

# FİBER OPTİK AKIM SENSÖRÜNÜN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

**Hakan AYDOĞAN ve Faruk ARAS\***

PETKİM Petrokimya Holding A.Ş., Aliğa, 35800, İzmir

\*Elektrik Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Umuttepe, 41380, Kocaeli

[haydogan@petkim.com.tr](mailto:haydogan@petkim.com.tr), [faruk.aras@kocaeli.edu.tr](mailto:faruk.aras@kocaeli.edu.tr)

(Geliş/Received: 22.10.2007 ; Kabul/Accepted: 08.09.2008)

## ÖZET

Bu çalışmada, Faraday etkili fiber optik akım sensörünü oluşturan polarizör, analizör, lazer, fotodiyot gibi elemanlar Matlab Simulink programı kullanılarak ayrı ayrı modellenmekte ve simüle edilmektedir. Böylece sistemi oluşturan parçaların optimum performansları belirlenebilmektedir. Tüm bu modellerin birleştirilmesiyle, Faraday etkili fiber optik akım sensörünün sistem modeli oluşturulmakta ve çeşitli dinamiklere karşı cevabı incelenmektedir. Elde edilen sonuçlar analiz edilmekte ve değerlendirilmektedir. Daha düşük akımların ölçülmesi için fiberin sarım sayısının artırılması, sistem cevabını geciktirmektedir. Sistemin çıkışı, ışığın kutuplanma açısı ölçüldüğü için lazer optik gücünden etkilenmemektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Fiber optik sensor, Faraday etkisi, modelleme, simülasyon.

## MODELING AND SIMULATION OF FIBER OPTIC CURRENT SENSOR

### ABSTRACT

In this study, the components of fiber optic current sensor based on Faraday Effect such as polarizer, analyzer, laser, photodiode have been modeled and simulated by Matlab Simulink software, separately. Thus, the optimal performances of the components can be determined. The complete system sensor based Faraday's effect has been modeled by using of these sub-models and examined the effects of various dynamics. The obtained results have been analyzed and evaluated. Increasing number of turns of fiber wound for measuring of small currents has caused time lag of the system response. The output of system has not been affected by optical power of laser since it has been measured that the rotation angle of polarization of light.

**Keywords:** Fiber optic sensor, Faraday effect, modeling, simulation.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik güç endüstrisi, endüstrinin önemli ve büyüyen bir dalıdır. Elektrik güç santrallerinde, güç çeviricilerinde ve transformatör istasyonlarında yüksek akımların ölçümü, izlenmesi ve kontrol edilmesi gerekmektedir. Geleneksel akım transformatörleri yüksek gerilimde çalışırken iyi bir yalıtım yapmak gereklidir. Bunun yanında, algılayıcı sinyali elektromanyetik girişime maruz kalmaktadır. Bu girişimi engellemek için algılayıcı ve sinyal hattı ekranla kaplanmak zorundadır. Ekran ve yalıtım, geleneksel akım transformatörlerinin karmaşık ve ağır oluşuna neden olmasının yanında maliyetini de arttıran bir unsurdur. Bu sorunu ortadan kaldırmak için farklı teknolojilerin yanı sıra optik akım

algılayıcıları da son 20 yıldır gündemde olup halen geliştirilme çalışmaları devam etmektedir [1].

Fiber optik manyetik akım sensörleri manyetostriksiyon tabanlı ve Faraday tabanlı olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Manyetostriksiyon sensörlerde, bir dış manyetik alandan dolayı malzemede meydana gelen uzunluk değişimini ölçen bir interferometre kullanılmaktadır. Uzunluk değişimi, fiber içindeki ışığın faz açısında bir kaymaya neden olmaktadır. Faraday etkili sensörlerde ise dış manyetik alan, fiber optik içinde doğrusal kutuplanmış ışığın polarizasyon düzleminin dönmesine neden olmaktadır. Manyetostriksiyon sensörlerin duyarlılığı Faraday tabanlı sensörlere göre daha yüksek olmasına rağmen, karmaşık ve pahalı

tasarımının yanında elektriksel olarak aktif bir sensör olması da dezavantajlarındandır. Faraday tabanlı sensörlerin cevabı ile bir dış manyetik alan arasında doğrusal bir ilişki olması bu sensörlerin manyetostriksiyon tabanlı sensörlere göre üstünlüğünü göstermektedir. Manyetostriksiyon sensörler doğru akımdan 100 kHz frekans aralığındaki manyetik alanları algılayabilirken, Faraday etkili fiber optik akım sensörleri ise doğru akımdan MHz'lere varan yüksek bir bant genişliğine sahiptirler ve yüksek doğrusallık göstermektedirler [2,3].

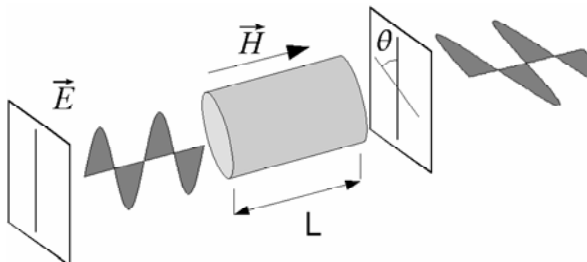
Briffod ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada  $\pm 500$  kA'e kadar olan ac ve dc akımları,  $\pm 0.2$  doğrulukla ve  $0 - 50$  °C aralığında ölçülebilen fiber optik akım sensörü tasarlanmıştır [4]. Ulmer ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada ise, 500 A'de oda sıcaklığında  $-0.03$  değişim ile fiber optik algılayıcının çıkış sinyalinin istikrarlı olduğu bildirilmiştir [5].

