

# FİBER OPTİK KABLolar İLE YENİ BİR HEYELAN İZLEME VE ERKEN UYARI SİSTEMİ KURULMASI ÇALIŞMALARI: LABORATUVAR DENEYLERİNDEN SAHA UYGULAMALARINA

## DEVELOPING A NOVEL LANDSLIDE MONITORING AND EARLY WARNING SYSTEM WITH FIBER OPTIC CABLES: FROM LABORATORY EXPERIMENTS TO FIELD APPLICATIONS

Mustafa K. KOÇKAR<sup>1</sup>, Cem DEMİR<sup>1</sup>, Yunus E. KAYA<sup>1</sup>, A. Enes ÖZŞİMŞİR<sup>1</sup>, A. Kaan KARABULUT<sup>1</sup>, Barış URAL<sup>1</sup>, Gökhan ŞAHİN<sup>1</sup>, Arzu ARSLAN KELAM<sup>1</sup>, Haluk AKGÜN<sup>2</sup>, Ahmet TEMİZ<sup>3</sup>

### ÖZET

Son yıllarda yıkıcı doğal afetlerden birisi olan heyelanlara dair farkındalık ve risk yönetimi kavramına verilen önem hızla artmakta ve afet risk yönetimi açısından erken uyarı sistemleri büyük ilgi görmektedir. Günümüzde heyelanların izlenmesinde kullanılan inklinometreler, tiltmetreler, ekstensometreler ve yersel yüzey ölçüm sistemleri (lidar, lazerli tarayıcı, elektro optik, total istasyon, vb.) gibi çeşitli uygulamalar mevcuttur. Ancak, bu sistemler meydana gelen deformasyonları belirlemek ve izlemek için kullanılmakta olduklarından, zamansal çözünürlükleri tekrarlanma sürelerine bağlıdır. Fiber optik sistemler ise hızlı veri aktarımı, hafiflik, çevresel dayanıklılık, sürekli ölçüm ve düşük maliyet gibi özellikleri ile öne çıkmakta ve erken uyarı sistemleri için ideal bir çözüm sunmaktadır. Bu çalışmanın amacı, litolojik özellikleri ve yenilme tiplerinden bağımsız olarak herhangi bir tetikleme mekanizması (aşırı yağış, deprem, beşeri faktörler, vb.) sonucu oluşan heyelan hareketlerini fiber optik kablolarla izleyerek güvenilir bir izleme ve erken uyarı sistemi geliştirilmesidir. Buna ilişkin olarak, öncelikle laboratuvar ölçeğinde kurulan bir heyelan simülatörü yardımıyla fiber optik kablolar üzerindeki hassasiyet etkileri belirlenmiş. Sonrasında elde edilen bu sonuçların Yalova'da aktif bir heyelan sahasında da gerçek zamanlı olarak uygulaması yapılarak yağış rejimi, yeraltı ve yüzey suyu durumu ve deprem etkilerinin izlenmesi ve erken uyarı sistemlerine adapte edilmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sahada sistemin hassasiyet etkileri, inklinometreler yardımıyla belirlenerek sonuçların güvenilirliği kontrol edilmektedir. Çalışmanın sonuçları, heyelan hareketlerinin deformasyon etkilerinin farklı bakış açılarından değerlendirilmesinde

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Çankaya, Ankara, Türkiye, mustafakockar@hacettepe.edu.tr (Sorumlu yazar), cemdemir@hacettepe.edu.tr, yunuskaya@hacettepe.edu.tr, abduallahenes@hacettepe.edu.tr, kaankarabulut@hacettepe.edu.tr, barisoral@hacettepe.edu.tr, gokhan.sahin@hacettepe.edu.tr, arslanarzu2012@gmail.com

<sup>2</sup> Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ), Ankara, Türkiye, hakgun@metu.edu.tr

<sup>3</sup> İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi, Ankara, Türkiye, ahmet.temiz@afad.gov.tr

kullanılarak, ülkemizde depremde etkileneceği düşünülen heyelanlı alanlarda izleme ve erken uyarı sistemi olarak kullanılması, buna benzer çalışmaların ülkemizde yaygınlaşması ve heyelan izleme istasyonlarının kurulmasına öncülük etmesi beklenmektedir.

