



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Fiber Optik Fabry-Perot Akustik Sensörler için Yeni Bir Diyafram Malzemesi Olarak 2D GaSe Benzetimi

Şekip Esat HAYBER^a, Timuçin Emre TABARU^b, Umut AYDEMİR^{a,*}, Ömer Galip SARAÇOĞLU^c

^a Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Kaman MYO, Ahi Evran Üniversitesi, Kırşehir, TÜRKİYE

^b Klinik Mühendisliği Araştırma ve Uygulama Merkezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, TÜRKİYE

^c Elektrik-Elektronik Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: umutaydemir@gmail.com

ÖZET

Algılanacak akustik/basınç sinyalinin şiddet ve frekans değerine duyarlı uçlar üretmek diyafram tasarımının doğru yapılmasıyla sağlanır. Kullanılan diyafram malzemesinin hem geometrik boyutları hem de yapısal özellikleri (yoğunluk, Young modülü, Poisson oranı gibi) sensör performansını etkileyen unsurlardır. Bu durumdan ötürü literatürde farklı tipte diyafram malzemeleri araştırılmaktadır. Bu çalışmada diyafram tabanlı fiber optik Fabry-Perot (FP) akustik sensörlerde kilit rol oynayan diyafram performansı üzerine hesaplamalar verilmiştir. Hesaplamalarda diyafram olarak grafen benzeri iki boyutlu (2D) Galyum Selenit (GaSe) kullanılmıştır. 2D malzemeler sınıfına ait GaSe malzemesi fiber optik FP akustik sensör uç tasarımında diyafram olarak ilk defa hesaplanmış ve benzetim yoluyla sensör ucunun performansı teorik olarak elde edilmiştir. Teorik hesaplamalar ve benzetimler neticesinde 2D GaSe malzemesi fiber optik FP akustik sensör uç üretiminde diyafram olarak kullanılabilirliği öngörülmüştür. Oluşturulan uçların frekans cevapları ve akustik basınca duyarlılığı teorik olarak hesaplanmış ve literatürde kullanılan diğer geleneksel malzemelerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak verilmiştir. Sensör görünürlüğü ve frekansı açısından GaSe malzemesinin kullanım alanına göre alternatifler sunduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Akustik algılama, Fabry-Perot (FP) interferometresi, Galyum Selenit (GaSe), fiber optik sensör

A New Diaphragm Material for Fiber Optic Fabry-Perot Acoustic Sensors with 2D GaSe

ABSTRACT

In order to produce tips which is sensitive to the intensity and frequency of the acoustic/pressure signal suitable diaphragm design is essential. Both the geometric dimensions and the structural properties (density of material, Young's modulus and Poisson's ratio) of diaphragm materials are affecting the sensor performance. Therefore different types of diaphragm materials are being investigated in the literature.

In this study, the performance of diaphragm-based fiber optic Fabry-Perot (FP) acoustic sensors is discussed. Two-dimensional (2D) Gallium Selenide (GaSe) like graphene were used as diaphragms in the calculations. Family of 2D materials like GaSe was firstly calculated as diaphragm material in the fiber optic FP acoustic sensor tip design and the performance of the sensor tip was theoretically simulated. As a result of theoretical calculations and simulations, it is predicted that 2D GaSe material could be used by production of fiber optic FP sensors as a diaphragm material. The frequency responses and the acoustic pressure sensitivity of the designed tips are theoretically calculated and compared with tips produced conventional materials in the literature. In terms of sensor visibility and frequency response, it has been shown that GaSe offers alternatives depending on the field of use.

Keywords: Acoustic detection, Fabry-Perot (FP) interferometer, Gallium selenide (GaSe), fiber optic sensor

I. GİRİŞ

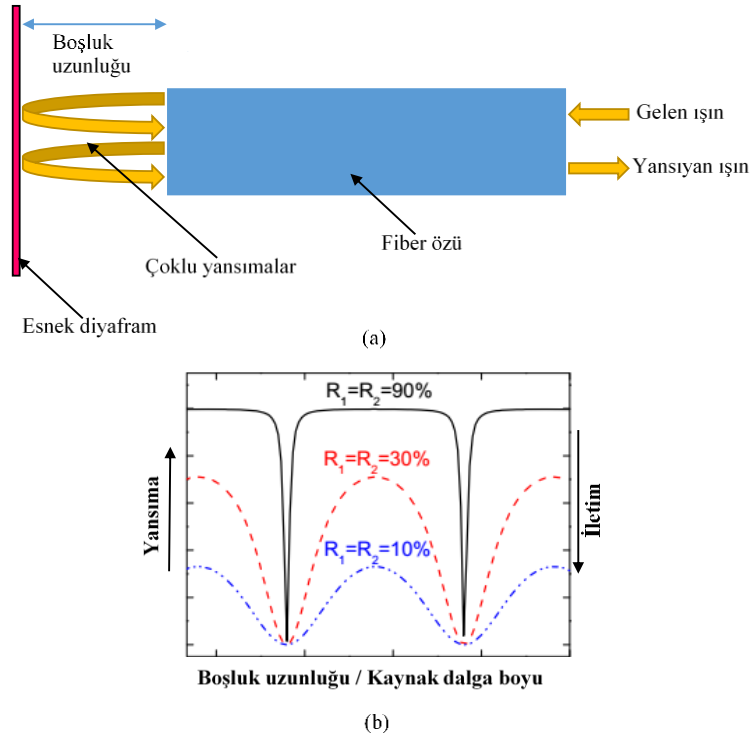
Modern cihazlarda ölçüm teknolojilerinin geliştirilmesiyle, fiber optik sensörler giderek daha çok dikkat çekmeye başlamıştır. Fiber optik interferometrik sensörler, elektromanyetik parazitlere karşı bağımsızlık, çok çeşitli ölçütlere yanıt verme yeteneği, çok yüksek çözünürlük, yüksek doğruluk, küçük boyut gibi geleneksel sensörlere kıyasla birçok avantajı beraberinde getirir. Fiber optik interferometrik sensörler, karmaşık materyaller, büyük inşaat mühendisliği yapıları, uzay araçları ve uçaklar gibi yapıların sağlıklı bir şekilde izlenmesi için başarıyla ticarileştirilmiş ve yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu durum söz konusu akıllı materyallerin ve yapıların geliştirilmesine yol açacaktır [1]. Fiber optik dışta etkileşimli Fabry-Perot (FP) interferometrik sensörler, bu tür uygulamalar için en iyi adaylardan biridir [2]. FP interferometresine dayalı basınç sensörleri statik ve dinamik basınç ölçümleri elde etmek için umut verici sonuçlar vermiştir [3, 4].

