

# Benek Deseni Görüntüleme ile Konik Fiber Sensörlerde Gerilme Ölçümü

## Strain Measurement in Tapered Fiber Sensors by Speckle Pattern Imaging

Hüsamettin ŞERBETÇİ<sup>1</sup>, İsa NAVRUZ<sup>2</sup>, Fikret ARI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği  
Çankırı Karatekin Üniversitesi  
[hserbetci@karatekin.edu.tr](mailto:hserbetci@karatekin.edu.tr)

<sup>2</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği  
Ankara Üniversitesi  
[inavruz@ankara.edu.tr](mailto:inavruz@ankara.edu.tr), [fari@eng.ankara.edu.tr](mailto:fari@eng.ankara.edu.tr)

### Özet

Yerel alan ağlarında haberleşme için yaygınca kullanılan dereceli indisli fiberler bir sensör elemanı olarak da kullanılabilir. Bu çalışmada geliştirilen üretim düzeni ile dereceli indisli çok modlu bir optik fiber konik biçimde inceltildiğinde çıkış ucunda benek deseni görüntüleri oluştuğu gözlemlenmiştir. Elde edilen benek deseni görüntüleri kullanılarak boylamsal gerilmeyi ölçebilen bir sensör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Mikrometre seviyesinde küçük adımlarla gerilme uygulanan fiber sensörün çıkış görüntüleri her bir adım için kaydedilmiş ve görüntüler arası korelasyon ilişkisi hesaplanarak algılama işlemi gerçekleştirilmiştir. Dinamik ölçüm aralığı yaklaşık 1100  $\mu\epsilon$  ve doğrusal regresyon için  $R^2$  değeri 0.9955 olan konik fiber sensörün gerilmeye karşı hassas sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

### Abstract

Graded index fibers, which are widely used for communication in local area networks, can also be used as a sensor element. When a graded index multimode optical fiber was tapered with the fabrication setup developed in this study, it was observed that speckle pattern images are formed at the output end. A sensor design that can measure the longitudinal strain was realized using the obtained speckle pattern images. Output images of the fiber sensor, in which strain is applied with small steps at the micrometer level, were recorded for each step and the detection process was carried out by calculating the correlation relationship between the images. The tapered fiber sensor with a dynamic measuring range of approximately 1100  $\mu\epsilon$  and an  $R^2$  value of 0.9955 for linear regression was shown to give strain sensitive results.

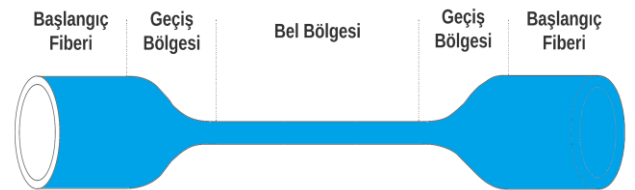
## 1. Giriş

Fiber optik kablolar, ucuz ve kompakt yapıda olması, kullanım ömrünün uzunluğu, düşük sinyal bozulması gibi pek çok avantajdan dolayı günümüzde özellikle telekomünikasyon sektöründe sinyal taşıyıcı olarak yaygınca kullanılmaktadır. Bununla beraber birçok fiziksel büyüklüğün ölçümü konusunda, optik fiberi doğrudan bir algılama elemanı olarak kullanmak

