Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 28(5), 652-660, 2022

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Çoklu-analit algılama amacıyla pasta-şeklinde fotonik kristal fiber bazlı yüzey plazmon rezonans algılayıcı

Pie-Shaped photonic crystal fiber based surface plasmon resonance sensor for multi-analyte sensing purposes

Ahmet YASLI[1], *Hüseyin ADEMGİL*[2*]

[1]Elektrik ve Elektronik Müh. Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Lefke Avrupa Üniversitesi, Lefke, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti.
ayasli@eul.edu.tr

[2]Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Lefke Avrupa Üniversitesi, Lefke, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti.
hademgil@eul.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 16.04.2021 Düzeltme Tarihi/Revision: 09.12.2021 doi: 10.5505/pajes.2022.35487
Kabul Tarihi/Accepted: 01.02.2022 Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada çoklu-analit algılama amacıyla, çift analit kanallı, fotonik kristal fiber (FKF) tabanlı yüzey plazmon rezonans (YPR) algılayıcı tasarlanmıştır. Plazmonik materyal olarak altın ve gümüş kullanılmıştır. Sayısal analizler Tam Vektörel-Sonlu Öge Yöntemi (TV-SÖY) kullanılarak yapılmıştır, ayrıca tasarlanan algılayıcı duyarlılık hesapları için spektral yöntemi kullanılmıştır. Sayısal analizler sonucu, en yüksek 6800 nm/RIU duyarlılığa ve 1.47x10-5 RIU çözünürlüğe ulaşılırken, sabit ve değişken analit kırılma indisleri için sırasıyla 3500 nm/RIU ve 3100 nm/RIU duyarlılık seviyelerine ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Fotonik kristal fiber (FKF), Yüzey plazmon rezonans (YPR), Çoklu analit, Çift kanal, Fiber optik algılayıcı.

Abstract

In this study, the dual-channel photonic crystal fibre (PCF) based surface plasmon resonance (SPR) sensor has been proposed to sense multi-analyte. Gold and silver used as plasmonic layers. Full vectorial Finite Element Method (FV-FEM) have been used to perform numerical analysis. Also, the spectral interrogation method has been used to calculate the sensitivity of the proposed sensor structure. According to numerical results, the highest sensitivity levels are obtained as 6800 nm/RIU with 1.47x10−5 RIU, where the average sensitivities are calculated as 3500 nm/RIU and 3100 nm/RIU for fixed and variable refractive indices, respectively.

Keywords: Photonic crystal fiber (PCF), Surface plasmon resonance (SPR), Multi analyte. Multi-channel, Fiber optic sensor.

1 Giriş

Günümüzde, kimyasal [1] ve biyo-kimyasal [2] alanlarda kullanılmak üzere çok hassas duyarlılığa sahip algılayıcılara ihtiyaç duyulmaktadır. Yüzey plazmon rezonans (YPR) tekniği, molekül etiketleme gerektirmeden kullanılabilen eski bir yöntemdir [3]. Otto'nun YPR'yi prizma ile kullanmasından sonra [4], Kretschmann'ın bu teknikten yararlanarak geliştirdiği, "Kretschmann Raether prism geometry" diye bilinen yapı [5], bu alanda kullanılan en yaygın yöntemdir. Bu yöntemde gözlemlenen en büyük sorun ise prizma geometrisinin hantal yapısından dolayı çok küçük uygulamalara uygun olmayışı, yüksek fiyatı ve anlık duyarlılık gerektiren uygulamalarda kullanışsız olmasıdır [6]. Jorgenson ve Yee bu hantal yapıdan doğan sorunu çözmek için YPR tekniği ile fiber optik teknolojisini birlikte kullanmışlardı [7]. Öte yandan hızla gelişen fiber teknolojisi ile ortaya çıkan fotonik kristal fiberler (FKF), araştırmacılara ışığın yayılımını kontrol edebilecek eşsiz olanaklar sağlamıştır [8]. FKF'lerin benzersiz özelliklerinden yararlanan Hassani ve Skoroboğaty, 2006 yılında ilk YPR temelli FKF algılayıcı geliştirdiler [9]. Geliştirilen algılayıcının çok küçük, kompakt, hafif, yüksek duyarlıklı, elektromanyetik etkileşime karşı dirençli ve anlık uzak veri aktarımına uygun oluşu, onu diğer algılayıcı türlerinden ayıran en önemli özellikler olmuştur [9],[10].

Kretschmann Raether prizma geometrisi YPR temelli algılayıcı yapıların temeli olarak kabul edilmektedir [5]. Çalışma prensibi hedef bölgesindeki etkin kırılma indisi (n_{eff}) değişimlerini algılamaya dayanır. Hedef bölgedeki etkin kırılma indisindeki herhangi bir değişim, rezonans eşleşmesinin gerçekleştiği dalga boyunun da değişmesine neden olur. Rezonans eşleşmesi, p-polarize ışık ile yüzey plazmon dalgalarının (YPD) salınım frekanslarının eşleştiği dalga boyu olarak tanımlanır. Bu eşleşme anında temel çekirdek modundan yayılan p-polarize ışıktan, YPD'lerin en yüksek seviyede enerji aktarımı gerçekleşir. Bu da yayılım kayıplarının o dalga boyunda en yüksek değere (tepe noktasına) ulaşmasına neden olur. Bu tepe noktalarındaki değişimleri hesaplamak için spektral (spectral interrogation) [11], genlik (amplitude) [12] veya açısal (angular) [1] gibi yöntemler kullanılmaktadır. Açısal metotta mekanik olarak hareket eden parçalara ihtiyaç duyulduğundan ve genlik metodunda çok duyarlı olmayışından dolayı çok tercih edilmemektedirler.

Yukarıda da bahsedildiği gibi, günümüzdeki hassas algılayıcı uygulamalarında ihtiyaç duyulan küçük, çok yüksek duyarlıklı algılayıcı Hassani'nin FKF'i YPR tekniği ile kullanmasıyla çok ileri düzeye taşınmıştır [9]. Hassani çalışmasında, geometrik yapı olarak iki farklı tasarım üzerinde çalışmıştı. Bunlardan ilki içten, diğeri ise dıştan metal kaplı analit kanallarından oluşmaktaydı. Bu tasarımlar ilerde araştırmacıların yapacağı benzer tasarımlar için temel oluşturmuşlardı [11],[13]-[17]. FKF temelli çalışmalarda beklenen en önemli etken, tasarımın gerçek hayatta üretilebilir olmasıdır. Bundan dolayı tasarımlar yapılırken, gerçek şartlar altında üretilebilir parametreler içermeleri çok önemlidir. Hassani'den sonra birçok araştırmacı

*Yazışılan yazar/Corresponding author

benzer şekilde yüksek duyarlılığa sahip algılayıcı yapıları tasarladılar [18]-[21]. Bu tasarımların çoğu tek-analit analiz etmek üzere tasarlanmıştı. Günümüz şartlarında hızla gelişen teknoloji ise araştırmacıları, tek-analit yerine çoklu-analit analizi yapacak algılayıcı uygulamaları geliştirmeye doğru yönlendirmiştir.

