

OPTİK FİBERLERDEKİ POLARİZASYON MOD DISPERSİYONUNUN SABİT ÇÖZÜMLEYİCİ VE JONES MATRİSİ YÖNTEMLERİYLE ÖLÇÜLMESİ

Sait Eser KARLIK¹

Güneş YILMAZ²

Kutalmış GEREN³

^{1,3} Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü, 16059, Görükle, BURSA

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

¹ e-mail: ekarlik@uludag.edu.tr

² e-mail: gunes.yilmaz@tr.pirelli.com

Anahtar Sözcükler: PMD, Sabit Çözümleyici, Jones Matrisi, Çiftkırılma, Optik Fiber

ÖZET

Polarizasyon Mod Dispersiyonu (PMD), yüksek hızlı haberleşme sistemlerinde band genişliğini sınırlayan temel faktörlerden biridir. Bu nedenle, PMD'nin yüksek doğrulukla ölçülmesi büyük önem taşımaktadır. Sabit çözümleyici ve Jones matrisi metodları, PMD ölçümlerinde en çok kullanılan yöntemlerdir. Bu çalışmada, sabit çözümleyici ve Jones matrisi metodları, farklı fiber uzunlukları ve farklı dalgaboylarında incelenmiştir. Veriler, fiber uzunluğunun kuplaj uzunluğundan büyük ya da küçük olmasının, sonuçları önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Sabit çözümleyici metodunda, kısa fiberlerde sinüsoidal bir iletim cevabı elde edilirken, uzun fiberlerdeki iletim spektrumunda ölçüm sonuçlarının doğruluğunu etkileyebilecek bazı belirsizlikler tespit edilmiştir. Jones matrisi metodunda ise, kısa fiberlerde dalgaboyundan bağımsız sonuçlar elde edilirken, uzun fiberlerde dalgaboyunun ölçüm sonuçları üzerinde bariz bir etkisi olduğu görülmüştür.

1. GİRİŞ

Optik fiberde iletim kapasitesini sınırlayan temel etken dispersiyondur. Dispersiyon nedeniyle oluşan darbe genişlemesi, iletişim 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 durum, fiberde oluşan PMD miktarının belirlenmesini amaçlayan çok sayıda ölçüm metodunun geliştirilmesine yol açmıştır. Bir

polarimetre kullanarak çıkış polarizasyon durumunu ölçen yöntemler, hem ayrıntılı teorik yorumlamalar için gerekli hem de PMD'nin dalgaboyunun bir fonksiyonu şeklinde belirlenmesi için uygundur. Bu metodlar arasında en yaygın olarak kullanılanlar Poincaré küresi yöntemi [1,2] ve Jones matrisi yöntemidir [3,4]. Doğrudan polarimetreye bağlı olmayan ve polarizasyon vektörünün sadece bir bileşenini belirlemeye yönelik daha basit bir teknik ise sabit çözümleyici tekniğidir [5].

Bu çalışmada amacımız, fiber uzunluğunun ve dalgaboyunun sabit çözümleyici tekniği ve Jones matrisi metodlarıyla yapılan ölçümlere etkisini incelemek, hangi koşullar altında hangi yöntemin daha güvenilir olduğunu belirlemektir. Bu nedenle, sabit çözümleyici tekniği ve Jones matrisi metodu, çeşitli uzunluk ve dalgaboylarındaki fiberlere uygulanmıştır.

İkinci bölümde, PMD ile ilgili temel kavramlardan bahsedilmiştir. Üçüncü ve dördüncü bölümlerde, sırasıyla sabit çözümleyici tekniği ve Jones matrisi metodu açıklanmıştır. Beşinci bölümde ise 500 m ve 50 km uzunluktaki fiberlerde, 1450-1650 nm aralığında her iki yöntemle elde edilen PMD benzetim sonuçları verilmiş ve bu sonuçlardan yola çıkarak yöntemler birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

2. PMD İLE İLGİLİ TEORİK ALT YAPI

Fiberin dairesel geometrisindeki bozulmalar ve kırılma indisinde anizotropi oluşturan iç gerilmeler PMD'ye katkıda bulunan iki ana faktördür. Diğer faktörler, kırılmalar, 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.

