



**FİBER OPTİK SİSTEMLERDE DOĞRUSAL OLMAYAN RAMAN
SAÇILMASININ İKİLİ ARAMA DENKLEMLİ ADAPTİF YAPAY ARI
KOLONİSİ ALGORİTMASI İLE OPTİMİZASYONU**

Vehbi YOLCU

DOKTORA TEZİ

BİLİŞİM SİSTEMLERİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2023

Vehbi YOLCU tarafından hazırlanan “FİBER OPTİK SİSTEMLERDE DOĞRUSAL OLMAYAN RAMAN SAÇILMASININ İKİLİ ARAMA DENKLEMLİ ADAPTİF YAPAY ARI KOLONİSİ ALGORİTMASI İLE OPTİMİZASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Bilişim Sistemleri Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Murat YÜCEL

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Yusuf SÖNMEZ

Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. Doğan AYDIN

Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Düzce Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Ümit ATİLA

Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 05/06/2023

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Aslıhan TÜFEKÇİ

Bilişim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Vehbi YOLCU

...../...../.....

FİBER OPTİK SİSTEMLERDE DOĞRUSAL OLMAYAN RAMAN SAÇILMASININ
İKİLİ ARAMA DENKLEMLİ ADAPTİF YAPAY ARI KOLONİSİ ALGORİTMASI İLE
OPTİMİZASYONU

(Doktora Tezi)

Vehbi YOLCU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ

Haziran 2023

ÖZET

Yüksek bant genişliğine duyulan ihtiyaç sebebiyle dağıtık fiber Raman yükselteçlerine (FRY) olan ilgi artmaktadır. FRY' ler geniş bant aralığını kullanmasının yanında düşük gürültü faktörü avantajı ve kullanımdaki basitlik ile de ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada SMF-28 türü fiberlerde kazancı düzleştirilmeye çalışılan 50 km mesafeye sahip bir fiber hatta ilerleyen 100 adet optik sinyale, zıt yönde sırasıyla 4, 8, 16 adet pompa sinyali gönderilerek dağıtık fiber Raman yükselteç sistemi kurulmuştur. Kurulan sistemde ilk olarak, sinyal kazancını düzleştirmek için lineer olmayan FRY modeli, optimizasyon problemi olarak tanımlanarak optimum pompa gücü ve dalga boyları ikili arama denklemlili adaptif yapay arı kolonisi algoritması (İADAYAK) ile bulunmuştur. Sonrasında 8 pompa verileri esas alınarak lineer olmayan FRY sınır değer problemi MATLAB BVP çözücü metodu yardımıyla çözümlenmiştir. Çözüm sırasında analitik Jacobian matrisi sisteme hazır halde verilerek lineer olmayan FRY sınır değer problemi nümerik metotla çözümlenmiş, hızlı ve etkili sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, 100 adet optik sinyalin kazanç dalgalanmasının maksimum $\pm 0,5$ dB olduğu gözlemlenmiştir. Yapay zekâ teknolojisi kapsamında üretilen algoritmaların gelişmesi paralelinde bu çalışmaya benzer çözüm performanslarının gelişeceği ve bu sayede elde edilen verimin artacağı düşünülmektedir.

Bilim Kodu : 90532

Anahtar Kelimeler : FRY, Yapay Arı Kolonisi, İADAYAK, Pompa Optimizasyonu,

Sayfa Adedi : 101

Danışman : Prof. Dr. Murat YÜCEL

OPTIMIZATION OF NONLINEAR RAMAN SCATTERING IN FIBER OPTIC
SYSTEMS BY BINARY SEARCH EQUATIONS BASED ADAPTIVE ARTIFICIAL
BEE COLONY ALGORITHM

(Ph.D. Thesis)

Vehbi YOLCU

GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF INFORMATICS

June 2023

ABSTRACT

Due to the need for high bandwidth, interest in distributed fiber Raman amplifiers (FRA) is increasing. In addition to using wide band gap, FRAs also come to the fore with the advantage of low noise factor and simplicity in use. In this study, a distributed fiber Raman amplifier system was established by sending 4, 8, and 16 pump signals in the opposite direction to 100 optical signals advancing on a fiber line with a distance of 50 km, whose gain is tried to be flattened in SMF-28 type fibers. In the established system, firstly, in order to flatten the signal gain, the non-linear FRA model was defined as an optimization problem and the optimum pump power and wavelengths were found with the binary search equation adaptive artificial bee colony algorithm (BSEAABC). Then, based on 8 pump data, the nonlinear FRA boundary value problem was solved with the help of MATLAB BVP solver method. During the solution, the analytical Jacobian matrix was given to the system ready and the non -linear FRA boundary value problem was solved by numerical method and rapid and effective results were obtained. When the results were examined, it was observed that the gain ripple of 100 optical signals was maximum $\pm 0,5$ dB. It is thought that in parallel with the development of algorithms produced within the scope of artificial intelligence technology, solution performances similar to this study will improve and thus the efficiency obtained will increase.

Science Code : 90532

Key Words : FRA, Artificial Bee Colony, BSEAABC, Pump Optimization,

Page Number : 101

Supervisor : Prof. Dr. Murat YÜCEL

TEŞEKKÜR

Doktora sürecimin başından sonuna kadar tüm iletişim kanallarını açarak bana desteklerini esirgemeyen, tecrübesiyle akademik gelişimime katkı sağlayan danışman hocam Prof. Dr. Murat YÜCEL' e teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca yaptığım akademik çalışmalarda ve tezin geliştirilmesi aşamasında bilgisiyle bana desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Doğan AYDIN' a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez izleme komitemde yer alan sayın Prof. Dr. Yusuf SÖNMEZ' e teşekkürlerimi sunarım.

Yoğun çalışmalarımnda sabır ve anlayışlarını esirgemeyen her daim bana desteklerini sunan sevgili eşime ve kıymetli oğullarım Mustafa Said ve Ahmet Talha' ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
3. FİBER OPTİK İLETİŞİM SİSTEMLERİ.....	11
3.1. Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçler (EDFA).....	17
3.2. Raman Yükselteçler.....	21
3.3. Raman Yükselteç Denklemleri.....	28
4. İKİLİ ARAMA DENKLEMLİ ADAPTİF YAPAY ARI KOLONİSİ (İADAYAK) ALGORİTMASI.....	33
4.1.Optimizasyon Algoritmalarının Yapısı.....	33
4.2.Yapay Arı Kolonisi Algoritması (YAK).....	36
4.3.YAK İyileştirme Çalışmaları.....	39
4.4. İkili Arama Denklemli Adaptif Yapay Arı Kolonisi (İADAYAK) Algoritması.	41
5. MATLAB BVP ÇÖZÜCÜ.....	49
6. YÖNTEM.....	65
6.1. FRY Denklemi ve Kurulan Sisteme Ait Bilgiler.....	65
6.2. FRY Denklem Çözümü ve Kurulan Sisteme Ait Bilgiler.....	75
7. BULGULAR.....	81

	Sayfa
8. TARTIşMA.....	87
9. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	89
KAYNAKLAR.....	91
ÖZGEÇMİş.....	101



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Örnek bir arama denklemi listesi.....	43
Çizelge 4.2. İADAYAK algoritmasının sözde kodu.....	43
Çizelge 6.1. Klasik YAK ve İADAYAK algoritması arasındaki istatistiksel karşılaştırma sonuçları.....	74
Çizelge 7.1. 8 adet pompa sinyali kullanılarak elde edilen optimum dalga boyu ve güç değerleri.....	81
Çizelge 8.1. Optik fiber uzunluğu, sinyal ve pompa sayılarına göre alan yazındaki çalışmalar.....	87

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Optik fiber iletişiminin yıllara göre gelişim grafiği.....	13
Şekil 3.2. Dünyada yer alan fiber optik iletişim sistemlerinin yapısı.....	14
Şekil 3.3. Optik ışının dalga boyuna bağlı soğurma ve zayıflama grafiği.....	15
Şekil 3.4. EDFA' nın 1500 nm dalga boyunda yükseltgenme grafiği.....	18
Şekil 3.5. 980nm (a) ve 1480nm (b) dalga boyunda pompalanmış EDFA' nın 1550 nm dalga boyundaki optik sinyali kuvvetlendirmesi.....	20
Şekil 3.6. Belirli frekansta optik fiberlerde görülen saçılma çeşitleri.....	22
Şekil 3.7. Raman saçılmasının Kuantum mekaniği açısından enerji diyagramı.....	24
Şekil 3.8. Raman saçılmasının şematik görüntüsü, Uyarılmış Raman saçılması (a), Raman Yükselteç (b), Raman Lazer(c).....	25
Şekil 3.9. İleri yönde Raman kuvvetlendirici örnek tasarımı.....	26
Şekil 3.10. Standart tek modlu optik fiber kabloya ait Raman kazanç katsayısı.....	27
Şekil 3.11. Sinyal, pompa ve ASE gürültüsünün dalga boyu ve frekans dağılımları...	28
Şekil 5.1. Bir pompa ve bir sinyalden oluşan FRY denkleminin çözüm grafiği.....	51
Şekil 5.2. Bir pompa ve beş sinyalden oluşan FRY denkleminin çözüm grafiği.....	52
Şekil 5.3. İki pompa ve beş sinyalden oluşan FRY denkleminin çözüm grafiği.....	53
Şekil 5.4. İki pompa ve beş sinyalden oluşan FRY denkleminin çözüm grafiği.....	54
Şekil 5.5. İki pompa ve 19 sinyalden oluşan FRY denkleminin çözüm grafiği.....	55
Şekil 5.6. 19 optik sinyalin 80km optik fiber boyunca hareketi.....	56
Şekil 5.7. 19 optik sinyalin 50km optik fiber boyunca hareketi.....	57
Şekil 5.8. a) 64 optik sinyalin 50km optik fiber boyunca hareketi b) 4 pompanın 50km optik fiber boyunca hareketi.....	58
Şekil 5.9. 100 optik sinyalin 50km optik fiber boyunca hareketi.....	60
Şekil 6.1. Standart tek modlu optik fiber kabloya ait Raman kazanç katsayısı.....	66
Şekil 6.2. SMF-28 standart optik fiber kabloya ait dalga boyuna göre zayıflama katsayısı.....	67
Şekil 6.3. 100 adet optik sinyalin dalga boylarına göre dB cinsinden elde edilen GL, k değeri.....	69
Şekil 6.4. Dört adet pompa kullanılarak elde edilen optimum sonuçlar.....	70