FP sensörü tipik olarak bir fiber uç yüzeyi ile akustik/basınç sinyaline duyarlı diyaframdan oluşur. Diyaframın FP sensöründeki basınç duyarlılığı, FP boşluğunun uzunluk değişiminin basınca oranı olarak tanımlanmaktadır [5]. FP sensörün basınca duyarlılığını belirleyen temel unsurlar kullanılan malzemeler ile diyafram kalınlığı ve çapıdır. Literatüründe minyatür FP basınç algılayıcılarının birçoğunda, metal, SiO₂/silika, polimer, gümüş ve grafen membran gibi basınca duyarlı farklı elastik diyafram malzemeleri kullanılmıştır [6-11]. Bu çalışmada ise fiber optik FP akustik sensör uçlarının diyafram malzemesi olarak daha önce denenmeyen 2D GaSe malzemesini kullanarak teorik ve benzetim hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Benzetim işlemleri sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS programından faydalanarak gerçekleştirilmiştir.

II. YÖNTEM

Optik girişim teorisi ve diyafram dinamik titreşim analizi, diyafram tabanlı fiber optik interferometrik akustik sensörlerin iki temel taşıını oluşturmaktadır [12]. Bu iki prensibi birleştiren akustik sensör sisteminin akustik basınca duyarlılığı ve frekans cevabı nicel olarak analiz edilebilir ve bu analiz neticeleri sensör sistem parametrelerinin (diyaframın geometrik boyutları ve yapıldığı malzeme) seçiminde kullanılabilir.

A. OPTİK GİRİŞİM TEORİSİ



Şekil 1. (a) FP boşluğunun şematik gösterimi; (b) FP interferometresinin tipik yansımama spektrumu.

FP boşluğunun şematik gösterimi ve tipik yansımama spektrumu sırasıyla Şekil 1 (a) ve (b)'de gösterilmektedir. Gelen ışık paralel iki yansıtıcı yüzey arasında yansımama ve kırılmalara uğradıktan sonra boşluğu terk eder. Bu iki yansıtıcı yüzeyler sırasıyla fiber-boşluk (R_1) ve boşluk-diyafram (R_2) ara-yüzeyleridir. Geçen ışığın spektrumu yansıyanın yatay eksene göre simetrisi olacaktır. FP interferometresinden yansıyan ışığın yoğunluğu I_r aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [13].

$$I_r(L, \lambda) = \alpha_0 I_0(\lambda) \frac{R_1 + \eta R_2 - 2\sqrt{\eta R_1 R_2} \cos \phi}{1 + \eta R_1 R_2 - 2\sqrt{\eta R_1 R_2} \cos \phi} \quad (1)$$

Buradaki L FP boşluk uzunluğunu, $I_0(\lambda)$ λ dalga boyundaki giriş optik yoğunluğunu temsil eder. α_0 sistemdeki optik kayıpları tanımlayan bir sabittir. Bu optik kayıplar giriş/çıkış fiberlerindeki kuplaj, optik kuplör, konektör ve benzeri kayıplardan oluşur. R_1 ve R_2 sırasıyla fiber-boşluk ve boşluk-diyafram ara-yüzeyindeki yansıtma katsayılarıdır. ϕ ise optik fazı gösterir ve aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\phi = \frac{4\pi n_m L}{\lambda} \quad (2)$$

Buradaki n_m FP boşluğundaki ortamın kırılma indisidir. η boşluk boyunca ışığın gidiş geliş iletim katsayısını gösterir ve aşağıdaki gibi tanımlanır [14].

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda L}{\pi n_m w^2}\right)^2} \quad (3)$$

Buradaki w kullanılan fiberin alan yarıçapını (spot genişliği) temsil etmektedir. Tek modlu basamak indisli bir fiber için w Gaussian dağılımı ile aşağıdaki şekilde analitik yaklaşımla tanımlanır [15].

$$\frac{w}{a} \approx 0.65 + \frac{1.619}{V^{3/2}} + \frac{2.879}{V^6} \quad (4)$$

V ifadesi fiberin normalize frekansı olup Eş. 5'te verilmiştir.