Fiber optik akım sensörün uygulamalarında, lazer, fiber optik ve fotodiyot gibi elemanların sistem verimi ve güvenilirliği üzerinde önemli etkileri olmaktadır. Farklı ışık dalga boylarında bu elemanların cevaplarının da farklı olduğu bilinmektedir. Bu yüzden sistem verimi ve güvenilirliğini en üst seviyede tutmak için bu elemanların farklı dalga boylarındaki davranışları belirlenmelidir. Deney ortamında tek tek bu elemanların farklı ışık dalga boylarındaki davranışlarını gözlemlemek neredeyse imkansızdır. Bu nedenle, bu çalışmada, fiber optik sensör sisteminde gerekli olan elemanlar Matlab Simulink programında tek tek modellenmiş ve simüle edilmiştir. Böylece sistemi oluşturan elemanların, farklı dalga boylarındaki davranışlarının sistem çıkışına etkisini izlemek mümkün hale gelmiştir.

## 2. FARADAY ETKİSİ (FARADAY EFFECT)

Şekil 1'de Faraday malzemesinden geçen doğrusal kutuplanmış ışık  $\vec{E}$ , polarizasyon düzleminde  $\theta$  açısı kadar dönerse dönme açısı aşağıdaki eşitlikle bulunabilir.

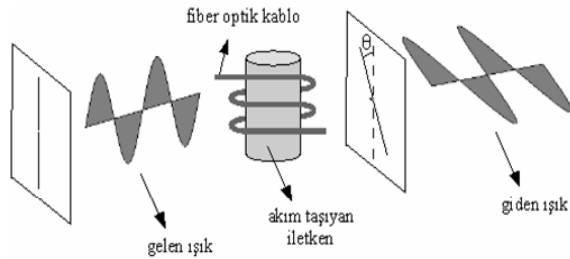
$$\theta = V \int \vec{H} \cdot d\vec{L} \quad (1)$$



Şekil 1. Faraday Etkisi (Faraday Effect)

$\theta$	: Kutuplanma düzlemi dönme açısı (polarization rotation)	(Rad)
$V$	: Verdet Sabiti (Verdet Constant)	(Rad/A)
$\vec{H}$	: Işığın yayılım yönü boyunca manyetik alan şiddetinin vektörü (the vector of magnetic field intensity through direction of propagation of light)	A.sarım/m
$d\vec{L}$	: Işığın yayılım yönü boyunca Faraday malzemesinin küçük bir uzunluğunun vektörü (the vector of the little length of the Faraday material through direction of propagation of light)	m

Şekil 2'de fiber optik, akım taşıyan iletken etrafına sarıldığından, fiber içerisindeki doğrusal kutuplanmış ışığın polarizasyon düzlemi dış manyetik alan nedeniyle dönmektedir. Polarizasyon, ışığın yalnızca elektrik alanı ile ilgili bir kavramdır ve ışığın manyetik alan bileşeni daima elektrik alanına dik ve orantılıdır.



Şekil 2. Fiber optik akım algılayıcısı (Fiber optic current sensor)

Amper kanununa göre denklem (1), aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$\theta = VNI \quad (2)$$

$N$  : Fiber optik sarım sayısı (the number of turns of fiber)

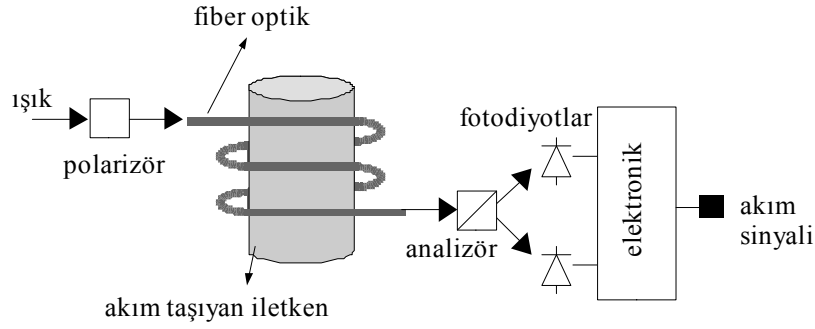
$I$  : İletkenin akımı (current of the conductor) (A)

## 3. MODELLEME (MODELING)

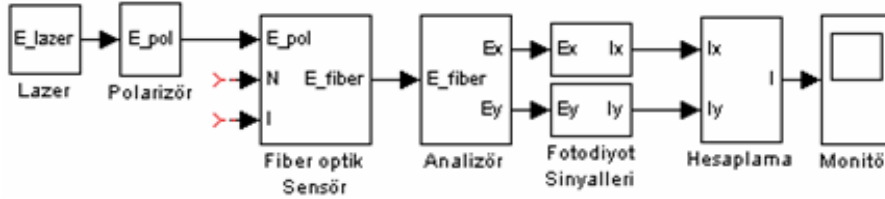
Fiber optik akım sensörünü oluşturan elemanlar ve bu sistemin basit bir yapısı Şekil 3'de görülmektedir. Bu sensörün optimum cevabını bulmak için ışık kaynağı, polarizör, fiber optik, analizör, fotodiyotlar ve hesaplama biriminden oluşan elemanların ayrı ayrı modellenmesi ve simüle edilmesi gerekmektedir.

Bir ışık kaynağından gelen ışık polarizör yardımıyla x ve y yönünde doğrusal kutuplanması Şekil 3'de görülen sistemin çalışma prensibidir. Akım taşıyan iletken etrafına sarılmış optik fibere giren bu ışık fiber çıkışında analizör yardımıyla x ve y bileşenlerine ayrılmakta ve fotodiyotlar tarafından algılanan bu ışıklar fotodiyot akımlarına dönüştürülmektedir.

Elektronik birimi bu sinyalleri kullanarak iletkenin taşıdığı akımı belirlemektedir. Şekil 4'de fiber optik sensör ve çalışması için gerekli olan elemanların



Şekil 3. Fiber optik akım algılayıcı sistemi (The system of fiber optic current sensor)



Şekil 4. Fiber optik akım algılayıcısının sistem modeli (The system model of fiber optic current sensor)

Matlab Simulink ortamında oluşturulan model görülmektedir.