Şekil	Sayfa
Şekil 6.5. 8 adet pompa kullanılarak elde edilen optimum sonuçlar.....	71
Şekil 6.6. 16 adet pompa kullanılarak elde edilen optimum sonuçlar.....	72
Şekil 6.7. Algoritmaların yakınsama değeri sonuçları.....	75
Şekil 6.8. Oluşturulan sistem düzeneğinin basit gösterimi.....	75
Şekil 6.9. İki pompa Üç sinyalden oluşan FRY çözümünde kullanılan analitik Jacobian matrisi örneği.....	77
Şekil 6.10. MATLAB BVP çözücü fonksiyonun akış diyagramı.....	79
Şekil 7.1. Kazancı düzleştirilmiş 100 adet optik sinyalin 50km uzunluğundaki optik fiberde ilerleme sonuçları.....	82
Şekil 7.2. Sinyallere zıt yönde ilerleyen 8 pompanın optik fiberdeki ilerleme sonuçları	84

SİMGELER ve KISALTMALAR

Çalışma kapsamında kullanılan simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
S	Saniye
Gb	Gigabit
THz	Terahertz
mW	Miliwatt
nm	Nanometre
km	Kilometre
dB	Desibel
MHz	Megahertz
GHz	Gigahertz
μm	Mikrometre
Mb	Megabit
Tb	Terabit
m	Metre
ω	Frekans
cm^3	Santimetre küp
λ	Dalga boyu
h	Plank Sabiti
k	Boltzman Sabiti
T	Sıcaklık
α	Zayıflama katsayısı
ε	Rayleigh saçılımı
K_{eff}	Polarizasyon faktörü
A_{eff}	Etkin alan değeri
P_k	Pompa gücü
P_j	Sinyal gücü
$MaxItr$	Maksimum iterasyon sayısı

Simgeler**Açıklamalar**

BD_t	Başarı Değeri
W	Watt
v_k	Pompa frekansı
v_j	Sinyal frekansı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AB	Adams – Bashforth
ABM	Adams - Bashforth-Moulton
ACO	Ant Colony Optimization Karıncı Kolonisi Optimizasyonu
ASE	Güçlendirilmiş Kendiliğinden Emisyon
BVP	Boundary Value Problem (Sınır Değer Problemi)
BFO	Bakteri Yiycek Arama Optimizasyonu
DE	Diferansiyel Evrimsel
DRY	Dağıtık Raman Yükselteç
DWDM	Yoğun Dalga Boyu Bölmeli Çoğullama
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier (Erbiyum Katkılı Optik Yükselteç)
ELM	Aşırı Öğrenme Makinesi (Extreme Learning Machine)
FES	Fonksiyon Çağırım Değeri
FA	Firefly Algorithm (Ateş Böceği Algoritması)
FRL	Fiber Raman Lazer
FRY	Fiber Raman Yükselteç
GWO	Grey Wolf Optimization (Gri Kurt Optimizasyonu)
ILS	Iterated Local Search (Yenilemeli Yerel Arama)
ISL	Iterated Social Learn (Artan Sosyal Öğrenme Çatısı)
İADAYAK	İkili Arama Denklemli Adaptif Yapay Arı Kolonisi
LRA	Toplu Raman Yükselteç
MS	Meta Sezgisel
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu

Kısaltmalar**Açıklamalar**

RFA

Random Forest Algorithm
(Rastgele Orman Algoritması)

RK

Runge Kutta

SFLA

Shuffled Frog Leaping Algorithm
(Zıplayan Kurbağa Algoritması)

SZ

Sürü Zekâsı

URS

Uyarılmış Raman Saçılması

WDM

Wavelength Division Multiplexing
(Dalga Boyu Bölümlemeli Çoğullama)

YAK

Yapay Arı Kolonisi

1. GİRİŞ

Dalga boyu bölümlenmeli optik sistemlerin (WDM) gelişmesi ile iletim kapasitesi alanında büyük ilerleme yaşanmıştır [1]. Yaklaşık 1 GB/s hızındaki tek sinyal işaretinin tek bir optik fiber üzerinden iletildiği sistemlerden, birden çok sinyal işaretinin farklı dalga boylarında ve her biri yaklaşık olarak 550 GB/s hızında olan 224 adet veri sinyalinin tek bir optik fiber üzerinden iletilebildiği günümüz iletim teknolojisine ulaşılmıştır [2].

Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricilerin (EDFA) 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. Bu doğrultuda uyarılmış Raman saçılması (URS), bu ihtiyacın karşılanması için araştırma konusu olmuştur [3]. Lineer olmayan bu etkilerin her birinde, uyarılmaya neden olan yüksek güçlü pompa dalgasından farklı frekanstaki sinyal (Stokes) dalgasına güç aktarılmaktadır. Bu etkiler EDFA kuvvetlendiricilerine göre önemli avantajlara sahiptirler. URS geniş bant aralığını kullanmasının yanında düşük gürültü faktörü avantajı ve kullanımdaki basitlik ile de ön plana çıkmaktadır. URS' ler, fiber yapısına katkı yapılarak elde edilen diğer yükselteç sistemleri yerine yine kendi içerisindeki pompa güçlerine ve pompa dalga boylarına bağlıdır. Fiber Raman yükselteç (FRY)' lerin yukarıda sayılan tüm avantajları neticesinde sinyal daha uzak mesafelere tek seferde bozulmadan iletelebilmektedir [4].

Silika fibere gönderilen pompa ve sinyal ışınlarının frekans farkı 13 THz dolaylarında ise uyarılmış Stokes saçılımı sinyali kuvvetlendirmekte fakat pompanın gücünü tüketmektedir. Bu fiziksel olay neticesinde silika fiber içerisine belli frekans aralıkları ile çok sayıda pompa ve sinyal ışınları gönderildiğinde, sinyal ışınları, fiber kayıplarını Raman saçılması neticesinde pompa güçlerinden telafi ederek uzak mesafelere gücünü kaybetmeden ulaşabilmektedir. Bu çok pompalı iletim yapısı dağıtık Raman yükselteçlerin (DRY) temelini oluşturmaktadır [5]. Fakat başlangıçta kullanılan optik sinyal güçlerinin kazancının düzeltilmesi için silika fibere gönderilecek pompa güçlerinin ve frekanslarının, sinyallerin sayısına, gücüne ve frekansına göre ayarlanması gerekmektedir. Bu bağlamda C ve L bandında başlangıçta 1 mW gücünde 100 adet sinyal, silika fibere belli frekanslarda gönderildiğinde kazancı düzeltililerek kilometrelerce uzağa yine 1 mW gücünde

ulaşabilmesi için, sisteme eklenecek pompaların güçleri ve frekanslarının numerik analizle optimize edilerek FRY denkleminin çözülmesi, bu araştırmanın problemidir.

Alan yazın incelendiğinde, son yıllarda gelişen optik fiber teknolojileri ile fiber Raman yükselteç (FRY) sistemlerinin optimizasyonu alanında son yirmi yılda yapılmış çalışmalara rastlanmaktadır [6]. Yapılan çalışmalar incelendiğinde FRY kapsamında kurulan sistemlerin ve kullanılan algoritmaların çeşitliliği dikkat çekmektedir. İlk olarak, kurulan FRY sistemleri incelendiğinde sinyal ve pompaların kullanıldığı bantların, optik sinyal ve pompaların aralıklarının, optik fiberin uzunluklarının ve optik fiber çeşitlerinin birbirlerinden farklı olduğu gözlemlenmiştir. İkinci olarak, araştırmacılar FRY denklemini Genetik algoritmalar, Yapay Sinir ağları, Benzetilmiş Tavlama algoritması, Parçacık Sürü optimizasyonu gibi farklı algoritmalar ile çözümlemeye çalışmışlardır. Bazı araştırmacılar denklem çözümünde yerel optimuma düşmemek için kullandıkları algoritmalarını daha fazla geliştirerek kazancı optimum seviyede düzeltirmeye çalışmışlardır. Bazı araştırmacılar ise, lineer olmayan FRY problemini en kısa sürede ve en az hata ile çözümlemeye odaklanmışlar, bu sebeple FRY sınır değer problemini Euler, Trapezoid, Midpoint, Adams-Bashforth, Runge-Kutta, Shooting gibi nümerik metotlarla çözümlemeye çalışmışlardır [7].

Sürü zekâsı, doğada yer alan canlıların bir bütün olarak hareketleri sonucunda ortaya koydukları karmaşık davranışların bilgisayar sistemlerine modellenmesiyle ortaya çıkan tekniklerdir. Canlıların birlikte gösterdiği, merkezi olmayan, öz-örgütlü ve bütünsel yapılar modellenerek bilim insanları tarafından problemlerin çözümlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Böylelikle, Sürü Zekâsı (SZ) algoritmaları literatürde yer almaya başlamıştır. Bu bağlamda çok çeşitli sürü zekâsı algoritması geliştirilmiş ve literatüre sunulmuştur. Bunlardan biri, arıların yiyecek arama davranışından esinlenen Yapay Arı Kolonisi (YAK) algoritmasıdır. YAK algoritmasında arıların bütün davranışları doğada oldukları gibi bire bir modellenmemiş ve bunun yanında da algoritma ile ilgili bazı ön kabullerde bulunulmuştur. Bu ön kabullerden biri her bir besinin çıkarılmasında sadece bir görevli arının olmasıdır. Bu sebeple algoritmada yer alan besin sayısı ile görevli arı sayısının birbirine eşit olduğu kabul edilir. Bir diğer ön kabul ise günlük hayattaki sistemden farklı olarak işçi arı ile gözcü arı sayısının birbirine eşit olmasıdır. Böyle bir kabulde bulunulmasına rağmen, aslında bir besine gidip gelen arının görevli olduğu besin kaynağı tükendiğinde bu arının kâşif arı olarak görevini sürdürdüğü kabul edilir. Ayrıca bir besinin kalitesi ne kadar yüksekse o kaynağın

uygunluk değeri de o kadar iyidir. Yukarıda yer alan bu ön kabuller ışığında YAK algoritması ile en iyi (optimum) çözümün elde edilmesine çalışılır [8].

