

FİBER BRAGG IZGARA TABANLI OPTİK SENSÖRÜN ANALİZİ

Lale KARAMAN¹

N. Özlem ÜNVERDİ²

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
Elektrik-Elektronik Fakültesi
Yıldız Teknik Üniversitesi, 34349, Beşiktaş, İstanbul

¹ e-posta: lale_karaman@yahoo.com

² e-posta: unverdi@yildiz.edu.tr

Anahtar sözcükler : Optik haberleşme, optik sensör, fiber Bragg ızgara, Bragg dalgaboyu

ÖZET

Günümüzde optik fiber haberleşme sistemleri, teknolojinin ana yapısını oluşturmaktadır. Optik fiber haberleşme teknolojisindeki hızlı ve belirgin gelişme, elektronik alanda kullanılan sensör sistemlerinin yaygınlaşmasına neden olmuştur. Günümüzde üretilen birçok sensör çeşidi bulunmaktadır.

Bu çalışmada, optik fiber sensör çeşitleri arasında yer alan fiber Bragg ızgara tabanlı sensörler analiz edilmiştir. Izgaraların karakteristik özelliklerini oluşturan dalgaboyu, yansıma ve iletim spektrumu band genişliği gibi özellikleri incelenmiştir. Çalışmada, yansıyan ve iletilen güç miktarlarının, ızgara periyoduna, ızgara uzunluğuna ve kırılma indisi değerlerine bağlı olarak değişimi irdelenmiş, sıcaklık ve gerilmeye bağlı olarak, yansıyan dalgaboyunda meydana gelen değişim miktarları belirlenmiştir.

1. GİRİŞ

Elektronik sistemlerin çoğunda sensörler önemli bir yere sahiptir. Optik fiber haberleşme teknolojisindeki gelişmeler, optik fiber sensörlere olan ilgiyi artırmıştır. Çeşitli fiziksel ve kimyasal olayların optik fiber sensör içinden geçen ışığın şiddetine, iç yansımaya ve polarizasyon durumuna etki etmesi, bu olaylara etkili olan büyüklüklerin ölçülmesine imkan sağlar. Optik fiber sensörlerin endüstride birçok uygulama alanı vardır. Otomotiv, makina araçları, havacılık, jeofizik, petro-kimya ve askeri uygulamaları bilinen en önemli uygulama alanlarıdır.

Dalgaboyunda meydana gelen değişimleri inceleyerek algılama yapan fiber Bragg ızgara tabanlı sensörlerin en büyük avantajı, algılanan parametrenin etkilerinin, dalgaboyuna etkisinin hemen görülmesidir. Dalgaboyunda meydana gelen kayma miktarları incelenerek sıcaklık ve gerilme algılamaları yapılmaktadır. Çalışmada, sıcaklık ve gerilmeye bağlı olarak, yansıyan dalgaboyunda meydana gelen değişimlere duyarlı fiber Bragg ızgara tabanlı sensörler incelenmiştir.

Çalışmanın 2. Bölümü'nde, fiber Bragg ızgaraların karakteristik özellikleri açıklanmıştır. 3. Bölüm'de, fiber Bragg ızgara tabanlı sensörlerin, sıcaklık ve gerilme duyarlılığı analiz edilerek 4. Bölüm'de, elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. FİBER BRAGG IZGARALAR

Optik fiber, yoğun ultraviyole ışığa maruz kaldığı zaman kırılma indisi değişime uğramaktadır. Kırılma indisinde meydana gelen bu değişim, dalgaboyu, yoğunluk ve uygulanan ışığın miktarına bağlıdır. Genellikle bu değişimi sağlamak için, 248 nm ve 193 nm dalgaboyunda ultraviyole ışık veren ve içinde çok gelişmiş bir bilgisayar bulunan lazerler (excimer) kullanılmaktadır [1, 2]. Germanyum katkılı, tek modlu fiberdeki kırılma indisi değişimi 10^{-5} ile 10^{-2} aralığında yer alır.

