

OPTİK FİBERLİ DAĞINIK ALGILAMA YÖNTEMİYLE ENERJİ KABLOSUNDA SICAKLIK VE GERGİNLİĞİN ALGILANMASI

*Abdurrahman GÜNDAY**

*Güneş YILMAZ**

*Sait Eser KARLIK**

Özet: XLPE (çapraz bağlı polietilen) yalıtkanlı yüksek gerilim kablolarında, kablo yalıtkanı, çalışma esnasında elektriksel, ısı ve mekanik etkilere maruz kalır. Kablo yalıtkanının maruz kaldığı önemli etkilerden biri maksimum işletme sıcaklığı, diğeri de yalıtkan üzerinde meydana gelen gerginliktir. Bu çalışmada, 1550 nm'de tek modlu optik fiber kullanılarak 380 kV yüksek gerilim kablosunda kablo boyunca sıcaklık ve gerginlik algılama benzetimleri yapılmıştır. Kablo boyunca sıcaklık verilerine ulaşabilmek için, Raman saçılmasını baz alan dağınık sıcaklık algılama yöntemi kullanılmıştır. Kablo boyunca gerginlik verilerinin elde edilebilmesi için de, geri saçılan işaretin Brillouin frekans kayması bilgisinden faydalanılmıştır. Kablo ek yerleri, kesişim noktaları ve boru içinden geçme gibi benzetim koşulları altında ve Matlab 6.5 programı kullanılarak 5 km uzunluklu kablo boyunca sıcaklık ve gerginlik profilleri 1.5 m uzamsal çözünürlükte, ~ 1.25 °C sıcaklık çözünürlüğü ve ~ 50 $\mu\epsilon$ gerginlik çözünürlüğü ile elde edilmiştir. Ayrıca, kablo boyunca Brillouin frekans kayması ve Brillouin güç değişimi profillerinden faydalanılarak, frekans kayması üzerindeki etkin değer (RMS) gürültüsü ~ 1.20 MHz ve güç değişimi üzerindeki RMS gürültüsü \sim % 0.45 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dağınık Algılama, Optik Fiber, Sıcaklık, Gerginlik, Enerji Kablosu.

Temperature and Strain Sensing by the Method of Optical Fiber Distributed Sensing in Power Cable

Abstract: The cable insulation is exposed to electrical, thermal and mechanical effects during operation in XLPE insulated underground power cables. One of the important effects that the cable insulation is exposed is the maximum operation temperature and the other is the strain occurred on the insulation. In this study; temperature and strain sensing simulations have been performed along the 380 kV power cable by using a 1550 nm single mode fiber. Distributed temperature sensing method based on Raman scattering has been used to obtain temperature data along the cable. In order to obtain strain data along the cable, Brillouin frequency shift information of the back scattered signal has been utilized. Under the existence of simulation conditions such as cable connection points, cross-connection points and passing through ducts, temperature and strain profiles have been obtained along a 5 km cable with a spatial resolution of 1.5 m, a temperature resolution of ~ 1.25 °C and a strain resolution of ~ 50 $\mu\epsilon$ by using Matlab 6.5. Furthermore, RMS noises detected on frequency shift and Brillouin power change have been computed as ~ 1.20 MHz and as ~ 0.45 % respectively by taking advantage of Brillouin frequency shift and the Brillouin power change profiles along the cable.

Key Words: Distributed Sensing, Optical Fiber, Temperature, Strain, Power Cable.

1. GİRİŞ

Enerji kablolarıyla iletilebilecek maksimum güç, yalıtkanındaki dielektrik kayıpların ve iletken akımının belirlediği çalışma sıcaklığıyla sınırlandırılmaktadır. XLPE (çapraz bağlı polietilen) yalıtkanlı kablolarda, yalıtkanı korumak için iletkenin yüzey sıcaklığının maksimum 90 °C olarak sınırlandırılması gerekmektedir. Yalıtkan ömrünü etkileyen diğeri bir faktör gerginliktir. Kablonun gerilmesi veya gerginliğe maruz kalması, XLPE yalıtkanının yaşlanması, yırtılmasına ve kopmasına neden olabilir. Bu yüzden, kablo üzerinde gerek sıcaklık gerekse gerginlik oluşumlarının yüksek çözünürlükte ve yüksek doğrulukta algılanması çok önemlidir. Bu amaçla geliştirilmiş yöntemler ve bu yöntemler doğrultusunda çalışan algılama sistemleri mevcuttur. Geleneksel algılamada, her bir algılama noktası için bir ısı çifti (termokuplör) veya

* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa.

ısı direnç probun kullanıldığı ve pahalı bir yöntem olan klasik noktasal sıcaklık algılama yönteminin yanı sıra, sıcaklık bilgisinin % 80-90 oranında doğrulukla elde edilebildiği sonlu elemanlar yöntemi gibi matematiksel modeller de kullanılmaktadır (Nakamura ve diğ., 1992, Garrido ve diğ., 2003). Optik fiberlerin karakteristik özellikleri nedeniyle algılayıcı olarak kullanılabilirdiği ve tek bir algılayıcı ile binlerce noktadan algılamanın yapılabildiği “dağınık algılama” yöntemi, kablo yalıtkanının maruz kaldığı etkilerin tespiti için geleneksel algılamaya göre daha avantajlıdır (Yılmaz ve Karlık, 2006). Ayrıca, optik fiberin, elektriksel ve kimyasal açıdan risk taşıyan ortamlarda güvenilirlik, elektromanyetik girişime karşı bağışıklık, aşınmalara ve korozyona karşı yüksek direnç gibi özellikleri algılama sisteminin güvenilirliğini de arttırmaktadır.

Dağınık algılamada, sıcaklık ve gerginlik bilgilerinin algılanması için spontane Raman ve Brillouin frekans kayması tekniği, Brillouin frekans tepeleri tekniği, Brillouin frekans kayması ve güç değişimi tekniği gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır (Alahbabi, 2005, Günday, 2007).