Bir sayısal optimizasyon problemini çözerken, bir YAK algoritmasının etkinliği, çoğunlukla işçi arı ve gözlemci arı adımlarında kullanılan arama denklemlerine bağlıdır. Bu nedenle, klasik YAK algoritmasını iyileştirmek için literatürde birçok arama denklemi önerilmiştir. Ancak, her problem türü için uygun arama denklemi farklılık gösterebilir ve bu nedenle seçilen bir arama denklemi her problem için iyi sonuçlar elde edemeyebilir. Ayrıca, algoritma performansını etkileyen bir diğer önemli faktör, seçilen arama denklemi ile değiştirilecek değişkenlerin (boyutların) sayısıdır. Klasik YAK algoritmasında arama denklemi rastgele seçilen sadece bir değişkeni günceller. Bu yaklaşımın algoritmanın çeşitlendirme davranışını güçlendirdiği fakat yakınsama hızını yavaşlattığı bilinmektedir. Birden çok değişkenin tek seferde değiştirildiği durumlarda ise seçilen arama denkleminin yapısına göre algoritmanın odaklanma veya çeşitlendirme davranışı ayarlanabilmektedir [9]. Fakat odaklanma ve çeşitlendirmenin ne ölçüde katkı sağlaması gerektiği yine problem türüne göre değişiklik gösterir. Bu çalışmada, sözü geçen bu problemlerin üstesinden gelebilmek için adaptif bir arama denklemi seçim stratejisi önerilmiştir.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında, bu araştırmanın amacı kazancı düzleştirilmiş FRY denkleminin çözümlenmesidir. Bu kapsamda, FRY denkleminin çözümü için teorik olarak pompa ve sinyallerden oluşan bir sistem düzeneği oluşturulmuştur. İlk olarak, oluşturulan sistemde yer alan pompaların frekansları ve güçleri, ikili arama denklemlili adaptif yapay arı kolonisi algoritması (İADAYAK) algoritması ile optimize edilerek nümerik olarak en iyi değerler elde edilmiştir. Sonrasında FRY sınır değer problemi MATLAB BVP çözücü metodu ile çözümlenmiştir. Denklem çözümünde analitik Jacobian matrisi sisteme hazır olarak verilmiş bu sayede daha hızlı ve etkili sonuçlar elde edilmiştir. Bununla beraber FRY denklemi çözümünde kullanılan çalışmalar incelendiğinde genellikle çözüm için geleneksel algoritmalar önerilmiş ve yerel maksimumdan kaçınmak için kısıtlı memnuniyet yöntemleri geliştirilmiştir. Ayrıca FRY denklemi çözümü için, sınırlı sayıda hızlı ve kararlı çalışan matematiksel model gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, tez kapsamında yapılan çalışmanın FRY denklem çözümünde yaşanan sınırlılıkları gidereceği düşünülmektedir.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, yapılan çalışmanın konusu ile ilgili olan çalışmalara kısaca yer verilmiştir. Konu ile ilgili geçmişten günümüze tarama yapılarak alan yazına ışık tutulmuştur.

İlgili alan yazın incelendiğinde genellikle FRY denkleminin çok çeşitli optimizasyon algoritmaları ile çözümlenmeye çalışıldığı gözlemlenmiştir. Araştırmalarda, çoğunlukla teorik olarak sistem düzeneği oluşturulmuş ve sistem parametreleri belirlenmiştir. Parametreler genel olarak optik fiberin mesafesini, pompa ve sinyallerin adedini ve dalga boylarını, optik sinyallerin başlangıçtaki güçlerini, pompa ve sinyallerin birbirlerine göre konumlarını ifade eder. Yapılan çalışmaların başarısını ölçmek için, ilk olarak mümkün olan en uzak mesafeye iletilen optik sinyallerin kazanç dalgalanmasının kabul edilebilir seviyede olması, ikinci olarak mümkün olan en çok sayıda optik sinyalin aynı anda iletilmesi, üçüncü olarak ise FRY diferansiyel denkleminin en kısa sürede çözümü kullanılmaktadır.

Perlin ve Winful [10] yaptığı çalışmasında 100 sinyal ve 16 pompadan oluşan teorik bir sistem düzeneği oluşturmuştur. Sistemde pompalar 1400nm ile 1500nm arasında ve optik sinyaller 1520nm ile 1620nm arasında konumlandırılmıştır. Sinyaller arası 100GHz boşluk bırakılarak pompa ve sinyaller birbirlerine zıt yönde ve fiber mesafesi 50 km olarak seçilmiştir. Ayrıca sinyallerin başlangıç güçleri 0 dB olarak ayarlanarak, sistem optik fiberlerin zayıflama katsayısının en az olduğu C bandında sistem hazırlanmıştır. Hazırlanan sisteme göre öncelikle 16 pompanın en iyi pompa dalga boyu ve gücü standart genetik algoritma kullanarak belirlenmiştir. Sonrasında lineer olmayan FRY diferansiyel denklemi Runge-Kutta metodu kullanılarak çözümlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde Raman kazanç dalgalanması 0,2dB olarak ölçülmüştür.

Hu ve arkadaşları [11] sırasıyla 2, 4, 8 pompa ve sırasıyla 20, 40, 80 adet optik sinyal kullanarak FRY denklemini çözmeye çalışmışlardır. Bunun için öncelikle 2 pompa 20 sinyalden oluşan, ikinci olarak 4 pompa 40 sinyalden oluşan, üçüncü olarak 8 pompa 80 sinyalden oluşan sistem düzeneği oluşturmuşlardır. Sinyaller arası 0,8nm boşluk bırakılarak pompa ve sinyaller birbirlerine zıt yönde ve fiber mesafesi 50 km olarak seçilmiştir. Sinyallerin başlangıç güçleri -3dB olarak ayarlanarak sistem optik fiberlerin zayıflama katsayısının en az olduğu C bandında sistem hazırlanmıştır. Bununla birlikte sistemde

pompaların dalga boyları sabit olarak seçilmiş, yalnızca güçlerin en iyi değerleri genetik algoritma kullanılarak bulunmuştur. Sonrasında FRY diferansiyel denklemi shooting metodu ile çözümlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde güçlerin ve dalga boyların birlikte seçildiği değerler sonucu oluşan kazanç dalgalanmasının(0,2dB) sadece güçlerin optimize edildiği kazanç dalgalanmasından (0,4dB) daha az olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Jiang ve arkadaşları [12] Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritması kullanarak FRY diferansiyel denklemini çözmüştür. Bunun için öncelikle 1530nm- 1625nm arası 95 sinyal ve 1400nm- 1500nm arası 4 pompa kullanarak sistem düzeneği hazırlanmıştır. Sinyaller arası 1nm boşluk bırakılarak pompa ve sinyaller birbirlerine zıt yönde ve fiber mesafesi 50 km olarak seçilmiştir. Pompa güçleri 50 mW ile 300mW arası seçilmiş, ayrıca sinyallerin başlangıç güçleri 1 mW olarak ayarlanarak sistem optik fiberlerin zayıflama katsayısının en az olduğu 1500nm esas alınarak sistem hazırlanmıştır. Sonrasında FRY diferansiyel denklemi Newton-Raphson metodu kullanılarak çözümlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, optimum pompa dalga boyları 1503.8 nm, 1433.9 nm, 1454.1 nm, 1469.8 nm olarak bulunmuştur. Bununla birlikte optimum pompa güçleri 213.9 mW, 158.4 mW, 67.3 mW ve 180.2 mW olarak elde edilmiştir. Ayrıca ortalama kazanç 9,3dB olarak elde edilmiş, pompalar için harcanan toplam güç 620mW olarak tespit edilmiş, bununla beraber optik sinyallerin kazanç dalgalanması 0,7dB olarak ölçülmüştür.

Liu ve arkadaşları [13] evrimsel algoritmalar içerisinde yer alan Rastgele Sıçrayan Kurbağa algoritması ve Uç Değer Optimizasyon Stratejisi ile FRY diferansiyel denklemini çözümlerlerdir. Çalışmada ilk olarak, kazanç dalgalanmasını en aza indirerek optimum pompa dalga boylarını ve pompa güçlerini belirlemek için Rastgele Sıçrayan Kurbağa algoritması kullanılmıştır. Bununla beraber denklem hesaplamalarını hızlandırmak için, Uç Değer Optimizasyon Stratejisi hesaplamalara dahil edilmiştir. Önerilen bu strateji ile, optimizasyonda karar değişkenleri olarak pompaların terminal güç değerlerini alarak geleneksel tekrarlı tahmin yöntemi kullanılmadan birleştirilerek FRY denklemi çözümlenmiş, bu yöntemle pompaların optimum orijinal güç değerleri elde edilmiştir. Sistem düzeneğinde 20km fiber mesafesi ve 1530nm-1610nm arası 80 adet optik sinyal kullanılmıştır. Bununla birlikte, 1400nm-1530nm nm arası 4 pompa ve sinyallerin giriş güçleri -20dB olarak seçilmiştir. Simülasyon sonuçları incelendiğinde, geleneksel hesaplama süresinden yaklaşık yüzde 65 oranında tasarruf edildiği tespit edilmiştir. Kazanç dalgalanmasının ise 0,64 dB'den az olduğu gözlemlenmiştir. Kullanılan bu iki algoritmanın

birleşiminin, optimizasyon verimliliğini artırdığı ve iyi bir kazanç profili ile performansını iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Jiang ve arkadaşları [14] FRY diferansiyel denklemi çözümünde karınca kolonisi optimizasyon algoritması kullanmışlardır. Öncelikle 35 sinyal ve 4 pompadan oluşan teorik bir sistem düzeneği oluşturmuştur. Sistemde pompalar 1420nm ile 1480nm arasında ve optik sinyaller 1530nm ile 1565nm arasında konumlandırılmıştır. Sinyaller arası 1nm boşluk bırakılarak pompa ve sinyaller birbirlerine zıt yönde ve fiber mesafesi 20 km olarak seçilmiştir. Ayrıca sinyallerin başlangıç güçleri 0,1 mW olarak ayarlanarak sistem optik fiberlerin zayıflama katsayısının en az olduğu C bandında sistem hazırlanmıştır. Hazırlanan sisteme göre, öncelikle 4 pompanın en iyi pompa dalga boyu ve gücü karınca kolonisi optimizasyon algoritması kullanarak belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, optimum pompa dalga boyları 1420.2, 1434.7, 1468.5, 1479.3 nm olarak, optimum pompa güçleri ise 67.9, 64.3, 120.8, 5.7 mW olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, FRY diferansiyel denklemi çözümünde oluşan kazanç dalgalanması ise 0,27dB olarak bulunmuştur. Çalışmada FRY denklemi çözümünde harcanan zamanın diğer standart algoritma kullanılarak harcanan zamandan 20 kat fazla tasarruf edildiği gözlemlenmiştir.