Bir fiber Bragg ızgarada kırılma indisinin değişiminden dolayı yayılan modların birbirine etkisi, zıt yönde ilerleyen modlar arasında meydana gelir. Kırılma indisinde meydana gelen değişimden dolayı, optik fiberin çekirdek bölgesinde ızgara oluşumu meydana gelir. Bragg şartı olarak bilinen belirli şartlar altında, ızgarayı oluşturan saçaklardan yansıyan ışık birbirine eklenir ve büyük bir yansıma meydana gelir. ızgara saçak aralığı (Λ) ızgara periyodu olarak isimlendirilir. Ünitiform ızgaralar için periyot, ızgara boyunca sabit kalırken, cıvıltılı ızgaralarda değişir. Kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarı, üniform ızgaralarda ızgara uzunluğu boyunca sabit kalırken, apodize ızgaralarda farklılık gösterir. Bragg ızgaralarda, ızgara periyodu 1 μm 'den küçüktür.

Yansıma modunda çalışan fiber Bragg ızgaralar, fiber girişine uygulanan ışığın bir kısmını ızgara saçaklarından geri yansıtarak çalışırlar. Bu yansıtıcılık Bragg dalgaboyunda (λ_B) en yüksek değerine ulaşır. Yansıyan ışık spektrumu çok dar ve Bragg dalgaboyunda merkezlenmiş durumdadır.

Bragg şartı,

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir [1, 2]. Burada, λ_B , Bragg dalgaboyu (ızgaradan geri yansiyacak ışığın merkez dalgaboyu), n_{eff} , merkez dalgaboyunda çekirdek bölgesinin etkin kırılma indisi ve Λ , ızgara periyodunu temsil eder.

2.1 KUPLE MOD TEORİSİ

Fiber ızgara karakteristikleri, birçok yöntemle modellenerek anlaşılabilir. Kuple Mod Teorisi, bu yöntemler arasında en çok kullanılanıdır. Karmaşık olmaması ve ilgilenilen pek çok fiber ızgaranın optik özelliklerini hassas olarak modellemesi nedeniyle bu çalışmada Kuple Mod Teorisi göz önüne alınmıştır.

Kuple Mod Teorisi kullanılan analitik yöntemlerde, fiber Bragg ızgaranın ileri ve geri yönde hareket eden ve genlikleri optik eksene bağlı olarak değişen modlar arasında, karşılıklı etkileşimin olduğu varsayılır. Iızgara periyodu ve kırılma indisi değişimi periyodik olarak değiştiği zaman dalgaboyunun bir fonksiyonu olan yansıtıcılık için analitik bir çözüm elde edilir.

Sonlu uzunluklu üniform ızgaraların, yansıma özelliklerini tanımlamak için zamandan bağımsız kuple mod eşitlikleri kullanılır. $S_+(z)$ ızgara boyunca ilerleyen alan, $S_-(z)$ ızgara boyunca yansıyan alan olmak üzere, kuple mod eşitlikleri:

$$\frac{dS_+}{dz} = i [\delta S_+(z) + \Omega S_-(z)] \quad (2)$$

$$\frac{dS_-}{dz} = -i [\delta S_-(z) + \Omega S_+(z)] \quad (3)$$

formundadır. Burada, Ω , ileri ve geri yöndeki propagasyon modları arasındaki kuplaj katsayısıdır. Kuplaj katsayısı,

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n \eta}{2 n_{eff} \Lambda} \quad (4)$$

olarak tanımlanır [1]. Burada, η , modal örtüşme faktörünü gösterir ve bu değer, yaklaşık olarak 1'e eşittir. Burada δ , bozulmayı ifade eder ve

$$\delta = \frac{n_{eff}}{c} (\omega - \omega_B) = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda} = 2\pi n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) \quad (5)$$

şeklinde gösterilir [3]. Burada ω_B , Bragg dalgaboyundaki açılal frekans,

$$\omega_B = \frac{\pi c}{n_{eff} \Lambda} \quad (6)$$

dır.