*Anahtar Kelimeler: Heyelan izleme sistemi, Fiber optik, Erken uyarı sistemi, Yalova*

## ABSTRACT

In recent years, the importance given to awareness and risk management concepts concerning landslides, one of the most destructive natural disasters, has been rapidly increasing, and early warning systems have received significant attention in disaster risk management. Various applications, including inclinometers, tiltmeters, extensometers, and terrestrial surface measurement tools (such as LiDAR, laser scanners, electro-optical devices, and total stations), are currently used to monitor landslides. These applications, designed to detect and monitor deformations, have a temporal resolution limited by the intervals between measurements. In contrast, fiber optic systems offer advantages such as rapid data transmission, lightweight design, environmental durability, continuous monitoring, and low cost, *providing an optimal solution for early warning systems*. This study aims to develop a reliable monitoring and early warning system by utilizing fiber optic cables to observe landslide movements triggered by various mechanisms, such as heavy rainfall, earthquakes, or human activities, independent of lithological characteristics or failure types. Initially, a laboratory-scale landslide simulator was employed to investigate the sensitivity of the fiber optic cables. Subsequently, to test the consistency of the findings obtained from the laboratory setting in real-time field conditions, an active landslide site located in the Yalova district was selected for application, where the rainfall regime, groundwater fluctuations, surface water conditions, and seismic effects were monitored and integrated into the early warning system. The sensitivity of the system in the field is currently being assessed using inclinometer measurements, and the reliability of the results is being continually validated. The results of the study are expected to contribute to the evaluation of the deformation effects on landslide movements from various perspectives, and the system has the potential to be implemented as a monitoring and early warning tool in landslide-prone areas of the country, particularly those at risk from earthquakes. The research is also expected to contribute to the broader adoption of similar research in our country and promote the establishment of landslide monitoring stations.

*Keywords: Landslide monitoring system, Fiber optic, Early warning system, Yalova*

## 1. GİRİŞ

Heyelanlar, dünya genelinde ve Türkiye’de en az deprem ve sel gibi diğer doğal afetler kadar önemli bir afet türü olarak karşımıza çıkmaktadır (Gökçe ve diğ., 2008; Okalp ve Akgün, 2016). Zeminlerin duraylılığını kaybetmesine neden olan temel faktörler arasında jeomorfolojik özellikler, yağış rejimi, yeraltı suyu seviyesi, yüzey suyu değişkenliği, günlük sıcaklık farkları, kar erimesi ve depremlerle tetiklenen sismik aktiviteler yer almaktadır. Türkiye’deki heyelanlar ve etkileri göz önüne alındığında, bu sebeplerle oluşan deformasyonların izlenmesinin can ve mal kaybını minimum seviyeye indireceğini söylemek mümkündür.



Günümüzde kullanılan farklı yöntemler olmakla birlikte fiber optik sistemler, yüksek hassasiyetli veri aktarımı, deformasyon ve sıcaklık değişimlerine duyarlılık, çevresel ve elektromanyetik etkilere karşı direnç, düşük maliyet ve eş zamanlı izleme yeteneği gibi özellikleri sayesinde heyelan izleme çalışmalarında avantajlı bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır (Wang ve diğ., 2009; Gupta, 2012). Ancak Türkiye’de bu teknolojinin heyelan izleme ve erken uyarı sistemlerinde kullanımı henüz yaygın değildir ve genellikle veri aktarımı amacıyla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, beşeri koşullara bağlı olarak heyelanların izlenmesi için fiber optik sistemlerin kullanıldığı bir erken uyarı sistemi geliştirilmiştir. Kullanılan fiber optik sistem; fiber optik kablolar ve hem lazer ışık kaynağı hem de alıcı olarak görev yapan bir ölçüm cihazı olan BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analyzer)’dan oluşmaktadır. Sistem, fiber optik kabloda heyelan hareketi sebebiyle oluşan birim deformasyonunu gerinim cinsinden ölçen bir izleme düzeneğidir. Bu düzenek yardımıyla fiber optik kablolarla ölçülen gerinim (strain) miktarı kütle hareketi ile ilişkilendirilmektedir (Arslan Kalam ve diğ., 2016, 2021; Koçkar ve diğ., 2023, 2024).

Yalova ili, Türkiye’nin aktif deprem bölgelerinden biri olup, bu bölgedeki heyelanların depremlere karşı hassasiyetleri yüksektir. Bu nedenle Yalova, çalışma için pilot bölge olarak seçilmiş ve izleme çalışmaları yapılması planlanmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle laboratuvar ortamında geliştirilen dinamik heyelan simülatörü ile sarsma tablası kullanılarak çeşitli hassasiyet deneyleri yapılmış ve fiber optik kabloların deformasyon hassasiyetleri belirlenmiştir (Demir ve diğ., 2023; Koçkar ve diğ., 2023). Bu deneylerin ardından, sahada geoteknik karakterizasyon çalışmaları yapılarak, fiber optik kablolar uygun konfigürasyonlarla heyelan sahasına yerleştirilmiş ve sistemin güvenilirliği test edilmiştir (Arslan Kalam ve diğ., 2023 2024; Kaya, 2024; Koçkar ve diğ., 2024).