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_f^2 - n_c^2} \quad (5)$$

Buradaki a fiber özünün yarıçapı, n_c fiber kaplamasının kırılma indisini gösterir. Eş. 1'deki R_1 ve R_2 ifadeleri fiber özü kırılma indisi n_f , FP boşluğundaki ortamın kırılma indisi n_m ve kullanılan diyaframın kırılma indisine n_d bağlı olacak şekilde sırasıyla Eş. 6 ve 7 de verilmiştir.

$$R_1 = \left(\frac{n_f - n_m}{n_f + n_m} \right)^2 \quad (6)$$

$$R_2 = \left(\frac{n_m - n_d}{n_m + n_d} \right)^2 \quad (7)$$

B. GÖRÜNÜRLÜK

Fiber optik FP akustik sensörlerin önemli bir parametresi olan görünürlük girişim saçaklarının algılanabilmesinin bir ölçüsü olarak tanımlanabilir. Yansıyan işaretin kontrastı olarak da ifade edilen görünürlük parametresi genel olarak aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (8)$$

Buradaki I_{\max} ve I_{\min} değerleri Eş. 1'deki yansıyan ışık yoğunluğunun sırasıyla maksimum ve minimum değerleridir. Bu değerler $\cos\phi$ fonksiyonun +1 ve -1 olduğu durumlarda Eş. 9 ve 10'daki gibi ifade edilir.

$$I_{\max} = \frac{R_1 + \eta R_2 + 2\sqrt{\eta R_1 R_2}}{1 + \eta R_1 R_2 + 2\sqrt{\eta R_1 R_2}} \quad (9)$$

$$I_{\min} = \frac{R_1 + \eta R_2 - 2\sqrt{\eta R_1 R_2}}{1 + \eta R_1 R_2 - 2\sqrt{\eta R_1 R_2}} \quad (10)$$

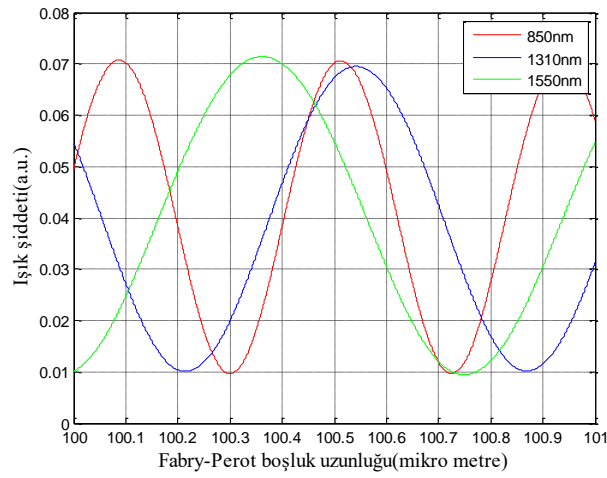
Eş. 9 ve 10 Eş. 8'de yerine yazıldığında Eş. 11 elde edilir.

$$\gamma = \frac{2\sqrt{\eta R_1 R_2}(\eta R_1 R_2 - \eta R_2 - R_1 + 1)}{\eta^2 R_1 R_2^2 - 4\eta R_1 R_2 + \eta R_1^2 R_2 + \eta R_2 + R_1} \quad (11)$$

Eş. 11'deki görünürlük ifadesi Eş. 3'den Eş. 7'ye kadarki parametrelerden de anlaşılacağı üzere, kullanılan fiberin öz ve yelek kırılma indislerine, kullanılan fiber çapına, FP boşluk uzunluğuna ve boşluğun kırılma indisine, kullanılan ışığın merkez dalga boyuna bağlıdır. Bu parametrelerin genel olarak tipik değerleri vardır ve çok farklı seçenekler sunmazlar. Oysaki görünürlük ifadesi görüldüğü üzere kullanılan diyaframın kırılma indisine de bağlıdır.

C. DOĞRUSALLIK

Optik dedektör tarafından ölçülen ışık şiddeti uzun boşluk değerlerine doğru azalmaktadır. Sensör sisteminin doğrusal bölgede çalışabilmesi için boşluk uzunluğundaki değişime göre çıkıştaki optik sinyalin arasında doğrusal bir ilişki olmalıdır. Şekil 2 de üç farklı dalga boyunda, FP interferometresinin boşluk uzunluğuna göre yansıma spektrumunu göstermektedir.



Şekil 2. Üç farklı dalga boyunda FP interferometresinin boşluk uzunluğuna göre yansıma spektrumu.

Yansıyan sinyalin belirli bir dar bölgede ki ardışık maksimum ve minimum değerlerine denk gelen boşluk uzunlukları arasındaki farkın yarısına karşılık gelen değer, FP boşluğunun maksimum değişim miktarıdır. Bunu Eş. 12'den görebilmekteyiz. Bu değer üzerindeki değerlerde FP interferometresi doğrusal bölge dışına çıkmaktadır ve diyaframdaki değişimler ile sensör çıkışı arasında doğrusal olmayan bir ilişkiye sebep olmaktadır. Bu sınırlama optik girişim teorisinden kaynaklandığı için optik sınır diyebiliriz. Boşluğun maksimum değişim miktarı ile optik kaynağın dalga boyu arasında 1/8 değerinde bir oran vardır [12]. Bu oran sensörün doğrusal bölgede kalma şartını sağlamaktadır. Optik kaynağın merkez dalga boyu azaldıkça, FP boşluğunda daha küçük değişimler olması gerekiyor. Tablo 1'den de görüldüğü gibi yüksek dalga boylu kaynaklar sensörün doğrusal bölgede kalması açısından daha az risk taşırlar.

