

OPTİK FİBERLİ DAĞINIK ALGILAMANIN YÜKSEK GERİLİM KABLOLARINDAKİ KULLANIMINDA SICAKLIK VE GERGİNLİK OLUŞUMLARININ YOUNG VE SHEAR MODÜLLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Abdurrahman GÜNDAY*, Sait Eser KARLIK, Güneş YILMAZ****

* Elektronik Teknolojisi Programı, Orhangazi Meslek Yüksek Okulu, Uludağ Üni., 16800, Orhangazi, Bursa

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Uludağ Üni., 16059, Görükle, Bursa

agunday@uludag.edu.tr, ekarlik@uludag.edu.tr, gunesv@uludag.edu.tr

(Geliş/Received: 06.02.2013; Kabul/Accepted: 28.05.2014)

ÖZET

Bu çalışmada, XLPE yalıtkanlı yüksek gerilim (YG) kablolarında oluşan eşzamanlı sıcaklık ve gerginlik değişimlerinin algılanmasında kullanılabilecek yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde, Brillouin güç değişimlerinin sıcaklık bağımlılığını esas alan optik fiberli dağılık algılama prensibi ile algılayıcı fiberin Young modülü ve Shear modülünün, sıcaklık ve sıcaklık kaynaklı içsel gerginlik bağımlılığından yararlanılmıştır. Çalışmada model olarak, Temmuz ayında Bursa bölgesinde 20 °C ortam sıcaklığına sahip 1,5 m derinlikli kumlu toprak altına serilmiş, 2 km uzunluklu, 630 mm² iletken kesitli, XLPE yalıtkanlı 89/154 kV YG kablosu esas alınmıştır. Algılayıcı fiber, 1550 nm'de tek modlu optik fiberdir. Young modülü sıcaklık duyarlılığı YG kablosunun çalışma sıcaklığı bölgesinde $-2,33 \times 10^{-6} \text{ \%}/^{\circ}\text{K}$ iken, Shear modülünde $-6,67 \times 10^{-7} \text{ \%}/^{\circ}\text{K}$ şeklinde elde edilmiştir. Ayrıca, Young modülü gerginlik duyarlılığı ile Shear modülü gerginlik duyarlılığı, YG kablosu üzerindeki en sıcak noktada sırasıyla $5,7154 \times 10^{-4} \text{ \%}$ ve $3,0502 \times 10^{-4} \text{ \%}$ olarak bulunmuştur. Kablo çalışma rejiminde iken, sıcaklıktaki 1 °K değişime karşılık kablo boyunca $\sim 26,83 \text{ }\mu\text{e}$ gerginlik değişimi meydana gelmiştir. Gerek teorik hesaplamalar gerekse benzetim sonuçları, Young modülü sıcaklık ve gerginlik duyarlılıklarından yararlanmanın, kablo çalışma süresi ve kapasitesi hakkında bilgi edinilmesi açısından Shear modülü sonuçlarına göre daha etkin bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Young Modülü, Shear Modülü, Brillouin Saçılması, Optik Fiberli Dağılık Algılama, Sıcaklık, Gerginlik, Yüksek Gerilim Kablosu.

THE IMPACT OF TEMPERATURE AND STRAIN FORMATIONS ON YOUNG AND SHEAR MODULI IN USAGE OF OPTICAL FIBER DISTRIBUTED SENSING FOR POWER CABLES

ABSTRACT

In this study, a novel method that can be used for sensing temperature and strain changes simultaneously occurred along the XLPE insulated high voltage (HV) cables has been proposed. In this method, optical fiber distributed sensing principle based on the temperature dependence of Brillouin power changes and the temperature and intrinsic thermal strain dependencies of Young modulus and Shear modulus of the sensing fiber have been utilized. The cable model used in this study has been based on an XLPE insulated 89/154 kV power cable with a conductor cross-sectional area of 630 mm² and a length of 2 km, which has been laid under 1.5 m of a sandy ground of Bursa with an ambient temperature of 20 °C in July. The sensing fiber is a single mode fiber at 1550 nm. While temperature sensitivity of the Young modulus has been determined as $-2.33 \times 10^{-6} \text{ \%}/^{\circ}\text{K}$ in the operation temperature region of the power cable, that of the Shear modulus has been obtained as $-6.67 \times 10^{-7} \text{ \%}/^{\circ}\text{K}$. Furthermore, strain sensitivities of Young and Shear moduli at the hottest point of the power cable have been obtained as $5.7154 \times 10^{-4} \text{ \%}$ and $3.0502 \times 10^{-4} \text{ \%}$, respectively. In the operation regime of the cable, $\sim 26.83 \text{ }\mu\text{e}$ strain variation has been occurred for a 1 °K variation in the temperature along the cable. Both theoretical computations and simulation results show that it is a more efficient method to utilize

strain and temperature sensitivities of the Young modulus in gathering information about the lifespan and the capacity of the power cable with respect to that of the Shear modulus.

Key Words: Young Modulus, Shear Modulus, Brillouin Scattering, Optical Fiber Distributed Sensing, Temperature, Strain, Power Cable

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Genleşmesi kısıtlanmış bir malzemede sıcaklık değişimine bağlı olarak gerilmeler meydana gelebilir. Bu gerilmeler, ısı genleşme katsayısı α ile orantılıdır. Sıcaklık dT kadar artırılırsa, l uzunluklu silindirik bir cismin boyundaki dl miktarındaki artış, $dl = \alpha \cdot l \cdot dT$ bağıntısı ile hesaplanabilir. Bir cisimde, ısı etkileri meydana gelen birim uzama veya şekil değiştirme elastik sınırlar içinde gerilmelerle doğru orantılıdır. Cisim üzerinde sıcaklık kaynaklı olarak meydana gelen ısı gerilmeleri (1)'de verildiği gibi ifade edilmektedir [1].

$$\sigma = E \cdot \epsilon = E \cdot \alpha \cdot dT \quad (1)$$

Eşitlikte, E malzemenin Young modülünü, σ cisim üzerinde oluşan ısı gerilmeyi (uzunlamasına gerilme) ve ϵ ise ısı gerginliği (birim uzama) ifade etmektedir. Cisim gerilmeye maruz kalırsa, atomlar arası uzaklık gerilme doğrultusunda artar, enine doğrultuda ise bağ kuvvetleri etkisinde azalır. Bu tür yer değiştirmelere atomlar arası bağlar karşı koyar ve cismin elastik şekil değiştirme özelliklerini belirler. Elastik şekil değiştirmenin ölçütü olarak değerlendirilen elastik şekil değiştirme direnci, elastisite modülü veya Young modülü olarak ifade edilmektedir. Bir başka ifade ile Young modülü, bir malzeme veya cismin elastik şekil değiştirmesinin ve orijinal şekline dönmesinin bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Young modülünün birimi N/m^2 veya GPa 'dır ve bir cisim veya malzeme üzerindeki herhangi bir noktada meydana gelen gerilmeler ile gerginliklerin oranı olarak (2)'de verildiği gibi ifade edilebilmektedir [1,2].

$$E = \frac{\text{Gerilme}}{\text{Gerginlik}} = \frac{F/A}{\Delta L/L} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2)$$

Eşitlikte; F uygulanan kuvveti, A kuvvetin uygulandığı alanı, ΔL cismin kuvvet sonucu uzama miktarını ve L ise cismin ilk boyunu ifade etmektedir. Shear modülü veya kayma modülü, kayma gerilmesinin kayma gerginliğine (kayma şekil değiştirmesi) oranı olarak tanımlanır ve (3)'te verildiği gibi ifade edilmektedir. Birimi GPa 'dır [1].

$$G = \frac{F/A}{\Delta x/L} = \frac{\tau}{\gamma} \quad (3)$$

Eşitlikte; G Shear (kayma) modülünü, Δx enlemesine yer değiştirme (kayma) miktarını, τ kayma gerilmesini ve γ kayma şekil değiştirmesini ifade etmektedir.

