

**T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OPTİK FİBERLERDEKİ POLARİZASYON MOD DİSPERSİYONU (PMD)  
OLAYININ ORTAM KOŞULLARINA BAĞLILIĞININ İNCELENMESİ**

**SAİT ESER KARLIK**

**DOKTORA TEZİ  
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BURSA 2006**

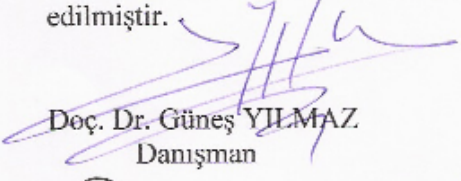
T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

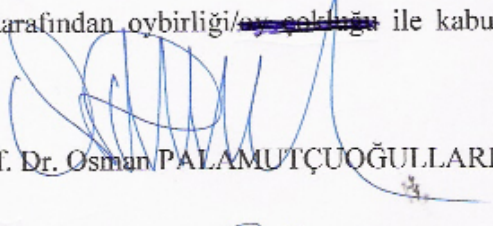
OPTİK FİBERLERDEKİ POLARİZASYON MOD DİSPERSİYONU (PMD)  
OLAYININ ORTAM KOŞULLARINA BAĞLILIĞININ İNCELENMESİ

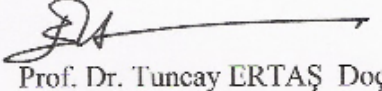
SAİT ESER KARLIK

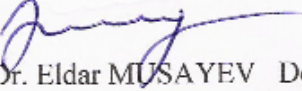
DOKTORA TEZİ  
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI


Bu tez 08/12/2005 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliğiyle kabul edilmiştir.

  
Doç. Dr. Güneş YILMAZ  
Danışman

  
Prof. Dr. Osman PALAMUTÇUOĞULLARI

  
Prof. Dr. Tuncay ERTAŞ

  
Doç. Dr. Eldar MUSAYEV

  
Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ

## ÖZET

Polarizasyon mod dispersiyonu (PMD), 5 Gbit/s'den yüksek optik iletim hızlarında, tek modlu fiberdeki darbe genişlemesinin ve alıcıda elde edilen güç seviyesindeki azalmanın temel nedenlerinden biridir. Bu doktora tezinde, PMD, hem mevcut haberleşme sistemleri hem de yeni kurulacak haberleşme sistemleri açısından incelenmiştir. Öncelikle, Türk Telekomünikasyon A.Ş. TRFO-9b Fiber Optik Kablo Şartnamesi'ne göre üretilmiş G.652 standard haberleşme fiberi ve fiber ribbonlarla kurulmuş sistemlere uygulanacak kompanzasyon yöntemlerinin ihtiyaç duyduğu ortam koşullarının PMD üzerindeki etkisine ilişkin veriler deneysel olarak bulunmuştur. Daha sonra, yeni kurulacak sistemler için geliştirilen sabit ve sinüsoidal spinli fiberlerde PMD değerini minimuma indirecek çözüm yolları araştırılmış ve her ikisi için önerilerde bulunulmuştur.

Sabit çözümleyici ve Jones matrisi yöntemleri ile gerçekleştirilen benzetimler, sabit çözümleyici yönteminin, optik fiber omurgalı kablolu yerel alan ağlarındaki PMD ölçümlerinde; Jones matrisi yönteminin, uzak mesafe haberleşme sistemlerindeki PMD ölçümlerinde kullanılması gerektiğini göstermiştir.

Dünyada havai hatlı optik fiberlerin toplam fiber ağı içindeki payı % 5'in altındadır. Türkiye'de ise bu oran % 20 civarındadır. Özellikle dağlık bölgelerde ve güneydoğu bölgesinde bu oran % 30'u geçmektedir. Bu nedenle, Türkiye için önemli bir kriter olacağı düşüncesiyle, fiber ribbon kablolarda, titreşimin PMD üzerindeki etkisi tezde araştırılmıştır. Genliği 0.5-10 mm ve frekansı 5-20 Hz arasında değişen titreşim fiber ribbon kabloya uygulandığında, maksimum iletim uzunluğunun % 20 azaldığı tespit edilmiştir.

Sıcaklığın PMD üzerindeki etkisine ilişkin deneylerde, 10 °C ile 60 °C arasında değişen sıcaklığın, maksimum iletim uzunluğunu ribbondaki dış fiberlerde % 23.3, ribbondaki iç fiberlerde % 18.5 azalttığı görülmüştür. Ayrıca, 13 °C ile 25 °C arasında değişen ortam sıcaklığının, fiber ribbon kabloda maksimum iletim uzunluğunu % 22.2 azalttığı saptanmıştır.

Sabit spinli fiberlerde, belirli oranlarda uygulanan harici bükmelerin, fiberin PMD değerini düşürdüğü saptanmıştır. Ancak PMD değerini minimuma indirecek harici bükme değerinin tespitinde, spinli fiberin üretildiği kütüğün PMD değeri de etkili olduğundan, her kütükten üretilmiş fiberler için harici bükme değerinin ayrı ayrı tespit edilmesi gerekmektedir.

Sinüsoidal spinli fiberlerde, harici bükmeden kaynaklanan DGD dalgalanmalarını önlemek için, etkin spin oranının, doğrusal çiftkırılmanın 5 katından büyük olacak şekilde ( $\gamma_{rms} > 5\delta\beta_L$ ) seçilmesi gerektiği bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** PMD, Diferansiyel Grup Gecikmesi, Optik Fiber, Çiftkırılma

## ABSTRACT

Polarization mode dispersion (PMD) is one of the main factors of pulse broadening in single mode optical fibers and power degradation at the receiver at transmission rates exceeding 5 Gbps. In this PhD thesis, PMD has been investigated for not only existing but also novel communication systems. Firstly, the data about effects of medium conditions on PMD required by compensation methods that will be applied to systems installed with G.652 standard communication fibers and fiber ribbons manufactured according to Turk Telecommunication A.S. TRFO-9b Optical Fiber Cable Specification have been experimentally obtained. Then, methods for minimizing the PMD values of constantly and sinusoidally spun fibers developed for novel communication systems have been investigated and proposed.

Simulations performed with fixed analyzer and Jones matrix methods have showed that the fixed analyzer method should be used in PMD measurements of optical fiber backboned local area networks and Jones matrix method should be used in PMD measurements of long-haul communication systems.

The share of aerial optical fibers in worldwide optical fiber network is 5 %. This ratio increases to 20 % in Turkey and exceeds 30 % especially in rocky geographical regions and south-east Anatolia. Therefore, with the idea that it will be an important criteria for Turkey, effects of vibration on PMD of fiber ribbon cables have been investigated in PhD thesis. It has been found that when a vibration with a magnitude varying between 0.5 mm and 10 mm and a frequency between 5 Hz and 20 Hz is applied to the fiber ribbon cable, the maximum transmission length degrades with 20 %.

In experiments related to the effects of temperature on PMD, it has been observed that temperature varying between 10 °C and 60 °C degrades the maximum transmission length with 23.3 % in external fibers of the ribbon and with 18.5 % in internal fibers of the ribbon. Furthermore, ambient temperature varying between 13 °C and 25 °C degrades the maximum transmission length with 22.2 % in fiber ribbon cable.

In constantly spun fibers, it has been observed that external twists with specific rates cause PMD degradations. However, in determining the external twist rate that will minimize the PMD, PMD value of the preform from which the spun fiber has been produced has an important effect and therefore, the external twist rate minimizing the PMD must be separately determined for each fiber produced from a different preform.

To overcome external twist induced DGD fluctuations in sinusoidally spun fibers, it has been found that the effective spin rate must be greater than five times the linear birefringence ( $\gamma_{\text{rms}} > 5\delta\beta_L$ ).

**Keywords:** PMD, Differential Group Delay, Optical Fiber, Birefringence

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b>	i
<b>ABSTRACT</b>	ii
<b>İÇİNDEKİLER</b>	iii
<b>SİMGELER DİZİNİ</b>	vii
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b>	viii
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b>	xi
<b>1. GİRİŞ</b>	1
1.1. Dispersiyonun Optik Fiberli Haberleşme Sistemlerine Etkisi	1
1.2. Problemin Tanımı	2
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI ve KURAMSAL BİLGİLER</b>	4
2.1. Kaynak Araştırması	4
2.2. Kuramsal Bilgiler	8
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM</b>	12
3.1. PMD Ölçüm Yöntemleri	12
3.1.1. Sabit Çözümleyici Yöntemi	12
3.1.2. Jones Matrisi Yöntemi	13
3.1.3. Poincare Küresi Yöntemi	15
3.1.4. İnterferometrik Yöntem	17
3.1.5. Yöntemlerin Karşılaştırılması	18
3.2. Sabit Çözümleyici ve Jones Matrisi Yöntemleriyle PMD Benzetiminde Kullanılan Modeller	19
3.3. G.652 Standard Haberleşme Fiberlerindeki PMD Deneyleri	20
3.3.1. Çiftkırılma ve Polarizasyon Mod Kuplajının PMD'ye Etkisinin İncelenmesinde Kullanılan Yöntemler, Cihazlar ve Deney Koşulları	20

3.3.2. G.652 Standard Haberleşme Fiberinde PMD'nin Sıcaklık ile Değişiminin İncelenmesinde Kullanılan Yöntemler, Cihazlar ve Deney Koşulları	24
3.4. Fiber Ribbon Kablolardaki PMD Deneyleri	25
3.4.1. Deneylerde Kullanılan NZDF Ribbon Kablo Yapısı	25
3.4.2. Anlık PMD Ölçümleri ve PMD'nin Ribbon Kalınlığı ile Değişiminin İncelenmesinde Kullanılan Yöntem ve Cihazlar	27
3.4.3. Fiber Ribbon Kablolarda PMD'nin Mekanik Test Koşullarıyla Değişiminin İncelenmesinde Kullanılan Yöntem ve Cihazlar	28
3.4.4. Fiber Ribbon Kablolarda PMD'nin Esneme ile Değişiminin İncelenmesinde Kullanılan Yöntem ve Cihazlar	29
3.4.5. Fiber Ribbon Kablolarda PMD'nin Titreşim ile Değişiminin İncelenmesinde Kullanılan Yöntem ve Cihazlar	30
3.4.6. Fiber Ribbon Kablolarda PMD'nin Sıcaklıkla Değişiminin İncelenmesinde Kullanılan Yöntem ve Cihazlar	31
3.5. Spinli Fiberlerdeki PMD Deneyleri	32
3.5.1. Giriş	32
3.5.2. Fiberin Spinlenmesi ve Spin Tipleri	33
3.5.3. Sabit Spinli Fiberlerde PMD'nin Harici Bükme Oranı ile Değişiminin İncelenmesinde Kullanılan Yöntem ve Deney Koşulları	35
3.5.4. Sinüsoidal Spinli Fiberlerde PMD'nin Harici Bükme Oranı ile Değişiminin İncelenmesinde Kullanılan Yöntem ve Deney Koşulları	36
<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI</b>	<b>38</b>
4.1. Sabit Çözümleyici Tekniği ve Jones Matrisi Yöntemiyle Elde Edilen Benzetim Sonuçları	38

4.2. G.652 Standard Haberleşme Fiberlerindeki PMD Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar	43
4.2.1. Çiftkırılma ve Polarizasyon Mod Kuplajının PMD'ye Etkisiyle İlgili Sonuçlar	43
4.2.2. G.652 Standard Haberleşme Fiberinde PMD'nin Sıcaklık ile Değişimi Gösteren Sonuçlar	48
4.2.2.1. Adiabatik Rejimde Elde Edilen Sonuçlar	48
4.2.2.2. İzotermal Rejimde Elde Edilen Sonuçlar	49
4.3. Fiber Ribbon Kablolardaki PMD Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar	52
4.3.1. Fiber Ribbon Kablolarda Anlık PMD Ölçümleri ve PMD'nin Ribbon Kalınlığı ile Değişimini Gösteren Sonuçlar	52
4.3.2. Fiber Ribbon Kablolarda PMD'nin Mekanik Test Koşullarıyla Değişimini Gösteren Sonuçlar	55
4.3.3. Fiber Ribbon Kablolarda PMD'nin Esneme ile Değişimini Gösteren Sonuçlar	56
4.3.4. Fiber Ribbon Kablolarda PMD'nin Titreşim ile Değişimini Gösteren Sonuçlar	57
4.3.5. Fiber Ribbon Kablolarda PMD'nin Sıcaklıkla Değişimini Gösteren Sonuçlar	58
4.4. Spinli Fiberlerde PMD'nin Fibere Uygulanan Harici Bükme Oranı ile Değişimini Gösteren Sonuçlar	62
4.4.1. Sabit Spinli Fiberlerde PMD'nin Harici Bükme Oranı ile Değişimini Gösteren Sonuçlar	62
4.4.2. Sinüsoidal Spinli Fiberlerde PMD'nin Harici Bükme Oranı ile Değişimini Gösteren Sonuçlar	64
<b>5. TARTIŞMA</b>	<b>75</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>81</b>

<b>EKLER</b>	89
EK-1 DENEYLERDE KULLANILAN AYARLI LAZERLERİN TEKNİK ÖZELLİKLERİ	89
EK-2 PAT9000F PMD/PDL ÇÖZÜMLEYİCİNİN TEKNİK ÖZELLİKLERİ	93
EK-3 ACTERNA MTS-8000 TESTER CİHAZININ TEKNİK ÖZELLİKLERİ	96
<b>TEŞEKKÜR</b>	97
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	98



## SİMGELER DİZİNİ

$\alpha_0$	-	Spin genliği
$\delta\beta_C$	-	Dairesel çiftkırılma
$\delta\beta_L$	-	Doğrusal çiftkırılma
$D_{PMD}$	-	PMD parametresi
$\Delta\tau$	-	Diferansiyel grup gecikmesi (DGD)
$\langle\Delta\tau\rangle$	-	Ortalama diferansiyel grup gecikmesi
$\gamma_{rms}$	-	Etkin spin oranı
$h$	-	Polarizasyon mod kuplaj uzunluğu
$\Lambda$	-	Spin periyodu
$\mathbf{\Omega}(\omega)$	-	PMD vektörü

## KISALTMALAR DİZİNİ

BER	-	Bit Hata Oranı
DGD	-	Diferansiyel Grup Gecikmesi
DOP	-	Polarizasyon Derecesi
DSF	-	Kaydırılmış Dispersiyonlu Fiber
EDF	-	Erbiyum Katkılı Fiber
EDFA	-	Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendirici
ISI	-	Semboller Arası Girişim
ITU-T	-	Uluslararası Telekomünikasyon Birliği- Telekomünikasyon
JMM	-	Jones Matrisi Yöntemi
NZDF	-	Dispersiyonu Sıfırdan Farklı Fiber
PDL	-	Polarizasyona Bağlı Kayıp
PMD	-	Polarizasyon Mod Dispersiyonu
PSP	-	Polarizasyonun Temel Durumları
SOP	-	Polarizasyon Durumu
TDM	-	Zaman Bölmeli Çoğullama
WDM	-	Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Çiftkırılma nedeniyle oluşan darbe bölünmesi	9
Şekil 2.2	Normalize diferansiyel grup gecikmesinin olasılık yoğunluk fonksiyonu	10
Şekil 3.1	Sabit çözümleyici tekniği ölçme düzeneği	12
Şekil 3.2	Jones matrisi yöntemi ölçme düzeneği	14
Şekil 3.3	Poincare küresi üzerinde SOP gösterimi	15
Şekil 3.4	PMD'nin çıkış SOP'sine etkisi	16
Şekil 3.5	Çıkış SOP'sinin değişimi (a) Uniform çiftkırılmalı kısa fiber parçasında (b) Rasgele çiftkırılmalı uzun fiberde	17
Şekil 3.6	Temel interferometrik PMD ölçme düzeneği	18
Şekil 3.7	Benzetimlerde kullanılan uzak mesafe iletişim sistemi modeli	20
Şekil 3.8	Deneylerde kullanılan NZDF ribbon kablo yapıları	27
Şekil 3.9	Gerilme testi düzeneği	29
Şekil 3.10	Esneme testi düzeneği	30
Şekil 3.11	Titreşim testi düzeneği	30
Şekil 3.12	Değişik tiplerdeki fiber spin profilleri	34
Şekil 4.1	Kısa fiberde sabit çözümleyici tekniği ile elde edilen iletim spektrumu	38
Şekil 4.2	Kısa fiberde Jones matrisi metodu ile elde edilen diferansiyel grup gecikmesi	39
Şekil 4.3	Uzun fiberde sabit çözümleyici tekniği ile elde edilen iletim spektrumu	39
Şekil 4.4	Uzun fiberde Jones matrisi yöntemi ile elde edilen diferansiyel grup gecikmesi değişimi	40
Şekil 4.5	1600 km'lik EDFA sisteminde sabit çözümleyici yöntemi kullanılarak elde edilen benzetim sonuçları	41
Şekil 4.6	1600 km'lik EDFA sisteminde Jones matrisi yöntemi kullanılarak elde edilen benzetim sonuçları	42
Şekil 4.7	Makaralara sarılı (siyah çubuklar) ve döşenmiş (gri çubuklar) fiber kablolarda ölçülen PMD değerleri	44

Şekil 4.8	30°C (düz), 25°C (kesikli) ve 20°C (noktalı çizgi) sıcaklıklarda PMD spektrumları	45
Şekil 4.9	PMD spektrumundaki dalgaboyu kayması	46
Şekil 4.10	Adiyabatik rejimde B fiberi için PMD dağılımı	48
Şekil 4.11	Adiyabatik rejimde B fiberi için PMD dalgaboyu spektrumu	49
Şekil 4.12	İzotermal rejimde B fiberi için PMD dağılımı	50
Şekil 4.13	İzotermal rejimde B fiberi için PMD dalgaboyu spektrumu	51
Şekil 4.14	45 °C (daire noktalı eğri) ve 48 °C (kare noktalı eğri) sıcaklıkta A fiberinin PMD dalgaboyu spektrumu	52
Şekil 4.15	Fiber ribbon PMD değerleri	54
Şekil 4.16	Esneme testinde gözlenen DGD değişimi	56
Şekil 4.17	Esneme testinde elde edilen DGD değişimi dağılımı	56
Şekil 4.18	Titreşim testinde gözlenen DGD değişimi	57
Şekil 4.19	Titreşim testinde elde edilen DGD değişimi dağılımı	58
Şekil 4.20	Ortam sıcaklığındaki değişimlerin PMD'ye etkisi (birinci halka)	59
Şekil 4.21	Ortam sıcaklığındaki değişimlerin PMD'ye etkisi (ikinci halka)	60
Şekil 4.22	Açık alan testinde PMD değişimi	61
Şekil 4.23	7.1 tur/m sabit spin oranlı fiberde PMD'nin harici bükme oranı ile değişimi	62
Şekil 4.24	3.4 tur/m sabit spin oranlı fiberde PMD'nin harici bükme oranı ile değişimi	63
Şekil 4.25	0.5 tur/m, 2.8 tur/m ve 4.0 tur/m sabit spin oranlı fiberlerde PMD'nin harici bükme oranı ile değişimi	64
Şekil 4.26	Harici bükme uygulanan DSF1'de DGD değişimi	65
Şekil 4.27	Harici bükme uygulanan DSF2'de DGD değişimi	65
Şekil 4.28	Harici bükme uygulanan DSSF1'de DGD değişimi	67
Şekil 4.29	Harici bükme uygulanan DSSF2'de DGD değişimi	67
Şekil 4.30	DSSF2 ile aynı kütükten üretilmiş 1.1 tur/m etkin spin oranlı fibere uygulanan harici bükme altında DGD değişimi	68
Şekil 4.31	DSSF2 ile aynı kütükten üretilmiş 4.4 tur/m etkin spin oranlı fibere uygulanan harici bükme altında DGD değişimi	69

Şekil 4.32	DSSF2 ile aynı kütükten üretilmiş 8.9 tur/m etkin spin oranlı fibere uygulanan harici bükme altında DGD değişimi	69
Şekil 4.33	DSSF2 ile aynı kütükten üretilmiş 17.8 tur/m etkin spin oranlı fibere uygulanan harici bükme altında DGD değişimi	70
Şekil 4.34	DSSF1 ile aynı kütükten üretilmiş 1.1 tur/m etkin spin oranlı fibere uygulanan harici bükme altında DGD değişimi	71
Şekil 4.35	DSSF1 ile aynı kütükten üretilmiş 4.4 tur/m etkin spin oranlı fibere uygulanan harici bükme altında DGD değişimi	72
Şekil 4.36	DSSF1 ile aynı kütükten üretilmiş 8.9 tur/m etkin spin oranlı fibere uygulanan harici bükme altında DGD değişimi	72
Şekil 4.37	DSSF1 ile aynı kütükten üretilmiş 17.8 tur/m etkin spin oranlı fibere uygulanan harici bükme altında DGD değişimi	73
Şekil E-1.1	Agilent 81480/640/680A ayarlı lazerlerin dış görünüşü	89
Şekil E-2.1	PAT9000F PMD/PDL çözümleyicinin dış görünüşü	93
Şekil E-2.2	PAT9000F ile kurulan PMD ölçüm düzeneği	95

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1	SiO <sub>2</sub> malzeme sabitleri	21
Çizelge 3.2	Deneylerde kullanılan TRFO-9b şartnamesine göre üretilmiş G.652 standard haberleşme fiberlerinin teknik özellikleri	24
Çizelge 3.3	Deneylerde kullanılan G.652 standard haberleşme fiberlerinin PMD karakteristikleri	25
Çizelge 3.4	NZDF kablonun optik ve geometrik karakteristikleri	26
Çizelge 3.5	Deney kablolarının geometrik parametreleri	27
Çizelge 3.6	Deneylerde kullanılan fiberlerin çift kırılma karakteristikleri	37
Çizelge 4.1	Uzun ( <i>L</i> ) ve kısa ( <i>S</i> ) fiberlerin ölçülen DGD ve PMD değerleriyle hesaplanan polarizasyon mod kuplaj uzunlukları ( <i>h</i> )	44
Çizelge 4.2	Fiber ribbon kablolarda ölçülen anlık PMD değerleri (ps/km <sup>1/2</sup> )	53
Çizelge 4.3	Fiber ribbonlarda ölçülen PMD değerleri (ps/km <sup>1/2</sup> )	54
Çizelge 4.4	Fiber ribbon kablolarda mekanik test koşullarında gözlenen DGD değişimi (ps)	55
Çizelge E-1.1	Agilent 81480A ayarlı lazerin teknik özellikleri	90
Çizelge E-1.2	Agilent 81640A ayarlı lazerin teknik özellikleri	91
Çizelge E-1.3	Agilent 81680A ayarlı lazerin teknik özellikleri	92
Çizelge E-2.1	PAT9000F ile uyumlu ayarlı lazerler	93
Çizelge E-2.2	PAT9000F'in PMD ölçümüyle ilgili teknik özellikleri	94
Çizelge E-2.3	PAN9300FIR polarizasyon ölçerin teknik özellikleri	95
Çizelge E-3.1	Acterna MTS-8000 Tester cihazının teknik özellikleri	96

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Dispersiyonun Optik Fiberli Haberleşme Sistemlerine Etkisi

Dünya üzerinde kurulu optik fiber tabanlı haberleşme sistemlerinin kanal kapasitesi, toplam kablolu haberleşme sistemlerinin kapasitesinin %80'ininden fazlasını teşkil eder. Optik fiberli sistemlerinin kurulduğu yıllarda (2000 öncesi) fiber üzerinden tek kanal veri iletim hızları 155 Mbit/s, 622 Mbit/s ve 2.5 Gbit/s idi. Ancak günümüzde 10 Gbit/s ve 40 Gbit/s iletim hızlı sistemler kullanılmakta ve 120 Gbit/s hızlı sistemler üzerinde çalışmalar sürmektedir. Mevcut sistemlerde, kullanıcı ihtiyaçları ve uygulama çeşitleri arttıkça veri iletim hızlarını daha yüksek hızlara çıkarmak için gerekli adaptasyonlar yapılmaktadır. Ancak bu adaptasyonlar sırasında, maliyetin çok yüksek olması nedeniyle iletim ortamı olan optik fiberler yenilenmeden mevcut optik fiberler kullanılmaktadır. Bu durumda, 'yaşlı' optik fiberlerde, üretildikleri yıllardaki düşük iletim hızları nedeniyle uygulamada problem oluşturmayan faktörler, iletim hızları yükseldikçe haberleşme sistemindeki bit hata oranının (BER) artmasına sebep olmaktadır.

Optik fiberde iletim kapasitesini sınırlayan temel etkenlerden biri dispersiyondur. Dispersiyon nedeniyle oluşan darbe genişlemesi, iletişim sisteminde semboller arası girişimin (ISI) meydana gelmesine ve BER'in artmasına sebep olur. 2.5 Gbit/s sistemlerde lazer vericideki modülasyon, dispersiyonu kontrol edebilecek şekilde spektral genişliği belirler. Ancak 10 Gbit/s sistemler birkaç yüz kilometrenin ötesindeki uzaklıklarda dispersiyon kompanzasyonuna ihtiyaç duyarlar. 40 Gbit/s sistemlerde ise kompanzasyon ihtiyacı çok daha kısa mesafelerde ortaya çıkar. Örneğin, 2.5 Gbit/s hızındaki işaretleri kompanzasyon olmaksızın 1000 km'ye kadar iletebilen bir fiber, 40 Gbit/s hızında ancak 4 km'ye kadar kompanzasyonsuz iletim yapabilir (Dutton 1998).

Tek modlu fiberde kromatik dispersiyon ve polarizasyon mod dispersiyonu (PMD) olmak üzere iki tip dispersiyon mevcuttur.

Kromatik dispersiyon, optik fiberde iletilen ışığın hızının dalgaboyuna bağlılığından kaynaklanmaktadır. Kromatik dispersiyon, malzeme dispersiyonu ve dalga kılavuzu dispersiyonu bileşenlerinden oluşur. Malzeme dispersiyonu, kırılma

indisinin dalgaboyuyla değişmesinden meydana gelir. Dalga kılavuzu dispersiyonu ise ışığın fiber çekirdeği ile fiber kılıfı arasında dağılmasıyla ortaya çıkar. Kromatik, malzeme ve dalga kılavuzu dispersiyonu pozitif veya negatif işaretli olabileceği gibi, kromatik dispersiyon bileşenlerinin birbirlerini sıfırlaması da mümkündür. Ayrıca, yüksek bit hızlı ve optik kuvvetlendiricili uzak mesafe iletişim sistemlerinde kromatik dispersiyon etkilerini en aza indiren kompanzasyon teknikleri de mevcuttur (Kashyap ve ark. 1994, Quetel ve ark. 1997, Pan ve ark. 2002). Dolayısıyla kromatik dispersiyon PMD'ye göre daha büyük değerlerde olmasına rağmen daha kolaylıkla kompanze edilebilir.

PMD, tek modlu dairesel simetrik fiberin aslında birbirine dik iki mod iletmesinden kaynaklanan istatistiksel bir etki olup fiber uzunluğunun karekökü ile doğru orantılıdır ve birimi  $ps / \sqrt{km}$ 'dir. PMD 1970'lerden beri bilinen bir dispersiyon türüdür. O zamanın düşük veri hızları nedeniyle pratik uygulamaları belirgin biçimde etkilemeyen PMD, günümüzde 5 Gbit/s'den yüksek optik iletim hızlarında, tek modlu fiberdeki darbe genişlemesinin ve alıcıda elde edilen güç seviyesindeki azalmaların temel sebebidir. Sayısal iletişimi etkilememesi için, PMD sistemdeki bitler arası boşluğun % 10'unundan fazla olmamalıdır. Yani, 10 Gbit/s veri hızlı sistemde, uçtan uca PMD en fazla 10 ps olmalıdır. Başka bir deyişle 100 km uzunluğundaki fiberde maksimum PMD  $1 ps / \sqrt{km}$  olmalıdır. Ayrıca, PMD, kromatik dispersiyona göre daha küçük değerlerde olmasına rağmen kompanzasyonu çok daha zordur (Dutton 1998).

## 1.2. Problemin Tanımı

Doktora tez çalışmasını ortaya çıkaran problem, bir firmanın 1990'lı yılların başlarında ürettiği optik fiberli kablolarla kurulan ve başlangıçta 622 Mb/s ve 2.5 Gb/s veri iletim hızlarında sorunsuz çalışan sistemlerde 5 Gb/s'nin üzerindeki hızlara çıkıldığında ISI ve dolayısıyla BER değerlerinin % 10'lara varan artışlar göstermesidir. Yapılan incelemeler sonucunda problemin nedeninin optik fiberlerdeki PMD olduğu bulunmuştur. PMD'nin haberleşme sistemlerine etkisinin azaltılması gerekmektedir.

PMD'nin haberleşme sistemlerine etkisini azaltmada iki yöntem kullanılır. Birinci yöntem PMD kompanzasyonu, ikinci yöntem ise fiberin ve kablonun üretim sürecinde düşük PMD değerinin sağlanmasıdır.

Kurulu sistemler için uygulanacak yöntem PMD kompanzasyonudur. Ancak kompanzasyon bir yandan PMD'yi azaltırken bir yandan da sistemin karmaşıklığını ve gecikmeyi de arttırmaktadır. Ayrıca sistemdeki veri iletim hızı arttırıldıkça, kompanzatörlerin de değiştirilmesi ya da yeni iletim hızına göre ayarlanması gerekir.

Yeni kurulan sistemlerde kompanzasyona ilave olarak düşük PMD değerlerine sahip fiberlerin kullanılması konusunda çalışmalar yapılmaktadır (Galtarossa ve ark. 2001, Nolan ve ark. 2004).

Tez çalışmasında, PMD, hem mevcut haberleşme sistemleri hem de yeni kurulacak haberleşme sistemleri açısından incelenmiştir. Öncelikle, Türk Telekomünikasyon A.Ş. TRFO-9b Fiber Optik Kablo Şartnamesi'ne göre üretilmiş G.652 standard haberleşme fiberi ve fiber ribbonlarla kurulmuş sistemlere uygulanacak kompanzasyon yöntemlerinin ihtiyaç duyduğu ortam koşullarının PMD üzerindeki etkisine ilişkin veriler deneysel olarak bulunmuştur. Daha sonra, yeni kurulacak sistemler için geliştirilen sabit ve sinüsoidal spinli fiberlerde PMD değerini minimuma indirecek çözüm yolları araştırılmış ve her ikisi için önerilerde bulunulmuştur.

Doktora tezinin ikinci bölümünde PMD hakkında yapılan kaynak araştırması ve PMD ile ilgili kuramsal bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, deneylerde kullanılan yöntemler, cihazlar ve fiber türleri açıklanmıştır. Dördüncü bölümde ise elde edilen sonuçlar sunulmuş ve yorumlanmıştır.



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI ve KURAMSAL BİLGİLER

### 2.1. Kaynak Araştırması

Poole ve Wagner'in (1986) tek modlu fiberlerdeki polarizasyon mod dispersiyonunu açıklayan ilk çalışmasının ardından, PMD'nin teorik ve deneysel temellerini geliştiren çok sayıda makale yayınlanmıştır.

Andresciani ve arkadaşları (1987) polarizasyonun temel durumları (PSP) arasındaki grup gecikmesi farkının ölçülmesini konu alan makalelerinde, DGD'nin bir olasılık yoğunluk fonksiyonu şeklinde ifade edilebileceğini belirtmişlerdir. Poole ve arkadaşları (1991), bu fonksiyonun teoride Maxwell olasılık yoğunluk fonksiyonu biçiminde olması gerektiğini ispatlamışlardır. Bu ispatın temelini, Curti ve arkadaşlarının (1990) tek modlu fiberlerde PSP'lerin oluşumunu istatistiksel açıdan analiz ettikleri çalışmaları oluşturmuştur.

Gisin ve arkadaşları (1993), PMD'nin istatistiksel özelliklerini polarimetrik ve interferometrik ölçüm tekniklerini kullanarak deneysel anlamda incelemişlerdir. Bu çalışmadaki önemli bir bulgu, dalgaboyundaki ufak değişimlerin PMD'de büyük değişimlere sebep olduğu ve bu durumun istatistiklerin uzun vadedeki kararlılığıyla ters düştüğüdür.

Suetsugu ve arkadaşları (1995), PMD'nin, hem fiber hem de ortalama kuplaj uzunluğuna bağlılığının kareköksel olduğunu deneysel anlamda kanıtlamışlardır.

PMD karakterizasyonu ilk defa polarizasyona duyarlı gerisaçılma teknikleri kullanılarak Corsi ve arkadaşları (1998) tarafından gerçekleştirilmiştir. Burada, gerisaçılan işaretin polarizasyon durumundaki değişimin ileri yöndeki işaretin polarizasyon durumuyla bağlantılı olduğu gösterilmiştir. Çalışmada kullanılan teknikle DGD'nin, darbe uzunluğunun ve korelasyon uzunluğunun aynı anda ölçülmesi mümkün olmuştur. Elde edilen en önemli bulgu, sadece ileri yöndeki Maxwell dağılımlı DGD'ye kıyasla ileri ve geri yöndeki toplam DGD'nin Rayleigh dağılımına sahip olduğudur. Bu noktadan hareketle, toplam ortalama DGD'yi ileri yöndeki ortalama DGD'ye bağlayan basit bir bağıntı türetilmiştir.

Dal Forno ve arkadaşları (2000), ilk defa farklı ortam koşullarının PMD'ye etkisi üzerinde durmuştur. Ancak değişken ortam koşulu olarak sadece sıcaklıkla

ilgilenmiş ve sadece kuplaj noktalarındaki sıcaklık dağılımının benzetimiyle yetinip herhangi bir deneysel çalışmada bulunmamışlardır.

PMD'nin teorik ve deneysel modellemesini geliştiren çalışmaların artması, PMD'nin ölçülmesiyle ilgili metotlar sunan yayınlara da belirli bir ivme kazandırmıştır.

Heffner (1992, 1993), Jones tarafından bulunan bir yöntemden (Jones 1941) yola çıkarak, PMD ölçümlerinde yaygın olarak kullanılan Jones matrisi yöntemini (JMM) geliştirmiştir. Çıkış polarizasyon durumunun (SOP) dalgaboyuna göre ölçüldüğü JMM'de, farklı dalgaboylarında fiberin Jones matrisini hesaplamak için, önceden belirlenmiş giriş SOP'leri kümesi kullanılmaktadır. Matristeki bileşenlerin frekansa göre türevlerinden DGD hesaplanır. Bu teknik, doğrusal iletim özelliklerinin frekansa bağlı Jones matrisi tarafından belirlenmesi yoluyla fiberin karakterizasyonunu tam olarak gerçekleştirir. Birçok ticari cihaz bu tekniği kullanmaktadır.

Gisin ve arkadaşlarının (1996) geliştirdikleri, PMD'nin yüksek doğrulukla ölçülmesini sağlayan metodu temel alan çok sayıda interferometrik (Bock ve ark. 1997, Oberson ve ark. 1997, Olsson ve ark. 1998) ve gerisaçılımlı (Corsi ve ark. 1999, Sunnerud ve ark. 2000) uygulama gerçekleştirilmiştir.

PMD'nin teorik ve deneysel modellemesinin yanısıra, farklı ölçüm metodları da geliştirildiğinden, polarizasyon mod dispersiyonunun iletişim sistemlerine etkisiyle ilgili çalışmalar yoğunlaşmıştır. Garcia ve arkadaşları (1996), alıcıda PMD'den kaynaklanan güç azalmasının formülünü, diferansiyel grup gecikmesinin, verici yükselme/düşme sürelerinin, alıcı parametrelerinin ve kuvvetlendirici gürültüsünün fonksiyonu biçiminde elde etmişlerdir. Böylece, polarizasyon mod dispersiyonunun ortam koşullarından da etkilendiğini teorik anlamda ispatlamış oldular.

Özellikle 1995'ten sonra, farklı yüksek hızlı optik sistemler (pilot taşıyıcılı evreuyumlu (koherent) optik sistemler, WDM sistemleri, vb.) üzerindeki PMD etkisini inceleyen çok sayıda makale yayınlanmıştır (Ciprut ve ark. 1998, Sarkimukka ve ark. 2000, Khosravani ve Willner 2001, Chongjin ve ark. 2001). Ancak bu çalışmalarda daha çok teorik ve sayısal analizler yapılmış, elde edilen sonuçlar deneylerle desteklenmemiştir. Ayrıca değişen ortam koşulları (sıcaklık, fiber kırılma indisi değişimleri, mekanik zorlanma, vb.) analizlerde pek dikkate alınmamıştır. Elde edilen ortak sonuç, PMD'nin BER'i önemli ölçüde etkilediğidir.

