

# Landau-Placzek Oranını Temel Alan Optik Fiberli Dağınmık Algılamada Brillouin ve Rayleigh Saçılma Katsayılarının Gerginlikle Değişiminin Analizi

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

Abdurrahman GÜNDAY<sup>1</sup>

Sait Eser KARLIK<sup>2</sup>

Güneş YILMAZ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Uludağ Üniversitesi Orhangazi Meslek Yüksek Okulu Elektronik Teknolojisi Programı 16800 Orhangazi/BURSA [agunday@uludag.edu.tr](mailto:agunday@uludag.edu.tr)

<sup>2</sup>Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü 16059 Görükle/BURSA, [ekarlik@uludag.edu.tr](mailto:ekarlik@uludag.edu.tr)

<sup>3</sup>Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü 16059 Görükle/BURSA, [gunesy@uludag.edu.tr](mailto:gunesy@uludag.edu.tr)

### Özet

XLPE yalıtımlı YG kablolarında, kablo yalıtımının çalışma kapasitesini ve performansını belirleyen gerginlik oluşumlarının algılanmasında, optik fiberli dağınmık algılama yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Optik fiberli dağınmık algılama yönteminde, Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayılarını temel alan Landau Placzek Oranı'ndan (LPR) yararlanılmaktadır.

Bu çalışmada, Young (elastisite) modülü, Shear modülü ve Poisson oranı gibi XLPE kablo yalıtımına ait malzeme karakteristiklerinin gerginlik bağımlılıkları kullanılarak, Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayılarının gerginlikle değişimleri ve gerginlik duyarlılıkları analiz edilmiştir. Matlab 7.6 programı kullanılarak, 7.4 km uzunluklu 64/110 kV YG kablosuna entegre edilmiş 321 °K – 334 °K sıcaklık aralığında çalışan algılayıcı fiberin gerginlik oluşumlarına karşı davranışı, 750 µε – 1095 µε aralığındaki gerginlik değerleri için benzetimlerle elde edilmiştir.

Bu çalışmada, sıfır gerginlik referans alındığında, 293 °K sıcaklığında Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayılarının gerginlik duyarlılıklarının sırasıyla, % 1.8308 x 10<sup>-4</sup> ve -% 7.9304 x 10<sup>-4</sup> olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, 750 µε – 1095 µε aralığındaki gerginlik değişimi için, Rayleigh saçılma katsayısı gerginlik duyarlılığı, % 1.8283 x 10<sup>-4</sup> ile % 1.8272 x 10<sup>-4</sup> aralığında değişirken, Brillouin saçılma katsayısı gerginlik duyarlılığının -% 7.9779 x 10<sup>-4</sup> ile -% 7.9999 x 10<sup>-4</sup> aralığında değiştiği belirlenmiştir. Benzetimlerden, Rayleigh saçılma katsayısına ait gerginlik duyarlılığı değişiminin ~ - 3.2 x 10<sup>-10</sup> %/µε ve Brillouin saçılma katsayısına ait

gerginlik duyarlılığı değişiminin ~ - 6.4 x 10<sup>-9</sup> %/µε olduğu bulunmuştur. Ayrıca, LPR'nin gerginlikle değişimi ve gerginlik duyarlılığı da analitik yöntem ve benzetimlerle analiz edilmiştir. 750 µε – 1095 µε gerginliği aralığında, LPR'nin gerginlik duyarlılığının % 9.7384 x 10<sup>-4</sup> ile % 9.7157 x 10<sup>-4</sup> arasında değiştiği gözlenmiştir. LPR benzetim sonuçlarından faydalanılarak, optik fiberin çalışma sıcaklığı aralığında analitik yöntem ile elde edilen gerginliğe bağlı LPR formülü basitleştirilmiş ve doğrusal bir denklem ile ifade edilmiştir.

### Abstract

The optical fiber distributed sensing method is widely used for detecting strain formations that determine the operation capacity and the performance of the cable insulation in XLPE insulated power cables. The Landau-Placzek Ratio (LPR) based on Rayleigh and Brillouin scattering coefficients is used in the optical fiber distributed sensing method.

In this study, using the strain dependence of material characteristics belonging to XLPE cable insulation, e.g. the Young (elasticity) module, the Shear module and the Poisson ratio, variations of Rayleigh and Brillouin scattering coefficients with strain and their strain sensitivities have been analyzed. Using Matlab 7.6 program, behaviour of the sensing fiber integrated to a 64/110 kV power cable with a length of 7.4 km and operating at 321 °K – 334 °K temperature range against strain formations for strain values in the range of 750 µε – 1095 µε has been obtained with simulations.

In this study, taking the zero strain as the reference, strain sensitivities of Rayleigh and Brillouin scattering coefficients

have been determined as  $1.8308 \times 10^{-4} \%$  and  $-7.9304 \times 10^{-4} \%$ , respectively, at the  $293 \text{ }^\circ\text{K}$  temperature. Moreover, for strain variations in the range of  $750 \mu\epsilon - 1095 \mu\epsilon$ , while the strain sensitivity of Rayleigh scattering coefficient is changing from  $1.8283 \times 10^{-4} \%$  to  $1.8272 \times 10^{-4} \%$ , it has been observed that the strain sensitivity of Brillouin scattering coefficient changes from  $-7.9779 \times 10^{-4} \%$  to  $-7.9999 \times 10^{-4} \%$ . Using simulation results, strain sensitivity variations of Rayleigh and Brillouin scattering coefficients have been computed as  $\sim -3.2 \times 10^{-10} \%/ \mu\epsilon$  and  $\sim -6.4 \times 10^{-9} \%/ \mu\epsilon$ , respectively. Furthermore, the variation of LPR with the strain and its strain sensitivity have been analyzed with both the analytical method and simulations. In the  $750 \mu\epsilon - 1095 \mu\epsilon$  strain range, it has been observed that the strain sensitivity of LPR changes from  $9.7384 \times 10^{-4} \%$  to  $9.7157 \times 10^{-4} \%$ . Using LPR simulation results, in the operating temperature and strain range of the optical fiber, the strain-dependent LPR formula derived with the analytical method has been simplified and expressed with a linear equation.

