

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OPTİK FİBERLİ BRILLOUIN VE DAĞINIK RAMAN
KUVVETLENDİRİCİLERİNİN MATLAB NÜMERİK ÇÖZÜMLERİ İLE
PERFORMANS ANALİZLERİ

Fikri Serdar GÖKHAN

DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2010

ÖZET

Günümüzde kullanılan haberleşme sistemlerinin bit hızları ve iletim için kullandıkları bant genişlikleri hızla artmaktadır. Buna bağlı olarak yüksek bit hızları ve geniş bantlarda çalışabilen Dağınık Raman fiber kuvvetlendiricilerine olan ilgi son yıllarda oldukça artmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalar iki ana başlık altında özetlenebilir. Birincisi, Dağınık Raman fiber kuvvetlendiricilerini tanımlayan denklem sistemlerinin geliştirilmesi, ikincisi de bu denklem sistemlerinin etkin bir şekilde çözülmesi için yapılan çalışmalardır. Dağınık Raman fiber kuvvetlendiricilerini tanımlayan denklem sistemlerinin çözümüne yönelik yapılan çalışmalar sınırlandırılmış şartlar altında ve yavaş çözüm sunabilmektedir. Geliştirilen denklem sistemleri için her durumda kararlı ve hızlı çözüm üretecek bir nümerik çözüm yöntemi yoktur. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla, tez kapsamında, Raman denklem sistemleri için her koşulda çözüm üretecek kararlı ve hızlı nümerik yöntem sunulmuştur.

Tez kapsamında, tek pompa ve tek sinyal içeren Raman ve Brillouin fiber kuvvetlendiricilerinin benzetimi için kararlı ve hızlı çalışan bir nümerik yöntem önerilmiş ve bu yöntemin tüm kuvvetlendirici yapılandırmaları için uygulanabileceğini göstermek amacıyla çok sayıda benzetim yapılmıştır.

Tek pompa ve tek sinyal içeren Raman ve Brillouin fiber kuvvetlendiriciler için yapılan benzetimler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak bu kuvvetlendiricilerin eşik pompa güç seviyesinin nümerik olarak hesaplanması için pratik bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemle hesaplanan kuvvetlendirici eşik güç seviyeleri ile deneysel değerlerin tam olarak örtüştüğü görülmüştür. Optik fiberli kuvvetlendiricilerin eşik gücünün hesaplanması sadece optik fiberli kuvvetlendirici tasarımları için değil aynı zamanda optik fiberli lazerler ve optik fiberli algılayıcılar gibi pratikte sıkça kullanılan uygulamalar için de önemlidir.

Pompa dalgası fiber içerisinde ilerlerken fiber kaybı ve lineer olmayan pompa-sinyal etkileşimi nedeniyle gücünü tüketmektedir. Lineer olmayan pompa-sinyal etkileşiminden kaynaklanan pompa gücünün tüketilme miktarı optik fiberli birçok uygulama için önemlidir. Sinyal çözümlenmesi sonucunda elde edilen veriler ile birlikte pompa giriş gücüne bağlı olarak fiberdeki tüm noktalarda pompa tüketilme miktarını belirleyen yöntem geliştirilmiştir.

Tez çalışmasında, Raman ve Brillouin fiber kuvvetlendiricilerin nümerik çözümü için kestirim ve sonlu farklar yöntemleri incelenmiştir. Bu yöntemler içerisinde daha kararlı çözüm sunabilmesinden dolayı sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Yüksek pompa güçlerinde ve uzun fiber kuvvetlendirici mesafelerinde çözüm üretebilmek için *süreklilik* olarak adlandırılan ilerleme tekniği kullanılmıştır. Önerilen çözüm algoritması, Raman ve Brillouin kuvvetlendiricilerin tüm yapılandırmaları için çözüm üretebilmektedir. Bu yöntem sadece optik fiberli kuvvetlendirici tasarımları için değil, iki noktada değerleri bilinen sınır değer problemlerinin çözümü için önemli bir araç olma özelliğine sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Fiber Kuvvetlendiriciler, Optik Fiber, Sınır Değer Problemleri, Süreklilik Yöntemi

ABSTRACT

Bit rates and the transmission bandwidth are increasing rapidly for the currently used communication systems. Accordingly, the interest in Distributed Raman fiber amplifiers has increased in the recent years because they can work in high bit rates and wide transmission bands. The studies on this topic can be summarized under two main headings. The first one includes the development of the equations which describe the distributed Raman fiber amplifier system, the second topic deals with the studies of efficient solution of the equations. The proposed solutions for distributed Raman fiber amplifiers equation systems are performing under limited conditions and are rather slow. In the literature, there is a lack of stable and fast numerical solution which meets all situations for the developing Raman amplifier equations. In order to meet this need, within the scope of this thesis, fast and stable numerical solution which works in any condition is presented.

In the context of thesis, fast and stable numerical method has been proposed for the simulation of Raman and Brillouin fiber amplifiers having single pump and single signal and several number of simulations have been made to show the applicability of this method to all amplifier configurations.

Using the data obtained from simulation of a single pump and single signal fiber amplifier, a practical numerical method has been proposed for the calculation of power threshold of this amplifier. Thereafter, it is seen that the calculated power threshold values match exactly with the experimental values observed. Calculation of the threshold power level is not only important for the design of the optical fiber amplifiers but also for the applications such as fiber lasers and fiber sensors.

During its propagation through the fiber, the pump power is depleted due to fiber loss and nonlinear pump-signal interaction. The pump depletion due to nonlinear pump-signal interaction is important for many optical fiber applications. Using the data obtained from the solution of equations, a computation method has been developed for the calculation of pump depletion along the fiber depending on the pump power injected into the fiber.

Within the thesis, finite difference and shooting methods have been investigated for the solution of Raman and Brillouin fiber amplifiers. Within these methods, finite difference method has been preferred due to its high stability. Continuation method has been used for the numerical solution of amplifiers which have high pump powers and long fiber distances. The proposed solution algorithm can produce a solution for all fiber amplifier configurations. This solution method will be an important tool not only for fiber amplifiers but also all kinds of two-point boundary value problems.

Keywords: Optical Fiber Amplifiers, Optical Fiber, Boundary Value Problems, Continuation Method.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Optik Fiberle Kuvvetlendirme	1
1.2. Problemin Tanımı	3
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI ve KURAMSAL BİLGİLER	5
2.1. Kaynak Araştırması	5
2.2. Kuramsal Bilgiler	9
2.2.1. Raman kuvvetlendirmesi	9
2.2.2. Raman kuvvetlendiricileri	11
2.2.3. Raman kazanç katsayısı	13
2.2.4. Raman fiber kuvvetlendirici modeli	15
2.2.4.1. Genel kuvvetlendirici modeli	16
2.2.4.2. Sinyal, pompa ve ASE gürültüsüne ait denklemler	17
2.2.4.3. Birden fazla pompa ve sinyal içeren basitleştirilmiş Raman kuvvetlendirici modeli	19
2.2.4.4. Tek pompa ve tek sinyal içeren Raman kuvvetlendirici modeli	21
2.2.5. Brillouin kuvvetlendirmesi	22
2.2.6. Brillouin kuvvetlendiricilerin eşik noktasının hesaplanması	23
2.2.7. Brillouin fiber jeneratörü	24
2.2.8. Brillouin kuvvetlendiricileri	28

3. MATERYAL ve YÖNTEM	30
3.1. Kararlı Durum Denklemlerinin Newton-Raphson Yöntemi ile Çözümü	30
3.2. Raman Kuvvetlendirici Denklemlerinin Çözümü İçin Yapılan Çalışmalar	32
3.2.1. Kestirim yöntemi	33
3.2.2. Sonlu farklar yöntemi	34
3.3.Brillouin Kuvvetlendirici Denklemlerinin MATLAB Sınır Değer Fonksiyonları ile Çözümü	37
3.3.1. Diferansiyel denklemlerin kodlanması	37
3.3.2. Sınır değerlerin kodlanması	38
3.3.3. Tahmin fonksiyonunun kodlanması	38
3.3.4. Hesaplama	39
3.3.5. Program çıktısı	40
3.4. Raman Kuvvetlendirici Denklemlerinin MATLAB çözümü	40
3.4.1. Diferansiyel denklemlerin kodlanması	40
3.4.2. Sınır değerlerin kodlanması	41
3.5.Birden Fazla Pompa ve Sinyal İçeren Raman Kuvvetlendirici Denklemlerinin Çözümü	41
3.6. Önerilen Çözüm Yönteminin Uygulanması	42
3.6.1.MATLAB sembolik fonksiyon seti kullanılarak Jacobian matrisinin hesaplanması	45
3.6.2. Süreklilik yöntemi ile pompa gücünün artırılması	46
3.6.3. Süreklilik yöntemi ile fiber mesafesinin artırılması	46
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI	47
4.1.Brillouin Fiber Kuvvetlendiricilerin MATLAB Sınır Değer Çözücü Fonksiyonlar ile Nümerik Çözümü	47
4.2.MATLAB Sınır Değer Çözücü Fonksiyon ile Brillouin Fiber Kuvvetlendiricilerin Eşik Değerlerinin Hesaplanması	48
4.3.Raman Fiber Kuvvetlendiricilerin MATLAB Sınır Değer Çözücü Fonksiyon ile Nümerik Çözümü	55
4.4.Raman Fiber Kuvvetlendiricilerin Nümerik Çözümü için Yakınsama Aralığı	61

4.5.Birden Çok Pompa ve Sinyal İçeren Raman Fiber Kuvvetlendiricilerin Nümerik özümleri	64
5. SONUÇ	72
KAYNAKLAR	76
ÖZGEÇMİŞ	82
TEŐEKKÜR	83

KISALTMALAR DİZİNİ

ASE	-	Amplified Spontaneous Emission Kendiliğinden Kuvvetlenen Emisyon
BFJ	-	Brillouin Fiber Generator Brillouin Fiber Jeneratörü
BFK	-	Brillouin Fiber Kuvvetlendiricileri
EDFA	-	Erbium-Doped Fiber Amplifiers Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendirici
FWM	-	Four Wave Mixing Dört Dalga Karışımı
IFWM	-	Intra-channel Four Wave Mixing Kanallar arası Dört Dalga Karışımı
IXPM	-	Intra-channel Cross-Phase Modulation Kanallar arası Çapraz Faz Modülasyonu
KBK	-	Kendiliğinden Brillouin Kuvvetlenmesi
OTDM	-	Optical Time Domain Multiplexing Optik Zaman Domeninde Çoğullama
RFK	-	Raman Fiber Kuvvetlendiricileri
SBS	-	Stimulated Brillouin Scattering Uyarılmış Brillouin Saçılması
SNR	-	Signal to Noise Ratio İşaretin Gürültüye Oranı
SOA	-	Semiconductor Optical Amplifiers Yarı-iletken Optik Kuvvetlendiriciler
SPM	-	Self-Phase Modulation Kendiliğinden Faz Modülasyonu
SRS	-	Stimulated Raman Scattering Uyarılmış Raman Saçılması
WDM	-	Wavelength Division Multiplexing Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama
XPM	-	Cross-Phase Modulation Çapraz Faz Modülasyonu

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Brillouin fiber kuvvetlendiricisinde hesaplanan eşik değerleri ile deneysel değerlerin karşılaştırılması	53
Çizelge 4.2. Şekil 4.24 ve Şekil 4.25’de kullanılan pompaların giriş ve çıkış güçleri	67
Çizelge 4.3. Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’de kullanılan pompa dalgaboylarına ait giriş ve çıkış güçleri	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. İleri yönde pompalamalı Raman fiber kuvvetlendirici	11
Şekil 2.2. İleri yönde pompalanan Raman kuvvetlendiricisinin şematik gösterimi	12
Şekil 2.3. Ters yönde pompalamalı Raman kuvvetlendiricinin şematik gösterimi	13
Şekil 2.4. İki yönde pompalamalı Raman kuvvetlendiricinin şematik gösterimi	13
Şekil 2.5. Noktasal ve dağınık fiber kuvvetlendiricilerin sinyal seviyelerinin mesafeye göre değişimi	13
Şekil 2.6. <i>SMF-28</i> ve <i>TW-Reach</i> fiberin 1460 nm'deki Raman kazanç katsayısı	14
Şekil 2.7. <i>TW-Reach</i> fiber için Raman kazanç katsayısının dalga boyu ile değişimi	15
Şekil 2.8. Raman kuvvetlendiricisinin şematik olarak gösterimi. $P_1(0+)\dots P_N(0+)$, $z=0$ noktasından $z=L$ noktasına doğru hareket eden sinyal ve pompa güçlerini, $P_1(L+)\dots P_N(L+)$ ise $z=L$ noktasındaki güç seviyelerini göstermektedir. L , fiber uzunluğunu, z ise pozisyonu ifade etmektedir.	16
Şekil 2.9. Sinyal, pompa ve ASE gürültüsünün dalga boyu spektrum dağılımları	17
Şekil 2.10. Brillouin fiber jeneratörünün şematik gösterimi	25
Şekil 2.11. Brillouin fiber jeneratöründe geriye saçılan optik gücün deneysel olarak ölçüm sonuçları	25
Şekil 2.12. Brillouin fiber jeneratöründe geriye saçılan optik güce ait deneysel olarak ölçülen güç değerleri ile benzetim yapılarak hesaplanan güç değerlerinin kıyaslanması	26
Şekil 2.13. Brillouin fiber jeneratöründe, fiber girişinde ölçülen stokes ($P_S(0)$) (kare) güç seviyesi ile fiber çıkışında ölçülen pompa ($P_P(L)$) (üçgen) güç seviyesi. Geriye saçılan stokes gücünün ($P_S(0)$), giriş pompa gücüne göre değişimi ($dP_S(0) / dP_P(0)$) ile gösterilmiştir.	27
Şekil 2.14. Brillouin kuvvetlendiricinin şematik olarak gösterimi	28
Şekil 3.1. Birden fazla pompa ve sinyal içeren Raman kuvvetlendirici denklemlerinin çözümü için önerilen algoritma	44

- Şekil 4.1. Brillouin fiber kuvvetlendiricisinde pompa ve sinyal gücünün fiber uzunluğu ile değişimi $P_S(L)=1\mu\text{W}$, $P_p(0)=15\text{mW}$ 47
- Şekil 4.2. Brillouin fiber kuvvetlendiricisinde sinyal ve pompa çıkış gücünün pompa giriş gücüne göre değişimi $P_S(L)=100\text{nW}$, $P_p(0)=15\text{mW}$ 49
- Şekil 4.3. $P_S(L)=1\mu\text{W}$ için (4.2) eşitliği ile hesaplanan Brillouin fiber kuvvetlendirici eşik gücü 50
- Şekil 4.4. $P_S(L)=10\mu\text{W}$ için (4.2) eşitliği ile hesaplanan Brillouin fiber kuvvetlendirici eşik gücü 50
- Şekil 4.5. Brillouin fiber kuvvetlendiricisinde, sinyal gücü ile pompa eşik değeri arasındaki ilişki. (a),(b),(c) şekillerinde sinyal güçleri ($P_S(L)$) sırasıyla 1.5 nW, 150 nW, 15 μW 'tır. Eşik değeri ise sırasıyla 9.031 dBm, 6.99 dBm, 4.771 dBm'dir. 51
- Şekil 4.6. Brillouin fiber kuvvetlendiricisinde, sinyal gücü ve sinyal kazancı arasındaki ilişki. (a),(b),(c) şekillerinde sinyal güçleri ($P_S(L)$) sırasıyla 1.5 nW, 150 nW, 15 μW 'dir. Bu sinyal güçleri için en yüksek kazanç değerleri ise sırasıyla 105 dB, 85 dB, 70 dB'dir. 52
- Şekil 4.7. Brillouin fiber kuvvetlendiricisinde pompa gücüne bağlı kazanç değerleri 53
- Şekil 4.8. Brillouin fiber kuvvetlendiricisinde pompa gücüne bağlı işaret gürültü oranı 54
- Şekil 4.9. İleri yönlü tek pompa ve tek sinyal içeren Raman fiber kuvvetlendiricisinde pompa ve sinyal gücünün fiber uzunluğu ile değişimi. $P_p(0)=1.5\text{W}$, $P_S(0)=1\text{nW}$ 55
- Şekil 4.10. İleri yönlü pompalamalı Raman fiber kuvvetlendiricisinde pompa ve Stokes çıkış gücünün, giriş pompa gücü ile değişimi $P_S(0)=1\text{nW}$ 56
- Şekil 4.11. $P_S(0)=1\text{nW}$ ve $\Gamma=1$ için ileri yönlü pompalamalı Raman fiber kuvvetlendiricinin eşik gücü 57
- Şekil 4.12. $P_S(0)=1\text{nW}$ ve $\Gamma=2$ için ileri yönlü pompalamalı Raman fiber kuvvetlendiricinin eşik gücü 57
- Şekil 4.13 İleri yönde pompalamalı Raman kuvvetlendiricisinde, literatürde kabul edilen eşik seviyesi ile (4.4) ve (4.5) eşitlikleri ile hesaplanan eşik gücü arasındaki farkın gösterimi. Stokes gücü $P_S(0)=1\text{nW}$, $\alpha_S \approx \alpha_P = 0.2$ dB/km, $g_R = 7 \times 10^{-14}$ m/W, $A_{eff} = 80 \mu\text{m}^2$, $w_P = 1.55 \mu\text{m}$, $w_S = 1.65 \mu\text{m}$, $L = 100$ km, $\Gamma = 1$. 59

- Şekil 4.14. İleri yönde pompalamalı Raman kuvvetlendiricisinde, pompa tükenmesinin giriş pompa gücüne göre değişimi. Stokes gücü $P_S(0)=1\text{nW}$, $\alpha_S \approx \alpha_P = 0.2$ dB/km, $g_R = 7 \times 10^{-14}$ m/W, $A_{eff} = 80 \mu\text{m}^2$, $w_P = 1.55 \mu\text{m}$, $w_S = 1.65 \mu\text{m}$, $L = 100$ km, $\Gamma = 1$. 60
- Şekil 4.15 İleri yönde pompalamalı Raman kuvvetlendiricisinde, pompa tükenmesinin başladığı kazanç seviyesi ile literatürde kabul edilen pompa eşik seviyesindeki kazanç değeri. Stokes gücü $P_S(0)=1\text{nW}$, $\alpha_S \approx \alpha_P = 0.2$ dB/km, $g_R = 7 \times 10^{-14}$ m/W, $A_{eff} = 80 \mu\text{m}^2$, $w_P = 1.55 \mu\text{m}$, $w_S = 1.65 \mu\text{m}$, $L = 100$ km, $\Gamma = 1$ 60
- Şekil 4.16. Tahmini ilk değerlerin sınır değerlerine eşit olduğu durumda yakınsama uzunluğu ve benzetim süresinin pompa gücüne olan bağlılığı (*bvp5c* ile) 62
- Şekil 4.17. Tahmini ilk değerlerin sınır değerlerine eşit olduğu durumda benzetim süresinin bağıl hata değeri ile değişimi (*bvp5c* ve analitik Jacobian matrisi ile) 63
- Şekil 4.18. Tahmini ilk değerlerin sınır değerlerine eşit olduğu durumda yakınsama mesafesinin farklı sınır değer çözücü fonksiyonlar ile değişimi (Hata toleransı 10^{-5} ve analitik Jacobian matrisi ile) 63
- Şekil 4.19. Tahmini ilk değerlerin sınır değerlerine eşit olduğu durumda hesaplama süresinin farklı sınır değer çözücü fonksiyon ile değişimi (Hata toleransı 10^{-5} ve analitik Jacobian matrisi ile) 64
- Şekil 4.20. İki adet ters yönlü pompalama düzeneğinde pompa güçlerinin fiber boyunca *dBm* cinsinden değişimi 65
- Şekil 4.21. İki adet ileri yönlü ve üç adet ters yönlü pompalama düzeneğinde pompa güçlerinin fiber boyunca değişimi 65
- Şekil 4.22. Şekil 4.21'deki pompalama düzeneğinde pompa güçlerinin fiber boyunca *dBm* cinsinden değişimi 66
- Şekil 4.23. Şekil 4.20'deki kuvvetlendiriciye ait 19 adet sinyalin fiber boyunca kuvvetlendirilmesi 66
- Şekil 4.24. Giriş güçleri eşit 10 adet ters yönlü pompalama düzeneğinde pompa güçlerinin fiber boyunca *dBm* cinsinden değişimi 67
- Şekil 4.25. Giriş güçleri 130 ile 350 mW arasında değişen 10 adet ters yönlü pompalama düzeneğinde pompa güçlerinin fiber boyunca *dBm* cinsinden değişimi 68

Şekil 4.26. Şekil 4.24'teki kuvvetlendirici düzeneğinde pompa güçlerinin fiber boyunca <i>Watt</i> cinsinden değişimi	68
Şekil 4.27. Şekil 4.24'te verilen Raman kuvvetlendiricisinde $z=0$ noktasından $z=L$ noktasına hareket eden 64 adet sinyalin fiber boyunca güç değişimi	69
Şekil 4.28. Dört adet ileri yönlü ve altı adet ters yönlü pompalama düzeneğinde pompa güçlerinin fiber boyunca değişimi	69
Şekil 4.29. Şekil 4.28'e ait pompalama düzeneğinde 64 adet sinyalin kuvvetlendirilmesi	70
Şekil 4.30. Şekil 4.28'de gösterilen iki yönlü pompalama düzeneğinde pompa güçlerinin fiber boyunca <i>dBm</i> cinsinden değişimi	70
Şekil 4.31. Giriş güçleri 130 ile 350 mW arasında değişen dört adet ileri ve altı adet ters yönlü pompalama düzeneğinde pompa güçlerinin fiber boyunca <i>dBm</i> cinsinden değişimi	71

SİMGELER DİZİNİ

A_{eff}	-	Optik fiberin etkin alanı
$A_{eff-ps}(\Delta\nu, \lambda_p)$	-	Pompa ve sinyalin birbirlerine göre etkin fiber alanı
$A_{eff}(\nu)$	-	Frekansa bağlı fiberin etkin alanı
g_B	-	Brillouin kazancı
g_R	-	Raman kazancı
$g_R(\Delta\nu, \lambda_p)$	-	Belli bir dalgaboyunda ve pompa ve sinyal frekans farkına bağlı Raman kazanç katsayısı
h	-	Planck sabiti
$J_{i,j}$	-	Jacobian Matrisi
k	-	Boltzmann sabiti
L	-	Kuvvetlendirici uzunluğu
L_{eff}	-	Fiberin efektif uzunluğu
N_{ph}	-	Akustik fonon sayısı
P_b	-	Brillouin fiber jeneratörde geriye saçılan ışık gücü
P^+	-	İleri yönde hareket eden pompa veya sinyal gücü
P^-	-	Ters yönde hareket eden pompa veya sinyal gücü
$P(0+)$	-	Fibere giren pompa veya sinyal gücü
$P(L+)$	-	Fiberden çıkan pompa veya sinyal gücü
$P(L-)$	-	Fiber çıkışından girişe doğru hareket eden pompa gücü
P_{KBS}	-	Kendiliğinden Brillouin saçılma gücü
P_{BFJ}	-	Brillouin fiber jeneratörün eşik gücü
P_{RFJ}	-	Raman fiber jeneratörün eşik gücü
P_{th}	-	Kuvvetlendiricinin uyarılma eşik seviyesi
T	-	Sıcaklık (Kelvin)
ν	-	Frekans
ν_{ref}	-	Referans pompa frekansı
V	-	Grup hızı.
$\alpha(\nu)$	-	Frekansa bağlı zayıflama
$\gamma(\nu)$	-	Frekansa bağlı Rayleigh saçılım katsayısı
Γ	-	Polarizasyon faktörü
$\Delta\nu$	-	Pompa ve sinyalin frekans farkı
λ_{pompa}	-	Referans pompa dalgaboyu
λ_{Sinyal}	-	Referans sinyal dalgaboyu
Λ_p	-	Referans pompa ve sinyal dalgaboyuna göre hesaplanan pompa dalgaboyu
Λ_s	-	Referans pompa ve sinyal dalgaboyuna göre hesaplanan sinyal dalgaboyu

1. GİRİŞ

1.1. Optik Fiberle Kuvvetlendirme

Günümüzde kurulu olan haberleşme sistemleri iki farklı çoğullama tekniğini iç içe kullanmaktadır. Veri hızlarının düşük olduğu kanallar, daha yüksek hızlarda veri iletebilmek için zaman uzayında çoğullanmaktadır (OTDM). 10 ile 40 Gbit/s'lik veri hızlarına sahip bu kanallar, dalga boyu bölgesinde tekrar çoğullanarak (WDM) veri iletim kapasitesi daha da artırılmaktadır. OTDM-WDM sistemindeki iletim kapasitesinin artırılması, üç yolla mümkün olabilmektedir:

- Her bir WDM kanalında daha yüksek bit hızları kullanarak;

Bu yaklaşımda, daha yüksek hızlarda çalışan pahalı elektronik devrelere ihtiyaç olmaktadır. Elektronik sistemlerin anahtarlama hızı fiziksel etkenler nedeniyle sınırlandırılmaktadır. Çok hızlı optik anahtarlama, bu engellerin üstesinden gelecek gibi görünse de, bu anahtarlama sistemleri henüz deney aşamasındadır. Bunlara ek olarak dispersiyon, kendiliğinden faz modülasyonu (SPM) ve çapraz faz modülasyonu (XPM) gibi lineer olmayan etkilerin yanı sıra kanallar arası dört dalgaboyu karışımı (IFWM) ve kanallar arası çapraz faz modülasyonu (IXPM) oluşmaktadır. Kısa süreli darbeler kullanıldığında ışık şiddetindeki ani değişim miktarının artmasından dolayı, lineer olmayan bu etkileri daha da şiddetlendirmektedir.

- WDM kanalları arasında, kanal boşluğunu azaltarak;

Kanalar arası boşluk, alıcıda kullanılan filtrelerin seçicilik özelliği ile belirlenmektedir. Yüksek bit hızlı kanallarda, daha kısa süreli darbe kullanıldığından daha yüksek bant genişliğine ihtiyaç olmaktadır. Bu durumda, eğer kanallar arası boşluk küçükse, bant genişliğinin aşılması için kanal hızı sınırlandırılacaktır. Diğer taraftan, kanallar arası boşluk azaltıldığında, kanallar arası faz eşleşmesi artacağından, kanal içinde istenmeyen FWM etkinliği de artmaktadır.

- Optik iletim sistemlerinin bant genişliğini artırarak;

Eğer fiberde OH⁻ iyon Emilimi göz önüne alınmaz ise, mevcut bant genişliği kesim frekansı ve Rayleigh saçılması nedeniyle oluşan fiber kaybı tarafından belirlenmektedir. Bu durumda, iletim bant genişliği, tek modlu fiberde yaklaşık 400 nm (1.2 – 1.6 µm) civarındadır. Ancak, optik iletim sistemleri fiber dışında optik kuvvetlendiriciler gibi başka aygıtlar da içermekte olup bu kuvvetlendiriciler optik fiberin yüksek bant genişliğinden istifade edilmesini engellemektedir. Örneğin, Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricilerin (EDFA) kuvvetlendirme bant genişliği C-bandında 20 nm civarındadır. Filtreler yardımıyla kuvvetlendirme bant genişliği önce 35 nm'ye ve daha sonra 80 nm'ye kadar çıkartılabilmektedir. Bu durumda, EDFA kuvvetlendiriciler optik fiberin C ve L bandındaki 1530 ve 1610 nm arasındaki dalga boylarında kuvvetlendirme yapabilmekte ve optik fiberin yüksek bant genişliğinden istifade edilmesine olanak sağlamamaktadır. EDFA kuvvetlendiricilerin, kuvvetlendirme bant genişliği erbiyum iyonlarının enerji seviyeleri tarafından belirlendiğinden farklı gereksinimler için adapte edilememektedir.

Bu nedenle, optik fiberli iletim sistemlerinin bant genişliğinden istifade edebilmek için daha farklı fiziksel mekanizmalara ihtiyaç vardır. Lineer olmayan uyarılmış Raman saçılması (SRS), uyarılmış Brillouin saçılması (SBS) ve FWM bu ihtiyacın karşılanması için umut vaat etmektedir. Lineer olmayan bu etkilerin her birinde, uyarılmaya neden olan yüksek güçlü *pompa*¹ dalgasından farklı frekanstaki sinyal (Stokes) dalgasına güç aktarılmaktadır. Bu etkiler EDFA kuvvetlendiricilerine göre önemli avantajlara sahiptirler.

Erbiyum iyonlarının aksine, lineer olmayan kuvvetlendirme mekanizmaları frekanstan bağımsız olarak herhangi bir tek modlu fiber içinde oluşabilmektedir. Uygun bir pompa kaynağı ile herhangi bir dalga boyunda kuvvetlenme mümkün olabilmektedir. Raman fiber kuvvetlendiriciler ile 1.3 µm'de Dianov ve arkadaşları (1995), 1.4 µm'de Srivastava ve arkadaşları (1998), C bandında Nielsen ve arkadaşları

¹ Pompa dalgası, Raman ve Brillouin saçılması oluşturmak amacıyla optik fiber içerisine gönderilen yüksek güçlü ışıktır. Tez kapsamında pompa dalgası yerine kısaca *pompa* terimi kullanılmıştır.

(1999), C ve L bandının her ikisini birlikte kullanarak Nielsen ve arkadaşları (2000) ve Rottwitt ve arkadaşları (2003) kuvvetlendirme yapmışlardır. Farklı dalgalarda pompalar kullanılarak, geniş bantlı kuvvetlendiriciler tasarlanmıştır (Rottwitt ve Kidorf 1998, Emori ve Namiki 1999). Lineer olmayan SRS fiziksel etkisini kullanarak optik fiberin tüm uzunluğu üzerinde sinyalin geniş bantlı olarak kuvvetlendirildiği bu sistemlere *Dağınık Raman fiber kuvvetlendiricileri* adı verilmiştir. Son yıllarda, istenilen dalgalarda ışık veren yüksek güçlü pompa lazer diyotlarının üretilmesinin ardından, Dağınık kuvvetlendiriciler günümüzde kullanılan EDFA kuvvetlendiricilerin ciddi alternatifi olma yolundadır.

1.2. Problemin Tanımı

Yüksek hızlı veri iletimi için yüksek bant genişliğine duyulan ihtiyaç nedeniyle Dağınık Raman fiber kuvvetlendiricilerine olan ilgi son yıllarda oldukça artmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalar iki ana başlık altında özetlenebilir. Bunlardan birincisi, Dağınık Raman fiber kuvvetlendiricilerini tanımlayan denklem sistemlerinin geliştirilmesi, ikincisi ise bu denklem sistemlerinin etkin bir şekilde çözülmesi için yapılan çalışmalardır. Denklem sistemlerine yapılan yeni ilaveler bu denklemlerin nümerik çözümü için çalışmaları da peşinden sürüklemektedir. Denklem sistemindeki pompalar, sinyaller, kendiliğinden kuvvetlenen emisyonlar (ASE) ve Rayleigh saçılmaları arasındaki lineer olmayan etkileşimler nümerik çözümü güçleştirmektedir. Bunların yanı sıra, yüksek pompa güçleri, fazla sayıda sinyal kanalı (100 den büyük) ve uzun kuvvetlendirme mesafeleri için nümerik çözümü daha da zorlaştırmakta ve çözüm için saatlerce süren hesaplamaları beraberinde getirmektedir. Bu denklem sistemlerinin çözümüne yönelik yapılan çalışmalar sınırlandırılmış şartlar altında ve yavaş çözüm sunabilmektedir. Sürekli olarak geliştirilen denklem sistemleri için her durumda kararlı ve hızlı çözüm üretecek bir nümerik yöntem konusunda araştırmalar devam etmektedir. Problemin hızlı çözümünü zorlaştıran genel olarak iki ana neden bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, problemin kestirim yöntemine göre çözülmesi durumunda, çözüme hızlı yakınsayacak başlangıç koşulların elde edilmesinin güç olmasıdır. İkinci neden, problemin sonlu farklar yöntemine göre çözülmesi durumunda, yeteri kadar iyi tahmin değerlerinin veya yeteri kadar iyi tahmin fonksiyonunun elde edilmesinin zor olmasıdır.

Çözüm süresinin uzaması, tahmini başlangıç değerlerini veya tahmin fonksiyonunu her adımda düzeltmek için izlenen algoritma karmaşıklığından kaynaklanmaktadır. Bu algoritma birçok alt fonksiyonun çalıştırılmasını gerektirmekte ve adım aralılarının uygun şekilde ayarlanmasını içermektedir. Oysaki başlangıç noktası olarak sonuca hızlı yakınsayacak uygun noktalar seçilebilse veya pompa ve sinyal değişimlerini yaklaşık olarak ifade eden bir fonksiyon türetilbilirse, bu karmaşık algoritmanın işletilmesine gerek olmaksızın sonuca hızlı bir şekilde ulaşılabilecektir. Ancak birçok parametre içeren çözüm fonksiyonu için başlangıç değerlerinin veya tahmin fonksiyonlarının elde edilmesi sinyal sayısına, sinyal ve pompa gücüne, fiber uzunluğuna bağlı olarak detaylı analiz gerektirmektedir.

Kuvvetlendirme bant aralığının dar olması nedeniyle daha çok aktif filtre olarak kullanılan Brillouin kuvvetlendiriciler için nümerik çözüm araştırmaları, Raman kuvvetlendiricilerinin nümerik çözüm araştırmalarına kıyasla daha azdır. Çözüm yöntemleri Raman kuvvetlendiriciler ile benzer olmasına rağmen oldukça geniş uygulama alanı olan Brillouin kuvvetlendiricilerin nümerik analiz yöntemleri uzun süre ihmal edilmiştir. Literatürde, oldukça geniş uygulama alanı olan optik fiberli kuvvetlendiriciler için üretim aşamasından önce pompa ve sinyal değişimlerinin incelenmesi için etkin şekilde çözüm sunabilecek bir benzetim aracına ihtiyaç vardır. Bununla birlikte bu çözüm aracı, pompa tüketilmesinin izlemesi, sinyal kazanımlarının belirlenmesi, pompa eşik güç seviyesinin saptanması gibi önemli kuvvetlendirici parametrelerinin incelenmesine olanak vermesi bakımından önemlidir. Doktora tez çalışması, bu eksikleri gidermeyi ve optik fiberli kuvvetlendiricileri bir çatı altında toplayarak nümerik çözümüne ait etkili ve güvenilir çözüm sunmayı hedeflemiştir.

Doktora tezinin ikinci bölümünde Raman ve Brillouin kuvvetlendiricilerin nümerik çözümü hakkında kaynak araştırması ve bu kuvvetlendiriciler ile ilgili kuramsal bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, nümerik hesaplamada kullanılan yöntem ve nümerik çözüm algoritması anlatılmıştır. Dördüncü bölümde ise elde edilen sonuçlar sunulmuş ve yorumlanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI ve KURAMSAL BİLGİLER

2.1. Kaynak Araştırması

Optik fiberli haberleşme sistemleri, optik fiberi enformasyon iletimi için kullandığından ışık-dalga sistemleri olarak da adlandırılmaktadır. Işık dalga sistemleri ilk olarak 1980 yılında ticarileşmiştir (Gloge ve ark. 1980). O zamandan beri optik fiberli haberleşme sistemleri dünya çapında yaygınlaşmıştır.

