

# ADİBATİK VE İZOTERMAL ŞARTLAR ALTINDAKİ OPTİK FİBERDE POLARİZASYON MOD DISPERSİYONUNUN İNCELENMESİ

Sait Eser KARLIK<sup>1</sup>

Güneş YILMAZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü, 16059, Görükle, BURSA

<sup>2</sup> Türk Pirelli Kablo ve Sistemleri A.Ş., AR-GE Bölümü, 16941, Mudanya, BURSA

<sup>1</sup> e-mail: ekarlik@uludag.edu.tr

<sup>2</sup> e-mail: gunes.yilmaz@tr.pirelli.com

*Anahtar Sözcükler: PMD, Adiyabatik Rejim, İzotermal Rejim, Jones Matrisi, Optik Fiber*

## ÖZET

Polarizasyon Mod Dispersiyonu (PMD), yüksek hızlı haberleşme sistemlerinde band genişliğini sınırlayan temel faktörlerden biridir. Bu nedenle, çevresel koşulların PMD üzerindeki etkisinin bilinmesi büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, hem sıcaklığın sabit ve fiberdeki gerilmelerin kalıcı haldeki değerlerine erişmiş olduğu izotermal rejimde hem de sıcaklıktaki değişimlerin etkisiyle fiberdeki gerilmelerin zamanla değiştiği adiyabatik rejimde PMD'nin dalgaboyu ve sıcaklık bağımlılığı incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, her iki rejimde de PMD'nin belirli bir dalgaboyu bağımlılığı sergilediğini ancak izotermal koşullardaki bağımlılığın adiyabatik koşullardakinden daha güçlü olduğunu göstermektedir. Ayrıca, adiyabatik rejimdeki PMD dağılımı teorideki Maxwell dağılımına uyarken, izotermal rejimde Maxwell dağılımından belirgin sapmalar gözlemlenmiştir. İzotermal koşullar altında,  $\pm 19^\circ\text{C}$ 'lik sıcaklık duyarlılığı tespit edilmiştir. Çalışmanın adiyabatik rejimdeki sonuçları günlük sıcaklık değişimlerinin büyük olduğu ortamlara, izotermal rejimdeki sonuçları ise sıcaklığın yaklaşık olarak sabit kabul edilebileceği ortamlara (özellikle denizaltı kablo sistemlerine) uygulanabilir.

## 1. GİRİŞ

Optik fiberde iletim kapasitesini sınırlayan temel etken dispersiyondur. Dispersiyon nedeniyle oluşan darbe genişlemesi, iletim sisteminde semboller arası girişimin (ISI) meydana gelmesine ve bit hata oranının artmasına sebep olur. Araştırmacılar tarafından 1970'lerden beri bilinen bir dispersiyon çeşidi polarizasyon mod dispersiyonudur. O zamanın standartlarına göre "pratik uygulamalara belirgin bir etkisinin olmayacağı" düşünülen PMD, optik fiberli haberleşme sistemlerinin kanal bit hızlarının 10Gbit/s mertebesine ulaştığı, 40Gbit/s ve daha yüksek hızlı sistemler üzerindeki çalışmaların da devam ettiği günümüzde, 5Gbit/s'den yüksek optik iletim hızlarında, tek modlu fiberdeki darbe genişlemesinin

ve alıcıda elde edilen güç seviyesindeki azalmaların temel nedenidir. Bu nedenle, PMD'nin zaman, sıcaklık ve dalgaboyu gibi parametrelere bağımlılığının bilinmesi uygun iletim sisteminin tasarımı açısından çok önemlidir. Poole ve Wagner'in bu alandaki ilk çalışmasının ardından PMD'nin teorik ve deneysel temellerini geliştiren çok sayıda makale yayınlanmıştır [1-4]. PMD ile ilgili analitik modeller, optik fiberin birbirine bağlı çok sayıda küçük parçadan oluştuğunu ve her bir parçanın küçük değerinde bir PMD'ye sahip olduğunu kabul ederler. Bu durum, iletim hattı boyunca fiber parçaları arasındaki olası tüm kuplajları gözönüne alan toplamsal istatistikleri gündeme getirir [2,4]. Bu çalışmada amacımız, analitik modellere uygulanabilen toplamsal istatistikler ile gerçek optik iletim koşullarında oluşan istatistikleri karşılaştırmaktır.