## 2. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Sahada heyelanlar üzerinde uygulanması öncesi farklı fiber optik kabloların deformasyonu tespit etme hassasiyetinin ve sahadaki deformasyonlara bağlı olarak uyumlu olup olmadığının laboratuvar ölçeğinde test edilmesi gerekmektedir. Farklı hız ve genlik parametrelerinde oluşturulan tekrarlı sismik yüklerin, heyelanın yenilme yüzeyindeki yer değiştirme hareketine bağlı olarak kablolar üzerindeki etkisini ölçmek amacıyla laboratuvar ölçeğinde bir sarsma tablası kurulmuştur. Sarsma tablası üzerine inşa edilen heyelan havuzunun boyutları, sarsma anında oluşacak sönümlenme hareketleri ve düzlem birim şekil değiştirme koşulları göz önüne alınarak belirlenmiştir. Sarsma tablası üzerine yerleştirilen 2 x 0.5 x 0.8 m boyutlarında, şeffaf pleksiglas malzemeden yapılmış bu heyelan havuzu, farklı yönlerde yatay ivmelerin test edilmesine olanak sağlayacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 1)



Şekil 1. Sarsma tablası ve heyelan havuzunun kurulum aşamasındaki görünümü



Heyelan simülatörü ile yapılan tekrarlı testler ile farklı yönde yatay ivmeler ve farklı frekanslarındaki dinamik deprem parametrelerinin eğimli heyelan zemin modeli üzerinde uyguladığı dinamik kuvvetler sayesinde heyelan havuzunda kayan kütlelerin hızlanmasına veya yer değiştirmesine dayalı olarak hareketini etkileyebilecek zemin davranış özelliklerinin belirlenmesi sağlanmıştır. Fiber optik sistem ile ölçümlenen deformasyon miktarlarının kontrolü ve doğrulanması için deneyler sırasında yer değiştirme ölçen LVDT'lerle kayan kütlelerin dinamik davranış tepkilerine bağlı olarak kayma düzlemindeki maksimum deformasyon elde edilmiş ve yer değiştirme tepkileri ölçümlenmiştir.

Kullanılan sistemde fiber optik kablonun yer değiştirmesi sonucunda oluşan gerinimleri kaydeden ve uzun mesafelerde sürekli ölçüm alabilme yeteneğine sahip olan BOTDA veri kayıtcısı, fiber optik kablolarla meydana gelen gerinim veya sıcaklık değişimlerini, frekanslardaki değişiklikler üzerinden hassas bir şekilde ölçebilen bir sistemdir. Bu sistem, zıt yönlerden gelen lazerler ile fiber optik kablonun Brillouin frekansını kullanarak ölçüm yapar ve belirli noktalarda pik (tepe) noktaları oluşturarak fiber üzerindeki mikro-gerinim değişimlerini belirler. Laboratuvar çalışmaları Şekil 2 'de plan görüntüsü verilen düzenek ile başlamış ve 2 mm, 3 mm ve 4.5 mm çapındaki tek modlu fiber optik kablolar başta olmak üzere farklı kabloların hassasiyet analizleri yapılmıştır. Fiber optik kablonun her bölgesi farklı bir LVDT ile eşleştirilerek şev yüzeyi 4 farklı sensör bölgesine bölünmüştür.



Şekil 2. Heyelan simülatörü deney düzenekinin plan görüntüsü

Sarsma tablası sadece bir ekseninde 2 yöne de hareket edebilmektedir. Oluşturulan yapay heyelanda laboratuvar şartlarında iki yönlü yüksek ivmeli hareket yapıldığında LVDT'lerin başarılı bir şekilde çalışmadığı saptanmıştır. Buna karşılık tek yönde gelişen kütle hareketine hem fiber optik kablolar hem de LVDT'ler hassas bir şekilde yanıt vermekte olup, oluşturulmaya çalışılan gerinim ( $\mu\epsilon$ ) – deformasyon (mm) ilişkisi için daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Bu nedenle, sarsma tablası sadece tek yönlü konfigürasyonda çalıştırılmış; deplasman ve hız parametreleri, toplamda dokuz ardışık test ile kademeli olarak artırılmıştır. Bu testler, heyelan düzenekinde oluşacak deformasyonların zaman içerisinde kontrollü bir şekilde gelişebilmesi ve gözlemlerin detaylı olarak yapılabilmesi amacıyla kurgulanmıştır (Demir, 2023).