Optik fiberli haberleşme sistemlerinin en önemli avantajı, yüksek bilgi miktarını düşük kayıpla uzun mesafelere taşıyabilmesidir. Ancak, bir optik iletim sisteminin iletim mesafesi, ışığın fiber malzemesi tarafından soğurulmasından kaynaklanan fiber kayıpları, Rayleigh saçılması ve dalga kılavuzunun kusurları nedeniyle sınırlandırılmaktadır. 1990'lı yıllara kadar uzak mesafe haberleşme sistemlerinde, fiber kayıplarını dengelemek için opto-elektronik tekrarlayıcılar kullanılmıştır. Ancak, opto-elektronik tekrarlayıcılar önce optik-elektrik ve daha sonra elektrik-optik dönüşümü yaptığından, WDM sistemleri için karmaşık ve pahalı hale gelmiştir. Bunun aksine, optik kuvvetlendiriciler, elektrik-optik dönüşümüne gerek kalmaksızın optik sinyali direkt olarak kuvvetlendirebilmektedir. Bu nedenle, optik kuvvetlendiriciler 1990'lı yıllardan beri kullanılmakla beraber kaybın sınırlandırılmasında iyi bir alternatif çözüm sunmuşlardır (Islam 2002). Başlangıçta, yarı-iletken optik kuvvetlendiriciler (SOA), erbiyum-katkılı optik kuvvetlendiriciler (EDFA) ve Raman fiber kuvvetlendiricileri (RFK) gibi çeşitli optik kuvvetlendiriciler geliştirilmiştir.

İlk optik kuvvetlendirici olan SOA, 1980 (Yamamoto 1980) yılında ortaya atılmış, ilk ticari aygıt 1987 yılında piyasaya çıkmıştır (Saitoh ve Mukai 1987). SOA hem ön kuvvetlendirici olarak hem de istenilen sinyali iletim fiberi içine sürülmesinde bir itici olarak kullanılabilir. Günümüzde, halen 1300 nm'de SOA kullanılmaktadır (Kuindersma ve ark. 1997). Ancak bu kuvvetlendiriciler, çok kanallı uzun-mesafe haberleşme sistemlerinde, kanallar arası diyafoni ve çınlamaya neden olduğundan hat üzerinde optik kuvvetlendirici olarak çalışamazlar.

EDFA kuvvetlendiriciler günümüzdeki optik haberleşme sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılmakta olup üretimi esnasında Erbiyum ile katkılanırlar. EDFA kuvvetlendiricinin çalışma prensibi, Erbiyumu bir kazanç ortamına dönüştüren silika fiberdeki Erbiyum iyonların enerji seviyeleridir. Fiber kuvvetlendiriciler arasında erbiyum katkılı kuvvetlendiriciler önemli bir yere sahiptirler. Bunun nedeni, 1.55 nm – C bandındaki sinyalleri sadece kuvvetlendirmeyip, kuantum gürültüsünden arındırarak 54 dB'e varan yüksek kazanç sağlamalarıdır (Laming ve ark. 1992). Bugün birçok WDM sistemi, iletim mesafesini artırmak için EDFA kuvvetlendiricilerini hat üzerinde kullanmaktadır.

Optik fiberlerde Raman fiber kuvvetlendiricilerine (RFK) yönelik çalışmalar 1970'lerde başlamıştır (Stolen ve Ippen 1973). Ancak, o yıllarda RFK kuvvetlendiriciler için gerekli olan yüksek güçlü pompa lazerlerin olmayışı ve 1980'li yıllarda EDFA kuvvetlendiricilere olan ilgi nedeniyle 1990'lı yıllardan önce ihmal edilmiştir. Ancak 1990'lı yıllardan sonra, yüksek güçlü pompa lazerlerinin geliştirilmelerine müteakip, RFK kuvvetlendiricilere olan ilgi artmıştır.

SOA ve EDFA kuvvetlendiriciler ile kıyaslandığında, RFK kuvvetlendiriciler herhangi bir dalgaboyunda bölgesinde çalışabilme özelliğine sahiptirler. Bunun nedeni, kuvvetlendirme sadece pompa ile sinyalin frekans farkına bağlı olup, EDFA kuvvetlendiricisinde olduğu gibi, katkı iyonlarının enerji seviyeleri arasındaki farka bağlı değildir. RFK kuvvetlendiriciler iyi bir gürültü performansına sahip olup, fiberin tüm noktalarında kuvvetlendirme yapabilme özellikleri nedeniyle dağınık kuvvetlendiriciler olarak kullanılabilirler. Ayrıca, pompa ve sinyal arasında frekans farkına dayanan Raman kazancı haberleşme spektrumunun her noktasında Raman kuvvetlendirmesine olanak vermektedir. Bu nedenle, Raman kuvvetlendiriciler C ve L bandındaki sinyalleri kuvvetlendirmek için esnek ve basit bir yöntem olarak görülmektedir. Optik fiberin geniş bandından faydalanmak için Raman kuvvetlendiricinin hassas şekilde tasarlanması oldukça önemlidir.

Raman fiber kuvvetlendiricilerde pompa, sinyaller ve ASE arasındaki Raman saçılmasına ait basitleştirilmiş model ilk defa 1970'li yıllarda Auyeung ve Yariv (1978)

tarafından ileri sürülmüştür. Daha sonra Stolen ve arkadaşları (1984) tarafından kendiliğinden kuvvetlenen emisyon (ASE) açık şekilde tanımlanmış ve tek modlu fiberde birden fazla Stokes frekans kaymasının olabileceği gösterilmiştir. Kidorf ve arkadaşları (1999), tek modlu optik fiberler için Raman kuvvetlendiricilerine ait kapsamlı denklemler elde etmişlerdir. Achtenhagen ve arkadaşları (2001), Kidorf ve arkadaşlarının (1999) denklemlerinde öngörülen kazanç değerini doğrulamış ve bu denklemlere Rayleigh saçılmasını eklemiştir. Berntson ve arkadaşları (2001), sinyal fotonlarının kendiliğinden soğrulduğunu belirterek, Kidorf ve arkadaşlarının (1999) önerdiği Raman kuvvetlendirici denklemlerini düzeltmiştir. Perlin ve arkadaşları (2002), denklemlere anti-Stokes emisyonunu ilave etmişlerdir. Mandelbaum ve Bolshtyansky (2003) tarafından denklemlere grup hızı ve etkileri ilave edilerek en kapsamlı Raman kuvvetlendirici eşitlikleri elde edilmiştir.

Raman kuvvetlendirici içerisindeki dalga etkileşimlerinin çözümüne ilişkin matematik model lineer olmayan sınır değer problemidir. Bu problemin analitik bir çözümü olmayıp, nümerik olarak çözülebilmektedir. Çok pompalı ve çok sinyalli Raman kuvvetlendiricinin nümerik çözümü konusunda yapılan çalışmalar uzun süreden beri literatürde yer almaktadır.

Mandelbaum ve Bolshtyansky (2003) tarafından önerilen en kapsamlı Raman kuvvetlendirici modeli tasarım bakımından basit olmasına rağmen, pompa, sinyal, ASE ve Rayleigh saçılım bileşenleri arasındaki lineer olmayan etkileşimler, kuvvetlendiricinin nümerik çözümünü zorlaştırmakta ve çözüm süresini uzatmaktadır. Pompa gücü ve kanal (sinyal) sayısı yüksek olduğunda ise çözüm süresi daha da uzamaktadır. Ayrıca, çözümün başarıya ulaşip ulaşmayacağı ve çözüm süresi tahmini başlangıç değerlerine veya tahmin fonksiyonuna bağlıdır. Bu nedenle, denklemlerin hızlı ve kararlı çözülebilmeleri için daha basit modellemeler yapılarak Raman fiber kuvvetlendirici denklemleri sadeleştirilmiştir (Ming ve ark. 2000, Zhou ve ark. 2001, Wang ve Fan. 2001, Choi ve ark. 2005, Cani, ve ark. 2007).

Sınır değer problemlerinin nümerik çözümünde iki farklı çözüm tekniği kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden birincisi *kestirim* ikincisi *sonlu farklar* yöntemidir

(Stoer ve Bulirsch 2002). Genel olarak, kestirim yöntemi, sonlu farklar yöntemine göre çözüme daha hızlı ulaşmaktadır. Kestirim yöntemi, sınır değer problemini, başlangıç değer problemi olarak ele almaktadır. Ancak başlangıç değerleri tahmini olup kesin olarak bilinmemektedir. Kestirim metodunda, tahmini başlangıç değerleri her adımda, kendini belli bir algoritmaya göre düzeltmektedir. Düzeltme sınır değerler sağlanana kadar devam etmektedir. Düzeltme yöntemi, çözümün en önemli noktası olup, sonuca gidiş hızını ve kararlılığı belirlemektedir. Yakın zamanda, araştırmacılar tarafında etkin olarak çalışan kestirim yöntemleri önerilmiştir (Liu ve Zhang 2004, Ning ve ark. 2004, Han ve ark. 2005, Han ve ark. 2006). Dastjerdi ve arkadaşları (2008), sonuca hızlı biçimde yakınsayabilen oldukça pratik bir kestirme yöntemi önermişlerdir. Çalışmalarında 10 pompa ve 64 sinyal kanalı olan Raman kuvvetlendirici denklemleri çözülmüş ve toplam giriş pompa gücü 1700 mW'a çıkarılarak geniş bantlı kuvvetlendirici tasarımında önemli bir yol kat etmişlerdir.

Sonlu farklar yöntemleri kestirim yöntemlerine göre çözüme *genel olarak* daha yavaş ancak daha kararlı yakınsamaktadır. Bu nedenle, sınır değer problemlerinin çözümü için yazılmış paket programlar (MATLAB **bvp4c**, **bvp5c**, **bvp6c**) daha çok sonlu farklar yöntemlerini kullanmaktadır. Ancak, kestirim yöntemini kullanan Fortran dilinde yazılmış oldukça iyi paket programlar da mevcuttur (**MUSN** (Mattheij ve Staaring 1984), NAG kütüphanesi kod: **D02SAF** (Gladwell 1987), **DD04** (H2KL 2000)). Yakın zamanda, araştırmacılar tarafından Raman kuvvetlendirici denklemleri için etkin şekilde çalışan sonlu farklar yöntemleri önerilmiştir (Liu ve ark. 2003, Liu ve Lee 2003, Liu ve Zhang 2004, Hu ve ark. 2004, Liu 2006)

Yapılan kaynak araştırmasında, fiber kuvvetlendiriciler ile ilgili araştırmalar aşağıda gösterildiği şekilde gruplanabilir.

- Fiber kuvvetlendiricilerin modellenmesi
- Fiber kuvvetlendiricilerin nümerik çözümüne ait yöntemler
- Fiber kuvvetlendiricilerin kurulum şekillerine göre uygulamaları
- Fiber kuvvetlendirici ve fiber lazerleri için eşik nokta tespitinde kullanılan yöntemler

Literatürde, Raman fiber kuvvetlendiricilerin modellenmesi ve benzetimi konusunda çalışmalar halen devam etmektedir. Nümerik çözüm yöntemlerine yönelik şu ana kadar olan çalışmalarda ise 80 km'den uzun mesafelerde ve toplam pompa gücü 1000 mW'tan yüksek değerler için benzetim yapılması güçleşmekte ve çözüm süresi 30 dakikayı aşmaktadır. Ayrıca önerilen çözüm yöntemleri ileri yönde, geri yönde ve her iki yönde çalışan Raman kuvvetlendirici yapılanmalarının hepsine birden çözüm üretmek için oldukça karmaşık algoritmalar kullanmakta ve çözüm süresini yaklaşık 1 saate uzatmaktadır. Brillouin fiber kuvvetlendiricilerde ise birden fazla pompa ve sinyal içeren kuvvetlendirici modellenmesi konusunda henüz bilinen bir çalışma yapılmamıştır. Bunun nedeni, 12 THz' lik Raman kazanç bant genişliği ile kıyaslandığında, Brillouin kazanç bant genişliğinin yaklaşık 35 MHz olması günümüzde kullanılan haberleşme hızını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle, optik kuvvetlendiriciler içerisinde, Brillouin fiber kuvvetlendiriciler uzun zaman göz ardı edilmiş hatta bazı haberleşme kitaplarından çıkarılmıştır. Tek pompa ve tek sinyal içeren Brillouin fiber kuvvetlendiricinin nümerik çözümünün konusunda ise literatürde bilinen sadece bir çalışma mevcuttur (Chen ve Bao 1998). Bu çalışmada Brillouin kuvvetlendirici denklemlerinin analitik çözümü olmadığı bildirilmiş, çözüm için Newton-Raphson yöntemi önerilmiştir.

2.2. Kuramsal Bilgiler

2.2.1. Raman kuvvetlendirmesi

Malzeme içerisine Raman eşik güç seviyesinden düşük güçlü pompa ışını gönderildiğinde belli bir frekans kayması ile her yöne ışık saçılmaktadır. Bu frekans kayma miktarı sıvı O₂ için 43.8 THz, Benzen için 28 THz, LiTaO₃ için 5.68 THz'dir. Silika fiber için ise bu kayma miktarı yaklaşık 13.2 THz'dir. Bu frekans kayma miktarına Raman frekansı, geriye saçılan ışığa ise Raman saçılması veya Stokes ışığı denmektedir. Eşik pompa gücünden daha düşük güçlü pompa ışını ve optik fiber içeren yapıya tez kapsamında Raman jeneratörü adı verilmiştir. Raman jeneratöründe saçılan Stokes ışığına literatürde *spontane* Raman saçılması adı verilmiştir. Spontane Raman saçılmasında Stokes ışını nW mertebelerinde olup her yönde yayılmaktadır. Ancak eşik gücün üzerindeki pompa güçlerinde Stokes ışını oldukça şiddetlenmekte ve koherent

duruma geçerek uyarılmış Raman saçılması oluşmaktadır (SRS). Uyarılmış Raman saçılmasında Stokes ışını pompa ışını yönünde hareket edebileceği gibi geri yönde de hareket edebilir.

SRS ilk defa Raman tarafından keşfedilmiş ve bu nedenle 1930 yılında Nobel Fizik ödülü almıştır (Raman ve Krishnan 1928). Spontane Raman saçılmasının fiziksel temeli ise, molekül üzerine düşen optik dalga, bu molekülü birbirine bağlayan bağlar üzerindeki elektronları, optik dalganın frekansında titreştirir. Bu elektronların oluşturduğu dipoller belli bir faz kayması ile gelen optik dalganın frekansında radyasyon yayarlar. Aynı zamanda, molekülün kendisi moleküler titreşim frekansında titreşmektedir. Bu durumda, dipol momenti optik ve moleküler titreşim frekanslarının toplamı ve farklarını içeren frekanslarda radyasyon yayar. Bu toplam ve fark frekansları frekans spektrumunda Raman ışığını ortaya çıkarmaktadır. Spontane Raman saçılımı *izotropik* bir olay olup her yönde kendini göstermektedir.

Üç çeşit Raman saçılım süreci vardır (Schneider 2004). Bunlar;

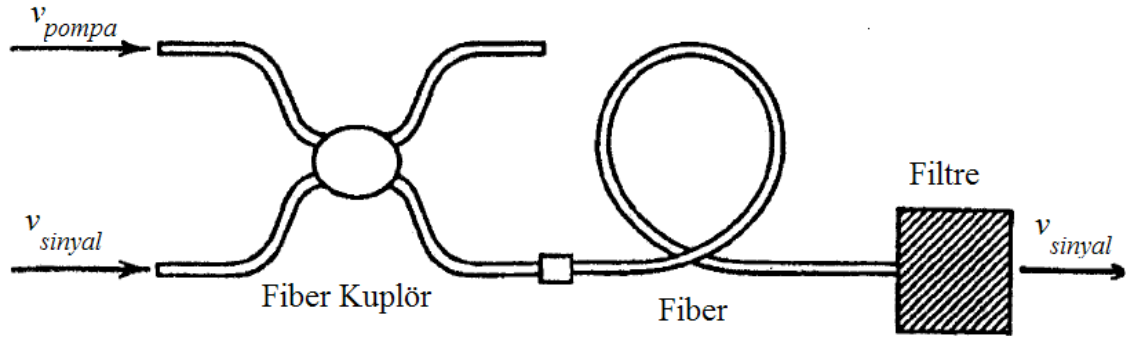
- 1) Fiber içine gönderilen pompa fotonları enerjilerini serbest bırakarak daha düşük enerjili ve frekanslı diğer fotonların oluşturulmasına neden olurlar. Pompanın kalan enerjisi ise silika molekülleri tarafından soğurularak sanal bir üst enerji seviyesi uyarılmaktadır. Buna Stokes saçılması denir. Silikanın zahiri enerji seviyeleri frekans kayma miktarını belirler ($\Omega_{Raman} = \nu_{pompa} - \nu_{sin yal}$).
- 2) Bir üst enerji seviyesine henüz uyarılmış bir molekülün tekrar bir pompa fotonu soğurduğu durumda anti-Stokes saçılması oluşmaktadır. ($\Omega_{Raman} + \nu_{pompa} = \nu_{Anti-Stokes}$).
- 3) Uyarılmış durumda bulunan molekül tarafından soğurulan sinyal fotonları, bir pompa fotonu oluşturacaktır ($\Omega_{Raman} + \nu_{Sinyal} = \nu_{pompa}$). Bu duruma anti-Stokes saçılması adı verilmektedir.

Sinyal ve pompanın frekans farkı, Raman frekansı dolaylarında ise ($\Omega_{Raman} \approx 13.2THz$), uyarılmış Stokes saçılımı sinyali kuvvetlendirmekte ve pompanın gücünü tüketmektedir. Bu durum Raman kuvvetlendiricinin temelini oluşturmaktadır. Stolen'a göre Raman kazanç spektrumu sıcaklıktan bağımsızdır (Stolen 1979a).

Bugünün kullanılan silika fiberlerinde, enerji seviyeleri geniş bant içinde enerji dönüşümünü gerçekleştirebilecek yapıdadır (Agrawal 2001).

2.2.2. Raman kuvvetlendiricileri

Şekil 2.1’de fiberin Raman kuvvetlendirici olarak nasıl kullanılacağı gösterilmektedir. Sırasıyla ν_p ve ν_s frekanslarındaki pompa ve sinyal ışınları fiber kuplör üzerinden fibere enjekte edilmektedir. İki ışın beraber fiber içinde ilerlerken, enerji pompa ışınından sinyal ışınına SRS etkileşimi nedeniyle transfer edilmektedir. Bu nedenle pompa tüketilirken sinyaller kuvvetlendirilmektedir. Çıkış ucunda ise, istenilen sinyali filtrelemek için bir filtre kullanılmaktadır.

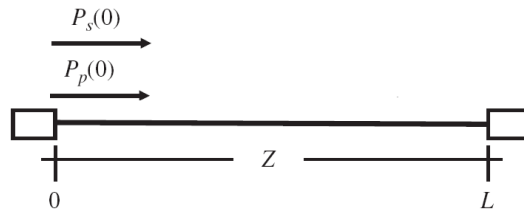


Şekil 2.1. İleri yönde pompalamalı Raman fiber kuvvetlendirici

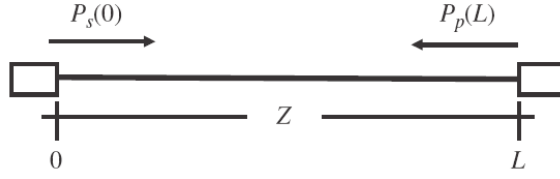
Raman kuvvetlendiriciler SRS üzerinden kazanç sağladıkları için, SRS kazancı Raman kuvvetlendirici tasarımında kritik öneme sahiptir. Aşağıdaki temel konular önemlidir.

- Her fiberin kendi kazanç Raman spektrumu vardır. Bu kazanç spektrumu fiberin parametresi olup, pompa ve sinyalin frekans farkına bağlı olup kendi frekanslarına bağlı değildir. Bu da, bir sinyali kuvvetlendirmek veya sinyal frekansında bir optik foton yaratmak için, pompa ve sinyalin frekans farkının, yaratılması istenen fotonun frekansına eşit olması gerekmektedir. Frekans farkı 13-14 THz veya 100 nm ise kazanç faktörü maksimumdur (Chraplyvy 1984). Bu durum Raman kuvvetlendiricinin ne şekilde tasarlanacağı hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlar. Örneğin 1530 nm’deki sinyali kuvvetlendirmek için en iyi pompadalga boyu 1430 nm civarındadır.

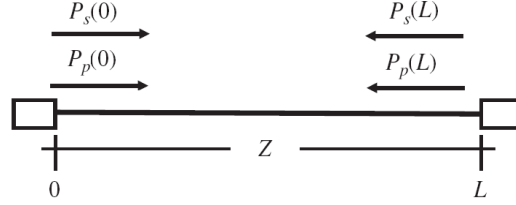
- Raman kazancı pompa veya sinyalin ilerleme yönüne bağlı değildir. Bunun anlamı sinyalin pompa ile ters yönde, beraber veya her iki yönde hareket etmesi durumunda kuvvetlendirme olabilmektedir. Bu durumda Raman kuvvetlendiricilerinde üç farklı pompalama düzeneği gerçekleştirilebilmektedir. Bu düzenekler pompanın sinyal ile beraber, karşılıklı ve her iki yönde ilerlemesi şeklinde olabilir. Her düzenneğin kendine özgü avantajı vardır (Nissov 1997). İleri yönde pompalanan Raman kuvvetlendiricisinde pompa ve sinyal birlikte $z=0$ noktasından $z=L$ noktasına doğru hareket etmektedirler. Bu durumda kuvvetlendirici en iyi gürültü performansı sergilemektedir. Kısa mesafeli kuvvetlendiricilerde (<10 km), bu üç düzenneğin performansı arasında fark yoktur. Geri yönde pompalamalı Raman kuvvetlendiricide pompa ve sinyal farklı uçlardan fibere gönderilmektedir. Pompa ve sinyalin birbirine ters yönde hareket etmeleri, ileri yönde ve her iki yönde hareket etmeye göre, daha yüksek kazanç performansı sergiler. İki yönde pompalamalı Raman kuvvetlendiricisinde pompa ve sinyal fibere her iki yönde gönderilmektedir. Çok uzun mesafeli Raman kuvvetlendiricilerinde (>100 km) her iki yönde hareket düzenneği daha uygundur. Bugünün optik haberleşme sistemlerinin birçoğunda, iki yönde hareket düzenneği kullanılmaktadır. Bunun nedeni, fiber bölme uzunluğu 45 ile 100 km arasında ise, iki yönde hareket düzenneği en iyi kazanç ve gürültü performansı sergilemektedir. Şekil 2.2, 2.3 ve 2.4'te sıra ile ileri yönde, geri yönde ve iki yönde hareket düzenekleri şematik olarak gösterilmiştir.
- Raman kazancı polarizasyona bağlıdır (Stolen 1979b). Pompa ve sinyalin birbirlerine göre polarizasyon durumları önemlidir. Pompa ve sinyallerin rastgele polarize olmalarına göre paralel polarize olmaları durumunda kazanç 2 kat artmaktadır. Birbirlerine dik polarize olmalarına göre, paralel polarize olmaları durumunda pompa ve sinyal birbirleriyle 10 kat daha iyi etkileşmektedirler. Eğer birbirlerine göre dik polarize olmuşlar ise aralarında Raman etkileşimi olmayabilmektedir (Stolen 1979a).



Şekil 2.2. İleri yönde pompalanan Raman kuvvetlendiricisinin şematik gösterimi

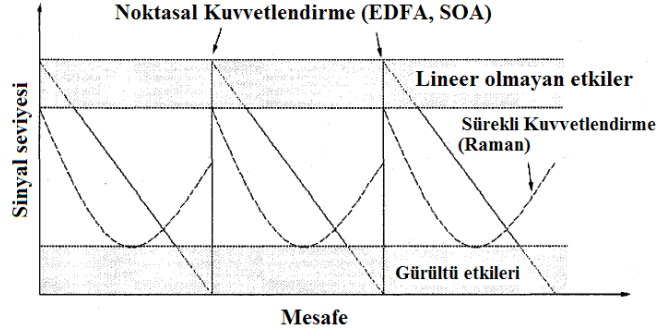


Şekil 2.3. Geri yönde pompalamalı Raman kuvvetlendiricinin şematik gösterimi



Şekil 2.4. İki yönde pompalamalı Raman kuvvetlendiricinin şematik gösterimi

Kuvvetlendiriciler *noktasal* ve *sürekli* olarak ikiye ayrılmaktadır. Dağınık Raman kuvvetlendiricileri fiberin her noktasında sinyali, sürekli olarak kuvvetlendirmektedir. EDFA ve SOA kuvvetlendiricileri noktasal olarak kuvvetlendirme yapmaktadırlar. Noktasal ve sürekli kuvvetlendiricilerin, kuvvetlendirme şekilleri, Şekil 2.5'te gösterilmiştir.

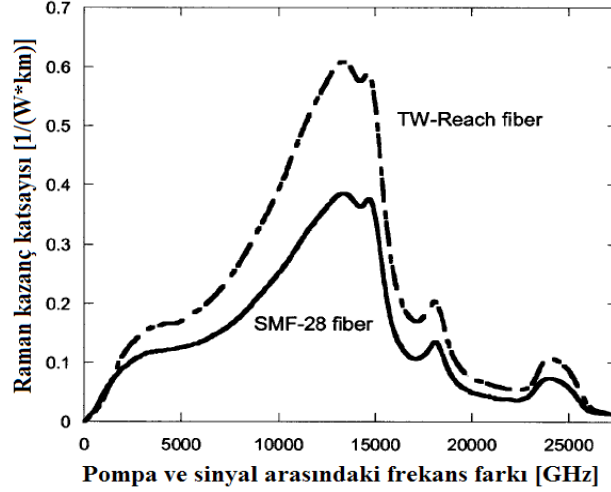


Şekil 2.5. Noktasal ve dağınık fiber kuvvetlendiricilerin sinyal seviyelerinin mesafeye göre değişimi (Namiki ve Emori 2002)

2.2.3. Raman kazanç katsayısı

Raman kazanç katsayısı ($g_R = \text{Raman kazanç kesiti} / A_{eff}$), uyarılmış Raman saçılmasında pompa ve sinyalin birbirleriyle etkileşme gücünü ifade eden faktördür. Şekil 2.6'da iki çeşit fiberin 1460 nm'de g_R ölçümleri gösterilmiştir. Birincisi etkin alanı yaklaşık $80 \mu\text{m}^2$ olan *SMF-28* fiberi, diğeri ise etkin alanı $50 \mu\text{m}^2$ olan *True wave-Reach* fiberidir. Şekil 2.6'dan görüldüğü gibi Raman kazanç spektrumu yaklaşık olarak

üçgen şeklinde olup 13 ila 14 THz arasında en yüksek değerini almaktadır (Chraplyvy 1984). Her iki g_R spektrumunun tepe değeri açık bir şekilde birbirinden farklıdır. Bunun nedeni, üretim esnasında *SMF-28* ve *TW-Reach* fiberleri farklı katkı maddeleri kullanılarak üretilmiştir. *TW-Reach* fiberinin kırıcılık indisi, fiber özünün daha fazla GeO_2 ile katkılanması ile artırılabilir. Bu da etkin alanın azalmasına ve *TW-Reach* fiberinin g_R kazancının artmasına neden olur.



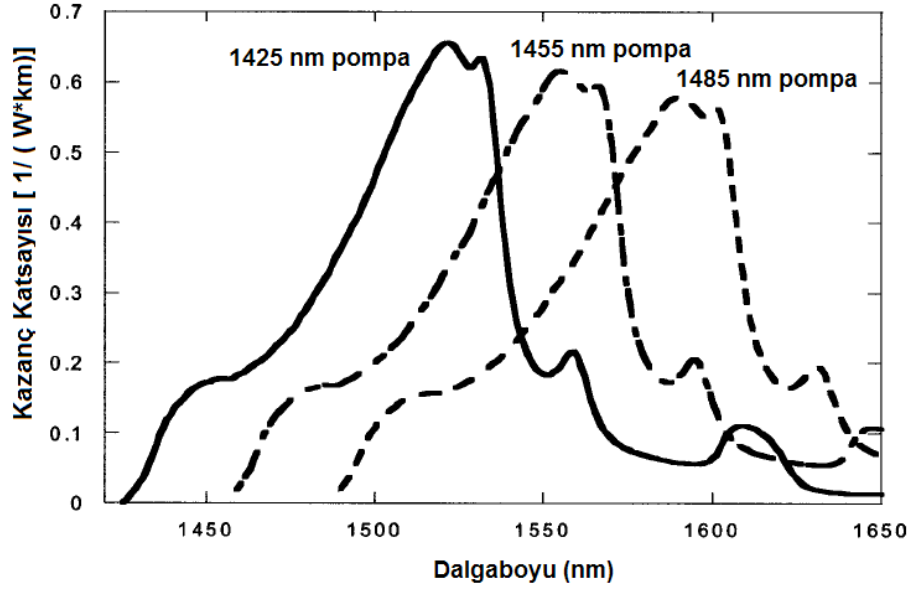
Şekil 2.6. *SMF-28* ve *TW-Reach* fiberin 1460 nm'deki Raman kazanç katsayısı

Herhangi bir fiberde, belli bir pompa dalgaboyu için Raman kazanç spektrumu sabittir. Ancak, g_R katsayısı farklı pompa dalgaboyları için sabit değildir ve pompa dalgaboyunun azalması ile birlikte g_R katsayısı da artmaktadır. g_R , A_{eff} ($\approx 80\mu\text{m}^2$) ve pompa dalgaboyu arasındaki ilişki (2.1) eşitliği ile ifade edilmektedir (Rottwitt ve ark. 2003).

$$g_R(\Delta\nu, \Lambda_{pompa}) = g_R(\Delta\nu, \lambda_{pompa}) \times \frac{\lambda_{Sinyal}}{\Lambda_{Sinyal}} \times \left[\frac{A_{eff-ps}(\Delta\nu, \lambda_{pompa})}{A_{eff-ps}(\Delta\nu, \Lambda_{pompa})} \right] \quad (2.1)$$

$$A_{eff-ps}(\Delta\nu, \lambda_{pompa}) = \frac{1}{2} \times [A_{eff}(\lambda_{pompa}) + A_{eff}(\lambda_{Sinyal})]$$

Burada $\Delta\nu$ pompa ve sinyalin frekans farkı, Λ_p , Λ_s , λ_{pompa} , λ_{Sinyal} sıra ile yeni pompa ve yeni sinyal dalgaboyu, referans pompa ve referans sinyal dalgaboyudur. Pompa ve sinyalin birbirlerine göre etkin fiber alanı $A_{eff-ps}(\Delta\nu, \lambda_p)$ eşitliği ile belirlenmektedir. Pompa dalgaboyu ile g_R kazanç spektrumunun değişimi Şekil 2.7'de gösterilmiştir.

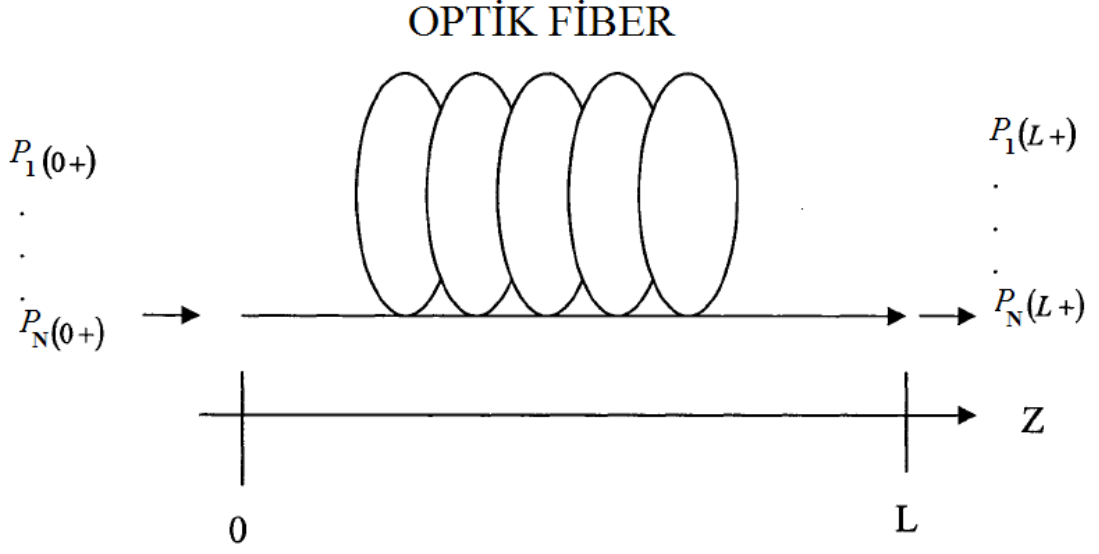


Şekil 2.7. TW- Reach fiber için Raman kazanç katsayısının dalgaboyu ile değişimi

2.2.4. Raman fiber kuvvetlendirici modeli

Pompa ve sinyalin frekans farklılıklarına dayanan Raman kazancının bu özelliği, haberleşme spektrumunun her noktasında Raman kuvvetlendirmesini mümkün kılmaktadır. Bu nedenle, sinyalin C ve L bandında esnek ve basit bir şekilde kuvvetlendirilebilmesi, Raman fiber kuvvetlendiricilerini önemli bir alternatif olarak ön plana çıkarmaktadır.

Şekil 2.8'de Raman fiber kuvvetlendirici şematik olarak gösterilmiştir. Bu kuvvetlendiricide, L fiber uzunluğunu, $\alpha(\nu)$ frekansa bağlı zayıflamayı, $g_R(\Delta\nu, \lambda_p)$ pompa ve Stokes ışınları arasındaki frekans farkı ($\Delta\nu$) ve pompa dalgaboyuna (λ_p) bağlı Raman kazanç katsayısını, $\gamma(\nu)$ frekansa bağlı Rayleigh saçılım katsayısını, $A_{eff}(\nu)$ fiberin etkin alanını ve T fiberin mutlak sıcaklığını ifade etmektedir. Pozisyon referansı olarak kullanılan z , giriş ucunda sıfır, çıkış ucunda L değerini almaktadır. Sinyal veya pompa gücü P_i olmak üzere, ileriye doğru hareket P_i^+ , geriye doğru hareket P_i^- olarak gösterilmektedir. Bu durumda, $P_i(0+)$ giriş, $P_i(L+)$ ise çıkış güçlerini ifade etmektedir. Fiber çıkışından fiber girişine doğru (geri yönde) hareket eden pompa güçleri ise $P_i(L-)$ olarak ifade edilmektedir (Mandelbaum ve Bolshtyansky 2003).