Bir malzemede Shear modülünden bahsedebilmek için, malzemenin kristal yapısı boyunca, kayma doğrultusundaki kayma gerilmesi bileşeninin, o kayma sisteminin kayma direncine eşit olması gerekmektedir. Bir cisim için kayma olayı, ancak atomlar arası bağ kuvvetlerini yenerek oluşabilmektedir. Farklı hızda soğuma sürecine sahip malzemeler için, sıcaklık farkından dolayı ısı gerilmeler meydana gelebilir. Yüksek sıcaklıktaki bir malzeme parçası hızla soğutulursa, yüzeyi hemen soğur ve sertleşir, içi yumuşak ve sıcak kalır. İç kısmı zamanla soğurken büzölmeye çalışır, fakat sert dış kısım buna engel olur. Bunun sonucunda da, dış yüzeyde basınç gerilmeleri ve iç kısımda ise çekme gerilmeleri meydana gelir [1].

Özellikle XLPE yalıtkanlı bakır ve alüminyum iletkenli yüksek gerilim kabloları, çalışma esnasında kablodan geçen yük akımındaki değişimlere ve bu değişimlerden kaynaklanan yüksek sıcaklık oluşumlarına maruz kalabilmektedir. XLPE yalıtkanlı YG kablolarında meydana gelen bu sıcaklık oluşumları ile sıcaklık kaynaklı gerginlik değişimleri, özellikle kablo yalıtkanında yaşlanma sürecinin hızlanmasına neden olmaktadır. Bu durum, XLPE yalıtkanlı YG kablolarının yüksek maliyeti ile birleşince, kablo iletkeni ve yalıtkanında oluşan sıcaklığın ve sıcaklık kaynaklı içsel gerginliklerin tespit edilmesini önemli hale getirmektedir.

YG kablolarında gerek iletkenin, ekran tellerinin ve metal zırh malzemelerin gerekse, yalıtkan malzemelerin ısı etkilerine bağlı olarak farklı hızlarda genleşme ve büzölme özelliği göstermesi, yalıtkan üzerinde boşlukların oluşmasına neden olabilmektedir. Söz konusu oluşumlar, dielektrik alan etkisi ile ortaya çıkan kısmi boşalmalar meydana getirerek, kablonun akım taşıma kapasitesini önemli ölçüde sınırlandırmaktadır [3]. Bu sınırlamalar, gerek ısı etkilerinin gerekse sıcaklık kaynaklı gerginliklerin önceden tespit edilerek çözülmesini gerektirmektedir. Young modülünün ve Shear modülünün sıcaklık ve gerginlik değişimlerinden doğrudan etkilenmesi, bu iki parametrenin optik fiberli algılamada kullanılarak, kablonun verimliliği ve çalışma süresi ile ilgili ortaya çıkabilecek sıcaklık ve gerginlik değişimi kaynaklı problemlerin önceden tespit edilip önlenmesi açısından önemli bir imkân sunmaktadır. Bunun yanı sıra, ısı etkilerinin analizi ile malzemenin kırılma dayanıklılığı ve sertliği ile ilgili doğru değerlendirmeler yapmak da mümkün olmaktadır.

Bu çalışmada, sadece bir foto alıcı ile kablo üzerindeki çok sayıda ölçüm noktasından fiziksel

verinin alınabildiği bir yöntem olan optik fiberli dağınmık algılama metodundan yararlanılmıştır. Optik fiberli dağınmık algılama metodunda, fiberin kendisi algılama elemanı olarak kullanılabilir [4]. Bu yöntemle göre, fibere pompalanan işaretin Brillouin güç ifadesinden yararlanılarak kablo boyunca sıcaklık verileri elde edilmiş ve bu sıcaklık değişimlerinin neden olduğu gerginlik oluşumları Young modülü kullanılarak tespit edilmiştir.

Literatürde Brillouin saçılma mekanizmasını temel alan optik fiberli algılayıcılarda, kullanılan lazerin ve optik fiberin çalışma dalgaboyuna bağlı olarak farklı dalgaboylarında giriş işaretlerinin kullanıldığı çalışmalar mevcuttur [5-10]. Ancak son yıllardaki çalışmalarda ağırlıklı olarak 1550 nm dalgaboylu ışın vericilerin kullanıldığı algılayıcılar önerilmektedir [11-17]. Bunun en önemli nedeni, günümüzde dağınmık algılayıcıların kilometreler mertebesinde algılama mesafesine sahip uygulamalarda kullanılması ve dolayısıyla işaret zayıflamasının büyük önem arz etmesidir. 1550 nm bölgesinde standart haberleşme fiberinin kullanıldığı uygulamalarda zayıflama minimum olmaktadır. Bu noktadan hareketle, çalışmada sunulan modelde kablonun 2 km uzunluklu olması nedeniyle, zayıflamanın etkisini minimize ederek algılayıcının performansını yüksek tutmak amaçlanmış ve lazerden fibere pompalanan işaretin dalga boyu 1550 nm seçilmiştir. Dolayısıyla, algılamanın da 1550 nm civarındaki Brillouin Stokes ve Brillouin anti-Stokes bileşenlerinden yararlanılarak gerçekleştirildiği kabul edilmiştir.

2. YOUNG MODÜLÜNÜN SICAKLIK VE GERGİNLİK BAĞIMLILIĞI (STRAIN AND TEMPERATURE DEPENDENCES OF THE YOUNG MODULUS)

Silika camlar için Young modülü, (4)'te verildiği gibi sıcaklıkla doğrusal olarak değişmektedir [18].

$$E_{(T)} = 69,68 + 1,126 \times 10^{-2}T \quad [\text{GPa}] \quad (4)$$

Eşitlikte; T, °K cinsinden sıcaklığa karşılık gelmektedir.

Young modülünün sıcaklıkla yüzdesel değişimi veya sıcaklık duyarlılığı (5)'te elde edilmiştir.

$$\frac{1}{E_{(T)}} \frac{dE_{(T)}}{dT} = \frac{1}{6188,28 + T} \quad (5)$$

Görüldüğü gibi, Young modülünün sıcaklık duyarlılığı, sıcaklıkla ters orantılı biçimde değişim göstermekte olup 293°K ortam sıcaklığı için $15,429 \times 10^{-3}$ değerini almaktadır.

