

Landau-Placzek Oranını Temel Alan Optik Fiberli Dağılık Algılamada Brillouin ve Rayleigh Saçılma Katsayılarının Sıcaklıkla Değişiminin Analizi

Analysis of Variation of Brillouin and Rayleigh Scattering Coefficients with Temperature in Landau-Placzek Ratio Based Optical Fiber Distributed Sensing

Abdurrahman GÜNDAY¹

Sait Eser KARLIK²

Güneş YILMAZ³

¹ Uludağ Üniversitesi Orhangazi Meslek Yüksek Okulu Elektronik Teknolojisi Programı 16800 Orhangazi/BURSA agunday@uludag.edu.tr

² Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü 16059 Görükle/BURSA ekarlik@uludag.edu.tr

³ Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü 16059 Görükle/BURSA gunesy@uludag.edu.tr

Özet

Landau-Placzek Oranı'nu (LPR) temel alan dağılık sıcaklık algılama sistemlerinde, algılayıcı olarak kullanılan optik fiber içerisine gönderilen işaretin maksimum tepe gücü, algılanabilecek spontane Brillouin işareti seviyesini sınırlamaktadır. Bu durum, Brillouin işaretin genliğini bozan ve optik fiberin algılama kapasitesini sınırlayan doğrusal olmayan etkilerden kaynaklanmaktadır.

Bu çalışmada, optik fiberin algılama kapasitesini sınırlayan sıcaklık değişimlerinin Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayıları üzerindeki etkileri teorik olarak analiz edilmiştir. Matlab 7.6 programı kullanılarak, 7.4 km uzunluklu 64/110 kV YG kablosuna entegre edilmiş algılayıcı fiber için, Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayılarının sıcaklıkla değişimi benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Rayleigh saçılma katsayısının sıcaklık duyarlılığı, 322 °K için 3.05×10^{-3} ve 334 °K için 3.0×10^{-3} değerini, Brillouin saçılma katsayısının sıcaklık duyarlılığı ise aynı sıcaklıklar için sırasıyla % 0.29 ve % 0.28 değerlerini almıştır. LPR'nin sıcaklıkla değişimi ve sıcaklık duyarlılığı da benzetimler yardımıyla incelenmiştir. Optik fiberin çalışma sıcaklığı aralığında (322 °K – 334 °K), LPR'nin sıcaklık duyarlılığı, – % 0.31 ile – % 0.30 aralığında elde edilmiştir. LPR benzetim sonuçlarından yararlanılarak, çalışma sıcaklığı

aralığında, analitik yöntem ile elde edilen LPR formülü basitleştirilmiş ve doğrusal bir denklem ile ifade edilmiştir.

Abstract

The maximum peak power of the signal launched into the fiber which is used as the sensor in Landau-Placzek Ratio (LPR) based distributed temperature sensing systems limits the detectable level of spontaneous Brillouin signal. This is due to nonlinear effects distorting the amplitude of the Brillouin signal and limiting the sensing capacity of the optical fiber.

In this study, effects of temperature variations limiting the sensing capacity of the optical fiber on Rayleigh and Brillouin scattering coefficients have been theoretically analyzed. Using Matlab 7.6 program, simulations focused on variations of Rayleigh and Brillouin scattering coefficients with temperature have been performed for the sensing fiber integrated to a 64/110 kV power cable with a length of 7.4 km. The temperature sensitivity of the Rayleigh scattering coefficient takes values of 3.05×10^{-3} % for 322 °K and 3.0×10^{-3} % for 334 °K while that of the Brillouin scattering coefficient has values of 0.29 % and 0.28 % for the same temperatures, respectively. The variation of LPR with temperature and its temperature sensitivity have been also analyzed with simulations. In the operating temperature range

of the optical fiber, i.e. 322 °K – 334 °K, the temperature sensitivity of LPR has been obtained between – 0.31 % and – 0.30 %. Using LPR simulation results, the LPR formula derived with the analytical method has been simplified in the operating temperature range and expressed with a linear equation.

1. Giriş

Optik fiberli dağınık algılamada, sıcaklık ve gerginlik gibi parametreler, kesintisiz bir biçimde fiber boyunca elde edilebilmekte ve görüntülenebilmektedir. Tam dağınık algılama olarak bilinen bu yöntem, sıcaklık ve gerginlik gibi parametrelerin çok sayıda ayırık ön değerlendirmeden geçirilerek analiz edildiği ve her noktada algılandığı yarı-dağınık algılamaya nazaran daha etkili bir yöntemdir [1].

Dağınık algılamada, optik fiber içerisine gönderilip fiberin giriş ucuna geri-saçılan ışık darbesi, foto alıcı ile algılanarak ölçülmektedir. Elde edilen ölçüm sonuçları, fiber kablosu boyunca oluşan içsel ve dışsal kayıp mekanizmaları hakkında bilgi vermektedir. Yöntem, prensip olarak Rayleigh işaretinin yanı sıra Brillouin ve Raman işaretlerine de uygulanmaktadır.