Şekil 2.8. Raman kuvvetlendiricisinin şematik olarak gösterimi. $P_1(0+)$... $P_N(0+)$, $z=0$ noktasından $z=L$ noktasına doğru hareket eden sinyal ve pompa güçlerini, $P_1(L+)$... $P_N(L+)$ ise $z=L$ noktasındaki güç seviyelerini göstermektedir. L , fiber uzunluğunu, z ise pozisyonu ifade etmektedir.

2.2.4.1. Genel kuvvetlendirici modeli

(2.2) eşitliğinde Raman kuvvetlendiricisine ait genel model ifade edilmiştir (Mandelbaum ve Bolshtyansky 2003).

$$\pm \frac{dP_i^\pm}{dz} = -\alpha(v_i, T)P_i^\pm \dots\dots \quad (2.2.1)$$

$$+ \gamma(v_i)P_i^\pm \dots\dots \quad (2.2.2)$$

$$+ P_i^\pm \sum_j^{v_j > v_i} g_R(v_j, v_i) [P_j^+ + P_j^-] \dots\dots \quad (2.2.3)$$

$$+ 2 \sum_j^{v_j > v_i} [P_j^+ + P_j^-] \cdot h\nu_i \Delta\nu \cdot g_R(v_j, v_i) \times \left(1 + \frac{1}{e^{\frac{h(v_j - v_i)}{kT}} - 1} \right) \dots\dots \quad (2.2.4)$$

$$- P_i^\pm \sum_j^{v_j < v_i} \frac{V_j}{V_i} \frac{v_j}{v_i} g_R(v_i, v_j) [P_j^+ + P_j^-] \dots\dots \quad (2.2.5)$$

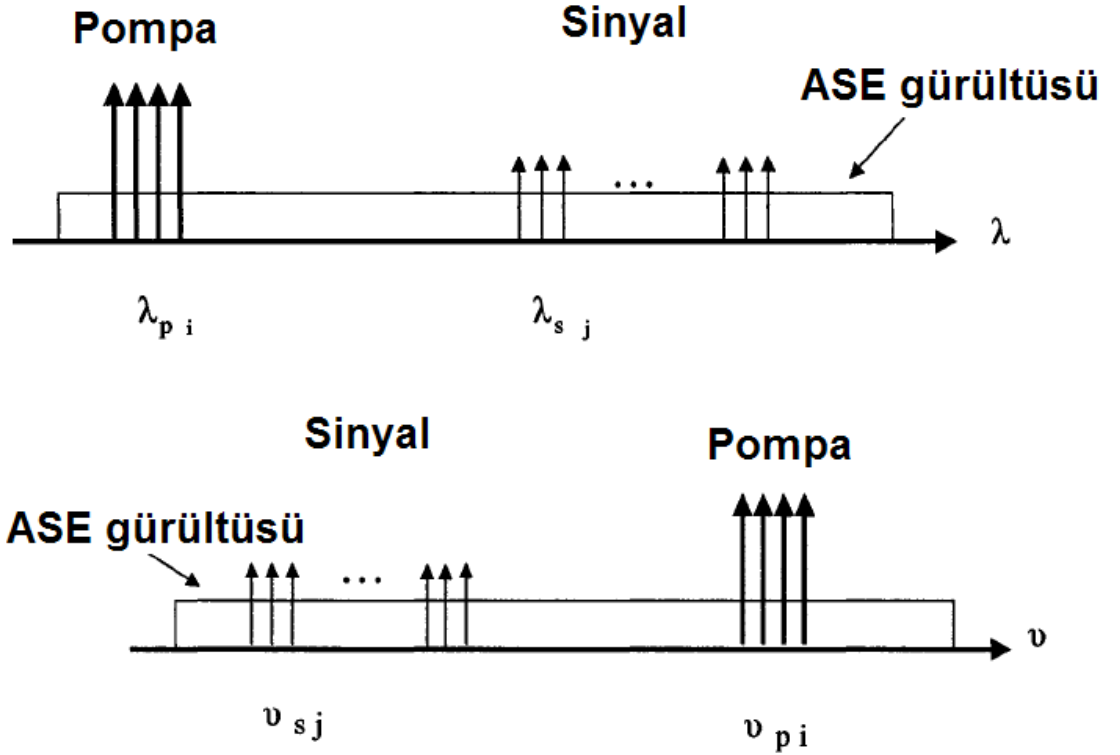
$$+ 2 \sum_j^{v_j < v_i} [P_j^+ + P_j^-] \cdot h\nu_i \Delta\nu \cdot \frac{v_j}{v_i} \frac{V_j}{V_i} g_R(v_i, v_j) \left(\frac{1}{e^{\frac{h(v_i - v_j)}{kT}} - 1} \right) \quad (2.2.6)$$

$$(2.2)$$

Burada, h Planck sabiti, k Boltzmann sabiti, ν_j ve ν_i frekanslar V_i ve V_j indislerin belirttiği frekanslardaki grup hızlarıdır. (2.2.1) ifadesinde anlık fiber kaybı, (2.2.2) ifadesinde anlık Rayleigh saçılımı, (2.2.3) ifadesinde yüksek frekanslı olan dalgalar üzerinden kazanılan kazanç, (2.2.5) ifadesinde düşük frekanslı olan dalgalara aktarılan güç, (2.2.4) ve (2.2.6) ifadelerinde ise sıra ile ASE ve anti-Stokes nedeniyle oluşan gürültüler ifade edilmiştir.

2.2.4.2. Sinyal, pompa ve ASE gürültüsüne ait denklemler

Raman kuvvetlendiricileri için, girişler sinyal veya pompa dalgalarıdır. ASE gürültüsü ise, sinyal ve pompa dalgalarının fiber içindeki hareketleri esnasında oluşmaktadır. Şekil 2.9'da sinyal, pompa ve ASE gürültüsünün dalgaboyu dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Sinyal, pompa ve ASE gürültüsünün dalgaboyu spektrum dağılımları

Pompalar ilerleme esnasında enerjilerini sinyallere aktararak sinyallerin kuvvetlenmesini sağlamaktadırlar. Ancak, pompalar enerjilerini daha uzun dalgaboylu kanallara aktarırken (sinyallere ve ASE gürültüsüne) tükenmektedir. SRS nedeniyle oluşan sinyaller arasındaki girişim bir kazanç veya gürültü olarak nitelendirilebilir. Ancak bu tezde, bir kazanç olarak değerlendirilecektir. Bunun nedeni, her ne kadar bu durum haberleşme açısından gürültü olarak değerlendirilse de, enerji dönüşümü açısından bir kazanç ve kayıp söz konusudur. Eğer Raman kuvvetlendirici birden fazla pompa içeriyorsa, kısa dalga boylu pompalar, enerjilerinin bir kısmını daha uzun boylu pompa dalgalarına aktararak tüketirler. Birlikte ilerleme sırasında, ASE gürültüsü enerjisinin bir kısmını sinyallere aktarmaktadır. Ancak, alınan güç bir gürültüden ibaret olup bir kazanç olarak nitelendirilemez. Aynı durum anti-Stokes bileşeni için de geçerli olup, anti-Stokes bileşeninden sinyallere aktarılan güç de bir gürültüden ibarettir. Bu varsayımlara dayanarak, ASE gürültü gücünü de içeren sinyal ve pompa hareket denklemleri sıra ile (2.3) eşitliğinde verilmiştir (Mandelbaum ve Bolshtyansky 2003).

İleri yönde:

$$\begin{aligned}
\frac{dP_i^+(z_{k+1})}{dz} = & -\alpha(v_i)P_i^+(z_k) + \gamma(v_i)P_i^-(z_k) \dots\dots \\
& + P_i^+(z_k) \sum_j^{v_j > v_i} g_R(v_j, v_i) [P_j^+(z_k) + P_j^-(z_k)] \dots\dots \\
& + 2hv_i \Delta v \sum_j^{v_j > v_i} g_R(v_j, v_i) [P_j^+(z_k) + P_j^-(z_k)] \times \left(1 + \frac{1}{e^{\frac{h(v_j - v_i)}{kT}} - 1} \right) \dots\dots \\
& - P_i^+(z_k) \sum_j^{v_j < v_i} \frac{V_j}{V_i} \frac{v_j}{v_i} g_R(v_j, v_i) [P_j^+(z_k) + P_j^-(z_k)] \dots\dots \\
& + 2hv_i \Delta v \sum_j^{v_j < v_i} \frac{V_j}{v_i} \frac{V_j}{V_i} g_R(v_j, v_i) [P_j^+(z_k) + P_j^-(z_k)] \left(\frac{1}{e^{\frac{h(v_i - v_j)}{kT}} - 1} \right) \quad (2.3a)
\end{aligned}$$

Geri yönde:

$$\begin{aligned}
\frac{dP_i^-(z_k)}{dz} = & -\alpha(v_i)P_i^-(z_{k+1}) + \gamma(v_i)P_i^+(z_{k+1}) \dots\dots \\
& + P_i^-(z_{k+1}) \sum_j^{v_j > v_i} g_R(v_j, v_i) [P_j^+(z_{k+1}) + P_j^-(z_{k+1})] \dots\dots \\
& + 2hv_i \Delta v \sum_j^{v_j > v_i} g_R(v_j, v_i) [P_j^+(z_{k+1}) + P_j^-(z_{k+1})] \times \left(1 + \frac{1}{e^{\frac{h(v_j - v_i)}{kT}} - 1} \right) \dots\dots \\
& - P_i^-(z_{k+1}) \sum_j^{v_j < v_i} \frac{V_j}{V_i} \frac{v_j}{v_i} g_R(v_j, v_i) [P_j^+(z_{k+1}) + P_j^-(z_{k+1})] \dots\dots \\
& + 2hv_i \Delta v \sum_j^{v_j < v_i} \frac{V_j}{v_i} \frac{V_j}{V_j} g_R(v_j, v_i) [P_j^+(z_{k+1}) + P_j^-(z_{k+1})] \left(\frac{1}{e^{\frac{h(v_i - v_j)}{kT}} - 1} \right) \dots\dots
\end{aligned} \tag{2.3b}$$

2.2.4.3. Birden fazla pompa ve sinyal içeren basitleştirilmiş Raman kuvvetlendirici modeli

(2.3) eşitliğinde belirtilen Raman kuvvetlendiricisine ait genel model, tüm sinyaller ile birlikte, ASE gürültüsünün kuvvetlendirilmesini de içermektedir. Ancak, ihmal edilebilir ASE gürültüsünün, hesaplamalara dâhil edilmesi hesaplama sürelerini oldukça uzatmaktadır. Ayrıca, bu etkileşimlerden en önemlileri pompa-pompa, pompa-sinyal, SRS, sinyal ve pompaya etki eden dalgaboyuna bağlı zayıflama dır. Hesaplama süresi ve en önemli etkileşimler göz önüne alındığında, basitleştirilmiş Raman kuvvetlendirici modeli, (2.4) eşitliği ile ifade edilmektedir. Bu eşitlik, kuvvetlendiriciye ait tüm fiziksel etkileşimleri içermekte, ancak gürültü kaynakları (ASE gürültüsü (*spontane* Raman saçılması) ve Rayleigh geri saçılması) ihmal edilmiştir (Perlin ve Winful 2002).

$$\begin{aligned}
\pm \frac{dP_k}{dz} = & -\alpha_k P_k + \sum_{j=1}^{k-1} \frac{g_{vj}(v_j - v_k)}{\Gamma A_{eff}} P_j P_k - \sum_{j=k+1}^{m+n} \frac{v_k}{v_j} \frac{g_{vk}(v_k - v_j)}{\Gamma A_{eff}} P_j P_k \\
& k = 1, 2, \dots, n + m
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Burada frekanslar azalan sırada birbirini takip etmektedir yani, $i < j$ için $v_i > v_j$ olmaktadır. $k = 1, 2, \dots, n$ 'e kadar olan indeksler $z = L$ noktasından $z = 0$ noktasına doğru geri yönde hareket eden pompa dalgalarını (eşitliğin sol tarafındaki negatif işaretli olanlar) ifade etmektedir. $k = n + 1, \dots, n + m$ 'e kadar olan indeksler $z = 0$ noktasından $z = L$ noktasına, yani ileri yönde hareket eden sinyal dalgalarını göstermektedir (eşitliğin sol tarafındaki pozitif işaretli olanlar). P_i , v_i , α_i sıra ile güç, frekans ve $i = 1, 2, \dots, n + m$ olmak üzere, i 'nci dalganın zayıflama katsayısını göstermektedir. v_{ref} referans pompa frekansı olmak üzere, v_p pompa frekansındaki kazanç katsayısı $g(v_{ps}) = g_R(v_p - v_s)v_p/v_{ref}$ eşitliği ile hesaplanır. (2.4) eşitliğinde A_{eff} fiberin etkin alanı, Γ ise polarizasyon faktörüdür. Her iki dalganın polarizasyon durumları birbirine paralelse $\Gamma = 1$, tek modlu fiber için polarizasyon durumları rastgele ise $\Gamma = 2$ 'dir. (2.4) eşitliğinin çözümü için aşağıdaki sınır şartları bilinmektedir.

$$\begin{array}{l}
 P_1(L) = P_{1-0} \\
 P_2(L) = P_{2-0} \\
 P_3(L) = P_{3-0} \\
 \dots \\
 P_k(L) = P_{k-0}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} P_1(L) = P_{1-0} \\ P_2(L) = P_{2-0} \\ P_3(L) = P_{3-0} \\ \dots \\ P_k(L) = P_{k-0} \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \text{Giriş Pompa değerleri} \\ \\ \\ \\ k = 1, \dots, n \end{array} \quad (2.5)$$

$$\begin{array}{l}
 P_1(0) = P_{10} \\
 P_2(0) = P_{20} \\
 P_3(0) = P_{30} \\
 \dots \\
 \dots \\
 P_k(0) = P_{k0}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} P_1(0) = P_{10} \\ P_2(0) = P_{20} \\ P_3(0) = P_{30} \\ \dots \\ \dots \\ P_k(0) = P_{k0} \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \text{Giriş sinyal değerleri} \\ \\ \\ \\ k = n + 1, \dots, n + m \end{array} \quad (2.6)$$

2.2.4.4. Tek pompa ve tek sinyal içeren Raman kuvvetlendirici modeli

Şekil 2.2’de gösterilen *ileri yönde* pompalanan Raman kuvvetlendiricide, 1 adet pompa (n=1) ve 1 adet sinyal (m=1) için (2.4) eşitliği düzenlenirse, pompa denklemi;

i=1

$$\frac{dP_1}{dz} = -\alpha_1 P_1 + \sum_{j=1}^0 \frac{g_R(v_j - v_1)}{\Gamma A_{eff}} P_j P_1 - \sum_{j=2}^2 \frac{v_1 g_R(v_1 - v_j)}{\Gamma A_{eff}} P_j P_1$$

$$\frac{dP_1}{dz} = -\alpha_1 P_1 - \frac{v_1 g_R(v_1 - v_2)}{v_2 \Gamma A_{eff}} P_2 P_1 \quad \longrightarrow \quad 1 \rightarrow p, 2 \rightarrow s \quad \longrightarrow$$

$$\frac{dP_p}{dz} = -\alpha_p P_p - \frac{v_p g_R(v_p - v_s)}{v_s \Gamma A_{eff}} P_p P_s \quad (2.7)$$

Sinyal (Stokes) denklemi;

$$\frac{dP_2}{dz} = -\alpha_2 P_2 + \frac{g_R(v_1 - v_2)}{\Gamma A_{eff}} P_1 P_2 \quad \longrightarrow \quad 1 \rightarrow p, 2 \rightarrow s \quad \longrightarrow$$

$$\frac{dP_s}{dz} = -\alpha_s P_s + \frac{g_R(v_p - v_s)}{\Gamma A_{eff}} P_p P_s \quad (2.8)$$

Eğer Şekil 2.3’de gösterildiği gibi pompalama geri yönde yapılıyorsa, bu durumda n=m=1 için pompa denklemi,

$$\frac{dP_p}{dz} = +\alpha_p P_p + \frac{v_p g_R(v_p - v_s)}{v_s \Gamma A_{eff}} P_p P_s \quad (2.9)$$

Burada g_R Raman kazancı v_p ve v_s sıra ile pompa ve sinyal dalgaboyları α_p , α_s sırasıyla pompa ve sinyalin zayıflama katsayısıdır. Γ , pompa ve Stokes dalgalarının birbirlerine göre polarizasyon durumlarıdır. Her iki dalganın polarizasyon durumları birbirine paralel ise $\Gamma=1$, tek modlu fiber için polarizasyon durumları rastgele ise $\Gamma=2$ ’dir. Bu sistemin sınır şartı (2.10) eşitliklerinde belirtilmiştir.

$$\begin{aligned}
P_p(z=0) &= P_p(0) \\
P_s(z=0) &= P_s(0) \quad \text{ileri yönde pompalama düzeneği} \\
P_s(z=L) &= P_s(L) \quad \text{geri yönde pompalama düzeneği}
\end{aligned} \tag{2.10}$$

(2.10) sınır şartlarında, $P_p(0)$ ve $P_s(0)$ ileri yönde pompalama düzeneği için $z=0$ noktasındaki pompa ve sinyal gücüdür. $P_s(L)$ ise geri yönde pompalama düzeneği için $z=L$ noktasında sinyal gücüdür.

2.2.5. Brillouin kuvvetlendirmesi

Uyarılmış Brillouin saçılımı (SBS) nedeniyle, optik fiberlerde ışığın kuvvetlenmesinin ilk defa kanıtlanmasından itibaren Brillouin fiber kuvvetlendiriciler (BFK) birçok uygulamada yer almışlardır (Olson ve Ziel 1972). Ayarlanabilir dar bant filtrelerden (Tkach ve ark. 1989, Tanemura ve ark. 2002), optik fiberlerde darbe ilerlemesinin kontrolüne kadar geniş uygulama alanı bulmuşlardır (Okawachi ve ark. 2005, Song ve ark. 2005). Bundan başka Horiguchi ve Culverhouse'ın 1989 yılında Brillouin saçılması yardımıyla fiberde gerilme ve sıcaklığın ölçülmesi konusundaki çalışmaları optik fiberli algılayıcılar konusunda yeni bir dönem başlatmıştır (Horiguchi ve ark. 1989, Culverhouse ve ark. 1989). Çalışmalarında, pompa (veya Stokes) ışığını zaman veya frekans bölgesinde modüle ederek *gerilme* ve *sıcaklığın* fiber boyunca ölçülmesi ile dağıtık Brillouin algılayıcıları ilk defa tanımlamışlardır.

Birkaç mW'lık pompa güçlerinde yüksek kazançlar elde edilmesini sağlayan, (SBS), optik fiberlerde lineer olmayan en önemli güçlendirme mekanizmasıdır. Ancak, 12 THz' lik Raman kazanç bant genişliği ile kıyaslandığında, yaklaşık 35 MHz olan Brillouin kazanç bant genişliği, yüksek bant genişliği gerektiren yüksek hızlı dijital kanalların kuvvetlendirilmesi için yeterli değildir. Ayrıca, sıcaklık nedeniyle oluşan yüksek sayıda uyarılmış fononlar nedeniyle, ASE gürültüsü nispeten fazladır. Bu nedenlerden dolayı, sayısal optik haberleşmede Brillouin kuvvetlendiriciler kullanılamamaktadır. Ancak, eğer sinyaller sayısallaştırılmamış ise ve analog olarak gönderiliyorsa, bu durumda sinyallerin bant genişliği oldukça azalmaktadır. Bu durumda analog sinyaller için Brillouin kuvvetlendiricileri önemli avantajlara sahip

olabilmektedir. Brillouin kuvvetlendiriciler, dar bantlı kuvvetlendirme özelliği nedeniyle, kuvvetlendirici yerine daha çok aktif filtre olarak kullanılmaktadır.

Raman kuvvetlendiricilerde olduğu gibi, uyarılmış Brillouin saçılması da, güçlü pompa dalgasından zayıf sinyal (Stokes) dalgasına gücün aktarılması anlamına gelmektedir. Fiberin diğer ucundan fibere Stokes ışını gönderilmese bile, nW mertebelerindeki ASE gürültüsü nedeniyle Stokes dalgası kendiliğinden meydana gelebilmektedir (Boyd 2003) . Ancak, pompaya göre yaklaşık 11 GHz'lik bir frekans farkı ile zayıf bir sinyal fiberin diğer ucundan ortama gönderilirse, bu sinyal SBS nedeniyle güçlendirilecektir. Brillouin kuvvetlendiricisinde, sinyal ve pompa birbirine ancak ters yönde hareket etmeleri durumunda kuvvetlenme olmaktadır. Bu durumda pompa ve sinyalin birbirine ters yönde ilerlediği Şekil 2.3'deki yapı Brillouin kuvvetlendiricisi için uygun olmaktadır. Burada gerekli olan koşul, pompa ve sinyalin frekansları arasındaki farkın fiberin Brillouin frekans kayma miktarına (yaklaşık 11 GHz) eşit olmasıdır.

Fiberin Brillouin frekans kayma miktarı yaklaşık 11 GHz olduğundan, pompa dalgaboyu haberleşmenin kullanıldığı dalgaboyu bölgesindedir. Ayrıca, SBS, düşük pompa güçlerinde kolaylıkla oluşabildiğinden, ucuz pompa kaynakları problemsiz olarak sağlanabilmektedir.

2.2.6. Brillouin kuvvetlendiricilerin eşik noktasının hesaplanması

Raman ve Brillouin kuvvetlendiricilerin en önemli problemi, spontane saçılmadan, uyarılmış saçılmaya geçiş noktasındaki pompa gücünün yani eşik güç değerinin saptanmasıdır. Brillouin ve Raman kuvvetlendirici tasarımlarının yanı sıra, Brillouin ve Raman algılayıcıların ve lazerlerin tasarımları için de eşik pompa gücünün saptanması oldukça önemlidir (Ravet ve ark. 2006).

Smith'in (1972) Brillouin eşik güç seviyesi ile ilgili tanımı (2.11) eşitliği ile ifade edilmektedir (Smith 1972).

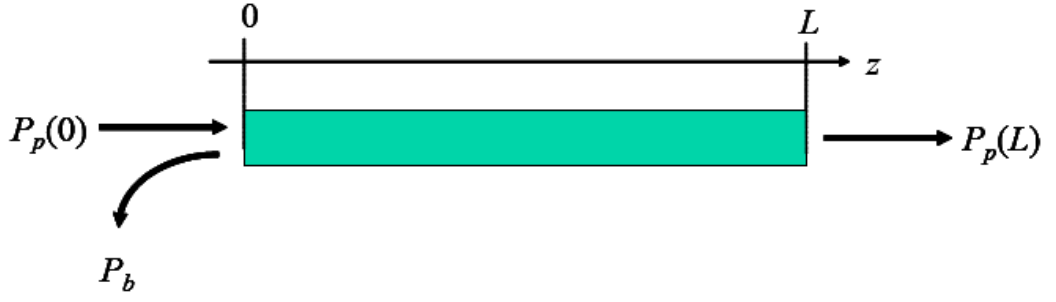
$$P_{BFJ} \approx 21 \cdot \Gamma \cdot A_{eff} / (g_B \cdot L_{eff}) \quad (2.11)$$

(2.11) eşitliğinde, g_B Brillouin kazanç katsayısı, Γ polarizasyon faktörü (Van Deventer 1994), A_{eff} ve L_{eff} sırasıyla etkin fiber alanı ve etkin fiber uzunluğudur ($L_{eff} = (1 - e^{-\alpha L}) / \alpha$). L_{eff} fiber zayıflama katsayısı α ve fiber uzunluğu L ' nin bir fonksiyonudur. $P_{eq} = A_{eff} \cdot \Gamma \cdot / (g_B \cdot L_{eff})$ olmak üzere, P_{eq} değerini, 21 kazanç değeri veren eşdeğer giriş Stokes (sinyal) gücü olarak düşünebiliriz. Modern optik fiberlerde, 21 faktörü 19 olarak ifade edilmektedir (Bayvel ve Radmore 1990). Ancak, (2.11) eşik gücü, fiberin diğer ucundan sinyal yollanmadığı için fiber içinde kendiliğinden oluşturulan Stokes dalgası göz önüne alınarak hesaplanan eşik gücüdür. Fiberin diğer ucundan işaret gönderilmeden, fiber içindeki gürültü nedeniyle oluşturulan Stokes ile kuvvetlendirme yapılan düzeneğe Brillouin fiber jeneratörü (BFJ) adı verilmektedir. Dolayısı ile (2.11) eşitliği BFJ için geçerli olmaktadır.

BFJ'den farklı olarak Brillouin fiber kuvvetlendiricisinde (BFK), fiberin diğer ucundan pompa dalgasına göre yaklaşık 11 GHz frekans farkı ile (Stokes) zayıf sinyal gönderilmektedir. Bu Stokes sinyal gücünü de göz önüne alarak, kuvvetlendiricinin eşik güç seviyesinin hesaplanmasına ait yöntem ilk defa Ravet ve arkadaşları (2008) tarafından ortaya atılmıştır. Bu yöntemle birlikte Brillouin fiber kuvvetlendiricilerin uyarılmış Brillouin eşik gücü nümerik olarak hesaplanabilmektedir. Bu yöntem ayrıca, Raman fiber kuvvetlendiricinin eşik güç değerinin hesaplanması için yol gösterici olması nedeniyle önemlidir. Bu bölümde Brillouin fiber kuvvetlendiriciler için eşik seviyesinin (P_{th}) hesaplanması için önerilen yöntem anlatılacak ve bu yöntem daha sonra Raman kuvvetlendiricileri için uygulanacaktır.

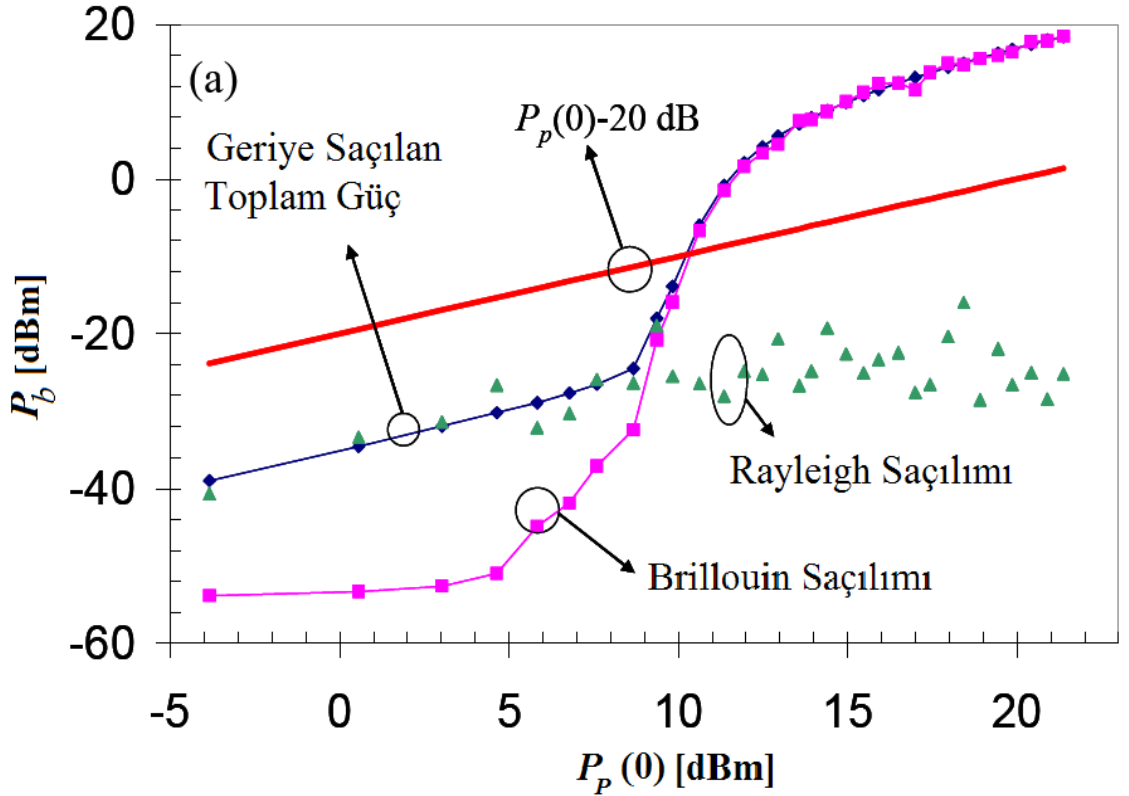
2.2.7. Brillouin fiber jeneratörü

Şekil 2.10'da gösterildiği gibi Brillouin fiber jeneratörü, sadece pompa sinyalinden ($P_p(0)$) ve optik fiberden oluşmaktadır. Geriye saçılan toplam ışık gücü (P_b), Rayleigh saçılma gücü ve kendiliğinden oluşan (spontane) Brillouin saçılma gücünün toplamıdır. $z = L$ noktasında fiberdeki ısıl nedenlerden dolayı oluşan Stokes dalgası pompa ile etkileşime girerek kendiliğinden (spontane) Brillouin saçılmasına neden olmaktadır.

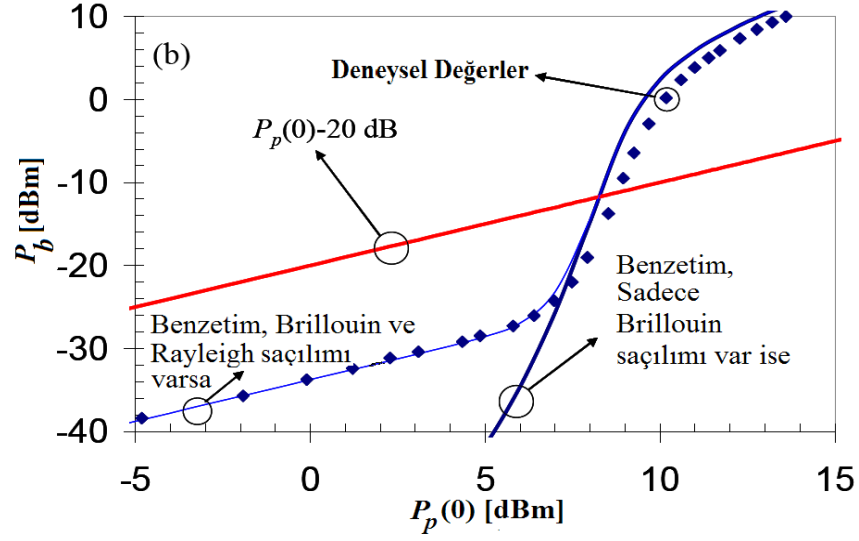


Şekil 2.10. Brillouin fiber jeneratörünün şematik gösterimi

Şekil 2.11’de, 20 km’lik basamak indisli fiberden oluşan Brillouin fiber jeneratöründe geriye saçılan toplam güç bileşenlerinin giriş pompa gücüne göre değişimi incelemek üzere yapılan deneyin sonucu gösterilmiştir (Ravet ve ark. 2008). Bu şekilde geriye saçılan güç, Rayleigh saçılma gücü (P_R) ile Brillouin geri saçılım gücünün (P_S) toplamıdır.



Şekil 2.11. Brillouin fiber jeneratöründe geriye saçılan optik gücün deneysel olarak ölçüm sonuçları (Ravet ve ark. 2008)

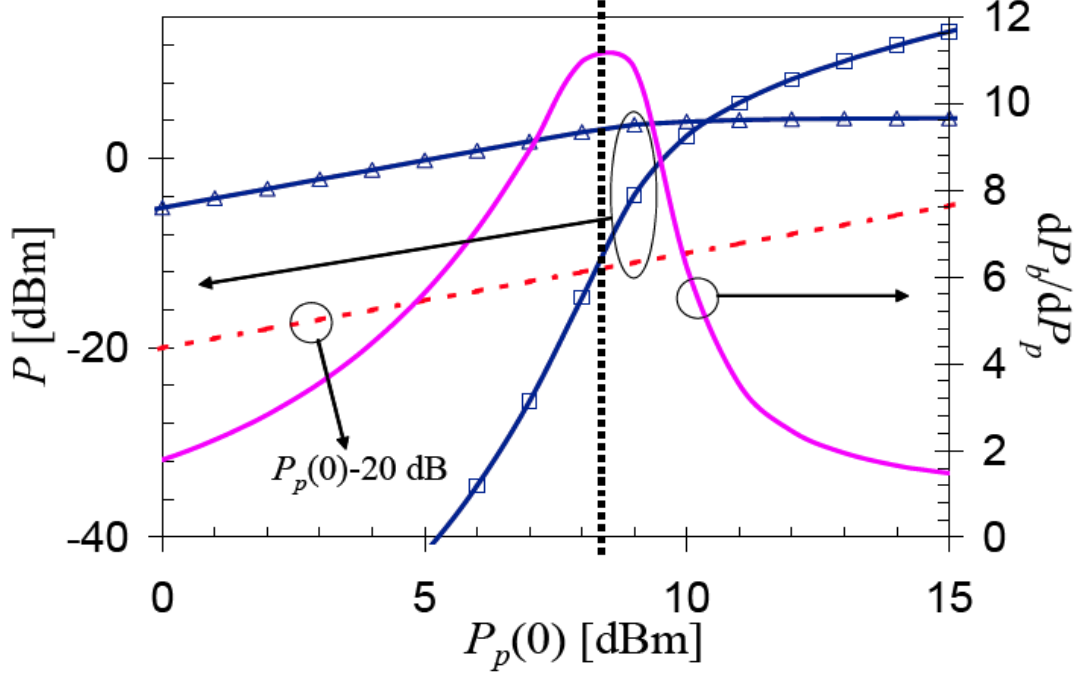


Şekil 2.12. Brillouin fiber jeneratöründe geriye saçılan optik güce ait deneysel olarak ölçülen güç değerleri ile benzetim yapılarak hesaplanan güç değerlerinin kıyaslanması. (Ravet ve ark. 2008)

Şekil 2.12’de deneysel ölçüm değerleri ile nümerik çözümlerin kıyaslaması yapılmaktadır. Pompa giriş gücünün %1’ini ifade eden %1 ölçüt çizgisinin ($P_p(0) - 20\text{dB}$ çizgisi) altındaki bölgede nümerik ve deneysel veriler, toplam güç içerisinde Rayleigh saçılmasının daha baskın olduğunu göstermektedir. Ancak, %1 ölçüt çizgisinin yakınındaki ve üstündeki bölgede, geri saçılan toplam güç içerisinde Brillouin geri saçılım gücünün katkısının daha büyük olduğunu göstermektedir.

