UZUN MESAFELİ VE YÜKSEK HIZLI FİBEROPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE OPTİK IZGARA TABANLI DİSPERSİYON KOMPANZASYONU

İsa NAVRUZ

DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR EĞİTİMİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2006
ANKARA

İsa NAVRUZ tarafından hazırlanan UZUN MESAFELİ VE YÜKSEK HIZLI FİBEROPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE OPTİK IZGARA TABANLI DİSPERSİYON KOMPANZASYONU adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Fatma Nihal GÜLER
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Raşit AHISKA

Üye : Prof Dr. Fatma Nihal GÜLER

Üye : Doç. Dr. Fatih ÇELEBİ

Üye : Doç. Dr. Elif Derya UBEYLİ

Üye : Y. Doç Dr. Halim Haldun GÖKTAŞ

Tarih : 25/12/2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

İsa NAVRUZ

UZUN MESAFELİ VE YÜKSEK HIZLI FİBEROPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN OPTİK IZGARA TABANLI DİSPERSİYON KOMPANZASYONU
(Doktora Tezi)

İsa NAVRUZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Aralık 2006

ÖZET

Son yıllarda, iletişim teknolojilerinde yaşanan göz kamaştırıcı gelişmelerin paralelinde bilgi trafiğinde artan yoğunluk, fiberoptik şebekelerinin ve haberleşme kanallarının kapasitelerini tüm dünyada her geçen gün daha çok zorlamaktadır. Optik yükselteçlerin uygulama sahasına girmesiyle yeni bir döneme geçen fiberoptik haberleşme sistemlerinde, bilgi iletim mesafesini ve hızını sınırlayan en büyük etken dispersiyondur. İletim hızı arttıkça daha da hızlı bir şekilde artan ve optik darbenin istenmedik bir şekilde genişlemesine sebep olan dispersiyonun kontrol altında tutulması zorunludur.

Dispersiyon ile mücadelede bu günlerde, fiberoptik haberleşme sisteminin bir optik bileşeni olabilen fiber Bragg ızgaralarına yoğun bir ilgi vardır. Bu çalışmada, fiber Bragg ızgaralarını iyi bir optik filtre olmasının yanında bir optik dipersiyon kompansatörü olarak geliştirmeye yönelik araştırmalar yapılmıştır. İlk olarak optik ızgarayı sayısal olarak analiz edebilmek amacıyla bağlaşımlı kip teorisine dayanan ve "matris transfer metodu" ile "bağlaşımlı kip eşitlik sistemi" ni çözen bir model ortaya konmuştur. Fiber Bragg ızgarasının optik karakteristiklerini etkileyebilecek, tasarım dalgaboyu, kırılma indisi modülasyon genliği, çalışma dalgaboyu band aralığı, apodizasyon, ızgara uzunluğu, doğrusal ve doğrusal olmayan cıvıltı gibi parametreleri de içeren bu

modelin uygulaması için MATLAB yazılımı altında çalışan bir simülatör geliştirilmiştir. Bu simülatör ile optik dispersiyon kompansatörlerinin güç yansıma, grup zaman gecikme ve dispersiyon spektrumlarının en iyileme analizleri yapılarak gerçekte uygulanabilir ızgara tasarım örnekleri sunulmuştur.

Tasarım modeli ve simülatör yazılımı bir adım daha geliştirilerek çok kanallı optik haberleşme sistemleri için optik fiber ızgarasında karmaşık yapılar ve bunların etkileri araştırılmıştır. Genlik ve faz örnekleme teknikleri içinde farklı örnekleme fonksiyonları analiz edilmiş ve bu fonksiyonları kullanan optik ızgaranın spektral karakteristikleri test edilmiştir. Son olarak faz örnekleme yaklaşımı ile optimizasyon yapılmış ve süperyapılı bir FBG' nin tasarımı sunulmuştur. Elde edilen spektral karakteristikler ve sonuçlar ile faz örneklemeli FBG' nin oldukça başarılı olduğu tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 704.1.111
Anahtar kelimeler : Fiber Bragg ızgarası, dispersiyon kompanzasyonu
Sayfa adeti : 120
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Fatma Nihal GÜLER

DISPERSION COMPENSATION BASED ON OPTICAL GRATING FOR LONG HAUL AND HIGH SPEED FIBEROPTICAL TELECOMMUNICATION SYSTEMS

(PhD Thesis)

İsa NAVRUZ

GAZİ UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

December 2006

ABSTRACT

The wonderful improvements in communication technologies and the increasing data rate have forced the fiber optical networks and communication channel capacities day by day all over the world. Dispersion is the most important factor that limits the data transmission distance in the fiber optical communication systems that passed to a new age by the application of optical amplifiers. It is necessary to control the dispersion which reduces dramatically the transmission rate and causes the optical pulse to entire in an undesired way.

Nowadays, there is an intense interest to fiber Bragg gratings which can be an optical component of fiber optical communication systems while cope with dispersion. In this study, researches are carried out in order to improve the fiber Bragg gratings as a well optical filter and an optical compensator at the same time. First of all, in order to analyze the optical grating numerically, a model solving the "coupled mode equation system" by "matrix transfer method" is exposed. For the application of this model that involves the parameters, that effects the optical characteristics of fiber Bragg grating, design wavelength, refraction index modulation amplitude, operating wavelength bandwidth, apodization, grating length, linear and nonlinear chirp, a simulator is improved working under MATLAB software. By this simulator, the

optimization analysis of power reflectivity, group time delay and dispersion spectra are realized and design examples that can be applied in practical are presented.

As a next step the design model and the simulator software is improved and the optical fiber communication systems are examined on the fiber grating complex structures and their effects. Different amplitude and phase sampling functions are analyzed and the optical grating spectral characteristics that use these functions are tested. Finally, an optimization has been realized by phase sampling approximation and a super structure FBG design has been presented. The calculated spectral characteristics and results have shown that phase sampled FBG is very successful.

Science Code : **704.1.111**
Key Words : **Fiber Bragg grating, dispersion compensation**
Page Number : **120**
Adviser : **Prof. Dr. Fatma Nihal GÜLER**

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren çok kıymetli Hocam Prof. Dr. Fatma Nihal GÜLER'e, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli eşim Tuğba Selcen NAVRUZ'a ve çalışmalarım boyunca kendisine zaman ayıramayışımı anlayışla karşılayan biricik oğlum Ömer Faruk NAVRUZ' a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT vi

TEŞEKKÜR viii

İÇİNDEKİLER ix

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xiii

SİMGELER VE KISALTMALAR xvii

1. GİRİŞ 1

2. FİBER KARAKTERİSTİKLERİ 5

2.1. Kırılma İndisi Profili 6

2.2. Fiber Kaybı 7

2.3. Kromatik Dispersiyon 8

2.4. Doğrusal olmayan Etkiler 10

2.4.1. Kendi kendine faz modülasyonu 11

2.4.2. Çapraz faz modülasyonu 12

2.4.3. Dört dalga karıştırma 12

2.4.4. Uyarılmış saçılmalar 14

2.5. Polarizasyon Mod Dispersiyonu 15

3. FIBER IZGARALARI 18

3.1. Izgara İndis Profili 19

3.2. Fiber Izgaralarının Temel Çalışma Prensibi 21

3.3. Fiber Bragg Izgaraları ve Dispersiyon Kompanzasyonu 22

Sayfa

4. FİBER BRAGG IZGARALARININ MODELLENMESİ ..... …...23

4.1. Bağlaşımlı Kip Teorisi 25

4.2. Tekdüze Izgaralar İçin Analitik Çözümler 30

4.3. Nümerik Çözüm Metotları 32

4.3.1. Sayısal integral alma yöntemi 32

4.3.2. Matris transfer yöntemi 33

4.4. Grup Zaman Gecikmesi ve Dispersiyon 35

5. TEK KANAL DİSPERSİYON KOMPANZASYONU İÇİN FBG UYGULAMALARI 36

5.1. Tekdüze FBG'ler 36

5.2. Cıvıltılı FBG' ler 40

5.3. Apodize-Cıvıltılı FBG' ler 43

5.4. Geniş Band Dispersiyon Kompanzasyonu 50

6. WDM SİSTEMLER İÇİN ÇOK KANALLI FBG' LER 55

6.1. Örneklemeli Fiber Bragg Izgaraları 56

6.2. Örnekleme fonksiyonu ve spektral ilişkiler 58

6.2.1. Dikdörtgensel örnekleme 59

6.2.2. Sinc biçimli örnekleme 67

6.2.3. Faz örnekleme 72

6.3. SFBG İle Dispersiyon ve Dispersiyon Eğim Uygulamaları 77

6.3.1. Dispersiyon ve dispersiyon eğim hesabı 77

6.3.2. Dispersiyon ve dispersiyon eğim uygulamaları 80

7. WDM VE DWDM DİSPERSİYON KOMPANZASYONU İÇİN FAZ ÖRNEKLEMELİ FİBER BRAGG IZGARALARININ OPTİMİZASYONU 85

Sayfa

7.1. Optimizasyon için Faz Örneklemeli FBG' nin Modellenmesi 86

7.2. Benzetilmiş Tavlama Yöntemi 88

7.3. Optimizasyon ve Simülasyon Sonuçları 93

7.4. PSFBG' ler ile Dispersiyon Kompanzasyon Uygulamaları 98

7.4.1 Doğrusal dispersiyon kompanzasyonu 99

7.4.2. Doğrusal olmayan dispersiyon kompanzasyonu 107

8. SONUÇ VE ÖNERİLER 109

KAYNAKLAR 113

ÖZGEÇMİŞ 120

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 6.1. Farklı tip fiberlerin RDS değerleri 79

Çizelge 7.1. Benzetilmiş Tavlama Algoritması parametreleri 93

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Işığın, optik kılavuzda tam dahili yansıma yaparak ilerleyişi 5

Şekil 2.2. Tek mod fiberler için sıklıkla kullanılan kırılma indis profilleri 6

Şekil 2.3. Fiber kaybının dalgaboyuna göre değişimi 7

Şekil 3.1. Tekdüze bir fiber ızgarasının genel yapısı.....18

Şekil 3.2. Farklı tür ızgara profilleri 20

Şekil 3.3. Fiberoptik kılavuzda oluşan bağlaşıma göre fiber ızgaraları.....21

Şekil 3.4. Cıvıltılı fiber Bragg ızgara kompansatörü 22

Şekil 4.1. Farklı ızgara şiddeti değerleri için tekdüze bir Bragg ızgarasının yansıma spektrumu 31

Şekil 4.2. N parçaya ayrılmış fiber ızgarası 33

Şekil 5.1. Tekdüze bir ızgarada güç yansıtıcılık, grup zaman gecikme ve dispersiyon eğrileri 37

Şekil 5.2. Farklı $\overline{\delta n}_{eff}$ değerleri için tekdüze bir ızgaranın güç yansıtıcılık eğrisi...38

Şekil 5.3. Tekdüze bir ızgarada güç yansıtıcılık, grup zaman gecikme ve dispersiyon eğrileri 39

Şekil 5.4. Optik dolaştırıcı ve fiber Bragg ızgarası bağlantısı 40

Şekil 5.5. Doğrusal cıvıltılı fiber ızgarasının güç yansıtıcılık, grup zaman gecikmesi ve dispersiyon spektrumları 42

Şekil 5.6. Doğrusal cıvıltılı fiber ızgarasının grup zaman gecikme ve dispersiyon spektrumu, cıvıltı parametresi 4,5nm/cm 44

Şekil 5.7. FBG için farklı tip apodizasyon profilleri 45

Şekil 5.8. Güç Yansıtıcılık ve grup zaman gecikme spektrumları 46

Şekil 5.9. *Gaussian* apodizasyon profilleri 47

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.10. Apodize-cıvıltılı FBG' nin güç yansıtıcılık ve grup zaman gecikme spektrumları 48

Şekil 5.11. Farklı ızgara profillerine karşılık gelen güç yansıma ve grup zaman gecikmesi spektrumları 49

Şekil 5.12. İki ayrı cıvıltı değerleri için ızgaranın güç yansıma spektrumu 51

Şekil 5.13. İki ayrı ızgaranın güç yansıma spektrumuları 52

Şekil 5.14. Güç yansıtıcılık(dB) (siyah) ve grup zaman gecikmesi spektrumları (mavi) 53

Şekil 5.15. Güç yansıtıcılık(dB) (siyah) ve grup zaman gecikmesi spektrumları (mavi) 54

Şekil 6.1. WDM optik haberleşme sisteminin genel yapısı 55

Şekil 6.2. Örneklenmiş ızgara yapısının şematik gösterimi 56

Şekil 6.3. Örnekle fonksiyonları ve indis modülasyonları 57

Şekil 6.4. Dikdörtgensel Örneklenmiş Fiber Izgarası 61

Şekil 6.5. (a) Dikdörtgensel örnekleme sinyali ve (b) Fourier spektrumu, *R*=1/6 62

Şekil 6.6. Dikdörtgensel örneklenmiş fiber Bragg ızgarasının WDM kanallı yansıma spektrumu, *R*=1/6 63

Şekil 6.7. (a) Dikdörtgensel örnekleme sinyali ve (b) Fourier spektrumu, R=1/10 63

Şekil 6.8. Dikdörtgensel örneklenmiş fiber Bragg ızgarasının WDM kanallı yansıma spektrumu, *R*=1/10 64

Şekil 6.9. Dikdörtgensel örneklenmiş fiber Bragg ızgarasının farklı R değerleri için WDM kanallı yansıma spektrumları 65

Şekil 6.10. Dikdörtgensel örneklenmiş fiber Bragg ızgarasının farklı *L* değerleri için WDM kanallı yansıma spektrumları 66

Şekil 6.11. Sinc biçimli örnekleme sinyalinin farklı *K* değerleri için elde edilen Fourier spektrumları 68

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.12. Sinc biçimli örnekleme sinyalinin farklı *K* değerleri için elde edilen Fourier spektrumları 70

Şekil 6.13. Sinc örneklenmiş fiber Bragg ızgarasının farklı *K* değerleri için WDM kanallı yansıma spektrumları 71

Şekil 6.14. L/2 noktasında π kadar faz kaydırılmış fiber ızgarasının indis değişimi 72

Şekil 6.15. Faz kaydırılmış fiber ızgarasının yansıma spektrumları 74

Şekil 6.16. Faz örneklenmiş fiber ızgarasının yansıma spektrumları 76

Şekil 6.17. Faz örneklemeli fiber Bragg ızgarasının yansıma spektrumu 77

Şekil 6.18. Farklı *k* değerleri için doğrusal olmayan cıvıltı parametresinin değişimi 80

Şekil 6.19. Cıvıltılı FBG' nin güç yansıtıcılık ve grup zaman gecikme eğrileri 80

Şekil 6.20. Apodize-cıvıltılı FBG' nin yansıma ve grup zaman gecikme eğrileri .. 81

Şekil 6.21. Apodize-cıvıltılı FBG' nin dispersiyon spektrumu 82

Şekil 6.22. Apodize-doğrusal olmayan cıvıltılı FBG' nin güç yansıtıcılık, grup zaman gecikmesi dispersiyon spektrumları 83

Şekil 6.23. Apodize-cıvıltılı FBG' nin güç yansıtıcılık (dB) ve dispersiyon spektrumları 84

Şekil 7.1. Benzetilmiş tavlama algoritmasının akış diyagramı 92

Şekil 7.2. (a) 8 kanal için optimize edilmiş faz profili,
(b) L=1cm uzunluklu ızgara için yansıma spektrumu
(c) L=1.5 cm uzunluklu ızgara için yansıma spektrumu 95

Şekil 7.3. (a) 16 kanal için optimize edilmiş faz profili,
(b) L=1cm uzunluklu ızgara için yansıma spektrumu,
(c) L=2 cm uzunluklu ızgara için yansıma spektrumu 96

Şekil 7.4. (a) 32 kanal için optimize edilmiş faz profili,
(b) L=2cm için ızgara için yansıma spektrası 97

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.5. Cıvıltılı-PSFBG' nin farklı cıvıltı değerlerine karşın yansıma spektrumunun değişimi, cıvıltı parametreleri 100

Şekil 7.6. Farklı apodizasyon profillerinin fiber ızgarasının yansıma spektrumuna olan etkisi 102

Şekil 7.7. Farklı ızgara uzunlukları için PSFBG' nin yansıma spektrumları 103

Şekil 7.8. Farklı δn_{eff} değerleri için yansıma spektrumları 104

Şekil 7.9. WDM dispersiyon kompansatörü yansıma ve grup zaman gecikme spektrumları 105

Şekil 7.10. WDM dispersiyon kompansatörü yansıma ve grup zaman gecikme spektrumları 106

Şekil 7.11. WDM dispersiyon kompansatörü yansıma ve grup zaman gecikme spektrumları 108

Şekil 7.12. WDM dispersiyon kompansatörü yansıma ve grup zaman gecikme spektrumları 108

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklama**
C	Cıvıltı parametresi (*nm/cm*)
D	Dispersiyon (*ps/nm*)
D_p	Polarizasyon mod dispersiyonu ($ps/\sqrt{km}$)
k	Serbest uzay dalga sayısı
E	Elektrik alan
Ψ	Elektrik yada manyetik alan vektörü
c	Işık hızı
L	Izgara uzunluğu (*mm*)
n_1	Çekirdek indisi
n_2	Kılıf indisi
$n_0(\omega)$	Silisyumun doğrusal kırılma indisi
n_{eff}	Çekirdeğin etkin kırılma indisi
P	Örnekleme periyodu (mm)
R	Örnekleme oranı
S_D	Dispersiyon eğimi (ps/nm^2)
$s(z)$	Örnekleme fonksiyonu
t	İletim güç katsayısı
r	Yansıma güç katsayısı
ρ	Yansıma katsayısı
ξ	İletim katsayısı
$U(z)$	Izgara boyunca ilerleyen alan
$V(z)$	Izgara boyunca yansıyan alan
z	Mesafe
$\beta(\omega)$	Mod yayılım sabiti

Simgeler	Açıklama
Λ	Izgara saçak aralığı (mm)
$\delta n_{eff}(z)$	Izgara indis değişimi
$\overline{\delta n}_{eff}(z)$	Izgara indis değişimi dc bileşeni
$\phi(z)$	Izgara fazı
λ_B	Bragg dalgaboyu
λ_D	Tasarım dalgaboyu
a	Gauss genişlik parametresi
$q(z)$	AC bağlaşım katsayısı
κ	Izgara bağlaşım katsayısı
$\hat{\sigma}$	DC bağlaşım katsayısı
δ	Frekans sapması
v	Izgaranın saçak görünürlüğü
F	Transfer matrisi
θ_p	Yansıyan dalganın fazı
S_m	Örnekleme fonksiyonu Fourier katsayıları
s_b	Dikdörtgensel örnekleme fonksiyonu
$\delta(z)$	Dirac-Delta fonksiyonu
K	Sinc fonksiyonu parametresi
M	Izgaranın yansıyan kanal sayısı
r_0	Hedef yansıma güç katsayısı
W_m	Ağırlık faktörü
k_c	Doğrusal olmayan cıvıltı katsayısı
$\Delta\nu_0$	Optik frekansta kanallar arası boşluk
$\Delta\varepsilon_r$	Fiber ızgarasındaki gerçek indis değişimi
τ_ρ	Grup zaman gecikmesi

Kısaltmalar	Açıklama
ITU	Uluslar arası Telekomünikasyon Birliği

Kısaltmalar	Açıklama
WDM	Dalgaboyu paylaşımlı çoklama
FWHM	Yarı maksimumdaki tam genişlik
DWDM	Yoğun dalgaboyu paylaşımlı çoklama
EDFA	Erbiyum katkılı fiber yükselteci
SPM	Kendi kendine faz modülasyonu
XPM	Çapraz faz modülasyonu
FWM	Dört dalga karışım
SBS	Uyarılmış Brillouin saçılması
SRS	Uyarılmış Raman saçılması
PMD	Polarizasyon mod dispersiyon
FBG	Fiber Bragg ızgarası
CFBG	Cıvıltılı fiber Bragg ızgarası
SFBG	Örneklenmiş Fiber Bragg ızgarası
PSFBG	Faz örneklemeli Fiber Bragg ızgarası

1. GİRİŞ

Son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmelere rağmen, haberleşme şebekelerinin band genişliğinin artırılmasına yönelik talepleri karşılama sorunu, modern iletişiminin en önemli alt yapı problemi olmaya devam etmektedir. Bilgisayar maliyetlerinin düşmesi ile bilgi çağına dahil olan küresel katılımlar sonucu, müşteri sayıları aşırı bir şekilde artan şebeke servis sağlayıcılar ve online servisler hızla çoğalmaktadır. Gelecekte, çok daha fazla sayıda insan, günlük ihtiyaçlarını karşılamak ve üstlendikleri görevleri yerine getirmek için, online servislerde çok daha fazla zaman harcayacaktır. Gelişen teknoloji ile bilgisayarlar da çok daha hızlı çalışacaktır.

Günümüzde, yüksek kapasite ve performansından dolayı optik fiber haberleşme sistemleri, tüm bu gelişmelere altyapı hazırlayabilecek en iyi aday olarak görülmektedir. Fiberoptik altyapının sürekli gelişmesi ve kurulu yada kurulacak haberleşme sistemleri için yeni teknik ve teknolojilerin kullanılması, yakın kuşak iletişim servislerinin ihtiyaçlarını büyük ölçüde karşılayacak gibi görülmektedir. Dalgaboyu paylaşımlı çoklama (WDM) ve yoğun dalgaboyu paylaşımlı çoklama (DWDM) yapılı şebekeler, kurulu optik kablolarda çok büyük bir yatırım yapmaksızın şebekenin taşıma kapasitesini kademeli yükselten, oldukça ilgi çekici bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır. Tek bir dalgaboyu yerine giderek artan sayıda dalgaboyu taşıyan WDM/DWDM sistemler, 1990'lı yılların hemen başında kurulu fiber kablolar ile işletilmeye başlanmıştır.

Optik haberleşme sistemlerinde, son 15 yılda önemli gelişmeler yaşanmıştır. Optik fiber iletişimindeki en büyük adım, erbiyum katkılı fiberoptik yükselteç (EDFA) ve dağıtılmış raman yükselteçlerinin (DRA) keşfinden sonra gelmiştir. EDFA ve DRA' ların geniş bandgenişlik kazancına bağlı olarak, WDM kanallar eş zamanlı yükseltilebilmekte ve uzun mesafe boyunca iletilebilmektedir. Gelişen bu süreçte bugün, tek kanal için 70 km üzerinde 1,28Tbit/s hıza ulaşılmıştır [1].

Yüksek hızlı, uzun mesafeli optik haberleşme sistemlerinin iletim performansını sınırlayan pek çok etkenler vardır. Kromatik dispersiyon, polarizasyon mod

dispersiyon, doğrusal olmayan karakteristikler ve fiber kaybı bunlardan en önemli olanlardır. Silis içeren cam yapılı optik fiberler kullanarak haberleşmenin sağlanabileceği fikrinin atıldığı ilk yıllarda, fiber kaybı en önemli sınırlayıcı faktör idi. Çünkü, fiber üzerinde o yıllarda yapılan ilk çalışmalarda 850 nm' de optik kaybın 20dB/km olduğu gösterilmişti [2]. Bu kayıp, optik fiberin girişine verilen sinyal gücünün, bir km sonra %1' e düşmesine neden olan büyük bir kayıp idi. Ancak takip eden on-onbeş yıl boyunca bu alanda göz kamaştırıcı gelişmeler olmuştur. Optik fiberin, sinyali zayıflatma etkisi hızla azalırken iletim penceresi, önce 850nm'den 1310nm'ye sonra 1550nm'ye kaydırılmıştır. 1979 yılında 1550nm penceresinde tek modlu fiber kullanılarak zayıflamanın 0,2dB/km'ye düşürüldüğü gösterilmiştir [3]. 1986 yılında saf silika çekirdek ve flor kılıflı bir SMF ile 1550 nm'de zayıflama katsayısı 0,154dB/km'ye düşürülmüştür [4]. 2002 yılında, saf-silika çekirdek fiberler için zayıflama 0,152 dB/km olarak not edilmiştir [5]. Sonuç olarak gelinen bu noktada fiber kaybı, optik fiberin girişine verilen sinyal gücünün, bir km sonra %96'ya düşmesi ile eşdeğerdir.

Yüksek hızlı, uzun mesafeli optik haberleşme sistemlerinde optik sinyallerin iletimi boyunca periyodik yükseltilmesini sağlayan EDFA ve DRA'ların uygulama sahasına girmesiyle, fiber kayıpları temel sınırlayıcı unsur olmaktan çıkmıştır. Günümüzde, optik yükselteç kullanan sistemlerinin performansını etkileyen iki temel unsurdan söz edilir. Bunlar, dispersiyon ve doğrusal olmayan optik etkilerdir. Dispersiyon ve doğrusal olmayan optik etkiler, fiber içerisinde ilerleyen optik darbenin giderek yayılmasına ve bilginin kaybolmasına yada anlamsız bir hale gelmesine neden olan bozucu etkilerdir.

Dispersif etkiler içinde en etkin olanı kromatik dispersiyondur. Optik fiberdeki kromatik dispersiyon, grup hızının iletilen sinyalin dalgaboyuna bağımlılığından kaynaklanan bir olgudur ve yüksek hızlı optik haberleşme sistemlerinin performansını sınırlayan en önemli faktördür. Optik sinyalin doğasına ve haberleşme sisteminin yapısına bağlı olarak, kromatik dispersiyonu iyileştirme çabaları farklı olabilir. 100km üzerinde 10Gb/s' den daha büyük veri hızları için, kromatik dispersiyonun, dispersiyon kompanzasyon teknikleri kullanarak iyi bir biçimde

yönetilmesi gerekmektedir. Ayrıca, dispersiyon kompanzasyonunda gerekli hassasiyet, bit hızı ile dramatik bir şekilde artar. Örneğin, 10Gb/s bit hızındaki bir optik sistem 1000ps/nm büyüklüğünde birikmiş dispersiyona dayanabilirken, 40Gb/s hızındaki sistem için bu sınır yalnızca 60ps/nm dir. Bu durum, uzun mesafeli optik haberleşme sistemlerinde yeterli performansı elde etmek için dispersiyonun niçin kontrol edilmesi gerektiğinin açık bir ifadesidir.

Optik fibere ve optik bileşenlere bağlı olarak kromatik dispersiyon yönetimi, günümüzde ve yakın gelecekteki yüksek hızlı telekomünikasyon sistemleri için kritik meselelerden biridir. Fiber boyunca ilerleyen optik darbenin genişlemesine ve bozulmasına sebep olan dispersiyonun giderilmesine yönelik pek çok araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalar arasında en çok ilgi göreni ve en popüler olanı bir optik yansıtıcı olan fiber Bragg ızgaralarıdır. Fiber Bragg ızgaraları, ışığın spektral özelliklerini değiştirebilen ve fiberoptik haberleşme sistemine optik olarak bağlanabilen bileşenlerdir. Yüksek hızlı DWDM haberleşme sistemlerinde karşılaşılan dispersiyon problemlerine, fiber Bragg ızgarası ile çözüm arayışı halen güncelliğini koruyan bir araştırma konusudur.

Bu tezde, tekdüze basit yapılı ve tek kanallı bir ızgara yapısından başlayarak, karmaşık yapılı (süper yapılı) çok kanallı ızgaraya kadar uzanan ayrıntılı bir model sunulmuştur. Bu modeli kullanan tasarımların uygulaması için MATLAB yazılımı altında çalışan bir simülatör programı geliştirilmiştir. Böylece yapılan araştırmaların sonuçlarını değerlendirebilecek bir laboratuar ortamı için sanal bir zemin hazırlanmıştır.

Bu tezde yapılan araştırmalar, fiberoptik haberleşmede sistemlerinde optik filtre ve dispersiyon kompanzasyonu için fiber Bragg ızgaralarını geliştirmeye yöneliktir. Çalışmanın önemli bir kısmında, tek kanallıdan yüksek hızlı DWDM optik sistemlere kadar uzanan haberleşmenin tüm katmanlarında gerçekte uygulanabilir optik ızgara tabanlı dispersiyon kompansatörleri için gerekli parametreler araştırılmış ve optimizasyonu yapılmıştır. Çok kanallı WDM sistemleri için dispersiyon ve dispersiyon eğim problemlerine çözüm olan örnek tasarım modelleri sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlar ve bulgular optik fiber ızgaralarının üretim öncesi tasarımlarına ışık tutacak niteliktedir.

Tezin ikinci bölümünde, optik fiberlere ve optik haberleşme sistemlerine ilişkin kavramlardan ve özelliklerden söz edilmiştir. Sistem performansına bozucu yönde etki eden zayıflama ve dispersiyon ile doğrusal olmayan diğer etkenler ve bunların sonuçları sunulmuştur. Tüm bu bozucu etkiler içinde özellikle kromatik dispersiyon ile yüksek dereceli dispersiyonun önemine işaret edilmiştir.

Tezin üçüncü bölümü, fiber ızgaralarının genel yapısı ve çalışma prensibini içermektedir. Fiber ızgaralarının, optik fiberin dispersiyonu dengelemek üzere dispersiyon kompansatörü olarak kullanılabileceği bu bölümde anlatılmıştır.

Bağlaşımlı Kip Eşitlikleri' ne dayanan optik ızgaranın teorisinin, analitik ve nümerik çözüm metotlarının anlatıldığı dördüncü bölümde, Matris Transfer Metodu kullanılarak optik ızgaranın nümerik modeli geliştirilmiştir.

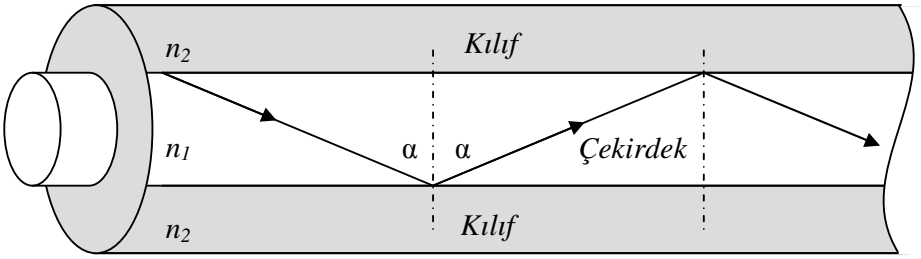
Tezin beşinci bölümünde, tek kanallı dar yada geniş band dispersiyon kompansatörü geliştirmek için fiber Bragg ızgaralarını geliştirmeye yönelik araştırmalar yapılmıştır.

Tezin altıncı bölümünde, WDM sistemler için çok kanallı fiber Bragg ızgaralarını geliştirmeye yönelik araştırmalar yapılmıştır. Örneklemeli ızgara modelleri geliştirilmiş, dispersiyon eğimi de içeren kompansatör tasarımları sunulmuştur.

Tezin yedinci bölümünde, faz örneklemeli fiber Bragg ızgarası ile optimizasyona dayalı optik filtre ve dispersiyon kompansatörünün tasarım modeli geliştirilmiştir. Doğrusal ve doğrusal olmayan dispersiyon kompansatör uygulamaları bu bölümde sunulmuştur.

2. FİBER KARAKTERİSTİKLERİ

Fiberlerde ışık yayılımı temel optik kurallarına dayanır. Sırayla n_1 ve n_2 indislerine sahip fiber çekirdeği ve bunu sarmalayan kılıf, ışık için optik bir kılavuz oluşturur. Işığın, klavuz içinde tam dahili yansıma yaparak ilerleyebilmesi için n_1 indisi n_2' den %1 yakın oranda küçüktür. Tipik değerler, çekirdeğin kırılma indisi 1,47 ve kılıfın kırılma indisi 1,46'dır. Şekil 2.1'de optik kılavuz ve yansıyarak ilerleyen ışığın takip ettiği yol görülmektedir.



Şekil 2.1. Işığın, optik kılavuzda tam dahili yansıma yaparak ilerleyişi

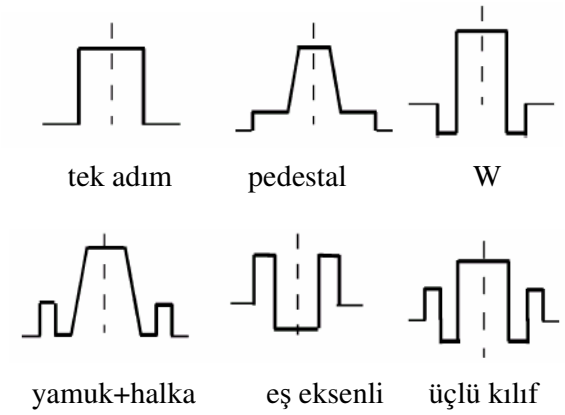
Fibere giren ışığın, çekirdek-kılıf sınırına çarparak tam yansıyabilmesi için kritik açıdan daha büyük açılarda gelmesi gerekir. Kritik açı, sinel kanunu olarak bilinen $n_1.sin\alpha_1 = n_2$ eşitliğindeki α_1 açısıdır. Bu açının 90°' ye yakın olması, ışığın fiber çekirdeğinden kılıfa geçmesine engel olacaktır. Çekirdek indisi n_1' in, kılıf indisi n_2' ye oldukça yakın olmasının gerekçesi bu kritere dayanmaktadır.

Çekirdek çapı, fiberin kılavuzluk ettiği modlar açısından önemli bir parametredir. Çekirdek çapı büyüdükçe, ışığın fiber boyunca takip edebileceği yolların sayısı artar. Farklı yollardan ilerleyen ışığın fiber çıkışına ulaşmaları farklı zaman alacağından, çıkışta zaman kaymaları oluşur ve optik darbenin özgün şekli bozularak genişler. Mod dispersiyonu olarak isimlendirilen bu durum, iletim hızını önemli derecede sınırlar. Mod dispersiyonunu ortadan kaldırımak için, optik fiberlerin çekirdek çapı sadece tek bir moda kılavuzluk edecek ölçüde küçültülür. Tek mod fiberleri olarak

isimlendirilen bu fiberler günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve bunların çekirdek çapı 10μm' den küçüktür.

2.1. Kırılma İndisi Profili

Kırılma indisi profili, fiber kesitinde indis değişimini tanımlar. Önemli fiber karakteristikleri bu kırılma indisi profiline bağlıdır. Şekil 2.2, tek mod fiberlerde en çok kullanılan çeşitli indis profili şekillerini göstermektedir. Bunlardan en basit olanı, kırılma indisi değişiminin sabit olduğu tek adımlı (kademeli) olanıdır. Çekirdek çapının tipik değeri 10μm'dir.



Şekil 2.2. Tek mod fiberler için sıklıkla kullanılan kırılma indis profilleri.

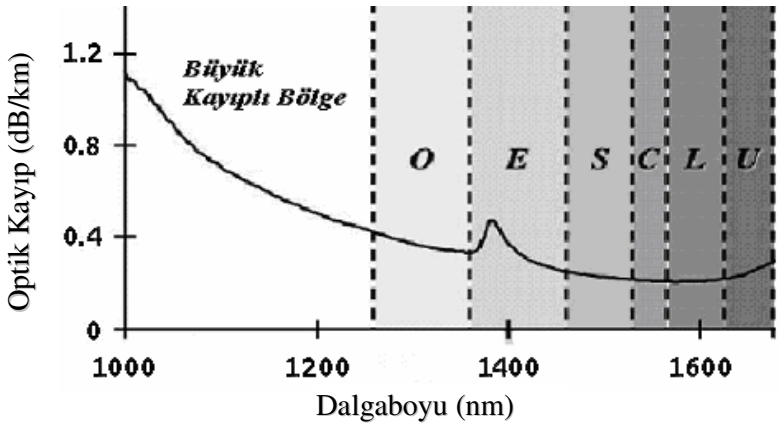
Fiber üretimi iki kademeli bir işlemdir. Birinci aşama, ön-form (preform) olarak isimlendirilen materyal çubuğunun yüksek saflıkta üretimidir. Bu çubuk, aynen fiberinkine benzer kesit profili ve bileşime sahiptir. Fakat, çapı birkaç cm'dir. Çünkü bu büyüklük, indis profil şeklinin çok iyi kontrol edilmesini sağlar. Çekirdeğin kırılma indisi, germanyum katkılama ile artırılır. Daha karmaşık profiller için, flor katkılama ile indisin düşürülmesi sağlanır. İndis farklılığı, yaklaşık $10x10^{-3}$ mertebesinde oldukça düşüktür. İkinci adım, ön-form çubuğunun 125μm fiber içine çekilip uzatılmasıdır. Böylece çubuğun küçük boyutlarda bir kopyası oluşacaktır. Çubuk, küçük bir kuvvet ve yerçekimi ile uç kısmından çekilir. Çekim işlemi

boyunca, mekanik bir koruyucu oluşturmak için fiber polimer ile kaplanır. Polimer ile kaplanan fiber çapı 250μm' ye kadar genişler.

2.2. Fiber kaybı

Fiber kaybı, fiber boyunca sinyal gücü yayılımını azalttığı için temel bir sınırlayıcı faktördür. Bu zayıflama, zayıflama katsayısı α ile ifade edilir ve birimi dB/km' dir. Pek çok optik sistemin çalıştığı 1550nm' de zayıflama katsayısının tipik değeri 0,2dB/km' dir. Bu dalgaboyu aralığında Rayleigh saçılması kaybın esas kaynağıdır.

WDM' in uygulamaya girmesiyle, fiber optik haberleşme sistemlerinde kullanılan band genişliği tipik olarak 1260nm ile 1675nm aralığına genişleme imkanı bulmuştur. 1530nm-1560nm aralığında geleneksel C bandının (C-bandı) her iki kenarında beş band daha belirtilmiştir. ITU-T standartlarına göre orijinal band (O-Bandı) 1260-1360nm, genişletilmiş band (E-Bandı) 1360-1460nm, kısa band (S-Bandı) 1460-1530nm, uzun band (L-Bandı) 1565-1625nm ve üst uzun band (U-Bandı) 1625-1675nm dalgaboyu aralığında tanımlanmıştır. Şekil 2.3'de tipik bir fiberin bu bandları kapsayan dalgaboyu spektrumunda optik kayıp eğrisi görülmektedir.



Şekil 2.3. Fiber kaybının dalgaboyuna göre değişimi.

Büküntü oluşturma, kaybın başka bir kaynağıdır. Büküntü yarıçapı küçüldükçe kayıp artar. Fiberler tasarlanırken, 10 mm'nin üzerindeki büküntü yarıçapları için büküntü kayıpları ihmal edilebilir. Fiberler kablo biçiminde iken mikro bükülme kaybı oluşabilir. Mikro bükülme, rastgele eksenel salınımlara karşılık gelir. Bu, fiberlerin mükemmel düzgün olmayan bir yüzeye sıkışması sonucu meydana gelir. Bir fiber üretilirken, mikro-bükülme kayıplarını mümkün olduğunca azaltacak tedbirlerin alınması bu bağlamda önemlidir.

2.3. Kromatik Dispersiyon

Elektromagnetik bir dalga silika gibi bir dielektrik dalgakılavuzunda ilerlerken, ortamın cevabı genel olarak optik frekans ω'ya bağlıdır. Bu özellik açıkça, kırılma indisi n(ω)'nın frekans bağımlılığı ile ortaya konur ve kromatik dispersiyon olarak isimlendirilir [6-9]. Fiber dispersiyonu optik darbe iletiminde önemli bir rol oynar. Çünkü optik darbe ile ilişkilendirilen farklı spektral bileşenler, *serbest ışık hızı /n(ω)* ile belirlenen farklı hızlarda ilerler. Sonuç olarak optik darbe fiber çıkışına ulaşıncaya kadar spektral yayılmaya maruz kalır ve orjinal şekli bozulur. Dispersiyon etkisi, mod-yayılım sabiti β'nın ω_0 merkez frekansı etrafındaki Taylor serisi ile ifade edilebilir.

$$\beta(\omega) = n(\omega)\frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega-\omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega-\omega_0)^2 + \ldots \tag{2.1}$$

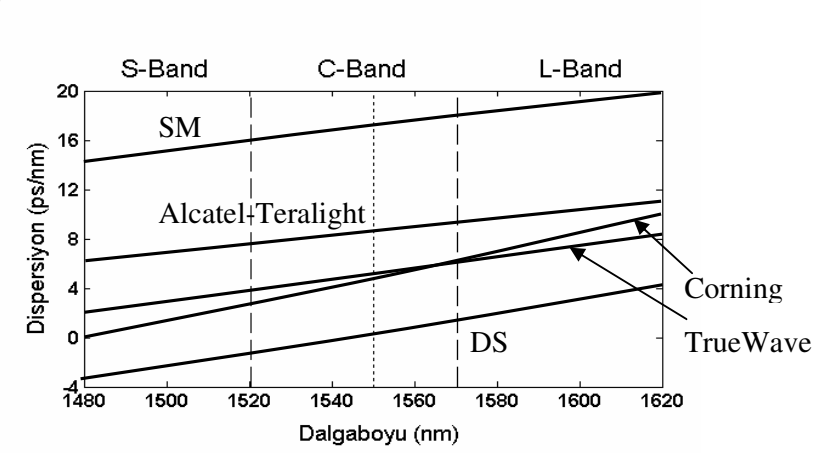
$$\beta_m = \left[\frac{d^m\beta}{d\omega^m}\right]_{\omega=\omega_0} \quad (m=0,1,2,..) \tag{2.2}$$

β_1, $vg=1/\beta_1$ ifadesiyle verilen grup hızını belirler. β_2, birinci dereceden darbe genişlemesine karşılık gelir ve aynı zamanda optik sinyalin dalgaboyuna (frekansına) bağlıdır. β_2 nin sıfır olduğu dalgaboyu, sıfır-dispersiyon dalgaboyu olarak belirtilir ve bu dalgaboyu tek modlu fiberler (SMF) için 1300nm'dir. En yaygın kullanılan sistem parametresi dispersiyon parametresidir (D) ve ps/(nm-km) ölçeğinde verilir. 1550nm

SMF için D yaklaşık 17,5ps/(nm-km)'dir. Dispersiyon parametresi D'nin β_2 ile ilişkisi Eş. 2.3'te verildiği gibidir.

$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2}\beta_2 \tag{2.3}$$

Dispersiyon parametresi dalgakılavuzu profili uyarlanarak değiştirilebilir. Dispersiyonu kaydırılmış fiberlerde (DSF), λ_0 yaklaşık 1550nm'dir ve bu dalgaboyunda D, $\pm 2{,}5$ aralığındadır. Dispersiyon parametresi D' nin SMF ve DSF' nin her ikisi için dalgaboyu ile değişimi Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Negatif D değerleri genellikle normal dispersiyon (β_2 pozitif) ve pozitif D değerleri anormal dispersiyon (β_2 negatif) olarak belirtilir. D'nin dalgaboyuna bağımlılığı genellikle dispersiyon eğimi olarak temsil edilir ve 1550nm'de SMF ve DSF için $dD/d\lambda \approx 0{,}08$ps/nm-km^2' dir. Fiberin doğrusal olmayan etkilerini azaltmak için yeni kuşak üretilen fiberler küçük miktarda dispersiyon sunmaktadır. Burada amaç, doğrusal olmayan etkilere dispersiyon ile karşılık vererek darbe bozulmasını önlemektir. Ayrı ayrı düşünüldüğünde, sistem performasını bozucu yönde etkileyen doğrusal olmayan etki ve dispersiyonun her ikisin de dengelendiği bu sistemlere "soliton optik haberleşme" adı verilmiştir. Corning-LEAF ve Lucent-TrueWave fiberler gibi dispersiyonu sıfır olmayan kaydırılmış fiberler (NZDSF) 1990'lı yılların ortalarında bu sistemler için sunulmuştur. Şekil 2.4'te çeşitli fiberlerin dispersiyon karakteristikleri verilmiştir[9].



Şekil 2.4. Farklı fiberler için dispersiyonun dalgaboyu ile değişimi.