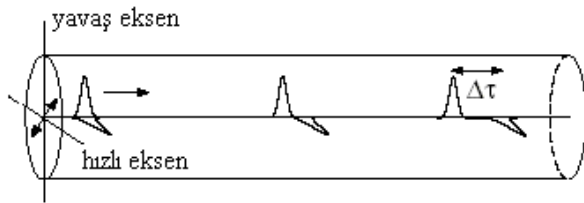
Optik fiberlerdeki çiftkırılma, kırılma indislerindeki farklılık biçiminde ifade edilebilir. Bu durumda, ortogonal polarizasyon modları için yayılım sabiti β

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

şeklinde. Burada ω ışığın açısal frekansını, c boşluktaki ışık hızını, $\Delta n = n_s - n_f > 0$ yavaş ve hızlı eksenler arasındaki kırılma indisi farkını, λ ise ışığın boşluktaki dalgaboyunu göstermektedir. Çiftkırılma, fiber boyunca ilerleyen ışığın polarizasyon durumunu (SOP) da değiştirebilir. Herhangi bir polarizasyon durumu, çiftkırılmadan etkilenmeyen PSP'lere (özdurumlar) 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

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

şeklinde elde edilir. Burada, Δv_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'de çiftkırılma nedeniyle oluşan darbe bölünmesi görülmektedir.



Şekil 1. Çiftkırılma nedeniyle oluşan darbe bölünmesi

Çok sayıda rasgele çiftkırılmalı elemandan oluşan tek modlu bir fiberin $\Delta\tau$ diferansiyel grup gecikmesi, teorik olarak Maxwell dağılımına sahiptir [1,6]. Yani, normalize DGD'nin olasılık yoğunluk fonksiyonu, $x = \Delta\tau / \langle \Delta\tau \rangle$ olmak üzere,

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

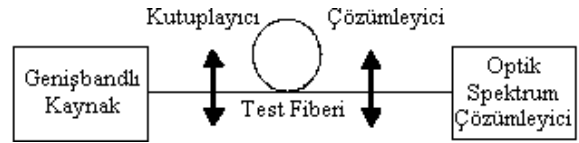
şeklinde ifade edilebilir. $\langle \Delta\tau \rangle$ ortalama diferansiyel grup gecikmesi olup (4) formülüyle hesaplanabilir.

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

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

3. SABİT ÇÖZÜMLEYİCİ TEKNİĞİ

Optik fiberlerde ortalama DGD'yi ölçmek için en basit ve en çok kullanılan teknik sabit çözümleyici tekniğidir. Bu yöntemin ölçme düzeneği Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Sabit çözümleyici tekniği ölçme düzeneği

Bu yöntemde, genişbandlı polarize ışık test fiberinden geçirilir ve çıkıştaki optik spektrum çözümleyiciden iletim spektrumu elde edilir. Fiber boyunca farklı dalgalıboyları için farklı SOP'ler oluşacağından, çıkıştaki SOP'ye bağlı olarak her dalgaboyu değişik bir iletim karakteristiğine sahip olacaktır. Dolayısıyla, iletim spektrumunda çeşitli maksimum ve minimum noktaları bulunacaktır. Bu ekstremum noktalarının sayısından (N_e) ya da ortalama değer geçişlerinin sayısından (N_m), ortalama DGD hesaplanabilir. Test fiberinin, kuplaj uzunluğu L_C 'den daha kısa olduğu durumlarda

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{\pi N_e}{\Delta\omega} = \frac{\pi N_m}{\Delta\omega}, \quad L < L_C \quad (5)$$

test fiberinin, kuplaj uzunluğu L_C 'den daha uzun olduğu durumlarda ise

$$\begin{cases} \langle \Delta\tau \rangle = 0.824\pi \frac{N_e}{\Delta\omega} \\ \langle \Delta\tau \rangle = 4 \frac{N_m}{\Delta\omega} \end{cases}, \quad L \gg L_C \quad (6)$$

formülleri kullanılarak ortalama DGD bulunabilir. Buradaki 0.824 katsayısı Monte Carlo benzetimleriyle elde edilmiştir.