Brillouin jeneratörlerde, geriye saçılan P_b gücünü, fibere gönderilen pompa gücünün %1’ine ulaştıran pompa gücü eşik gücü olarak tanımlanmaktadır (Bayvel ve Radmore 1990). Buna göre, Brillouin fiber jeneratörlerde %1 ölçüt çizgisi eşik güç seviyesini göstermektedir. Şekil 2.11’de eşik noktasına yaklaştıkça Rayleigh saçılım gücünün ihmal edilebilir düzeye indiği görülmektedir. Bu durumda, $P_b = P_S + P_R$ olduğundan, eşik güç seviyesi yakınında $P_b \approx P_S$ olarak alınabilir. Bu nedenle, eşik noktasının tespitinde toplam saçılma gücü P_b veya Stokes gücü P_S kullanılabilir. Brillouin jeneratörde, eşik seviyesi şekil 2.12 veya şekil 2.13’de görüldüğü gibi, düz ve kesikli çizgilerin kesiştiği noktadır. Şekil 2.13’de uyarılmış rejimin pompa giriş gücüne ne şekilde bağlı olduğunu daha açık biçimde göstermek için geriye saçılan Stokes

gücünün, pompa giriş gücüne göre değişimi (dP_s/dP_p) gösterilmiştir (Ravet ve ark. 2008).

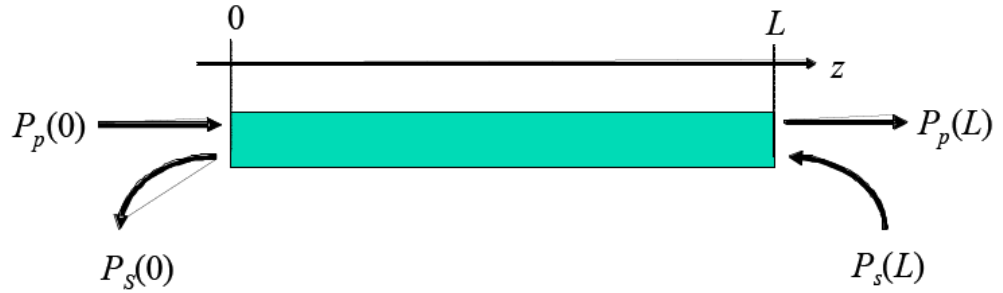


Şekil 2.13. Brillouin fiber jeneratöründe, fiber girişinde ölçülen Stokes ($P_s(0)$) (kare) güç seviyesi ile fiber çıkışında ölçülen pompa ($P_p(L)$) (üçgen) güç seviyesi. Geriye saçılan Stokes gücünün ($P_s(0)$), giriş pompa gücüne göre değişimi ($dP_s(0) / dP_p(0)$) ile gösterilmiştir (Ravet ve ark. 2008).

Geriyeye saçılan Stokes gücünün ($P_s(0)$), pompa giriş gücüne ($P_p(0)$) göre değişimi önce artış göstermektedir. Bu artış uyarılmış rejimin göstergesidir. Bu değişim daha sonra azalışa geçmektedir. Bunun nedeni, belli bir güç seviyesinden sonra pompa dalgasının gücü tükenmeye başlamıştır. İlgi çekici olarak, Brillouin jeneratörde, P_s eğrisinin % 1 ölçüt çizgisi ile kesişimi her zaman (dP_s/dP_p) eğrisinin tepe noktasında oluşmaktadır (Ravet ve ark. 2008). Tepe noktasının, P_s eğrisi ile kesiştiği nokta, P_s eğrisinin büküm noktasını göstermektedir. Bu durumda eşik güç değerinin başka bir ifadesi olan büküm noktası, pompa gücünün tükenmeye başladığı, giriş pompa $P_p(0)$ değerini verecektir (Cotter 1982). Ayrıca, Ravet ve arkadaşları (2008), %1 ölçüt çizgisi yardımıyla bulunan büküm noktasının deneysel veriler ile tutarlı olduğunu göstermişlerdir.

2.2.8. Brillouin kuvvetlendiricileri

Brillouin fiber kuvvetlendiricide, Stokes sinyali ($P_S(L)$) Şekil 2.14'de gösterildiği gibi $z = L$ noktasından fibere yollanmaktadır (Olson ve Van der Ziel 1972). Birbirine zıt yönde hareket eden pompa ve Stokes dalgaları ortamdaki akustik alanın büzülmesi nedeniyle birbirleriyle etkileşime girmektedir. Bu etkileşim sonucunda, Stokes sinyali kuvvetlenmekte, pompa dalgası ise Stokes sinyalinin kazancı oranında tüketilmektedir. Brillouin fiber jeneratöründe, ısıll nedenlerden dolayı oluşan spontane Brillouin saçılması, uyarılmış Brillouin saçılmasının yanında ihmal edilebilir düzeydedir. (2.12) eşitliklerinde Brillouin fiber kuvvetlendiricisine ait kararlı hal denklemleri verilmiştir. Bu denklemler kendiliğinden kuvvetlenen emisyon gücünün (ASE) ihmal edilebilir seviyede olduğu sürece geçerlidir (Ferreira ve ark. 1994). Deneyler, bükülme metodu ile bulunan eşik pompa güç seviyesinin, Brillouin fiber kuvvetlendiricilerinde de geçerli olduğunu göstermiştir (Ravet ve ark. 2008).



Şekil 2.14. Brillouin kuvvetlendiricinin şematik olarak gösterimi

$$\frac{d}{dz} P_p = -\frac{1}{\Gamma} g_B P_S P_p - \alpha P_p \quad (2.12a)$$

$$\frac{d}{dz} P_S = -\frac{1}{\Gamma} g_B P_S P_p + \alpha P_S \quad (2.12b)$$

P_p , P_S , α ve g_B sıra ile pompa gücü, Stokes (sinyal) gücü, kullanılan dalga boyundaki fiberin zayıflaması ve Brillouin kuvvetlendirme katsayısıdır. Γ pompa ve Stokes dalgalarının birbirlerine göre polarizasyon durumlarını göstermektedir ve değeri

1 ile 2 arasında değişmektedir. Polarizasyonun sabit bir şekilde korunduğu fiberlerde, pompa ve Stokes aynı polarizasyon durumuna sahipse $\Gamma = 1$, eğer iki dalga birbirlerine göre rastgele polarizasyona sahipse $\Gamma = 1.5$ ve sıradan tek modlu fiberler için $\Gamma = 2$ 'dir.

Şekil 2.14'de verilen L uzunluğundaki Brillouin fiber kuvvetlendiricisinde, pompa ışını $z = 0$ noktasından Stokes ışını da $z = L$ noktasından gönderilmiş olsun. Bu durumda sınır koşulları,

$$P_p(z = 0) = P_{p0} \quad (2.13a)$$

$$P_s(z = L) = P_{sL} \quad (2.13b)$$

Burada $P_p(0)$, $z = 0$ noktasından fibere gönderilen pompa gücü, $P_s(L)$ ise fibere $z = L$ noktasından gönderilen Stokes (sinyal) gücüdür. A_{eff} ise, optik fiberin etkin alanıdır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Literatürde Brillouin kuvvetlendiricisine ait (2.12) ile verilen kararlı hal denklemlerinin analitik çözümü Chen ve Bao (1998) tarafından araştırılmıştır. Çalışmalarında, çözüm içerisinde açık olarak ifade edilemeyen entegral ifadeleri bulunduğundan, problemin nümerik olarak çözülebileceğini bildirmişlerdir. Nümerik çözüm için iki boyutlu Newton-Raphson yöntemini önermişlerdir. Bu çözüm yöntemi Raman kuvvetlendiricisine ait denklem çözümü için yol gösterici olması bakımından oldukça önemlidir.

3.1. Kararlı Durum Denklemlerinin Newton-Raphson Yöntemi ile Çözümü

Chen ve Bao (1998) tarafından önerilen nümerik çözüme göre (3.1) eşitliğindeki denklemin kökleri hesaplanmalıdır (Ravet 2007).

$$F_i(x_1, x_2, \dots, x_N) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.1)$$

Burada x , tüm x_i vektörlerini, F ise, tüm F_i fonksiyon kümesini göstermektedir. x 'in yakın komşuluğunda, F_i fonksiyonları, (3.2) eşitliğinde Taylor serisine açılmıştır.

$$F_i(x + \delta x) = F_i(x) + \sum_{j=1}^N \frac{\partial F_i}{\partial x_j} \delta x_j + O(\delta x^2) \quad (3.2)$$

(3.2) eşitliğindeki kısmi türevler matrisi Jacobian matrisi (J) olduğundan, bu matrisin ifadesi,

$$J_{ij} \equiv \frac{\partial F_i}{\partial x_j} \quad (3.3)$$

Eşitlik (3.2) matris formunda ifade edilirse;

$$F(x + \delta x) = F(x) + J \cdot \delta x + O(\delta x^2) \quad (3.4)$$

$F(x + \delta x) = 0$ 'a eşitlenir δx^2 ve daha yüksek dereceli hata terimleri ihmal edilirse, δx hata terimi için, fonksiyonun değerini sıfıra doğru yaklaştıran doğrusal denklem kümesi (3.5) eşitliği ile ifade edilebilir.

$$J \cdot \delta x = -F \quad (3.5)$$

Burada, çözüm vektörü (3.6) ifadesi ile güncellenerek çözüme yaklaşmaktadır (Press ve ark. 1992).

$$x_{yeni} = x_{eski} + \delta x \quad (3.6)$$

Bu işlem (3.7) eşitliğindeki koşul sağlanana dek kendini güncelleştirmektedir.

$$|F| < \varepsilon \quad (3.7)$$

(3.5) eşitliğinde x_{yeni} , x_{eski} , J ve F cinsinden ifade edilebilmektedir. Buna göre,

$$x_{1,yeni} = x_{1,eski} + \frac{1}{J_{11}} \left(F_1 + J_{12} \frac{F_1 J_{21} - F_2 J_{11}}{J_{11} J_{22} - J_{21} J_{12}} \right) \quad (3.8a)$$

$$x_{2,yeni} = x_{2,eski} + \left(\frac{F_1 J_{21} - F_2 J_{11}}{J_{11} J_{22} - J_{21} J_{12}} \right) \quad (3.8b)$$

$J_{11} J_{22} - J_{21} J_{12} \neq 0$ koşulu her durumda sağlanmalıdır. Eşitlik (3.8a) ve (3.8b), eşitlik (3.7) sağlanıncaya dek güncellenecektir. $x_1 = I_p(L)$ ve $x_2 = I_s(0)$ yapılarak, $F_1(x_1, x_2)$ ve $F_2(x_1, x_2)$, (3.9) eşitlikleri ile ifade edilebilir.

$$F_1(x_1, x_2) = -x_1 - I_s(L) + A(x_1, x_2)^{1/2}, \quad (3.9a)$$

$$F_2(x_1, x_2) = \int_{+I_p(0)-x_2}^{+x_1-I_s(L)} B(u, x_2)^{1/2} du + \alpha L, \quad (3.9b)$$

A ve B fonksiyonlarının ifadesi,

$$A(x_1, x_2) = \{4I_p(0)x_2 \exp[(g/\alpha)(x_1 + x_2 - I_p(0) - I_s(L))] + [x_1 - I_s(L)]^2\} \quad (3.10a)$$

$$B(u, x_2) = \{4I_p(0)x_2 \exp[(g/\alpha)(u - I_p(0) + x_2)] + u^2\} \quad (3.10b)$$

Jacobian matrisin elemanlarını hesaplamak için $F_1(x_1, x_2)$ ve $F_2(x_1, x_2)$ fonksiyonlarının sırasıyla x_1 ve x_2 'ye göre kısmi türevleri alınır. Buna göre Jacobian matrisinin elemanları (Ravet 2007);

$$J_{11} = \frac{\partial}{\partial x_1} F_1(x_1, x_2) \quad (3.11a)$$

$$= -1 + \frac{1}{2} A(x_1, x_2)^{-1/2} \{4I_p(0)x_2 \exp[(g/\alpha)(x_1 + x_2 - I_p(0) - I_s(L))] + [x_1 - I_s(L)]\}$$

$$J_{12} = \frac{\partial}{\partial x_2} F_1(x_1, x_2) \quad (3.11b)$$

$$= -1 + A(x_1, x_2)^{-1/2} 2I_p(0) \exp[(g/\alpha)(x_1 + x_2 - I_p(0) - I_s(L))] \left(1 + \frac{x_2 g}{\alpha}\right)$$

$$J_{21} = \frac{\partial}{\partial x_1} F_2(x_1, x_2) = A(x_1, x_2)^{-1/2} \quad (3.11c)$$

$$J_{22} = \frac{\partial}{\partial x_2} F_2(x_1, x_2) = \frac{1}{I_p(0) + x_2} \dots \quad (3.11d)$$

$$- 2I_p(0) \left(1 + \frac{x_2 g}{\alpha}\right) \int_{+I_p(0)-x_2}^{+x_1-I_s(L)} \exp[(g/\alpha)(u + x_2 - I_p(0) - I_s(L))] B(u, x_2)^{-3/2} du$$

3.2. Raman Kuvvetlendirici Denklemlerinin Çözümü İçin Yapılan Çalışmalar

(2.7) ve (2.8) eşitlikleri ile ifade edilen, tek pompa ve tek sinyal içeren Raman kuvvetlendirici denklemlerinin, Brillouin kuvvetlendirici denklemlerinin çözümünde olduğu gibi analitik çözümü yoktur. Bu durumda tek pompa ve tek sinyal içeren Raman kuvvetlendirici denklemleri de nümerik olarak çözülmektedir.

İki nokta, sınır değer probleminin çözüm yöntemleri, literatürde iki ana başlıkta toplanmıştır (Stoer ve Bulirsch 2002). Bu yöntemlerden birincisi literatürde “shooting” olarak adlandırılan *kestirim* yöntemi, ikincisi ise literatürde “finite difference” olarak

adlandırılan *sonlu farklar* yöntemidir. Bu bölümde iki temel yöntem açıklanmış ve yöntemler karşılaştırılmıştır.

3.2.1. Kestirim yöntemi

Adi diferansiyel denklemlerin sayısal çözümü için başlangıç değerlerinin bilinmesi gereklidir. Başlangıç değerleri bilinen, adi diferansiyel denklem çözme tekniği literatürde *ilk değer* problemi olarak adlandırılmaktadır. Kestirim metodu, başlangıç değerleri tahmin edilmiş, ilk değer problemi olarak düşünülebilir.

Sınır değer probleminde P_L bilinmekte ancak P_0 bilinmemektedir. Kestirim yönteminde, P_0 değerini belirlemek için, P_0 yerine değerler öngörülerek, problem ilk değer problemi şeklinde çözülmekte ve sonucun P_L değerine eşit olup olmadığına bakılmaktadır. Sonuç P_L değerine eşit olana dek deneme yapılarak, P_0 değeri belirlenmektedir.

Kestirim yönteminde denemeler belli bir algoritmaya göre yapılmakta ve ilk değer bu algoritmaya göre kendini düzelterek ilerlemektedir. Bu ilerlemeler sınır değer(ler)i sağlanana kadar devam etmektedir. Düzeltme yöntemi, algoritmanın can alıcı noktası olup, sonuca gidiş hızı ve kararlılığı bu yöntemle bağlıdır. Düzeltme yönteminde genel olarak geleneksel Newton-Raphson yöntemi kullanılmaktadır. Ancak, Newton-Raphson yönteminde, ilk tahmin değerleri sonuca yeteri kadar yakın ise, sonuca hızlı bir şekilde yakınsama olmaktadır. İlk tahmin değerleri sonuca yeteri kadar yakın değil ise, sonuca yavaş bir şekilde yakınsanmakta hatta sonuçtan uzaklaşma olabilmektedir (ıraksama). Bu nedenle, Newton-Raphson düzeltme yöntemini kullanan algoritmaların genel olarak kararlılığı zayıftır. Ayrıca Newton-Raphson metodunda Jacobian matrisinin her elemanı (3.11) eşitliklerinde olduğu gibi analitik olarak bulunmalıdır. Lineer olmayan Raman denklemlerinde, bu matris elemanları oldukça karmaşık entegral ifadeleri içerdiğinden hesaplaması oldukça fazla zaman almaktadır. Örnek olarak, 10 pompa ve 50 sinyal dalgası için Jacobian matrisinin [60x60] elemanı olduğu göz önüne alındığında, Jacobian matrisinde nümerik değer hesaplatılmasının uzun süre aldığı görülebilir. Bu

durumda analitik Jacobian matrisinin bilgisayara hazır olarak verilip sadece nümerik değer hesaplatılmasının süreyi kısaltacağı açıktır.

Eğer çözülmesi istenen fonksiyon bazı noktalarda keskin olarak değişmiyorsa veya kararlı olarak değişiyorsa kestirim yöntemi oldukça etkilidir. Ancak fonksiyon keskin şekilde değişiyorsa ve düzeltici yöntemin kararlılık kriterleri doğru olarak tanımlanmamış ise, istenen aralığın sonuna gelmeden ıraksama kaçınılmazdır. Sıklıkla karşılaşılan diğer bir durum ise, düzeltici yöntem belirtilen fiber uzunluğunun tümü için hesaplama yapabilmesine rağmen yanlış hesaplama yapmaktadır. Bunun nedeni, lineer olmayan denklemlerin değerlendirilmesi doğru yapılamamaktadır veya denklem çözücü hesaplanması istenen sınır değer için (P_L) başlangıç değerini (P_0) tam doğru kestirememektedir. Diğer bir sorun ise, çözülen fonksiyon sınır değerlere duyarlı olmayabilmekte veya başlangıç değerine aşırı duyarlı olabilmektedir. Bir önceki örnekteki 60 adet lineer olmayan denklemin çözümünde eğer kestirim yöntemi kullanılacaksa, kararlılık kriterleri iyi tanımlanmış bir düzeltme yöntemi kullanılması gerekmektedir.

Raman kuvvetlendirici denklem çözümü Hu ve arkadaşları (2004) tarafından incelenmiş ve çözümde keskin değişimlerin bir hayli fazla olduğu raporlanmıştır. Ayrıca lineer olmayan denklem çözümleri için bu sonucun doğal olduğunu bildirmişler ve çözüm için sonlu farklar yöntemini önermişlerdir. Bu durumda, kestirim algoritması kullanılırsa, her ilerleme adımında birden fazla kararlılık kriteri işletilmesi gerekeceğinden, iyi yapılandırılmış düzeltici algoritma olsa bile çözüm süresi oldukça uzayacaktır.

Yakın zamanda, araştırmacılar tarafında etkin çalışan kestirim algoritmaları önerilmiştir (Liu ve Zhang 2004, Ning ve ark. 2004, Han ve ark. 2005, Han ve ark. 2006, Dastjerdi ve ark. 2008).

3.2.2. Sonlu farklar yöntemi

Sonlu farklar yöntemi $a = x_0 < x_1 < x_2 \dots < x_N = b$ şeklinde tanımlı $[a,b]$ kapalı aralığındaki $[x_i, x_{i+1}]$ noktalar arasında belirli bir yöntemle ilerleyerek sonuca

ulaşmaktadır. Örneğin en çok kullanılan yöntemlerden biri olan trapezoid yönteminde ilerleme şekli h_i adım aralığı olmak üzere (3.12) eşitliği ile ifade edilmektedir.

$$y_{i+1} - y_i = \frac{h_i}{2} [f(x_i, y_i) + f(x_{i+1}, y_{i+1})] \quad (3.12)$$

Tek adımlı sonlu farklar yöntemlerinde bir sonraki noktaların durumları bir önceki noktaların $[i, i+1]$ durumlarına bağlıdır. Ancak çok adımlı yöntemlerde, bir sonraki noktaların durumları, iki ya da üç adım önceki noktaların durumlarına bağlıdır.

Kestirim yöntemini kullanan ilk değer problemlerinde uygulanan tek adımlı Euler yönteminde ilerleme şekli h_i adım aralığı olmak üzere (3.13) eşitliği ile ifade edilmektedir.

$$y_{i+1} - y_i = h_i \cdot f(x_i, y_i) \quad (3.13)$$

(3.12) eşitliği ile (3.13) eşitliği arasındaki farklılık, sonlu fark yöntemi ile kestirim yöntemi arasındaki farkı göstermektedir. (3.13) eşitliğinde görüleceği üzere kestirim yönteminde ilerleme ile ilgili bilgi tek noktada saklanmış olup, çözümün sonuca ulaşım sağlayacağı noktaların hareket yönüne bağlıdır. Sonlu farklar yöntemlerinde ise ilerleme ile ilgili bilgi iki ya da daha fazla noktadan elde edildiği için yön kavramı yoktur. Tek adımlı sonlu farklar yöntemlerinin, kestirim yöntemi ile aynı hızda sonuca yakınsadığı Ascher ve arkadaşları (1995) tarafından raporlanmıştır. Sonlu farklar yöntemleri, çok adımlı kestirim yöntemlerine göre çözüme daha yavaş ancak daha doğru ve kararlılıkla ulaşmaktadır.

Sonlu farklar yöntemlerinde bazı ilerleme yöntemleri ön plana çıkmıştır. Bunlar, Runge - Kutta (RK), Adams - Bashforth (AB), Adams – Bashforth-Moulton (ABM) yöntemleridir. MATLAB sınır değer çözücü fonksiyonları `bvp4c/bvp5c/bvp6c` sınır değer problemlerinin çözümünde sonlu farklar yöntemleri kullanmaktadır.

Pratikte lineer olmayan denklem sistemleri Newton-Raphson yönteminin herhangi bir yapısı kullanılarak çözülmektedir. Denklemlerin ve sınır değerlerin lineer olduğu

Sürekli olarak kısaca, bir önceki düğümde elde edilecek sonucun bir sonraki çözüm için kılavuzluk etmesi olarak yorumlanabilir. Iraksama olmaması için fonksiyonun keskin dönüş noktalarında oldukça iyi bir tahmin değerine ihtiyacı vardır. Bu tahmin değeri en basit şekilde bir önceki çözüm noktasından elde edilebilmektedir. Keskinlik daha iyi bir tahmin değeri gerektirdiğinden fonksiyonun keskin değişim bölgesinde, düğüm noktaları birbirine daha da yaklaşmalıdır. Bu durumda keskin değişen fonksiyonlarda düğüm noktalarının birbirine yaklaşmasını ve gevşemesini kontrol edecek iyi bir algoritmanın tasarlanması şarttır. Lineer olmayan Raman denklemlerinin MATLAB sınır değer çözücü fonksiyonları ile çözümünde, süreklilik yöntemi aktif olarak kullanılmıştır (Gokhan ve Yılmaz 2009b).

Yakın zamanda, araştırmacılar tarafında etkin çalışan sonlu farklar yöntemleri önerilmiştir (Liu ve ark. 2003, Liu ve Lee 2003, Liu ve Zhang. 2004, Hu ve ark. 2004, Liu 2006, Gokhan ve Yılmaz 2009b).

3.3. Brillouin Kuvvetlendirici Denklemlerinin MATLAB Sınır Değer Fonksiyonları ile Çözümü

Bu bölümde, analitik çözümü olmayan Brillouin kuvvetlendirici denklemlerinin, MATLAB sınır değer fonksiyonları ile çözümü anlatılacaktır. Benzer çözüm yöntemi analitik çözümü olmayan Raman kuvvetlendirici denklemleri için de geçerlidir (Gokhan ve Yılmaz 2009a).

3.3.1. Diferansiyel denklemlerin kodlanması

Kararlı hal denklemleri (2.12) eşitlikleri ile ifade edilen tek pompalı ve tek sinyalli Brillouin kuvvetlendirici için diferansiyel denklemlerin MATLAB ortamında kodlanması $y(1) = I_p$, $y(2) = I_s$ olmak üzere aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

```

%=====
function dydx = bvpode(x,y)
% Brillouin kuvvetlendiricileri için MATLAB ortamında
% diferansiyel denklem kodlanması
gb = 2.15e-11; % Brillouin kazancı
Γ=1.5;
Att=0.193; % [dB/km] basamak indisli fiber için
Alpha = 0.23026*Att*1e-3 ; % zayıflama katsayısı [m/km]
dydx = [-gb/Γ*y(1)*y(2)-Alpha*y(1)
        -gb/Γ*y(1)*y(2)+Alpha *y(2)];
%=====

```

3.3.2. Sınır değerlerin kodlanması

Sınır değerlerin tanımı da bir fonksiyon şeklindedir.

```

%=====
function bound = bvpbc(ya,yb)
% Brillouin kuvvetlendirici için sınır değerlerin
% kodlanması
% a sol sınır değer  $I_P(z=0) I_{P0}$  ( $a=x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_N=b$ )
% b sağ sınır değer  $I_S(z=L) I_{SL}$ 
a=1e-3 % 1 mW;
b=100e-3; % 100 mW

Sınır_deger = [ya(1)- a
               yb(2)- b ];
%=====

```

3.3.3. Tahmin fonksiyonunun kodlanması

MATLAB ortamında *Bvpinit* fonksiyonu kullanılarak tahmin fonksiyonu veya tahmin değerleri ile tahmin fonksiyonunun veya tahmini değerlerin geçeceği tahmini apsis noktaları tanımlanmaktadır. Diferansiyel denklemdeki bilinmeyen sayısı kadar tahmini değer veya tahmin fonksiyonu kullanılmalıdır. Bu bölüm sınır değer problemlerinin çözümünde önemli yere sahiptir. Bu önem, çözüm için gerekli düğüm noktalarının yeri ve sayısı ile bu düğümlerden geçecek olan tahmini fonksiyonun, sınır değer çözücü fonksiyona çözüm konusunda önemli ipuçları vermesi ve çözüm için kılavuzluk yapmasından kaynaklanmaktadır. Tahmin fonksiyonunun doğru olması çözüm için kritik öneme sahip olmakla birlikte çözüm hızını da belirlemektedir. *Bvpinit* fonksiyonun ilk parametresi ile apsis noktaları tanımlanmaktadır. Örneğin *linspace*

(0,5000,50) fonksiyonu, tahmin fonksiyonunun kullanacağı apsis değerlerinin, sıfır ile elli arasında eşit aralıklı noktalardan geçtiğini bildirmektedir. *Bvpinit* fonksiyonunun ikinci parametresi her bir diferansiyel denklem için kullanılacak tahmini fonksiyonun tanımlanmasını sağlar.

Sınır değer problemlerinde tahmini fonksiyon belirlemek en önemli sorundur. Bu sorunu aşmak için önerilen yöntem 3.5 bölümünde detaylı olarak anlatılmıştır. Tahmini apsis değerleri ile tahmini fonksiyonlar *bvpinit* fonksiyonu ile birleştirilmektedir.

```
%=====
Tahmini_degerler = bvpinit(linspace(0,5000,50), [Ip Is]);
%=====
veya
%=====
Tahmini_degerler = bvpinit(linspace(0,5000,50), @tahmin)
function v= tahmin(x)

Ip=100e-3;
Is=1e-3;

v= [Ip*exp(-x) Is*exp(-5+x)];
%=====
```

3.3.4. Hesaplama

Tahmini fonksiyon ve diferansiyel denklemlerin tanımlanmasından sonra, seçenekleri tanımlayıp, çözüm için sınır değer fonksiyonunu çalıştırabiliriz (*bvp5c*). Seçenekler kısmında *bvpset* fonksiyonu ile durum raporunu isteyebilir (Status on), düğüm noktasının belirlenmesinde ne kadar bağıl hataya izin verilmesi gerektiğini tanımlayabiliriz (RelTol).

```
%=====
options = bvpset('Stats','on','RelTol',1e-12);
solution = bvp5c(@bvpode,@bvpbc,Tahmini_degerler,options);
%=====
```

3.3.5. Program çıktısı

Sınır değer çözücü fonksiyon tarafından çözülen apsis değerleri `sol.x` vektöründe, çözülen fonksiyonlar ise `sol.y` vektöründe saklanmaktadır. Tüm fonksiyon çözümleri aşağıdaki program ile elde edilip çizdirilebilmektedir. Çözüm sonucunda hesaplanan herhangi bir düğüm noktasındaki hata, seçenekler kısmında belirtilen 'RelTol' hata değerinden daha büyük olamaz.

```
%=====
% Çözüm Sonuçları
x = sol.x;
y1= sol.y(1,:);
y2= sol.y(2,:);
y3= sol.y(3,:);
%=====
```

3.4. Raman Kuvvetlendirici Denklemlerinin MATLAB çözümü

(2.7) ve (2.8) eşitlikleri ile ifade edilen tek pompalı ve tek sinyalli Raman kuvvetlendiricileri için $y(1) = I_{p1}$ (pompanın tükendiği durum), $y(2) = I_s$, $y(3) = I_{p2}$ (pompanın tükenmediği durum) olmak üzere üç değişken tanımlanırsa, diferansiyel denklemin kodlaması aşağıdaki şekilde düzenlenebilir.

3.4.1. Diferansiyel denklemlerin kodlanması

```
%=====
function dydx = bvpode(x,y)

% Tek pompa ve tek sinyalli Raman kuvvetlendiriciler
% için Diferansiyel denklemlerinin kodlanması

gr = 7e-14; % Brillouin kazancı
Gamma=1;
Att=0.193; % zayıflama [dB/km] basamak indisli fiber için
Alpha_p = 0.23026*Att*1e-3; % zayıflama katsayısı [m/km]
Alpha_s = 0.23026*Att*1e-3; % zayıflama katsayısı [m/km]
w=1.55/1.65; % wp/ws 1455/1555
dydx = [ -w*gr/Gamma*y(1)*y(2)-Alpha_p*y(1)
          gr/Gamma*y(1)*y(2)-Alpha_s*y(2)
          -Alpha_p*y(3) ] ;
%=====
```

3.4.2. Sınır değerlerin kodlanması

Sınır değerlerin tanımı da bir fonksiyon şeklindedir.

```
%=====
function bound = bvpbc(ya,yb)
% Raman kuvvetlendirici için sınır değerlerin
% kodlanması

% a sol sınır değer  $I_P(z=0)$   $I_{P0}$  ( $a=x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_N=b$ )
% b sağ sınır değer  $I_S(z=L)$   $I_{SL}$ 
a=1.5 ; % 1.5 W
b=1e-6; % 1μW

Sınır_deger =
[ya(1)- a      % Pompanın tüketildiği durumda çözüm
 ya(2)- b      % Stokes sinyalinin sınır değeri
 ya(3)- a ]; % Pompanın tüketilmediği durumda çözüm

% ya(2)- b ileri yönlü pompalama düzeneği için.
% yb(2)- b geri yönlü pompalama düzeneği için.
%=====
```

Programda tahmin fonksiyonunun kodlanması, hesaplama ve program çıktısı Brillouin Fiber kuvvetlendiriciler ile benzerlik gösterdiğinden ayrıca anlatılmayacaktır.

3.5. Birden Fazla Pompa ve Sinyal İçeren Raman Kuvvetlendirici Denklemlerinin Çözümü

Tez içerisinde, birden fazla pompa ve sinyal içeren Raman kuvvetlendirici denklemlerinin çözümü için, Newton-Raphson yöntemi yerine, MATLAB sınır değer çözücü fonksiyonları (bvp4c/bvp5c/bvp6c) ile birlikte, 3.2.2 kısmında detaylı olarak anlatılan algoritma kullanılmıştır (Gokhan ve Yılmaz 2009b). Bu algorithmada süreklilik yöntemi kullanılmıştır. Süreklilik yöntemi, bir giriş değerinin ürettiği çözümün bir sonraki giriş için tahmin değeri olarak kullanılması şeklinde özetlenebilir. Pompa veya sinyalde belli bir güç seviyesi için yakınsayan bir çözüm, daha büyük pompa ve sinyal seviyesi için yakınsamayabilir. Bu durumda yakınsayan çözüm değerleri kullanılarak süreklilik yöntemi yardımıyla istenilen güç seviyelerine çıkılabilmektedir. Bu durum fiber uzunluğu için de geçerlidir.

Eğer yeteri kadar güçlü tahmin değerleri var ise, sınır pompa güç değerleri ve fiber mesafesi ne olursa olsun MATLAB sınır değer çözücü fonksiyon çözüme yakınsamaktadır. Ancak, elimizde yeteri kadar güçlü tahmin değerleri yok ise, MATLAB sınır değer çözücü fonksiyon çözüme yakınsamayabilir veya belli bir fiber uzunluğu ya da belli sınır güç değerleri için çözüme yakınsayabilir. Önerilen yöntemde, sınır pompa ve sinyal güç değerleri, *tahmini ilk değerler olarak atayarak*, problem çözülmektedir. Daha sonra çözüme yakınsayan fiber uzunluğu belirlenmektedir. Problemin çözülebildiği en uzun fiber mesafesine *yakınsama mesafesi* adı verilmektedir. Önerilen yöntemde önce yakınsama mesafesi hesaplanmakta, daha sonra süreklilik yöntemi ile fiber mesafesi ve pompa / sinyal güçleri istenildiği kadar artırılabilir.

Lineer olmayan denklem sistemleri için hesaplanması oldukça güç olan Jacobian matrisi MATLAB sınır değer çözücü fonksiyonları tarafından nümerik olarak hesaplanabilmektedir. Bu durumda (3.16) eşitliğine göre, her adım için Jacobian matrisinin nümerik değeri ($J(x_1), J(x_2), \dots, J(x_N)$) MATLAB tarafından hesaplanacaktır. Buna göre fiber uzunluğu artıca nokta sayısı da ($i=1,2,\dots,N$) artacağından çözüm süresinin uzayacağı açıktır. Önerilen yöntemde, MATLAB sembolik fonksiyon seti kullanılarak, *analitik* Jacobian matrisi hesaplanmış ve programa hazır olarak verilmiştir. Analitik Jacobian matrisinde sadece sayısal değerleri yerine koyarak işlem yapmak çözümü hızlandıracağı açıktır. Yapılan zaman ölçümleri sonucunda, analitik Jacobian matrisinin programa hazır olarak verilmesinin çözüm süresini 1.6 oranında kısalttığı görülmüştür. Ayrıca, süreklilik yöntemi yardımıyla, 10 adet pompa dalgasının toplam pompa gücü şu ana kadar raporlanan en yüksek güç olan 2400 mW'a çıkartılarak Raman kuvvetlendiricisinin bant genişliği artırılmıştır. Toplam pompa gücü süreklilik yöntemi ile daha da artırılabilir. Ancak, toplam güç 2600 mW'a ulaştığında, hesaplama süresi 16 dakikaya çıkmaktadır.

3.6. Önerilen Çözüm Yönteminin Uygulanması

Sınır değer problemlerinin çözümünde en önemli sorun, sonuca yakınsayacak tahmini ilk değerlerin saptanmasıdır. İlk değerlerin saptanmasından sonra, belli fiber

uzunlukları için çözüme ulaşıp ulaşılamadığına bakılır. Fiberin belli bir uzunluğu için sonuca yakınsamama durumunda, yakınsama olana dek fiber uzunluğunu azaltma işlemine devam edilir.