Dağınık algılamada ışığın geri saçılması esasına dayalı optik ölçümler, OTDR (optik zaman domeni yansıma ölçme) ve BOTDR (Brillouin optik zaman domeni yansıma ölçme) olmak üzere iki prensibe dayanmaktadır. OTDR prensibi, optik fiber içerisinde ilerleyen kısa süreli ışık darbelerinin değerlendirilmesiyle anlaşılabilir. Işık darbeleri ilerledikçe, çoğunluğu Rayleigh saçılmasından kaynaklanan saçılma kayıpları meydana gelir. Rayleigh saçılması, fiktif sıcaklıkta cam yapı içerisindeki donmuş kompozit oluşumlarından ve yoğunluk dalgalanmalarından kaynaklanmaktadır. Yoğunluk dalgalanmaları, ışığın dalga boyuna kıyasla daha küçük ölçekte oluşmaktadır [2]. Saçılma tüm yönlerde meydana gelmesine rağmen, sadece küçük bir kısmı fiberin nümerik açıklığında yakalanır ve fiberin giriş ucuna doğru geri yönde kılavuzlanır. OTDR yönteminin en büyük avantajı, ölçümlerin fiberin bir ucundan kolaylıkla yapılabilmesidir [1].

BOTDR prensibi, OTDR yöntemine benzerlik göstermesine rağmen, optik fiber içerisinde ısıl olarak ortaya çıkan akustik dalgalardan ışığın saçılması esasına dayanmaktadır [3]. Bu prensip, Rayleigh saçılması esasına dayanan OTDR prensibinin aksine Brillouin saçılmasını esas almaktadır. Rayleigh saçılmasından farklı olarak Brillouin işaretinin saçılması, yoğunluk dalgalanmalarından kaynaklanır. Ancak, geriye saçılan Rayleigh işaretinde olduğu gibi, zamanla ve çalışma dalga boyuna bağlı olarak eksponansiyel değişim gösterir. BOTDR prensibi, daha uzun mesafelerde algılama çalışmalarına olanak sağlamakta ancak sıcaklık ve uzamsal çözünürlükte kısıtlar içermektedir [1].

Bu çalışmada, Rayleigh işareti gücünün Brillouin işareti anti-Stokes ve Stokes güçlerinin toplamına oranından (Landau-Placzek oranı) faydalanılarak, Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayılarının sıcaklıkla değişimleri ve sıcaklık duyarlılıkları teorik olarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarından yararlanılarak ve bir optik fiberli dağınık sıcaklık algılama (DTS) uygulaması için oluşturulan model kullanılarak benzetimler gerçekleştirilmiştir.

2. Optik Fiberli Dağınık Algılamada Landau-Placzek Oranı Yöntemi

Geriye saçılan Rayleigh işaretinin gücü $P_R(t)$, zamanın fonksiyonu olarak

$$P_R(t) = \frac{S}{2} P_i \gamma_R W v_g e^{-\gamma v_g t} \quad (1)$$

ile verilir. Eşitlikte $t = 2z/v_g$ kullanıldığında, $P_R(t)$ ifadesi,

$$P_R(z) = \frac{S}{2} P_i \gamma_R W v_g e^{-2\gamma z} \quad (2)$$

şeklini alır [1]. (1) ve (2) eşitliklerinde, S yakalama katsayısını, P_i fibere giren optik işaretinin gücünü, γ_R Rayleigh saçılma katsayısını, W darbe süresini, v_g fiberde ilerleyen ışığın grup hızını, γ fiber zayıflama katsayısını, t zamanı ve z mesafeyi ifade etmektedir.

Optik fiber boyunca geriye saçılan Brillouin işaretinin gücü $P_B(z)$,

$$P_B(z) = 0.5 P_0 \tau \gamma_B S v_g e^{(-2\gamma_B z)} \quad (3)$$

ile verilir. Eşitlikte, P_0 lazerin pompaladığı işaretin maksimum gücünü, τ işaretin darbe süresini, S yakalama katsayısını, v_g fiberde ilerleyen ışığın grup hızını γ_B ve γ_R sırasıyla Brillouin ve Rayleigh saçılma katsayılarını, z mesafeyi ifade etmektedir.

Brillouin saçılma mekanizmasını kullanan dağınık sıcaklık algılamada (DTS), kablo boyunca sıcaklık bilgileri, Brillouin güç değişiminin sıcaklık bağımlılığı ifadesinden elde edilebilmektedir [4, 5]. Brillouin güç değişiminin (ΔP_B) sıcaklık bağımlılığı

$$\Delta P_B = K_T^P \Delta T \quad (4)$$

ile verilmektedir [4, 6]. Eşitlikte; K_T^P Brillouin güç değişiminin sıcaklık katsayısını, ΔT ise algılayıcı fiber boyunca meydana gelen sıcaklık değişimini ifade etmektedir.

Geriye saçılan işarete Rayleigh işareti gücünün, Brillouin Stokes ve anti-Stokes güçlerinin toplamına oranı veya Rayleigh saçılma katsayısının Brillouin saçılma katsayısına oranı, Landau-Placzek oranını (LPR) verir [1, 7]. LPR,

$$LPR = \frac{P_R}{P_S + P_{AS}} = \frac{\gamma_R}{\gamma_B} = \frac{T_f(\beta_T \rho v_a^2 - 1)}{T} \quad (5)$$

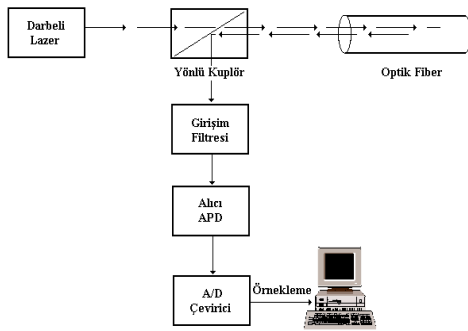
ile ifade edilmektedir. Eşitlikte; P_R Rayleigh gücüne, P_S ve P_{AS} sırasıyla Brillouin Stokes ve anti-Stokes güçlerine, γ_R ve γ_B sırasıyla Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayılarına, T_f °K cinsinden fiberin fiktif sıcaklığına, β_T fiktif sıcaklıkta silika fiberin izotermal sıkışma katsayısına, ρ silika fiberin yoğunluğuna, v_a ısıl etkilere bağlı olarak fiber içerisinde oluşan akustik dalgaların hızına ve T °K cinsinden sıcaklığa karşılık gelmektedir.