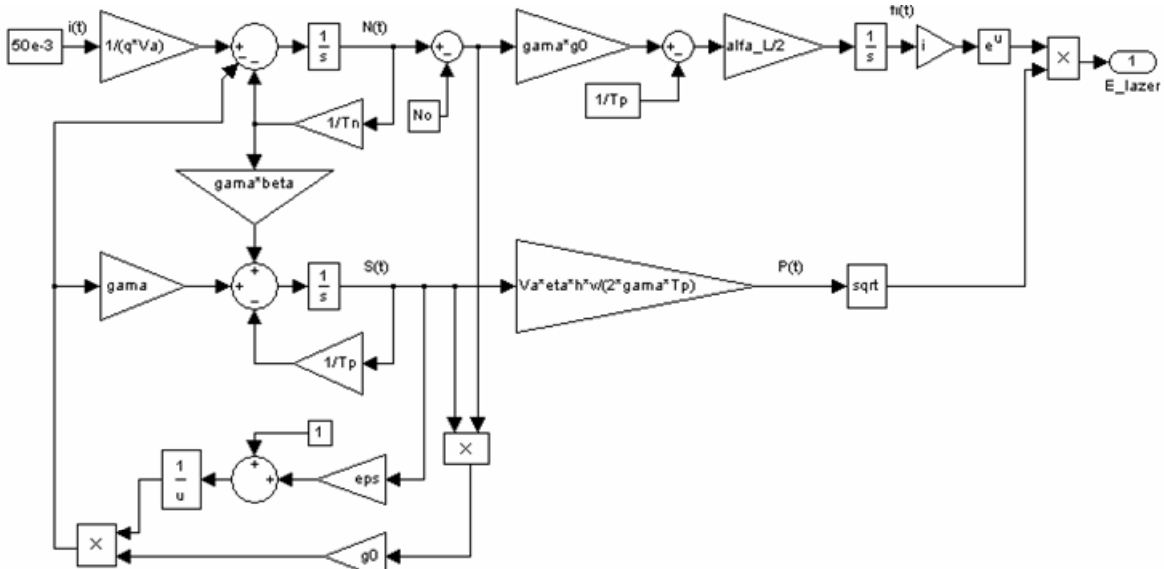
Işık kaynağı olarak kullanılan yarıiletken lazerin Şekil 5'de görülen modeli, lazer giriş akımı ve ışık dalga boyuna ( $\lambda$ ) bağlı bir ışık gücü yani bir elektrik alanı üretilmektedir. Matematiksel denklemler, yarıiletken lazer diyotun oran denklemleri kullanılarak aşağıdaki gibi oluşturulmaktadır [6].

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{i(t)}{qV_a} - g_0 \frac{[N(t) - N_o]S(t)}{1 - \varepsilon S(t)} - \frac{N(t)}{\tau_n} \quad (3)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = \Gamma g_0 \frac{[N(t) - N_o]S(t)}{1 - \varepsilon S(t)} - \frac{S(t)}{\tau_p} + \frac{\Gamma \beta}{\tau_n} N(t) \quad (4)$$

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{1}{2} \alpha_L \left[ \Gamma g_0 [N(t) - N_o] - \frac{1}{\tau_p} \right] \quad (5)$$

- $i(t)$  : Lazer akımı (laser current) (A)  
 $S(t)$  : Foton yoğunluğu (foton density) ( $m^{-3}$ )  
 $\Gamma$  : Optik tutsaklık faktörü (optical confinement factor) —  
 $g_0$  : Kazanç eğimi (slope gain) ( $cm^{-3}/s$ )  
 $N(t)$  : Taşıyıcı yoğunluğu (carrier density) ( $m^{-3}$ )  
 $N_o$  : Saydamlıktaki taşıyıcı yoğunluğu (carrier density at transparency) ( $cm^{-3}$ )  
 $\varepsilon$  : Kazanç doyum parametresi (gain saturation parameter) ( $cm^3$ )  
 $\tau_p$  : Foton ömrü (photon lifetime) (s)



Şekil 5. Lazer modeli (The model of laser)

- $\beta$  : Kendiliğinden yayınım faktörü (spontaneous emission factor) —  
 $\tau_n$  : Taşıyıcı ömrü (carrier lifetime) (s)  
 $V_a$  : Aktif bölgenin hacmi (volume of the active region) (cm<sup>3</sup>)  
 $\alpha_L$  : Hat genişliği ek faktörü (line-width enhancement factor) —  
 $q$  : Elektron yükü (elektron charge) (C)  
 $\phi(t)$  : Lazerin elektrik alan fazı (phase of the laser electric field) —

Lazer diyotun optik çıkış gücü matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [6].

$$P(t) = \frac{V_a \eta h \nu}{2\Gamma \tau_p} S(t) \quad (6)$$

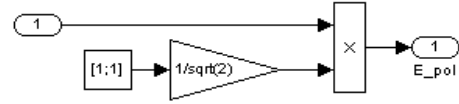
- $P(t)$  : Hat genişliği ek faktörü (line-width enhancement factor) W  
 $\eta$  : Toplam kuvantum verimi (total quantum efficiency) —  
 $h$  : Lazerin elektrik alan fazı (phase of the laser electric field) J.s  
 $\nu$  : Lazer ışınının frekansı (frequency of the laser) (s<sup>-1</sup>)

Işık, elektromanyetik bir alan olduğundan lazer ışığı çıkış gücü elektrik alanı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir [7].

$$E_{laser}(t) = \sqrt{P(t)} e^{i\phi(t)} \quad (7)$$

Şekil 6'da görülen polarizör modelinde, lazerden çıkan ışık x ve y yönünde ideal olarak doğrusal kutuplanmaktadır. Bunun matematiksel ifadesi ise aşağıdaki gibidir [8].

$$E_{pol} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} E_{laser} \quad (8)$$



Şekil 6. Polarizör modeli (The model of polarizer)

İletkenden geçen akımı algılayan sensör aslında bir fiber optik kablodur. Burada, fiber optik kabloda özün kırılma indisi, Verdet sabiti, Faraday etkisi, zayıflama, ve zaman gecikmesi dikkate alınmakta ve Şekil 7'de görüldüğü gibi modellenmektedir.