Optik fiberlerin PMD davranışını izotermal ve adiyabatik olmak üzere iki farklı rejimde incelemek gerekir. İzotermal rejim, sıcaklığın sabit ve fiberdeki gerilmelerin kalıcı haldeki değerlerine erişmiş olduğu çalışma biçimidir. Adiyabatik rejim ise, sıcaklıktaki değişimlerin etkisiyle fiberdeki gerilmelerin zamanla değiştiği durumdur. Bu çalışmada, hem adiyabatik hem de izotermal koşullardaki PMD davranışı incelenmiştir.

İkinci bölümde, PMD ile ilgili temel kavramlar ve deneylerde kullanılan ölçme yöntemi açıklanmıştır. Üçüncü bölümde ise, adiyabatik ve izotermal rejimlerde elde edilen deneysel sonuçlar verilmiş, bu sonuçlardan yola çıkarak gerçek istatistikler ile teorik istatistikler karşılaştırılmış ve ortam koşullarının PMD üzerindeki etkisi yorumlanmıştır.

## 2. TEMEL KAVRAMLAR VE ÖLÇME YÖNTEMİ

Fiberin dairesel geometrisindeki bozulmalar ve kırılma indisinde anizotropi oluşturan iç gerilmeler PMD'ye katkıda bulunan iki ana faktördür. Diğer faktörler, kıvrılmalar, bükülmeler ve üretim süreci olarak sıralanabilir. Bu etmenler, bölgesel anlamda

çiftkırılmaya (birefringence) da sebebiyet verirler. Çiftkırılma, polarizasyon mod kuplajı ile de bağlantılıdır. Polarizasyon mod kuplajı, tek modlu fiberlerde sürekli ve rasgele biçimde meydana gelir. Sabit kuplaj koşulları altında iki polarizasyon modu oluşur. Bu modlar ortogonal olup polarizasyonun temel durumları (PSP) veya öz durumlar şeklinde adlandırılırlar. PMD'nin optik fiberdeki oluşumunu anlamak için, başlangıç olarak uzun bir fiberin homojen çiftkırılmalı kısa bir parçasını incelemek gerekir. Tek modlu fiber, birçok rastgele çiftkırılmalı elemanın oluşturduğu bir bütün şeklinde modellenebilir.

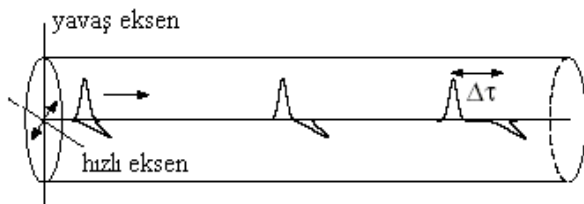
Optik fiberlerdeki çiftkırılma, kırılma indislerindeki farklılık biçiminde ifade edilebilir. Bu durumda, ortogonal polarizasyon modları için yayılım sabiti  $\beta$

$$\Delta\beta = \beta_s - \beta_f = \frac{\omega n_s}{c} - \frac{\omega n_f}{c} = \frac{\omega \Delta n}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \quad (1)$$

şekindedir. Burada  $\omega$  ışığın açısal frekansını,  $c$  boşluktaki ışık hızını,  $\Delta n = n_s - n_f > 0$  yavaş ve hızlı eksenler arasındaki kırılma indisi farkını,  $\lambda$  ise ışığın boşluktaki dalgaboyunu göstermektedir. Çiftkırılma, fiber boyunca ilerleyen ışığın polarizasyon durumunu (SOP) da değiştirebilir. Herhangi bir polarizasyon durumu, çiftkırılmadan etkilenmeyen PSP'lere (öz durumlar) ayrıştırılabilir. PSP'ler, homojen çiftkırılmalı fiber parçası için çiftkırılma eksenlerini (hızlı ve yavaş eksenler) oluştururlar. İki ortogonal mod arasında çiftkırılmadan kaynaklanan faz gecikmesi, polarizasyonun periyodik biçimde değişmesine sebep olur. Faz hızındaki farka, genellikle bölgesel grup hızındaki bir fark eşlik eder ve fiber boyunca yayılan darbelerde bölünmeler meydana gelir. Grup hızları arasındaki bu farka, diferansiyel grup gecikmesi (DGD)  $\Delta\tau$  denir. DGD, (1) formülündeki yayılım sabitlerinin frekansa göre türevinin alınması ile