Tablo 1. FP boşluğunun maksimum değişim miktarı.

| Merkezdalga boyu (nm) | Değişim miktarı (nm) |
|--------------------------|-------------------------|
| 640 | 80.00 |
| 820 | 102.50 |
| 850 | 106.25 |
| 1300 | 162.50 |
| 1310 | 163.75 |

$$(\Delta L)_{max} = \frac{L@I_{max} - L@I_{min}}{2} = \frac{\lambda_0}{8} \quad (12)$$

D. KAYNAK UYUM UZUNLUĞU

FP boşluk seçiminde kullanılacak ve sensör sisteminin performansını etkileyecek başka bir parametre ise, kaynak uyum uzunluğudur ve L_c ile gösterilir. Bu değer optik kaynağın merkez dalga boyuna ve spektral genişliği (full width at half maximum (FWHM)) değerlerine bağlıdır ve Eş. 13'deki gibi tanımlanır.

$$L_c \approx \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \quad (13)$$

Buradaki $\Delta\lambda$ ifadesi Eş. 14 ile verilir.

$$\Delta\lambda = \frac{\delta\lambda_{FWHM}}{\sqrt{8\ln 2}} \quad (14)$$

FP boşluk uzunluğunu ile kaynak uyum uzunluğu arasında $L < L_c$ ilişkisinin sağlanması sensör sisteminin duyarlılığı açısından önemlidir [15]. Eş. 13'den de anlaşılacağı gibi merkez dalga boyu büyük ve spektral genişliği küçük olan optik kaynaklar daha geniş FP boşluk uzunluklarına olanak sağlarlar. Bu sebeple kaynak merkez dalga boyu büyük değerlerde seçilir.

E. DİYAFRAM ESNEME MİKTARI

Fiber optik FP akustik sensörlerin bir diğer bölümü diyafram dinamik titreşim analizidir. Yüksek performanslı diyafram yapısının geliştirilmesi, doğru ve hassas ölçüm yapılabilmesi için kritik öneme sahiptir. Pratikte, birçok basınç sensörü için diyaframın esneme kapasitesinin belirlenmesi olmaz olmaz kriterlerden biridir.

FP interferometresinin boşluk uzunluğunu dinamik olarak modüle eden sinyal (örneğin akustik dalga) diyaframda bir esnemeye sebep olacaktır. Akustik dalganın diyaframdaki oluşturacağı esneme miktarı load-deflection yöntemiyle teorik olarak hesaplanabilir [16].

$$d = \frac{3(1 - \nu^2)Pr^4}{16Et^3} \quad (15)$$

Eş. 15 dairesel bir diyaframın P basıncı altında esneme miktarını verir. Buradaki parametreler Tablo 2 de belirtilmiştir. Genellikle, diyafram merkezindeki esneme miktarı mekanik doğrusallığın sağlanması için diyafram kalınlığının %30'undan daha küçük olması gerekir [16]. Bu sınır değeri bize optik girişim teorisindeki FP boşluğunun maksimum değişme miktarındaki sınır değerini hatırlatmaktadır. O halde bu iki sınır değerini dikkate alarak diyafram malzemesi seçimini ve geometrik boyutlarının hesabını

yapmalıyız. Daha öncede belirtildiği gibi geometrik boyutlarda bazı kısıtlamalar oluştuğunda malzeme özelliklerini değiştirmek iyi bir alternatif olmaktadır.

Tablo 2. Eş. 15'deki parametreler.

| Tanım | Sembol | Birim |
|-------------------------------------|--------|---------------|
| Diyaframa uygulanan basınç | P | Pa |
| Diyaframın esneme miktarı | d | nm |
| Diyafram malzemesinin Young modülü | E | GPa |
| Diyafram malzemesinin Poisson oranı | ν | - |
| Diyaframın yarıçapı | r | μm |
| Diyaframın kalınlığı | t | μm |

F. DİYAFRAM FREKANS TEPKİSİ

Diyafram kalınlığı ve yüzey uzunluğunun belirlenmesinde ölçülmesi istenen basıncın yanı sıra sensörün frekans cevabı da göz önünde bulundurulmalıdır. Böylelikle parametre seçiminde son olarak akustik dalganın algılanacağı frekans bandının belirlenmesi kalmaktadır. Seçilen diyaframın malzeme özelliğine ve geometrik ölçülerine (kalınlık ve yarıçap) bağlı olarak rezonans frekansı Eş. 16'daki gibi belirlenir.

$$f = \frac{\varphi_{mn}^2}{2\pi r^2 \sqrt{1 + \xi}} \sqrt{\frac{Et^2}{12\rho(1 - \nu^2)}} \quad (16)$$

$$\xi = 0.6689 \frac{\rho' r}{\rho t} \quad (17)$$

Buradaki ρ ve ρ' sırasıyla diyafram malzemesinin ve diyaframın içerisinde bulunduğu ortamın kg/m^3 cinsinden kütle yoğunluklarıdır. φ_{mn} farklı modlar için salınım köklerini ifade eder ($m=0, 1, 2, 3, n=0, 1, 2, 3$). Bu değerler Tablo 3 de listelenmiştir [12]. Bu durumda seçilecek olan diyafram malzemesi ve geometrisine göre istenilen tipte çalışacak sensör düzenekleri elde edilebilir.