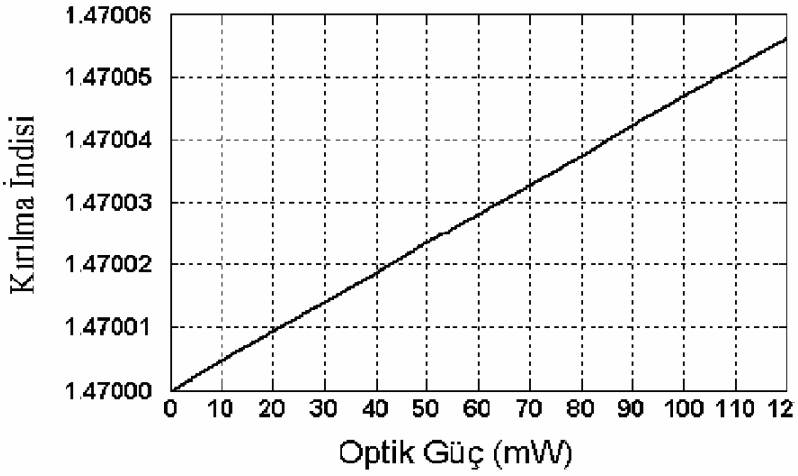
Negatif ve pozitif değerlikli dispersiyonun her ikisi de fiber çıkışında optik darbenin genişlemesine neden olur. Fiber uzunluğu ile artan genişleme, maksimum mesafeyi ya da yenilemesiz sistemde bit hızını önemli ölçüde sınırlar. Bu yüzden kromatik dispersiyon yüksek hızlı ve/veya uzun mesafeli sistemlerde mümkün olduğunca hafifletilmelidir. Fakat kromatik dispersiyonu ortadan kaldırmak yerine onu yönetmek ya da başka bir ifadeyle kontrol altında tutmak gerekir. Çünkü sıfır-dispersiyonlu fiberler dört dalga karışımı (FWM) içerirler ve bu yüzden bu tür fiberleri WDM sistemlerde kullanmak elverişli değildir. Teorik olarak yüksek hızlı ya da uzun mesafeli sistemler için kromatik dispersiyonun kompanzasyonu sabit bir değer olabilir. Ancak, optik sistemlerin ve şebekelerin pek çok önemli yanı vardır ki, ayar edilebilir dispersiyon kompanzasyon çözümleri oluşturmak, özellikle yüksek hızlı optik şebekelerde sistem performansına önemli derecede katkılar sağlar.

İlave olarak, WDM+EDFA sistemlerde optik fiberin dispersiyonu, EDFA kazanç band genişliği üzeride önemli miktarda değişir. Ayrıca, ikinci derece dispersiyon olarak ta isimlendirilen kromatik dispersiyonun dalgaboyu bağımlılığı, dispersiyon eğim problemini beraberinde getirir. Uzun mesafeli WDM sistemlerinde, farklı dalgaboylarının farklı dispersiyon kompanzasyonları gerektirmesinden dolayı, kromatik dispersiyon eğiminin de dikkate alınması önemlidir.

2.4. Doğrusal Olmayan Etkiler

İletilen sinyalin bozulmasına sebep olan optiksel doğrusal olmayan etkiler iki temel sınıfa ayrılır. Bunlar, uyarılmış saçılma (stimulated scattering) etkileri ve kırılma indisi etkileridir. Uyarılmış saçılma etkileri, fiberdeki ışık ile akustik ya da optik fononlar arasındaki parametrik etkileşimlerden ortaya çıkar. Kırılma indisi etkileri, ışık yoğunluğuna bağlı olarak değişen kırılma indis modülasyonu ile ilişkilendirilir. Silisyumun kırılma indisi sabit değildir ve Eş. 2.4'te verildiği gibi ışık yoğunluğu ile artar. Bu değişim Şekil 2.5'de görülmektedir.

$$n(\omega, P) = n_0(\omega) + n_2 \frac{P}{A_{eff}} \tag{2.4}$$



Şekil 2.5. Kırılma indisinin ışık yoğunluğu ile değişimi.

Burada, $n_0(\omega)$ silisin doğrusal kırılma indisi, n_2 ise $I=P/A_{eff}$ ile verilen ortamın etkin ışık yoğunluğuyla değişen kırılma indis katsayısıdır. P ışık gücü, A_{eff} çekirdeğin etkin alanıdır ve n_2 için tipik değer $2{,}6\text{x}10^{-20}$ m^2/W' tır. Kırılma indisinin yoğunluk bağımlılığı, optik fiberler için üç temel unsurda artışa sebep olur [6,10]. Bunlar, kendi kendine faz modülasyonu (SPM), çapraz faz modülasyonu (XPM) ve dört dalga karışım (FWM)'dır. Bu doğrusal olmayan etkiler, WDM optik haberleşme sisteminin performasını ciddi ölçüde düşürür [11,12]. SPM, tek kanal ve çok kanallı WDM sistemlerin her ikisinde de etkili olurken, XPM ve FWM daha ziyade çok kanallı WDM sistemlerde etkilidir.

2.4.1. Kendi kendine faz modülasyonu

Silisyumun kırılma indisi, içinden geçen ışığın yoğunluğu ile az da olsa değişir. Sinyal yoğunluğundaki bu değişimler ışık hızını etkiler ve böylece optik kanalın fazının kendi kendine modülasyonuna sebep olur. Sinyal taşıyan ışığın güç yoğunluğu artıkça veya azaldıkça, frekans kaymaları oluşur ve neticesinde optik kanalın band genişliği yayılır. Kendi kendine faz modülasyonundan kaynaklanan spektral genişleme, birçok uzun mesafeli optik haberleşme sistemlerinin bit hızını

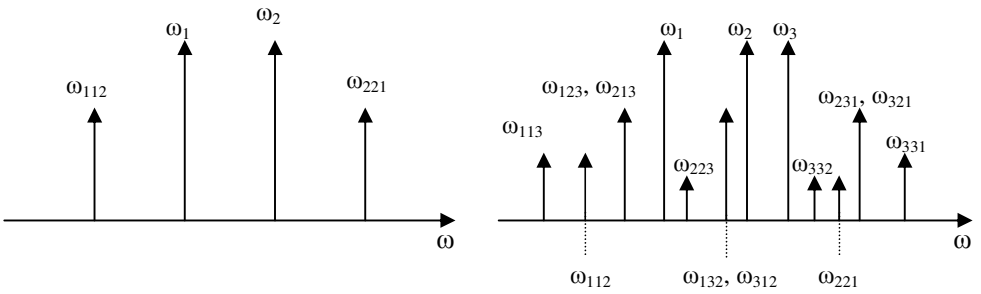
sınırlayan dispersiyon benzeri bir etki gösterir. Yüksek tepe gücüne sahip 1ps'den küçük çok kısa (ultrashort) optik darbeler için, kendi kendine faz modülasyonunun etkisi oldukça şiddetlidir. Kendi kendine faz modülasyonu, solitonlar olarak isimlendirilen optik darbeleri dengede tutmak için bir fırsat olarak değerlendirilebilir. Soliton iletimde bir optik darbe, zayıflama haricinde orjinal darbe biçimi bozulmadan fiber üzerinde oldukça uzun bir yol alabilir [13].

2.4.2. Çapraz faz modülasyonu

WDM kanalları taşıyan sistemler kendi kendine faz modülasyonunda olduğu gibi çapraz faz modülasyon etkisine de maruz kalırlar. Bu durumda bir optik kanalın ışık yoğunluğundaki değişimler, diğer optik kanalları etkileyen kırılma indisindeki değişimlere neden olur. Bu değişimler, o kanalın kendi kendine faz modülasyonu oluşturmasına ilaveten, diğer optik kanallar üzerindeki ışığın fazını modüle eder. Çapraz faz modülasyonunu şiddeti kanal sayısı ile artar ve kanallar arası boşluk azaldıkça şiddetlenir.

2.4.3. Dört-dalga karıştırma

SPM ve XPM' ye benzer şekilde, dört dalga karıştırma (FWM) yine silisyumun kırılma indisinin, ışık yoğunluğuna bağımlılığının doğal sonucu olarak ortaya çıkar. Fakat WDM sistemin performasına olan etkisi tamamıyla farklıdır. Karıştırma, iki veya daha fazla dalganın frekanslarının toplamından ya da farkından farklı bir frekansta, dalgaboyu üretimi olayına dayanır. Bir WDM sistemde farklı frekanstaki iki kanalın karışımı, kanallardan birinin fazını modüle eden yeni bir kanalın yan band olarak üretimine sebep olur. Şekil 2.6'da, 2 ve 3 kanallı bir sistemde FWM ile ortaya çıkan karışım görülmektedir.



Şekil 2.6. Dört dalga karıştırmanın spektrumları, soldaki 2 kanal, sağdaki 3 kanal.

Şekil 2.6'da, 2 ya da 3 kanal arasındaki etkileşimden yeni kanalların nasıl ortaya çıktığı gösterilmektedir. Üretilen kanalın frekansı şu ilişki ile tanımlanır.

$$\omega_{i,j,k} = \omega_i + \omega_j - \omega_k \tag{2.5}$$

Üç kanaldan ikisinin aynı frekansa sahip olduğu varsayılırsa, bu karışım Şekil 2.6' nın solundaki gibi iki farklı frekansta yeni kanallar üretir. Bunlar $\omega_i = \omega_j = \omega_1$ için ω_{112} ve $\omega_i = \omega_j = \omega_2$ için ω_{221} frekanslarıdır. Şekil 2.6 sağdaki gibi üç farklı kanal için, karışımdan 9 yeni frekansta kanallar üretir. N kanallı WDM sistem için FWM ile ortaya çıkan kanal sayısı şu eşitlik ile belirlenir [14].

$$M = \frac{1}{2}(N^3 - N^2) \tag{2.6}$$

Normal olarak, aynı fiber üzerinde ilerleyen WDM optik kanallar birbirleri üzerinde oldukça zayıf etkileşim gösterirler. Ancak, bu zayıf etkileşim uzun fiber iletimi üzerinde önemli hale gelebilir. Üç dalganın etkileşimi ile dördüncü dalganın ortaya çıktığı dört dalga karışımı, en önemli olanıdır. Dörtdalga karıştırma, 1550nm civarında optik kanalların frekanslarını karıştıran en güçlü doğrusal olmayan etkidir.

Kanalların eşit aralıklarla yerleştirildiği bir WDM sistemde, FWM ile ortaya çıkan yeni kanalların çoğu mevcut kanalların frekansları üzerine düşer. Örneğin 100Ghz

kanal aralıklı bir WDM sistemde FWM ile ortaya çıkan ω_{123} frekansındaki kanal $\omega_1+(\omega_1+100)-(\omega_1+200)=\omega_1-100$ frekansına düşer. Bu frekans aynı zamanda ω_1 frekanslı kanalın bitişiğindeki bir önceki kanalın frekansıdır. Mevcut kanalın üzerine FWM kanalın bindiği bu durum, yanses olarak isimlendirilir. İletim bandının merkezine yakın olan kanallar, uç kanallara göre yansesten çok daha fazla etkilenirler. Çünkü merkeze yakın frekanslarda ortaya çıkan FWM kanalları daha şiddetlidir. FWM'nin etkisi, kanal aralığına ve fiber dispersiyonuna bağlıdır. Kanal aralığı ya da fiber dispersiyonu artırılarak FWM karıştırma etkisi azaltılabilir.

Dispersiyon, maksimum iletim mesafesini ve bit hızını sınırlamaktadır. Dispersiyon, faz uyum şartını bozucu yönde etkilediği için FWM ve XPM'nin etkisi dispersiyon ile azaltılabilir. İyi bir sistem performansı yakalayabilmek için iletim fiberlerinin kromatik dispersiyonu ve doğrusal olmayan etkileri birlikte hesaba katılmalıdır [13]. Bu ikilem için dispersiyonun yönetimi etkili bir tekniktir.

2.4.4 Uyarılmış saçılmalar

Optik fiberin doğrusal olmayan davranışa sebep olan ikinci mekanizma saçılmadır. Bu konuda iki önemli saçılmadan söz edilebilir. Bunlar uyarılmış Raman saçılması (SRS) ve uyarılmış Brillouin (SBS) saçılmalarıdır.

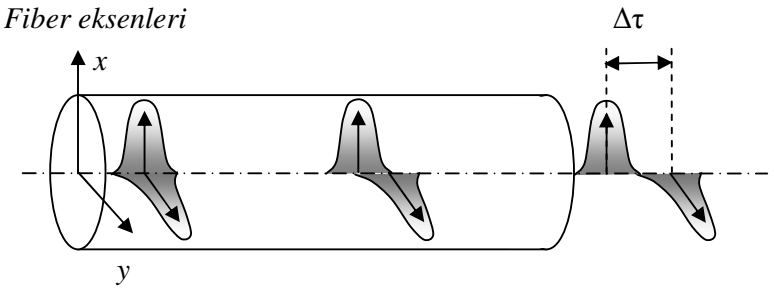
Işık optik fiber içinde ilerlerken, ışık dalgası ile optiksel titreşim modları arasında bir etkileşim meydana gelir. Bu etkileşim, uyarılmış Raman saçılması olarak bilinen bir saçılma etkisini ortaya çıkarır. Bu saçılma, fiber boyunca rastgele doğrultularda enerjinin düzensiz dağılımına sebep olur. SRS, düşük dalgaboylarının daha yüksek dalgaboylarının genliğini pompalaması anlamına gelir ki bu da daha yüksek dalga boylarında düşük dalgaboyundaki sinyallerin bastırılması ile sonuçlanır. Kanal sayısı çok yüksek olmayan WDM sistemlerde SRS etkisi çok şiddetli değildir. SRS'nin etkisini azaltmak için fiber içine gelen ışığın gücü düşürebilir. SRS etkisiyle enerjinin saçılması ile üretilen düşük dalgaboylu dalga, Stokes dalga olarak isimlendirilir. Bu dalga yüksek dalgaboylarını şiddetlendirmek için

değerlendirilebilir. Böyle bir dalga formu kullanılarak elde edilen kazanç, Raman yükseltecinin temelini oluşturur. Raman yükseltecinin çalışma aralığı, C ve L bandlarında çalışan WDM şebekelerde uygulanmak üzere genişletilebilir.

Uyarılmış Brillouin saçılması, fotonların fiber malzemesindeki akustik titreşimsel modlar ile etkileşiminin bir sonucudur. SBS aslında, ısıl olarak uyarılmış akustik dalgalar ile etkileşim içeren Raman saçılmasının özel bir durumudur. Bu saçılma, bir optik fibere aktarılacak optik gücün tepe seviyesini sınırlar. Optik güç, SBS eşik seviyesini geçtiği zaman iletilen ışığın önemli bir kısmı aksi istikamette saçılma yapar. Alıcıda gerekli olan optik gücü yakalamadaki zorluğa ilave olarak, bit hata performansını (BER) azaltan gürültü ve geri yansıyan optik sinyalden dolayı probleme neden olur.

2.5 Polarizasyon Mod Dispersiyon

Tek modlu fiberlerde, temel modda iletilen sinyal birbirine dik polarize olmuş iki bileşene sahiptir. İdeal silindirik bir fiberde, bu iki bileşen birbirinden ayrılmaz ve silindirik simetriden dolayı, aynı yayılma sabiti ile yayılırlar. Fakat gerçekte, optik fiberler mükemmel bir silindirik yapı gösteremezler. Sonuç olarak, bu bileşenler farklı hızlarda yol alırlar ve bu nedenle fiber çıkışına Şekil 2.7'de görüldüğü gibi farklı zamanlarda ulaşırlar. Bu olgu, polarizayon mod dispersiyon (PMD) olarak isimlendirilir.



Şekil 2.7. PMD etkisiyle meydan gelen zaman kayması

PMD esas olarak, fiberoptik kablonun asimetrik olmasından kaynaklanır. Asimetri basitçe, fiber çekirdeğinin kesitindeki çember yapının çok az da olsa değişmesi ya da oval gibi şekillenmesi olarak algılanabilir. Bu durum, fiberin imalat aşamasında oluşabileceği gibi, uygulama esnasında kablonun mekanik baskı görmesinden de kaynaklanabilir. Mekanik baskı kaynakları ortam şartlarına bağlıdır. Sıcaklık değişimlerinin, optik haberleşmeyi etkilemediği görüşü her ne kadar yaygın bir kabul görse de, günlük veya mevsimsel sıcaklık farklılıkları, toprak altı ya da kanal içindeki optik fiberin mekanik baskı görmesine neden olur. Ayrıca, kablo-yol maliyetlerinin uygunluğu açısından düşünülerek, demiryolu ya da karayolu kenarı izletilerek döşenmiş fiber kablolara, yoldan gelen titreşimler ile rüzgarın sebep olduğu salınımlar da önemli birer mekanik baskı kaynaklarıdır.

Optik fiberlerde PMD için, dik polarize iki bileşenin yayılma sabitleri ile iki dikey eksenin kırılma indisleri ilişkilendirilebilir.

$$\beta_0 - \beta_e = \frac{\omega n_0}{c} - \frac{\omega n_e}{c} = \frac{\omega \Delta_{neff}}{c} \tag{2.7}$$

Bu eşitlikte n_o ve n_e iki dikey eksenin etkin kırılma indisleri ve Δn_{eff} ise diferansiyel kırılma indisidir. Diferansiyel kırılma indisi fiberdeki çift kırılmanın bir ölçüsüdür ve bu değer 10^{-5} ile 10^{-7} aralığındadır.

Fiber boyunca düzensizliklerin rastgele değişiminden dolayı, PMD verilen bir fiber uzunluğu için sabit olmadığından, ortalama diferansiyel grup gecikmesi (DGD) terimi içinde tanımlanır. Diferansiyel grup gecikmesi $\Delta\tau$, diferansiyel kırılma indisi Δn_{eff} ile şu şekilde ilişkilendirilir.

$$\Delta\tau = \frac{\Delta n_{eff}}{c} + \frac{\omega}{c}\frac{d\Delta n_{eff}}{d\omega} \tag{2.8}$$

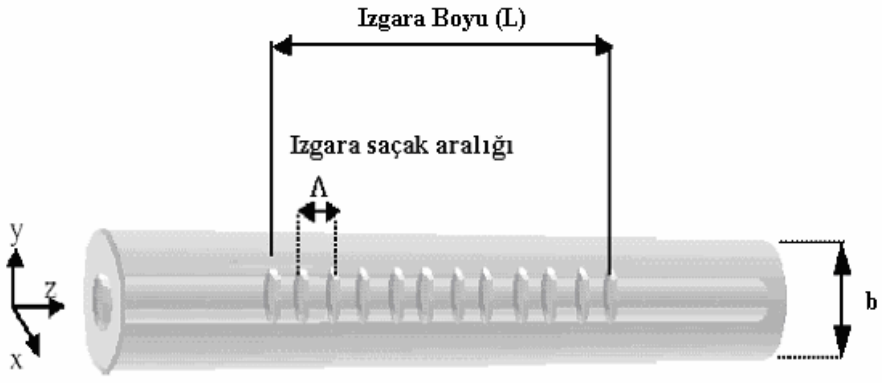
Fiber uzunluğu (L) arttıkça diferansiyel grup gecikmesi de artar. Bu ilişki basitçe aşağıdaki eşitlikle tanımlanabilir.

$$\Delta\tau = D_p\sqrt{L} \tag{2.9}$$

Burada D_p, PMD parametresidir ve $ps/\sqrt{km}$ birimi ile ölçülür. Çoğu fiber türü için D_p, 1ps/km$^{1/2}$ 'den küçüktür. PMD kaynaklı darbe genişlemesi, kromatik dispersiyon ile karşılaştırıldığında oldukça küçük kalır. Fakat PMD, sıfır dispersiyon dalga boyunda çalışan ve uzun mesafeli iletişim için tasarlanan fiber optik haberleşme sistemlerinde etkin bir sınırlayıcı faktör olabilir.

3. FİBER IZGARALARI

Fiber ızgaraları optik iletişim ve optik algılama alanlarında oldukça önemli elemanlardır. Tipik olarak n_1 indisine sahip ve genellikle çekirdek olarak isimlendirilen dielektrik silindir, n_2 indisine sahip yoğunlaştırılmış dielektrik silindir ile kuşatılmıştır. İki indis arasında $n_1 > n_2$ bağıntısı mevcuttur. Böyle bir düzenlemede, indisi n_2 olan bölgede elektrik alan üstel olarak azaldığı için, ikinci bölgenin dışında alan bulunmaz. Genel anlamda bir fiber ızgarası, özel dar bir dalgaboyu aralığında (Bragg dalga boyu civarında) yüksek yansıtıcılık sağlamak için, tek modlu bir optik fiber çekirdeği içinde kırılma indisinin periyodik modülasyonunu içerir. En basit yapı, indis modülasyonu tekdüze (uniform) olan ızgaralardır ve bu tip bir fiber ızgarasının genel görünüşü Şekil 3.1'de görülmektedir. Bu şekilde ızgara saçak aralığı, görünürlüğü kolaylaştırmak amacıyla ızgara boyuna nispeten bilerek abartılı çizilmiştir.



Şekil 3.1. Tekdüze bir fiber ızgarasının genel yapısı

Fiber ızgaraları bugün pek çok alanda kullanılmaktadır. Optik yükselticilerin kazanç spektrumlarının düzeltilmesi [15], WDM şebekelerde kanalların ayrıştırılması [16], dispersiyon kompansatörleri [17,18] ve optik algılayıcılar [19,20] fiber ızgara teknolojilerinin önemli uygulama alanlarıdır. Fiber ızgaraları, düşük yerleştirme kaybı, çok düşük polarizasyon hassasiyeti ve oldukça esnek tasarım gibi avantajlara

sahiptir. Bu avantajlardan dolayı optik fiber ızgaraları, kompleks filtreleme veya tam kromatik dispersiyon kompanzasyon uygulamaları için oldukça elverişlidir.

3.1. Izgara İndis Profili

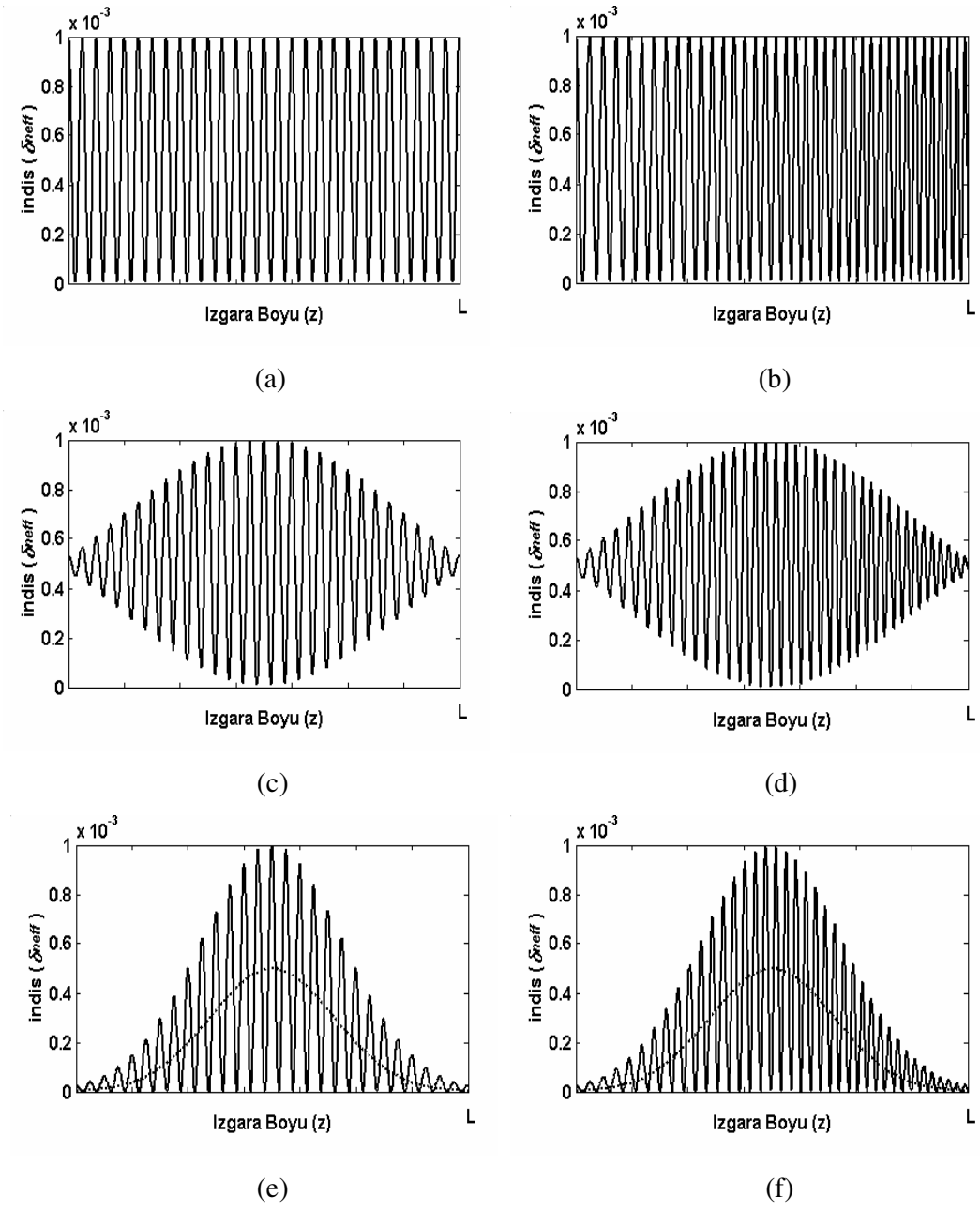
Izgara profili, optik fiber çekirdeğinin ultraviole ışınla işlenmesi sonucu ortaya çıkan indis modülasyonunun, fiber boyunca değişimine bağlı fonksiyonunun tanımıdır. En basit ızgara profili, çekirdek indisinin periyodik değişim gösterdiği sinüs biçimli profillerdir. Sabit genlikli sinüs biçimli profile sahip bir fiber ızgarası, tekdüze ya da düzenli ızgara olarak isimlendirilirler. Modülasyon genliğinin ızgara boyunca değiştirilmesi işlemine apodizasyon denir ve bu işlemden geçen bir fiber ızgarası apodize edilmiş ızgara olarak ifade edilir. Ayrıca, çekirdek indisinin periyodik olmayan değişim göstermesi durumunda cıvıltıdan söz edilir. Cıvıltılı bir fiber ızgarasında, ızgara saçak aralıkları fiber ekseni boyunca giderek daralır veya genişler. Şekil 3.2'de, en sık kullanılan birkaç farklı tip indis profilleri görülmektedir.

Izgara profili, optik fiber ızgaralarının karakteristik özelliklerinde değişim sağlayan önemli parametreleri içerir. Bu parametreler kılavuzlanmış bir modun, ızgara boyunca etkin kırılma indisindeki değişimini tanımlarlar ve bu değişim δn_{eff} ile gösterilir. Fiber çekirdeğinin ızgaralanmasından kaynaklanan etkin kırılma indisindeki değişim, genellikle şu şekilde tanımlanır [21].

$$\delta n_{eff} = \overline{\delta n}_{eff}(z)\left\{1 + v\cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda}z + \phi(z)\right]\right\} \tag{3.1}$$

Burada $\overline{\delta n}_{eff}$, bir ızgara periyodu üzerinde ortalaması alınmış Dc indis değişimidir. Örneğin Şekil 3.2 (e) ve (f)'deki grafiklerde, ızgara profilindeki kesikli çizgiler etkin kırılma indisinin ortalama Dc değişimine karşılık gelmektedir. v parametresi, indis değişiminin saçak görünürlüğünü kontrol eder. Λ, ızgara adımı ya da başka bir ifadeyle ızgara periyodudur ve $\phi(z)$ bu periyoda etki eden ızgara cıvıltısını tanımlar.

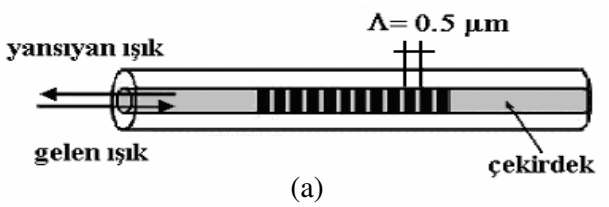
Bir fiber ızgaranın optik özellikleri, z ekseni boyunca oluşturulan δ_{neff} indis değişimi ile yakından ilişkilidir ve Şekil 3.2 bu değişime ilişkin farklı tür profilleri göstermektedir.



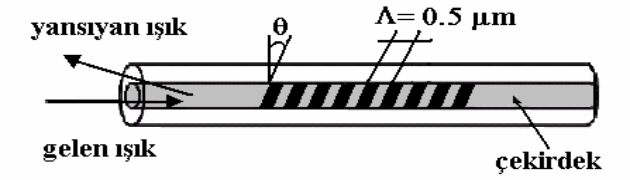
Şekil 3.2. Farklı tür ızgara profilleri. (a) tekdüze, (b) tekdüze cıvıltılı, (c)genişletilmiş sinc, d) genişletilmiş sinc cıvıltılı, e) Gaussian, f) Gaussian cıvıltılı.

3.2. Fiber Izgaralarının Temel Çalışma Prensibi

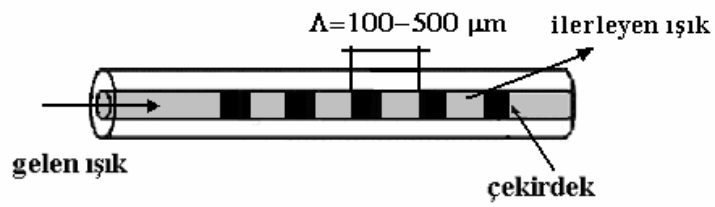
Fiber ızgaralarının çalışması temelde, Şekil 3.3'de görüldüğü gibi fiber boyunca ilerleyen ışığın ızgara saçaklarından yansıması ve elektromanyetik alan modlarının (TE ve TM modları) birbirleri arasında bağlaşım oluşturması esasına dayanır. Fiber Bragg ızgaralarında bu bağlaşım, aynı modun ileri ve geri yönde yayınan alanları arasında oluşur. Fiber iletim ızgaralarında ise iletim yönünde ilerleyen iki farklı mod arasında bağlaşım oluşur. Bir fiberoptik kılavuzda oluşan bağlaşıma göre fiber ızgaraları iki sınıfa ayrılabilir. Bunlar kısa periyotlu (~0,5μm) ve uzun periyotlu ızgaralardır (100~500μm). Faz uyumu yeterli olduğu takdirde, kısa periyotlu ızgaralar, birlikte yayılan ileri ve geri yönde kılavuzlanmış modlar arasında bir bağlaşım üretirler. İkinci sınıf ızgaralar ise, ileri yönde kılavuzlanmış mod ile geri yönde kılıflanmış mod arasında bir bağlaşım kurarlar.



(a)



(b)



(c)

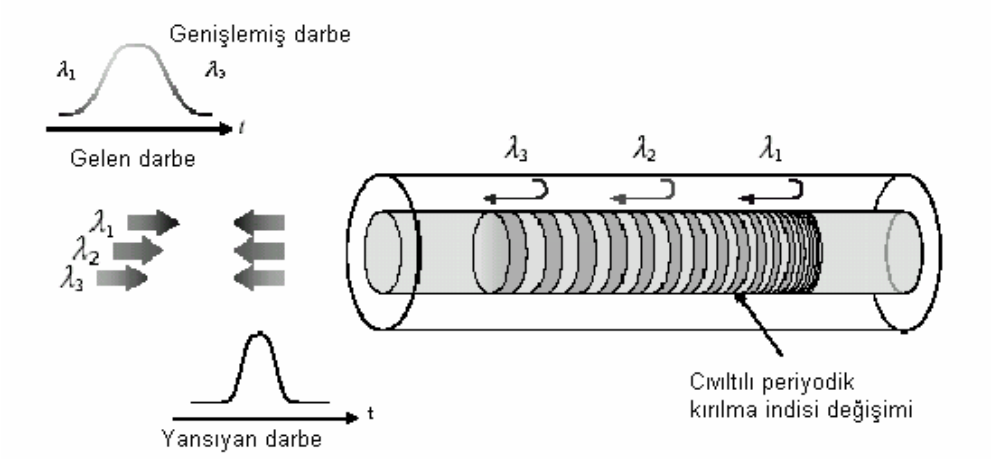
Şekil 3.3. Fiberoptik kılavuzda oluşan bağlaşıma göre fiber ızgaraları (a) Düzgün kısa periyotlu bir ızgara, (b) yatık kısa periyotlu bir ızgara, (c) uzun periyotlu bir ızgara.

3.3. Fiber Bragg Izgaraları ve Dispersiyon Kompanzasyonu

Bir fiber ızgarası, ızgaranın yapısına bağlı olarak yansıma yada iletim modunda tasarlanabilir. Kısa periyodlu yansıma modunda çalışan fiber ızgaralarına fiber Bragg ızgarası (FBG) adı verilir. Fiber Bragg ızgaraları girişine gelen ışığı, her bir ızgara saçağından bir miktar yansıtarak ızgara girişinde toplamsal bir yansıtıcılık oluşturur. Bu yansıtıcılık Bragg dalga boyunda (λ_B) maksimuma ulaşır.

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{3.2}$$

Fiber Bragg ızgaraları λ_B dalgaboyunda bir optik yansıtıcı filtre gibi davranır. Aynı zamanda optik darbeyi ızgara boyunca zaman gecikmesine uğratır ve bu da iletim hattının dispersif karakteristiğini değiştirir. Cıvıltılı fiber Bragg ızgarası ile yansıma modunda çalışan dispersiyon kompanzatörü, ilk defa Qulette tarafından önerilmiş ve deneysel olarak ispatlanmıştır [22]. Optik ışık darbesinin spekturumunda, önemli kontrol imkanı sağlayan optik ızgaralama yöntemi, hem dar band hem de geniş band dispersiyon kompanzasyonu için etkili bir tekniktir [23-25]. Şekil 3.4'de, cıvıltılı bir fiber ızgarası kullanarak optik darbedeki kromatik genişlemenin telafi edilebileceği gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Cıvıltılı fiber Bragg ızgara kompansatörü

Cıvıltılı fiber Bragg ızgaraları (CFBG), indis modülasyon periyodu (ızgara periyodu) ızgara uzunluğu boyunca gittikçe azalan ızgaralardır. Izgara yüzeyi uzunluk boyunca değiştiği için, fiber boyunca ilerleyen farklı gecikmelere sahip farklı dalgaboyları, farklı grup gecikmelerine maruz kalacaktır.

Fiber Bragg ızgaraları uyumluluk, düşük maliyet ve polarizasyona karşı duyarsızlık gibi önemli avantajları sunan çok yönlü teknolojilerdir. Bununla beraber belki en büyük avantajı onun, fibere düşük kayıpla hatta neredeyse kayıpsız bir şekilde dahil edilebilmesidir. Yansıtıcı tip ızgaralarda, bastırılmış ve kompanze edilmiş yansıyan dalgaların tümü, eş zamanda ızgara girişine geri döner. Izgara girişine yerleştirilen optik dolaştırıcılar, kompanze edilmiş sinyali toplar. Dispersiyon kompanzasyonu, genellikle bir optik haberleşme sisteminde WDM kanalların tümümü kapsayacak şekilde sağlanmalıdır. Cıvıltılı fiber Bragg ızgaralarının spektral band genişlikleri, ızgara boyu artırılarak [26] veya yapısal olarak çok kanallı ızgara tasarlanarak genişletilebilir [27,28]. Çok kanallı ızgara tabanlı kompansatörler, optik fiber üzerine belirli aralıklarla çok sayıda cıvıltılı ızgara işlenerek oluşturulurlar. Bölüm 5, 6 ve 7'de tek kanallı ve çok kanallı optik haberleşme sistemleri için CFBG'lerin tasarımı ve dispersiyon kompanzasyon uygulamaları detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

4 FİBER BRAGG IZGARALARININ MODELLENMESİ

Fiber ızgaralarının optik haberleşmedeki en ilgi çekici özelliği, istenilen spektral karakteristiği elde etmedeki esnekliğidir. İstenilen spektral karakteristiği elde etmek için, ızgaradaki indis değişimi, ızgara boyu, apodizasyon profili, periyot cıvıltısı, saçak büküntüsü, karşılıklı yayınım veya birlikte yayınım bağlaştırmaya yönelik ızgaralama gibi pek çok fiziksel parametreler değiştirilebilir. Bu parametrelerin uygun seçimi ile oldukça keskin spektral özelliklerde ızgara tasarımı yapmak mümkündür. Bu bölümde, fiber ızgaralarının tasarımına temel olacak optik karakteristikler belirlenmeye çalışılmıştır.

Kısa ızgara periyoduna sahip fiber Bragg ızgaralarında, optik fiber boyunca kılavuzlanan ışık her bir ızgara düzleminden saçılır. Bragg koşulu sağlanırsa, her ızgara düzleminden yansıyan ışık katkıları, geri yöndeki yansımalara eklenir ve ızgara periyodu tarafından tanımlanan dalgaboyu merkezinde bir geri yansımış tepe oluştururlar. Yansıtıcılığı, dalgaboyunun bir fonksiyonu olarak ifade etmek için farklı yaklaşımlarla çok sayıda teorik çalışma yapılmıştır [29-35]. Bu çalışmaların ortak bir sonucu olarak, bir fiber ızgarasının optik özelliklerinin öncelikle, z ekseni boyunca oluşturulan δ_{neff} indis değişimi tarafından belirlendiğini söylemek mümkündür. Verilen bir indis profiline karşılık, ızgaranın spektral cevabını teorik olarak belirleyebilmek için analitik veya nümerik olmak üzere iki farklı yol takip edilebilir. Her iki yolun temelinde de "bağlaşımlı kip teorisi (coupled mode theory)" olarak bilinen bir teori kullanılır.

Bağlaşımlı kip teorisi ile türetilen analitik yöntemlerde, FBG'nin ileri ve geri yönde hareket eden ve genlikleri optik eksene bağlı alarak değişen modlar arasında, karşılıklı güç bağlaşımını oluşturduğu varsayılır. Mod genliklerinde ani değişim olmadığı ve böylece genliklerin mesafeye göre ikinci türevi alındığında, sabit katsayılı birinci dereceden diferansiyel denklemler elde edilebileceğini kabul edilir. Izgara periyodik olduğu zaman dalgaboyunun bir fonksiyonu olan yansıtıcılık için bir kapalı form çözüm elde edilir. Fakat ızgara periyodu çok az değiştiği zaman,

analitik olarak çözüm üretmek oldukça güçtür. Karmaşık diferansiyel eşitlikleri nümerik olarak çözmek için Runge-Kutta yöntemi [36] kullanılarak yarı nümerik çözümler geliştirilebilir.

"Matris Transfer Metodu" FBG' nin yansıma spekturumu için oldukça doğru sonuç üreten nümerik bir yöntemdir [37,38]. Bu yöntemde FBG, n ve Δn kırılma indislerine sahip değişen katmanlı bir ortam olarak benzetim yapılır ve zayıf kılavuzlama yaklaşımı kabul edilir. Yani kılıf ve çekirdek arasındaki indis farkı ihmal edilebilir ki buna bazen *skalar dalga yaklaşımı* da denir. Bu yaklaşımda, modlar iletim yönüne dik yani eninedir.

4.1. Bağlaşımlı Kip Teorisi

Fiber ızgarasının spektral ilişkisi ve ilgili ızgara yapısı arasındaki bağıntıyı, analitik olarak ele alan bağlaşımlı kip teorisi [39-42] doğrudan sonuca ulaştığı ve çoğu fiber ızgarasının optik özelliklerini gerçekçi biçimde modellediği için oldukça yaygın kullanılmaktadır. Bu çalışmada fiberin kayıpsız olduğu varsayılacak ve ilgili dalgaboyu aralığında tek modlu olduğu kabul edilecektir. Bir başka deyişle sadece bir ileri ve bir de geri yayılan mod dikkate alınacaktır. Ayrıca, fiberin zayıf kılavuzlanmış olduğunu kabul edilecektir. Bu da kılıf ve çekirdeğin kırılma indisleri arasında çok küçük bir fark olduğu anlamına gelmektedir. Böylece elektrik ve manyetik alanlar fiber eksenine yaklaşık dik olur ki bu durumda, fiber yapısından kaynaklanan polorizasyon etkileri ihmal edilebilir.

Fiber ekseni z doğrultusunda yönlendirildiğini ve E alanın x yönünde polarize olduğu düşünülsün. Dalganın zamana göre değişimi $e^{-j\omega t}$ ile ifade edilir ve yayılım sabiti $\beta > 0$ ile frekansı $\omega > 0$ olan ileri yönde yayılan bir dalga $e^{[i(\beta z - \omega t]}$ formuyla tanımlanır.

Kırılma indisinin ızgaralanması olayı, fiber üzerinde bir bozulma gibi düşünülebilir. Bozulmamış fiberin kırılma indis profili $\bar{n}(x, y)$'dir ve bozulmuş fiberin z boyunca değişen indis değişimi $n(x, y, z)$'dir.

Her iki fiber de zayıf kılavuzlandığı için $\bar{n} \cong n \cong n_{eff} \cong n_{cl}$' dir. Burada n_{cl} kılıf indisidir ve n_{eff} ise etkin indistir. Toplam elektrik alanı E, ileri ve geri yayılan modların süperpoziyonu olarak yazabilir.

$$E_x(x, y, z) = b_1(z)\Psi(x, y) + b_{-1}\Psi(x, y) \tag{4.1}$$

Burada $b_{\pm 1}$, ileri ve geri yayılan modları temsil eder. $b_{\pm 1}$'in frekansa bağımlı olduğu kolayca söylenebilir. Çünkü bu katsayılar harmonik yayılım sabiti $\exp^{\pm i\beta z}$ içerirler. Yayılma sabiti β, aşağıdaki eşitliklerle ifade edilebilir:

$$\beta = \beta(\omega) = n_{eff}\,\omega / c = n_{eff}\,k \tag{4.2}$$

Burada, $k = \omega / c$ boşluk dalga sayısı, c ışık hızı ve ω ise optik frekanstır. Enine (iletim yönüne dik) bir dalgadaki ilişki, bozulmamış fiber için aşağıdaki verilen dalga eşitliğini karşılayan Ψ fonksiyonu ile tanımlanır:

$$\left\{\nabla_t^2 + k^2\bar{n}^2(x, y) - \beta^2\right\}\Psi = 0 \tag{4.3}$$

Burada, $\nabla_t^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$ olarak bilinen ikinci dereceden kısmi türev operatörüdür. Toplam elektrik alan E_x ızgaralanmış (bozulmuş) fiber için dalga denklemini sağlamalıdır.

$$\left\{\nabla_t^2 + k^2 n^2(x, y, z) + \partial^2 / \partial z^2\right\}E_x = 0 \tag{4.4}$$

Eş. 4.1' i, Eş. 4.4'te yerine yazarak ve Eş. 4.3'ü kullanarak aşağıdaki eşitlik elde edilebilir.

$$\frac{d^2}{dz^2}(b_1 + b_{-1})\Psi + \left[\beta^2 + k^2(n^2 - \bar{n}^2\right](b_1 + b_{-1})\Psi = 0 \tag{4.5}$$

Bu eşitliği Ψ^* ile çarparak ve x-y düzleminde integralini alarak Eş. 4.6 üretebilir.

$$\frac{d^2 b_1}{dz^2} + \frac{d^2 b_{-1}}{dz^2} + (\beta^2 + 2kn_{co}D_{11}(z))(b_1 + b_{-1}) = 0 \tag{4.6}$$

Burada D_{11} katsayısı aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$D_{11}(z) = \frac{\frac{k}{2n_{co}}\int (n^2 - \bar{n}^2)\Psi^2 dA}{\int \Psi^2 dA} \tag{4.7}$$

Kırılma indisi $n_{co} \approx n_{eff}$, fiber çekirdeğinin indisi için yaklaşık bir değerdir ve integral bütünüyle x-y düzlemindedir. Eş. 4.6 birinci dereceden iki diferansiyel denklem oluşturacak şekilde ikiye ayrılabilir.

$$\begin{aligned} \frac{db_1}{dz} - i(\beta + D_{11})b_1 &= iD_{11}b_{-1} \\ \frac{db_{-1}}{dz} + i(\beta + D_{11})b_{-1} &= -iD_{11}b_1 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Verilen bu iki eşitliğin türevi alınarak ve toplanarak doğruluğu gözlenebilir. İkiye ayırma yöntemi ile Eş. 4.1'de verilen toplam elektrik alan, ileri ve geri yayılan bileşenlere ayrılmış olur. Ayrıca $n = \bar{n}$ olduğunda Eş. 4.8'in çözümü, $b_{\pm 1}(z) = B_{\pm}(z)\exp(\pm i\beta z)$ 'ye indirgenir. Izgaralamanın olmadığı bölgede $n = \bar{n}$' dir

ve modlar birbirini etkilemeden yayılır. Diğer bölgelerde ise modlar, $D_{11}(z)$ kadar birbirleri arasında bağlaşım kurarlar.