XLPE yalıtkanlı yüksek gerilim yeraltı kablosu üzerinde oluşan sıcaklık ve gerginliğin algılanması konusunda literatürde bazı çalışmalar bulunmaktadır. Kee ve diğ. (2001), Brillouin saçılmasını kullanarak 15 km uzunluklu kabloda, sıcaklık ve gerginlik profillerini 10 m uzamsal, $\sim 4^\circ \text{C}$ sıcaklık ve $\sim 290 \mu\epsilon$ gerginlik çözünürlüğü ile elde etmişlerdir. Maughan ve diğ. (2001), spontane Brillouin geri saçılmanın koherent tespiti yöntemini kullanarak sıcaklık ve gerginlik profillerine, 30 km uzunluklu fiber kablo için 20 m uzamsal çözünürlükte, $\sim 4^\circ \text{C}$ sıcaklık ve $\sim 100 \mu\epsilon$ gerginlik çözünürlüğü ile ulaşmışlardır.

Bu çalışmada spontane Raman ve Brillouin frekans kayması tekniği kullanılmıştır. Raman gücündeki değişimden sıcaklık bilgisine ulaşılmış ve geri saçılan ışaretin Brillouin frekans kayması bilgisi ile sıcaklık bilgisinden gerginlik bilgisi elde edilmiştir. Bu yöntemle, 1550 nm'de çalışan tek modlu optik fiber kullanılarak 5 km uzunluklu 380 kV yüksek gerilim kablosunda kablo boyunca sıcaklık ve gerginlik profilleri, 1.5 m uzamsal çözünürlükte $\sim 1.25^\circ \text{C}$ sıcaklık çözünürlüğü ve $\sim 50 \mu\epsilon$ gerginlik çözünürlüğü ile elde edilmiştir.

2. DAĞINIK ALGILAMADA KULLANILAN SAÇILMA MEKANİZMALARI

Optik fiberli dağınık algılamada, fiber içerisine gönderilen ve geri saçılan ışığın şiddetindeki değişim, sıcaklık ve gerginliğin fonksiyonu olarak değerlendirilmektedir. Işığın saçılması, fiber içerisinde ilerleyen ışık fotonları ile geri saçılan ışık fotonlarının frekansları arasındaki ilişkiye göre, frekanslar aynı ise elastik saçılma, farklı ise elastik olmayan saçılma şeklinde sınıflandırılmaktadır. Rayleigh saçılması elastik saçılma, Raman ve Brillouin saçılmaları ise elastik olmayan saçılma örnekleridir.

2.1. Rayleigh ve Raman Saçılması

Rayleigh saçılması, fiberin üretimi sırasında oluşan malzeme yapısındaki değişimler ve malzeme yoğunluğundaki dalgalanmalar ile düzensizliklerden kaynaklanmaktadır. Bu değişimler, kırılma indisi dalgalanmalarına ve saçılan ışığın bir kısmının fiber içerisine pompalanan ışığa zıt yönde kılavuzlanmasına neden olmaktadır. Bu saçılmada, ilerleyen ışığın frekansına göre saçılan ışığın frekansında herhangi bir kayma olmaz.

Raman saçılması, fiber içerisine gönderilen ışık ile ortamın moleküler yapısında ortaya çıkan titreşimsel moleküler modlar arasındaki etkileşimin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Saçılma, fotonların frekansında azalma ve artmaya neden olur. Frekans azalan Raman saçılması bileşenleri Stokes çizgilerini, frekans artan bileşenler ise anti-Stokes çizgilerini oluşturur.

Rayleigh saçılmasının sıcaklık duyarlılığı düşük, Raman saçılmasının sıcaklık duyarlılığı ise yüksektir. Bu durum, dağınık sıcaklık algılamada Raman saçılmasının kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Raman gücünün sıcaklıkla değişimi (1)'de verilmektedir.

$$R(T) = \left[\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} \right]^4 e^{-\left(\frac{h\Delta\nu_r}{kT}\right)} \quad (1)$$

Burada λ_S ve λ_{AS} sırasıyla Raman Stokes ve anti-Stokes dalga boyları, h Planck sabiti, $\Delta\nu_r$ Raman anti-Stokes ve pompa işaretleri arasındaki frekans farkı, k Boltzmann sabiti ve T ise Kelvin olarak sıcaklık değerleridir. Raman gücünün sıcaklık duyarlılığı, (1) eşitliğinden (2)'deki gibi elde edilebilmektedir.

$$\frac{1}{R(T)} \frac{dR(T)}{dT} = \frac{h\Delta\nu_r}{kT^2} \quad (2)$$

Burada, $\Delta\nu_r = 13.5$ THz ve $T = 293$ °K değerleri için, sıcaklık değişimine bağlı olarak Raman gücünün yüzde değişimi yaklaşık % 0.80/°K olarak bulunur. Raman Stokes işaretinin darbe cevabı, (3) ile verilmektedir.

$$H_S(j\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} \{\Gamma_S \rho_S(z) \exp(-[\alpha_P(\lambda_0) + \alpha_P(\lambda_S)]z)\} \exp(-j\nu) dz \quad (3)$$

Bu ifadeye, ters hızlı Fourier dönüşümü (IFFT) uygulanarak, $h_S(z)$ (4) eşitliğindeki gibi yazılabilir.

$$h_S(z) = \text{Re}\{IFFT(H_S(j\nu))\} = \Gamma_S \rho_S(z) \exp(-[\alpha_P(\lambda_0) + \alpha_P(\lambda_S)]z) \quad (4)$$

Stokes darbe cevabında olduğu gibi, anti-Stokes darbe cevabı $H_{AS}(j\nu)$ ve $h_{AS}(z)$ sırasıyla (5) ve (6) ile ifade edilmektedir (Geng ve diğ., 2002).