Tablo 3. Φ_{mn} 'in değerleri.

| | 0 | 1 | 2 | 3 |
|---|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 3.196 | 4.611 | 5.906 | 7.143 |
| 1 | 6.306 | 7.799 | 9.917 | 10.537 |
| 2 | 9.440 | 10.958 | 12.402 | 13.795 |
| 3 | 12.577 | 14.108 | 15.579 | 17.005 |

III. ARAŞTIRMA VE BENZETİM BULGULARI

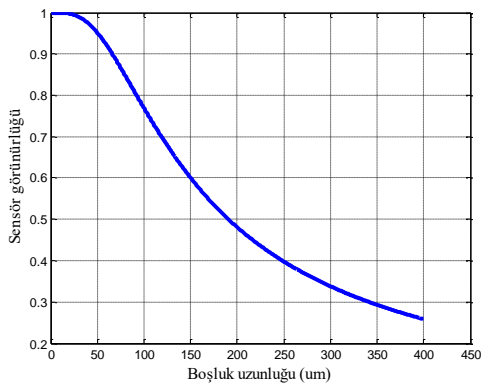
A. GALYUM SELENİT'İN SENSÖR GÖRÜNÜRLÜĞÜNE ETKİSİ

Seçilen diyaframın kırılma indisi değerine göre görünürlüğü ne şekilde değişeceğini anlamak için diyafram malzemesi olarak literatürde yaygın kullanılan geleneksel SiO₂ malzemesi seçilmiştir. Analitik sonuçlar GaSe malzemesiyle oluşturulmuş olan diyafram ile karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında seçilen tipik parametre değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

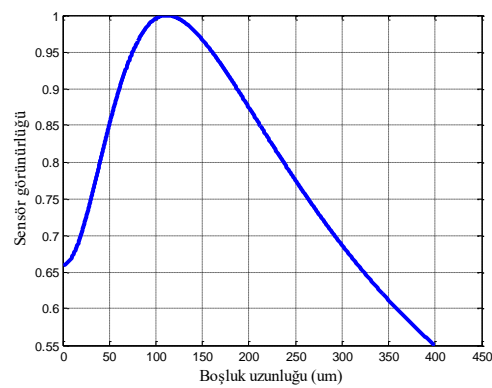
Tablo 4. Görünürlük ilişkisi için seçilen parametreler.

| Parametre | Değer | Birim |
|--|--------|-------|
| Fiber öz kırılma indisi | 1.4492 | - |
| Fiber yelek kırılma indisi | 1.444 | - |
| Boşluk kırılma indisi | 1 | - |
| SiO ₂ diyafram kırılma indisi | 1.45 | - |
| GaSe diyafram kırılma indisi | 2.43 | - |
| Fiber öz yarıçapı | 4.5 | µm |

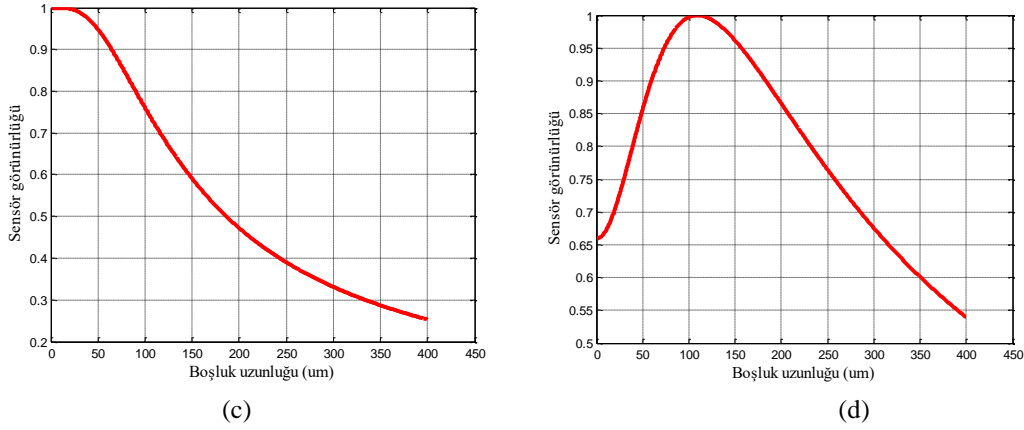
Tablo 4'deki değerler Eş. 11'de kullanıldığında iki farklı diyafram türü için görünürlük grafikleri Şekil 3'de verilmiştir. (Dalga boyu 1550 nm olarak alınmıştır.) Tablo 4'deki tüm değerler sabit tutularak sadece diyafram malzemesi değiştirilmiştir. GaSe malzemesiyle oluşturulmuş diyaframın yüksek FP boşluk uzunluklarında daha iyi görünürlük değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum bize, çok kısa boşluk uzunluklarına imkân vermeyen uygulamalarda, GaSe malzemesinin bir alternatif olacağı fikrini göstermektedir. Tablo 4'deki parametrelerden değiştirilmesi en mümkün olan bir diğer parametre ise kullanılan ışık kaynağının merkez dalga boyudur. Dalga boyunu 850 nm olarak elde edildiğinde değişimin neredeyse hiç olmadığı görülmüştür. Dalga boyunda bu orandaki değişikliklerin iletim katsayısı üzerine büyük bir etkisinin olmadığı Eş. 3, 4 ve 5'den de anlaşılmaktadır.