$$\Delta\tau = \frac{L}{\Delta v_g} = \frac{d\Delta\beta}{d\omega} L = \left( \frac{\Delta n}{c} + \frac{\omega}{c} \frac{d\Delta n}{d\omega} \right) L \quad (2)$$

şeklinde elde edilir. Burada,  $\Delta v_g$  ortogonal modlar arasındaki grup hızı farkıdır.  $\Delta\tau/L$  değeri, kısa bir fiber parçasında ps/km ile ifade edilirken, uzun fiberlerde fiber uzunluğunun karekökü ile orantılıdır.

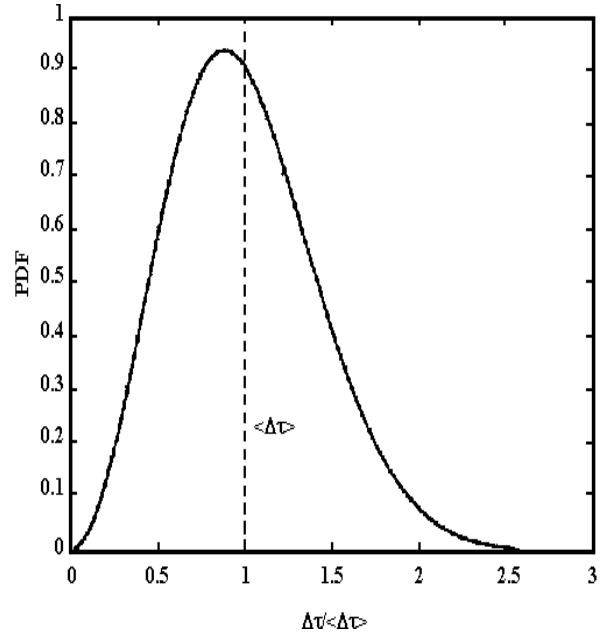


Şekil 1. Çiftkırılma nedeniyle oluşan darbe bölünmesi

Şekil 1'de çiftkırılma nedeniyle oluşan darbe bölünmesi görülmektedir. Çok sayıda rasgele çiftkırılmalı elemandan oluşan tek modlu bir fiberin  $\Delta\tau$  diferansiyel grup gecikmesi, teorik olarak Maxwell dağılımına sahiptir [2,4]. Yani, normalize DGD'nin olasılık yoğunluk fonksiyonu,  $x = \Delta\tau / \langle \Delta\tau \rangle$  olmak üzere,

$$f(x, \langle \Delta\tau \rangle) = \frac{32 \cdot x^2}{\pi^2 \langle \Delta\tau \rangle^3} \exp\left(-\frac{4 \cdot x^2}{\pi \langle \Delta\tau \rangle^2}\right) \quad (3)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu dağılım, Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Normalize diferansiyel grup gecikmesinin olasılık yoğunluk fonksiyonu

Maxwell dağılımı, yerel çiftkırılmaya ilgili istatistiklerin bir sonucu olup PDF'in kullanılan fiber modeline bağlı olduğunu gösterir. İstatistiksel dağılım fonksiyonunun fiziksel karşılığı, dalgaboyu, zaman ve çeşitli çevresel etkilerin fonksiyonu biçimindeki DGD dağılımıdır.

(3) formülündeki  $\langle \Delta\tau \rangle$ , ortalama diferansiyel grup gecikmesi olup (4) formülüyle hesaplanabilir.

$$\langle \Delta\tau \rangle = D_{PMD} \sqrt{L_{link}} \quad (4)$$

Burada,  $D_{PMD}$ , ps /  $\sqrt{\text{km}}$  birimli PMD parametresidir.