$$H_{AS}(j\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} \{\Gamma_{AS} \rho_{AS}(z) \exp(-[\alpha_P(\lambda_0) + \alpha_P(\lambda_{AS})]z)\} \exp(-j\nu) dz \quad (5)$$

$$h_{AS}(z) = \text{Re}\{IFFT(H_{AS}(j\nu))\} = \Gamma_{AS} \rho_{AS}(z) \exp(-[\alpha_P(\lambda_0) + \alpha_P(\lambda_{AS})]z) \quad (6)$$

(3)-(6)'da, Γ_S ve Γ_{AS} sırasıyla Stokes ve anti-Stokes yakalama katsayılarını, ρ_S ve ρ_{AS} sırasıyla Stokes ve anti-Stokes bantları için Bose-Einstein faktörlerini, $\alpha_P(\lambda_0)$ lazer darbe işaretine ait (λ_0 dalgaboyunda) zayıflama katsayısını, $\alpha_P(\lambda_S)$ ve $\alpha_P(\lambda_{AS})$ sırasıyla Stokes ve anti-Stokes dalgaboylarındaki güç zayıflama katsayılarını ifade etmektedir.

(4) eşitliğinin (6) eşitliğine oranından (7) eşitliği elde edilir.

$$\frac{h_S(z)}{h_{AS}(z)} = \frac{\Gamma_S \rho_S(z)}{\Gamma_{AS} \rho_{AS}(z)} \exp(-[\alpha_P(\lambda_S) - \alpha_P(\lambda_{AS})]z) \quad (7)$$

(7) düzenlenerek Stokes ve anti-Stokes darbe cevaplarının oranı, (8)'de verildiği gibi elde edilir (Geng ve diğ., 2002).

$$\frac{h_S(z)}{h_{AS}(z)} = \frac{\Gamma_S}{\Gamma_{AS}} \exp\left(\frac{\Delta E}{kT(z)}\right) \exp(-[\alpha_P(\lambda_S) - \alpha_P(\lambda_{AS})]z) \quad (8)$$

Burada, ΔE Raman saçılması sonucu oluşan moleküler enerji durumları arasındaki enerji farkını, k Boltzmann sabitini, $T(z)$ mesafeye bağlı olarak fiberin sıcaklığını ifade etmektedir.

Sıcaklık değişimi, (8) eşitliği düzenlenerek (9)'daki gibi elde edilir.

$$T(z) = \frac{\Delta E}{k \ln\left\{\left(\frac{h_S(z)}{h_{AS}(z)}\right) \left(\frac{\Gamma_{AS}}{\Gamma_S}\right) \exp([\alpha_P(\lambda_S) - \alpha_P(\lambda_{AS})]z)\right\}} \quad (9)$$

(9) eşitliği, gerekli düzenlemeler ile (10) biçimini alır.

$$T(z) = \frac{\Delta E}{k \ln\left[\frac{h_S(t)}{h_{AS}(t)} \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}}\right)^4 \cdot \exp(\Delta\alpha_P \cdot z)\right]} \quad (10)$$

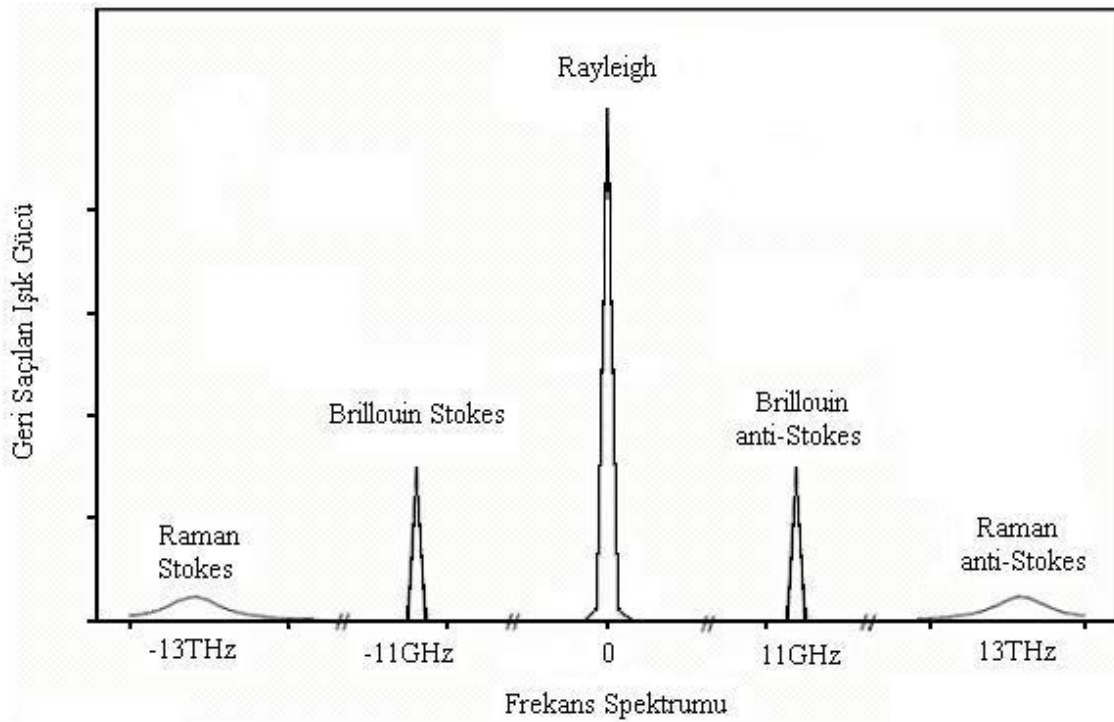
Burada, $h_S(t)$ ve $h_{AS}(t)$ sırasıyla zamana bağlı Stokes ve anti-Stokes darbe cevaplarıdır, $\Delta\alpha_P$ tek modlu fiberler için Neper cinsinden diferansiyel zayıflama katsayısı olup değeri 1.3×10^{-6} 'dır (Farahani ve Gogolla, 1999).