Savory ve Payne (2001), belirli bir sistem seçmek yerine genel bir iletişim sistemi yaklaşımıyla polarizasyon mod dispersiyonlu fiberdeki darbe yayılımını incelemiş, Jones matrisi metodu yerine Marcuse perturbasyon yöntemini kullanarak fiberin transfer fonksiyonunu verecek kısmi diferansiyel denklemler elde etmişlerdir. PMD'nin iletilen darbe genişliğine ve göz diyagramlarındaki kısılmalara etkisi de analiz edilmiştir. Ancak yazarların da ifade ettikleri gibi, bu çalışmada ortam koşullarındaki değişimler ihmal edilmiştir. Bu nedenle, elde edilen sonuçlar, farklı ortam koşullarında ancak bir düzeltme faktörünün denklemlere eklenmesiyle geçerli olacaktır.

Polarizasyon mod dispersiyonunun çevre koşullarına bağlılığıyla ilgili önemli çalışmalardan biri Passy ve arkadaşlarının (1992) yüksek çiftkırılmalı fiberlerdeki PMD'nin basınca bağlılığını inceledikleri yayınlardır. Ancak bu yayında, sadece hidrostatik basıncın PMD üzerindeki etkisi hem deneysel hem de sayısal açıdan ele alınmıştır. Bu nedenle elde edilen bulgular, sadece denizaltı fiber optik sistemlerine uygulanabilmektedir.

Cameron ve arkadaşları (1998), çevresel değişimlerden kaynaklanan PMD değişimlerinin, optik fiberli haberleşme sistemleri için önemli bir sorun oluşturduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada, havai, gömülü ve makaraya sarılı fiberlerdeki PMD'nin zamanla değişimi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, fiber sıcaklığındaki değişimin PMD'de dalgalanmaya yol açtığı ve bu dalgalanma oranının sıcaklıktaki değişim oranını izlediği şeklindedir.

Yüksek hızlı uzak mesafe ağların yanısıra şehiriçi abone hatlarında da önemli bir alternatif haline gelen dispersiyonu sıfırdan farklı fiber (NZDF) ribbon kabloların PMD performanslarının tespitine yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Galtarossa ve ark. 1994, 1997). Ancak bu çalışmalarda, kablo kurulumu sırasında ortaya çıkabilecek mekanik koşullar ile esneme ve titreşim gibi çevresel koşullardaki değişimlerin PMD üzerindeki etkisine değinilmemiştir.

Buryk ve arkadaşları (2004), Polonya da 1996 yılından önce döşenmiş ve dolayısıyla döşeme sırasında herhangi bir PMD testi uygulanmamış havai fiber kablolar üzerinde  $-40^{\circ}\text{C}$  -  $+60^{\circ}\text{C}$  sıcaklık aralığında PMD ölçümleri yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar her ne kadar Uluslararası Telekomünikasyon Birliği'nin (ITU-T) G-652 fiberleri için belirlediği PMD değerleri dahilinde bulunsa da, belirgin bir sıcaklık-PMD ilişkisi gözlenmiştir.

Nellen ve arkadaşları (2004), İsviçre Alpleri'ndeki havai fiber kablolarda uzun süreli PMD ölçümleri yapmışlar ve elde edilen sonuçları istatistiki yöntemlerle değerlendirmişlerdir. DGD ile hava koşulları arasında belirgin bir korelasyon bulmuşlardır.

Waddy ve arkadaşları (2005), yaklaşık 53 km uzunluklu birleştirilmiş havai-yer altı optik fiberli sistemin PMD'sini incelemiş olup sıcaklık değişimi ve rüzgar gibi çevresel koşulların sistem PMD'sini etkilediğini gözlemlemişlerdir.

Heismann (2004), yüksek DGD değerlerine sahip fiberlerde PMD'nin frekansa bağlılığını sayısal bir yöntemle incelemiştir. Ortalama frekansa bağlılığın bağlı optik frekans-ortalama DGD çarpımıyla ilişkili olduğunu bulmuştur.

PMD'nin kompanzasyonu ve uygun kompanzatörlerin geliştirilmesi konusunda da çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Merker ve ark. 2000, Zhang ve ark. 2002, Miao ve ark. 2003, Madsen ve ark. 2004, Lanne ve Corbel 2004, Lima ve ark. 2004, Alzetta ve Matsumoto 2004, Karlık ve ark. 2005 a, Ning ve ark. 2005, Shieh ve Dods 2005). Bu çalışmalar uygun kompanzasyon yöntemini ve kompanzatörü oluştururken ortam koşullarının PMD üzerindeki etkisiyle ilgili verilere ihtiyaç duymaktadır.

Yapılan kaynak araştırmasında, PMD ile ilgili araştırmaların aşağıda gösterildiği gibi gruplanabileceği saptanmıştır.

- PMD karakterizasyonu ve modellemesi
- PMD ölçümü ve ölçme teknikleri geliştirilmesi
- PMD'nin haberleşme sistemlerine etkisinin analizi
- PMD benzetim yöntemlerinin geliştirilmesi ve benzetici tasarımları
- PMD kompanzasyon yöntemleri ve kompanzatörlerin geliştirilmesi
- PMD'li haberleşme sistemlerine etki eden unsurların analizi

Ancak literatürdeki çalışmaların genellikle teorik ve sayısal analizlerle sınırlandırıldığı, elde edilen sonuçların deneylerle yeterince desteklenmediği görülmüştür. Bu durumun temel nedeni PMD'yi meydana getiren unsurların rasgele süreçler olmasıdır. Dolayısıyla güvenilir sonuçlara ulaşabilmek için çok sayıda ölçüm yapılması ve bu ölçümlerin istatistiki değerlendirmelere tabi tutulması gerekir. Ayrıca ölçümlerde kullanılacak cihazlar da pahalıdır ve özellikle kurulu sistemler üzerinde gerçekleştirilecek ölçümlerde onlarca kilometre mertebesinde uzak mesafeler söz

konusudur. Yani deneysel çalışmalar, çok zaman harcamayı ve güçlü bir finansmanı gerektirmektedir.

Deneysel çalışmaların azlığı nedeniyle, ortam koşullarındaki değişimlerin (sıcaklık, fiber kırılma indisi, gerilme, esneme, bükülme, titreşim gibi çevresel ve mekanik koşullardaki değişimler) PMD üzerindeki etkileri de analizlerde nadiren ve genellikle sayısal modellemelerle ele alınmıştır. Bu durum, uygun iletişim sistemlerinin tasarımı açısından önemli bir eksikliklerdir.

Doktora tezinin amacı, bu gerekliliği yerine getirmek; PMD'nin yukarıda sözü edilen parametrelere bağlılığını deneysel olarak incelemek; deneysel sonuçların teorik sonuçlarla ne derecede örtüştüğünü belirlemek ve farklılıkları saptamaktır.

## 2.2. Kuramsal Bilgiler

Fiberin dairesel geometrisindeki bozulmalar ve kırılma indisinde yön bağıllığı (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 birbirine dik olup polarizasyonun temel durumları (PSP) veya öz durumlar şeklinde adlandırılırlar. PSP'ler, düzgün çiftkırılmalı fiber parçası için çiftkırılma eksenlerini (hızlı ve yavaş eksenler) oluştururlar. PMD'nin optik fiberdeki oluşumunu anlamak için, başlangıç olarak uzun bir fiberin düzgün çiftkırılmalı kısa bir parçasını incelemek gerekir. Tek modlu fiber, birçok rasgele çiftkırılmalı elemanın oluşturduğu bir bütün şeklinde modellenenir.

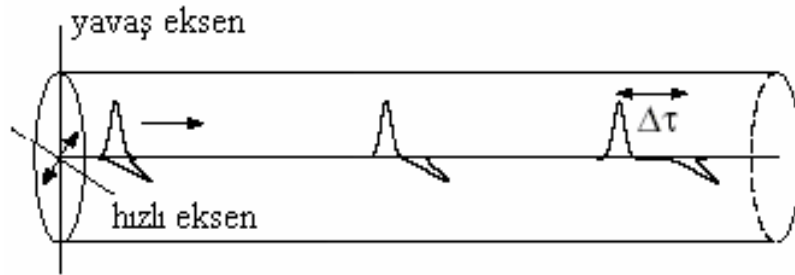
Optik fiberlerdeki çiftkırılma, kırılma indislerindeki farklılık biçiminde ifade edilebilir. Bu durumda, birbirine dik polarizasyon modları arasındaki yayılım sabiti farkı  $\Delta\beta$ ,

$$\Delta\beta = \beta_s - \beta_f = \frac{\omega n_s}{c} - \frac{\omega n_f}{c} = \frac{\omega \Delta n}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \quad (2.1)$$

şeklindedir. Burada  $\beta_s$  yavaş eksendeki yayılım sabitini,  $\beta_f$  hızlı eksendeki yayılım sabitini,  $\omega$  ışığın açısal frekansını,  $c$  boşluktaki ışık hızını,  $n_s$  yavaş eksendeki kırılma indisini,  $n_f$  hızlı eksendeki kırılma indisini,  $\Delta n = n_s - n_f > 0$  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 (özdurumlar) ayrıştırılabilir. 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, (2.1) formülündeki yayılım sabitlerinin frekansa göre türevinin alınması ile

$$\Delta\tau = \frac{L}{\Delta v_g} = \frac{d\Delta B}{d\omega} L = \left( \frac{\Delta n}{c} + \frac{\omega}{c} \frac{d\Delta n}{d\omega} \right) L \quad (2.2)$$

şeklinde elde edilir. Burada,  $\Delta v_g$  ortogonal modlar arasındaki grup hızı farkı ve  $L$  fiber uzunluğudur.  $\Delta\tau/L$  değeri, kısa bir fiber parçasında ps/km ile ifade edilirken, uzun fiberlerde fiber uzunluğunun karekökü ile orantılıdır. Şekil 2.1'de çiftkırılma nedeniyle oluşan darbe bölünmesi görülmektedir.



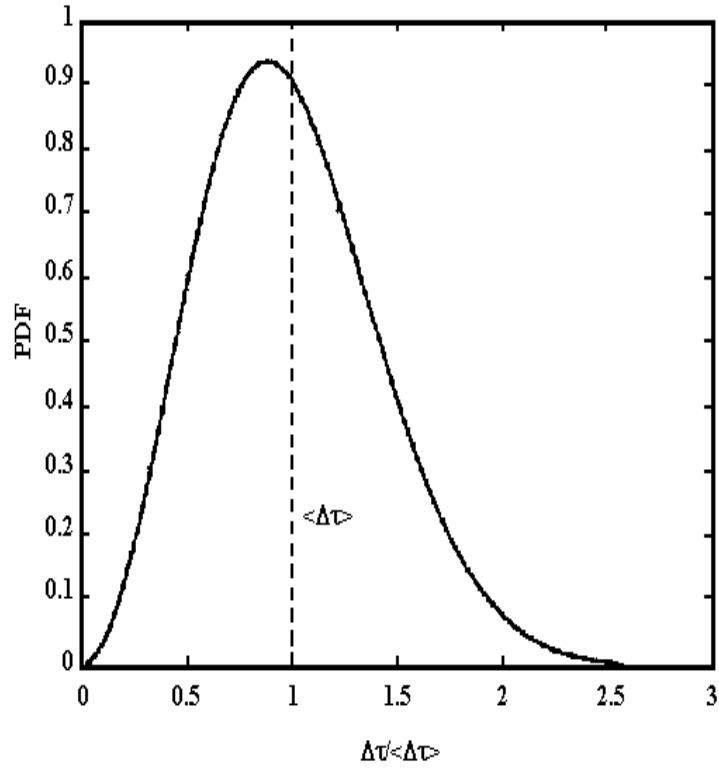
Şekil 2.1. Çiftkırılma nedeniyle oluşan darbe bölünmesi

Çok sayıda rasgele çiftkırılmalı elemandan oluşan tek modlu bir fiberin  $\Delta\tau$  diferansiyel grup gecikmesi, teorik olarak Maxwell dağılımına sahiptir. Yani,

normalize DGD'nin olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF),  $\langle \Delta\tau \rangle$  ortalama diferansiyel grup gecikmesi ve  $x = \Delta\tau / \langle \Delta\tau \rangle$  olmak üzere,

$$f(x, \langle \Delta\tau \rangle) = \frac{32 \cdot x^2}{\pi^2 \langle \Delta\tau \rangle^3} \exp\left(-\frac{4 \cdot x^2}{\pi \langle \Delta\tau \rangle^2}\right) \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilebilir (Andresciani ve ark. 1987, Poole ve ark. 1991). Bu dağılım, Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Normalize diferansiyel grup gecikmesinin olasılık yoğunluk fonksiyonu (Poole ve ark. 1991)

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

(2.3) formülündeki  $\langle \Delta\tau \rangle$ , (2.4) formülüyle hesaplanabilir.

$$\langle \Delta\tau \rangle = D_{\text{PMD}} \sqrt{L} \quad (2.4)$$

Burada,  $D_{\text{PMD}}$ , ps /  $\sqrt{\text{km}}$  birimli PMD parametresi ve  $L$  fiber uzunluğudur (Suetsugu ve ark. 1995).



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. PMD Ölçüm Yöntemleri

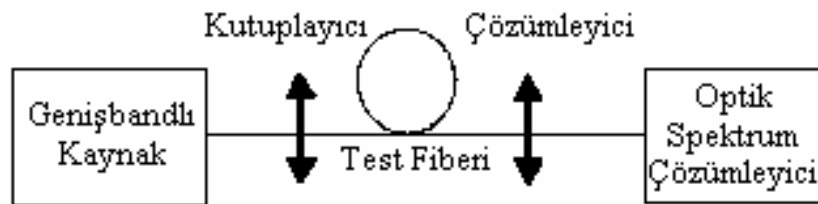
Literatürde çok sayıda PMD ölçüm yöntemi önerilmiştir (Galtarossa ve Palmieri 2004, Roberge ve ark. 2004, Westbrook ve ark. 2004, Kun ve ark. 2003, Simova ve ark. 2002, Zou ve ark. 2002, Galtarossa ve ark. 2000, Huttner ve ark. 1999, Song ve ark. 1999, Ravet ve ark. 1998, 1997, Chowdhury ve Chen 1996, Dudley ve Murdoch 1996, Martin ve ark. 1996, Villuendas ve ark. 1995, Namihira ve ark. 1993). Ancak bu yöntemler, genelde dört temel yöntemden türetilmiştir. Bu dört temel yöntem şunlardır:

- Sabit çözümleyici yöntemi
- Jones matrisi yöntemi
- Poincare küresi yöntemi
- İnterferometrik yöntem

Jones matrisi yöntemi ve Poincare küresi yöntemi polarimetrik yöntemler olarak da adlandırılırlar. Bu bölümde dört temel yöntem ayrı ayrı açıklanmış ve sonuçta yöntemler karşılaştırılmıştır.

##### 3.1.1. Sabit Çözümleyici Yöntemi

Optik fiberlerde ortalama DGD'yi ölçmek için en basit ve en çok kullanılan yöntem sabit çözümleyici yöntemidir. Bu yöntemin ölçme düzeneği Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1. Sabit çözümleyici yöntemi ölçme düzeneği

Bu yöntemde, genişbandlı polarize ışık test fiberinden geçirilir ve çıkıştaki optik spektrum çözümleyiciden iletim spektrumu elde edilir. Fiber boyunca farklı dalgaboyları 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

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{N_e \lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)c} = \frac{N_m \lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)c} \quad L < L_C \quad (3.1)$$

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

$$\begin{cases} \langle \Delta\tau \rangle = 0.824 \frac{N_e \lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)c} \\ \langle \Delta\tau \rangle = 2 \frac{N_m \lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)c} \end{cases}, \quad L \gg L_C \quad (3.2)$$

formülleri kullanılarak ortalama DGD bulunabilir. (3.1) ve (3.2) formüllerinde,  $\lambda_1$  ve  $\lambda_2$  ölçümlerin gerçekleştirildiği minimum ve maksimum dalgaboyları,  $c$  boşluktaki ışık hızı,  $L$  test fiberinin uzunluğudur. (3.2) formülündeki 0.824 katsayısı Monte Carlo benzetimleriyle elde edilmiştir (Poole ve Favin 1994).

(3.1) ve (3.2) 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.

### 3.1.2. Jones Matrisi Yöntemi

Doğrusal bir optik elemanın polarizasyona etkisi, matematiksel olarak  $2 \times 2$  boyutlu kompleks bir Jones matrisi ( $A$ ) kullanılarak açıklanabilir.  $A$  matrisi, (3.3)'te verilen eşitliğe göre, giriş polarizasyon durumunu çıkış polarizasyon durumuna dönüştürür.

$$\mathbf{j}_{\text{çıkış}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{j}_{\text{giriş}} \quad (3.3)$$

Polarizasyona bağlı kayıpların olmadığı çiftkırılmalı ortamda, frekansa bağlı Jones matrisi

$$A(\omega) = \begin{pmatrix} a(\omega) & b(\omega) \\ -b^*(\omega) & a^*(\omega) \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

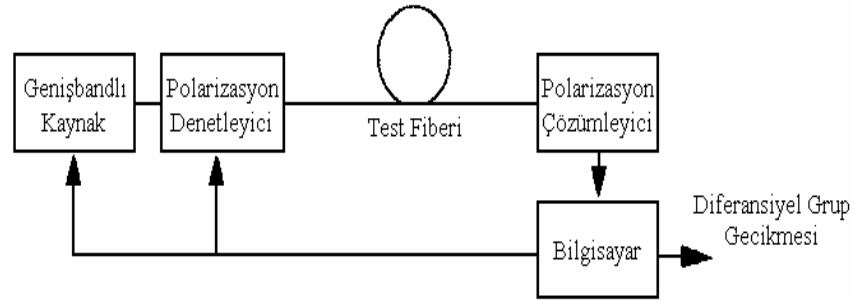
ile ifade edilir. Burada,  $a(\omega)$  ve  $b(\omega)$  ışığın açısal frekansının kompleks fonksiyonları,  $a^*$  ve  $b^*$  sırasıyla  $a$ 'nın ve  $b$ 'nin kompleks eşleniği olup  $|a|^2 + |b|^2 = 1$  eşitliği mevcuttur.

Çıkış SOP'sinin dalgaboyuna göre ölçüldüğü Jones matrisi yönteminde (JMM), farklı dalgaboylarında fiberin Jones matrisini hesaplamak için, önceden belirlenmiş giriş SOP'leri kümesi kullanılır (Heffner 1992, 1993). DGD, Jones matrisindeki bileşenlerin frekansa göre türevlerinden,

$$\Delta\tau(\omega) = 2\sqrt{|a'(\omega)|^2 + |b'(\omega)|^2} \quad (3.5)$$

formülüyle hesaplanır. Burada,  $a$  ve  $b$  (3.4) formülündeki Jones matrisi bileşenleri olup türevleri,  $a'(\omega) \approx [a(\omega) - a(\omega + \Delta\omega)] / \Delta\omega$  ve  $b'$  için de  $a'(\omega)$ 'ya 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 yöntemini kullanan ölçme düzeneği Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Jones matrisi yöntemi ölçme düzeneği

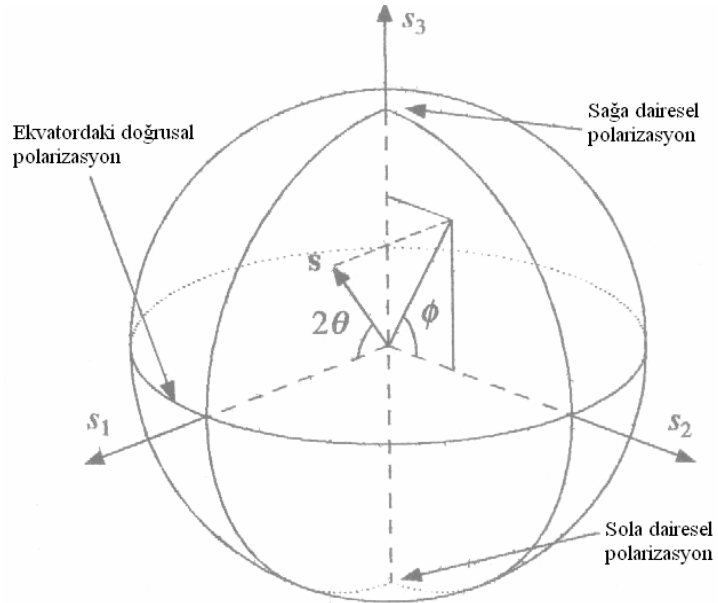
Şekil 3.2’de görüldüğü gibi, ölçme düzeneğinde ayarlı bir genişbandlı kaynak (lazer), polarizasyon denetleyici ve polarizasyon çözümleyici kullanılır. Her dalgaboyunda polarizasyon denetleyicisi taranır ve Jones matrisi yöntemi kullanılarak matematiksel hesaplamalar yapılır. Böylece bütün dalgaboylarındaki diferansiyel grup gecikmeleri elde edilir.

### 3.1.3. Poincare Küresi Yöntemi

Her SOP’nin, bir  $\mathbf{s}=[s_1, s_2, s_3]^T$  Stokes vektörünce belirlenen noktaya tekabül ettirilebildiği yüzeye sahip olan küreye Poincare küresi denir. Stokes vektörünün  $s_1, s_2, s_3$  bileşenleri

$$\begin{aligned} s_1 &= \cos 2\theta \\ s_2 &= \sin 2\theta \cos \phi \\ s_3 &= \sin 2\theta \sin \phi \end{aligned} \quad (3.6)$$

şeklinde tanımlanır. Şekil 3.3’te Poincare küresi üzerinde bir SOP gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Poincare küresi üzerinde SOP gösterimi

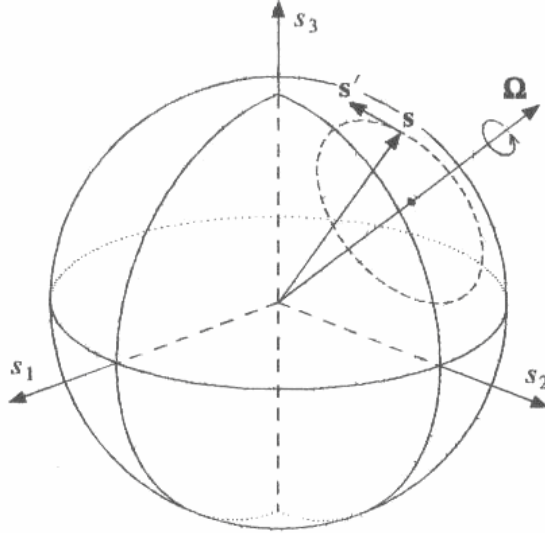
Doğrusal SOP'ler ekvatorda gösterilir ( $s_3 = 0$ ). Sağa dairesel polarizasyon ve sola dairesel polarizasyonlar, sırasıyla kuzey ( $s_3 = 1$ ) ve güney ( $s_3 = -1$ ) kutuplara yerleştirilir. Bu koordinat sisteminde, birbirine dik SOP'ler  $\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2 = -1$  eşitliğini sağlarlar.

Optik yoğunluk ( $s_0$ ), dördüncü bir Stokes parametresi olup tamamen polarize ışık için bu parametre  $s_0^2 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2$  ile hesaplanır.

PMD, taşıyıcı frekans değiştiğinde  $\mathbf{s}_{out}$  çıkış SOP'sinin etrafında döndüğü Stokes uzayında bir  $\mathbf{\Omega}(\omega)$  PMD vektörüyle karakterize edilir. Yani,

$$\mathbf{s}'_{out}(\omega) = \frac{d\mathbf{s}_{out}}{d\omega} = \mathbf{\Omega}(\omega) \times \mathbf{s}_{out} \quad (3.7)$$

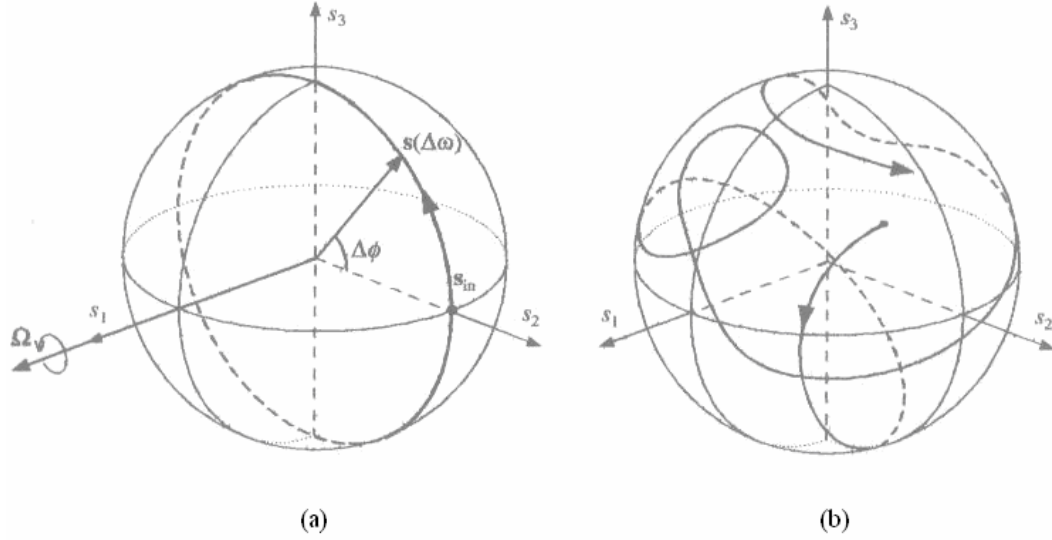
PMD vektörünün modülü DGD'yi verir. Yani,  $\Delta\tau = |\mathbf{\Omega}|$  ve PSP'ler de  $\pm \mathbf{\Omega}/|\mathbf{\Omega}|$  ile tanımlanır. PMD'nin çıkış SOP'sine etkisi Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. PMD'nin çıkış SOP'sine etkisi

Düzenli çiftkırılmalı fiber parçasında, PMD vektörü sabit olup çıkış SOP'si bu vektör etrafında döner. Ancak, rasgele polarizasyon mod kuplajına gerçek bir haberleşme fiberinde PMD vektörünün uzunluğu ve yönü taşıyıcı frekansla değişir.

Bahsedilen her iki durum için frekansın fonksiyonu biçimindeki çıkış SOP'sinin değişimi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

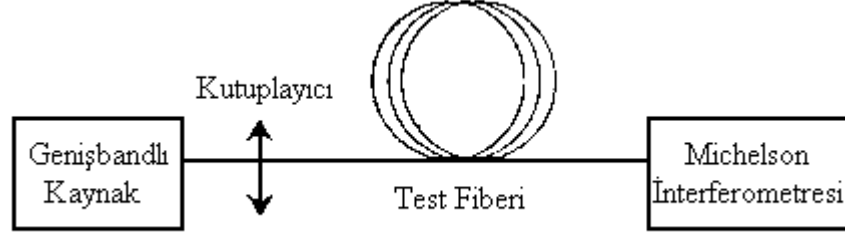


Şekil 3.5. Çıkış SOP'sinin değişimi (a) Düzgün çiftkırılmalı kısa fiberde (b) Rasgele çiftkırılmalı uzun fiberde

Poincare küresi yönteminde, en az iki giriş SOP'si için çıkış SOP'si ölçülerek PMD vektörü ve DGD frekansın fonksiyonu biçiminde bulunabilir (Andresciani ve ark. 1987, Poole ve ark. 1988). Çıkış SOP'lerinden biri PSP'lerden birine yakınsa, hesaplamalarda hata oluşur. Böyle bir durumda hatayı en aza indirmek için üç giriş SOP'si kullanılır (Poole ve ark. 1988).

### 3.1.4. İnterferometrik Yöntem

İnterferometrik yöntemde, genişbandlı kaynak (LED ya da lazer) test fiberine bağlanır ve fiber çıkışındaki ışığın koherens fonksiyonu bir Michelson interferometresiyle analiz edilir. Temel interferometrik ölçme düzeneği Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Optik kaynağın başlangıç koherens fonksiyonunun şekli, PMD nedeniyle genişler ve bu genişlemenin miktarı test fiberinin PMD'sini verir.



Şekil 3.6. Temel interferometrik PMD ölçme düzeneği

İnterferometrik yöntem, fiber PMD'sinin kaynağın başlangıç koherens uzunluğundan daha büyük olduğu durumlarda kullanılabilir. Tipik koherens uzunluğu 30 mm olan bir optik kaynak kullanılırsa, 0.01 ps'den daha büyük PMD değerleri ölçülebilir. Ölçülebilen maksimum PMD değeri 100 ps mertebesindedir.

### 3.1.5. Yöntemlerin Karşılaştırılması

Polarimetrik yöntemler (Poincare küresi ve Jones matrisi yöntemleri) çıkış SOP kümelerinin taranmasını gerektirdiğinden bu yöntemlerin ölçüm süreleri uzundur. Özellikle Poincare küresi yönteminin rasgele mod kuplajı durumunda kullanılması zordur. Ancak polarimetrik yöntemler kullanılarak femtosaniyeler mertebesindeki PMD ölçümleri yapılabilmektedir.

İnterferometrik yöntemde ölçme süresi kısadır. Rasgele mod kuplajı durumunda kararlı ve doğru ölçümler yapılabilmektedir. 100 ps mertebesindeki yüksek PMD değerleri ölçülebilmektedir. Ancak bu yöntemin ölçebileceği minimum PMD değeri kaynağın koherens fonksiyonunca sınırlanmakta olup 0.01 ps civarındadır.

Sabit çözümleyici yöntemi hızlı, rasgele mod kuplajı durumunda kararlı ve doğru ölçümlerin yapılabildiği bir yöntemdir. Ancak bu yöntemde yüksek PMD değerleri ölçülememektedir. Ölçülebilecek maksimum PMD değeri kullanılan optik spektrum çözümleyiciye bağlı olup genellikle pikosaniye mertebesindedir. Ölçülebilecek minimum PMD değeri, interferometrik yöntemdeki gibi, kaynağın koherens fonksiyonunca sınırlanmakta olup 0.01 ps civarındadır.

Sabit çözümleyici tekniği ve Jones matrisi yönteminin ortak özelliği, işaret kaynağının ve ölçüm ile ilgili diğer cihazların birbirleriyle haberleşebilecek şekilde aynı

yerde bulunmalarıdır. Bu nedenle sabit çözümleyici tekniği ve Jones matrisi yöntemi laboratuvar çalışmaları için daha uygundur. Döşenmiş fiberler üzerinde yapılan saha ölçümlerinde, işaret kaynağı ile interferometrenin aynı alanda bulunması gerekmediğinden, çoğunlukla interferometrik yöntemler kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemler, DGD'nin dalgaboyuna bağlılığını gösterememektedir (Olsson ve ark. 1998).

Tez çalışmasında sabit çözümleyici ve Jones matrisi yöntemleri kullanılmıştır. Sabit çözümleyici yönteminin seçilmesinin en önemli sebebi, yöntemin gerektirdiği cihazların elde hazır olarak bulunmasıdır. Ayrıca bu yöntem, yukarıda da belirtilen özellikleri nedeniyle, tez çalışmasında fiber ribbon kablolarla gerçekleştirilen anlık değer ölçümleri, gerilme, sıkıştırma, burulma, bükülme ve sıcaklık testlerindeki gereksinimleri rahatlıkla karşılamıştır.

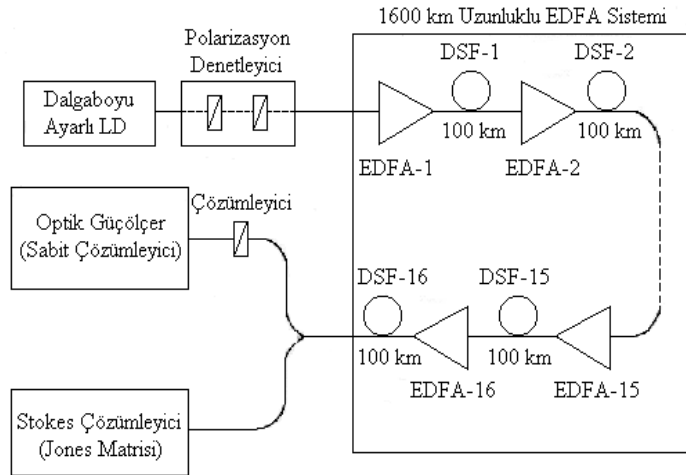
Tez çalışmasındaki diğer deneylerde, PMD ölçümleri için Jones matrisi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem yavaş olmasına rağmen, fiberin karakterizasyonunu tam olarak gerçekleştirdiğinden ve laboratuvar çalışmalarında interferometrik yöntemlere göre daha uygun olduğundan tercih edilmiştir.

### **3.2. Sabit Çözümleyici ve Jones Matrisi Yöntemleriyle PMD Benzetiminde Kullanılan Modeller**

Tez çalışmasının ölçüm yöntemleri olarak seçilen sabit çözümleyici ve Jones matrisi yöntemleriyle gerçekleştirilecek deneylerde, fiber uzunluğunun ve dalgaboyunun deney sonuçlarına etkilerini incelemek için 1 km kuplaj uzunluğuna sahip 500 m ve 50 km uzunluklu iki ayrı fiberde 1450-1650 nm dalgaboyu aralığında aktarlanlık (transmitans) ve diferansiyel grup gecikmesi benzetimleri yapılmıştır.

Daha sonra bu benzetimlerde elde edilen sonuçlardan yola çıkarak, optik kuvvetlendiricili bir uzak mesafe haberleşme sisteminde, sabit çözümleyici ve Jones matrisi yöntemlerini karşılaştırmak amacıyla, 1600 km uzunluklu bir EDFA sisteminde benzetimler gerçekleştirilmiştir. Benzetimlerde kullanılan uzak mesafe iletişim sistemi modeli, Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Toplam iletim uzunluğu 1600 km olan sistemde, 16 adet erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici (EDFA) bulunmaktadır. Kuvvetlendiriciler arasındaki 16 adet fiber parçası, her biri 100 km uzunluklu kaydırılmış dispersiyonlu fiberdir (DSF). Optik kaynak olarak, 1550 nm dalgaboyu bölgesindeki lazer diyot (LD)





Şekil 3.7. Benzetimlerde kullanılan uzak mesafe iletişim sistemi modeli

kullanılmıştır. Dalgaboyu ayarlı lazerden çıkan optik işaret 1600 km uzunluklu EDFA sisteminden geçirilmektedir. Sistemdeki EDFA'lar, optik izolatör, WDM fiber kuplör ve erbiyum katkılı fiber (EDF) gibi optik bileşenlerden oluşmaktadır.

Bu benzetim modelleri kullanılarak gerçekleştirilen benzetimlerden elde edilen sonuçlar Bölüm 4.1'deki Şekil 4.1-4.6'da gösterilmiştir. Tüm benzetimler, Optics Module benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir.

### 3.3. G.652 Standard Haberleşme Fiberlerindeki PMD Deneyleri

G.652 standard haberleşme fiberlerinde çiftkırılma, polarizasyon mod kuplaj uzunluğu ve sıcaklığın PMD üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla hem döşenmiş hem de makaralara sarılı gevşek tüplü fiberler üzerinde deneyler yapılmıştır.