Optik fiberli DTS'te LPR yöntemi, OTDR ile BOTDR prensiplerinin birlikte kullanımını esas almaktadır. LPR, güç esash bir tekniktir. En önemli avantajı, Brillouin işaretinin

Rayleigh işaretine göre referans alınması ve böylelikle işaretin giriş gücündeki dalgalanmalar veya fiber zayıflamaları nedeni ile geriye saçılan işaretin enerjisinde meydana gelen değişimlerin otomatik olarak düzeltilmesine olanak sağlamasıdır [1].

DTS için örnek bir ölçüm sistemi Şekil 1'de verilmiştir [8]. Burada, DTS ölçme düzeneğinde darbeli lazer, ışık darbeleri üretmekte ve yönlü kablolar, üretilen darbeleri geriye saçılan işaretten ayırmaktadır.

LPR yöntemini kullanan DTS'te, geriye saçılan işaret filtrelenip spontane Brillouin işareti ile Rayleigh işaretinin birbirinden ayrılması sağlanır. Foto-alıcı tarafından algılanan işaretler yüksek hızlı bir analog-sayısal çeviriciden geçirilir. İşaret-gürültü oranı artırılarak gösterge ünitesine ve/veya ilgili sistem ara bağdaşımına gönderilir.



Şekil 1 : DTS ölçüm sistemi

2.1. Young Modülü ve Poisson Oranının Sıcaklık Bağımlılığı

Hooke yasasına göre, bir malzemeye kuvvet uygulandığında, malzemede meydana gelen boylamasına veya enlemesine değişimler, elastik sınırlar içinde gerilmelerle orantılı olmak zorundadır [9]. Young (elastisite) modülü, elastik deformasyon altındaki bir malzemede oluşan birim uzama ile normal gerilme arasındaki doğrusal ilişkinin bir sonucudur. Dolayısıyla Young modülü, bir malzemenin kuvvet altında elastik şekil değiştirilebilirliğinin ölçütüdür [9, 10].

Poisson oranı, bir malzemenin kuvvet altında enine birim uzaması ile boyuna birim uzamasının oranı olarak değerlendirilebilir. Bu oran, $\sigma = -a_2/a_1$ şeklinde ifade edilir. Burada; a_2 enine birim deformasyon ve a_1 ise boyuna birim deformasyon olarak adlandırılmaktadır [9, 10]. Optik fiberde silika camlar için Young modülü, Poisson oranı ve kırılma indisi, sıcaklıkla değişiklik göstermektedir. Young modülü ve Poisson oranı, sırasıyla (6.a) ve (6.b)'de verildiği gibi, sıcaklıkla doğrusal bir değişim göstermektedir [1, 11].

$$E(T) = 69.68 + 1.126 \times 10^{-2} T \quad (6.a)$$

$$\sigma(T) = 0.157 + 2.887 \times 10^{-5} T \quad (6.b)$$

Eşitliklerde, E GPa cinsinden Young modülüne, σ Poisson oranına ve T °K cinsinden sıcaklığa karşılık gelmektedir.

Bir XLPE yalıtkanlı 64/110 kV YG kablosunu oluşturan malzemelerin Young modülü değerleri Çizelge 1'de GPa cinsinden verilmiştir [12].

Çizelge 1. XLPE yalıtkanlı bir 64/110 kV YG kablosunda yer alan malzemelerin Young modülü değerleri

Malzeme	Young Modülü E (GPa)
Bakır	115
Alüminyum	65
PVC yalıtkan	0.01
PVC kaplama	0.1
XLPE yalıtkan	0.5

Fiber içerisinde meydana gelen ısı etkileri sonucu oluşan akustik dalga hızı, E Young modülü, ρ silika fiberin yoğunluğu ve σ Poisson oranının fonksiyonu olarak (7)'de verilmektedir [1, 13].

$$\rho v_a^2 = \frac{E(1-\sigma)}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} \quad (7)$$

2.2. Rayleigh ve Brillouin Saçılma Katsayılarının Sıcaklıkla Değişimi ve Sıcaklık Duyarlılığı

Brillouin güç değişimi ifadesinde kullanılan γ_R Rayleigh ve γ_B Brillouin saçılma katsayıları (8.a) ve (8.b) ile verilmektedir [1, 11, 14].

$$\gamma_R = \frac{8\pi^3 n^8 p^2 k T_f [\beta_T - (\rho v_a^2)^{-1}]}{3\lambda_0^4} \quad (8.a)$$

$$\gamma_B = \frac{8\pi^3 n^8 p^2 k T (\rho v_a^2)^{-1}}{3\lambda_0^4} \quad (8.b)$$

Eşitliklerde; n fiberin çekirdek kırılma indisini, p Pockel katsayısını (~ 0.286), k Boltzman sabitini (1.38×10^{-23} J/°K), T fiberin sıcaklığını, T_f optik fiberin fiktif sıcaklığını ($T_f = 1950$ °K), β_T fiktif sıcaklıkta silika fiberin izotermal sıkıştırılabilirlik katsayısını ($\beta_T = 7 \times 10^{-11}$ m²N⁻¹), ρ silika fiberin yoğunluğunu ($\rho = 2330$ kg/m³), v_a akustik dalga hızını ve λ_0 fiber içerisine pompalanan ışığın dalga boyunu ($\lambda_0 = 1550$ nm) ifade etmektedir [6].