Young modülü, gerginlikle doğrusal olarak değişmektedir [18]. Bu ilişki (6)'da verilmiştir.

$$E_{\epsilon} = E_0(1 + 5,75 \epsilon) \quad (6)$$

(6)'da $E_0 = 72,98 \text{ GPa}$ sıfır gerginlik ve 293 °K sıcaklıktaki Young modülüne, ϵ ise gerginliğe karşılık gelmektedir [18].

Young modülünün gerginlikle yüzdesel değişimi veya gerginlik duyarlılığı (7)'de verildiği gibi elde edilmiştir. Kablo üzerinde gerginliğin maksimum olduğu bölgede gerginlik duyarlılığı en küçük değerini almaktadır.

$$\frac{1}{E_{(\epsilon)}} \frac{dE_{(\epsilon)}}{d\epsilon} = \frac{1}{0,174 + \epsilon} \quad (7)$$

(4) ve (6) kullanılarak $T > 293 \text{ °K}$ değerlerindeki algılayıcı optik fiber sıcaklığı için, kablo üzerinde sıcaklık değişiminin neden olduğu Young modülü değişimi (8)'de verildiği gibi elde edilebilmektedir. Eşitlikte T(z), kablo boyunca sıcaklık değişimine karşılık gelmektedir.

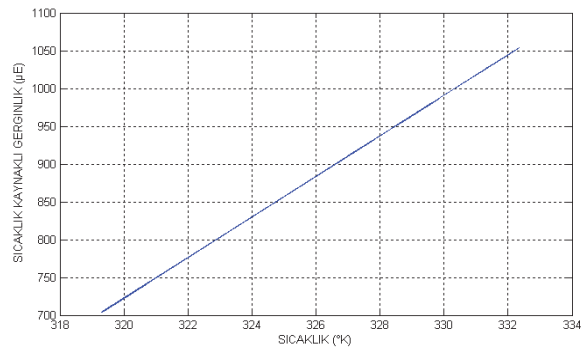
$$\Delta E_{(T)} = E_{(T)} - E_0 = 1,126 \times 10^{-2} \times T(z) - 3,3 \text{ GPa} \quad (8)$$

E_0 referans alınarak, kablonun çalışması esnasında meydana gelen sıcaklık değişimlerinin neden olduğu gerginlik oluşumları, (8)'in (6)'da yerine konması ile (9)'da verildiği gibi elde edilebilmektedir.

$$\epsilon = \frac{E_{(T)} - E_0}{E_0 \times 5,75} = 26,83 T - 7864 \quad (9)$$

Eşitlikte, T °K cinsinden sıcaklığı, ϵ ise $\mu\epsilon$ cinsinden sıcaklık kaynaklı içsel gerginliği ifade etmektedir. Görüldüğü gibi, algılayıcı optik fiber boyunca meydana gelen gerginlik oluşumları ile sıcaklık oluşumları arasında doğrusal bir bağıntı bulunmaktadır.

Sıcaklık ile gerginlik arasındaki ilişki Şekil 1'de verilmiştir. Algılayıcı optik fiberde, $320 \text{ °K} - 332 \text{ °K}$ aralığındaki sıcaklık değişimine karşılık, $722 \mu\epsilon - 1044 \mu\epsilon$ aralığında gerginlik değişimi elde edilmiştir.



Şekil 1. Algılayıcı optik fiber boyunca $320 \text{ °K} - 332 \text{ °K}$ aralığındaki sıcaklık değişimine karşılık gerginlik değişimi (Strain variation vs. temperature variation in the range of $320 \text{ °K} - 332 \text{ °K}$ along the sensing optical fiber)

3. SHEAR MODÜLÜNÜN SICAKLIK VE GERGİNLİK BAĞIMLILIĞI (STRAIN AND TEMPERATURE DEPENDENCES OF THE SHEAR MODULUS)

Shear modülü değeri ne kadar büyükse, malzemenin sertliği veya esnemezliği kadar yüksek olmakta ve kırılabilirliği artmaktadır. Bazı malzemelerin 293 °K sıcaklığındaki tipik malzeme özellikleri Tablo 1’de verilmiştir [1, 3, 19, 20].

Shear modülü, kablo üzerinde meydana gelen gerginlik değişimlerinin fonksiyonu olarak (10)’da verildiği gibi ifade edilebilmektedir. Eşitlikte; $G_0 = 32,1 \text{ GPa}$ olarak verilmektedir [18].

$$G_{(\epsilon)} = G_0(1 + 3,06 \epsilon) \quad (10)$$

Modülün gerginlikle yüzdesel değişimi (gerginlik duyarlılığı) (11)’de elde edilmiştir.

$$\frac{1}{G_{(\epsilon)}} \frac{dG_{(\epsilon)}}{d\epsilon} = \frac{1}{0,327 + \epsilon} \quad (11)$$

Shear modülünün gerginlik duyarlılığı, kablo boyunca gerginlikle doğrusal olarak azalmaktadır.

(9) eşitliği, (10)’da yerine yazılarak Shear modülünün sıcaklıkla değişimi, (12)’de verildiği gibi ifade edilebilmektedir.

$$G_{(T)} = 31,328 + 2,636 \times 10^{-3}T \quad [\text{GPa}] \quad (12)$$

Shear modülünün sıcaklıkla yüzdesel değişimi veya sıcaklık duyarlılığı (13)’te elde edilmiştir.

$$\frac{1}{G_{(T)}} \frac{dG_{(T)}}{dT} = \frac{1}{11884,67 + T} \quad (13)$$

Shear modülünün sıcaklık duyarlılığı, 293°K ortam sıcaklığı için $8,212 \times 10^{-3}$ değerini almaktadır.

4. BENZETİMLER (SIMULATIONS)

Brillouin güç değişimi esasına dayalı dağınık sıcaklık ve gerginlik algılamada, Temmuz ayı içinde Bursa bölgesinde ortalama 20 °C ortam sıcaklığına sahip kumlu özellikteki 1,5 m derinlikli toprak altına

serilmiş, 2 km uzunluklu, 630 mm² iletken kesitli, XLPE yalıtkanlı 89/154 kV YG kablosu model olarak seçilmiştir. Kablo boyunca Young modülü ve Shear modülü değişimleri için aşağıdaki koşullar baz alınmıştır:

Model olarak seçilen YG kablosu,

- 300 m - 400 m arasında ve 700 m - 735 m arasında, sırasıyla 100 m ve 35 m uzunluğundaki 145mm x 5 mm ebatlı PVC borular içerisinden geçirilmektedir.
- 1200 m - 1320 m arasında 155 mm x 5 mm ebatlı bir PVC boru içerisinden geçirilmesine ilaveten, 1240 m - 1280 m aralığında 180 mm x 7 mm ebatlı ısı geçirgenliği daha düşük ikinci bir PVC boru içerisinden de geçirilmektedir.
- 1700. metrede ise başka bir YG kablosu ile kesişmekte ve 2000. metrede dağıtım noktasına ulaşmaktadır.
- Herhangi bir harici gerginliğe maruz kalmamaktadır.