2.2. Brillouin Saçılması

Brillouin saçılması, fiber içerisinde ilerleyen ışık dalgası ile ısı olarak meydana gelen spontane akustik dalgaların etkileşiminin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Brillouin saçılmasında, ilerleyen ışık fotonları ile geri saçılan fotonlar arasında (11) ile verilen bir frekans kayması meydana gelir (De Souza, 1999).

$$\nu_b = \frac{2n}{\lambda_p} \nu_a \left(\sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (11)$$

Burada; n optik fiberin kırılma indisi, ν_b Brillouin frekans kayması, ν_a akustik frekans, λ_p pompalanan ışığın dalga boyu ve θ saçılma açısıdır. Akustik dalğanın hızı, optik fiberin sıcaklığına ve maruz kaldığı gerilmeye bağlı olduğu için, tespit edilen frekans kayması, her iki parametre hakkında bilgi vermektedir. Rayleigh, Raman ve Brillouin saçılmalarına ait frekans spektrumu Şekil 1'de verilmiştir (De Souza, 1999).



Şekil 1:

1550 nm silika bazlı fiberde Rayleigh, Brillouin ve Raman saçılmaları frekans spektrumu.

3. ALGILAYICI PERFORMANSINI BELİRLEYEN PARAMETRELER

Dağınık sıcaklık ve gerginlik algılamada kullanılan ve algılama sisteminin performansını belirleyen parametreler şunlardır:

- **Fiber Uzunluğu (Uzamsal Aralık) :** Uzamsal aralık, istenilen performans kriterlerinin sağlandığı maksimum fiber uzunluğu şeklinde tanımlanabilir. Fiberin her iki yöndeki toplam kaybı ile belirlenir. Bu belirlemede, sistemdeki bağlantı elemanları ve problemler de dikkate alınmalıdır.
- **Uzamsal Çözünürlük ve Örnekleme Aralığı:** Uzamsal çözünürlük, sıcaklık-mesafe grafiğinde sıcaklık değişiminin % 10'u ile % 90'ı arasındaki uzaklıktır. Algılayıcının bölgesel sıcaklık değişimine verdiği cevap bu parametre yardımıyla belirlenir. (12) ile ifade edilmektedir (Yılmaz ve Karlık, 2006).

$$\Delta z = \frac{c \cdot \tau}{2n} \quad (12)$$

Burada, c ışığın boşluktaki hızı, τ darbe süresi ve n fiberin kırılma indisidir. Örnekleme aralığı, iki saçılma noktası arasındaki ölçülebilir en küçük mesafe olup fiber algılayıcıdaki toplam ölçüm noktası sayısını belirler.

- **Sıcaklık ve Gerginlik Çözünürlüğü:** İki sıcaklık/gerginlik değeri arasında algılama sisteminin yorumlayabildiği minimum farktır. Sırasıyla (13) ve (14) ile ifade edilmektedir (Alahbabi, 2005).

$$\delta T = \frac{|K_{\varepsilon}^P \delta v| + |K_{\varepsilon}^V \delta P|}{|K_{\varepsilon}^V K_T^P - K_{\varepsilon}^P K_T^V|} \quad (13)$$

$$\delta \varepsilon = \frac{|K_T^P \delta v| + |K_T^V \delta P|}{|K_{\varepsilon}^V K_T^P - K_{\varepsilon}^P K_T^V|} \quad (14)$$

Eşitliklerde; δv ve δP sırasıyla Brillouin frekans kayması üzerindeki RMS gürültüsü ve güç değişimleri üzerindeki RMS gürültüsü, K_T^P ve K_{ε}^P sırasıyla Brillouin güç değişimi sıcaklık ve gerginlik katsayıları, K_T^V ve K_{ε}^V ise Brillouin frekans kayması sıcaklık ve gerginlik katsayılarıdır. Frekans ve güce bağlı olarak sıcaklık /gerginlik katsayıları Tablo I'de verilmiştir (Alahbabi, 2005).

Tablo I.
Brillouin işaretine ait frekans kayması ve güç değişimi sıcaklık ve gerginlik katsayıları

Katsayılar	Karşılık gelen değerler
K_T^V	$1.07 \pm 0.06 \text{ MHz}/(^{\circ}\text{C})$
K_{ε}^V	$0.048 \pm 0.004 \text{ MHz}(\mu\varepsilon)^{-1}$
K_T^P	$\% 0.36 \pm 0.003 /(^{\circ}\text{C})$
K_{ε}^P	$\% -9 \times 10^{-4} \pm 1 \times 10^{-5} /(\mu\varepsilon)^{-1}$

- **Etkin Değer (RMS) Gürültüsü:** Brillouin işareti frekans ve güç çizgileri üzerinde ortaya çıkan gürültünün her örnekleme noktasındaki değerinin karesel ortalamalarının karekökü ile belirlenir. (15) ile ifade edilmektedir (De Souza, 1999).

$$F_{RMS} = \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_m^2}{m}} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^m S_m^2}{m}} \quad (15)$$

Burada; S_1, S_2, \dots, S_m sırasıyla örnekleme noktalarında tespit edilen gürültü miktarları, m ise örnekleme sayısıdır.

- **Ölçüm Süresi:** Belirli bir çözünürlükteki sıcaklık profilini elde etmek için gereken zaman aralığına ölçüm süresi denir. Bu süre, geri-yansıyan işaretin algılanmasını ve işlenmesini içerir.
- **Isıl Cevap Süresi:** Kablo ve kılıf yapısının yanı sıra algılayıcı ve sıcaklığı ölçülecek cismin ısı bağlantı kalitesiyle de yakından ilgilidir. Optik fiberde ısıl cevap süresi $< 0.5 \text{ s}$ 'dir (Yılmaz ve Karlık, 2006).