Vala ve diğ. 2010 yılında yayınladığı makale, çoklu-analit algılama çalışmalarının ilk örneklerindendir [22]. Bu çalışmada YPR algılayıcı için, Kretschmann Raether prizma geometrisi temelli altın kaplı ızgara yöntemi kullanılmıştı. Üretilen ilk örnek 10 farklı analit analizine olanak sağlarken, $6x10^{-7}$ RIU çözünürlük elde edilmişti. Öte yandan duyarlılık analizi için kullanılan açısal yöntem ile prizma geometrisinin hantal yapısı, algılayıcı kullanım alanlarını kısıtlamaktaydı. Bu sorunu çözmek için Zhang ve arkadaşları çoklu-analit algılayabilecek mikro-yapısal fiber optik temelli YPR algılayıcı tasarladı. Tasarımda, plazmonik materyal olarak altın (Au) kullanılırken, analit kanalları vagon tekerleği şeklinde tasarlandı. Bunun amacı, analitin mikron büyüklükteki kanala konma işlemini kolaylaştırmaktı. 1.33 ve 1.46 etkin kırılma indisi değerleri arasında, kanal 1 ve 2 için sırasıyla 1535 nm/RIU ve 1550 nm/RIU duyarlılık değerleri elde etmişlerdi [23]. 2015 yılında Otupuri ve arkadaşları yine çoklu-analit analizi için YPR tabanlı FKF algılayıcı tasarladılar. Çalışmada plazmonik materyal olarak altın ve Ta_2TO_5 kaplı geniş mikro-akışkan analit kanalları kullanıldı. Yüksek çift kırılma(birefringence) elde etmek için elips şeklinde hava delikleri kullanıldı. Bu sayede her iki temel modda (x- ve y- polarize) yüksek duyarlılık değerlerleri elde edildi. Etkin kırılma indisi 1.33'ten 1.36'ya kadar değişirken, kanal-1 (x-polarize) için 4600 nm/RIU ve kanal-2 (y-polarize) için 2300 nm/RIU duyarlılık değerleri elde edildi [24]. Başka bir çalışma ise 2016 yılında Azzam ve arkadaşları tarafından Otupuri tasarımından feyz alınarak yapıldı. Çalışmalar arasındaki temel fark aktif plazmonik madde olarak yalnız altının (Au) kullanılmasıydı. Bu çalışmada birden fazla moddan yararlanarak (HE_{11}^{x}, HE_{11}^{y}, HE_{21}^{x} ve HE_{21}^{y}) çoklu-analit analizi yapılmış ve 2200 ve 2400 nm/RIU duyarlılık değerleri elde etmişlerdi [25]. Diğer bir çalışma ise YPR temelli çoklu-analit algılayıcı yapısının çekirdek bölgesinde, altınla kaplı çift analit kanaldan oluşmaktaydı. 1.30 ve 1.40 kırılma indisi değerleri arasında, Kanal -1 ve Kanal- 2 için sırasıyla 1000 nm/RIU ve 3750 nm/RIU duyarlılık olarak hesaplanmıştır [26]. Öte yandan benzer çoklu-analit çalışmaları optik fiber temelli algılayıcı yapılarla devam etmektedir. Lu ve çalışma arkadaşları, çift etkin kırılma indisi ölçmek için kılcal damar (capillari) yapılı optik fiber tasarladı [27]. Tasarlanan algılayıcı, dıştan çift katmanlı (Au ve ITO) içten ise Ag kaplı katmanlardan oluşmaktaydı. Kanal -1 ve Kanal-2 için sırasıyla 1951 nm/RIU and 2496 nm/RIU duyarlılık değerleri raporlanmıştı.

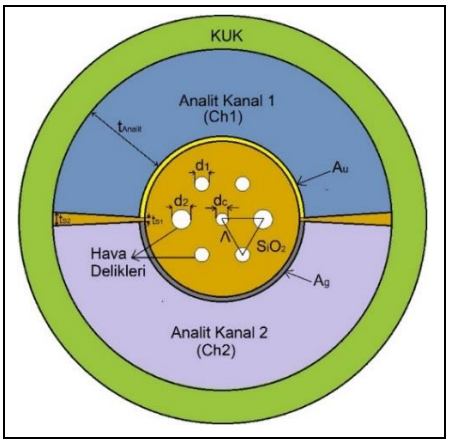
Önceki çalışmalardan da görülebileceği gibi, algılayıcıları en etkin biçimde kullanabilmek için FKF tasarımı büyük öneme sahiptir. Burada, algılayıcının gerçek hayatta üretilebilir olması, verimli ve güvenilebilir sonuçlar sağlaması, zamandan tasarruf için aynı anda birçok analiti analiz edebilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu yüzden araştırmacılar son zamanlarda FKF'lerin eşsiz yayılım özelliklerinden yararlanarak YPR temelli, çoklu analit analizi yapabilen algılayıcı tasarımları üzerinde yoğunlaştılar. Bu çalışmada, yüksek verimlilikle, çoklu-analit analizi yapabilen, geniş analit kanalları sayesinde kolay analit girişi yapılabilen, aynı zamanda sade tasarımı ile kolay üretilebilecek YPR temelli FKF tasarlanıp sayısal analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslanabilecek düzeyde oluşu ve tasarımın sade yapısının gerçek hayatta üretilebilir oluşu onu diğerler karmaşık yapıdaki algılayıcı tasarımlarına göre bir adım öne taşımaktadır. Böylelikle sade tasarımla çoklu-analit analizi yapabilen algılayıcı tasarlanmıştır.

2 Sayısal modelleme

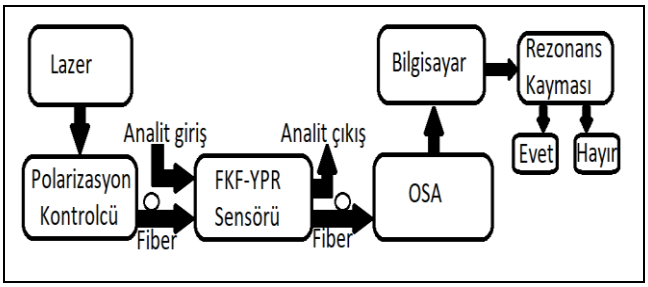
Bu çalışmada tasarlanan YPR temelli FKF algılayıcı yapısının sayısal analizleri (yayılım kaybı, mod analizi ve etkin kırılma indisi), Tam-Vektörel Sonlu Öge Yöntemi (TVSÖY) ile COMSOL MULTIPHYSICS adlı yazılım kullanılarak yapılmıştır [28],[29].

Tasarlanan FKF algılayıcı yapısı Şekil 1(a)'da görülmektedir. FKF, altıgen şekilde silika (Si_O_2) üzerine yerleştirilmiş yedi hava deliğinden oluşmaktadır. YPD'larını oluşturacak metal katman olarak altın (Au) ve gümüş (Ag) kullanılmıştır. Farklı analitleri aynı anda analiz edebilmek için iki analit kanalı kullanılmıştır. Bunlardan biri FKF'in üst kısmında, diğeri ise alt kısmında konumlandırılmıştır. Üstteki analit kanalı (Kanal 1) ile FKF arasına altın, alttaki analit kanal (Kanal 2) ile FKF arasına ise gümüş metal katmanları eklenmiştir. Analit kanalları birbirinden 0.04µm (t_{S1})'den 0.4µm (t_{S2})'ye doğru kalınlaşan silika ile ayrılmıştır. Her iki kanal birlikte kullanılmalıdır. Aksi takdirde boş olan kanal hava deliği gibi algılanacağından, FKF'nin kusurlukatmanını oluşturan hava delikleri ile benzer özellik gösterecek ve bu da FKF'in yapısını tamamen bozacaktır. Dolayısı ile sağlıklı sonuçlar elde edilemeyecektir. Işığın temel modda FKF çekirdeğine yayılımını sağlamak, aynı zamanda belli bir kısmının kayıp olarak YPD ile eşlemesini sağlamak için, farklı çaplarda hava delikleri kullanılmıştır (d_1, d_2). Merkezdeki hava deliğinin (d_C) farklı boyutta kullanılmasındaki amaç ise, rezonans eşleşmesinin gerçekleşeceği dalga boyunun istenilen değerde ayarlanabilmesini sağlamaktır [11]. Şekil 1(b)'de ise önerilen algılayıcının akış diyagramı gösterilmiştir. Burada, lazer kaynağından gelen ışık, bir polarizör denetleyicisi aracılığıyla önerilen algılayıcıya doğrusal olarak polarize bir şekilde, Ref. [30]'un makalesinde gösterildiği gibi temel modda yayınım yapması sağlanabilmektedir. Algılayıcıda oluşan rezonans durumu, optik spektrum analizörü (OSA) tarafından tespit edilir ve veriler, bilgisayar tarafından analiz edilir. Burada, analitin performansını değerlendirmek için rezonans dalgaboyundaki değerlendirilir. Eğer yayılım kaybının en yüksek olduğu tepe noktasında değişim varsa farklı analit olduğu tespit edilir. Rezonans dalga boyunun veya rezonans yoğunluğunun değişimi, analitlerin kırılma indisinin değişimi ile doğru orantılıdır. Bu nedenle, bilinmeyen sıvı örneğinin kırılma indisi, dalga boyu kayması miktarı ölçülerek tespit edilebilir.