Benzetimlerde kullanılan algılayıcı fibere ait parametreler aşağıda verilmiştir:

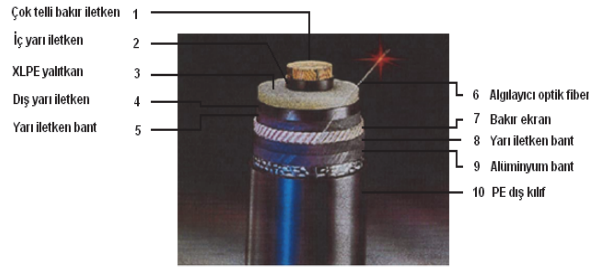
- Optik fiber kablo uzunluğu: $L = 2000 \text{ m}$.
- Lazerin pompalandığı işaretin maksimum gücü: $P_0 = 2,2 \text{ W}$.
- Pompalanan işaretin dalga boyu: $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$.
- Pompalanan işaretin darbe süresi: $\tau = 20 \text{ ns}$.
- Optik fiberin çekirdek kırılma indisi: $n_1 = 1,50$.
- Optik fiberin kılıf kırılma indisi: $n_2 = 1,48$.
- Optik fiber yakalama katsayısı: $S = 0,0066$.
- Işığın boşluktaki hızı: $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$.
- Uzamsal çözünürlük: $l = c\tau/2n_1 = 2 \text{ m}$.
- Dağınık sıcaklık algılamada ölçüm alınan nokta sayısı: $R = L/l = 1000 \text{ nokta}$.
- Brillouin güç değişiminin sıcaklık katsayısı: $K_T^P = 0,36 \pm 0,030 \text{ \%}/^\circ\text{K}$ [21,22].
- Işığın fiber içerisinde ilerleme hızı: $v_g = c/n_1 = 2 \times 10^8 \text{ m/s}$.
- Optik fiberin içerisinden meydana gelen akustik dalga hızı: $v_a = 5960 \text{ m/s}$.
- Foto elastik (Pockel) katsayısı: $p = 0,286$.
- Silika fiberin yoğunluğu: $\rho = 2330 \text{ kg/m}^3$.
- Optik fiberin fiktif (denge) sıcaklığı: $T_f = 1950 \text{ }^\circ\text{K}$ [18].

Tablo 1. Bazı malzemelerin 293 °K sıcaklığındaki tipik malzeme özellikleri (Typical material properties of various materials at 293 °K temperature)

Malzeme	Elastisite Modülü (E) (GPa)	Kayma Modülü (G) (GPa)	Poisson Oranı	Isıl Genleşme Katsayısı ($^\circ\text{K}$) ⁻¹	Elektriksel İletkenlik (Ωm) ⁻¹
Silika Fiber	72,98	32,10	0,165	$5,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-18}$
Cam	70	29,43	0,22	$9,0 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-12}$
XLPE yalıtkan	0,50	0,18	0,37	150×10^{-6}	$1,0 \times 10^{-15}$
Bakır	115	42,5	0,35	$16,2 \times 10^{-6}$	$5,85 \times 10^7$
Alüminyum	70	26	0,34	$23,8 \times 10^{-6}$	$2,95 \times 10^7$

- Fiktif sıcaklıkta silika fiberin izotermal sıkıştırılabilirlik katsayısı: $\beta_T = 7 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{N}$ [18].
- İletken ile algılayıcı optik fiber arasındaki sıcaklık farkı için sıcaklık düzeltme faktörü: $\Delta T = 32^\circ\text{C}$.

Model olarak seçilen optik fiber entegre edilmiş 89/154 kV YG kablosunun fotoğrafı Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Optik fiber entegre edilmiş 89/154 kV YG kablosu (An optical fiber integrated 89/154 kV power cable)

Algılayıcı fiber boyunca geriye saçılan işaretin Brillouin gücü değişimi P_B , (14) ile elde edilir [21].

$$P_B(z) = 0,5P_0\alpha_B S v_g e^{(-2\alpha_R z)} \quad (14)$$

Eşitlikte; P_0 lazerin pompaladığı işaretin maksimum gücünü, τ pompalanan işaretin darbe süresini, α_R ve α_B sırasıyla Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayılarını, S yakalama katsayısını, v_g fiberde ilerleyen ışığın grup hızını ve z mesafeyi ifade etmektedir. α_R ve α_B katsayıları (15) ile tanımlanabilir [18].

$$\alpha_R = (8\pi^3 n^8 p^2 k T_f [\beta_T - (\rho v_a^2)^{-1}]) / 3\lambda_0^4$$

$$\alpha_B = (8\pi^3 n^8 p^2 k T (\rho v_a^2)^{-1}) / 3\lambda_0^4 \quad (15)$$

Eşitlikte; n fiberin çekirdek kırılma indisini, p Pockel katsayısını, k Boltzman sabitini ($k = 1,38 \times 10^{-23} \text{J}/^\circ\text{K}$), T $^\circ\text{K}$ cinsinden fiberin sıcaklığını, T_f $^\circ\text{K}$ cinsinden fiberin fiktif sıcaklığını, β_T fiktif sıcaklıkta silika fiberin izotermal sıkıştırılabilirlik katsayısını, ρ silika fiberin yoğunluğunu, v_a akustik dalga hızını ve λ_0 fiber içerisine pompalanan ışığın dalga boyunu ifade etmektedir.

Brillouin saçılma mekanizmasını kullanan dağınk sıcaklık algılamada (DTS), kablo boyunca meydana gelen sıcaklık bilgileri, Brillouin gücü değişiminin sıcaklık bağımlılığı ifadesinden elde edilebilmektedir [22-24].

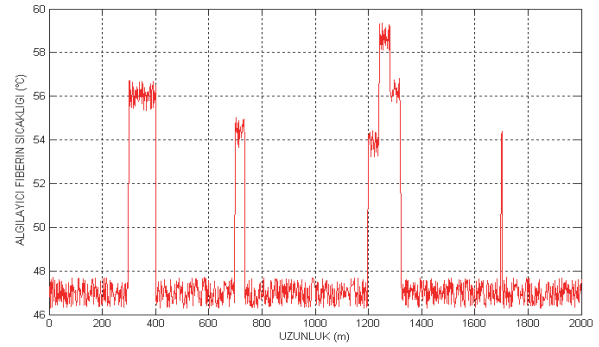
Brillouin gücü değişiminin sıcaklık ve gerginlik bağımlılığı (16) ile verilmektedir [21-23].

$$\Delta P_B = K_T^P \Delta T + K_E^P \Delta \epsilon \quad (16)$$

Eşitlikte; K_T^P Brillouin gücü değişiminin sıcaklık katsayısını, K_E^P Brillouin gücü değişiminin gerginlik katsayısını, ΔT ve $\Delta \epsilon$ sırasıyla, algılayıcı fiber boyunca meydana gelen sıcaklık ve içsel gerginlik değişimlerini ifade etmektedir.