(8.a) ve (8.b)'de görüldüğü gibi, Brillouin saçılma katsayısının ortam sıcaklığına doğrudan bir bağımlılığı olmasına karşılık, Rayleigh saçılma katsayısının ortam sıcaklığına görünür bir bağımlılığı bulunmamaktadır. Ancak, Rayleigh saçılma katsayısı, saçılmanın meydana geldiği ortamın elastik özelliklerindeki değişimle ilgili olan fiktif sıcaklığa bağlıdır ve bu sıcaklık da ortam sıcaklığından etkilenmektedir.

(7), (8.a) ve (8.b)'de yerine konularak Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayıları γ_R ve γ_B sırasıyla (9.a) ve (9.b)'de verildiği gibi elde edilir.

$$\gamma_R = \frac{8\pi^3 n^8 p^2 k T_f}{3\lambda_0^4} \times \left[\beta_T - \frac{(1+\sigma)(1-2\sigma)}{E(1-\sigma)} \right] \quad (9.a)$$

$$\gamma_B = \frac{8\pi^3 n^8 p^2 k T}{3\lambda_0^4} \times \frac{(1+\sigma)(1-2\sigma)}{E(1-\sigma)} \quad (9.b)$$

(9.a)'da eşitliğin sağındaki ilk çarpan A ve ikinci çarpan B ile ifade edilip γ_R (9.c)'deki gibi yazıldığında

$$\gamma_R = \frac{8\pi^3 n^6 p^2 k T_f}{3\lambda_0^4} \times \left[\beta_T - \frac{(1+\sigma)(1-2\sigma)}{E(1-\sigma)} \right] = A \times B \quad (9.c)$$

A, (9.c)'den $A = 5.83 \times 10^5$ olarak hesaplanmaktadır.

Sırasıyla (6.a) ve (6.b)'de verilmiş olan Young modülü ve Poisson oranı (9.c)'deki B ifadesinde yerine yazılarak (10.a) elde edilebilir.

$$B = \frac{3.32 + 5.71 \times 10^{-4} T - 2.11 \times 10^{-8} T^2}{(58.74 + 7.48 \times 10^{-3} T - 3.25 \times 10^{-7} T^2) \times 10^9} \quad (10.a)$$

(10.a)'da gerekli düzenlemeler yapıldığında (10.b) oluşur.

$$B = (0.0565 + 2.54 \times 10^{-6} T - 1.23 \times 10^{-9} T^2) \times 10^{-9} \quad (10.b)$$

$A = 5.83 \times 10^5$ ve (10.b), (9.c)'de yerine yazıldığında Rayleigh saçılma katsayısı γ_R , sıcaklığın fonksiyonu olarak (11.a)'da verildiği gibi elde edilebilir.

$$\gamma_R(T) = 3.3 \times 10^{-5} + 1.48 \times 10^{-9} T - 7.17 \times 10^{-13} T^2 \quad (11.a)$$

(11.a)'dan yararlanılarak Rayleigh saçılma katsayısının sıcaklık duyarlılığı (11.b)'deki gibi elde edilir.

$$\frac{d\gamma_R(T)}{dT} / \gamma_R(T) = \frac{1.48 \times 10^{-9} - 14.34 \times 10^{-13} T}{3.3 \times 10^{-5} + 1.48 \times 10^{-9} T - 7.17 \times 10^{-13} T^2} \quad (11.b)$$

Rayleigh saçılma katsayısının sıcaklık duyarlılığı, algılayıcı fiberin çalışma sıcaklığı aralığında (322 °K - 334 °K), % 3.05 $\times 10^{-3}$ ile % 3.0 $\times 10^{-3}$ değerleri arasında değişim göstermektedir.

(9.b)'de eşitliğin sağındaki ilk çarpan C ve ikinci çarpan D ile ifade edilirse, γ_B (12.a)'daki gibi yazıldığında,

$$\gamma_B = \frac{8\pi^3 n^6 p^2 k}{3\lambda_0^4} \times \frac{T(1+\sigma)(1-2\sigma)}{E(1-\sigma)} = C \times D \quad (12.a)$$

değerler yerine konulursa, $C = 298.95$ olarak hesaplanmaktadır.