$n$  kırılma indisi için, [9]'daki  $\lambda - n$  ilişkisini gösteren tablodaki verilerden yararlanılarak bir fonksiyon elde edilmektedir.

Verdet sabiti, ise  $(n^2 - 1)^2 / (n\lambda^2)$  ile orantılıdır [10].

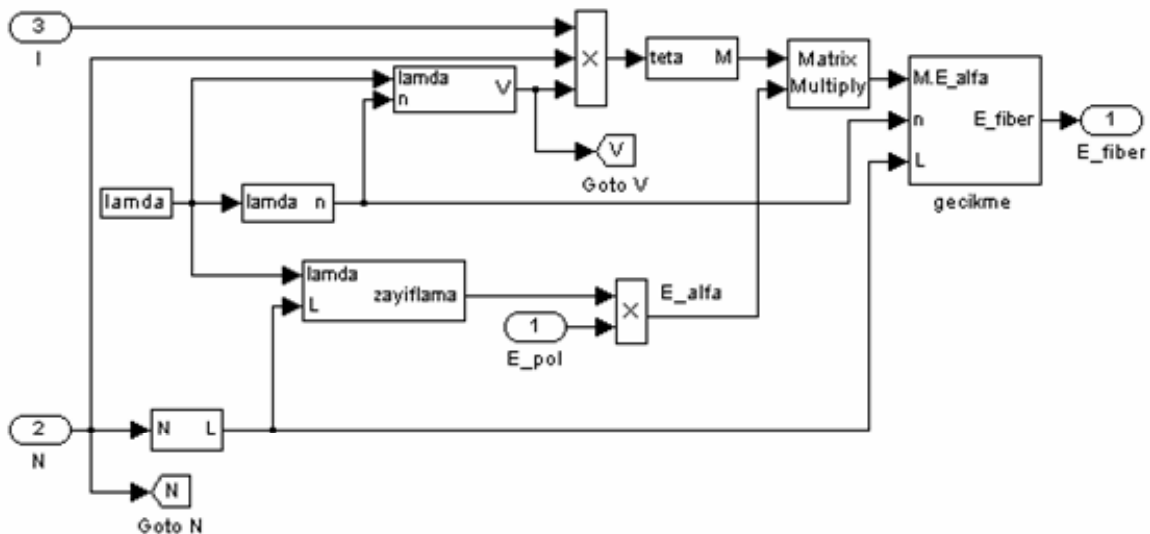
Fiberin içindeki ışığın doğrusal çift kırınımı ihmal edildiğinde, Faraday etkisi matematiksel olarak [8]'e benzer olarak M matrisi şeklinde yazılabilir.

$$M = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

Fiber içinde elektrik alanının zayıflaması, [11]'e benzer olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$E_{alfa} = E_{pol} \sqrt{10^{-\frac{\alpha L}{10}}} \quad (10)$$

Zayıflama modelinde  $L$ , kilometreye çevrilen fiber optik kablunun uzunluğunu ve  $\alpha$  (dB/km) fiber optik zayıflama katsayısını ifade etmektedir. Zayıflamada Rayleigh saçılması küçük dalga boylarında, kızılötesi soğurma kaybı ise yüksek dalga boylarında baskın olduğundan zayıflama katsayısı aşağıdaki gibi ifade



Şekil 7. Fiber optik modeli (The model of fiber optic)

edilebilir [11].

$$\alpha(\lambda) = 7.81 \cdot 10^{11} e^{-\left(\frac{48.48}{\lambda}\right)} + \frac{1}{\lambda^4} \quad (11)$$

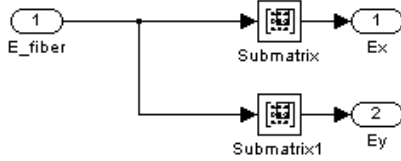
Faraday etkisinden dolayı ışığın elektrik alanındaki değişimi de aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$E_{fiber} = ME_{alfa} \quad (12)$$

Diğer yandan, lazer ışını fiber optik kablo içinde ilerlerken  $nL/c$  kadar bir zaman gecikmesi meydana gelindiğinden bu sisteme Şekil 7'deki Gecikme modeli ile dahil edilmektedir.

Şekil 8'de analizör modeli, fiber optik kabloyu terk eden ışığın elektrik alanını ideal olarak x ve y bileşenlerine ayırmaktadır. Aşağıdaki denklem ışığın elektrik alanının x ve y bileşenlerini ifade etmektedir.

$$E_{x,y} = E_{laser} \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{10^{-\frac{aL}{10}}} (\cos \theta \mp \sin \theta) \quad (13)$$



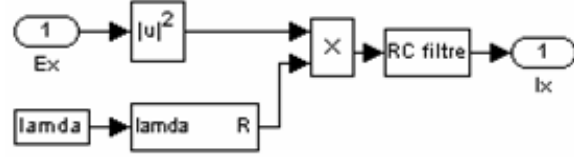
Şekil 8. Analizör modeli (The model of analyzer)

Burada, ışık detektörü olarak kullanılan fotodiyotlar modellenirken tepkisellik (responsivity) ve alçak geçiren filtre dikkate alınmıştır. Fotodiyoda gelen ışık yani elektrik alanı, büyüklüğünün karesi alınarak optik güce çevrilmektedir. Fakat bu optik güç, ışığın dalga boyu ile değişen tepkisellikten dolayı aşağıdaki denklemde ifade edildiği gibi [8]'e ek olarak belirli bir oranda elektrik akımına çevrilmektedir.

$$I_{x,y} = R |E_{x,y}|^2 \quad (14)$$

Burada  $I_{x,y}$  fotodiyot akımlarını ve  $R$  (A/W) ise fotodiyot tepkiselliğini göstermektedir. Modellenen silikon fotodiyot için  $R-\lambda$  değişimi [12]'den yararlanılarak elde edilmiştir. Optik gücün elektrik akımına dönüşmesi süresi alçak geçiren filtre tasarımı ile modellenmiştir. Fotodiyotun yükselme zamanı yaklaşık olarak 2 ns seçilmiştir. Şekil 9'da x yönündeki elektrik alanını elektrik akımına çeviren fotodiyot modeli görülmektedir.