320 $^\circ\text{K}$ - 332 $^\circ\text{K}$ aralığında, algılayıcı optik fiberde geriye saçılan işaretin Brillouin gücündeki değişim üzerinde sıcaklığın etkisi \sim % 93 seviyelerinde iken, sıcaklık kaynaklı içsel gerginlik oluşumlarının etkisi \sim % 7 seviyelerindedir. Bu nedenle, Brillouin gücü üzerindeki sıcaklık kaynaklı içsel gerginliklerin etkisi ihmal edilebilmektedir. Dolayısıyla, bu çalışmada, YG kablosu boyunca algılayıcı optik fiberdeki sıcaklıkdeğişimi verileri, (16) kullanılarak ve eşitlikteki $K_E^P \Delta \epsilon$ katkısı ihmal edilerek elde edilmiştir.

YG kablosu boyunca algılayıcı optik fiberin sıcaklık profili Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. YG kablosu boyunca algılayıcı optik fiberin sıcaklık profili (Temperature profile of the sensing optical fiber along the power cable)

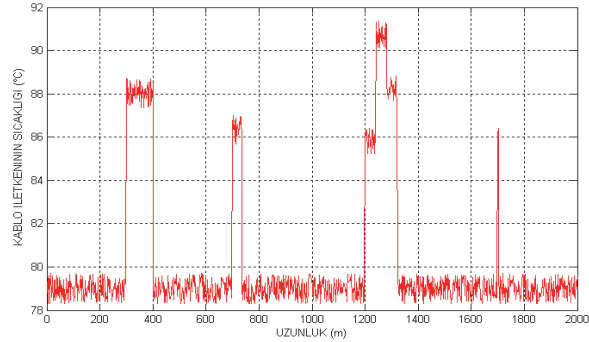
Optik fiberin sıcaklığı, 47 $^\circ\text{C}$ - 59 $^\circ\text{C}$ (320 $^\circ\text{K}$ - 332 $^\circ\text{K}$) aralığında değişim göstermektedir. En yüksek sıcaklık değerine, YG kablosunun 180 mmx7 mm ebatlı PVC bir boru içerisinden geçirildiği bölgede 59,34 $^\circ\text{C}$ ile ulaşılmıştır.

YG kablosunun bakır iletkeni ile ekran telleri arasındaki manyetik olmayan metal tüpler içerisine yerleştirilmiş algılayıcı optik fiber arasında 30 $^\circ\text{C}$ -35 $^\circ\text{C}$ sıcaklık farkı bulunmaktadır. Bu fark, genelde iletken, XLPE yalıtkan ve koruyucu kılıf malzemelerinin ısıl geçirgenlik katsayılarına, kablounun içinden geçtiği PVC borunun ve boru ile kablo arasındaki havanın ısıl transfer özelliklerine, kablounun serildiği toprağın nemlilik derecesine ve ısıl geçirgenliğine, dış ortamın mevsimsel sıcaklık değişimlerine bağlıdır [25, 26]. Şekil 4’te görülen, YG kablosu boyunca kablo iletkeninin sıcaklık profili benzetiminde, sıcaklık farkı (model alınan kablo için 32 $^\circ\text{C}$) *sıcaklık düzeltme faktörü* olarak algılayıcı fiberin sıcaklık değerine eklenmiştir.

Sıcaklık artışının maksimum olduğu bölgeler, ortalama 88 $^\circ\text{C}$ ile YG kablosunun 100 m uzunluklu PVC boru içerisinden geçirildiği 300m-400m arası ve ortalama 90,6 $^\circ\text{C}$ ile YG kablosunun ısıl geçirgenliği

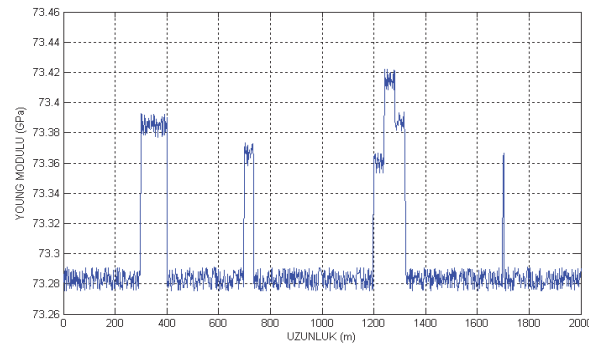
daha düşük olan ikinci bir PVC boru içerisinden geçirildiği 1240 m-1280 m aralığıdır. 300 m-400m aralığındaki en sıcak nokta 88,72 °C ile 300. metre iken, kablo üzerinde tespit edilen en sıcak nokta 91,34 °C sıcaklık değeri ile 1250. metredir. YG kablosunun, 700 m-735 m arasında 35 m uzunluklu PVC boru içerisinden geçirildiği bölgede ve 1700. metrede başka bir YG kablosu ile kesiştiği noktada, sıcaklık sırasıyla, 86,9 °C ve 86,4 °C değerlerine ulaşmıştır.

XLPE yalıtkanlı YG kablolarında maksimum çalışma sıcaklığı olan 90 °C değeri, Şekil 4'teki profilden de görüldüğü üzere sadece bir bölgede geçilmiştir.



Şekil 4. YG kablosu boyunca kablo iletkeninin sıcaklık profili (Temperature profile of the cable conductor along the power cable)

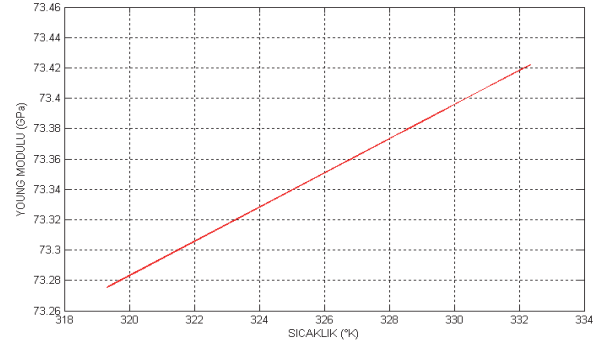
Kablo üzerinde tespit edilen sıcak noktaların doğrusal bir fonksiyonu olarak Young modülü değişimi Şekil 5'teki gibi elde edilmiştir. Young modülü, maksimum çalışma sıcaklığının aşıldığı 240 m-1280 m bölgesinde 73,42 GPa ile maksimum değerine ulaşmıştır.