Doğrusal bir optik elemanın polarizasyona etkisi, matematiksel olarak  $2 \times 2$  boyutlu kompleks bir Jones matrisi (A) kullanılarak açıklanabilir. A matrisi, (5)'te verilen eşitliğe göre, giriş polarizasyon durumunu çıkış polarizasyon durumuna dönüştürür.

$$J_{\text{çıkış}} = A \cdot J_{\text{giriş}} \quad (5)$$

Polarizasyona bağlı kayıpların olmadığı çiftkırılmalı ortamda, frekansa bağlı Jones matrisi

$$A(\omega) = \begin{pmatrix} a(\omega) & b(\omega) \\ -b^*(\omega) & a^*(\omega) \end{pmatrix} \quad (6)$$

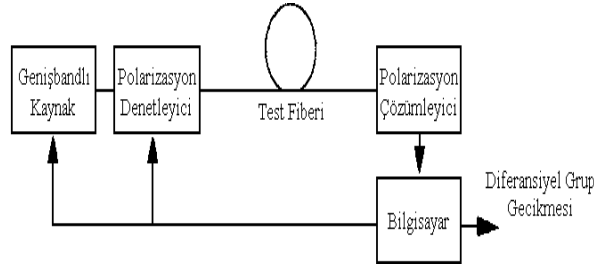
ile ifade edilir. Burada,  $a(\omega)$  ve  $b(\omega)$  ışığın açısal frekansının kompleks fonksiyonları,  $a^*$   $a$ 'nın kompleks eşleniği olup  $|a|^2 + |b|^2 = 1$  eşitliği mevcuttur.

Çıkış SOP'sinin dalgaboyuna göre ölçüldüğü Jones matrisi yönteminde (JMM) [5,6], farklı dalgaboylarında fiberin Jones matrisini hesaplamak için, önceden belirlenmiş giriş SOP'leri kümesi kullanılır. DGD, Jones matrisindeki bileşenlerin frekansa göre türevlerinden,

$$\Delta\tau(\omega) = 2\sqrt{|a'(\omega)|^2 + |b'(\omega)|^2} \quad (7)$$

formülüyle hesaplanır. Burada,  $a$  ve  $b$  (6) formülündeki Jones matrisi bileşenleri olup türevleri,  $a'(\omega) \approx [a(\omega) - a(\omega + \Delta\omega)] / \Delta\omega$  ve  $b'$  için de benzeri biçimde yaklaşık olarak hesaplanır.

Jones matrisi metodunu kullanan ölçme düzeneği Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Jones matrisi metodu ölçme düzeneği

Şekil 3'te görüldüğü gibi, ölçme düzeneğinde ayarlı bir genişbandlı kaynak (lazer), polarizasyon denetleyici ve polarizasyon çözümleyici kullanılır. Her dalgaboyunda polarizasyon denetleyicisi taranır ve Jones matrisi metodu kullanılarak matematiksel hesaplamalar yapılır. Böylece bütün dalgaboylarındaki diferansiyel grup gecikmeleri elde edilir.

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR

PMD, Şekil 3'teki ölçme düzeneği kullanılarak 1500nm aralığında (1510-1560nm) dalgaboyu ve zamanın fonksiyonu biçiminde ölçülmüştür. Fiber içindeki gerilmelerin kalıcı hal değerlerine ulaştığı ve sıcaklığın sabit tutulduğu izotermal rejimde farklı sıcaklık değerleri için ölçümler yapılmıştır. Ölçümlerin yapıldığı sıcaklık