Fiber ızgarasında indis bozulmasın z'ye bağımlılığı yaklaşık sinüs biçimindedir ve aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$n^2 - \bar{n}^2 = \Delta\varepsilon_{r,ac}(z)\cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z + \phi(z)\right) + \Delta\varepsilon_{r,dc}(z) \tag{4.9}$$

Burada Λ, tasarım öncesi belirlenmiş ızgara periyodudur ve $\phi(z)$ ızgara fazıdır. $\Delta\varepsilon_{r,ac}(z)$ ve $\Delta\varepsilon_{r,dc}(z)$ gerçel ve yavaş değişen fonksiyonlardır ve aşağıdaki eşitliği sağlarlar.

$$\left|\Delta\varepsilon_{r,ac}(z)\right| << n^2{}_{co} \qquad \left|\varepsilon_{r,dc}(z)\right| << n_{co}^2 \tag{4.10}$$

D_{11} genellikle yarı-sinusoidal fonksiyon olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$D_{11}(z) = \kappa(z)\exp(i\frac{2\pi}{\Lambda}z) + \kappa^*(z)\exp(-i\frac{2\pi}{\Lambda}z) + \sigma(z) \tag{4.11}$$

Burada $\kappa(z)$ kompleks, z' nin yavaş değişen fonksiyonudur. $\sigma(z)$ gerçel ve yine z' nin yavaş değişen bir fonksiyonu olup $\varepsilon_{r,dc}$' den kaynaklanan Dc indis değişimlerine karşılık gelir. Eş. 4.6'yı basitleştirmek için yeni *U* ve *V* alan genlikleri tanımlanabilir.

$$\begin{aligned} b_1(z) &= U(z)\exp(+i\frac{\pi}{\Lambda}z)\exp(+i\int_0^z \sigma(z')dz') \\ b_{-1}(z) &= V(z)\exp(-i\frac{\pi}{\Lambda}z)\exp(-i\int_0^z \sigma(z')dz') \end{aligned} \tag{4.12}$$

Eş. 4.11 ve 4.12'yi, Eş. 4.10'da yerine koyarak hızlı salınan terimleri ihmal edilebilir. Çünkü bunlar genliklerin artmasını ya da azalmasını çok az etkiler. Sonuç olarak tek modlu fiberler için bağlaşımlı kip denklem sistemi aşağıdaki gibi elde edilir [21]:

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dz} &= +i\hat{\sigma}U(z) + qV(z) \\ \frac{dV}{dz} &= -i\hat{\sigma}V(z) + q^{*}U(z) \end{aligned} \tag{4.13}$$

Burada, U ve V sırayla ızgara boyunca ilerleyen ve yansıyan alanlardır ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\begin{aligned} U(z) &= u(z)\exp(i\delta(z) - \frac{\phi}{2}) \\ V(z) &= v(z)\exp(-i\delta(z) + \frac{\phi}{2}) \end{aligned} \tag{4.14}$$

$q=q(z)$, ac bağlaşım katsayısı, $\hat{\sigma}$ ise Dc bağlaşım katsayıdır ve tek modlu Bragg yansıma ızgaraları için aşağıdaki eşitlikler geçerlidir [21].

$$q(z) = i\kappa(z)\exp\left(-2i\int_{0}^{z}\sigma(z')dz'\right) \tag{4.15}$$

$$\hat{\sigma} = \delta + \sigma - \frac{1}{2}\frac{d\phi}{dz} \tag{4.16}$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{\lambda}\overline{\delta n}_{eff} \tag{4.17}$$

$$\delta = 2\pi n_{eff}\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_D}\right) \tag{4.18}$$

$$\kappa = \kappa^{*} = \frac{\pi}{\lambda}v\overline{\delta n}_{eff} \tag{4.19}$$

Burada δ, maksimum yansımayı sağlayan ışık dalgaboyunun referans alındığı spektrumda frekans değişim oranıdır ve bozulma ya da frekans sapması olarak da

ifade edilir. λ_D, $\overline{\delta n}_{eff}$ sıfıra yaklaşırken Bragg koşulunun sağlandığı tasarım dalgaboyudur. Özet olarak bir fiber Bragg ızgarası şu parametrelerle karakterize edilir: Bragg dalgaboyu λ_B' nin belirlenmesi, etkin kırılma indisi n_{eff}, Dc indis değişimi $\overline{\delta n}_{eff}$, ızgara fazı $\phi(z)$ ve yavaş değişen kompleks bağlaşım katsayısı *q(z)*. Bağlaşım katsayısının mutlak değeri, ızgara gücünü ya da indis modülasyon genliğini belirler. İleri ve geri yayılan alan zarfları Eş. 4.13'te verilen bağlaşımlı kip denklemleri ile ilişkilendirilir.

4.2. Tekdüze Izgaralar İçin Analitik Çözümler

Eşitlik (4.13) ile verilen bağlaşımlı kip denklemlerini sağlayan herhangi bir çözüm [*U,V*], uygun sınır koşulları uygulanarak çözülebilir. Örneğin $0 \le z \le L$ aralığına yerleştirilmiş bir ızgara için, *U(0)*=1 ve *V(L)*=0 sınır koşulları uygundur. Bu durumda yansıma katsayısı $\rho = V(0)$ ve iletim katsayısı $\xi = U(L)$ olacaktır. Bağlaşımlı kip denklem sisteminin basit kapalı form çözümlerini bulmak için, önce *q(z)=sabit* olan tekdüze (uniform) ızgaraları ele alınabilir.

Tekdüze bir ızgara sınırlı $0 \le z \le L$ aralığında sabit bir bağlaşım katsayısına sahiptir. Burada *L* ızgara uzunluğudur. Bu durumda bağlaşımlı kip denklem sistemini analitik olarak çözmek mümkündür. Eş. 4.13'ün türevi alınarak ve orijinal eşitliklerde türevleri yerine konarak aşağıdaki denklem sistemi kolayca elde edilebilir:

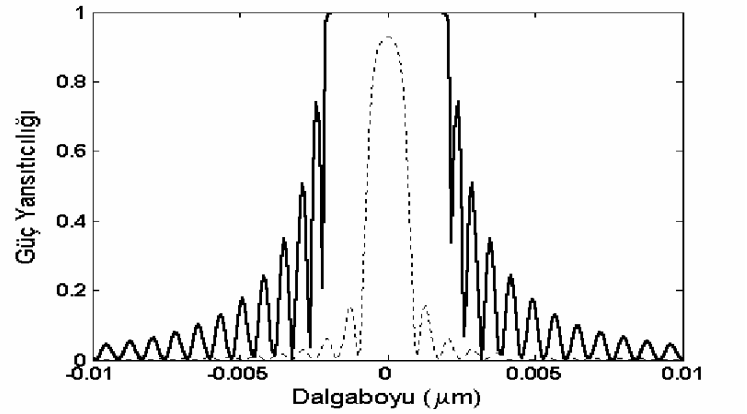
$$\frac{d^2U}{dz^2} = \left(|q|^2 - \hat{\sigma}^2\right) \cdot V$$
$$\frac{d^2V}{dz^2} = \left(|q|^2 - \hat{\sigma}^2\right) \cdot U \qquad (4.20)$$

Bu eşitlikler iki sınır koşulu uygulanarak analitik olarak çözülebilir. Sonuçta yansıma katsayısı ve iletim katsayıları aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\rho = \frac{-q^* \sinh(\gamma L)}{\gamma \cosh(\gamma L) - i\hat{\sigma} \sinh(\gamma L)} \tag{4.21}$$

$$\xi = \frac{\gamma}{\gamma \cosh(\gamma L) - i\hat{\sigma} \sinh(\gamma L)} \tag{4.22}$$

Burada, $\gamma^2 = |q|^2 - \hat{\sigma}^2$ tanımı yapılmıştır. Elde edilen bu iki eşitlik, bütün tekdüze ızgaralar için tipiktir. Şekil 4.1'de, farklı ızgara şiddeti değerleri için bir tekdüze ızgaranın güç yansıtıcılığı ($r = |\rho|^2$) görülmektedir.



Şekil 4.1. Farklı ızgara şiddeti değerleri için tekdüze bir Bragg ızgarasının yansıma spektrumu, *qL=2* (kesikli çizgili), *qL=8* (düz çizgili).

Şekil 4.1'de , *qL=2* ve *qL=8* ile verilen tekdüze bir FBG'nin tipik güç yansıtıcılığı görülmektedir. Izgara şiddeti *qL* çarpımı ile orantılı olarak artmaktadır. Maksimum yansıtıcılığın oluştuğu dalgaboyu aşağıda verilen eşitlikle ilişkilidir:

$$\frac{\lambda}{\lambda_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{\hat{\sigma} L}{\pi N}} \tag{4.23}$$

Burada *N*, toplam ızgara periyot sayıdır ve $N=L/\Lambda$ ile hesaplanabilir. λ_{max} maksimum yansıtıcılığın meydana geldiği dalgaboyudur. Belirlenen bir *qL* değeri için *N* değeri büyüdükçe yansıma band genişliği daralır ve tersi durumda band genişliği genişler. Bir FBG için maksimum yansıtıcılık şu eşitlikle hesaplanır:

$$r_{\max} = \tanh^2(\kappa L) \tag{4.24}$$

Maksimum yansıtıcılık durumunda $\hat{\sigma} = 0$ olacağı Eş. 4.23'ten kolayca görülebilir. Bu ifade Eş. 4.16'da yerine konularak ve Eş. 4.17 kullanılarak, maksimum yansıtıcılığın meydana geldiği dalgaboyu ile tasarım dalgaboyu ilişkisi için aşağıdaki eşitlik elde edilebilir:

$$\lambda_{\max} = \left(1 + \frac{\overline{\delta n}_{eff}}{n_{eff}}\right)\lambda_D \tag{4.25}$$

4.3. Nümerik Çözüm Metotları

Tekdüze olmayan ızgaralar için bağlaşımlı kip denklem sistemindeki bağlaşım katsayıları q ve q^* tekdüze ızgarada olduğu gibi sabit değildir. Yani $q = q(z)$' dir. Buna ilave olarak ızgara fazının değiştiği cıvıltılı FBG' lerde, diğer bağlaşım parametresi $\hat{\sigma}$' nun da z' ye göre değişmesi söz konusudur. Bu durumda bağlaşımlı kip denklem sisteminin çözümü, analitik bir metottan daha çok nümerik bir metot kullanmayı gerektir.

Bu bölümde, bağlaşımlı kip denklem sisteminin çözümü için iki farklı yöntem önerilmiştir. Bunlardan ilki, diferansiyel denklemlerin çözümü için sayısal integral alma yöntemi, diğeri ise matris transfer metodudur.

4.3.1. Sayısal integral alma yöntemi

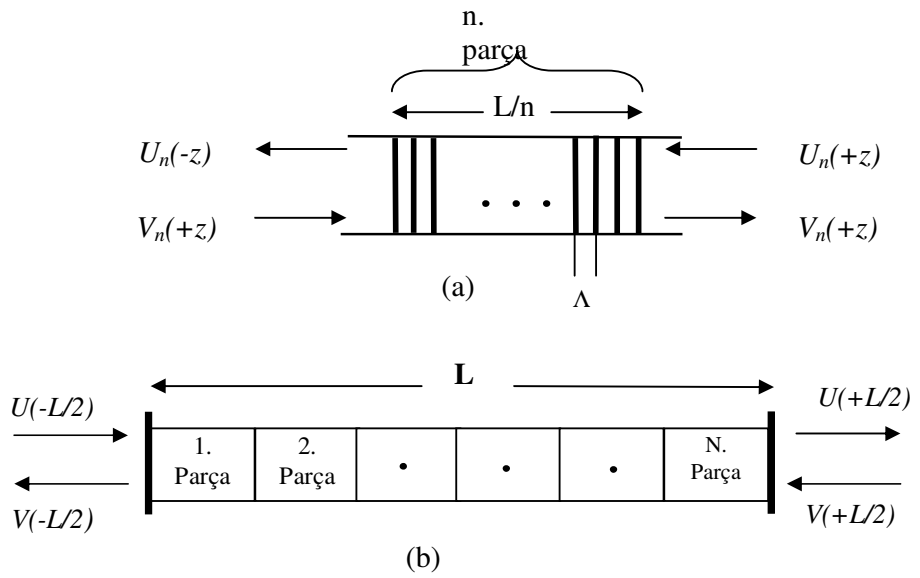
Bir FBG'nin optik karakteristiklerini analiz edebilmek için, bağlaşımlı kip eşitliklerini sağlayan $U(z)$ ve $V(z)$ ile ifade edilen, sırasıyla ilerleyen ve yansıyan dalgaların belirlenmesi gerekir. $0 \le z \le L$ aralığındaki bir optik ızgara için herhangi bir z noktasındaki yansıtıcılık $\rho(z) = V(z)/U(z)$ ile ifade edilebilir. $\rho(z)$' nin z' ye göre türevi Eş. 4.13'te verilen bağlaşımlı kip denklemlerinde yerine konularak aşağıdaki Riccati eşitliği elde edilebilir:

$$\frac{d\rho(z)}{dz} = -2i\hat{\sigma}\rho - q(z)\rho^2 + q^*(z) \tag{4.26}$$

Eş. 4.26'da verilen diferansiyel denklem *y'=f(x,y)* formunda bir diferansiyel denklemdir. Bu eşitliğin çözümü için $\rho(L)=0$ oldukça uygun bir sınır koşuludur. Yani ızgara sonunda yansıma sıfır kabul edilebilir. Çözüme, ızgara sonundan başlanabilir ve adım adım ızgara başlangıcına doğru ilerleyerek ızgara girişindeki $\rho(z)=\rho(0)$ yansıma katsayısı hesaplanabilir. Böyle bir diferansiyel denklemin nümerik olarak çözümü için Runge-Kutta metodu kullanılabilir.

4.3.2. Matris transfer metodu

Bu yöntemde, fiber ızgarası Şekil 4.2' deki gibi $-L/2 \le z \le L/2$ aralığında eşit olarak N parçaya bölünür. Her bir parça için uygun sınır koşulları uygulanarak yansıyan ve ilerleyen (*Ui* ve *Vi*) alanların 2x2 transfer matrisleri elde edilir. Izgaranın toplam transfer matrisi, her parça için kısmi elde edilen transfer matrislerinin çarpımı olarak ifade edilir.



Şekil 4.2. N parçaya ayrılmış fiber ızgarası (a) Herhangi bir parça (b) Tüm ızgara

Şekil 4.2' de N parçaya ayrılmış bir fiber ızgarası görülmektedir. Herhangi bir parça için transfer matrisi Eş. 4.27'de verildiği gibi tanımlanır.

$$F(i)=\begin{bmatrix} Cosh(\gamma_B\Delta z)-i\dfrac{\hat{\sigma}}{\gamma_B}\sinh(\gamma_B\Delta z) & -i\dfrac{\kappa}{\gamma_B}\sinh(\gamma_B\Delta z) \\ i\dfrac{\kappa}{\gamma_B}\sinh(\gamma_B\Delta z) & Cosh(\gamma_B\Delta z)+i\dfrac{\hat{\sigma}}{\gamma_B}\sinh(\gamma_B\Delta z) \end{bmatrix} \tag{4.27}$$

$$\gamma_B=\sqrt{\kappa^2-\hat{\sigma}^2} \tag{4.28}$$

Toplam transfer matrisine her bir parçanın katkısı, sağdan sola doğru transfer katsayıları çarpılarak ilave edilir. Böylece fiber ızgarasının toplam transfer matrisi aşağıda verildiği gibi hesaplanır:

$$F=F_N\cdot F_{N-1}\cdot\ldots\cdot F_2\cdot F_1 \tag{4.29}$$

$$\begin{bmatrix}[U(+L/2)]\\ V(+L/2)\end{bmatrix}=F\begin{bmatrix}[U(-L/2)]\\ V(-L/2)\end{bmatrix} \tag{4.30}$$

Sınır Koşulları: Şekil 4.2'nin sağ kenarında yani ızgara sonunda, hiç yansıma olmayacağı düşünülürse *V(+L/2)=0* olarak hesaplamaya katılabilir. Bu aşamadan sonra, geriye kalan üç sınır alanlarından uygun olan birine 1 vererek, yansıyan ve ilerleyen alanlar normalize genlikler ile ifade edilebilir. Örneğin *U(+L/2)=1* olarak belirlenirse, alanların sırasıyla yansıma ve iletim genlik katsayıları olan ρ *ve* ξ Eş. 4.31'de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\rho=\frac{V(-L/2)}{U(-L/2)} \qquad\qquad \xi=\frac{1}{U(-L/2)} \tag{4.31}$$

Optik güç yoğunlu, alan genliklerin karesiyle orantılı olduğu için optik ızgaranın güç yansıtıcılığı ve iletiçiliği şu şekilde hesaplanabilir:

$$r = |\rho|^2 \qquad t = |\xi|^2 \tag{4.32}$$

Burada ρ ve ξ, sırayla normalize edilmiş yansıma ve iletim genlikleri katsayıları, *r* ve t ise sırasıyla yansıma ve iletim güç katsayılarıdır.

4.4. Grup Zaman Gecikmesi ve Dispersiyon

Yansıma modunda çalışan FBG'ler, dalgaboyu spektrumunda ışığın belirli bir band aralığında yansıtılmasına olanak sağlar. Böyle bir optik filtre aynı zamanda, yansıyan ışığın spektrumunda grup zaman gecikmesi oluşturabilir ve böylece ışığın dispersiyonuna neden olabilir. Bu olayın iyi tarafı şudur ki; bu dispersiyon etkisi, belirli bir çalışma band aralığı için ızgara parametreleri istenilen bir seviyeye ayarlanarak, iletim hattından kaynaklanan dispersiyonu kompanze edilebilir [43-46]. Tek kanallı dar-band optik haberleşme sistemlerden geniş-band WDM optik haberleşme sistemlere kadar uzanan dalgaboyu spektrumunda, optik iletim hattın dispersif etkisini FBG ile dengelemeye çalışmak, optik bir çözüm olması açısından oldukça önemli bir avantajdır.

Izgara içinde yansıyan bir optik darbenin grup zaman gecikmesi τ_ρ , ızgara fazına uygulanan cıvıltıdan kaynaklanır. Bu gecikme, optik ızgaradan yansıyan dalganın faz bilgisi (θ_ρ) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\tau_\rho = \frac{d\theta_\rho}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c}\frac{d\theta_\rho}{d\lambda} \tag{4.33}$$

Fazın, optik frekans ω' ya göre değişimi ile grup zaman gecikmesi belirlenebilir. Grup zaman gecikmesinin, dalgaboyu λ' ya göre değişimi ise dispersiyonu verir ve bu değişim aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$D_\rho = \frac{d\tau_\rho}{d\lambda} = \frac{2\tau_\rho}{\lambda} - \frac{\lambda^2}{2\pi c}\frac{d^2\theta_\rho}{d\lambda^2} \tag{4.34}$$

5. TEK KANAL DİSPERSİYON KOMPANZASYONU İÇİN FBG UYGULAMALARI

Dünya çapında kurulu optik fiber kabloların büyük çoğunluğu, kaydırılmamış tek mod fiberleri kullanmaktadır. Örneğin, 1310nm'de dalgaboyunda sıfır dispersiyonlu fiberler ve 1550nm'de yaklaşık 17ps-nm/km dispersiyonlu fiberler bu sınıfa girmektedirler. Günümüzde, 1550nm dalgaboyu civarındaki iletim penceresi tercih edilmektedir. Çünkü fiber kaybı, bu dalgaboyu civarında minimumdur ve erbiyum katkılı fiber yükselteçleri (EDFA) bu dalga boyu bölgesinde çalışmaktadırlar [47]. Ancak, bu bölgede dispersiyonun yüksek olması hattın performansını önemli derecede sınırlayacağından dolayı, bunun bir şekilde kompanze edilmesi gereği ortaya çıkmaktadır.

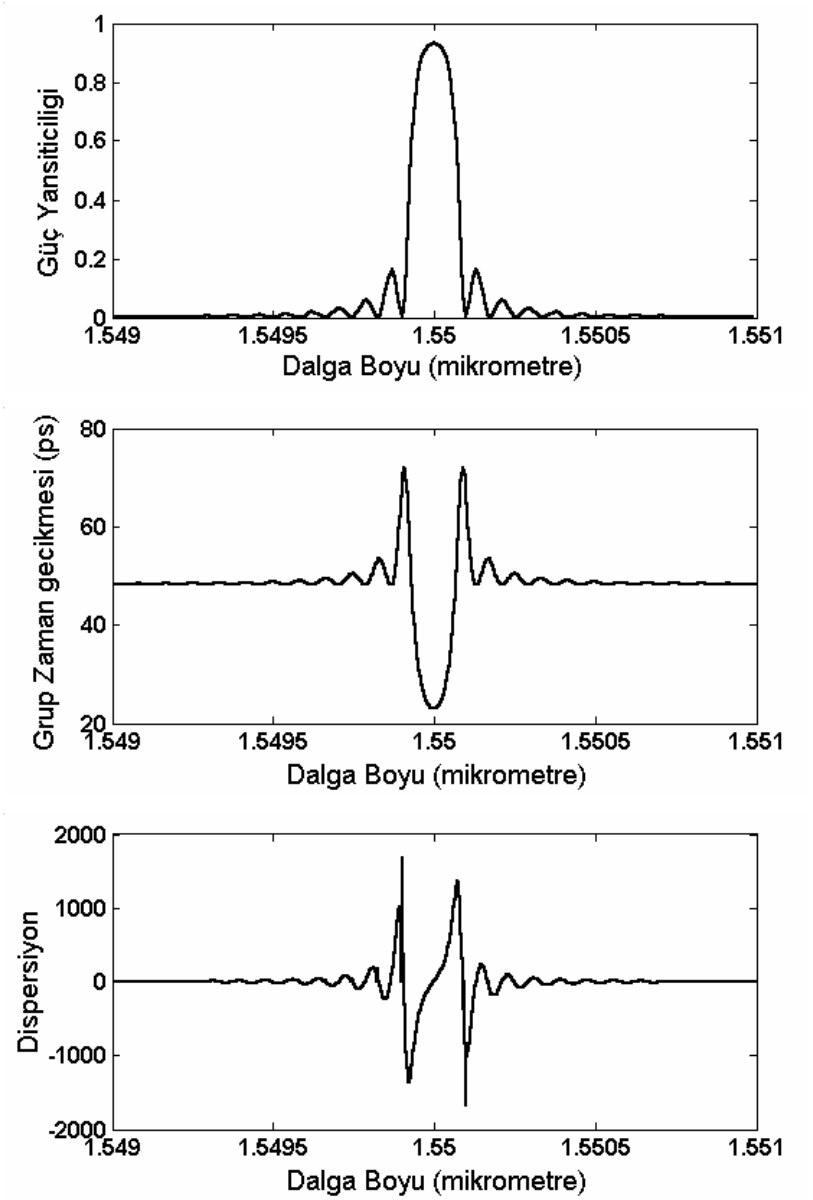
Bu bölümde, FBG'lerin tek kanallı optik haberleşme sistemleri için iyi bir optik filtre ve aynı zamanda dispersiyon kompansatörü olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Bu amaç doğrultusunda, önceki bölümde sunulan tasarım modeli kullanılarak, farklı tip FBG'lerin güç yansıtıcılık, grup zaman gecikmesi ve dispersiyon karakteristikleri incelenmiştir. Izgara boyu (L), etkin kırılma indis değişimi ($\overline{\delta n}_{eff}$), apodizasyon profili ve cıvıltı parametrelerinin spektral karakteristikler üzerine etkileri araştırılmış ve önemli değerlendirmeler yapılmıştır. FBG'nin yansıma spektrumunu elde etmek için Matlab (v6.5) yazılımı altında çalışan bir simülatör programı geliştirilmiş ve tasarım modelinin uygulanmasında nümerik çözüm yöntemi olarak Bölüm 4.3'te sunulan matris transfer metodu kullanılmıştır.

5.1. Tekdüze FBG' ler

Farklı tip FBG'ler içindeki en basit yapı, ızgara periyodu ve etkin kırılma indis değişimi ızgara boyunca sabit olan tekdüze yapılardır. Böyle bir ızgara yapısı için $\overline{\delta n}_{eff}(z) = \overline{\delta n}_{eff} = sbt$ ve cıvıltıya sebep olan ızgara faz değişimi $\phi(z) = 0$ olarak alınır. Izgara boyunca kırılma indis modülasyonunun z' ye göre değişimi basitçe şu eşitlikle belirlenebilir.

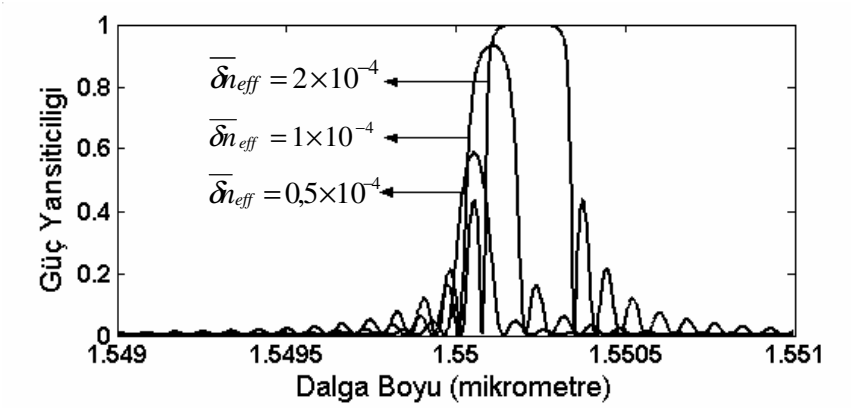
$$\delta n_{eff} = \overline{\delta n}_{eff} \left(\left\{ 1 + \cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda} z \right] \right\} \right) \tag{5.1}$$

Şekil 5.1'de tekdüze bir ızgaranın spektral karakteristiklerinden güç yansıcılık, grup zaman gecikme ve dispersiyon cevabı görülmektedir.



Şekil 5.1. Tekdüze bir ızgarada güç yansıtıcılık, grup zaman gecikme ve dispersiyon eğrileri, $\overline{\delta n}_{eff} = 1 \cdot 10^{-4}$, L=10mm.

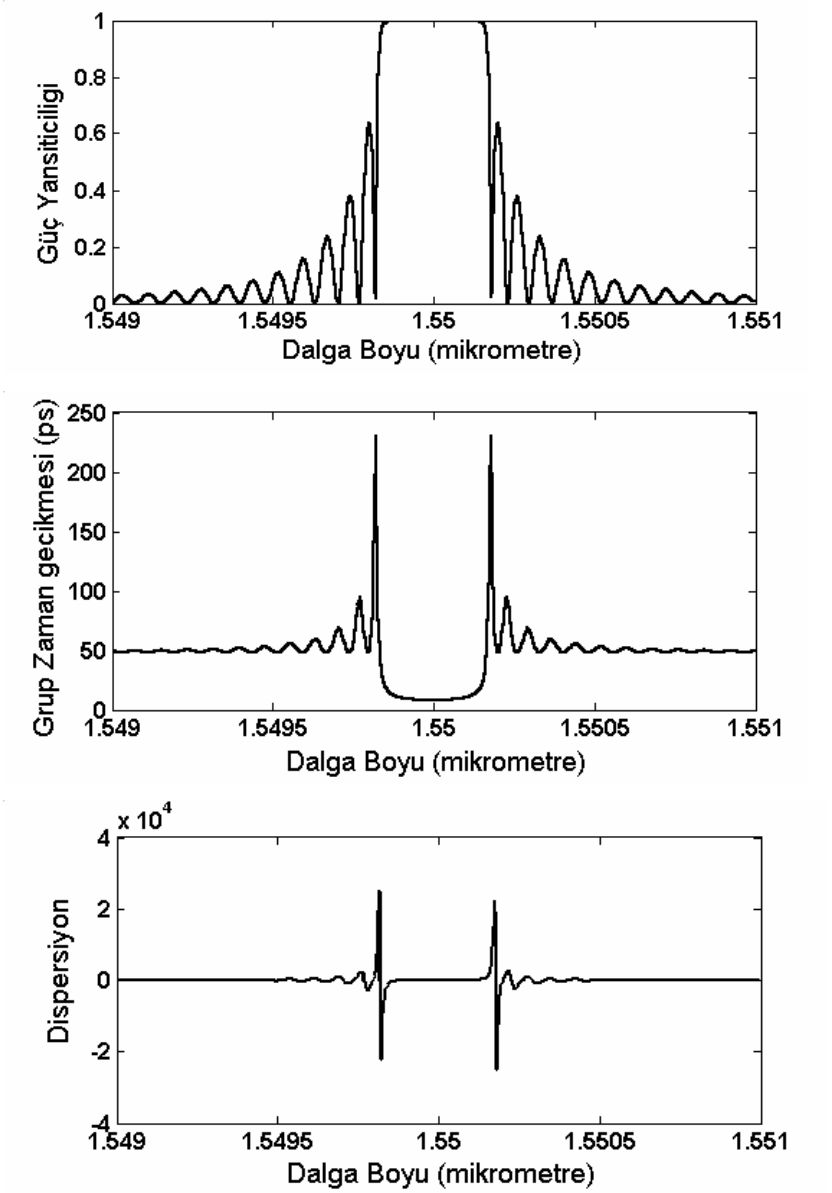
Elde edilen spektrumlarda, 1550nm dalgaboyu merkezli yansıma band genişliği oldukça dardır (<0,2nm) ve tepe yansıtıcılık maksimum seviye olan 1'e tam olarak ulaşamamıştır. Yansıtıcılığı şiddetlendirmek ve kanal band genişliğini artırmak için etkin kırılma indis değişim genliği $\overline{\delta n}_{eff}$' artırmak faydalı olacaktır. Şekil 5.2, kırılma indis değişim genliği $\overline{\delta n}_{eff}$ ile yansıma şiddeti arasındaki ilişkiyi gözlemleyebilmek için elde edilmiştir.



Şekil 5.2. Farklı $\overline{\delta n}_{eff}$ değerleri için tekdüze bir ızgaranın güç yansıtıcılık eğrisi, λ_D=1550nm, L=10mm, $\overline{\delta n}_{eff}$=0,5·10^{-4}, 1·10^{-4} ve 2·10^{-4}, n_{eff}=1,447.

Şekil 5.2' de görülen güç yansıtıcılık eğrileri incelendiğinde, $\overline{\delta n}_{eff}$ indis farkı arttıkça yansıtıcılığın da şiddetlendiği anlaşılmaktadır. Yansıtıcılılığı daha da şiddetlendirmek için $\overline{\delta n}_{eff}$ bir miktar daha artırılabilir. Ancak optik fiberin zayıf kılavuzlama koşulundan dolayı $\overline{\delta n}_{eff} << n_{eff}$ olmalıdır. Uygulamada $\overline{\delta n}_{eff}$ için üst sınır 10^{-3} olarak kabul edilir. Maksimum yansıtıcılığın oluştuğu dalgaboyu merkezinin, $\overline{\delta n}_{eff}$ arttıkça sağa doğru kayması, şekilde göze çarpan bir diğer önemli husustur. Bu kayma beklenen bir durumdur ve kayma miktarı Bölüm 4'te verilen Eş. 4.25 ile hesaplanabilir. Buradaki kayma miktarı 0,214nm gibi oldukça küçük bir değer olduğu için ihmal edilebilir. Ancak fiber ızgara lazerlerinde ve WDM fiber yansıma ızgaralarında dikkate alınması gereken önemli bir parametredir.

Şekil 5.3' de $\overline{\delta n}_{eff}$ ' in artması ile yansıma band genişliğinin yaklaşık 0,35nm'ye ve tepe yansıtıcılığın maksimum seviyeye ulaştığı görülmektedir. Bu band aralığı içinde grup zaman gecikmesi hemen hemen sabit kalmaktadır. Bu yüzden dispersiyon spektrumdan da görüleceği gibi, optik ızgaranın yansıma bandındaki dispersiyon ortalaması sıfırdır. Bu durum cıvıltı içermeyen tekdüze bir FBG'nin tipik özelliğidir.

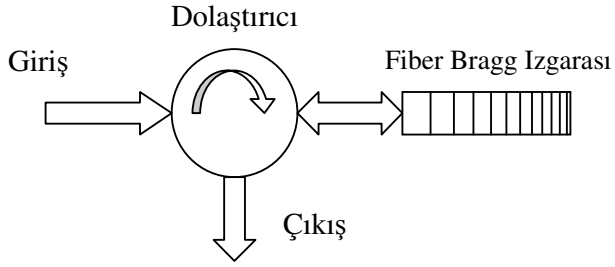


Şekil 5.3. Tekdüze bir ızgarada güç yansıtıcılık, grup zaman gecikme ve dispersiyon eğrileri, $\overline{\delta n}_{eff}=3\cdot10^{-4}$, L=10mm.

Cıvıltı içermeyen tekdüze bir FBG iyi bir optik filtre olabilir ancak dispersiyon kompansatörü için elverişli değildir.

5.2. Cıvıltılı FBG' ler

Cıvıltılı bir FBG, fiber uzunluğu ile ızgara periyodu değişen bir ızgara yapısına sahiptir ve bu değişim ızgara fazı $\phi(z)$ ile ifade edilir. Cıvıltılı bir FBG girişinden yansıyan optik sinyal, dalgaboyu spektrumunda grup zaman gecikmesine maruz kalır ve bu özelliği dispersiyon kompansazyonu için oldukça ilgi çekici yanıdır. Şekil 5.4'deki ızgara ve girişine yerleştirilen optik dolaştırıcılar ile dispersiyonu kompanze edilmiş optik sinyal toplanır.



Şekil 5.4. Optik dolaştırıcı ve fiber Bragg ızgarası bağlantısı

Doğrusal cıvıltılı FBG için kırılma indis modülasyonunu ve ızgara fazının değişimi şu eşitliklerle ifade edilebilir:

$$\delta n_{eff} = \overline{\delta n}_{eff}(z)\left\{1 + v\cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z)\right]\right\} \tag{5.2}$$

$$\frac{1}{2}\frac{d\phi}{dz} = -\frac{4\pi n_{eff} z}{\lambda_D{}^2}\frac{d\lambda_D}{dz} \tag{5.3}$$

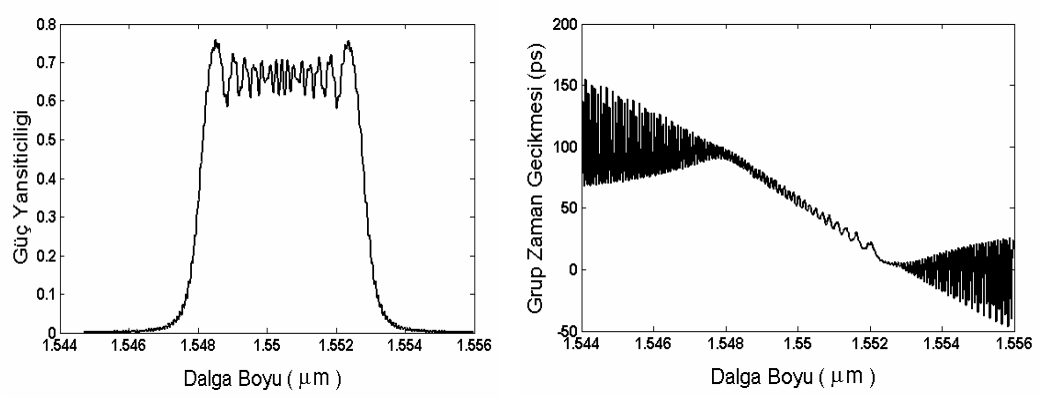
Burada $\frac{d\lambda_D}{dz}$, tasarım dalga boyunun ızgaradaki pozisyona göre değişim oranıdır ve bu oran cıvıltı parametresi olarak da ifade edilir. Bu oranın sabit bir değer olması,

ızgara cıvıltısının doğrusal olması anlamına gelir. Önceden belirlenen bir $\frac{d\lambda_D}{dz}$ değeri, Eş. 5.3 ve 4.16'da yerine yazılarak, cıvıltı etkisinin ızgara üzerindeki etkisi incelenebilir.

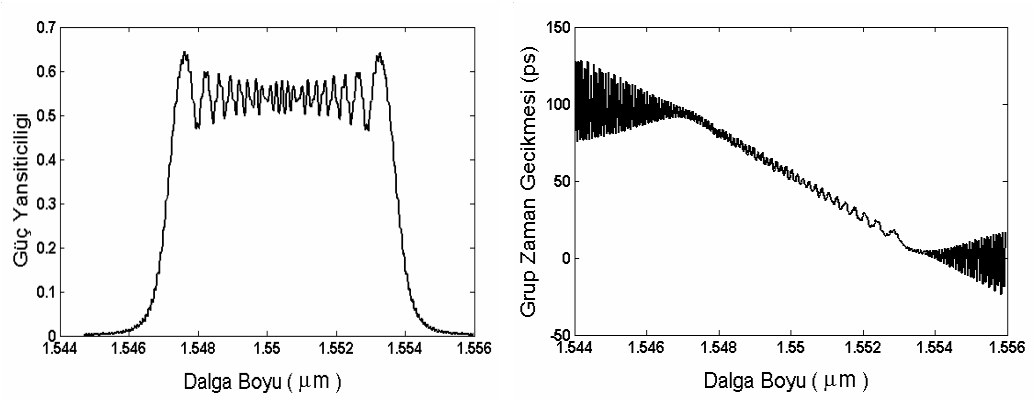
Şekil 5.5'te, farklı doğrusal cıvıltı değerlerine sahip FBG için elde edilen sonuçlar görülmektedir. Şekil 5.5'teki (a), (b) ve (c) spektrumları için $\frac{d\lambda_D}{dz}$ cıvıltı parametreleri, sırasıyla 2,5nm/cm, 3,5nm/cm ve 4,5nm/cm, diğer ortak parametreler ise L=10mm, $\overline{\delta n}_{eff}=4\cdot10^{-4}$, λ_D=1550nm olarak alınmıştır. Elde edilen spektrumlarda ilk olarak göze çarpan önemli husus, yansıma bandının tekdüze ızgaralara göre daha geniş bir dalgaboyu aralığını kapsaması ve bu genişliğin, cıvıltı parametresinin mutlak değeri ile orantılı bir şekilde artmasıdır. Ayrıca band genişliğindeki bu artışla beraber yansıma şiddetinde bir azalma da söz konusudur. Izgara periyodunun cıvıltı ile değişmesi sonucu, λ_B dalgaboyunun sınırlı bir dalgaboyu aralığında değişmesi, yansıma bandını genişletirken yansıtıma şiddetini düşürmesi doğal bir durumdur. Azalan yansıma şiddetine karşılık fiber ızgaranın boyunu uzatmak yararlı olabilir.

Güç yansıtıcılık spekrumunda, hızlı dalgalanmaların varlığı bir diğer önemli hususdur. Bu dalgalanmaların, grup zaman gecikme spekrumlarında da ortaya çıktığı Şekil 5.5'ten fark edilebilir.

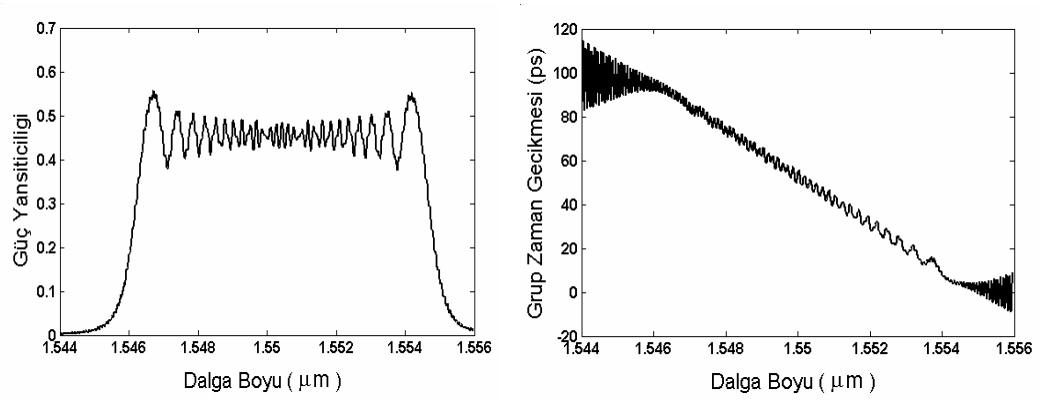
Grup zaman gecikmesi spektrumları incelendiğinde, yansıma bandını içinde, değişimin hemen hemen doğrusal olduğu görülebilir ve bu değişim, cıvıltılı FBG' nin bu dalgaboyu aralığında sabit bir dispersiyon karakteristiği gösterdiğinin kanıtıdır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.5. Doğrusal cıvıltılı fiber ızgarasının güç yansıtıcılık, grup zaman gecikmesi ve dispersiyon spektrumları, *Cıvıltı parametresi (nm/cm)* (a) 2,5, (b) 3,5, (c) 4,5

Şekil 5.5 (a)'da verilen grup zaman gecikmesi spektrumunda, eğrinin eğimi yani cıvıltılı FBG' nin dispersiyonu 18,75ps/nm iken (c)'deki spektrumda bu değer yaklaşık 11ps/nm olarak ölçülmüştür. Aslında bu değerler, uzun mesafeli bir fiber optik sistemdeki dispersiyon kompansatörü için oldukça küçüktür. Örneğin, Şekil 5.5 (a)'daki spektrumu veren bir cıvıltılı FBG, 1550nm dalgaboyunda 3ps/nm-km' lik dispersiyona sahip Lucent TrueWave fiberi sadece 6km için dengeleyebilir. Cıvıltı parametresinin haricinde, kırılma indisi modülasyon genliği, ızgara boyu gibi diğer ızgara parametrelerinin, grup zaman gecikmesine dolayısı ile dispersiyona nasıl bir katkı sağladığını analiz ederek, gerçek bir sistemdeki dispersiyon problemine çözüm üreten bir optik kompansatör tasarımı yapmak daha yararlı olacaktır.

5.3. Apodize-Cıvıltılı FBG'ler

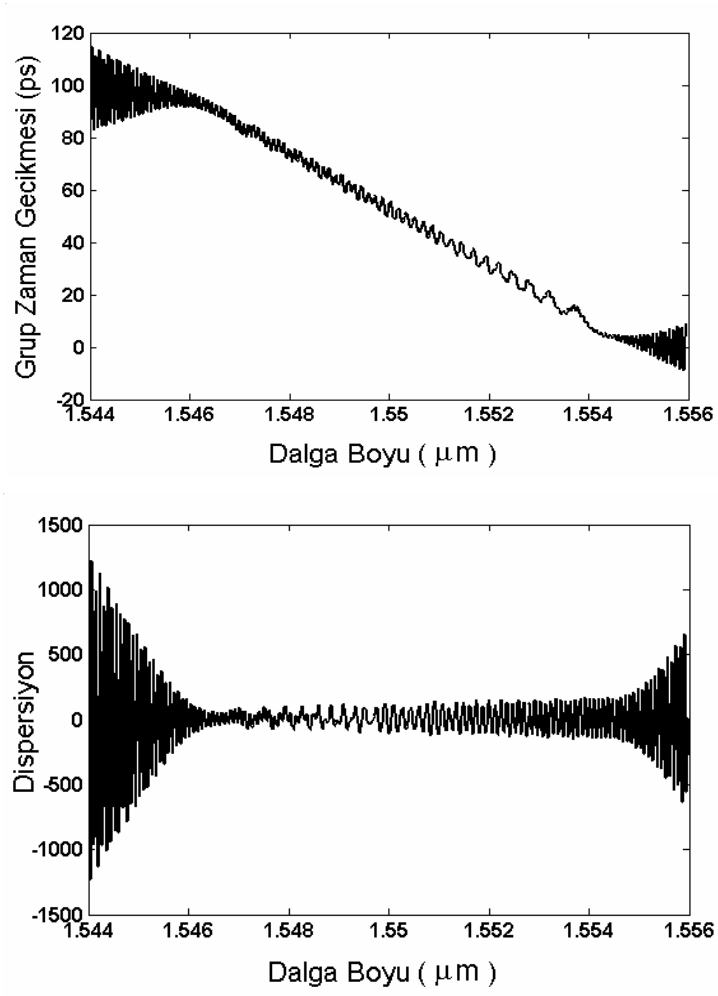
Güç yansıtıcılık ve grup zaman gecikmesi spektrumlarında ortaya çıkan dalgalanmalar önemli bir problemdir ve bu problemin çözülmesi veya etkisinin azaltılması gerekir. Bu salınımlar, Şekil 5.6'dan görüleceği üzere optik ızgaranın dispersiyon spektrumunda daha da büyük dalgalanmalara yol açar.

Kırılma indisi modülasyon genliğini $\overline{\delta n}_{eff}$ 'i, ızgara boyunca değişime uğratarak ya da genel bir tabir ile ızgarayı apodize ederek cıvıltılı FBG'nin güç yansıma ve grup zaman gecikme karakteristiklerinde olumlu katkılar sağlanabilir. Apodizasyon, ızgara ortasından başlayarak her iki uca doğru kırılma indis değişimin belirli bir profil dahilinde giderek azaltılması tekniğidir. Apodizasyon profili olarak aşağıdaki gibi tanımlanan *Gaussian*, *sinc* ve *tanh* gibi fonksiyonlar kullanılabilir.