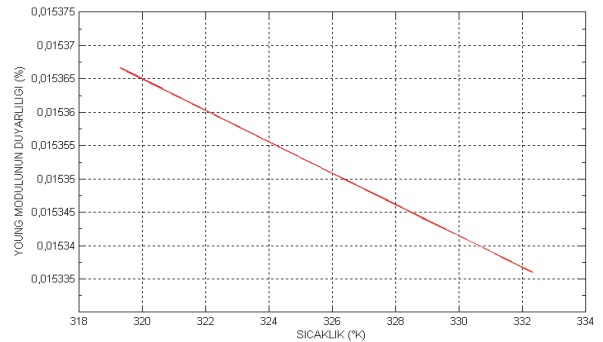
Şekil 5. Algılayıcı optik fiber boyunca sıcaklık nedeni ile meydana gelen Young modülü değişimi (Variation of the Young modulus caused by the temperature along the sensing optical fiber)

Şekil 6'da Young modülünün sıcaklık bağımlılığı ve sıcaklık duyarlılığı (sıcaklıkla yüzdesel değişimi) verilmiştir. Young modülü, sıcaklığın maksimum olduğu noktada en yüksek değerine ulaşırken, bu noktada sıcaklık duyarlılığı minimum değerine erişmiştir. Young modülü sıcaklık duyarlılığı, 320 °K, 326 °K ve 332 °K için sırasıyla, $15,365 \times 10^{-3}$, $15,351 \times 10^{-3}$ ve $15,337 \times 10^{-3}$ değerlerini

almıştır. YG kablosunun çalışma rejiminde (algılayıcı optik fiberin 320°K-332°K sıcaklık aralığında), Young modülünün sıcaklıkla değişimi $1,126 \times 10^{-2}$ GPa/°K ve sıcaklık duyarlılığı $- 2,33 \times 10^{-6}$ %/°K değerlerini almaktadır.

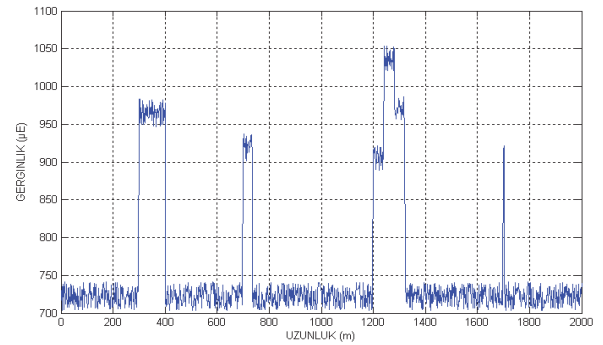


(a)



(b)

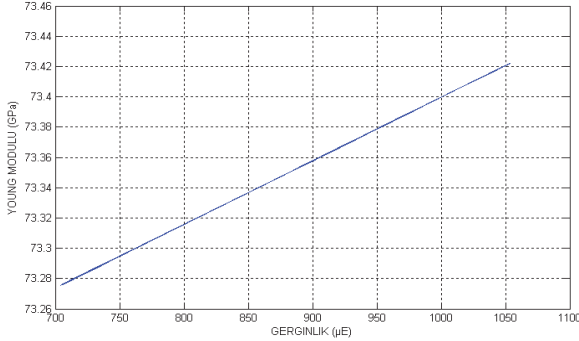
Şekil 6. a) Young modülünün sıcaklıkla değişimi (Variation of the Young modulus with temperature) ve b) Young modülünün sıcaklık duyarlılığı (sıcaklıkla yüzdesel değişimi) (temperature sensitivity of the Young modulus, i.e. percentile variation with temperature)



Şekil 7. Algılayıcı optik fiber boyunca sıcaklık kaynaklı gerginlik oluşumları (293 °K sıcaklık referans alınmıştır) (Thermal strain formations along the sensing optical fiber) (The reference temperature is 293 °K)

Şekil 7'de sıcaklığa bağlı olarak ortaya çıkan gerginlik oluşumlarının 2 km uzunluklu kablo boyunca değişimi gösterilmiştir. Gerginlik maksimum değerine 1054 µε ile 1240 m-1280 m arasında, YG kablosunun, 180 mmx7 mm ebatlı PVC boru içerisinden geçirildiği bölgede ulaşmıştır. İki YG kablosunun kesiştiği 1700. metrede ise, sıcaklık kaynaklı gerginlik değeri 921 µε olmuştur.

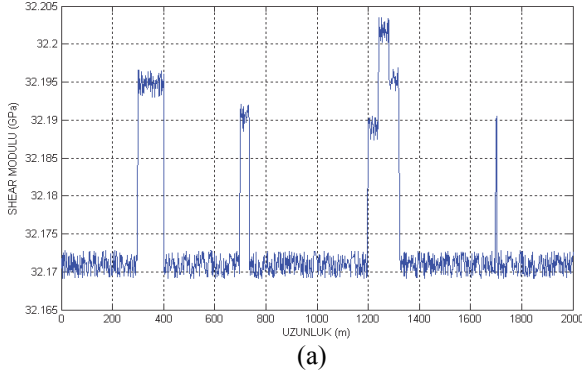
Young modülünün, YG kablosu boyunca meydana gelen ve optik fiber ile algılanan gerginlik oluşumlarına bağımlılığı doğrusaldır. Bu durum, Şekil 8'de verilen Young modülünün gerginlikle değişimi grafiğinden de görülmektedir.



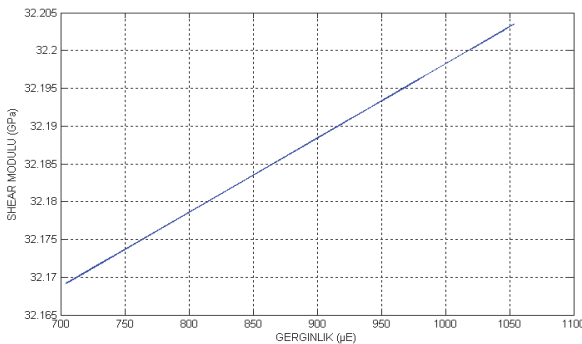
Şekil 8. Young modülünün gerginlikle değişimi (Variation of the Young modulus with strain)

Şekil 8'den anlaşılacağı üzere, Young modülündeki 1 GPa değişim için 2382 µε büyüklüğünde gerginlik değişimi gerekir. Diğer bir ifade ile Young modülünün gerginlikle değişimi $4,20 \times 10^{-4}$ GPa/µε şeklindedir.

2 km uzunluklu YG kablosu boyunca Shear modülünün değişimi ve Shear modülünün gerginlikle olan ilişkisi Şekil 9'da gösterilmiştir.