#### 3.3.1. Çiftkırılma ve Polarizasyon Mod Kuplajının PMD'ye Etkisinin İncelenmesinde Kullanılan Yöntemler, Cihazlar ve Deney Koşulları

G.652 standard haberleşme fiberlerindeki çiftkırılmanın temel nedenleri, fiberin dairesel geometrisindeki bozulmalar, iç gerilmeler, kıvrılmalar ve bükülmelerdir. İç gerilmelerden kaynaklanan çiftkırılma (3.8)'deki gibi formüle edilebilir.

$$\beta_{sc} = \frac{1}{2} k_0 n^3 (p_{11} - p_{12}) \left( 1 - \frac{u^2}{V^2} \right) \frac{1 + \nu_p}{1 - \nu_p} \Delta\alpha \Delta T \frac{a - b}{a + b} \quad (3.8)$$

Burada,  $k_0$  boşluktaki yayılım sabiti,  $n$  fiberin ortalama kırılma indisi,  $p_{11}$  ve  $p_{12}$  fiber malzemesinin optik gerilme tensörünün bileşenleri,  $\nu_p$  Poisson oranı,  $\Delta\alpha$  çekirdek ve kılıf malzemelerinin ısıl genişleme katsayıları arasındaki fark,  $\Delta T$  camın yumuşama sıcaklığıyla çevre sıcaklığı arasındaki fark,  $a$  ve  $b$  fiber çekirdeğinin uzun ve kısa çapları,  $V$  ve  $u$   $V = k_0 b (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$  ve  $u = k_0 b (n_1^2 - n_b^2)$  formülleriyle hesaplanan normalize parametrelerdir. Burada,  $n_b$  kısa çap üzerindeki efektif kırılma indisi,  $n_1$  ve  $n_2$  çekirdek ve kılıfın kırılma indisleridir.  $(1 - u^2/V^2)$  genellikle 0.5 mertebesinde bir değere sahiptir (Rashleigh 1983). (3.8)'deki malzeme sabitlerinin nümerik değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. SiO<sub>2</sub> malzeme sabitleri

N	$p_{11} - p_{12}$	$\nu_p$	$\alpha$ (SiO <sub>2</sub> )	$\alpha$ (0.25GeO <sub>2</sub> , 0.75SiO <sub>2</sub> )
1.46	-0.15	0.17	$0.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Bükülmeden kaynaklanan çiftkırılma ise,

$$\beta_{sc} = \frac{1}{2} k_0 n^3 (p_{11} - p_{12}) (1 + \nu_p) \frac{r^2}{R^2} \quad (3.9)$$

ile ifade edilebilir. Burada,  $r$  fiber kılıfının yarıçapı ve  $R$  bükülme yarıçapıdır (Rashleigh 1983).

Herhangi bir fiberin PMD'si ile çiftkırılma ve polarizasyon mod kuplaj uzunluğu arasındaki bağıntı (3.10)'da verilmiştir.

$$\langle \tau \rangle = \frac{h}{\sqrt{2}} \left( \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right) \left( \frac{2L}{h} - 1 + \exp \left[ \frac{-2L}{h} \right] \right)^{1/2} \quad (3.10)$$

Burada  $\beta$  toplam çiftkırılma,  $\omega$  açısal frekans,  $h$  polarizasyon mod kuplaj uzunluğu ve  $L$  fiber uzunluğudur. Bu ifade, çeşitli fiber modellerinden (Poole ve ark. 1991, Gisin 1991, Foschini ve Poole 1991) elde edilmiştir. Bu modellerden en basiti, uzunlukları ve çiftkırılmaları aynı, fakat çiftkırılma eksenleri rasgele yönelimli fiberlerin uçuca birleştirilmesiyle oluşturulmuştur.

Kısa fiberlerde,  $L \ll h$ , PMD uzunlukla lineer olarak artar ve (3.10) formülü

$$\langle \tau \rangle = \left( \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right) L \quad (3.11)$$

şeklini alır.

Uzun fiberlerde,  $L \gg h$ , PMD fiber uzunluğunun kareköküyle orantılı olup

$$\langle \tau \rangle = \left( \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right) \sqrt{hL} \quad (3.12)$$

yazılabilir.

Bu durumda, fiber uzunluğu (3.11) ve (3.12) denklemlerini sağlayacak şekilde seçildiğinde, mod kuplaj uzunluğu bir fiberin tamamının ve ufak bir parçasının PMD değerleri ölçülerek elde edilebilir.

(3.8) ve (3.9) formüllerindeki çiftkırılmalara en büyük katkıyı sağlayan bileşenlerin  $\omega$  açısal frekansıyla doğru orantılı olduğu ve ortalama çiftkırılmanın fiber uzunluğundan bağımsız olduğu varsayılırsa, mod kuplaj uzunluğu

$$h = \left( \frac{\langle \tau_L \rangle \omega_L}{\langle \tau_S \rangle \omega_S} \right)^2 \frac{L_S^2}{L_L} \quad (3.13)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada,  $L$  ve  $S$  indisleri sırasıyla uzun ve kısa fiberleri temsil etmektedir.

Çok sayıdaki fiberler üzerinde yapılan ölçümlerden ortalama bir mod kuplaj uzunluğu ( $\langle h \rangle$ ) elde ederken  $h$  değerleri yerine  $1/h$  değerlerinin ortalamasının alınması ve fiber uzunluğunun ağırlık faktörü olarak ortalamaya katılması daha doğru olur. Bu durumda, ortalama kuplaj uzunluğu,

$$\langle h \rangle = \left( \sum_i l_i \right) / \left( \sum_i \frac{l_i}{h_i} \right) \quad (3.14)$$

şeklinde bulunabilir. Burada,  $l_i$  ve  $h_i$  sırasıyla  $i$ . fiberin boyu ve mod kuplaj uzunluğudur.

Tez çalışmasında, çiftkırılma ve polarizasyon mod kuplajının PMD'ye etkisini incelemek için yapılan deneylerde, 1470-1560 nm dalgaboyu aralığında Jones matrisi yöntemiyle PAT9000F PMD/PDL çözümleyici ve Agilent 81680A ayarlı lazer kullanılmıştır. Agilent 81680A ve PAT9000F ile ilgili teknik bilgiler sırasıyla Ek-1 ve Ek-2'de verilmiştir.

Makaralara sarılı ve döşenmiş fiberler üzerinde elde edilen PMD deney sonuçları Bölüm 4.2.1 Şekil 4.7'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan tüm fiberler aynı firmanın ürünleridir. Makaralara sarılı fiberlerin uzunlukları 2 km ile 13 km arasındadır. Döşenmiş fiberlerin uzunluğu ise yaklaşık 1 km'dir. Tüm kabloların yapısı aynı olup merkez taşıyıcı eleman etrafına sarılmış altı gevşek tüp ve iki bakır telden oluşmuştur. Her gevşek tüpün içerisinde dolgu maddesine batırılmış bir fiber bulunmaktadır.

Ayrıca, altı adet döşenmiş ve beş adet makaralara sarılı kabloların tamamında olduğu gibi 10 ya da 20 m uzunluklu parçalarında da deneyler yapılmış ve elde edilen sonuçlarda (3.13) formülü yardımıyla polarizasyon mod kuplaj uzunlukları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Bölüm 4.2.1 Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Daha sonra, kablolardan birinin DGD'si dalgaboyunun fonksiyonu biçiminde üç farklı sıcaklık derecesinde (20 °C, 25 °C ve 30 °C) ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar Bölüm 4.2.1 Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Deneylerde kullanılan kablo iki adet bakır tel içerdiğinden, elektrikle ısıtma yöntemiyle sıcaklığın tüm kablo üzerinde homojen olması sağlanmıştır.

### 3.3.2. G.652 Standard Haberleşme Fiberinde PMD'nin Sıcaklık ile Değişiminin İncelenmesinde Kullanılan Yöntemler, Cihazlar ve Deney Koşulları

Optik fiberlerde sıcaklığın PMD'ye etkisini izotermal ve adiabatik olmak üzere iki farklı rejimde incelemek gerekir. İzotermal rejim, sıcaklığın sabit ve fiberdeki gerilmelerin kalıcı haldeki değerlerine erişmiş olduğu çalışma biçimidir. Adiabatik rejim ise, sıcaklıktaki değişimlerin etkisiyle fiberdeki gerilmelerin zamanla değiştiği durumdur. G.652 standard haberleşme fiberinin PMD davranışı, hem adiabatik hem de izotermal koşullarda, 1510-1560 nm dalgaboyu aralığında Jones matrisi yöntemiyle PAT9000F PMD/PDL çözümleyici ve Agilent 81680A ayarlı lazer kullanılarak yapılan deneylerle incelenmiştir. İzotermal rejimde farklı sıcaklık değerleri için deneyler yapılmıştır. Deneylerin yapıldığı sıcaklık dereceleri  $10 \pm 0.5$  °C,  $25 \pm 0.5$  °C,  $45 \pm 0.5$  °C ve  $48 \pm 0.5$  °C şeklindedir. Adiabatik deneylerde, sıcaklık 10 °C'den 60 °C'ye 4 °C/h hızla arttırılmıştır. Daha sonra sıcaklık 10 °C'ye düşürülmüş ve yeni bir döngüye başlamadan önce, ortam sıcaklığı 6 saat boyunca sabit tutulmuştur. Deneylerde kullanılan fiberler, Türk Telekomünikasyon A.Ş. TRFO-9b Fiber Optik Kablo Şartnamesi'ne göre üretilmiş makaralara sarılı iki adet G.652 standard haberleşme fiberidir. Bu fiberlerin teknik özellikleri Çizelge 3.2'de ve PMD karakteristikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlar Bölüm 4.2.2 Şekil 4.10-4.14'te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Deneylerde kullanılan TRFO-9b şartnamesine göre üretilmiş G.652 standard haberleşme fiberlerinin teknik özellikleri (Anonim 2005)

Parametre	Değer	Parametre	Değer
Kromatik dispersiyon (1285-1330 nm)	$\leq 3.5$ ps/nm.km	Kılıf çapı	$125 \pm 1.0$ $\mu$ m
Kromatik dispersiyon (1525-1575 nm)	$\leq 17$ ps/nm.km	Çekirdek/kılıf eşmerkezlilik hatası	$\leq 0.8$ $\mu$ m
MFD (1310 nm)	$(8.6-9.5) \pm 0.7$ $\mu$ m	Kılıfın ovalliği	$\leq \% 2.0$

Çizelge 3.3. Deneylerde kullanılan G.652 standard haberleşme fiberlerinin PMD karakteristikleri

Fiber	Ortalama PMD (ps)	PMD Katsayısı (ps/km <sup>1/2</sup> )	Uzunluk (km)
A	0.49	0.11	20
B	4.56	1.02	20

### 3.4. Fiber Ribbon Kablolardaki PMD Deneyleri

NZDF, yüksek hızlı uzak mesafe ağların yanısıra şehiriçi abone hatlarında da önemli bir alternatif haline gelmiştir. NZDF’lerde en yaygın kablo yapısı gevşek tüplü fiber iken son zamanlarda daha ekonomik ve yüksek hızlara uyumlaştırılmasının daha kolay olması nedeniyle slotlu çekirdeğe sahip ribbon yapısı da tercih edilmeye başlanmıştır. Dolayısıyla, bu tip kabloların PMD performanslarının bilinmesi, yüksek bit hızlı iletişim uygulamaları açısından son derece önemlidir.

Bu amaçla, üç farklı tipteki NZDF ribbon kabloda, kablo yapısının, ribbon kalınlığının, ribbon içindeki fiberlerin konumlarının, gerilme, sıkıştırma, burulma, bükülme gibi mekanik etkilerin, esneme, titreşim ve sıcaklık gibi çevresel koşullardaki değişimlerin PMD değerlerine etkilerini gözlemlemek için deneyler yapılmıştır.

Bu bölümde öncelikle deneylerde kullanılan NZDF ribbon kablolar hakkında bilgi verilecek ve daha sonra deney yöntemleri, cihazları ve koşulları açıklanacaktır.

#### 3.4.1. Deneylerde Kullanılan NZDF Ribbon Kablo Yapısı

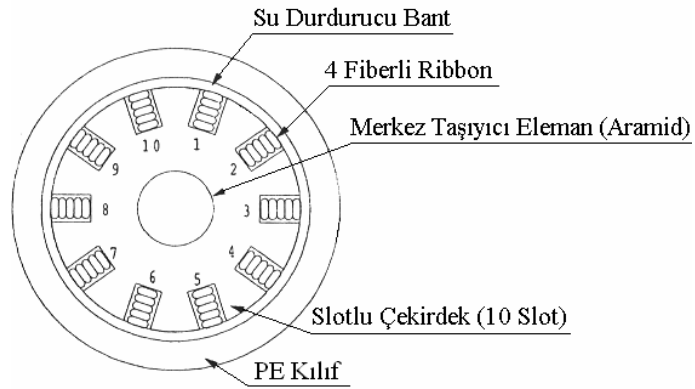
Deneylerde kullanılan NZDF, 1530–1625 nm dalgaboyu bölgesindeki yüksek bit hızlı iletişim için optimize edilmiştir. Bu fiberin bazı teknik özellikleri Çizelge 3.4’te verilmiştir.

NZDF’nin en yaygın şekillerinden biri, 5 ile 16 arasında slot içeren çekirdek yapısıdır. Her slotta 5 ya da 10 ribbon ve her ribbonda 4 ya da 8 fiber bulunur. Deneylerde, üç farklı tipte fiber ribbon kablo kullanılmıştır. A kablosu, 200 fiberli bir kablo olup 10 slotlu ve her slotta 4 fiberli 5 adet ribbon bulunan bir yapıya sahiptir. B kablosunda 600 fiber ve 8 fiberli ribbonlar içeren 8 slot bulunmaktadır. C kablosunda

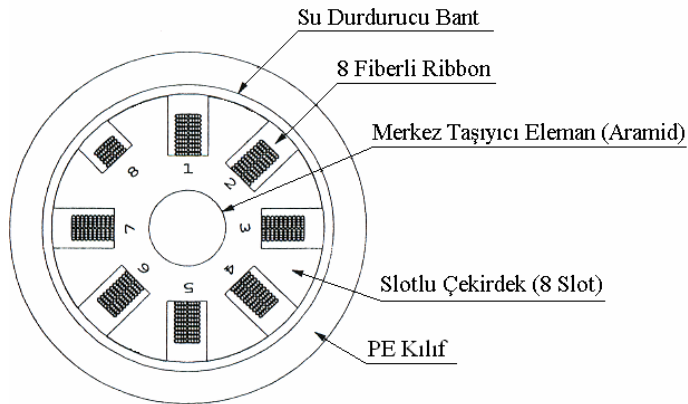
ise 128 fiber ve 2 fiberli ribbonlar içeren 8 slot vardır. A ve B kablolarında merkez taşıyıcı eleman Aramid olup C kablosunun merkez taşıyıcı elemanı metaldir. Su koruması, A ve B kablolarında su durdurucu bantlarla C kablosunda ise dolgu malzemesiyle sağlanmıştır. Deneyleerde kullanılan kabloların yapıları Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. NZDF kablonun optik ve geometrik karakteristikleri

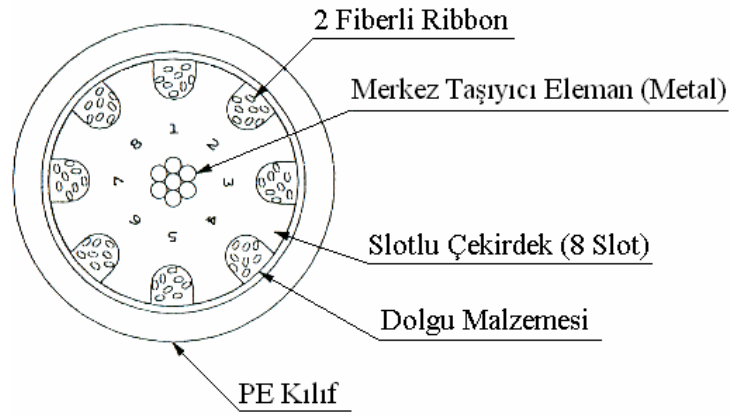
Parametre	Değer	Parametre	Değer
Kromatik dispersiyon (1530-1565 nm)	2.6 – 6.0 ps/nm.km	Kılıf çapı	$125 \pm 1.0 \mu\text{m}$
Kromatik dispersiyon (1565-1625 nm)	4.0 – 8.9 ps/nm.km	Çekirdek/kılıf eşmerkezlilik hatası	$\leq 0.6 \mu\text{m}$
MFD (1550 nm)	$8.4 \pm 0.6 \mu\text{m}$	Kılıfın ovalliği	$\leq \% 1.0$



a. 200 fiber ve 4 fiberli ribbonlar içeren A kablosu



b. 600 fiber ve 8 fiberli ribbonlar içeren B kablosu



c. 128 fiber ve 2 fiberli ribbonlar içeren C kablosu

Şekil 3.8. Deneylerde kullanılan NZDF ribbon kablo yapıları

Çizelge 3.5. Deney kablolarının geometrik parametreleri

Parametre	A Kablosu	B Kablosu	C Kablosu
Toplam fiber sayısı	200 fiber	600 fiber	128 fiber
Ribbon tipi	4 fiberli	8 fiberli	2 fiberli
Ribbon kalınlığı	0.4 mm	0.3 mm	0.4 mm
Ribbon genişliği	1.1 mm	2.1 mm	0.7 mm
Merkez taşıyıcı elemanın çapı	4.5 mm (A-FRP)	4.5 mm (A-FRP)	7/1.4 mm (Metalik)
Kılıf kalınlığı	1.5 mm	1.5 mm	2.0 mm
Kablo dış çapı	17 mm	22 mm	21 mm
Su koruması	Su durdurucu bant	Su durdurucu bant	Dolgu malzemesi

Deney kablolarının geometrik parametreleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

### 3.4.2. Anlık PMD Ölçümleri ve PMD'nin Ribbon Kalınlığı ile Değişiminin İncelenmesinde Kullanılan Yöntem ve Cihazlar

Üç tip fiber ribbon kablonun anlık PMD değerleri, 1380-1640 nm dalgaboyu aralığında sabit çözümleyici yöntemiyle Acterna MTS-8000 Tester ve Agilent 81480A, 81640A, 81680A ayarlı lazerler kullanılarak ölçülmüştür. Ayarlı lazerler ve Acterna



MTS-8000 Tester ile ilgili teknik bilgiler sırasıyla Ek-1 ve Ek-3'te verilmiştir. Ölçümler esnasında, kablolar makaralara sarılı vaziyette ve ortam sıcaklığı, oda sıcaklığı düzeyindedir. Ölçülen PMD değerleri Bölüm 4.3.1 Çizelge 4.2'de verilmiştir.

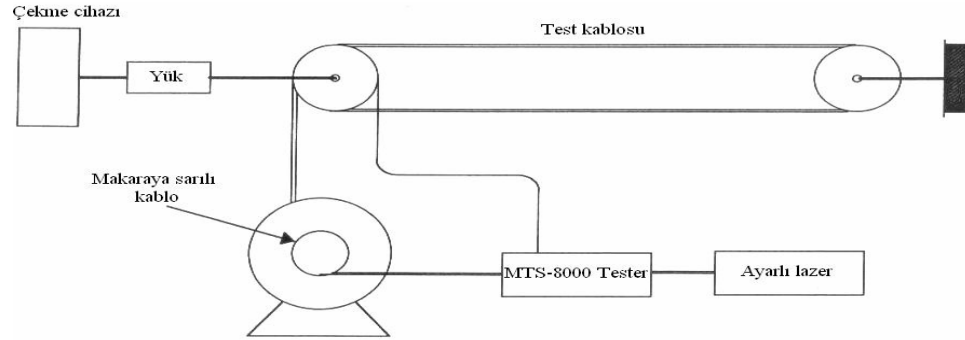
Ribbon kalınlığının ve ribbon içindeki fiberlerin konumlarının kablonun PMD performansı üzerindeki etkisi incelemek için altı adet 4 fiberli ribbon kullanılmıştır. Her bir ribbon içindeki tüm fiberler aynı kabloya aittir. Örneklerdeki ribbon kalınlıkları 0.3 mm ve 0.4 mm'dir. Ortalama ribbon uzunluğu 1.5 km olup ribbonlar 280 mm çapındaki makaralara 200 g'lik bir gerilme kuvvetiyle sarılmışlardır. Ribbonların PMD değerleri, sabit çözümleyici yöntemiyle Acterna MTS-8000 Tester ve Agilent 81480A, 81640A, 81680A ayarlı lazerler kullanılarak 1380-1640 nm dalgaboyu aralığında ölçülmüştür. Deney sonuçları Bölüm 4.3.1 Çizelge 4.3 ve Şekil 4.15'te verilmiştir.

### **3.4.3. Fiber Ribbon Kablolarda PMD'nin Mekanik Test Koşullarıyla Değişiminin İncelenmesinde Kullanılan Yöntem ve Cihazlar**

Kablo kurulumu sırasında oluşabilecek mekanik etkiler altındaki PMD performansını incelemek için, kablo yanal baskılara maruz bırakıldığında DGD'de meydana gelen değişimler incelenmiştir. Bu testlerde, fiberler uzun halkalar oluşturacak şekilde birleştirilmiştir. A ve B kablolarının herbirinde dış ve iç fiberler kullanılarak iki ayrı halka oluşturulmuştur. C kablosunda ise tüm fiberler birleştirilerek tek bir halka elde edilmiştir. Sabit çözümleyici yöntemi kullanılarak, 1380–1640 nm dalgaboyu aralığında her üç tip kablonun çeşitli mekanik testler altındaki PMD performansı incelenmiştir. Uygulanan mekanik testlerde IEC-794-1-E standartları kullanılmıştır (Anonim 1996). Mekanik testler şunlardır:

- Gerilme testi: Bu testte, A, B ve C kablolarının her birinde, 6.5 m uzunluklu kablo parçasına 1960 N büyüklüğünde gerilme kuvveti uygulanmıştır. Gerilme testi, IEC-794-1-E1 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Gerilme testi düzeneği Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar Bölüm 4.3.2 Çizelge 4.4'te verilmiştir.
- Sıkıştırma testi: Bu testte, A, B ve C kablolarının her birinde, 10 mm uzunluklu kablo parçasına 1960 N büyüklüğünde sıkıştırma kuvveti uygulanmıştır. Sıkıştırma testi, IEC-794-1-E1 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Test düzeneği, gerilme testindeki düzeneğin aynısı olup uygulanan kuvvet gerilme testinde uygulanan

kuvvetin ters yönündedir. Elde edilen sonuçlar Bölüm 4.3.2 Çizelge 4.4'te verilmiştir.

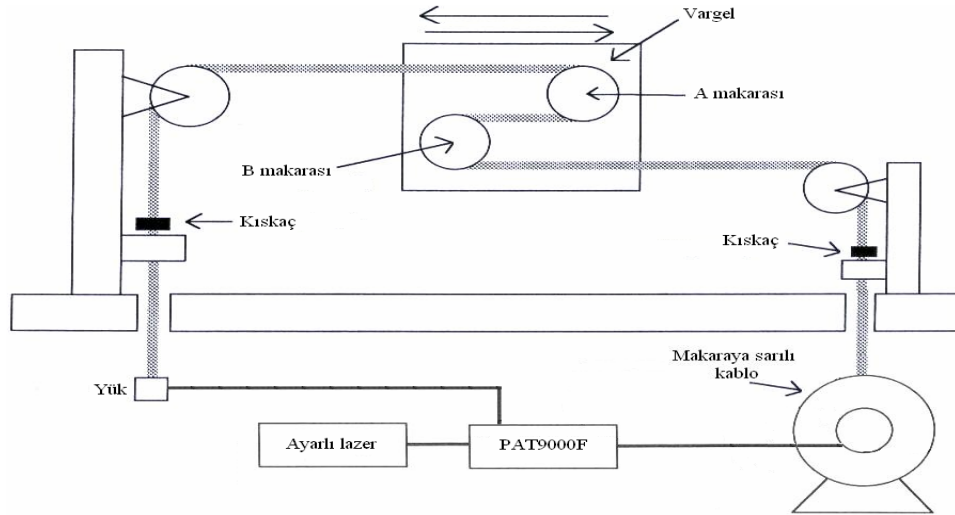


Şekil 3.9. Gerilme testi düzeneği

- Burulma testi: Bu testte, A, B ve C kablolarının her birinde, 1 m uzunluklu kablo parçasına  $\pm 180^\circ$  burulma uygulanmıştır. Burulma testi, IEC-794-1-E7 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Bölüm 4.3.2 Çizelge 4.4'te verilmiştir.
- Bükülme testi: Bu testte, A, B ve C kablolarının her biri, 600 mm çaplı makaraya 3 defa sarılmak suretiyle kablolarına bükülme uygulanmıştır. Bükülme testi, IEC-794-1-E11 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Bölüm 4.3.2 Çizelge 4.4'te verilmiştir.

#### 3.4.4. Fiber Ribbon Kablolarda PMD'nin Esneme ile Değişiminin İncelenmesinde Kullanılan Yöntem ve Cihazlar

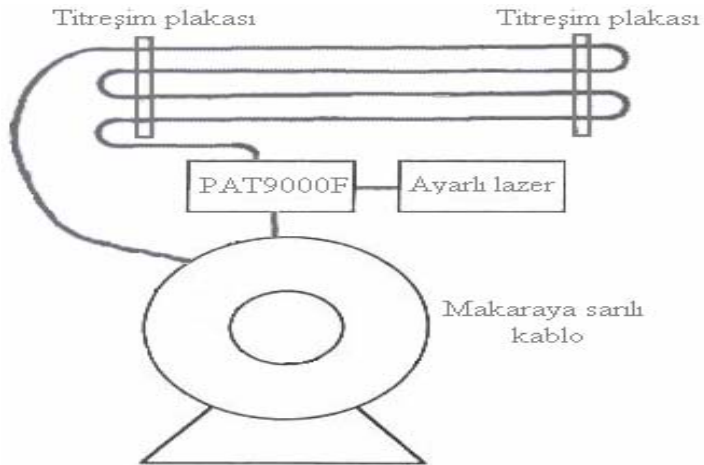
Esneme testi, C kablosu üzerinde IEC-794-1-E8 standardına göre gerçekleştirilmiştir (Anonim 1996). Deneyde, Jones matrisi yöntemini temel alan PAT9000F PMD/PDL çözümleyici ve 1550 nm dalgaboylu Agilent 81640A lazer kullanılmıştır. Deney süresi 30 dakika olup kabloya 1960 N kuvvet uygulanmıştır. Bükülme çapı 600 mm'dir. Esneme testi düzeneği Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar Bölüm 4.3.3 Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 3.10. Esneme testi düzeneği

### 3.4.5. Fiber Ribbon Kablolarda PMD'nin Titreşim ile Değişiminin İncelenmesinde Kullanılan Yöntem ve Cihazlar

Bu testte, rüzgar nedeniyle oluşan titreşimin fiber ribbon kablonun PMD performansına etkisini gözlemlemek için DGD'nin titreşimle değişimi incelenmiştir. Deneyde, bir önceki testte bahsedilen deney seti ve IEC-794-1-E19 standardı A kablosuna uygulanmıştır. Titreşim testi düzeneği Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Titreşim testi düzeneği

Toplam test süresi 27 saattir. İlk 15 saatte, titreşim frekansı 5 Hz’de sabit tutulup titreşim genliği değiştirilmiştir. Sonraki 12 saatte, titreşim genliği 1 mm değerinde sabit tutulup titreşim frekansı değiştirilmiştir. İlk 15 saatte kabloya uygulanan titreşim genlikleri sırasıyla 0.5 mm, 1 mm, 2 mm, 5 mm ve 10 mm’dir. Her titreşim genliği 3 saat boyunca sabit tutulmuştur. Son 12 saatte kabloya uygulanan titreşim frekansları sırasıyla 20 Hz, 15 Hz, 10 Hz ve 5 Hz’dir. Her titreşim frekansı 3 saat boyunca sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Bölüm 4.3.4 Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da gösterilmiştir.

### **3.4.6. Fiber Ribbon Kablolarda PMD’nin Sıcaklıkla Değişiminin İncelenmesinde Kullanılan Yöntem ve Cihazlar**

Genellikle, PMD sabit sıcaklık koşullarında ölçülür. Halbuki, gerçek ortamda sıcaklık sabit olmayıp hızlı ve rasgele biçimde değişebilmektedir. Bu nedenle, gerçek ortam koşullarında kablo boyunca oluşan çiftkırılma ve mod kuplaj dağılımı da sürekli ve rasgele değişir. Bu da, gerçek ortam koşullarında PMD’nin zamanla değişiminin, sabit sıcaklık testlerinde elde edilen sonuçlardan daha büyük olabileceğini gösterir.

Bu etkiyi gözlemlemek için, ortalama uzunluğu 1 km olan ve makaraya sarılı durumda bulunan A kablosunun dış fiberlerini (birinci halka) ve iç fiberlerini (ikinci halka) kullanarak iki ayrı halka oluşturulmuştur. Her bir halkanın uzunluğu yaklaşık 47 km’dir. Sabit çözümleyici yöntemi, Acterna MTS-8000 Tester ve Agilent 81480A, 81640A, 81680A ayarlı lazerler kullanılarak, 1380–1640 nm aralığında her bir halkanın PMD’si 30 dakikalık aralıklarla ölçülmüştür. Toplam ölçüm süresince, ortam sıcaklığı 10 °C ile 60 °C arasında, Bölüm 4.3.5 Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de gösterildiği biçimde değiştirilmiştir.

Gerçek ortam koşullarında, fiber ribbon kablonun PMD performansını daha iyi anlayabilmek için, çevre sıcaklığındaki değişimin kademeli olarak arttırıldığı üç test daha yapılmıştır. Bu testler, kontrollü oda sıcaklığı, kontrolsüz oda sıcaklığı ve açık alan testleridir.

Kontrollü oda sıcaklığı testinde, makaraya sarılı fiber kablo, 24 saat boyunca sıcaklığın sürekli 23 °C’de tutulduğu bir odada bırakılmıştır. PAT9000F PMD/PDL çözümleyici ve 1550 nm dalgaboylu Agilent 81640A lazer kullanılarak her 30 dakikada bir kablonun PMD’si ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar Bölüm 4.3.5’te açıklanmıştır.

Kontrolsüz oda sıcaklığı testinde, makaraya sarılı A kablosunun fiberleri 50 km uzunluklu bir halka oluşturacak şekilde birleştirilmiş ve ortam sıcaklığının +/- 4 °C değiştiği bir depoda 24 saat bırakılmıştır. Ölçüm yöntemi bir önceki testtekinin aynısıdır. Elde edilen sonuçlar Bölüm 4.3.5'te açıklanmıştır.

Üçüncü testte, gerçek saha koşullarında PMD değişimini gözlemlemek için, B kablosunun fiberleri 60 km uzunluklu bir halka oluşturacak şekilde birleştirilmiş ve kablo 48 saat boyunca açık alanda çevresel sıcaklık değişimine maruz bırakılmıştır. Deneyde kullanılan düzeneğe daha önceki testlerde kullanılanların aynısıdır. 48 saat boyunca çevre sıcaklığı yaklaşık olarak 13 °C ile 25 °C arasında değişmiştir. Elde edilen sonuçlar Bölüm 4.3.5 Şekil 4.22'de verilmiştir.

### **3.5. Spinli Fiberlerdeki PMD Deneyleri**

#### **3.5.1. Giriş**

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 (Nolan ve ark. 2004). Fiberde rasgele mod kuplajları oluşmasına rağmen bu kuplajların önceden kestirilebilmesi ve kontrol edilebilmesi mümkün değildir. Fiber PMD'sini azaltmada etkin bir yöntem, fiber üretiminde 1990'ların başından beri kullanılan ve kontrollü polarizasyon mod kuplajına imkan sağlayan fiber spinleme metodudur. Spinli fiberlerin PMD performansı çeşitli modelleme yöntemleri ve ağırlıklı olarak benzetimlerle incelenmiştir (Galtarossa ve ark. 2002, Chen ve ark. 2002, Pizzinat ve ark. 2003, Galtarossa ve ark. 2004).

Optik fiberdeki polarizasyon mod kuplajını etkileyen önemli bir faktör fibere uygulanan bükmelemdir (Ulrich ve Simon 1979). Spinsiz fiberlerde bükmelemlerin PMD'ye etkisi teorik ve deneysel olarak (Schuh ve ark. 1995) ve (Galtarossa ve Palmieri 2002)'de incelenmiştir. Bükmenin spinli fiberlerde de PMD değişimlerine sebebiyet veren önemli bir dış etken olduğu (Li ve ark. 1999)'da belirtilmiştir.

Tez çalışmasında, sabit ve sinüsoidal spinli fiberlerin, değişik oranlarda uygulanan harici bükmelemler altındaki PMD performansları deneysel olarak incelenmiştir.

Bölüm 3.5.2’de fiberin spinlenmesi ve spin tipleri hakkında bilgi verilecektir. Daha sonra, Bölüm 3.5.3 ve Bölüm 3.5.4’te sabit ve sinüsoidal spinli fiberlerle yapılan deneylerde kullanılan malzemeler, yöntemler ve deney koşulları açıklanacaktır.

### 3.5.2. Fiberin Spinlenmesi ve Spin Tipleri

Fiber spinleme işlemi, Barlow ve ark. (1981) tarafından önerilmiştir. Bu öneride, spinli fiberi oluşturmak için çekme işlemi esnasında kütüğün (preform) eksenini 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 ( $\leq 2.5$  Gb/s) ve PMD’nin bu ağlarda önemli bir sorun oluşturmamasıydı. Bir diğer neden, düşük çekme hızlarında kolaylıkla gerçekleştirilen spinlemenin, yüksek çekme hızlarına çıkıldıkça –kütüğün eksenini etrafında yüksek hızda döndürülmesinin çok zor olmasından dolayı- uygulanabilirliğini kaybetmesidir. Bu soruna teknolojik bir çözüm Hart ve ark. (1994) tarafından getirilmiştir. Bu yeni öneri, kütük yerine fiberin doğrudan spinlenmesini içermektedir. Bu yöntemle birlikte, fiber üretiminde spinleme işleme daha yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır.

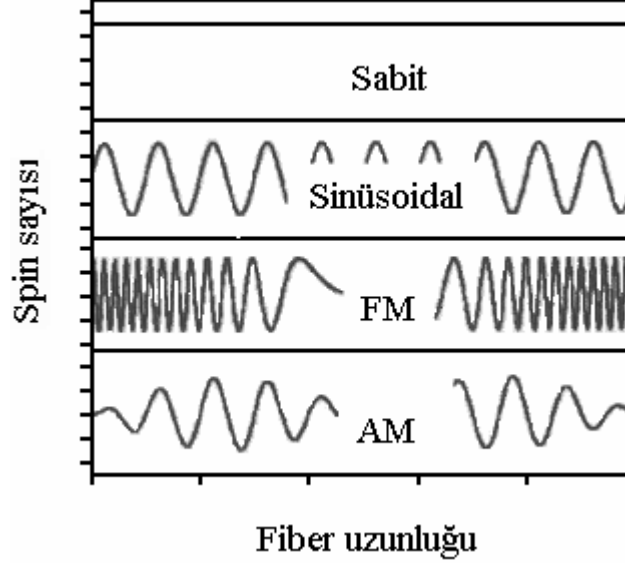
Günümüzde değişik tiplerde spinli fiber üretilmektedir. En yaygın uygulama alanı bulanlar, sabit ve sinüsoidal spinli fiberler olmakla birlikte yakın bir geçmişte önerilen frekans modülasyonlu (FM) ve genlik modülasyonlu (AM) spinli fiberler de hızla yaygınlaşmaktadır (Li ve Nolan 1998). Bu dört tip fiberin spin profilleri Şekil 3.12’de gösterilmiştir.

Sabit spinli fiberin spin profili,

$$\alpha(z) = \alpha_0 \quad (3.15)$$

şeklinde sabit bir  $\alpha_0$  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.



Şekil 3.12. Değişik tiplerdeki fiber spin profilleri

Sinüsoidal spinli fiberde, fiber eksenı etrafında saat yönünde ve saat yönünün tersinde Şekil 3.12'deki profile uygun biçimde döndürülür. Böylece sabit spinlemede meydana gelen elastik bükmenin oluşması önlenir. Dolayısıyla, sinüsoidal spinleme sabit spinlemedekinden daha düşük PMD değerlerine erişilmesine imkan sağlar.

Sinüsoidal spin profili,

$$\alpha(z) = \alpha_0 \sin(\eta z) \quad (3.16)$$

şeklindedir. Burada  $\alpha_0$  radyan cinsinden uygulanan spinin genliği,  $\eta=2\pi/\Lambda$ ,  $\Lambda$  metre cinsinden spin periyodu ve  $z$  fiber uzunluğudur. (3.16)'nın fiber uzunluğuna göre türevi alındığında bulunan  $\alpha' = d\alpha/dz$  değeri fiber ekseninin dönme frekansı olup

$$\alpha'(z) = 2\pi \frac{\alpha_0}{\Lambda} \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) \quad (3.17)$$

şeklindedir. (3.17)'nin etkin değeri, etkin spin oranı olarak adlandırılır. Birimi rad/m olan bu değer

$$\gamma_{rms} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \frac{\alpha_0}{\Lambda} \quad (3.18)$$

ile ifade edilir. 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 (Li ve Nolan 1998). Şekil 3.12’de şematik olarak gösterilen bu profiller, FM spinli fiberlerde

$$\alpha(z) = \alpha_0 \sin \left\{ 2\pi \left[ f_0 z + f_m \sin \left( \frac{2\pi z}{\Lambda} \right) \right] \right\} \quad (3.19)$$

ve AM spinli fiberlerde

$$\alpha(z) = \alpha_0 \sin(2\pi f z) \sin \left( \frac{2\pi z}{\Lambda} \right) \quad (3.20)$$

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

### 3.5.3. Sabit Spinli Fiberlerde PMD’nin Harici Bükme Oranı ile Değişiminin İncelenmesinde Kullanılan Yöntem ve Deney Koşulları

Bu deneylerde, üretici firma tarafından ITU-T G.652 standardlarına uygun üç farklı kütükten tek yönlü sabit spinlemeyle üretilmiş beş adet fiber kullanılmıştır. Birinci kütükten üretilmiş fiberin spin oranı 7.1 tur/m, ikinci kütükten üretilmiş fiberin spin oranı 3.4 tur/m ve üçüncü kütükten üretilmiş üç fiberin spin oranları 4.0 tur/m, 2.8 tur/m ve 0.5 tur/m’dir. Bu fiber numunelerine minimum 1/7 tur/m oranlı bükme üretebilen bir makineyle tek yönlü harici bükme uygulanmıştır.