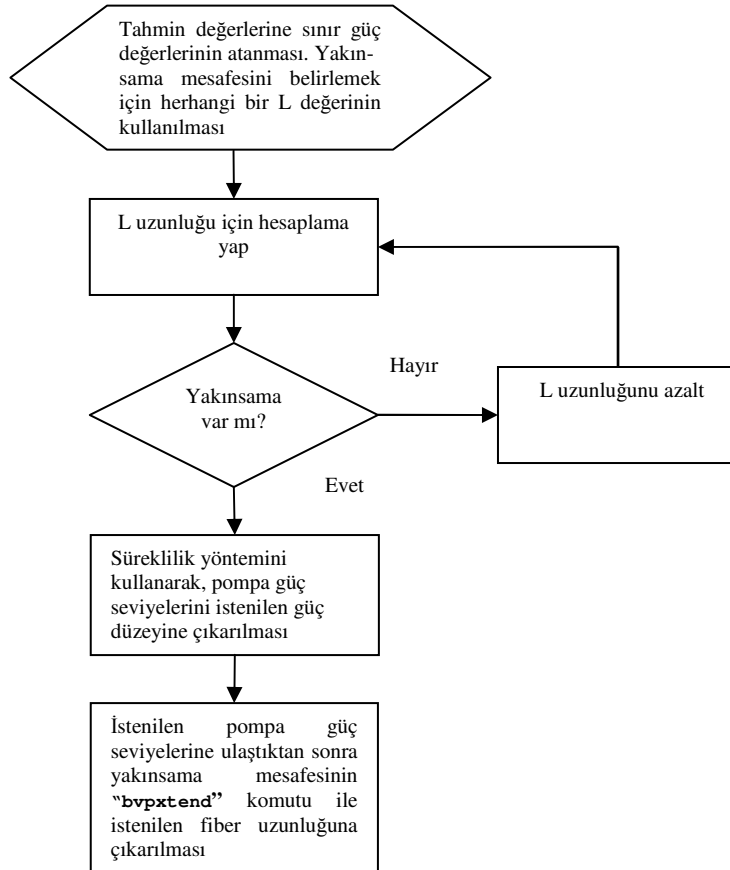
Yakınsamanın olduğu fiber uzunluğunun saptanmasından sonra, istenilen fiber uzunluğuna ve istenilen güç seviyesine erişmek için kullanılacak süreklilik algoritmasındaki artırım değeri sistemi çözümsüzlüğe itecek ölçüde büyük olmamalıdır. Artırım değeri yüksek olursa, çözüme hızlı ulaşılır ancak bir önceki çözüm noktası bir sonraki çözüm için yeteri kadar iyi tahmin değeri olmayabilir. Bu durumda MATLAB sınır çözücü fonksiyonlar ya çözüme işlemi durdurur ya da problemi yanlış bir şekilde çözer ve bu durumu kullanıcıya (hata toleransının aşıldığını ikaz ederek) bildirir. Artırım değerinin düşük olması durumunda ise çözüme ulaşmak için gerekli süre artmaktadır. Fiber uzunluğu süreklilik yöntemi ile artırılmak istenirse toplam 1500 mW'a kadar olan pompa güçleri için, artırım değerinin fiber uzunluğunun 50'de biri olduğu, toplam pompa gücü 1500 mW ile 2500 mW arasında ise artırım değerinin fiber uzunluğunun 80'de biri olduğu belirlenmiştir. Bu durumda toplam pompa gücü arttıkça, artırım değeri azalarak çözüm süresi artmaktadır.

Süreklilik yöntemini uygulamak için MATLAB sınır değer fonksiyonları (*bvp4c*, *bvp5c* ve *bvp6c*), *bvpinit* fonksiyonu ile birlikte kullanılmaktadır. *Bvpinit* fonksiyonu, uzatmak istediğimiz fiber uzunluğu veya büyütme istediğimiz güç seviyesini artırmak için *extrapolasyon* (aralık içindeki değerleri kullanarak aralığın dışındaki değerlerin belirlenmesi) yapmaktadır. *bvpinit* fonksiyonu dışında, apsis değerlerini (fiber uzunluğunun) uzatmak için özel olarak *bvpextend* komutu geliştirilmiştir. Ancak güç seviyesinin süreklilik yöntemi ile artırılması için, *bvpinit* komutu ile birlikte yeni bir program bölümü yazılmalıdır (Kierzenka ve Shampine 2008).

Sınır değer problemlerinde (3.11) eşitliklerinde olduğu gibi, Jacobian matris analitik olarak hesaplanmalı ve program içerisine girilmelidir. Ancak, MATLAB, sınır değer çözücü fonksiyonlar, Jacobian matrisinin sayısal değerini kendi iç yazılımı olan *numjac* fonksiyonu ile yaklaşık olarak hesaplamaktadır. Brillouin ve Raman kuvvetlendiricilerini ifade eden denklemlerde olduğu gibi analitik çözümü olmayan

birçok fonksiyon için analitik Jacobian matrisini hesaplamak oldukça güçtür. Bu durumda, işlem süresinin kısaltılması için MATLAB sembolik fonksiyon seti kullanarak, analitik Jacobian matrisini hesaplatmak oldukça avantajlı olmaktadır. Veya en kötü durumda sınır değer çözücü fonksiyonlar bu matrisin nümerik değerini *numjac* fonksiyonu ile kendi içinde hesaplayacaktır.

Sınır değerleri, tahmini ilk değerler olarak atandıktan sonra problemin çözülebildiği en uzun fiber mesafesi yakınsama mesafesi olarak adlandırılmıştır. Yakınsama mesafesi belirlendikten sonra, 3.6.2 ve 3.6.3 bölümlerinde açıklanan komut dizilerini işletilerek, sıra ile pompa güçleri ve fiber mesafesi artırılabilir. Tez içerisinde kullanılan bu yöntemin, diğer yöntemlere göre en önemli avantajı tahmin değerleri veya fonksiyonları arayışına son vermesi ve oldukça kararlı çalışmasıdır. Önerilen yöntemin akış diyagramı Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Birden fazla pompa ve sinyal içeren Raman kuvvetlendirici denklemlerinin çözümü için önerilen algoritma

3.6.1. MATLAB sembolik fonksiyon seti kullanılarak Jacobian matrisinin hesaplanması

```

%=====

% iki pompa ve üç sinyal içeren Raman kuvvetlendirici denklemleri
% pompa dalgaları için,

% y1' = k1_1_*y1 + ( k3_2_1_*y2*y1 + k3_3_1_*y3*y1 + k3_4_1_*y4*y1 +
%       k3_5_1_*y5*y1)
% y2' = k1_2_*y2 -
%       (k4_1_2_*y1*y2) + (k3_3_2_*y3*y2 + k3_4_2_*y4*y2 + k3_5_2_*y5*y2)

% sinyal dalgaları için,
% y3' = -k2_1_*y3 + (k4_1_3_*y1*y3 + k4_2_3_*y2*y3)
%       - (k3_4_3_*y4*y3 + k3_5_3_*y5*y3)
% y4' = -k2_2_*y4 + (k4_1_4_*y1*y4 + k4_2_4_*y2*y4 + k4_3_4_*y3*y4)
%       - (k3_5_4_*y5*y4)
% y5' = -k2_3_*y5 + (k4_1_5_*y1*y5 + k4_2_5_*y2*y5 + k4_3_5_*y3*y5 +
%       k4_4_5_*y4*y5) - 0

syms res y1 y2 y3 y4 y5
syms k1_1_ k1_2_
syms k2_1_ k2_2_ k2_3_

syms k3_2_1_ k3_3_1_ k3_4_1_ k3_5_1_
syms k4_1_2_ k3_3_2_ k3_4_2_ k3_5_2_
syms k4_1_3_ k4_2_3_ k3_4_3_ k3_5_3_
syms k4_1_4_ k4_2_4_ k4_3_4_ k3_5_4_
syms k4_1_5_ k4_2_5_ k4_3_5_ k4_4_5_

res = [

k1_1_*y1 + ( k3_2_1_*y2*y1 + k3_3_1_*y3*y1 + k3_4_1_*y4*y1 + k3_5_1_*y5*y1)
k1_2_*y2 - (k4_1_2_*y1*y2) + (k3_3_2_*y3*y2 + k3_4_2_*y4*y2 + k3_5_2_*y5*y2)
-k2_1_*y3 + (k4_1_3_*y1*y3 + k4_2_3_*y2*y3) - ( k3_4_3_*y4*y3 + k3_5_3_*y5*y3)
-k2_2_*y4 + (k4_1_4_*y1*y4 + k4_2_4_*y2*y4 + k4_3_4_*y3*y4) - ( k3_5_4_*y5*y4)
-k2_3_*y5 + (k4_1_5_*y1*y5 + k4_2_5_*y2*y5 + k4_3_5_*y3*y5 + k4_4_5_*y4*y5) - 0

];

dFdy = jacobian(res, [y1; y2; y3; y4; y5])

%=====

```

3.6.2. Süreklilik yöntemi ile pompa gücünün artırılması

```

%=====
function Pompa_Gücü_Artırımı

global a b

a= sol_sınırdak_pompanın_güç_seviyesi;    %[a
b= sağ_sınırdaki_pompanın_güç_seviyesi;    %  b]

sol = bvpinit(linspace(0,L,2),[Her bir pompa ve sinyalin sınır
değerleri]);

options = bvpset('Stats','on','RelTol',1e-5);

for k=1:Yükseltilecek_Güç
b=b+k;
sol = bvp5c(@bvpode,@bvpbc,sol,options);
end
%=====

```

3.6.3. Süreklilik yöntemi ile fiber mesafesinin artırılması

```

%=====
function fiber_uzunlugunun_sureklilik_kullanarak_artirilmasi

L= Yakinsama_uzaklığı/ Tahmin değerleri ile çözüm veren L değeri

solinit = bvpinit(linspace(0,L,2),[çözüm veren Tahmin değerleri]);
options = bvpset('Stats','on','RelTol',1e-5);

sol = bvp5c(@bvpode,@bvpbc,solinit,options);

%-----süreklilik -----

for Bnew=L:2000:50000
    solinit=bvpextend(sol,Bnew);
    sol = bvp5c(@bvpode,@bvpbc,solinit,options);
% Her bir sinyal ve pompanın çözüm değerleri

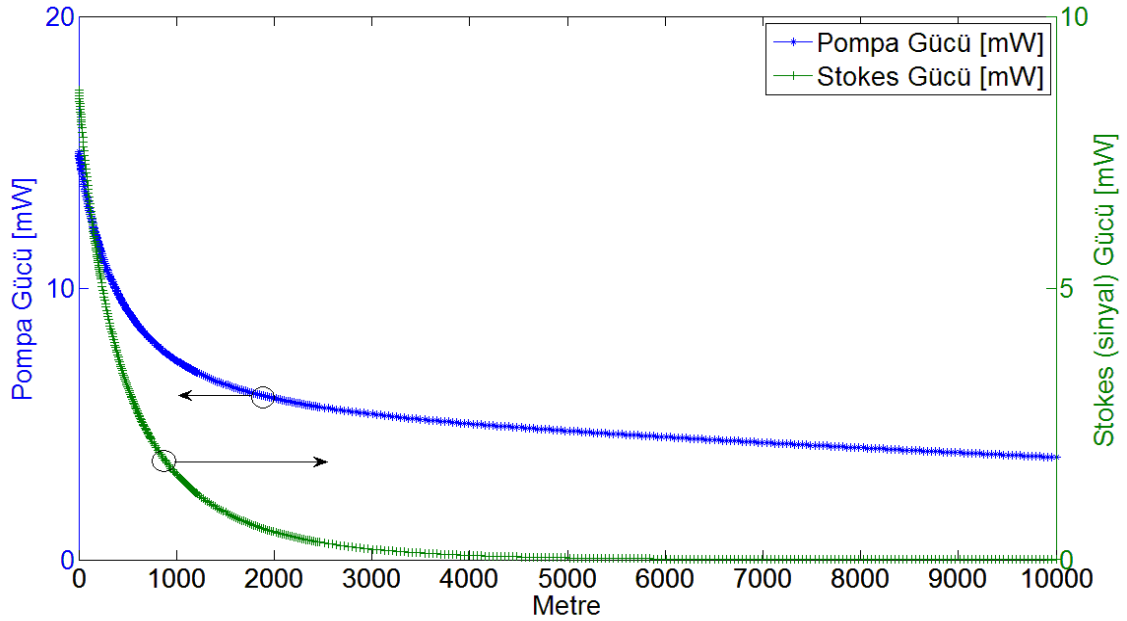
x = sol.x;
y1=sol.y(1,:);
y2=sol.y(2,:);
y3=sol.y(3,:);
*
**
%=====

```

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

4.1. Brillouin Fiber Kuvvetlendiricilerin MATLAB Sınır Değer Çözücü Fonksiyonlar ile Nümerik Çözümü

Brillouin fiber kuvvetlendirici benzetimlerinde kullanılan parametreler; $\alpha=0.193$ dB/km (True Wave™ fiber ve $\lambda=1550$ nm), $g_B=2.15 \times 10^{-11}$ m/W, $A_{eff}=83.7 \mu\text{m}^2$, $L=10$ km ve $\Gamma=1.5$ 'dir. Şekil 4.1'de sınır güç değerleri $P_S(L)=1\mu\text{W}$ ve $P_p(0)=15\text{mW}$ olan Brillouin fiber kuvvetlendiricisinde pompa ve sinyal (Stokes) gücünün fiber uzunluğu ile değişimi çizilmiştir.



Şekil 4.1. Brillouin fiber kuvvetlendiricisinde pompa ve sinyal gücünün fiber uzunluğu ile değişimi $P_S(L)=1\mu\text{W}$ ve $P_p(0)=15\text{mW}$

Şekil 4.1 dikkatli incelendiğinde, sınır noktalarına yaklaştıkça düğüm noktalarının sıklığı görülmektedir. Bunun nedeni, MATLAB sınır değer çözücü fonksiyonların (bvp4c, bvp5c, bvp6c), düğüm noktalarında hata kontrol algoritmasını işletmesinden kaynaklanmaktadır. Sınır değer çözücü fonksiyonlar hata değerini (4.1) eşitliğine göre belirlemektedirler.

$$hata(x) = (S(x))' - f(x, S(x)) \quad (4.1)$$

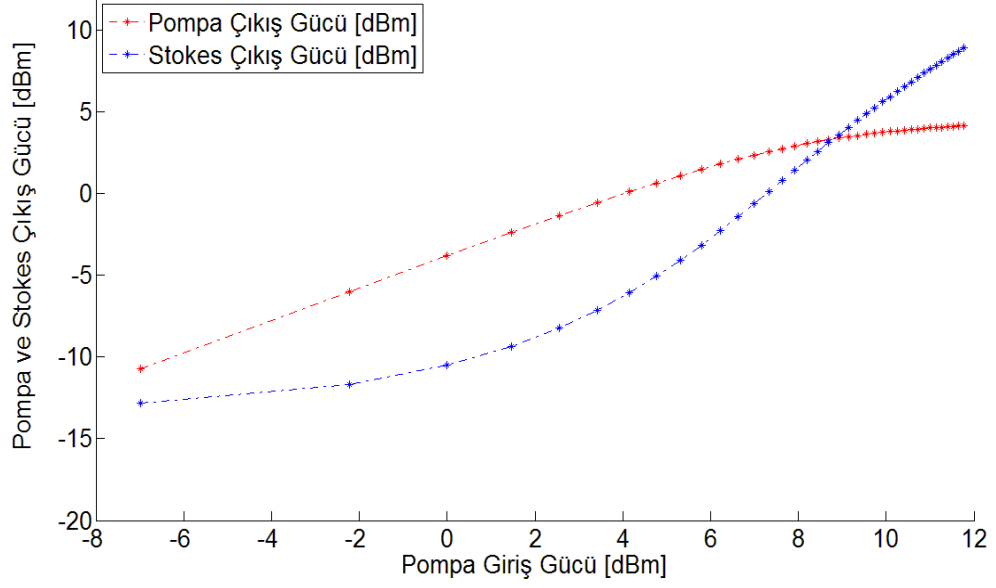
(4.1) eşitliğinde hata değeri çözülmek istenen fonksiyonun sadece birinci dereceden türevi göz önüne alınarak hesaplanmaktadır. Gerçekte hata, çözülmek istenen fonksiyonun ($S(x)$) daha yüksek mertebeden türevlerine de bağlıdır. Ancak sınır değeri çözücü fonksiyonlar bu türevlere erişememektedir. Yüksek dereceden türevlerin daha etkin olduğu keskin değişim noktalarında, hata kullanıcı tarafından belirlenen toleranstan daha yüksek ise, program hata değerini sağlamak için bir alt düğüm noktası oluşturarak kullanıcının istediği toleransı sağlamaya çalışmaktadır. Alt düğüm noktalarının oluşturulma süreci tolerans sağlanana kadar devam etmektedir. Bunun anlamı, eğer hata toleranstan büyükse, aralık ikiye bölünecektir. Ve bu bölünmeler hata değeri toleranstan küçük oluncaya dek devam edecektir. Bu durumda aralıklar arası sıklaşmaya başlayacaktır. Düğümlerin sıklaşması genel olarak fonksiyonun keskin değiştiği noktalarda oluşmaktadır. Eğer fonksiyon monoton olarak değişiyorsa, hata değerini sağlaması kolaylaşacağından düğüm noktalarının arası açılacaktır (Kierzenka ve Shampine 2001).

4.2. MATLAB Sınır Değer Çözücü Fonksiyon ile Brillouin Fiber Kuvvetlendiricilerin Eşik Değerlerin Hesaplanması

Brillouin fiber jeneratörlerin eşik gücü, bölüm 2.2.7’de belirtildiği gibi, pompa gücünün tükenmeye başladığı giriş pompa gücü olarak tanımlanmıştır (Cotter 1982). Ravet ve arkadaşları (2008), $z=0$ noktasında ölçülen Stokes gücü ile *%1 ölçüt* çizgisinin kesişim noktasının, ($dP_{S(\text{çıkış})} / dP_{P(\text{giriş})}$) eğrisinin tepe noktasından geçtiğini göstermişler ve bu kesişme noktasının Brillouin fiber jeneratörün eşik noktası olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmalarında, kesişme noktasının aynı zamanda $P_{S(\text{cikis})}$ eğrisinin bükülme noktası olduğu bildirilmiştir (Bkz. Şekil 2.13). Ravet ve arkadaşları (2008), Brillouin fiber kuvvetlendiricilerin eşik seviyesi tespitinde *%1 ölçüt* noktasının geçerli olmadığını ancak bükülme noktasının geçerli olduğunu deneysel olarak göstermişlerdir.

Kuvvetlendiricinin eşik gücünün belirlenebilmesi için, Şekil 4.2’de giriş pompa gücüne bağlı olarak çıkış pompa ve Stokes (sinyal) gücü çizdirilmiştir. Çizimde kullanılan program modülü, bölüm 3.3’de anlatılmıştır.

Pompa giriş gücüne karşı, Stokes çıkış gücünün dBm cinsinden değişimi (Stokes giriş gücü 0.1mW)

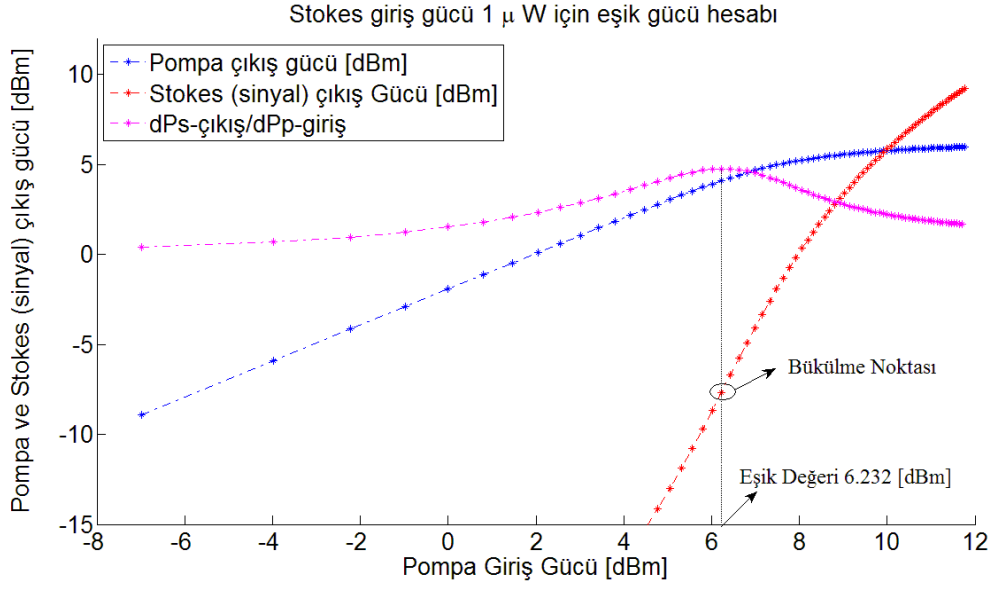


Şekil 4.2. Brillouin fiber kuvvetlendiricisinde sinyal ve pompa çıkış gücünün pompa giriş gücüne göre değişimi $P_S(L)=100\text{nW}$, $P_p(0)=15\text{mW}$

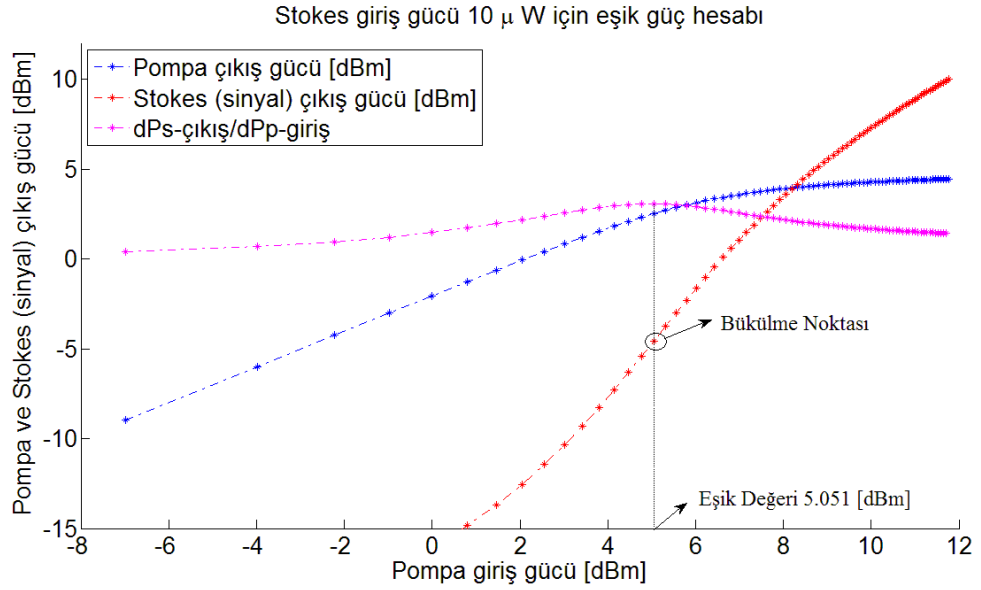
Kuvvetlendiricinin çıkış eğrileri belirlendikten sonra, eşik noktasının belirlenmesi için (4.2) eşitliği kullanılarak $(dP_{S(\text{çıkış})} / dP_{P(\text{giriş})})$ eğrisinin tepe noktası hesaplatılmıştır. $(dP_{S(\text{çıkış})} / dP_{P(\text{giriş})})$ eğrisini çizdirmek için kuvvetlendiricinin çıkış eğrilerinin çiziminde kullanılan apsis ve ordinat değerlerinden yararlanılmıştır. $(dP_{S(\text{çıkış})} / dP_{P(\text{giriş})})$ eğrisinin tepe noktasının bulunması ile $P_{S(\text{çıkış})}$ eğrisinin bükülme noktası belirlenerek kuvvetlendiricinin eşik gücü hesaplatılmıştır (Gokhan ve Yılmaz 2009a).

$$\text{BK eşik seviyesi} = \max \left(\frac{dP_{\text{Stokes-çıkış}}}{dP_{\text{pump-giris}}} \right) \approx \max \left(\frac{P_{\text{Stokes-çıkış-(n+1)}} - P_{\text{Stokes-çıkış-(n)}}}{P_{\text{pump-giris-(n+1)}} - P_{\text{pump-giris-(n)}}} \right) \quad (4.2)$$

Brillouin fiber kuvvetlendiricinin eşik gücünü hesaplamak için pompa giriş gücünü 0.2 mW ile 15 mW arasında 0.1 mW'lık adım aralıkları ile değiştirerek, $z=0$ noktasında Stokes çıkış gücü, $z=L$ noktasında ise pompa çıkış gücü hesaplatılmıştır. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te, (4.2) eşitliği kullanılarak Brillouin fiber kuvvetlendiricinin eşik gücü hesaplatılmıştır. Şekil 4.3'de $P_S(L) = 1\mu\text{W}$, Şekil 4.4'de $P_S(L) = 10\mu\text{W}$ alınmıştır.

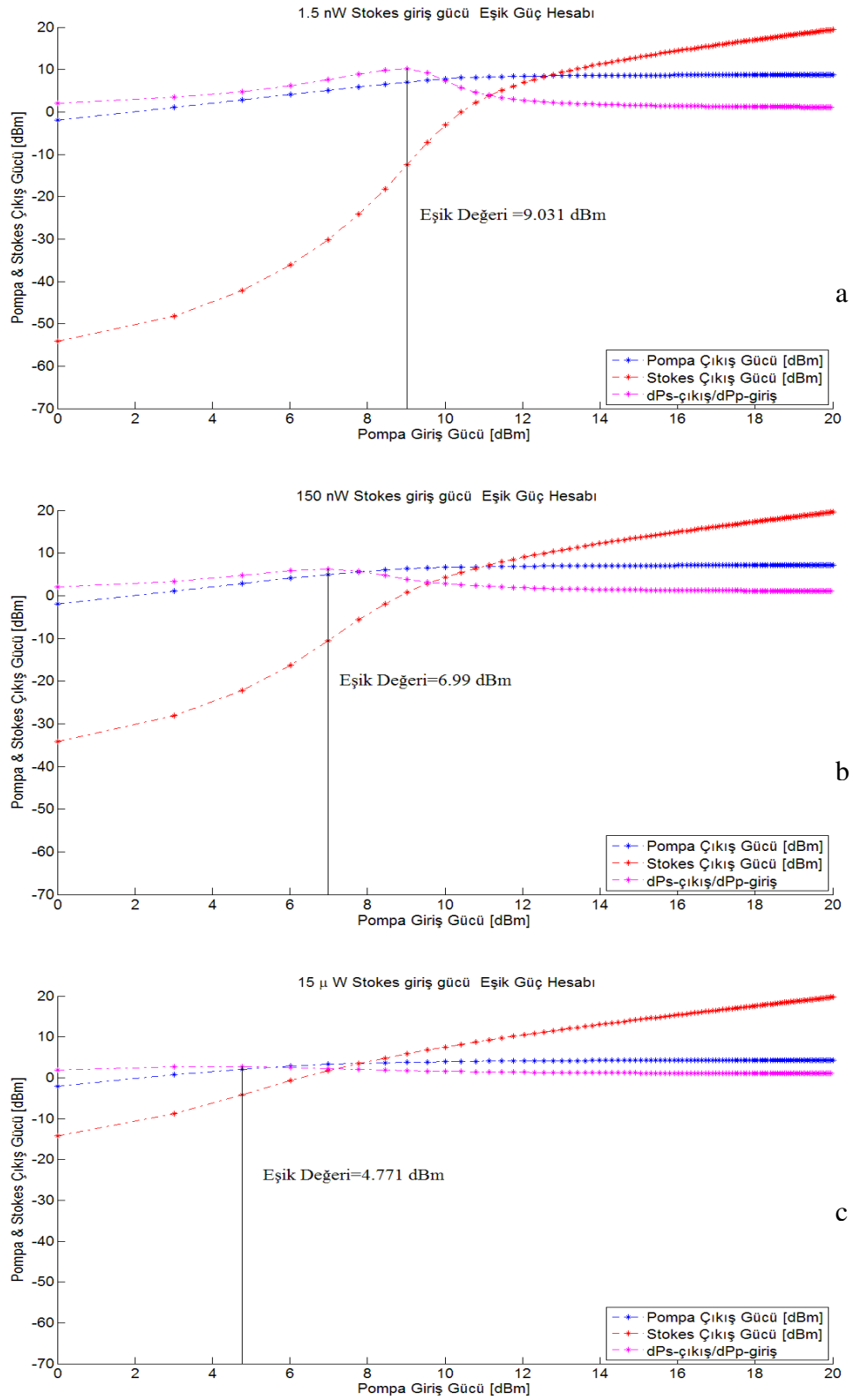


Şekil 4.3. $P_S(L)=1\mu W$ için (4.2) eşitliği ile hesaplanan Brillouin fiber kuvvetlendirici eşik gücü

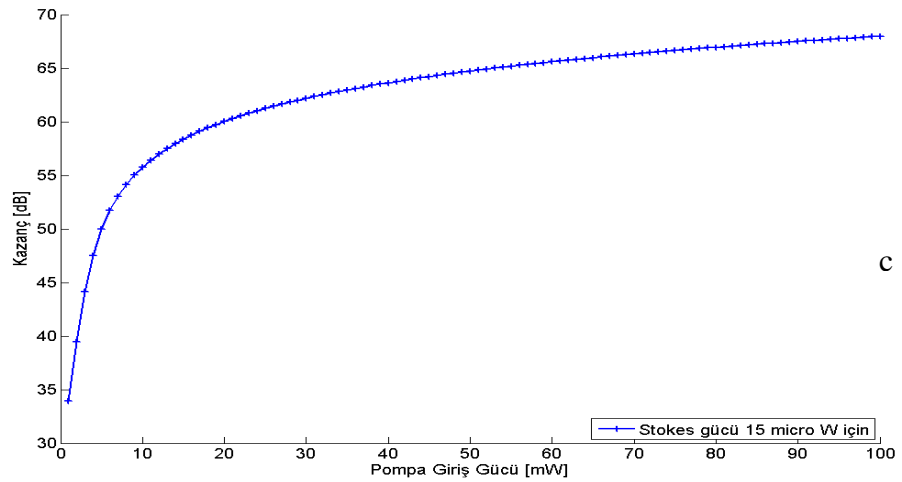
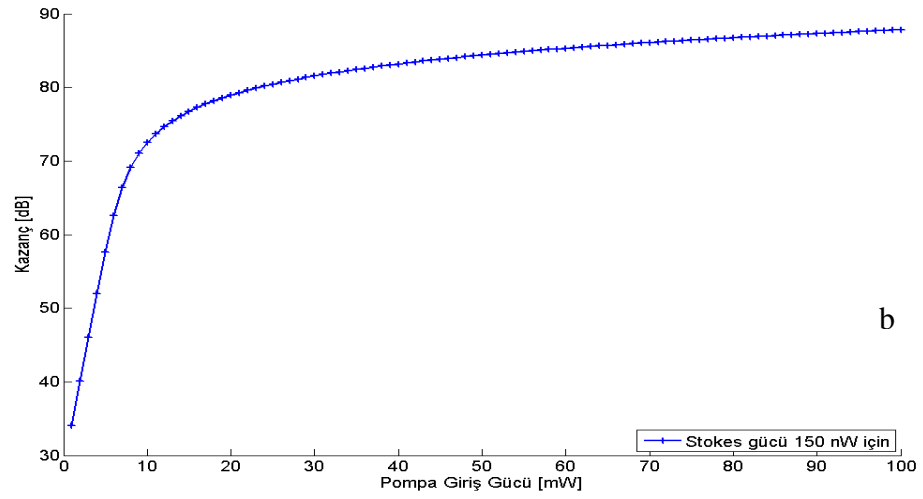
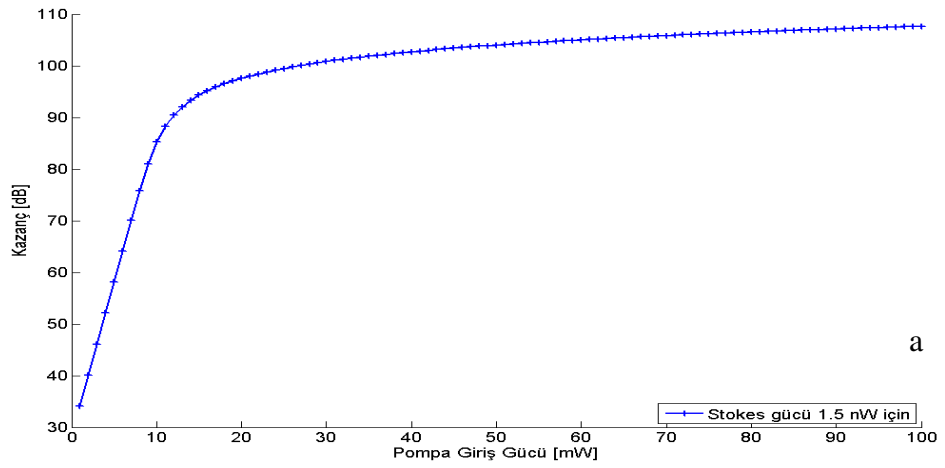


Şekil 4.4. $P_S(L)=10\mu W$ için (4.2) eşitliği ile hesaplanan Brillouin fiber kuvvetlendirici eşik gücü

Şekil 4.3 ve şekil 4.4 incelendiğinde $(dP_{S(\text{çıkış})} / dP_{P(\text{giriş})})$ eğrisi uyarılmış Brillouin saçılımı nedeniyle önce artmakta, tepe noktasından sonra fiber kaybı ve pompada tükenmenin başlamasıyla azalmaktadır. Şekil 4.5’de Brillouin fiber kuvvetlendiricide, Stokes (sinyal) gücü ile pompa eşik arasındaki ilişki ve Şekil 4.6’da sinyal gücü ile sinyal kazancı arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Brillouin fiber kuvvetlendiricisinde, Stokes (sinyal) gücü ile pompa eşik değeri arasındaki ilişki. (a),(b),(c) şekillerinde sinyal güçleri ($P_S(L)$) sırasıyla 1.5 nW, 150 nW, 15 μ W'tır. Eşik değeri ise sırasıyla 9.031 dBm, 6.99 dBm, 4.771 dBm'dir.



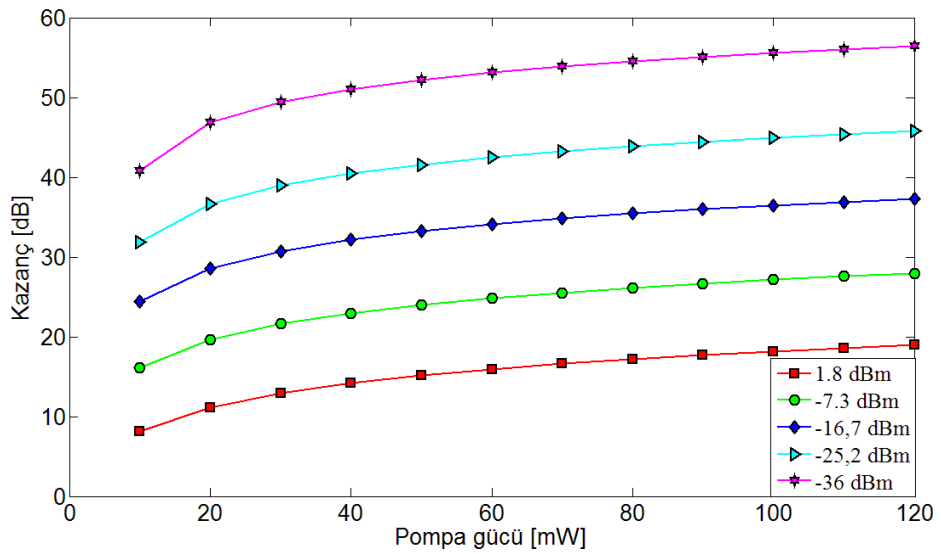
Şekil 4.6. Brillouin fiber kuvvetlendiricisinde, Stokes (sinyal) gücü ve Stokes kazancı arasındaki ilişki. (a),(b),(c) şekillerinde sinyal güçleri ($P_S(L)$) sırasıyla 1.5 nW, 150 nW, 15 μ W'dir. Bu sinyal güçleri için kazanç değerleri ise sırasıyla 105 dB, 85 dB, 70 dB'dir.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de benzetimle elde edilen eşik değerleri ile Fabian ve arkadaşları (2008) tarafından elde edilen deneysel veriler Çizelge 4.1’de karşılaştırılmıştır. Sınır değer çözücü tarafından hesaplanan ordinat ve apsis değerleri kullanılarak hesaplanan eşik değeri ile deneysel eşik değerlerinin birbirleriyle tam olarak örtüştüğü görülmektedir.