Chen ve Jiang [15] çok pompalı FRY diferansiyel denklemini çözmek için Aşırı Öğrenme Makinesi (ELM) tekniğini ve Diferansiyel Evrimsel (DE) algoritmasını birleştiren hibrit bir yaklaşıma dayalı, verimli bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntem ile, öğrenme hızı ve ELM' nin yüksek düzeyde genelleştirilmesinin yanı sıra DE' nin güçlü küresel arama yeteneğini kullanarak FRY denklemini daha kararlı olarak çözmüşlerdir. Hazırlanan sisteme göre, öncelikle pompaların en iyi pompa dalga boyu ve güçleri diferansiyel evrim optimizasyon algoritması kullanarak bulunmuştur. Sistem incelendiğinde geriye doğru çok pompalı deneysel kurulum C ve L bandında yapılmıştır. Sinyallerin dalga boyları 1 nm aralıkta 1530 nm ile 1620 nm arasında seçilmiş ve sinyal güçlerinin başlangıç değerleri 0,1 mW olarak belirlenmiştir. Pompaların dalga boyları 1420 nm ile 1520 nm aralığında seçilmiş ve herhangi iki optik sinyal arasındaki dalga boyu aralığı 1 nm olarak belirlenmiştir. Pompaların güçleri 10 mW ile 500 mW aralığında, optik fiber uzunluğu 25 km olarak ayarlanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, 4 pompa kullanılarak çözülen denklemde kazanç dalgalanması 0,5 dB olarak bulunmuştur. Ayrıca, FRY denkleminin toplam hesaplama süresi 4235 saniye olarak ölçülmüş, böylelikle standart çözüm hızından yüzde 90 oranında tasarruf edildiği gözlemlenmiştir.

Zibar ve arkadaşları [16] FRY diferansiyel denklemini çözmek için makine öğrenmesi tekniğini kullanmışlardır. Bununla beraber, FRY denkleminde yer alan kazanç ve gürültü faktörünü de bularak sistem düzeneğini genişletmişlerdir. Sistem düzeneğinde, fiber mesafesi 100km, 5 pompa 185-196THz arasında, 40 sinyal 192-196 arasında ve optik sinyalin başlangıç güçleri 0dB seçilerek gerçek yaşam standartlarına yakın bir deney düzeneği kurulmuştur. Ek olarak hazırlanan sistemde, pompaların en iyi pompa dalga boyu makine öğrenmesi tekniği kullanarak bulunmuştur. Sistem incelendiğinde geriye doğru çok pompalı deneysel kurulum C ve L bandında yapılmıştır. Çalışmada ayrıca optik fiberde gerçek yaşam şartlarında meydana gelen dispersiyon, lineer olmayan etkiler de hesaba katılarak gerçekçi bir sistem düzeneği kullanılmıştır. Bu sayede, oluşturulan teorik sistem deneysel olarak da gerçekleştirilerek, doğrulaması yapılmaya çalışılmıştır. Ayrıca, sistemde pompa güçleri 5 pompa için 160mW olarak eşit tutulmuş, pompa güçleri 1414 nm, 1428 nm, 1442 nm, 1456 nm, 1470 nm olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde kazanç dalgalanması 1,4dB olarak bulunmuştur. Yapılan tüm sistem deneysel olarak da desteklendiği için bu kazanç dalgalanmasının başarılı olduğu söylenebilir.

Liu ve Lee [17] Hibrit genetik algoritma kullanarak FRY diferansiyel denklemini çözmeye çalışmıştır. Bu çalışmada diğerlerinden farklı olarak hem Raman yükselteç sistemi hem de EDFA yükseltici sistemi birlikte kullanılmaya çalışılmış, bu şekilde birbirlerinin avantajlı yönleri birlikte kullanılarak optik sinyaller en uzağa kayıpsız ulaştırılmaya çalışılmıştır. Hazırlanan deney düzeneği EDFA ve Raman yükselteç sistemlerini birlikte kullanacak şekilde tasarlanmış bu sebeple EDFA için gerekli olan pompa dalga boylarının birbirine çok yakın olması sağlanarak sadece pompa güçleri optimize edilmiştir. 65 sinyal ve 4 pompadan oluşan teorik bir sistem düzeneği oluşturmuştur. Sistemde pompaların dalga boyları 1440nm civarında ve güçleri ise 200 mW ile 250 mW arasında seçilmiştir. Optik sinyaller arası 200 GHz boşluk bırakılarak pompa ve sinyaller birbirlerine zıt yönde ve fiber mesafesi 50 km olarak seçilmiştir. Ayrıca sinyallerin başlangıç güçleri 1 mW olarak ayarlanarak sistem optik fiberlerin zayıflama katsayısının en az olduğu C bandında sistem hazırlanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, kullanılan hibrit sistemin, Raman ve EDFA yükselteçlerin tek başlarına yaptığı yükselteç sistemleri ile rekabetçi olabileceği gözlemlenmiştir. Teorik yapılan deneylerin pratikte de yapılıp uygulanabilirliğinin test edilmesi gerekliliği vurgulanmıştır. Bununla beraber, optik sinyallerin 50 km sonraki kazanç dalgalanması hakkında herhangi bir bilgi verilmemiştir.

Han ve arkadaşları [18] Newton Raphson metodu kullanarak FRY diferansiyel denklemini çözmüşlerdir. Denklemden Plank sabiti, sıcaklık, ASE gürültüsü gibi sabitleri de kullanarak tüm FRY denklemini çözmeye çalışmışlardır. Denklem çözümlerini hızlandıran Jacobian matrisini de sisteme önceden yükleyerek denklemin daha hızlı çözülmesini sağlamışlardır. Sistemde pompalar 1400nm ile 1500nm arasında ve optik sinyaller 186 GHz ile 196 GHz arasında konumlandırılmıştır. Sinyaller arası 100GHz boşluk bırakılarak pompa ve sinyaller birbirlerine zıt yönde ve fiber mesafesi 50 km olarak seçilmiştir. Ayrıca sinyallerin başlangıç güçleri -20 dB olarak ayarlanarak sistem optik fiberlerin zayıflama katsayısının en az olduğu C bandında sistem hazırlanmıştır. Sisteme pompa dalga boyları 1424, 1438, 1452, 1466, 1495 nm olarak, pompa güçleri ise 378, 167, 92, 95, 68 mW olarak girilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, sisteme hazır olarak önceden girilen Jacobian matrisi sayesinde denklemin hesaplama süresinde 3 kata kadar ciddi hızlanmalar gözlemlenmiştir. Bununla beraber, optik sinyallerin 50 km sonraki kazanç dalgalanması hakkında herhangi bir bilgi verilmemiştir.

Cui ve arkadaşları [19] yaptığı çalışmada 124 sinyal ve 8 pompadan oluşan teorik bir sistem düzeneği oluşturmuştur. Sistemde pompalar 1400nm ile 1500nm arasında ve optik sinyaller 1500nm ile 1620nm arasında konumlandırılmıştır. Sinyaller arası 100GHz boşluk bırakılarak pompa ve sinyaller birbirlerine zıt yönde ve fiber mesafesi 80 km olarak seçilmiştir. Ayrıca sinyallerin başlangıç güçleri 0 dB olarak ayarlanarak sistem optik fiberlerin zayıflama katsayısının en az olduğu C+L bandında sistem hazırlanmıştır. Hazırlanan sisteme göre, öncelikle 8 pompanın en iyi pompa dalga boyu ve gücü standart genetik algoritma kullanarak belirlenmiştir. Sonrasında, lineer olmayan FRY diferansiyel denklemi doğrusal çoktan çoğa ilişkiyi ifade eden matris hesaplama metodu kullanılarak çözümlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde Raman kazanç dalgalanması 0,5dB olarak ölçülmüştür.



3. FİBER OPTİK İLETİŞİM SİSTEMLERİ

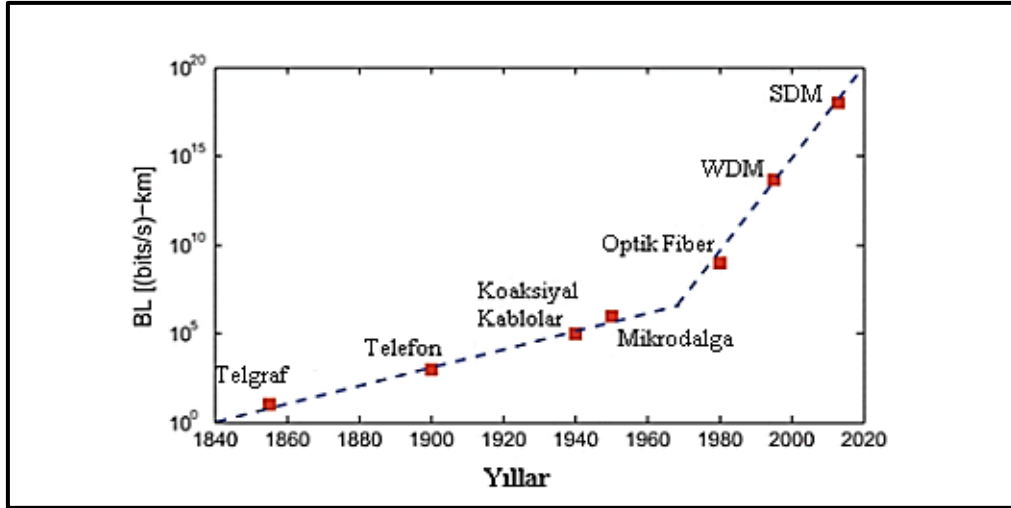
1830' larda telgrafın icadı, ışığın yerini elektriğin almasıyla elektrikli iletişim çağını başlatmıştır. Bu sistemde ara aktarma istasyonlarının kullanılması, günümüzde bile uzun sayılabilecek mesafelere (1000 km' den fazla) iletişime olanak sağlamıştır. Sonrasında 1876'da telefonun icadı, elektrik sinyallerinin sürekli değişen bir elektrik akımı aracılığıyla analog biçimde iletilmesiyle teknoloji dünyasına büyük bir değişiklik getirmiştir [20]. Bu yenilikçi analog elektrik teknikleri, yaklaşık yüzyıl boyunca iletişim sistemlerine hâkim olmuştur. Bu bağlamda dünya çapındaki telefon ağlarının gelişimi, elektrikli iletişim sistemlerinin tasarımında birçok ilerlemeye yol açmıştır. Bükümlü tel çiftleri yerine koaksiyel kabloların kullanılması mevcut sistem kapasitesini önemli ölçüde artırmıştır. Bunun yanında 1940 yılında hizmete giren ilk koaksiyel kablo sistemi, yüzlerce ses kanalını aynı anda ileten veya tek bir televizyon kanalını iletebilen 3 MHz' lik bir sistemden oluşmaktadır. Ancak bu sistemlerin bant genişliği, 10 MHz' in üzerindeki frekanslar için hızla artan frekansa bağlı kablo kayıplarıyla sınırlıdır. Bu sınırlılık, içinde frekansları olan bir elektromanyetik taşıyıcı dalganın kullanıldığı mikrodalga iletişim sistemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır [21].