Her bir fiber numunesi yaklaşık 1 km uzunluğundadır. PMD değeri ölçülecek fiber, deney 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 temel alan PAT9000F PMD/PDL çözümleyici ve Agilent 81640A ayarlı lazer



kullanılarak 1520-1630 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. Elde edilen sonuçlar, Bölüm 4.4.1 Şekil 4.23-4.25'te gösterilmiştir.

#### 3.5.4. Sinüsoidal Spinli Fiberlerde PMD'nin Harici Bükme Oranı ile Değişiminin İncelenmesinde Kullanılan Yöntem ve Deney Koşulları

Sinüsoidal spinli fiberlerdeki DGD deneyleri iki bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde her biri 150 m uzunluklu dört farklı fibere harici bükme uygulanmış ve 1550 nm dalgaboyunda Jones matrisi yöntemini temel alan PAT9000F PMD/PDL çözümleyici ve Agilent 81640A lazer kullanılarak DGD ölçümleri yapılmıştır. Kullanılan fiberlerden ikisi kaydırılmış dispersiyonlu spinsiz fiber (DSF1 ve DSF2), ikisi de kaydırılmış dispersiyonlu sinüsoidal spinli fiberdir (DSSF1 ve DSSF2). DSF1 ile DSSF1 ve DSF2 ile DSSF2 aynı kütüklerden üretilmiştir.

Spinsiz fiberlere harici bükme uygulandığında elde edilecek DGD

$$DGD = \frac{\delta\beta_L \delta\beta_L' + (\delta\beta_C - 2\gamma)\delta\beta_C'}{\sqrt{\delta\beta_L^2 + (\delta\beta_C - 2\gamma)^2}} \quad (3.21)$$

ile hesaplanır (Schuh ve ark. 1995). Burada  $\delta\beta_L$  doğrusal çiftkırılma,  $\gamma$  uygulanan harici bükme ve  $\delta\beta_C$  bükme oranının indüklediği dairesel çiftkırılma,  $\delta\beta_L'$ ,  $\delta\beta_C$  ve  $\delta\beta_C'$  sırasıyla aşağıdaki formüllerle bulunabilir.

$$\delta\beta_L' = \frac{d(\delta\beta_L)}{d\omega} \approx \frac{\delta\beta_L}{\omega} \quad (3.22)$$

$$\delta\beta_C = g\gamma \quad (3.23)$$

$$\delta\beta_C' = \gamma \frac{dg}{d\omega} \quad (3.24)$$

Bu formüllerde  $g$  dönme katsayısı ve  $\omega$  açısal frekanstır.

Deneylerde kullanılan DSF1 ve DSF2'nin çiftkırılma karakteristikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir. Elde edilen sonuçlar Bölüm 4.4.2 Şekil 4.26-4.29'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Deneylerde kullanılan fiberlerin çiftkırılma karakteristikleri

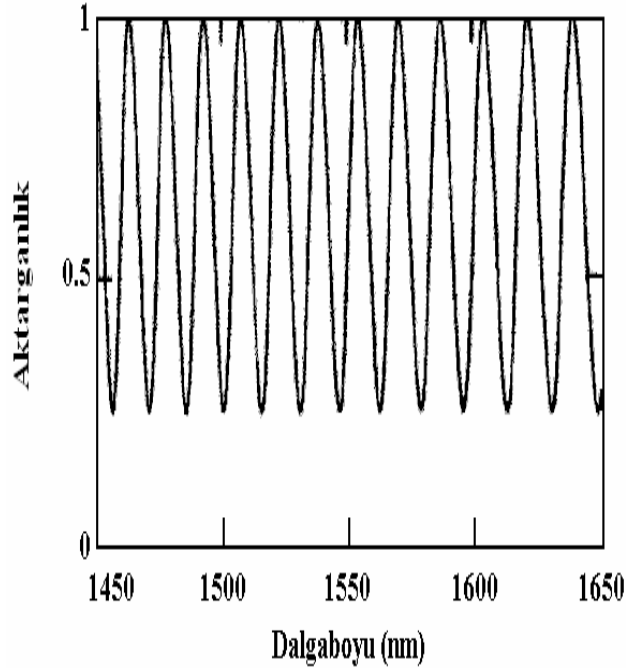
Fiber	$\delta\beta_L$ (rad/m)	$\omega/\delta\beta_L d(\delta\beta_L)/d\omega$	g	$\omega/g dg/d\omega$
DSF1	1.7	1	0.14	0.09
DSF2	3	1	0.14	0.088

Deneyin ikinci bölümünde ise DSSF1 ile aynı kütükten üretilmiş, aynı doğrusal çiftkırılmaya ancak farklı efektif spin oranlarına sahip dört adet sinüsoidal spinli fiberde aynı koşullar altında ve aynı yöntemle DGD ölçümleri yapılmıştır. Benzer ölçümler DSSF2 ile aynı kütükten üretilmiş, aynı çiftkırılmaya ancak farklı efektif spin oranlarına sahip dört adet sinüsoidal spinli fiberde de tekrarlanmıştır. Bu deneylerde amaç doğrusal çiftkırılma, spin genliği ve spin periyodu arasındaki ilişkiyi incelemektir. Elde edilen sonuçlar, Bölüm 4.4.2 Şekil 4.30-4.37’de gösterilmiştir.

## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

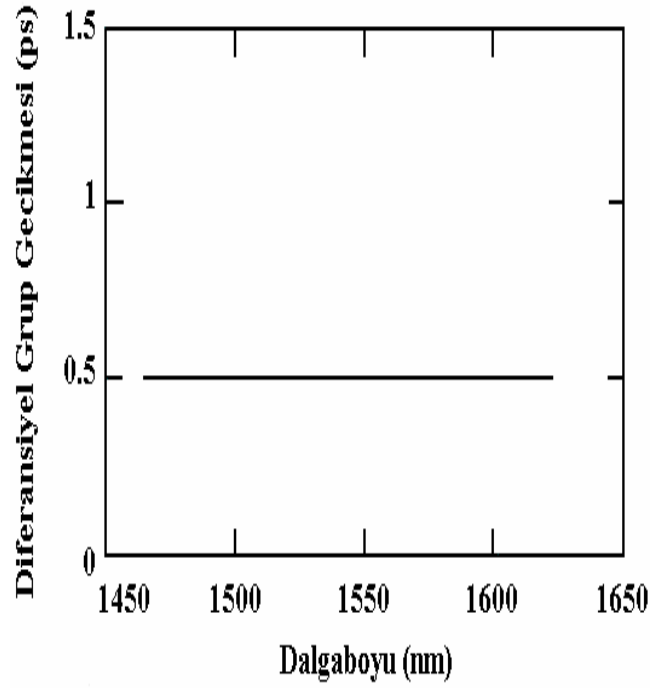
### 4.1. Sabit Çözümleyici Tekniği ve Jones Matrisi Yöntemiyle Elde Edilen Benzetim Sonuçları

Şekil 4.1’de 500 m uzunluklu fiberde sabit çözümleyici tekniği ile elde edilen iletim spektrumu benzetim sonucu aktarganlık (transmitans)-dalgaboyu grafiği şeklinde verilmiştir. Görüldüğü gibi iletim spektrumu sinüsoidal bir şekil sergilemektedir. 1450-1650 nm dalgaboyu aralığında 25 adet ekstremum noktası mevcuttur. (3.1) formülünden yararlanarak ortalama DGD hesaplanırsa 0.5 ps bulunur.



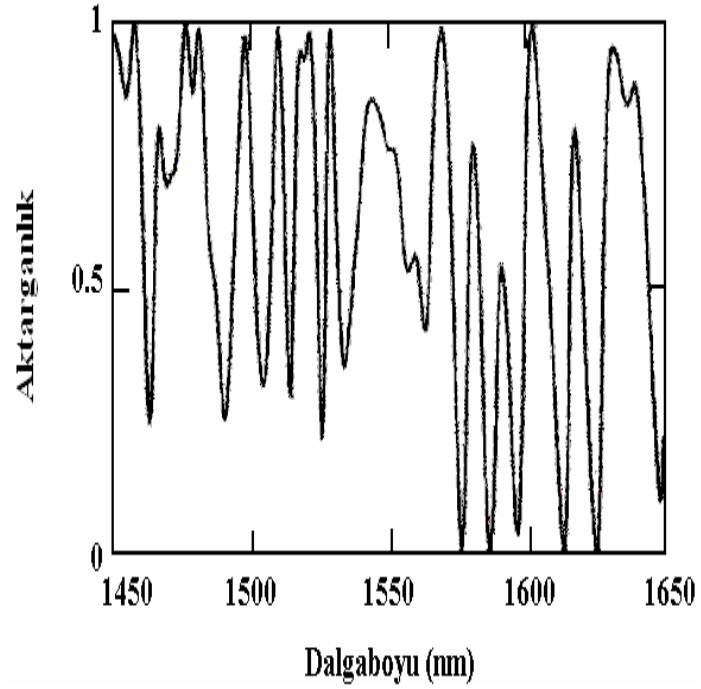
Şekil 4.1. Kısa fiberde sabit çözümleyici tekniği ile elde edilen iletim spektrumu

Aynı fiber için Jones matrisi yöntemiyle elde edilen benzetim sonuçları Şekil 4.2’de 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.



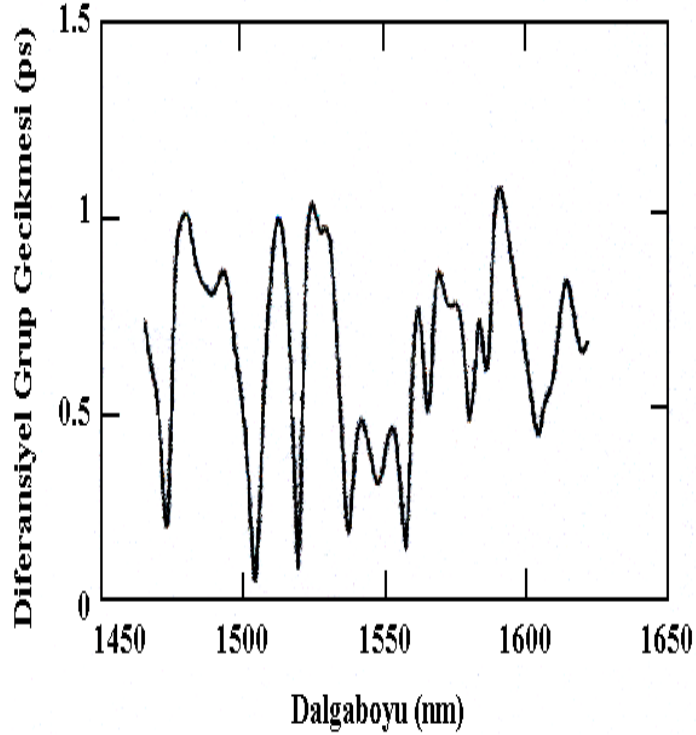
Şekil 4.2. Kısa fiberde Jones matrisi metodu ile elde edilen diferansiyel grup gecikmesi

Şekil 4.3'te 50 km uzunluklu fiberde sabit çözümlenici tekniği ile elde edilen iletim spektrumu benzetim sonucu verilmiştir.



Şekil 4.3. Uzun fiberde sabit çözümlenici tekniği ile elde edilen iletim spektrumu

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 (3.2) 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.

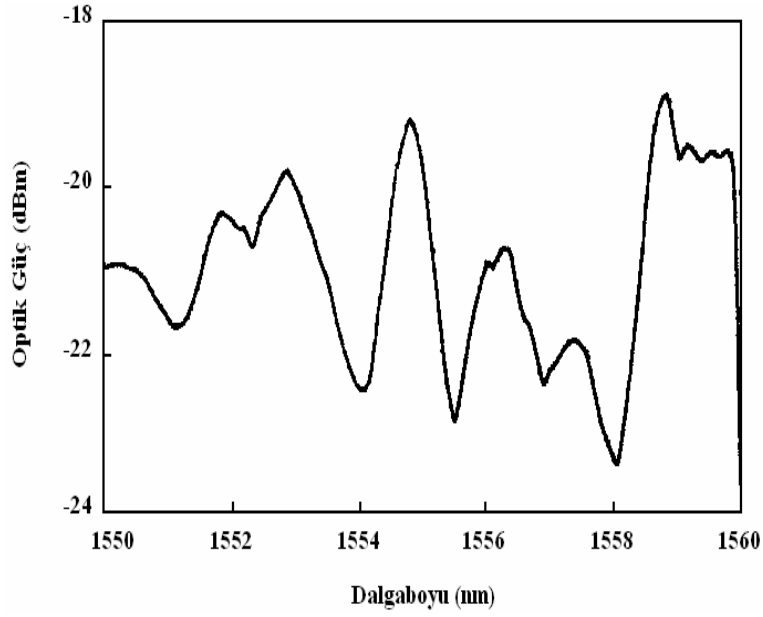


Şekil 4.4. Uzun fiberde Jones matrisi yöntemi ile elde edilen diferansiyel grup gecikmesi değişimi

Şekil 4.4'te 50 km uzunluklu fiberin Jones matrisi yöntemiyle elde edilen diferansiyel grup gecikmesi değişimiyle ilgili benzetim sonuçları görülmektedir. Kısa fiberdeki durumun aksine, DGD dalgaboyuna bağlıdır. PMD değeri, DGD-dalgaboyu grafiğinden (2.4) 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 (Karlík ve ark. 2002).

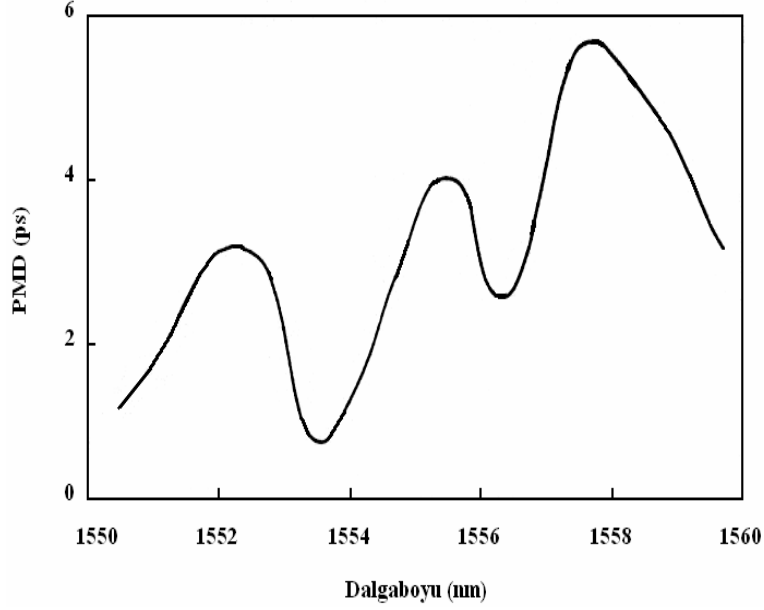
Bölüm 3.2’de açıklanan 1600 km uzunluklu EDFA sisteminde, sabit çözümleyici ve Jones matrisi yöntemleri kullanarak elde edilen PMD benzetim sonuçları sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da görülmektedir.



Şekil 4.5. 1600 km’lik EDFA sisteminde sabit çözümleyici yöntemi kullanılarak elde edilen benzetim sonuçları

Sabit çözümleyici yöntemi ve Jones matrisi metoduyla elde edilen sistemin ortalama PMD değerleri ( $\Delta\tau_{\text{sis}}$ ) sırasıyla 5.14 ps ve 3.09 ps’dir.

EDFA’da kullanılan optik izolatörün, 1480/1550 nm WDM fiber kuplörün ve EDF’nin uygulamadaki tipik PMD değerleri ( $\Delta\tau_{\text{ISO}}$ ,  $\Delta\tau_{\text{WDM}}$  ve  $\Delta\tau_{\text{EDF}}$ ) sırasıyla, 0.004 ps, 0.007 ps ve 0.184 ps’dir. Görüldüğü gibi, optik izolatörün ve WDM kuplörün PMD değerleri EDF’nin PMD değerlerine göre ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Dolayısıyla, bir EDFA’nın PMD değerini belirleyen bileşen EDF’dir.



Şekil 4.6. 1600 km'lik EDFA sisteminde Jones matrisi yöntemi kullanılarak elde edilen benzetim sonuçları

Sistemdeki tüm EDFA'lerden kaynaklanan toplam PMD ( $\Delta\tau_{EDFA}$ ),

$$\Delta\tau_{EDFA} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left\{ \Delta\tau_{ISO_i}^2 + \Delta\tau_{WDM_i}^2 + \Delta\tau_{EDF_i}^2 \right\}} \cong \Delta\tau_{EDF} \sqrt{N} \quad (4.1)$$

şeklinde ifade edilebilir.

İletişim sistemindeki toplam PMD ( $\Delta\tau_{sis}$ ) ise,

$$\Delta\tau_{sis} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta\tau_{EDFA_i}^2 + \sum_{j=1}^N \left( \Delta\tau_{f_j} \sqrt{L_j} \right)^2} \cong \sqrt{\left( \Delta\tau_{EDF} \sqrt{N} \right)^2 + \left( \Delta\tau_f \sqrt{L} \right)^2} \quad (4.2)$$

şeklinde hesaplanabilir.

(4.1) ve (4.2) formüllerinde,  $\Delta\tau_{EDFA_i}$  i. EDFA'nın PMD değeri,  $\Delta\tau_{f_j}$  ve  $L_j$ , sırasıyla, j. optik fiber parçasının PMD değeri ve uzunluğudur. Ayrıca,  $\Delta\tau_{EDFA} = \Delta\tau_{EDFA1} = \Delta\tau_{EDFA2} = \dots = \Delta\tau_{EDFAN}$  ve  $\Delta\tau_f = \Delta\tau_{f1} = \Delta\tau_{f2} = \dots = \Delta\tau_{fN}$  kabul edilmiştir.  $N (= 16)$  ve  $L (= 1600 \text{ km})$ , sistemdeki toplam EDFA sayısı ve toplam optik fiber uzunluğudur.

EDFA'lerden kaynaklanan toplam PMD, (4.1) formülünden  $\sim 0.736$  ps bulunur. DSF'lerde  $\Delta\tau_f$ 'in uygulamalardaki tipik değeri  $0.1 \text{ ps}/(\text{km})^{1/2}$  olduğuna göre, sistemin toplam PMD'si, (4.2) formülünden  $\sim 4.07$  ps olarak hesaplanır. Tipik değerler kullanılarak yapılan bu hesaplamada, sistemdeki toplam PMD değerini belirleyen temel etkenin optik fiber olduğu açıkça görülmektedir.

Benzetimlerde elde edilen PMD değerleri, sabit çözümleyici yönteminde  $5.14$  ps ve Jones matrisi yönteminde  $3.09$  ps'dir. Bu değerler, uygulamadaki tipik değerler kullanılarak hesaplanan teorik değer ( $4.07$  ps) ile büyük ölçüde uyumludur. İncelenen  $1600$  km'lik iletişim sisteminin uzunluğu dikkate alındığında,  $\pm 1$  ps'lik farkın çok önemli olmadığı görülmektedir. Teorik değerler ile benzetimde bulunan değerler arasındaki bu farkın nedeni, teorik hesaplamalarda tipik değerlerin kullanılmış olması ve sabit çözümleyici yöntemiyle PMD değeri belirlenirken, Şekil 4.5'te de görüldüğü gibi, bazı dalgaboylarında hangi noktaların maksimum veya minimum seçilmesi gerektiği konusundaki belirsizliklerdir (Karlık ve Yılmaz 2003 a)

Benzetimlerde elde edilen sonuçlar toplu olarak değerlendirildiğinde, sabit çözümleyici yönteminin, optik fiber omurgalı kablolu yerel alan ağlarındaki PMD ölçümlerinde; Jones matrisi yönteminin, uzak mesafe haberleşme sistemlerindeki PMD ölçümlerinde kullanılmasının uygun olduğu görülmektedir.

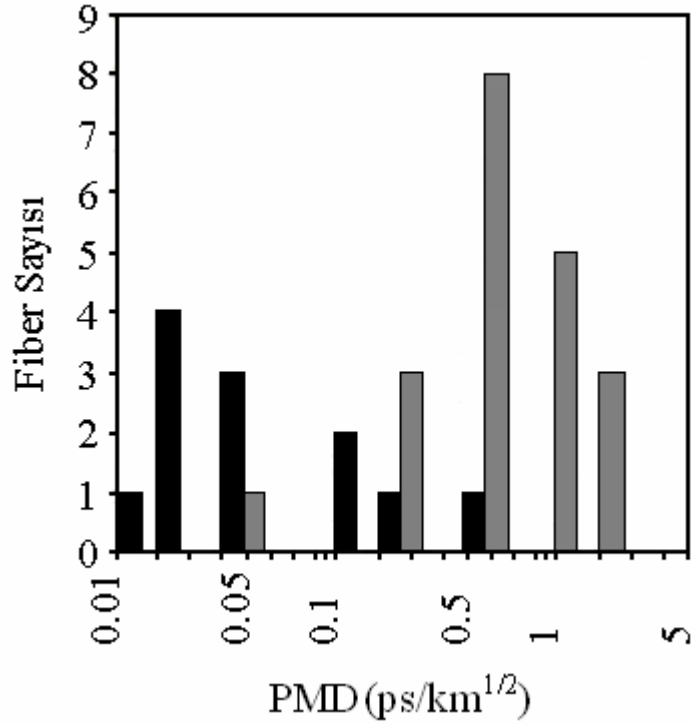
## **4.2. G.652 Standard Haberleşme Fiberlerindeki PMD Deneylelerinden Elde Edilen Sonuçlar**

### **4.2.1. Çiftkırılma ve Polarizasyon Mod Kuplajının PMD'ye Etkisiyle İlgili Sonuçlar**

Bölüm 3.3.1'de açıklanan ayarlı lazer ve PMD/PDL çözümleyici kullanılarak makaralara sarılı ve döşenmiş fiberler üzerinde elde edilen PMD deney sonuçları Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

Ayrıca, altı adet döşenmiş ve beş adet makaralara sarılı kabloların tamamında olduğu gibi  $10$  ya da  $20$  m uzunluklu parçalarında elde edilen deney sonuçları ve bu deneylerden hesaplanan polarizasyon mod kuplaj uzunlukları Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.



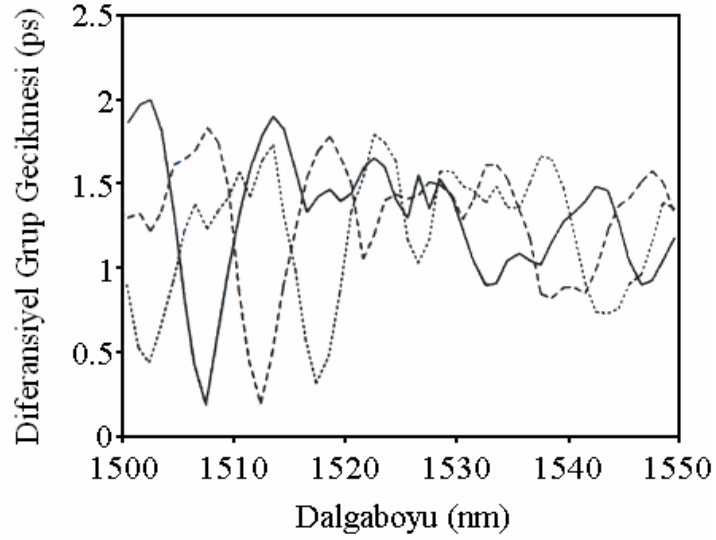


Şekil 4.7. Makaralara sarılı (siyah çubuklar) ve döşenmiş (gri çubuklar) fiber kablolarda ölçülen PMD değerleri

Çizelge 4.1. Uzun ( $L$ ) ve kısa ( $S$ ) fiberlerin ölçülen DGD ve PMD değerleriyle hesaplanan polarizasyon mod kuplaj uzunlukları ( $h$ )

fiber	$\tau_L$ (ps)	$L_L$ (m)	PMD (ps.km <sup>-1/2</sup> )	$\tau_S$ (ps)	$L_S$ (m)	$h$ (m)
1	0.46	750	0.53	0.011	10	233
2	0.07	750	0.08	0.001	10	653
3	0.52	750	0.60	0.006	10	1001
4	0.29	750	0.34	0.013	10	66
5	0.15	750	0.17	0.004	10	188
6	0.44	750	0.51	0.007	10	527
7	0.58	2350	0.38	0.182	20	1.7
8	0.16	1685	0.12	0.031	20	6.3
9	0.07	1760	0.05	0.004	20	70
10	0.13	3270	0.07	0.012	20	14
11	0.30	4520	0.14	0.058	20	2.4

Bazı durumlarda seçilen kısa örneğin uzunluğu tüm fiberi yeterince iyi temsil edememektedir. 9 numaralı makaraya sarılı fiberde gözlenen yüksek mod kuplaj uzunluğu değerinin sebebi büyük bir ihtimalle bundan kaynaklanmaktadır. Deney düzeneğinden kaynaklanan çiftkırılmanın hesaplanan  $h$  değerleri üzerinde belirgin bir etkisi bulunmamaktadır. Aksi bir durumda, öncelikle kısa fiberler etkilenecek ve  $h$  değeri kısa fiberin PMD değeriyle ters orantılı olduğundan gerçek mod kuplaj uzunluğu hesaplanandan daha yüksek olacaktır.

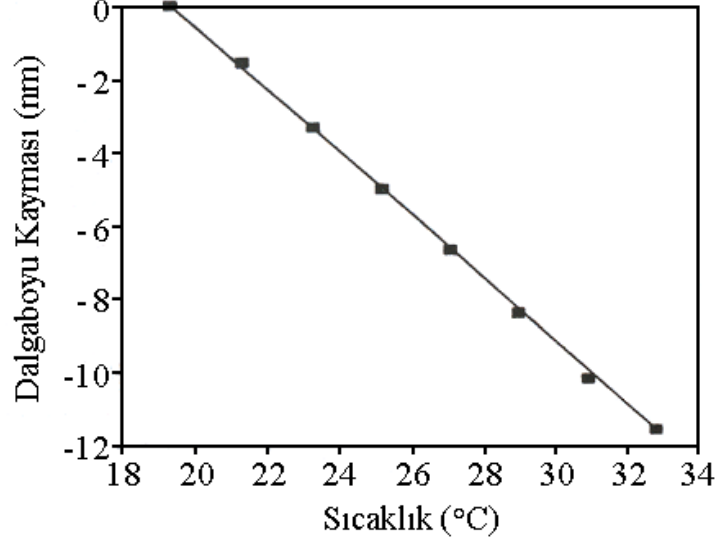


Şekil 4.8. 30 °C (düz), 25 °C (kesikli) ve 20 °C (noktalı çizgi) sıcaklıklarda PMD spektrumları

PAT9000F PMD/PDL çözümlenici kullanılarak kablolardan birinin DGD'sinin dalgaboyunun fonksiyonu biçiminde, üç farklı sıcaklık derecesinde ölçülmesinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Şekil 4.8'den de görüldüğü gibi, sıcaklıktaki değişim PMD spektrumunun şeklini değiştirmekten çok dalgaboyunda kayma meydana getirmiştir. Aynı kablodaki iki farklı fiberde yapılan deneyler sonucunda, ortalama kaymanın, Şekil 4.9'da da görüldüğü gibi, yaklaşık  $-1.0 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  olduğu saptanmıştır.

Şekil 4.7'den de açıkça görüldüğü gibi, döşenmiş fiberlerin PMD'leri makaralara sarılı olanlarından belirgin biçimde daha büyüktür. Döşenmiş ve makaralara sarılı fiberlerin mod kuplaj uzunlukları Çizelge 4.1'den karşılaştırılırsa, döşenmiş fiberlerin daha büyük değerli PMD'leri, makaralara sarılı fiberlerinkine oranla daha uzun olan  $h$  değerleriyle ilişkilendirilebilir. (3.14) formülü kullanılarak,  $\langle h \rangle$

döşenmiş fiberler için 206 m ve makaralara sarılı fiberler için 3.58 m olarak bulunur. Yani, döşenmiş fiberlerin  $\langle h \rangle$  değeri, makaralara sarılı fiberlerin  $\langle h \rangle$  değerinden 58 kat daha büyüktür.



Şekil 4.9. PMD spektrumundaki dalgaboyu kayması

Farklı kablo tasarımları, PMD değerlerindeki değişimleri etkilerler. Deneylede kullanılan kablo yapısında, fiber ile gevşek tüpün cidarı arasında herhangi bir mekanik kontak bulunmaması, gevşek tüplü fiber kabloların çok büyük polarizasyon mod kuplaj uzunluklarına sahip olmalarına imkan tanır. Fiber üzerine mekanik bir baskının uygulandığı başka bir kablo yapısında bu durum farklı olacaktır. Bu nedenle, farklı kablo tipleri üzerinde PMD ve kuplaj uzunluğu araştırmaları önemli bir inceleme konusudur.

Mod kuplaj uzunluğu ve PMD üzerindeki etkileriyle ilgili yorumlamaların ardından test kablosunun çiftkırılma özelliklerini de detaylı olarak analiz etmekte yarar vardır. Şekil 4.8 ve 4.9'dan da görüldüğü gibi, çevre sıcaklığındaki değişimler döşenmiş bir kablonun PMD spektrumunun şeklini değiştirmekten çok dalgaboyunda bir kaymaya sebebiyet vermektedir. Fiber kablo, düzgün çiftkırılmalı küçük fiber parçalarının birleşimi şeklinde düşünülürse, PMD spektrumunun sıcaklıkla değişmesinin üç nedeni vardır. Birinci neden, ısıl genleşme nedeniyle fiber boyunda meydana gelen uzamadır. Bu durum, polarizasyon durumlarında ve polarizasyon modları arasındaki grup gecikmelerinde değişimlere neden olur. Ancak 10 °C'lik bir sıcaklık artışında 1 km'lik

bir fiberde sadece birkaç santimetrelilik bir uzama meydana geldiğinden, bu olayın PMD üzerindeki etkisi çok küçüktür. İkinci neden, (3.8) formülünden de görüldüğü gibi, çiftkırılmanın fiberlerdeki iç gerilmeler nedeniyle sıcaklığa doğrusal bağlılığıdır. Üçüncü neden, özellikle makaralara sarılı fiberlerde tampon ve kılıf malzemelerinin ısıl genişmesinin mod kuplajında değişimler meydana getirmesidir.

Her fiber parçasında optik fazın değişimini sağlamak için, fiber uzunluğundaki artış dalgaboyundaki bir artışla kompanze edilebilir; çünkü (3.8) ve (3.9) formüllerindeki çiftkırılmaya sebebiyet veren en önemli faktörler dalgaboyuyla ters orantılıdır. Genleşmenin etkisi, Çizelge 3.1'de verilen ısıl genişleme katsayıları kullanıldığında, test fiberinin PMD spektrumunda 0.01 nm/°C değerinde pozitif yönlü küçük bir kayma şeklinde olacaktır.

İç gerilmelerden kaynaklanan çiftkırılmadaki değişimleri de dalgaboyundaki değişimlerle kompanze etmek mümkündür. Dalgaboyundaki kayma miktarının belirlenmesi için  $\Delta T$  değerinin – fiberde kullanılan cam tipinin yumuşama sıcaklığıyla ortam sıcaklığı arasındaki farkın – bilinmesi gerekir. Bu değer, fiberde kullanılan katkı maddelerine göre değişmesine rağmen, her durumda saf kuvarsın yumuşama sıcaklığı olan 1500 °C'den daha küçüktür. Bu nedenle, 1500 nm civarında iç gerilmelerden kaynaklanan çiftkırılma kompanzasyonu için dalgaboyunda yaklaşık 1.3 nm/°C'lik negatif yönlü büyük bir kayma gereklidir.

Yukarıda bahsedilen üçüncü sıcaklık etkisi – tampon ve kılıf malzemelerinin ısıl genişmesinden kaynaklanan mod kuplajı değişimleri – oluşumlarındaki rastgelelik nedeniyle benzer bir şekilde kompanze edilemezler.

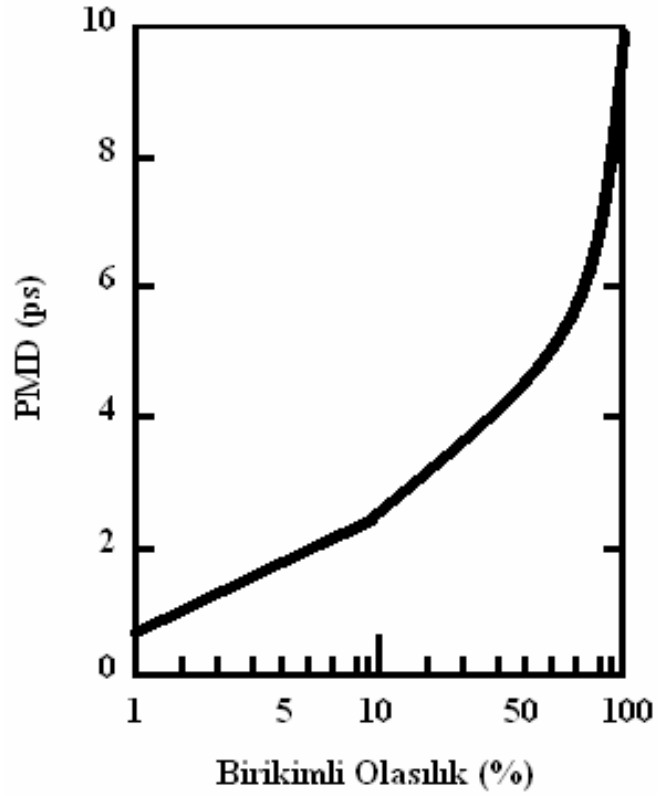
Deney sonuçları incelendiğinde, PMD spektrumunda gözlenen dalgaboyu kayması, eliptik çekirdek deformasyonu ve iç gerilmelerden kaynaklanan çiftkırılma değişimleriyle açıklanır. Çiftkırılmaya neden olan diğer etkiler SOP'yi belirgin ölçüde değiştirebilecek kadar büyük olsalardı, dalgaboyu kaymasının yanısıra PMD spektrumunun şeklinde de belirgin değişiklikler meydana gelecekti.  $\Delta T$  değerindeki yaklaşıklıklar göz önüne alınırsa, gözlenen kayma değeriyle (-1.0 nm/°C) hesaplanan değer (-1.3 nm/°C) birbiriyle uyumaktadır. Yüksek sıcaklıklarda ısıl genişleme katsayıları da arttığından, (3.8) formülündeki  $\Delta\alpha\Delta T$  ifadesi yerine  $\int\Delta\alpha\Delta T$  ifadesinin kullanılması daha doğrudur (Rashleigh 1983). Bu durumda sıcaklık değişimini kompanze etmek için gereken dalgaboyu kayması, çiftkırılmanın sıcaklığa lineer bağlı

olduğu durumdakinden daha küçük olacaktır. Bu sonuç, deneylerde saptanan dalgaboyu kaymasıyla örtüşmektedir.