Çizelge 4.1. Brillouin fiber kuvvetlendiricisinde hesaplanan eşik değerleri ile deneysel değerlerin karşılaştırılması

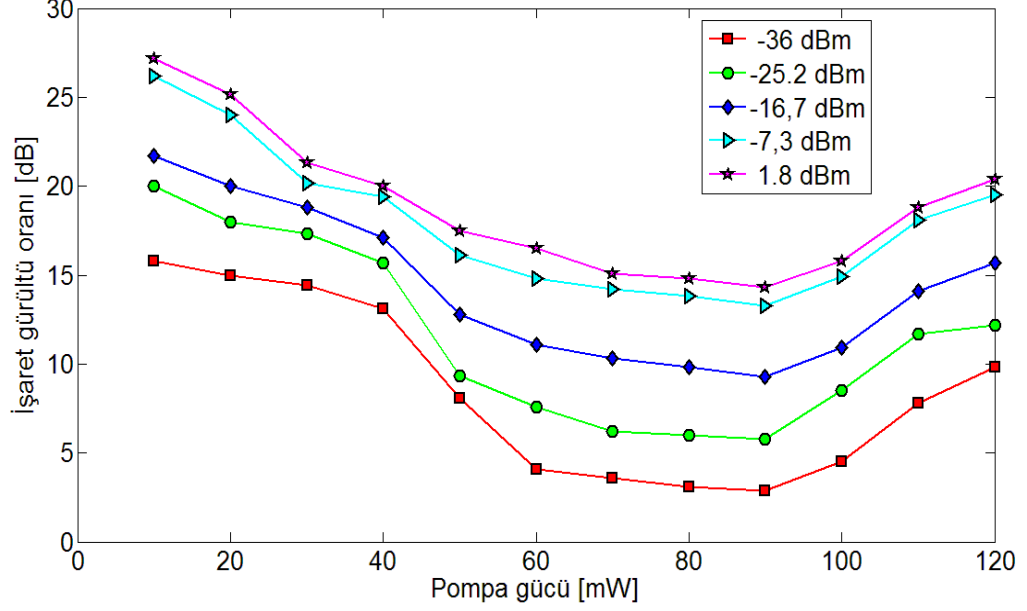
$P_s(L)$ [dBm]	α [dB/km]	L[km]	$P_{deneysel}$ [dBm] eşik gücü	(4.2) eşitliği ile hesaplanan eşik güçleri [dBm]
-30	0.193	10	6.2	6.232
-20	0.193	10	5.0	5.051

Şekil 4.7’de Brillouin fiber kuvvetlendiricisinde, pompa gücüne karşın kazanç değerleri hesaplatılmıştır. Hesaplama kullanılan parametreler Şekil 4.2’de kullanılan parametreler ile aynıdır. Şekilde, eşik güç seviyeleri geçildikten sonra pompanın tükenmeye başlaması nedeniyle kuvvetlendiricinin doyuma girdiği görülmektedir. Ancak, aynı pompa güç değeri için, kuvvetlendirici farklı Stokes güçlerinde doyuma girmektedir. Ayrıca kuvvetlendiricinin, düşük Stokes güçleri için, daha yüksek kazançla doyuma girdiği görülmektedir. Bu durumda yüksek Stokes güçleri, pompayı daha hızlı tüketeceğinden Stokes gücü arttıkça, kuvvetlendiricinin daha düşük pompa gücünde doyuma gireceği açıktır (Xing ve ark. 2008).



Şekil 4.7. Brillouin fiber kuvvetlendiricisinde pompa gücüne bağlı kazanç değerleri

Şekil 4.8’de Brillouin fiber kuvvetlendiricinin işaret gürültü oranı hesaplatılmıştır. Benzetim, gürültünün iki etken nedeniyle oluştuğu düşünülerek yapılmıştır. Bu gürültüler Rayleigh saçılımı ve kendiliğinden Brillouin kuvvetlenmesidir (KBK).



Şekil 4.8. Brillouin fiber kuvvetlendiricisinde pompa gücüne bağlı işaret gürültü oranı

İşaret gürültü oranı, tüm bu gürültüleri göz önüne alınarak (4.3) eşitliği ile hesaplanılabilir (Gokhan ve Yılmaz 2009a).

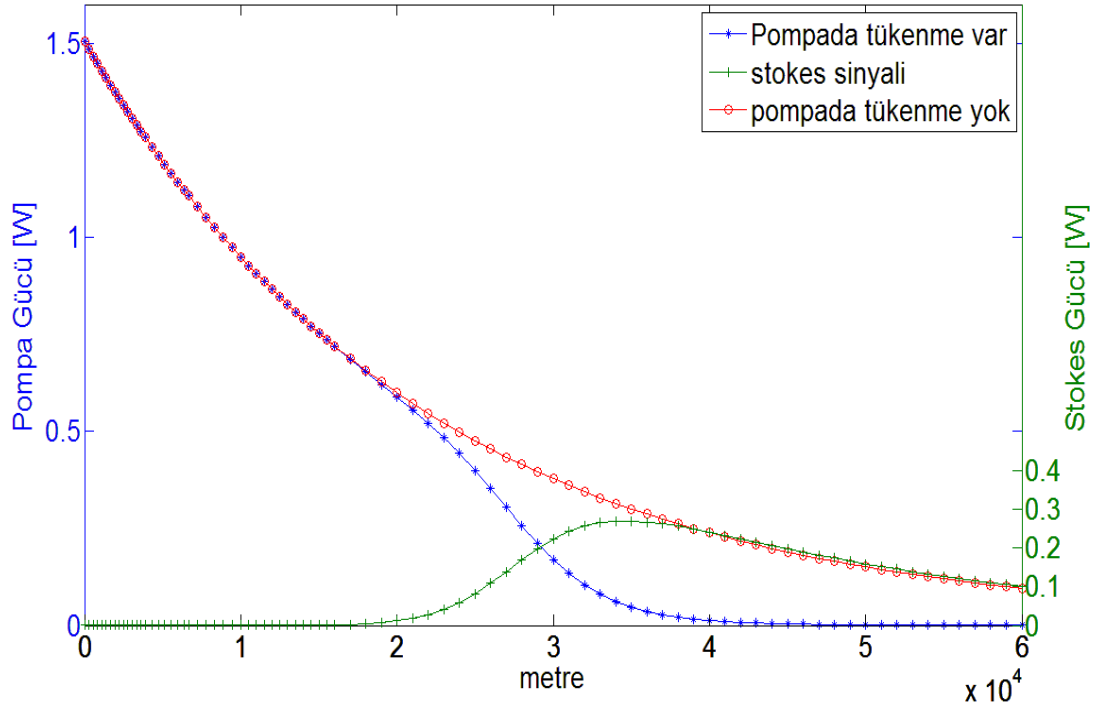
$$SNR = 10 \log \left[\frac{P_{stokes, cikis}}{P_{KBK} + P_{Rayleigh}} \right] \quad (4.3)$$

Burada, $P_{stokes, cikis}$, P_{KBK} , $P_{Rayleigh}$ sırasıyla, Stokes çıkış gücü, kendiliğinden Brillouin kuvvetlenmesi ve Rayleigh saçılma gücüdür. Kendiliğinden Brillouin kuvvetlenmesi, sinyal giriş gücü olmasa bile fiberde kendiliğinden oluşmaktadır (Boyd 2003). Pompa gücü, Brillouin eşik seviyesinin üzerine çıkarsa, kendiliğinden Brillouin kuvvetlenmesinin oluşumu hızlanmaktadır. Kendiliğinden Brillouin kuvvetlenmesi pompanın tükenmesini hızlandırarak kazancın daha hızlı doyuma ulaşmasına neden olmakta ve kuvvetlendiricinin gürültü gücünü artırmaktadır. Kendiliğinden Brillouin kuvvetlenmesi ortamdaki Stokes foton sayısı ile doğru orantılıdır. Stokes foton sayısı ise ortamdaki akustik fonon sayısına (N_{ph}) bağlıdır. Oda sıcaklığında $N_{ph} \approx k_B T / (h \cdot \nu_B)$ olup k_B , T , h ve ν_B sırası ile Boltzman sabiti, sıcaklık, Planck sabiti ve Brillouin

frekansdır ($v_B \approx 11$ GHz). Kendiliğinden Brillouin kuvvetlenme gücü, $P_{KBS} = (N_{ph} \cdot h \cdot v_s \cdot \Delta v_B)$ olup, v_s Stokes frekansı ve Δv_B ise Brillouin çizgi genişliğidir ($\Delta v_B \approx 32$ MHz). Tipik değerler için P_{KBS} yaklaşık 410 nW'tır. Ancak bu değer, eşik pompa değerinin üzerine çıktığında, hızlı bir şekilde artış göstererek, sinyalin gürültüye oranını azaltmaktadır. Bunun nedeni, gürültü gücünün artması kuvvetlenmeden daha baskındır. Ancak belli bir pompa gücünden sonra kendiliğinden kuvvetlenme miktarı doyuma gireceğinden Stokes kuvvetlenmesi baskın duruma geçmektedir (Gokhan ve Yılmaz 2009a).

4.3. Raman Fiber Kuvvetlendiricilerin MATLAB Sınır Değer Çözücü Fonksiyon ile Nümerik Çözümü

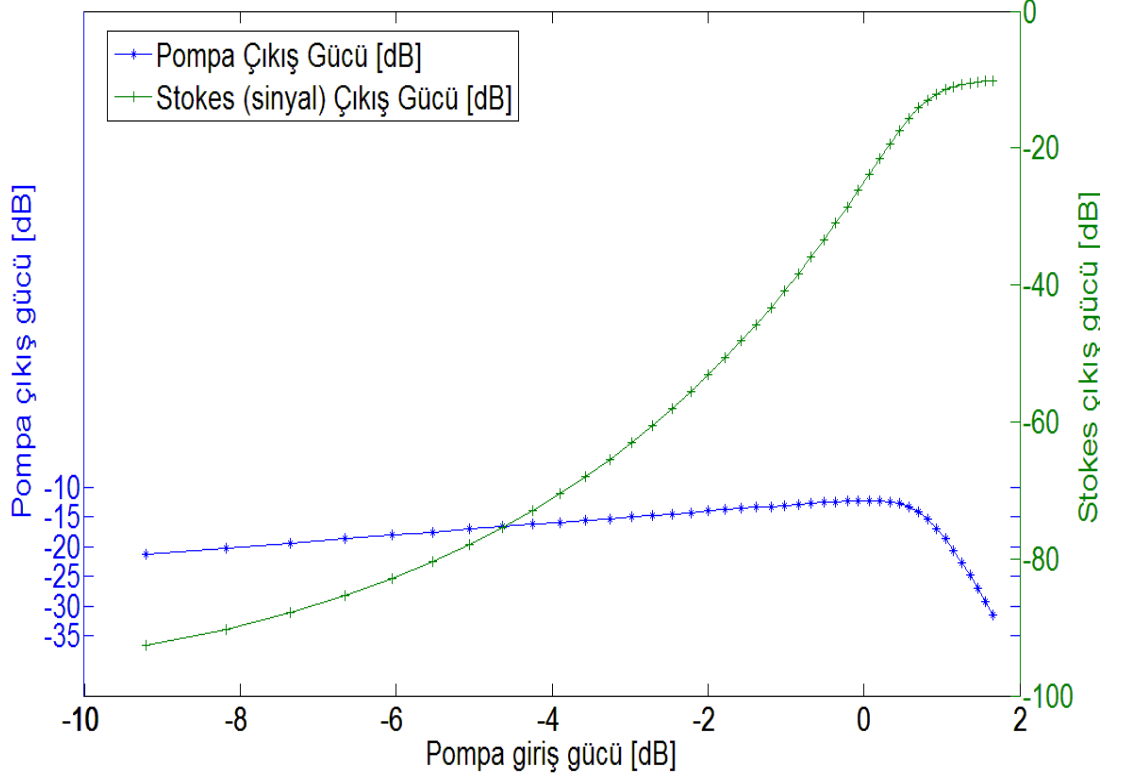
Raman fiber kuvvetlendirici benzetimlerinde kullandığımız ortak parametreler; $P_S(0)=1\text{nW}$, $\alpha_S \approx \alpha_P = 0.2$ dB/km, $g_R = 7 \times 10^{-14}$ m/W, $A_{eff} = 80 \mu\text{m}^2$, $v_P = 1.55 \mu\text{m}$, $v_S = 1.65 \mu\text{m}$, $L = 60$ km ve $\Gamma = 1$ 'dir. Şekil 4.9'da $P_P(0) = 1.5\text{W}$ için tek pompa ve tek sinyal içeren ileri yönlü Raman fiber kuvvetlendiricisinde pompa ve sinyal gücünün fiber uzunluğu ile değişimi çizilmiştir. Çizimde kullanılan program modülü, bölüm 3.4'de anlatılmıştır.



Şekil 4.9. İleri yönlü tek pompa ve tek sinyal içeren Raman fiber kuvvetlendiricisinde pompa ve sinyal gücünün fiber uzunluğu ile değişimi. $P_P(0) = 1.5\text{W}$, $P_S(0) = 1\text{nW}$

Brillouin fiber kuvvetlendiriciler için kullanan eşik güç seviyesi tanımı, Raman fiber kuvvetlendiriciler için de kullanılmıştır. Bu nedenle Brillouin kuvvetlendiriciler için bükülme noktasının bulunması için yapılan nümerik çözüm yöntemi Raman fiber kuvvetlendiriciler için de uygulanmıştır. Şekil 4.10'da, $P_S(0)=1\text{nW}$ için ileri yönlü pompalamalı Raman fiber kuvvetlendiricide çıkış güçlerinin, giriş pompa gücüne göre değişimi çizdirilmiştir.

Pompa giriş gücüne karşı stokes çıkış gücünün [dB] cinsinden değişimi (Stokes giriş gücü 1nW)



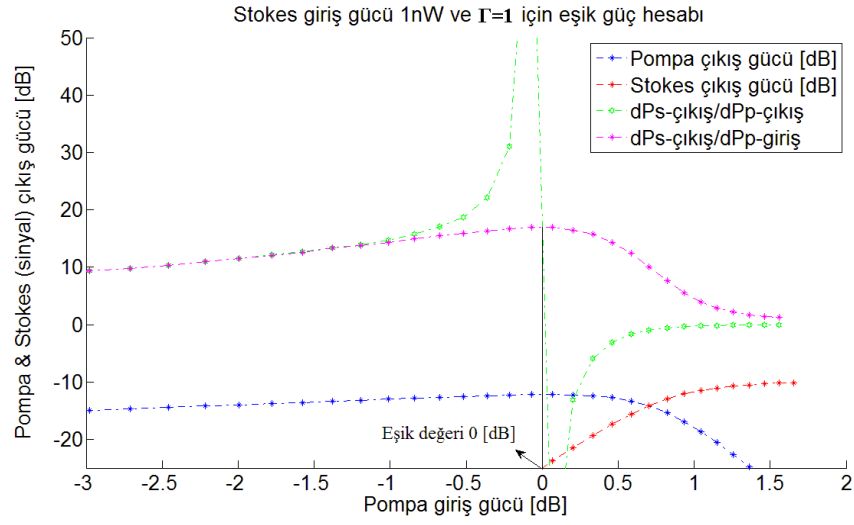
Şekil 4.10. İleri yönlü pompalamalı Raman fiber kuvvetlendiricisinde pompa ve Stokes çıkış gücünün, giriş pompa gücü ile değişimi. $P_S(0)=1\text{nW}$.

İleri yönlü pompalamalı Raman fiber kuvvetlendiricide, eşik noktasının belirlenmesi için sınır değer çözücü fonksiyonunun hesapladığı apsis ve ordinat değerleri kullanılarak $(dP_{S(\text{çıkış})} / dP_{P(\text{giriş})})$ ve $(dP_{S(\text{çıkış})} / dP_{P(\text{çıkış})})$ eğrileri çizdirilmiştir. Bu eğrilerin (4.4) ve (4.5) eşitlikleri ile tepe noktaları bulunarak eşik değeri hesaplatılmıştır (Gokhan ve Yılmaz 2009a). Enteresane şekilde bu eğrilerin tepe noktalarının aynı noktada oluştuğu belirlenmiştir.

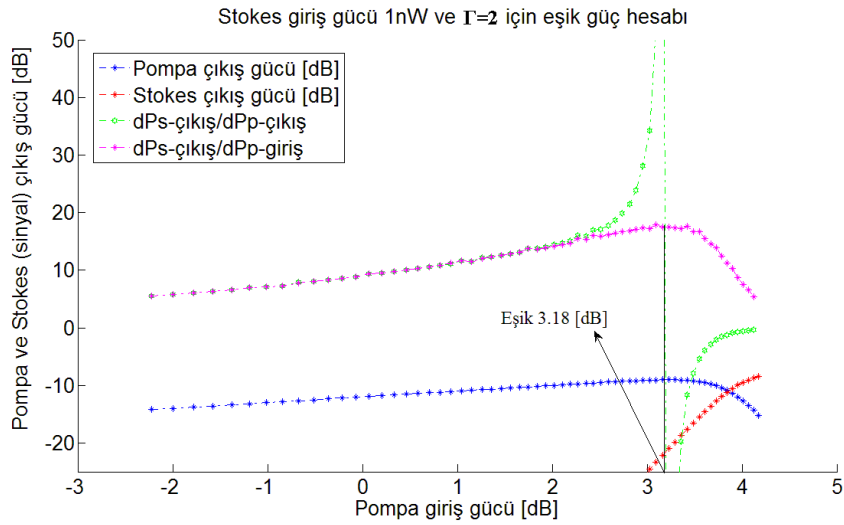
$$\text{RFK eşik seviyesi} = \max \left(\frac{dP_{\text{Stokes-çıkış}}}{dP_{\text{pompa-giriş}}} \right) \approx \max \left(\frac{P_{\text{Stokes-çıkış-(n+1)}} - P_{\text{Stokes-çıkış-(n)}}}{P_{\text{pompa-giriş-(n+1)}} - P_{\text{pompa-giriş-(n)}}} \right) \quad (4.4)$$

$$\text{RFK eşik seviyesi} = \max \left(\frac{dP_{\text{Stokes-çikis}}}{dP_{\text{pump-çikis}}} \right) \approx \max \left(\frac{P_{\text{Stokes-çikis-(n+1)}} - P_{\text{Stokes-çikis-(n)}}}{P_{\text{pump-çikis-(n+1)}} - P_{\text{pump-çikis-(n)}}} \right) \quad (4.5)$$

İleri yönlü Raman fiber kuvvetlendiricinin eşik gücünü hesaplamak için pompa giriş gücünü 0.12 mW ile 1.5 W arasında 0.032 mW'lık adım aralıkları ile değiştirerek, $z=L$ noktasında Stokes ve pompa çıkış gücü hesaplatılmıştır. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de (4.4) ve (4.5) eşitlikleri kullanılarak Raman fiber kuvvetlendiricinin eşik gücü bulunmuştur. $P_s(0)=1$ nW olmak üzere, Şekil 4.11'de $\Gamma=1$, Şekil 4.12'de ise $\Gamma=2$ alınmıştır.



Şekil 4.11. $P_s(0)=1$ nW ve $\Gamma=1$ için ileri yönlü pompalamalı Raman fiber kuvvetlendiricinin eşik gücü



Şekil 4.12. $P_s(0)=1$ nW ve $\Gamma=2$ için ileri yönlü pompalamalı Raman fiber kuvvetlendiricinin eşik gücü

Literatürde, uyarılmış Raman saçılmasının eşik noktası, Stokes çıkış gücünün kuvvetlenerek pompa çıkış gücüne eşit olmasına neden olan giriş pompa gücü olarak tanımlanmaktadır (McIntosh 2000). Literatüre göre eşik seviyesinin hesaplanmasında pompa tüketilmesi göz önüne alınmamıştır. Şekil 4.13 dikkatli incelendiğinde, (4.4) ve (4.5) eşitlikleri ile hesaplanan eşik güç değeri literatürde kabul edilen eşik güç değerinden (çıkış güçlerinin eşit oldukları nokta) daha küçüktür. Bunun nedeni, literatürdeki eşik değeri hesaplamasında pompa tüketilmesi göz önüne alınmamıştır. Ayrıca literatürdeki eşik değeri, pompa ve Stokes dalgaboyları için etkin alanın eşit olduğu, Raman kazancının yaklaşık olarak Lorentz dağıldığı ve Stokes sinyalinin optik fiberde kendiliğinden oluştuğu (dışarıdan herhangi bir Stokes sinyalinin fibere gönderilmediği) kabul edilerek hesaplanmıştır.

Tükenmenin hangi pompa gücünde başladığını belirlemek için, Şekil 4.9'da incelenen kuvvetlendiricide pompa giriş gücüne bağlı olarak fiberin tüm noktalarında pompa gücünün tüketilme miktarı hesaplatılmıştır. Pompa tüketilme miktarının hesaplanması için tükenmenin olmadığı pompa gücü değişimi ile tükenmenin olduğu pompa gücü değişimi arasındaki farkın hesaplanması yeterlidir. Şekil 4.14'de, pompa gücünün tüketilmesi, giriş pompa gücüne bağlı olarak çizdirilmiştir. Buna göre bölüm 3.4'teki diferansiyel denklem kodlaması göz önüne alınarak tüketilme miktarı (4.6) eşitliğine göre hesaplanabilmektedir.

$$Pompa\ Tüketilmesi\ (P_0) = y_3(P_0) - y_1(P_0) \quad (4.6)$$

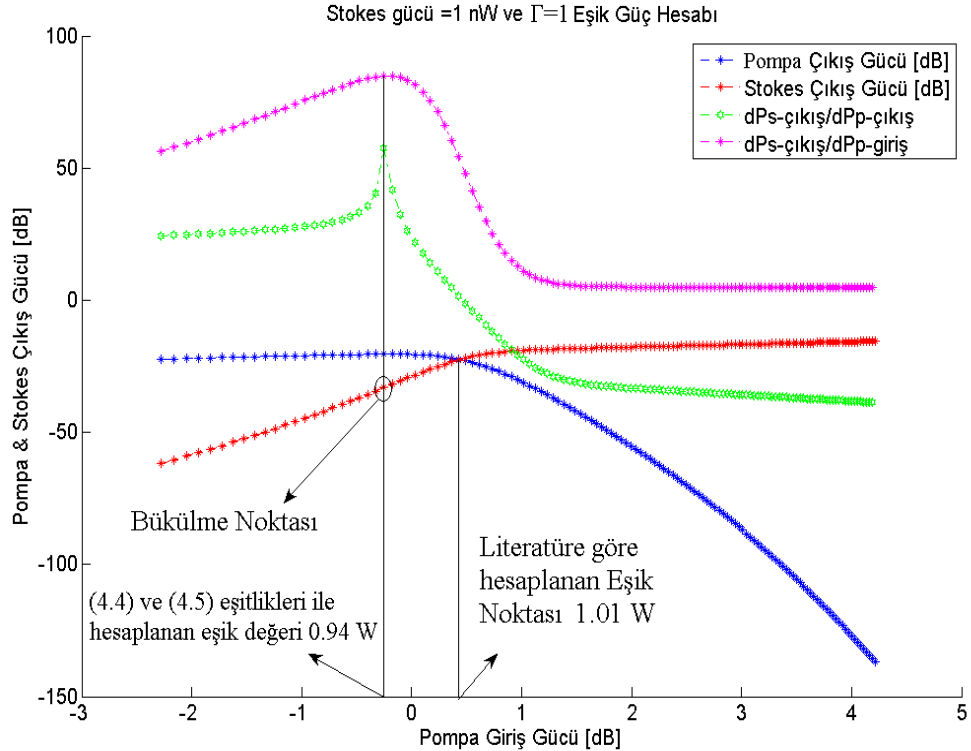
(4.4) ve (4.5) eşitlikleri ile hesaplanan eşik gücü 0.94 W, literatüre göre hesaplanan eşik gücü ise 1.01 W'tır. Şekil 4.14'de pompa tüketilmesinin başladığı pompa giriş gücü açıkça görülmektedir. Pompa giriş gücü 0.94 W civarında iken pompa tüketilmeye henüz yeni başlamıştır. 1.01 W giriş pompa gücünde ise, fiber genelinde pompa gücünü önemli ölçüde tüketmektedir. Optik fiberin altmışıncı kilometre dolaylarında ise tükenme en yüksek seviyesine çıkmaktadır. Bu durumda (4.4) ve (4.5) eşitlikleri ile bulunan eşik noktası, pompanın tükenmeye başladığı güç seviyesini ve dolayısı ile eşik pompa gücünü göstermektedir.

Eğer fiberin diğer ucundan kuvvetlendiriciye dışarıdan Stokes yollanmaz ise bu durumda Raman kuvvetlendirici, Raman jeneratörüne dönüşmektedir. Brillouin fiber kuvvetlendirici ile Brillouin jeneratörü arasında fark, Raman kuvvetlendirici ile Raman jeneratörü arasındaki farka benzemektedir. Raman jeneratöründe de Stokes, fiberin iç dinamikleri nedeniyle kendiliğinden oluşmaktadır (spontane). (4.6) eşitliğinde, Raman fiber jeneratörünün eşik seviyesine ait eşitlik verilmiştir.

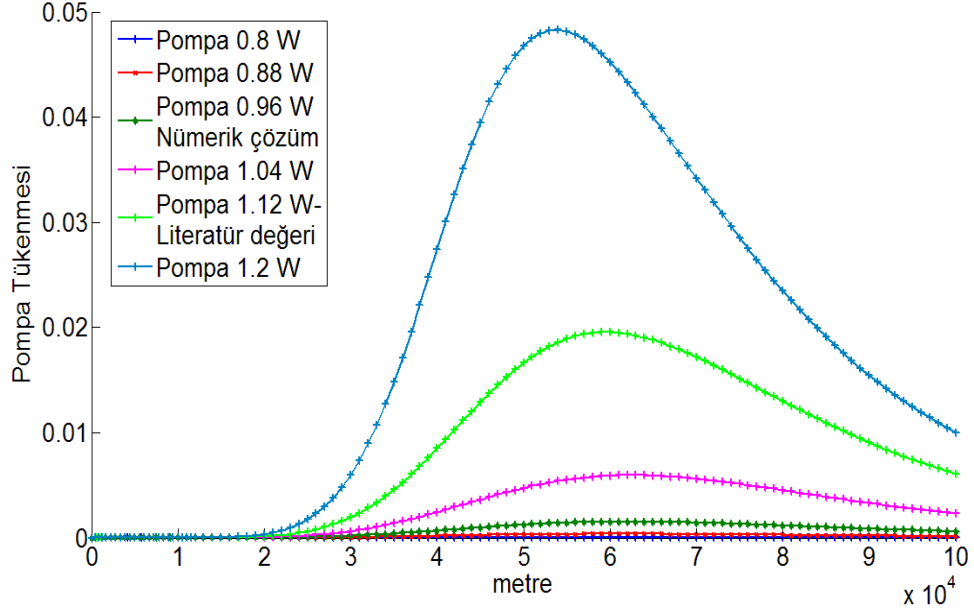
$$P_{RFJ} \approx 16 \cdot \Gamma \cdot A_{eff} / (g_R \cdot L_{eff}) \quad (4.6)$$

Burada g_R Raman kazanç katsayısı, Γ polarizasyon faktörü (Smith 1972), A_{eff} ve L_{eff} sırasıyla etkin fiber alanı ve etkin fiber uzunluğudur ($L_{eff} = (1 - e^{-\alpha L}) / \alpha$).

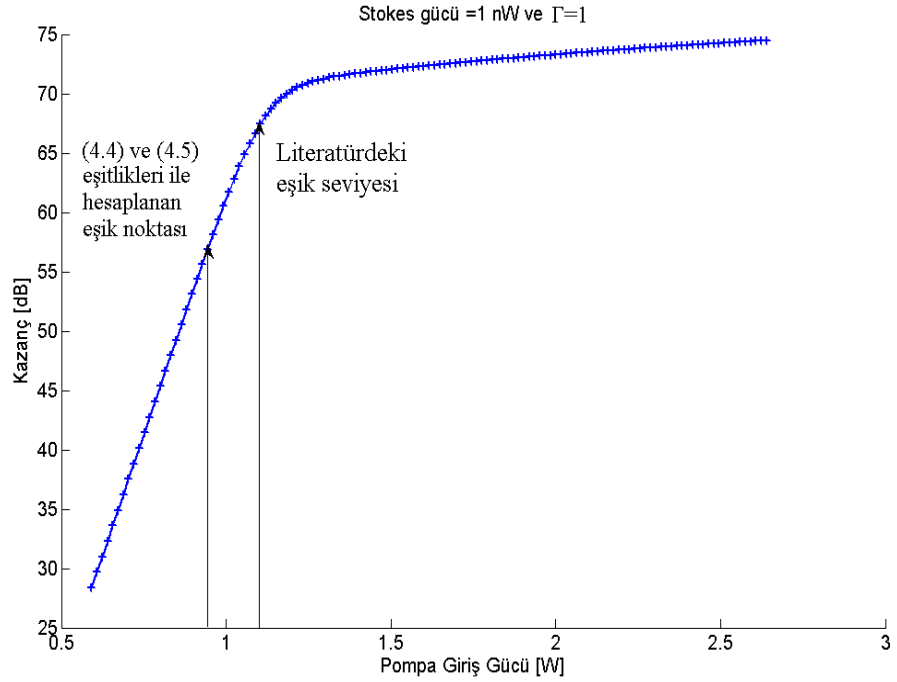
Şekil 4.15'te ise sinyal kazancı üzerinde literatürdeki eşik seviyesi ile, (4.4) ve (4.5) eşitlikleri ile hesaplanan eşik seviyesi arasındaki fark gösterilmiştir.



Şekil 4.13. İleri yönde pompalı Raman kuvvetlendiricisinde, literatürde kabul edilen eşik seviyesi ile (4.4) ve (4.5) eşitlikleri ile hesaplanan eşik gücü arasındaki farkın gösterimi. Stokes gücü $P_S(0)=1\text{nW}$, $\alpha_S \approx \alpha_P=0.2$ dB/km, $g_R=7 \times 10^{-14}$ m/W, $A_{eff}=80 \mu\text{m}^2$, $v_P=1.55 \mu\text{m}$, $v_S=1.65 \mu\text{m}$, $L=100$ km, $\Gamma=1$.



Şekil 4.14. İleri yönde pompalamalı Raman kuvvetlendiricisinde, pompa tükenmesinin giriş pompa gücüne göre değişimi. Stokes gücü $P_S(0)=1\text{nW}$, $\alpha_S \approx \alpha_P = 0.2$ dB/km, $g_R = 7 \times 10^{-14}$ m/W, $A_{eff} = 80 \mu\text{m}^2$, $\nu_P = 1.55 \mu\text{m}$, $\nu_S = 1.65 \mu\text{m}$, $L = 100$ km, $\Gamma = 1$.



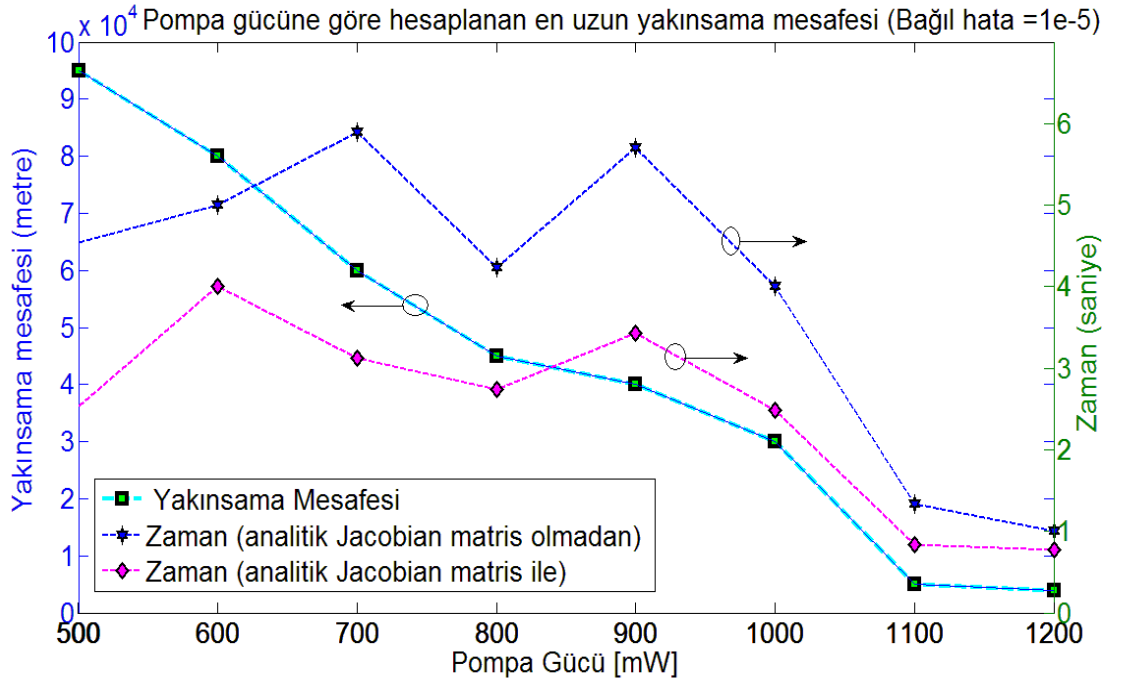
Şekil 4.15. İleri yönde pompalamalı Raman kuvvetlendiricisinde, pompa tükenmesinin başladığı kazanç seviyesi ile literatürde kabul edilen pompa eşik seviyesindeki kazanç değeri. Stokes gücü $P_S(0)=1\text{nW}$, $\alpha_S \approx \alpha_P = 0.2$ dB/km, $g_R = 7 \times 10^{-14}$ m/W, $A_{eff} = 80 \mu\text{m}^2$, $\nu_P = 1.55 \mu\text{m}$, $\nu_S = 1.65 \mu\text{m}$, $L = 100$ km, $\Gamma = 1$.