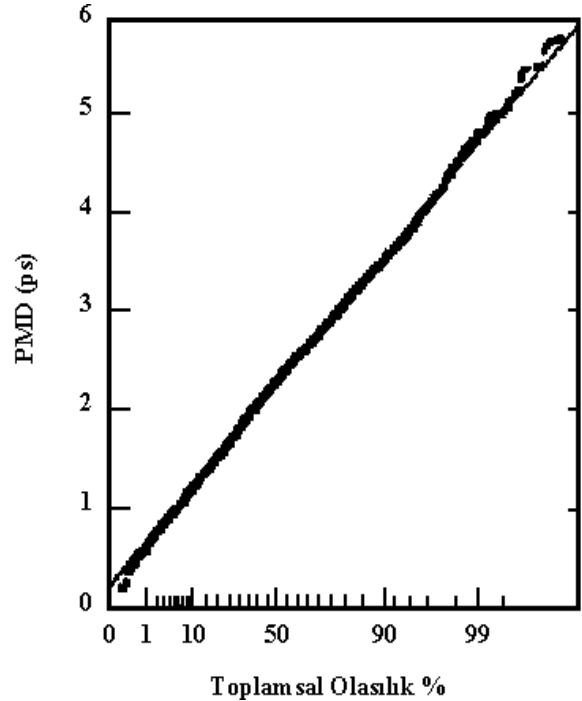
dereceleri  $10 \pm 0.25^\circ\text{C}$ ,  $25 \pm 1.25^\circ\text{C}$ ,  $48 \pm 0.5^\circ\text{C}$  ve  $50 \pm 0.5^\circ\text{C}$  şeklindedir. Adiabatik ölçümlerde, sıcaklık  $10^\circ\text{C}$ 'den  $58^\circ\text{C}$ 'ye  $4^\circ\text{C}/\text{h}$  hızla arttırılmıştır. Daha sonra sıcaklık  $10^\circ\text{C}$ 'ye düşürülmüş ve yeni bir döngüye başlamadan önce ortam sıcaklığı 6 saat boyunca sabit tutulmuştur. Ölçümlerde kullanılan fiberler, makaralara sarılı iki adet tek modlu standard fiberdir. Tablo 1'de bu fiberlerin karakteristikleri verilmiştir.

Tablo 1. Ölçümlerde kullanılan tek modlu fiberlerin karakteristikleri

Fiber	Ortalama PMD (ps)	PMD Katsayısı (ps / $\sqrt{\text{km}}$ )	Uzunluk (km)
A	0.6	0.13	20
B	2.4	0.54	20

### 3.1. ADİABATİK REJİM

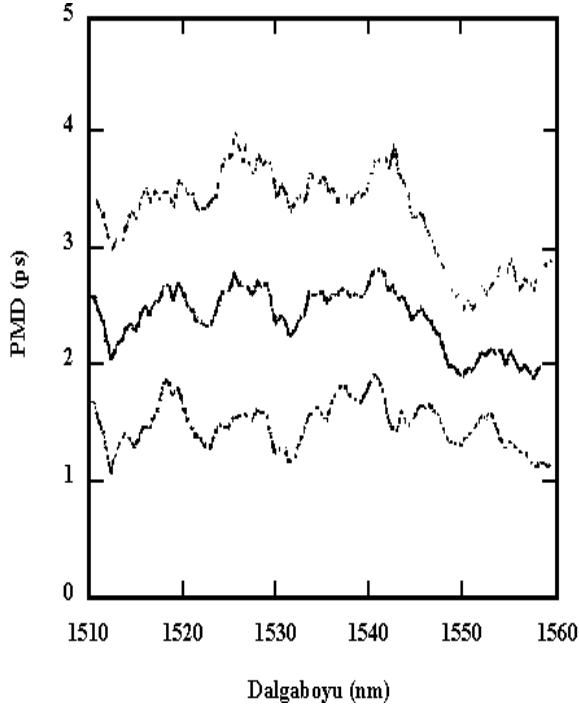
Adiabatik rejimde B fiberinde 4800 ölçüm sonucunda elde edilen PMD verileri Şekil 4'te görülmektedir. Dağılım grafiğinin ordinatı, Maxwell fonksiyonundan türetilen toplamsal olasılıktır.



Şekil 4. Adiabatik rejimde B fiberi için PMD dağılımı

Şekil 4'ten görüldüğü gibi, adiabatik şartlar altında B fiberi için elde edilen PMD dağılımı, teorideki Maxwell dağılımına uymaktadır. Ölçümlerde elde edilen ortalama ve standard sapma değerleri,

sırasıyla 2.35 ps ve 0.92 ps'dir. Standard sapmanın ortalama değere oranı 0.39 olup bu değer, teorik oran 0.422'ye epey yakındır.