#### 4.2.2. G.652 Standard Haberleşme Fiberinde PMD'nin Sıcaklık ile Değişimi Gösteren Sonuçlar

##### 4.2.2.1. Adiabatik Rejimde Elde Edilen Sonuçlar

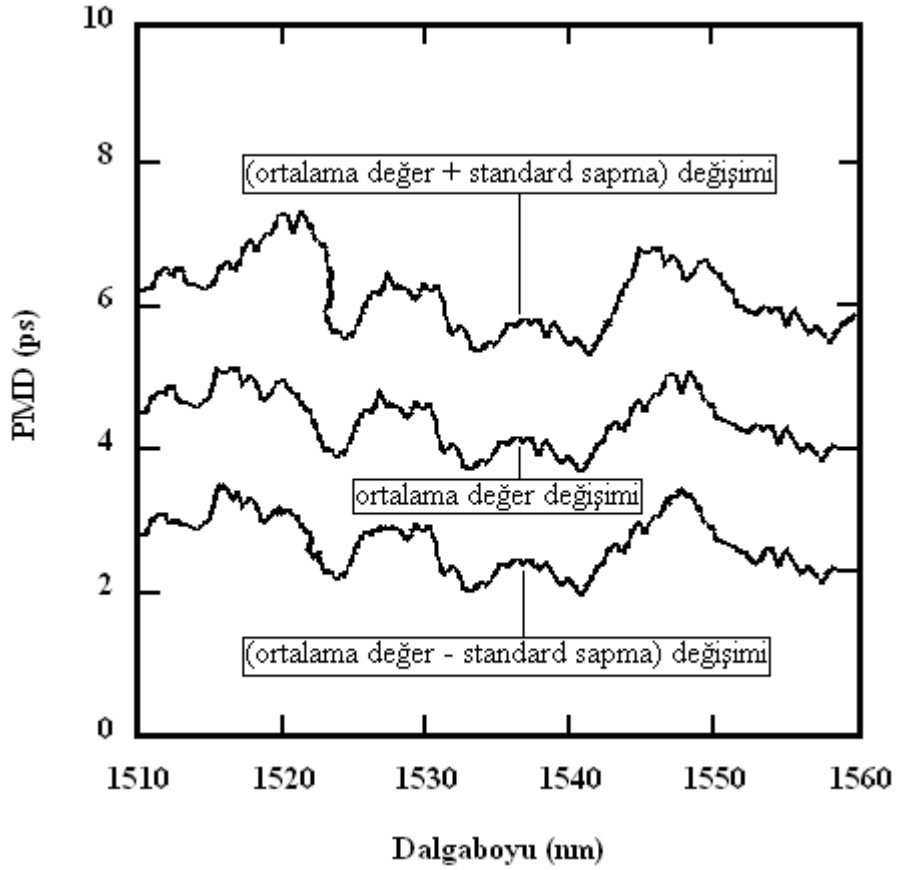
Adiabatik rejimde B fiberinde 4750 ölçüm sonucunda elde edilen PMD dağılımı Şekil 4.10'da görülmektedir. Dağılım grafiğinin ordinatı, Maxwell fonksiyonundan türetilen birikimli olasılıktır.



Şekil 4.10. Adiabatik rejimde B fiberi için PMD dağılımı

Şekil 4.10'dan 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 4.56 ps ve 1.78 ps'dir. Standard sapmanın ortalama değere oranı 0.39 olup bu değer, teorik oran 0.42'ye yakındır.

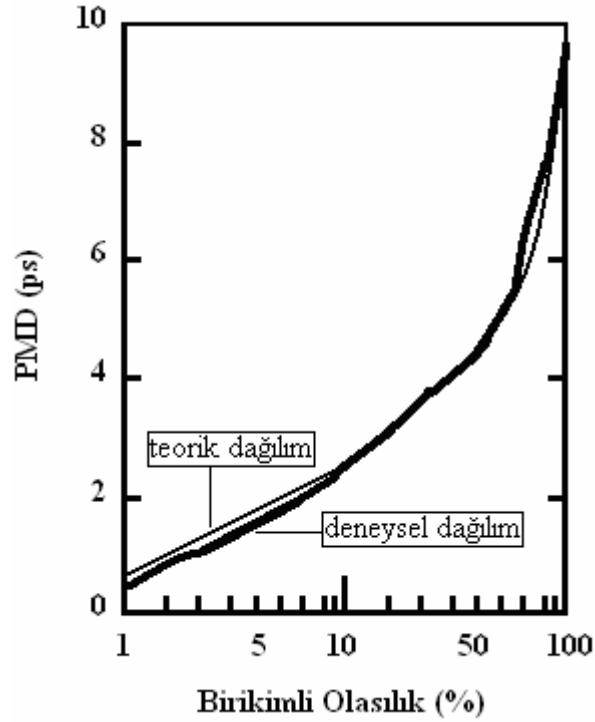


Şekil 4.11. Adiyatik rejimde B fiberi için PMD dalgaboyu spektrumu

Adiyatik rejimde PMD'nin dalgaboyuyla değişim grafiği Şekil 4.11'de verilmiştir. Bu grafikte, ortalama değer, ortalama değer + standard sapma ve ortalama değer - standard sapma eğrileri görülmektedir. Ortalama PMD ve standard sapmanın ortalama değere oranı dalgaboyuyla az da olsa değişmektedir.

#### 4.2.2.2. İzotermal Rejimde Elde Edilen Sonuçlar

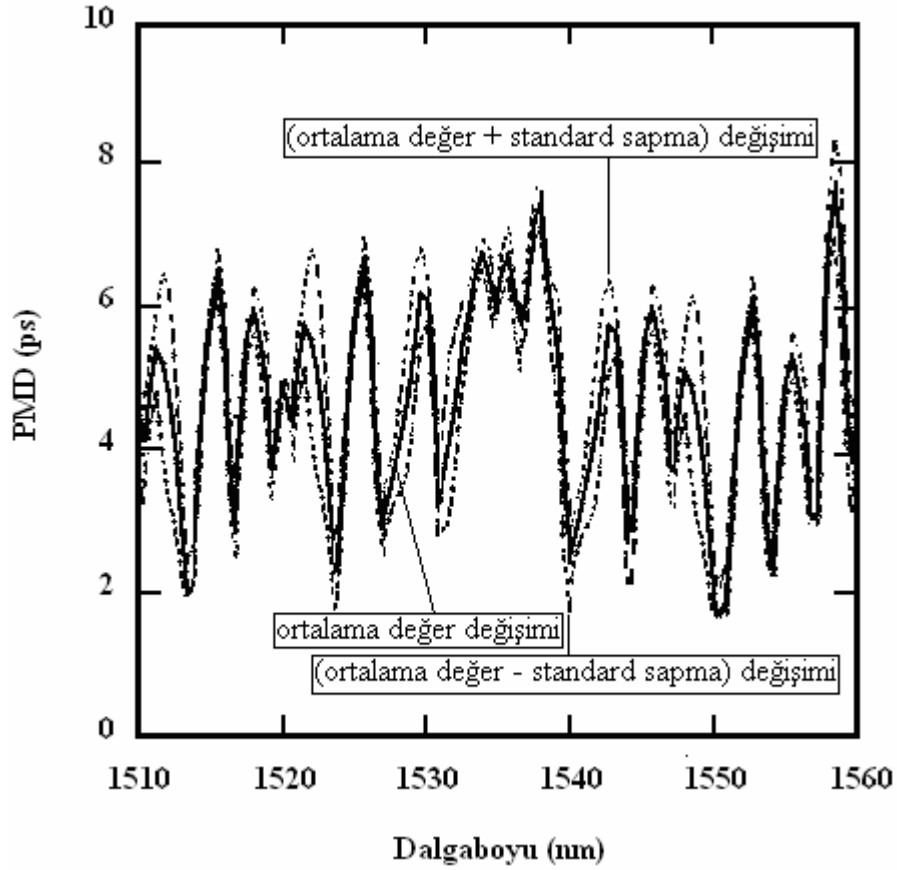
Şekil 4.12'de,  $25 \pm 0.5$  °C ortam sıcaklığında B fiberinde 4750 ölçüm sonucunda elde edilen PMD dağılımı görülmektedir. Ölçümler, 532 saatlik toplam test süresi boyunca her iki saatte bir tekrarlanmıştır.



Şekil 4.12. İzotermal rejimde B fiberi için PMD dağılımı

Şekil 4.10 ve Şekil 4.12'deki adiabatik ve izotermal PMD dağılımları karşılaştırılırsa; adiabatik dağılımın Maxwell fonksiyonuna uyduğu, izotermal dağılım ise 0.8-2.3 ps ve 5.5-7.6 ps aralığındaki PMD değerlerinde Maxwell fonksiyonundan sapmalar gösterdiği açıktır.

Şekil 4.13'te, 25 °C sıcaklıktaki izotermal koşullar altında B fiberinin PMD dalgaboyu spektrumu, ortalama değer, ortalama değer + standard sapma ve ortalama değer – standard sapma için verilmiştir. Görüldüğü gibi, izotermal rejimde ve sabit dalgaboylarında PMD standard sapması, ortalama değerinin küçük bir yüzdesidir. B fiberi için sabit dalgaboyunda standard sapmanın ortalama değere oranı 0.14 olarak tespit edilmiştir. Bu oran, Maxwell dağılımından elde edilen teorik değerden (0.42) 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.

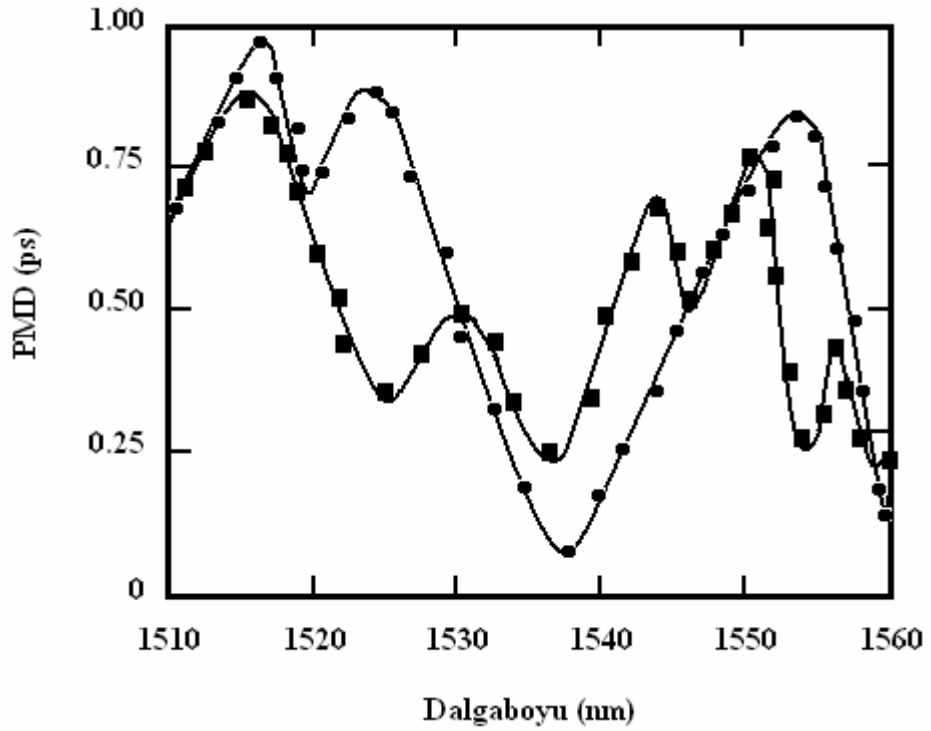


Şekil 4.13. İzotermal rejimde B fiberi için PMD dalgaboyu spektrumu

Sabit dalgaboyunda ortalama PMD'nin sıcaklık bağımlılığını elde edebilmek için izotermal sıcaklık artışı, PMD değişimlerinin monoton olmasına imkan sağlayacak şekilde küçük değerlerde tutulmalıdır. Çizelge 3.2'deki A fiberinde, 45 °C ve 48 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilen 72 saatlik deneyde elde edilen ortalama PMD değerleri Şekil 4.14'te görülmektedir.

Şekil 4.14'ten anlaşılacağı gibi, izotermal şartlar altında PMD sıcaklığa önemli ölçüde bağlıdır. Bu sıcaklık duyarlılığı,  $[1/\tau(\lambda)]\partial\tau(\lambda)/\partial T$  parametresi ile belirlenir. Burada,  $\tau(\lambda)$  sabit dalgaboyundaki PMD ve  $T$  sıcaklıktır. Şekil 4.14'teki veriler için, bu parametrenin tüm dalgaboyları üzerinden ortalaması sifıra çok yakındır. Ancak, ortalama değer etrafında, etkin değeri %19/°C olan bir dağılım mevcuttur. Dolayısıyla





Şekil 4.14. 45 °C (daire noktali eğri) ve 48 °C (kare noktali eğri) sıcaklıkta A fiberinin PMD dalgaboyu spektrumu

$0 \pm \%19$  /°C'lik sıcaklık duyarlılığı bulunmaktadır. Çizelge 3.2'de verilen A fiberinin PMD değerlerinin, B fiberinin PMD değerlerinden daha düşük olduğu gözönüne alınır, B fiberinin daha güçlü bir sıcaklık duyarlılığına sahip olduğu kolayca anlaşılır.

### 4.3. Fiber Ribbon Kablolardaki PMD Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar

#### 4.3.1. Fiber Ribbon Kablolarda Anlık PMD Ölçümleri ve PMD'nin Ribbon Kalınlığı ile Değişimini Gösteren Sonuçlar

Bölüm 3.4.2'de sözü edilen yöntem ve cihazlar kullanılarak, üç tip fiber ribbon kablonun 1380-1640 nm dalgaboyu aralığında ölçülen anlık PMD değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Fiber ribbon kablolarda ölçülen anlık PMD değerleri (ps/km<sup>1/2</sup>)

Parametre	A Kablosu	B Kablosu	C Kablosu
Ortalama	0.0443	0.0451	0.0386
$\sigma$	0.0212	0.0238	0.0164
Maksimum	0.184	0.161	0.122
Minimum	0.023	0.026	0.018
Fiber sayısı	528	528	528
Ortalama kablo uzunluğu	1.450 km	1.410 km	1.475 km

Çizelge 4.2’de verilen ölçüm sonuçları kendi aralarında karşılaştırılırsa, C kablosunun PMD performansının A ve B kablolarının PMD performanslarından daha iyi olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi, Şekil 3.8’den de görüldüğü gibi, C kablosunun her slotunda dolgu malzemesinin bulunmasıdır. Bilindiği gibi, PMD, fiber boyunca oluşan mod kuplajı ve çiftkırılma değişimleri gibi etkenlerin karmaşık bir fonksiyonudur. C kablosundaki dolgu malzemesi, fiberdeki gerilmeleri değiştirmekte ve bu faktörleri olumlu yönde etkilemektedir.

Haberleşme sistemlerinde, PMD tarafından sınırlanan maksimum iletim uzunluğu

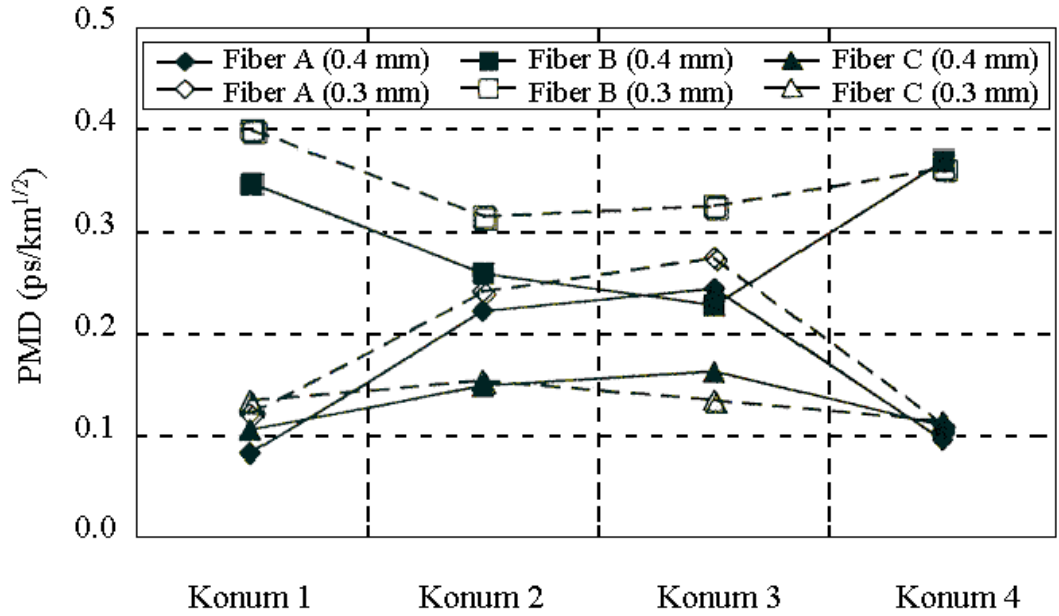
$$L = \left[ \frac{10^3 f}{B \times \text{PMD}} \right]^2 \quad (4.3)$$

ile hesaplanır (Jacobs ve ark. 1997). Burada,  $B$  bit hızı,  $L$  iletim mesafesi ve  $f$  darbe - periyot oranıdır.  $B = 40$  Gbps,  $f = 0.1$  ve  $L = 400$  km olursa, maksimum PMD değeri  $0.125$  ps/km<sup>1/2</sup> olarak hesaplanır. Ölçülen anlık PMD değerleri hesaplanan değerle karşılaştırılırsa, bu kabloların yüksek bit hızlı iletişimi büyük ölçüde destekleyeceği görülmektedir.

Ribbon kalınlığının ve ribbon içindeki fiberlerin konumlarının kablonun PMD performansı üzerindeki etkisini incelemek için, Bölüm 3.4.2’de bahsedilen yöntem ve cihazlar kullanılarak elde edilen deney sonuçları Çizelge 4.3’te ve Şekil 4.15’te görülmektedir.

Çizelge 4.3. Fiber ribbonlarda ölçülen PMD değerleri ( $\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ )

Fiber Tipi		Konum 1	Konum 2	Konum 3	Konum 4
A Fiberi	0.3 mm	0.121	0.240	0.272	0.108
	0.4 mm	0.081	0.220	0.241	0.093
B Fiberi	0.3 mm	0.401	0.316	0.325	0.362
	0.4 mm	0.348	0.257	0.229	0.366
C Fiberi	0.3 mm	0.133	0.156	0.132	0.114
	0.4 mm	0.107	0.151	0.163	0.107



Şekil 4.15. Fiber ribbon PMD değerleri

Deney sonuçları ribbon içindeki fiberlerin konumlarının PMD performansını etkilediğini göstermektedir. Çizelge 4.3 ve Şekil 4.15'ten görüldüğü gibi, dıştaki fiberlerin (Konum 1 ve Konum 4) PMD değerleriyle içteki fiberlerin (Konum 2 ve Konum 3) PMD değerleri arasında belirgin bir fark bulunmaktadır. PMD değerleriyle ribbon kalınlığı arasında da bir bağlantı olduğu açıktır. Genellikle, 0.3 mm kalınlıklı ribbonların PMD'leri 0.4 mm kalınlıklı ribbonlarınkinden daha büyüktür.

Bu deneylerde, her ribbon makaralara sarılma sırasında 200 g'lık bir gerilme kuvvetine maruz kalmıştır. Bu durum, çiftkırılma ve mod kuplajının artmasına yol açmıştır. Ancak, bu faktörlerin PMD üzerindeki etkileri değişik olmuştur. Çiftkırılmadaki artışın etkisinin boyuna mod kuplajındaki artışın etkisinden daha fazla olduğu fiberlerde PMD artmış; boyuna mod kuplajının etkisinin daha baskın olduğu fiberlerde PMD azalmıştır (Karlık ve Yılmaz 2003 b).

#### 4.3.2. Fiber Ribbon Kablolarda PMD'nin Mekanik Test Koşullarıyla Değişimini Gösteren Sonuçlar

Bölüm 3.4.3'de açıklanan mekanik testlerde elde edilen DGD değişimi Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

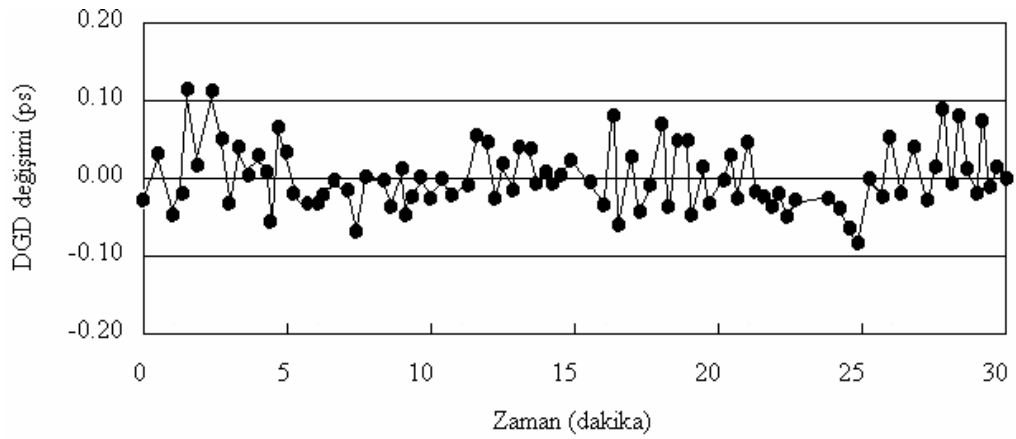
Çizelge 4.4. Fiber ribbon kablolarında mekanik test koşullarında gözlenen DGD değişimi (ps)

Test	A Kablosu		B Kablosu		C Kablosu
	Dıştaki fiber halka	İçteki fiber halka	Dıştaki fiber halka	İçteki fiber halka	Tüm fiber halka
Gerilme	0.01	0.04	0.04	0.02	0.01
Sıkıştırma	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02
Burulma (+/-)	0.03/-0.06	-0.07/-0.05	0.01/-0.02	0.05/0.01	-0.04/-0.06
Bükülme	0.03	-0.05	-0.05	-0.08	0.02

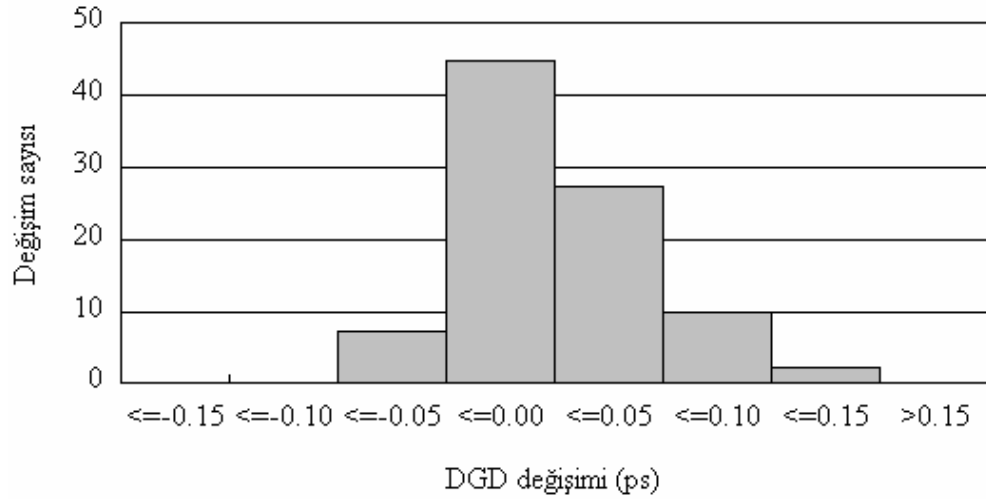
Bu sonuçlara göre, IEC-794-1-E standartlarına uygun mekanik test koşulları altında belirgin bir PMD değişiminin olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca A ve B kablolarında ribbon içindeki fiberlerin konumu ile PMD performansı arasında bir ilişki görülmemiştir (Karlık ve Yılmaz 2004 a).

### 4.3.3. Fiber Ribbon Kablolarda PMD'nin Esneme ile Değişimini Gösteren Sonuçlar

Bölüm 3.4.4'te açıklanan yöntem ve cihazlarla yapılan esneme testi süresince ölçülen DGD değişimi Şekil 4.16'da görülmektedir. Bu testte ölçülen ortalama DGD 0.17 ps olup sonuçlar yaklaşık olarak % 24'lük bir değişim göstermektedir. Esneme testindeki DGD değişiminin dağılımı Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Esneme testinde gözlenen DGD değişimi

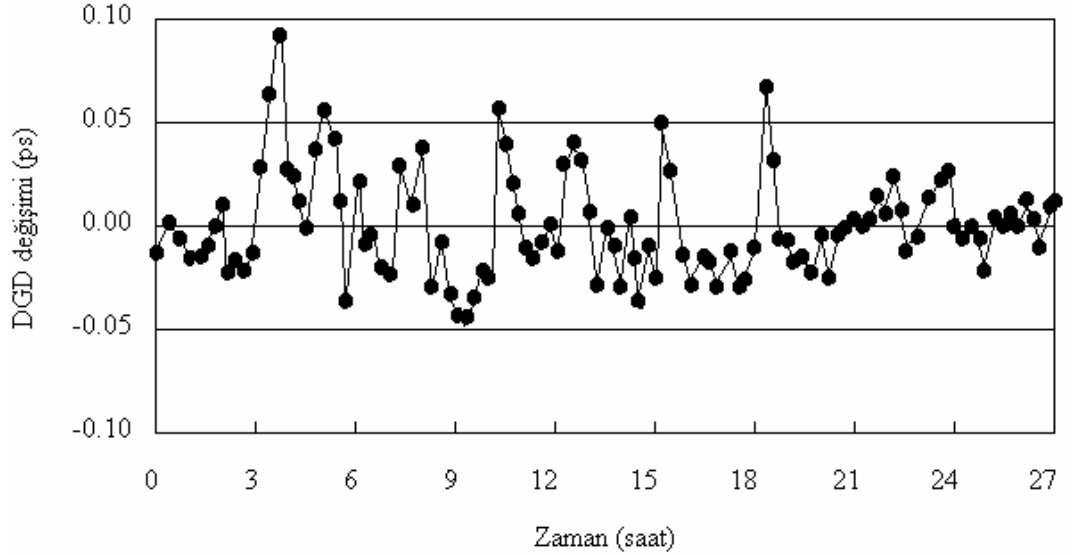


Şekil 4.17. Esneme testinde elde edilen DGD değişimi dağılımı

Test sırasında değişim gözlemlenmesine rağmen, daha sonra herhangi bir artık etki kalmamıştır (Karlık ve Yılmaz 2004 a).

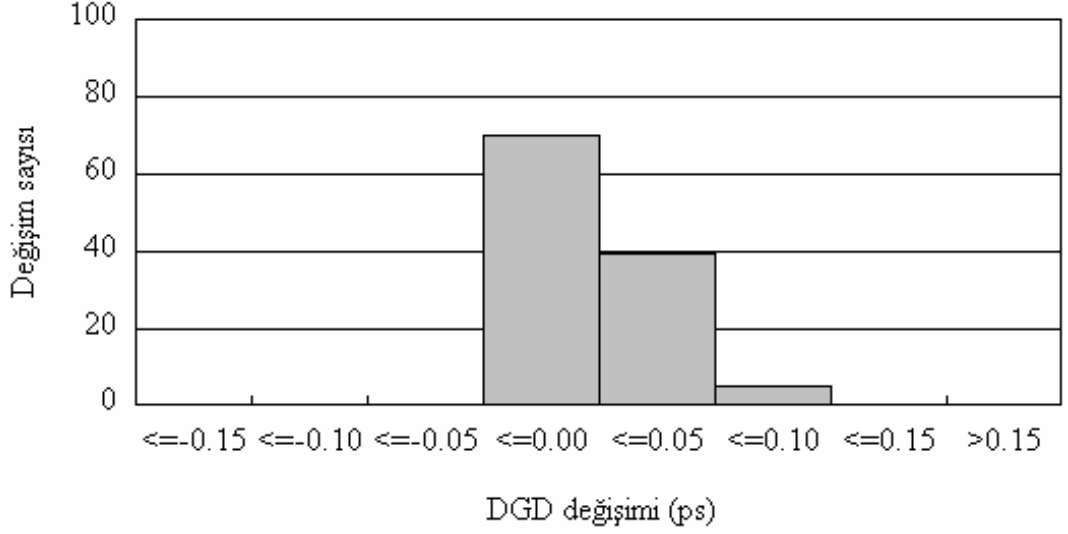
#### 4.3.4. Fiber Ribbon Kablolarda PMD'nin Titreşim ile Değişimini Gösteren Sonuçlar

Bölüm 3.4.5'te açıklanan yöntem ve cihazlarla, rüzgar nedeniyle oluşan titreşimin kablo performansına etkisini gözlemlemek için PMD ile titreşim arasındaki ilişkinin incelendiği titreşim testi boyunca ölçülen DGD değişimi Şekil 4.18'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Titreşim testinde gözlenen DGD değişimi

Testte ölçülen ortalama DGD 0.20 ps olup, titreşim frekansı ve titreşim genliğinin DGD üzerindeki toplam etkisi %12'lik bir değişim şeklindedir. DGD değişiminin dağılımı Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Buradaki önemli nokta, titreşim frekansındaki değişimlerin PMD üzerindeki etkisinin küçük (%6'lık bir değişim), titreşim genliğindeki değişimlerin PMD üzerindeki etkisinin ise belirgin (%15'lik bir değişim) olmasıdır (Karlık ve Yılmaz 2004 a).



Şekil 4.19. Titreşim testinde elde edilen DGD değişimi dağılımı

Sonuçlar (4.3) formülü kullanılarak değerlendirildiğinde;

Ortalama DGD'nin 0.2 ps olduğu şartlarda maksimum iletim uzunlukları,

a) 40 Gbit/s sistemlerde 1563 km ve 120 Gbit/s sistemlerde 174 km'dir.

b) Titreşimin etkisiyle (rüzgar hızı ve frekansına bağlı olarak), 40 Gbit/s sistemlerde 1246 km ve 120 Gbit/s sistemlerde 138 km olacaktır.

Kabloya uygulanan titreşim maksimum iletim uzunluğunu % 20 azaltmaktadır.

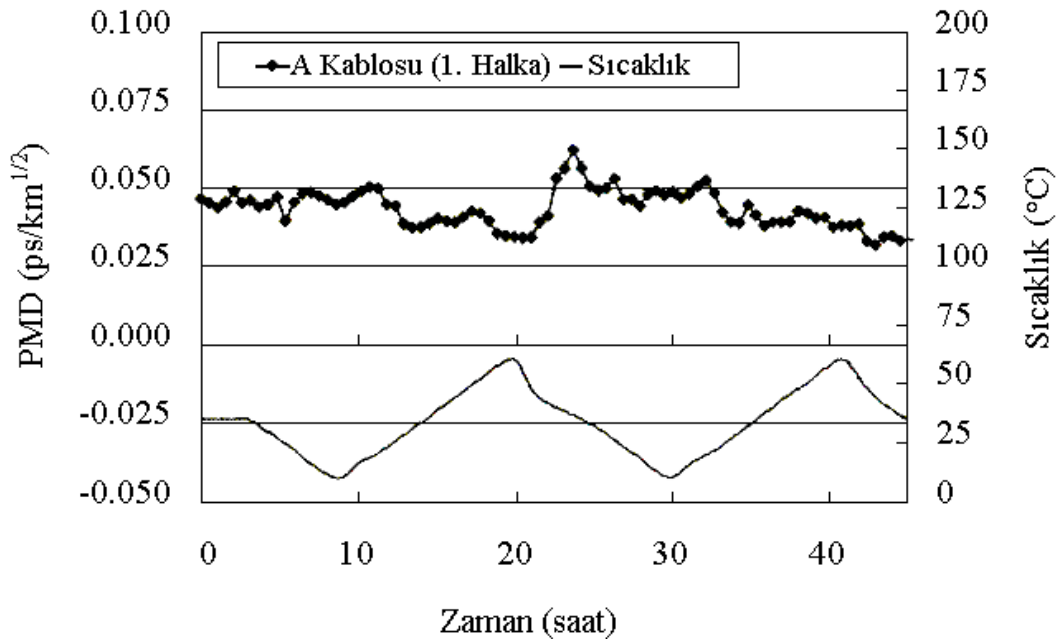
Esneme ve titreşim testlerindeki DGD değişimlerinin sebebi şöyle açıklanabilir:

Esneme ve titreşim, fiber kabloya harici yanal zorlanma yükler. Fiber/kablo etkileşimiyle ilgili unsurlar PMD değişimlerine sebep olur. Slotlu çekirdeğe sahip kablolarda, fiber/kablo etkileşimine hassasiyet diğer kablolardakinden daha fazladır. Bunun nedeni, kablo boyunca fiber ve çekirdek arasında çok sayıda temas noktası bulunmasıdır. Slotlu çekirdek malzemesi sert olduğu için, esneme ve dikey titreşim sırasında meydana gelen harici streslerin kablo boyunca oluşturduğu çiftkırılma ve mod kuplaj dağılımlarındaki değişimler DGD değişimlerine sebep olur.

#### 4.3.5. Fiber Ribbon Kablolarda PMD'nin Sıcaklıkla Değişimini Gösteren Sonuçlar

A kablosunun dış fiberlerinin oluşturduğu birinci halkada ve iç fiberlerinin oluşturduğu ikinci halkada ortam sıcaklığının 10 °C ile 60 °C arasında değiştiği durumda elde edilen PMD grafikleri Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de verilmiştir.

Şekil 4.20 ve 4.21, sıcaklıktaki değişimle beraber PMD'nin de değiştiğini göstermektedir. Birinci halkadaki ortalama PMD  $0.044 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  ve PMD'nin sıcaklıkla değişimi % 14.2, ikinci halkadaki ortalama PMD  $0.047 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  ve PMD'nin sıcaklıkla değişimi % 10.7 olarak bulunmuştur. Birinci ve ikinci halkaların PMD performansları arasındaki bu farkın nedeni, dış fiberlerden oluşan birinci halkanın fiber/kablo etkileşimlerine daha fazla maruz kalması, iç fiberlerin oluşturduğu ikinci halkanın ise dış fiberler sayesinde bu tür etkilerden korunmasıdır. Sonuç olarak, kablo boyunca oluşan çiftkırılma ve mod kuplajı birinci halkada daha büyüktür.



Şekil 4.20. Ortam sıcaklığındaki değişimlerin PMD'ye etkisi (birinci halka)

10 °C ile 60 °C arasında yapılan testte elde edilen sonuçlar (4.3) formülü kullanılarak değerlendirildiğinde;

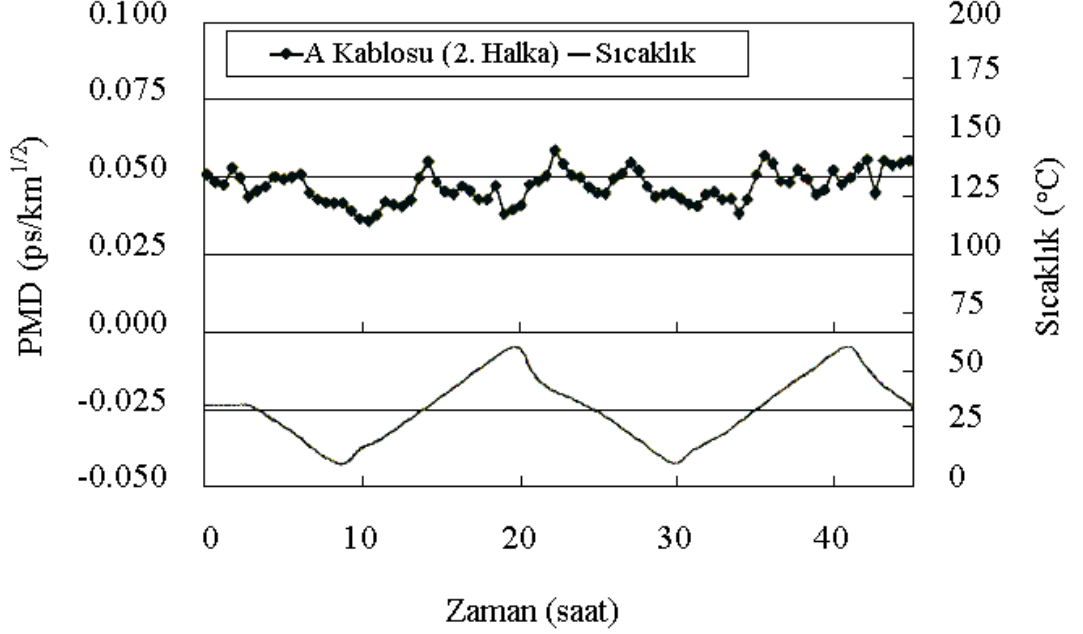
Birinci halkada ortalama PMD'nin  $0.044 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  olduğu şartlarda maksimum iletim uzunlukları

a) 40 Gbit/s sistemlerde 3228 km ve 120 Gbit/s sistemlerde 359 km'dir.

b) Değişen sıcaklığın etkisiyle, 40 Gbit/s sistemlerde 2475 km ve 120 Gbit/s sistemlerde 275 km olacaktır.