(5) ve (6) formüllerindeki kuplaj uzunluğu L_C , DGD'nin sabit olarak kabul edilebileceği maksimum uzunluktur. Kuplaj uzunluğunun tipik değeri fiber üretim parametrelerine bağlı olup genelde birkaç yüz metre civarındadır. Pratikte, fiber uzunluğu kuplaj uzunluğundan daha büyüktür.

4. JONES MATRİSİ METODU

Doğrusal bir optik elemanın polarizasyona etkisi, matematiksel olarak 2×2 boyutlu kompleks bir Jones matrisi (A) kullanılarak açıklanabilir. A matrisi, (7)'de verilen eşitliğe göre, giriş polarizasyon durumunu çıkış polarizasyon durumuna dönüştürür.

$$\mathbf{j}_{\text{çıkış}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{j}_{\text{giriş}} \quad (7)$$

Polarizasyona bağlı kayıpların olmadığı çiftkırılmalı ortamda, frekansa bağlı Jones matrisi

$$\mathbf{A}(\omega) = \begin{pmatrix} a(\omega) & b(\omega) \\ -b^*(\omega) & a^*(\omega) \end{pmatrix} \quad (8)$$

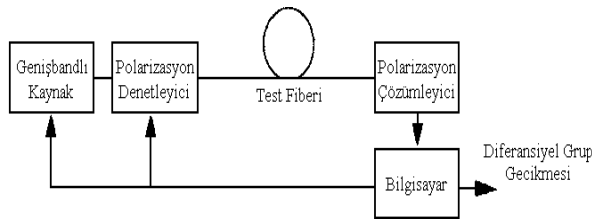
ile ifade edilir. Burada, $a(\omega)$ ve $b(\omega)$ ışığın açılal frekansının kompleks fonksiyonları, a^* a 'nın kompleks eşleniği olup $|a|^2 + |b|^2 = 1$ eşitliği mevcuttur.

Çıkış SOP'sinin dalgaboyuna göre ölçüldüğü Jones matrisi yönteminde (JMM) [3,4], farklı dalgaboylarında fiberin Jones matrisini hesaplamak için, önceden belirlenmiş giriş SOP'leri kümesi kullanılır. DGD, Jones matrisindeki bileşenlerin frekansa göre türevlerinden,

$$\Delta\tau(\omega) = 2\sqrt{|a'(\omega)|^2 + |b'(\omega)|^2} \quad (9)$$

formülüyle hesaplanır. Burada, a ve b (8) 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.

Doğrusal iletim özellikleri frekansa bağlı Jones matrisi tarafından tamamen belirlenebildiği için, bu teknik, fiberin karakterizasyonunu tam olarak gerçekleştirir. Jones matrisi metodunu kullanan ölçme düzeneği Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Jones matrisi metodu ölçme düzeneği