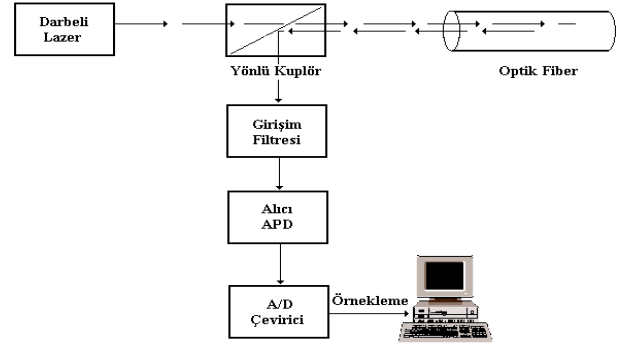
## 1. Giriş

XLPE yalıtkanlı yüksek gerilim kablolarında, kablo yalıtkanının yaşlanma sürecine etki eden önemli fiziksel oluşumlardan biri kablo üzerinde meydana gelen gerginliklerdir. Kablo üzerindeki gerginlikler, kablonun fiziksel kuvvet ve yüke maruz kalması sonucu yalıtkanın mikro ve makro bükülmelerinden kaynaklanabileceği gibi, yalıtkan üzerindeki ısı oluşumlarından da kaynaklanabilmektedir.

Landau-Placzek oranını (LPR) temel alan optik fiberli dağınk algılama sistemlerinde, gerginlik oluşumları, algılayıcı optik fiber kablo boyunca kesintisiz bir biçimde elde edilebilmektedir. Bu sistemlerde, fiber içerisine lazer ile pompalanan ışık darbelerinin bir kısmı, kablo üzerindeki gerginlik oluşumları nedeniyle geri saçılarak optik fiberin giriş ucuna dönmektedir. Algılama sisteminde yer alan bir yönlü kuplör, geri yönde saçılan ışık darbelerini fiber içerisinde ilerleyen ışık darbelerinden ayırarak, bir filtreleme ünitesine göndermektedir. Filtreleme ünitesinde, geri yönde saçılan Rayleigh ve Brillouin işaretleri ayrılmaktadır. Birbirinden ayrılan Rayleigh ve Brillouin işaretleri, bir fotodiyot tarafından algılanarak elektriksel büyüklüğe çevrilir. Daha sonra bu işaretler kuvvetlendiriciden ve yüksek hızlı bir analog-sayısal (A/D) dönüştürücüden geçirilerek işaret-gürültü oranı (SNR) artırılıp bir bilgisayara ve/veya elektronik bir sisteme gönderilir [1]. Optik fiberli dağınk algılama sisteminin blok şeması Şekil 1'de gösterilmiştir.

Dağınk algılamada ışığın geri saçılması esasına dayalı optik ölçümler, optik zaman domeni yansıma ölçme (OTDR) ve Brillouin optik zaman domeni yansıma ölçme (BOTDR) prensiplerini temel alır.

OTDR prensibinde, optik fiber kablo içerisinde ilerleyen ışık darbelerinde oluşan ve çoğunluğu Rayleigh saçılmasından kaynaklanan saçılma kayıpları değerlendirilir. Rayleigh saçılması, cam yapıdaki homojensizliklerden ve yoğunluk dalgalanmalarından kaynaklanır. Homojensizlikler ve yoğunluk dalgalanmaları, fotonların geri yönde saçılarak fiberin giriş ucuna dönmelerine neden olmaktadır [2].



Şekil 1 : Optik Fiberli Dağınk Algılama Sistemi

BOTDR prensibi ise, optik fiber içerisinde ısı etkileri sonucu ortaya çıkan akustik dalgalar ile fiber içerisinde ilerleyen ışık fotonlarının etkileşmesine dayanmaktadır. Bu prensip, Brillouin saçılmasını esas almaktadır [3].

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

## 2. Optik Fiberli Dağınk Algılamada Landau-Placzek Oranı Yöntemi

Geriye saçılan Rayleigh işaretinin gücü,  $P_R(z)$ ,

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

ile verilir [4]. Burada,  $S$  yakalama katsayısını,  $P_i$  fibere giren optik işaretin gücünü,  $\gamma_R$  Rayleigh saçılma katsayısını,  $W$  ışık darbesinin süresini,  $v_g$  fiberde ilerleyen ışığın grup hızını,  $\gamma$  fiber zayıflama katsayısını,  $z$  mesafeyi ifade etmektedir.

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

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

ile verilir [5]. Burada,  $P_0$  lazerin pompaladığı işaretin maksimum gücüne,  $\tau$  işaretin darbe süresine,  $\gamma_B$  Brillouin saçılma katsayısına,  $S$  yakalama katsayısına,  $v_g$  fiberde ilerleyen ışığın grup hızına,  $\gamma_R$  Rayleigh saçılma katsayısına,  $z$  mesafeye karşılık gelmektedir.