FKF'in çekirdeğini saran ve bir sıra halkadan oluşan hava deliklerinde d_2'lerin d_1'lere göre biraz daha büyük olmasının nedeni, çift kırılma etkisini artırarak x- ve y- polarizasyonları arasında fark yaratmaktır. Kullanılan hava deliklerinin çapları, $d_c = 0.36$µm, $d_1 = 0.42$µm ve $d_2 = 0.56$µm olacak şekilde tasarlanmıştır. Analit kanal (tAnalit) ile metal katmanların genişlikleri ise sırasıyla, 2.66µm ve 40nm, hava delikleri arasındaki mesafe (Λ) ise 1.2µm olacak şekilde tasarlanmıştır. Altın ve gümüşün elektriksel geçirgenliği için sırasıyla Johnson ile Christy'nin [31] ve Palik'in değerleri kullanılmıştır [32]. Silikanın etkin kırılma indisini hesaplamak için Denklem 1'de gösterilen Sellmeir denklemi kullanılırken [33], hava delikleri içinse bu değer 1 olarak alınmıştır.



(a)



(b)

Şekil 1. Tasarlanan FKF-YPR algılayıcısı; (a): Şematik diyagramı ve (b): Akış diyagramı.

Figure 1. The Proposed PCF-SPR sensor; (a): Schematic diagram and (b): Flow chart.

$$n^2(y) = 1 + \frac{B_1(\lambda)^2}{(\lambda)^2 - C_1} + \frac{B_2(\lambda)^2}{(\lambda)^2 - C_2} + \frac{B_3(\lambda)^2}{(\lambda)^2 - C_3} \quad (1)$$

Burada, n kırılma indisini, λ dalga boyunu, ve B1,2,3 ile C1,2,3 Sellmeier katsayılarını göstermektedir [33].

TVSÖY ile sayısal analizlerinin benzetim çalışmasının yapılabilmesi için, FKF'yi çevreleyen kusursuz uyum katmanı (KUK) adı verilen yapay bir katman kullanılmıştır. Bunu kullanmaktaki amaç, FKF'den dışa doğru yayılan ışığın soğurulmasını sağlamak ve ışığın geri yansımasını önlemektir. Böylelikle gerçeğe en yakın benzetim sonuçları elde edilebilmektir.

Tasarlanan algılayıcının duyarlılık analizi daha önce de belirtildiği gibi spektral metot kullanılarak yapılmıştır. Burada temel prensip, yayılım kayıplarının tepe noktaları arasındaki farktan yararlanmaktır. Rezonans anında, ışıktan YPD dalgalarına en yüksek enerji akışı gerçekleşir. Buda yayılım kayıplarının belli bir dalga boyunda en üst değere ulaştığı andır. Burada, analiz edilen ortamın etkin kırılma indisinin değişmesi durumunda, rezonans eşleşmesinin gerçekleştiği dalga boyu farklı noktalara kayar. Spektral metot da bu kayıpların tepe noktalarında oluşacak olan değişimin, etkin kırılma indisindeki değişime olan oranına dayanır. Buradaki yayılım kayıplarını hesaplamak için Denklem 2 [34], spektral metodun duyarlılığını (S) hesaplamak içinse Denklem 3 [35],[36] kullanılmıştır.

$$\frac{40\pi}{\ln(10)\,\lambda} Im(n_{eff}) \times 10^4 \; [dB/cm] \quad (2)$$

Burada, λ dalga boyu, (n_{eff}) ise etkin kırılma indisinin sanal (imajiner) kısmıdır.

$$S(\lambda) = \frac{\Delta\lambda_{peak}}{\Delta n_a} (\text{nm/RIU}) \quad (3)$$

Burada, Δn_a etkin kırılma indisindeki değişimi ve $\Delta\lambda_{peak}$ yayılım kayıplarının tepe noktaları arasındaki değişimi göstermektedir.

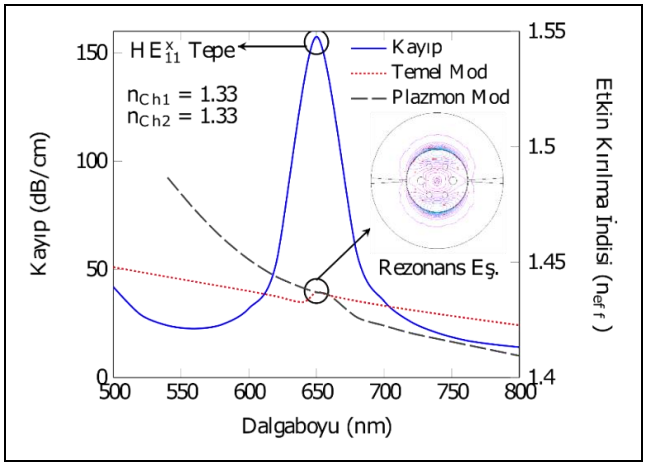
Algılayıcı tarafından algılanabilecek en düşük rezonans dalga boyundaki değişim miktarı çözünürlük (R) olarak adlandırılmaktadır. Algılayıcı duyarlılığının çözünürlüğe olan oranı, algılayıcı algılama limitini belirleyen faktördür. Bu yüzden çözünürlük bu tip algılayıcılarda büyük önem arz etmektedir ve tasarımların yüksek duyarlılık ile düşük çözünürlükte olacak şekilde yapılmaları arzulanmaktadır [35]. Çözünürlüğü hesaplamak için aşağıda verilen bağıntı kullanılmıştır [35]:

$$R = \Delta n_a \frac{\Delta\lambda_{min}}{\Delta\lambda_{peak}} \; (\text{RIU}^{-1}) \quad (4)$$

Buradav $\Delta\lambda_{\min}$ en düşük enstrümantal dalga boyundaki çözünürlüktür ve 0.1nm olarak kullanılmıştır.

3 Sayısal sonuçlar ve tartışma

Tasarlanan bu algılayıcı yapısının duyarlılığını etkileyen en önemli faktör, daha önce de belirtildiği gibi rezonans durumudur. Temel modda yayılan ışığın salınım frekansı ile plazmon modundaki YPD'lerin frekanslarının eşitlendiği anda rezonans eşleşmesi gerçekleşir. Burada, ışıktan YPD'lere en yüksek enerji aktarıldığından dolayı, çekirdek kısmında yayılan ışıktan dış katmana doğru oluşan yayılım kayıpları da en yüksek değere (tepe noktasına) ulaşır. Şekil 2'de, tasarlanan YPD temelli FKF algılayıcı yapısının rezonans durumu görülmektedir.

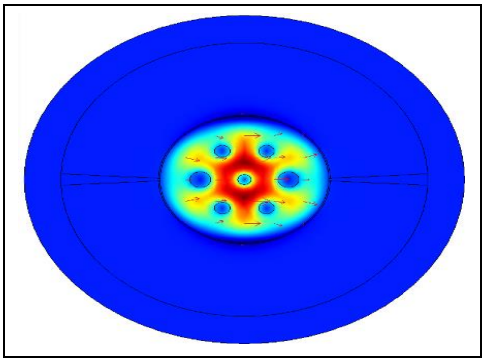


Şekil 2. Temel HE_{11}^x ve plasmon modun etkin kırılma indisi dağılımı ve rezonans eşleşmesi.

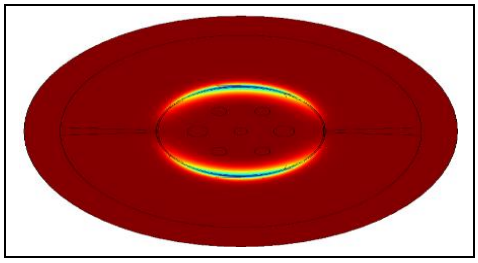
Figure 2. The resonance condition of fundamental HE_{11}^x mod with respect to effective refractive index.

Buna göre, temel mod (kırmızı noktalı) ile plazmon modun (siyah kesik çizgili) etkin kırılma indislerinin gerçek (Real) kısımlarının kesiştiği dalga boyunda, yayılım kayıplarının (mavi düz çizgi) en yüksek değere ulaştığı açıkça görülmektedir. Burada analit ile algılayıcı arasındaki etkileşimi artırmak için, güçlü modal alana ihtiyaç vardır [19]. Bundan

dolayı çalışmada sadece ışığın temel yayılım modu olan HE_{11}^{x} kullanılmıştır. Tüm analizler, ışık dalgası z-yönünde yayılırken x-y düzleminde gerçekleştirilmiştir. Birçok biyolojik ve kimsayal maddenin sahip olduğu kırılım indisi değerleri 1.30-1.40 aralığında olduğundan (su=1.33, cytop=1.34, ethanol=1.354, kanser hücreleri (1.36-1.40), vb.), çalışmada bu değerler seçilmiştir. Şekil 2'de görülen temel HE_{11}^{x} modundaki rezonans durumu, kanal -1 ve kanal-2 analit kırılma indisi değerleri 1.33'ken, 650 nm dalga boyunda sağlanmıştır. Tasarlanan FKF-YPR algılayıcı yapısının 540 nm dalga boyundaki manyetik alan dağılımı, Şekil 3'te gösterilmiştir.