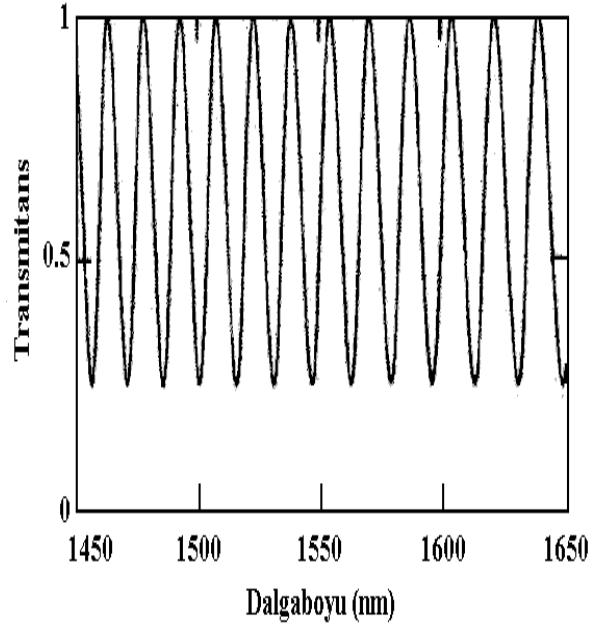
Şekil 3'te görüldüğü gibi, ölçme düzeneğinde ayarlı bir genişbandlı kaynak (lazer), polarizasyon denetleyici ve polarizasyon çözümlenmesi kullanılır. Her dalgaboyunda polarizasyon denetleyicisi taranır ve Jones matrisi metodu kullanılarak matematiksel hesaplamalar yapılır. Böylece bütün dalgaboylarındaki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

Sabit çözümlenici tekniği ve Jones matrisi metodunun ortak özelliği, işaret kaynağının ve ölçüm ile ilgili diğer cihazların birbirleriyle haberleşebilecek şekilde aynı yerde bulunmalarıdır. Ayrıca, ölçüm süresince fiberlerin sabit tutulması gerekir çünkü her iki yöntem de titreşimlere karşı son derece duyarlıdır. Bu nedenle sabit çözümlenici tekniği ve Jones matrisi metodu laboratuvar çalışmaları için daha uygundur. Döşenmiş fiberler üzerinde yapılan saha ölçümlerinde, işaret kaynağı ile interferometrenin aynı alanda bulunması gerekmediğinden ve titreşim duyarlılığı az olduğundan, interferometrik yöntemler kullanılabilir. Ancak bu yöntemler, DGD'nin dalgaboyu bağımlılığını gösterememektedir [7].

Ölçüm süresi açısından, polarizasyon taraması gerektiren Jones matrisi metodu, sabit çözümlenici tekniğinden daha uzun sürer.

5. PMD BENZETİM SONUÇLARI

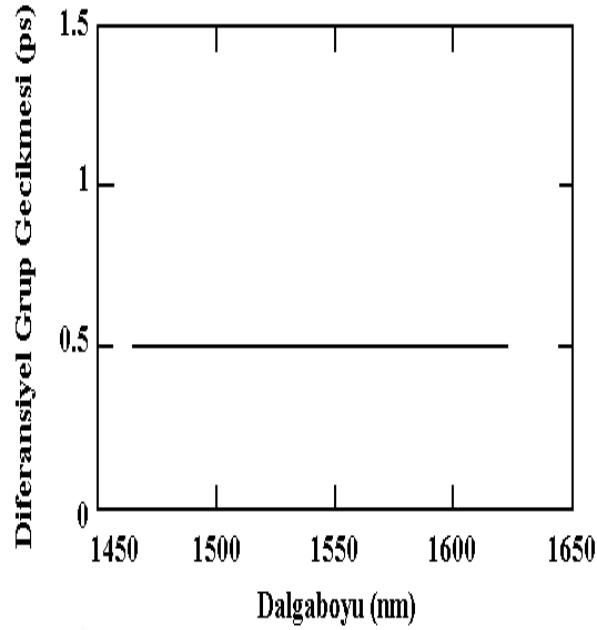
Sabit çözümlenici tekniği ve Jones matrisi metodu kullanılarak 1 km kuplaj uzunluğuna sahip 500 m ve 50 km uzunluklu iki ayrı fiber için 1450-1650 nm dalgaboyu aralığında transmittans ve diferansiyel grup gecikmesi benzetimleri yapılmıştır.