(a)



(b)



Şekil 3. (a) Kaynak dalga boyu 1550 nm diyafram malzemesi SiO₂ (b) Kaynak dalga boyu 1550 nm diyafram malzemesi GaSe (c) Kaynak dalga boyu 850 nm diyafram malzemesi SiO₂ (d) Kaynak dalga boyu 850 nm diyafram malzemesi GaSe.

Daha da küçük dalga boyuna sahip kaynaklar kullanıldığında diyaframın etkisi kadar olmasa da görünürlikte sınırlı bir değişim olmaktadır. Ancak kullanılacak olan kaynağın dalga boyu tipik değerlere sahiptir ve bu değerler için de belirli bir alt sınır vardır. Fiber optik FP akustik sensörler için doğrusallık ve kaynak uyum uzunluğu gibi diğer parametreleri de hesaba kattığımızda seçilecek olan kaynağın dalga boyu üzerine çok büyük değişiklikler yapılamayacağı görülmektedir. Bu parametreler II. Bölümde tartışılmıştı.

B. GALYUM SELENİT'İN SENSÖR DUYARLIĞINA ETKİSİ

Diyafram olarak kullanılan silisyum (Si), silisyum dioksit (SiO₂) ve grafen malzemeleri ile algılayıcı ucu ürettiğimiz ve hesaplamalarda kullandığımız galyum selenit (GaSe) malzemelerinin özellikleri Tablo 5 de verilmiştir.

Tablo 5. Diyafram malzemelerinin özellikleri.

| Malzeme | Young modülü (GPa) | Possion oranı | Yoğunluk (kg/m ³) |
|----------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------------------|
| Si ^[17] | 163 | 0.27 | 2330 |
| SiO ₂ ^[15] | 73 | 0.17 | 2200 |
| Grafen ^[15] | 1000 | 0.165 | 2200 |
| GaSe | 92.3 ^[18] | 0.29 ^[19] | 5030 |

Tablo 5'deki değerler kullanılarak, uygulanan basınç altında diyaframlardaki esneme miktarları incelenmiştir. Hesaplamalar teorik ve benzetim olarak yapılmıştır. Benzetim işlemlerinde sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS programından faydalanılmıştır. Dört farklı tipteki diyafram malzemesinin farklı basınçlar altında esneme miktarları hesaplanmış Tablo 6'da malzemelerin dayanabilecekleri maksimum basınç değerleri, Tablo 7'de ise farklı basınçlar altında esneme miktarları (duyarlılıkları) verilmiştir. Hesaplamalarda diyaframın yarıçap değeri $r=909 \mu\text{m}$, kalınlık değeri $t=30 \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir. Burada diyafram malzemesi Borosilikat Cam (Thorlabs 51-2800-1800 - GRIN/Ferrule Sleeve) kılıfa göre tasarlanmıştır. Tablo 7'de kırmızı ile işaretlenmiş değerlerden sonra diyafram malzemelerinin doğrusal bölgeden çıktıkları görülmektedir. Sonuçlara göre grafen doğrusal bölgeden en geç çıkan malzeme olduğu görülmektedir. Aynı kalınlıkta seçilmiş diğer

malzemeler dikkate alındığında yüksek basınçlarda grafen malzemesinin daha kullanışlı olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra küçük basınç değişimlerine tepkisi diğer diyafram malzemelerine göre daha az olduğu görülmüştür. Bu durum hassas ölçümlerde daha düşük bir çözünürlük veya algılama kabiliyeti olarak yorumlanabilir.

Tablo 6. Malzemelere uygulanabilecek maksimum basınç değerleri.

| Malzeme | P_{max} (kPa) |
|------------------|--------------------|
| Si | 333.74 |
| SiO ₂ | 142.69 |
| Grafen | 1951.36 |
| GaSe | 191.29 |

Tablo 7. Diyafram malzemelerinin farklı basınçlardaki esneme değerleri.

| Basınç | | Si | SiO ₂ | Grafen | GaSe |
|---------|----------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 Pa | Teorik | 0.02696 nm | 0.06307 nm | 0.00461 nm | 0.04704 nm |
| | Benzetim | 0.02654 nm | 0.06258 nm | 0.00457 nm | 0.04618 nm |
| 10 Pa | Teorik | 0.26967 nm | 0.63071 nm | 0.04612 nm | 0.47047 nm |
| | Benzetim | 0.26541 nm | 0.62588 nm | 0.04578 nm | 0.46181 nm |
| 100 Pa | Teorik | 2.69669 nm | 6.30716 nm | 0.46121 nm | 4.70478 nm |
| | Benzetim | 2.65410 nm | 6.25880 nm | 0.45780 nm | 4.461810 nm |
| 1 kPa | Teorik | 26.96696 nm | 63.07164 nm | 4.61217 nm | 47.04780 nm |
| | Benzetim | 26.54100 nm | 62.58800 nm | 4.57800 nm | 44.61810 nm |
| 10 kPa | Teorik | 269.66961 nm | 630.71641 nm | 46.12171 nm | 470.47809 nm |
| | Benzetim | 265.41000 nm | 625.88000 nm | 45.78000 nm | 446.18100 nm |
| 100 kPa | Teorik | 2696.69616 nm | 6307.16416 nm | 461.21714 nm | 4704.78085 nm |
| | Benzetim | 2654.10000 nm | 6258.80000 nm | 457.80000 nm | 4461.81000 nm |
| 1 MPa | Teorik | 26.96164 μm | 63.07164 μm | 4612.17143 nm | 47.04780 μm |
| | Benzetim | 26.54100 μm | 62.58800 μm | 4578.00000 nm | 44.61810 μm |
| 10 MPa | Teorik | - | - | 46.12171 μm | - |
| | Benzetim | - | - | 45.78000 μm | - |