(a)

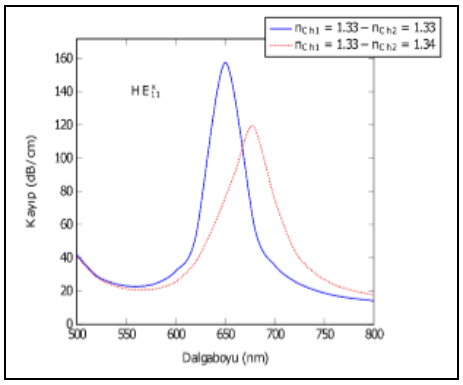


Şekil 3. FKF-YPR algılayıcı 540nm dalga boyunda manyetik alan dağılımı; (a): Temel (HE_{11}^{x}) ve (b): Plazmon-x mod (nCh1,nCh2=1.33).

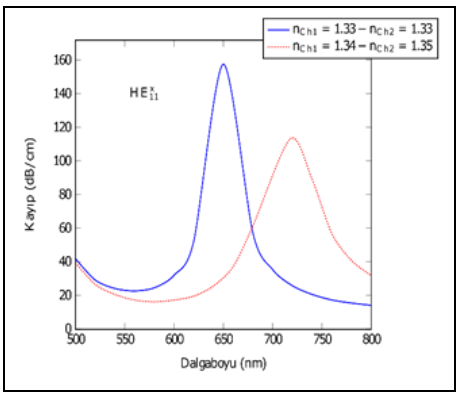
Figure 3. The magnetic distribution of PCF-SPR sensor at 540 nm wavelength; (a): Fundamental (HE_{11}^{x}) and (b): Plasmon-x mod (nCh1,nCh2=1.33).

Şekil 3(a)'da, manyetik alanın çekirdek bölgesinde yoğunlaşmasına rağmen hava deliklerinin arasından, metal katmanın bulunduğu bölgeye doğru kayıpların olduğu görülmektedir. Plazmon, uzunlamasına bir dalga olarak plazma üzerinde tanımlanmış dalga vektörleri ve frekansları olan elektron salınımlarıdır. Bu uzunlamasına salınımlar genellikle plazma salınımları olarak adlandırılırken, bu salınımların kuantumu plazmon olarak bilinir. Bu salınımlar metal ve dielektrik katmanlar arasında meydana geldiğinde yüzey plazmon dalgaları olarak adlandırılırlar. Bu uzunlamasına SPW'lerin elektrik alanı üstel bozunması ile sonuçlanan plasmon modu Şekil 3(b) elde edilir [37]. Şekil 3(b)'de, manyetik alanın metal tabakanın bulunduğu bölgelerde yoğunlaştığı görülmektedir. Dalga boyu arttıkça, Şekil 2'de görülen temel ve plasmon modlar arasında rezonans eşleşme gerçekleşir. YPR tipi sensörlerin temel çalışma prensibi, farklı temel ve plazmon mod rezonans frekanslarının eşleşmesi ile gerçekleşen ve rezonans eşleşmesi olarak adlandırılan durumun gerçekleştiği dalgaboyunun Şekil 2'de gösterilen, algılayıcıya farklı kırılım indisine sahip maddelerin girmesi ile bu frekans eşleşmesinin farklı dalga boylarına kaymasına neden olur. Burada farklı kırılım indisi, dalga boyunda ne kadar farklılık (kayma) gösterirse, denklem 3'ten de anlaşılabileceği gibi okadar yüksek duyarlılıkta algılayıcılar elde edilmiş olunur. Bu sebeple Şekil 3'te temel modun 540 nm'de çıktığı görülürken, diğer benzetim sonuçlarında rezonans 650-700 nm civarında gerçekleşmektedir.

Bilindiği gibi spektral duyarlılık, hedef bölgedeki etkin kırılma indisi değişimlerini algılamaya dayanmaktadır. Bu çalışmada, değişimlerin gerçekleşeceği hedef bölge için geniş iki adet analit kanalı kullanılmıştır. İki kanal kullanılmasındaki amaç, istenildiğinde her birine farklı analit konulabilmesine olanak sağlamaktır. Bu sayede aynı anda birden fazla analit analizi yapılabilmektedir. Bu bağlamda farklı etkin kırılma indisi değerlerine sahip analitlerin duyarlılık analizleri Şekil 4'te gösterilmiştir.



(a)

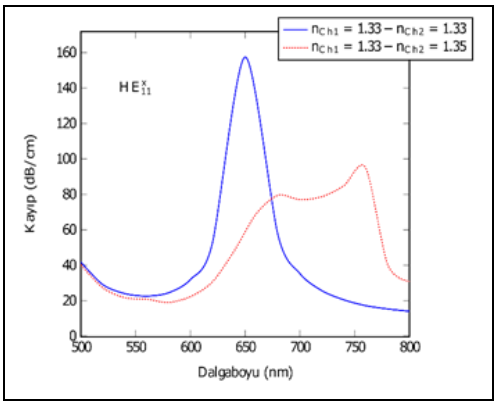


(b)

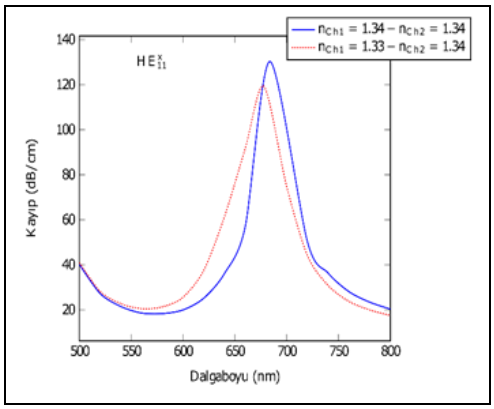
Şekil 4. Değişken kırılma indisi duyarlık analizleri; (a): nCh1,Ch2=1.33 ile nCh1=1.33–nCh2=1.34, (b): nCh1,Ch2=1.33 ile nCh1=1.34–nCh2=1.35, (c): nCh1,Ch2=1.33 ile nCh1=1.33–nCh2=1.35, (d): nCh1,Ch2=1.34 ile nCh1=1.33–nCh2=1.34, (e): nCh1,Ch2=1.34 ile nCh1=1.33–nCh2=1.35, (f): nCh1,Ch2=1.34 ile nCh1=1.34–nCh2=1.35, (g): nCh1,Ch2=1.35 ile nCh1=1.33–nCh2=1.34, (h): nCh1,Ch2=1.35 ile nCh1=1.33-nCh2=1.35.

Figure 4. The sensitivity analysis for refractive index variations; (a): nCh1,Ch2=1.33 ile nCh1=1.33–nCh2=1.34, (b): nCh1,Ch2=1.33 ile nCh1=1.34–nCh2=1.35, (c): nCh1,Ch2=1.33 ile nCh1=1.33–nCh2=1.35, (d): nCh1,Ch2=1.34 ile nCh1=1.33–nCh2=1.34, (e): nCh1,Ch2=1.34 ile nCh1=1.33–nCh2=1.35, (f): nCh1,Ch2=1.34 ile nCh1=1.34–nCh2=1.35, (g): nCh1,Ch2=1.35 ile nCh1=1.33–nCh2=1.34, (h): nCh1,Ch2=1.35 ile nCh1=1.33-nCh2=1.35.