Şekil 4. Kısa fiberde sabit çözümlenici tekniği ile elde edilen iletim spektrumu

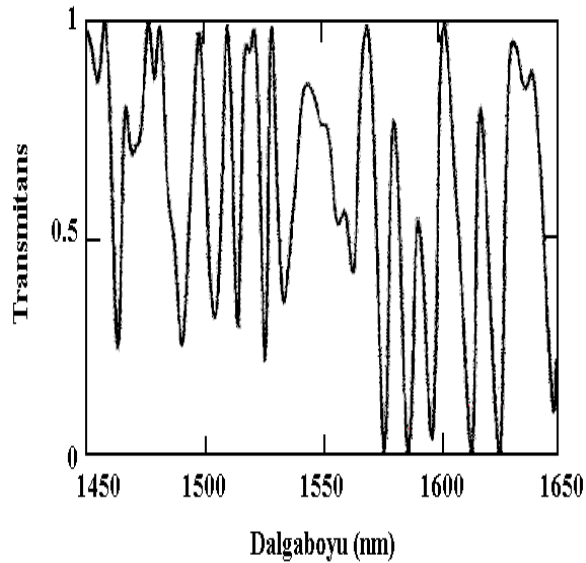
Şekil 4'te 500 m uzunluklu fiberde sabit çözümlenici tekniği ile elde edilen iletim spektrumu benzetim sonucu verilmiştir. Görüldüğü gibi iletim spektrumu sinüsoidal bir şekil sergilemektedir. $\Delta\lambda = 50$ nm olan her dalgaboyu aralığında 6 adet ekstremler noktası mevcuttur. (5) formülünden yararlanarak DGD hesaplanırsa 0.5 ps bulunur.

DGD'nin değeri tüm iletim spektrumu boyunca sabittir.



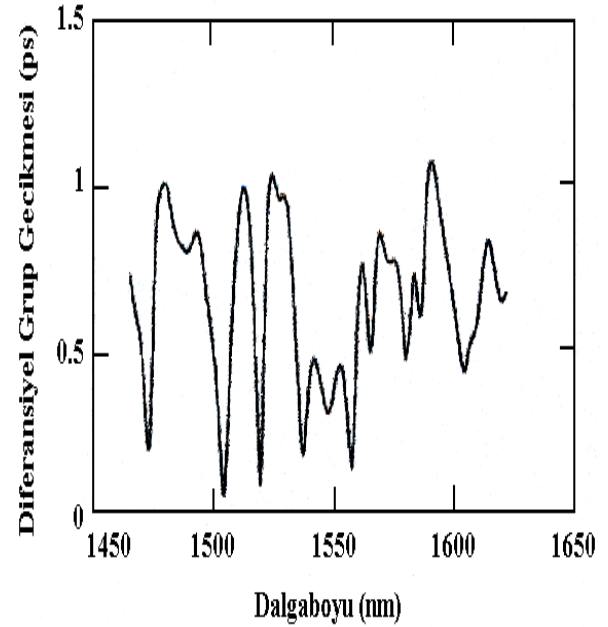
Şekil 5. Kısa fiberde Jones matrisi metodu ile elde edilen diferansiyel grup gecikmesi

Aynı fiber için Jones matrisi metoduyla elde edilen benzetim sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. 500 m uzunluklu fiberde diferansiyel grup gecikmesinin dalgaboyundan bağımsız olduğu açıkça görülmektedir. DGD değeri ise, sabit çözümleyici tekniğinde hesaplanan değer (0.5 ps) aynıdır. Bu durum, fiber uzunluğu kuplaj uzunluğundan daha kısa iken hem sabit çözümleyici tekniğinin hem de Jones matrisi yönteminin güvenilir sonuçlar verdiğini gösterir.