4. BENZETİM KOŞULLARI VE GERÇEKLENMESİ

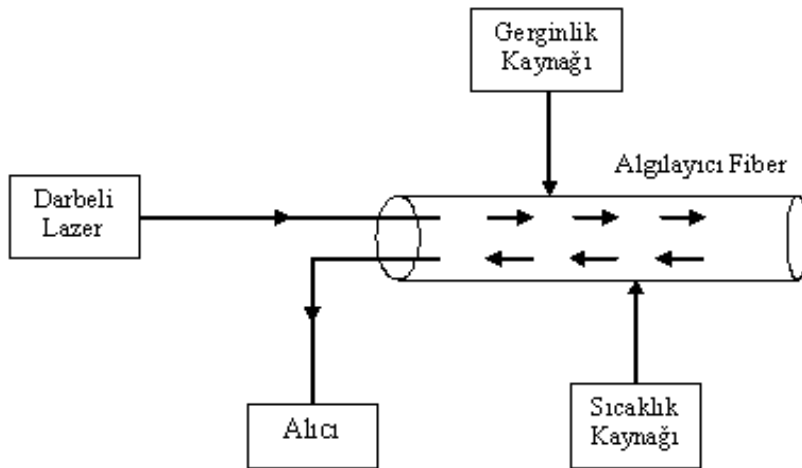
380 kV 5 km uzunluklu XLPE yalıtkanlı yüksek gerilim kablosu boyunca sıcaklık ve gerginlik profilini algılamak için, kablo siperine entegre edilmiş 1550 nm'de tek modlu optik fiber algılayıcı modelini temel alan benzetimler Matlab 6.5 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Benzetim koşulları aşağıda verilmiştir.

- Kablo boyunca her 500 m'de bir tekrarlanan kablo ek yeri vardır.
- Kablo, 1500-1525 m arasında 145x5 mm (iç çap x kalınlık) PVC (polivinil klorür) boru içerisinden geçmektedir.
- Kablo, 2200-2300 m arasında 145x5 mm PVC boru içerisinde ilerlerken, toprak kaymasından kaynaklanan boylamasına gerilmeler sonucunda kablo üzerinde gerginlik oluşmaktadır.
- Kablo, 3700-3800 m arasında 145x5 mm PVC boru içerisinden geçmekte ve yine bu aralıkta toprak kayması nedeniyle kablo üzerinde gerginlik oluşmaktadır.
- Kablo, 4600-4625 m ve 4675-4700 m arasında 145x5 mm ebatlı PVC boru içerisinden, 4625-4675 m arasında ise 180x7 mm ebatlı başka bir PVC boru içerisinden geçmekte ve 4650. metrede başka bir kablo ile kesişmektedir.

Benzetimlerde, kablonun çevresinde su, gaz boruları gibi ısıl oluşumlara neden olacak başka nesnelerin bulunmadığı kabul edilmiştir. Benzetimlerde başlangıç sıcaklığı 80° C (kablonun sürekli rejimde ve nominal akımda bir saat çalıştıktan sonra eriştiği sıcaklık değeri) ve başlangıç gerginliği 0 $\mu\epsilon$ olarak alınmıştır.

Şekil 2'de, benzetimlerde kullanılan optik fiberli algılayıcı modelinin basit gösterimi verilmiştir. Sıcaklık kaynakları, iletkenden geçen akım ve yalıtkanında oluşan dielektrik kayıplardan dolayı, boru içerisinden geçişlerde, kablo ek yerlerinde ve kablo bağlantı noktalarında oluşan sıcak noktaları ifade etmektedir.

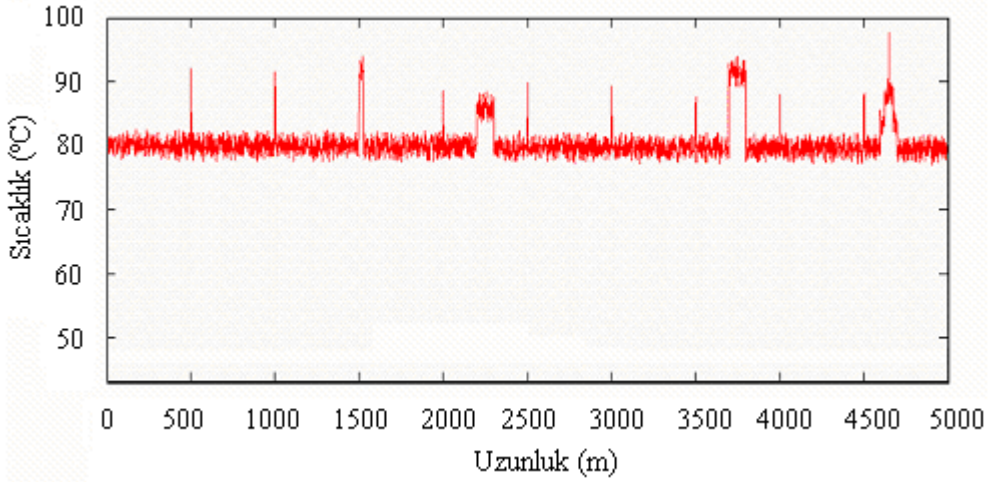
Yalıtkan üzerinde oluşan gerginliklerin temelde üç nedeni vardır: Birinci neden, üretim aşamasındaki püskürtme süreci sonrasında, yalıtkanın iç ve dış katmanlarının yalıtkanın merkez kısmına göre daha hızlı soğuması sonucunda merkez kısımda oluşan gerilmelerdir. İkinci neden, iletkenin ısıl genişleme katsayısının, yalıtkanın ısıl genişleme katsayısına göre daha yüksek olması nedeniyle, yüksek sıcaklıklarda iletkenin yalıtkanına göre daha fazla genişerek yalıtkanına doğru basınç yapması ve yalıtkanın içerisine girmesine neden olan termo-mekanik gerilmelerdir. Üçüncü neden ise, yalıtkan üzerinde dış etkenler (toprak kayması, basınç- kuvvet etkisi) sebebiyle oluşan kıvrılmalar, bükülmeler şeklinde ortaya çıkan enlemesine ve boylamasına gerilmelerdir.