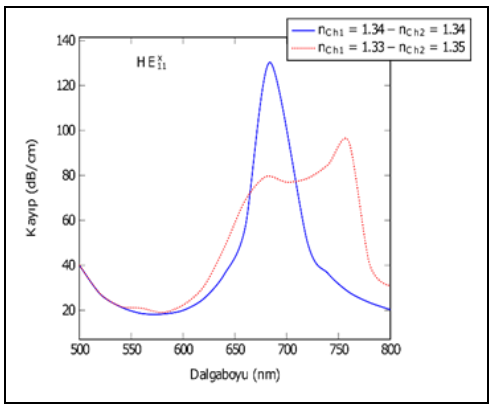
Şekil 4.ün devamı/*Şekil 4. Continued.*



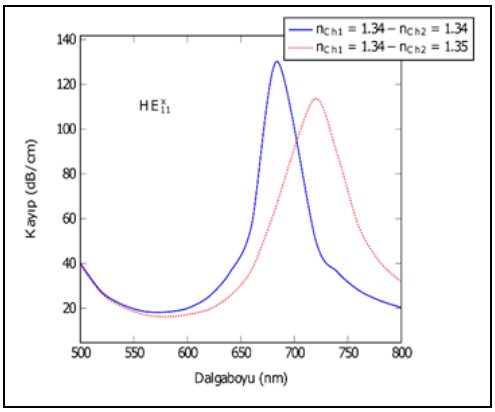
(c)



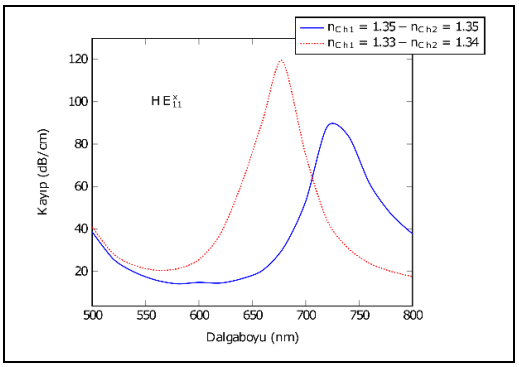
(d)



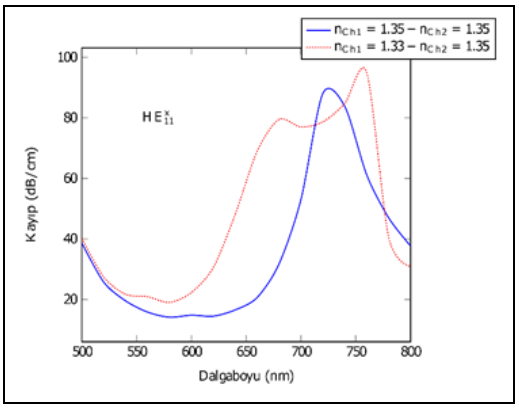
(e)



(f)



(g)



(h)

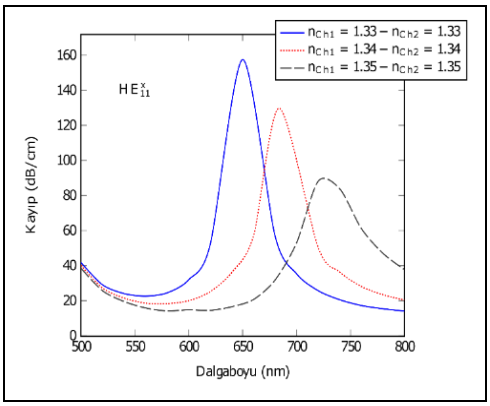
Şekil 4. Değişken kırılma indisi duyarlık analizleri;
(a): nCh1,Ch2=1.33 ile nCh1=1.33–nCh2=1.34,
(b): nCh1,Ch2=1.33 ile nCh1=1.34–nCh2=1.35,
(c): nCh1,Ch2=1.33 ile nCh1=1.33–nCh2=1.35,
(d): nCh1,Ch2=1.34 ile nCh1=1.33–nCh2=1.34,
(e): nCh1,Ch2=1.34 ile nCh1=1.33–nCh2=1.35,
(f): nCh1,Ch2=1.34 ile nCh1=1.34–nCh2=1.35,
(g): nCh1,Ch2=1.35 ile nCh1=1.33–nCh2=1.34,
(h): nCh1,Ch2=1.35 ile nCh1=1.33-nCh2=1.35.

Figure 4. The sensitivity analysis for refractive index variations;
(a): nCh1,Ch2=1.33 ile nCh1=1.33–nCh2=1.34,
(b): nCh1,Ch2=1.33 ile nCh1=1.34–nCh2=1.35,
(c): nCh1,Ch2=1.33 ile nCh1=1.33–nCh2=1.35,
(d): nCh1,Ch2=1.34 ile nCh1=1.33–nCh2=1.34,
(e): nCh1,Ch2=1.34 ile nCh1=1.33–nCh2=1.35,
(f): nCh1,Ch2=1.34 ile nCh1=1.34–nCh2=1.35,
(g): nCh1,Ch2=1.35 ile nCh1=1.33–nCh2=1.34,
(h): nCh1,Ch2=1.35 ile nCh1=1.33-nCh2=1.35.

Şekil 4(a),(b) ve (c)'de, mavi düz çizgi her iki analit kanalına 1.33, kırmızı noktalı çizgi ise Kanal -1 ve Kanal-2'ye farklı etkin kırılma indisine sahip analitler konulduğunda elde edilen sonuçlar göstermektedir. Benzer şekilde, Şekil 4(d), (e) ve (f) de mavi düz çizgi, her iki analit kanalına 1.34 ve Şekil 4(g) ve (h) ise 1.35 kırılma indisli analit varken elde edilen sonuçları sunmaktadır. Tüm grafiklerde, etkin kırılma indisindeki değişimin beklenildiği gibi rezonans dalgaboyunda kaymalara neden olduğu görülmüştür. Ayrıca kırılma indislerindeki değişim oranına göre eşleşme enerjisinin de kayıp oranlarına etkisinden dolayı farklılıklar gösterdiği görülmüştür. Son olarak Şekil 4'te görüldüğü üzere, Kanal 1'de 1.33 Kanal 2'de ise 1.35 kırılma indisli analit kullanıldığında kayıp eğrisi beklendiği gibi çıkmamaktadır. Bunun sebebi ise analit kırılma indisleri arasında farkdan dolayı olduğu tahmin

edilmektedir. Bu senaryoda tam rezonans eşleşmesinin sağlanamadığıve kısmen 2 tepe noktası- oluştuğu görülmektedir.

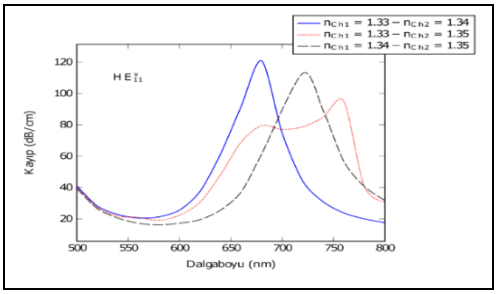
Şekil 5'te, her iki analit kanalına aynı etkin kırılma indisi değerine sahip analitler konulduğunda, rezonans eşleşmesinin dalga boyuna göre değişimi gösterilmiştir. Burada etkin kırılma indisi 1.33'ten 1.35'e doğru artarken, rezonans durumunun da Şekil 4'e benzer şekilde daha yüksek dalga boyuna kaydığı gözlemlenmektedir. Ayrıca, eşleşme enerjisinin de düştüğü görülmüştür. Bu bağlamda, en iyi eşleşme seviyesi her iki kanalın da 1.33 kırılma indisli analitle doldurulduğunda elde edildiğini görmekteyiz.



Şekil 5. Her iki analit kanalına, aynı etkin kırılma indisli analit konulduğunda algılayıcı analizi.

Figure 5. The sensitivity analysis for same refractive indexes in both analyte channels.

Şekil 6'da ise, her bir analit kanalına farklı değerlerde analit konulduğunda rezonans durumunun dalgaboyuna göre değişimi gösterilmektedir. Burada mavi düz çizgi ile gösterilen, 1.33-1.34 etkin kırılma indisi değerleri arasında fark az olduğu için tek ve yüksek kayıp değere sahip tepe noktası çıktığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde, 1.34-1.35 etkin kırılma indisi değerleri arasında da benzer ilişki olduğundan, siyah kesik çizgi ile gösterilen yüksek kayıp değerine sahip tek bir tepe noktası elde edilmiştir. Öte yandan, etkin kırılma indisleri arasında daha büyük fark olan 1.33-1.35 senaryosu incelendiğinde, iki farklı tepe noktası elde edilmiştir. Daha önce bahsedildiği gibi bu durumu tam rezonans eşleşmesi sağlanamamasından kaynaklandığını görüyoruz. Tüm senaryolar için rezonans eşleşmesi sırasında enerji ikiye bölündüğü için her iki kanalda da ayni analit kullanıldığı durumlara göre kayıp değerlerinin de düştüğü görülmüştür.