Şekil 6. Uzun fiberde sabit çözümleyici tekniği ile elde edilen iletim spektrumu

Şekil 6'da 50 km uzunluklu fiberde sabit çözümleyici tekniği ile elde edilen iletim spektrumu benzetim sonucu verilmiştir. 500 m uzunluklu fiberle karşılaştırıldığında en belirgin fark, iletim spektrumunun sinüsoidal olmamasıdır. 1530 nm civarındaki saçak yapısındaki daralma, bu aralıkta PMD'nin etkisinin daha fazla olduğunu göstermektedir. Ayrıca, ortalama DGD'nin (ya da PMD'nin) değeri hesaplanırken, 500 m uzunluklu fiberdeki gibi yüksek bir doğruluktan söz etmek mümkün değildir. Sabit çözümleyici tekniğinin doğası gereği, belirli bir dalgaboyu aralığındaki ekstremum noktalarının sayısı tespit edilerek (6) formülü uyarınca bir değer bulunabilir. Ancak grafikten de görüldüğü gibi, hangi noktaların ekstremum sayılabileceği konusunda belirsizlikler mevcuttur. Örneğin 1555 nm civarındaki küçük tepeliğin hesaplamalara dahil edilmesi ya da edilmemesi sonucu önemli ölçüde etkileyecektir.



Şekil 7. Uzun fiberde Jones matrisi metodu ile elde edilen diferansiyel grup gecikmesi

Şekil 7'de 50 km uzunluklu fiberin Jones matrisi metoduyla elde edilen diferansiyel grup gecikmesiyle ilgili benzetim sonuçları görülmektedir. Kısa fiberdeki durumun aksine, DGD dalgaboyuna bağlıdır. PMD değeri, DGD-dalgaboyu grafiğinden (4) formülü de kullanılarak $0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer, benzetimlerde kullanılan fiber ile ilgili spesifikasyonlarda belirtilen pratik değerlerle örtüşmektedir. Bu durum, fiber uzunluğunun kuplaj uzunluğundan daha büyük olduğu durumlarda, Jones matrisi yönteminin sabit çözümleyici tekniğine göre daha güvenilir sonuçlar verdiğini göstermektedir.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, sabit çözümleyici tekniği ve Jones matrisi yöntemleriyle yapılan PMD ölçümlerinde, fiber uzunluğunun ve dalgaboyunun ölçüm sonuçlarına etkisi incelenmiştir. Fiber uzunluğu kuplaj uzunluğundan kısa ise, her iki yöntem de güvenilir sonuçlar vermekte ve dalgaboyundan bağımsız, sabit bir DGD ölçmektedir. Fiber boyunun, kuplaj uzunluğundan daha uzun olduğu durumda sabit çözümleyici tekniğinin güvenilirliği azalmakta, Jones matrisi yöntemi ise güvenilir ve dalgaboyuyla değişen bir DGD ölçmektedir.

Sonuç olarak daha basit ölçme düzeneği ve daha hızlı ölçüm gerektiren durumlarda sabit çözümleyici tekniği, daha güvenilir ölçüm sonuçları gerektiren durumlarda (özellikle laboratuvar çalışmalarında) Jones matrisi metodu en uygun yöntemlerdir.

KISALTMALAR

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

KAYNAKLAR

[1] 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.

[2] Poole C.D., Bergano N.S., Wagner R.E. ve Schulte H.J., "Polarization dispersion and principal states in a 147-km undersea lightwave cable", J. Lightwave Technol., c. 6, s. 1185-1190, 1988.

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

[4] 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.

[5] Poole C.D. ve Favin D.L., "Polarization-mode dispersion measurements based on transmission spectra through a polarizer", J. Lightwave Technol., c. 12, s. 917-929, 1994.

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

[7] Olsson B.E., Karlsson M. ve Andrekson P.A., "Polarization mode dispersion measurement using a Sagnac interferometer and a comparison with the fixed analyzer method", IEEE Photon. Technol. Lett., c. 10, s. 997-999, 1998.