Gaussian Profil: $$f(z) = \exp\left[-a\left(\frac{z - L/2}{L}\right)^2\right] \tag{5.4}$$

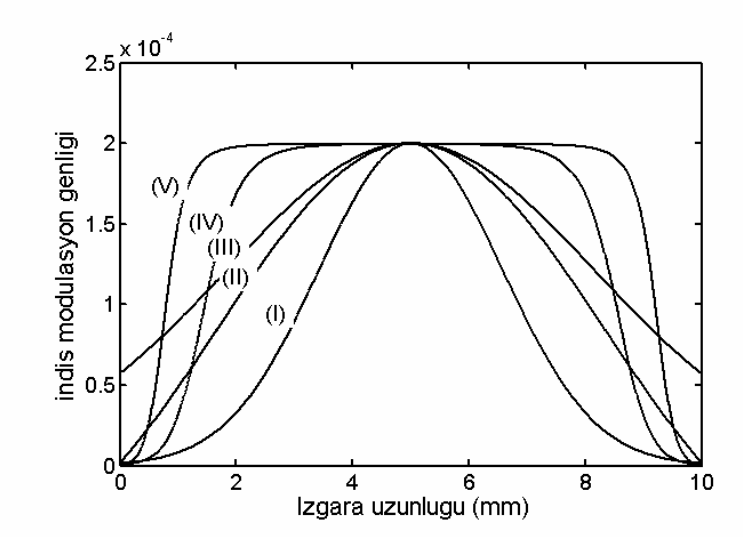
Sinc Profil: $$f(z) = \sin c\left(\frac{z - L/2}{FWHM}\right) \tag{5.5}$$

Tanh Profil: $$f(z) = \frac{1}{2}\left[1 + \tanh\left(\beta(1 - 2\left|\frac{2z}{L}\right|^{\alpha}\right)\right] \quad (5.6)$$



Şekil 5.6. Doğrusal cıvıltılı fiber ızgarasının grup zaman gecikme ve dispersiyon spektrumu, *cıvıltı parametresi* 4,5nm/cm.

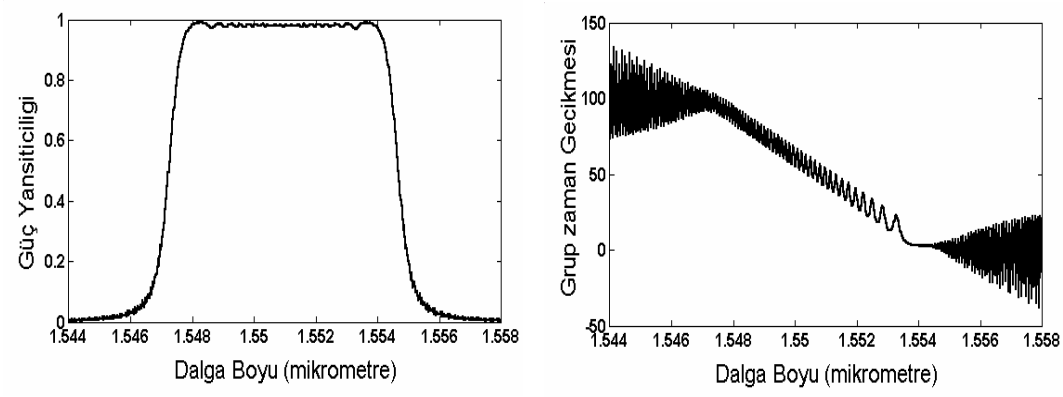
Bu fonksiyonlarda *a*, Gaussian genişlik parametresi, *FWHM* yarı maksimumdaki tam genişlik, α ve β ise *tanh* için gerekli parametrelerdir. Şekil 5.7'de, bu fonksiyonlarla elde edilen farklı apodizasyon profilleri görülmektedir. Bu profillerden dolayı $\overline{\delta n}_{eff} = \overline{\delta n}_{eff}(z)$ şeklini alır ve artık ızgara boyunca *z*' ye bağlıdır. Böylece eşitlik (4.15-19) ile verilen bağlaşımlı kip katsayıları ve parametreleri de *z*' ye bağımlı olur.



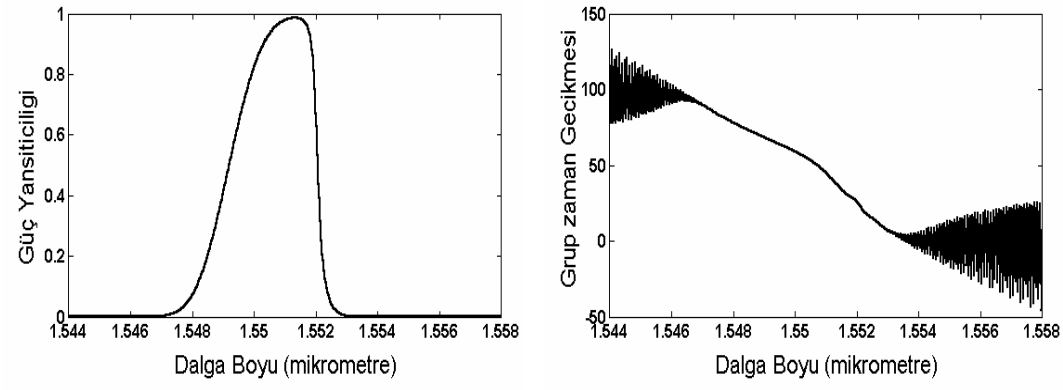
Şekil 5.7. FBG için farklı tip apodizasyon profilleri (I)-*Gaussian (a=20),* (II)-*Sinc*, (III)-*Gaussian (a=5)*, (IV)-*Tanh (α=2, β=3)*, (V)-*Tanh (α=4, β=3)*.

Şekil 5.8 (a) ve (b)'de sırayla apodize edilmemiş ve apodize edilmiş iki ayrı cıvıltılı ızgaraya ilişkin elde edilen sonuçlar verilmiştir. Her iki ızgara için, L=10mm, $\overline{\delta n}_{eff}=9\cdot10^{-4}$, λ_D=1550nm, n_{eff}=1,447'dir. Apodizasyon için *Gaussian* profil seçilmiş, Gauss genişlik parametresi a ise 20 olarak alınmıştır.

Şekil 5.8'de, kırılma indis genliğine uygulanan apodizasyonun, güç yansıtıcılık ve grup zaman gecikme spektrumundaki dalgalanmaları önemli ölçüde bastırdığı görülmektedir. Bu olumlu katkının yanında yansıma şiddetinin düşmesi olumsuz bir durum olarak değerlendirebilir. Yansıtıcılığın düşmesi aslında şaşırtıcı bir durum değildir. Çünkü, her apodizasyon profili, indis değişim genliğini tekdüze bir ızgaraya göre az ya da çok azaltır ve bu azalma doğrudan optik ızgaranın yansıtıcılığını zayıflatır. Ayrıca, cıvıltılı bir FBG' nin yansıma band genişliğinin de daralması, yukarıdakine benzer sebeple apodizasyonun sonucu olarak yorumlanabilir.



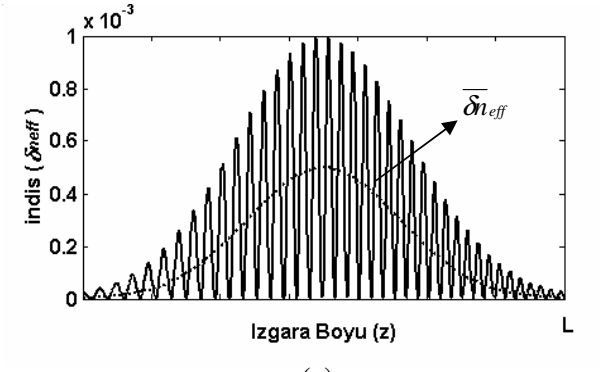
(a)



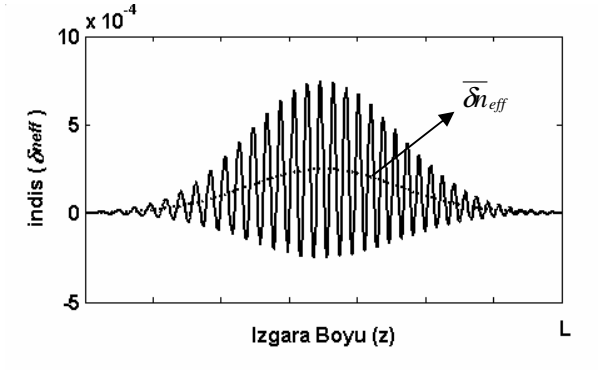
(b)

Şekil 5.8. Güç Yansıtıcılık ve grup zaman gecikme spektrumları (a) Cıvıltılı FBG (b) Apodize-cıvıltılı FBG

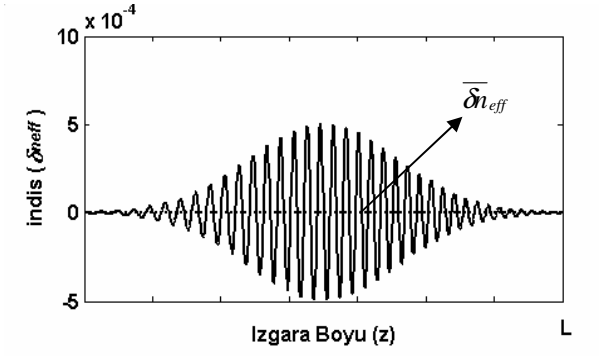
Cıvıltılı FBG' lerin yansıma spektrumlarında iyileştirme sağlamak amacıyla, genişletilmiş apodizasyon profilleri tercih edilebilir. Genişletme işlemi, kırılma indis değişimi Dc bileşenini sıfıra doğru yaklaştıran bir işlemdir ve bu işlem için bölüm 3.1' de tanımlanan *v* parametresi kullanılır. Şekil 5.9'da, genişletilmiş apodizasyon profiline örnek olarak *Gaussian profili*'ni kullanan indis modülasyon değişimleri görülmektedir.



(a)



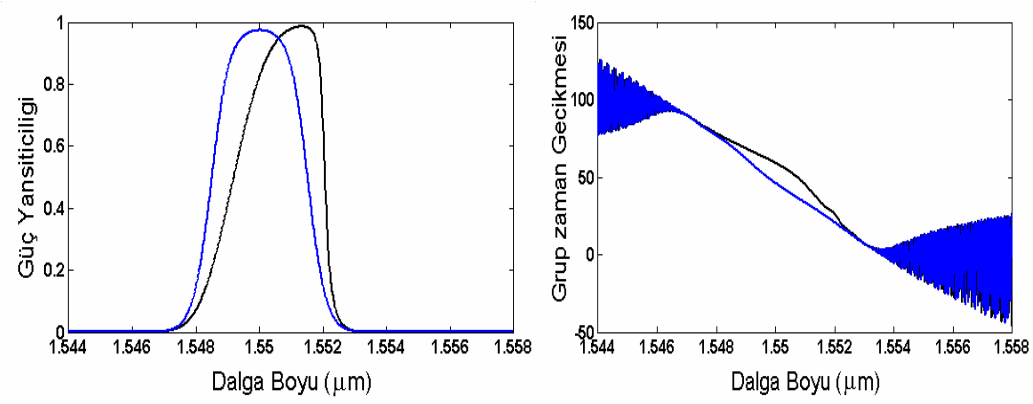
(b)



(c)

Şekil 5.9. *Gaussian* apodizasyon profilleri, (a) Normal v=1, (b) Genişletilmiş v=2, (c) Maksimum genişletilmiş v=100 (v>>1).

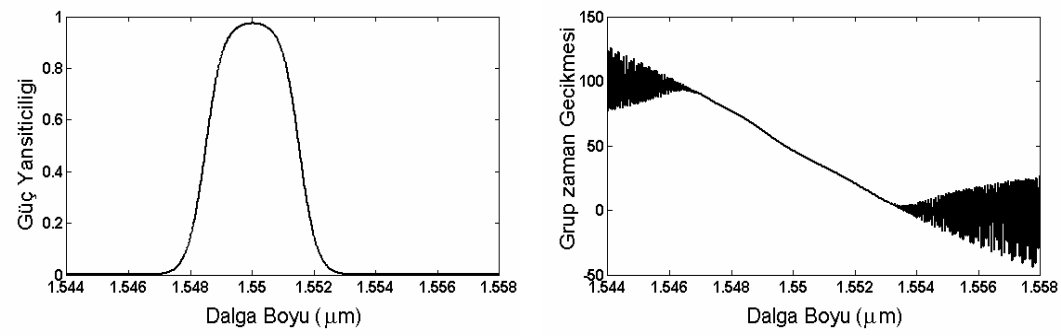
Şekil 5.10'daki spektrumlar, normal *Gaussian profil* ile maksimum genişletilmiş *Gaussian profili* kullanan apodize edilmiş cıvıltılı FBG'nin, güç yansıtıcılık ve grup zaman gecikmesi spektrumlarını karşılaştırmak için elde edilmiştir.



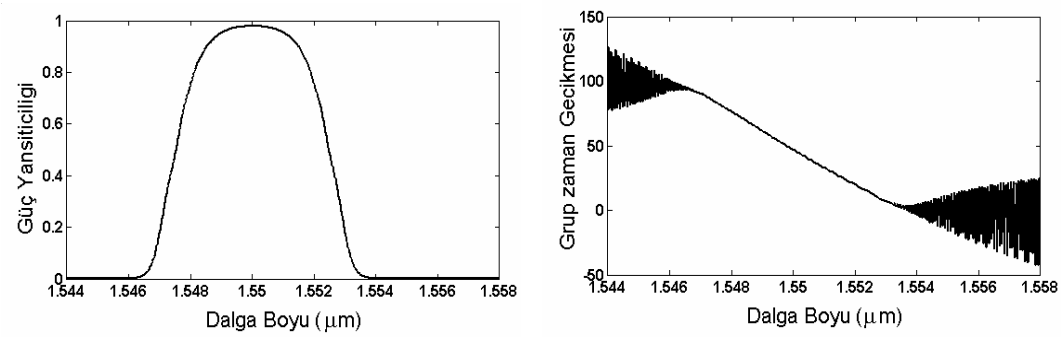
Şekil 5.10. Apodize-cıvıltılı FBG' nin güç yansıtıcılık ve grup zaman gecikme spektrumları, normal apodizasyon (siyah çizgili) ve genişletilmiş apodizasyon (mavi çizgili).

Şekil 5.10' da, mavi renkle çizilen güç yansıtıcılık ve grup zaman gecikme spektrumları maksimum genişletilmiş apodize-cıvıltılı FBG'ye aittir. Bu spektrumlar siyah renkle çizilen normal apodize-cıvıltılı FBG'nin spektrumları ile karşılaştırıldığında, genişletilmiş apodize-cılvıltılı FBG'nin istenilen karakteristikleri daha iyi karşılayabildiğini söylemek mümkündür. Apodizasyon profilindeki genişletme işlemi, spektrumunda, bir yandan simetrik ve dengeli bir yansıma bandı oluşumunu sağlarken, diğer taraftan grup zaman gecikme spektrumunun daha doğrusal bir tepki vermesinde önemli katkı sağlamıştır. Farklı ızgara parametreleri ile yapılan tüm tasarımlarda, apodizasyon profilinde genişletme tekniğinin olumlu katkıları gözlenmiştir. Bu tespitten sonra, çalışmanın devam eden aşamalarında kullanılacak tüm apodizasyon profilleri için genişletme tekniği uygulanmıştır ve bu profiller için artık "genişletilmiş" ifadesi kullanılmamıştır.

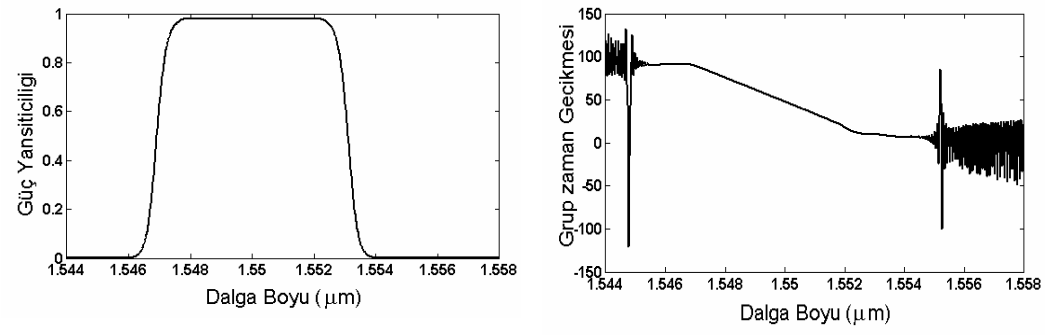
Farklı apodizasyon profilleri kullanarak, cıvıltılı FBG' nin spektrumuna nasıl katkı sağladığını araştırmakta fayda vardır. Bu amaç için, Eş. 5.4-6 ile tanımı daha önce yapılan *Gaussian*, *sinc* ve *tanh* apodizasyon profillerini doğrusal cıvıltılı FBG'ye uygulanabilir. Bu çalışmadan edilen sonuçlar Şekil 5.11'de gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.11. Farklı ızgara profillerine karşılık gelen güç yansıma ve grup zaman gecikmesi spektrumları, (a) *Gaussian* (a=20), (b) *Sinc*, (c) *Tanh* (α=*4,* β=*3)*, diğer parametreler, λ_D=1550nm, *L=-10mm,* $\overline{\delta n}_{eff}=9\cdot10^{-4}$, n_{eff} =1,447*, cıvıltı parametresi* =-3,5nm/cm*,* v=100.

Şekil 5.11'de, sırasıyla *Gaussian*, *sinc* ve *tanh* apodizasyonun uygulandığı cıvıltılı FBG için elde edilen (a), (b) ve (c) spektrumlarda, yansıma bandının giderek genişlediği fark edilebilir. *Tanh (α=4, β=3)* profiline karşılık olarak elde edilen güç yansıtıcılık spektrumunun, ideal bir optik filtre karakteristiğine daha yakın olduğunu söylemek mümkündür. Bu profil için elde edilen yansıma spektrumunun -3dB band genişliği 5,2nm'dir ve bu band genişliği diğerlerinden daha büyüktür. Grup zaman gecikme spektrumları incelendiğinde, *sinc* profil ile elde edilen grup zaman gecikmesi spektrumunun, yansıma dalgaboyu bandında diğerlerine göre daha doğrusal olduğu görülmektedir. Benzer bir doğrusallık, *tanh (α=4, β=3)* profiline karşılık gelen grup zaman gecikme spektrumunda görülmesine rağmen, yansıma bandının her iki kenarına yakın bölgede bir büküntünün varlığı söz konusudur. Band genişliği iyi ayarlandığı takdirde bu durum, tek kanallı ya da birkaç kanallı WDM optik haberleşme sistemleri için göz ardı edilebilir. Ancak kanallar arası boşluğun oldukça dar olduğu DWDM sistemlerde dikkate alınması gerekebilir.

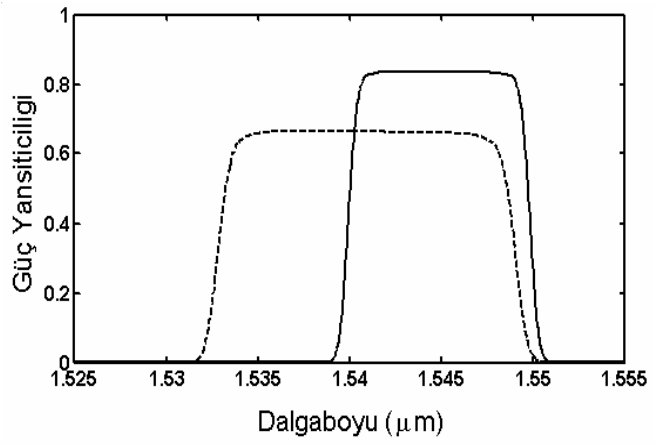
5.4. Geniş Band Dispersiyon Kompanzasyonu

Fiberoptik haberleşmede sıklıkla C bandı (1520-1570nm) tercih edilir. Bunun sebebi, bu aralıktaki optik zayıflamanın küçük olmasıdır. C bandında çalışan tek modlu optik fiberler genellikle 17ps/nm-km kromatik dispersiyona sahiptir. Fiberoptik hattın kromatik dispersiyonunu telafi edebilecek, tüm C bandında çalışan bir cıvıltılı fiber Bragg ızgarasının oldukça kullanışlı olacağı ortadır.

Bu çalışmada, etkin kırılma indis farkı $\overline{\delta n}_{eff}$, ızgara boyu L, ızgara cıvıltısı $d\lambda_D/dz$ parametreleri ile apodizasyon fonksiyonun, fiber ızgarasının yansıma spektrumunu nasıl etkilediği araştırılmıştır. C bandını kapsayan, geniş bir aralıkta çalışan cıvıltılı fiber Bragg ızgarasının tasarımı yapılarak, dispersiyon telafisine ilişkin örnek çözümler sunulmuştur.

Bölüm 5.3'de, cıvıltılı bir FBG' nin *tanh* (α=4, β=3) ızgara profili ile apodize edilmesi durumunda, elde edilen yansıma bandının daha geniş bandlı olduğu

belirlenmişti. Cıvıltılı fiber Bragg ızgarasının cıvıltı parametresi $d\lambda_D/dz$ artırılarak, yansıma band aralığı daha da genişletilebilir. Şekil 5.12'de iki ayrı değerlikli cıvıltı parametresine karşılık, FBG' nin yansıma spektrumunda oluşan değişim görülmektedir. $d\lambda_D/dz$=-6nm/cm için ızgara periyodu, ızgara başından itibaren 535,59nm'den 531,48nm'ye doğrusal olarak azalmaktadır. $d\lambda_D/dz$=10nm/cm için bu değişim, 535,59nm-528,77nm aralığındadır. $\left|d\lambda_D / dz\right|$ değeri arttıkça yansıma band aralığı genişlemektedir. Fakat, bu genişlemeye karşın yansıma gücünün azaldığı görülmektedir.

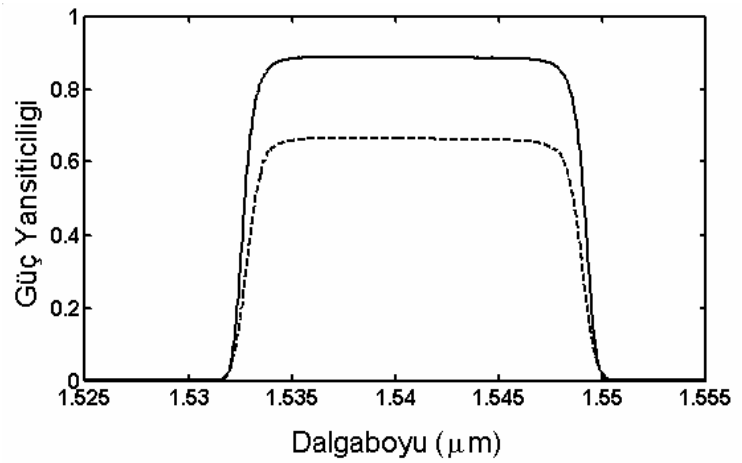


Şekil 5.12. İki ayrı cıvıltı değerleri için ızgaranın güç yansıma spektrumu. Düz çizgili spektrum *cıvıltı parametresi=-6nm/cm* ve kesikli çizgili spektrum *cıvıltı parametresi=-10nm/cm* için çizilmiştir. L=10mm, $\overline{\delta n}_{eff}=8\cdot10^{-4}$, λ_D=1550nm, n_{eff}=1.447, *v=100*, *tanh apodizasyon* (α=4, β=3).

Şekil 5.12'de, artan cıvıltı değeri ile yansıma bandındaki genişleme görülmektedir. Ancak bu genişleme, beraberinde yansıma şiddetinin düşmesine neden olmuştur. Yansıma bandının genişlemesine karşın oluşan bu güç kaybını telafi etmek için, $\left|d\lambda_D / dz\right|$ azaltılırken ızgara boyunun artırılması bir çözüm olabilir.

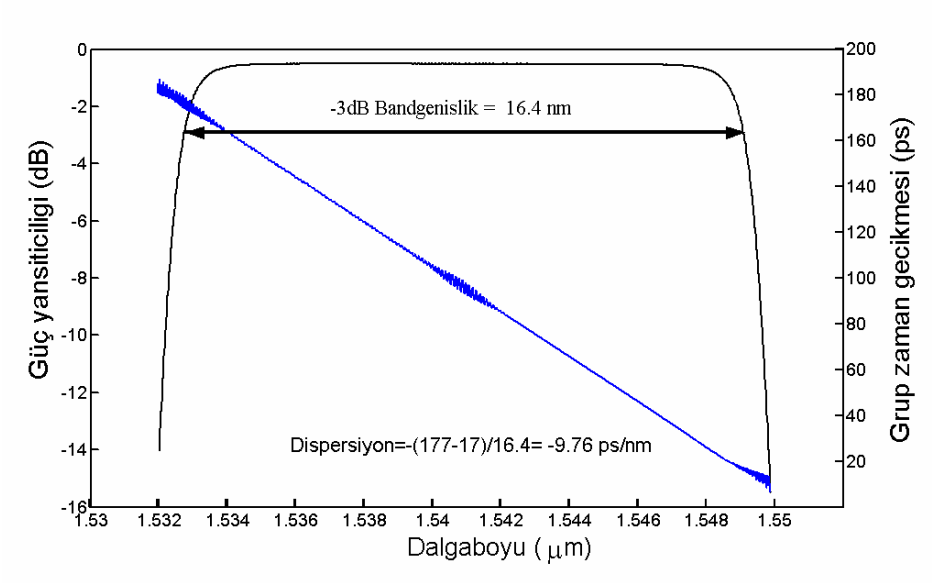
Şekil 5.13'te, $d\lambda_D/dz$=-10 nm/cm ve $d\lambda_D/dz$=-5nm/cm olan iki ayrı cıvıltı değerine sahip L=10mm ve L=20mm uzunluklarındaki FBG' nin, güç yansıma spektrumu görülmektedir. Bu grafiklerde, $d\lambda_D/dz$ yarıya düşürülürken ızgara boyu iki katına yükseltilerek, yansıma band genişliğinin hemen hemen aynı kaldığı ve güç

yansıtıcılığının ise yükseldiği anlaşılmaktadır. Böylece, yapılan tasarım ile bir yandan cıvıltılı FBG' nin yansıma bandı genişletilirken, diğer yandan azalan yansıtıcılık şiddetlendirilmiştir. Şekil 5.14, bu iki ızgaranın güç yansıtıcılık (dB) ve grup zaman gecikme spektrumlarını karşılaştırmalı olarak göstermektedir.

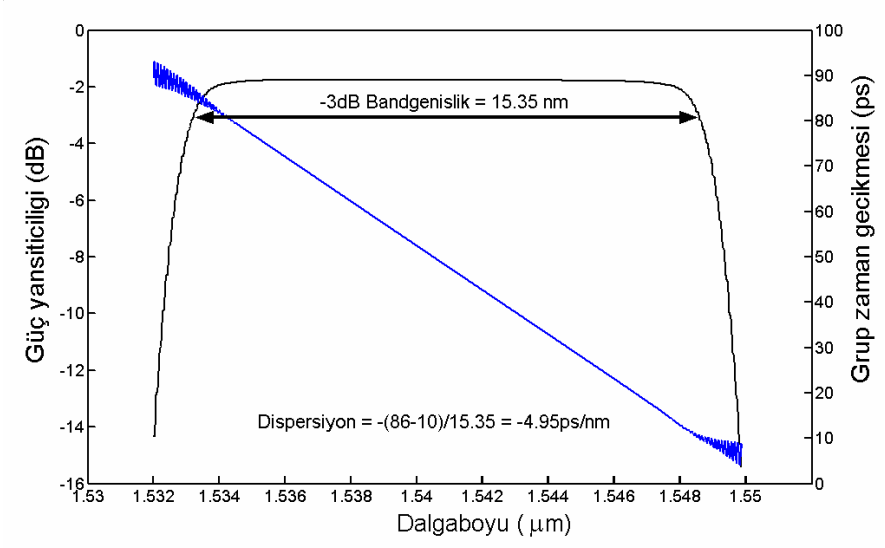


Şekil 5.13. İki ayrı ızgaranın güç yansıma spektrumuları, *L*=20mm ve *cıvıltı parametresi* -5nm/cm ve (düz çizgili), *L*=10mm ve *cıvıltı parametresi* -10nm/cm (kesikli çizgili).

Şekil 5.14 (a) ve (b)'de verilen spektrumlar incelendiğinde, ızgara boyu ile dispersiyon ilişkisi daha iyi anlaşılabilir. Izgara boyu arttıkça, yansıma dalgaboyu aralığında grup zaman gecikmesi ve dolayısıyla mutlak dispersiyon da artmaktadır. *L*=10mm uzunluklu ızgara, yansıma bandı boyunca ortalama 4,95ps/nm değerinde dispersiyon cevabı verirken, *L*=20mm boyundaki ızgara hemen hemen iki katı olan 9,76 değerinde bir cevap vermiştir. Izgara boyu ve ızgara cıvıltısı arasındaki denge iyi kurulduğu takdirde, istenilen bir grup zaman gecikmesi ve dolayısıyla dispersiyon karakteristiği elde edilebilir.



(a)

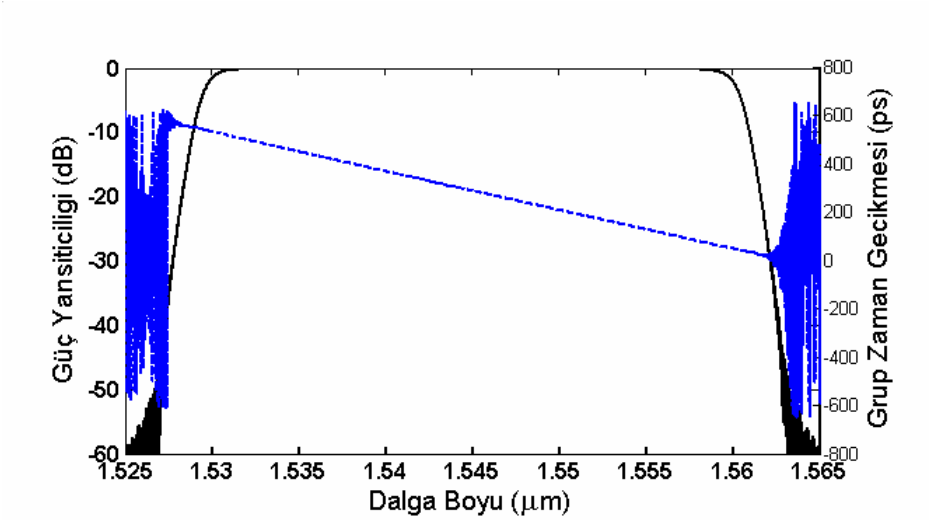


(b)

Şekil 5.14. Güç yansıtıcılık(dB) (siyah) ve grup zaman gecikmesi (mavi) spektrumları (a) *L*=20mm, *cıvıltı parametresi*=-5nm/cm, (b) *L*=10mm, *cıvıltı parametresi* =-10*nm/cm.*

Spektrumu Şekil 5.15'de görülen optik ızgaranın yansıma bandı, C bandını (1530-1560) tümüyle kapsamaktadır ve bu aralıktaki dispersiyon, doğrusal değişim gösteren grup zaman gecikme spektrumundan yaklaşık 17,3ps/nm olarak

hesaplanmıştır. Bu karakteristikler ile tasarım örneği sunulan cıvıltılı FBG' nin, fiberoptik haberleşmede C bandında çalışan geniş band iyi bir dispersiyon kompansatörü olabileceği açıkça ortadadır. Burada elde edilen dispersiyon değeri önceki tasarım örneklerinde elde edilen dispersiyon değerlerden daha yüksektir. Izgara boyunun uzatılması ve doğrusal cıvıltının azaltılması optik ızgaranın hem dispersiyonunu hem de güç yansıtıcılığını şiddetlendirmiştir. Bu tasarım örneğinde ızgara boyu 60cm ve $\overline{\delta n}_{eff}=8\cdot10^{-4}$ olarak belirlenmiştir. $\overline{\delta n}_{eff}$ parametresi, elde edilen güç yansıtıcılığın oldukça şiddetli olmasından dolayı daha da düşük değerlikli seçilebilir. Tasarım dalga boyu λ_D değiştirilerek, spektrumda optik ızgaranın yansıma dalgaboyu aralığı L bandına kaydırabilir ve benzer ızgara parametreleri ile L bandında çalışan geniş band dispersiyon kompansatörü tasarlanabilir.

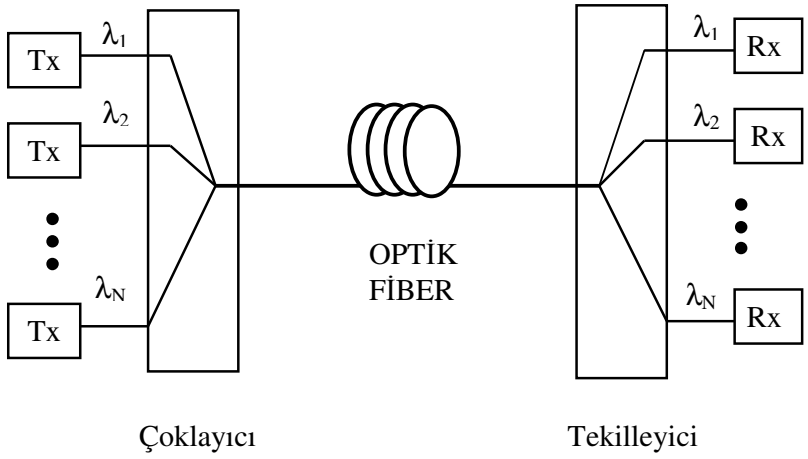


Şekil 5.15. Güç yansıtıcılık(dB) (siyah) ve grup zaman gecikmesi spektrumları (mavi) *L=60mm, cıvıltı parametresi*=-3nm/cm.

6. WDM SİSTEMLER İÇİN ÇOK KANALLI FBG' LER

Çok kanallı optik haberleşme sistemleri, dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM) esasına dayanan, bir fiberoptik hattan farklı dalgaboylarında bir çok kanalın taşındığı sistemlerdir. Bu sistemlerin geliştirilmesindeki amaç, tek kanallı sistemlere göre iletim kapasitesinin artırılmasıdır. Çünkü tek kanallı sistemlerde bit hızı arttıkça fiber dispersiyonu, iletim uzunluğu sınırlayan en önemli bir faktör olmaktadır. İletilecek sinyali farklı dalga boylarına paylaştırarak, mümkün olan en uzak mesafeye taşıma tekniği, dispersiyona karşı geliştirilen en çarpıcı gelişmelerin başında yer alır.

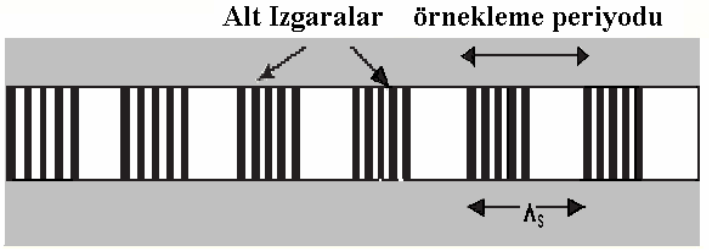
Çok uzun mesafeli geleneksel tek kanal optik haberleşme sistemleri, dispersiyon etkisinden dolayı genellikle 10Gb/s hızından daha yukarı hızlarda iletişime izin vermezler. Bu durumda WDM sistemi ile toplam bit hızı kolayca artırılabilir [9,48]. Şekil 6.1'de, noktadan noktaya optik WDM haberleşme sisteminin basit bir şeması verilmiştir. Bu sistemde her bir göndericideki optik sinyal, farklı bir dalgaboyu üzerinden aynı fiber üzerinde taşınır ve fiber çıkışındaki tekilleyici (demultiplexer), her kanalı kendi alıcısına ayrıştırır.



Şekil 6.1. WDM optik haberleşme sisteminin genel yapısı.

6.1. Örneklemeli Fiber Bragg Izgaraları

Fiber ızgara dizileri, peş peşe eklenmiş fiber ızgaraları gibi düşünülebilir. Fakat, gerçekte böyle bir ekleme yerine, daha uzun boylu bir fiber, imalat aşamasında maskelenerek ızgaralanır ve Şekil 6.2'deki yapıya benzer bir ızgara dizisi elde edilir. Bu ızgara dizisine örneklenmiş fiber ızgarası ya da kısaca SFBG denilmektedir.



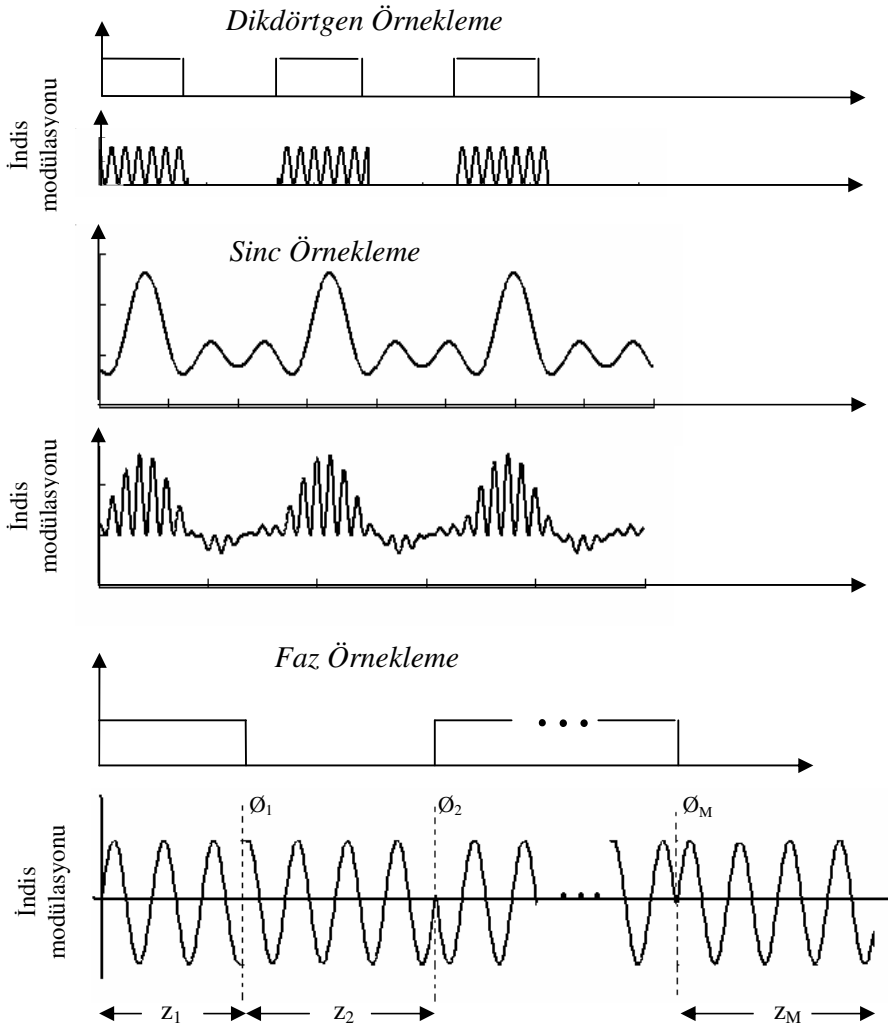
Şekil 6.2. Örneklenmiş ızgara yapısının şematik gösterimi

Bir fiber ızgarasını örnekleyerek dalgaboyu bölmeli spektrum elde etme fikri ilk olarak yarıiletken lazerler için önerilmiştir [49]. SFBG'ler WDM optik haberleşme sistemlerinde optik filtre ve dispersiyon kompanzasyonunda [50-54,76], DBR fiber lazerlerinde [55] ve fiberoptik sensör uygulamalarında [56] yaygın biçimde kullanılan teknolojilerdir.

Fiber yansıma ızgaralarının WDM sistemler için geliştirilmesi, tekdüze tek kanallı ızgaralara göre daha kompleks tasarımlar gerektirir. Tekdüze bir fiber ızgarası için geçerli olan parametrelerin yanında, örneklemenin türü ve örnekleme fonksiyonunun seçimi de optik fiber ızgarasının spektral cevabını belirleyen temel unsurlardır.

Örneklemenin türü konusunda yapılan çalışmalarda, iki seçimin varlığından söz edilebilir. Bunlardan ilki, ızgaranın kırılma indisinin modülasyon zarfını örnekleme tekniğidir. Bu teknikle örneklenen fiber ızgarasının kırılma indisinin tepe genliği, fiber eksenine göre değişir. Diğeri ise, ızgara fazını değiştiren örnekleme tekniğidir. Bu teknikte ise, ızgara fazında periyodik faz kaymaları meydana getirilirken, kırılma

indisi modülasyon zarfı sabit genliklidir. Şekil 6.3'de farklı türden örneklenmiş fiber ızgara yapıları ve kullanılan örnekleme fonksiyonları görülmektedir.



Şekil 6.3. Örnekle fonksiyonları ve indis modülasyonları

Örnekleme fonksiyonunun periyodik olmasında büyük fayda vardır. Çünkü periyodik örneklenmiş bir fiber ızgarası, dalgaboyu spektrumunda periyodik kanallar üretir. Böylece kanallar, dalgaboyu spektrumunda eşit aralıklarla sıralanır. Bu durum, ITU ızgara standardına uygun biçimde kanalların yerleşimi açısından önemlidir.

Periyodik örneklenmiş fiber yansıma ızgarasının dalgaboyu spektrumu, $\Delta\nu_0$ aralıklı kanallar içerir.

$$\Delta\nu_0 = \frac{c}{2n_{eff}P} \tag{6.1}$$

Bu eşitlikte, P örnekleme periyodu ve c ışık hızıdır. Örneklenmiş fiber ızgara tasarımında geleneksel yaklaşım, dikdörtgen örnekleme fonksiyonunun tercihine yöneliktir. Bu örnekleme fonksiyonu kullanılarak tasarlanan örneklenmiş fiber ızgarasının üretimindeki maskeleme tekniği, nispeten daha kolaydır ve maliyeti daha düşüktür.

6.2. Örnekleme fonksiyonu ve spektral ilişkiler

Örneklenmiş FBG, periyodik örnekleme fonksiyonu *s(z)* ile fiber uzunluğu boyunca profili modüle edilmiş ızgaradır. Bölüm 3.1' de verilen ve FBG' nin indis değişimini tanımlayan Eş.3.1'i kullanarak, örneklenmiş FBG'nin etkin kırılma indisinin değişiminin en genel formu şu şekilde tanımlanabilir.

$$\delta n_{eff} = \overline{\delta n}_{eff}(z)s(z)\left\{1 + v\cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda}z + \phi(z)\right]\right\} \tag{6.2}$$

Periyodik örnekleme fonksiyonu *s(z)*'nin Fourier serisi şu eşitlikle tanımlanır.

$$s(z) = \sum_{-\infty}^{\infty} S_m \exp\left(\frac{i2m\pi z}{P}\right) \tag{6.3}$$

Burada, S_m kompleks Fourier katsayılarıdır ve P örnekleme periyodudur. Eş.6.3 ile tanımlanan örnekleme fonksiyonu Eş.6.2'de yerine konulursa, örneklenmiş FBG için kırılma indis farkı δn_{eff}'in z' ye göre değişimi belirlenebilir. Bölüm 4'de detayı sunulan, "bağlaşımlı kip" eşitliklerinin çözümü için önerilen matris transfer metodu

kullanılarak, FBG'nin spektrumu elde edilebilir. Bu aşamada, örneklenmiş FBG'nin WDM sistem için arzu edilen spektral özelliklerini belirlemek üzere, iyi bir örnekleme fonksiyonunun tasarımı önemli bir araştırma konusudur [57, 58].

Örneklenmiş bir fiber Bragg ızgarasını, dalgaboyu spektrumunda, çekirdek ızgara adını verebileceğimiz çok sayıda örneklenmemiş ızgaralardan oluşan bir bütün olarak hayal etmek yanlış olmaz. m arttıkça, Fourier serisinde S_m' nin katsayılarının şiddeti giderek azalır. Örnekleme fonksiyonunun Fourier serisi $s(z)$, sonsuz olmasına rağmen, sıfırdan önemli derecede farklı olan katsayılarının bir kıymeti vardır ve bunların sayısı çoklanmış ızgara sayısına eşittir.

WDM sistemlerde, özdeş (maksimum yansıtıcılık ve geçirme band aralığı aynı kanallar) ve eşit aralıklarla sıralanmış kanallar elde etmek için, örnekleme fonksiyonu tespit edilirken şu kriterler dikkate alınmalıdır [67].

1. Verilen N sayılı kanal için buna karşılık gelen Fourier katsayıları S_m genlikleri eşit olmalıdır.
2. Kanal sayısı N mümkün olduğunca yükseltilmelidir. Çünkü pek çok durum için kanal sayısının yüksek olması arzu edilir.
3. Fourier katsayılarının (S_m) genlikleri mümkün olduğunca yüksek tutulmalıdır. Çünkü bu genlikler yükseldikçe, çoklu ızgaraların yansıtıcılığı artmakta ve bu da indis modülasyonunun maksimum seviyesinin yükseltilmesine olan gereksinimi azaltmaktadır.

6.2.1. Dikdörtgensel örnekleme

Genlik örnekleme, kırılma indisinin genliğini modüle ederek yapılan örneklemedir. FBG'lerin örneklenmesi konusunda yapılan ilk çalışmada, genlik örneklemeyi kullanan dikdörtgensel örnekleme fonksiyonu önerilmiştir [59]. Takip eden süreçte birçok araştırmacı, dikdörtgensel örneklenmiş FBG'leri geliştirme ve optik sistem üzerinde uygulama gayreti göstermişlerdir [60-62]. Bu tür bir örneklemeyi kullanan

FBG'nin imalat teknolojisi daha kolay elde edilebilir geleneksel UV (mor ötesi) maskesi gerektirdiği için, bugün ticari alanda kullanılan örneklenmiş FBG'lerin büyük bir kısmı bu sınıfa girmektedir.