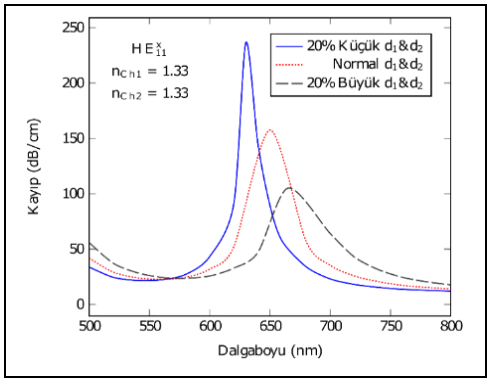
Şekil 6. Her iki analit kanalına, farklı etkin kırılma indisli analit konulduğunda algılayıcı analizi.

Figure 6. The sensitivity analysis for different refractive index values in both analyte channels.

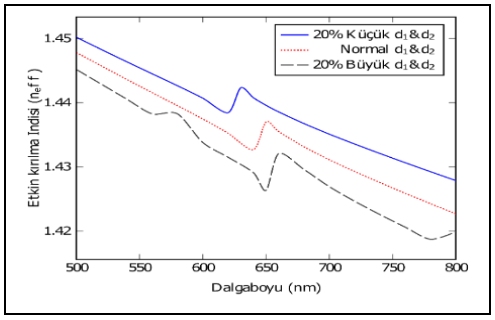
FKF'de ışığın yayılımını etkileyen en önemli faktörlerden biri de hava deliklerinin çapıdır. Dolayısıyla, YPR temelli FKF algılayıcılarında hava deliklerinin büyüklüğü, algılayıcı rezonans durumunu doğrudan etkileyen temel faktörlerden biridir. Gereğinden büyük delik çapı, ışığın çekirdek bölgesine hapsedilmesine, diğer bir deyişle çekirdekten dışarı ışık sızmamasına ve ışığın plazmon bölgesindeki YPD dalgalarıyla eşleşmemesine veya çok düşük enerji ile eşleşmesine (çok küçük tepe noktası) yol açar. Bu da tepe noktasını algılamada zorluk yaratacağından spektral metotla algılamayı zorlaştırır.

Diğer yandan gereğinden daha küçük hava delikleri, çok fazla miktarda ışığın çekirdek bölgesinden YPD'lerin bulunduğu kısma doğru sızmasına neden olur. Bu da çok yüksek miktarda eşleşme enerjisi ve sonuç olarak yüksek değerde yayılım kaybına yol açar.

Yüksek kayıp değerleri de algılayıcı kavrama uzunluğunu negatif yönde etkilediğinden dolayı, algılayıcı performansının düşmesine neden olur [9]. Bundan dolayı Şekil 7'de, d_1 ve d_2 hava delikleri büyüklüklerinin tasarlanan algılayıcı yapısının performansına olan etkisi her iki kanal da 1.33 kırılma indisli analit ile doldurularak incelenmiştir. Burada beklenildiği gibi, hava deliklerinin çapı %20 küçültüldüğünde kayıp değerlerinin çok yükseldiği, %20 büyültüldüğünde ise tepe noktasının normalden fazla düştüğü görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 7. Hava deliği çapının FKF-YPR algılayıcı etkisi; (a): Kayıp ve (b): Etkin kırılma indisi gerçel kısım (n_{Ch1},n_{Ch2}=1.33).

Figure 7. The effect of air hole diameter on the PCF-SPR sensor sensitivity (a): Loss and (b): Real part of effective refractive index (n_{Ch1},n_{Ch2}=1.33).

Aynı zamanda Şekil 7(b)'de etkin kırılma indisleri değişimi grafiğinden de görülebileceği gibi, delik çapı küçüldükçe, etkin kırılma indisinin gerçel kısmı da düşüş göstermektedir.

Rezonans eşleşmesinin gerçekleştiği dalgaboyunda etkin kırılma indisinin tepe noktaları oluşmaktadır.

Bunun da Şekil 7(a)'da görülen tepe noktalarının farklı dalga boylarına kaymasına, başka bir deyişle rezonans eşleşmesinin farklı dalga boylarında gerçekleşmesine neden olduğu görülmüştür. Ayrıca, grafiksel olarak sunulmasa da, d_1 ve d_2 hava delikleri büyüklüklerinin algılayıcı performansına olan etkisi kanallar farklı analit ile doldurulduğunda benzerlik göstermektedir.

Şekil 4, 5 ve 6'da gösterilen grafiklerin, spektral metot ile yapılan duyarlılık analiz sonuçları Tablo 1'de özet olarak sunulmuştur.

Tablo 1. Algılayıcı spektral duyarlılık ve çözünürlük analizi.

Table 1. Spectral Sensitivity and resolution analysis of sensor.

	Kırılma İndisi	Duyarlılık (nm/RIU)	Çözünürlük (x10^{-5}RIU)
Kanal 1 - 2	1.33-1.33	3400	2.94
Kanal 1 - 2	1.34-1.34		
Kanal 1 - 2	1.34-1.34	3600	2.8
Kanal 1 - 2	1.35-1.35		
Kanal 1 - 2	1.33-1.33	2800	3.57
Kanal 1 - 2	1.33-1.34		
Kanal 1 - 2	1.33-1.33	6800	1.47
Kanal 1 - 2	1.34-1.35		
Kanal 1 - 2	1.33-1.33	4500	2.22
Kanal 1 - 2	1.33-1.35		
Kanal 1 - 2	1.34-1.34	600	1.67
Kanal 1- 2	1.33-1.34		
Kanal 1- 2	1.34-1.34	5600	1.79
Kanal 1- 2	1.33-1.35		
Kanal 1- 2	1.34-1.34	3400	2.94
Kanal 1- 2	1.34-1.35		
Kanal 1- 2	1.35-1.35	4200	2.38
Kanal 1- 2	1.33-1.34		
Kanal 1- 2	1.35-1.35	1000	1.1
Kanal 1- 2	1.33-1.35		
Kanal 1- 2	1.33-1.34	4000	2.5
Kanal 1- 2	1.34-1.35		
Kanal 1- 2	1.34-1.35	1100	9.09
Kanal 1- 2	1.33-1.35		
Kanal 1- 2	1.33-1.34	3100	3.23
Kanal 1- 2	1.33-1.35		

Her grafiğin kayıp karakteristiğine göre, x-polarize temel modu için duyarlılık sonuçları hassasiyetle hesaplanmıştır. Tablodan görüldüğü gibi, öncelikle kanal-1 ve kanal- 2 kırılma indisleri sabitken, sonra kanal-1 sabit, kanal-2 değişken ve son olarak hem kanal-1 hem de kanal-2 kırılma indislerinin değişken olduğu durumlar için duyarlılık analizleri yapılmıştır.

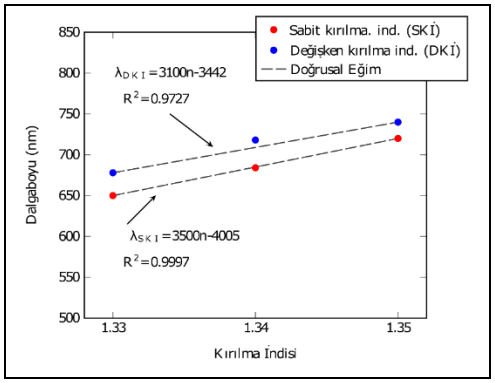
Elde edilen sonuçlara göre, Şekil 4(b)'de sunulan kayıp tepe noktaları denklem 3 ve 4 kullanılarak, en yüksek duyarlılık değeri 6800 nm/RIU ve 1.47 x10^{-5} RIU olarak hesaplanmıştır. Diğer yandan tasarlanan algılayıcının ortalama duyarlılığı ise, sabit ve değişken kırılma indisine göre denklem 5 ve 6'da hesaplanmıştır.

$$\lambda_{SKI} = 3500n - 4005, \quad 1.33 \leq n_a \leq 1.35 \qquad (5)$$

$$\lambda_{DKI} = 3100n - 3442, \quad 1.33 \leq n_a \leq 1.35 \qquad (6)$$

Burada, her iki analit kanalındaki etkin kırılma indisi değerinin aynı olduğu durumlar sabit kırılma indisi olarak adlandırılmış ve kısaca SDK olarak gösterilmiştir. Öte yandan, herhangi bir analit kanlındaki kırılma indisi değerinin farklı olduğu durumlar ise değişken kırılma indisi olarak adlandırılmış ve kısaca DKI olarak gösterilmiştir. Buna bağlı olarak doğrusal eğim denklemlerinin gösterildiği Şekil 8'den de görülebileceği gibi, sabit kırılma indisli değerlerde ortalama 3500 nm/RIU'lik duyarlılığa ulaşılırken, değişken olanda ise bu değer 3100 nm/RIU olarak hesaplanmıştır.