Bragg ızgaranın uzunluğunun L kadar olduğu düşünülürse, $S_-(L) = 0$ sınır koşulu altında, (2) ve (3) eşitliklerinin çözümüne göre, gelen alan ve yansıyan alan ifadeleri,

$$S_+(z) = \alpha \cosh(\alpha(L-z)) - i \delta \sinh(\alpha(L-z)) \quad (7)$$

$$S_-(z) = i \Omega \sinh(\alpha(L-z)) \quad (8)$$

olarak elde edilir. Burada,

$$\alpha = \sqrt{\Omega^2 - \delta^2} \quad (9)$$

dir.

Iızgaradan yansıyan güç miktarı,

$$R = |\Gamma|^2 = \frac{\Omega^2 \sinh^2(\alpha L)}{\alpha^2 \cosh^2(\alpha L) + \delta^2 \sinh^2(\alpha L)} \quad (10)$$

ve iletilen güç miktarı ise,

$$T = |\tau|^2 = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 \cosh^2(\alpha L) + \delta^2 \sinh^2(\alpha L)} \quad (11)$$

olarak bulunur [4].

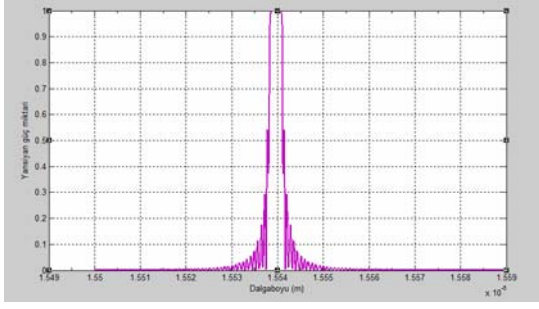
Iızgaradan yansiyabilecek maksimum güç, $\delta = 0$ şartı sağlandığı zaman elde edilir. Bu durumda,

$$R_{\max} = \tanh^2(\Omega L) \quad (12)$$

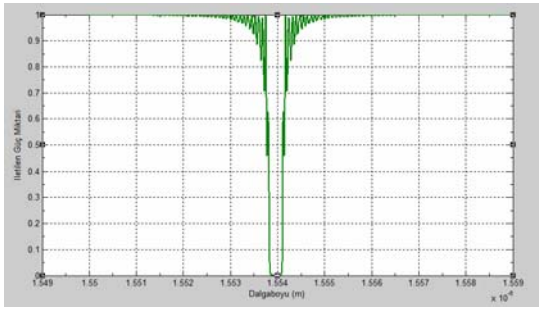
olur [5].

Dalgaboyu 1550 nm ile 1559 nm aralığında, ızgara uzunluğu $L = 10$ mm, ızgara periyodu $\Lambda = 0.53$ μm , ızgaranın efektif kırılma indisi $n_{eff} = 1.466$, kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarı $\Delta n = 0.00025$ olarak alındığı durum için, ızgaradan yansıyan güç miktarının dalgaboyuna göre değişimi, Şekil-1'de, ızgaranın ilettiği güç miktarının dalgaboyuna göre değişimi ise Şekil-2'de görülmektedir [6]. Yansıyan güç miktarının Bragg dalgaboyunda en yüksek seviyeye ulaştığı, iletilen güç miktarının ise Bragg dalgaboyunda en düşük seviyede kaldığı gözlenmektedir.

Daha önce belirtilen ızgara koşulları geçerli durumdayken, ızgara uzunluğunun değişik değerleri

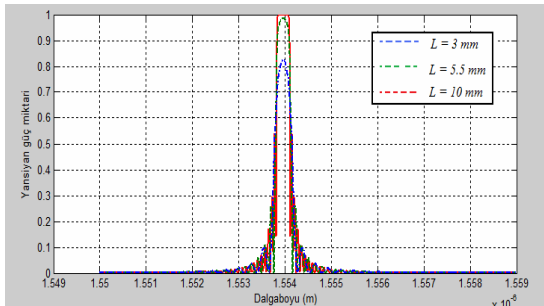


Şekil-1 : Fiber Bragg ızgaradan yansıyan güç miktarının dalgaboyuna göre değişimi.