Landau-Placzek oranı (LPR), geriye saçılan işarete, Rayleigh işareti gücünün, Brillouin işareti gücüne oranı veya Rayleigh saçılma katsayısının Brillouin saçılma katsayısına oranı şeklinde tanımlanmaktadır [4]. LPR,

$$LPR = \frac{P_R}{P_S + P_{AS}} = \frac{\gamma_R}{\gamma_B} = \frac{T_f}{T} (\beta_T \rho v_a^2 - 1) \quad (3)$$

ile ifade edilmektedir. Burada,  $P_R$  Rayleigh gücüne,  $P_S$  ve  $P_{AS}$

sırasıyla Brillouin Stokes ve anti-Stokes güçlerine,  $\gamma_R$  ve  $\gamma_B$  sırasıyla Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayılarına,  $T_f$  °K cinsinden fiberin fiktif sıcaklığına,  $T$  °K cinsinden ortam sıcaklığına,  $\beta_T$  fiktif sıcaklıkta silika fiberin izotermal sıkışma katsayısına,  $\rho$  silikanın yoğunluğuna ve  $v_a$  ısı etkilere bağlı olarak fiberin içerisinde oluşan akustik dalgaların hızına karşılık gelmektedir.

LPR yöntemi, dağınık algılamada OTDR ve BOTDR prensiplerini birlikte kullanmaktadır. En önemli avantajı, algılayıcı optik fiberin sadece bir giriş ucuna gerek duymasıdır. Böylelikle algılama sisteminin tasarımı ve kontrol edilebilmesi daha kolay olmaktadır [6].

### 2.1. Young Modülü, Shear Modülü ve Poisson Oranının Gerginlik Bağlılıkları

Farklı hızda soğuma sürecine sahip malzemeler için, sıcaklık farkından dolayı ısı gerilmeler meydana gelebilir. Yüksek sıcaklıktaki bir malzeme hızla soğutulursa, yüzeyi hemen soğur ve sertleşir ancak iç kısmı yumuşak ve sıcak kalır. İç kısım zamanla soğurken büzölmeye çalışır; fakat sert dış kısım buna engel olur. Sonuç olarak, dış yüzeyde basınç gerilmeleri ve iç kısımda ise çekme gerilmeleri meydana gelir [7].

Young (elastisite) modülü, kuvvet altında gerilme, esneme, uzama veya sıkışma gibi davranışlar gösteren malzemelerin elastiki özelliklerini ifade etmek için yaygın olarak kullanılan bir parametredir. Malzemenin kuvvet altında elastik şekil değiştirebilirliğinin ölçütüdür [8]. Young modülü, kuvvet altındaki malzeme üzerinde her hangi bir noktadaki gerilmenin gerginliğe oranı şeklinde de değerlendirilmekte olup

$$E = \frac{\text{Gerilme}}{\text{Gerginlik}} = \frac{F/A}{\Delta L/L} \quad (4)$$

ile verilir. Burada, F malzemeye uygulanan kuvvet, A kuvvetin uygulandığı yüzey alanı,  $\Delta L$  gerginlik kaynaklı uzama miktarı, L gerginlik oluşumundan önceki uzunluktur.

Fiberin Young modülü (E), kablo üzerinde meydana gelen gerginlik oluşumları ( $\epsilon$ ) ile doğrusal biçimde değişmektedir. Young modülünün gerginlik bağımlılığı

$$E = E_0(1 + 5.75 \epsilon) \quad [\text{GPa}] \quad (5)$$

ile ifade edilir [4]. Burada,  $E_0$ , 293 °K sıcaklıkta ve sıfır gerginlik altındaki Young modülüne karşılık gelmekte olup  $E_0 = 72.98 \text{ GPa}$ 'dır.

Shear modülü, kayma gerilmesinin kayma gerginliğine (kayma şekil değiştirmesi) oranı olarak tanımlanmaktadır. Shear modülü, kablo üzerinde meydana gelen gerginlik değişimlerinin ( $\epsilon$ ) fonksiyonu olarak

$$G(\epsilon) = G_0(1 + 3.06 \epsilon) \quad (6)$$

şeklinde yazılabilmektedir [4]. Burada,  $G_0 = 32.1 \text{ GPa}$ 'dır.

Bir cisim, bir yönde gerilmeye maruz kaldığında, gerilme yönüne dik diğer iki yönde daralmaya; sıkıştırıldığında ise diğer iki yönde genişlemeye (nadiren de büzölmeye veya kısalmaya) meyillidir. Bu olaya, Poisson etkisi adı verilir.

Poisson etkisinin bir ölçütü olan Poisson oranı ( $\sigma$ ), malzemedeki veya cisimdeki enine birim deformasyonun boyuna birim deformasyona oranıdır ve  $\sigma = -\epsilon_2/\epsilon_1$  ile ifade edilir. Burada;  $\epsilon_2$  enine birim deformasyon ve  $\epsilon_1$  boyuna birim deformasyondur [8].

Poisson oranı, Young modülüne ve Shear modülüne bağlı olarak

$$\sigma = \frac{E}{2G} - 1 \quad (7)$$

ile verilebilir [4, 8]. (5) ve (6)'daki sırasıyla Young modülü ve Shear modülü ifadeleri (7)'de yerine yazıldığında,

$$\sigma = \frac{0.1368 + 3.4764x \epsilon}{1 + 3.06 x \epsilon} \quad (8)$$

elde edilir. (8) ifadesinde gerekli düzenlemeler yapıldığında, Poisson oranı, algılayıcı optik fiberde meydana gelen gerginliğin fonksiyonu olarak

$$\sigma = 0.1368 + 3.058 x \epsilon \quad (9)$$

biçimini alır. (9)'dan görüldüğü üzere, Poisson oranı da, Young ve Shear modüllerine benzer şekilde, gerginlik değişimlerinden doğrusal olarak etkilenmektedir.