Algılayıcı uygulamalarında doğrusal eğim grafiği, algılayıcı kararlılığını gösteren faktördür. Dolayısıyla, yüksek doğrusallık, yüksek kararlılığı göstermektedir. Yine Şekil 8'den görülebileceği gibi, tasarlanan algılayıcı sabit kırılma indisli değerler için yüksek doğrusallık değerine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca, beklenildiği gibi analit kanallarındaki kırılma indisi değerlerinin farklılık gösterdiği durumlarda bunun az da olsa düştüğü görülmüştür.



Şekil 8: Sabit ve değişken kırılma indisi değişimine göre, algılayıcıün doğrusal eğim analizi.

Figure 8. The linearity analysis of proposed sensor with respect to same and different refractive index.

Elde edilen duyarlılık sonuçlarına göre, tasarlanan algılayıcı Tablo 2'de gösterilen benzer yapıdaki çoklu-analit algılayıcılarla karşılaştırılabilir olduğu görülmüştür. Tasarlanan algılayıcının, diğerlerine göre daha yüksek duyarlılığa sahip olmasının yanında, geometrik yapısının günümüz şartlarında üretime daha elverişli olması, altın ile gümüş'ü bütünleştirmenin kolaylığı ile birleştiğinde onu diğer tasarımlardan farklı kılmaktadır.

Tablo 2. Çoklu analit FKF tabanlı YPR algılayıcı performans kıyaslama tablosu.

Table 2. Performance comparison table of multi-analyte PCF-SPR sensor.

Tasarım	Plasmonik Madde	Dalgaboyu Aralığı	Maksimum Duyarlılık (nm/RIU)	Ref.
Dört Kanal	Au/$Ta2TO5$	500-950	4600	[24]
Çift Kanal	Au-ITO	400-1000	1963.2	[38]
Çift Kanal	Au-ITO-Au	500-1000	2496	[27]
Çift Kanal	ITO/$Ta2TO5$	1200-2100	5000	[39]
Çift Kanal	Au-Ag	500-800	4250	[40]
Çift Kanal	Au-Ag	500-800	6800	.....

Tasarlanan yapının çoklu analit algılama yeteneği birçok endüstriyel sektörde aranan bir özelliktir [3],[41],[42]. Bu tür algılayıcı yapılar, daha geniş kimyasal ve biyolojik numuneler için analitlerin saptanmasında kullanılabilir. YPR FKF algılayıcıları için olası bir geliştirme yönü, bakım noktası teşhisi için taşınabilir ve hızlı çip üzerinde laboratuvar testleridir. Amaç, mevcut benimsenen floresan algılamayı, farklı analit

türlerini algılama yeteneğini geliştirebilecek, test maliyetlerini azaltabilecek ve numune hazırlama sürecini azaltarak zamandan tasarruf sağlayabilecek etiketsiz algılama ile değiştirmek olabilir. Floresan algılamanın aksine, YPR tabanlı FKF yapıları, kesintisiz izleme uygulamaları için yeniden kullanılabilir olacak şekilde yapılandırılabilir [42]. FKF tabanlı YPR algılayıcı yapıları gıda güvenliği, su testi, sıvı algılama, tıbbi teşhis, ilaç tespiti, biyogörüntüleme, biyolojik analit ve kimyasal tespit dahil çok geniş uygulama yelpazesine sahiptir.

Son olarak tasarlanan algılayıcının gerçek hayatta üretile bilirliği değerlendirildiğinde; FKF'in kolaylıkla 'stack and draw' metodu ile üretilebileceği [43],[44], plazmonik maddeler olan altın ve gümüşü bütünleştirmek için ise sırasıyla 'High-pressure chemical vapour deposition' ve 'electron beam evaporation' yöntemlerinin kullanılabileceği bilinmektedir [45],[46].

4 Sonuçlar

Bu çalışmada FKF temelli YPR algılayıcı tasarlanıp, Tam Vektörel- Sonlu Öge Yöntemi kullanılarak sayısal analizleri yapılmıştır. Tek bir algılayıcı yapısının aynı anda iki farklı analit geçmesi durumunda, etkin kırılma indisi değişimine dayalı yayılım kayıpları ve rezonans dalga boyundaki değişim gözlemlenmiştir. Kırılma indisi 1.33 ile 1.35 arasında, x-polarize temel mod için spektral duyarlılık ve çözünürlük sonuçları elde edilmiştir. Buna bağlı olarak, en yüksek 6800 nm/RIU duyarlılık ile $1.47x10^{-5}$ RIU çözünürlük değerlerine ulaşılırken, analit kırılma indisi değerleri kanal-1 ve kanal- 2'de sabit olduğu zaman ortalama 3500 nm/RIU, farklı olduğu zaman ise 3100 nm/RIU olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, kılıf bölgesindeki hava deliklerinin algılayıcı yapısının temel yayılım hareketlerini nasıl etkilediği sunulmuştur. Tasarlanan algılayıcı yapısı, duyarlılık ve iyi seviye çözünürlük özellikleriyle birçok endüstriyel sektörde kimyasal ve biyo-kimyasal uygulamalarda kullanılmaya uygundur. Elde edilen değerlerin daha önce yayımlanan benzer çalışmalar ile karşılaştırılabilir olduğu gözlemlenmiştir.

5 Conclusions

In this study, PCF-based SPR sensor was designed and its numerical analysis was performed using the Full Vector-Finite Element Method. The propagation losses based on effective refractive index change and change in resonance wavelength are observed, when two different analyte are processed simultaneously. The Spectral sensitivity and resolution results were obtained for x-polarized fundamental mode with refractive index between 1.33 and 1.35. Accordingly, 1.47x10 nm5 RIU resolution values with the highest sensitivity of 6800 nm/RIU are reached. An average sensitivity of 3500 nm/RIU and 3100 nm/RIU are achieved when analyte refractive index values are fixed in channel-1 and channel-2. In addition, the effects of the air hole sizes in the cladding region over the fundamental propagation characteristics of the structure is presented. The sensitivity and satisfying resolution level of the proposed sensor structure is suitable for use in chemical and bio-chemical applications in many industrial sectors. It has been observed that the values obtained in this work are comparable with similar studies published previously.

6 Teşekkür

Yazarlar isimsiz yorumculara değerli önerileri için teşekkürlerini sunar.

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Hüseyin ADEMGİL fikrin oluşması, tasarımın yapılması ve literatür taraması başlıklarında; Ahmet YASLI fikrin geliştirilip tasarım haline getirilmesinde, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve sonuçların incelenmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

9 Kaynaklar

[1] Zhao Y, Deng ZQ, Li J. "Photonic crystal fiber based surface plasmon resonance chemical sensors". *Sensors and Actuators B: Chemical*, 202, 557-567, 2014.

[2] Lin Y, Zou Y, Lindquist RG. "A reflection-based localized surface plasmon resonance fiber-optic probe for biochemical sensing". *Biomedical optics express*, 2(3), 478-484, 2011.

[3] Chen H, Hou Y, Ye Z, Wang H, Koh K, Shen Z, Shu Y. "Label-free surface plasmon resonance cytosensor for breast cancer cell detection based on nano-conjuğation of monodisperse magnetic nanoparticle and folic acid". *Sensors and Actuators B: Chemical*, 201, 433-438, 2014.

[4] Otto A. "Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection". *Zeitschrift für Physik A Hadrons and nuclei*, 216(4), 398-410, 1968.

[5] Kretschmann E, Raether H. "Radiative decay of non radiative surface plasmons excited by light". *Zeitschrift für Naturforschung A*, 23(12), 2135-2136, 1968.

[6] Hasan MR, Akter S, Rifat AA, Rana S, Ahmed K, Ahmed R, Subbaraman H, Abbott D. "Spiral photonic crystal fiber-based dual-polarized surface plasmon resonance biosensor". *IEEE Sensors Journal*, 18(1), 133-140, 2017.

[7] Jorgenson R, Yee S. "A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance". *Sensors and Actuators B: Chemical*, 12(3), 213-220, 1993.

[8] Knight J, Birks T, Russell PSJ, Atkin D. "All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding". *Optics Letters*, 21(19), 1547-1549, 1996.