4.4. Raman Fiber Kuvvetlendiricilerin Nümerik Çözümü için Yakınsama Aralığı

Bölüm 3.5’de önerilen yöntemde, sınır değerlerini, *tahmini ilk değer olarak atayarak*, yakınsama mesafesinin hesaplandığını ve bu mesafe hesaplandıktan sonra, fiber mesafesinin veya sinyal güçlerinin süreklilik yöntemi ile istenildiği kadar artırılabilceği belirtilmişti. Çözüme yakınsayan en büyük fiber uzunluğuna ise yakınsama mesafesi adı verilmiştir. Yapılan benzetimlerde yakınsama mesafesinin genel olarak tahmini başlangıç değerlerine ve sınır güç değerlerine (pompa güçleri) bağlı olduğu belirlenmiştir. Yakınsama uzunluğu, sınır pompa ve sinyal değerlerinin azalması ile artmaktadır. Buna göre, yakınsama mesafesi ile sınır pompa ve sinyal gücü arasında zıtlık vardır. Eğer pompaların tahmini ilk değerleri, sınır pompa güç seviyesinden daha düşük seçilirse, yakınsama mesafesinin arttığı belirlenmiştir. Bunun nedeni, Raman kuvvetlendiricilerinde, pompa güçlerinin süreç başlar başlamaz azalması, sinyal güç değerlerinin ise artmasıdır. Bu durumda tahmini başlangıç pompa güç değerleri sınır pompa güç değerlerinden daha küçük olmalıdır. Yapılan benzetimler sonucunda, tahmini başlangıç pompa değerleri, sınır pompa değerlerinin yaklaşık olarak %80’i kadar seçildiğinde en yüksek yakınsama mesafesi elde edilmiştir. Yakınsama mesafesi ne kadar büyük olursa, süreklilik yöntemi ile istenen fiber uzunluğuna o kadar hızlı erişilebileceği açıktır. Yakınsama mesafesi ile sınır pompa güç değerleri ve hesap süresinin değişimini incelemek için benzetim yapılmıştır. Benzetimde kullanılan değerler; $\Gamma = 2$, $A_{\text{eff}} = 80 \mu\text{m}^2$, $\nu_{\text{reff}} = 196.4 \text{ THz}$ (1511 nm) ve $L=80 \text{ km}$ ’dir. Fiber kayıpları, sinyaller için $\alpha=0.2 \text{ dB/km}$ ve pompalar için 0.35 dB/km ’dir. 188.85 THz’den 192.45 THz’e kadar 200 GHz aralıklı 19 sinyal kanalı mevcuttur. Her bir sinyal kanalının gücü 1 mW’tır. $z=L$ noktasından $z=0$ noktasına sinyaller ile ters yönde hareket eden iki pompanın güçleri birbirine eşit ve dalgaboyları sıra ile 1455 ve 1775 nm’dir.

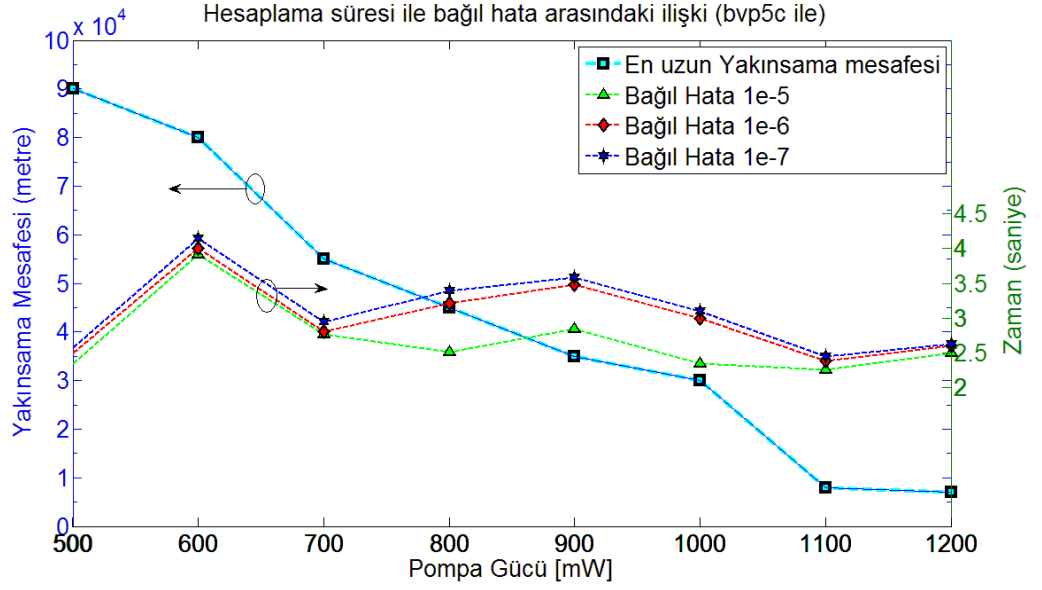
Şekil 4.16’da, yukarıda hesaplama parametreleri verilmiş Raman kuvvetlendiricisinin, yakınsama mesafesinin pompa gücü (iki adet pompa mevcut ve güçleri eşit) ile değişimi incelenmiştir. Ayrıca bu şekilde, benzetim süresinin sınır pompa gücüne bağlı olarak değişimi ile analitik Jacobian matrisinin hesaplama süresini ne ölçüde değiştirdiği incelenmiştir. Bu benzetimde hesaplamalar sınır güç değerlerini tahmini ilk

değer olarak atayarak yapılmıştır. Pompaların 100 mW ile 1200 mW arasındaki her güç değeri için, yakınsama uzunluğu azaltılarak çözüme ulaşılabilmektedir. Düşük pompa güçleri ile daha yüksek yakınsama uzunluğunun elde edilebileceği şekilden açıkça görülmektedir. Analitik Jacobian matris olmaksızın, 1000 mW'a kadar olan pompa güçlerinde, benzetim süresi ortalama 4.9 saniye civarındadır. 1000 mW için, yakınsama uzunluğu ve dolayısı ile benzetim süresi azalmaktadır. Bunun nedeni 1000 mW'a kadar olan pompa güçleri için problemin çözümünde ortalama 30 düğüm noktası kullanılırken, 1000 mW'tan sonra 10 düğüm noktasının kullanılmasıdır. Analitik Jacobian matrisi programa hazır olarak verildiğinde, benzetim süresi ortalama 3 saniye civarındadır. Bu durumda ortalama benzetim süresinde 1.6 kat azalma olmuştur. Hesaplama bağıl hata 10^{-5} olarak ayarlanmıştır. Bu durumda, düğüm noktalarında hesaplama hatası bu değerden büyük olamaz. Program çıktısı, bir düğümdeki en büyük hesaplama hatasını 9×10^{-6} olarak bildirmiştir.



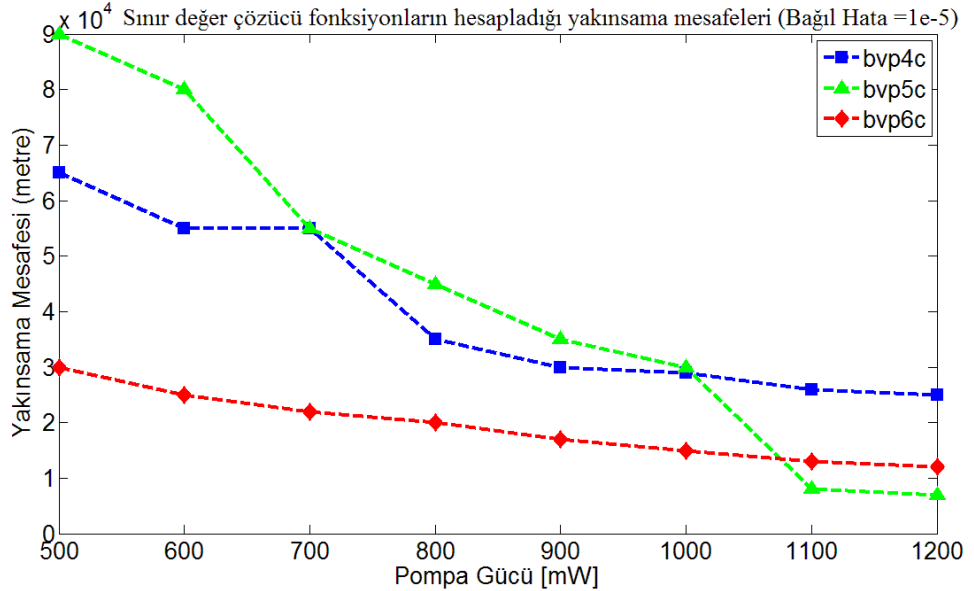
Şekil 4.16. Tahmini ilk değerlerin, sınır değerlerine eşit olduğu durumda, yakınsama uzunluğu ve benzetim süresinin pompa gücüne olan bağılılığı (*bvp5c* ile)

Şekil 4.17'de kullanıcı tarafından izin verilen hata değerinin hesaplama süresini ne ölçüde değiştirdiği gösterilmektedir. Eğer çözümde keskin değişme yok ise toleransın hesaplama süresini önemli ölçüde değiştirmedeği söylenebilir. Ancak beklenildiği gibi, tolerans değeri azaldıkça hesaplama süresi artmaktadır.

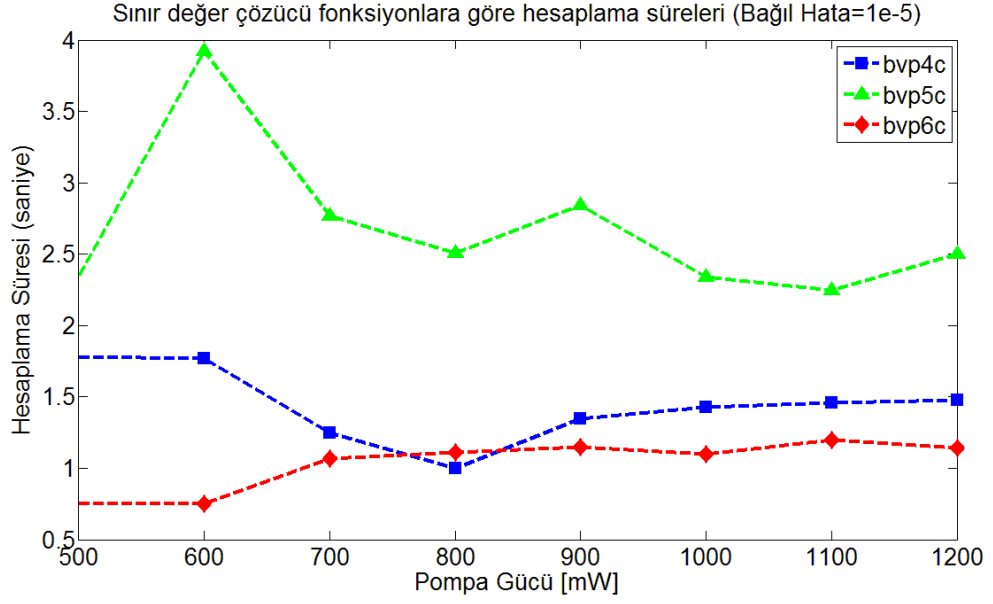


Şekil 4.17. Tahmini ilk değerlerin sınır değerlerine eşit olduğu durumda, benzetim süresinin bağıl hata değeri ile değişimi (*bvp5c* ve analitik Jacobian matrisi ile)

Şekil 4.18’de yakınsama mesafesinin pompa gücü ile değişimi, Şekil 4.19’da ise benzetim süresinin pompa gücü ile değişimi farklı MATLAB sınır değer çözücü fonksiyonlar kullanılarak incelenmiştir. Her iki şekil dikkatle incelendiğinde, yakınsama mesafesi ile benzetim süresinin arttığı görülmektedir.



Şekil 4.18. Tahmini ilk değerlerin sınır değerlerine eşit olduğu durumda, yakınsama mesafesinin farklı sınır değer çözücü fonksiyonlar ile değişimi (Hata toleransı 10^{-5} ve analitik Jacobian matrisi ile)

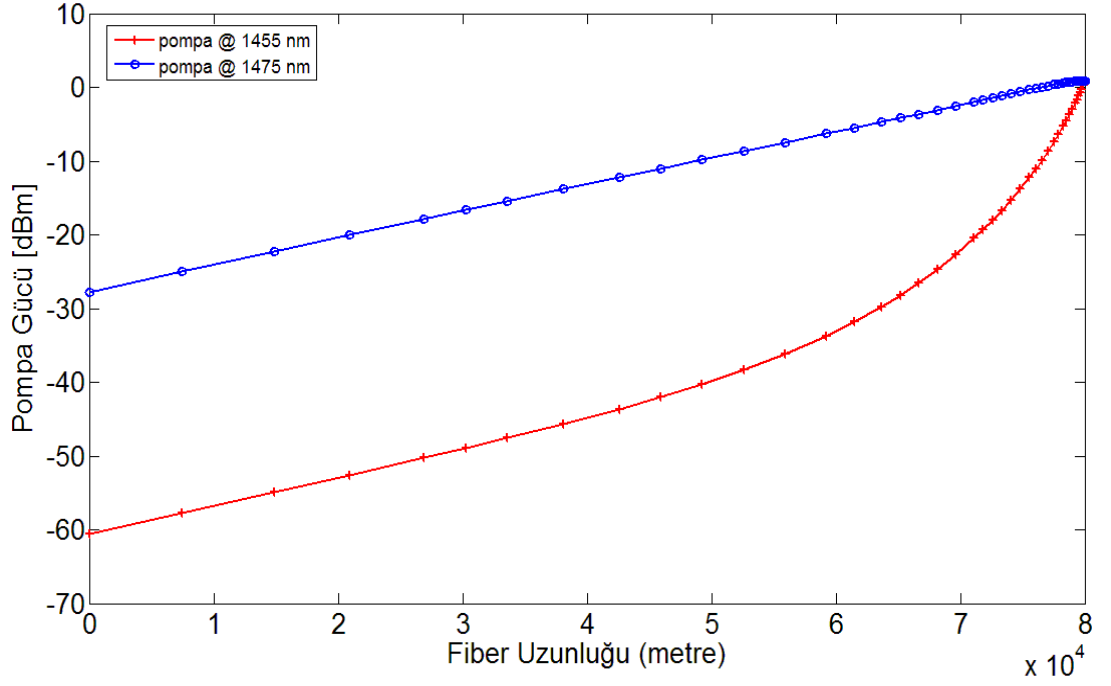


Şekil 4.19. Tahmini ilk değerlerin sınır değerlerine eşit olduğu durumda, hesaplama süresinin farklı sınır değer çözücü fonksiyon ile değişimi (Hata toleransı 10^{-5} ve analitik Jacobian matrisi ile)

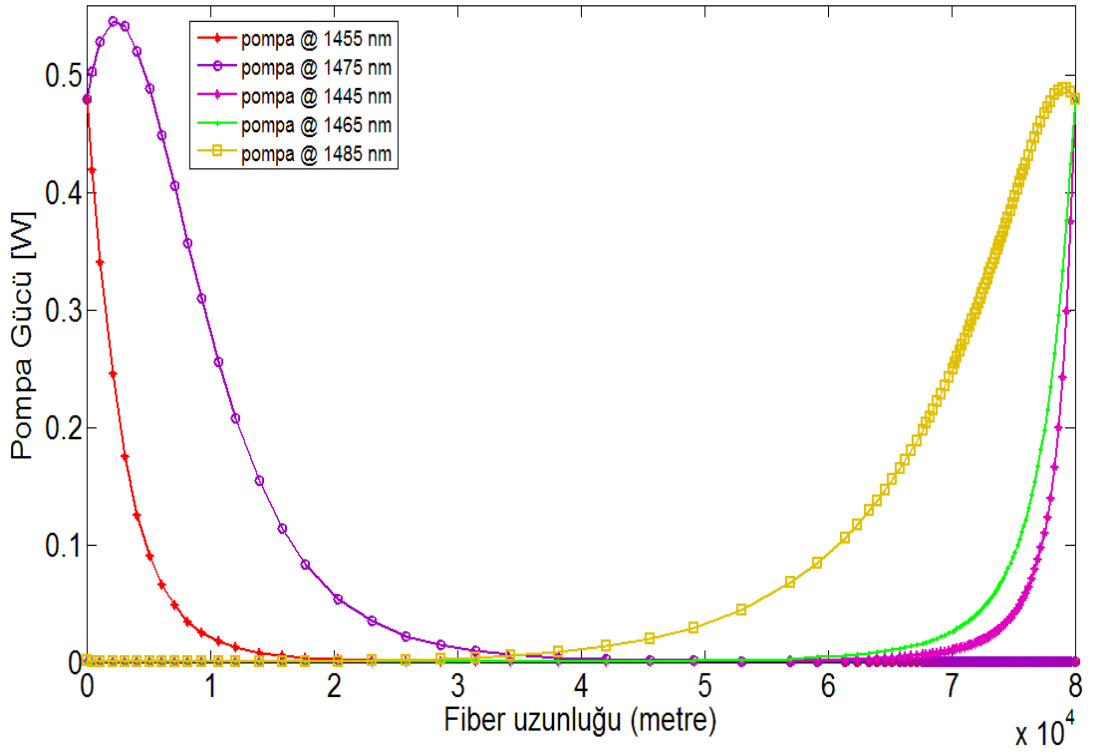
4.5. Birden Çok Pompa ve Sinyal İçeren Raman Fiber Kuvvetlendiricilerin Nümerik Çözümleri

Bu bölümde, MATLAB sınır değer çözücü fonksiyonları ile iki adet benzetim yapılmıştır. Bu benzetimlerde sinyaller $z=0$ noktasından $z=L$ noktasına doğru hareket ederken, pompa dalgaları $z=L$ noktasından $z=0$ noktasına doğru hareket etmektedir. İlk benzetimde kullanılan değerler; $\Gamma = 2$, $A_{\text{eff}} = 80 \mu\text{m}^2$, $\nu_{\text{reff}} = 196.4 \text{ THz}$ (1511 nm) ve $L=80 \text{ km}$ 'dir. Fiber kayıpları, sinyaller için $\alpha=0.2 \text{ dB/km}$ ve pompalar için 0.35 dB/km 'dir. 188.85 THz'den 192.45 THz'e kadar 200 GHz aralıklı 19 sinyal kanalı mevcuttur. Her bir sinyal kanalının gücü 1 mW'tır. Sinyallere göre ters yönde hareket eden iki pompanın güçleri birbirine eşit ve 1200 mW'tır (toplam güç 2400 mW) ve dalgalı boyları sıra ile 1455 ve 1775 nm'dir. Şekil 4.20'de $z=L$ noktasından $z=0$ noktasına (sinyal ile ters yönde) hareket eden pompaların güç değerlerinin dB cinsinden değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.21'de iki tanesi $z=0$ noktasından $z=L$ noktasına doğru (ileri yönde) ve üç tanesi $z=L$ noktasından $z=0$ noktasına doğru (geri yönde) hareket eden pompa dalgalarının fiber boyunca güç değişimleri incelenmiştir. Bu yapılanmada tüm pompaların gücü eşit ve 480 mW olup dalgalı boyları sıra ile 1455, 1475, 1445, 1465 ve 1485 nm'dir. Şekil 4.22'de ise, Şekil 4.21'deki pompaların güç değerlerinin dB

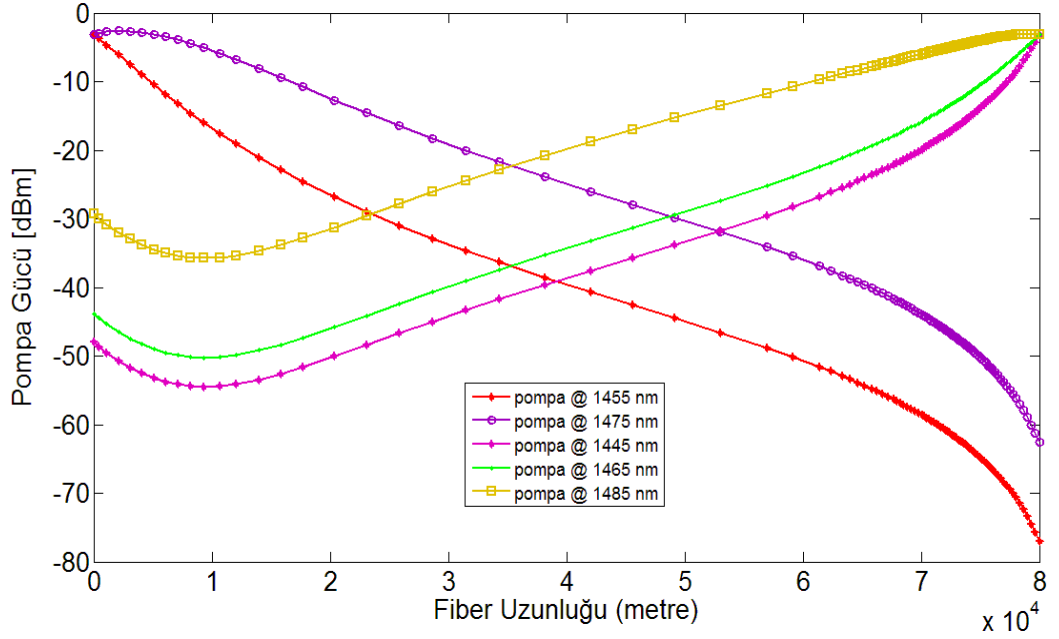
cinsinden değişimi gösterilmiştir. şekil 4.23'te ise, şekil 4.20'deki kuvvetlendiriciye ait 19 adet sinyalin fiber boyunca kuvvetlendirilmesi gösterilmiştir.



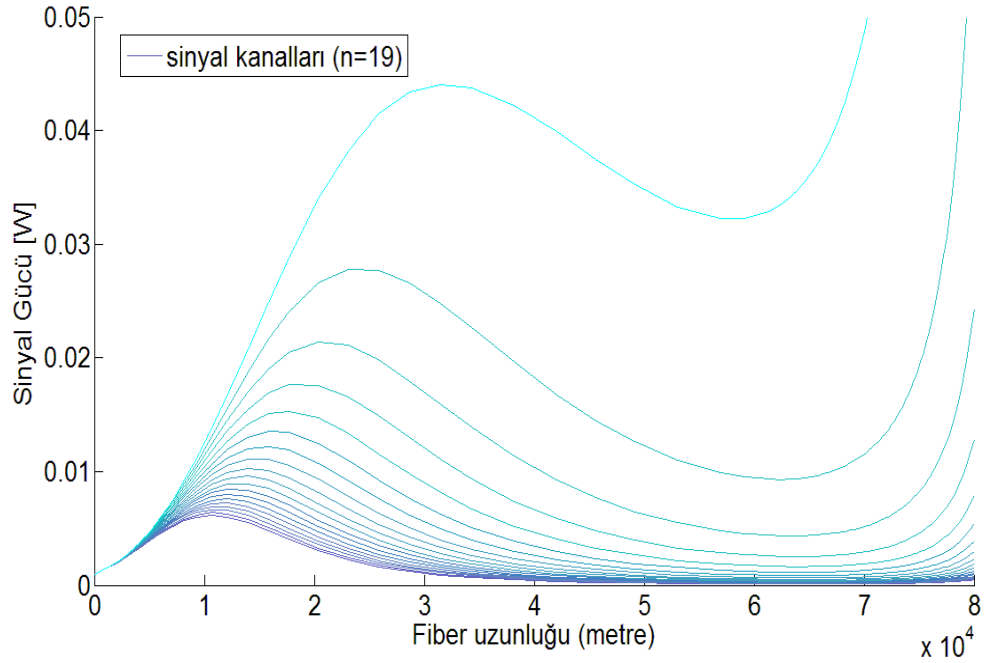
şekil 4.20. İki adet geri yönlü pompalama düzeneğinde pompa gclerinin fiber boyunca *dBm* cinsinden değişimi



şekil 4.21. İki adet ileri yönlü ve c adet geri yönlü pompalama düzeneğinde pompa gclerinin fiber boyunca değişimi



Şekil 4.22. Şekil 4.21'deki pompalama düzeneğinde pompa güçlerinin fiber boyunca dBm cinsinden değişimi



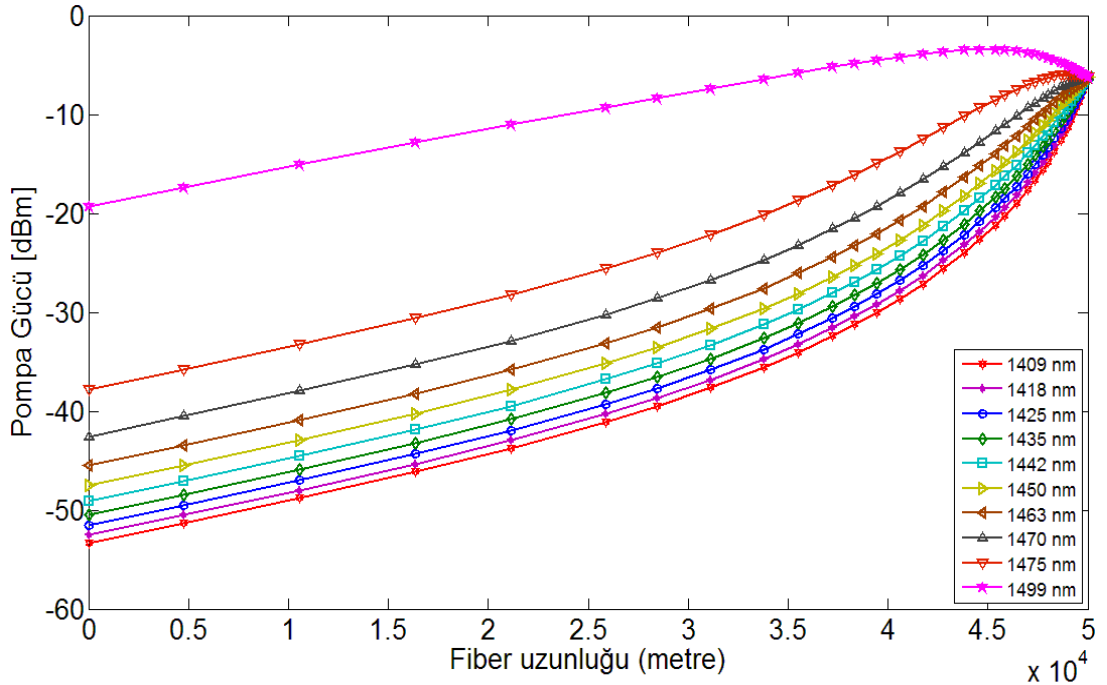
Şekil 4.23. Şekil 4.20'deki kuvvetlendiriciye ait 19 adet sinyalin fiber boyunca kuvvetlendirilmesi

Önerilen yöntemin test edilmesi için pompa ve sinyal sayısını artırıp ikinci benzetim yapılmıştır. Bu benzetimde 189.4 THz ile 197.4 THz arasında 64 sinyal kanalı kullanılmış olup, her bir sinyalin gücü 0.5 mW'tır. $A_{\text{eff}} = 80 \mu\text{m}^2$, $\Gamma = 2$ ve $\nu_{\text{reff}} = 196.4$ THz'dir (1511 nm). Fiber kaybı sinyaller için $\alpha = 0.2$ dB/km ve pompalar için 0.35

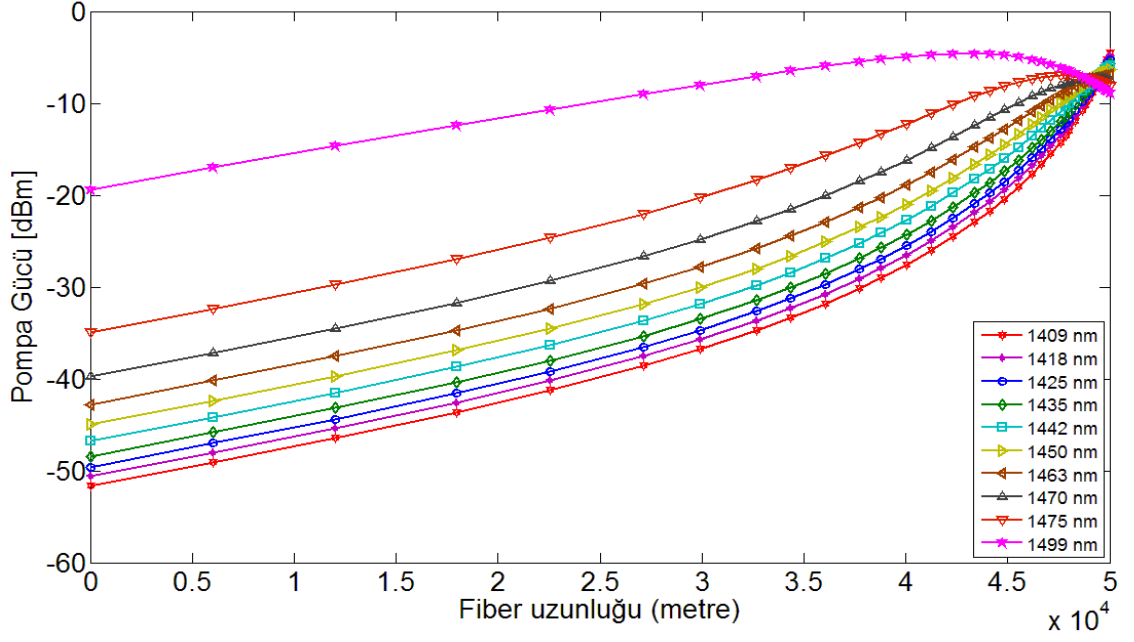
dB/km'dir. Pompa dalgaboyları sıra ile 1409, 1418, 1425, 1435, 1442, 1450, 1463, 1470, 1475 ve 1499 nm'dir. Şekil 4.24'te giriş güçleri eşit olan 10 adet pompa dalgasının $z=L$ noktasından $z=0$ noktasına doğru hareketi esnasında dBm cinsinden güç değişimi gösterilmiştir (giriş güçleri eşit ve 240 mW). Şekil 4.25'te, giriş güçleri 130 ile 350 mW arasında değişen 10 adet pompa dalgasının $z=L$ noktasından $z=0$ noktasına doğru hareketi esnasında dBm cinsinden güç değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te kullanılan fiber dalgaboyları ile pompa giriş ve çıkış güçleri Çizelge 4.2'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.2. Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te kullanılan pompaların giriş ve çıkış güçleri

Şekil 4.24 (Toplam pompa giriş gücü 2400 mW)		Şekil 4.25 (Toplam pompa giriş gücü 2400 mW)	
$P_p(z=0)$ (mW)	$P_p(z=L)$ (mW)	$P_p(z=0)$ (mW)	$P_p(z=L)$ (mW)
4.61×10^{-3}	240 (1409 nm)	6.86×10^{-3}	350 (1409 nm)
5.56×10^{-3}	240 (1418 nm)	8.73×10^{-3}	330 (1418 nm)
6.97×10^{-3}	240 (1425 nm)	1.10×10^{-2}	295 (1425 nm)
8.95×10^{-3}	240 (1435 nm)	1.44×10^{-2}	270 (1435 nm)
1.22×10^{-2}	240 (1442 nm)	2.11×10^{-2}	255 (1442 nm)
1.78×10^{-2}	240 (1450 nm)	3.20×10^{-2}	230 (1450 nm)
2.83×10^{-2}	240 (1463 nm)	5.27×10^{-2}	205 (1463 nm)
5.54×10^{-2}	240 (1470 nm)	10.60×10^{-2}	180 (1470 nm)
16.3×10^{-2}	240 (1475 nm)	31.64×10^{-2}	155 (1475 nm)
11.8	240 (1499 nm)	11.58	130 (1499 nm)

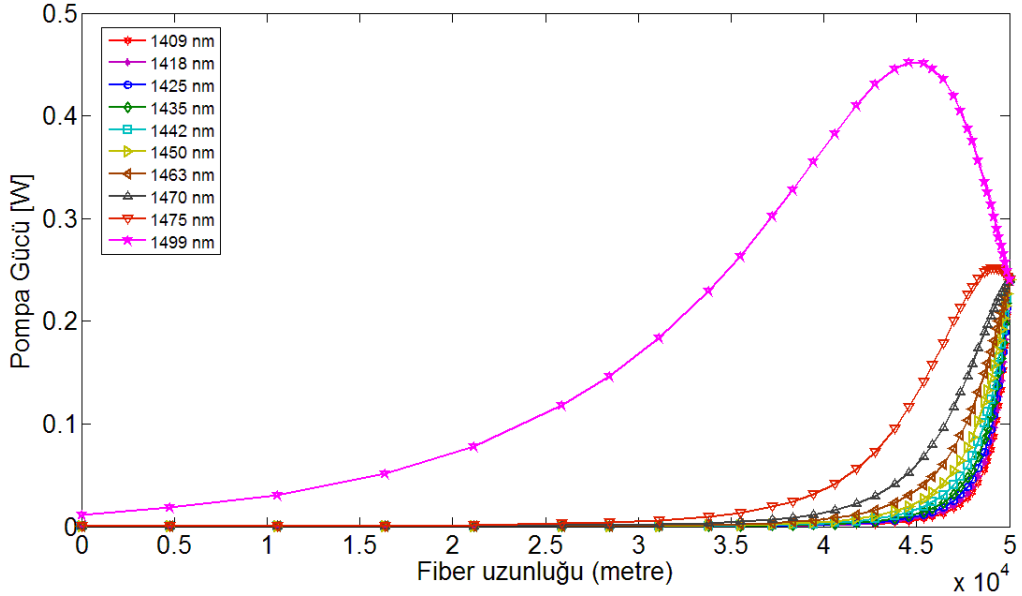


Şekil 4.24. Giriş güçleri eşit 10 adet geri yönlü pompalama düzeneğinde pompa güçlerinin fiber boyunca dBm cinsinden değişimi



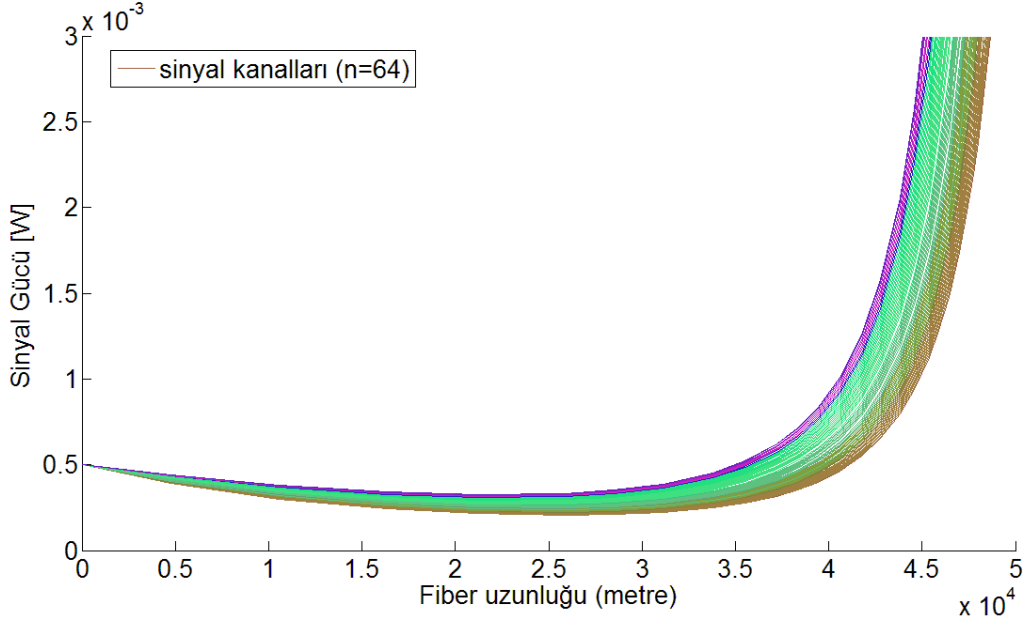
Şekil 4.25. Giriş güçleri 130 ile 350 mW arasında değişen 10 adet geri yönlü pompalama düzeneğinde pompa güçlerinin fiber boyunca dBm cinsinden değişimi

Şekil 4.26'da, Şekil 4.24'teki kuvvetlendirici düzeneği için pompa güçlerinin Watt cinsinden değişimi gösterilmiştir.