Tekdüze bir FBG, Şekil 6.4'te görüldüğü gibi dikdörtgen biçimli bir fonksiyon ile maskelenirse, tekdüze örneklemeli FBG elde edilir. Bu ızgaranın modellenmesi, tekdüze ızgaranın modellenmesine benzetilebilir. Izgaranın adım adım transfer matrisleri belirlenirken, her örnekleme periyodunda ızgaralamanın olmadığı L_A-L_B bölgelerinde ışığın sadece fazının değiştiğini, diğer optik karakteristiklerin değişmediğini anımsamak gerekir. Bu faz değişimi şu şekilde belirlenir [21].

$$\frac{\phi_i}{2} = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}\Delta z \tag{6.4}$$

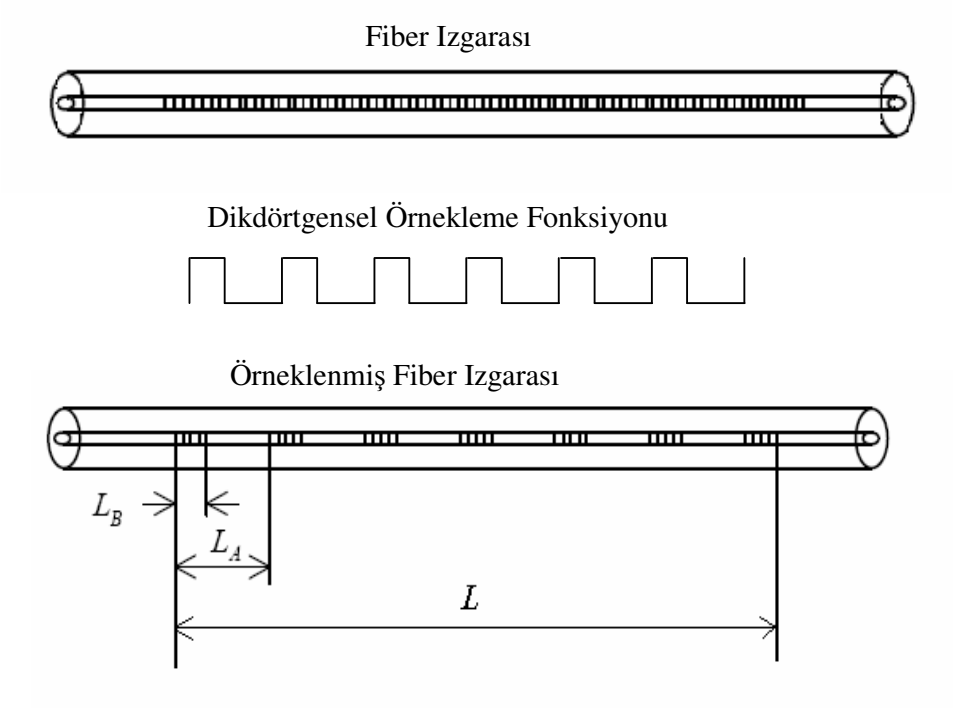
Burada, Δz komşu iki ızgara arasındaki mesafe olup L_A-L_B ile hesaplanır. Bu faz değişiminin etkisi, matris transfer metoduna Eş 6.5' de verildiği gibi bir çarpan olarak ilave edilmelidir.

$$F_{si} = F_i \cdot F_{pi} \tag{6.5}$$

Burada, F_{si}, örneklenmiş fiber ızgarasının matris transfer metodunda hesaplanan i. adımdaki transfer matrisidir. F_{pi} ise faz değişimini ifade eder ve şu şekilde hesaplanır.

$$F_{pi} = \begin{bmatrix} \exp(-\frac{i\phi_i}{2}) & 0 \\ 0 & \exp(\frac{i\phi_i}{2}) \end{bmatrix} \tag{6.6}$$

F_i ise, ızgaranın herhangi bir adımındaki transfer matrisidir ve 4. bölümde verilen Eş.4.27 ile belirlenebilir.



Şekil 6.4. Dikdörtgensel Örneklenmiş Fiber Izgarası

Dikdörtgensel örnekleme fonksiyonu, *rect* fonksiyonu kullanarak Eş 6.7 ile tanımlanabilir.

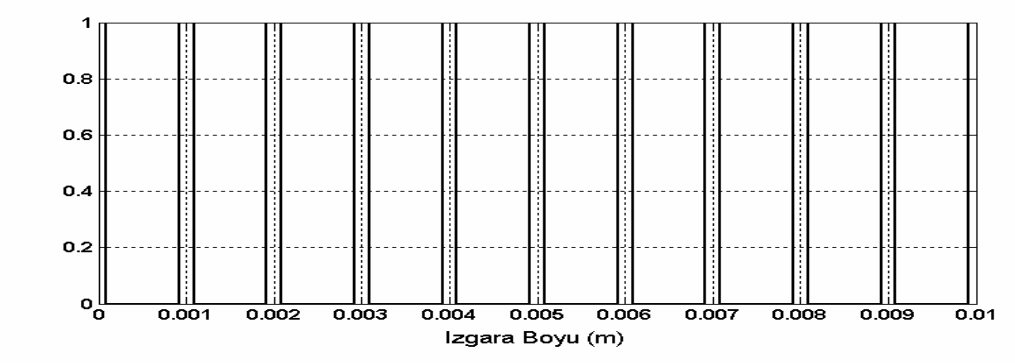
$$s_b = rect(z / z_1) \tag{6.7}$$

Burada s_b, bir P periyodu içindeki örnekleme fonksiyonu tanımlar ve z_1 bir periyot içindeki darbe uzunluğudur. $R = z_1 / P$ ise örnekleme oranıdır. Örnekleme fonksiyonun ızgara ekseni boyunca z' ye göre periyodik değişimi şu eşitlik ile tanımlanabilir.

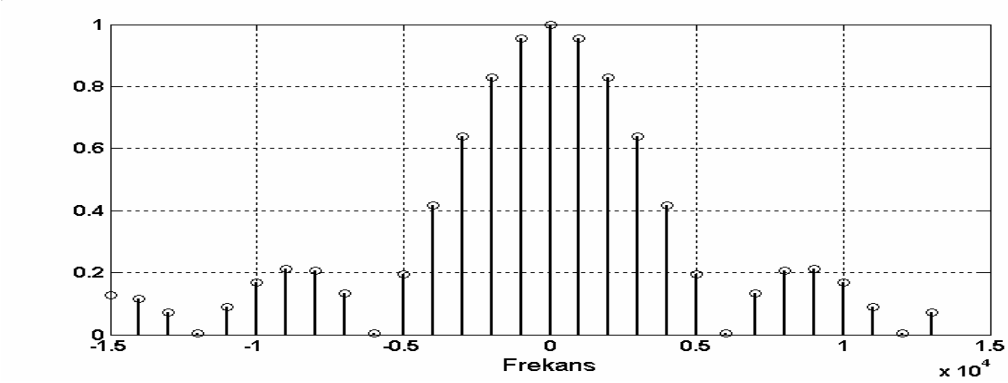
$$s(z) = s(b) \otimes \sum_m \delta(z - mP) \tag{6.8}$$

Bu eşitlikte $\otimes$, katlama (konvolüsyon) çarpımıdır. $s(z)$' nin Fourier transformu, frekans boyutunda *1/P* aralıklı bir tarak (comb) fonksiyonudur.

Şekil 6.5 (a) ve (b)' de, $s(z)$ ve onun Fourier transformu olan $S(u)$ 'nun birer örneği verilmiştir. Örneklenmiş fiber ızgarasının yansıma spektrumu, örnekleme fonksiyonu ile yakından ilişkilidir. Örnekleme fonksiyonu $s(z)$ 'nin Fourier transformu ile örneklenmiş fiber Bragg ızgarasının yansıma spektrumunu gösteren Şekil 6.6 dikkatlice incelendiğinde, ikisi arasındaki ilişki daha iyi anlaşılabilir. Örnekleme fonksiyonu olarak periyodik bir darbe dizisi kullanılmıştır. Örnekleme periyodu 1mm, örnekleme oranı R=1/6 ve etkin indis değişiminin tepe seviyesi $\delta n_{eff} = 9 \cdot 10^{-4}$ olarak belirlenmiştir.

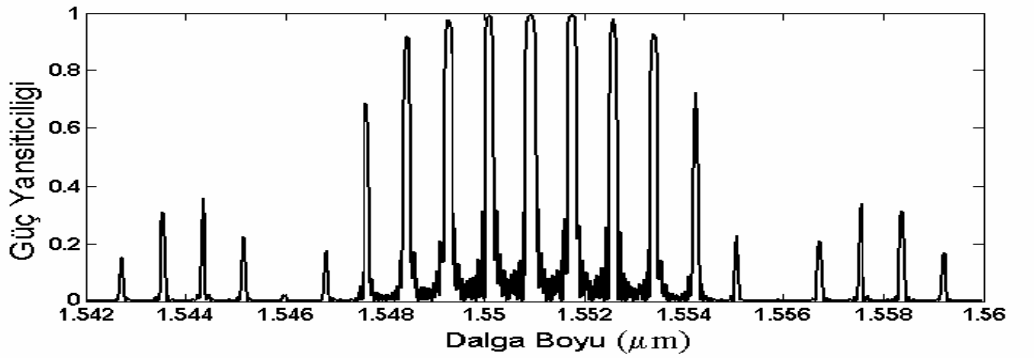


(a)



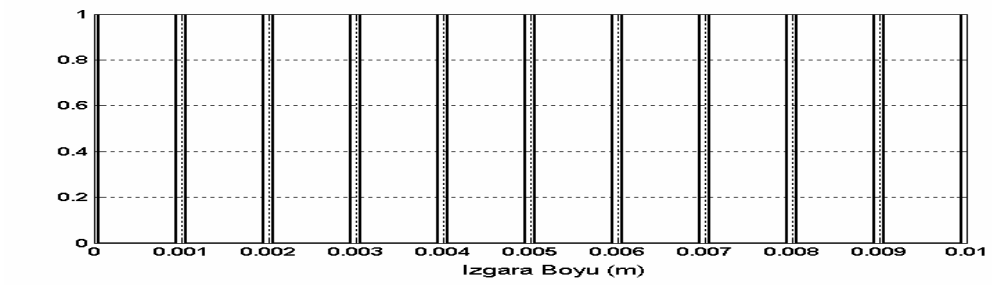
(b)

Şekil 6.5. (a) Dikdörtgensel örnekleme sinyali ve (b) Fourier spektrumu, R=1/6

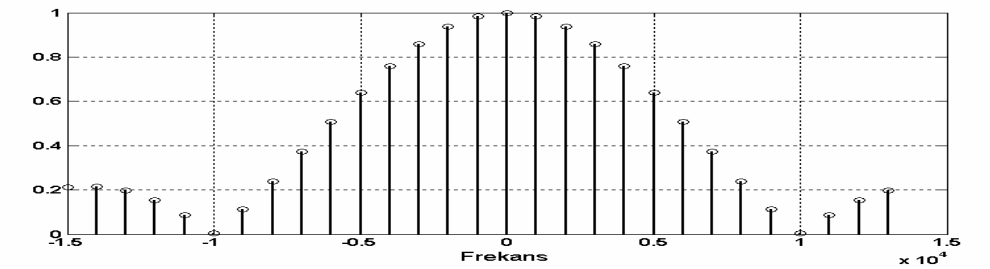


Şekil 6.6. Dikdörtgensel örneklenmiş fiber Bragg ızgarasının WDM kanallı yansıma spektrumu, *R*=1/6

Bu genlik maskesi altında oluşturulan örneklenmiş fiber Bragg ızgarasının yansıma spektrumunda, 1550nm etrafında kullanışlı (maksimum güç yansıtıcılık seviyesi>0.5) 9 kanalın oluştuğu Şekil 6.6'dan görülmektedir. Bu kanallar, şiddet ve konum açısından, Şekil 6.5'de verilen örnekleme fonksiyonun Fourier spektrumu ile karşılaştırıldığında, büyük ölçüde benzerlik gösterdiği söylenebilir. Kanallar eşit aralıklıdır ve bu da örnekleme fonksiyonun periyodik olmasının bir neticesidir.



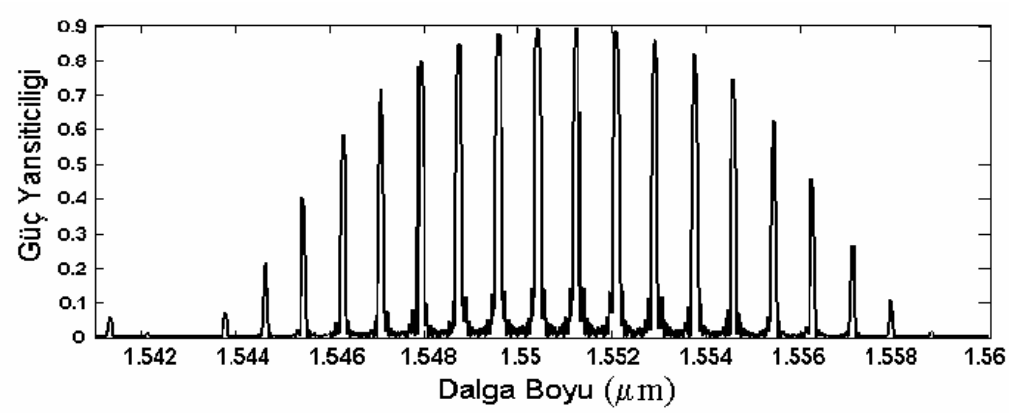
(a)



(b)

Şekil 6.7. (a) Dikdörtgensel örnekleme sinyali ve (b) Fourier spektrumu, R=1/10.

Şekil 6.7' de, örnekleme periyodu yine 1mm ancak, örnekleme oranı *R*=1/10 için elde edilen örnekleme sinyali ve bu sinyalin Fourier spektrumu görülmektedir. Şekil 6.8' de ise buna karşılık gelen Fiber Bragg ızgarasının yansıma spektrumu görülmektedir. Yine bu iki şekil arasındaki spektral benzerlikler, örnekleme fonksiyonunun optik ızgaranın yansıma spektrumu ile yakından ilişkili olduğunun göstergesidir.

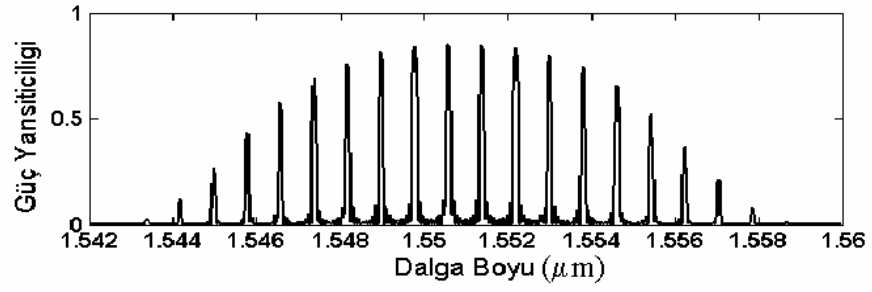


Şekil 6.8. Dikdörtgensel örneklenmiş fiber Bragg ızgarasının WDM kanallı yansıma spektrumu, *R*=1/10.

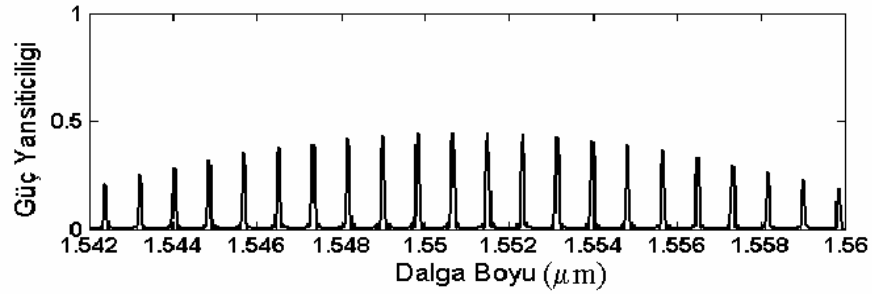
Şekil 6.9' da verilen yansıma spektrumları, örnekleme oranı *R* sırayla 1/15, 1/20 ve 1/30 olan üç ayrı örneklenmiş FBG için elde edilmiştir. Bu spektrumlardan, örnekleme oranı sıfıra doğru yakınlaştıkça, 1542nm-1560nm dalgaboyu aralığında 22 kanalın birbirlerine göre giderek benzeş bir özelliğe kavuştuğu kolaylıkla anlaşılabilir. Ancak bu iyileşmenin paralelinde, 1550nm civarına yakın yüksek yansıtıcılığa sahip kanalların şiddetinin azaldığı görülmektedir. Başka bir ifade ile, spektrum genişledikçe örneklenmiş FBG'nin ortalama yansıtıcılığı azalmıştır.

Örneklenmiş FBG'nin yansıma spektrumundaki kanalların şiddeti, etkin kırılma indisi $\overline{\delta n}_{eff}(z)$'in tepe genliği ile doğru orantılı değişir. Bunun sebebi, bağlaşımlı kip katsayılarından κ' nın $\overline{\delta n}_{eff}(z)$ ile doğru orantılı olmasından kaynaklanır.

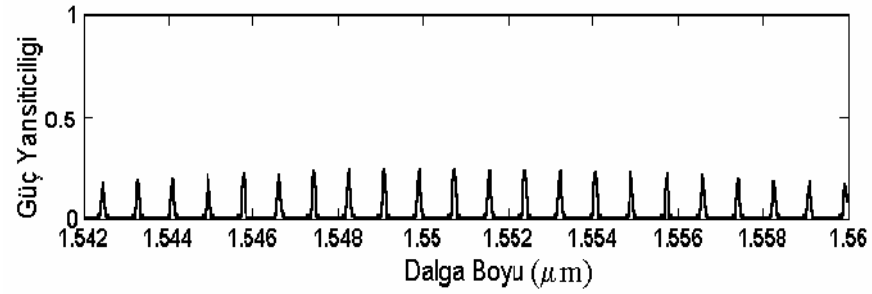
$$\kappa = \frac{\pi}{\lambda} v \overline{\delta n}_{eff} \tag{6.9}$$



(a)



(b)

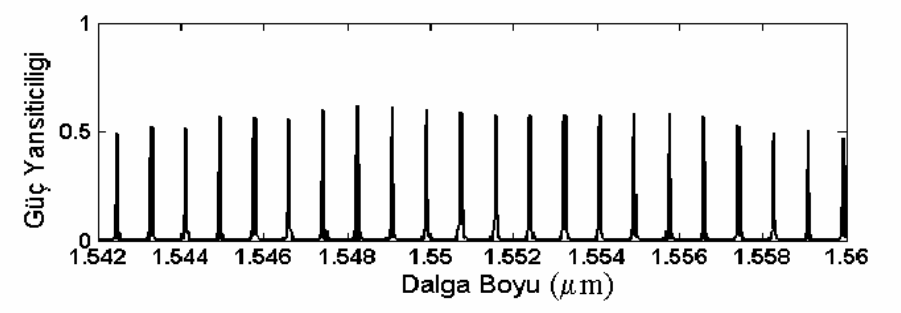


(c)

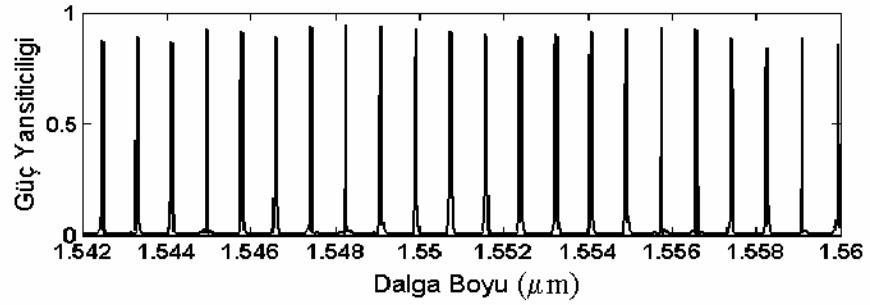
Şekil 6.9. Dikdörtgensel örneklenmiş fiber Bragg ızgarasının farklı R değerleri için WDM kanallı yansıma spektrumları. (a) *R=1/15*, (b) *R=1/20 ,* (c) *R=1/30,* *L*=10mm, $\overline{\delta n}_{eff} = 8 \cdot 10^{-4}$.

Örneklenmiş FBG'nin özdeş N adet kanal üretebilmesi için, çekirdek ızgaraya göre N kat büyüklükte δn_{eff} gerekmektedir. Ancak δn_{eff} için kabul edilebilir üst sınır teorik olarak 10^{-3}' tür [51]. Şekil 6.10'daki spektrumlar, örnekleme oranı *R=1/30* olan farklı uzunluklu (20, 40 ve 60mm) fiber Bragg ızgaralarının, güç yansıtıcılık-fiber ızgara uzunluğu ilişkisini ortaya koymak için elde edilmiştir. FBG'nin boyu arttıkça yansıtıcılığın şiddetlendiği anlaşılmaktadır. Spektrum 6.10 (c)'de, 1542-

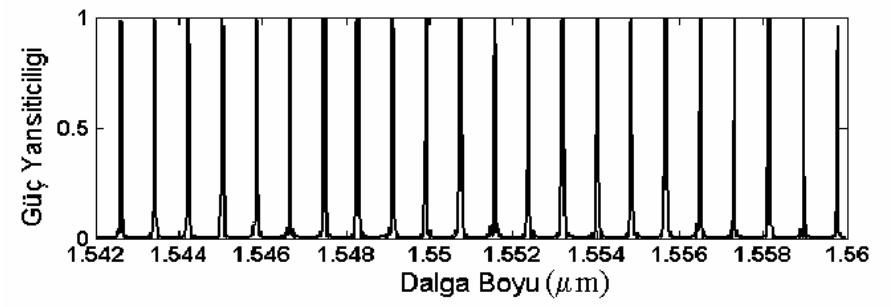
1560nm aralığında ITU ızgara standardına uygun hemen hemen özdeş 22 kanal üretilmiştir. Spektral pencereyi genişleterek özdeş kanal sayısı N'yi daha da artırmak için, örnekleme oranı *R* azaltılırken ızgara uzunluğunu artırmayı önerebiliriz. Böylece, *R*'nin azaltılmasıyla özdeş kanal sayısı N artarken, yansıma şiddetindeki düşüş, ızgara uzunluğu artırılarak telafi edilebilir. Ancak ızgara uzunluğu arttıkça, imalat teknolojisindeki üretim zorluğunun, fiber ızgarasının maliyetini artıracağı dikkate alınmalıdır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.10. Dikdörtgensel örneklenmiş fiber Bragg ızgarasının farklı *L* değerleri için WDM kanallı yansıma spektrumları, *R*=1/30 (a) *L*=20mm, (b) *L*=40mm *ve* (c) *L*= 60mm.

6.2.2. Sinc Biçimli Örnekleme

Dikdörtgensel genlik örneklemede, fiber ızgarasında örneklenmemiş büyük kısımlar olduğu hemen fark edilebilir. Örneğin Şekil 6.10(c)' deki spektrumun elde edilmesi için örnekleme oranı R=1/30 ve örnekleme periyodu 1mm olarak alınmıştı. Bu durumda, 60mm uzunluklu fiber ızgarasının her bir 1mm'lik kısmının sadece 1/30'u boyunca ızgaranın varlığından söz edebiliriz. Yani, fiber boyunca ızgaralanmamış büyük boşluklar mevcuttur. Özdeş kanal sayısı N' yi artırma çabası içinde, R azaldıkça, bu boşluklar daha da artacaktır. Izgaralanmamış bu boşlukların fiber Bragg ızgarasında yansıtıcılığa hiçbir katkısı yoktur.

SFBG tasarımı konusunda yapılan araştırmalarda, dikdörtgensel (rect) örneklemeden başka sinc biçimli genlik örnekleme fonksiyonun kullanıldığı göze çarpmaktadır [63,64]. Bu çalışmalarda, sinc biçimli örnekleme fonksiyonunun önerilmesinin başlıca sebebi, dikdörtgensel örneklemiş fiber ızgarasının kanal sayısı N arttıkça, azalan yansıtıcılığı şiddetlendirmek için, gerek duyulan etkin kırılma indis farkı δn_{eff} 'nin tepe genliğinin gerçekçi boyutlara indirgenmesidir. Ya da bu ihtiyacın kırılma indisi farkı yerine, ızgara uzunluğunu artırarak karşılandığı durumlarda ızgara uzunluğunu sınırlandırmaktır.

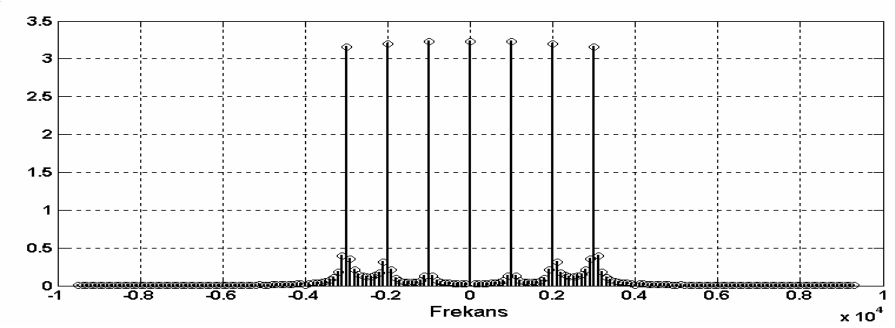
Sinc biçimli örnekleme fonksiyonu Eş.6.10' daki gibi tanımlanabilir.

$$s(z) = \sum_{m=1}^{M} \left\{ \left[\frac{\sin(K\pi \frac{z}{P})}{K \sin(\pi \frac{z}{P})} rec\left(\frac{z}{z_1} \right) \right] \otimes \delta(z - mP) \right\} \tag{6.10}$$

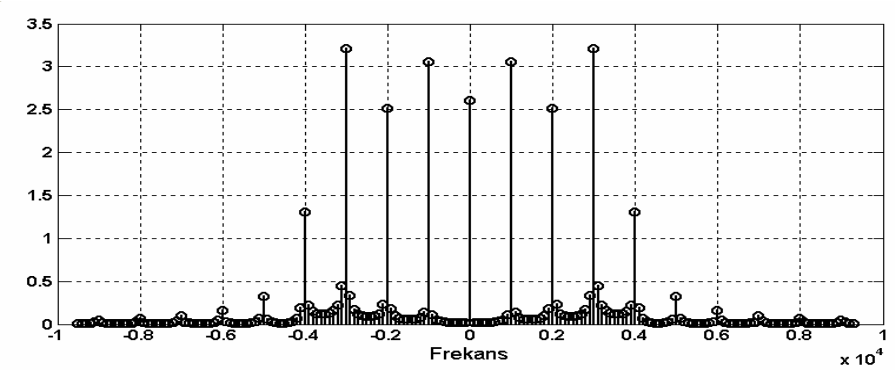
Burada K, pozitif tamsayılardır ve M ise toplam örnek sayısıdır. P yine örnekleme periyodu, $\delta(z)$ ise Dirac-Delta fonksiyonudur. $R = z_1 / P$ örnekleme oranıdır ve bu oran $(0 < R \leq 1)$ aralığında değişebilir. $rect(z / z_1)$, dikdörtgensel fonksiyon olup aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$rect\left(\frac{z}{z_1}\right)=\begin{cases}1, & |z|\le z_1\\ 0, & |z|>z_1\end{cases} \tag{6.11}$$

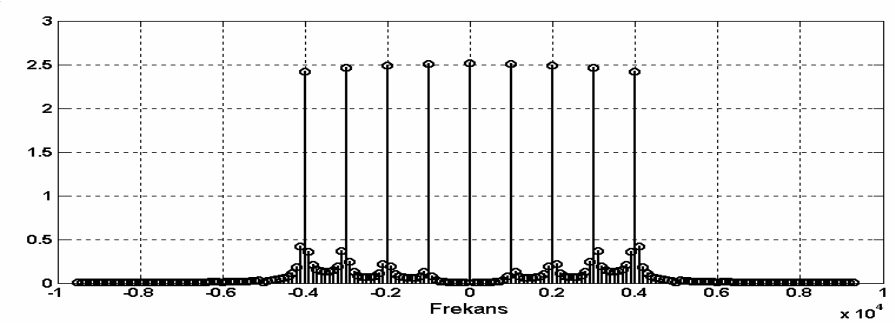
s(z)' nin Fourier spektrumuna göz atmakta fayda vardır. Şekil 6.11'deki spektrumlar *K*' nın farklı değerleri için elde edilmiştir.



(a)



(b)



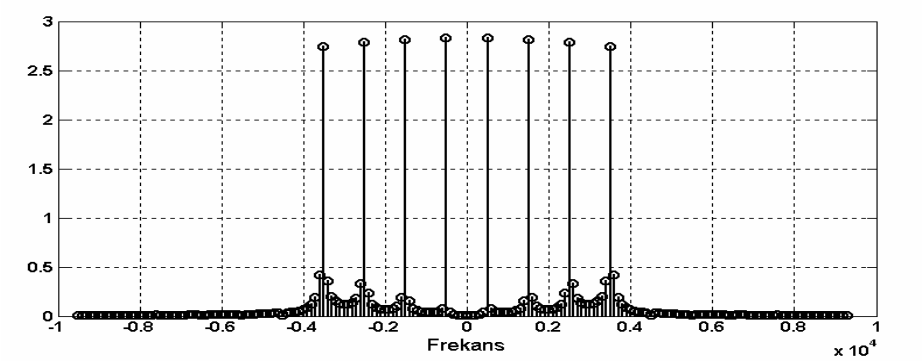
(c)

Şekil 6.11. Sinc biçimli örnekleme sinyalinin farklı *K* değerleri için elde edilen Fourier spektrumları, (a) *K*=7, (b) *K*=8, (c) *K*=9, diğer parametreler *P*=1mm, *N*=10, *R*=1

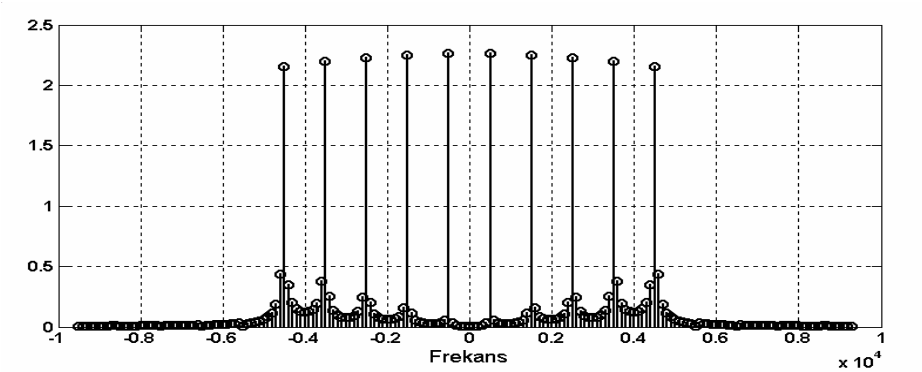
Şekil 6.11'de, üç ayrı K değerleri için sinc biçimli örnekleme sinyalinin Fourier spektrumu görülmektedir. $K=7$ ve $K=9$ için elde edilen (a) ve (c) spektrumlarda, hemen hemen aynı şiddette ve sırayla 7 ve 9 adet Fourier katsayılarının, diğerlerine göre oldukça şiddetli olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, örneklenmiş fiber ızgarasındaki WDM kanalların spektral yerleşimi açısından, oldukça verimli olacağının bir işarettir. Ancak, $K=8$ için elde edilen spektrumda, Fourier katsayıları arasında belirgin bir baskın grup oluşmamıştır. K'nın farklı değerleri için yapılan örneklemelerden, tek sayılı K değerleri için elde edilen spektrumlar, K sayıda WDM kanalı için istenilen spektral cevabı karşılamaktadır. Aynı durumun, çift sayıdaki kanallar üzerinde geçerli olması için, Eş. 6.10'da verilen örnekleme fonksiyonun Fourier transformuna bir $\pi/2$ kadar faz kayması ilave edilir [64]. Buna göre sinc biçimli örnekleme fonksiyonu aşağıdaki verildiği gibi tanımlanır.

$$s(z)=\begin{cases}\displaystyle\sum_{m=1}^{M}\left\{\left[\frac{\sin(K\pi\frac{z}{P})}{K\sin(\pi\frac{z}{P})}rec\left(\frac{z}{z_1}\right)\right]\otimes\delta(z-mP)\right\} & K=1,3,5,7,... \\ \displaystyle\sum_{m=1}^{M}\left\{(-1)^m\left[\frac{\sin(K\pi\frac{z}{P})}{K\sin(\pi\frac{z}{P})}rec\left(\frac{z}{z_1}\right)\right]\otimes\delta(z-mP)\right\} & K=2,4,6,...\end{cases} \tag{6.12}$$

Şekil 6.12'de verilen Fourier spektrumları, Eş. 6.12 ile tanımlı sinc biçimli örnekleme fonksiyonun K=8 ve K=10 değerleri için elde edilmiştir. Daha önce, K=7 ve K=9 için elde edilen spektrumlara benzer biçimde (Bkz. Şekil 6.11 (a) ve (c)) Şekil 6.12 (a) ve (b)' de sırayla 8 ve 10 kanalı karşılayan Fourier katsayılarının, diğer katsayılara oranla daha şiddetli olduğu görülmektedir. Böylece, Eş. 6.12 ile çift ya da tek değerlikli K değeri belirlenerek, istenilen sayıda onlarca kanalı üretebilecek örnekleme fonksiyonu belirlenebilir.



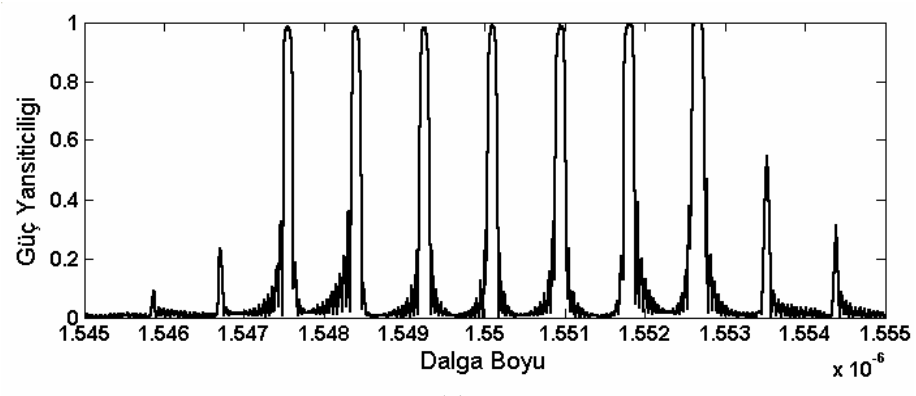
(a)



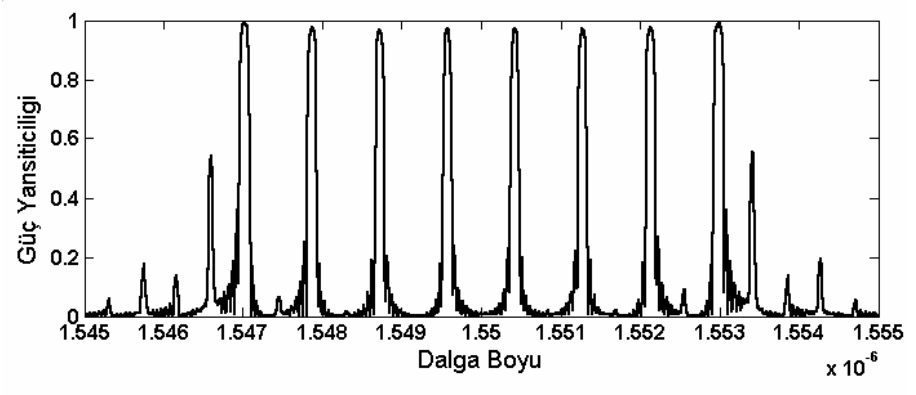
(b)

Şekil 6.12. Sinc biçimli örnekleme sinyalinin farklı *K* değerleri için elde edilen Fourier spektrumları, (a) *K*=8, (b) *K*=10, diğer parametreler *P*=1mm, *N*=10, *R*=1.

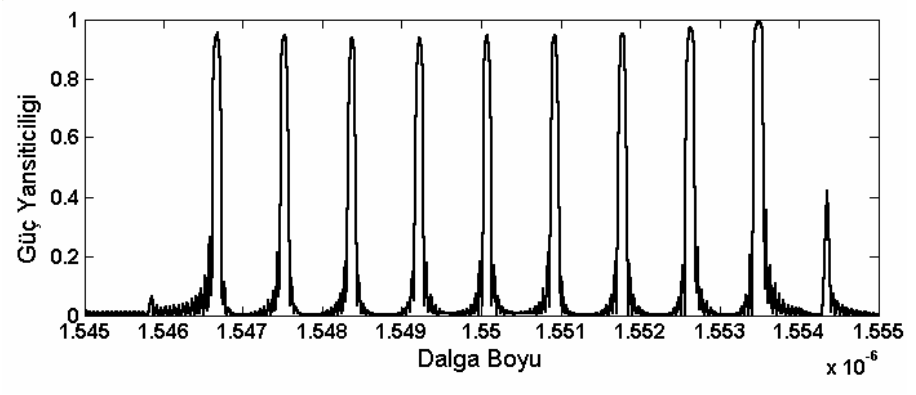
Şekil 6.13'te, sinc biçimli SFBG' nin *K*=7, 8 ve 9 değerleri için elde edilen üç ayrı yansıma spektrumları görülmektedir. Kanalların sayılarına ve karakteristiklerine dikkat edilirse, (a), (b) ve (c) şekillerinde hemen hemen özdeş ifade edebileceğimiz sırayla 7, 8 ve 9 kanal elde edilmiştir. Arzu edildiği takdirde, kanal sayısı daha da artırılabilir. Ancak, bu sayı arttıkça kanalların şiddetinin azalması kaçınılmazdır ve bu azalma, ızgara boyu ya da etkin kırılma indis farkı $\delta n_{eff}(z)$'nin elverdiği ölçüde artırılması ile telafi edilebilir.



(a)



(b)



(c)

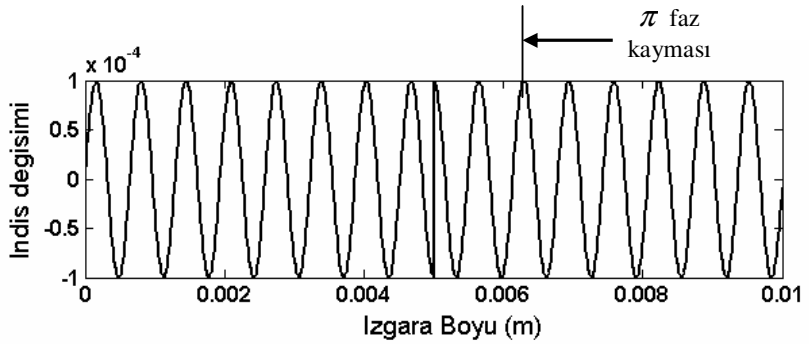
Şekil 6.13 Sinc örneklenmiş fiber Bragg ızgarasının farklı K değerleri için WDM kanallı yansıma spektrumları, (a) K=7, (b) K=8 ve (c) K=9, diğer parametreler R=1, L=15, $\delta n_{eff} = 8 \cdot 10^{-4}$, P=1mm

6.2.3. Faz örnekleme

Genlik örneklemede, kırılma indisinin modülasyon zarfının genliği örneklendiği için örnekleme periyodunun önemli bir yüzdesinde (*100·(1-R)*) bu genlik sıfırdan geçer. Bu kısımların ızgara yansıtıcılığına herhangi bir katkısı olmadığı için, genlik örneklenmiş fiber yansıma ızgarasının yansıtıcılık şiddeti çekirdek (örneklenmemiş) ızgaraya göre her şartta düşük olacaktır.

Fiber ızgarasının fazının örneklenmesi, kırılma indisinin modülasyon zarfının genliğinin yerine modülasyon fazını değiştiren bir örnekleme yaklaşımıdır. Faz örneklemede, modülasyon zarfının genliği olan etkin kırılma indis farkı $\delta n_{eff}(z)$'in tepe genlik seviyesi ızgara boyunca sabittir ve değişen sadece ızgara fazı $\phi(z)$'dir. Böylece, ızgara yansıtıcılığı genlik örneklemeye göre daha şiddetli olacaktır ki, bu durum faz örneklemenin en ilgi çekici özelliğidir. Genlik örneklemiş fiber yansıma ızgaraları ile dispersiyon ve dispersiyon eğim kompanzasyonu konusunda yapılan araştırmalarda, yüksek kapasiteli WDM sistemler için her ne kadar iyi sonuçlar elde edilmiş olsa da [28,65], kompleks yapılı genlik örneklenmiş fiber ızgara imalatı, çoklu ışın işlemi gerektirdiği için, faz örneklenmiş fiber ızgara imalatına göre nispeten daha zordur.

Şekil 6.14'te tekdüze bir fiber ızgarasının tam ortasına uygulanan faz kayması ve bunun neticesinde oluşan indis farkı $\delta n_{eff}(z)$'nin modülasyonu görülmektedir.



Şekil 6.14. *L*/2 noktasında π kadar faz kaydırılmış fiber ızgarasının indis değişimi.

İndis modülasyonuna dahil edilen bu faz kaymasının yansıma spektrumuna etkisini analiz edebilmek için, matris transfer metodunu kullanan modellemenin geliştirmesi gerekir. Bunun için önceki çalışmada detayı sunulan modelde, i. adım için hesaplanan her transfer matrisine, dikdörtgensel örneklemede olduğu gibi aşağıdaki faz çarpanı ilave edilmelidir.

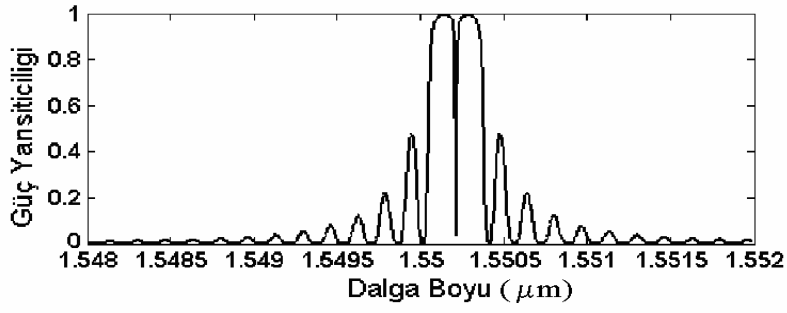
$$F_{pi} = \begin{bmatrix} \exp(-\frac{i\phi_i}{2}) & 0 \\ 0 & \exp(\frac{i\phi_i}{2}) \end{bmatrix} \tag{6.13}$$

Burada F_{pi}, i. adımda ızgaraya eklenen ϕ_i faz değişimini ifade eden kompleks çarpandır ve sadece faz kaymasının olduğu nokta için 1'den farklıdır. Örneğin, Şekil 6.14'teki gibi bir faz örneklemesi içeren fiber ızgarası için, ızgara boyunun 100 adıma bölünmesi ile gerçekleştirilen nümerik analizde, *i=50* için $\phi_i = \pi$ ve diğer *i* değerleri için $\phi_i = 0$ olarak hesaplamaya katılır.

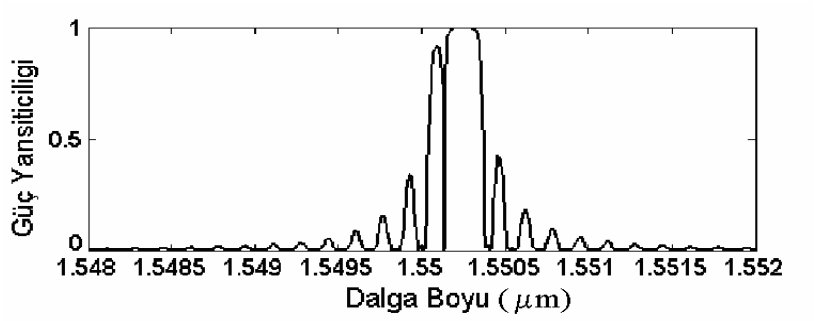
Şekil 6.15' deki spektrumlar, Şekil 6.14'deki gibi *L*/2 noktasına farklı faz kaymaları dahil edilmesi durumunda, tekdüze bir fiber Bragg ızgarasının yansıma spektrumunda oluşan değişimler için elde edilmiştir. Şekil 6.15 (a)'da π faz kaymasının, yansıma spektrumunu özdeş ve bitişik iki kanala ayırdığı görülmektedir. $\pi/2$ ve $3\pi/2$ faz kaymalarında, iki kanal arasındaki denge değişmiştir. Buradan, ızgaranın birden fazla farklı noktalarında π faz kayması oluşturarak, yansıma spektrumunda oluşan kanal sayısının artırılması düşünülebilir. Bu aşamada, faz kaymalarının ızgara boyunca pozisyonu tanımlayan bir faz örnekleme fonksiyonuna ihtiyaç olacaktır.