Değişen sıcaklık, birinci halkadaki maksimum iletim uzunluğunu % 23.3 azaltmaktadır.



Şekil 4.21. Ortam sıcaklığındaki değişimlerin PMD'ye etkisi (ikinci halka)

İkinci halkada ortalama PMD'nin  $0.047 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  olduğu şartlarda maksimum iletim uzunlukları

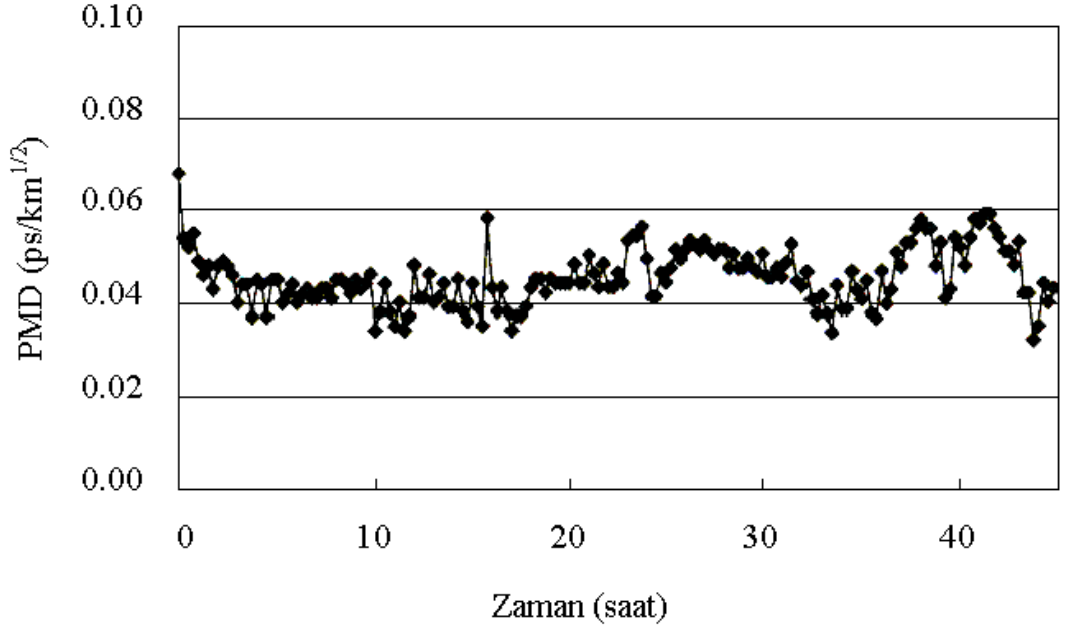
a) 40 Gbit/s sistemlerde 2830 km ve 120 Gbit/s sistemlerde 314 km'dir.

b) Değişen sıcaklığın etkisiyle, 40 Gbit/s sistemlerde 2309 km ve 120 Gbit/s sistemlerde 256 km olacaktır.

Değişen sıcaklık, ikinci halkadaki maksimum iletim uzunluğunu % 18.5 azaltmaktadır.

Bölüm 3.4.6'da kullanılan yöntem ve cihazların açıklandığı kontrollü oda sıcaklığı testinde, beklenildiği gibi, ölçülen PMD değeri son derece kararlı bulunmuştur. Sadece % 2.2'lik ufak bir değişim tespit edilmiştir.

Bölüm 3.4.6'da kullanılan yöntem ve cihazların açıklandığı kontrolsüz oda sıcaklığı testinde, elde edilen PMD değişimi % 9.7 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.22. Açık alan testinde PMD değişimi

Bölüm 3.4.6’da kullanılan yöntem ve cihazların açıklandığı açık alan testinde, B fiberinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Toplam 180 ölçüm yapılan 48 saat süreli açık alan testinde, çevre sıcaklığı 13 °C ile 25 °C arasında değişmiştir. Açık alan testinde, ortalama PMD  $0.045 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  ve PMD’nin sıcaklıkla değişimi % 13.4 olarak bulunmuştur. Bu sonuç, A kablosunun iç ve dış halkalarında yapılan sıcaklık testlerinden elde edilen sonuçlarla benzeşmektedir (Karlık ve Yılmaz 2003 b).

Sonuçlar (4.3) formülü kullanılarak değerlendirildiğinde;

Açık ortam testinde, ortalama PMD’nin  $0.045 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  olduğu şartlarda maksimum iletim uzunlukları

a) 40 Gbit/s sistemlerde 3086 km ve 120 Gbit/s sistemlerde 343 km’dir.

b) Değişen sıcaklığın etkisiyle, 40 Gbit/s sistemlerde 2400 km ve 120 Gbit/s sistemlerde 267 km olacaktır.

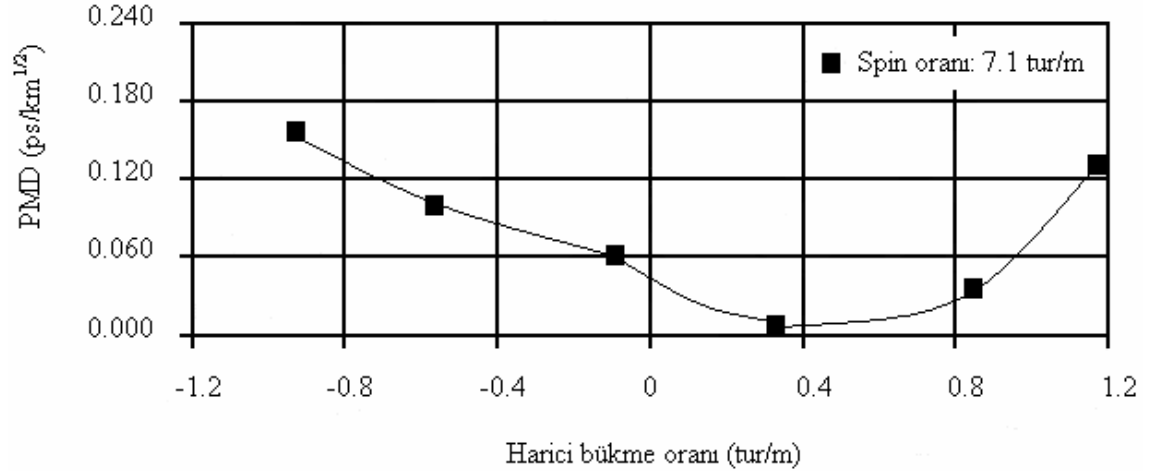
Açık ortam testinde, değişen sıcaklık, maksimum iletim uzunluğunu % 22.2 azaltmaktadır.

#### 4.4. Spinli Fiberlerde PMD'nin Fibere Uygulanan Harici Bükme Oranı ile Değişimini Gösteren Sonuçlar

##### 4.4.1. Sabit Spinli Fiberlerde PMD'nin Harici Bükme Oranı ile Değişimini Gösteren Sonuçlar

Bölüm 3.5.3'te bahsedilen yöntem ve koşullar uygulanarak 7.1 tur/m sabit spin oranlı fiberde elde edilen deney sonuçları Şekil 4.23'te gösterilmiştir.

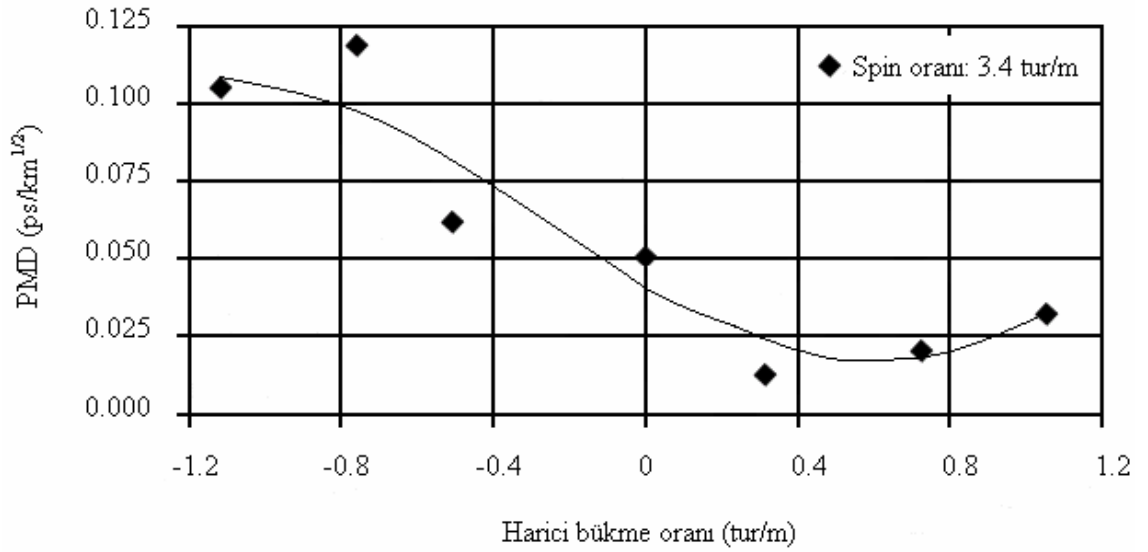
Şekil 4.23'te PMD deney sonuçları verilen fiberle aynı kütükten yapılmış spinsiz bir fiberin, herhangi bir harici bükme uygulanmamışken tipik PMD değeri  $0.44 \text{ ps/km}^{1/2}$  'dir. Spinli fiberde ölçülen PMD değerleri spinsiz fiberdeki tipik değerle karşılaştırılırsa, harici bükmelerin PMD değeri üzerindeki etkilerine rağmen sabit spinlemenin PMD değerini belirgin biçimde düşürdüğü açıkça görülmektedir.



Şekil 4.23. 7.1 tur/m sabit spin oranlı fiberde PMD'nin harici bükme oranı ile değişimi

Beklenildiği gibi harici bükme oranı azaldıkça PMD değeri de düşmektedir. Ancak teorinin ve beklenenin tersine PMD minimum değerine 0 tur/m harici bükme oranında değil yaklaşık 0.35 tur/m harici bükme oranında erişmekte ve  $0.01 \text{ ps/km}^{1/2}$  olmaktadır.

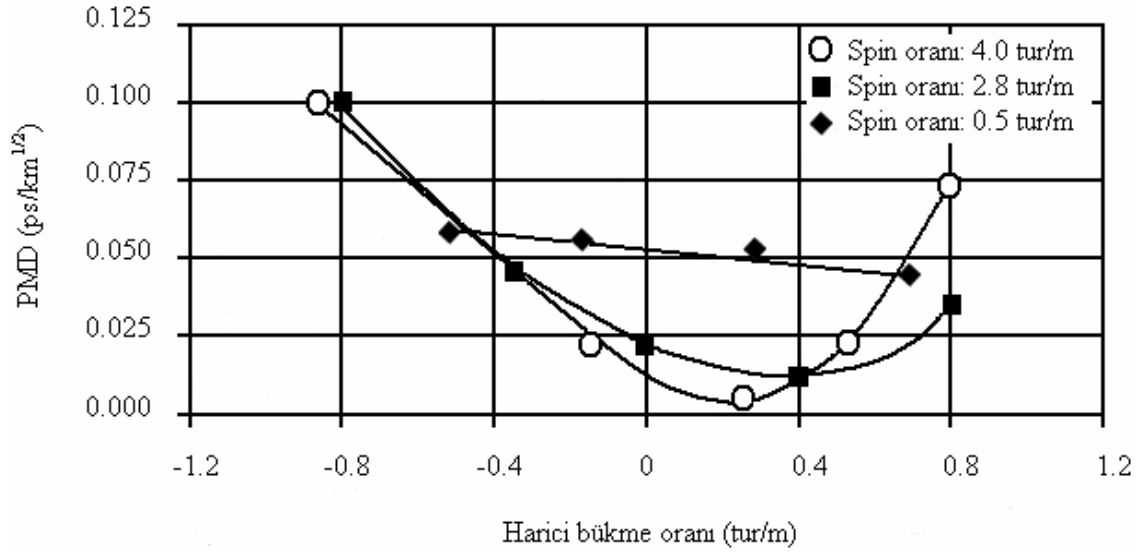
Bölüm 3.5.3'te bahsedilen yöntem ve koşullar uygulanarak 3.4 tur/m sabit spin oranlı fiberde elde edilen deney sonuçları Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



Şekil 4.24. 3.4 tur/m sabit spin oranlı fiberde PMD'nin harici bükme oranı ile değişimi

Şekil 4.24'te PMD deney sonuçları verilen fiberle aynı kütükten yapılmış spinsiz bir fiberin, herhangi bir harici bükme uygulanmamışken tipik PMD değeri  $0.135 \text{ ps/km}^{1/2}$  'dir. Spinli fiberde ölçülen PMD değerleri spinsiz fiberdeki tipik değerle karşılaştırılırsa, harici bükmelerin PMD değeri üzerindeki etkilerine rağmen sabit spinlemenin PMD değerini belirgin biçimde düşürdüğü açıkça görülmektedir. Beklenildiği gibi harici bükme oranı azaldıkça PMD değeri de düşmektedir. Ancak teorinin ve beklenenin tersine PMD minimum değerine 0 tur/m harici bükme oranında değil yaklaşık 0.6 tur/m harici bükme oranında erişmekte ve  $0.02 \text{ ps/km}^{1/2}$  olmaktadır. Şekil 4.24'te görüldüğü gibi, eğrinin üzerinde bulunmayan sonuçlar da elde edilmiştir. Bunun sebebi deney sırasında oluşan rasgele mod kuplajındaki değişimlerin PMD üzerinde de belirgin değişimlere sebep olmasıdır.

Bölüm 3.5.3'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 deney sonuçları Şekil 4.25'te gösterilmiştir. Şekil 4.25'te PMD deney sonuçları verilen fiberlerle aynı kütükten yapılmış spinsiz bir fiberin, herhangi bir harici bükme uygulanmamışken tipik PMD değeri  $0.125 \text{ ps/km}^{1/2}$  'dir. Spinli fiberde ölçülen PMD değerleri spinsiz fiberdeki tipik değerle karşılaştırılırsa, harici bükmelerin PMD değeri üzerindeki etkilerine rağmen sabit spinlemenin PMD değerini düşürdüğü görülmektedir. Spin oranı arttıkça PMD değerindeki düşüş artmaktadır. Önceki deney sonuçlarına benzer şekilde harici bükme



Şekil 4.25. 0.5 tur/m, 2.8 tur/m ve 4.0 tur/m sabit spin oranlı fiberlerde PMD'nin harici bükme oranı ile değişimi

oranı azaldıkça PMD değeri de düşmektedir. Yine teorinin ve beklenilenin 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  $0.012 \text{ ps/km}^{1/2}$  ve 4.0 tur/m spin oranlı fiberde yaklaşık  $0.25 \text{ tur/m}$  harici bükme oranında  $0.005 \text{ ps/km}^{1/2}$  olmaktadır (Karlık ve Yılmaz 2004 b).

Sonuçlar değerlendirildiğinde,

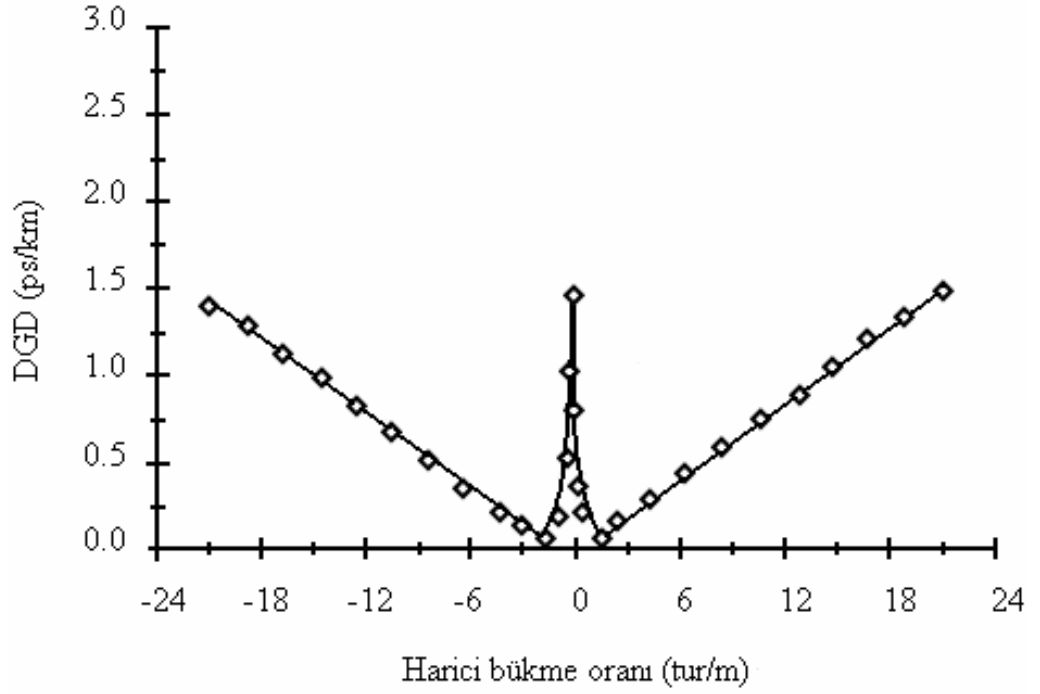
a) Belirli sabit spin oranlarında belirli oranlarda uygulanan harici bükme oranları, fiberin PMD değerini düşürmektedir.

b) Ancak PMD değerini minimuma indirecek harici bükme değerinin tespitinde, spinli fiberin üretildiği kütüğün PMD değeri de etkili olduğu için her kütükten üretilmiş fiberler için ayrı ayrı tespit edilmesi gerekmektedir.

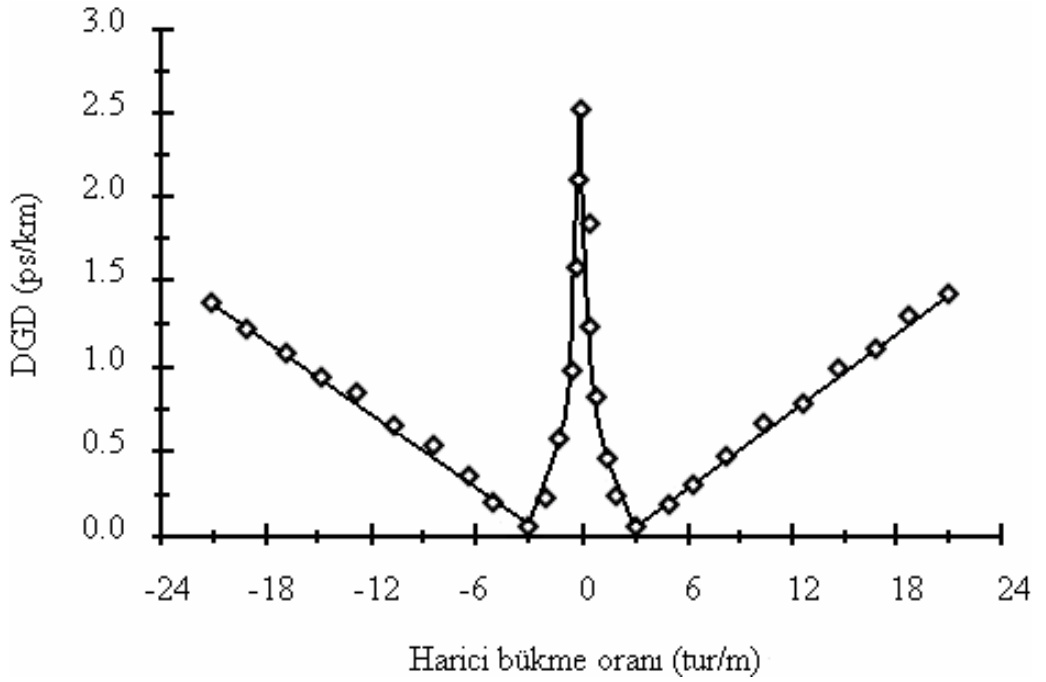
#### 4.4.2. Sinüsoidal Spinli Fiberlerde PMD'nin Harici Bükme Oranı ile Değişimini Gösteren Sonuçlar

Bölüm 3.5.4'te bahsedilen yöntem ve koşullar uygulanarak gerçekleştirilen sinüsoidal spinli fiberlerdeki DGD ölçümlerinin ilk kısmında elde edilen sonuçlar, Şekil 4.26, 4.27, 4.28 ve 4.29'da grafiklerle gösterilmiştir.

Şekil 4.26 ve Şekil 4.27 sırasıyla DSF1 ve DSF2'ye farklı harici bükme oranları uygulandığında tespit edilen DGD değişimini göstermektedir.



Şekil 4.26. Harici bükme uygulanan DSF1'de DGD değişimi



Şekil 4.27. Harici bükme uygulanan DSF2'de DGD değişimi

Şekil 4.26 ve 4.27’de DSF1 ve DSF2’ye herhangi bir harici bükme uygulanmazken ölçülen DGD değerleri arasında büyük farklılıklar vardır. Bu durumun nedenini açıklayabilmek için (3.21) formülünün  $\gamma = 0$  için aldığı biçimi bulmak gerekir.  $\gamma = 0$  için  $\delta\beta_C = 0$  ve  $\delta\beta_C' = 0$  olur. Bu durumda (3.21) formülü

$$DGD = \delta\beta_L' \approx \frac{\delta\beta_L}{\omega} \quad (4.4)$$

şeklini alır. Deneyde kullanılan  $\omega$  değeri her iki fiber için de aynı olduğuna göre harici bükme yokken fiberlerin DGD oranları yaklaşık olarak doğrusal çiftkırılma oranlarına eşit olacaktır. Bu nedenle, DSF2’nin Çizelge 3.6’da verilen doğrusal çiftkırılması DSF1’inkinin yaklaşık iki katı olduğundan fiberlerin DGD değerleri arasında da benzer durum sözkonusudur.

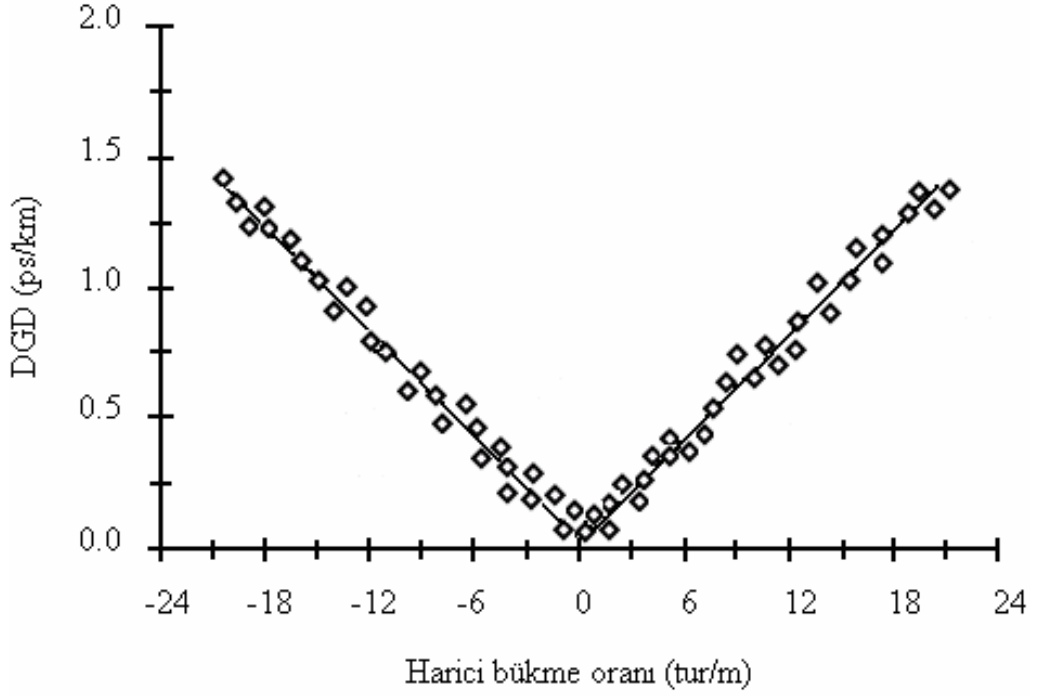
Şekil 4.26 ve 4.27’deki diğer DGD değerleri incelendiğinde, DGD’nin harici bükme ile yaklaşık olarak doğrusal arttığı ve (3.21) formülü incelendiğinde bu sonucun analitik çözüme uygun olduğu görülmektedir.

Şekil 4.26 ve 4.27’deki diğer bir önemli nokta DSF1’e yaklaşık  $\pm 1.75$  tur/m ve DSF2’ye  $\pm 3$  tur/m harici bükme oranları uygulandığında DGD’nin yaklaşık sıfır olmasıdır. Bu durum da (3.21) formülü ile uyumludur.

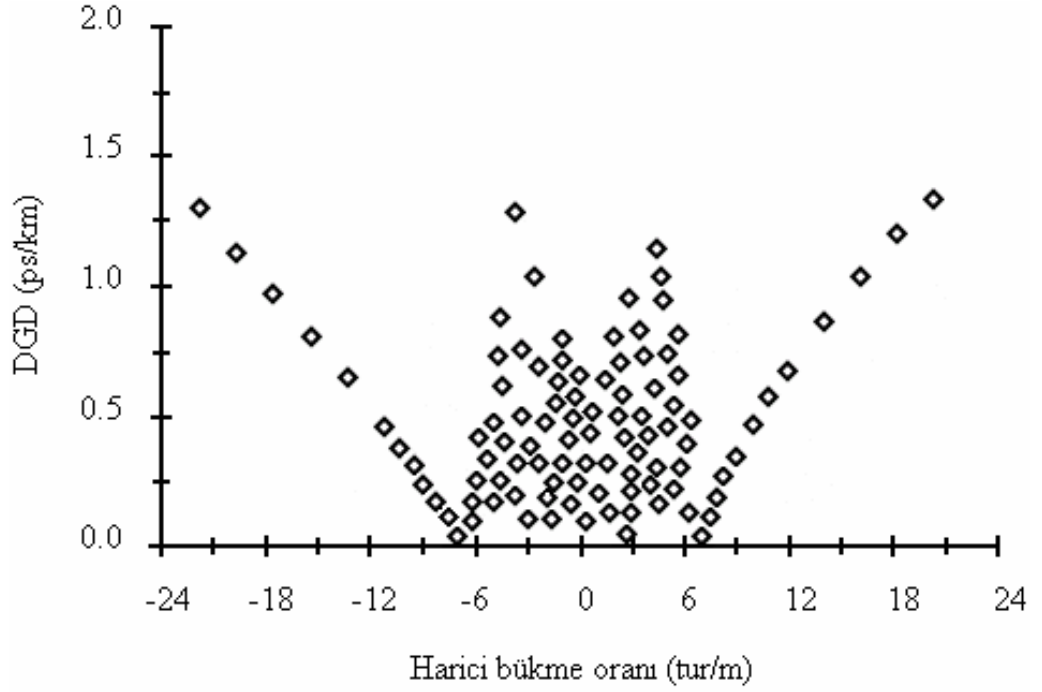
Şekil 4.28 ve Şekil 4.29 sırasıyla DSSF1 ve DSSF2’ye farklı harici bükme oranları uygulandığında tespit edilen DGD değişimini göstermektedir.

Şekil 4.28’de DSSF1’in herhangi bir harici bükme yokken DGD değerinin yaklaşık sıfır olduğu görülmektedir. Diğer noktalarda DGD değeri tıpkı Şekil 4.26’da olduğu gibi harici bükme ile yaklaşık olarak doğrusal artmakta ve yaklaşık olarak Şekil 4.26’daki değerleri almaktadır. Bunun nedeni DSSF1’in DSF1 ile aynı preformdan üretilmesi ve dolayısıyla aynı doğrusal çiftkırılmaya sahip olmasıdır.

Şekil 4.29’daki DSSF2’nin DGD değerleri, Şekil 4.28’deki DSSF1’in DGD değerlerinin aksine, harici bükme yokken sıfıra doğru gitmek yerine - 6 - + 6 tur/m aralığındaki harici bükme oranlarında belirgin dalgalanmalar sergilemekte, DSF2’nin harici bükme yokken ölçülen DGD değerinin yarısına kadar erişen artışlar göstermektedir. Çok geniş bir harici bükme oranı aralığındaki bu büyük DGD dalgalanmaları, sistem uygulamaları açısından bakıldığında istenmeyen bir durumdur; çünkü kablo kurulum işlemi sırasında bir miktar bükmenin oluşması kaçınılmazdır.



Şekil 4.28. Harici bükme uygulanan DSSF1’de DGD değişimi



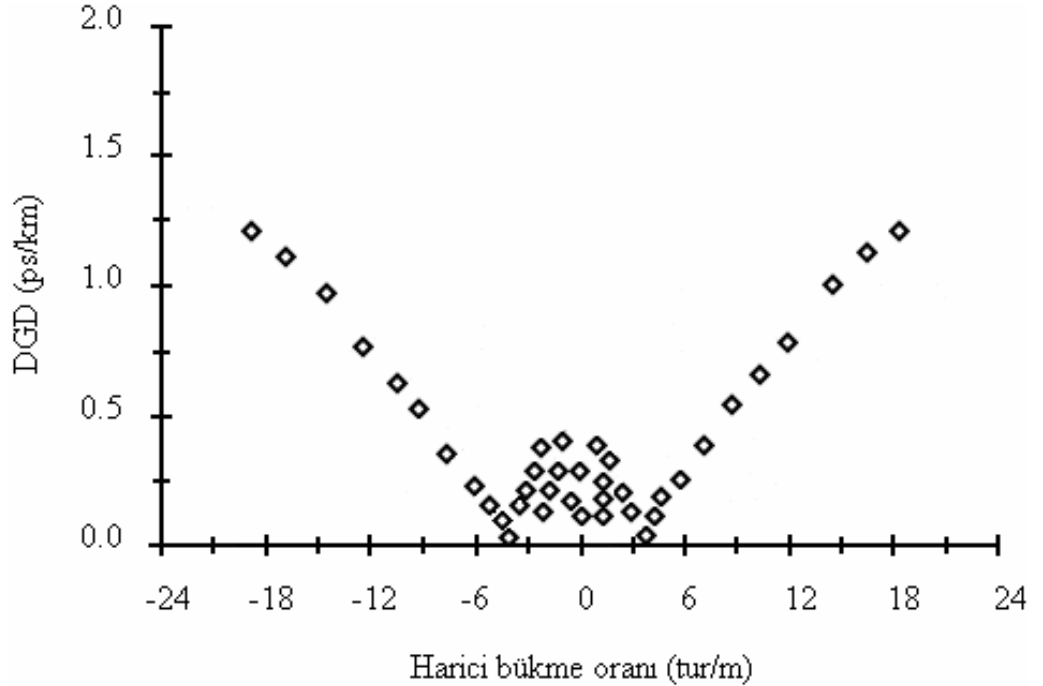
Şekil 4.29. Harici bükme uygulanan DSSF2’de DGD değişimi



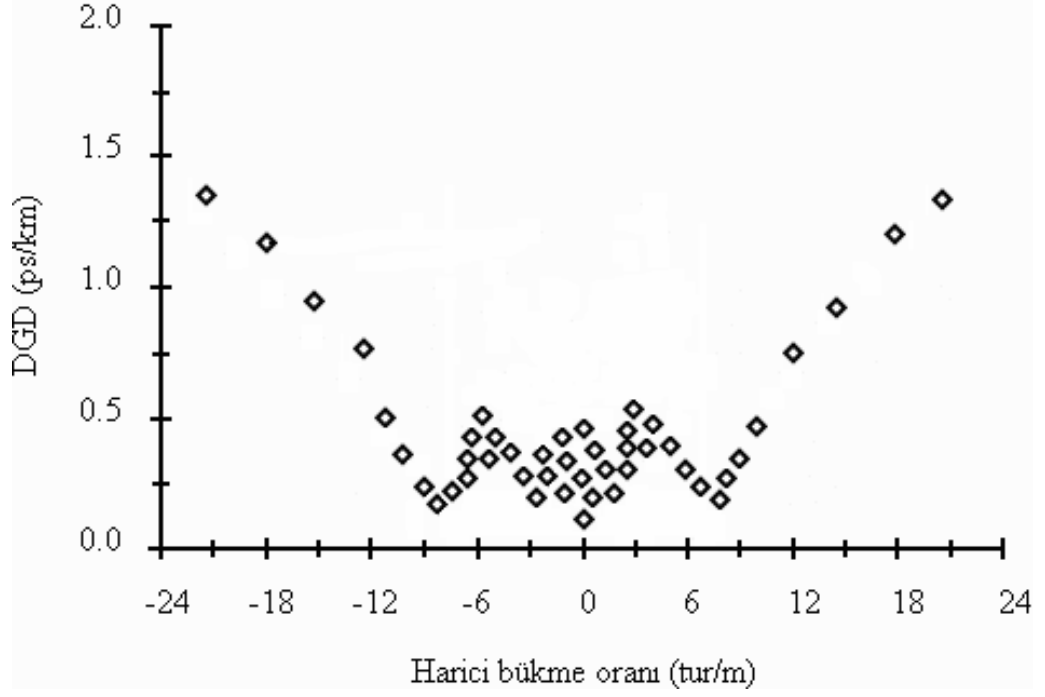
DSSF2, bahsedilen aralığın dışındaki bükme oranlarında ise DSF2'ye benzer davranışta bulunmaktadır (Karlık ve ark. 2005 b).

Değişik oranlarda harici bükme uygulanan DSSF2'nin DGD değerlerinde karşılaşılan dalgalanmaların nedenini araştırmak ve hem DSSF1'in hem de DSSF2'nin farklı spin genlikleri ve spin periyotlarındaki davranışlarını incelemek için Bölüm 3.5.4 Sayfa 34'ün son paragrafında belirtilen koşullar altında ikinci kısım DGD ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

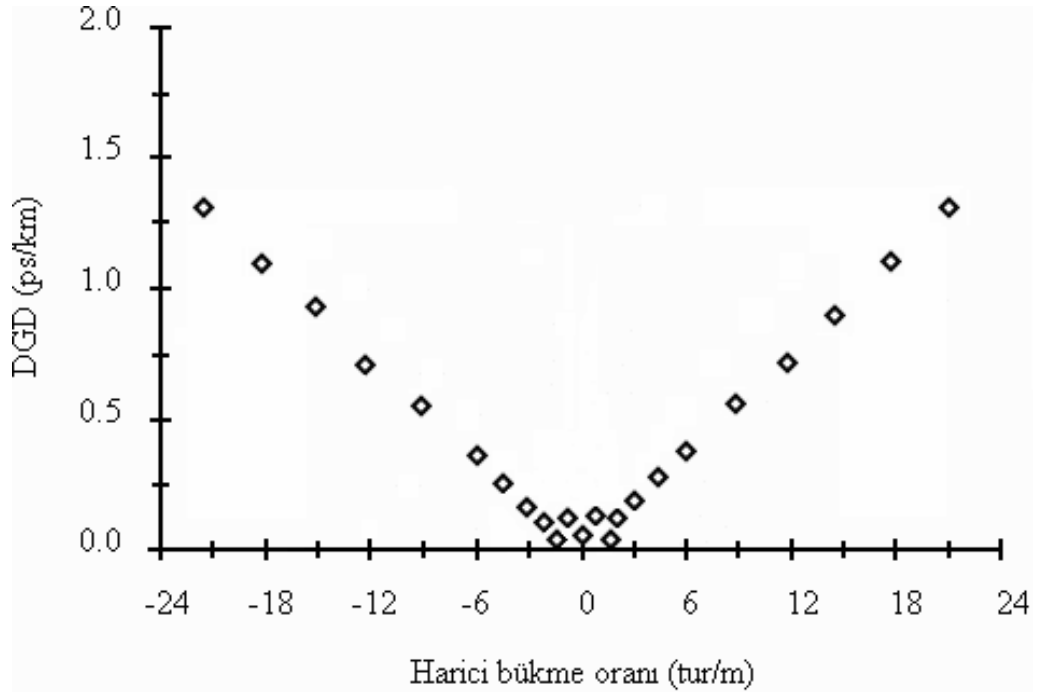
Şekil 4.30, 4.31, 4.32 ve 4.33'teki DGD ölçümleri DSSF2 ile aynı kütükten üretilmiş, aynı doğrusal çift kırılmaya ( $\delta\beta_L = 3$  rad/m) ancak farklı etkin spin oranlarına sahip sinüsoidal spinli fiberlerde gerçekleştirilmiştir. Dört fiberin de spin genliği  $4\pi$  seçilmiştir. Ancak spin periyotları Şekil 4.30, 4.31, 4.32 ve 4.33'teki fiberler için sırasıyla 8m, 2m, 1m ve 0.5m'dir. Dolayısıyla (3.18) formülü kullanılarak fiberlerin etkin spin oranları sırasıyla 1.1 tur/m, 4.4 tur/m, 8.9 tur/m ve 17.8 tur/m şeklinde hesaplanır.