LVDT'ler ile laboratuvar çalışmaları tamamlandıktan sonra heyelan izleme sisteminin bir diğer ayağı olan laboratuvar ölçekli görüntü işleme çalışmalarına başlanmış, kurulan düzenekteki heyelan kütle hareketinin yüksek çözünürlüklü aksiyon kamerasıyla takip edilmesi ve alınan görüntülerin bilgisayar kodları aracılığıyla işlenerek deformasyonların tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede fiber optik kablolar ile elde edilen



deformasyonların ve hassasiyet analizlerinin kontrol edilmesi hedeflenmiştir (Özşimşir, 2024). Mevcut kurulumda, yüzey deformasyonları görüntü kayıtları ile belirlenebilmektedir. Elde edilen verilerin doğruluğunu kontrol etmek veya aralarındaki ilişkiyi incelemek için farklı ölçüm yöntemleri ile doğrulama yapılması gerekmektedir. Bu nedenle deney düzeneğine iki adet eğim ölçer sensörü yerleştirilmiştir. Sensörlerin kablo bağlantıları ve heyelan konteynerindeki yerleşimi Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Eğim borusunun sensör kablo bağlantıları ve sarsma tablası içindeki yerleşimi

Görüntü işleme çalışmalarında, her bir pikselin RGB değeri kullanılarak hareket tespiti yapılmıştır. Bu aşamada görüntü üzerinde referans olarak kabul edilecek bir nesneye ihtiyaç duyulmuştur. Bu kapsamda heyelan konteyneri üzerindeki eğim sensörlerinin üst kısmına yerleştirilmek üzere 5 x 5 cm boyutlarında bir takip plakası tasarlanmış ve deney düzeneğinde kum üzerinde belirgin bir referans bölge oluşturulmuştur. Görüntü işleme çalışmaları kapsamında kamera kayıtları ile elde edilen verilerin analizi için. video kaydını temel olarak üç aşamalı bir süreçten geçiren (fotoğrafın karelere bölünmesi, gri tonlamalı versiyon dönüşümü, takip plakasının konumunun belirlenmesi-filtreleme) bir Python kodu yazılmıştır. Görüntü işleme ile elde edilen veriler eğim sensörü ile karşılaştırılarak ölçümler arasındaki tutarlılık incelenmiştir. Veri analizi sürecinde iki farklı yöntem ile yapılan ölçümler bir veri setini oluşturmaktadır ve son aşamada tüm ölçümler tek grafik üzerinde karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Örnek veri setine ait karşılaştırmalı sonuçlar

Görüntü işleme ve eğim sensörlerinden elde edilen sonuçların genel olarak tutarlı olduğu görülmüştür. Bu iki ölçüm yöntemi arasındaki küçük farklılıkların başlıca nedenlerinden biri, eğim borusunun dönmeye devam etmesiyle plakanın da dönmesi ve dolayısıyla görüntüde daha az hareketin meydana gelmesidir. Eğim sensörü çok küçük birimlerle çalışmaya



uygundur ancak görüntü işlemede hassasiyeti artırmak için piksel sayısının artırılması gerekir. Daha yüksek çözünürlük, daha büyük bir dosya boyutu ve kod üzerinde daha uzun işlem süresi anlamına gelir. Bu nedenle gereksinimler doğru analiz edilmeli ve buna bağlı olarak çözünürlük seçimi yapılmalıdır.

### 3. SAHA ÇALIŞMALARI

Laboratuvar çalışmalarının tamamlanmasının ardından, saha çalışmalarına, Yalova'da aktif bir heyelan bölgesinde başlanmıştır. Çalışma sahasının yükseklik modelini elde etmek amacıyla insansız hava aracı kullanılarak görüntüler toplanmış ve Sayısal Yükseklik Modeli oluşturulmuştur. Arazi çalışmalarında proje ekibi tarafından riskli olduğu tespit edilen şevde statik ve dinamik koşullarda Limit Denge Analizleri (LEM) uygulanmıştır. Bu bölgenin riskli olarak değerlendirilmesinde şevin arka kısmında yer alan 4 katlı binanın varlığı da etkili olmuştur. Daha önceden elde edilen sondaj verilerine göre zemin profilinin ilk 7 metresindeki "Katı kil" tabakasının birim hacim ağırlığı  $13.80 \text{ kN/m}^3$ , kohezyonu  $76.61 \text{ kPa}$  ve sürtünme açısı  $6^\circ$ 'dir. Bu atabakanın altında bulunan "Çok Katıl Kil" tabakasının ise birim hacim ağırlığı  $19.13 \text{ kN/m}^3$ , kohezyonu  $229.13 \text{ kPa}$  ve sürtünme açısı  $9^\circ$ 'dir. TBDY (2018) dikkate alınarak, dinamik yükler altında yapılan LEM analizine göre, zemin stabilitesi değerlendirilmiştir. Analizler seçilen bölgenin statik koşullarda sınır dengeye yakın ( $FS = 1.32$ ) ve dinamik deprem yükleri altında ise güvenlik katsayısının kritik seviyede olduğunu belirlenmiştir ( $FS = 0.93$ ). Bu durum, şevin stabilitesinin düşük olduğunu göstermiştir. İzleme sistemiyle bu alanda çalışmalara başlanmıştır. İzleme sisteminin sahada uygulanmasında ilk olarak heyelan hareketine ilişkin deformasyonların yoğun olduğu tespit edilen bu lokasyonda fiber optik kablolar sahaya yüzeye yakın bir şekilde yerleştirilmiş, BOTDA ölçüm sistemiyle eş zamanlı deformasyon ölçümlerinin alınmasına ve izleme çalışmalarına başlanmıştır. Daha sonra ise alanda deformasyonların fiber optik kablolarla derinde izlenmesi sondaj kuyusu açılması çalışmaları tamamlanmıştır.