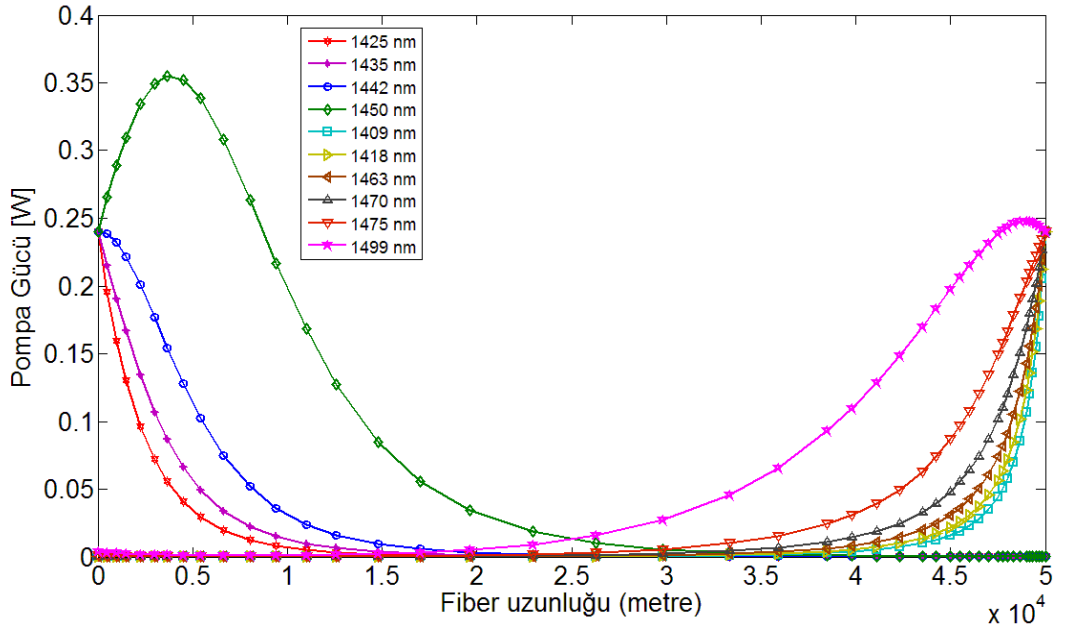
Şekil 4.26. Şekil 4.24'teki kuvvetlendirici düzeneğinde pompa güçlerinin fiber boyunca Watt cinsinden değişimi

Şekil 4.27'de, Şekil 4.24'teki kuvvetlendirici düzeneğinde sinyallerin $z=0$ noktasından $z=L$ noktasına hareketi esnasındaki kuvvetlenmesi gösterilmiştir.

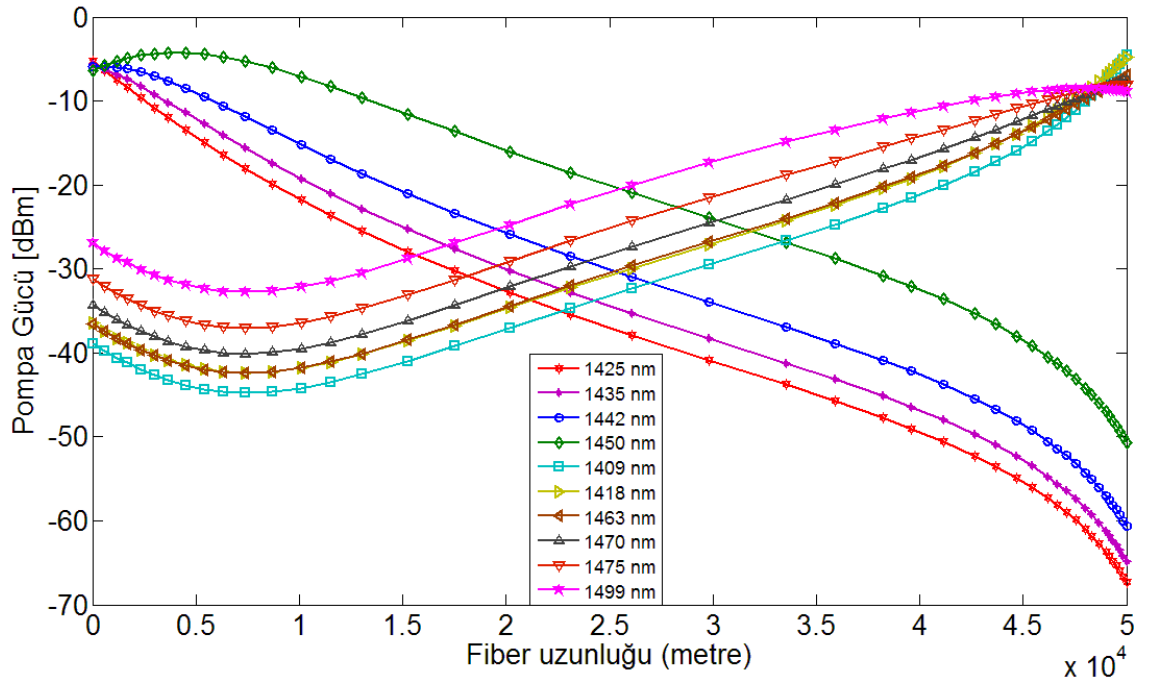


Şekil 4.27. Şekil 4.24'teki kuvvetlendirici düzeneği için 64 adet sinyalin $z=0$ noktasından $z=L$ noktasına hareketi esnasındaki kuvvetlenmesi

Şekil 4.28'de gösterilen iki yönlü pompalama düzeneğinde, dört adet ileri yönlü ve altı adet geri yönde hareket eden pompa dalgalarının fiber boyunca güçlerinin değişimi gösterilmiştir. Bu yapılandırmada tüm pompa güçleri 240 mW olup, dalga boyları sırası ile 1425, 1435, 1442, 1450, 1409, 1418, 1463, 1470, 1475 ve 1499 nm'dir. Şekil 4.29'da, Şekil 4.28'deki düzeneğe ait sinyallerin güç değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.28. Giriş güçleri eşit dört adet ileri yönlü ve altı adet geri yönlü pompalama düzeneğinde pompa güçlerinin fiber boyunca değişimi



Şekil 4.31. Giriş güçleri 130 ile 350 mW arasında değişen dört adet ileri ve altı adet geri yönlü pompalama düzeneğinde pompa güçlerinin fiber boyunca *dBm* cinsinden değişimi

Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'de kullanılan pompa dalgaboyları ve giriş / çıkış güçleri Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'de kullanılan pompa dalgaboylarına ait giriş ve çıkış güçleri

Şekil 4.30 (İleri yönde ilerleyen dört ve geri yönde ilerleyen altı pompa) Toplam giriş gücü 2400 mW		Şekil 4.31 (İleri yönde ilerleyen dört ve geri yönde ilerleyen altı pompa) Toplam giriş gücü 2400 mW	
$P_p(z=0)$ (mW)	$P_p(z=L)$ (mW)	$P_p(z=0)$ (mW)	$P_p(z=L)$ (mW)
8.48×10^{-2}	240 (1409 nm)	0.13	350 (1409 nm)
0.12	240 (1418 nm)	0.22	330 (1418 nm)
240 (1425 nm)	2.52×10^{-4}	295 (1425 nm)	1.84×10^{-4}
240 (1435 nm)	4.55×10^{-4}	270 (1435 nm)	3.24×10^{-4}
240 (1442 nm)	1.66×10^{-3}	255 (1442 nm)	8.53×10^{-4}
240 (1450 nm)	1.22×10^{-2}	230 (1450 nm)	8.57×10^{-3}
0.18	240 (1463 nm)	0.20	205 (1463 nm)
0.32	240 (1470 nm)	0.37	180 (1470 nm)
0.76	240 (1475 nm)	0.75	155 (1475 nm)
3.91	240 (1499 nm)	2.0	130 (1499 nm)

5. SONUÇ

Literatürde sıkça söz edilen optik fiberli kuvvetlendiricilerin işaret çözümleri konusunda sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Sınırlı sayıdaki çalışma yapılmasının nedenlerinden birincisi fiber kuvvetlendiricileri ifade eden denklemlerin sürekli olarak güncellenmesi, ikincisi sınır değer problemlerini çözen bilgisayar yazılımlarının ancak son 15 yılda yeterli seviyeye gelmesi, üçüncüsü ise bu paket programlarındaki algoritmaların sürekli olarak güncellenmesinden kaynaklanmaktadır.

Son 10 yılda Brillouin kuvvetlendiricilerin uygulama alanları artmıştır. Aynı zamanda farklı dalgaboylarda pompa lazerlerinin üretilmeleriyle Raman kuvvetlendiriciler de eski önemini kazanmıştır. Bu artan ilgi nedeniyle, literatürde optik fiberli kuvvetlendiricilerin ileri, geri ve her iki yönlü yapılandırılmaları için çözüm üretebilecek bir nümerik yöntem ihtiyacı doğmuştur. Bu tez çalışmasında Raman ve Brillouin fiber kuvvetlendiricilerin işaret çözümlerini ortak bir çatı altında birleştirerek her ikisine de uygulanabilecek kararlı çalışan bir çözüm yöntemi geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen yöntem yardımıyla optik fiberli kuvvetlendiricilerin eşik pompa gücü ve pompa gücündeki tükenme miktarı hesaplatılmıştır.

Hesaplamalarda optik topluluğu tarafından kabul edilen denklem sistemleri göz önüne alınmıştır. Buna göre, Raman kuvvetlendiricilerin genel çözümü için Mandelbaum ve Bolshtyansky (2003) tarafından önerilen denklem sistemleri göz önüne alınmıştır. Ancak benzetimlerde, Raman kuvvetlendirici denklemlerin hızlı çözümü için Perlin ve Winful (2002) tarafından sadeleştirilen denklem takımı kullanılmıştır. Brillouin kuvvetlendiricilerin nümerik çözümü için Ferreira ve arkadaşları (1994) tarafından önerilen denklem takımı dikkate alınmıştır.

Doktora tez kapsamında Raman ve Brillouin kuvvetlendiricileri için etkin çözüm yöntemleri araştırılmıştır. Çözüm için uygun olan kestirim ve sonlu farklar yöntemleri detaylı olarak incelenmiştir. Buna göre, sonlu farklar yöntemlerinin kestirim

yöntemlerine göre sonuca daha kararlı yakınsadığı belirlendiğinden doktora tez çalışmasında çözüm için sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır.

Doktora tezinin bilime katkısı aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Doktora tezi kapsamında Raman ve Brillouin kuvvetlendiricilerinin çözümü için önerilen sonlu farklar yönteminde sonuca kararlı bir şekilde yakınsayan yeni bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde tahmini değer arama sorunu yoktur. Tahmini değer olarak sınır pompa ve sinyal güç değerleri kullanılmaktadır. Bu tahmini değerler kullanılarak bilgisayarın sorunsuz olarak hesaplama yapabildiği en uzun fiber mesafesi belirlenmektedir. Belirlenen bu fiber mesafesine tez kapsamında yakınsama mesafesi adı verilmiştir. Yakınsama mesafesi hesaplandıktan sonra süreklilik yöntemi yardımı ile pompa güçleri veya fiber mesafesi artırılabilir. Yapılan denemelerde tahmini ilk değerler sınır güç değerinin yaklaşık %80'i olduğunda en uzun yakınsama mesafesine ulaşıldığı belirlenmiştir. Bu yöntem bir algoritma ile geliştirilerek çok pompa ve çok sinyalli Raman kuvvetlendiricilerine uygulanmıştır (Gökhan ve Yılmaz 2009b). Keskin şekilde değişim gösteren sınır değer problemlerinin çözümü için geliştirilen süreklilik yöntemi, yaptığımız literatür araştırmasına göre optik fiberli kuvvetlendiricilerin çözümünde ilk defa kullanılmıştır. Ayrıca, yapılan literatür araştırmasına göre, sınır güç değerlerinin tahmini değerler olarak kullanılarak çözüme ulaşılması da diğer bir yeniliktir.
2. Kestirim veya sonlu farklar yöntemleri ile sınır değer problem çözümünde önemli sorunlardan bir tanesi de analitik Jacobian matrisinin temin edilmesidir. Lineer olmayan diferansiyel denklemler için bu matrisin temin edilmesi daha da güçtür. MATLAB sınır değer fonksiyonları analitik Jacobian matrisine gerek duymadan hesaplama yapabilmesine rağmen Jacobian matrisinin analitik olarak programa hazır olarak verilmesi hesaplama süresini önemli ölçüde azaltmaktadır. Doktora tezinde, MATLAB sembolik fonksiyon seti yardımıyla analitik Jacobian matrisi bilgisayara hesaplatılarak Dağınık Raman kuvvetlendirici denklemlerinin çözüm süresi 1.6 kat azaltılmıştır.

3. Yüksek bant genişliği gerektiren Raman kuvvetlendiricileri için pompa ve sinyal sayıları ve pompa güçleri yüksek tutulmalıdır. 10 pompa ve 64 sinyal ile bilinen en yüksek toplam güç 1700 mW'tır (Dastjerdi ve arkadaşları (2008)). Doktora tezinde önerilen yöntem ile 10 pompa ve 64 sinyal kanalı kullanarak 2400 mW toplam pompa gücüne erişilmiştir. Ayrıca bu yöntemle ileri, geri ve her iki yönde pompalamalı Dağınık Raman kuvvetlendiriciler için istenilen pompa gücünde ve istenilen fiber uzunluklarında benzetim yapılabileceği gösterilmiştir (Gökhan ve Yılmaz 2009b).
4. Birden çok pompa ve sinyal içeren Raman kuvvetlendiricileri için önerilen yöntemin tek pompa ve tek sinyal içeren Raman ve Brillouin kuvvetlendiricilerine uygulanabileceği gösterilmiştir. Önerilen çözüm tekniği ile tek sinyal ve pompa içeren Raman ve Brillouin kuvvetlendiricilerin sinyal çözümleri yapılmıştır (Gökhan ve Yılmaz 2009a).
5. Brillouin fiber jeneratörü için geliştirilen eşik güç hesaplama yönteminden yola çıkarak, tek pompa ve tek sinyal içeren Raman ve Brillouin kuvvetlendiricisinin eşik gücünü hesaplama yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem ile hesaplanan fiber kuvvetlendirici eşik değerlerinin deneysel veriler ile tam olarak uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir. Eşik pompa gücünün teorik olarak hesaplanabilmesi kuvvetlendiricilerin yanı sıra fiber algılayıcıların ve fiber lazerlerin tasarımı için kritik öneme sahiptir.
6. Fiber kuvvetlendiricilerde pompa ve sinyal etkileşimi sonucu oluşan pompa tükenmesi miktarının fiber boyunca hesaplanmasına ilişkin yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemle pompa tüketilmesinin başladığı eşik pompa gücü hesaplanmıştır.
7. Tek pompa ve tek sinyal içeren Raman kuvvetlendiricilerin eşik pompa gücü literatürde bildirilen eşik güç değerinden farklıdır. Literatürde bildirilen Raman eşik değeri, pompa tüketilmesi göz önüne alınmadan hesaplanmıştır. Şekil 4.13, 4.14,

4.15'te bu farklılık gösterilmiştir. Eşik noktası pompa tüketilmesinin başladığı nokta olarak kabul edildiğinde, nümerik yöntem bu noktayı tam olarak belirlemektedir. $(dP_{S(\text{çıkış})} / dP_{P(\text{giriş})})$ ve $(dP_{S(\text{çıkış})} / dP_{P(\text{çıkış})})$ eğrilerinin aynı noktada çakışması önerilen yöntemin doğruluğunu kanıtlamaktadır. Raman eşik güç değerinin önerilen yöntem ile hesaplanmasına ilişkin çalışma yapılmış ve literatüre kazandırılmıştır (Gökhan ve Yılmaz 2009a).

KAYNAKLAR

- ACHTENHAGEN, M., T.G. CHANG, B. NYMAN, A. HARDY. 2001. Analysis of a multiple-pump Raman amplifier, *Appl. Phys. Lett.*, 78(10) : 1322-1324.
- AGRAWAL, G. 2001. *Nonlinear Fiber Optics*. Optics and Photonics, New York. p.312-313.
- ASCHER, U. M., R. M. M. MATTHEIJ, R. D. RUSSELL. 1995. *Numerical Solution of Boundary Value Problems for Ordinary Differential Equations*. Philadelphia: SIAM.
- AUYEUNG, J., A. YARIV. 1978. Spontaneous and stimulated Raman scattering in long low loss fibers. *IEEE J. Quantum Electron*, 14: 347-352.
- BAYVEL, P., P.M. RADMORE. 1990. Solutions of the SBS equations in singlemode optical fibers and implications for fiber transmission systems. *Electron Lett.*, 26: 434-5.
- BERNTSON, A., S.POPOV, E. VANIN, G. JACOBSEN, J. KARLSSON. 2001. Polarization dependence and gain tilt of Raman amplifiers for WDM systems. *OFC 2001*, Baltimore, MD, Paper M12-1.
- BOYD, R.W. *Nonlinear Optics*. 2003. Academic Press. San Diego. USA. p. 416
- CANI, S.P.N., M.J. PONTES, M.E.V. SEGATTO, M.T.M.R. GIRALDI, C.A. PROCOPIO, E.C. SOUZA, A.P.LOPEZ-BARBERO. 2007. Broadband Raman amplifier analytical model under experimental validation. *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics conference (IMOC 2007)*. pp.214-218
- CHEN, L, X. BAO. 1998. Analytical and Numerical Solutions for steady state stimulated Brillouin scattering in a single-mode fiber. *Optics Communications*, 152: 65-70.
- CHOI, L. K., P. KIM, J. PARK, N. PARK. 2005. Adiabatic, closedform approach to the highly efficient analysis of a fiber Raman amplifier problem. *Opt. Lett.*, 30(2): 126–128.
- CHRAPLYVY, A. 1984. Optical power limits in multi-channel wavelength-division multiplexed systems due to stimulated Raman scattering. *Electron. Letter*, 20:58-59.
- COTTER, D. 1982. Observation of stimulated Brillouin scattering in low-loss silica fiber at 1.3- μm . *Electron Lett.*, 18: 495-6.
- CULVERHOUSE, D., F. FRAHI, C.N. PANNELL, D.A. JACKSON. 1989. Potential of stimulated Brillouin scattering as sensing mechanism for distributed temperature sensor. *Electron. Lett.*, 25: 913-914.
- DASTJERDI, Z. L., F. KROUSHAVI, M.H. RAHMANI. 2008. An efficient shooting method for fiber amplifiers and Lasers. *Optics & Lasers Tech.*, 40(8): 1041-1046.

DIANOV, E.M., A.A. ABRAMOV, M.M. BUBNOV, A.V. SHIPULIN, A.M. PROKHOROV, S.L. SEMJONOV, A.G. SCHEBUNJAEV, V.F. KHOPIN. 1995. Demonstration of 1.3- μm Raman Fiber Amplifier Gain of 25 dB at a Pumping Power of 300 mW. *Optical Fiber Technology*, 1(3): 236-238.

EMORI, Y, S. NAMIKI. 1999. 100 nm bandwidth flat gain Raman amplifiers pumped and gain-equalized by 12-wavelength-channel WDM high power laser diodes. *OFC/IOOC Technical Digest*. PD 19/1-19/3.

FERREIRA, M.F., J.F. ROCHA, J.L. PINTO. 1994. Analysis of the gain and noise characteristics of fiber Brillouin amplifiers. *Opt Quantum Electron.*, 26: 35-44.

GLADWELL, I. 1987. The NAG kütüphanesi sınır değer kodları. Numerical Analysis Report no. 134, Department of Mathematics, University of Manchester, U.K.

GLOGE D., ALBANESE A., BURRUS C.A., CHINNOCK E.L., COPELAND J.A., DENTAI A.G., LEE T.P., LI T. and OGAWA K., 1980. *Bell System Tech. J.* 59: 1365.

GOKHAN F.S., YILMAZ G. 2009. Numerical solution of Brillouin and Raman fiber amplifiers using bvp6c. *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering (COMPEL)* (yayında).

GOKHAN F.S., YILMAZ G. 2009. Solution of Raman fiber amplifier equations using MATLAB BVP solvers. *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering (COMPEL)* (yayında).

HAN, Q., J. NING, H. ZHANG, Z. CHEN. 2006. Novel Shooting Algorithm for Highly Efficient Analysis of Fiber Raman Amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 24(4): 1946-1952.

HAN, Q., J. NING, Z. CHEN, L. SHANG, G. FAN. 2005. An efficient shooting method for fibre Raman amplifier design. 2005. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 7(8): 386–390.

HANSEN, P. B., L. ESKILDSEN, S. G. GRUBB, A. J. STENTZ, T. A. STRASSER, J. JUDKINS, J. J. DEMARCO, R. PEDRAZZANI, K. J. DIGIOVANNI. 1997. Capacity Upgrades of Transmission Systems by Raman Amplification. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 9 : 262-264

HORIGUCHI, T., T. KURASHIMA, M. TATEDA. 1989. Tensile strain of Brillouin frequency shift in silica optical fibers. *IEEE Photo. Tech. Lett.*, 1: 107-109.

HU, S., H. ZHANG, Y. GUO. 2004. Stiffness Analysis in the numerical solution of Raman amplifier propagation equations. *Optics Express*, 12(8): 1656-1664.

H2KL 2000. The Harwell 2000 Library. www.hsl.rl.ac.uk, Erişim Tarihi 20.11.2009. Konu: Numerical Analysis information.

- ISLAM, M. N. 2002. Raman amplifiers for telecommunications. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 8(3): 548-559.
- KIDORF, H., K.ROTTWITH, M. NISSOV, M.MA, E.RABARIJAONA. 1999. Pump intereactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier. *IEEE Photon. Technol. Letter*, 11(5): 530-532.
- KIERZENKA J., L. F SHAMPINE. 2008. BVP Solver that Controls Residual and Error. *Journal of Numerical Analysis, Industrial and Applied Mathematics (JNAIAM)*, 3(1-2): 27-41.
- KIERZENKA, J., L. F. SHAMPINE. 2001. A BVP solver Based on Residual Control and the MATLAB PSE, *ACM TOMS*, 27(3):299-316
- KUINDERSMA, P., G. CUIJPERS, J. REID, G. HOVEN, S. WALCZYK. 1997. An experimental analysis of the system performance of cascades of 1.3 μm semiconductor optical amplifiers. *European conference on optical communication in Edinbrough, United Kingdom*, pp. 79-82.
- LAMING, R., M. ZERVAS, D. PAYNE. 1992. 54 dB gain quantum-noise limited Erbium-doped fiber amplifier. *European conference on optical communication in Berlin, Germany*, 1: 89-92.
- LIU, X., 2006. Fast methods for solving nonlinearly coupled equations describing fiber amplifiers. *Applied Mathematics and Computation*, 172: 1018-1035.
- LIU, X., B. LEE. 2003. A fast stable method for Raman amplifier propagation equations. *Opt. Express*, 11(18):2163-2176
- LIU, X., H. ZHANG, Y. GUO. 2003. A novel method for Raman amplifier propagation equations. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 15:392-394.
- LIU, X., M. ZHANG. 2004. An effective method for two-point boundary value problems in Raman amplifier propagation equations. *Opt. Commun.*, 235(1-3): 75-82.
- LIU, X., M. ZHANG. 2004. An effective method for two-point boundary value problems in Raman amplifier propagation equations. *Optics Communications*, 235: 75-82.
- MANDELBAUM, I., M.BOLSHTYANSKY. 2003. Raman amplifier model in single-mode optical fiber. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 15: 1704-1706.
- MATTHEIJ, R. M. M. ve STAARINK, G.W. M. 1984. An efficient algorithm for solving general linear two point BVP. *SIAM J. Sci. Stat. Comput.* 5: 745-63.

- MCINTOSH, C.M. 2000. Stimulated Raman Scattering Threshold Enhancement in Silica-Based Optical Fibers via Filtering Techniques. Phd. Thesis, University of Lehigh. p.50-55.
- MING, B., W. J. LEE, N. PARK. 2000. Efficient formulation of Raman amplifier propagation equations with average power analysis. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 12(11): 1486–1488.
- MORITA, I., K. TANAKA, N. EDAGAWA. 2001. Benefit of Raman amplification in ultra-long-distance 40 Gbit/s-based WDM transmission. *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, 2001)*, paper TuF5.
- NIELSEN, T. N., A. J. STENTZ, K. ROTTWITT, D. S. VENGSARKAR, L. HSU, P. B. HANSEN. 2000. 3.28-Tb/s (82x40 Gb/s) transmission over 3x1000 km nonzero-dispersion fiber using dual C- and L-band hybrid Raman/Er-bium-doped inline amplifiers. *OFC Conference Baltimore, MD, Post-deadline paper*: PD-23
- NIELSEN, T. N., A. J. STENTZ, P. B. HANSEN, Z. J. CHEN, D. S. VENGSARKAR, T. A. STRASSER, K. ROTTWITT, J. H. PARK, S. STULZ, S. CABOT, K. S. FEDER, P. S. WESTBROOK, S. G. KOSINSKI. 1999. 1.6 Tb/s (40 X 40 Gb/s) transmission over a 4 X 100 km nonzero-dispersion fiber using hybrid Raman/Erbium-doped inline amplifiers. *Proceedings European Conference on Optical Communication, ECOC'99, Nice, France, post-deadline paper*, pp. 26-27
- NING, J., Q. HAN, Z. CHEN, J. LI, X. LI. 2004. A powerful simple shooting method for designing multi-pumped fibre Raman amplifiers. *Chin. Phys.Lett.*, 21(11): 2184–2187.
- NISSOV, M. 1997. Long-Haul Optical Transmission Using Distributed Raman Amplification. Technical University of Denmark, Dept. of Electromagnetic Systems, Denmark. p.42-45.
- OKAWACHI, Y., M.S. BIGELOW, J.E. SHARPING. 2005. Tunable all-optical delays via Brillouin Slow Light in an Optical Fiber. *Phys. Rev. Lett.*, 94:153902-1-4.
- OLSSON, N.A, J.P. VAN DER ZIEL. 1972. Cancellation of fiber loss by semiconductor laser pumped Brillouin amplification at 1.5 μm . *Appl Phys. Lett.*, 48: 1329-30.
- PERLIN, V., G. WINFUL. 2002. On distributed Raman amplification for ultrabroad-band long-haul WDM systems. *J. Lightwave Tech.*, 20: 409-416.
- PRESS W.H., S.A. TEUKOLSKY, W.T. VETTERLING, B.P. FLANNERY. 1992. *Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, Cambridge, p.373.

- RAMAN, C., K. KRISHNAN. 1928. A new type of secondary radiation. *Nature*, 121: 501.
- RAVET F. 2007. Performance of the Distributed Brillouin Sensor: Benefits and Penalties Due to Pump Depletion. Ph.D. Thesis, University of Ottawa, p.184-186.
- RAVET, F., J. SNOODY, X. BAO, L. CHEN. 2008. Power Thresholds and Pump Depletion in Brillouin Fiber Amplifiers. *The Open Optics Journal*, 2: 1-5.
- RAVET, F., J. SNOODY, X. BAO, L. CHEN. 2008. Power Thresholds and Pump Depletion in Brillouin Fiber Amplifiers. *The Open Optics Journal*, 2: 1-5.
- RAVET, F., L. CHEN, X. BAO, L. ZOU, V.P. KALOSHA. 2006. Theoretical study of the effect of slow light on BOTDA spatial resolution. *Opt Express*, 14(22): 10351-10358.
- REEVES-HALL, P. C., D. A. CHESTNUT, C. J. S. MATOS, J. R. TAYLOR. 2001. Dual wavelength pumped L- and U-band Raman amplifier," *Electron. Lett.* 37: 883-884.
- ROTTWITT, K., A. STENTZ, L. LENG, M. LINES, H. SMITH. 2003. Scaling of the Raman gain coefficient: applications to Germanosilicate fibers, *IEEE J. Lightwave Technol.*, 21: 1652-1662.
- ROTTWITT, K., H. D. KIDORF. 1998. A 92-nm bandwidth Raman amplifier. *Optical Fiber Communications Conference*, San Jose, CA, PD6
- ROTTWITT, K., J. BROMAGE, A. J. STENTZ, L. LENG, M. E. LINES, H. SMITH. 2003. Scaling of the Raman Gain Coefficient: Applications to Germanosilicate Fibers. *J. Lightwave Technol*, 21: 1652.
- SAITOH, T., T. MUKAI. 1987. 1.5 μm GaInAs traveling-wave semiconductor laser amplifier. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, QE-23 (6): 1010-1020.
- SCHNEIDER T., *Nonlinear Optics in Telecommunications*. 2004. Springer –Verlag Berlin Heidelberg. Germany. p. 244
- SHAMPINE L.F., I. GLADWELL, S.THOMPSON. 2003. Solving ODEs with MATLAB. Cambridge University Press, New York. p.159-160.
- SMITH, R.G. 1972. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering. *Appl Optics*, 11: 2489-94.
- SONG, K.Y., M. GONZALEZ-HERRAEZ, L, THEVENAZ. 2005. Observation of pulse delaying and advancement in optical fibers using stimulated Brillouin scattering. *Opt. Express*. 13(1): 9758-9765.

- SRIVASTAVA, A. K., D. L. TZENG, A. J. STENTZ, J. E. JOHNSON, M. L. PEARSALL. 1998. High-speed WDM Transmission in AllWave™ Fiber in Both the 1.4- μm and 1.55- μm Bands. Optical Amplifiers Their Applications, OAA'98. PD2.
- STOER J., R. BULIRSCH. 2002. Introduction to Numerical Analysis. Springer-Verlag, 3rd. ed, New York. p.465-524.
- STOLEN, R. 1979. Nonlinear properties of optical fibers. Academic Press, New York. p.127-133.
- STOLEN, R. 1979. Polarization effects in fiber Raman and Brillouin lasers. IEEE Journal Quantum Electron., QE-15: 1157-1160.
- STOLEN, R. E. IPPEN. 1973. Raman Gain in glass optical waveguides. Appl. Phys. Lett., 22: 276-278.
- STOLEN, R.H., L. LEE, R.K. JAIN. 1984. Development of the stimulated Raman spectrum in single-mode silica fibers. J. Opt. Soc. Amer. B, Opt. Phys, 1(4): 652-657.
- TANEMURA, T., Y. TAKUSHIMA, K. KIKUCHI. 2002. Narrowband optical filter, with a variable transmission spectrum, using stimulated Brillouin scattering in optical fiber. Opt. Lett., 27: 1552-1554.
- TKACH, R.W., A.R. CHRAPLYVY, R.M. DEROSIER. 1989. Performance of a WDM network based on stimulated Brillouin scattering. IEEE Photo Tech Lett, 1: 111-113.
- VAN DEVENTER, O., A.J. BOOT. 1994. Polarization Properties of Stimulated Brillouin scattering in single-mode fibers. J Lighthwave Technol., 12: 585-90.
- WANG, S., C. FAN. 2001. Generalised attenuation coefficients and a novel simulation model for Raman fibre amplifiers. IEE Proc.-Optoelectron, 148:156-159.
- XING, L., L. ZHAN, S. LUO, Y. XIA. 2008. High-Power Low-Noise Fiber Brillouin Amplifier for Tunable Slow-Light Delay Buffer. IEEE Journal of Quantum Electronics, 44 (12): 1133-1138.
- YAMAMOTO, Y. 1980. Characteristics of AlGaAs Fabry-Perot cavity type laser amplifiers. IEEE Journal of Quantum Electronics, QE-16 (10): 1047-1052.
- ZHOU, X., C. LU, P. SHUM, T. H. CHENG. 2001. A simplified model and optimal design of a multiwavelength backward-pumped fibre Raman amplifier. IEEE Photon. Technol. Lett., 13(9): 945-947.

ÖZGEÇMİŞ

Fikri Serdar Gökhan, 1975 yılında Samsun'da doğdu. 1998 yılında Uludağ Üniversitesi Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecesini aldı. 1998-2000 yılları arasında askerlik görevini tamamladı. 2000-2004 yılları arasında Pirelli Kablo ve Sistemleri'nde Araştırma ve Geliştirme Bölümünde Tasarım Mühendisi olarak çalıştı. Bu süre içerisinde 2002 yılında Yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2003 senesinde Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Doktora eğitimine başladı. 2004 yılında 6 ay süre ile Oracle Developer 9i yazılım dilinde veri tabanı yöneticisi olarak çalıştı. 2004-2008 yılları arasında Türkmenistan'ın Mary şehrinde kurulu Entegre Tekstil firmasında Bakım Mühendisi olarak çalıştı. 2008 yılında yurda döndü.

Fikri Serdar Gökhan'ın araştırma konuları optik fiberli kuvvetlendiriciler, optik fiberli algılayıcılar ve optik fiberli iletişim sistemleridir. Kendisinin SCI (Science Citation Index) kapsamındaki dergilerde yayına kabul edilmiş 2 adet makalesi ve 2 uluslararası bildirisi vardır.

TEŐEKKÜR

Doktora süresince hem tezimde hem de tezimin haricinde karşılaştığım sorunlara sabırla çözüm yolları öneren, destek ve yardımını hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Güneş YILMAZ'a, her konuda desteğini aldığım Yrd.Doç.Dr.Sait Eser Karlık'a, en zor zamanlarımda yanımda olan arkadaşım Kimya Mühendisi Zekeriya Şirin'e, yetişmemde emeği bulunan tüm hocalarıma, sabırla her konuda yardımcı olan ve çalışmaya teşvik eden kardeşim Hakan GÖKHAN ve kuzenim Fatma BADEMCİ'ye ve tabii ki otuz beş seneden beri karşılık beklemeyen şefkat ve sevgisiyle daima yanımda olup bugünlere ulaşmamı sağlayan annem Emriye GÖKHAN'a sonsuz şükran ve saygılarımı sunarım.