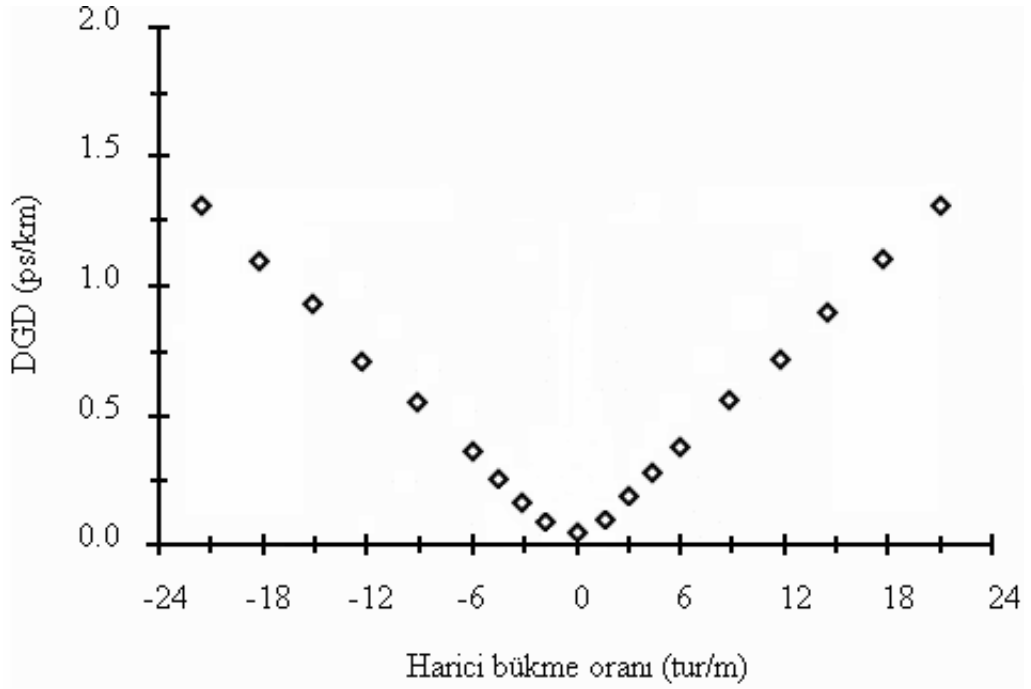
Şekil 4.30. DSSF2 ile aynı kütükten üretilmiş 1.1 tur/m etkin spin oranlı fibere uygulanan harici bükme altında DGD değişimi



Şekil 4.31. DSSF2 ile aynı kütükten üretilmiş 4.4 tur/m etkin spin oranlı fibere uygulanan harici bükmeler altında DGD değişimi



Şekil 4.32. DSSF2 ile aynı kütükten üretilmiş 8.9 tur/m etkin spin oranlı fibere uygulanan harici bükmeler altında DGD değişimi



Şekil 4.33. DSSF2 ile aynı kütükten üretilmiş 17.8 tur/m etkin spin oranlı fibere uygulanan harici bükme oranları altında DGD değişimi

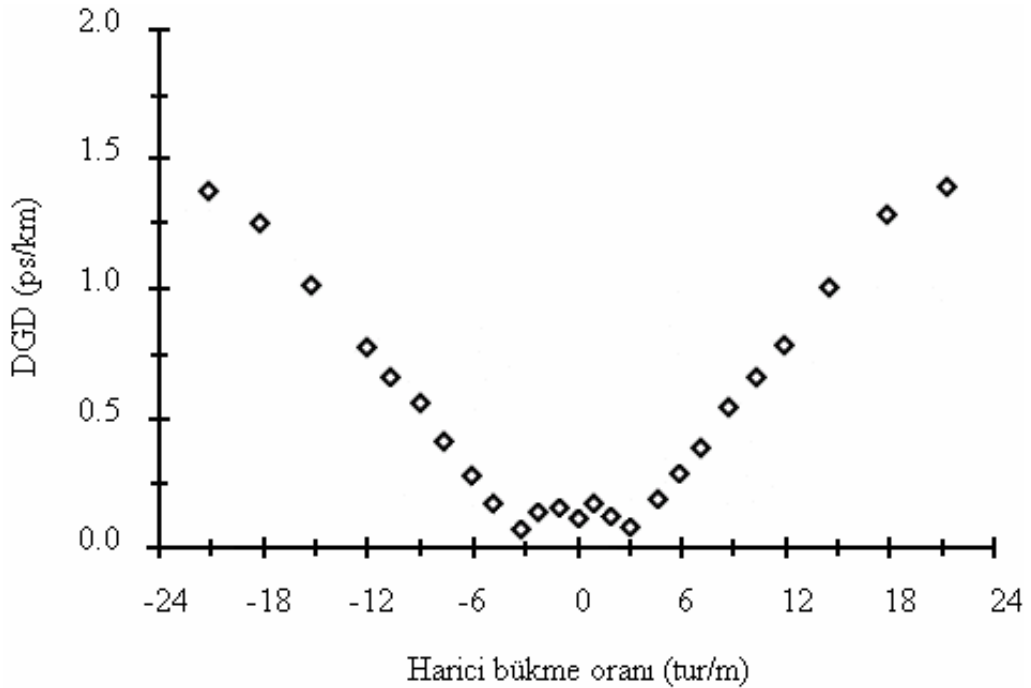
Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'den, deneylerde kullanılan fiberlerin etkin spin oranlarının (sırasıyla 1.1 tur/m ve 4.4 tur/m), DGD değerini harici bükme yokken ya da 0 tur/m harici bükmenin yakınında sıfırlayacak kadar büyük olmadıkları görülmektedir. Şekil 4.31'deki grafik biçim olarak Şekil 4.29'dakine benzemektedir. Ancak Şekil 4.29'daki DGD dalgalanmalarının tepe değeri Şekil 4.31'deki DGD dalgalanmalarının tepe değerinden belirgin biçimde daha büyüktür. Bu durumun sebebi, her iki fibere uygulanan harici bükme oranlarının şiddetindeki ufak değişimlerdir. Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'de, DGD değerindeki dalgalanmaların yoğun olarak gerçekleştiği 0 tur/m harici bükmenin her iki tarafındaki bölgeler dışında kalan noktadaki DGD değerleri birbirleriyle ve Şekil 4.29'daki değerlerle örtüşmektedir.

Şekil 4.32'de Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'e kıyasla daha dar bir bölgede ve daha az bir miktarda olmasına rağmen DGD değerlerinde dalgalanma mevcuttur. Şekil 4.33'e bakıldığında ise, 17.8 tur/m etkin spin oranlı fiberde DGD değerinin, bu tip bir fiberden beklenildiği gibi, harici bükme yokken sıfıra çok yakın olduğu görülmektedir.

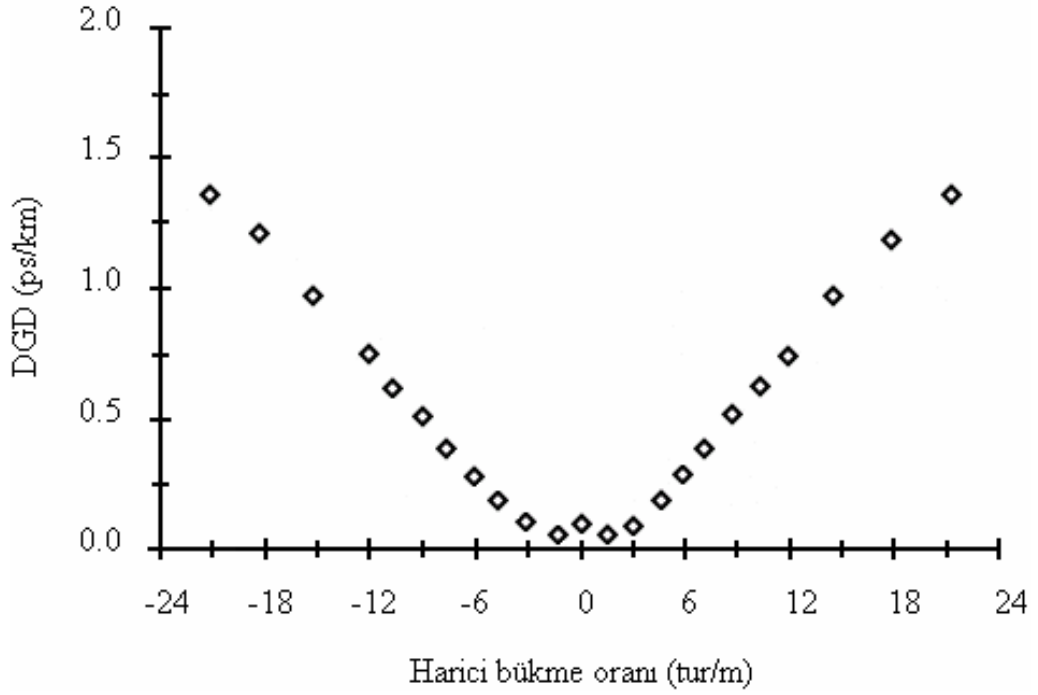
Şekil 4.29-4.32'deki dalgalanmaların sebebi, fiber spinleme işlemi çiftkırılma eksenini değişken biçimde saat yönünde ve saat yönünün tersinde döndürürken harici

olarak uygulanan bükmenin tek yönlü olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum, iki alternatif yönden birindeki spinin tek yönlü harici bükme nedeniyle çözülmesine neden olur. Bu da DGD değerlerinde dalgalanmalar oluşturur. Şekil 4.30'daki DGD dalgalanmalarının Şekil 4.31'deki dalgalanmalara göre daha dar bir harici bükme oranı bölgesinde meydana gelmesi, bu düşüncenin doğruluğunu kanıtlamaktadır. Şekil 4.30'daki ölçümlerin yapıldığı fiberin spin periyodu daha büyüktür. Dolayısıyla, fiberdeki spin daha gevşek olduğundan daha küçük bir harici bükme ile çözülmektedir. Fiber DGD'sindeki dalgalanmalar, harici bükmelerin indüklediği dairesel çiftkırılma doğrusal çiftkırılmaya baskın hale gelinceye kadar devam eder.

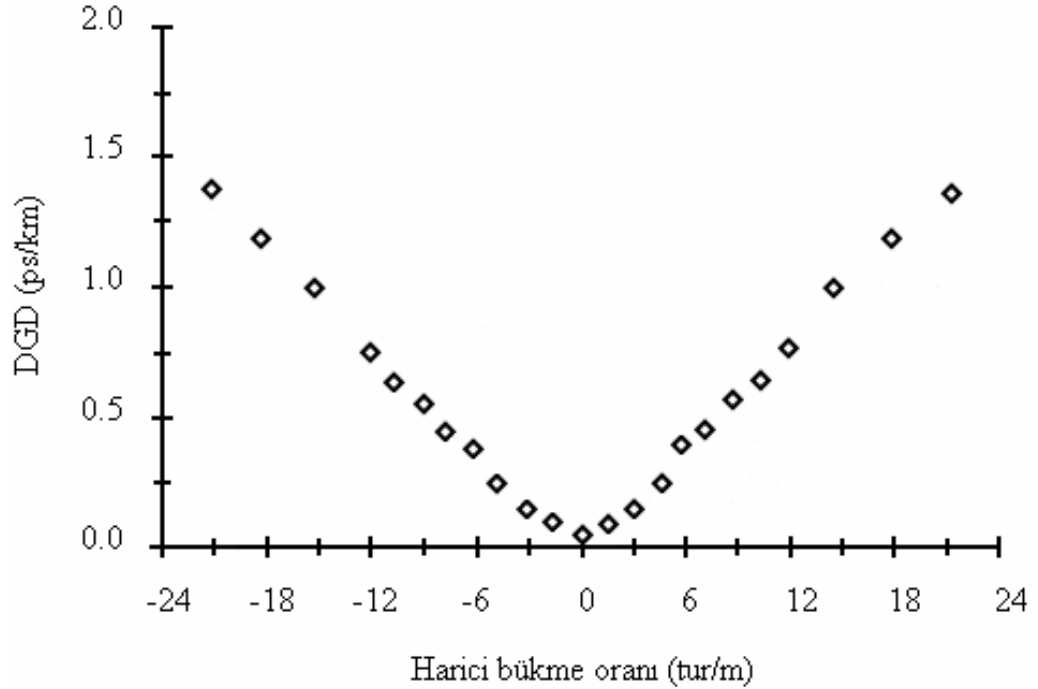
Şekil 4.34, 4.35, 4.36 ve 4.37'deki DGD ölçümleri DSSF1 ile aynı kütükten üretilmiş, aynı doğrusal çiftkırılmaya ( $\delta\beta_L = 1.7$  rad/m) ancak farklı etkin spin oranlarına sahip sinüsoidal spinli fiberlerde gerçekleştirilmiştir. Dört fiberin spin genlikleri sırasıyla  $4\pi$ ,  $4\pi$ ,  $8\pi$ ,  $4\pi$  ve spin periyotları sırasıyla 8m, 2m, 2m ve 0.5m'dir. Dolayısıyla (3.18) formülü kullanılarak fiberlerin etkin spin oranları sırasıyla 1.1 tur/m, 4.4 tur/m, 8.9 tur/m ve 17.8 tur/m şeklinde hesaplanır.



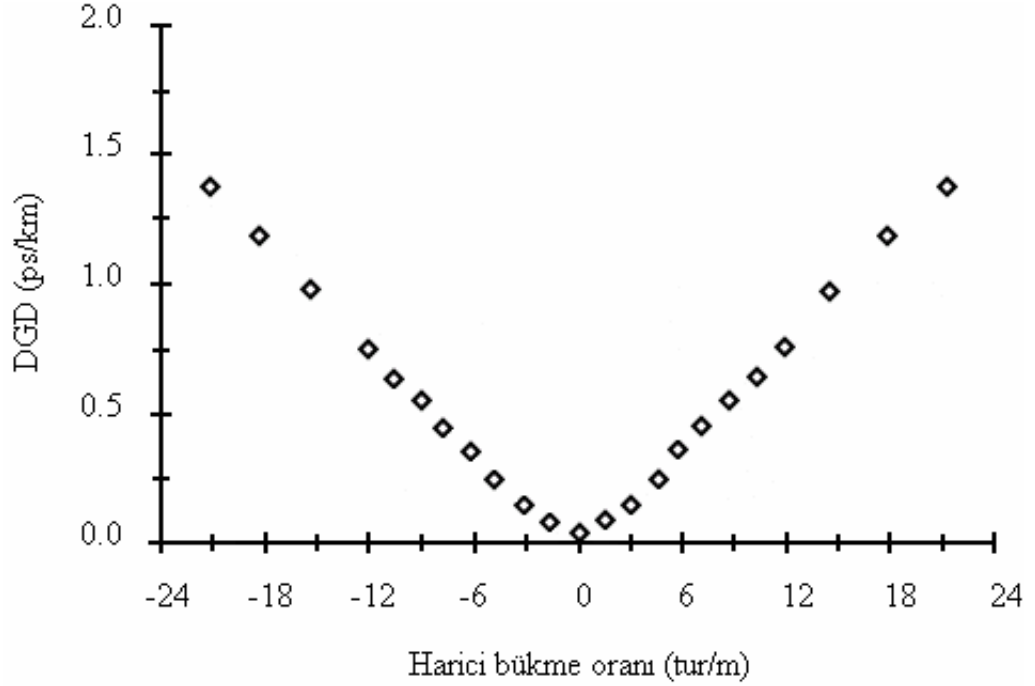
Şekil 4.34. DSSF1 ile aynı kütükten üretilmiş 1.1 tur/m etkin spin oranlı fibere uygulanan harici bükmeler altında DGD değişimi



Şekil 4.35. DSSF1 ile aynı kütükten üretilmiş 4.4 tur/m etkin spin oranlı fibere uygulanan harici bükme oranı altında DGD değişimi



Şekil 4.36. DSSF1 ile aynı kütükten üretilmiş 8.9 tur/m etkin spin oranlı fibere uygulanan harici bükme oranı altında DGD değişimi



Şekil 4.37. DSSF1 ile aynı kütükten üretilmiş 17.8 tur/m etkin spin oranlı fibere uygulanan harici bükme oranı altında DGD değişimi

Şekil 4.34'ten de görüldüğü gibi 1.1 tur/m'lik etkin spin oranı, harici bükme yokken ve sıfır noktası civarındaki harici bükme değerlerinde DGD değerini sıfıra çekmek için yeterli değildir. Ancak Şekil 4.35'te 4.4 tur/m etkin spin oranlı fiberde elde edilen sonuçlar, bu düşük etkin spin oranına rağmen, Şekil 4.28'deki DSSF1 için ölçülen değerlere yaklaşan bir görüntü sergilemektedir. Bu durumun nedeni, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31 için açıklanan nedenle aynıdır. Şekil 4.36 ve Şekil 4.37'deki 8.9 tur/m ve 17.8 tur/m etkin spin oranlı fiberlerde elde edilen sonuçlar DGD değerlerinde belirgin bir dalgalanma göstermemekte hatta sıfır harici bükme noktasında sıfıra çok yaklaşmaktadır. Bu durum, DSF1 ile aynı kütükten üretilmiş fiberlerin yeterince yüksek spin oranlarında arzu edilen spinli fiber davranışını sergilediklerini göstermektedir.

Sinüsoidal spinli fiberlerde gerçekleştirilen bu ikinci kısım deneyler toplu halde değerlendirildiğinde, bu tip fiberlerde DGD değerini yeterince düşürmek için gereken minimum etkin spin oranını fiberin doğrusal çiftkırılması cinsinden veren ampirik bir formül elde edilmektedir. Bu formül,

$$\gamma_{rms} > 5\delta\beta_L \quad (\text{tur/m}) \quad (4.5)$$

şeklindedir. Etkin spin oranı (4.5) ile hesaplanan değerden küçük olduğunda, 0 tur/m harici bükme civarındaki DGD değerlerinde dalgalanmalar görülecek ve bu dalgalanmalar, bu tip fiberlerle kurulan iletişim sistemlerindeki toplam PMD'yi de arttıracaktır.

## 5. TARTIŞMA

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, doktora tezinin bilime katkı sağlayan sonuçları şunlardır:

1. **Sabit Çözümleyici ve Jones Matrisi Yöntemlerinin Karşılaştırılması:** Doktora tezinde, ölçümlerde kullanılacak sabit çözümleyici ve Jones matrisi yöntemleri fiberin boyu ve kuplaj uzunluğu açısından karşılaştırılmıştır. Kuplaj uzunluğu diferansiyel grup gecikmesinin (DGD) sabit olarak kabul edilebileceği maksimum uzunluktur. Tezde, kuplaj uzunluğundan kısa ve kuplaj uzunluğundan uzun fiberler için her iki ölçüm yöntemiyle benzetimler yapılmıştır.

a) 1450-1650 nm dalgaboyu aralığında 1 km kuplaj uzunluğuna sahip 500 m uzunluklu fiberde her iki yöntemle 0.5 ps DGD değeri bulunmuştur. Bu durum, fiber uzunluğu kuplaj uzunluğundan daha kısa iken her iki yöntemin güvenilir sonuçlar verdiğini göstermektedir.

b) 1 km kuplaj uzunluğuna sahip 50 km uzunluklu fiberde sabit çözümleyici tekniğinde iletim spektrumunun sinüsoidal olmadığı bulunmuştur. İletim spektrumundaki ekstremum noktalarının hesaplanmasında kararsızlıklar bulunduğundan 500 m fiberdeki gibi yüksek bir doğruluktan söz etmenin mümkün olmadığı tespit edilmiştir. 50 km uzunluklu fiberde Jones matrisi yöntemiyle 0.1 ps/km<sup>1/2</sup> PMD değeri bulunmuştur. Bu durum, fiber uzunluğunun kuplaj uzunluğundan daha büyük olduğu durumlarda Jones matrisi yönteminin sabit çözümleyici tekniğine göre daha güvenilir sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Sonuç: Optik fiber omurgalı kablolu yerel alan ağlarında mesafeler 2-3 km'yi geçmediğinden sabit çözümleyici yönteminin kullanılması, uzak mesafe haberleşme sistemlerinde ise Jones matrisi yönteminin kullanılması önerilmektedir.

2. **Fiber ribbon kablolarında titreşimin PMD'ye etkisinin araştırılması:** Günümüzde, fiber ribbon kabloların yaklaşık % 80'i maksimum 8-10 km uzunluklu erişim ağlarında, % 20'si ise 10 km'nin üzerindeki uzak mesafe haberleşme ağlarında kullanılmaktadır. Ancak, fiber ribbon kabloların geleneksel gevşek tüplü fibere göre daha ekonomik ve yüksek hızlara uyumlaştırılmasının daha kolay olması nedeniyle, uzak mesafe



haberleşme ağlarındaki kullanımı gittikçe artmaktadır. Literatürde, fiber ribbon kabloların PMD performanslarıyla ilgili çalışmalar, ribbon içindeki fiberlerin konumlarının PMD'ye etkisi üzerinde yoğunlaşmış olup titreşim gibi çevresel koşullardaki değişimlerin PMD üzerindeki etkisine değinilmemiştir. Dünyada havai hatlı optik fiberlerin toplam fiber ağı içindeki payı % 5'in altındadır. Türkiye'de ise bu oran % 20 civarındadır. Özellikle dağlık bölgelerde ve güneydoğu bölgesinde bu oran % 30'u geçmektedir. Bu nedenle, Türkiye için önemli bir kriter olacağı düşüncesiyle, fiber ribbon kablolarında, titreşimin PMD üzerindeki etkisi tezde araştırılmıştır. Fiber ribbon kablolarında gerçekleştirilen titreşim testinde, 10 km uzunluklu kabloya 0.5 – 10 mm aralığında titreşim genliği ve 5 – 20 Hz arasında titreşim frekansı uygulanmış, 1550 nm dalgaboyunda Jones matrisi yöntemiyle PMD ölçümü yapılmıştır. Ölçülen ortalama DGD 0.2 ps olup titreşim frekansı ve titreşim genliğinin PMD üzerindeki toplam etkisinin % 12'lik bir değişim şeklinde olduğu saptanmıştır. Sabit frekansta titreşim genliğinin % 15'lik, sabit genlikte titreşim frekansının ise % 6'lık PMD değişimi oluşturduğu bulunmuştur. Yani titreşim genliğinin PMD üzerindeki etkisi titreşim frekansının etkisinin 2.5 katıdır. Bu sonuç, havai fiber ribbon kablolarında rüzgarın şiddetinin PMD üzerindeki etkisinin, kablonun salınım frekansınıninkinden daha büyük olduğunu göstermektedir.

Sonuçlar değerlendirildiğinde;

Ortalama DGD'nin 0.2 ps olduğu şartlarda maksimum iletim uzunlukları,

a) 40 Gbit/s sistemlerde 1563 km ve 120 Gbit/s sistemlerde 174 km'dir.

b) Titreşimin etkisiyle (rüzgar hızı ve frekansına bağlı olarak), 40 Gbit/s sistemlerde 1246 km ve 120 Gbit/s sistemlerde 138 km olacaktır.

Kabloya uygulanan titreşimin maksimum iletim uzunluğunu % 20 azalttığı tespit edilmiştir.

**3. Fiber ribbon kablolarında sıcaklığın PMD'ye etkisinin araştırılması:** Literatürde, sıcaklığın fiber ribbon kabloların PMD'sine etkisi genellikle sabit sıcaklık değerlerinde incelenmiştir. Ancak bu tür incelemeler, gerçek ortam koşullarında sıcaklığın PMD üzerindeki etkisini göstermekten uzaktır; çünkü gerçek ortamda sıcaklık sabit olmayıp hızlı ve rasgele biçimde değişebilmektedir. Tezde yapılan deneylerde, bu etkiyi gözlemlemek için, öncelikle, ribbonlardaki dış fiberler (birinci halka) ve iç fiberler

(ikinci halka) birleştirilerek iki ayrı halka oluşturulmuş, toplam ölçüm süresince ortam sıcaklığı 10 °C ile 60 °C arasında değiştirilerek, 1380–1640 nm aralığında her bir halkanın PMD'si 30 dakikalık aralıklarla ölçülmüştür. Birinci halkada ortalama PMD  $0.044 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$  ve PMD'nin sıcaklıkla değişimi % 14.2, ikinci halkada ortalama PMD  $0.047 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$  ve PMD'nin sıcaklıkla değişimi % 10.7 olarak bulunmuştur. Birinci ve ikinci halkaların PMD performansları arasındaki bu farkın nedeni, dış fiberlerden oluşan birinci halkanın fiber/kablo etkileşimlerine daha fazla maruz kalması, iç fiberlerden oluşan ikinci halkanın ise dış fiberler sayesinde bu tür etkilerden korunmasıdır. Sonuç olarak, kablo boyunca oluşan çiftkırılma ve mod kuplajı birinci halkada daha büyüktür. Daha sonra, 60 km uzunluklu bir fiber ribbon halka 48 saat boyunca açık alanda çevresel sıcaklık değişimlerine maruz bırakılmıştır. Test süresince çevre sıcaklığı yaklaşık olarak 13 °C ile 25 °C arasında değişmiştir. Bu testte ortalama PMD  $0.045 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$  ve PMD'nin sıcaklıkla değişimi % 13.4 olarak bulunmuştur.

10 °C ile 60 °C arasında yapılan testte elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde;

Birinci halkada ortalama PMD'nin  $0.044 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$  olduğu şartlarda maksimum iletim uzunlukları

a) 40 Gbit/s sistemlerde 3228 km ve 120 Gbit/s sistemlerde 359 km'dir.

b) Değişen sıcaklığın etkisiyle, 40 Gbit/s sistemlerde 2475 km ve 120 Gbit/s sistemlerde 275 km olacaktır.

Değişen sıcaklığın birinci halkadaki maksimum iletim uzunluğunu % 23.3 azalttığı tespit edilmiştir.

İkinci halkada ortalama PMD'nin  $0.047 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$  olduğu şartlarda maksimum iletim uzunlukları

a) 40 Gbit/s sistemlerde 2830 km ve 120 Gbit/s sistemlerde 314 km'dir.

b) Değişen sıcaklığın etkisiyle, 40 Gbit/s sistemlerde 2309 km ve 120 Gbit/s sistemlerde 256 km olacaktır.

Değişen sıcaklığın ikinci halkadaki maksimum iletim uzunluğunu % 18.5 azalttığı tespit edilmiştir.

Açık ortam testinde, ortalama PMD'nin  $0.045 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  olduğu şartlarda maksimum iletim uzunlukları

a) 40 Gbit/s sistemlerde 3086 km ve 120 Gbit/s sistemlerde 343 km'dir.

b) Değişen sıcaklığın etkisiyle, 40 Gbit/s sistemlerde 2400 km ve 120 Gbit/s sistemlerde 267 km olacaktır.

Açık ortam testinde, değişen sıcaklığın maksimum iletim uzunluğunu % 22.2 azalttığı tespit edilmiştir.

**4. Sabit spinli fiberlerde harici bükme ile PMD değerinin düşürülmesi:** Özellikle 40 Gbit/s ve üzerindeki veri iletim hızlarında çalışacak yeni haberleşme sistemlerinde PMD değerleri düşük, spinli fiberler kullanılmaktadır. Sabit spinleme basit, kolaylıkla modellenebilen ve düşük maliyetli bir yöntem olmasına rağmen, spinleme işlemi sırasında fiberde oluşan elastik bükme, sabit spinli fiberlerdeki PMD değerini arttıran bir faktördür. Tezde yapılan deneylerde, 7.1 tur/m, 3.4 tur/m, 4.0 tur/m ve 2.8 tur/m sabit spin oranlı fiberlere harici bükme uygulanmış ve 1520-1630 nm dalgaboyu aralığında Jones matrisi yöntemiyle PMD ölçümleri yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar;

a) 7.1 tur/m sabit spinli fiberde harici bükme yokken PMD değeri  $0.045 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 'dir. 0.35 tur/m harici bükme uygulandığında PMD değeri  $0.01 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  olmaktadır.

b) 3.4 tur/m sabit spinli fiberde harici bükme yokken PMD değeri  $0.04 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 'dir. 0.6 tur/m harici bükme uygulandığında PMD değeri  $0.02 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  olmaktadır.

c) 4.0 tur/m sabit spinli fiberde harici bükme yokken PMD değeri  $0.012 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 'dir. 0.25 tur/m harici bükme uygulandığında PMD değeri  $0.005 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  olmaktadır.

d) 2.8 tur/m sabit spinli fiberde harici bükme yokken PMD değeri  $0.024 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 'dir. 0.4 tur/m harici bükme uygulandığında PMD değeri  $0.012 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  olmaktadır.

Sonuçlar değerlendirildiğinde,

a) Belirli sabit spin oranlarında belirli oranlarda uygulanan harici bükmeler, fiberin PMD değerini düşürmektedir.

b) Ancak PMD değerini minimuma indirecek harici bükme değerinin tespitinde, spinli fiberin üretildiği kütüğün PMD değeri de etkili olduğu için her kütükten üretilmiş fiberler için ayrı ayrı tespit edilmesi gerekmektedir.

**5. Sinüsoidal spinli fiberlerde harici bükmenin neden olduğu PMD dalgalanmalarını yok etmek için uygun etkin spin oranının deneysel olarak belirlenmesi:** Sinüsoidal spinli fiberler, değişken spin profilleri nedeniyle sabit spinli fiberlerdeki elastik bükme dezavantajını ortadan kaldıran ve daha düşük PMD değerlerine ulaşılmasına imkan veren fiberlerdir. Tezde, sinüsoidal spinli fiberlerde harici bükmenin PMD'ye etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Aynı kütükten üretilmiş doğrusal çiftkırılmaları  $\delta\beta_L = 1.7$  rad/m ve  $\gamma_{rms}$  etkin spin oranları 1.1 tur/m, 4.4 tur/m, 8.9 tur/m ve 17.8 tur/m olan 150 m uzunluklu fiberlerle başka bir kütükten üretilmiş doğrusal çiftkırılmaları  $\delta\beta_L = 3$  rad/m ve  $\gamma_{rms}$  etkin spin oranları 1.1 tur/m, 4.4 tur/m, 8.9 tur/m ve 17.8 tur/m olan 150 m uzunluklu fiberlere -24 tur/m - + 24 tur/m değerleri arasında harici bükme uygulanmış ve 1550 nm dalgaboyu bölgesinde DGD ölçümleri yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar;

a) Ölçüm sonuçları çok geniş bir aralıkta daha önce literatürde spinsiz fiberler için önerilmiş analitik bir formülden elde edilen değerlerle uyusmaktadır.

b) Doğrusal çiftkırılmaları  $\delta\beta_L = 1.7$  rad/m, etkin spin oranları 1.1 tur/m ve 4.4 tur/m olan fiberlerde - 3 tur/m - + 3 tur/m harici bükme aralığında DGD değerlerinde dalgalanmalar tespit edilmiştir.

c) Doğrusal çiftkırılması  $\delta\beta_L = 3$  rad/m ve etkin spin oranı  $\gamma_{rms} = 1.1$  tur/m olan fiberde - 3 tur/m - + 3 tur/m harici bükme aralığında DGD değerlerinde dalgalanmalar tespit edilmiştir.

d) Doğrusal çiftkırılması  $\delta\beta_L = 3$  rad/m ve etkin spin oranı  $\gamma_{rms} = 4.4$  tur/m olan fiberde - 9 tur/m - + 9 tur/m harici bükme aralığında DGD değerlerinde dalgalanmalar tespit edilmiştir.

e) Doğrusal çiftkırılması  $\delta\beta_L = 3$  rad/m ve etkin spin oranı  $\gamma_{rms} = 8.9$  tur/m olan fiberde  $-3$  tur/m  $- +3$  tur/m harici bükme aralığında DGD değerlerinde dalgalanmalar tespit edilmiştir.

DGD dalgalanmaları, haberleşme sistemleri için istenmeyen bir durum olup yok edilmesi gerekir.

Sonuçlar değerlendirildiğinde,  $\gamma_{rms} > 5\delta\beta_L$  seçildiğinde DGD dalgalanmalarının yok olduğu görülmektedir.

Doktora tezinin bilime katkısı aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Sabit çözümleyici yöntemi, optik fiber omurgalı kablolu yerel alan ağlarındaki PMD ölçümlerinde; Jones matrisi yöntemi, uzak mesafe haberleşme sistemlerindeki PMD ölçümlerinde kullanılmalıdır.
- Genliği 0.5-10 mm ve frekansı 5-20 Hz arasında değişen titreşim fiber ribbon kabloya uygulandığında, maksimum iletim uzunluğunu % 20 azaltmaktadır.
- 10 °C ile 60 °C arasında değişen sıcaklık, maksimum iletim uzunluğunu ribbondaki dış fiberlerde % 23.3, ribbondaki iç fiberlerde % 18.5 azaltmaktadır.
- 13 °C ile 25 °C arasında değişen ortam sıcaklığı, fiber ribbon kabloda maksimum iletim uzunluğunu % 22.2 azaltmaktadır.
- Sabit spinli fiberlerde, belirli oranlarda uygulanan harici bükmeler, fiberin PMD değerini düşürmektedir. Ancak PMD değerini minimuma indirecek harici bükme değerinin tespitinde, spinli fiberin üretildiği kütüğün PMD değeri de etkili olduğu için, her kütükten üretilmiş fiberler için ayrı ayrı tespit edilmesi gerekmektedir.
- Sinüsoidal spinli fiberde, harici bükmeden kaynaklanan DGD dalgalanmalarını önlemek için etkin spin oranı, doğrusal çiftkırılmanın 5 katından büyük olacak şekilde ( $\gamma_{rms} > 5\delta\beta_L$ ) seçilmelidir.

**KAYNAKLAR**

- ALZETTA, D., M. MATSUMOTO. 2004. Location optimization and distribution of polarization-mode dispersion compensators using polarizers. *J. Lightwave Tech.* 22(4):1014-1022.
- ANDRESCIANI, D., F. CURTI, F. MATERA, B. DAINO. 1987. Measurement of the group-delay difference between the principal states of polarization on a low-birefringence terrestrial fiber cable. *Optics Letters*, 12(10):844-846.
- ANONİM. 1996. IEC-794-1-2, Basic Optical Cable Test Procedures.
- ANONİM. 2005. TRFO-9b Fiber Optik Kablo Teknik Şartnamesi. Türk Telekomünikasyon A.Ş. Etüt Proje ve Yatırım Daire Başkanlığı Fiber Optik Müdürlüğü.
- BARLOW, A.J., J.J. RAMSKOV-HANSEN, D.N. PAYNE. 1981. Birefringence and polarization mode-dispersion in spun single-mode fibers. *Appl. Opt.* 20:2963.
- BOCK, W.J., W. URBANCZYK, M. FONTAINE. 1997. Characterization of highly birefringent optical fibers using interferometric techniques. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement.* 46(4):903-907.
- BURYK, M., K. BORZYCKI, M. JAWORSKI, M. MARCINIAK. 2004. Investigation of PMD in old optical fibres and cables and PMD effects on network upgrades to higher bit rates. *Proceedings of 6th International Conference on Transparent Optical Networks*, vol. 2, p.244-247.
- CAMERON, J., L. CHEN, X. BAO, J. STEARS. 1998. Time evolution of polarization mode dispersion in optical fibers. *IEEE Photonics Tech. Lett.* 10(9):1265-1267.
- CHEN, X., M.-J. LI, D.A. NOLAN. 2002. Scaling properties of polarization mode dispersion of spun fibers in the presence of random mode coupling. *Optics Letters*, 27:1595-1597.
- CHONGJIN, X., H. SUNNERUD, M. KARLSSON, A. ANDREKSON. 2001. Polarization-mode dispersion-induced outages in soliton transmission systems. *IEEE Photonics Tech. Lett.* 13(10):1079-1081.
- CHOWDHURY, D.Q., G. CHEN. 1996. Ultrafast optical fiber polarization-mode dispersion measurement using wavelength scanning technique. *Proceedings of Conference on Optical Fiber Communications OFC 96*, pp.151-152.
- CIPRUT, P., B. GISIN, N. GISIN, R. PASSY, J.P. von der Weid, F. PRIETO, C.W. ZIMMER. 1998. Second-order polarization mode dispersion: impact on analog and digital transmissions. *J. Lightwave Tech.* 16(5):757-771.