Sırasıyla (6.a) ve (6.b)'de verilmiş olan Young modülü ve Poisson oranı (12.a)'daki D ifadesinde yerine yazılarak (12.b) elde edilebilir.

$$D = \frac{T \times (0.794 - 4.7 \times 10^{-5} T - 16.67 \times 10^{-10} T^2)}{10^9 \times (58.74 + 7.48 \times 10^{-3} T - 3.25 \times 10^{-7} T^2)} \quad (12.b)$$

(12.b)'de gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra, $C = 298.95$ ile birlikte (12.a)'da yerine konulursa, Brillouin saçılma katsayısı γ_B , sıcaklığın fonksiyonu olarak (13.a)'da verildiği gibi elde edilebilir.

$$\gamma_B(T) = 4. \cdot 10^{-9} T - 7.5 \times 10^{-13} T^2 \quad (13.a)$$

(13.a)'dan yararlanılarak Brillouin saçılma katsayısının sıcaklık duyarlılığı (13.b)'deki gibi elde edilir.

$$\frac{d\gamma_B(T)}{dT} / \gamma_B(T) = \frac{4 \times 10^{-9} - 15 \times 10^{-13} T}{4. \cdot 10^{-9} T - 7.5 \times 10^{-13} T^2} \quad (13.b)$$

Brillouin saçılma katsayısı sıcaklık duyarlılığı, algılayıcı fiberin 322 °K, 328 °K ve 334 °K sıcaklık değerlerinde sırasıyla, % 0.290, % 0.285 ve % 0.280 değerlerini almaktadır. Brillouin saçılma katsayısının sıcaklık duyarlılığı, sıcaklık artışı ile azalmakta olup çok küçük değişim göstermektedir.

2.3. Landau-Placzek Oranı'nın Sıcaklıkla Değişimi ve Sıcaklık Duyarlılığı

(5) ile verilmiş olan LPR, (8.a) ve (8.b) ifadeleri kullanıldığında, (14)'teki gibi elde edilmektedir.

$$LPR = \frac{\gamma_R}{\gamma_B} = \frac{T_f}{T} \left(\frac{E(1-\sigma)}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} \beta_T - 1 \right) \quad (14)$$

(11.a) ve (13.a) denklemleri, (14)'te yerine konulduğunda, LPR sıcaklığın fonksiyonu olarak (15)'te verildiği gibi elde edilebilir.

$$LPR(T) = \frac{\gamma_R(T)}{\gamma_B(T)} = \frac{3.3 \times 10^{-5} + 1.48 \times 10^{-9} T - 7.17 \times 10^{-13} T^2}{4. \cdot 10^{-9} T - 7.5 \times 10^{-13} T^2} \quad (15)$$

Optik fiberin çalışma sıcaklığı aralığında, Brillouin saçılma katsayısının sıcaklık duyarlılığının, Rayleigh saçılma katsayısının sıcaklık duyarlılığından çok yüksek olması (~ 95 kat) nedeniyle, LPR profilinde asıl belirleyici etken, geriye saçılan işaretin Brillouin gücündeki değişimdir. Bu yüzden, (14)'te verildiği gibi, sıcaklığa bağlı değişkenlerin LPR üzerindeki etkisi, algılayıcı optik fiberin sıcaklık değişimine kıyasla ihmal edilebilmektedir.

LPR'nin sıcaklık duyarlılığı, (16)'da verildiği gibi elde edilebilir.

$$\frac{dLPR(T)}{dT} / LPR(T) = -\frac{1}{T} \quad (16)$$

LPR'nin sıcaklık duyarlılığı, 322 °K, 328 °K ve 334 °K sıcaklık değerleri için sırasıyla, - % 0.310, - % 0.305, - % 0.300 değerlerini almaktadır. (16)'dan da görüldüğü gibi, LPR'nin sıcaklık duyarlılığı, sıcaklık artışı ile doğrusal olarak artmaktadır.

3. Benzetimler

64/110 kV XLPE yalıtımlı YG kablosuna entegre edilmiş 7.4 km uzunluklu algılayıcı optik fiber kablo boyunca Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayıları ile LPR değişimleri için oluşturulan model kullanılarak yapılan benzetimler, Matlab 7.6 programı ile gerçekleştirilmiştir.

Algılayıcı optik fiber için modelde kullanılan benzetim koşulları aşağıda verilmiştir:

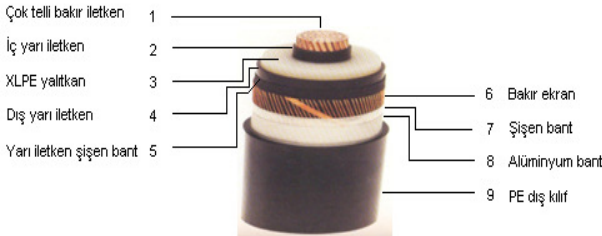
- YG kablosu üzerinde her 700 metrede bir tekrarlanan kablo bağlantı noktası vardır.
- Kablo, belirli bölgelerde, farklı uzunluk ve ebatlardaki PVC boruların içerisinden geçmektedir. Kablonun PVC boruların içinden geçtiği bölgeler ile PVC boruların uzunluk ve ebatları şu şekildedir:
 - 2250 m - 2350 m arasında 100 m uzunluklu 180 mmx7 mm PVC boru

- 3200 m – 3320 m arasında 120 m uzunluklu 170 mmx5 mm PVC boru
- 4700 m – 4800 m arasında 100 m uzunluklu 145 mmx5 mm PVC boru
- 5600 m – 5650 m arasında 50 m uzunluklu 180 mmx7 mm PVC boru
- 5800 m – 5850 m arasında 50 m uzunluklu 180 mmx7 mm PVC boru
- Kablo 6380 m - 6430 m bölgesinde 145 mmx5 mm ölçüsünde PVC boru içerisinde ilerlerken, 6401. metrede başka bir 64/110 kV YG kablosu ile kesişmektedir.