Şekil-2 : Fiber Bragg ızgaradan iletilen güç miktarının dalgaboyuna göre değişimi.

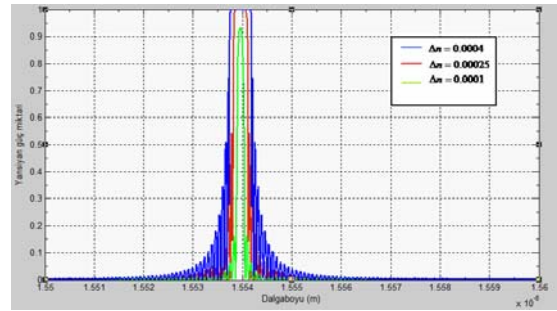
için ızgaradan yansıyan güç miktarı değişimi Şekil-3'de yer almaktadır. Buna göre, ızgara uzunluğu arttığında yansıyan güç miktarının da arttığı görülmekte ve kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarı sabit tutulduğu durumda daha büyük uzunluklu fiber ızgaralar kullanılarak yüksek yansıtıcılık değerleri elde edilebilmektedir. Ancak ızgara uzunluğunun artması daha yüksek maliyetli sensör yapımını gerektirmektedir.



Şekil-3 : Değişik ızgara uzunlukları için fiber Bragg ızgaradan yansıyan güç miktarlarının dalgaboyuna göre değişimi.

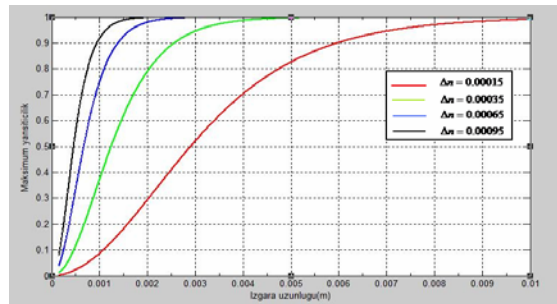
Dalgaboyu 1550 nm ile 1560 nm aralığında, ızgara uzunluğu $L = 10$ mm, ızgara periyodu $\Lambda = 0.53$ μm , ızgaranın efektif kırılma indisi $n_{\text{eff}} = 1.466$ olarak

alındığı durumda, kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarının farklı değerleri için, ızgaradan yansıyan güç miktarı Şekil-4'de görülmektedir. Buna göre, kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarı arttıkça, yansıyan güç miktarının arttığı ve iletilen güç miktarlarının ise azaldığı görülmektedir. Ayrıca şekilden görüldüğü gibi, kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarı arttıkça band genişliğinde artış gözlenmektedir. Bunun yanı sıra, kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarının artmasıyla yansıma spektrumunun yan loblarında taşınan güç miktarının da arttığı görülmektedir. Kuplaj katsayısı olan Ω değeri, Δn ile doğru orantılı olarak değişir; buna göre, kuplaj katsayısı arttıkça yansıyan güç miktarı artmaktadır.



Şekil-4 : Değişik Δn değerleri için fiber Bragg ızgaradan yansıyan güç miktarlarının dalgaboyuna göre değişimi.

Dalgaboyunun 1550 nm, ızgara uzunluğunun 1.5 mm ile 10 mm aralığında olduğu ve kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarının değişik değerler aldığı durumda ızgara uzunluğuna bağlı olarak değişen maksimum yansıtıcılık eğrisi Şekil-5'de yer almaktadır. Buradan, yansıtıcılığın en yüksek değere ulaştığı noktaya, kırılma indisi değişiminin yüksek değerleri için, çok daha kısa ızgaralarla erişilebileceği sonucuna varılabilir. Bu durum, efektif olarak kullanılacak ızgara uzunluğunun bulunabilmesi konusunda kullanışlı bir yöntem oluşturmaktadır.



Şekil-5 : Maksimum yansıtıcılığın ızgara uzunluğuna bağlı olarak değişimi.