#### 3.1. Sığ Derinlik Fiber Optik Çalışmalar

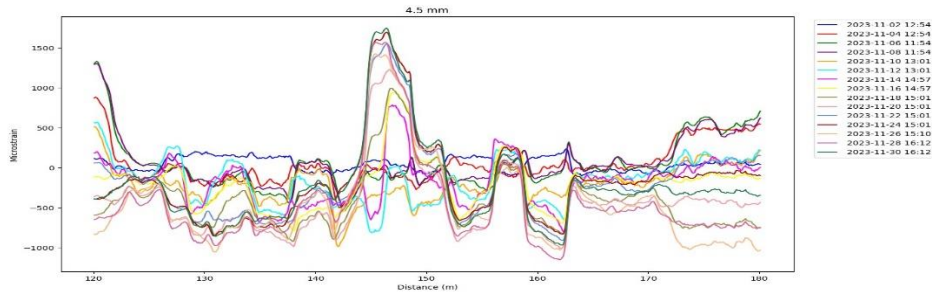
Saha çalışmalarında, daha önce laboratuvar test edilen ve gerininin ölçülmesinde hassas olduğu tespit edilen  $3 \text{ mm}$  çapında tek modlu bir kablo ile çevresel faktörlere karşı daha yüksek direnç sunan  $4.5 \text{ mm}$  çapında kablolar kullanılmıştır. İlk olarak, çalışma sahasına fiber optik kablolar ızgara şeklinde ve düşey bir konfigürasyonla yüzeye yakın bir şekilde yerleştirilmiş ve kabloların gergin durmasını sağlamak amacıyla sabitleme çubukları kullanılmıştır. Farklı yönlerden ölçüm alınmasına imkan veren yüzeye yakın konfigürasyonlar, ayrıca fiber kablonun ulaşılabilir olmasına ve yaşanabilecek olumsuz durumlarda kablolarla hızlı bir şekilde müdahale edilmesine de olanak sağlamıştır (Şekil 5).



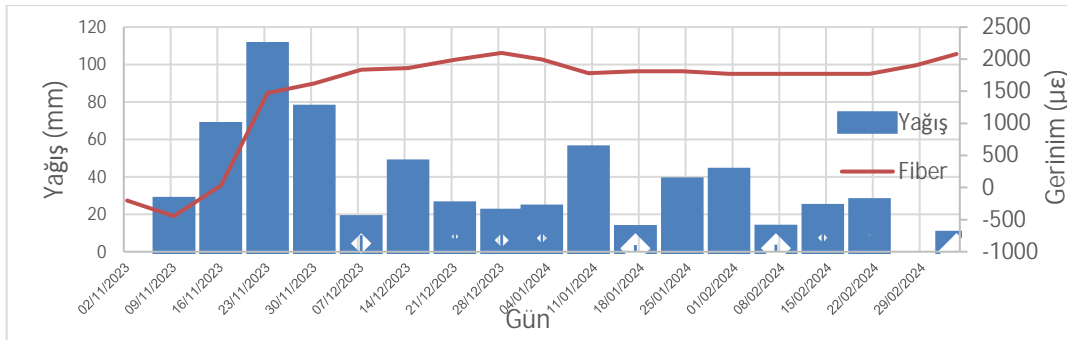


Şekil 5. Fiber optik kablo serilim adımları, sabitleme çubukları ve kablo konfigürasyonu

Fiber optik kablo seriliminin tamamlanmasından sonra sistem iki hafta süreyle test edilmiş ve sürekli izleme çalışmalarına başlanmıştır. Kasım 2023 ile Mayıs 2024 tarihleri arasında kesintisiz olarak veri almıştır. Öncelikle heyelan sahasındaki konfigürasyonun en hassas noktaları belirlenmiştir. Şekil 6'da görüldüğü üzere, 4.5 mm kablonun 146. metresine denk gelen kısım, heyelan sahasının en hassas noktası olarak görünmektedir ve bu kısım "Hassas Nokta 3" olarak adlandırılmıştır. İzleme süreci boyunca elde edilen mikro-gerinim verileri, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden (MGM) sağlanan yağış verileri ile karşılaştırılmış ve yağışların arttığı zaman aralıklarında fiber kablolardaki mikro-gerinim değerlerinin arttığı görülmüştür. 4.5 mm çaplı fiber optik kablodan elde edilen veriler, 2023 yılı Kasım ve Aralık aylarında yağışların artmasıyla birlikte yaklaşık 2000  $\mu\epsilon$ 'lik (mikro-gerinim) bir artış göstermiştir (Şekil 7).