üzere araştırmacılar yoğun bir ilgi göstermektedir. Bu alanda, fiber sensörler ile kırılma indisi [1], sıcaklık [1], gerilme [2-7], bükülme [8, 9], kuvvet [3, 10, 11], basınç [12, 13], deformasyon [5, 14] gibi birçok fiziksel büyüklüğün ölçümlerinin yapılabileceği literatürde gösterilmiştir. Bunun yanı sıra spektrometre uygulamaları [7, 15-20] ve RF sinyal ölçümü [12, 21] üzerine çalışmaların da olduğu görülmektedir. Bu çalışmaların hemen hepsinde sensör olarak kullanılan optik fiberlerin üzerinde herhangi bir deformasyon işlemi uygulanmadan ölçüm işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Fiber optik kablolar, düşük kayıplı iletim sağlamak için standart silindirik bir geometriye sahiptir. Ancak özellikle kırılma indisi ile basınç, kuvvet ve gerilme gibi diğer dış ortama ait fiziksel büyüklüklerin algılanması için fiber içerisinde ilerleyen ışığın dış ortam ile iyi bir etkileşimde bulunması istenir. Bu bağlamda fiberin sensör olarak kullanılacak kısmı özel bir geometriye sahip olacak biçimde inceltilecek fiber dış ortama daha duyarlı hale getirilebilir. Konik biçimde inceltilen fiber sensör geometrisi literatürde konik fiber sensör (KFS) olarak isimlendirilir ve genellikle bu tip sensörler ile kırılma indisi ölçümü yapılabildiği gösterilmiştir.

KFS'ler fiberin sensör amaçlı kullanılacak bölgesinin ısı ya da kimyasal yöntemler kullanılarak inceltilmesi ile üretilmektedir. Isıl yöntemler içerisinde alevle ısıtma [22-25], elektrik ark-deşarj [26, 27] ve lazer ile ısıtma [28, 29] gibi pek çok yöntem bulunurken, kimyasal yöntemlerde bazı kimyasalların silikayı aşındırma özelliğinden faydalanılmaktadır. Simetrik geometriye sahip bir KFS, Şekil 1'de gösterildiği gibi üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlar başlangıç fiberi, geçiş bölgesi ve bel bölgesidir.



Şekil 1. KFS'nin Geometrik Yapısı

Optik fiberin yeterince inceltilmesi fiber içerisinde ilerleyen ışığın dış ortam ile etkileşmesi için önemli bir husustur. Standart tek modlu fiberlerde (SMF) fiber kılıf (cladding) çapı 30-35 µm ve altına düşecek şekilde inceltilmesi sonucu oluşan yeni optik kılavuzda fiberin bel bölgesi fiber özü ve dış ortam ise fiber kılıfı gibi davranır. Bu durum ışık demetinin dış ortam üzerinden tam dahili yansımalar yapmasına neden olacaktır. Böylece sensör üzerinden ilerleyen ışık demetinin dış ortam ile etkileşimine bağlı olarak dalga boyu spektrumunda oluşturduğu değişim optik spektrum analizör (OSA) aracılığıyla gözlemlenebilir ve algılama işlemi gerçekleştirilebilir.

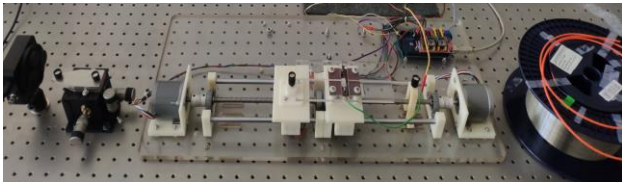
Konik fiberler ile geliştirilen sensör uygulamalarında, geleneksel yöntemlerde kullanılan OSA çıkışından alınan sinyal ile algılama yapmak yerine, benek deseni üzerinden algılama işlemi gerçekleştirilebilir. Çok modlu fiberler (MMF) yüzlerce optik yayılma modunu taşıma kapasitesine sahiptirler. Modlar arasındaki faz farkından dolayı her bir mod çıkışa farklı sürelerde ulaşır ve bu durum fiber çıkışındaki ışıma görüntüsünde, benek deseni adı verilen bir girişim deseni oluşmasına neden olur. Benek deseni algılamaya dayalı fiber sensörler lazer ışıma kaynağı, çok modlu optik fiber ve bir CCD kameradan oluşmaktadır. CCD kamera ile gözlemlenen benek deseni görüntüleri algılama işlemi için kullanılabilir.

