

SABİT SPİNLİ FİBERLERE UYGULANAN HARİCİ BÜKMELERİN FİBERİN POLARİZASYON MOD DİSPERSİYONUNA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Sait Eser KARLIK¹

Güneş YILMAZ²

^{1,2}Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü,
16059, Görükle, BURSA
e-mail: ekarlik@uludag.edu.tr

Anahtar Sözcükler: PMD, Sabit Spinli Fiber, Elastik Bükme, Harici Bükme

ÖZET

Yüksek bit hızlı ve zaman bölmeli çoğullamalı (TDM) haberleşme sistemlerinde düşük polarizasyon mod dispersiyonuna (PMD) sahip optik fiberlerin kullanılması sistem güvenilirliği açısından son derece önemlidir. Fiber PMD'sini azaltmada etkin bir yöntem, fiberin spinlenmesidir. Sabit spinleme, basit, kolaylıkla modellenebilen ve düşük maliyetli bir yöntem olması nedeniyle çok tercih edilmektedir. Ancak bu yöntemin dezavantajı bobine sarılı fiberde elastik bükme oluşturmasıdır. Harici bükme, spinsiz fiberlerde olduğu gibi spinli fiberlerde de PMD değişimlerine sebebiyet veren önemli bir etkidir. Bu çalışmada, sabit spinli fiberlerin, değişik oranlarda uygulanan harici bükmeler altındaki PMD performansları deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sabit spinli fiberlerde harici bükmenin fiber PMD'si üzerinde olumsuz etkisinin yanısıra uygun bükme oranlarında olumlu etkisinin de bulunduğunu göstermektedir. Spin oranı 1 tur/m ile 8 tur/m arasında olan sabit spinli fiberlere, spinlemenin sebep olduğu elastik bükme ile ters yönlü ve 0 tur/m ile 1.5 tur/m arasında ufak bir orana sahip harici bükme uygulanarak PMD'nin sifıra yaklaştırılabileceği görülmüştür.

1. GİRİŞ

Dispersiyon, optik fiberin iletim kapasitesini sınırlayan temel etkidir. Dispersiyon sebebiyle oluşan darbe genişlemesi, semboller arası girişimin (ISI) meydana gelmesine ve iletişim sisteminin bit hata oranının artmasına neden olur. Polarizasyon mod dispersiyonu (PMD), 1970'lerden beri bilinen bir dispersiyon türüdür. O zamanın düşük veri hızları nedeniyle pratik uygulamaları belirgin biçimde etkilemeyen PMD, 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.

Yüksek bit hızlı ve zaman bölmeli çoğullamalı (TDM) haberleşme sistemlerinde düşük

PMD'ye sahip optik fiberlerin kullanılması sistem güvenilirliği açısından son derece önemlidir. PMD'yi azaltmak için etkili bir yöntem mod kuplajı oluşturmaktır. Bu durum [1]'de ayrıntılı biçimde açıklanmıştır. Fiberde rasgele mod kuplajları oluşmasına rağmen bu kuplajların önceden kestirilebilmesi ve kontrol edilebilmesi mümkün değildir. Düşük PMD'li fiber elde edebilmek için, fiber içinde kontrol edilebilen mod kuplajı oluşturmanın bir yolu, 1990'ların başından beri kullanılan fiber spinleme metodudur. Spinli fiberlerin PMD performansı çeşitli modelleme yöntemleri ve ağırlıklı olarak simülasyonlarla incelenmiştir [2, 3, 4].

Optik fiberdeki polarizasyon mod kuplajını etkileyen önemli bir faktör fibere uygulanan bükmelerdir [5]. Spinsiz fiberlerde bükmelerin PMD'ye etkisi teorik ve deneysel olarak [6] ve [7]'de incelenmiştir. Bükmenin spinli fiberlerde de PMD değişimlerine sebebiyet veren önemli bir dış etken olduğu [8]'de belirtilmiştir.