Young modülünün sıcaklık bağımlılığı ifadesi  $E(T) = 69.68 + 1.126 \times 10^{-2} T$  [4] ile (5)'te verilen gerginlik bağımlılığı ifadesi kullanılarak sıfır gerginlik ve 293 °K referans alındığında, algılayıcı fiber boyunca ortaya çıkan sıcaklık değişimleri ile gerginlik değişimleri arasında (10)'daki ilişki elde edilebilir.

$$\epsilon(T) = \frac{1.126 \times 10^{-2} T - 3.3}{419.64} \times 10^6 = 26.83 T - 7864 \quad (10)$$

Burada, T °K cinsinden sıcaklığı,  $\epsilon$  ise  $\mu\epsilon$  cinsinden gerginliği ifade etmektedir. Görüldüğü gibi, algılayıcı optik fiber boyunca meydana gelen gerginlik oluşumları ile sıcaklık oluşumları arasında doğrusal bir bağlantı bulunmaktadır. Sıcaklık ile gerginlik arasındaki ilişki Şekil 2'de verilmiştir.

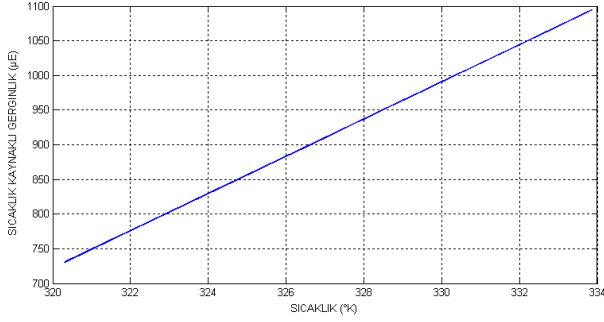
Brillouin güç değişimi üzerinde, hem optik fiberin algıladığı sıcaklık değişimlerinin hem de sıcaklığa bağlı olarak ortaya çıkan gerginlik değişimlerinin etkisi bulunmaktadır [3, 5, 9]. Ancak bu çalışmada, sıcaklık kaynaklı oluşan gerginliklerin Brillouin güç değişimi üzerindeki etkisi, sıcaklığın etkisi yanında ihmal edilerek, Brillouin güç değişimi sadece sıcaklık değişimlerine bağlı olarak ifade edilmiştir.

Brillouin güç değişiminin ( $\Delta P_B$ ) sıcaklık bağımlılığı

$$\Delta P_B = K_T^P \Delta T \quad (11)$$

şeklinde dir. Burada,  $K_T^P$  Brillouin güç değişiminin sıcaklık katsayısını,  $\Delta T$  ise algılayıcı fiber boyunca meydana gelen sıcaklık değişimini ifade etmektedir.

Bu çalışmadaki LPR esaslı dağınık gerginlik algılamada, kablo boyunca sıcaklık kaynaklı olarak meydana gelen gerginlik bilgileri, Brillouin güç değişimi ve sıcaklık ile gerginlik ilişkisini veren (10) ifadesinden elde edilmektedir.



Şekil 2: Optik fiber boyunca 321 °K -334 °K arasındaki sıcaklık değişimine karşılık gerginlik değişimi

## 2.2. Rayleigh ve Brillouin Saçılma Katsayılarının Gerginlikle Değişimi ve Gerginlik Duyarlılıkları

LPR'nin (3) ile verilen ifadesindeki  $\gamma_R$  Rayleigh ve  $\gamma_B$  Brillouin saçılma katsayıları, sırasıyla (12.a) ve (12.b) ile tanımlanmaktadır [4, 10].

$$\gamma_R = \frac{8\pi^3 n^8 p^2 k T_f [\beta_T - (\rho v_a^2)^{-1}]}{3\lambda_0^4} \quad (12.a)$$

$$\gamma_B = \frac{8\pi^3 n^8 p^2 k T (\rho v_a^2)^{-1}}{3\lambda_0^4} \quad (12.b)$$

(12.a) ve (12.b)'de, n fiberin çekirdek kırılma indisini, p Pockel katsayısını ( $\sim 0.286$ ), k Boltzman sabitini ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ ), T fiberin sıcaklığını,  $T_f$  optik fiberin fiktif sıcaklığını ( $T_f = 1950 \text{ }^\circ\text{K}$ ),  $\beta_T$  fiktif sıcaklıkta silika fiberin izotermal sıkıştırılabilirlik katsayısını ( $\beta_T = 7 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{N}^{-1}$ ),  $\rho$  silika fiberin yoğunluğunu ( $\rho = 2330 \text{ kg/m}^3$ ),  $v_a$  akustik dalga hızını ve  $\lambda_0$  fiber içerisine pompalanan ışığın dalga boyunu ( $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ ) ifade etmektedir [5].

Optik fiber içerisinde ısıl etkiler neticesinde oluşan akustik dalga hızı  $v_a$ , Young modülü (E), silika fiberin yoğunluğu ( $\rho$ ) ve Poisson oranının ( $\sigma$ ) fonksiyonu şeklinde

$$\rho v_a^2 = \frac{E \times (1-\sigma)}{(1+\sigma) \times (1-2\sigma)} \quad (13)$$

ile verilmektedir [4]. (13), (12.a) ve (12.b)'de yerine konularak Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayıları  $\gamma_R$  ve  $\gamma_B$  sırasıyla (14.a) ve (14.b)'de verildiği gibi elde edilir.

$$\gamma_R = \frac{8\pi^3 n^8 p^2 k T_f}{3\lambda_0^4} \cdot \left[ \beta_T - \frac{(1+\sigma)(1-2\sigma)}{E(1-\sigma)} \right] \quad (14.a)$$

$$\gamma_B = \frac{8\pi^3 n^8 p^2 k T}{3\lambda_0^4} \cdot \frac{(1+\sigma)(1-2\sigma)}{E(1-\sigma)} \quad (14.b)$$

(14.a)'da eşitliğin sağındaki ilk çarpan A ve ikinci çarpan B ile ifade edilip  $\gamma_R$  (14.c)'deki gibi yazıldığında

$$\gamma_R = \frac{8\pi^3 n^8 p^2 k T_f}{3\lambda_0^4} \times \left[ \beta_T - \frac{(1+\sigma)(1-2\sigma)}{E(1-\sigma)} \right] = A \times B \quad (14.c)$$

A, (14.c)'den  $A = 5.83 \times 10^5$  olarak hesaplanmaktadır.