Fotodiyotlardan elde edilen elektrik akımları aşağıdaki gibi  $\Delta/\Sigma$  işleminden geçmektedir [8].



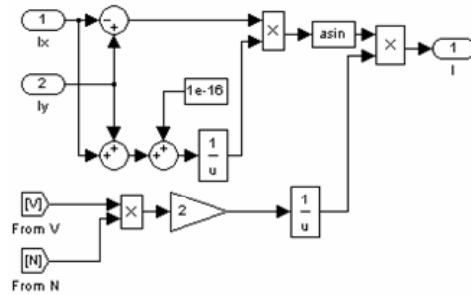
Şekil 9. Fotodiyot modeli (The model of photodiode)

$$\frac{I_y - I_x}{I_y + I_x} = \sin(2\theta) \quad (15)$$

$\theta$  değeri VNI değerine eşit olduğundan iletkenden geçen akım aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$I = \frac{1}{2VN} \arcsin\left(\frac{I_y - I_x}{I_y + I_x}\right) \quad (16)$$

Şekil 10'da modellenenmiş ideal bir hesaplama birimi görülmektedir.

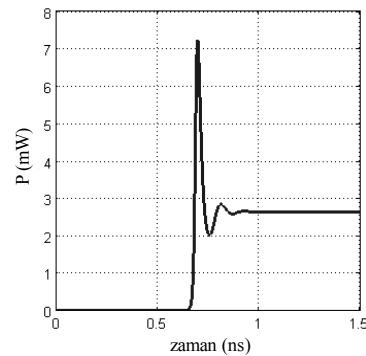


Şekil 10. Hesaplama birimi (The unit of calculating)

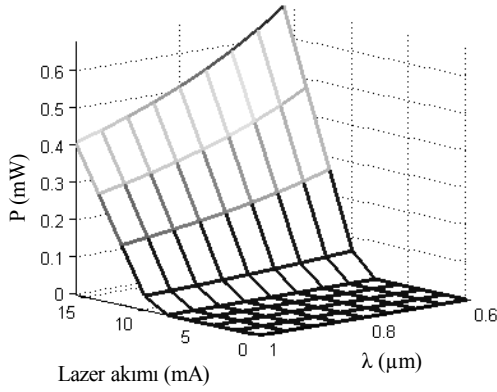
### 3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME (RESULTS AND DISCUSSION)

Şekil 11'de, lazer dalga boyu 950 nm ve lazer giriş akımı 50 mA iken simüle edilen sistemde, lazer çıkış gücünün yaklaşık 1ns sonra sürekli duruma geçtiği, yapılan bir çalışma ile de benzer olarak gözlemlenmektedir [13].

Şekil 12'de, sistemin önemli dinamiklerden olan lazer giriş akımı ve lazer dalga boyunun değişimi ile lazer çıkış gücü arasındaki ilişki gösterilmektedir. Belli bir eşik akımından sonra lazer çıkış gücünün arttığı, yapılan bir çalışmada da gözlemlenmektedir [13].



Şekil 11. Lazer geçici rejimi (The transient-state of the laser)

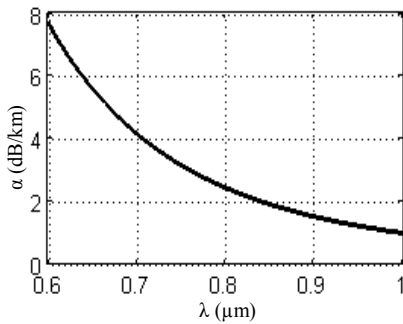


Şekil 12. Lazer çıkış gücü (Laser output power)

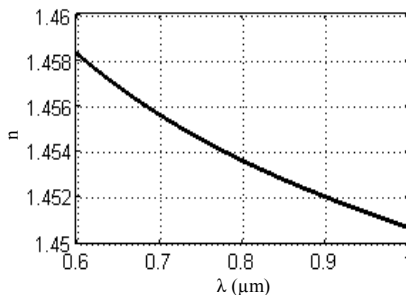
Bununla beraber lazer dalga boyunun artmasıyla fotonların enerjisi ve dolayısıyla lazer çıkış gücü de azalmaktadır. Lazer giriş akımı 2 mA'lık, dalga boyu ise 50 nm'lik arttırmalar ile değiştirilmektedir.

Şekil 13'de, fiber optik zayıflama katsayısının lazer dalga boyu ile değişim grafiği görülmektedir. Verilen sınırlar içinde dalga boyunun artması ile beraber Rayleigh saçılmasının ve dolayısıyla zayıflama katsayısının azaldığı görülmektedir. 850 nm'de tek modlu bir fiberin zayıflama katsayısı 1.91 dB/km bulunmuştur. Bu değer [14]'de 1.81 dB/km olarak belirtilmektedir.

Şekil 14'de, fiber optik özünün kırılma indisinin, lazer dalga boyu ile değişimi görülmektedir. Verilen sınırlar içinde dalga boyunun artması ile özün kırılma indisinin azalması [9,15]'de bahsedilen bir deneyde gösterilmiş ve 633 nm'de fiber özünün kırılma indisi



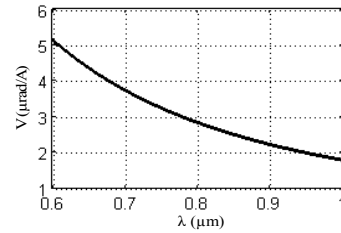
Şekil 13. Fiber optik zayıflama katsayısı (The fiber optic attenuation coefficient)



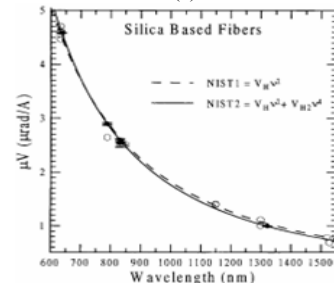
Şekil 14. Fiber optik kırılma indisi (The fiber optic refractive index)

1.458 olarak bulunduğu bildirilmiştir. Bu çalışmada yapılan modelleme ve benzetim sonucunda çok yakın bir değer 1.457 elde edilmektedir.