4 GHz taşıyıcı frekansında çalışan ilk mikrodalga sistemi 1948'de kullanılmaya başlanmıştır. MHz düzeyinden GHz frekans genişliğine ulaşılması gerçekten insanlarda heyecan uyandırmıştır. O zamandan beri hem koaksiyel kablo sistemleri hem de mikrodalga sistemler önemli ölçüde geliştirilerek ve halen günümüzde bile kullanılan 100 Mb/s bit hızlarında çalışabilir hale gelmiştir. 20. Yüzyılın ikinci çeyreğinde geliştirilen en gelişmiş koaksiyel sistem 274 Mb/s bit hızına ulaşmıştır [22]. Fakat bu sistemin dezavantajı sık tekrarlayıcı gerektirmesi ve tekrarlayıcıların nispeten pahalı olmasıdır. Oysaki mikrodalga iletişim sistemleri genellikle daha büyük bir tekrarlayıcı aralığına izin verirler, fakat bit hızları da MHz taşıyıcı frekansı ile sınırlı olmaktadır.

Yirminci yüzyılın son çeyreğinde, taşıyıcı olarak optik dalgalar kullanılırsa, taşıyıcı frekansında önemli bir artışın mümkün olacağı fark edilmiştir. Fakat 1960' lı yıllarda ne tutarlı bir optik kaynak ne de uygun bir iletim ortamı olmadığından, 1960 yılında lazerin icadı bilim insanlarına umut olmuş ve araştırmalar bu alanda hızlanmıştır [23]. Bu noktada ilk olarak çalışmalar optik iletişim için lazer ışığını kullanmanın yollarını bulmaya

odaklanmıştır. 1966' da, ışığı bakır tellerdeki elektronların yönlendirilmesine benzer bir şekilde yönlendirebildikleri için optik fiberlerin veri iletiminde en iyi seçim olabileceği bilim insanları tarafından önerilmiştir [24]. Fakat burada ana sorun, optik fiberlerin yüksek seviyedeki kayıpları olmuştur. Öyle ki, mevcut olan optik fiber kayıplarının 1 km' de 1000 dB gibi çok yüksek değerlere sahip olduğu gözlenmiştir. Bundan yaklaşık 10 yıl sonra fiber kayıplarının belirli dalga boyu bölgesinde (1300 μ m) 20 dB/km'nin altına düşürülebildiği buluş ortaya atılmıştır. Bu doğrultuda, çeşitli optik kaynakların ve düşük kayıplı optik fiberlerin aynı anda kullanılabilirdiği fiber optik iletişim sistemlerinin geliştirilmesi için dünya çapında bir seferberlik başlatılmıştır [11]. 20 yıldan kısa bir süre içinde ise bit hızında yüzde 100.000 kat saniye başına veri iletiminde hızlanmalar gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, iletim mesafeleri de buna paralel olarak birkaç km' den 10.000 km' ye çıkmıştır. Sonuç olarak, ışığın optik fiber içinde ışık hızında ilerlemesi çok küçük kayıplarla ve yüksek bit oranında çalışması neticesinde, 20. yüzyılın en büyük buluşları arasında yer almıştır [25].

Günümüzde kullanılan çok modlu fiber optik iletişim sistemleri, 1980'lerin başında kullanıma sunulmuştur. Fakat bu tür optik fiber sistemlerinin bit hızı, çok modlu fiberlerdeki dağılım nedeniyle 100 Mb/s' nin altında sınırlı kalmıştır. Bu sebeple, uzak mesafelere daha yüksek bit hızı ile iletim yapabilecek sistemler üzerinde çalışmalar hızlanmıştır. 1981'deki bir laboratuvar deneyi sayesinde, 44 km'lik tek modlu fiber üzerinde 2 Gb/s hızında ilk iletim gerçekleştirilmiştir [15]. 1980' li yılların sonuna gelindiğinde, yaklaşık 50 km tekrarlayıcı aralığı ile 1,7 Gb/s'n' ye kadar bit hızlarında çalışan yeni nesil ışık dalgası sistemleri ticari olarak kullanıma sunulmuştur. Yeni nesil ışık dalgası sistemlerinin tekrarlayıcı aralığı 1,3 μ m' de tipik olarak 0,5 dB/km fiber kayıplarıyla sınırlandırılmıştır. Oysaki fiber kayıplarının en az olduğu silika liflerinin kayıpları 1,55 μ m 'dir. Nitekim bu gelişmelerden birkaç yıl sonra 1,5 μ m spektral bölgede 0,2 dB/km'lik kayıp değerine ulaşılmıştır [26]. Fakat yarı iletken lazerler, birkaç uzunlamasına sinyalin eşzamanlı salınımının bir sonucu olarak meydana gelen darbe yayılması nedeniyle kullanılamamıştır. Bununla birlikte, optik fiberdeki lineer olmayan etkilerden biri (Dispersiyon problemi) lazer spektrumunu tek bir uzunlamasına bölüm ile sınırlar. 1.55 μ m' ye yakın minimum optik fiber kaybına sahip dispersiyon kaydırmalı fiberler kullanılarak bu sınırlılığın üstesinden gelinmiştir. Böylelikle 1980' li yılların ikinci çeyreğinde yapılan laboratuvar deneyleri ile 100 km'yi aşan mesafelerde 4 Gb/s' ye kadar bit hızlarında bilgi iletme kapasitesine ulaşılmıştır [27].

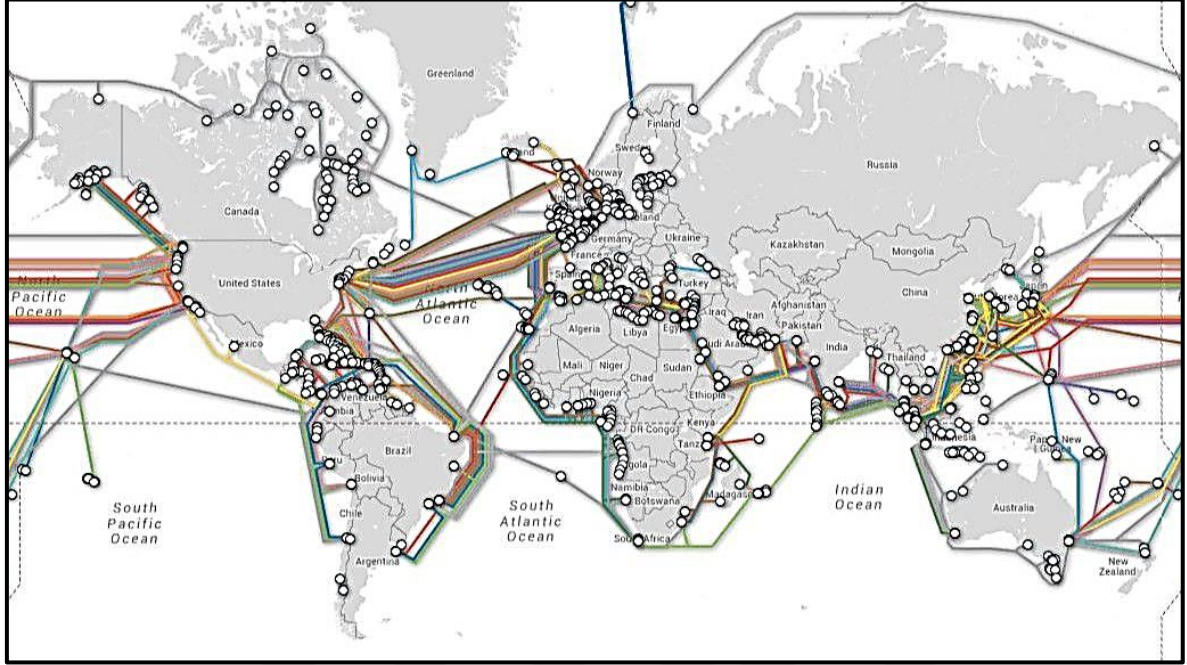


Şekil 3.1. Optik fiber iletişiminin yıllara göre gelişim grafiği

Bu gelişmeler sayesinde 2.5 Gb/s'de çalışan yeni nesil ışık dalgası sistemleri, 1990' lı yılların başında ticari olarak kullanılabilir hale gelmiştir. Sonrasında bu sistemler geliştirilerek 10 Gb/s' ye kadar bit hızı kapasitesine ulaşılmıştır [28].

Geliştirilen yeni nesil C bant ($1.55 \mu\text{m}$) sistemlerinin bir eksik yanı, sinyalin tipik olarak 60-70 km aralıklı elektronik tekrarlayıcılar kullanılarak periyodik olarak yeniden üretilmesi olmuştur. Bu eksiklik EDFA ve Raman optik fiber yükselteçlerin bulunmasıyla ortadan kaldırılmıştır. Gelişimi devam eden yükselteç sistemleri, tekrarlayıcı aralığını artırmak için optik yükselteçlerden ve bit hızını artırmak için WDM sistemlerinden yararlanmaya başlamıştır. Bu teknoloji sayesinde aynı anda optik fiberin içerisinde farklı dalga boyuna sahip optik sinyallerin iletimi sağlanmıştır. Bu da tek optik fiberde yüzlerce kat hızlanma kapasitesine imkân vermiştir. Bu gelişmeler neticesinde 2000' li yıllarda, 10 Tb/s bit hızında çalışan ışık dalgası sistemleri geliştirilmiştir [29]. WDM sisteminde, fiber kayıpları genelde 50 km ile 80 km aralıklı EDFA' lar kullanılarak periyodik olarak güçlendirilir. Bu tip yükselteçler daha da geliştirilerek ticari olarak kullanıma sunulmuştur. 1991'de yapılan bir deney ile, bir devir daim döngüsü sistemi kullanılarak 2,5 Gb/s'de 21.000 km'nin üzerinde ve 5 Gb/s'de 14.300 km' nin üzerinde veri iletimi kapasitesine ulaşılmıştır [30]. Bu kapasite, sadece yükselteç kullanarak optik bir denizaltı iletim sisteminin, kıtalararası iletişim için uygun olduğunu göstermiştir. 20. Yüzyılın son yıllarına gelindiğinde, gerçek denizaltı kabloları kullanılarak 5 Gb/s bit hızında 11.300 km'nin üzerinde iletim deneyleri sadece deneysel olarak kalmamış, aynı zamanda ticari trans Atlantik ve trans pasifik kablo

sistemlerinde de kullanılabilir hale gelmiştir. Bu heyecan uyandıran gelişmeler paralelinde dünya çapında çok sayıda denizaltı optik iletim sistemi okyanuslara yerleştirilmiştir [31].