Benzetimlerde kullanılan algılayıcı fibere ait parametreler şunlardır:

- Fibere pompalanan işaretin darbe süresi: $\tau = 14$ ns
- Pompalanan işaretin dalga boyu: $\lambda = 1550$ nm
- 1550 nm için fiber zayıflama katsayısı: $\gamma = 4.56 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$
- Lazerin pompaladığı işaretin maksimum gücü: $P_0 = 1$ W
- Optik fiberin çekirdek kırılma indisi: $n_1 = 1.44$
- Optik fiberin kılıf kırılma indisi: $n_2 = 1.40$
- Işığın boşluktaki hızı: $c = 3 \times 10^8$ m/s
- Uzamsal çözünürlük: $l = ct/2n_1 = 1.46$ m
- Fiber kablo uzunluğu: $L = 7400$ m
- Dağınık sıcaklık algılamada ölçüm alınan nokta sayısı: $R = L/l = 5068$ nokta
- Silika fiberin yoğunluğu: $\rho = 2330$ kg/m³
- Fiber için Brillouin gücünün sıcaklıkla değişim katsayısı: $K_T^B = 0.36 \pm 0.030 \text{ \%}^\circ\text{K}^{-1}$
- Yakalama katsayısı: $S = (n_1^2 - n_2^2)/4n_1^2 = 13.70 \times 10^{-3}$
- İletken ile algılayıcı optik fiber arasındaki sıcaklık farkı için sıcaklık düzeltme faktörü: $\Delta T = 32$ °C

Modelde kullanılan optik fiber entegre edilmiş 64/110 kV YG kablosu kesitinin kısımları Şekil 2’de verilmiştir.

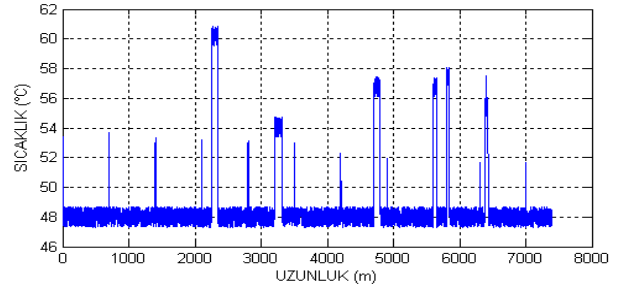


Şekil 2: XLPE yalıtımlı 64/110 kV YG kablosunun görünümü

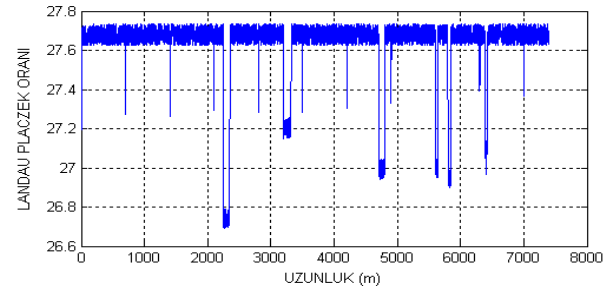
Algılayıcı optik fiber boyunca Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayılarının hesaplanmasında kullanılan sıcaklık verileri, sıcaklık duyarlılığının Rayleigh gücüne göre daha yüksek olması nedeniyle, (3) ile verilen Brillouin güç değişimi ifadesi kullanılarak elde edilmiştir.

Algılayıcı olarak 64/110 kV YG kablosuna entegre edilmiş optik fiber boyunca sıcaklık değişimi ve LPR değişimi Şekil 3’te gösterilmiştir. Optik fiber, maksimum sıcaklığa 2250 m -2350 m aralığında, 60.85 °C değeri ile ulaşmıştır. YG kablosu ek yerlerinde de sıcaklık artışları görülmektedir. Bu noktalarda maksimum sıcaklık 54 °C civarında olmuştur. Algılayıcı optik fiberin LPR değişimi, Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayılarına bağlı olarak kablo boyunca ortaya çıkan

sıcaklık oluşumlarının fonksiyonu biçiminde elde edilmiştir. LPR, sıcaklığın en yüksek olduğu 2250 m – 2350 m bölgesinde 26.7 ile en düşük değerini almıştır.



(a)



(b)

Şekil 3: a) Algılayıcı fiber boyunca sıcaklık değişimi ve b) Algılayıcı fiber boyunca Landau-Placzek oranı değişimi

Rayleigh saçılma katsayısının, sıcaklıkla değişimi ve sıcaklık duyarlılığı (sıcaklıkla yüzdesel değişimi) Şekil 4’te gösterilmiştir. Rayleigh saçılma katsayısı, sıcaklıkla doğrusal olarak artmaktadır. Bu nedenle sıcaklığın en yüksek olduğu bölgede (~ 334 °K), $3.3414 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ değerine ulaşmıştır.

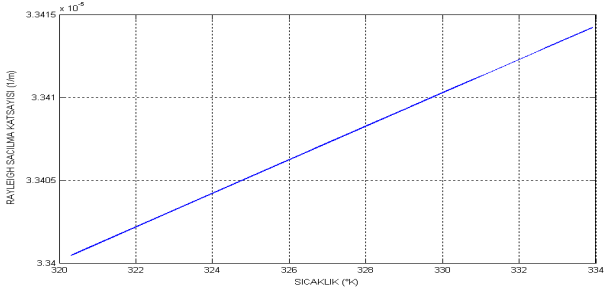
Rayleigh saçılma katsayısının sıcaklık duyarlılığı ise, fiber çalışma sıcaklığı aralığında (322 °K – 334 °K), $\% 3.05 \times 10^{-3}$ ile $\% 3.00 \times 10^{-3}$ değerleri arasında değişim göstermektedir.