C. GALYUM SELENİT'İN FREKANS TEPKİSİ

Bu dört malzemenin seçilen geometrik boyutlardaki frekans tepkileri hava ortamında teorik ve benzetim olarak hesaplanmıştır ve sonuçlar Tablo 8'de verilmiştir. Temel rezonans frekansları dikkate alındığında grafen malzemesi geniş band çalışmaya diğerlerine göre daha uygundur. Ancak sensör ucunun ölçüm yapacağı ortam havanın ($\rho'=1 \text{ kg/m}^3$) haricinde yoğun bir ortam olabilir. Bu durumda diyafram malzemesini saran ortamın yoğunluğu sensörün çalışma frekansını etkileyecektir. Örnek olarak bu ortamın su ($\rho'=1000 \text{ kg/m}^3$) olduğunu düşünürsek değişmiş olan rezonans frekansları ve % değişim değerleri Tablo 9'da gösterilmektedir. GaSe haricindeki diğer malzemelerin kütle yoğunluklarına Tablo 5'den baktığımızda yaklaşık aynı ($\sim 2200 \text{ kg/m}^3$) olduğunu görmekteyiz. Bunun anlamı Eşt. 17'deki sönüm katsayısının (ξ) etkisi bu üç malzeme için aynı olmakla birlikte GaSe için farklıdır. Yani GaSe'in yoğunluğu fazla olduğu için az yoğun ortamdaki çok yoğun ortama geçişlerde çalışma frekansındaki değişim daha az olmaktadır. Bu sonuç bize tasarlanan algılayıcı ucun yoğunlukça birbirinden farklı

ortamlarda (bal, glikoz çözeltileri, yoğun gıda maddeleri gibi) kullanılma potansiyelinin diğerlerinden daha fazla olduğunu göstermektedir [20].

Tablo 8. *Diyafram malzemelerinin havadaki temel rezonans frekansları.*

| Malzeme | Temel rezonans frekansları (kHz) | |
|------------------|-------------------------------------|----------|
| | Teorik | Benzetim |
| Si | 147.230 | 148.630 |
| SiO ₂ | 99.040 | 99.620 |
| Grafen | 366.250 | 368.330 |
| GaSe | 76.080 | 76.690 |

Tablo 9. *Diyafram malzemelerinin sudaki temel rezonans frekansları ve % değişimleri.*

| Malzeme | Temel rezonans frekansları (kHz) | Havaya göre değişim (%) |
|------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Si | 47.53 | -67.72 |
| SiO ₂ | 31.17 | -68.53 |
| Grafen | 115.25 | -68.53 |
| GaSe | 34.01 | -55.29 |

IV. SONUÇ

Bu çalışmada diyafram malzemesi olarak literatürde ilk defa Galyum Selenit (GaSe) kullanılarak tasarlanan fiber optik sensör uçların frekans cevapları ve akustik basınç aralıkları hesaplandı. Bulgular literatürde kullanılan grafen ve geleneksel diyafram malzemeleri ile karşılaştırılarak verilmiştir. Bu çalışmanın en büyük yeniliği, gelecek nesil fiber optik sensör uçları için grafen dışında 2D GaSe kristalinin tasarımda kullanılmasıdır. Benzetim sonuçlarına göre, sensör görünürlüğü ve frekans tepkileri açısından GaSe'in ciddi alternatifler sunduğu gösterilmiştir. GaSe malzemesiyle oluşturulmuş diyaframın yüksek FP boşluk uzunluklarında daha iyi görünürlük değerine sahip olduğu görülmüştür. Bu durum bize, çok kısa boşluk uzunluklarına imkân vermeyen uygulamalarda, GaSe malzemesinin bir alternatif olacağı fikrini vermektedir. Mekanik ve frekans tepkisi incelemelerinde, hesaplamalar teorik ve benzetim olarak yapılmıştır. Benzetim işlemlerinde sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS programından faydalanılmış ve sonuçların teorik sonuçlar ile çok yakın olduğu gösterilmiştir. Grafen doğrusal bölgeden en geç çıkan malzeme olmaktadır. Aynı kalınlıkta seçilmiş malzemeler dikkate alındığında yüksek basınçlarda grafen malzemesinin daha kullanışlı olduğu görülmüştür. Fakat uygulanan basınçlardaki küçük değişimlere tepkisi diğerlerine göre daha azdır. Bu da daha hassas ölçümlerde daha düşük bir çözünürlük anlamına gelmektedir. GaSe'in yoğunluğu fazla olduğu için az yoğun ortamdan çok yoğun ortama geçişlerde çalışma frekansındaki değişim daha az olmaktadır. Bu sonuç tasarlanan algılayıcı ucun yoğunlukça birbirinden farklı ortamlarda (bal, glikoz çözeltileri, yoğun gıda maddeleri gibi) kullanılma potansiyelinin diğerlerinden daha fazla olduğunu göstermektedir. Geometrik boyutlarda bazı kısıtlamalar oluştuğunda diyafram malzemesini değiştirmenin iyi bir alternatif olabileceği sonucuna varılmıştır.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2016-6811 ve FDK-2016-6815 proje numaraları ile desteklenmiştir. Aynı zamanda proje çalışanlarının araştırma faaliyetlerine verdikleri destekten dolayı Erciyes Üniversitesi Klinik Mühendisliği Araştırma Uygulama Merkezi'ne teşekkürlerimizi bildiririz.