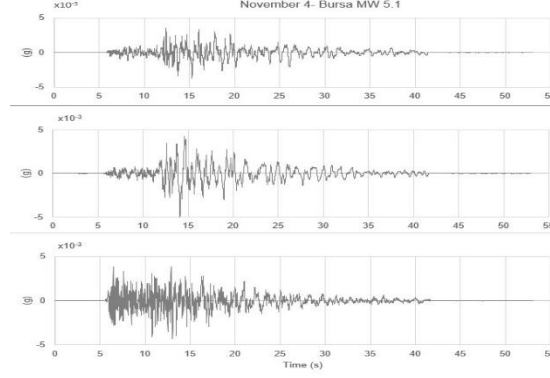
Şekil 6. Kasım ayı 4.5 mm çaplı fiber optik kablo ile ölçümlenen gerinim değişimi



Şekil 7. Hassas Nokta 3 için 4.5 mm çaplı kablodaki haftalık Gerinim ( $\mu\epsilon$ )- Yağış Grafiği

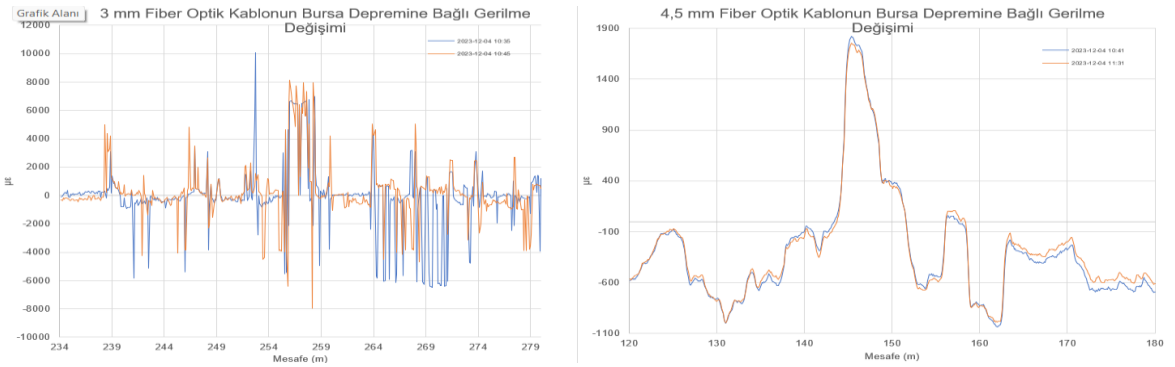


Çalışmanın bir diğer önemli amacı, heyelan sahalarında fiber optik kabloların deprem anındaki izleme performansını değerlendirmek ve sismik aktivitenin heyelan hareketine etkisini ortaya koymaktır. Fiber optik sistemle yapılan izleme çalışmaları süresince, yüksek sismik aktiviteye sahip Yalova ilini etkileyen  $M_W=5.1$  büyüklüğündeki Bursa Depremi'ne ait ivme-zaman grafiği örnek olarak Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 8.  $M_W=5.1$  Bursa Depremi ivme Zaman Grafiği (sırasıyla D-B, K-G, ve Düşey)

Şekil 9 her iki kablodaki depreme bağlı mikro-gerinim değişimlerini göstermektedir. Söz konusu depremin en yüksek yer ivmesi (PGA)  $4.98 \times 10^{-3} g$  olarak ölçülmüştür. 3 mm çaplı fiber optik kablo, kablonun 255.80 m'sinde maksimum değişim göstermiş olup, bu noktada gerinim değişimi  $11040.31 \mu\epsilon$  olarak tespit edilmiştir. Kablo boyunca ortalama  $1232.27 \mu\epsilon$  değişim gözlemlenmiştir. 4.5 mm çaplı fiber optik kabloda ise, 172.54 m'de maksimum değişim gözlemlenmiş olup, bu noktadaki gerinim değişimi  $137.63 \mu\epsilon$ 'dir. Kablo boyunca ortalama  $43.72 \mu\epsilon$  değişim gözlemlenmiştir. Laboratuvar sonuçlarından yola çıkarak  $M_W=5.1$  Bursa depremi sonucunda ölçümlenen mikro-gerinim değerleri şev üzerinde yaklaşık 1 mm'lik deformasyon olduğunu göstermektedir (Kaya, 2024).