Bu çalışmada amacımız, sabit spinli fiberlerin, değişik oranlarda uygulanan harici bükmeler altındaki PMD performanslarının deneysel olarak incelenmesidir. Bu amaçla, farklı spin oranlarına sahip sabit spinli fiberlere tek yönlü harici bükmeler uygulanmış ve Jones matrisi yöntemi kullanılarak elde edilen ölçüm sonuçlarından fiberlerin PMD değerleri hesaplanmıştır.

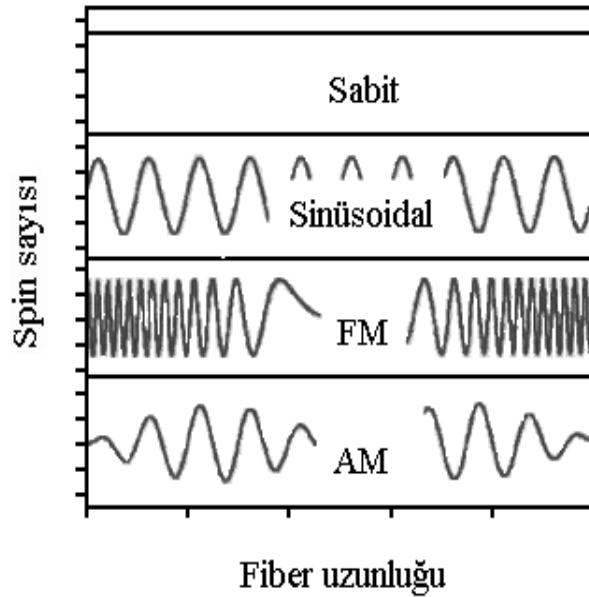
İkinci kısımda, fiber spinleme işlemi ve spin tipleri açıklanmıştır. Üçüncü kısımda, deneylerde kullanılan fiberler, ölçüm yöntemleri ve deney koşulları hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü kısımda ise elde edilen sonuçlar grafiklerle sunulmuş ve yorumlanmıştır.

2. FİBERİN SPİNLENMESİ VE SPİN TİPLERİ

Fiber spinleme işlemi 1981 yılında Barlow ve arkadaşları tarafından önerilmiştir [9]. Bu öneride, spinli fiberi oluşturmak için çekme işlemi esnasında preformun eksen etrafında döndürülmesi düşünülmüş ve spinlemenin PMD üzerindeki etkisinin, fiberdeki asimetri eksenlerinin hızlı değişiminden kaynaklandığı gösterilmiştir. Ancak 1990'ların ortalarına kadar fiber üretiminde spinleme işlemi çeşitli nedenlerden dolayı pek kullanılmamıştır. Bu nedenlerden birisi, optik

ağlardaki bit hızının o zamanlarda daha düşük olması (≤ 2.5 Gb/s) ve PMD'nin bu ağlarda önemli bir sorun oluşturmamasıydı. Bir diğer neden, düşük çekme hızlarında kolaylıkla gerçekleştirilen spinlemenin, yüksek çekme hızlarına çıkıldıkça -preformun eksenini etrafında yüksek hızda döndürülmesinin çok zor olmasından dolayı- uygulanabilirliğini kaybetmesiydi. Bu soruna teknolojik bir çözüm Hart ve arkadaşları tarafından getirilmiştir [10]. Bu yeni öneri, preform yerine fiberin doğrudan spinlenmesini içermektedir. Bu yöntemle birlikte, fiber üretiminde spinleme işleme daha yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır.