V. KAYNAKLAR

- [1] E. Udd, *Fiber Optic Smart Structure Technology- Fiber Optic Smart Structures*, John Wiley & Sons, Inc., (Wiley Series in Pure and Applied Optics), USA, New York, 1995, ss. 5-21.
- [2] F. T. S. Yu, S. Yin, "Fiber Optic Sensors Based Upon the Fabry-Perot Interferometer" *Fiber Optic Sensors*, Marcel Dekker Inc., USA, New York, 2002, böl. 2, s. 76, ss. 41-74.
- [3] T. W. Kao, ve H. F. Taylor, "High-Sensitivity Intrinsic Fiber-Optic Fabry-Perot Pressure Sensor," *Optics Letters*, c. 21, s. 8, ss. 615-617, 1996.
- [4] S. Avino, J. A. Barnes, G. Gagliardi, X. Gu, D. Gutstein, J. R. Mester ve H. P. Loock, "Musical Instrument Pickup Based on a Laser Locked to an Optical Fiber Resonator," *Optics Express*, c. 19, s. 25, ss. 25057-25065, 2011.
- [5] Y. Wang, D. N. Wang, C. Wang, ve T. Hu, "Compressible Fiber Optic Micro-Fabry-Pérot Cavity with Ultra-High Pressure Sensitivity," *Optics Express*, c. 21, s. 12, ss. 14084-14089, 2013.
- [6] G. Beheim, K. Fritsch, ve R. N. Poorman, "Fiber-Linked Interferometric Pressure Sensor," *Review of Scientific Instruments*, c. 58, s. 9, ss. 1655-1659, 1987.
- [7] C. Li, X. Gao, T. Guo, J. Xiao, S. Fan, ve W. Jin, "Analyzing the Applicability of Miniature Ultra-High Sensitivity Fabry-Perot Acoustic Sensor Using a Nanothick Graphene Diaphragm," *Measurement Science and Technology*, c. 26, s. 8, ss. 085101, 2015.
- [8] F. Guo, T. Fink, M. Han, L. Koester, J. Turner, ve J. Huang, "High-Sensitivity, High-Frequency Extrinsic Fabry-Perot Interferometric Fiber-Tip Sensor Based on a Thin Silver Diaphragm," *Optics Letters*, c. 37, s. 9, ss. 1505-1507, 2012.
- [9] G. C. Hill, R. Melamud, F. E. Declercq, A. A. Davenport, I. H. Chan, P. G. Hartwell, ve B. L. Pruitt, "SU-8 MEMS Fabry-Perot Pressure Sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, c. 138, s. 1, ss. 52-62, 2007.
- [10] J. Ma, W. Jin, H. L. Ho., ve J. Y. Dai, "High-Sensitivity Fiber-Tip Pressure Sensor with Graphene Diaphragm," *Optics Letters*, c. 37, s. 13, ss. 2493-2495, 2012.
- [11] W. Wang, N. Wu, Y. Tian, C. Niezrecki, ve X. Wang, "Miniature All-Silica Optical Fiber Pressure Sensor with an Ultrathin Uniform Diaphragm," *Optics Express*, c. 18, s. 9, 9006-9014, 2010.

- [12] J. Deng, "Development of novel optical fiber interferometric sensors with high sensitivity for acoustic emission detection," Doctoral dissertation, Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, ABD, 2004.
- [13] B. Yu, A. Wang, ve G. R. Pickrell, "Analysis of Fiber Fabry-Pérot Interferometric Sensors Using Low-Coherence Light Sources," *Journal of Lightwave Technology*, c. 24,s. 4, ss. 1758, 2006.
- [14] B. Yu, D. W. Kim, J. Deng, H. Xiao ve A. Wang, "Fiber Fabry-Perot Sensors for Detection of Partial Discharges in Power Transformers," *Applied Optics*, c. 42, s. 16, ss. 3241-3250, 2003.
- [15] J. Ma, "Miniature fiber-tip Fabry-Perot interferometric sensors for pressure and acoustic detection" Doctoral Dissertation, Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, 2014.
- [16] D. Giovanni, Flat and Corrugated Diaphragm Design Handbook, 11. Baskı, CRC Press, Marcel Dekker, 1982, ss 157-173.
- [17] Anonim, (2017). [Online]. Erişim: <https://www.memsnet.org/material/siliconsibulk/>
- [18] E. B. Borisenko, N. N. Kolesnikov, D. N. Borisenko, ve S. I. Bozhko, "Microhardness And Structural Defects of Gase Layered Semiconductor," *Journal of Crystal Growth*, c. 316, s. 1, ss. 20-24, 2011.
- [19] Anonim, (2017). [Online]. Erişim: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F10681727_429#page-1
- [20] Ş. E. Hayber, T. E. Tabaru, U. Aydemir, Ö. G. Saraçoğlu, "A New Diaphragm Material for Fiber Optic Fabry-Perot Acoustic Sensors with 2D GaSe" IV. International Multidisciplinary Conference of Eurasia, Roma, İtalya, 2017, sayfa 532-533.