Sırasıyla (5) ve (9)'da verilmiş olan Young modülü ve Poisson

oranı (14.c)'deki B ifadesinde yerine yazılarak (15.a) elde edilebilir.

$$B = \frac{3.584 + 14.46 \epsilon - 71.12 \epsilon^2}{(63 + 139.06 \epsilon - 1283.2 \epsilon^2) \times 10^9} \quad (15.a)$$

(15.a)'da gerekli düzenlemeler yapıldığında (15.b) oluşur.

$$B = (0.0568 + 0.104 \epsilon) \times 10^{-9} \quad (15.b)$$

$A = 5.83 \times 10^5$  ve (15.b), (14.c)'de yerine yazıldığında, Rayleigh saçılma katsayısı  $\gamma_R$ , algılayıcı optik fiber boyunca oluşan gerginlik değişimlerinin fonksiyonu şeklinde (16.a)'da verildiği gibi elde edilebilir.

$$\gamma_R(\epsilon) = 3.31 \times 10^{-5} + 6.06 \times 10^{-5} \epsilon \quad (16.a)$$

(16.a)'dan yararlanılarak Rayleigh saçılma katsayısının gerginlik duyarlılığı, (16.b)'deki gibi elde edilir.

$$\frac{d\gamma_R(\epsilon)}{d\epsilon} / \gamma_R(\epsilon) = \frac{6.06 \times 10^{-5}}{3.31 \times 10^{-5} + 6.06 \times 10^{-5} \epsilon} \quad (16.b)$$

Rayleigh saçılma katsayısının gerginlik duyarlılığı, sıfır gerginlik referans alındığında,  $293 \text{ }^\circ\text{K}$  için  $\% 1.8308 \times 10^{-4}$  değerini almaktadır. Algılayıcı fiberin sıcaklık değişimi ( $321 \text{ }^\circ\text{K} - 334 \text{ }^\circ\text{K}$ ) ve gerginlik değişimi ( $750 \text{ } \mu\text{E} - 1095 \text{ } \mu\text{E}$ ) aralıklarında, Rayleigh saçılma katsayısının gerginlik duyarlılığı  $\% 1.8283 \times 10^{-4}$  ile  $\% 1.8272 \times 10^{-4}$  değerleri arasında değişim göstermektedir.

(14.b)'de eşitliğin sağındaki ilk çarpan C ve ikinci çarpan D ile ifade edilirse,  $\gamma_B$  (17.a)'daki gibi yazıldığında,

$$\gamma_B = \frac{8\pi^3 n^8 p^2 k}{3\lambda_0^4} \times \frac{T \cdot (1+\sigma)(1-2\sigma)}{E \cdot (1-\sigma)} = C \times D \quad (17.a)$$

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

Sırasıyla (5) ve (9)'da verilmiş olan Young modülü ve Poisson oranı (17.a)'daki D ifadesinde yerine yazılarak (17.b) elde edilebilir.

$$D = \frac{T \cdot (0.0131 - 0.075 \epsilon - 0.297 \epsilon^2)}{(1 + 2.21 \epsilon - 20.37 \epsilon^2) \times 10^9} \quad (17.b)$$

(10)'da verilen ifadeden yararlanılırsa, (17.b), (17.c) biçimini alır.

$$D = \frac{(0.0373 \epsilon + 293) \times (0.0131 - 0.075 \epsilon - 0.297 \epsilon^2)}{(1 + 2.21 \epsilon - 20.37 \epsilon^2) \times 10^9} \quad (17.c)$$

(17.c)'de gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra,  $C = 298.95$  ile birlikte (17.a)'da yerine konulursa, Brillouin saçılma katsayısı  $\gamma_B$ , gerginliğin fonksiyonu olarak (18.a)'da verildiği gibi elde edilebilir.

$$\gamma_B(\epsilon) = 1.15 \times 10^{-6} - 9.12 \times 10^{-6} \epsilon \quad (18.a)$$

(18.a)'dan yararlanılarak Brillouin saçılma katsayısının gerginlik duyarlılığı (18.b)'deki gibi elde edilir.

$$\frac{d\gamma_B(\epsilon)}{d\epsilon} / \gamma_B(\epsilon) = \frac{-9.12 \times 10^{-6}}{1.15 \times 10^{-6} - 9.12 \times 10^{-6}\epsilon} \quad (18.b)$$

Brillouin saçılma katsayısının gerginlik duyarlılığı, sıfır gerginlik referans alındığında, 293 °K için  $- \% 7.9304 \times 10^{-4}$  değerini almaktadır. Algılayıcı fiberin sıcaklık değişimi (321 °K – 334 °K) ve gerginlik değişimi (750  $\mu\epsilon$  – 1095  $\mu\epsilon$ ) aralıklarında, Brillouin saçılma katsayısı gerginlik duyarlılığı  $- \% 7.9779 \times 10^{-4}$  ile  $- \% 7.9999 \times 10^{-4}$  değerleri arasında değişmektedir.