3. FİBER BRAGG IZGARA TABANLI SENSÖRLER

Fiber Bragg ızgara tabanlı sensörler, dalgalıboyunda meydana gelen değışimleri inceleyerek algılama yapan elemanlardır ve en büyük avantajları, algılanan parametrenin etkilerinin, dalgalıboyuna etkisinin hemen görölmesidir. Dalgalıboyunda meydana gelen kayma miktarları dikkate alınarak sıcaklık ve gerilme algılamaları yapılmaktadır.

Fiber Bragg ızgaralara, sıcaklık veya gerilme gibi bir kuvvet uygulandıında ızgaranın periyodunda ve kırılma indisinde değışiklik meydana gelir ve bu durum Bragg dalgalıboyunda kayma olmasına neden olur [7].

3.1 FİBER BRAGG IZGARA TABANLI SENSÖRLERİN SICAKLIK DUYARLILIĞI

Fiber Bragg ızgaralar, sıcaklığa karşı duyarlılık gösteren elemanlardır. Sıcaklıkta meydana gelen değışim, Bragg dalgalıboyunda değışim olmasına yol açar. Dalgalıboyunda meydana gelen kayma, termal genişleme ve büzölmeden dolayı ızgara periyodunun ve fiberin kırılma indisinin sıcaklıkla değışime uğramasından kaynaklanır. Sıcaklık değışimiyle dalgalıboyunda meydana gelen kayma miktarı,

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T \quad (13)$$

olarak tanımlanır. Burada,

$$\alpha_\Lambda = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \quad (14)$$

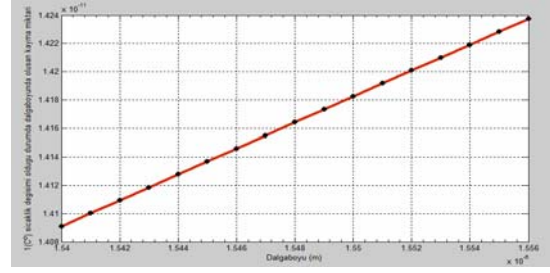
şeklinde tanımlanan terim, boyuna termal uzama katsayısını ifade eder. Cam fiberler için, termal uzama katsayısı, $\alpha_\Lambda = 0,55 \cdot 10^{-6} C^{-1}$ değeri alır. Aynı eşitlikte,

$$\alpha_n = \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \quad (15)$$

şeklinde tanımlanan terim ise, kırılma indisinin sıcaklıkla değışim miktarının dalgalıboyuna etkisini ifade eder ve termo-optik katsayı olarak kullanılır. Cam fiberler için, termo-optik katsayısı $\alpha_n = 8,6 \cdot 10^{-6} C^{-1}$ değeri alır [1, 8].

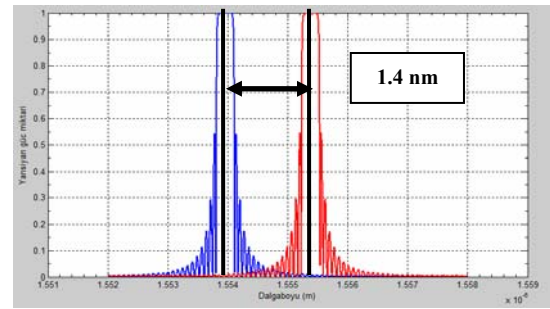
Sıcaklıkta meydana gelen $1 C^\circ$ 'lik değışime bağlı olarak değışik dalgalıboylarında meydana gelen kayma miktarının yer aldığı Şekil-6'da görölüğü gibi, 1550 nm dalgalıboyunda, 0.01419 nm'lik kayma meydana gelmektedir. Buna karşın çok yüksek sıcaklıklar fiber kaplamaya zarar verir ve fiber Bragg ızgaraların

yansıtıcılığını azaltabilir ve yansıtıcılık özelliğini tamamen yok edebilir.



Şekil-6 : $1 C^\circ$ sıcaklık değışimi olduğu durumda oluşan kayma miktarı.