(a)



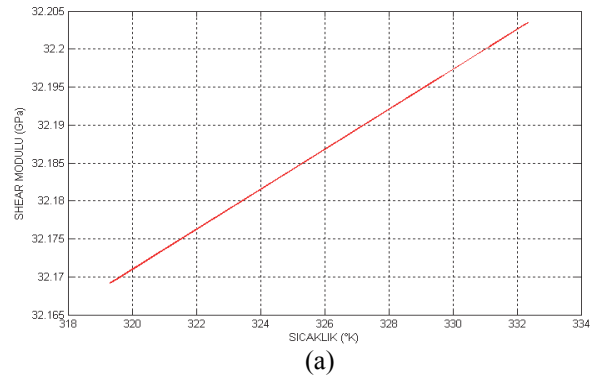
(b)

Şekil 9. a) Shear modülünün YG kablosu boyunca değişimi (Variation of the Shear modulus along the power cable) ve b) Shear modülünün gerginlikle değişimi (Variation of the Shear modulus with strain)

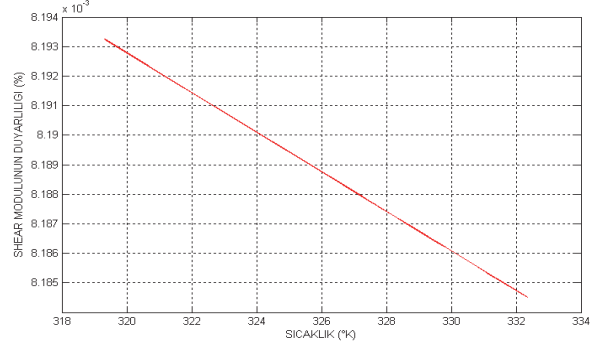
Shear modülü, gerginliğe doğrusal olarak bağlıdır. Maksimum değerini, 32,203 GPa ile 1250. metrede almıştır. Bu noktada gerginlik, 1054 µε ile en yüksek değerine ulaşmıştır. Şekil 9(b)'den, Shear modülünün gerginlikle değişiminin $9,82 \times 10^{-5}$ GPa/µε şeklinde olduğu görülmektedir.

Shear modülünün sıcaklıkla değişimi ve sıcaklık duyarlılığı (sıcaklıkla yüzdesel değişimi) Şekil 10'da gösterilmiştir. Shear modülünün sıcaklık duyarlılığı, sıcaklık artışı ile doğrusal olarak azalmaktadır. Shear modülü sıcaklık duyarlılığı, 320 °K, 326 °K ve 332 °K sıcaklıkları için, sırasıyla, $\% 8,193 \times 10^{-3}$, $\% 8,189 \times 10^{-3}$ ve $\% 8,185 \times 10^{-3}$ değerlerini almıştır. Şekil 10'daki veriler kullanılarak, Shear modülünün sıcaklıkla değişimi $2,636 \times 10^{-3}$ GPa/°K ve sıcaklık duyarlılığı ise $- 6,67 \times 10^{-7}$ %/°K olarak hesaplanmıştır.

Young modülünün ve Shear modülünün gerginlik duyarlılıkları Şekil 11'de verilmiştir. Young modülü ve Shear modülünün gerginlik duyarlılıkları, algılayıcı optik fiberin gerginlik değişimi aralığında (722 µε – 1044 µε), sırasıyla $- 3,25 \times 10^{-9}$ %/µε ve $- 9,35 \times 10^{-10}$ %/µε olarak elde edilmiştir. YG kablosunun 90 °C maksimum çalışma sıcaklığının aşıldığı bölgede, duyarlılıklar sırasıyla $\% 5,7154 \times 10^{-4}$ ve $\% 3,0502 \times 10^{-4}$ değerlerini almıştır.

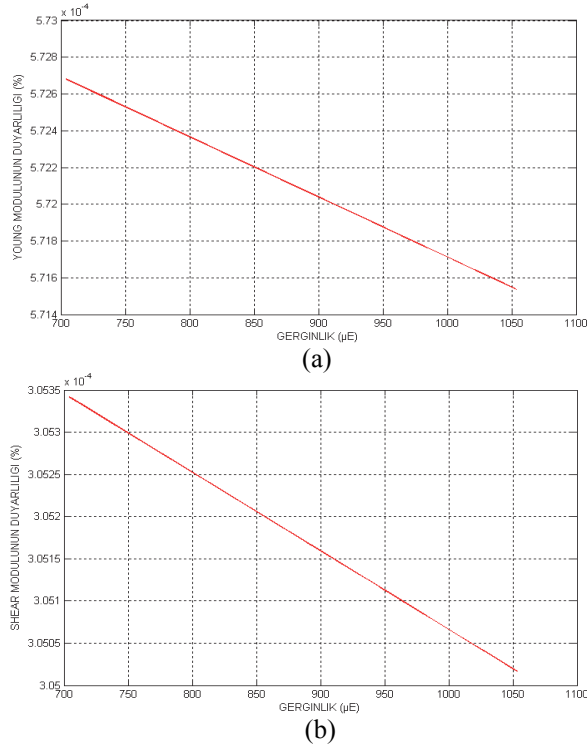


(a)



(b)

Şekil 10. a) Shear modülünün sıcaklıkla değişimi (Variation of the Shear modulus with temperature) ve b) Shear modülünün sıcaklık duyarlılığı (sıcaklıkla yüzdesel değişimi) (temperature sensitivity of the Shear modulus, i.e. percentile variation with temperature)



Şekil 11. a) Young modülünün gerginlik duyarlılığı (gerginlikle yüzdesel değişimi) (strain sensitivity of the Young modulus, i.e. percentile variation with strain) ve b) Shear modülünün gerginlik duyarlılığı (gerginlikle yüzdesel değişimi) (strain sensitivity of the Shear modulus, i.e. percentile variation with strain)

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, Brillouin güç değişimini esas alan dağınk algılama metodundan yararlanılarak, XLPE yalıtkanlı 89/154 kV YG kablosunda meydana gelen sıcaklık oluşumları ile ısıl etkiler neticesinde ortaya çıkan içsel gerginlikler incelenmiştir. Algılayıcı fiber boyunca meydana gelen sıcaklık değişimlerinin ve buna bağlı içsel gerginlik oluşumlarının belirlenebilmesi için, silika fiberin Young modülü değişimlerinden yararlanılmış ve fiber boyunca sıcaklık ve içsel gerginlik profilleri elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, algılayıcı fiberin sertliğini ve kırılgenliğini saptamak açısından önemli olan Shear modülünün de sıcaklık ve içsel gerginlik algılamada kullanılabilirliğini incelemek amacıyla benzetimler yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, algılayıcı optik fiberin 320 °K -332 °K çalışma sıcaklığı aralığında, Young modülü sıcaklık duyarlılığının ($-2,33 \times 10^{-6}\%/^{\circ}\text{K}$), Shear modülü sıcaklık duyarlılığından ($-6,67 \times 10^{-7}\%/^{\circ}\text{K}$) yaklaşık olarak 3,5 kat daha büyük olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, Young modülü gerginlik duyarlılığının $-3,25 \times 10^{-9}\%/\mu\epsilon$ ve Shear modülü gerginlik duyarlılığının ise $-9,35 \times 10^{-10}\%/\mu\epsilon$ seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir.