### 2.3. Landau-Placzek Oramı'nın Gerginlikle Değişimi ve Gerginlik Duyarlılığı

(3) ile verilmiş olan LPR, (16.a) ve (18.a) ifadeleri kullanıldığında, (19)'daki gibi elde edilmektedir.

$$LPR(\epsilon) = \frac{\gamma_B}{\gamma_B} = \frac{3.31 \times 10^{-5} + 6.06 \times 10^{-5}\epsilon}{1.15 \times 10^{-6} - 9.12 \times 10^{-6}\epsilon} \quad (19)$$

(19)'da gerekli düzenlemeler yapıldığında, LPR, gerginliğin fonksiyonu olarak (20)'de verildiği gibi elde edilebilir.

$$LPR(\epsilon) = 28.8 + 281.9 \times \epsilon + 418.9 \times \epsilon^2 \quad (20)$$

Optik fiberin çalışma gerginliği aralığında (750  $\mu\epsilon$  – 1095  $\mu\epsilon$ ), Brillouin saçılma katsayısının gerginlik duyarlılığının, Rayleigh saçılma katsayısının gerginlik duyarlılığından yüksek olması (~ 4.5 kat) nedeniyle, kablo boyunca LPR profilinde esas belirleyici etken, geriye saçılan ışaretin Brillouin gücündeki değişimdir.

LPR'nin gerginlik duyarlılığı, (21)'de verildiği gibi elde edilebilir.

$$\frac{dLPR(\epsilon)}{d\epsilon} / LPR(\epsilon) = \frac{281.9 + 837.8 \times \epsilon}{28.8 + 281.9 \times \epsilon + 418.9 \times \epsilon^2} \quad (21)$$

LPR'nin gerginlik duyarlılığı, sıfır gerginlik referans alındığında, 293 °K sıcaklığında,  $\% 9.7882 \times 10^{-4}$  değerini almaktadır. 750  $\mu\epsilon$  – 1095  $\mu\epsilon$  gerginlik aralığında ise  $\% 9.7384 \times 10^{-4}$  ile  $\% 9.7157 \times 10^{-4}$  değerleri arasında değişim göstermektedir.

### 3. Benzetimler

64/110 kV XLPE yalıtkanlı, tek damarlı bakır iletkenli 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:

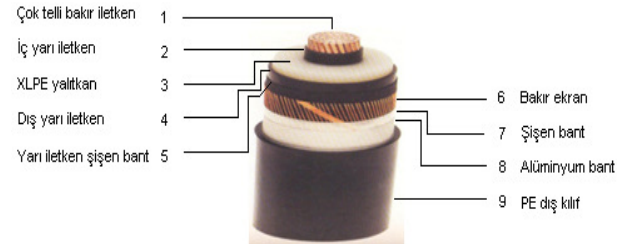
- YG kablosu üzerinde her 700 metrede bir tekrarlanan kablo bağlantı noktası vardır.
- Kablo, belirli bölgelerde, farklı uzunluk ve ebatlardaki PVC boruların içerisinde geçmektedir. Kablonun PVC boruların içinden geçtiği bölgeler ile PVC boruların uzunluk ve ebatları şu şekildedir:

- 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
- 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.
- Kablo üzerinde harici gerginlik oluşumu bulunmamaktadır.

Benzetimlerde kullanılan algılayıcı fibere ait parametreler şunlardır:

- Fibere pompalanan ışaretin darbe süresi:  $\tau = 14$  ns
- Pompalanan ışaretin dalga boyu:  $\lambda = 1550$  nm
- 1550 nm için fiber zayıflama katsayısı:  $\gamma = 4.56 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}$
- Lazerin pompaladığı ışaretin 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:  $l = c\tau/2n_1 = 1.46$  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/m<sup>3</sup>
- Fiber için Brillouin gücünün sıcaklıkla değişim katsayısı:  $K_T^P = 0.36 \pm 0.030$  %°K<sup>-1</sup>
- 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

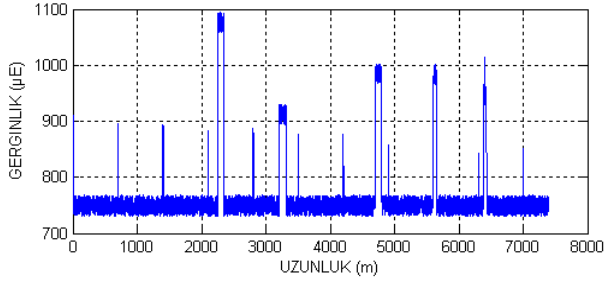
Modelde kullanılan optik fiber entegre edilmiş 64/110 kV YG kablosu kesitinin kısımları Şekil 3'te verilmiştir.



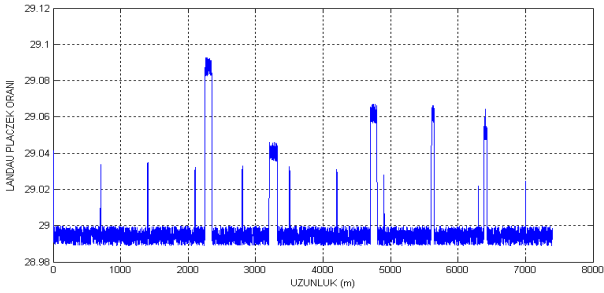
Şekil 3: XLPE yalıtkanlı 64/110 kV YG kablosunun görünümü

64/110 kV YG kablosuna entegre edilmiş algılayıcı optik fiber kablo boyunca elde edilen gerginlik değişimi ve LPR değişimi Şekil 4'te gösterilmiştir. Optik fiber, en yüksek gerginlik değerine 2250 m - 2350 m aralığında, 1095  $\mu\epsilon$  ile ulaşmıştır. Kablo bağlantı noktalarında da gerginlik artışları görülmektedir. Bu noktalarda, maksimum gerginlik 900  $\mu\epsilon$  olmuştur. Optik fiberin LPR değişimi, gerginliğin maksimum olduğu 2250 m – 2350 m bölgesinde 29.093 ile en büyük değerini almıştır.