Şekil 9.  $M_W=5.1$  Bursa Depremi sonrası fiber kablolardaki mikro-gerinim değişimi (Kaya, 2024)

### 3.2. Sondaj ile Gerçekleştirilen Derin Fiber Optik Çalışmaları

Heyelan sahasında yer değiştirmelerin yoğun olduğu belirlenen noktalarda kayma yüzeyinde meydana gelen deformasyonu tespit etmek amacıyla açılan 3 adet 10 metrelik sondaj kuyusunun içerisine kuyular boyunca fiber optik kablo yerleştirilmiş (Şekil 10) ve mikro-gerinim ölçümleri alınmaya başlanmıştır. Fiber kablolar inklinometre borusu üzerinde açılan kanalların içerisine yerleştirilerek önce silikonla sabitlenmiş ve ardından su





geçirmez koli bantlarıyla üzeri kapatılmıştır. Ayrıca, fiber optik sistem ile izlenerek sahada tespit edilen yer değiştirmelerin kontrol edilmesi ve doğrulanması amacıyla arazi çalışmaları boyunca heyelan sahasında inklinometre ölçümleri alınmıştır (Şekil 11). Inklinometre ile belli periyot aralıklarında alınan deformasyon değerleri de göz önünde bulundurularak kayan kütlelerin aktivitesinin tespiti ve kayma düzleminin derinliği ile birlikte izleme aşamasında fiber optik ölçümlerden elde edilen deformasyon verilerinin belli aralıklarla kontrol edilmesi sağlanacaktır. Bu sayede heyelanları tetikleyen depremin ikincil etkileri başta olmak üzere yağış rejiminin yarattığı yeraltı ve yüzey suyu durumuna bağlı hidrolojik ve hidrojeolojik etkilerin farklı bakış açılarından detaylı olarak incelenmesi gerçekleştirilecektir. Bu ölçüm çalışmaları heyelan sahasında hala devam etmektedir.



Şekil 10. Inklinometre borularına sabitlenmiş fiber optik kablo ve inklinometre ölçümü

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı tetikleyici mekanizmalarla oluşan heyelan hareketlerinin fiber optik kablolarla izlenerek güvenilir bir izleme ve erken uyarı sistemi geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, ilk olarak laboratuvar ölçeğinde kurulan bir heyelan simülatörü kullanılarak 2 mm, 3 mm ve 4.5 mm çapındaki fiber optik kabloların hassasiyetleri tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, 2 mm çapındaki fiber optik kablo için 1 mm' deformasyona karşılık gelen gerinim değerlerinin 25.000-30.000  $\mu\epsilon$  aralığında, 3 mm çapındaki fiber optik kablo için 15.000-20.000  $\mu\epsilon$  aralığında ve 4,5 mm çapındaki fiber optik kablo için ise 5.000-10.000  $\mu\epsilon$  aralığında olduğu ölçümlenmiştir. Beklendiği üzere, çapı 2 mm olan kabloların, 3 mm çapındaki kablolarla kıyasla kütle hareketine daha hassas tepki verdiği teyit ancak saha koşulları için uygun olmadığı tespit edilmiş; 4.5 mm çapındaki kabloların ise laboratuvar ölçeğinde daha düşük bir hassasiyete sahip olmasına rağmen arazi koşullarında kullanılmaya çok uygun olduğu yapılan testler ile doğrulanarak laboratuvar hassasiyet ölçümleri tamamlanmıştır. Laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirilen hassasiyet ölçümlerine ek olarak, yüzey deformasyonları sisteme entegre edilen bir kamera ile kaydedilmiş ve geliştirilen bir Python kodu yardımıyla görüntü işleme analizleri gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak minyatür eğimölçer gibi LVDT ölçümlerine alternatif doğrulama araçlarından da faydalanılmıştır. Sonuçlar, ölçüm tekniklerinin kendi aralarında tutarlı ve güvenilir olduğunu göstermiştir. Ayrıca, sonuçların sahada gerçek zamanlı uygulanabilirliğini test edebilmek adına, Yalova'da aktif bir heyelan sahasında uygulama çalışmaları yapılmıştır. İlk olarak fiber optik izleme sistemi, çalışmalara uygun olan ve deformasyonların yoğun olduğu bir alanda sığ ölçümler alınarak test edilmek üzere 3 mm ve çevresel etkilere dayanıklı 4.5 mm