Termal uzama katsayısı ve termo-optik katsayı belirtilen değeri aldığı durumda, sıcaklıkta meydana gelen $100 C^\circ$ 'lik değışim miktarı için, yansıyan güç spektrumunda meydana gelen değışim miktarının görölüğü Şekil-7'de mavi ile gösterilen eğri, Bragg dalgalıboyunun $\lambda_B = 1554$ nm olarak alındığı referans yansıma spektrumunu, kırmızı ile gösterilen eğri ise sıcaklık değışimi sonrasında dalgalıboyunda meydana gelen kayma miktarına bağlı olarak değışen yansıma spektrumunu göstermektedir. Sıcaklıkta meydana gelen $100 C^\circ$ 'lik değışim sonucunda, yansıyan güç spektrumunun en yüksek değere ulaştığı dalgalıboyu, referans dalgalıboyundan 1.4 nm uzakta yer almaktadır.



Şekil-7 : Sıcaklıkta meydana gelen değışime bağlı yansıyan güç spektrumu.

3.2 FİBER BRAGG IZGARA TABANLI SENSÖRLERİN GERİLME DUYARLILIĞI

Fiber Bragg ızgaralar, sıcaklığa olduğu gibi gerilmeye karşı da duyarlılık gösteren elemanlardır. Gerilme ile meydana gelen değışim, Bragg dalgalıboyunda değışim olmasına yol açar. Her madde belirli bir elastisite özelliğine sahiptir. ızgaraya bir gerilme kuvveti uygulandıında, maddenin sahip olduğu fotoelastik

katsayı değişime uğrar ve dalgaboyunda kayma meydana gelir. Gerilme değişimiyle dalgaboyunda meydana gelen kayma miktarı,

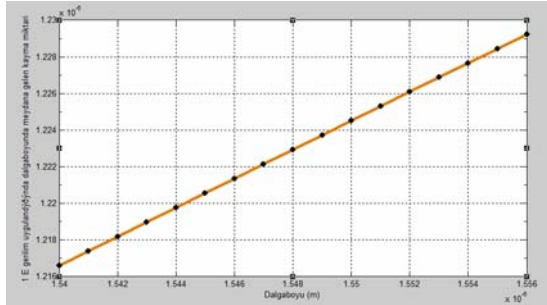
$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) G_z \quad (16)$$

olarak tanımlanır. Burada, G_z , ızgaraya uygulanan gerilme miktarını gösterir. P_e ise fotoelastik katsayısını ifade eder ve

$$P_e = \frac{n_{eff}^2}{2} (p_{12} - m(p_{11} + p_{12})) \quad (17)$$

dir. Burada p_{ij} olarak gösterilen terimler, stres-optik tensörün Pockel katsayılarını, m olarak gösterilen terim ise, Poisson oranını ifade eder. Germanyum katkılı cam fiber için, $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, $m = 0,16$ ve $n_{eff} = 1,482$ değerlerini alır. Bu durumda fotoelastik katsayı değeri $P_e = 0,21$ olarak bulunur [1, 7, 8].

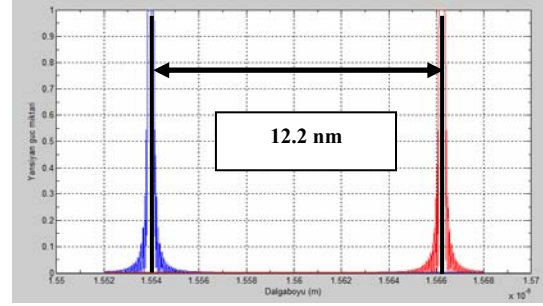
Şekil-8’de, gerilme kuvvetinde meydana gelen 1 birimlik gerilme değişimine bağlı olarak değişim dalgaboylarında meydana gelen kayma miktarı yer almaktadır. Şekilden görüldüğü gibi, 1550 nm dalgaboyunda, yaklaşık olarak 1.225 μm ’lik kayma meydana gelmektedir.