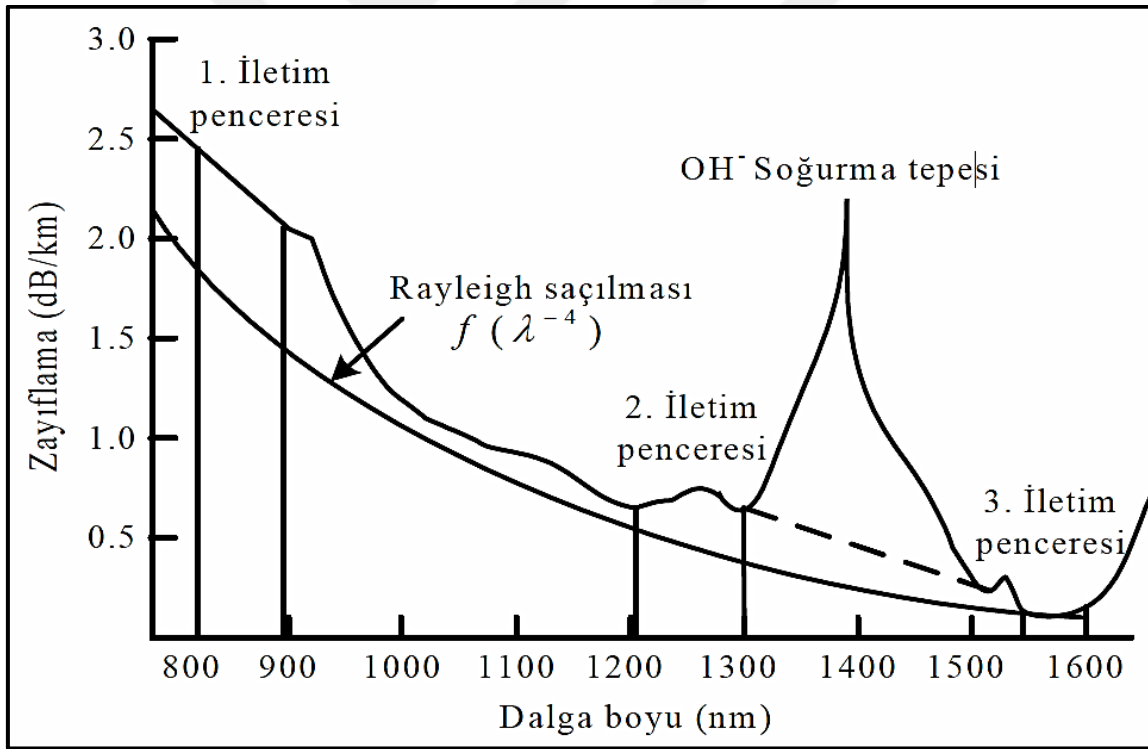
Şekil 3.2. Dünyada yer alan fiber optik iletişim sistemlerinin yapısı

WDM optik sistemlerinin amacı, WDM tekniği aracılığıyla daha fazla kanal tek optik sistemde iletilerek sistem kapasitesini ve bant genişliğini arttırmaktır. Artan sinyal bant genişliği ile tek bir yükselteç kullanarak tüm kanalları yükseltmek 21. Yüzyılın başında mümkün hale gelmiştir. Bilim insanlarının uğraşlarıyla 2001 yılında, her biri 40 Gb/s'de çalışan 82 kanallın 3000 km üzerinde iletildiği ve neredeyse 10.000 (Tb/s) km' lik bir deney sistemi başarıyla çalıştırılmıştır. Sonrasında bu sistemin iletim kapasitesi yaklaşık 11 Tb/sn' ye (her biri 40 Gb/s'de çalışan 273 WDM kanalı) yükseltilmiştir. Ancak verimli iletim mesafesi 117 km ile sınırlandırılmıştır. Bu sayede, 1980' li yıllardan 2000' li yılların başına kadar olan 20 yıllık süre içerisinde iletim kapasitesi yaklaşık 10.000 kat artırılmıştır [32].

Günümüzde kullanılan ve bilim insanları tarafından geliştirilmeye çalışılan fiber optik iletişim sistemleri, WDM sisteminin kapasitelerini artırmalarının yanında bu sistemlerin aynı anda çalışabileceği dalga boyu aralığını genişletmeye çalışmaktadırlar. C bandı olarak bilinen geleneksel dalga boyu penceresi, 1.53–1.57µm dalga boyu aralığını içeren WDM sistemleri yeterli gelmediği için yoğun dalga boyu bölmeli çoğullama (DWDM) sistemleri geliştirilmiştir [33]. Bu bağlamda, sırasıyla L, S ve E bantları kullanılmaya çalışılmakta, bu sayede kullanılan optik pencereler fazlaştırılmaya çalışılmaktadır. Gittikçe popüler olma

yolunda ilerleyen Raman yükselteç sistemleri her üç dalga boyu bandındaki sinyaller için kullanılabilir. Bu pencerelerin kullanıma açılması sayesinde binlerce ışık dalgası aynı sistemde birlikte yol alabilir.

Optik fiberlerde ışığın ilerlemesini sınırlayan en önemli fiziksel olaylardan biri, zayıflama olarak karşımıza çıkmaktadır. Optik alıcılar, sinyali doğru bir şekilde ölçümlemek için belirli miktarda sinyal gücüne ihtiyaç duyduğundan, iletim mesafesi doğal olarak fiber kayıplarıyla sınırlıdır. Yani optik sinyal optik fiber içerisinde ilerlerken sahip olduğu frekansa bağlı olarak zayıflar, bu zayıflama dolayısıyla enerjilerini kaybederek belirli mesafe sonra optik alıcılar tarafından tespit edilemezler. Optik sinyalin sahip olduğu frekans (dalga boyu) maruz kalacağı zayıflama katsayısında önemli rol oynamaktadır. Bu durum Şekil 3.3’ de sunulmuştur.



Şekil 3.3. Optik ışının dalga boyuna bağlı soğurma ve zayıflama grafiği

Zayıflama, optik işaretin yeniden kuvvetlendirilmeden önce iletebileceği en uzak mesafeyi belirleyen temel faktördür. Optik fiberdeki işaret zayıflaması genellikle desibel (dB) cinsinden logaritmik olarak ifade edilir [34]. Belirli dalga boyuna sahip optik sinyal için:

$$\text{Desibel (dB)} = 10 \log_{10} P_0/P_i \quad (3.1)$$

Eş 3.1 olarak tanımlanır. Burada P_i , fibere giren optik güç ve P_0 fiberden alınan optik çıkış gücünü ifade eder. Optik fiber haberleşmesinde, zayıflama genellikle “birim uzunluk başına desibel” cinsinden ifade edilir:

$$\alpha_{db} = 1/L \cdot 10 \log_{10} P_i/P_0 \quad (3.2)$$

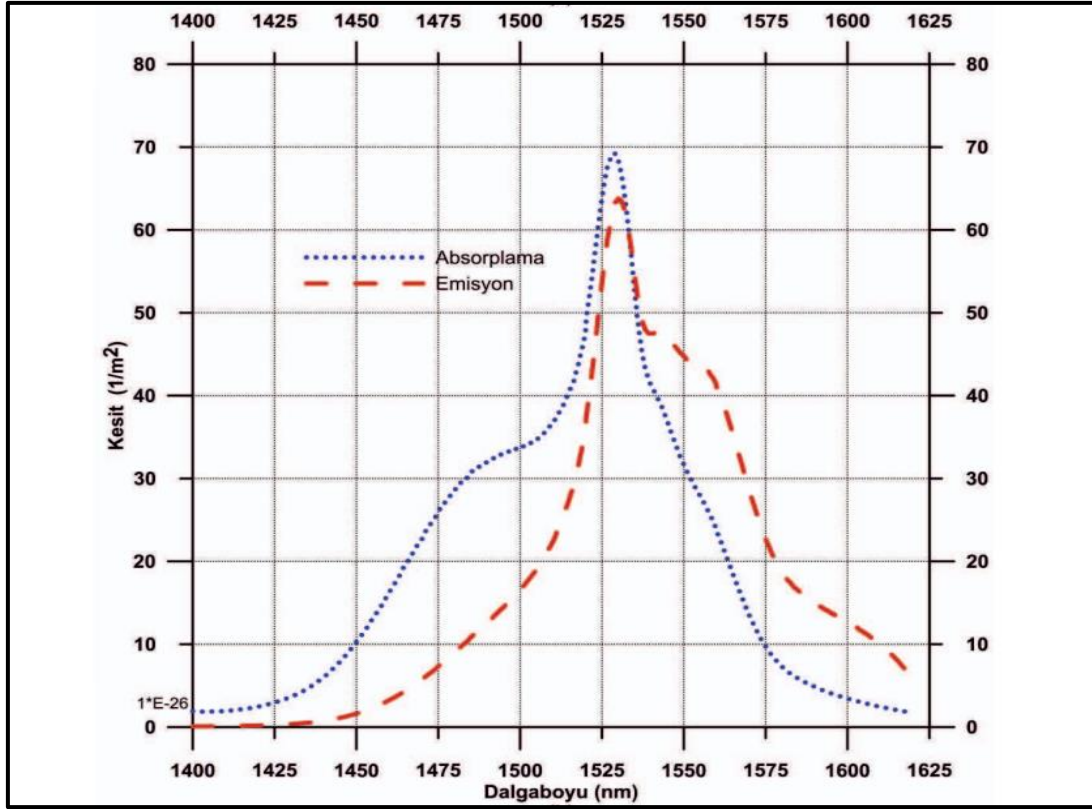
Eş 3.2 incelendiğinde α_{db} birim uzunluk başına işaret zayıflamasını, L ise fiberin uzunluğunu gösterir. Optik fiberde işaret zayıflamasından sorumlu çok sayıda mekanizma vardır. Bunlardan ilki, soğurma olarak karşımıza çıkmaktadır. Soğurma, ışığın tamamının veya bir kısmının yutularak yansıtılmaması olarak tanımlanabilir. Genellikle koyu renkler üzerine gelen ışığı soğurma özelliğine sahiptir. Bu sebeple, üzerine gelen ışığın çok azını yansıtır. Tek modlu optik fiberin dalga boyuna bağlı zayıflama ve soğurma grafiği şekil 3.3’ de sunulmuştur. Optik haberleşmede kullanılan tek modlu optik fiberler 1300nm ile 1600nm arasında fiber zayıflamasının en düşük olduğu yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Şekilde görülen OH^- soğurma tepesinin kaynağı imalat sürecinde camın içerisinde sıkışan su molekülleridir. Optik fiber iletişimde olumsuz etkilere sebep olan soğurma, atmosferik kimyasal buhar çökertme metodu kullanılarak OH^- iyonları dehidrasyon yöntemi ile kaldırılmıştır. Bu sayede, 1300-1600nm arası soğurma katsayısı minimuma indirilmiştir [35].