Şekil 15'(a) da, fiber optik Verdet sabitinin, lazer dalga boyu ile değişimi, Rose ve arkadaşları tarafından yayınlanan bir makaledeki Verdet sabiti değişimi ile benzerliği görülmektedir [16]. Verilen sınırlar içinde dalga boyunun artması Verdet sabitinin ve dolayısıyla ışığın polarizasyon düzlemindeki açısının azalmasına neden olmaktadır.



(a)

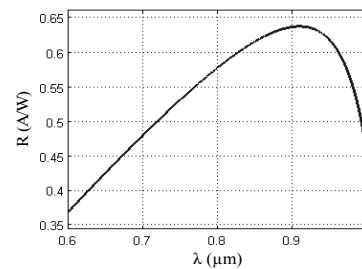


(b) [16]

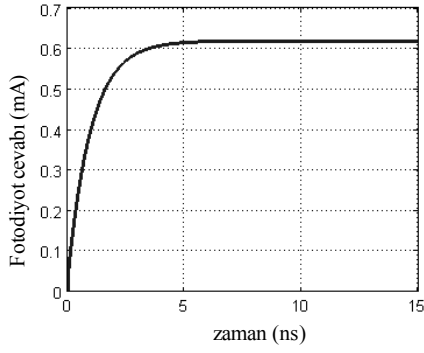
Şekil 15. Fiber optik Verdet sabiti (The Verdet constant of the fiber optic)

Şekil 16'da, oluşturulan fotodiyot tepkisellik fonksiyonunun, Si PIN fotodiyotların veri sayfalarında yer aldığı gibi, lazer dalga boyu ile değişimi görülmektedir [12]. Silikon fotodiyotlarda yüksek dalga boylarından dolayı düşük foton enerjisi, bant aralığı enerjisini yenememektedir. Bunun sonucunda fotodiyot bir elektrik akımı üretememektedir.

Şekil 17'de, modellenen fotodiyotun 950 nm'de 1 mW'lık foton gücünden üretilen elektrik akımının geçici rejimi görülmektedir. Sürekli durumda ise fotodiyotun tepkiselliğinden dolayı, 950 nm dalga boyundaki foton giriş gücünün yaklaşık %62'si elektrik akımına çevrilebilmektedir.

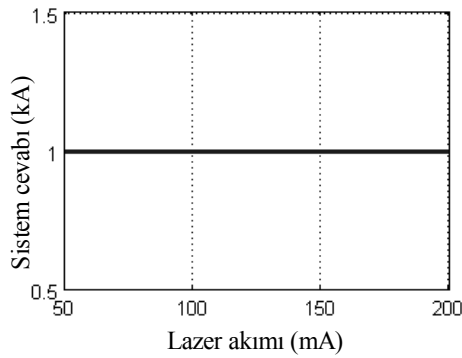


Şekil 16. Fotodiyot tepkiselliği (The responsivity of the photodiode)



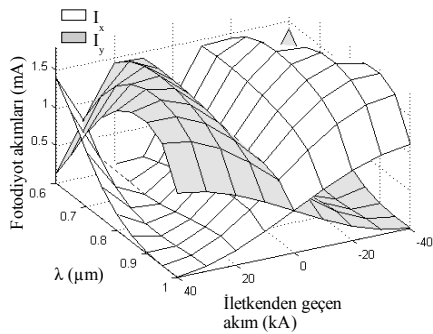
**Şekil 17.** Fotodiyot geçici rejimi (The transient-state of the photodiode)

Şekil 18’de, iletkenen geçen akım sabitken (1kA) lazer giriş akımını arttırmak suretiyle lazer gücü artırılmış buna rağmen fiber optik sensör sisteminin cevabı sabit kalmıştır (1kA). Bu grafik böyle bir modelin sistem çıkışının lazer gücünden bağımsız olduğunu göstermektedir.



**Şekil 18.** Lazer akımının sistem cevabına etkisi (The effect of the laser current to the system response)

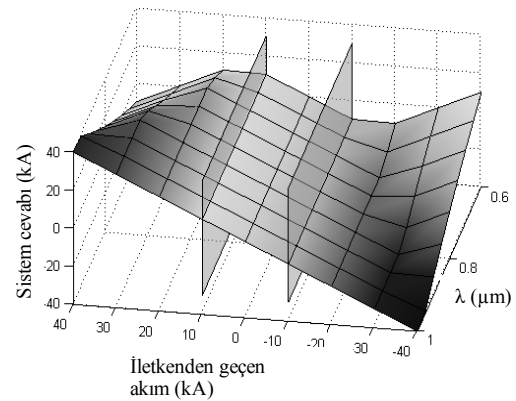
Şekil 19’da, fiber optik sarım sayısı 10 ve lazer giriş akımı 50 mA iken, dalga boyu 0.6-1  $\mu\text{m}$  arasında 0.05  $\mu\text{m}$  artırımlarla ve iletkenen geçen akım -40 - 40 kA arasında 10 kA’lık artırımlarla değiştirilmektedir. Böylece lazer dalga boyu ve iletkenen geçen akımın, fotodiyot akımlarına etkisi gözlemlenmektedir. iletkenen akım geçmediğinde, fotodiyotların ürettiği akımlar birbirine eşit olmaktadır. Dalga boyu 1 $\mu\text{m}$  civarında iken iletkenen geçen akım pozitif çok



**Şekil 19.** Fotodiyotların akımları (The current of the photodiodes)

büyükse  $I_x$  akımı, negatif çok büyükse  $I_y$  akımı sıfıra çok yakın olmaktadır. Yüksek giriş akımlarında, düşük dalga boylarında Verdet sabitinin artması fotodiyot akımları üzerinde istenmeyen değişimler meydana getirmektedir.