Benek deseni ile algılamaya dayalı fiber sensörlerde, algılama işlemi referans görüntü olarak belirlenen ilk benek deseni görüntüsünün kaydedilmesi ile başlar. Ardından, ölçülecek fiziksel büyüklük belirli aralıklar ile uygulanarak her bir değişim için benek deseni görüntüleri kaydedilir. Referans görüntü ile diğer görüntüler arasındaki korelasyon, çeşitli yöntemler kullanılarak yapılandırılabilir ve algılama işlemi gerçekleştirilir. Bu yöntemlerden bazıları, benek korelasyonu [1, 2, 9, 13, 15, 31], algoritmik yöntemler [3, 15], istatistiksel mod analizi [8, 30], derin öğrenme [18, 19, 32], yapay sinir ağları [33] ve makine öğrenmesi [14] şeklinde sıralanabilir.

Bu çalışmada, geliştirilen KFS üretim düzeneği ile fibere konik yapının kazandırıldığı inceltme işlemi sayesinde, ışığın dış ortam ile etkileşime geçmesi sağlanmış ve fiberdeki boylamsal gerilmenin ölçümü, benek deseni görüntüleri analiz edilerek gerçekleştirilmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

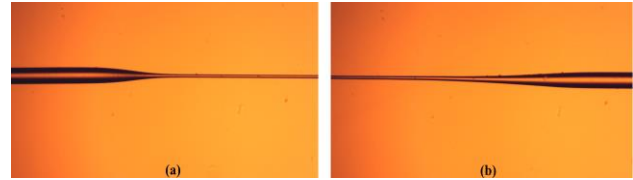
Çalışmanın ilk aşamasında, fibere konik yapının kazandırılması için ark-deşarj tekniği kullanan bir üretim düzeneği geliştirilmiştir. KFS üretimi için geliştirilen üretim düzeneği Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. KFS Üretim Düzeneği

Çalışmada dereceli indisli çok modlu fiber (GI-MMF) (F-MFD Newport) kullanılmıştır. Fiberin sensör olarak şekillendirilecek kısmı, 20 cm aralığı olan iki fiber tutturucu ile sabitlenmiştir. Fiber karşılıklı konumlandırılmış iki elektrot arasına yerleştirilerek ark-deşarjı başlatılmıştır. Ark-deşarjı ile ısınan optik fiber, sol tarafta bulunan motor yardımıyla çekilirken, ark

pozisyonu sağ tarafta bulunan motor aracılığıyla tersi yönünde hareket ettirilmiştir. Her iki motorun hızı, ivmesi ve elektrotlara uygulanan ark gücü gibi parametreler bilgisayar üzerinde geliştirilen bir arayüz üzerinden kontrol edilmiştir. Böylece sensör geometrisini şekillendiren bel bölge uzunluğu, kalınlığı ve konik geçiş bölge uzunluğu kontrol edilerek mikrometre hassasiyetinde sensör bölgesinin şekillendirilmesi sağlanmıştır. Şekil 3'de bu üretim düzeneği ile elde edilen KFS'ye ait mikroskop görüntüleri verilmiştir. 125 µm kılıf çapına sahip GI-MMF, inceltme işlemi sonrası yaklaşık 25 µm kılıf çapına kadar düşürülmüştür.

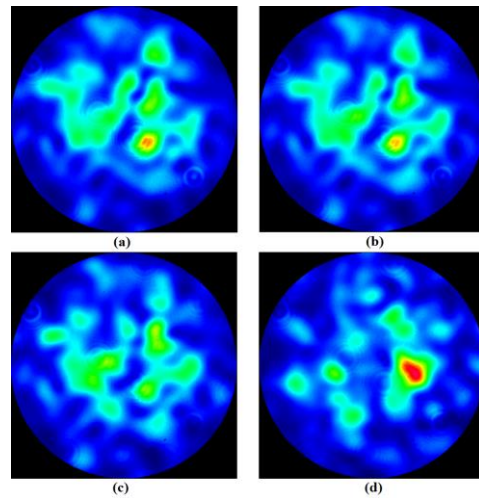


Şekil 3. Sensör Bölgesinin Mikroskop Görüntüsü a) Başlangıç Bölgesi b) Bitiş Bölgesi