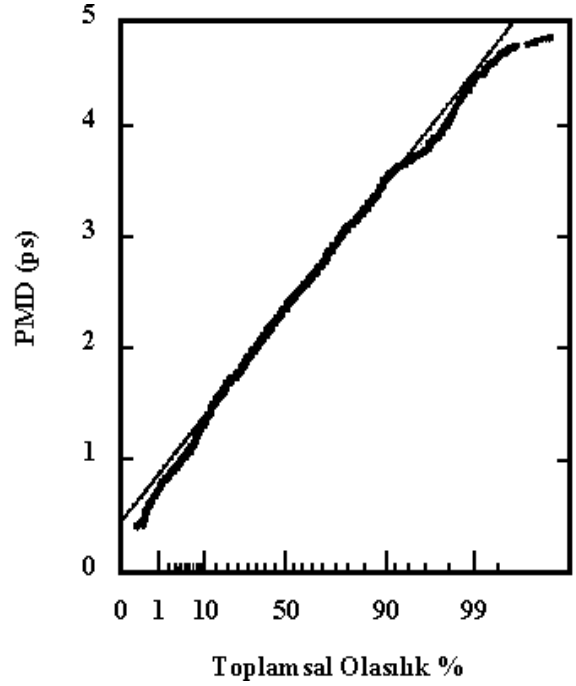
Şekil 5. Adiyatik rejimde B fiberi için PMD dalgaboyu spektrumu

Adiyatik rejimde PMD'nin dalgaboyuyla değişim grafiği Şekil 5'te verilmiştir. Bu grafikte, ortalama değer, ortalama değer + standard sapma ve ortalama değer - standard sapma eğrileri görülmektedir. Ortalama PMD'nin ve standard sapmanın ortalama değere oranının dalgaboyuyla az da olsa değiştiği açıktır.

Tablo 1'deki A fiberi için yapılan adiyatik PMD ölçümleri de benzer sonuçlar vermiştir.

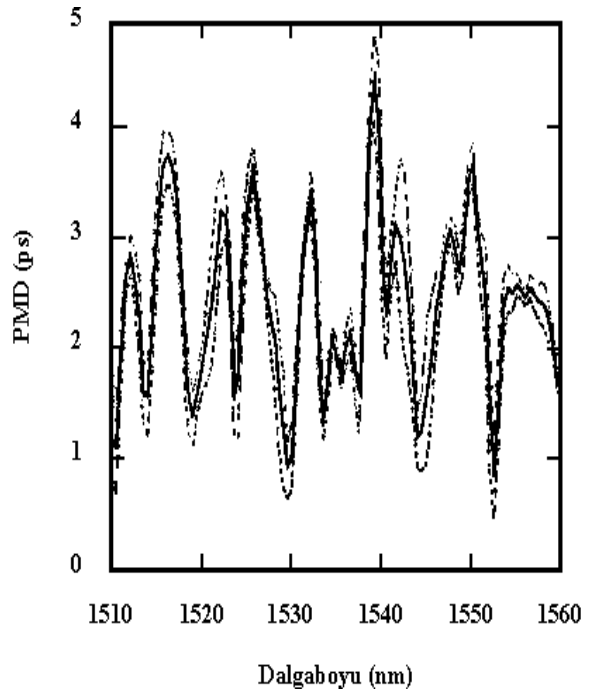
### 3.2. İZOTERMAL REJİM

Tablo 1'de verilen her iki fiber için çeşitli izotermal koşullar altında PMD ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da,  $25 \pm 1.25^\circ\text{C}$  ortam sıcaklığında B fiberinde elde edilen PMD dağılımı görülmektedir. Ölçümlerin yapıldığı dalgaboyu aralığı, adiyatik rejimde olduğu gibi, 1510-1560 nm aralığıdır. Ölçümler, 552 saatlik toplam test süresi boyunca her iki saatte bir tekrarlanmıştır. Şekil 4 ve Şekil 6'daki adiyatik ve izotermal PMD dağılımları karşılaştırılırsa; adiyatik dağılımın Maxwell fonksiyonuna uyduğu, izotermal dağılımın ise Maxwell fonksiyonundan sapmalar gösterdiği söylenebilir. Bu sapmalar, yüksek PMD değerlerinde daha belirgindir.