Şekil 2:
Benzetimlerde kullanılan optik fiberli algılayıcı modeline ait basit gösterim.

Gerginlik oluşumunun en büyük nedeni, yalıtkan üzerindeki dış etken kaynaklı gerilmelerdir. Benzetimlerde bu tip gerginlikler esas alınmış olup Şekil 2'deki gerginlik kaynağı, toprak kayması sonucu toprağın ağırlığının kablo yalıtkanı üzerinde oluşturduğu basınçtır.

Benzetimlerde, lazer darbe süresi $\tau = 15$ ns ve fiber uzunluğu $L = 5$ km alındığından uzamsal çözünürlük $\Delta z = 1.5$ m ve kablo üzerinde ölçüm alınan nokta sayısı $L/\Delta z = 3333$ olmaktadır. Benzetimlerde, 1550 nm dalga boyunda tek-modlu fiber kullanılmıştır. Kablo boyunca sıcaklık profili, eşitlik (10) kullanılarak Şekil 3'te gösterildiği gibi elde edilmiştir.



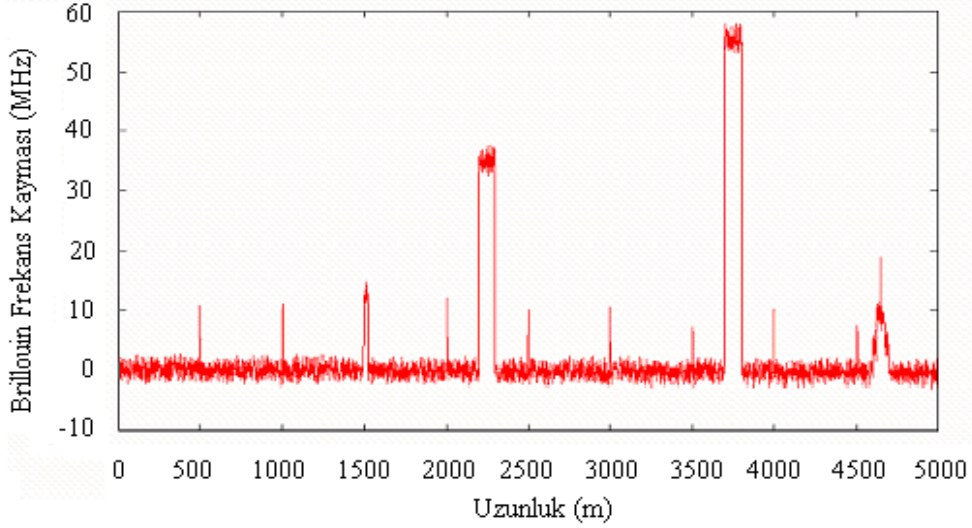
Şekil 3:

5 km uzunluklu 380 kV yüksek gerilim kablosu boyunca elde edilen sıcaklık profili.

Sıcaklık profili kablo boyunca incelendiğinde, ek yerlerinde, kesişim noktalarında ve boru içerisinde sıcaklık artışı nedeniyle tepeler olduğu görülmektedir. Kablodan akım geçerken, ek yerlerinde temas direncinden kaynaklanan ısı etkileşimleri artmakta ve buna bağlı olarak sıcaklık da artmaktadır. Kablonun içinden geçtiği PVC boruların çaplarındaki artış, içeride kalan hava katmanının kalınlığını da arttırmaktadır. Havanın ısı geçirgenliğinin düşük olması nedeniyle, daha kalın hava tabakası oluşumu, boru içerisinde hapsedilen ısının dışarı atılmasını güçleştirdiği için boru içerisinde sıcaklık artışına neden olmaktadır.

Bu 'sıcak noktalar' hariç ortalama sıcaklık 80 °C'dir. Kablo sıcaklığı, 500. ve 1000. metrelerdeki ek yerlerinde, 1500-1525 m, 3700-3800 m arasında ve 4650. metrede 90 °C kritik sıcaklık değerini aşmıştır. Kablo üzerindeki maksimum sıcaklık değerine, 98 °C olarak 4650. m.'de, kablonun 180x7 mm PVC boru içerisinden geçtiği ve başka bir kablo ile kesiştiği noktada ulaşılmıştır.

Kablo boyunca Brillouin frekans kayması değişimi eşitlik (11) kullanılarak Şekil 4'te gösterildiği gibi elde edilmiştir. Benzetimden görüldüğü gibi, Brillouin frekans kayması 2200-2300 m arasında ~ 35 MHz olarak 3700-3800 m arasında ise ~ 55 MHz olarak elde edilmiştir. Bu mesafelerde Brillouin frekansındaki kaymalara, sıcaklığın yanı sıra gerginliğin de büyük etkisi olmaktadır. 2200-2300 m arasındaki frekans kaymasının ~ 6 MHz'i sıcaklık, ~ 29 MHz'i gerginlik kaynaklıdır. 3700-3800 m arasındaki frekans kaymasının ise, ~ 12 MHz'i sıcaklık, ~ 43 MHz'i gerginlik kaynaklıdır. Sıcaklık değişiminin maksimum olduğu 4650. metrede elde edilen frekans kayması ~ 19 MHz'dir. Kablo ek yerlerinde, 1500-1525 m arasında ve 4600-4700 m arasındaki frekans kaymasının tamamı sıcaklık kaynaklıdır.