Brillouin saçılma katsayısının sıcaklıkla değişimi ve sıcaklık duyarlılığı Şekil 5’te gösterilmiştir. Brillouin saçılma katsayısı da sıcaklıkla doğrusal olarak artmaktadır. Sıcaklığın en yüksek olduğu bölgede (~334 °K), $1.252 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ değerini almıştır.

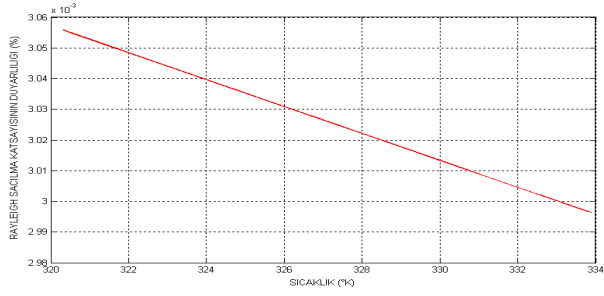
Brillouin saçılma katsayısının sıcaklık duyarlılığı, sıcaklık artışı ile doğrusal olarak azalmaktadır. Bu nedenle, ilgilenilen sıcaklık aralığında en yüksek $\% 0.29$ değerini en düşük ise $\% 0.28$ değerini almıştır.

LPR’nin sıcaklıkla değişimi ve sıcaklık duyarlılığı Şekil 6’da gösterilmiştir. LPR’nin sıcaklıkla değişimi ve sıcaklık duyarlılığı (15) ve (16) kullanılarak elde edilmiştir. LPR’nin sıcaklıkla değişimi benzetiminden, LPR’nin sıcaklık artışı ile doğrusal olarak azaldığı gözükmektedir. Buradan, LPR, optik fiberin çalışma sıcaklığı aralığında yaklaşık olarak sıcaklığın fonksiyonu olarak (17)’de verildiği gibi elde edilebilmektedir.

$$LPR(T) \approx 53 - 0.079 \times T ; 322 \text{ °K} \leq T \leq 334 \text{ °K} \quad (17)$$

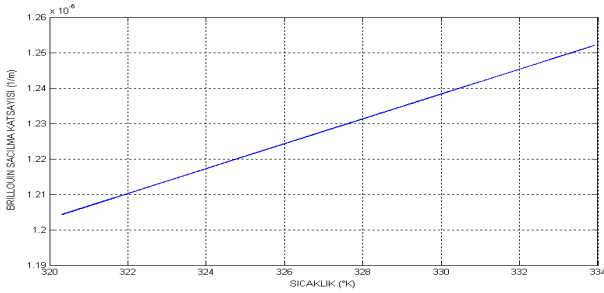


(a)

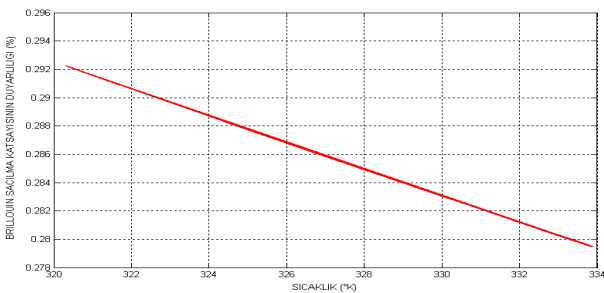


(b)

Şekil 4: a) Rayleigh saçılma katsayısının sıcaklıkla değişimi ve b) Rayleigh saçılma katsayısının sıcaklık duyarlılığı (sıcaklıkla yüzdesel değişimi)



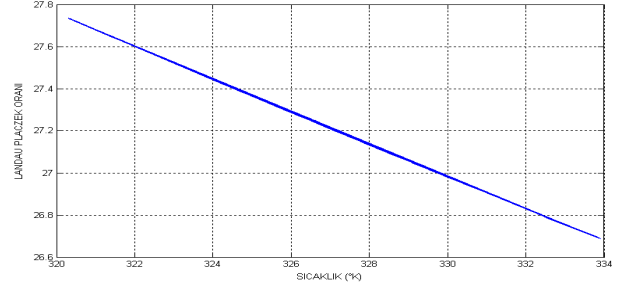
(a)



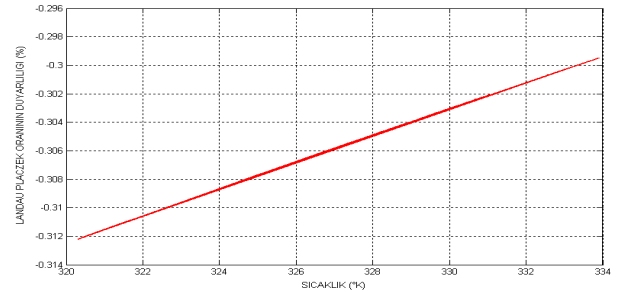
(b)

Şekil 5: a) Brillouin saçılma katsayısının sıcaklıkla değişimi ve b) Brillouin saçılma katsayısının sıcaklık duyarlılığı (sıcaklıkla yüzdesel değişimi)

