hattın durum takibinin yapılmasında mümkün mertebe insan kaynaklı olabilecek hataları azaltmak veya sistemden tamamen kaldırmak yüksek oranda sistemin güvenliğini arttıracaktır. İşaret işleme için kullanılan çapraz korelasyon tekniğinin, kaynak işaretin kodlanarak bu sisteme entegre edilmesi sayesinde hareketli objelerin yüksek hassasiyette konumlarının tespiti yapılabilmektedir. Ayrıca hattın sürekliliğinin takibi ise özel tasarlanan FBG algılayıcısı sayesinde özel olarak seçilmiş frekanslardaki kaymalar takip edilerek ilgili noktada gerçekleşen olayın şiddeti ve yönü kestirilebilmektedir. Dolayısı ile önerilen sistem hareketli

objelerin yüksek hassasiyette konum tespitini, hareket yönünü ve hatta bulunan (normalde olmayan) bozulmaları hızlı şekilde takibi konusunda önemli katkılar sunmaktadır. Ayrıca uzun hatlarda araçların ve hattın takibi amacıyla hali hazırda kullanılan sistemler için her bir km başı maliyeti proje bazlı değişse de önerilen sisteme göre çok yüksek olmaktadır. Bununla birlikte doğal afetlere karşı da önlem sunamamaktadırlar. FOS sistemleri sadece hareketli objelerin değil aynı zamanda hattın durumunun da takibini sağlamasıyla kazaların önlenmesinde ve doğal afetlere karşı yüksek katkı sağlayabilirler.

Teşekkür

Makalenin hazırlanması için yazılım simülatörünü sağladığı için OptiWave firmasına teşekkür ederim.

Kaynakça

- [1] Boynukalin, S.; Paker, S.; Atieh, A. Investigation of Hybrid Remote Fiber Optic Sensing Solutions for Railway Applications. *Photonics* 2023, 10, 864. <https://doi.org/10.3390/photonics10080864>
- [2] K.S. P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems" pp. 57–58, Third Edition.
- [3] Arthur H. Hartog, "AN INTRODUCTION TO DISTRIBUTED OPTICAL FIBRE SENSORS", pp 6-38
- [4] M. S. Dzulkefly Zan, M. M. Elgaud and A. A. A. Bakar, "Coding the Optical Pulse in TDM-FBG Sensors with Hybrid Simplex-and Golay Codes for SNR Improvement," 2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), 2019, pp. 1-3, doi: 10.23919/PS.2019.8818010.
- [5] Kinet, D.; Mégret, P.; Goossen, K.W.; Qiu, L.; Heider, D.; Caucheteur, C. Fiber Bragg Grating Sensors toward Structural Health Monitoring in Composite Materials:

Challenges and Solutions. *Sensors* 2014, 14, 7394-7419.
<https://doi.org/10.3390/s140407394>

- [6] M. Werneck, R. Allil, B. Ribeiro and F. de Nazaré, “A Guide to Fiber Bragg Grating Sensors”, *Intec open science*: <http://dx.doi.org/10.5772/54682>, 2013.