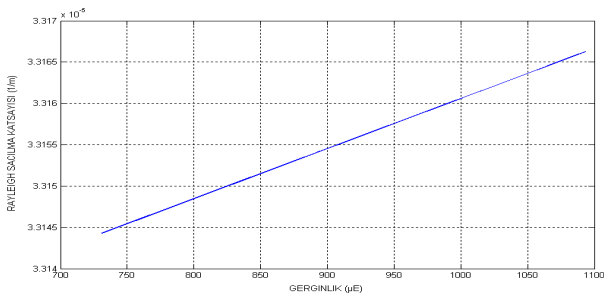


(a)

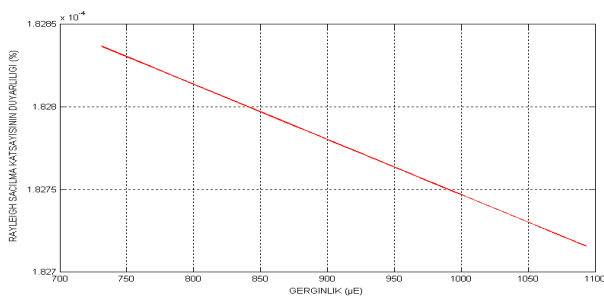


(b)

Şekil 4: Algılayıcı optik fiber boyunca gerginlik değişimi ve b) Algılayıcı optik fiber boyunca LPR değişimi



(a)

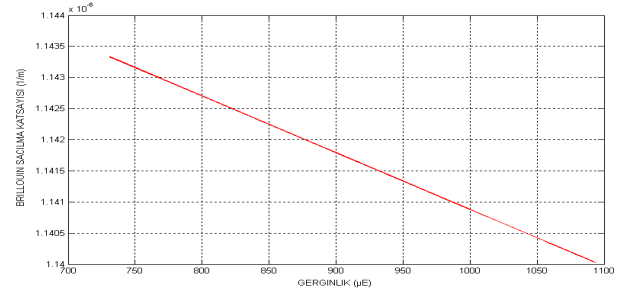


(b)

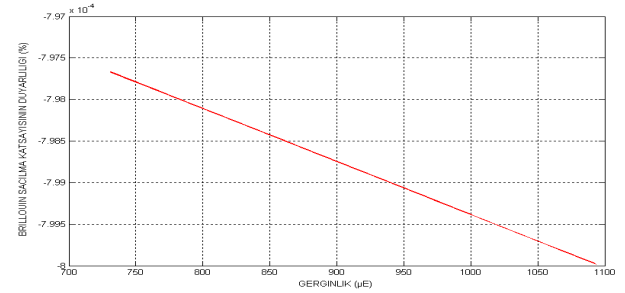
Şekil 5: a) Rayleigh saçılma katsayısının gerginlikle değişimi ve b) Rayleigh saçılma katsayısının gerginlik duyarlılığı (gerginlikle yüzdesel değişimi)

Rayleigh saçılma katsayısının, gerginlikle değişimi ve gerginlik duyarlılığı (gerginlikle yüzdesel değişimi) Şekil 5'te verilmiştir. Rayleigh saçılma katsayısı, gerginlikle doğrusal olarak artmaktadır. Bu nedenle gerginliğin en düşük olduğu

750 µε için  $3.3146 \times 10^{-5} m^{-1}$  değerini, en yüksek olduğu 1095 µε için,  $3.3166 \times 10^{-5} m^{-1}$  değerini almıştır. Rayleigh saçılma katsayısına ait gerginlik duyarlılığı ise, kablo boyunca en yüksek  $\% 1.8283 \times 10^{-4}$  değerini almıştır. Rayleigh saçılma katsayısı gerginlik duyarlılığı, gerginliğin maksimum 900 µε'a ulaşıldığı kablo bağlantı noktalarında  $\% 1.8278 \times 10^{-4}$  olmuştur. Kablo üzerindeki gerginliğin maksimum olduğu 2250 m – 2350 m aralığında ise, Rayleigh saçılma katsayısı gerginlik duyarlılığı  $\% 1.8272 \times 10^{-4}$  ile en düşük değerine ulaşmıştır.



(a)



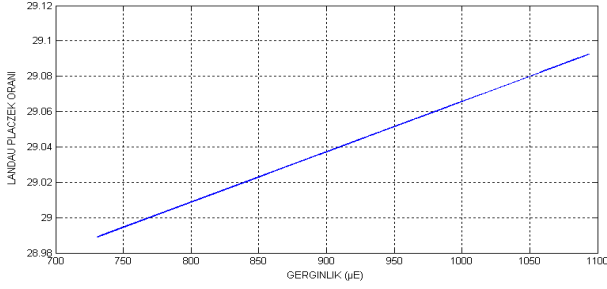
(b)

Şekil 6: a) Brillouin saçılma katsayısının gerginlikle değişimi ve b) Brillouin saçılma katsayısının gerginlik duyarlılığı (gerginlikle yüzdesel değişimi)

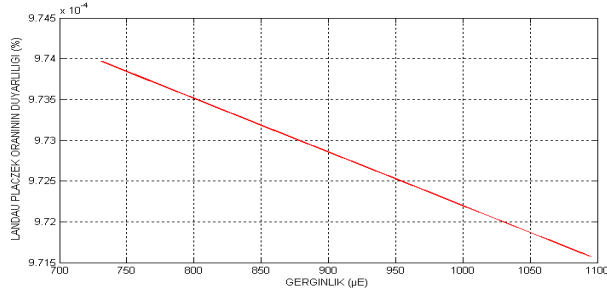
Brillouin saçılma katsayısının, gerginlikle değişimi ve gerginlik duyarlılığı (gerginlikle yüzdesel değişimi) Şekil 6'da verilmiştir. Brillouin saçılma katsayısı gerginlikle doğrusal olarak azalma göstermektedir. 750 µε - 1095 µε gerginlik aralığında,  $1.1432 \times 10^{-6} m^{-1}$  ile  $1.1400 \times 10^{-6} m^{-1}$  değerleri arasında değişmektedir. Brillouin saçılma katsayısı gerginlik duyarlılığı da, Rayleigh saçılmasında olduğu gibi, gerginlikle doğrusal olarak azalmaktadır. En düşük değerini, kablo üzerinde sıcaklık kaynaklı gerginliğin en yüksek olduğu 2250 m – 2350 m aralığında  $-\% 7.9999 \times 10^{-4}$  ile almıştır.