çapındaki kablolar kullanılarak kurulmuştur. İzleme sürecinde mikro-gerinim verileri, MGM yağış verileriyle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. İzleme sırasında meydana gelen  $M_w=5.1$  büyüklüğündeki Bursa Depremi, her iki kabloda da başarıyla ölçümlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda sistemin sığ ölçümleri düzenli ve kesintisiz alabildiği doğrulanmıştır. Bu çalışmalar sonrasında, kayma düzlemi içerisinde açılan derin sondaj kuyularına indirilen fiber optik kablolar ve inklinometre cihazı ile birlikte deformasyon hareketinin derinliğe bağlı olarak incelenmesi ve değerlendirilmesi sürecine başlanılmış ve halen devam etmektedir. Bu çalışmalar, heyelanları tetikleyen depremin ikincil etkilerinin yanı sıra, yağış rejiminin yeraltı ve yüzey suları üzerindeki hidrolojik ve hidrojeolojik etkilerinin detaylı incelenmesine olanak tanıyacaktır. Çalışmanın sonuçları, heyelan hareketlerinin deformasyon etkilerinin farklı perspektiflerden ele alınarak değerlendirilmesine katkı sağlayacak olup, ülkemizde depremden etkilenecek heyelan bölgelerinde izleme ve erken uyarı sistemi olarak kullanılma potansiyeline sahiptir. Çalışmanın benzer projelerin yaygınlaşmasına ve heyelan izleme istasyonlarının kurulmasına öncü nitelikte olması beklenmektedir.

## TEŞEKKÜR

*Bu çalışma TÜBİTAK tarafından "Depremlerin Tetiklediği Heyelanların Yaratmış Olduğu Tehlike ve Risklerin Fiber Optik Yöntemlerle Laboratuvarda Test Edilmesi ve Sahada İzlenmesi Sonucunda Gerçek Zamanlı Bir Heyelan Erken Uyarı Sisteminin Kurulması (Heusis-Net) (PI: Doç. Dr. Mustafa Kerem Koçkar)" başlıklı 121M761 kodlu 1001 projesi ile desteklenmiştir.*

## KAYNAKLAR

Arslan Kelam, A., Koçkar, M.K., Akgün, H. (2016), "Utilization of optical fiber system for mass movement monitoring", Disaster Sci Eng, 2(1):19–24.

Arslan Kelam, A., Akgün, H., Koçkar, M.K. (2022), "Application of an optical fiber-based system for mass movement monitoring", Environmental Earth Sciences, Vol. 81.

Arslan Kelam, A., Demir, C., Şahin, G., Kaya, Y.E., Karabulut, A.K., Ural, B., Özşimşir, A.E., Koçkar, M.K., Akgün, H., Temiz, A. (2023), "Laboratory testing of an optical fiber-based monitoring system developed for earthquake-induced landslides", 7th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology (7ICEES), Antalya, Türkiye, 8 p.

Arslan Kelam, A., Şahin, G., Demir, C., Kaya, Y.E., Karabulut, A.K., Ural, B., Özşimşir, A.E., Koçkar, M.K., Akgün, H., Temiz, A. (2024), "Developing an early warning system by monitoring earthquake-induced landslides through fiber optics", 18th World Conference on Earthquake Engineering, Milan, Italy, 8 p.

Demir, C. (2023), "Laboratory Testing Of Effects Caused By Landslides Triggered By Earthquakes Through Utilizing Fiber Optic Methods", Master Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Demir, C., Koçkar, M.K., Akgün, H., Arslan Kelam, A., Şahin, G., Kaya, Y.E., Karabulut, A.K., Ural, B., Özşimşir, A.E. (2023), "Laboratory testing of effects caused by landslides triggered by earthquakes through utilizing fiber optic methods", 6th World Landslide Forum, Florence, Italy (Özet).



Gökçe, O., Özden, Ş., Demir, A. (2008), "Türkiye'de Afetlerin Mekansal Ve İstatistiksel Dağılımı Afet Bilgi Envanteri", T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Afet Etüt ve Hasar Tespit Daire Başkanlığı, Ankara, Türkiye.

Gupta, S.C. (2012), "Textbook on optical fiber communication and its applications", 2nd Ed. PHI Learning Private Limited, New Delhi

Kaya, Y.E. (2024), "Field Monitoring of Deformation Effects Caused by Landslides with Fiber Optic Methods", Master Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Koçkar, M.K., Akgün, H., Arslan Kalam, A., (2023). "Depremlerin Tetiklediği Heyelanların Yaratmış Olduğu Tehlike ve Risklerin Fiber Optik Yöntemlerle Laboratuvarda Test Edilmesi ve Sahada izlenmesi Sonucunda Gerçek Zamanlı Bir Heyelan Erken Uyarı Sisteminin Kurulması (HEUSIS-NET)", TÜBİTAK, Proje No. 121M761.

Lin, M.L., Wang, K.L. (2006), "Seismic slope behavior in a large-scale shaking table model test", Engineering Geology, 86, 118–133.

Özşimşir, A.E. (2024), "Testing and Evaluation of the Deformation Effects Developed by Landslides in the Laboratory with Image Processing Techniques", Master Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Wang, B.J., Li, K., Shi, B., Wei, G.Q. (2009), "Test on application of distributed fiber optic sensing technique into soil slope monitoring", Landslides, 6, 61–68.