Şekil 6'dan, LPR'nin 322 °K – 334 °K sıcaklık aralığında, 27.60 – 26.70 değerleri arasında değiştiği gözükmemektedir. Buradan, optik fiberin sıcaklığındaki ~ 13 °K değerindeki artışa karşılık LPR değerinde ~ 1 birimlik bir azalma olduğu görülmektedir. LPR'nin sıcaklık duyarlılığı, algılayıcı fiber boyunca ve fiber çalışma sıcaklığı aralığında – % 0.31 ile – % 0.30 seviyesinde değişim göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 6: a) LPR'nin sıcaklıkla değişimi ve b) LPR'nin sıcaklık duyarlılığı (sıcaklıkla yüzdesel değişimi)

4. Sonuç

Bu çalışmada, Rayleigh işareti gücünün Brillouin işareti anti-Stokes ve Stokes güçlerinin toplamına oranından (Landau-Placzek oranı, LPR) faydalanılarak, Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayılarının sıcaklıkla değişimleri ve sıcaklık duyarlılıkları teorik olarak analiz edilmiş ve benzetimleri elde edilmiştir. Analiz sonuçları, Rayleigh saçılma katsayısının ortam sıcaklığına görünür bir bağımlılığının bulunmamasına rağmen, fiktif sıcaklık nedeniyle ortam sıcaklığından etkilendiğini göstermektedir. Brillouin saçılma katsayısı ise ortam sıcaklığıyla belirgin biçimde değişmektedir.

64/110 kV YG kablosu boyunca, 322 °K – 334 °K sıcaklık aralığında, algılayıcı optik fiberin Brillouin saçılma katsayısının sıcaklık duyarlılığı, Rayleigh saçılma katsayısının sıcaklık duyarlılığından ~ 95 kat daha büyüktür. Rayleigh gücünün sıcaklık duyarlılığının Brillouin gücünün sıcaklık duyarlılığına kıyasla çok küçük olması, optik fiberli dağıtım sıcaklık algılamada, Landau-Placzek oranının neredeyse tamamen Brillouin gücü değişimlerinden etkilendiğini göstermektedir.

Bu çalışmada ayrıca, optik fiberin çalışma sıcaklığı aralığında, LPR'nin sıcaklık duyarlılığı – % 0.30 seviyelerinde elde

edilmiştir. Analitik yöntem ile elde edilen LPR formülü, benzetim sonuçlarından yararlanılarak, 322 °K – 334 °K sıcaklık aralığı için basitleştirilmiş ve doğrusal bir denklem haline getirilmiştir.

LPR'nin ortam sıcaklığına karşı yüksek duyarlılığı, optik fiberli dağıtık sıcaklık algılamanın kullanıldığı sistemlerde, gerçek zamanlı sıcaklık algılanmasında, LPR'nin etkili bir biçimde kullanılabilmesine imkan sağlamaktadır.

5. Kaynaklar

- [1] De Souza, K. R. C. P., *Fiber optic distributed sensing based on spontaneous Brillouin scattering*, PhD Dissertation, University of Southampton, 1999.
- [2] Senior, J. M., *Optical fiber communications – principles and practice*, 2nd Ed., Prentice Hall, 1992.
- [3] Shimizu, K. & Horiguchi, A., “Coherent self-heterodyne Brillouin OTDR for measurement of Brillouin frequency shift distribution in optical fibers”, *J. Lightwave Technol.*, Vol. 12, No.5, pp.730-736, 1994.
- [4] Günday, A., Yılmaz, G. ve Karlık, S. E., “Optik fiberli dağıtık algılama yöntemiyle enerji kablosunda sıcaklık ve gerginliğin algılanması”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 12, Sayı 2, 43-52, 2007.
- [5] Günday, A., Yılmaz, G. & Karlık, S. E., “Spontaneous Raman power and Brillouin frequency shift method based distributed temperature and strain detection in power cables”, *ELECO2007 5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 2007.
- [6] Alahbabi, M., *Distributed optical fiber sensors based on the coherent detection of spontaneous Brillouin scattering*, PhD Dissertation, University of Southampton, 2005.
- [7] Soto M. A., Bolognini G., Di Pasquale, F., “30-km spontaneous-Brillouin distributed temperature sensor employing Simplex-coding and low optical input power”, *IEEE Sensors 2008 Conference*, 282 – 285, 2008.
- [8] Yılmaz, G. & Karlık, S. E., “A distributed optical fiber sensor for temperature detection in power cables”, *Sensors and Actuators A-Physical*, Vol.125, No.2, pp.148-155, 2006.
- [9] Onaran, K., *Malzeme Bilimi*, Bilim Teknik Yayınevi, 11. Baskı, 2009.
- [10] Wang, W. H., “The elastic properties, elastic models and elastic perspectives of metallic glasses”, *Progress in Materials Science*, 57 (2012) 487–656, 2012.
- [11] Bansal, P. B. & Doremus, R. H. *Handbook of glass properties*, Academic Press, 1986.
- [12] Heinhold L., *Power cables and their applications*, Siemens Aktiengesellschaft, 3rd Ed., Part 1, 1990.
- [13] Yu, Q., *Distributed Brillouin sensing using polarization-maintaining fibers with high measurement accuracy*, PhD Dissertation, Ottawa-Carleton Institute for Physics, University of Ottawa, 2006.
- [14] Lancry, M., Régnier, E., Poumellec, B., “Fictive temperature in silica-based glasses and its application to optical fiber manufacturing”, *Progress in Materials Science*, 57 (2012) 63–94, 2012.