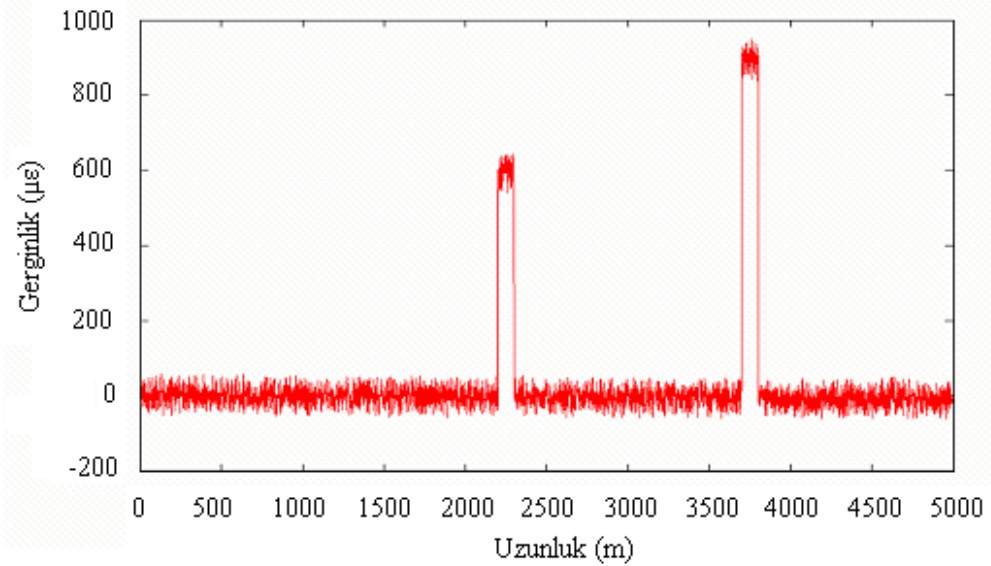


Şekil 4:

5 km uzunluklu 380 kV yüksek gerilim kablosu boyunca elde edilen Brillouin frekans kayması

Herhangi bir noktadaki sıcaklık bilgisi ve Brillouin frekans kayma miktarının bilinmesi ile gerginlik bilgisine ulaşmak mümkün olabilmektedir. Kablo boyunca gerginlik profili eşitlik (16) (Alahbabi, 2005) ile hesaplanmıştır.

$$\Delta\varepsilon(z) = \frac{\Delta v_B(z) - K_T^V \Delta T_R(z)}{K_\varepsilon^V} \quad (16)$$



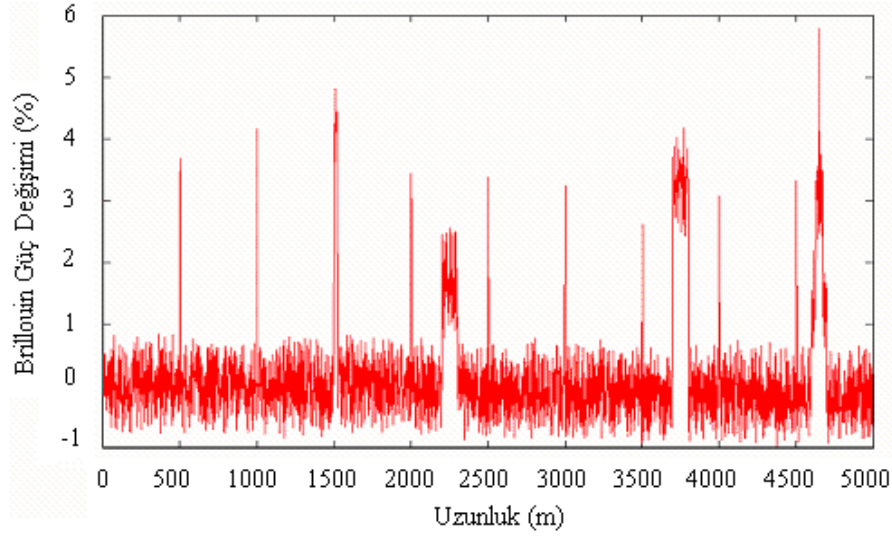
Şekil 5:

5 km uzunluklu 380 kV yüksek gerilim kablosu boyunca elde edilen gerginlik profili

Şekil 5'te yüksek gerilim kablosu için elde edilen gerginlik profili gösterilmiştir. Şekil 5'te, 2200-2300 m ve 3700-3800 m arasında, toprak kayması sonucu kablo yalıtkanı üzerinde oluşan boylamasına gerginlik görülmektedir. Kablo üzerinde diğer noktalarda gerginlik sıfır kabul edilmektedir. 2200-2300 m arasındaki gerginlik $\sim 595 \mu\varepsilon$ seviyesindedir. Maksimum gerginlik değeri ise $950 \mu\varepsilon$ olarak 3700-3800 m arasında elde edilmiştir.

Kablo boyunca Brillouin güç değişimi, gerginlik ve sıcaklık profillerindeki değerler eşitlik (17)'de (Alahbabi, 2005) yerine konularak elde edilmiştir. Brillouin güç değişimi grafiği Şekil 6'da verilmiştir.

$$\Delta P(z) = K_{\epsilon}^P \Delta \epsilon(z) + K_T^P \Delta T(z) \quad (17)$$



Şekil 6:
5 km uzunluklu 380 kV yüksek gerilim kablosundaki Brillouin güç değişimi (%).

Şekil 6'da, 3700-3800 m arasında gerginlik maksimum olmasına rağmen Brillouin güç değişimi maksimum değildir. Bunun nedeni; yalıtkan üzerinde oluşan gerginliğin, sıcaklığın aksine, Brillouin güç değişimi üzerinde azaltıcı etkisinin olmasıdır. Maksimum sıcaklığın elde edildiği 4650. metrede Brillouin güç değişimi ~ % 5.8'dir. 4650. m dışında en yüksek güç değişimi ~ % 4.8 ile sıcaklığın 90 °C'yi aştığı 1500-1525 m arasında elde edilmiştir. Bu aralıkta gerginlik sıfır olduğu için, Brillouin güç değişimi üzerinde azaltıcı bir etkisi yoktur.