YG kablusunun PVC boru içerisinden geçerken başka bir YG kablosu ile kesiştiği 6401. metrede (1010 µε gerginlikte), Rayleigh saçılma katsayısı gerginlik duyarlılığı  $\% 1.8274 \times 10^{-4}$  değerini, Brillouin saçılma katsayısı gerginlik duyarlılığı ise  $-\% 7.9945 \times 10^{-4}$  değerini almıştır.

LPR'nin gerginlikle değişimi ve gerginlik duyarlılığı Şekil 7'de gösterilmiştir. LPR'nin gerginlikle değişimi ve gerginlik duyarlılığı (20) ve (21) kullanılarak elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 7: a) LPR'nin gerginlikle değişimi ve b) LPR'nin gerginlik duyarlılığı (gerginlikle yüzdesel değişimi)

Şekil 7'den, LPR'nin 750 µε – 1095 µε gerginlik aralığında, 28.9946 – 29.0929 arasında değiştiği görülmektedir. Buradan LPR, optik fiberdeki gerginlik değişimi aralığında, gerginliğin fonksiyonu olarak (22)'de verildiği gibi elde edilebilmektedir.

$$LPR(\epsilon) \approx 28.78 + 285 \epsilon ; 750 \mu\epsilon \leq \epsilon \leq 1095 \mu\epsilon \quad (22)$$

LPR'nin gerginlik duyarlılığı (gerginlikle yüzdesel değişimi), algılayıcı fiberdeki sıcaklığa bağlı gerginlik artışı ile doğrusal olarak azalmaktadır. Kabloda gerginliğin 1095 µε ile en yüksek değerine ulaştığı bölgede, LPR'nin gerginlik duyarlılığı %  $9.7157 \times 10^{-4}$  olarak en düşük değerine ulaşmıştır.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, Landau-Placzek oranını (LPR) temel alan dağıntık gerginlik algılama yönteminden yararlanılarak, Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayılarının gerginlikle değişimleri ve gerginlik duyarlılıkları ile LPR'nin gerginlikle değişimi ve gerginlik duyarlılığı hem teorik olarak hem de benzetimlerle analiz edilmiştir. Çalışmada, Young modülünün sıcaklık ve gerginliğe yüksek bağımlılığı kullanılarak, algılayıcı optik fiber boyunca oluşan gerginlik verileri, sıcaklık verilerinden elde edilmiştir.

Benzetim sonuçlarına göre, Rayleigh saçılma katsayısına, Brillouin saçılma katsayısına ve LPR'ye ait gerginlik duyarlılığı değişimleri sırasıyla  $\sim -3.2 \times 10^{-10} \%$ /µε,  $\sim -6.4 \times 10^{-9} \%$ /µε ve  $\sim -6.6 \times 10^{-9} \%$ /µε olarak elde edilmiştir. Brillouin saçılma katsayısının gerginlik duyarlılığının, Rayleigh saçılma katsayısının gerginlik duyarlılığından  $\sim 4.5$  kat daha büyük olduğu, hem teorik

sonuçlardan hem de benzetim sonuçlarından görülmektedir. Bunun yanı sıra, Brillouin saçılma katsayısının gerginlik duyarlılığı değişiminin, Rayleigh saçılma katsayısınıninkine kıyasla  $\sim 20$  kat daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, LPR esaslı dağıntık gerginlik algılamada, belirleyici etkenin Brillouin gücündeki değişim olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada ayrıca, analitik yöntem ile elde edilen LPR formülü, benzetim sonuçlarından yararlanılarak, ilgilenilen gerginlik değişimi aralığı için basitleştirilmiş ve doğrusal bir denklem haline getirilmiştir.

LPR'nin ısı etkiler neticesinde meydana gelen gerginlik oluşumlarına karşı yüksek duyarlılığı, optik fiberli dağıntık gerginlik algılamanın kullanıldığı sistemlerde, gerçek zamanlı gerginlik algılanmasında, LPR'nin etkili bir biçimde kullanılabilmesine imkan sağlamaktadır.

#### 5. Kaynaklar

- [1] 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.
- [2] Senior, J. M., *Optical fiber communications – principles and practice*, 2nd Ed., Prentice Hall, 1992.
- [3] Günday, A., Yılmaz, G. ve Karlık, S. E., "Optik fiberli dağıntık algılama yöntemiyle enerji kablosunda sıcaklık ve gerginliğin algılanması", *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 12, Sayı 2, 43-52, 2007.
- [4] K. R. C. P. De Souza, *Fiber optic distributed sensing based on spontaneous Brillouin scattering*, PhD Dissertation, University of Southampton, 1999.
- [5] Alahbabi, M., *Distributed optical fiber sensors based on the coherent detection of spontaneous Brillouin scattering*, PhD Dissertation, University of Southampton, 2005.
- [6] Bao, X., Webb, D. J. & Heron, N. "Experimental and theoretical studies of a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 13, No. 7, pp. 1340-1347, 1995.
- [7] Onaran, K., *Malzeme Bilimi*, Bilim Teknik Yayınevi, 11. Baskı, 2009.
- [8] W.H. Wang, "The elastic properties, elastic models and elastic perspectives of metallic glasses", Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, PR China, *Progress in Materials Science* 57 (2012) 487–656, 2012.
- [9] 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 5<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 2007.
- [10] 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.