Günümüzde değişik tiplerde spinli fiber üretilmektedir. En yaygın uygulama alanı bulanlar, sabit ve sinüsoidal spinli fiberler olmakla birlikte yakın bir geçmişte önerilen [11] frekans modüleri (FM) ve genlik modüleri (AM) spinli fiberler de hızla yaygınlaşmaktadır. Bu dört tip fiberin spin profilleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Değişik tiplerdeki fiber spin profilleri

Sabit spinli fiberin spin profili,

$$\alpha(z) = \alpha_0 \quad (1)$$

şeklinde sabit bir α_0 değerine sahiptir. Sabit spinleme basit, kolaylıkla modellenebilen ve düşük maliyetli bir yöntemdir. Bu nedenle çok tercih edilmektedir. Ancak sabit spinlemenin PMD üzerindeki etkisi fiber vuru uzunluğuna bağlıdır. Kısa vuru uzunluklarında ve düşük spin oranlarında etkin değildir. En önemli dezavantajı, bobine sarılı fiberde elastik bükme oluşturmasıdır. Bu sorun değişken oranlı spinlemeyi gündeme getirmiştir.

Sinüsoidal spinli fiberde, fiber eksenini etrafında saat yönünde ve saat yönünün tersinde Şekil 1'deki profile uygun biçimde döndürülür. Böylece sabit spinlemede meydana gelen elastik

bükülmenin oluşması önlenir. Dolayısıyla, sinüsoidal spinleme sabit spinlemedekinden daha düşük PMD değerlerine erişilmesine imkan sağlar.

Sinüsoidal spin profili,

$$\alpha(z) = \alpha_0 \sin(\eta z) \quad (2)$$

şeklinde. Burada α_0 radyan cinsinden uygulanan spinin genliği, $\eta=2\pi/\Lambda$, Λ metre cinsinden spin periyodu ve z fiber uzunluğudur. Sinüsoidal spinli fiberlerde PMD değeri çok düşük seviyelere çekilebilmesine rağmen, fiber vuru uzunluğunda meydana gelen değişimler kablonun PMD performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Bu problemi çözmek için FM veya AM spin profilleri önerilmiştir [11]. Şekil 1'de şematik olarak gösterilen bu profiller, FM spinli fiberlerde

$$\alpha(z) = \alpha_0 \sin\left\{2\pi\left[f_0 z + f_m \sin\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right)\right]\right\} \quad (3)$$

ve AM spinli fiberlerde

$$\alpha(z) = \alpha_0 \sin(2\pi f z) \sin\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \quad (4)$$

şeklini alır. FM ve AM spinli fiberler geniş bir vuru uzunluğu aralığında çok düşük PMD değerlerine sahiptirler.

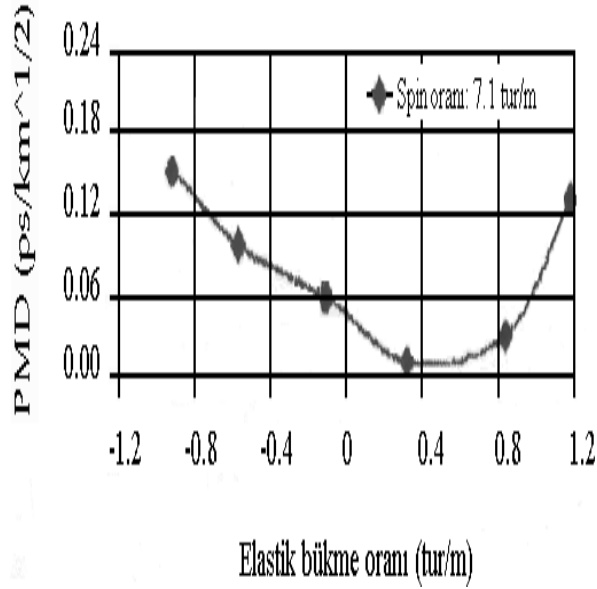
3. ÖLÇÜMLERDE KULLANILAN FİBERLER, ÖLÇÜM YÖNTEMİ VE KOŞULLARI

Ölçümlerde beş adet fiber kullanılmıştır. Bu fiberler, üretici firma tarafından ITU-T G652 standartlarına uygun üç farklı preformdan tek yönlü sabit spinlemeyle üretilmiş olup birinci preformdan üretilmiş fiberin spin oranı 7.1 tur/m, ikinci preformdan üretilmiş fiberin spin oranı 3.4 tur/m ve üçüncü preformdan üretilmiş üç fiberin spin oranları 4.0 tur/m, 2.8 tur/m ve 0.5 tur/m'dir. Bu fiber numunelerine minimum 0.15 tur/m oranlı bükme üretebilen bir makineyle tek yönlü harici bükme uygulanmıştır.