Literatürde Damman ızgara olarak adı geçen yapı bir ikilik faz örnekleme ızgarasıdır [66]. Damman örneklemeli FBG, örnekleme periyodunda belirli sayıda π faz kaymaları oluşturarak tasarlanabilir [67]. Örneğin ızgara periyodu $\Lambda \approx 0.5\,\mu m$ ve

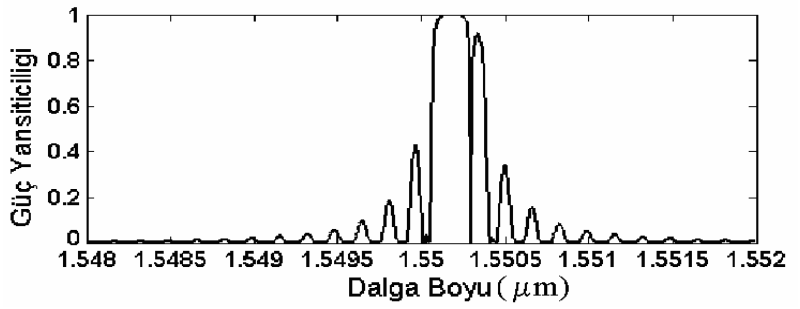
tasarım dalgaboyu $\lambda_D = 1550\,\text{nm}$ olan bir FBG için π faz kayması, faz maskesinde oluşturulan yaklaşık 250nm uzamsal kaymalar oluşturarak elde edilebilir[68].



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.15. Faz kaydırılmış fiber ızgarasının yansıma spektrumları, (a) π, (b) $\pi/2$, (c) $3\pi/2$.

Damman örnekleme fonksiyonu ikilik bir faz fonksiyonudur. Bu fonksiyon, her bir örnekleme periyodunda *K* sayıda 0 ve π şeklinde faz kaymaları içerir. Fonksiyon aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$s_b(z) = \sum_{n=0}^{K} \exp(i\phi_n) rect\left[\frac{z - \frac{z_{n+1} - z_n}{2}}{z_{n+1} - z_n} \right] \tag{6.14}$$

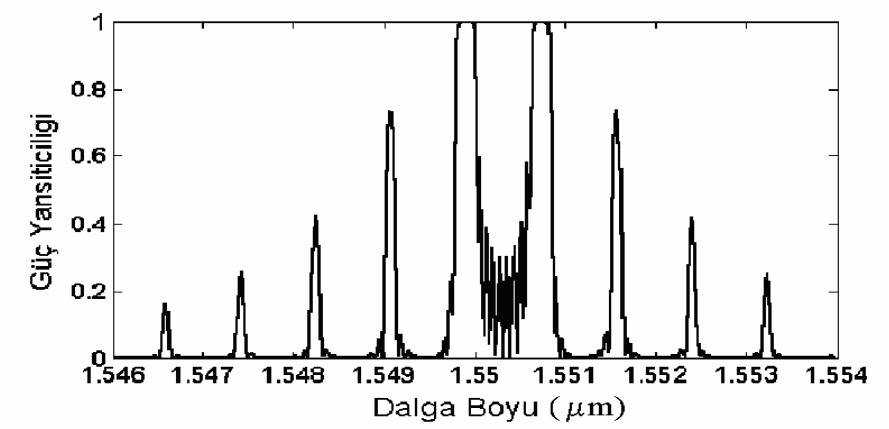
Burada $\theta_n = n\pi$' dir ve z_n, *n=0,1,2, ... ,K* için faz geçiş noktalarını temsil eder. Buna göre s_b(z), her faz geçiş noktasında, genliği 1 yada -1 şeklinde değişen bir dikdörtgensel fonksiyondur. z_n noktalarının tespiti konusunda iki farklı yaklaşım yapılabilir. İlki, örnekleme periyodunu eşit adımlara ayırarak ($z_{n+1} - z_n = sbt.$) periyodik faz kaymaları oluşturma yöntemidir [69]. Bu yöntemde P periyodu, m parçaya ayrılır ve her parçada yine m sayıda periyodik faz kaymaları meydana getirilir. Faz değişimi şu eşitlikle hesaplanabilir.

$$\phi_{jm+k} = \frac{2\pi jk}{m} \qquad 0 \le j,k \le m-1 \tag{6.15}$$

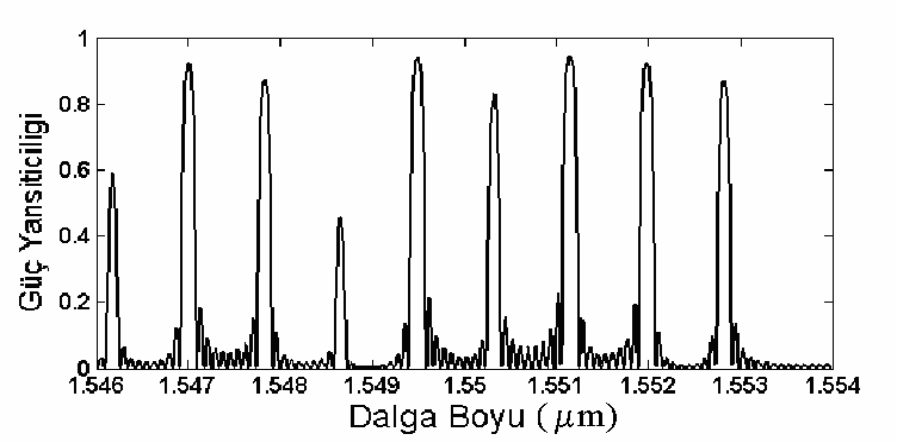
Burada j ve k, sırayla parça ve her parçadaki faz değişim yerini belirleyen indekslerdir. Örneğin, örnekleme periyodu iki eş parçaya ayrılırsa (m=2), her parçada ikişer faz değişimden toplam bir periyot boyunca dört faz değişimi belirlenir. Bu örneğe göre m=2 için faz değişimi, $\Delta z = P/4$ aralıklarla $\phi = [\{0,0\},\{0,\pi\}]$ şeklindedir. Şayet m=4 için bu tür bir örnekleme yapılırsa, periyot 4 eşit parçaya bölünür ve her parçada 4 faz kayması oluşturulur. Böylece faz dizisi, $\phi = 2\pi[\{0,0,0,0\},\ \{0,1/4,1/2,3/4\},\ \{0,1/2,0,1/2\},\ \{0,3/4,1/2,1/4\}]$ şeklinde elde edilir. Şekil 6.16' da, m=2 ve m=4 ile set edilen faz örneklemeli FBG' nin güç yansıtıcılık spektrumunu görülmektedir.

Şekil 6.16'da, faz örneklenmiş fiber ızgarasının yansıma spektrumunda, kanal sayısı arttıkça, kanallar arası benzerliğin giderek kaybolduğu görülmektedir. Buna karşın, faz örneklemenin dikdörtgen örneklemeye göre en önemli avantajı, etkin kırılma indis farkı δn_{eff}' in daha küçük tutulabilmesidir.

Faz örneklemede yapılan bir başka teknik ise, faz kaymalarının π olduğu, faz geçiş noktalarının periyodik olmadığı örneklemeye dayanır. Bu durumda, faz geçiş noktalarının rastgele bir biçimde seçilemeyeceği de ortadadır. Faz geçiş noktalarını belirlemek için bir optimizasyon işlemine gerek vardır. Yakın bir zamanda yapılan çalışmada, 9 kanallı faz örneklenmiş FGB' nin faz kayma noktalarını belirlemek için "simulated quenching optimizasyon" kullanılmıştır [67]. Bu çalışmada, bir periyot içinde normalize edilmiş faz kayma noktaları için [0,077, 0,189, 0,402, 0,712, 0,781, 1] değerleri önerilmiştir. Şekil 6.17'deki spektrum, bu değerleri kullanarak elde edilen simülasyon sonucunu göstermektedir.

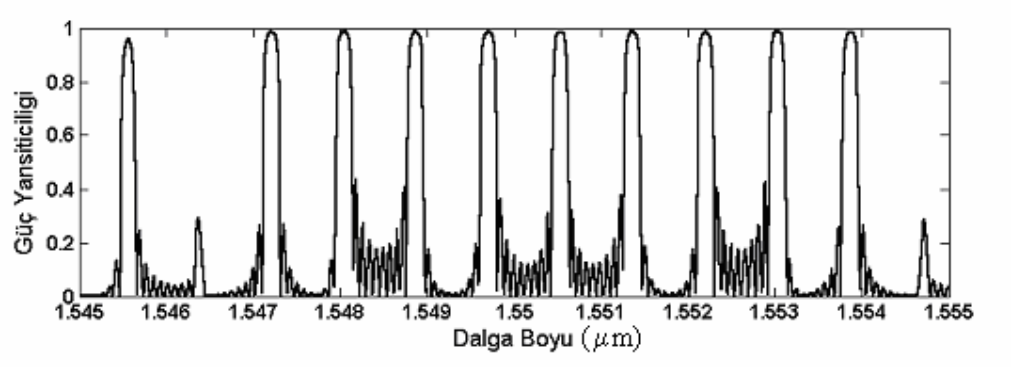


(a)



(b)

Şekil 6.16. Faz örneklenmiş fiber ızgarasının yansıma spektrumları, (a) *m=2*, (b) *m*=4, *L*=10mm, *P*=1mm, $\delta n_{eff} = 3 \cdot 10^{-4}$



Şekil 6.17. Faz örneklemeli fiber Bragg ızgarasının yansıma spektrumu, *L=10mm, P=1mm*, δn_{eff} =0,0007.

Şekil 6.17'de, faz örneklemeli FBG' nin yansıma spektrumunda, üretilen dokuz kanalın oldukça benzeş ve şiddetli olduğu açıkça görülmektedir. Optimizasyon ile elde edilen faz kayma noktaları, istenilen spektrumun elde edilmesi için oldukça önemlidir. Daha da önemlisi, faz örneklemeli bir FBG' nin, artan kanal sayısına karşılık gerek duyulan indis modülasyonunun maksimum değeri $\delta n_{eff\ (\max)}$' in , $\sqrt{N}$ ile doğru orantı olmasıdır. Oysa, genlik modülasyonlu örneklemeler için bu değer, *N* ile orantılı olduğu için δn_{eff} ' in daha yüksek tutulması gerekir, ya da alternatif yaklaşımla ızgara boyu *L*'nin uzatılması gerekir.

6.3. SFBG İle Dispersiyon ve Dispersiyon Eğim Uygulamaları

Yüksek bit hızları, birden fazla dalgaboylu kanallar ve daha uzun mesafeye ulaşım, DWDM optik iletişim sistemleri için evrimsel gelişimlerdir. Fiber optik sistemin tasarımında bugün gelinen noktada en kritik problem, kromatik dispersiyondur. Söz konusu ortam yüksek hızlı DWDM olunca, kromatik dispersiyonun sistem performansına olumsuz katkısı, iletişim hızının karesi ile orantılı bir şekilde artar. FBG'lerin tek kanallı optik haberleşme sistemlerindeki hem optik filtre hem de dispersiyon kompanzatörü uygulamasına benzer biçimde, SFBG'lerin WDM sistemlerdeki uygulamaları, bu konuda çalışma yapan araştırmacıların yoğun ilgi odağıdır.

6.3.1. Dispersiyon ve Dispersiyon Eğim Hesabı

SFBG'lerin, WDM sistemlerde kromatik dispersiyonu dengeleme konusunda uygulamaları [70,71] , optik sistemin yapısına uygun ızgara tasarımı gerektirir. SFBG' nin, arzu edilen yansıma spektrumu elde edildikten sonra, ızgaranın dispersif etkisi, yansıtıcılık faz bilgisinden faydalanılarak hesaplanır. Şayet ızgaraya bir dispersif etki kazandırılacak ise bu, ızgaranın etkin kırılma indisinin modülasyonuna cıvıltı ($d\lambda_D/dz$) ilave edilerek sağlanır.

Dispersiyon eğim problemi, fiberoptik haberleşme sistemleri geliştikçe önemi artan bir diğer sorundur. Özellikle WDM sistemlerde, herhangi bir kanal için dispersiyon tamamıyla kompanze edilse bile, optik fiberin çekirdek indisinin dalgaboyuna doğal bağımlılığından dolayı, kanallar kendi aralarında farklı grup gecikmelerine maruz kalacaktır. Dispersiyon eğimi ya da 2. dereceden dispersiyon olarak ifade edilen bu problem, optik fiber hattının sonuna doğru ilerledikçe belirginleşir ve uzun mesafeli WDM sistemlerde iletim mesafesine etki eden en önemli sınırlayıcı faktör olur. Bu aşamada, sadece dispersiyonun değil, dispersiyon eğiminin de hesaba katılması gerekir. Dispersiyon ve dispersiyon eğiminin bir optik haberleşme sisteminin iletim mesafesini sınırlaması şu şekilde hesaplanır [9].

$$L < \frac{2\pi C}{16 D \lambda^2 B^2} \tag{6.16}$$

$$L < \frac{2\pi C}{16 \left| S_D \Delta\lambda \right| \lambda^2 B^2} \tag{6.17}$$

Burada L, optik hattın iletim mesafesi, D fiber dispersiyonu, S_D fiber dispersiyon eğimi ve B bit hızıdır. Optik hattın iletim mesafesi belirlenirken, her iki eşitliği de sağlayacak şekilde hesaplanmalıdır. Örneğin 10Gbps bit hızında 100GHz kanal aralıklı 32 kanallı bir WDM sistemi düşünelim. 4,2ps/nm-km dispersiyona ve 0,085ps/nm^2-km dispersiyon eğime sahip bir standart LEAF fiber, 1550nm çalışma dalgaboyunda dispersiyondan dolayı 117 km, dispersiyon eğiminden dolayı 113 km'

lik bir mesafeye izin verir. Bu durumda iletim hattı 113 km ile sınırlandırılmış olur. Dispersiyon eğimi S_D ve bağıl dispersiyon eğimi *RDS* aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$S_D = \frac{dD}{d\lambda} \qquad RDS = \frac{S_D}{D} \tag{6.18}$$

Eğer, ızgaranın *RDS*' si optik fiber hattın *RDS*' ne uyumlu hale getirilebilirse, dispersiyon ve dispersiyon eğimi birlikte eş zamanlı kompanze edilmiş olur. Çizelge 6.1'de, ticari alanda kullanılan birkaç fiberin RDS'i verilmiştir.

Çizelge 6.1. Farklı tip fiberlerin RDS değerleri

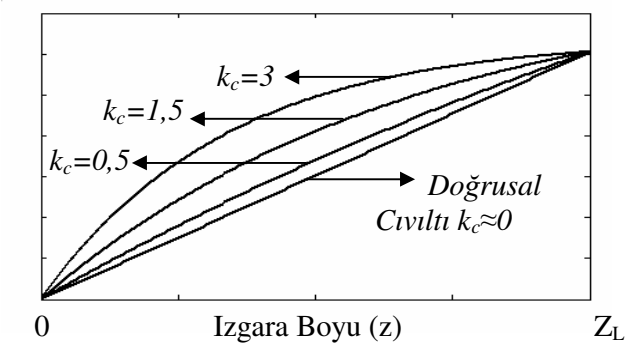
Fiber Tipi	RDS
Corning SMF-28	0.0032
Corning LEAF	-0.092
Corning LS	0.026
Lucent TrueWave RS	0.022

Izgara periyodu Λ' ye dahil edilen doğrusal cıvıltı ($d\lambda_D/dz=sbt=C$) yerine, doğrusal olmayan cıvıltı yerleştirilerek, $\frac{d\lambda_D}{dz} \propto \exp(z)$ olacak biçimde ızgaranın dispersiyon karakteristiğine eğim kazandırılabilir. Tasarım dalga boyu λ_D' nin, z' ye göre doğrusal olmayan değişimi aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\frac{d\lambda_D}{dz} = \frac{CL}{1-\exp(-k)}\left[1 - exp(-k_c z/L)\right] \tag{6.19}$$

Burada C, doğrusal cıvıltı katsayısı, k_c doğrusal olmayan cıvıltı katsayısı ve L ızgara boyudur. λ_D' nin her iki tür ızgara için z' ye göre değişimi Şekil 6.18'de görülmektedir. k_c parametresi sıfıra doğru yaklaştıkça cıvıltı değişimi giderek

doğrusallaşır. Ancak burada, k_c parametresi tam olarak sıfıra eşit olmamalıdır. Aksi takdirde Eş. 6.19 tanımsız olacaktır.

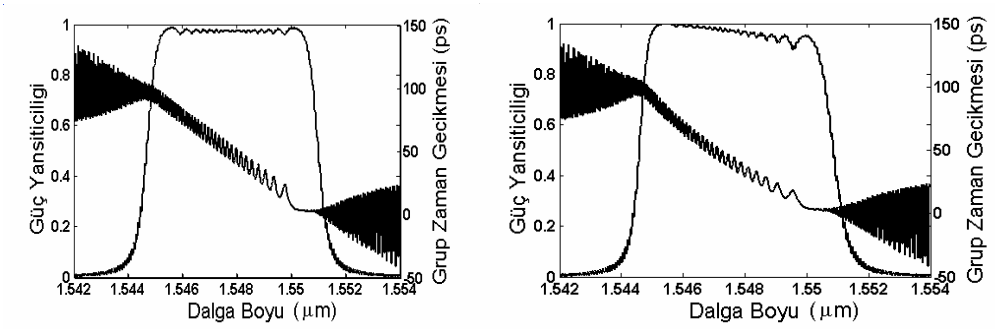


Şekil 6.18. Farklı k_c değerleri için doğrusal olmayan cıvıltı parametresinin değişimi

6.3.2. Dispersiyon ve Dispersiyon Eğim Uygulamaları

Tek kanallı optik haberleşme için dispersiyon ve dispersiyon eğim uygulamaları

SFBG' nin dispersiyon ve dispersiyon eğim için verdiği spektral cevabı araştırmadan önce, Eş. 6.19'u FBG için uygulayarak, beklenen dispersiyon ve dispersiyon eğim karakteristiğini sağlayıp sağlamadığı test edilebilir. Şekil 6.19'da, 10mm uzunluklu doğrusal ve doğrusal olmayan iki ayrı FBG' nin yansıma ve grup gecikme spektrumları görülmektedir.

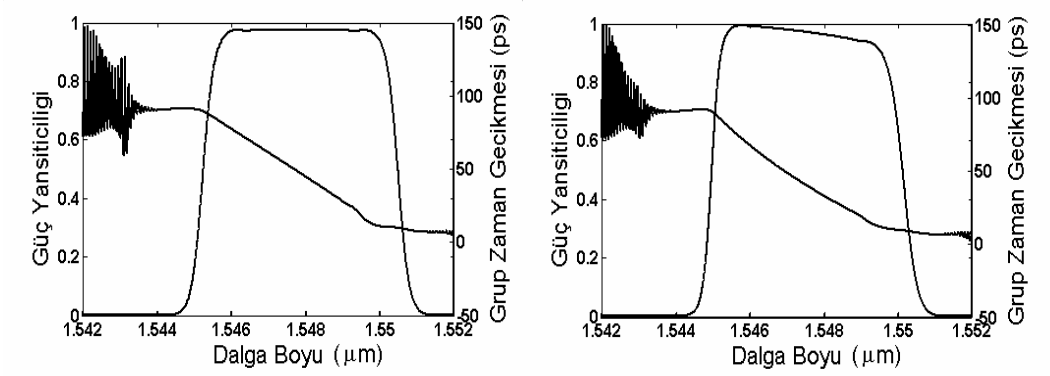


(a) (b)

Şekil 6.19. Cıvıltılı FBG' nin güç yansıtıcılık ve grup zaman gecikme eğrileri, (a) doğrusal cıvıltılı (b) doğrusal olmayan cıvıltılı.

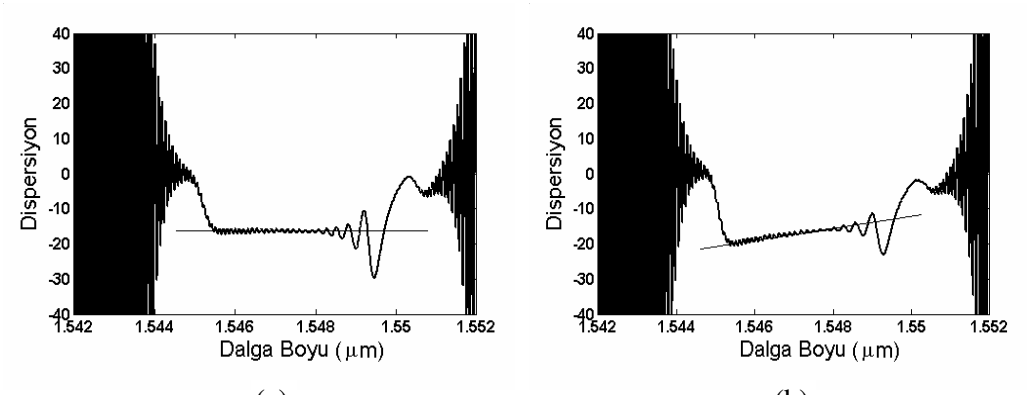
Şekil 6.19'da, verilen iki ayrı spektrumdan soldaki grup gecikme eğrisinin doğrusal, sağdakinin eğrisel bir yol izlediği görülmektedir. Sağdaki spektrumun grup zaman gecikmesi eğrisinin dalgaboyuna göre ikinci dereceden türevi sabittir. Başka bir ifade ile dispersiyon eğimi içermektedir ve bu durum, dispersiyonun dalgaboyu ile doğrusal bir değişim gösterdiğinin bir ispatıdır. Eğer, ızgaranın dispersiyon eğimi, hattın dispersiyon eğimine uyumlu olursa, dispersiyonla beraber dispersiyon eğim problemine de çözüm sunulmuş olacaktır. Şekil 6.19' daki grup zaman gecikme eğrilerinin yüksek dalgalanmalar gösterdiği açıktır. Bu dalgalanmalar, şiddeti azaltılmadığı taktirde dispersiyon eğrisinde daha da şiddetlenecektir. Önceki çalışmalarda, ızgarayı apodize ederek bu problemin üstesinden gelinmişti. Burada da aynı tekniği kullanarak daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

Şekil 6.20'de, yukarıda sözü edilen iki ayrı ızgarayı, $\tanh(\alpha = 4, \beta = 3)$ ile apodize ederek elde edilen güç yansıtıcılık ve grup zaman gecikme eğrileri görülmektedir. Şekil 6.20'de, apodize edilen cıvıltılı FBG' nin güç yansıtıcılık ve grup zaman gecikme eğrilerindeki dalgalanmaların şiddetin önemli derecede azaldığı anlaşılmaktadır. Bu iyileştirme, ızgaranın dispersiyon ve dispersiyon eğimi karakteristiklerine de yansıyacaktır. Şekil 6.21'de verilen spektrumlar bu ızgaranın iki ayrı cıvıltıya karşılık verdiği dispersiyon cevabını yansıtmak için elde edilmiştir.



(a) (b)

Şekil 6.20. Apodize-cıvıltılı FBG' nin yansıma ve grup zaman gecikme eğrileri, (a) doğrusal cıvıltılı (b) doğrusal olmayan cıvıltılı

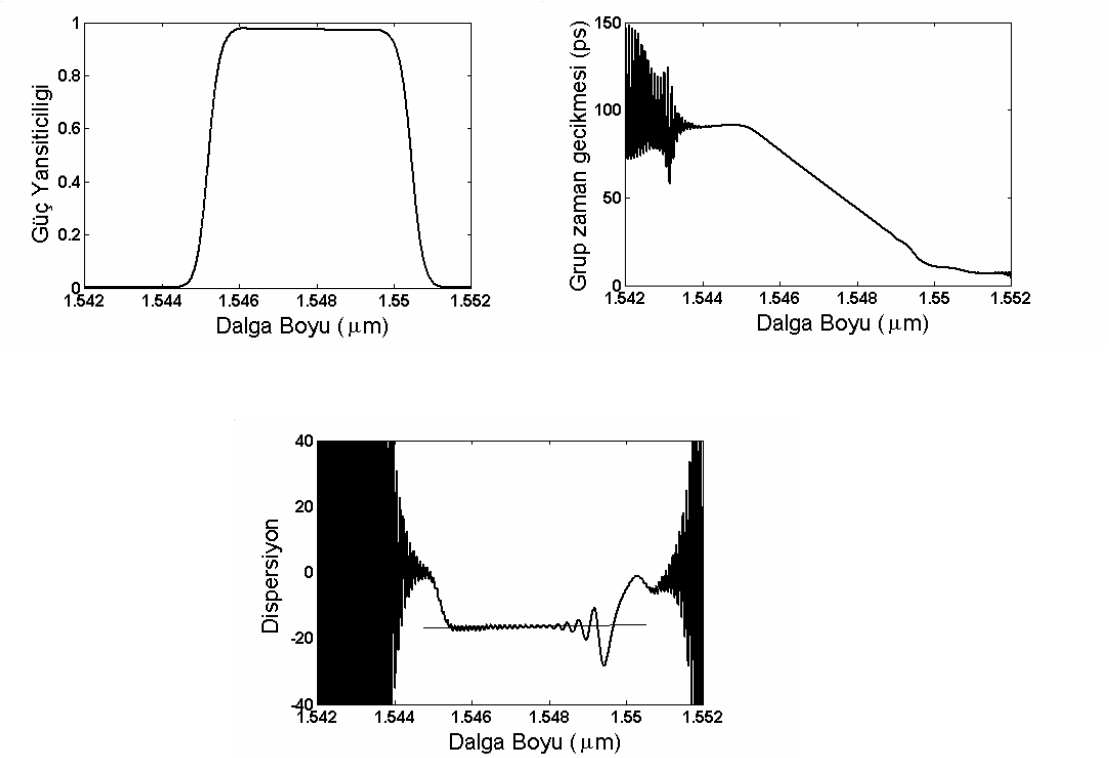


(a) (b)

Şekil 6.21. Apodize-cıvıltılı FBG' nin dispersiyon spektrumu, (a) doğrusal cıvıltılı (b) doğrusal olmayan cıvıltılı, k_c=0,5, δn_{eff} =0,0008, C=-3nm/cm, L=10.

Şekil 6.21-(a)'da, doğrusal cıvıltılı FBG, yansıma bandı boyunca -16,5ps/nm dispersiyon cevabı vermiştir ve dispersiyon eğimi sıfırdır. Şekil 6.21-(b)'deki doğrusal olmayan-cıvıltılı FBG ise, aynı yansıma bandında -20ps/nm ile -14 ps/nm aralığında hemen hemen doğrusal değişen dispersiyon cevabı vermiştir. Bu aralıktaki dispersiyon eğimi yaklaşık 1,67ps/nm' dir. Bu değerlerden, elde edilen dispersiyon eğiminin oldukça yüksek olduğu söylenebilir. Ancak bu örnek tasarım, ızgaranın dispersiyon eğim cevabını, spektrum üzerinde kolaylıkla görebilmek için verilmiştir. Doğrusal olmayan cıvıltı katsayısı k_c azaltılarak uygulamada kullanılan fiber cinsine göre dispersiyon eğim uyumu sağlanabilir. Şekil 6.22'de görülen spektrumlar dispersiyon eğimini düşürmek amacıyla k_c=0,1 için elde edilmiştir.

Şekil 6.22'de görülen güç yansıma spektrumunda, yansıma band genişliğinin, bir önceki şekilde k_c=0,5 için elde edilen spektrumla kıyaslandığında oldukça benzer olduğu söylenebilir. Ancak bu spektrumda, k_c=0,1 için elde edilen dispersiyon ve dispersiyon eğim değerleri sırayla D≈17ps/nm ve S_D=0,32ps/nm^2 dir. Bu örnek tasarımla, dispersiyon eğiminin k_c parametresi ile kontrol edilebileceği açıkça görülmektedir.

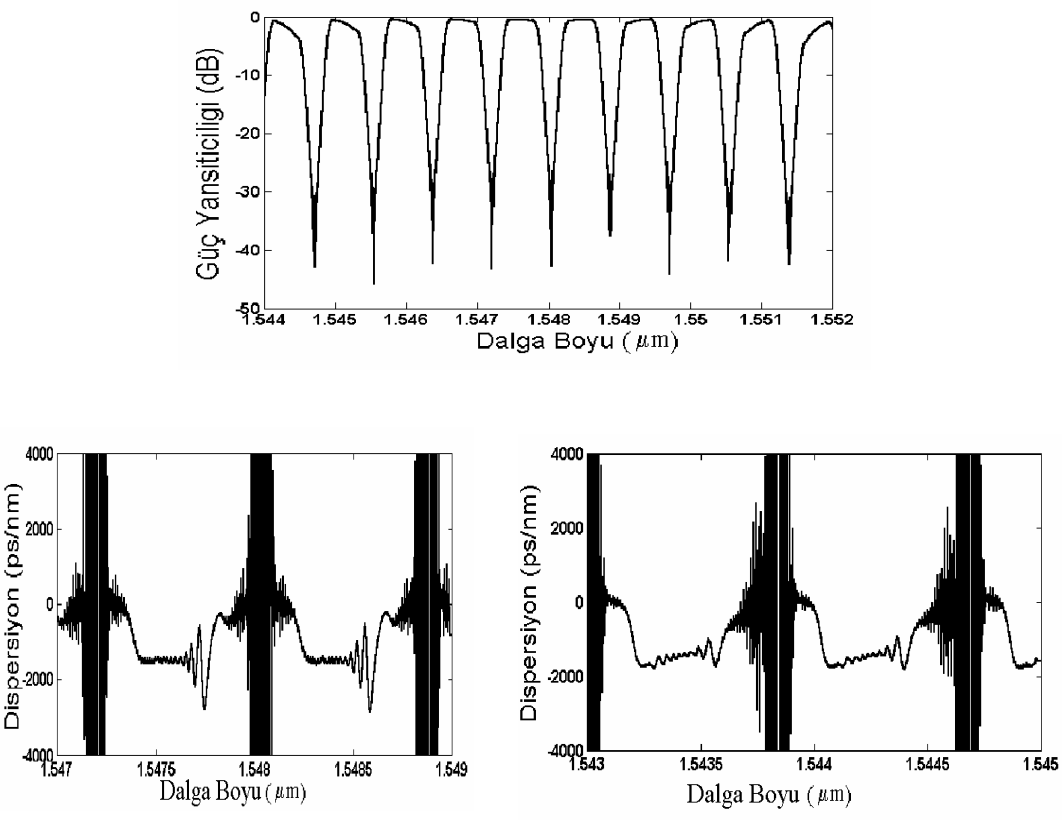


Şekil 6.22. Apodize-doğrusal olmayan cıvıltılı FBG' nin güç yansıtıcılık, grup zaman gecikmesi dispersiyon spektrumları, k_c=0,1 *ve* S_D=0,32ps/nm^2 D=17ps/nm, L=10.

WDM optik haberleşme için dispersiyon ve dispersiyon eğim uygulamaları

Bu aşamaya kadar yapılan çalışmalarda, tek kanallı FBG'lerin ile dispersiyon ve dispersiyon eğim karakteristikleri belirlenmiştir. FBG'nin indis modülasyonuna dahil edilen doğrusal ya da doğrusal olmayan cıvıltı, onun grup zaman gecikme ve dolayısı ile dispersiyon spektrumu şekillendirmektedir. Cıvıltılı bir FBG örneklenerek, dispersif davranışı yansıma spektrumunda oluşan birden çok kanal üzerinde analiz edilebilir.

Örnekleme periyodu 1mm, örnekleme oranı R=0,1 ve L=60mm uzunluğunda dikdörtgensel örneklenmiş bir FGB'ye, doğrusal ve doğrusal olmayan cıvıltıyı ayrı ayrı uygulayarak, ızgaranın spektral dispersiyon analizi yapılabilir. Bu analiz için, Şekil 6.23 ile verilen güç yansıtıcılık, ve dispersiyon spektrumlarını gösteren simülasyon sonuçları elde edilmiştir.



(a) (b)

Şekil 6.23. Apodize-cıvıltılı FBG' nin güç yansıtıcılık (dB) ve dispersiyon spektrumları. (a) doğrusal cıvıltılı $k_c=0$, (b) doğrusal olmayan cıvıltılı $k_c=0,5$, diğer parametreler L=60mm, C=-0,4, $tanh(\alpha=4,\beta=3)$ apodizasyon

FBG örneklenerek, Şekil 6.23' deki yansıma spektrumundan görüldüğü gibi 1552-1544nm aralığında hemen hemen özdeş 10 kanal üretilmiştir. Bu aralıkta ızgara, yaklaşık 500ps grup zaman gecikmesine karşılık 1500ps/nm dispersiyon etkisi vermektedir. İndis modülasyonuna dahil edilen cıvıltı, ızgaraya dispersif bir etki kazandırmıştır. Doğrusal cıvıltı ile oluşan dispersif etki (Şekil 6.23(a)), tüm kanalar için sabittir ve yaklaşık 1500ps/nm' dir. Doğrusal olmayan cıvıltı ise (Şekil 6.23(b)), ızgaranın dispersif etkisine dalgaboyu ile yaklaşık doğrusal değişen bir özellik kazandırmıştır. Eş. 6.19 ile verilen ızgara cıvıltısı için, k_c=0,5 ve C=-0,4 değerleri ile pozitif bir dispersiyon eğim karakteristiği elde edilmiştir. Izgaranın bu cevabı ile, bir optik haberleşme sisteminde hem dispersiyon hem de dispersiyon eğim probleminin telafisi mümkündür.

7. WDM VE DWDM DİSPERSİYON KOMPANZASYONU İÇİN FAZ ÖRNEKLEMELİ FİBER BRAGG IZGARALARININ OPTİMİZASYONU

Optik fiber Bragg ızgaraları ile WDM haberleşme sistemlerinde uygulama alanı bulabilmek için, tekdüze ızgara yapısından karmaşık yapılı ızgaraya geçilmesi gerekir. Optik ızgaranın kırılma indis değişimini tanımlayan bir örnekleme fonksiyonu belirleyerek örneklenmiş fiber ızgara yapısı oluşturmak, karmaşık yapılı ızgara tasarımının vazgeçilmez tek yoludur. Örnekleme fonksiyonun, fiber ızgarasını oluşturan kırılma indis değişiminin hangi parametresi üzerinde kurulacağı (genlik ve/veya faz) ve bu fonksiyonun nasıl tanımlanacağı, karmaşık ızgara tasarımının en önemli aşamalarıdır.

Çok kanallı fiber ızgarasının tasarımının temelinde, çekirdeğin kırılma indisinin genliğinin yada fazının örneklenmesi vardır. Çok sayıda kanal üretilebilen SFBG tasarımı için, gerek duyulan kırılma indisi modülasyon genliğinin etkin değeri δn_{eff} , pratik olarak 10^{-4} ile 10^{-3} aralığında bulunmak zorundadır. Bu kısıtlama, SFBG' lerin kanal sayısının artırılmasında en önemli sınırlayıcı faktördür. Geleneksel genlik örnekleme tekniğinde, M kanallı SFBG için gerek duyulan kırılma indisi modülasyon genliği, kanal sayısı ile orantılı olarak artar ve bu gereksinim genellikle $M \cdot \delta n_{eff}$ şeklinde tanımlanır [72]. Yakın bir tarihte, ızgara kırılma indisinin genlik örnekleme ile biçimlendirildiği bir çalışmada, 8 kanallı SFBG için $\delta n_{eff} = 8 \cdot 10^{-4}$ olarak tespit edilmiştir ve bu çalışmada sinc örnekleme yaklaşımı kullanılmıştır [64]. Alexander Buryak ve arkadaşları, kanal sayısı arttıkça δn_{eff}' in artırılmasına yönelik gereksinimi azaltabilmek amacıyla, genlik örneklemeye dayanan kırılma indisi örnekleme fonksiyonunu optimize ederek, M kanallı bir SFBG için gerek duyulan $\delta n_{eff(M)}$' i teorik sınır olan $\sqrt{M}\,\delta n_{eff}$ 'ye oldukça yakın elde etmişlerdir [57].

Izgaranın kırılma indisi genliğinin yerine sadece fazının örneklendiği faz örnekleme yaklaşımı, SFBG tasarımında geliştirilen oldukça yeni bir tekniktir [67,69,73]. Bu tekniğin en önemli yanı, tüm ızgara boyunca kırılma indisi modülasyon genliğinin sabit kalması ve böylelikle ızgaranın daha şiddetli yansıtıcılık sağlamasıdır. Faz

örneklemeli bir fiber Bragg ızgarasının (PSFBG) yansıma spektrumunu biçimlendiren temel etken, faz örnekleme fonksiyonun ızgara boyunca değişimini tanımlayan faz profilidir. Bu değişimin, genlik örneklemede kullanılan dikdörtgen veya sinc gibi bilindik bir fonksiyona uyarlanması, maalesef pek işe yaramaz. Faz değişimi genellikle düzenli sıralı olmadığı için, bu fonksiyonun, hedef bir yansıma spektrumundan yola çıkılarak analitik yöntemlerle belirlenmesi de pek mümkün gözükmemektedir. Böyle bir durumda faz örnekleme fonksiyonunu belirlenmesi, hedef bir yansıma spektrumuna ulaşmaya çalışan optimizasyon teknikleri sayesinde mümkün olabilir.

7.1. Optimizasyon için Faz Örneklemeli FBG' nin Modellenmesi

Daha önce Eş. 6.2 ile verilen ve bir FBG' nin fiber boyunca etkin indis değişim modülasyonunu ifade eden eşitliği, kompleks formda düzenleyerek PSFBG için şu eşitlik yazılabilir.

$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n}_{eff}\left(1 + v\,\mathrm{Re}\left\{\exp\left[i\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z + \phi(z)\right)\right]\right\}\right) \tag{7.1}$$

Burada $\phi(z)$, ızgara fazını içeren cıvıltı fonksiyonudur. Tekdüze bir ızgara için $\phi(z)$=0' dır ve ızgaranın yansıma spektrumu tek kanallıdır. Yansıma spektrumunu katlayan veya başka bir ifadeyle kanal sayısını artıran faz örneklemeli ızgaradan söz edebilmek için, $\phi(z)$'yi faz kaymaları içeren bir fonksiyon olarak düşünmek gerekir. Bu tanıma uyan $\phi(z)$, faz örnekleme fonksiyonu olarak da isimlendirilir. PSFBG' de etkin kırılma indisi modülasyon genliğinin ızgara boyunca değişmediği için, bu eşitlikte $\overline{\delta n}_{eff}(z)$ yerine bilerek $\overline{\delta n}_{eff}$ yazılmıştır. Fourier analizini kullanarak Eş. 7.1 şu şekilde yazılabilir.

$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n}_{eff}\left(1 + v\,\mathrm{Re}\left\{\sum_m F_m \exp\left[i\left(2\pi z/\Lambda + 2\pi m/\Lambda_s\right)\right]\right\}\right) \tag{7.2}$$

Burada Λ_s, faz örnekleme fonksiyonu $\phi(z)$' nin periyodu ve F_m ise kompleks Fourier katsayılarıdır. Bağlaşım katsayısı κ ile Fourier katsayıları F_m arasında doğrusal bir ilişki vardır ve bu ilişki şu şekilde ifade edilir.

$$\kappa_m = F_m \frac{\pi \bar{\delta}_{neff}}{\lambda_B} \tag{7.3}$$

Bağlaşım katsayısı κ_m' i kullanarak, PSFBG' nin yansıma spektrumdaki *m.* kanalın maksimum yansıtıcılığı şöyle belirlenir.

$$r_m = tanh^2(|\kappa_m| L) \tag{7.4}$$

Tüm WDM kanalların, arzu edilen hedef yansıtıcılığı sağlayabileceği bir ızgara tasarımını gerçekleştirmek için minimizasyon problemini şu şekilde kurmak mümkündür.

$$C_F = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} W_m |r_0 - r_m|^2 \tag{7.5}$$

Burada C_F minimize edilecek maliyet fonksiyonudur. W_m ve r_0, önceden belirlenen, M kanallı bir ızgarada sırasıyla her bir kanal için ağırlık faktörü ve pratik olarak geçerli olabilen hedef yansıtıcılıktır.

Probleme, N elemandan oluşan geçici bir $\phi(z)$ ile başlanır. Maliyet fonksiyonu C_F' yi en iyi minimize eden $\phi(z)$ 'yi bulmak için çok değişkenli evrensel bir optimizasyon metoduna gereksinim vardır. Bu çalışmada, detayları bir sonraki bölümde sunulan standart benzetilmiş tavlama metodu geliştirilerek, yukarıda modellenen minimizasyon probleme uygulanmıştır.

PSFBG'nin yansıma spektrumunda, WDM kanalların eşit aralıklı sıralanması için $\phi(z)$'nin periyodik olması şarttır. Örneğin, periyodu Λ_s=1mm olan bir faz örnekleme fonksiyonun oluşturacağı yansıma spektrumu, $c/(2n_{eff}\Lambda_s) \approx 100GHz$ sabit kanal aralıklarına sahip olur ki, bu değer ITU standardına uygundur. Her periyodunda N sayıda faz kayması içeren $\phi(z)$'nin formu için, iki ayrı yaklaşım sunulabilir. Bunlardan birincisinde $\phi(z)$, +π, -π kaymaları içerir, ancak bunların oluşturulacağı z_1, z_2, z_3, ..., z_N konumları belirsizdir ve bu konumlar optimizasyon problemi dahilinde belirlenmeye çalışılır [67-69]. Damman örnekleme olarak da adlandırılan bu yaklaşımda, faz fonksiyonunun düzensiz yerleşik (eşit olmayan aralıklı) faz kayması içermesi, fiber ızgarasının üretim teknolojisine getirdiği zorluk açısından bir dezavantaj olarak değerlendirilebilir. Buna alternatif ikinci yaklaşımda, örnekleme periyodu eşit parçalara bölünür ve sıralı z_1, z_2, z_3, ..., z_N noktalarında faz değişiminin ne olması gerektiği tespit edilmeye çalışılır [70,73].

Bu çalışmada $\phi(z)$ için, ikinci yaklaşıma dayanan düzenli yerleşik faz değişimi içeren formun kullanılması tercih edilmiştir. Bu formda mümkün olan en az sayıda faz değişimi oluşturarak, yeterince özdeş, maksimum sayıda kanal üretilmesi hedef olarak belirlenmiştir.

7.2. Benzetilmiş Tavlama Yöntemi

Benzetilmiş tavlama, ilk olarak Kirkpatrick tarafından önerilmiş, olasılık tabanlı sezgiye dayanan bir algoritmadır [74]. Tavlama, fiziksel anlam olarak, bir katının ergime noktasına kadar ısıtılması ve bunun devamında mükemmel kafes yapılı durumda kristalize olana kadar yavaşça soğutulması işlemidir. Sıcaklık azaltıldıkça, atomik enerji düşer ve düzgün yapılı bir kristal sağlandığında, sistem minimum enerjiye sahip olur. Evrensel optimizasyon problemlerinin çözümü için sunulan benzetilmiş tavlama (SA) yöntemi [75], adından da anlaşılacağı gibi böyle bir fiziksel olaydan esinlenerek geliştirilmiştir. İyi kurulmuş SA algoritması, sınırlı bir sürede evrensel optimumu bulabilir. Algoritmanın temel adımları aşağıda özetlenmiştir.

1. Adım: Alt ve üst sınırlar içinde tanımlı başlangıç faz katsayıları ile başlanır ve maliyet fonksiyonu C_F, bu katsayılar ile hesaplanır. Sonra, başlangıç sıcaklığı ve algoritmayı yineleme sayısı ayarlanır.

$S = [-2\pi ,\ 2\pi]$

$\phi^0 = \left[\phi_1^0, \phi_2^0, \phi_3^0, \cdots, \phi_N^0\right] \ , \quad \phi_j^0 \in S$

$C_{F\min}^{\ 0} = C_{F\min}(\phi)$

$k=1\ ,\ T_k = T_0\ , D$

Bu adımda, ϕ^0, başlangıçta verilen faz örnekleme fonksiyonu geçici katsayılarıdır ve *S,* bu katsayıların tanımlı olduğu aralıktır. $C_{F\min}^{\ 0}$, bu adımda hesaplanan maliyettir. *D*, her bir değişken için maksimum değişim miktarını içeren NxN boyutlu köşegen bir matristir. Örneğin, başlangıç faz katsayıları ϕ_j^0'nin tüm elemanları 0 olarak verilirse, ilk döngüde D'nin, köşegenindeki tüm katsayılar 2π olmalıdır.

k, T_k ve T_0 ise sırayla algoritmanın yineleme indeksi, mevcut sıcaklık ve başlangıçta verilen sıcaklık parametreleridir. Algoritmanın evrensel minimumu yakalayabilmesi için, başlangıç sıcaklık parametresinin yeterince büyük verilmesi gerekir. Ancak, gereğinden çok büyük bir değer verilmesi, yakınsamayı zorlaştırabilir yada çözüm süresini uzatabilir. Gereğinden çok küçük bir değer verilmesi ise, çözümü yerel bir minimuma doğru sürükleyebilir.