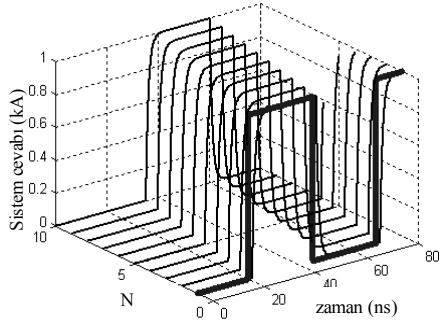
Şekil 20’de ise fiber optik sarım sayısı 10 ve lazer giriş akımı 50 mA iken, dalga boyu 0.6-1  $\mu\text{m}$  arasında 0.05  $\mu\text{m}$  artırımlarla ve iletkenen geçen akım -40 - 40 kA arasında 10 kA’lık artırımlarla değiştirilmektedir. Böylece lazer dalga boyu ve iletkenen geçen akımın, sistem cevabına etkisi gözlemlenmektedir. Düşük dalga boylarında Verdet sabiti büyük değerler almaktadır. Eğer iletkenen geçen akım yeteri kadar büyükse Verdet sabiti,  $\theta$  açısını  $\pi/4$  radyandan daha yüksek bir değere ulaştırabilir ( $\pi/4 < \theta < \pi/2$ ). Sistem çıkışı  $2\theta$ , analitik düzlemde ikinci bölgeye geçtiğinden dolayı bu açının ters sinüs fonksiyonundan geri dönen değerinin yarısı  $\theta$  açısını değil, tümleyenini vermektedir. Sonuçta sistem çıkışı yanlış cevap vermektedir. Dalga boyunun artmasıyla Verdet sabiti azalacağından dolayı sistem çıkışı doğrusallaşmaktadır. Fakat fotodiyotun duyarlılığı yaklaşık 900nm’den sonra yüksek bir eğimle azaldığından fotodiyot akımı çok azalacaktır. Böyle bir sinyal kuvvetlendirilmek istenildiğinde gürültü parametresi önem arz edecektir. Bunun yanında 0.6-1  $\mu\text{m}$  arası dalga boyu değişiminde model -10 - 10 kA aralığında, kaynak [17] ile benzer olarak, doğrusal bir cevap verdiği görülmektedir.



**Şekil 20.** Sistem cevabı (The system response)

Şekil 21’de dalga boyu 950 nm ve lazer giriş akımı 50 mA iken 20. ns’de binen 20 Mhz’lik 1 kA’lık akım darbesinin ve N sarım sayısının sistem cevabına etkisi görülmektedir. N arttıkça, fiber optik kablonun uzunluğu ve buna bağlı olarak ışığın kat ettiği zaman artmaktadır. Bu nedenle sistemin cevabın da bir gecikme olmaktadır.

Verdet sabitin kırılma indisi ve dalga boyu ile değiştiği bilinmektedir. Verdet sabitinin değişimi polarizasyon açısını da etkilediğinden dolayı dikkate alınmalıdır. Yüksek dalga boyu yani düşük Verdet sabiti daha yüksek akımlar ölçmemize imkan



**Şekil 21.** Fiber optik sarım sayısının sistem cevabına etkisi (The effect of the number of turns of fiber wound to the system response)

sağlarken, dalga boyu duyarlılık ilişkisinden dolayı fotodiyot akımlarının çok düşük olmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda kuvvetlendirilen fotodiyot akımlarında gürültü değeri daha yüksek olacaktır. Böyle bir sistemde, lazer giriş gücü, sistem çıkışını etkilememektedir. Dolayısıyla zayıflamadan dolayı fiber optik kabloda meydana gelen güç azalmasının da bir önemi kalmamaktadır. Fiber optik kablonun sarım sayısı arttığında fiber optik kablo uzunluğu artmakta ve bu uzunluk bir sinyal gecikmesine neden olmaktadır. Bunun sonucunda sistem çıkışı ancak gecikmeli tepki verebilmektedir. Fiber optik kablonun sarım sayısını değiştirmek suretiyle akımın ölçüm aralığı değiştirilebilmektedir. Böyle bir sistemin gerçekleşmesi istenildiğinde, hesaplama birimi kısmında, fotodiyotlardan elde edilen akımlar gerilime dönüştürülmekte ve istenilen seviyeye yükseltilmektedir. Hesaplama biriminde işlemlerin yapılabilmesi için bu sinyaller analog–dijital dönüştürücüler aracılığıyla dönüştürülmektedir. Bu dönüştürücünün referans gerilimini bulmak için ne kadarlık bir skalada ölçüm yapılacağı belirlenmekte ve fotodiyot akımlarının hangi değer aralığı içinde değiştiği gözlemlenmektedir.

#### 4. SONUÇ (RESULTS)

Bu çalışma, Faraday etkili fiber optik akım sensörü üretimi ve uygulamalarında sistemi oluşturan elemanların seçimi, kullanımı ve uygulamada meydana gelebilecek durumları ve sistem dinamiklerinin etkilerini önceden kestirmek için oldukça faydalı çıktılar sunmaktadır. Ayrıca, bu makalede sunulan modeller; lazer, fiber optik, polarizör, analizör ve fotodiyot kullanan başka sistemler ve uygulamalar için de kullanılabilir.