Çalışmanın ikinci aşamasında, üretilen KFS'nin boylamsal gerilmeye karşı tepkisi ölçülmüştür. Fiberin gerilme ölçümü fiberde meydana gelen birim uzama ile ilişkilendirilebilir. Bu ilişki Eş. 1 ile hesaplanabilir. Deneysel çalışmada kullanılan fiber uzunluğu  $L=20$  cm ve gerilme adımı  $\Delta L=31,25$  µm'dir. Buna göre her bir adım sonucu fiberde oluşan gerilme 156,25 µe değerine karşılık gelmektedir.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

İşıma kaynağı olarak 635 nm dalga boyunda çalışan diyot lazer (LDM635 Thorlabs) kullanılmıştır. Bir uçundan sabitlenen fiber sensörü, motorize kaydırıcı üzerine yerleştirilen diğer uçtan 25 motor adımı ile (31,25 µm) çekilerek her adımda fiber çıkışından gözlenen benek deseni görüntüleri bir CCD kamera (BC106-VIS Thorlabs) ile kaydedilmiştir. Şekil 4'de referans görüntü ile bazı gerilme değerlerine karşılık gelen benek deseni görüntüleri gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere gerilmenin artması ile oluşan benek deseni görüntülerinin referans görüntüye benzerliği giderek azalmaktadır.

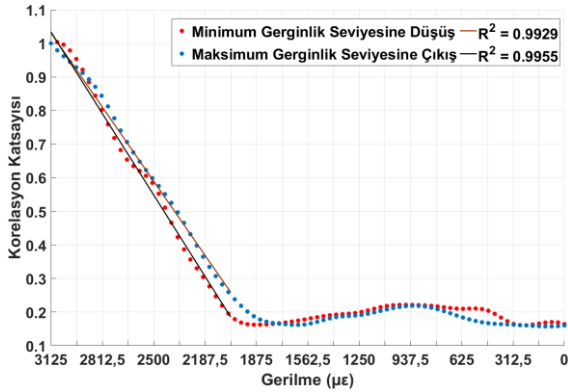


Şekil 4. Benek Deseni Görüntüleri a) Referans Görüntü  $\varepsilon=3125$  b)  $\varepsilon=2968,75$  c)  $\varepsilon=2812,5$  d)  $\varepsilon=1718,75$

Benek desenleri arasındaki korelasyon ilişkisi Eş. 2 [34] ile hesaplanmıştır. Burada referans görüntü  $x_i$ , referans görüntünün ortalaması (mean)  $\bar{x}$ , gerdirme sonrası elde edilen diğer görüntü  $y_i$  ve diğer görüntülerinin ortalaması ise  $\bar{y}$ 'dir. Her bir benek deseni görüntüsünün referans görüntü ile oluşturduğu korelasyon ayrı hesaplanmıştır.