Her bir fiber numunesi yaklaşık 1 km uzunluğundadır. PMD değeri ölçülecek fiber, ölçüm öncesinde çevresi yaklaşık 50 m olan kare şeklindeki tabana serilmiştir. Böylece fiberin bobinlere sarılması sonucunda oluşacak ve PMD ölçümlerini etkileyecek ilave stres ve bükme önlenmiştir. PMD ölçümleri Jones matrisi yöntemi kullanılarak 1520 nm -1630 nm dalgaboyu aralığında 10 nm aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Her bir örnek için çok sayıda ölçüm yapılmıştır. Elde edilen sonuçların dağılımının ortalamaları hesaplanarak ilgili harici bükme oranı altındaki PMD değerlerine ulaşılmıştır.

4. ÖLÇÜM SONUÇLARI

Bölüm 3'te bahsedilen yöntem ve koşullar uygulanarak 7.1 tur/m sabit spin oranlı fiberde elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 2'de gösterilmiştir.

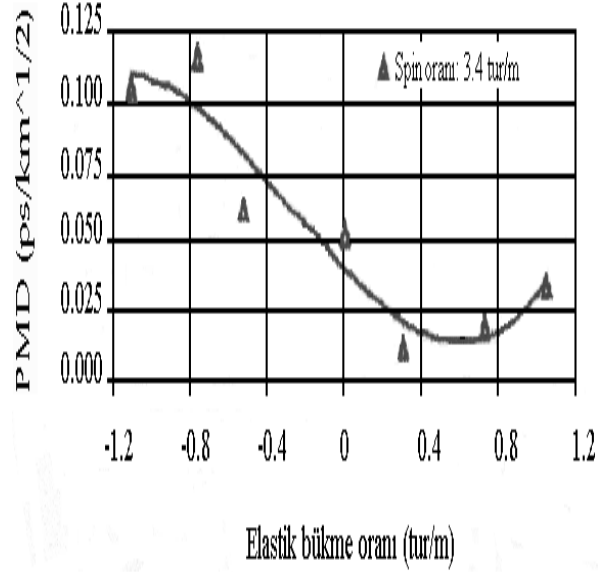


Şekil 2. 7.1 tur/m sabit spin oranlı fiberin PMD-Elastik bükme grafiği

Şekil 2'de PMD ölçüm sonuçları verilen fiberle aynı preformdan yapılmış spinsiz bir fiberin herhangi bir harici bükme uygulanmamışken tipik PMD değeri 0.44 ps/km^{1/2}'dir. Spinli fiberde ölçülen PMD değerlerini spinsiz fiberdeki tipik değerle karşılaştıracak olursak harici bükme oranının PMD üzerindeki etkilerine rağmen sabit spinlemenin PMD değerini belirgin biçimde düşürdüğü açıktır. Beklenildiği gibi harici bükme oranı azaldıkça PMD değeri de düşmektedir. Ancak teoremin ve beklenilenin tersine PMD minimum değerine 0 tur/m harici bükme oranında değil yaklaşık 0.35 tur/m harici bükme oranında erişmekte ve sifıra çok yaklaşımaktadır.

Bölüm 3'te bahsedilen yöntem ve koşullar uygulanarak 3.4 tur/m sabit spin oranlı fiberde elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 3'te gösterilmiştir.