CORSI, F., A. GALTAROSSA, L. PALMIERI. 1998. Polarization-mode dispersion characterization of single-mode optical fiber using backscattering technique. *J. Lightwave Tech.* 16(10):1832-1843.

CORSI, F., A. GALTAROSSA, L. PALMIERI, M. SCHIANO, T. TAMBOSSO. 1999. Continuous-wave backreflection measurement of polarization mode dispersion. *IEEE Photonics Tech. Lett.* 11(4):451-453.

CURTI, F., B. DAINO, G. DeMARIS, F. MATERA. 1990. Statistical treatment of the evolution of the principal states of polarization in single-mode fibers. *J. Lightwave Tech.* 8(8):1162-1166.

DAL FORNO, A.O., A. PARADISI, R. PASSY, J.P. von der Weid. 2000. Experimental and theoretical modeling of polarization-mode dispersion in single-mode fibers. *IEEE Photonics Tech. Lett.* 12(3):296-298.

DUDLEY, J.M., S.G. MURDOCH. 1996. Intermodal dispersion and polarization mode dispersion measurements in optical fibers using a self-modelocked Ti:sapphire laser. *Optical Fiber Technology*, 2(1):80-84.

DUTTON, H.J.R. 1998. *Understanding Optical Communications*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 613 p.

FOSCHINI, G.J., C.D. POOLE. 1991. Statistical theory of polarization dispersion in single mode fibers. *J. Lightwave Tech.* 9(11):1439-1456.

GALTAROSSA, A., G. GIANELLO, C.G. SOMEDA, M. SCHIANO. 1994. Stress investigation in optical fiber ribbon cable by means of polarization sensitive techniques. *IEEE Photonics Technology Lett.* 6(10):1232 – 1234.

GALTAROSSA, A., C.G. SOMEDA, A. TOMMASINI, B.A. SCHREFLER, G. ZAVARISE, M. SCHIANO. 1997. Stress birefringence in fiber ribbons. *Proceedings of Conference on Optical Fiber Communication OFC 97*, p.262.

GALTAROSSA, A., L. PALMIERI, M. SCHIANO, T. TAMBOSSO. 2000. Improving the accuracy of the wavelength-scanning technique for PMD measurements. *IEEE Photonics Technology Lett.* 12(2):184-186.

GALTAROSSA, A., L. PALMIERI, A. PIZZINAT. 2001. Optimized spinning design for low PMD fibers: An analytical approach. *J. Lightwave Tech.* 19(10):1502-1512.

GALTAROSSA, A., L. PALMIERI. 2002. Measure of twist-induced circular birefringence in long single-mode fibers: theory and experiments. *J. Lightwave Tech.* 20(7):1149-1159.

GALTAROSSA, A., P. GRIGGIO, A. PIZZINAT. 2002. Calculation of the mean differential group delay of periodically spun, randomly birefringent fibers. *Optics Letters*, 27:692-694.

- GALTAROSSA, A., L. PALMIERI. 2004. Spatially resolved PMD measurements. *J. Lightwave Tech.* 22(4):11103-11115.
- GALTAROSSA, A., P. GRIGGIO, L. PALMIERI, A. PIZZINAT. 2004. First and second order PMD statistical properties of constantly spun randomly birefringent fibers. *J. Lightwave Tech.* 22(4):1127-1136.
- GARCIA, J.S. A.G. GONZALES, M.L. IRIBAS. 1996. Polarization mode dispersion power penalty: influence of rise/fall times, receiver Q and amplifier noise. *IEEE Photonics Tech. Lett.* 8(12):1719-1721.
- GISIN, N. 1991. Solutions of the dynamical equation for polarization dispersion. *Optics Communications*, 86(5):371-373.
- GISIN, N., R. PASSY, J.C. BISHOFF, B. PERNY. 1993. Experimental investigation of the statistical properties of polarization mode dispersion in single mode fibers. *IEEE Photonics Tech. Lett.* 5(7):819-821.
- GISIN, N., B. GISIN, J.P. von der Weid, R. PASSY. 1996. How accurately can one measure a statistical quantity like polarization-mode dispersion? *IEEE Photonics Tech. Lett.* 8(12):1671-1673.
- HART, A.C., R.G. HUFF, K.L. WALKER. 1994. Method of making a fiber having low polarization mode dispersion due to a permanent spin. U.S. Patent 5 298 047.
- HEFFNER, B.L. 1992. Automated measurement of polarization-mode dispersion using Jones matrix eigenanalysis. *IEEE Photonics Tech. Lett.* 4(9):1066–1069.
- HEFFNER, B.L. 1993. Accurate automated measurement of differential group delay dispersion and principal state variation using Jones matrix eigenanalysis. *IEEE Photonics Tech. Lett.* 5(7):814 –817.
- HEISMANN, F. 2004. Average frequency dependence of polarization-mode dispersion. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16(7):1658-1660.
- HUTTNER, B., B. GISIN, N. GISIN. 1999. Distributed PMD measurement with a polarization-OTDR in optical fibers. *J. Lightwave Tech.* 17(10):1843-1848.
- JONES, R.C. 1941. A new calculus for the treatment of optical systems I. *J. Opt. Soc. Am.* 31(7):488 –503.
- KARLIK, S.E., G. YILMAZ, K. GEREN. 2002. Optik fiberlerdeki polarizasyon mod dispersiyonunun sabit çözümleyici ve Jones matrisi yöntemleriyle ölçülmesi. ELECO2002 Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu Bildirisi. Bursa, 18-22 Aralık 2002, sayfa 275-279.



KARLIK, S.E., G. YILMAZ. 2003. Optik kuvvetlendiricili uzak mesafe iletişim sistemlerinde polarizasyon mod dispersiyonunun sabit çözümleyici ve Jones matrisi yöntemleriyle ölçülmesi. Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi Bildirisi. İstanbul, 18-21 Eylül 2003, sayfa 418-421.

KARLIK, S.E., G. YILMAZ. 2003. Investigations on polarization mode dispersion performance of non-zero dispersion fiber ribbon cables under different structural and environmental conditions. Proceedings of Third International Conference on Electrical and Electronics Engineering ELECO2003. Bursa, Turkey, 3-7 December 2003, p.341-345.

KARLIK, S.E, G. YILMAZ. 2004. Mekanik ve çevresel koşullardaki değişimlerin fiber ribbon kablolardaki polarizasyon mod dispersiyonuna etkilerinin incelenmesi. ELECO2004 Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu Bildirisi. Bursa, 8-12 Aralık 2004, sayfa 202-206.

KARLIK, S.E, G. YILMAZ. 2004. Sabit spinli fiberlere uygulanan harici bükmelemlerin fiberin polarizasyon mod dispersiyonuna etkilerinin incelenmesi. ELECO2004 Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu Bildirisi. Bursa, 8-12 Aralık 2004, sayfa 198-201.

KARLIK, S.E, G. YILMAZ. 2005. Harici bükme uygulanan sinusoidal spinli fiberlerde polarizasyon mod dispersiyonu değişimi. ITUSEM2005 İletişim Teknolojileri Ulusal Sempozyumu Bildirisi. Adana, 17-19 Kasım 2005, sayfa 159-163.

KARLIK, S.E, G. YILMAZ, A. KARTALTEPE. 2005. 40 Gbit/s haberleşme sistemlerinde öz faz modülasyonu kullanılarak polarizasyon mod dispersiyonu etkilerinin azaltılması. ITUSEM2005 İletişim Teknolojileri Ulusal Sempozyumu Bildirisi. Adana, 17-19 Kasım 2005, sayfa 1-4.

KARLIK, S.E., G. YILMAZ, E. YILMAZ. 2005. Effects of external twists on polarization mode dispersion of sinusoidally spun fibers. Proceedings of Fourth International Conference on Electrical and Electronics Engineering ELECO2005. Bursa, Turkey, 7-11 December 2005, p.307-310.

KASHYAP, R., S.V. CHERNIKOV, P.F. McKEE. 1994. 30 ps chromatic dispersion compensation of 400 fs pulses at 100 Gbits/s in optical fibers using an all-fiber photoinduced chirped reflection grating. Electronics Letters, 30(13):1078-1080.

KHOSRAVANI, R., A.E. WILLNER. 2001. System performance evaluation in terrestrial systems with high polarization mode dispersion and the effect of chirping. IEEE Photonics Tech. Lett. 13(4):296-298.

- KUN, X., Y. DAI, M. JIN, F. JIA, X. CHEN, X. LI, S. XIE. 2003. A novel method of automatic polarization measurement and its application to the higher-order PMD measurement. *Optics Communications*, 215(4-6):309-314.
- LI, M.J., D.A. NOLAN. 1998. Fiber spin-profile designs for producing fibers with low polarization mode dispersion. *Opt. Lett.* 23:1659-1661.
- LANNE, S., E. CORBEL. 2004. Practical considerations for optical polarization-mode dispersion compensators. *J. Lightwave Tech.* 22(4):1033 – 1040.
- LI, M.J., A.F. EVANS, D.W. ALLEN, D.A. NOLAN. 1999. Effects of lateral load and external twist on PMD of spun and unspun fibers. *Proceedings of ECOC'99.* 2:62-63.
- LIMA, I.T., A.O. LIMA, G. BIONDINI, C.R. MENYUK, W.L. KATH. 2004. A comparative study of single-section polarization-mode dispersion compensators. *J. Lightwave Tech.* 22(4):1023-1032.
- MADSEN, C.K., M. CAPPUZZO, E.J. LASKOWSKI, E. CHEN, L. GOMEZ, A. GRIFFIN, A. WONG-FOY, S. CHANDRASEKHAR, L. STULZ, L. BUHL. 2004. Versatile integrated PMD emulation and compensation elements. *J. Lightwave Tech.* 22(4):1041-1050.
- MARTIN, P., G. LEBOUDEC, E. TAUFFLIEB, H.C. LEFEVRE. 1996. Optimized polarization mode dispersion measurement with  $\pi$ -shifted white light interferometry. *Optical Fiber Technology*, 2(2):207-212.
- MERKER, T., N. HAHNENKAMP, P. MEISSNER. 2000. Comparison of PMD-compensation techniques at 10 Gbit/s using an optical first-order compensator and electrical transversal filter. *Optics Communications*, 182(1-3):135-141.
- MIAO, H., C. YANG, S. LI, Y. YAN. 2003. Feed-forward polarization mode dispersion compensation with a step control algorithm. *Optics Communications*, 222(1-6):179-189.
- NAMIHIRA, Y., K. NAKAJIMA, T. KAWAZAWA. 1993. Fully automated interferometric PMD measurements for active EDFA, fibre optic components and optical fibres. *Electronics Letters*, 29(18):1649-1651.
- NELLEN, P.M., R. BRÖNNIMANN, M. HELD, U. SENNHAUSER. 2004. Long-term monitoring of polarization-mode dispersion of aerial optical cables with respect to line availability. *J. Lightwave Tech.* 16 (8):1848-1855.
- NING, G., S. ADITYA, P. SHUM, Y.D. GONG, X.Y. DONG, J.H. NG. 2005. A PMD compensator with Hi-Bi chirped FBG free from chromatic dispersion. *Optics Communications*, 245(1-6):153-157.
- NOLAN, D.A., X. CHEN, M.-J. LI. 2004. Fibers with low polarization-mode dispersion. *J. Lightwave Tech.* 22 (4):1066-1077.

- OBERSON, P., K. JULLIARD, N. GISIN, R. PASSY, J.P. von der Weid. 1997. Interferometric polarization mode dispersion measurements with femtosecond sensitivity. *J. Lightwave Tech.* 15(10):1852-1857.
- OLSSON, B.E., M. KARLSSON, A. ANDREKSON. 1998. Polarization mode dispersion measurement using a Sagnac interferometer and a comparison with the fixed analyzer method. *IEEE Photonics Tech. Lett.* 10(7):997-999.
- PAN, Z., Y.W. SONG, C. YU. 2002. Tunable chromatic dispersion compensation in 40 Gb/s systems using nonlinearly chirped fiber Bragg gratings. *J. Lightwave Tech.* 20(12):2239-2246.
- PASSY, R., A.L. GAMA, N. GISIN, J.P. von der Weid. 1992. Pressure dependence of polarization mode dispersion in HiBi fibers. *J. Lightwave Tech.* 10(11):1527-1531.
- PIZZINAT, A., L. PALMIERI, B.S. MARKS, C.R. MENYUK, A. GALTAROSSA. 2003. Analytical treatment of randomly birefringent periodically spun fibers. *J. Lightwave Tech.* 21(12):3355-3363.
- POOLE, C.D., R.E. WAGNER. 1986. Phenomenological approach to polarization dispersion in long single-mode fibers. *Electronics Letters*, 22(19):1029-1030.
- POOLE, C.D., N.S. BERGANO, R.E. WAGNER, H.J. SCHULTE. 1988. Polarization dispersion and principal states in a 147-km undersea lightwave cable. *J. Lightwave Tech.* 6(7):1185-1190.
- POOLE, C.D., J.H. WINTERS, J.A. NAGEL. 1991. Dynamical equation for polarization dispersion. *Optics Letters*, 16(6):372-374.
- POOLE, C.D., D.L. FAVIN. 1994. Polarization-mode dispersion measurements based on transmission spectra through a polarizer. *J. Lightwave Tech.* 12(6):917-929.
- QUETEL, L., L. RIVOALLAN, M. MORVAN. 1997. Chromatic dispersion compensation by apodised Bragg gratings within controlled tapered fibers. *Optical Fiber Technology*, 3(3):267-271.
- RASHLEIGH, S.C. 1983. Origins and control of polarization effects in single-mode fibers. *J. Lightwave Tech.* 1(2):312-331.
- RAVET, F., B. HEENS, X. WANG, J.-C. FROIDURE, M. BLONDEL. 1997. PMD measurements on single-mode optical fibre below the interferometer limit. *Conference Proceedings of 10<sup>th</sup> Annual Meeting of IEEE Lasers and Electro-Optics Society LEOS 97*, vol. 2, pp.119-120.
- RAVET, F., B. HEENS, X. WANG, J.-C. FROIDURE, M. BLONDEL. 1998. Accurate and fast PMD measurements by the fixed analyser technique. *Proceedings of 9<sup>th</sup> Mediterranean Electrotechnical Conference MELECON 98*, vol. 2, pp.1409-1413.

- ROBERGE, N.C.R., J. BRADLEY, G. AMICE, F. AUDET, G.W. SCHINN. 2004. Interferometric PMD measurement of a transatlantic 5512-km fiber link including 119 EDFAs. Proceedings of Conference on Optical Fiber Communication OFC 2004, p.MF13.
- SARKIMUKKA, S., A. DJUPSJÖBACKA, A. GAVLER, G. JACOBSEN. 2000. Mitigation of polarization mode dispersion in optical multichannel systems. *J. Lightwave Tech.* 18(10):1374-1380.
- SAVORY, S.J., F.P. PAYNE. 2001. Pulse propagation in fibers with polarization-mode dispersion. *J. Lightwave Tech.* 19(3):350-357.
- SCHUH, R.E., E.S.R. SIKORA, N.G. WALKER, A.S. SIDDIQUI, L.M. GLEESON, D.H.O. BEBBINGTON. 1995. Theoretical analysis and measurement of effects of fibre twist on polarization mode dispersion of optical fibres. *Electronics Letters*, 31:1772-1773.
- SHIEH, W., S.D. DODS. 2005. Robustness of polarization-mode-dispersion compensation in the presence of polarization-dependent loss. *IEEE Photonics Tech. Lett.* 17(3):573-575.
- SIMOVA, E., I. POWELL, C.P. GROVER. 2002. Biased  $\pi$ -shifted low-coherence interferometry for measuring polarization mode dispersion (PMD). *Optical Fiber Technology*, 8(1):4-23.
- SONG, S., C.T. ALLEN, K.R. DEMAREST, R. HUI. 1999. A novel method for measuring polarization-mode dispersion using four-wave mixing. *J. Lightwave Tech.* 17(12):2530-2533.
- SUETSUGU, Y., T. KATO, M. NISHIMURA. 1995. Full characterization of polarization-mode dispersion with random-mode coupling in single-mode optical fibers. *IEEE Photonics Tech. Lett.* 7(8):887-889.
- SUNNERUD, H., B.E. OLSSON, M. KARLSSON, A. ANDREKSON, J. BRENTTEL. 2000. Polarization-mode dispersion measurements along installed optical fibers using gated backscattered light and a polarimeter. *J. Lightwave Tech.* 18(7):897-904.
- ULRICH, R., A. SIMON. 1979. Polarization optics of twisted single-mode fibers. *Appl. Opt.* 18:2241-2251.
- VILLUENDAS, F., J. PELAVO, P. BLASCO. 1995. Polarization-mode transfer function for the analysis of interferometric PMD measurements. *IEEE Photonics Tech. Lett.* 7(7):807-809.
- WADDY, D.S., L. CHEN, X. BAO. 2005. Polarization effects in aerial fibers. *Optical Fiber Technology*, 11(1):1-19.

WESTBROOK, P.S., L.E. NELSON, S. WIELANDY, J. FINI. 2004. Enhancement of spectral polarimetry for PMD measurement using transmitted signal spectra. Proceedings of Conference on Optical Fiber Communication OFC 2004, p.3.

ZHANG, X., Y. XIA, Y. HUANG, X. REN. 2002. A novel tunable PMD compensation using linearly chirped fiber Bragg grating. Optics Communications, 214(1-6):123-127.

ZOU, N., M. YOSHIDA, Y. NAMIHIRA, H. ITO. 2002. PMD measurement based on delayed self-heterodyne OFDR and experimental comparison with ITU-T round robin measurements. Electronics Letters, 38(3):115-116.

## EKLER

### EK-1 DENEYLERDE KULLANILAN AYARLI LAZERLERİN TEKNİK ÖZELLİKLERİ

Doktora tez çalışması kapsamında yapılan deneylerde Agilent Technologies tarafından üretilen 81480A, 81640A ve 81680A ayarlı lazerler kullanılmıştır. 81480A 1370-1480 nm, 81640A 1510-1640 nm ve 81680A 1460-1580 nm dalgaboyu aralığında çalışır. Bu lazerler, Agilent 8164A Lightwave Solution Mainframe'e monte edilerek kullanılırlar. Agilent 81480/640/680A ayarlı lazerlerin dış görünüşü Şekil E-1.1'de verilmiştir.



Şekil E-1.1. Agilent 81480/640/680A ayarlı lazerlerin dış görünüşü

Agilent 81480A, 81640A ve 81680A ayarlı lazerlerin teknik özellikleri sırasıyla Çizelge E-1.1, Çizelge E-1.2 ve Çizelge E-1.3'te verilmiştir.

Çizelge E-1.1. Agilent 81480A ayarlı lazerin teknik özellikleri

Dalgaboyu aralığı	1370-1480 nm	
Dalgaboyu çözünürlüğü	0.1 pm, 15 MHz (1450 nm'de)	
Mutlak dalgaboyu doğruluğu	$\pm 0.01$ nm	
Bağıl dalgaboyu doğruluğu	$\pm 5$ pm, tipik $\pm 2$ pm	
Dalgaboyu tekrar edilebilirliği	$\pm 1$ pm, tipik $\pm 0.5$ pm	
Dalgaboyu kararlılığı (tipik 24 saat sabit sıcaklıkta)	$\leq \pm 1$ pm	
Ayar hızı (1/10/100 nm adımlarda)	400 ms/600 ms/2.8 s	
	Çıkış 1 (düşük SSE)	Çıkış 2 (yüksek güç)
Çıkış gücü	$\geq -4.5$ dBm tipik tepe $\geq -7$ dBm (1420-1470 nm) $\geq -13$ dBm (1370-1480 nm)	$\geq +4.5$ dBm tipik tepe $\geq +3$ dBm (1420-1470 nm) $\geq -3$ dBm (1370-1480 nm)
Minimum çıkış gücü	-13 dBm	-3 dBm
Güç kararlılığı	$\pm 0.01$ dB, 1 saat (1420-1480 nm) tipik $\pm 0.01$ dB, 1 saat (1370-1420 nm) tipik $\pm 0.03$ dB, 24 saat	
Güç tekrar edilebilirliği	$\pm 0.01$ dB	
İşaret SSE oranı	$\geq 61$ dB/nm (1420-1470 nm) $\geq 55$ dB/nm (tipik, 1370-1480 nm)	$\geq 40$ dB/nm (1420-1470 nm) $\geq 35$ dB/nm (1370-1480 nm)
İşaret toplam SSE oranı	$\geq 58$ dB (1420-1470 nm) $\geq 53$ dB (tipik, 1370-1480 nm)	$\geq 28$ dB (tipik, 1420-1470 nm)

Çizelge E-1.2. Agilent 81640A ayarlı lazerin teknik özellikleri

Dalgaboyu aralığı	1510-1640 nm	
Dalgaboyu çözünürlüğü	0.1 pm, 12.5 MHz (1550 nm'de)	
Mutlak dalgaboyu doğruluğu	$\pm 0.015$ nm	
Bağıl dalgaboyu doğruluğu	$\pm 7$ pm, tipik $\pm 3$ pm	
Dalgaboyu tekrar edilebilirliği	$\pm 1$ pm, tipik $\pm 0.5$ pm	
Dalgaboyu kararlılığı (tipik 24 saat sabit sıcaklıkta)	$\leq \pm 1$ pm	
Ayar hızı (1/10/100 nm adımlarda)	400 ms/600 ms/2.8 s	
	Çıkış 1 (düşük SSE)	Çıkış 2 (yüksek güç)
Çıkış gücü	$\geq -5$ dBm tipik tepe $\geq -7$ dBm (1530-1610 nm) $\geq -9$ dBm (1520-1620 nm) $\geq -13$ dBm (1510-1640 nm)	$\geq 4$ dBm tipik tepe $\geq 2$ dBm (1530-1610 nm) $\geq 0$ dBm (1520-1620 nm) $\geq -5$ dBm (1510-1640 nm)
Minimum çıkış gücü	-13 dBm	-5 dBm
Güç kararlılığı	$\pm 0.01$ dB, 1 saat tipik $\pm 0.03$ dB, 24 saat	
Güç tekrar edilebilirliği	$\pm 0.01$ dB	
İşaret SSE oranı	$\geq 60$ dB/nm (1530-1610 nm) $\geq 55$ dB/nm (tipik, 1520-1620 nm) $\geq 50$ dB/nm (tipik, 1510-1640 nm)	$\geq 45$ dB/nm (1530-1610 nm) $\geq 40$ dB/nm (1520-1620 nm) $\geq 35$ dB/nm (1510-1640 nm)
İşaret toplam SSE oranı	$\geq 55$ dB (1530-1610 nm) $\geq 45$ dB (tipik, 1510-1640 nm)	$\geq 27$ dB (tipik, 1530-1610 nm)



Çizelge E-1.3. Agilent 81680A ayarlı lazerin teknik özellikleri

Dalgaboyu aralığı	1460-1580 nm	
Dalgaboyu çözünürlüğü	0.1 pm, 12.5 MHz (1550 nm'de)	
Mutlak dalgaboyu doğruluğu	$\pm 0.01$ nm	
Bağıl dalgaboyu doğruluğu	$\pm 5$ pm, tipik $\pm 2$ pm	
Dalgaboyu tekrar edilebilirliği	$\pm 1$ pm, tipik $\pm 0.5$ pm	
Dalgaboyu kararlılığı (tipik 24 saat sabit sıcaklıkta)	$\leq \pm 1$ pm	
Ayar hızı (1/10/100 nm adımlarda)	400 ms/600 ms/2.8 s	
	Çıkış 1 (düşük SSE)	Çıkış 2 (yüksek güç)
Çıkış gücü	$\geq -4$ dBm tipik tepe $\geq -6$ dBm (1520-1570 nm) $\geq -10$ dBm (1480-1580 nm) $\geq -13$ dBm (1460-1580 nm)	$\geq 6$ dBm tipik tepe $\geq 5$ dBm (1520-1570 nm) $\geq 1$ dBm (1480-1580 nm) $\geq -3$ dBm (1460-1580 nm)
Mínimum çıkış gücü	-13 dBm	-3 dBm
Güç kararlılığı	$\pm 0.01$ dB, 1 saat tipik $\pm 0.03$ dB, 24 saat	
Güç tekrar edilebilirliği	$\pm 0.01$ dB	
İşaret SSE oranı	$\geq 63$ dB/nm (1520-1570 nm) $\geq 58$ dB/nm (tipik, 1480-1580 nm) $\geq 53$ dB/nm (tipik, 1460-1580 nm)	$\geq 45$ dB/nm (1520-1570 nm) $\geq 40$ dB/nm (1480-1580 nm) $\geq 35$ dB/nm (1460-1580 nm)
İşaret toplam SSE oranı	$\geq 60$ dB (1520-1570 nm) $\geq 50$ dB (tipik, 1460-1580 nm)	$\geq 30$ dB (tipik, 1520-1570 nm)

## EK-2 PAT9000F PMD/PDL ÇÖZÜMLEYİCİNİN TEKNİK ÖZELLİKLERİ

Deneylerde kullanılan PAT9000F PMD/PDL çözümleyici, PMD ölçümlerini Jones matrisi yöntemiyle gerçekleştirmektedir. Sistemin bünyesinde üç dahili modül bulunmaktadır. Bu modüller, POL9320FIR polarizör, PAN9300FIR polarizasyon ölçer ve PMD ölçüm sisteminin kalibrasyon doğrulamasında kullanılan DGD referansıdır. PAT9000F PMD/PDL çözümleyicinin dış görünüşü Şekil E-2.1’de verilmiştir.



Şekil E-2.1. PAT9000F PMD/PDL çözümleyicinin dış görünüşü

PAT9000F, PMD ölçümlerinde kaynak olarak ayarlı lazer kullanır. PAT9000F ile uyumlu ayarlı lazerler Çizelge E-2.1’de verilmiştir.

Çizelge E-2.1. PAT9000F ile uyumlu ayarlı lazerler

ANDO	AQ 4320 A/D, AQ 4321 A/D serileri
Anritsu	MG 9637 A, MG 9638 A (tüm çeşitleri)
Agilent	8163A, 8164A, 8168A, 81640A, 81642A, 81680A, 81682A, HP8167, HP8168
New Focus	6200 serisi (tüm çeşitleri)
New Test	TUNICS serisi (tüm çeşitleri)

PAT9000F bünyesinde 640x480 yüksek çözünürlüklü ekran, dahili bellek ve 3-1/2'' disket sürücü bulunmaktadır. PAT9000F genel amaçlı arayüz hattı (GPIB) kullanılarak bilgisayara ya da TCP/IP Ethernet kartı ile yerel alan ağına bağlanabilmektedir.

PAT9000F'te, ayarlı lazerin dalgaboyu aralığında DGD ve PSP'ler dalgaboyunun fonksiyonu olarak ölçülür ve ekrana çizdirilir. Maksimum ve minimum DGD'ler belirlenebilir. Ortalama ve efektif PMD değerleri hesaplanır. DGD dağılımı histogram şeklinde de gösterilebilir ve Maxwell dağılımıyla karşılaştırılabilir. Ölçümler, geçici değişimleri gözlemek için otomatik olarak tekrarlanabilir. PAT9000F'in PMD ölçümüyle ilgili teknik özellikleri Çizelge E-2.2'de verilmiştir.

Çizelge E-2.2. PAT9000F'in PMD ölçümüyle ilgili teknik özellikleri

DGD ölçüm aralığı	0.001-280 ps (1310 nm) 0.001-400 ps (1550 nm)
Tekrar edilebilirlik	<0.01 ps
Tipik ölçüm süresi (1/100 veri noktası için)	2 s / 100 s

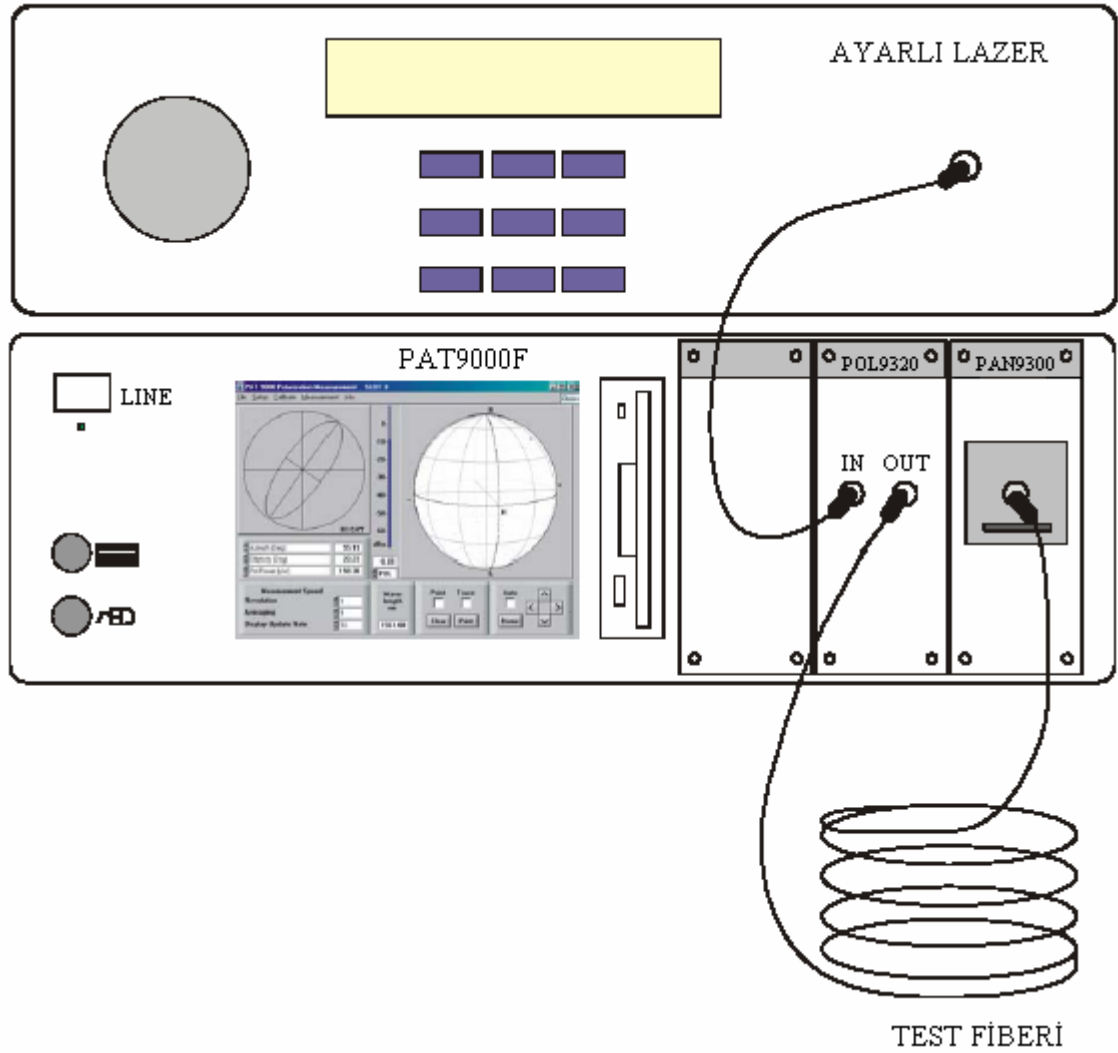
PAT9000F içindeki POL9320FIR ayarlanabilir doğrusal polarizör modülü, 1200-1700 nm dalgaboyu aralığında çalışır. Sistem PMD ölçümleri yaparken otomatik olarak çalıştırılır. POL9320FIR polarizasyona bağlı kayıpların (PDL) ölçümünde de kullanılır.

PAT9000F içindeki PAN9300FIR polarizasyon ölçer, SOP ve polarizasyon derecesini (DOP) belirler. 1200-1700 nm dalgaboyu aralığında çalışan PAN9300FIR polarizasyon ölçerin teknik özellikleri Çizelge E-2.3'te verilmiştir.

PAT9000F ile PMD ölçümünde, ayarlı lazerin çıkışı, POL9320FIR polarizörün girişine tek modlu fiber ile bağlanır. Test fiberi POL9320FIR çıkışı ile PAN9300FIR girişine bağlanır. Alıcıdaki gürültü seviyesinin ölçüm sonuçlarını etkilememesi için, seçilecek güç seviyesi - 40dBm'den büyük olmalıdır. PAT9000F ile kurulan PMD ölçüm düzeneği Şekil E-2.2'de verilmiştir.

Çizelge E-2.3. PAN9300FIR polarizasyon ölçerin teknik özellikleri

Dalgaboyu aralığı	1200-1700 nm
Giriş gücü aralığı	-70-+8 dBm
Hız	33 Hz (standard mod) 200 Hz (turbo mod)
Azimut açısı doğruluğu	<0.25°
Eliptik açısı doğruluğu	<0.25°
Normalize Stokes vektör doğruluğu	S1, S2, S3<0.005



Şekil E-2.2. PAT9000F ile kurulan PMD ölçüm düzeneği

### EK-3 ACTERNA MTS-8000 TESTER CİHAZININ TEKNİK ÖZELLİKLERİ

Deneyleerde kullanılan Acterna MTS-8000 Tester, sabit çözümlayici yöntemiyle çalışan, taşınabilir olması nedeniyle saha ölçümlerinde de yararlanılabilen ve kullanımı için özel bir eğitim süreci gerektirmeyen basit yapıya sahip bir cihazdır. MTS-8000, 1280-1650 nm dalgaboyu aralığında çalışan dahili optik spektrum çözümlayiciye sahiptir. DGD ölçüm aralığı 0.01-60 ps'dir. Ayrıca PMD katsayısı da ekranda otomatik olarak gösterilmektedir. Ölçülen veriler saklanabilmekte ve ekranda histogram şeklinde de görülebilmektedir.

MTS-8000, bir genişbandlı optik kaynak ve bir polarizör ile beraber çalışmaktadır. Optik kaynak olarak Acterna OBS-15 lazerin yanı sıra değişik firmaların ürettiği çok sayıda ayarlı lazer de MTS-8000 ile beraber çalışabilmektedir. Tez çalışmasındaki deneyleerde MTS-8000 ile Agilent 81480A, 81640A ve 81680A ayarlı lazerleri kullanılmıştır. Polarizör olarak Acterna OVP-15 ayarlı polarizör kullanılmıştır. OVP-15 polarizörün maksimum giriş gücü +23 dBm'dir.

Çizelge E-3.1. Acterna MTS-8000 Tester cihazının teknik özellikleri

DGD ölçüm aralığı	0.01-60 ps
Dalgaboyu aralığı	1280-1650 nm
Dalgaboyu doğruluğu	$\pm 20$ pm
Ölçüm süresi	<5 sec
Maksimum fiber uzunluğu	<140 km

MTS-8000 cihazının teknik özellikleri Çizelge E-3.1'de verilmiştir. MTS-8000 ile PMD ölçümlerinde, ayarlı lazerin çıkışı tek modlu bir fiber ile OVP-15 polarizörün girişine bağlanır. Test fiberi OVP-15 çıkışı ile MTS-8000 girişine bağlanır. MTS-8000'de ölçülen değerler ileri analizler için bilgisayara aktarılabilir.

## TEŞEKKÜR

Doktora süresince hem tezimde hem de tezimin haricinde karşılaştığım sorunlara sabırla çözüm yolları öneren, destek ve yardımını hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Güneş YILMAZ'a, tez çalışmamla ilgili değerli tavsiyeleri için Sayın Doç. Dr. Eldar MUSAYEV ve Sayın Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye, yetişmemde emeği bulunan tüm hocalarıma ve tabii ki otuz seneden beri karşılık beklemeyen şefkat ve sevgileriyle daima yanımda olup bugünlere ulaşmamı sağlayan annem Güzin Olcay KARLIK ve babam Salih KARLIK'a sonsuz şükran ve saygılarımı sunarım.

## ÖZGEÇMİŞ

Sait Eser Karlık, 1975 yılında Bursa'da doğdu. 1997 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecesini aldı. Aynı yıl Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya ve Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans yapmaya başladı. Yüksek lisansını 1999 yılında tamamlayarak aynı anabilim dalında doktora eğitimine başladı.

Sait Eser Karlık'ın araştırma konuları optik fiberlerdeki polarizasyon mod dispersiyonu, optik fiberli iletişim sistemleri, optik fiberli sensörler ve yüksek hızlı alan ağlarıdır. Kendisinin SCI (Science Citation Index) kapsamındaki dergilerde yayınlanmış 2 uluslararası makalesi, uluslararası sempozyum ve konferanslarda sunulmuş 7 bildirisi ve 15 adet ulusal bildirisi bulunmaktadır.