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

Referans görüntü ile diğer görüntüler arasında oluşan korelasyon ilişkisi Şekil 5'deki grafikte gösterilmektedir. Fiberin gerginlik seviyesi 0  $\mu\epsilon$  değerinden 3125  $\mu\epsilon$ 'a kadar 156,25  $\mu\epsilon$  adımlarla artırılmış ve maksimum gerginlik seviyesinden tekrar 0  $\mu\epsilon$  değerine aynı adım aralıklarıyla azaltılmıştır. Elde edilen toplam 41 benek deseni görüntüden 21. görüntü referans olarak alındığında azalan ve artan yöndeki gerilmeye karşı sensör tepkisinin oldukça benzer sonuç verdiği grafikten açıkça görülmektedir. Geliştirilen sensörün yaklaşık 1100  $\mu\epsilon$  olarak belirlenen dinamik ölçüm aralığında doğrusal bir tepki verdiğini söylemek mümkündür. Grafikte mavi renkle ifade edilen maksimum gerginlik seviyesine çıkış grafiğinde doğrusal regresyon için  $R^2$  değeri 0.9955 olarak hesaplanırken, kırmızı renk ile ifade edilen minimum gerginlik seviyesine düşüş grafiğinde  $R^2$  değeri 0.9929 olarak hesaplanmıştır. 156,25  $\mu\epsilon$  değerine karşı gelen 31,25  $\mu\epsilon$ 'lik artan ve azalan yöndeki gerilme değişimlerine karşılık elde edilen grafiklerinin  $R^2$  değerinin 0.99'un üzerinde çıkması, sensörün dinamik ölçüm aralığında gerilmeye karşı yüksek bir doğrusallığa sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. Korelasyon Katsayısının Gerilme Adımlarına Karşılık Değişimi

### 3. Sonuç

Standart dereceli indisli MMF'lerin çıkış ucunda benek deseni görüntüsü oluşmamaktadır. Ancak bu çalışmada önerilen inceltme tekniği kullanılarak, telekomünikasyon alanında yaygınca kullanılan dereceli indisli MMF'lerin benek deseni görüntülemeye dayalı sensör olarak kullanılabilceği gösterilmiştir. Geliştirilen üretim düzeneği ile fiber mikrometre hassasiyetinde konik biçimde inceltirilerek sensör bölgesi şekillendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda 635 nm lazer ışığının fiber sensör çıkışında oluşturduğu benek deseni görüntüleri analiz edilerek GI-MMF ile gerilme ölçümü gerçekleştirilmiştir. Sensörün, 31,25  $\mu\epsilon$ 'lik adımlarla sırasıyla artan ve azalan yönde yapılan gerilme testlerinde  $R^2$  katsayısı

0.99'un üzerinde hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlar sensörün 1100  $\mu\epsilon$  dinamik ölçüm aralığında 156,25  $\mu\epsilon$ 'luk gerilme değişimlerine duyarlı olduğunu göstermektedir. Önerilen sensörün sadece gerilmeye karşı değil aynı zamanda kırılma indisi, sıcaklık, kuvvet ve bükülme gibi daha pek çok farklı fiziksel büyüklüğün ölçümünde de kullanılabilceği öngörülmektedir.