Şekil-8 : 1 birim gerilme kuvveti değişimi olduğu durumda oluşan kayma miktarı.

Fotoelastik katsayı belirtilen değeri aldığı durumda, gerilme kuvvetinde meydana gelen 0.01 birimlik değişim miktarı için, yansıyan güç spektrumunda meydana gelen değişim miktarı Şekil-9’da görülmektedir. Şekil-9’da mavi ile gösterilen eğri, Bragg dalgaboyunun $\lambda_B = 1554$ nm olarak alındığı referans yansıma spektrumunu, kırmızı ile gösterilen eğri ise, gerilme değişimi sonrasında dalgaboyunda meydana gelen kayma miktarına bağlı olarak değişen yansıma spektrumunu göstermektedir. Gerilmede meydana gelen 0.01 birimlik değişim sonucunda,

yansıyan güç spektrumunun en yüksek değere ulaştığı dalgaboyu, referans dalgaboyundan 12.2 nm uzakta yer almaktadır.



Şekil-9 : Gerilmede meydana gelen değişime bağlı yansıyan güç spektrumu.

4. SONUÇ

Fiber Bragg ızgaraların temelini, optik fiber dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki kırılma indisinin, fiber uzunluğu boyunca belirli periyotlarla değişimi oluşturmaktadır.

Bragg dalgaboyu, ızgara periyodu ve kırılma indis değişimine bağlı olarak değişiklik gösterir. Sıcaklık ve ızgaraya uygulanan gerilme kuvvetinin değişimi ızgara periyodunda ve kırılma indisinde farklılaşmaya yol açar. Bu nedenle dalgaboyunda meydana gelen kayma miktarlarına bağlı olarak sensör uygulamaları yapılmaktadır. Yapılan çalışmada, gerilme kuvvetinin dalgaboyuna etkisinin, sıcaklık değişiminin dalgaboyuna etkisinden daha kuvvetli olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada yapılan analizde, fiber Bragg ızgaraların, yansıttıkları güç miktarlarının, değişik ızgara uzunlukları ve kırılma indislerinde meydana gelen değişimlere göre farklılık gösterdiği görülmüştür. Buna göre, ızgara uzunluğunun ve kırılma indisi değişiminin artan değerleri için yansıyan güç miktarının arttığı gözlenmiştir.

Çalışmada, kırılma indisi değişiminin yüksek değerleri için, çok daha kısa ızgaralarla, yansıtırlılığın en yüksek değere ulaştığı noktaya erişilebileceği belirlenmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Hill, K. O. ve Meltz, G., (1997), “Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview”, *J. Lightwave Technology*, 15(8):1263-1276.
- [2] Kashyap, R., (1999), *Fiber Bragg Gratings*, Academic Press, San Diego.

- [3] Phing, H., Ali, J., Rahman, R. ve Tahir, B. (2007), "Fiber Bragg Grating Modeling, Simulation and Characteristics with Different Grating Lengths", *Journal of Fundamental Sciences*, 167-175.
- [4] Keshk M., Ashry A. and Aly, H., (2007), "Analysis of Different Fiber Bragg Gratings for Use in a Multi-wavelength Erbium Doped Fiber Laser", *National Radio Science Conference (NRSC)*, 13-15March 2007, Egypt.
- [5] Zhang B. and Kahrizi M., (2005), "Characteristics of Fiber Bragg Grating Temperature Sensor at Elevated Temperatures", *International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems*.
- [6] Karaman L., "Fiber Bragg Izgara Tabanlı Optik Sensörlerin Analizi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009.
- [7] Kersey A., Davis M., Patrick H., LeBlanc, M. and Koo, K., (1997), "Fiber Grating Sensors", *J. Lightwave Technology*, 15(8): 1442-1463.
- [8] Mohammad N., Szyszkowski W., Zhang W., Haddad E., Zou J., Jamroz W. and Kruszelecky, R., (2004), "Analysis and Development of a Tunable Fiber Bragg Grating Filter Based on Axial Tension/Compression", *J. Lightwave Technology*, 22(3):2001-2013.