2. Adım: Her bir faz katsayısı için, izin verilen maksimum değişim aralığında, rastgele değişken *U* ile geçici faz katsayıları belirlenir ve sonra bu katsayılar ile maliyet fonksiyonunun yeni değeri hesaplanır.

$U \in \left[-1,\ \ 1\right]$

$\phi^k = \phi^{k-1} + U \times D$

$$C_{F\min}^{k} = C_{F\min}(\phi^{k})$$

Bu adımda *U*, [*-1, 1*] aralığında rastgele sayılardan oluşan N boyutlu vektördür. ϕ_j^k, yeni üretilen rastgele faz katsayılardır ve algoritmanın yenileme sayısı arttıkça, bu katsayıların değişim aralığı giderek daralır.

3. Adım: Maliyet fonksiyonu, bir önceki değer ile karşılaştırılır ve geçici faz katsayılarının geçerli katsayılar olarak kabul edilip edilmeyeceği, bir yada iki aşamada şu şekilde belirlenir:

1. Aşama. Eğer $C_{F\min}^{k} < C_{F\min}^{k-1}$ ise yeni üretilen faz katsayıları, geçerli faz katsayıları olarak kabul edilir. Aksi takdirde, rastgele bir değişen z ile Metropolis kriteri aşağıdaki gibi karşılaştırılır.

2. Aşama. Eğer $\exp\left(-\frac{C_{F\min}^{k} - C_{F\min}^{k-1}}{T}\right) > z$ ise yeni üretilen faz katsayıları yine geçerli faz katsayıları olarak kabul edilir, değilse kabul edilmez.

Bu adım 2. aşamasında *z*, [*0, 1*] aralığında rastgele üretilen bir sayıdır. Üssel ifadeyle verilen Metropolis kriteri denetiminde kabul edilme olasılığı, ilk bakışta anlamsız ve gerçek çözümden uzaklaştırıcı bir hareket olarak gelebilir. Ancak bu hareket, algoritmaya dinamiklik getirecek ve onun yerel bir minimuma sürüklenmesini engelleyecektir. Metropolis kriterine bağlı kabul olasılığı, çözüm sürecinin sonlarına doğru azalan sıcaklık ile iyice düşer ve dinamik hareketler engellenerek kararlı bir çözüme doğru yakınsama sağlanır.

4. Adım: Kabul gerçekleşti ise değişkenler güncelleştirilir.

$$\phi^{k-1} = \phi^{k}$$

$$C_{F\min}^{k-1} = C_{F\min}^{k}$$

$$D = (1-\beta)\cdot D + \beta \cdot \Delta\phi$$

$\Delta\phi$, $\phi^k - \phi^{k-1}$ faz değişim miktarını içeren bir köşegen matris ve β ise sıfıra oldukça yakın bir sabittir.

5. Adım: Adım 2, 3 ve 4, Markov zincir uzunluğu olarak kabul edilen M_t kadar tekrarlanır. Tavlama sıcaklığı değişmeden, algoritmanın bu sıcaklıkta en iyi minimumu yakalayabilmesine bir fırsat vermek için, yukarıdaki adımlar belirli sayıda yeniden çalıştırılır. Tekrarlama sayısı M_t için kesin bir değer yoktur. Problemin niteliğine ve ölçütlerine göre değişebilir. Çok büyük verilmesi problemin çözümünü gereksiz yere uzatır.

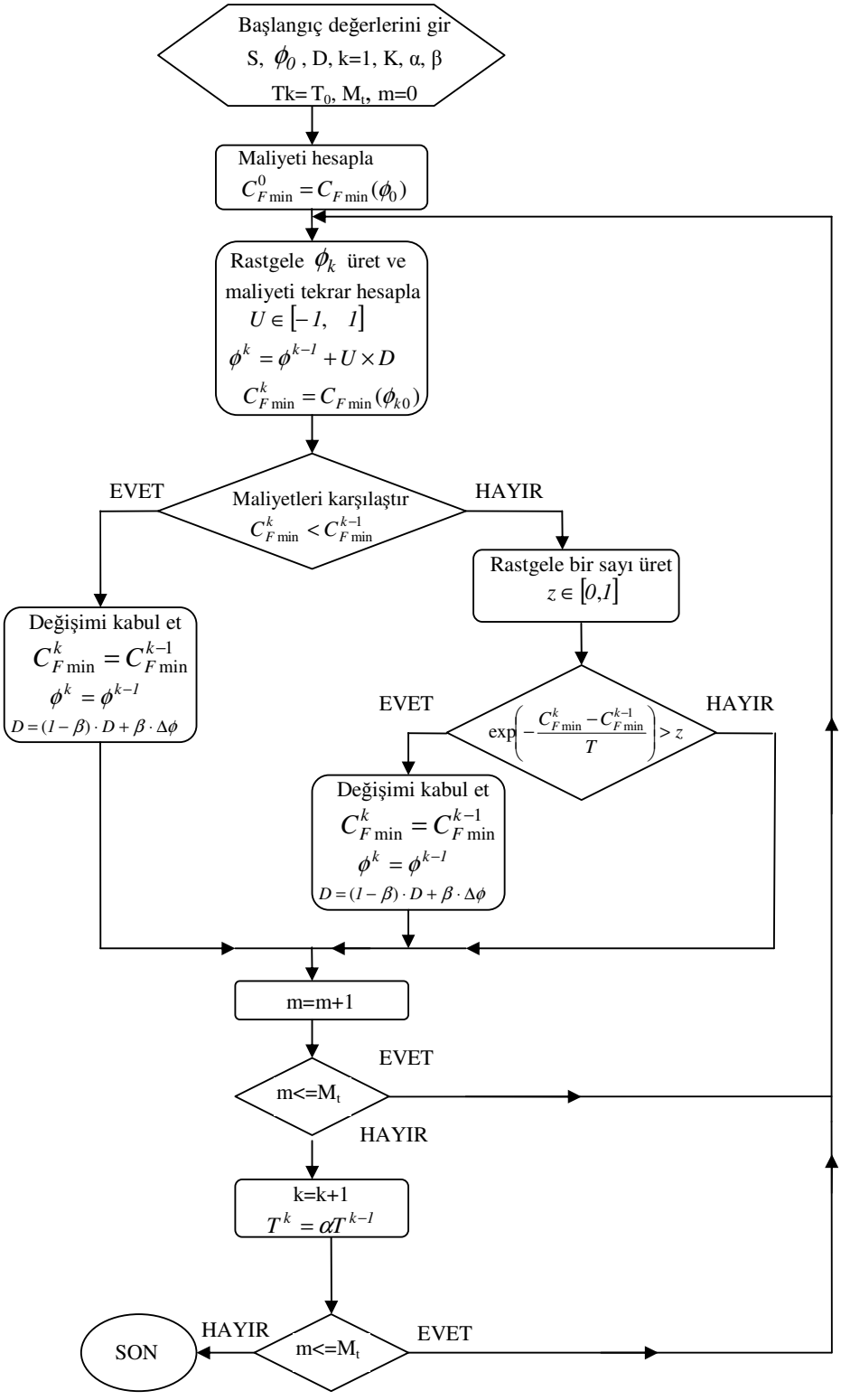
6. Adım: Bir sonraki iterasyon için indeks bir artırılır ve sıcaklık güncellenir.

$$k = k + 1$$
$$T^k = \alpha T^{k-1}$$

Bu adımda, sıcaklığın oldukça yavaş azalması için α sabiti 1'e oldukça yakın seçilir. Sıcaklığın yavaş bir şekilde azaltılması önemlidir. Çünkü katıların sertleşmesindeki fiziksel duruma benzer şekilde, evrensel minimumu sağlayan en iyi çözüm arayışı için gereklidir ve bu algoritmanın temel şartlarından biridir.

7. Adım: Sonlandırma kriteri denetlenir. Geçerli ise algoritma sonlandırılır, aksi takdirde 2. adıma geri dönülür.

Benzetilmiş tavlama algoritmasının akış şeması Şekil-7.1'de görülmektedir. Algoritmanın 4. adımında, kabul edilen faz değişimi ile güncellenen *D* matrisi, her iterasyonda 2. adımda yeni üretilecek faz katsayılarının, geçerli faz katsayıları etrafında üretilme olasılığını kuvvetlendirmektedir. Böylece geleneksel tavlama algoritmalarına göre optimum çözüme doğru daha uygun bir yaklaşım sağlanmıştır.



Şekil 7.1. Benzetilmiş tavlama algoritmasının akış diyagramı

Algoritmayı sonlandırmak için, sıcaklığı kontrol eden bir tavlama üretim sayısı ($k=1,2,...,K$) önerilebilir veya metropolis kriterini kullanan karşılaştırmada, kabul edilme oranı verilen küçük bir değerin altına düşmesi gibi kriterler kullanılabilir. Bu çalışmada, üretilen tavlama sayısı, verilen bir K sayısı ile sınırlandırılarak algoritmanın sonlanması sağlanmıştır.

7.3. Optimizasyon ve Simülasyon Sonuçları

PSFBG' nin yansıma spektrumunu şekillendiren faz değişim fonksiyonunu optimize etmek için, yukarıda detayları sunulan benzetilmiş tavlama metodu uygulanmıştır. Algoritmanın yürütülmesinde kullanılan parametreler Çizelge 7.1'de listelenmiştir. Eş. 7.5 ile verilen maliyet fonksiyonu hesaplanırken, şiddetli bir yansıma spektrumu elde etmek için, hedef yansıtıcılık katsayısı 1 olarak seçilmiştir, Ağırlık faktörü ise yansıma spektrumda yer alması istenilen kanallar için 1, bastırılmak istenen kanallar için 0 alınmıştır. Hedef yansıtıcılık katsayısı ve ağırlık faktörü değiştirilerek kanallar arasında güç yansıtıcılık dengesi kontrol edilebilir.

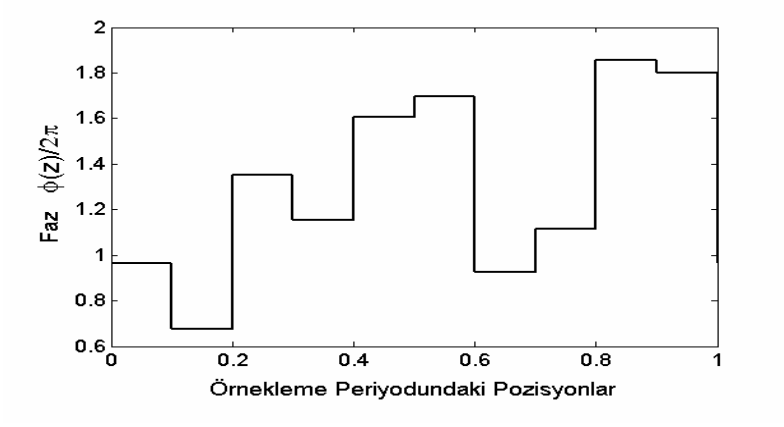
Çizelge 7.1. Benzetilmiş Tavlama Algoritması parametreleri

Parametre	Değer
Başlangıç tavlama sıcaklığı (T_0)	50
Tavlama üretim sayısı (K)	100
Markov uzunluğu (M_t)	35
Faz parçalarının sayısı (N)	10-20-40
Sıcaklık düşürme parametresi (α)	0,97
Azalma parametresi (β)	0,0005
Izgara Uzunluğu (L)	1-2cm
Tasarım Bragg dalgaboyu (λ_B)	1550nm
Kırılma indis modülasyon genliği (δn_{eff})	$4\cdot10^{-4}$ - $8\cdot10^{-4}$

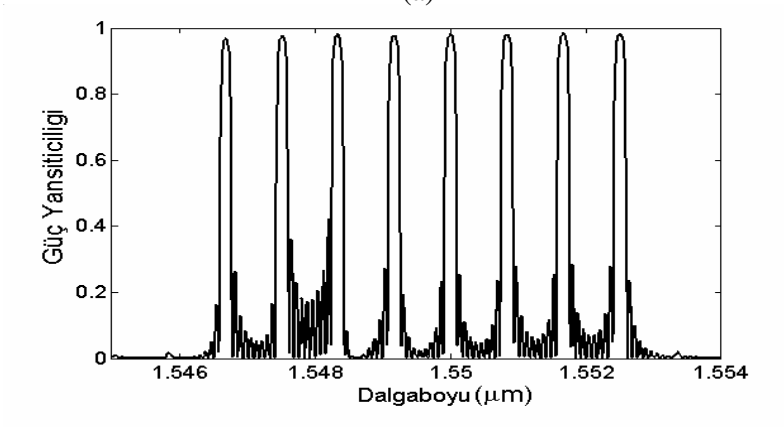
Bu bölümde, benzetilmiş tavlama algoritmasını çalıştırarak önce ızgaranın periyodik faz değişim fonksiyonu elde edilmiştir. Sonra, bu fonksiyon transfer matris metodunu kullanan simülatöre uygulanarak, PSFBG' nin yansıma spektrumu üretilmiştir. Simülasyon, farklı sayıda kanal içeren PSFBG tasarımı için ayrı ayrı yürütülmüştür. Simülasyona, önce 8 kanallı WDM spektrumu elde etmek üzere başlanmış ve bu tasarımda, optimum faz profili için örnekleme periyodu başına sadece 10 parça kullanılması yeterli görülmüştür.

İlk simülasyonda, örnekleme periyodu 10 parçaya bölünerek optimize edilen ızgara faz profili Şekil 7.2 (a)' da görülmektedir. Bu faz profili ile örneklenen PSFBG' nin yansıma spektrumu Şekil 7.2 (b)' de görülmektedir. Şekil 7.2 (b)' de, L=1cm uzunluğunda fiber ızgarasının yansıma spektrumunun 1545-1554nm dalgaboyu penceresinde, yaklaşık 0,98 şiddeti ile yansıtıcılığa ulaşan 8 WDM kanalı görülmektedir. Tüm kanalların, güç yansıtıcılıkları ve band genişlikleri incelendiğinde hemen hemen özdeş olduğu söylenebilir. Kanallar 100GHz' lik eşit aralıklarla sıralıdır. Spektrumda, çalışma dalgaboyu penceresinin her iki kenarlarında bulunan ve yaklaşık 1546 ve 1553nm dalgaboylarına sahip iki kanal, oldukça iyi bastırılmıştır (-18dB' den küçük). Izgara boyunu bir miktar uzatarak, spektrumdaki WDM kanalları daha da şiddetlendirmek mümkündür.

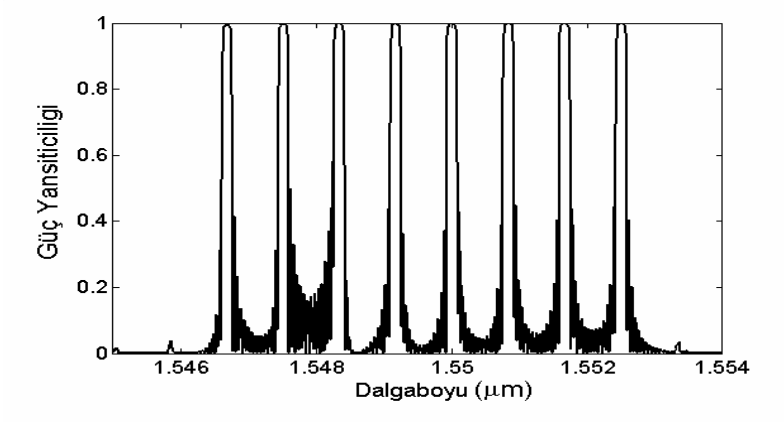
Şekil 7.2 (c)' de, aynı faz profili ile örneklenmiş 1,5cm uzunluğundaki PSFBG' nin yansıma spektrumu görülmektedir. Bu spektrum, Şekil 7.2 (b) ile karşılaştırıldığında, 8 WDM kanalın tümünün maksimum yansıtıcılığa ulaştığı ortadadır. Her iki farklı uzunluklu fiber ızgaraları için yapılan tasarımlarda, kırılma indisi modülasyon genliği $\overline{\delta n}_{eff}=4\cdot10^{-4}$ olarak alınmıştır ve 8 kanal üretmek için yapılan bu tasarımlarda, ızgara fazının bir periyodu sadece 10 düzenli yerleşik faz değişimi içermesi yeterli bulunmuştur.



(a)



(b)

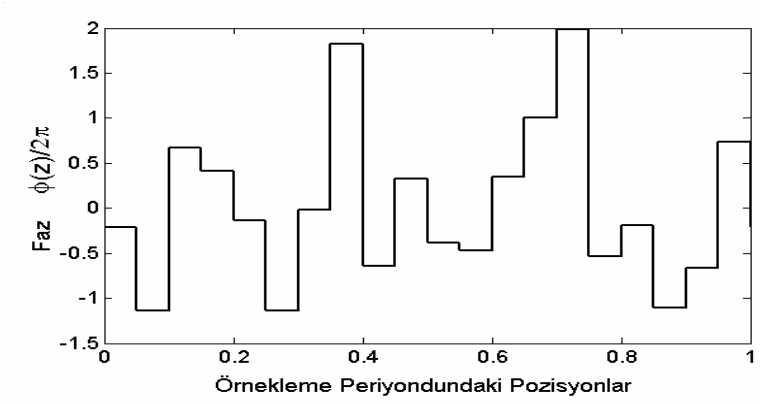


(c)

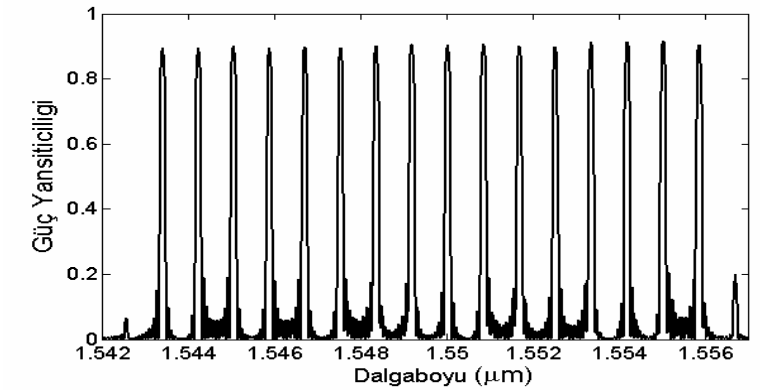
Şekil 7.2. (a) 8 kanal için optimize edilmiş faz profili, (b) *L*=1cm uzunluklu ızgara için yansıma spektrumu, (c) *L*=1,5 cm uzunluklu ızgara için yansıma spektrumu

Yansıma spektrumunda kanal sayısını artırmak için, faz profilinin periyot başına düşen parça sayısı artırılarak çalışma sürdürülebilir. Örneğin, 16 kanal elde etmek

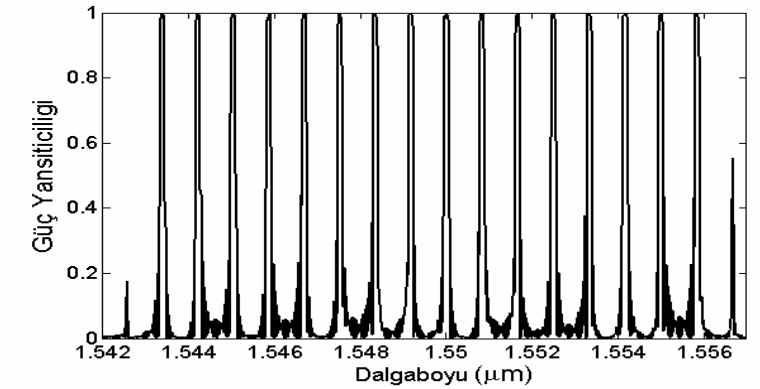
için faz periyodu Şekil 7.3'deki gibi 20 parçaya veya 32 kanal için Şekil 7.4' deki gibi 40 parçaya bölünerek yeni faz profilleri belirlenebilir.



(a)



(b)

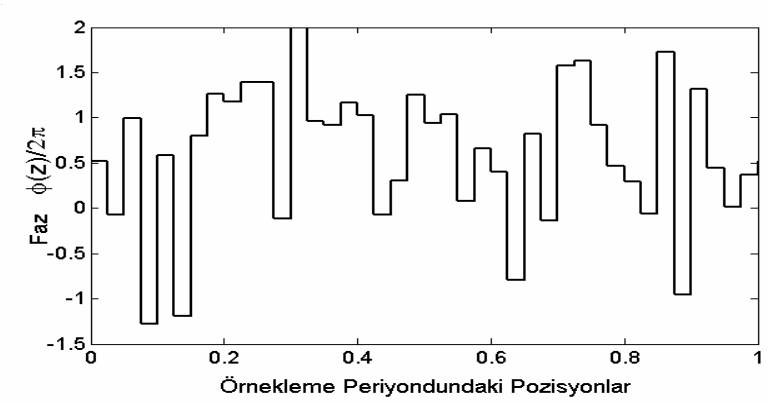


(c)

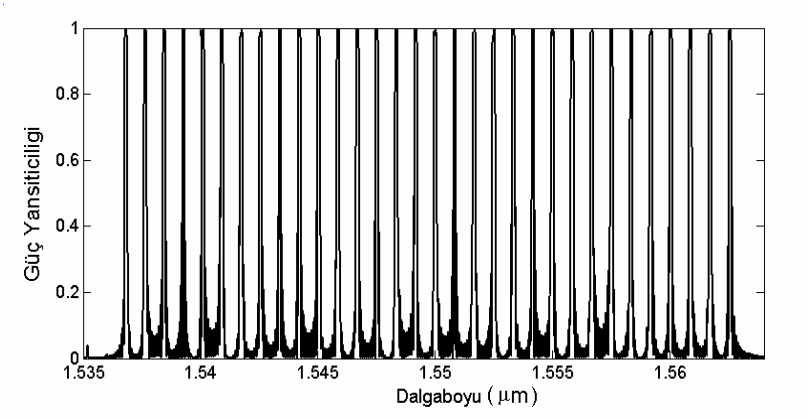
Şekil 7.3. (a) 16 kanal için optimize edilmiş faz profili, (b) *L*=1cm uzunluklu ızgara için yansıma spektrumu, (c) *L*=2 cm uzunluklu ızgara için yansıma spektrumu

Şekil 7.3'te, 16 kanal elde etmek amacıyla yapılan tasarımın simülasyon sonuçları görülmektedir. WDM kanal sayısını 16'ya çıkarmak için ızgara fazı 20 parça/periyoda bölünerek optimize edilmiş ve Şekil 7.3(a)'daki profil elde edilmiştir. Elde edilen bu faz profilinin ve L=1cm ve L=2cm uzunluklu iki ayrı ızgaraya uygulanması ile üretilen yansıma spektrumları Şekil 7.3 (b) ve (c) de görülmektedir.

Izgara fazını, 40 segment/periyod bölerek WDM kanal sayısını daha da artırılabilir. Şekil 7.4'te optimize edilen faz profili ve neticesinde elde edilen maksimum yansıtıcılığa ulaşan, özdeş, 32 kanallı yansıma spektrumu görülmektedir. Bu tasarımda, $\delta n_{eff}=6\cdot10^{-4}$ ve L=2cm olarak sınırlandırılırken, diğer parametreler değiştirilmemiştir.



(a)



(b)

Şekil 7.4. (a) 32 kanal için optimize edilmiş faz profili, (b) L=2cm için ızgara için yansıma spektrumu.

Elde edilen sonuçlar, şimdiye kadar örneklemeli FBG ile WDM kanal üretme konusunda yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında, 8, 16 ve 32 kanallı PSFBG tasarımları oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Bu tezde yapılan tasarımlarla, örnekleme periyodu başına düşen faz parça sayısı n, kırılma indis modülasyon genliği δn_{eff} ve ızgara uzunluğu L parametrelerinin değerlerinde ciddi bir tasarruf sağlandığı açıkça görülmektedir. Örneğin yakın bir tarihte Hojoon Lee ve arkadaşı, örnekleme periyodu içinde düzenli yerleşik değişim gösteren ızgara fazı $\phi(z)$'yi kullanan, sadece-faz örneklenmiş süperyapılı FBG' için analiz yaparak iki ayrı örnek tasarım sunmuşlardır [73]. İlk tasarımda, $\phi(z)$' nin tanımı için örnekleme periyodu başına 20 parça, ikinci tasarımda 30 parça tayin ederek sırayla 8 ve 16 kanal üreten FBG spektrumu, L=10cm ve $\delta n_{eff}=4\cdot 10^{-4}$ değerleri ile elde etmişlerdir. Izgara fazının periyot başına parça sayısı arttıkça, faz profili daha da karmaşıklaşır ve bu durum PSFBG'nin imalat teknolojisinde önemli bir problem olarak ortaya çıkacaktır. Ayrıca ızgara boyu uzadıkça üretim maliyetleri de orantılı bir şekilde artacaktır.

7.4. PSFBG' ler ile Dispersiyon Kompanzasyon Uygulamaları

PSFBG ile WDM dispersiyon kompanzasyon uygulamaları gerçekleştirebilmek için, öncelikle ızgaranın WDM yansıtıcılık spektrumu, optik haberleşme sisteminin dalgaboyu spektrumu ile birebir örtüşecek şekilde şekillendirilmelidir. Önceki bölümde, PSFBG' nin istenilen sayıda kanal içeren WDM yansıtıcılık spektrumunu için optimum çözüm sağlayan bir tasarım modeli geliştirilmiştir. Bundan sonraki ilk aşama, dikdörtgensel ya da sinc biçimli genlik örneklemeli FBG'lerde uygulanan tekniğe benzer biçimde, PSFBG'nin ızgara fazına doğrusal cıvıltı uygulanmasıdır. Izgara fazına uygulanan doğrusal cıvıltı ile çalışma dalgaboyu spektrumunda doğrusal bir grup zaman gecikmesi elde edilebilirse, PSFBG ile dispersiyon kompanzasyonu sağlamak mümkün olabilecektir. Doğrusal olmayan cıvıltı ile de dispersiyon eğim kompanzasyonu sağlanabilecektir.

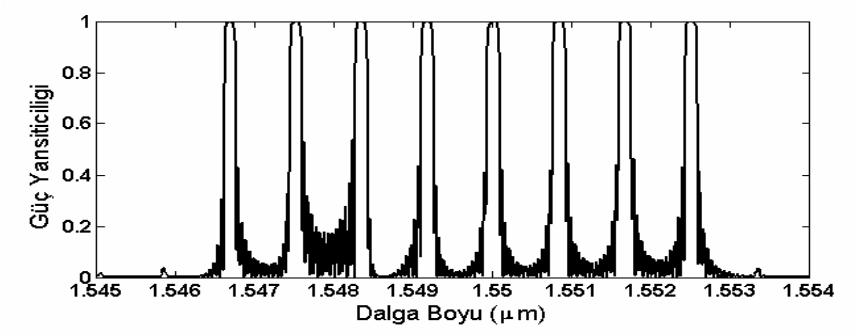
Bu bölümde, önceki bölümde modellemesi yapılan ve yansıma spektrumu elde edilen PSFBG'ye, doğrusal ve doğrusal olmayan farklı değerlikli cıvıltılar uygulayarak, ızgaranın yansıtıcılık, grup zaman gecikmesi ve dispersiyon eğrileri analiz edilmiştir.

7.4.1. Doğrusal dispersiyon kompanzasyonu

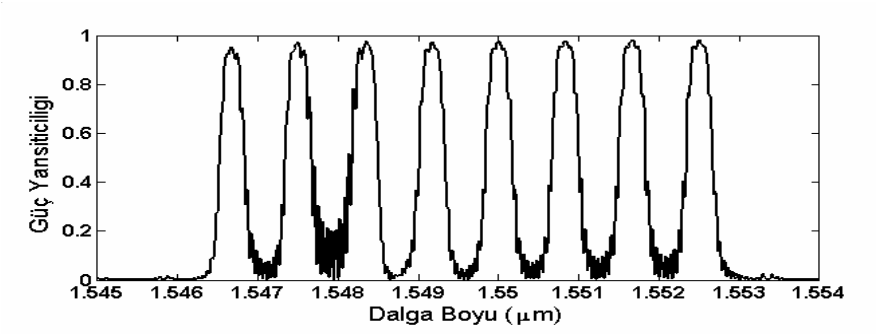
PSFBG ile doğrusal dispersiyon kompansatörü geliştirebilmek için ızgaranın fazına doğrusal cıvıltı uygulanmalıdır. Doğrusal cıvıltı, önceki dispersiyon kompanzasyon uygulamalarında olduğu gibi, ızgara periyodu Λ'nın fiber boyunca doğrusal değişimiyle oluşturulur. Bu değişim, tasarım dalgaboyu λ_D'nin mesafeye göre değişimini ifade eden $\frac{d\lambda_D}{dz} = C$ şeklinde belirtilir ve sabit bir katsayı şeklinde hesaba katılır.

Bir PSFBG'nin ızgara periyoduna uygulanan cıvıltı ile WDM kanallar üzerinde dispersiyon etki oluştururken dikkatli olmak gerekir. Çünkü Λ'ya dahil edilen doğrusal cıvıltı, doğrudan ızgara fazının değişimiyle ilgilidir. Faz örnekleme gereğince, bu faz aynı zamanda fiber boyunca belirli aralıkla faz kaymaları içereceğinden, yüksek değerlikli cıvıltı, PSFBG'nin yansıma spektrumu beklenmedik bir şekilde olumsuz etkileyebilir.

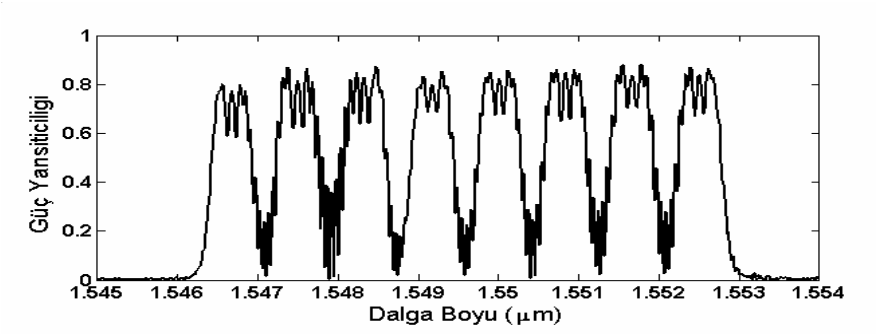
Bölüm 7.3'te, 8 kanal için belirlenen faz profilini kullanarak, doğrusal cıvıltılı PSFBG'nin analizi yapılabilir. Bu analizde, 8 kanal için tasarlanan cıvıltılı-PSFBG' ye farklı cıvıltı değerleri uygulayarak elde edilen yansıma spektrumlarının değişimi, Şekil 7.5'de görülmektedir. Bu grafiklerde, yansıma spektrumları ile uygulanan cıvıltı miktarları karşılaştırıldığında, cıvıltı miktarı arttıkça, kanallar arası girişim etkisinin artması sonucu yansıma spektrumunun bozulduğu anlaşılmaktadır.



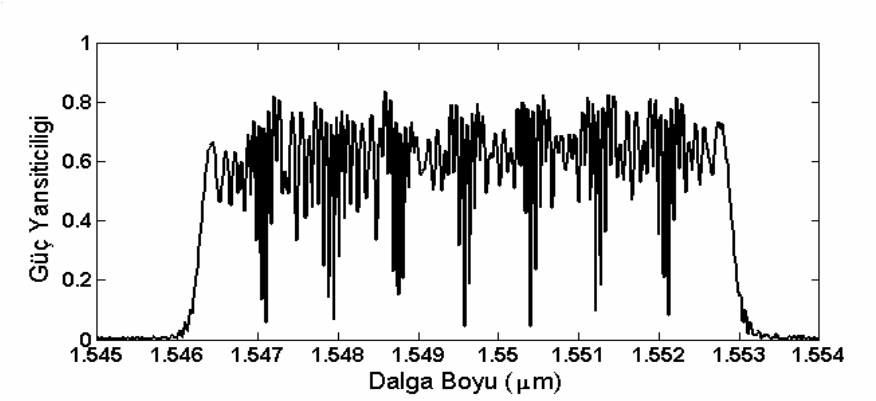
(a)



(b)



(c)

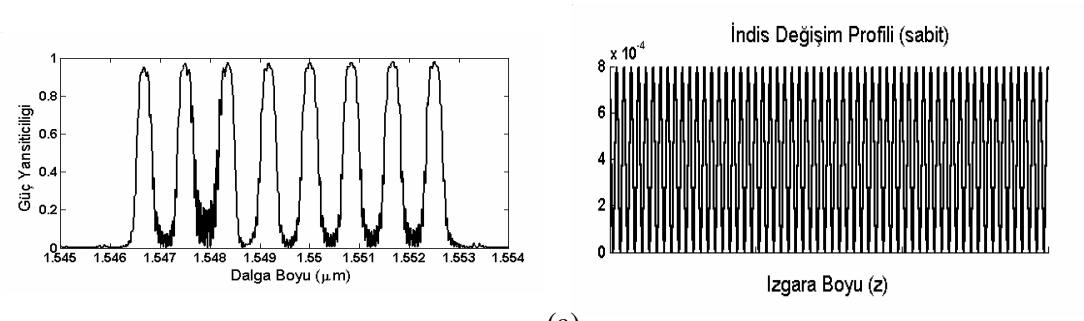


(d)

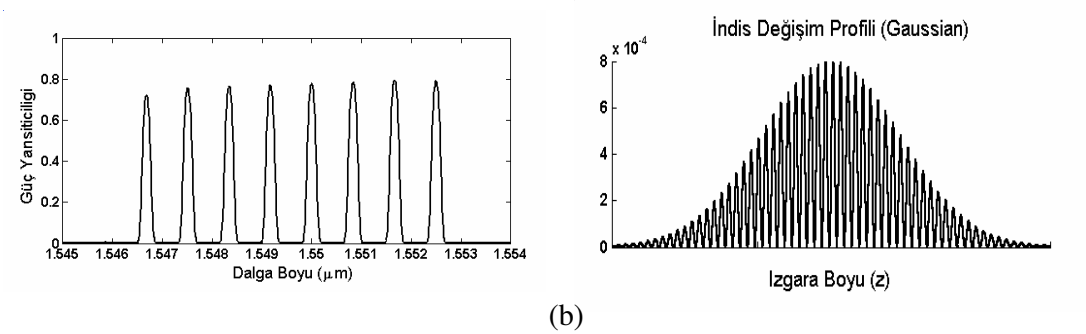
Şekil 7.5. Cıvıltılı-PSFBG'nin farklı cıvıltı değerlerine karşın yansıma spektrumunun değişimi, cıvıltı parametreleri (a) 0, (b) 0,1, (c) 0,2, (d) 0,3

Tek kanalı FBG için yapılan tasarımlarda, yansıma ve grup zaman gecikme spektrumlarında ortaya çıkan dalgalanmaların etkisi azaltmak için uygulanan bir teknik olarak apodizasyondan söz edilmişti. Bu aşamada, cıvıltılı-PSFBG' nin yansıma spektrumunu daha kararlı yapmak için apodizasyon tekniğinin uygulanması denenebilir. Bu uygulamanın bir sonucu olarak, farklı apodizasyon profillerinin fiber ızgarasının yansıma spektrumuna olan etkisini analiz etmek üzere elde edilen sonuçlar, Şekil 7.6' da görülmektedir. Şekil 7.6'da, *Gaussian*, *sinc* ve *tanh(α=4,β=3)* apodizasyon profilleri ve bunlara karşılık gelen faz örneklemeli FBG'nin yansıma spektrumları verilmiştir. Spektrumlarda, en uygun apodizasyon profilini belirleyebilmek için görsel bir analiz yapılabilir.

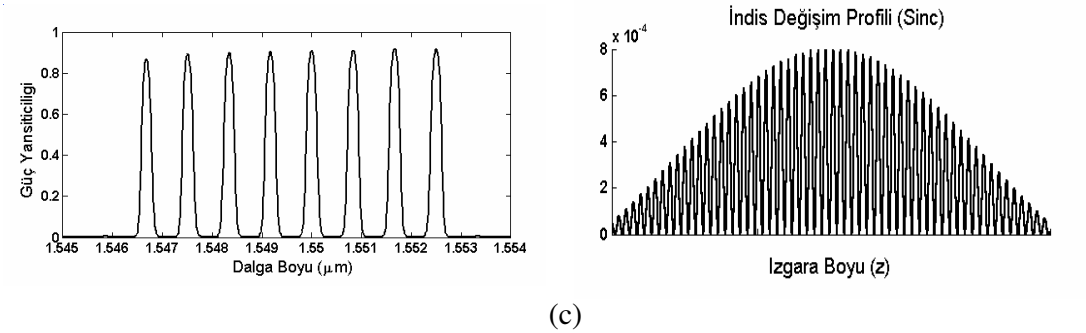
Her apodizasyon az yada çok kırılma indis modülasyon genliğini $\overline{\delta n}_{eff}(z)$'yi azaltır. Kırılma indis modülasyon genliğindeki azalma, optik ızgaranın boyu ile değişir. $\overline{\delta n}_{eff}(z)$'nin azalması ızgara yansıtıcılığını zayıflatır. Dolayısı ile, Şekil 7.6'da (b), (c) ve (d)'de görülen yansıma grafiklerindeki WDM kanalların, apodizasyonun uygulanmadığı (a)'daki WDM kanallara göre şiddetinin bir miktar düşmesi beklenen bir durumdur. Şekil 7.6 (d)' de, *tanh(α=4,β=3)* apodizasyona karşılık gelen spektrumda, kanallar yansıtıcılık açısından şiddetli gözükse de, dalgalanmaların hala etkili olması ve kanallar arası boşlukta yansımanın tam olarak bastırılamaması, önemli bir dezavantaj olarak göze çarpmaktadır. Gaussian ve sinc apodizasyonların karşılık geldiği spektrum (b) ve (c)'deki yansıma grafiklerinin, dalgalanmalara karşı daha kararlı görülmektedir. Bu ikisi arasında bir karşılaştırma yapılacak olursa, spektrum (b), spektrum (c) ye göre yansıtıcılık şiddeti bakımından daha zayıf kalmaktadır. Sonuç olarak bu değerlendirmelerden, sinc apodizasyonun 8 kanallı PSFBG için geliştirilen tasarımda en uygun apodizasyon olduğu kabul edilebilir. Ancak, farklı faz örnekleme profilini kullanan ve farklı sayıda kanal içeren ızgara tasarımı için, bunu genellemek yanlış olur. Farklı tasarımlar için, yansıtıcılık ve kararlılık açısından optimum cevabı veren apodizasyonun yeniden araştırılması gerekecektir.



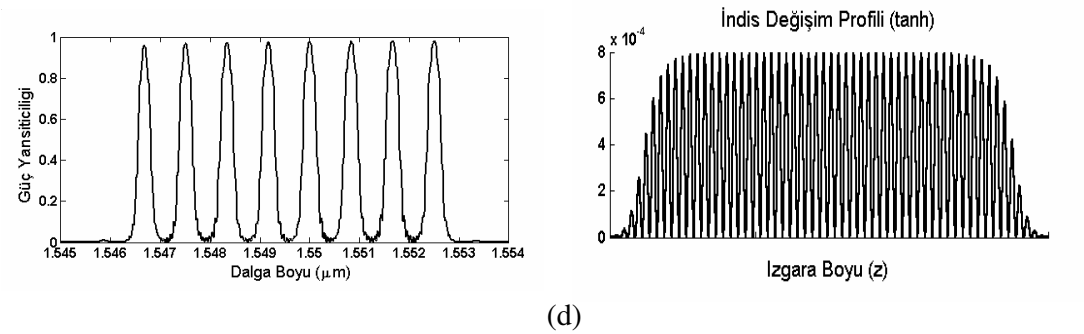
(a)



(b)



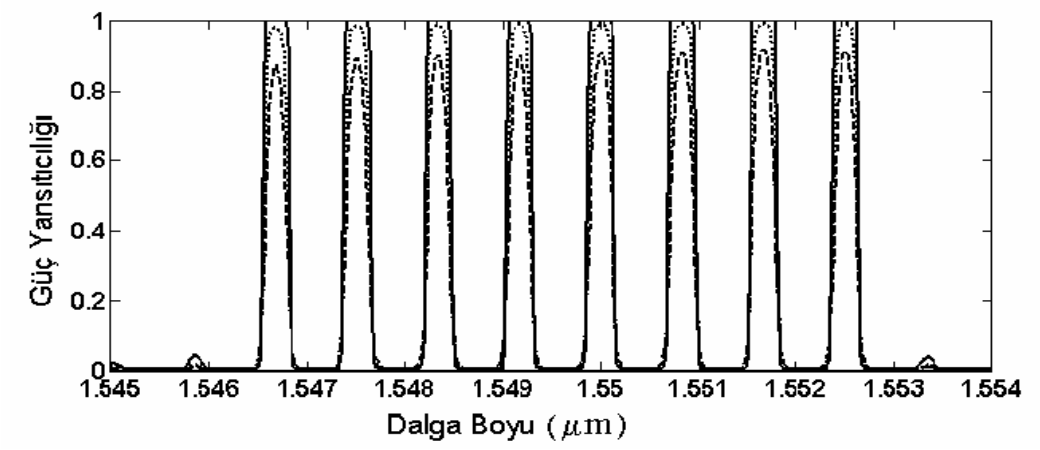
(c)



(d)

Şekil 7.6. Farklı apodizasyon profillerinin FBG' nin yansıma spektrumuna olan etkisi, (a) *apodizasyon yok*, (b) *Gaussian*, (c) *sinc*, (d) *tanh(α=4,β=3)*, Cıvıltı parametresi=0,1nm/cm

Tasarımda son olarak, sinc profili ile apodize edilmesi uygun görülen bu aşamadan sonra, yansıma spektrumunda kanalları şiddetlendirmek için ızgara boyunu değiştirmek ve bunun etkisi analiz etmek faydalı olacaktır.

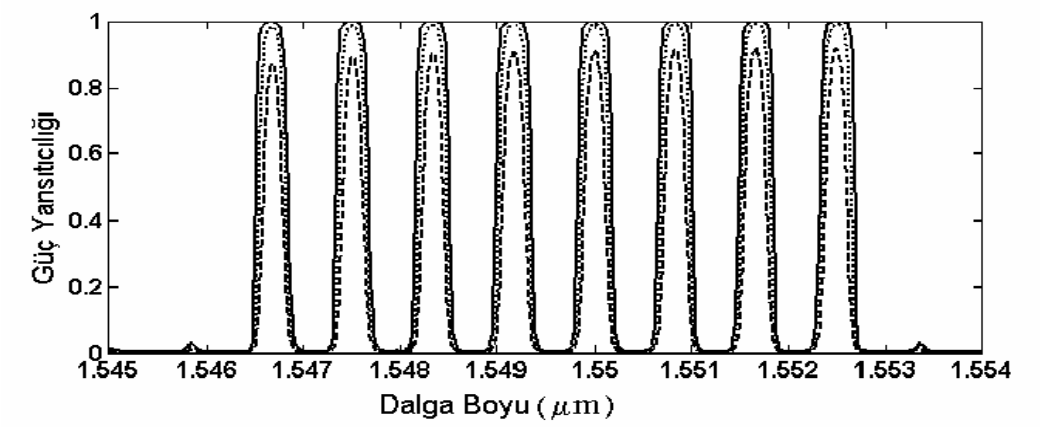


Şekil 7.7. Farklı ızgara uzunlukları için PSFBG' nin yansıma spektrumları, *L*=1,5cm (kesikli çizgi), *L*=3,0cm (noktalı çizgi) ve *L*=10cm (düz çizgi)

Şekil 7.7'de üç farklı ızgara uzunluğu ile değişen güç yansıtıcılık spektrumları görülmektedir. Izgara boyu arttıkça yansıtıcılık şiddetlenmektedir. Uzunluk arttıkça, ızgara fazına uygulanan cıvıltı sabit olsa bile ızgaranın yansıma spektrumuna kazandırdığı dispersiyon şiddetlenir. Çünkü, grup zaman gecikmesi dolayısı ile dispersiyon, ızgara boyu ile doğru orantılı değişir. Uzayan ızgara boyuna karşılık dispersiyonu sabit tutabilmek için, uygulanan cıvıltıyı ızgara boyu *L* ile ters orantılı olacak şekilde azaltmak gerekir. Şekil 7.7' de, tüm WDM kanalları aynı band aralığında şiddetlendirmek için, cıvıltı parametresi sırayla 0,1, 0,05 ve 0,015nm/cm olarak belirlenmiştir.