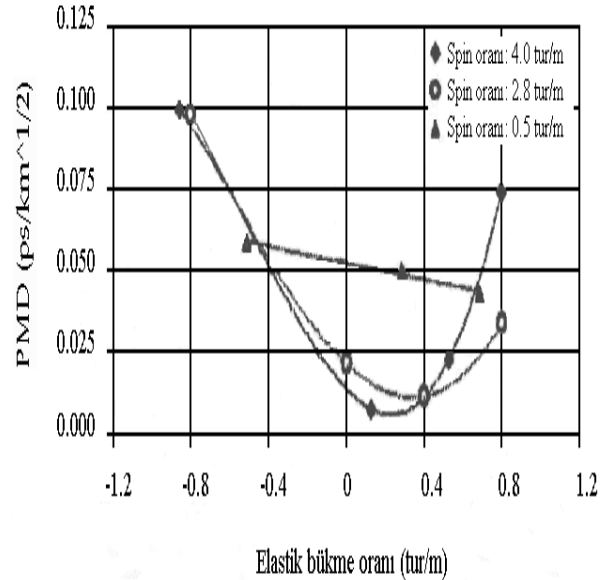
Şekil 3'te PMD ölçüm sonuçları verilen fiberle aynı preformdan yapılmış spinsiz bir fiberin herhangi bir harici bükme uygulanmamışken tipik PMD değeri 0.135 ps/km^{1/2}'dir. Spinli fiberde ölçülen PMD değerlerini spinsiz fiberdeki tipik değerle karşılaştıracak olursak harici bükme oranının PMD üzerindeki etkilerine rağmen sabit spinlemenin PMD değerini belirgin biçimde düşürdüğü açıktır. Beklenildiği gibi harici bükme oranı azaldıkça PMD değeri de düşmektedir. Ancak teoremin ve beklenilenin tersine, PMD'nin minimum değerine erişip sifıra yaklaştığı harici bükme oranı 0 tur/m değil yaklaşık 0.6 tur/m'dir.



Şekil 3. 3.4 tur/m sabit spin oranlı fiberin PMD-Elastik bükme grafiği

Şekil 3'te görüldüğü gibi eğrinin üzerinde bulunmayan ölçüm sonuçları da elde edilmiştir. Bunun sebebi ölçüm sırasında oluşan rasgele mod kuplajındaki değişimlerin PMD üzerinde de belirgin değişimlere sebep olmasıdır.

Bölüm 3'te bahsedilen yöntem ve koşullar uygulanarak 0.5 tur/m, 2.8 tur/m ve 4.0 tur/m sabit spin oranlı fiberlerde elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 0.5 tur/m, 2.8 tur/m ve 4.0 tur/m sabit spin oranlı fiberlerin PMD-Elastik bükme grafiği

Şekil 4'te PMD ölçüm sonuçları verilen fiberlerle aynı preformdan yapılmış spinsiz bir fiberin herhangi bir harici bükme uygulanmamışken tipik PMD değeri 0.125 ps/km^{1/2}'dir. Spinli fiberde ölçülen