Şekil 6. İzotermal rejimde B fiberi için PMD dağılımı

Şekil 7'de,  $25^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki izotermal koşullar altında B fiberinin PMD dalgaboyu spektrumu verilmiştir.



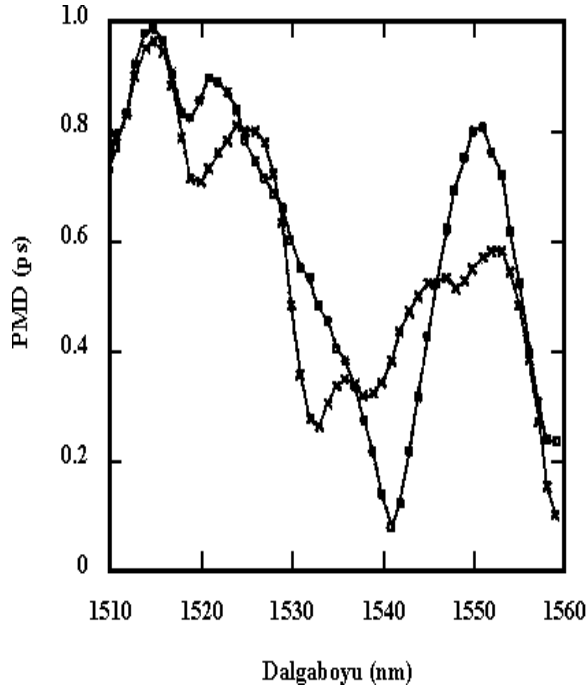
Şekil 7. İzotermal rejimde B fiberi için PMD dalgaboyu spektrumu

Görüldüğü gibi, izotermal rejimde ve sabit dalgaboylarında PMD standart sapması, ortalama değerinin küçük bir yüzdesidir. B fiberi için sabit dalgaboyunda standart sapmanın ortalama değere

oranı 0.15 olarak tespit edilmiştir. Bu oran, Maxwell dağılımından elde edilen teorik değerden (0.422) daha düşüktür. Bu nedenle, sabit dalgaboyu ve izotermal koşullar altında, zamanın fonksiyonu biçiminde çizilecek PMD dağılım grafiği Maxwell fonksiyonundan sapmalar gösterecektir. Ayrıca, izotermal koşullar altında ortalama PMD'nin dalgaboyuyla değişimi, adiabatik rejimdekinden daha büyüktür ve güçlü bir osilasyon davranışı göstermektedir.

B fiberindeki izotermal PMD diğer sıcaklık derecelerinde de incelenmiş ve benzer sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Sabit dalgaboyunda ortalama PMD'nin sıcaklık bağımlılığını elde edebilmek için izotermal sıcaklık artışı, PMD değişimlerinin monoton olmasına imkan sağlayacak şekilde küçük değerlerde tutulmalıdır. Tablo 1'deki A fiberinde, 48°C ve 50°C sıcaklıklarda gerçekleştirilen 72 saatlik deneyde elde edilen ortalama PMD değerleri Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8. 48°C (kare) ve 50°C (çarpı) sıcaklıkta A fiberinin PMD dalgaboyu spektrumu

Şekil 8'den anlaşılacağı gibi, izotermal şartlar altında PMD sıcaklığa önemli ölçüde bağımlıdır. Bu sıcaklık duyarlılığı,  $[1/\tau(\lambda)]\partial\tau(\lambda)/\partial T$  parametresi ile belirlenebilir. Burada,  $\tau(\lambda)$  sabit dalgaboyundaki PMD ve  $T$  sıcaklıktır. Şekil 8'deki veriler için, bu parametrenin tüm dalgaboyları üzerinden ortalaması sıfıra çok yakındır. Ancak, ortalama değerlerin etrafında, rms değeri %19/°C olan bir dağılım mevcuttur. Dolayısıyla  $0 \pm \%19/°C$ 'lik sıcaklık duyarlılığı bulunmaktadır. Tablo 1'deki fiberler arasında A fiberinin en düşük PMD değerlerine sahip olduğu

gözönüne alınırsa, B fiberinin daha güçlü bir sıcaklık duyarlılığına sahip olduğu kolayca anlaşılabilir.