Kırılma indisi modülasyon genliğini artırmak, yansıtıcılığı şiddetlendirmek için alternatif bir yoldur. Şekil 7.8'de, ızgara boyu değiştirilmeden farklı δn_{eff} değerlerine karşılık gelen yansıma spektrumlarının değişimi görülmektedir. Farklı δn_{eff} değerlerine örnek olarak $4\cdot10^{-4}$, $6\cdot10^{-4}$ ve $8\cdot10^{-4}$ değerleri alınmıştır. δn_{eff} ' nin artırılması, ızgara boyunun artırılması ile sonuçlanan katkıya benzer bir etki ile

kanalları şiddetlendirmiştir. Spektrumda kanal sayısı arttıkça ızgaranın yansıttığı band aralığı genişleyecek, dolayısıyla WDM kanalların şiddeti azalacaktır. Bunu telafi etmek için δn_{eff}' i artırmak mümkündür, ancak 10^{-3} değeri teoriksel bir üst sınırdır ve bu yaklaşım ancak bir aşamaya kadar çözüm sunabilir. Bu aşamada, yansıtıcılığı şiddetlendirmek için, δn_{eff} ve ızgara boyu L ile birlikte üretim maliyetlerini de hesaba katan optimum bir çözüm geliştirmek daha uygun olabilir.

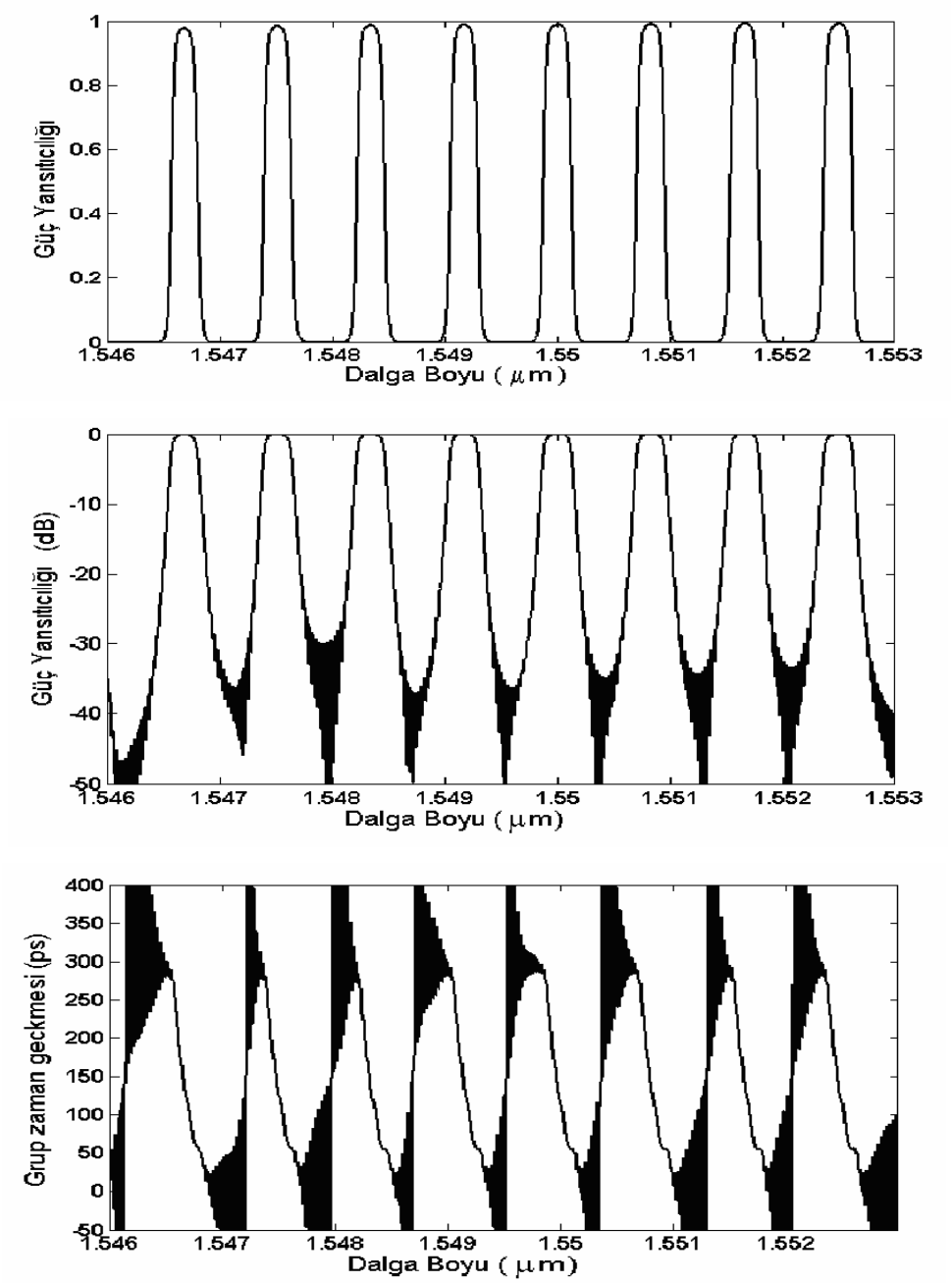


Şekil 7.8. Farklı δn_{eff} değerleri için yansıma spektrumları, sırayla kesikli, noktalı ve düz çizgiler için δn_{eff} değerleri $4\cdot10^{-4}$, $6\cdot10^{-4}$ ve $8\cdot10^{-4}$

PSFBG ile dispersiyon kompansatörü geliştirme araştırmalarına, yansıma spektrumu Şekil 7.7'de noktalı çizgilerle belirtilen 3cm uzunluklu ızgara ile başlanabilir. Bu ızgarayı kullanan kromatik bir dispersiyon kompansatörü geliştirebilmek için, optik ızgara fazına doğrusal cıvıltı uygulamak yeterlidir. Şekil 7.9'da, bu uygulamanın neticesi olarak elde edilen kromatik dispersiyon kompansatörün yansıma ve grup zaman gecikme spektrumları görülmektedir.

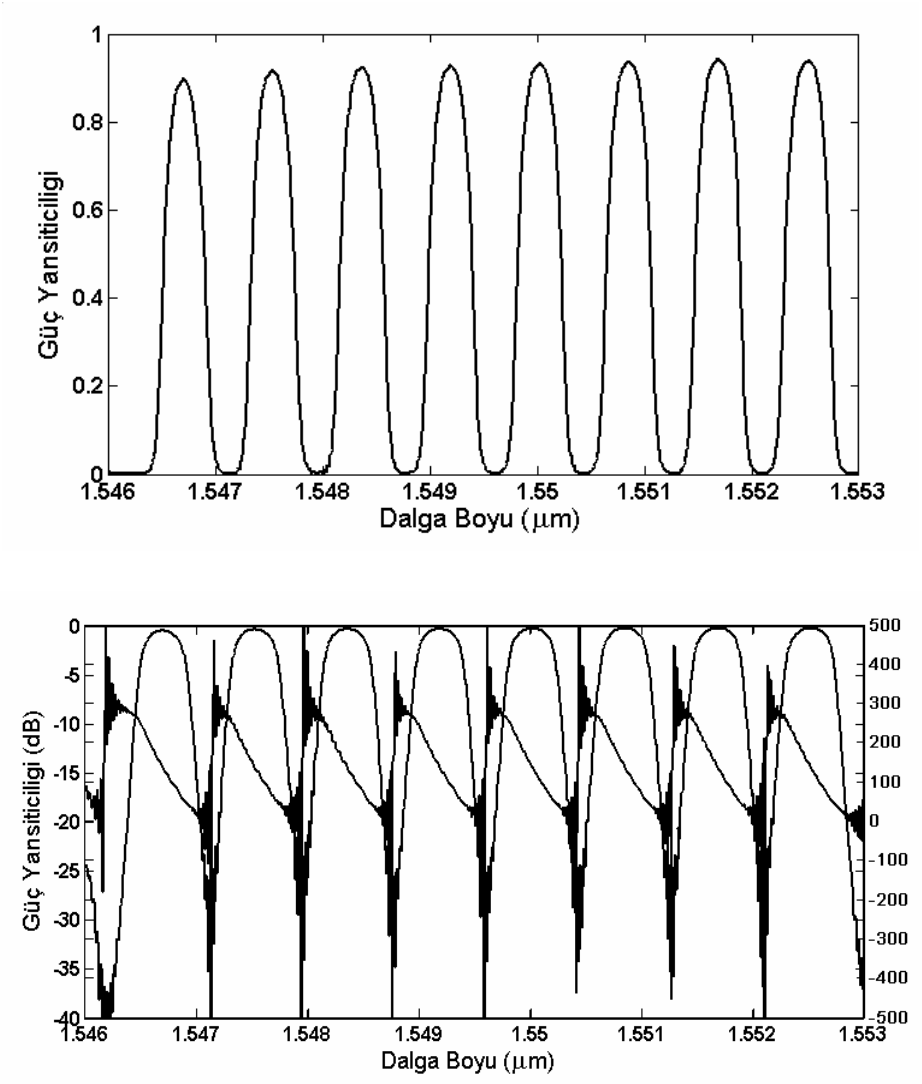
Yansıma ve grup zaman gecikme spektrumları Şekil 7.9'da verilen PSFBG kompansatör, 8 kanallı WDM haberleşme sistemleri için tasarlanmıştır. Kanalların, yansıtıcılık ve band genişlik açısından oldukça özdeş olduğu şekildeki spektrumlardan görülmektedir. Her bir kanalın -3dB band genişliği yaklaşık 0,23nm'dir. PSFBG kampansatörü, bu aralıkta çalışan ve optik sinyali taşıyan iletim fiberinin 870ps/nm değerindeki dispersiyonu dengeleyebilir. Izgaranın cıvıltı

parametresi değiştirilerek WDM optik haberleşme sistemleri için farklı dispersiyon değerlerinde kompanzasyon uygulamaları gerçekleştirilebilir.



Şekil 7.9. WDM dispersiyon kompansatörü yansıma ve grup zaman gecikme spektrumları, *L=3cm,* $\overline{\delta n}_{eff}=4\cdot10^{-4}$, λ_D=1550nm, cıvıltı parametresi=0,05nm/cm*, sinc apodizasyon*

Cıvıltı parametresi değiştirilerek, -3dB band genişliği ve dispersiyonu farklı kompansatör elde etmek mümkündür. Önceki tasarım örneğindeki parametrelerden, sadece cıvıltı parametresi 0.1nm/cm olarak değiştirildiğinde elde edilen dispersiyon kompansatörünün güç yansıma ve grup zaman gecikme spektrumu, Şekil 7.10'da görüldüğü gibi elde edilir. Bu tasarımda, her bir kanalın -3dB band genişliği yaklaşık 0,37nm'ye genişlemiştir. Kompansatörün, optik sinyali taşıyan iletim fiberin 670ps/nm değerindeki dispersiyonu dengeleyebileceği tespit edilmiştir.



Şekil 7.10. WDM dispersiyon kompansatörü yansıma ve grup zaman gecikme spektrumları, L=3cm, $\overline{\delta n}_{eff}=4\cdot10^{-4}$, λ_D=1550nm, cıvıltı parametresi=0,1nm/cm, *sinc apodizasyon*

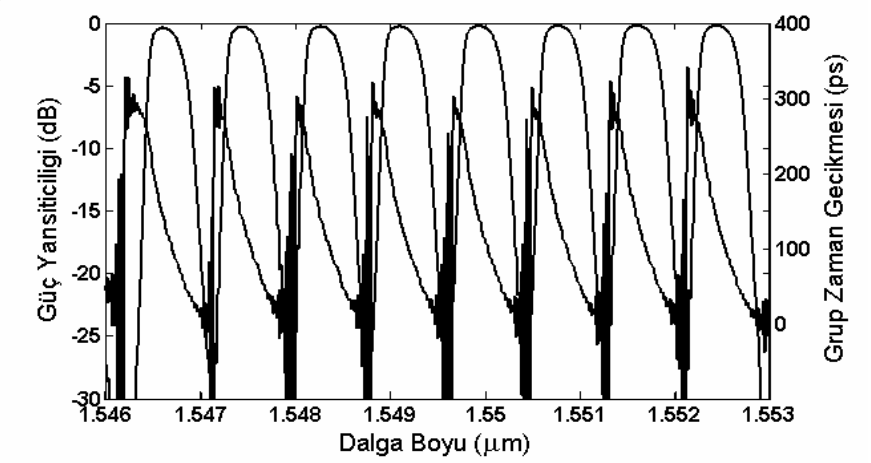
7.4.2. Doğrusal olmayan dispersiyon kompanzasyonu

Izgara fazına, doğrusal cıvıltı yerine doğrusal olmayan cıvıltı uygulayarak elde edilen dispersiyon kompanzasyonunun paralelinde, dispersiyon eğim kompanzasyonu da sağlanabilir. Böyle bir tasarım için, bölüm 6.3.1' de tanımlanan ve aşağıdaki eşitlikle belirtilen cıvıltı fonksiyonu kullanabiliriz.

$$\frac{d\lambda_D}{dz} = \frac{CL}{1-\exp(-k_c)}\left[1 - exp(-k_c z/L)\right] \tag{7.6}$$

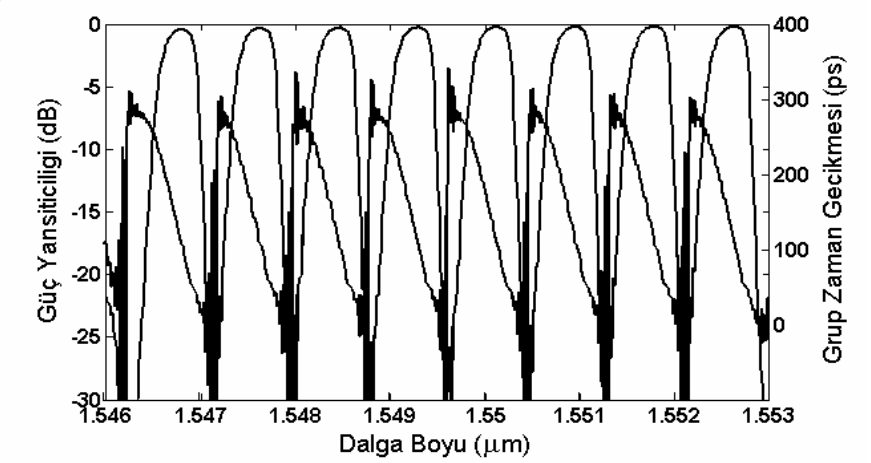
Burada C doğrusal cıvıltı katsayısı, k_c doğrusal olmayan cıvıltı katsayısı ve L ızgara boyudur. Şekil 7.11 ve 7.12'de, doğrusal olmayan dispersiyon kompansatörüne ilişkin iki farklı tasarıma ait güç yansıtıcılık ve grup zaman gecikme spektrumları görülmektedir. Her bir kanal için, grup zaman gecikme eğrisinin eğimli olması, dispersiyonun dalgaboyu ile değişmesine sebep olur. İlk tasarımda, doğrusal olmayan cıvıltı katsayısı k_c=1, ikinci tasarımda k_c=-1 olarak alınmıştır. k_c parametresi sıfıra doğru yaklaştıkça, grup zaman gecikme eğrisi giderek doğrusallaşır ve her kanal için dispersiyon sabit bir değer alır. Böylece C parametresi ile dispersiyon kontrol edilirken, k_c parametresi ile dispersiyon eğimini kontrol etmek mümkün olmaktadır.

Şekil 7.11'de, güç yansıtıcılık ve grup zaman gecikme spektrumları üst üste çakıştırılarak, PSFBG'nin WDM sistemler için doğrusal olmayan dispersiyon kompanzasyonu sağlayabileceği daha net bir şekilde görülmektedir. Grafiksek veriler değerlendirildiğinde, PSFBG kompansatörün dispersiyon karakteristikleri şu şekilde belirlenmiştir: WDM spektrumda her kanalın band genişliği 0,38nm olarak hesaplanmıştır. Şekil 7.11'deki spektrumun, merkez dalgaboyu 1546-1547nm aralığında olan 1. kanal için dispersiyonun ortalama değeri -580ps/nm iken, merkez dalgaboyu 1552-1553nm aralığında olan 8. kanal için dispersiyonun ortalama değeri -473ps/nm olarak tespit edilmiştir. Dispersiyon eğim parametresi k_c, pozitif yönde arttıkça ızgaranın dispersiyon eğim cevabı da aynı paralellikte değişecektir.



Şekil 7.11. WDM dispersiyon kompansatörü yansıma ve grup zaman gecikme spektrumları, L=3cm, $\delta n_{eff}=4\cdot10^{-4}$, λ_D=1550nm, C=0,1nm/cm, k_c=1, *sinc apodizasyon*

Bir önceki tasarım sonuçlara oldukça benzeyen Şekil 7.12'deki spektrumda, değişen sadece dispersiyon eğiminin yön değiştirmesidir. Bunun için, eğim parametresi k_c' ye negatif bir değer atamak kafidir. Grafiksel değerlendirmeler ile bu spektrumda, 8. kanal için ortalama dispersiyon -583ps/nm, 1. kanal için ise -490ps/nm olarak elde edilmiştir. Bu değerler, Şekil 7.11 için elde edilen değerlerle kıyaslandığında, dispersiyon eğiminin yön değiştirdiği açıkça görülmektedir.



Şekil 7.12. WDM dispersiyon kompansatörü yansıma ve grup zaman gecikme spektrumları, L=3cm, $\delta n_{eff}=4\cdot10^{-4}$, λ_D=1550nm, C=0,1nm/cm, k_c=-1 *sinc apodizasyon*

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

İçinde bulunduğumuz bilgi çağı, iletişim teknolojilerinde baş döndürücü gelişmelere sahne olmaktadır. Bu gelişmelerin önemli bir kısmına fiberoptik ağlar ve haberleşme sistemleri altyapı hizmeti sunmaktadırlar. EDFA ve RAMAN gibi optik yükselteçlerin uygulamaya girmesiyle yeni bir döneme geçen fiberoptik haberleşme sistemlerinde, bilgi iletim mesafesini ve hızını sınırlayan en büyük etken olan fiber zayıflamasının yerini dispersiyon almıştır. Dispersiyon ile mücadelede bugün, fiberoptik haberleşme sisteminde bir optik bileşen olarak kullanılabilen fiber Bragg ızgaralarına yoğun bir ilgi vardır. Bu çalışmada, fiber Bragg ızgaralarının optik haberleşme sistemleri için hem iyi bir optik filtre, hem de dispersiyon problemlerine çözüm olabilecek optik kompansatörleri geliştirmeye ve uygulamaya yönelik araştırmalar yapılmıştır.

Fiber Bragg ızgarasının bağlaşımlı kip teorisine dayanan modellemesinin ve matris transfer metodu ile sayısal çözümlemesinin yapıldığı 4. bölüm, çalışmanın ilk kritik aşamasıdır. Bu aşamada, MATLAB yazılımı altında geliştirilen simülatör programı, yeni fiber Bragg ızgara tasarımlarının oluşturulmasına ve bunların optik karakteristiklerinin gözlemlenerek analizler yapılmasına olanak sağlamıştır. Tek kanal için tasarlanmış bir FBG' nin, istenilen bir dalgaboyu aralığında iyi bir yansıtıcılıkla beraber dispersiyon kompazatörü olarak kullanılabileceği 5. bölümde sunulan tasarımlarla gösterilmiştir. Bu bölümde ızgara boyu, cıvıltı parametresi, kırılma indis modülasyon genliği ve apodizasyon profilinin, FBG' nin güç yansıtıcılığı, yansıma spektral genişliği, grup zaman gecikme ve dispersiyon karakteristikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Izgara fazına uygulanan doğrusal cıvıltının, grup zaman gecikme spektrumunda doğrusal azalan bir değişim oluşturduğu gözlenmiş, bu değişimin optik iletim fiberinden kaynaklanan kromatik dispersiyonu telafi edebileceği sonucuna varılmıştır. Cıvıltılı bir FBG'nin dispersiyon karakteristiğinin, ızgara boyu ve cıvıltı parametreleri arasında kurulacak denge ile yakından ilişkili olduğu anlaşılmıştır (bkz Şekil 5.12-13). Ayrıca optik ızgarayı apodize ederek oldukça yararlı sonuçlar elde edilmiştir. Apodize edilen bir cıvıltılı FBG, dalgaboyu spektrumunda istenilen bir yansıma band aralığında daha

kararlı bir optik filtre ve dispersiyon davranışı sergilemiştir (bkz Şekil 5.10-11). Elde edilen bulgular ve sunulan tasarım örnekleri, cıvıltılı FBG' lerin tüm C veya L bandını kapsayan iyi bir dispersiyon kompansatörü olabileceğini de ortaya koymuştur (bkz Şekil 5.14-15).

Yeni kurulan optik haberleşme sistemlerinde, geniş bir band üzerinde WDM/DWDM ile çok kanallı iletişim zorunlu hale gelmiştir. Dispersiyon, tek kanallı optik haberleşme sistemlerinde olduğu gibi, WDM/DWDM sistemlerde de en önemli sınırlayıcı faktördür. FBG'leri, her bir WDM kanal için ayrı ayrı optik fibere ilave etmek, sistem maliyetini oldukça artırır. Çünkü, FBG'lerin optik fibere eklenmesi pahalı dolaştırıcılar gerektirir. Bunun yerine, FBG'lerin dalgaboyu spektrumları katlayan ve birden çok yansıma kanalı üreten karmaşık ızgara tasarımları geliştirmek daha ekonomik bir yoldur.

6. bölümde, tek kanallı bir FBG için sunulan tasarım modeli ve simülatör yazılımı bir adım daha geliştirilerek, çok kanallı optik haberleşme sistemleri için optik fiber ızgarasının örneklenmesi, karmaşık yapılar ve bunların etkileri araştırılmıştır. Örneklenmiş FBG'lerin (SFBG) yansıma spektrumunun şekillendirilmesinde en etkin parametre örnekleme fonksiyonudur. Bu bölümde ilk olarak genlik örnekleme yaklaşımı içinde, dikdörtgensel ve sinc örnekleme fonksiyonları uygulanarak, bunların Fourier spektrumu ile SFBG' nin yansıma spektrumu karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalardan, örnekleme fonksiyonun Fourier katsayılarının, SFBG' nin yansıma spektrumunda WDM kanalları birebir karşıladığı görülmüştür. Dikdörtgensel örneklemiş bir FBG' nin yansıma kanal sayısı arttıkça (örnekleme oranı azaldıkça), bu kanalların şiddeti azalmaktadır. Bu azalma, ızgara boyu artırılarak şiddetlendirilmiştir. Örnekleme oranı 1/30 ve L=60mm uzunluklu dikdörtgen örneklenmiş FBG için yapılan simülasyonda, 1542-1560nm dalgaboyu aralığında 22 kanalın iyi bir yansıtıcılık sağladığı tespit edilmiştir (bkz Şekil 6.10). Kanal şiddetindeki azaltmayı sinc örneklenme ile de yavaşlatmak mümkündür. Bunun için dikdörtgensel yerine sinc biçimli örnekleme kullanılmıştır. Sinc örnekleme fonksiyonunun kanal sayısı ile ilişkili tanımı yapılmış ve bu aşamada

belirlenen bir *K* parametresi ile istenilen sayıda kanal üreten ızgara tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Fiberin çekirdek indisinin dalgaboyuna göre doğrusal olmayan değişiminden dolayı, iletim hattının optik sinyal üzerindeki dispersif etkisi dalgaboyu ile değişir. Dispersiyon eğim problemi olarak bilinen bu durum, özellikle WDM sistemlerde önemli bir sorundur. Bu bölümde, SFBG' ler ile disperiyon eğimini de kapsayan dispersiyon kompanzatörü için araştırma yapılmıştır. Izgaraya uygulanacak cıvıltı için, doğrusal olmayan değişim içeren bir model geliştirilmiştir (Eş. 6.19). Bu modeli kullanan örnek bir uygulama olarak, dikdörtgen örneklemeli cıvıltılı SFBG' nin tasarım parametreleri ve optik karakteristikleri Şekil 6.23' te sunulmuştur. Izgara genliğinin *tanh*(α=4, β=3) ile apodize edilmesi, grup zaman gecikmesi ve dolayısı ile dispersiyon eğrisindeki dalgalanmaların azaltılmasında etkili olmuştur.

Bölüm 7' de bir başka ızgara yapısı olan faz örneklemeli FBG (PSFBG) üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalar, faz örneklemeli FBG' lerin, faz fonksiyonu iyi belirlendiği takdirde daha iyi yansıma spektrumu ile dispersiyon ve dispersiyon eğim uygulamalarında daha başarılı sonuçlar verebileceğini işaret etmiştir. PSFBG' ler ızgara fazının örneklenmesi ile oluşturulur ve geleneksel örneklemeli ızgara göre daha yüksek yansıtıcılık sağlarlar. İstenilen sayıda, özdeş ve yansıma şiddeti yüksek WDM kanallar üreten bir PSFBG tasarımı, ızgaranın faz örnekleme fonksiyonu ile yakından ilişkilidir. Bu fonksiyonun, hedef bir yansıma spektrumundan yola çıkılarak analitik yöntemlerle belirlenmesi mümkün olmadığından etkin bir optimizasyon yöntemini kullanmak şarttır.

Bu çalışmada, bir süper-yapılı PSFBG modeli geliştirebilmek için, önce faz örnekleme fonksiyonu yeterince az parçalara ayrılmıştır. Faz örnekleme fonksiyonu ile ilişkilendirilen her bir ayrık kanalın için, özdeş ve maksimum yansıtıcılık sağlayan en iyi faz profili, geliştirilen benzetilmiş tavlama algoritması ile optimize edilmiştir. 8, 16 ve 32 kanal için üretilen faz profilleri ile matris transfer metodunu kullanarak PSFBG nin yansıma spektrumu elde edilmiştir. Şekil 7.2-4' de verilen yansıma spektrumlarının, 1-2cm ızgara uzunluğu ve $4\cdot10^{-4}$ - $6\cdot10^{-4}$ değerlikli kırılma

indis modülasyon genliği ile elde edilmesi, iyi bir tasarım örneği olduğunun açık bir göstergesidir.

Faz örnekleme fonksiyonu $\phi(z)$' yi tanımlarken 8, 16 ve 32 kanallı tasarım için sırası ile 10, 20 ve 40 eşit parçaya ayrılması yeterli görülmüştür. Kanal sayısını artırmak için örnekleme periyodu başına düşen parça sayısı artırılabilir. Parça sayısı arttıkça uzaysal çözümler daha da iyileştirilebilir. Ancak artan parça sayısıyla ızgara giderek karmaşıklaşacaktır. Sunulan optimizasyon algoritması ile, arzu edilen kanal sayısını karşılayan ve en uygun parçada tanımlanan mükemmel faz profili bulunabilir. Bu çalışma ile $\phi(z)$' nin karmaşıklığını indirgeyen ve tasarımı kolaylaştıran etkin bir model sunulmuştur.

PSFBG' nin ızgara periyodunun fiber boyunca cıvıltılı bir şekilde değişimi, optik sinyalin çıkışta grup zaman gecikmesine neden olur. Grup zaman gecikmesinin dalgaboyu spektrumundaki eğimi, FBG' nin dispersiyon cevabını verir. Bu teknik, optik haberleşme sistemlerinde kromatik dispersiyonu dengelenmesi için etkili ve tamamen optik bir tekniktir. Bu çalışmanın devam eden aşamalarında, PSFBG' ye cıvıltı ve apodizasyon uygulayarak, WDM ve DWDM sistemler için doğrusal ve doğrusal olmayan dispersiyon kompanzatörlerinin geliştirilebileceği ispatlanmıştır.

Gelecekte, fiberoptik haberleşme sistemlerini hızlandırmaya yönelik talepler kuşkusuz devam edecektir. Sistem hızlandıkça, kromatik dispersiyonla beraber polarizasyon mod dispersiyonu ve saçılma etkileri gibi doğrusal olmayan bozucu etkenlerin baskısı daha da artacaktır. Tüm bu etkenlerin hesaba katıldığı bir sistem tasarımı için, optik fiber Bragg ızgaralarını geliştirerek sistem içinde uygulamak, yakın kuşak optik haberleşme sistemlerinin problemlerine çözüm üretebilir.

KAYNAKLAR

1. Nakazawa, M., Yamamoto T. And Tamura, K. R., "1.28 Tbit/s-70km OTDM transmission using third and fourth-order simultaneous dispersion compensation with a phase modulator", ***Electronics Letters***, 36 (24):2027-2029 (2000).

2. Kapron, F.P., Keck D.B., Maurer, R.D., "Radiation losses in glass optical waveguides", ***Applied Physical Letters***, 17:423-425 (1970).

3. Miya, T., Terunuma, Y., Hosaka, T., Miyashita, T., "Ultimate low-loss single-mode fibre at 1.55 μm", ***Electronics Letters***, 15:106-108 (1979).

4. Yokota, H., Kanamori, H., Ishiguro, Y., Tanaka, S., "Transmission characteristics and reliability of pure-SiO2-core single-mode fibers", ***J. Lightwave Technology***, 4: 1144-1150 (1986).

5. Nagayama, K., Saitoh, T., Kakui M., Kawasaki, K., Matsui, Takamizawa, M.H., Miyaki, H., Ooga, Y., Tsuchiya, I., Chigusa, Y., "Ultra Low Loss (0.151 dB/km) Fiber and its Impact on Submarine Transmission Systems", ***Optical Fiber Communication Conference, OFC '02,*** FA10-1- FA10-3 (2002).

6. Agrawal, G.P., "Nonlinear Fiber Optics", ***Academic Press***, New York, 7-12 (1995).

7. Marcuse D., Light Transmission Optics, ***Van Nostrand Reinhold***, New York, (1982).

8. Kaminow, I. P. and Koch, T. L., Optical Fiber Telecommunication 3nd ed., ***Academic Press***, 162-190 (1997).

9. Agrawal, G. P., Fiber Optics Communications Systems, ***John Wiley&Sons***, New York, 286-287 (1997).

10. Shen, Y. R., Principles of Nonlinear Optics, ***Willey***, New York, 141-142, 187-189, 242-245 (1984).

11. Chraplyvy, A. R., "Limitation on lightwave Communication imposed by optical-fiber nonlinearities" ***IEEE J. Lightwave Technology***, 8 (10): 1548-1557 (1990).

12. Marcuse, D., Chraplyvy A. R. And Tkach, R. W., "Effect of fiber nonlinearities on long distance tranmission***", IEEE J. Lightwave Technology***, 9 (1): 121-128 (1991).

13. Navruz İ., "Optik Fiberlerde Nonlineerlik ve Dispersiyonun Işık Propagasyonuna Etkisi ve Soliton Sistemlere Giriş", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, 56-57 (1999).

14. Tkach R. W. et.al., " Four-Photon Mixing and High-Speed WDM Systems", ***Journal of Lightwave Technology***, 13 (5): 841-849 (1995).

15. Dung J. C., Chi, S., "Dispersion compensation and gain flattened for a wavelength division multiplexing system by using chirped fiber gratings in an erbium-doped fiber amplifier***", Optics Communications***, 162: 219-222 (1999).

16. Zhu, Y., Lu, C., Lacguet, B. M., Swart, P. L., Spammer, S. J., "Wavelength-tunable add/drop multiplexer for dense wavelength division multiplexing using long-period gratings and fiber strechers", ***Optics Communications*** 208: 337-344 (2002).

17. Pastor, D., Martinez, A., Capmany, J., Ortega, B., "Impact of Fiber Bragg Grating Based OADM Outband Dispersion in DWDM-SCM Systems, ***IEEE Photonics Technology Letters***, 14 (4): 567-569 (2002).

18. Cai, J.-X., Feng, K.-M., Willner, A. E., "Simultaneous Tunable Dispersion Compensation of Many WDM Channels Using a Sampled Nonlinearly Chirped Fiber Bragg Grating", ***IEEE Photonics Technology Letters***, 11 (11): 1455-1457 (1999).

19. Yu, Y., Lui, L., Tam, H., Chung, W., "Fiber-Laser Based Wavelength Division Multiplexed Fiber Bragg Grating Sensor Systems", ***IEEE Photonics Technology Letters***, 13 (7): 702-704 (2001).

20. Caucheteur, C., Lhomme, F., Chah, K., Blondel, M., Megret, P., "Fiber Bragg grating sensor demodulation technique by synthesis of grating parameters from its reflection spectrum", ***Optics Communications***, 240: 329-336 (2004).

21. Erdoğan, T., "Fiber Grating Spectra", ***Journal Of Lightwave Technology***, 15 (8): 1277-1294 (1997).

22. Qullette F., "Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguides", ***Optics Letters***, 12 (10): 847-849, (1987).

23. Sheu, L. G., Chuang, K. P., Lai, Y., "Fiber Bragg Grating Dispersion Compensator by Single-Period Overlap-Step-Scan Exposure", ***IEEE Photonics Technology Letters***, 15 (7), 939-941 (2003).

24. Das, M., Thyagarajan, K., "Dispersion Compensation in Transmission Using Uniform Long Periyod Fiber Gratings", ***Optics Communications***, 190: 159-163 (2001).

25. Chen, X., Xu, X., Zhou, M., Jiang, D., "Tunable Dispersion Compensation in a 10-Gb/s Optical Transmission System by Employing a Novel Tunable

Dispersion Compensator", ***IEEE Photonics Technology Letters***, 16 (1): 188-190 (2004).

26. Durkin, M., Ibsen, M., Cole, M. J., And Laming, R. I., "1 m long continuously-written fibre Bragg gratings for combined second- and third-order dispersion compensation," ***Electronics Letters,*** 33 (22): 1891–1893 (1997).

27. Buryak, A. V. and Stepanov, D.Y., "Novel multi-channel grating designs," ***Proceedings of BGPP 2001,*** BthB3-1-3 (2001).

28. Painchaud, Y., Mailloux, A., Chotard, H., Pelletier, E. and Guy, M., "Multi-channel fiber Bragg gratings for dispersion and slope compensation", ***Proeedings of OFC 2002***, 581-582 (2002).

29. Lekner, J. "Light in periodically stratified media", ***Journal of Optical Society of America A***, 11 (11): 2892-2899 (1994).

30. Kim, B. G. and Garmire, E. "Comparison between the matrix method and the coupled-wave method in the analysis of Bragg reflector structures", ***Journal of Optical Society of America A***, 9 (1): 132-136, (1992).

31. Bandelow, U. and Leonhardt, U. "Light propagation in one-dimensional lossless dielectrica: transfer matrix and coupled mode theory", ***Optical Communications***, 101: 92-99, (1993).

32. Ghatak A. K. and Thyagarajan, K. "Optical Electronics", ***Cambridge Univ.*** **Press**, 510-537 (1989).

33. Ghatak, A. K. and Thyagarajan, K. "Introduction to Fiber Optics", ***Cambridge Univ. Press***, 540-555 (1998).

34. Tai, H. "Simple numerical simulation of strain measurement", ***SPIE's 47 Annual Meeting***, 4772 (04): 13-24 (2002).

35. Griffiths, D. J. And Steinke, C. A. "Wave in locally periodic media", ***American Journal of Physics***, 69 (2): 137-154 (2001).

36. Chapra, S., "Numerical Methods for Engineers; with Software and Programming Applications 4th Ed."***, Mc Graw-Hill***, 701-723 (2002).

37. Kogelnik, H. "Coupled wave theory for thick hologram gratings", ***Bell System Technical Journal***, 48 (9): 2909-2949 (1969).

38. Yamada, M. And Sakuda, K. "Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguide via a fundamental matrix approach", ***Applied Optics,*** 26 (16): 3474-3478 (1987).

39. Othonos, A. And Kalli, K. "Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing", ***Artech House***, Boston, 189-221 (1999).

40. Orlov, S. S., Yariv, A., Essen, S. V., "Coupled-mode analysis of fiber-optic add drop filters for dense wavelength-division multiplexing", ***Optics Letters***, 22 (10): 688-690 (1997).

41. McCall, M., "On the application of coupled mode theory for modeling fiber Bragg gratings", ***Journal of Lightwave Technology***, 18 (2): 236-242 (2000)

42. Winick, K.A., "Effective-index method and coupled mode theory for almost waveguide gratings: A comparison", ***Applied Optics***, 31 (6): 757-764 (1992).

43. Katok, V., Kotenko, M., Sergiyenko, I., "Single-Mode Optic Fibre for Wideband Dispersion Compensations", ***IEEE Proceedings of 2001 3rd International Conference on Transparent Optical Networks***, 245-248, (2001).

44. Cole, M. J., Geiger, H., Laming, R. I., Set, S. Y., "Broadband dispersion compensating, chirped fibre Bragg gratings in a 10Gbit/s NRZ 110km non-dispesion-shifted fibre link operating at 1.55μm", ***Electronics Letters***, 33 (1): 70-71 (1997).

45. Pastor, D., Capmany, J., Ortega, D., Tatay, V., Marti, J., "Design of Apodized Linearly Chirped Fiber Gratings for Dispersion Compensation", ***Journal of Lightwave Technology***, 14 (11): 2581-88 (1996).

46. Erro, M. J., Laso, M. A. G., Benito, D., Garde, M. J., "Third-Order Dispersion in Linearly Chirped Bragg Gratings and its Compensation, "***Fiber and Integrated Optics***", 19: 367–382 (2000).

47. Becker, P. C., Olsson, N. A., Simpson, J. R. "Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology", ***Academic Press***, 5-9 (1999).

48. Tsuda, S., Silva, V. L., "Transmission of 80×10 Gbit/s WDM channels with 50 GHz spacing over 500 km of LEAF^{R} fiber", ***Optical Fiber Communication Conference 2000***, 1: 149-151 (2000).

49. Jayaraman, V., Chuang, Z. M. And Coldren, L. A., "Theory, design, and performance of extended tuning semiconductor lasers with sampled gratings," ***IEEE J. Quantum Electronics***, 29 (6): 1824–1834 (1993).

50. Eggleton, B. J., Krug, P.A., Poladian L. And Ouellette, F., "Long periodic superstructure Bragg gratings in optical fibres," ***Electronics Letters***, 30 (19): 1620-1622 (1994).

51. Loh, W.H., Zhou, F.Q., Pan, J.J., "Sampled Fiber Grating Based-Dispersion Slope Compensator", ***IEEE Photonics Technology Letters***, 11 (10): 1280-1282 (1999).

52. Chen, X.-F., Luo, Y., Fan, C.-C., Xie, S.-Z., "Analytical expression of sampled Bragg gratings with chirp in the sampling period and its application in dispersion management design in a WDM system", ***IEEE Photonics Technology Letters***, 12 (8): 1013-1-15 (2000).

53. Reyes, P. I., Litchinitser, N., Sumetsky, M. I., Westbrook, P. S., "160-Gb/s Tunable Dispersion Slope Compensator Using a Chirped Fiber Bragg Grating and a Quadratic Heater", ***IEEE Photonics Technology Letters***, 17 (4): 831-833 (2005).

54. Wang, C-H., Chen, L. R. and Smith, P., "Analysis of chirped-sampled and sampled-chirped fiber Bragg gratings", ***Applied Optics***, 41 (9): 1654-1659 (2002).

55. Xu, X., Dai, Y., Chen, X., Jiang, D. And Xie, S., "Chirped and phase-sampled fiber Bragg grating for tunable DBR fiber laser", Optical Society of America, 13 (10): 3877-3882 (2005).

56. Yun, B., Wang, Y., Li, A., Cui, Y., "Simulated annealing evolutionary algorithm for the fibre Bragg grating distributed strain sensor", ***Measurement Science And Technology***, 16: 2425-2430 (2005).

57. Buryak, A. V., Kolossovski, K. Y., Stepanov, D. Y., **"**Optimization of refractive index sampling for multichannel fiber Bragg gratings", ***IEEE, J. of Quantum Electronics***, 39 (1): 91-98 (2003).

58. Li, H. And Sheng, Y. "Direct Design of Multichannel Fiber Bragg Grating With Discrete Layer-Peeling Algorithm", ***IEEE Photonics Technology Letters***, 15 (9): 1252-1245 (2003).

59. Oullette, F., Krug, P. A., Stephens, T., Dhosi, G. And Eggleton, B. "Broadband and WDM dispersion compensation using chirped sampled fiber Bragg gratings," ***Electronics Letters***, 31 (11): 899–901 (1995).

60. Gnauck, A. H., Garrett, L. D., Forghieri, F., Gusmeroli, V. and Scarano, D., "8x20 Gb/s 315 km, 8 x10 Gb/s 480 km WDM transmission over conventional fiber using multiple broad-band fiber gratings" ***IEEE Photonics Technology Letters***, 10 (10): 1495–1497 (1998).

61. Cai, J.-X., Feng, K.M., Willner, A.E., Grubsky, V., Starodubov, D.S. And Feinberg, J., "Sampled nonlinearly chirped fiber Bragg grating for the tunable dispersion compensation of many WDM channels simultaneously," ***IEEE***

Conference of Optical Fiber Communication, San Diego, California, 4: 20-22 (1999).

62. Shu, X., Chisholm, K., Felmeri, I. And Sugden, K. "Highly sensitive transverse load sensing with reversible sampled fiber Bragg gratings", ***Applied Physics Letters***, 83 (15): 3003-3005 (2003).

63. Ibsen, M., Durkin, M. K., Cole, M. J., Laming, R. I., "Sinc-Sampled Fiber Bragg Gratings for Identical Multiple Wavelength Operation", ***IEEE Photonics Technology Letters***, 10 (6): 842-844 (1998).

64. Wu, Q., Yu, C. X., Wang, K., Xin, X., Wang, X., Yu, Z., "The control of channel numbers with equal reflectivity of sinc-sampled fiber Bragg gratings", ***Optics Communications***, 233: 83-88 (2004).

65. Xie, Y., Lee, S., Pan, Z., Cai, J.X., Willner, A. E., Grubsky, V., Starodubov, D. S., Salik, E. And Feinberg, J., "Tunable compensation of the dispersion slope mismatch in dispersion-managed systems using a sampled nonlinearly chirped FBG," ***IEEE Photonics Technology Letters***, 12 (10): 1417-1419 (2000).

66. Dammann, H. and Gortler, K., "High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms," ***Optics Communications***, 3: 312-315, (1971)

67. Li, H., Sheng, Y., Li, Y. And Joshua, E., "Phased-Only Sampled Fiber Bragg Gratings for High-Channel-Count Chromatic Dispersion Compensation", ***Journal Of Lightwave Technology***, 21 (9): 2074-2083 (2003).

68. Kashyap, R., "Fiber Bragg Gratings", ***Academic Press***, London, U.K., 57-60, 211-212 (1999).

69. Rothenerg, J.E., Li, H., Li, Y., Popelek, H., Sheng, Y., Wang, Y., "Dammann Fiber Bragg Gratings and Phase-Only Sampling for High Channel Counts", ***IEEE Photonics Techonology Letters***, 14 (9) : 1309-1311 (2002).

70. Lee, H. Agrawal, G. P., "Add–Drop Multiplexers and Interleavers With Broad-Band Chromatic Dispersion Compensation Based on Purely Phase-Sampled Fiber Gratings", ***IEEE Photonics Technology Letters***, 16 (2): 635-637 (2004).

71. Pan, Z., Song, Y.W., Yu, C., Wang, Y., Willner, A.E., "Using sampled nonlinearly chirped fiber Bragg gratings to achieve 40-Gbit/s tunable multi-channel dispersion compensation", ***Optics Communications***, 241: 371–375 (2004).

72. Kolossovski, K. Y., Sammut, R. A., Buryak, A. V., Stepanov, D.Y., "Three-step design optimization for multi-channel fibre Bragg gratings", ***Optics Express***, , 11 (9): 1029-1038 (2003).

73. Lee, H., Agrawal, G. P., “Purely Phase-Sampled Fiber Bragg Gratings for Broad-Band Dispersion and Dispersion Slope Compensation”, ***IEEE Photonics Technology Letters***, 15 (8):1091-1093 (2003).

74. Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C.D., Vecchi Jr, M.P., “Optimization By Simulated Annealing, Science”, 220: 671-680 (1983).

75. Haddock, J., Mittenthal, J., "Simulation Optimization Using Simulated Annealing", ***Computers and Industrial Engineering***, 22 (4): 387-395 (1992).

76. Nasu, Y., Yamashita, S., “Multiple phase-shift superstructure fibre Bragg grating for DWDM systems”, ***Electronics Letters***, 37 (24): 1471-1472 (2001).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: NAVRUZ, İsa
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 10.05.1974 Çankırı
Medeni Hali	: Evli
Telefon	: 0 (312) 2126720/1462
Fax	: 0 (312) 2125480
e-mail	: inavruz@eng.ankara.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/ Elk-Elektronik M.	1999
Lisans	Dokuz Eylül Ü./Elk-Elektronik M.	1995
Lise	Çankırı Lisesi	1991

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1995-2004	Ankara Ü. Çankırı MYO	Öğretim Görevlisi
2004-2006	Ankara Ü. Elektronik M.	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Güler, F.N., Navruz, İ.,"Optik Haberleşme Sistemlerinde Dispersiyon Kompanzasyonunda Optik Izgara Tabanlı Çözümler", Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21 (1): 129-136, 2006.

2. Navruz, İ., Güler, F.N., "Optimization of Reflection Spectra for Phase-Only Sampled Fiber Bragg Gratings", Optics Communications (Basıma hazır).

Hobiler

Kayak, Bilgisayar Teknolojileri, Tiyatro.