PMD değerlerini spinsiz fiberdeki tipik değerle karşılaştıracak olursak harici bükmelerin PMD değeri üzerindeki etkilerine rağmen sabit spinlemenin PMD değerini düşürdüğü açıktır. Spin oranı arttıkça PMD değerindeki düşüş de artmaktadır. Önceki ölçüm sonuçlarına benzer şekilde harici bükme oranı azaldıkça PMD değeri de düşmektedir. Yine teorisinin ve beklenenin tersine PMD minimum değerine 0 tur/m harici bükme oranından daha büyük bükme oranlarında erişmekte, 2.8 tur/m spin oranlı fiberde 0.4 tur/m harici bükme oranında ve 4.0 tur/m spin oranlı fiberde yaklaşık 0.25 tur/m harici bükme oranında sıfıra yaklaşmaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, değişik sabit spin oranlarına sahip fiberlerin, değişik oranlarda uygulanan harici bükmeler altındaki PMD performansları deneysel olarak incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, beklenildiği gibi sabit spin oranı arttıkça PMD değerindeki düşüşün de arttığını (spinsiz referans kablolarındaki PMD değerlerine göre) göstermektedir. Ancak beklenmeyen bazı sonuçlarla da karşılaşmıştır. Örneğin, harici bükmelere duyarlılık sabit spin oranı arttıkça artmaktadır ve PMD-harici bükme grafiklerindeki eğrilerin minimum noktalarına sıfırdan daha büyük harici bükmelerde erişilmiştir. Bu son bulgunun nedeni, sabit spinleme sırasında fiberde oluşan ve sabit spinlemenin dezavantajı olarak gösterilen elastik bükme ile ters yönlü bir harici bükme uygulandığında, fiberin maruz kaldığı toplam bükmenin azalmasıdır. Bu noktadan hareketle ölçümlerimiz, spin oranı 1 tur/m ile 8 tur/m arasında olan sabit spinli fiberlere, spinlemenin sebep olduğu elastik bükme ile ters yönlü ve 0 tur/m ile 1.5 tur/m arasında ufak bir orana sahip harici bükme uygulanarak PMD'nin etkin biçimde azaltılabileceğini göstermiştir. Yani çalışmamız, sabit spinli fiberlerde harici bükmenin fiber PMD'si üzerindeki olumsuz etkisinin, uygun bükme oranları seçildiği takdirde olumlu etkiye dönüştürülebileceğini deneysel olarak göstermiştir.

KISALTMALAR

ISI	-	Inter-symbol Interference
PMD	-	Polarization Mode Dispersion
TDM	-	Time Division Multiplexing

KAYNAKLAR

[1] D. A. Nolan, X. Chen and M. -J. Li, "Fibers with low polarization-mode dispersion", *J. Lightwave Tech.*, vol. 22, pp. 1066-1077, 2004.

- [2] R. E. Schuh, X. Shan and A. S. Siddiqui, "Polarization mode dispersion in spun fibers with different linear birefringence and spinning parameters", *J. Lightwave Tech.*, vol. 16, pp. 1583-1588, 1998.
- [3] A. Galtarossa, P. Griggio and A. Pizzinat, "Calculation of the mean differential group delay of periodically spun, randomly birefringent fibers", *Optics Lett.*, vol. 27, pp. 692-694, 2002.
- [4] X. Chen, M. -J. Li and D. A. Nolan, "Scaling properties of polarization mode dispersion of spun fibers in the presence of random mode coupling", *Optics Lett.*, vol. 27, pp. 1595-1597, 2002.
- [5] R. Ulrich and A. Simon, "Polarization optics of twisted single-mode fibers", *Appl. Opt.*, vol. 18, pp. 2241-2251, 1979.
- [6] R. E. Schuh, E. S. R. Sikora, N. G. Walker, A. S. Siddiqui, L. M. Gleeson and D. H. O. Bebbington, "Theoretical analysis and measurement of effects of fibre twist on polarisation mode dispersion of optical fibres", *Electronics Lett.*, vol. 31, pp. 1772-1773, 1995.
- [7] A. Galtarossa and L. Palmieri, "Measure of twist-induced circular birefringence in long single-mode fibers: theory and experiments", vol. 20, pp. 1149-1159, 2002.
- [8] M. J. Li, A. F. Evans, D. W. Allen and D. A. Nolan, "Effects of lateral load and external twist on PMD of spun and unspun fibers" *Proceedings of ECOC'99*, vol. 2, pp. 62-63, 1999.
- [9] A. J. Barlow, J. J. Ramskov-Hansen and D. N. Payne, "Birefringence and polarization mode-dispersion in spun single-mode fibers", *Appl. Opt.*, vol. 20, p. 2963, 1981.
- [10] A. C. Hart, R. G. Huff and K. L. Walker, "Method of making a fiber having low polarization mode dispersion due to a permanent spin", U.S. Patent 5 298 047, 1994.
- [11] M. J. Li and D. A. Nolan, "Fiber spin-profile designs for producing fibers with low polarization mode dispersion", *Opt. Lett.*, vol. 23, pp. 1659-1661, 1998.