Fiberlerde soğurma kaybı bakır kablolardaki güç kaybına benzetilir. Optik fiberin saf olamaması sebebiyle fiberde bulunan maddeler ışığı soğurarak ısıya dönüştürür. Optik fiberleri imal etmede kullanılan saf cam yaklaşık %99,9 saflıktadır. Bu sebeple soğurma kayıpları optik fiberlerde görülmektedir. Mor ötesi soğurma, Kızılötesi soğurma ve İyon rezonans soğurması temel soğurma çeşitleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Optik fiberlerin imal edildiği silika üzerindeki valans elektronlar Mor ötesi soğurmaya neden olmaktadır. Işık, valans elektronlarını iyonize ederek iletkenlik yapar. Bu sebeple, soğurma toplam ışık alanındaki kayba eşdeğerdir. Cam çekirdek moleküllerinin atomları tarafından soğrulan ışık fotonları Kızılötesi soğurmaya neden olur. Bu sebeple, soğrulan fotonlar ısınmaya özgü rastgele mekanik titreşimlere sebep olur [36]. Malzemedeki OH^- iyonları iyon rezonans soğurmasına sebep olur. Bu iyonların kaynağı imalat esnasında camın içerisine sıkışıp kalan OH^- iyonlarıdır. İyon soğurmasına demir bakır ve krom metalleri de sebep olabilir.

3.1. Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçler (EDFA)

Katkılı fiber yükselteçler 1960' lı yıllar gibi erken bir tarihte keşfedilmiş olsa da, optik fiberlere verimli olarak adapte edilme yöntemleri geliştirildikten ancak 25 yıl sonra pratikte kullanılabilir hale gelmiştir. Optik fiberlerin çalışma dalga boyu ve kazanç bant genişliği gibi yükseltgenme özellikleri, bir ana ortam rolü oynayan silika fiberden ziyade, katkı maddeleri tarafından belirlenir. Erbiyum, Holmiyum, Neodimyum, Samaryum, Tülyum ve İterbiyum gibi birçok farklı nadir toprak elementi, 0,5 ile 3,5 μm aralığında farklı dalga boylarında çalışan sinyallerin yükseltilmesi için kullanılabilir [37]. Erbiyum katkılı fiber yükselteçler (EDFA), 1,55 μm ' ye yakın dalga boyu bölgesinde (C bant) çalıştığı için en çok ilgiyi çeken nadir toprak elementi olmuştur. 20. yüzyılın sonunda EDFA' ların WDM sistemlerine yerleştirilmeleri, fiber optik iletişim alanında devrim yaratmış ve 1 Tb/s' yi aşan taşıma kapasitesine ulaşmasında etkin rol oynamıştır.

EDFA' nın basit tanımı, fiber çekirdeğinin Erbiyum iyonları (Er^{3+}) içermesi ve zayıflayan optik sinyallerin bu iyonlar ile enerji seviyelerinin artması olarak açıklanabilir. Bu artış uygun dalga boyunda pompalama ile optik fiber boyunca sağlanır. Kazanç spektrumu, pompalama sistemine bağlı olduğu kadar, fiber çekirdeğin içinde Erbiyumdan ziyade Germania ve Alümina gibi diğer katkı maddelerinin varlığına da bağlıdır. Bu sayede silikanın doğal yapısı, Er^{3+} ' nın enerji seviyelerini bantlar halinde genişletir. Bu sayede yükseltgenme gerçekleşir [38]. Bu durumu anlatan grafik Şekil 3.4' de sunulmuştur.



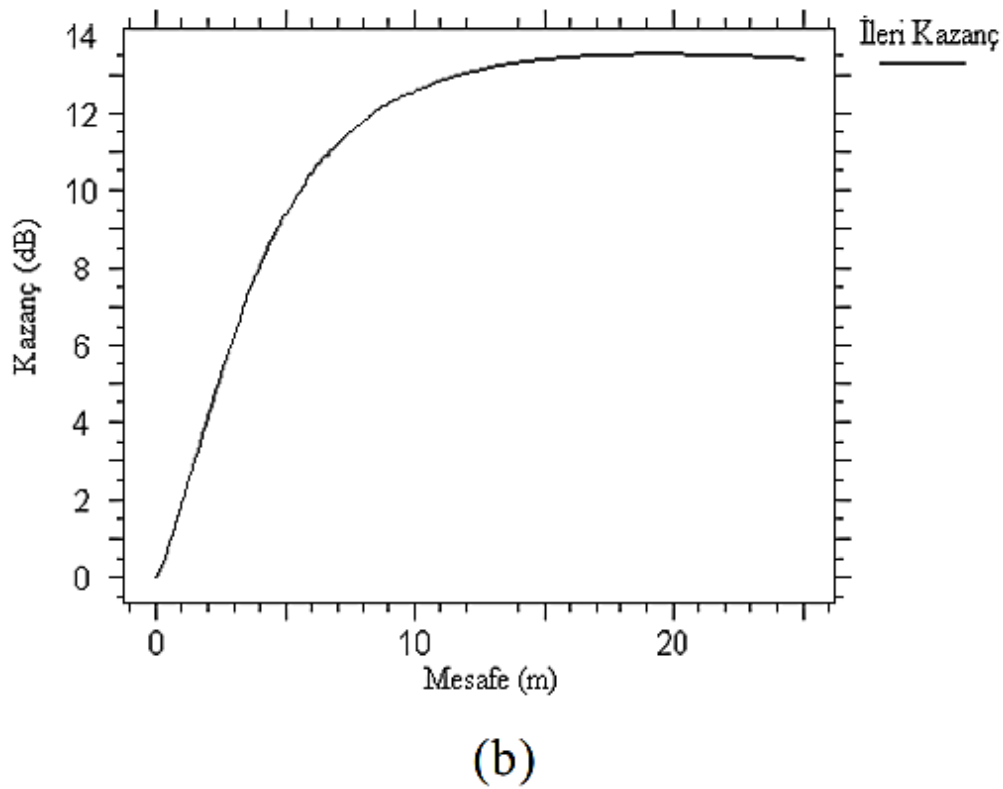
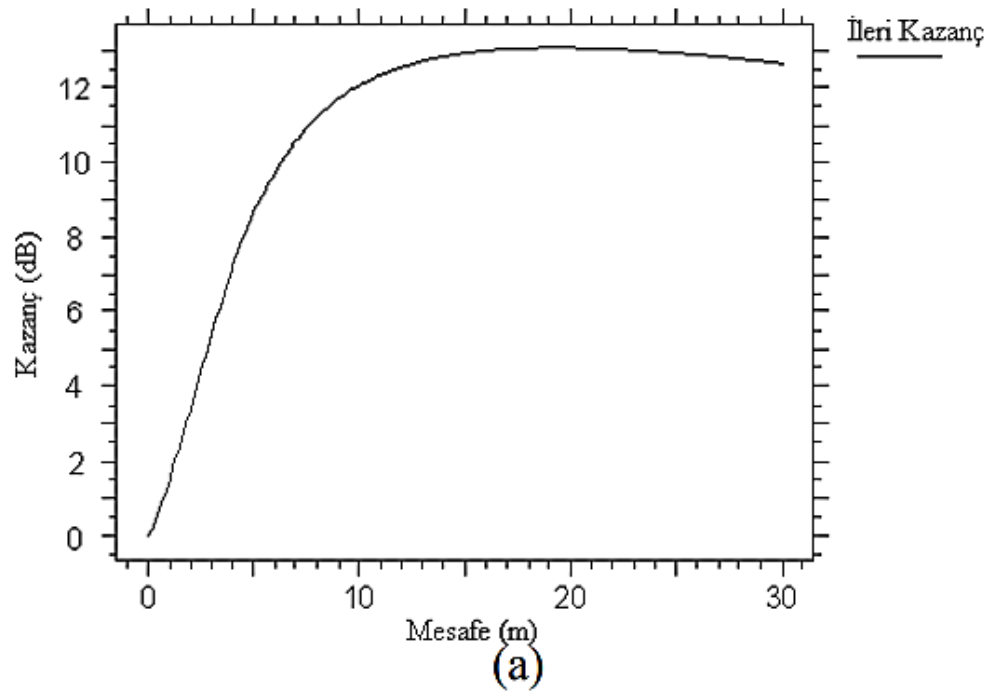
Şekil 3.4. EDFA' nın 1500 nm dalga boyunda yükseltgenme grafiği

EDFA' lar, optik pompa ve sinyaller ile hem ileri yönde hem de zıt yönlerde yayılacak şekilde tasarlanabilir. Bu yapılar isimlendirilirken sinyale paralel ise ileri pompalama, sinyale zıt ise geri pompalama olarak isimlendirilir. Sinyal gücü açıkken ileri ve geri pompalama performansları hemen hemen aynıdır. Doygunluk rejiminde ise güç dönüştürme verimliliği açısından genel olarak geriye doğru pompalama performansı daha iyidir. Çünkü bu durumda güçlendirilmiş kendiliğinden emisyonun (ASE) gürültüsü önemli rol oynar [39].