### 4. Kaynaklar

- [1] Singh, L., Zhu, G., Singh, R., Zhang, B., Wang, W., Kaushik, B. K., Kumar, S., "Gold Nanoparticles and Uricase Functionalized Tapered Fiber Sensor for Uric Acid Detection," IEEE Sensors Journal, vol. 20, no. 1, pp. 219-226, 2020.
- [2] Fujiwara, E., Silva, L.E., Marques, T.H.R., Cordeiro, C.M.B., "Polymer optical fiber specklegram strain sensor with extended dynamic range", Optical Engineering, 2018. <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.11.116107>
- [3] Murray, M.J., Davis, A., Kirkendall, C., Redding, B., "Speckle-based strain sensing in multimode fiber", Optics Express, 27 (20), 2019. <https://doi.org/10.1364/OE.27.028494>
- [4] Aristizabal, V. H., Velez, F.J., Rueda, E., Gomez, N.D., Gomez, J.A., "Numerical modeling of fiber specklegram sensors by using finite element method (FEM)", Optics Express, 24, (24), 2016. <https://doi.org/10.1364/OE.24.027225>
- [5] Wang, Y., Cai, H., Qu, R., Fang, Z., Marin, E., Meunier, J., "Specklegram in a grapefruit fiber and its response to external mechanical disturbance in a single-multiple-single mode fiber structure", Applied Optics, 47 (20), 2008. <https://doi.org/10.1364/AO.47.003543>
- [6] Rohollahejad, J., Xia, L., Ran, Y., Cheng, R., "Deformation Independent FBG Strain Sensor Based On Speckle Pattern Processing", 14th International Conference on Optical Communications and Networks, 2015. <https://doi.org/10.1109/ICOON.2015.7203648>
- [7] Rodriguez-Cobo, L., Lomer, M., Cobo, A., Lopez-Higuera, J., "Optical fiber strain sensor with extended dynamic range based on specklegrams", Sensors and Actuators A, 203, pp. 341-345, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.09.006>
- [8] Satar, S.M.A, Ali, A.H., Abbas, M.K., "Designing of an optical fiber sensors of statistical mode via image processing of speckle pattern changes", International Journal of Scientific and Research Publications, 5 (10), 2018.
- [9] Fujiwara, E., Santos, M.F.M., Suzuki, C.K., "Optical fiber specklegram sensor analysis by speckle pattern division", Applied Optics" 56 (6), pp1585-1590, 2017. <https://doi.org/10.1364/AO.56.001585>
- [10] Zhao, H. T., Zhang, G., Chin, L.K., Cai, H., Song, J.F., Yang, Z.C., Yap, E.P.H., Ser, W., Kwong, D.L., Liu, A.Q., "Particle separation under the co-action of Brownian motion and optical force in near-field speckle patterns", 18th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2015. <https://doi.org/10.1109/TRANSDUCERS.2015.7181018>
- [11] Fujiwara E., Wu Y.T., Santos M.F.M., Schenkel E.A., Suzuki C.K. 2017. "Development of a tactile sensor based