[9] Hassani A, Skoroboğatiy M. "Design of the microstructured optical fiber-based surface plasmon resonance sensors with enhanced microfluidics". *Optics Express*, 14(24), 11616-11621, 2006.

[10] Wong WC, Chan CC, Boo JL, Teo ZY, Tou ZQ, Yang HB, Li CM, Leong KC. "Photonic crystal fiber surface plasmon resonance biosensor based on protein g immobilization". *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 19(3), 1-7, 2013.

[11] Yasli A, Ademgil H. "Effect of plasmonic materials on photonic crystal fiber based surface plasmon resonance sensors". *Modern Physics Letters B*, 33(13), 1-15, 2019.

[12] Dhar GB, Roli V, Kumar SS. *Fiber Optic Sensors Based on Plasmonics.* 1st ed. Singapore, World Scientific, 2015.

[13] Akowuah EK, Gorman T, Ademgil H, Haxha S, Robinson GK, Oliver JV. "Numerical analysis of a photonic crystal fiber for biosensing applications". *IEEE Journal of Quantum Electronics,* 48(11), 1403-1410, 2012.

[14] Dash JN, Jha R. "Graphene-based birefringent photonic crystal fiber sensor using surface plasmon resonance". *IEEE Photonics Technology Letters*, 26(11), 1092-1095, 2014.

[15] Dash JN, Jha R. "On the performance of graphene-based d-shaped photonic crystal fibre biosensor using surface plasmon resonance". *Plasmonics*, 10(5), 1123-1131, 2015.
[16] Hameed MFO, Alrayk YK, Shaalan AA, El Deeb WS, Obayya SS. "Design of highly sensitive multichannel bimetallic photonic crystal fiber biosensor". *Journal of Nanophotonics*, 10(4), 1-15, 2016.
[17] Yasli A, Ademgil H, Haxha S. "D-shaped photonic crystal fiber based surface plasmon resonance sensor". *IEEE 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference*, İzmir, Turkey, 2-5 May 2018.
[18] Liu C, Wang F, Zheng S, Sun T, Lv J, Liu Q, Yang L, Mu H, Chu PK. "Analysis of a highly birefringent asymmetric photonic crystal fibre based on a surface plasmon resonance sensor". *Journal of Modern Optics*, 63(12), 1189-1195, 2016.
[19] Rifat AA, Mahdiraji GA, Ahmed R, Chow DM, Sua Y, Shee Y, Adikan FM. "Copper-graphene-based photonic crystal fiber plasmonic biosensor". *IEEE Photonics Journal*, 8(1), 1-8, 2016.
[20] Hasan MR, Akter S, Rifat AA, Rana S, Ali S. "A highly sensitive gold-coated photonic crystal fiber biosensor based on surface plasmon resonance". *Photonics*, 4(1), 1-11, 2017.
[21] Dash JN, Das R, Jha R. "Azo coated microchannel incorporated pcf-based spr sensor: A numerical analysis". *IEEE Photonics Technology Letters*, 30(11), 1032-1035, 2018.
[22] Vala M, Chadt K, Piliarik M, Homola J. "High-performance compact spr sensor for multi-analyte sensing". *Sensors and Actuators B: Chemical*, 148(2), 544-549, 2010.
[23] Zhang Y, Zhou C, Xia L, Yu X, Liu D. "Wagon wheel fiber based multichannel plasmonic sensor". *Optics express*, 19(23), 22863-22873, 2011.
[24] Otupiri R, Akowuah EK, Haxha S. "Multi-channel spr biosensor based on pcf for multi-analyte sensing applications". *Optics express*, 23(12), 15716-15727, 2015.
[25] Azzam SI, Hameed MFO, Shehata REA, Heikal A, Obayya SS. "Multichannel photonic crystal fiber surface plasmon resonance based sensor". *Optical and Quantum Electronics*, 48(2), 1-11, 2016.
[26] Kaur V, Singh S. "A dual-channel surface plasmon resonance biosensor based on a photonic crystal fiber for multianalyte sensing". *Journal of Computational Electronics,* 18(1), 319-328, 2019.
[27] Lu M, Peng W, Liu Q, Liu Y, Li L, Liang Y, Masson JF. "Dual channel multilayercoated surface plasmon resonance sensor for dual refractive index range measurements". *Optics express*, 25(8), 8563-8570, 2017.
[28] Prabhakar G, Peer A, Kumar A, Rastoği V. "Finite element analysis of solid-core photonic crystal fiber". *IEEE 2012 Students Conference on Engineering and Systems*, Allahabad, India, 16-18 March 2012.
[29] Dickinson EJ, Ekström H, Fontes E. "Comsol multiphysics R: Finite element software for electrochemical analysis. a mini-review". *Electrochemistry communications*, 40, 71-74, 2014.
[30] Li W, Chen D, Qinling Z. "Large-mode-area single mode-output Neodymium-doped silicate glass all-solid photonic crystal fiber". *Scientific Reports*, 5(1), 1-5, 2015.
[31] Shevchenko YY, Albert J. "Plasmon resonances in gold-coated tilted fiber bragg gratings". *Optics letters*, 32(3), 211-213, 2007.
[32] Philipp H, Palik ED. *Handbook of Optical Constants of Solids.* 1st ed. New York, USA, Academic Press, 1985.
[33] Anders Bjarklev ASB, Broeng J. *Photonic Crystal Fibres*. 1st ed. Massachusetts, USA, Kluwer Academic Publishers, 2003.
[34] Hao C, Lu Y, Wang M, Wu B, Duan L, Yao J. "Surface plasmon resonance refractive index sensor based on active photonic crystal fiber". *IEEE Photonics Journal*, 5(6), 1-9, 2013.
[35] Liu C, Yang L, Su W, Wang F, Sun T, Liu Q, Mu H, Chu PK. "Numerical analysis of a photonic crystal fiber based on a surface plasmon resonance sensor with an annular analyte channel". *Optics Communications*, 382, 162-166, 2017.
[36] Klantsataya E, Jia P, Ebendorff-Heidepriem H, Monro TM, François A. "Plasmonic fiber optic refractometric sensors: From conventional architectures to recent design trends". *Sensors*, 17(1), 1-23, 2016.
[37] Ferrell, Richard A. "Predicted radiation of plasma oscillations in metal films" *Physical Review*, 111(5), 1214-1222,1958.
[38] Li L, Zhang X, Liang Y, Guang J, Peng W. "Dual-channel fiber surface plasmon resonance biologıcal sensor based on a hybrid interroğation of intensity and wavelength modulation" *Journal of Biomedical Optics*, 21(12), 1-6, 2016.
[39] Kaur V, Singh S. "Performance analysis of multichannel surface plasmon resonance sensor with dual coating of conducting metal oxide". *Journal of Nanophotonics*, 12(1), 1-14, 2018.
[40] Yasli A, Ademgil H. "Multianalyte sensing analysis with multilayer photonic crystal fiber-based surface plasmon resonance sensor". *Modern Physics Letters B*, 34(33), 1-13, 2020.
[41] Caucheteur C, Guo T, Albert J. "Review of plasmonic fiber optic biochemical sensors: Improving the limit of detection". *Analytical Bioanalytical Chemistry*, 407(14), 3883-3897, 2015.
[42] Rifat A, Ahmed R, Yetisen AK, Hutt H, Sabouri A, Mahdiraji GA, Yun SH, Mahamd Adikan FR. "Photonic crystal fiber based plasmonic sensors". *Sensors and Actuators B: Chemical*, 243, 311-325, 2017.
[43] Rifat A, Mahdiraji GA, Sua Y, Shee Y, Ahmed R, Chow DM, Adikan FM. "Surface plasmon resonance photonic crystal fiber biosensor: a practical sensing approach". *IEEE Photonics Technology Letters*, 27(15), 1628-1631, 2015.
[44] Yajima T, Yamamoto J, Ishii F, Hirooka T, Yoshida M, Nakazawa M. "Low-loss photonic crystal fiber fabricated by a slurry casting method". *Optics Express*, 21(25), 30500-30506, 2013.
[45] Takeyasu N, Tanaka T, Kawata S. "Metal deposition deep into microstructure by electroless plating". *Japanese journal of applied physics,* 44(8), 1134-1137, 2005.
[46] Harrington JA. "A review of ir transmitting, hollow waveguides". *Fiber & Integrated Optics*, 19(3), 211-227, 2000.