Uzun mesafeli yeraltı enerji nakil hatlarında, dağınk optik fiberli sensörlerle sıcaklığın ve gerginliğin eş zamanlı algılanmasında, gerek Young modülünden gerekse Shear modülünden yararlanılabilir. Young ve Shear modüllerindeki değişimlerin eşzamanlı sıcaklık ve gerginlik izlemede kullanımı, sıcaklık ve gerginliğin XLPE yalıtkanlı YG kablolarında zamanla ortaya çıkaracağı fiziksel deformasyonun, elektriksel kayıpların ve termo-mekanik etkilerin tespiti ve önlenmesinde faydalanılabilecek önemli bir yöntem olacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Onaran, K., **Malzeme Bilimi**, Bilim Teknik Yayınevi, 11. Baskı, İstanbul, 2009.
2. Sokkar, T.Z.N., Shams El-Din, M.A. ve El-Tawargy, A.S., "On Young's Modulus Profile Across Anisotropic Nonhomogeneous Polymeric Fibre Using Automatic Transverse Interferometric Method", **Optics and Lasers in Engineering**, 50 (9):1223-1229, 2012.
3. Heinhold, L., "Power Cables", **Power Cables and Their Application**, 3rd Edition, Part 1, Editor: Heinhold, L., Siemens Aktiengesellschaft, Berlin, Germany, 134-139, 1990.
4. Yılmaz, G., Karlık, S.E., "A Distributed Optical Fiber Sensor for Temperature Detection in Power Cables", **Sensors and Actuators A:Physical**, 125 (2): 148-155, 2006.
5. Culverhouse, D., Farahi, F., Pannell, C.N. ve Jackson, D.A., "Potential of Stimulated Brillouin Scattering as Sensing Mechanism for Distributed Temperature Sensors", **Electronics Letters**, 25 (14): 913-914, 1989.
6. Ghogomu, N.N. ve Everard, J.K.A., "Coherent Photoconductive Detection of Brillouin Scattering for Temperature Sensing", **Electronics Letters**, 31 (18): 1606-1607, 1995.
7. Bao, X., Dhliwayo, J., Heron, N., Webb, D.J. ve Jackson, D.A., "Experimental and Theoretical Studies on a Distributed Temperature Sensor Based on Brillouin Scattering", **Journal of Lightwave Technology**, 13 (7): 1340-1348, 1995.
8. Davis, M.A. ve Kersey, A.D., "Simultaneous Measurement of Temperature and Strain Using Fibre Bragg Gratings and Brillouin Scattering", **IEE Proceedings - Optoelectronics**, 144 (3): 151-155, 1997.
9. Lecoecue, V., Hathaway, M.W., Webb, D.J., Pannell, C.N. ve Jackson, D.A., "20-km Distributed Temperature Sensor Based on Spontaneous Brillouin Scattering", **IEEE Photonics Technology Letters**, 12 (10): 1367-1369, 2000.
10. Parker, T.R., Farhadiroushan, M., Feced, R., Handerek, V.A. ve Rogers, A.J., "Simultaneous Distributed Measurement of Strain and Temperature from Noise-Initiated Brillouin

- Scattering in Optical Fibers”, **IEEE Journal of Quantum Electronics**, 34 (4): 645-659, 1998.
11. Bernini, R., Minardo, A., Persiano, G.V., Vaccaro, A., Villacci, D. ve Zeni, L., “Dynamic Loading of Overhead Lines by Adaptive Learning Techniques and Distributed Temperature Sensing”, **IET Generation, Transmission & Distribution**, 1 (6): 912-919, 2007.
 12. Diaz, S., Mafang, S.F., Lopez-Amo, M. ve Thevenaz, L., “A High-Performance Optical Time-Domain Brillouin Distributed Fiber Sensor”, **IEEE Sensors Journal**, 8 (7): 1268-1272, 2008.
 13. Soto, M.A., Bolognini, G., Di Pasquale, F., “Enhanced Simultaneous Distributed Strain and Temperature Fiber Sensor Employing Spontaneous Brillouin Scattering and Optical Pulse Coding”, **IEEE Photonics Technology Letters**, 21 (7): 450-452, 2009.
 14. Zou, W., He, Z. ve Hotate, K., “Demonstration of Brillouin Distributed Discrimination of Strain and Temperature Using a Polarization-Maintaining Optical Fiber”, **IEEE Photonics Technology Letters**, 22 (8): 526-528, 2010.
 15. Wang, L. ve Shu, C., “Demonstration of Distributed Strain Sensing with the Use of Stimulated Brillouin Scattering-Based Slow Light”, **IEEE Photonics Journal**, 3 (6): 1164-1170, 2011.
 16. Angulo-Vinuesa, X., Martin-Lopez, S., Nuno, J., Corredera, P., Ania-Castanon, J.D., Thevenaz, L. ve Gonzalez-Herraez, M., “Raman-Assisted Brillouin Distributed Temperature Sensor Over 100 km Featuring 2 m Resolution and 1.2 °C Uncertainty”, **Journal of Lightwave Technology**, 30 (8): 1060-1065, 2012.
 17. Luo, J., Hao, Y., Ye, Q., Hao, Y. ve Li, L., “Development of Optical Fiber Sensors Based on Brillouin Scattering and FBG for On-Line Monitoring in Overhead Transmission Lines”, **Journal of Lightwave Technology**, 31 (10): 1559-1565, 2013.
 18. De Souza, K.R.C.P., **Fiber Optic Distributed Sensing Based on Spontaneous Brillouin Scattering**, PhD Dissertation, University of Southampton, 1999.
 19. Wang, W.H., “The Elastic Properties, Elastic Models and Elastic Perspectives of Metallic Glasses”, **Progress in Materials Science**, 57 (3): 487-656, 2012.
 20. Lu, Y., Li, C., Zhang, X. ve Yam, S., “Determination of Thermal Residual Strain in Cabled Optical Fiber with High Spatial Resolution by Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry”, **Optics and Lasers in Engineering**, 49 (9-10): 1111-1117, 2011.
 21. Alahbabi, M., **Distributed Optical Fiber Sensors Based on the Coherent Detection of Spontaneous Brillouin Scattering**, PhD Dissertation, University of Southampton, 2005.
 22. Shang-hui, X., Li, L., “Signal Processing on Brillouin Scattering Based Distributed Fibre Sensors”, **Symposium on Photonics and Optoelectronics SOPO 2009**, Wuhan, China, 1-4, 14-16 August 2009.
 23. Günday, A., Yılmaz, G. ve Karlık, S.E., “Optik Fiberli Dağınık Algılama Yöntemiyle Enerji Kablosunda Sıcaklık ve Geriliminin Algılanması”, **Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 12 (2): 43-52, 2007.
 24. Günday, A., Yılmaz, G. ve Karlık, S.E., “Spontaneous Raman Power and Brillouin Frequency Shift Method Based Distributed Temperature and Strain Detection in Power Cables”, **5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering ELECO 2007**, Bursa, Turkey, 326-330, 5-9 December 2007.
 25. Aras, F., Oysu, C., “Thermal Analysis of 154 kV Underground Cable Joint Using Finite Element Method”, **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, 22 (3): 281-286, 2007.
 26. Ichino, T., Suzuki, T., Wada, T. ve Sadahiro, T., “Measurement of Conductor Temperature of Power Cable by Optical Fiber Sensor”, **7th International Conference on Dielectric Materials Measurements & Applications**, University of Bath, UK., 303-306, 23-26 September 1996.