## 4. SONUÇ

Bu çalışmamızda, optik fiberlerdeki PMD olayı adiabatik ve izotermal olmak üzere iki farklı rejimde incelenmiştir. Fiberin hızlı sıcaklık değişimlerine maruz bırakıldığı ve dolayısıyla fiber boyunca zamanla değişen gerilmelerin arttığı adiabatik rejimde, ölçümler sonucunda elde edilen PMD dağılımı teorideki Maxwell fonksiyonuyla uyumaktadır. Ortalama değer ve standard sapmanın ortalama değere oranı da teorik değerlere epey yakındır. Ayrıca, az da olsa belirli bir dalgaboyu bağımlılığı mevcuttur. Sıcaklığın sabit olduğu ve fiberdeki gerilmelerin kalıcı hal değerlerine ulaştığı izotermal rejimde ise, adiabatik rejime göre PMD'nin daha güçlü bir dalgaboyu bağımlılığı sergilediği tespit edilmiştir. Elde edilen PMD verilerinin dağılımı, teorideki Maxwell dağılımına tam olarak uymamaktadır. Özellikle yüksek PMD değerlerinde sapmalar oldukça belirgindir. Ortalama PMD değeri ve standard sapmanın ortalama değere oranı da teorik değerlerden daha düşüktür. Yapılan deneyler, PMD'nin çevre sıcaklığına duyarlı olduğunu da göstermiştir. Bu nedenle, sabit dalgaboyunda izotermal PMD'deki dalgalanmaların, ortam sıcaklığındaki değişimlerden kaynaklandığı söylenebilir. Dalgalanmanın miktarı ise, hem sıcaklıktaki değişimin büyüklüğüne hem de PMD'nin sıcaklık duyarlılığının derecesine bağlıdır.

Elde edilen veriler ışığında, PMD'nin sistem performansına etkisinin, fiberin içinde bulunduğu çevre koşullarına büyük ölçüde bağlı olduğu söylenebilir. Bu çalışmanın adiabatik rejimdeki sonuçları günlük sıcaklık değişimlerinin büyük olduğu ortamlara, izotermal rejimdeki sonuçları ise sıcaklığın yaklaşık olarak sabit kabul edilebileceği ortamlara (özellikle denizaltı kablo sistemlerine) uygulanabilir.

## KISALTMALAR

<b>DGD</b>	-	Differential Group Delay
<b>ISI</b>	-	Inter-symbol Interference
<b>JMM</b>	-	Jones Matrix Method
<b>PMD</b>	-	Polarization Mode Dispersion
<b>PSP</b>	-	Principal States of Polarization
<b>SOP</b>	-	State of Polarization

## KAYNAKLAR

[1] Poole C.D. ve Wagner R.E., "Phenomenological approach to polarization dispersion in long single-mode fibers", Electron. Lett., c.22, s.1029-1030, 1986.

[2] Andresciani D., Curti F., Matera F. ve Daino B., “Measurement of the group-delay difference between the principal states of polarization on a low-birefringence terrestrial fiber cable”, Optics Lett., c.12, s.844-846, 1987.

[3] Curti F., Daino B., DeMaris G. ve Matera F., “Statistical treatment of the evolution of the principal states of polarization in single-mode fibers”, J. Lightwave Tech., c.8, s.1162-1166, 1990.

[4] Poole C.D., Winters J.H. ve Nagel J.A., “Dynamical equation for polarization dispersion”, Optics Lett., c.16, s.372-374, 1991.

[5] Heffner B.L., “Automated measurement of polarization-mode dispersion using Jones matrix eigenanalysis”, IEEE Photon. Technol. Lett., c.4, s.1066–1069, 1992.

[6] Heffner B. L., “Accurate automated measurement of differential group delay dispersion and principal state variation using Jones matrix eigenanalysis,” IEEE Photon. Technol. Lett., c.5, s.814–817, 1993.