#### SEMBOLLER (NOMENCLATURES)

$i(t)$	-	A	Lazer akımı (laser current)
$S(t)$	-	$m^{-3}$	Foton yoğunluğu (foton density)
$\Gamma$	0.44	—	Optik tutsaklık faktörü (optical confinement factor)

$g_0$	$3.0 \times 10^{-6}$	$cm^{-3}/s$	Kazanç eğimi (slope gain)
$N(t)$	-	$m^{-3}$	Taşıyıcı yoğunluğu (carrier density)
$N_o$	$1.2 \times 10^{18}$	$cm^{-3}$	Saydımlıktaki taşıyıcı yoğunluğu (carrier density at transparency)
$\varepsilon$	$3.4 \times 10^{-17}$	$cm^3$	Kazanç doyum parametresi (gain saturation parameter)
$\tau_p$	$1.0 \times 10^{-12}$	s	Foton ömrü (photon lifetime)
$\beta$	$4.0 \times 10^{-4}$	—	Kendiliğinden yayılım faktörü (spontaneous emission factor)
$\tau_n$	$3.0 \times 10^{-9}$	s	Taşıyıcı ömrü (carrier lifetime)
$V_a$	$9.0 \times 10^{-11}$	$cm^3$	Aktif bölgenin hacmi (volume of the active region)
$\alpha_L$	5.6 [18]	—	Hat genişliği ek faktörü (line-width enhancement factor)
$P(t)$	-	W	Optik güç (optic power)
$q$	$1.602 \times 10^{-19}$	C	Elektron yükü (elektron charge)
$\eta$	0.1	—	Toplam kuvantum verimi (total quantum efficiency)
$h$	$6.624 \times 10^{-34}$	J.s	Plank sabiti (Planck's Constant)
$c$	$3 \times 10^8$	m/s	Işık hızı (light speed)
$\alpha$	-	dB/km	Zayıflama katsayısı (attenuation coefficient)
$R$	-	A/W	Fotodiyot tepkiselliği (fotodiyot responsivity)
$\theta$	-	rad	Kutuplanma düzlemi dönme açısı (Polarization rotation angle)
$V$	-	rad/A	Verdet sabiti (Verdet Constant)
$r$	0.05	m	İletkenin yarı çapı (conductor radius)
$E$	-	V/m	Elektrik alanı (electric field)
$H$	-	A.sarım/m	Manyetik alan şiddeti (Magnetic field intensity)
$L$	-	m	Uzunluk (Length)
$\lambda$	-	m	Lazer dalgaboyu (laser wavelength)

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Liehr, S., "Optical Measurement of Currents in Power Converters", Master's Thesis Project, Microsystem Technology Group School of Electrical Engineering Royal Institute of Technology, Stockholm, 1, (2006).



2. 2. Leung, F.Y.C., Chiu, W.C.K., Demokan, M.S., "Fiber-Optic Current Sensor Developed for Power System Measurement", IEEE International Conference on Advances in Power System Control, 637, 638, (1991).
3. 3. Tantaswadi, P., "In-Line Sagnac Interferometer Current Sensor", For the Degree of Doctor of Philosophy, Office of Graduate Studies of Texas A&M University, 1, (1995).
4. 4. Briffod, F., Alasia, D., Thévenaz, L., Cuénoud, G., Robert, P., "Extreme Current Measurements Using A Fibre Optics Current Sensor", Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 1, (2002).
5. 5. Ulmer, E.A., "A High-Accuracy Optical Current Transducer for Electric Power System", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, 896, (1990).
6. 6. Schaer, T., Rusnov, R., Eagle, S., Jastrebski, J., Albanese, S., Fernando, X., "A Dynamic Simulation Model for Semiconductor Laser Diodes", IEEE CCECE Canadian Conference, 293, 297, (2003).
7. 7. Cvetković, M., Matavulj, P., Radunović, J., Marinčić, A., "An InGaAs P-i-N Photodiode Model: Description and Implementations in The Analysis of The 1.55  $\mu\text{m}$  Lightwave System", Journal of Optical Communications, Vol. XX, No. Y, 2, (2000).
8. 8. Jiao, B., Wang, Z., Liu, F., Bi, W., "Interferometric Fiber-Optic Current Sensor with Phase Conjugate Reflector", Proceeding of the 2006 IEEE International Conference on Information Acquisition, China, 707, 708, (2006).
9. 9. Özkan, M., "Fiber Optik Kablolar ile İletişim ve Fiber Optik Dalgakılavuzları", Yüksek lisans tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 10, (1998).
10. 10. Stokes, J.L., Bartsch, R.R., Cochrane, J.C., Chrien, R.E., Forman, P.J., Looney, L.D., Tabaka, L.J., Veese, L.R., "Precision Current Measurements on Pegasus II Using Faraday Rotation", Pulsed Power Conference, 381, (1995).
11. 11. Kerstetter, P.C., "Models of Optoelectronic Devices Suitable for Electrical Circuit Simulation", For the Degree of Doctor of Philosophy, Georgia Institute of Technology, 41, 180, 181, (1998).
12. 12. Si PIN photodiode S5971, S5972, S5973 series [online], [http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts\\_S/S5971\\_etc.pdf](http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_S/S5971_etc.pdf), 2, (Ziyaret tarihi: 04.04.2007).
13. 13. Habibullah, F., Huang, W. P., "A Self-Consistent Analysis of Semiconductor Laser Rate Equations For System Simulation Purpose", Optics Communications 258, 237, 238, (2006).
14. 14. Fiber Optics [online], [http://www.commsplace.com/Knowledge/ITcs/html/tutorials/fibre\\_optics/introduction\\_fibre\\_optics.htm](http://www.commsplace.com/Knowledge/ITcs/html/tutorials/fibre_optics/introduction_fibre_optics.htm), (Ziyaret tarihi: 30.04.2008).
15. 15. Reddy, M., "Imbedded Optical Fiber Sensor of Differential Strain And Temperature in Graphite/Epoxy Composites", For the Degree of Master of Science, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 22, (1986).
16. 16. Rose, A. H., Etzel, S. M. Wang, C. M., "Verdet Constant Dispersion in Annealed Optical Fiber Current Sensors", Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 5, 806, (1997).
17. 17. Li, H. Y., Crossley, P. A., Aggarwal, R. K., "Application of Fibre Optical Current Transducer to Protection", Developments in Power System Protection, IEE, 275, (1997).
18. 18. Gan, K. G., Bowers, J. E., "Measurement of Gain, Group Index, Group Velocity Dispersion, and Linewidth Enhancement Factor of an InGaN Multiple Quantum-Well Laser Diode", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, No. 5, 1256, (2004).