Kablo boyunca çeşitli noktalarda Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kayması üzerinde oluşan RMS gürültü değerleri Tablo II'de verilmiştir. Bu değerlerin (13) ve (14) eşitliklerinde yerine konmasıyla bulunan sıcaklık ve gerginlik çözünürlükleri de Tablo II'de görülmektedir. Elde edilen sonuçlar 5 km uzunluklu yüksek gerilim kablosu boyunca sıcaklık ve gerginlik çözünürlüklerinin sırasıyla ~ 1.25 °C ve ~ 50 µε olduğunu göstermektedir.

Tablo II.
5 km uzunluklu kablo boyunca çeşitli noktalardaki RMS gürültü ve sıcaklık /gerginlik çözünürlüğü değerleri

Uzunluk (m)	Frekans kayması üzerinde oluşan RMS gürültü (MHz)	Güç değişimi üzerinde oluşan RMS gürültü (%)	Sıcaklık Çözünürlüğü (°C)	Gerginlik Çözünürlüğü (µε)
600	1.22	0.46	1.27	51
800	1.19	0.45	1.24	49.8
2200	1.24	0.44	1.22	50
3100	1.18	0.45	1.25	49
4900	1.17	0.47	1.29	51

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 5 km uzunluklu 380 kV XLPE yalıtkanlı yüksek gerilim yeraltı kablosunda sıcaklık ve gerginlik bilgileri, spontane Raman gücü ve Brillouin frekans kaymasını esas alan tekniğin kullanılması ile elde edilmiştir. Sıcaklık ve gerginlik algılamada, yüksek gerilim kablosunun siperine entegre edilmiş

tek modlu fiber modeli kullanılmıştır. Geri saçılan Raman işaretinin gücünden sıcaklık bilgisine, sıcaklık bilgisi ve saçılmanın olduğu noktadaki Brillouin frekans kayması bilgisi kullanılarak da gerginlik bilgisine ulaşılmıştır. Matlab 6.5 programı yardımıyla benzetimler gerçekleştirilmiş ve kablo boyunca sıcaklık ve gerginlik profilleri 1.5 m uzamsal çözünürlükte, ~ 1.25 °C sıcaklık çözünürlüğü ve ~ 50 $\mu\epsilon$ gerginlik çözünürlüğü ile elde edilmiştir.

Ayrıca, kablo boyunca Brillouin frekans kayması ve güç değişimi profilleri elde edilmiştir. Bu profillerdeki RMS gürültüleri analiz edilerek, kablo boyunca RMS gürültü değerleri sırasıyla ~ 1.20 MHz ve $\sim \% 0.45$ olarak bulunmuştur. Brillouin frekans kayması ve güç değişimleri üzerinde oluşan RMS gürültü miktarları, sıcaklık ve gerginlik çözünürlüklerini dolayısıyla algılama sisteminin performansını belirlediği için uygulamada dikkat edilmesi gereken noktalardır.

Elde edilen sonuçlar, dağılık algılama yöntemleri kullanılarak, yüksek gerilim kablolarında kablo boyunca sıcaklığın yanı sıra gerginlik bilgilerine yüksek çözünürlüklerde ulaşılabileceğini göstermektedir.

6. KAYNAKLAR

1. Alahbabi M. N. (2005) Distributed Optical Fiber Sensors Based on the Coherent Detection of Spontaneous Brillouin Scattering, Doktora Tezi, University of Southampton, Southampton, U.K.
2. Farahani, M. A., Gogolla, T. (1999) Spontaneous Raman Scattering in Optical Fibers with Modulated Probe Light for Distributed Temperature Raman Remote Sensing, J. Lightwave Technol., 17(8), 1379-1391.
3. Garrido, C., Otero, A. F., Cidras, J. (2003) Theoretical Model to Calculate Steady-state and Transient Ampacity and Temperature in Buried Cables, IEEE Trans. Power Delivery, 18(3), 667-678.
4. Geng, J., Xu, J., Li, Y., Wei, G., Guo, C. (2002) The Development of the Model and Arithmetic for the Fully Distributed Fiber Optic Sensor Based on Raman Optical-fiber Frequency-domain Reflectometry, Sensors and Actuators A: Physical, 101(1), 132-136.
5. Günday A. (2007) Enerji Kablosunda Oluşan Sıcaklık ve Gerilmeleri Optik Fiberli Algılayıcılarla Algılama Benzetimleri, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
6. Kee H. H., Lees G. P., Newson T. P. (2001) Simultaneous Independent Strain and Temperature Measurements Over 15 km using Spontaneous Brillouin Scattering, ISAP 2000, Glasgow, U. K., 1-9.
7. Maughan S. M., Kee H. H., Newson T. P. (2001) Simultaneous Distributed Fiber Temperature and Strain Sensor Using Microwave Coherent Detection of Spontaneous Brillouin Backscatter, Measurement Science and Technology, 12(7), 834-842.
8. Nakamura S., Morooka S., Kawasaki K. (1992) Conductor Temperature Monitoring System in Underground Power Transmission XLPE Cable Joints, IEEE Trans. Power Delivery, 7(4), 1688-1697.
9. Souza, P. D. (1999) Fiber Optic Distributed Sensing Based on Spontaneous Brillouin Scattering, Doktora Tezi, University of Southampton, Southampton, U. K.
10. Yılmaz G., Karlık S. E. (2006) A Distributed Optical Fiber Sensor for Temperature Detection in Power Cables, Sensors and Actuators A: Physical, 125(2), 148-155.