- on optical fiber specklegram analysis and sensor data fusion technique”, *Sensors and Actuators A Physical*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.07.031>
- [12] Valley, G. C., Sefler, G. A., Shaw, T.J., “Multimode waveguide speckle patterns for compressive sensing”, *Optics Letters*, 41 (11), p. 2529-2532, 2016. <https://doi.org/10.1364/OL.41.002529>
- [13] French, R., Gigan, S., Muskens, O. I., “Snapshot fiber spectral imaging using speckle correlations and compressive sensing”, *Optics Express*, 26 (24), pp. 32302-32316, 2018. <https://doi.org/10.1364/OE.26.032302>
- [14] Cuevas, A. R., Fontana, M., Rodriguez-Cobo, L., Lomer, M., Lopez-Higuera, J. M., “Machine Learning for Turning Optical Fiber Specklegram Sensor into a Spatially-Resolved Sensing System”, *Journal of Lightwave Technology* pp., 36 (17), 2018. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2850801>
- [15] Redding, B., Popoff, S. M., Cao, H., “All-fiber spectrometer based on speckle pattern reconstruction”, *Optics Express* 21 (5), pp. 6584-6600, 2013. <https://doi.org/10.1364/OE.21.006584>
- [16] Redding, B., Liew, S.F., Sarma, R., Cao, H., “Compact spectrometer based on a disordered photonic chip”, *Nature Photonics* 7 (9), pp.746-751, 2013. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.190>
- [17] Coluccelli, N., Cassinero, M., Redding, B., Cao, H., Laporta, P., Galzerano, G., “The optical frequency comb fibre spectrometer”, *Nature Communications* 7, 2016. <https://doi.org/10.1038/ncomms12995>
- [18] Kürüm, U., Wiecha, P.R., French, R., Muskens, O.L., “Deep learning enabled real time speckle recognition and hyperspectral imaging using a multimode fiber array”, *Optics Express* 27(15), 2019. <https://doi.org/10.1364/OE.27.020965>
- [19] Gupta, R.K., Bruce, G.D., Powis, S.J., Dholakia, K., “Deep Learning Enabled Laser Speckle Wavemeter with a High Dynamic Range”, *Laser & Photonics Review* 14 (9), 2020. <https://doi.org/10.1002/lpor.202000120>
- [20] Meng, Z., Li, J., Yin, C., Zhang, T., Yu, Z., Tang, M., Tong, W., Xu, K., “Multimode fiber spectrometer with scalable bandwidth using space-division multiplexing”, *AIP Advances*, 9 (1), 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5052276>
- [21] Valley, G.C., Sefler, G.A., Shaw, T.J., “Use of optical speckle patterns for compressive sensing of RF signals in the GHz band”, *SPIE Proceedings Vol. 9747:Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications IX*, 2016. <https://doi.org/10.1117/12.2208738>
- [22] Tian, Y., Wang, W., Wu, N., Zou, X. and Wang, X., “Tapered optical fiber sensor for label-free detection of biomolecules”, *Sensors (Basel)*, 11(4):3780-90, 2011.
- [23] T. Li, T., Dong, X., Chan, C. C., Zhao, C. and Zu, P., “Humidity Sensor Based on a Multimode-Fiber Taper Coated With Polyvinyl Alcohol Interacting With a Fiber Bragg Grating,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 6, pp. 2205-2208, 2012.
- [24] Komanec, M., Nemecek, T., Vidner, P. M., Martan, T., Lahodny, F. And Zvanovec S., “Structurally-modified tapered optical fiber sensors for long-term detection of liquids”, *Optical Fiber Technology*, Vol. 47, 187-191, 2019.
- [25] Zhang, C., Ning, T., Li, J., Pei, L., Li, C. and Lin, H., “Refractive index sensor based on tapered multicore fiber”, *Optical Fiber Technology*, vol. 33, 2017.
- [26] AL-Mashhadani, Z.A. and Navruz, I., “Highly sensitive measurement of surrounding refractive index using tapered trench-assisted multicore fiber”, *Optical Fiber Technology*, 48(13):76-83, 2019.
- [27] Singh L., Zhu, G., Singh, R., Zhang, B., Wang, W., Kaushik, B. K., and Kumar, S., "Gold Nanoparticles and Uricase Functionalized Tapered Fiber Sensor for Uric Acid Detection," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 1, pp. 219-226, 2020.
- [28] Zibaii, M. I., Kazemi, A., Latifi, H., Azar, M. K., Hosseini, S. M. and Ghezelaigh, M. H., “Measuring bacterial growth by refractive index tapered fiber optic biosensor”, *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*, 101, 313–320, 2010.
- [29] Zhang, W., Zhuang, W., Dong, M., Zhu L. and Meng, F., “Dual-Parameter Optical Fiber Sensor for Temperature and Pressure Discrimination Featuring Cascaded Tapered-FBG and Ball-EFPI,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 14, pp. 5645-5652, 2019.
- [30] Efendioglu, H. S., Yıldırım, T., Toker, O., Fidanboyly, K., “Design of intelligent fiber optic statistical mode sensors using novel features and artificial neural networks”, *International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications*, 2012. <https://doi.org/10.1109/INISTA.2012.6247006>
- [31] Redding, B., Cao, H., “Using a Multimode Fiber as a High-resolution, Low-loss Spectrometer”, *Optics Letters* 37(16), 3384-6, 2012. <https://doi.org/10.1364/OL.37.003384>
- [32] Li, Y., Xue, Y., Tian, L., “Deep speckle correlation: A deep learning approach toward scalable imaging through scattering media”, *Optica* 5 (10), 2018. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.001181>
- [33] Efendioglu, H. S., Yıldırım, T., Toker, O., Fidanboyly, K., “Design of intelligent fiber optic statistical mode sensors using novel features and artificial neural networks”, *International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications*, 2012. <https://doi.org/10.1109/INISTA.2012.6247006>
- [34] Zhu, R. vd., "Magnetic Field Sensing Based on Multimode Fiber Specklegrams", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 11, pp. 3614-3619, 2021. doi: 10.1109/JLT.2021.3067332.

## 5. Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı ile desteklenen 121E248 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.