Şekil 3.4' de gösterilen kazanç spektrumu, bir WDM sinyali yükseltildiğinde bireysel kanalların yükseltilmesini belirlediği için EDFA' nın en önemli özelliğidir. Kazanç spektrumunun genişliği, silisin amorf yapısından ve fiber çekirdek içindeki Germania ve Alümina gibi diğer yardımcı katkı maddelerinin varlığından önemli ölçüde etkilenir. Bu şekilde Erbium iyonlarının kazanç spektrumu homojen bir şekilde genişlemektedir. Bununla birlikte, kazanç spektrumu, rastgele yerleştirilmiş silika moleküllerinin varlığı sayesinde önemli ölçüde genişler [40]. Silika fiberdeki yapısal bozukluklar, kazanç spektrumunun heterojen olarak genişlemesine yol açarken, homojen olarak genişlemeden, çeşitli enerji seviyelerinin şiddetli şekilde bölünmesi sorumludur. EDFA' da kazanç

spektrumu azımsanmayacak kadar genişir ve optik fiber çekirdeğe alümina eklenmesi, kazanç spektrumunu daha da genişletir. Spektral delik yakma ölçümleri yoluyla homojen ve homojen olmayan genişlemenin katkılarını izole etmek için girişimlerde bulunulmuştur. Bunun yanında Germany katkılı EDFA' lar için homojen ve homojen olmayan genişlemenin katkıları nispeten küçüktür. Buna karşılık, alüminosilikat camların kazanç spektrumu, homojen ve homojen olmayan genişleme mekanizmalarından kabaca eşit katkılara sahiptir. Bu tür EDFA' ların kazanç bant genişliği tipik olarak 35 nm' yi aşmaktadır [41].

EDFA' ların kazanç spektrumu, fiber çekirdek yoğunluğu aynı olsa bile yükselteçler arası farklara göre değişir. Çünkü yükseltgenme miktarı aynı zamanda yükseltecin uzunluğuna da bağlıdır. Bunun nedeni, kazancın farklı spektral özelliklere sahip hem absorpsiyon hem de emisyon kesitlerine bağlı olmasıdır. Yerel ters çevirme veya yerel kazanç, pompa gücü değişimlerinden dolayı fiber uzunluğu boyunca değişmektedir. EDFA' larda toplam kazanç, Erbiyum katkılı optik fiber uzunluğu üzerinden integral alınarak elde edilir. Bu sayede, 1570–1610 nm spektral bölgesini kapsayan L bandında da yükseltgenme sağlayan EDFA' lar oluşturularak kazanç spektrumu genişler. EDFA yükselteçlerin sabit kazanç sağlayabileceği dalga boyu aralığı, WDM sistemleri için büyük bir araştırma konusu olarak karşımıza çıkar. Çünkü WDM' de amaç, onlarca sinyalin aynı miktar yükseltgenmesini sağlayarak uzun mesafeler boyunca sinyali bozulmadan taşımaktır [42].



Şekil 3.5. 980nm (a) ve 1480nm (b) dalga boyunda pompalanmış EDFA' nın 1550nm dalga boyundaki optik sinyali kuvvetlendirmesi

Şekil 3.5 incelendiğinde, 980nm (a) dalga boyunda kuvvetlendirme uzaklığı yaklaşık 12 m sonra tepe noktasına ulaşmıştır. Bu uzunluktan sonra yükseltgenme durmuş hatta azalmaya

başlamıştır. Yine 1480nm dalga boyunda kuvvetlendirme uzaklığı (b) incelendiğinde yaklaşık 18m civarı yükseltgenme seviyesi tepe noktasına ulaşmıştır. Bu ve buna benzer çalışmalar neticesinde, 20-30 m fiber uzunluğundan 200 m fiber uzunluğuna kadar Erbiyum katkılı fiber yükselteçler amaçlarına göre kullanılabilir.

3.2. Raman Yükselteçler

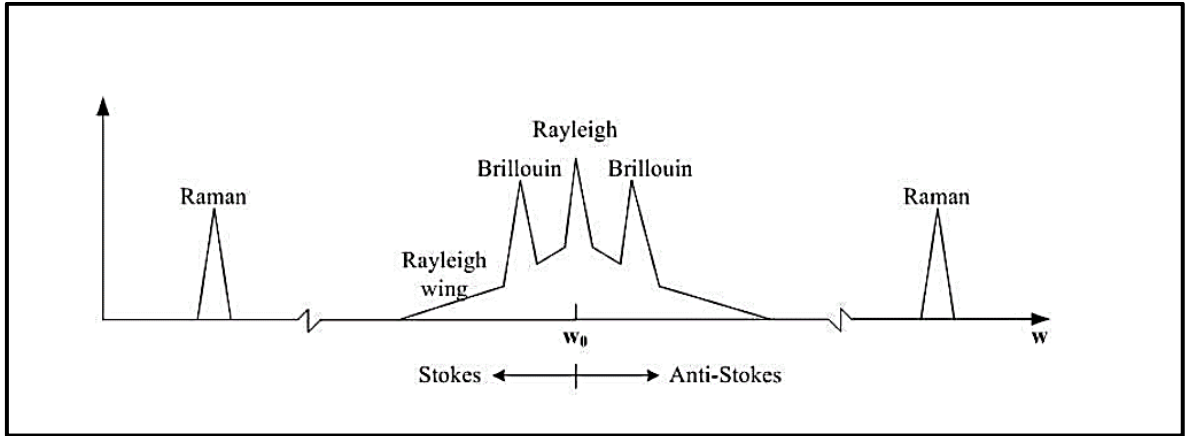
Optik fiberde Raman yükselteçleri ilk kez 1973'te gözlemlenip ölçülmesine rağmen, 1990'ların sonlarında yüksek güçlü diyot lazerler piyasaya sürülüp uygulama imkânı verilinceye kadar beklemek zorunda kalınmıştır. Raman yükselteç üzerine yapılan araştırmalar, 1990'ların başında EDFA' nın başarılı bir şekilde uygulanmasıyla ikinci plana atılmıştır. Bununla birlikte, Raman dağıtık yükselteçlerin WDM sistemlerinde gürültü açısından daha iyi sistem performansı sağladığı fark edilince, Raman yükselteçleri yeniden araştırma konusu olmuştur. Bu bağlamda, 1990' ların ortalarından sonlarına kadar dağıtık Raman yükselteçlere doğru eğilim artmaya başlamıştır. Günümüzde neredeyse tüm uzun mesafeli ve ultra uzun mesafeli iletim sistemlerinde dağıtık Raman yükselteçler kullanılmaktadır. FRY' ların diğer tip optik yükselteçlere göre temel avantajlarından birkaçı, kazanç ortamının diğer yükselteçlere göre düşük kayıplı olması, yükselteç dalga spektrumunun 400nm olarak neredeyse her dalga boyunda uygun olması ve maliyetinin az olması olarak açıklanabilir. Bu avantajlar neticesinde, uygun dalga boylarına ve pompa güçleri yerleştirilerek geniş bir bant üzerinden Raman kazancı elde edilebilir [43]. Bu sayede filtre takmak gibi optik donanım bileşenlerinden tasarruf sağlanır ve optik sistem verimli şekilde kullanılabilir.

Optik yükselteçler, optik iletişim için tamamen avantajlı yapıya sahip buluşlar değildir. Yükselteçler optik sinyal güçlerini yükseltirken gürültü üretirler. Raman yükselteçlerindeki ana gürültü kaynaklarından biri, kendiliğinden Raman saçılma mekanizması tarafından üretilen yükseltilmiş kendiliğinden emisyondur. Bununla birlikte, dağıtık Raman yükselteçlerin toplu Raman yükselteçlerinden daha iyi gürültü performansı verdiği bilinmektedir [44]. Yani daha az ASE gürültüsü üretirler. Bunun nedeni FRY' lerdeki ASE gürültüsünün, tamamen ters çevrilmiş bir sistem gibi davrandığından doğası gereği düşük olmasıdır. Bu konuyu biraz açarsak, Raman yükselteçte ASE spektral yoğunluğu sabittir ve tüm frekanslarda mevcuttur. ASE gürültüsünün yalnızca yükselteç bant genişliği üzerinde var olduğunu ve yükselteç çıkışına bir optik filtre yerleştirilerek daha da azaltılabileceğini

varsayarak, yükselteçten sonraki toplam ASE gücü daha da azalacaktır. Bu açıklamalar paralelinde, dağıtık FRY üzerine yapılan çalışmaların birçoğunda ASE gürültüsü ihmal edilerek FRY formülünden çıkartılıp hesaplamalara dâhil edilmemektedir [45].

FRY' lerde herhangi bir malzeme içerisine, kendi eşik güç seviyesinden daha az şiddetli bir ışın gönderildiğinde belli bir frekans kayması yaparak gönderilen ışın her yöne rastgele saçılmaktadır. Saçılma, ω_1 frekansındaki tek renkli radyasyon, tozsuz, şeffaf gazlar ve sıvılar veya optik olarak mükemmel, şeffaf katılar gibi sistemlerde meydana gelir. Bu saçılmaların birçoğu değişmeden optik boyunca iletilir. Elastik saçılma, elastik olmayan saçılmanın aksine, gelen saçılmada frekans kaymasına neden olmaz. Fakat elastik olmayan saçılma $\omega_1 \pm \omega_m$ da ek bir çift yeni frekansla, uyarılmış saçılma üretir [46].

Optik fiberlerde genel olarak görülen saçılmalar sırasıyla Raman, Brillouin ve Rayleigh saçılması olarak sıralanabilir. Tanım olarak, saçılan ışığın düşük frekanslara kaydırılan bu bileşenleri Stokes bileşenleri olarak, daha yüksek frekanslara kaydırılan bileşenler ise, anti-Stokes bileşenleri olarak bilinir. Aşağıda, optik fiberde lineer olmayan saçılmalar Şekil 3.6' da frekans bandında gösterilmiştir [47].



Şekil 3.6. Belirli frekansta optik fiberlerde görülen saçılma çeşitleri

Genel olarak, gelen ışık, ortamın titreşim seviyeleri tarafından tanımlanan bir miktar kadar saçılan ışığın frekansından farklılık gösterir. Her yöne rastgele saçılan Stokes ışınına da kendiliğinden Raman saçılması adı verilir. Kendiliğinden Raman saçılması zayıf bir işlem olarak kabul edilir. Örneğin, ışık 1 cm³ hacimli bir ortamda yayılırsa, gelen milyonlarca ışığın yalnızca bir kısmı Stokes frekansına saçılır. Bununla birlikte, moleküler bir ortama

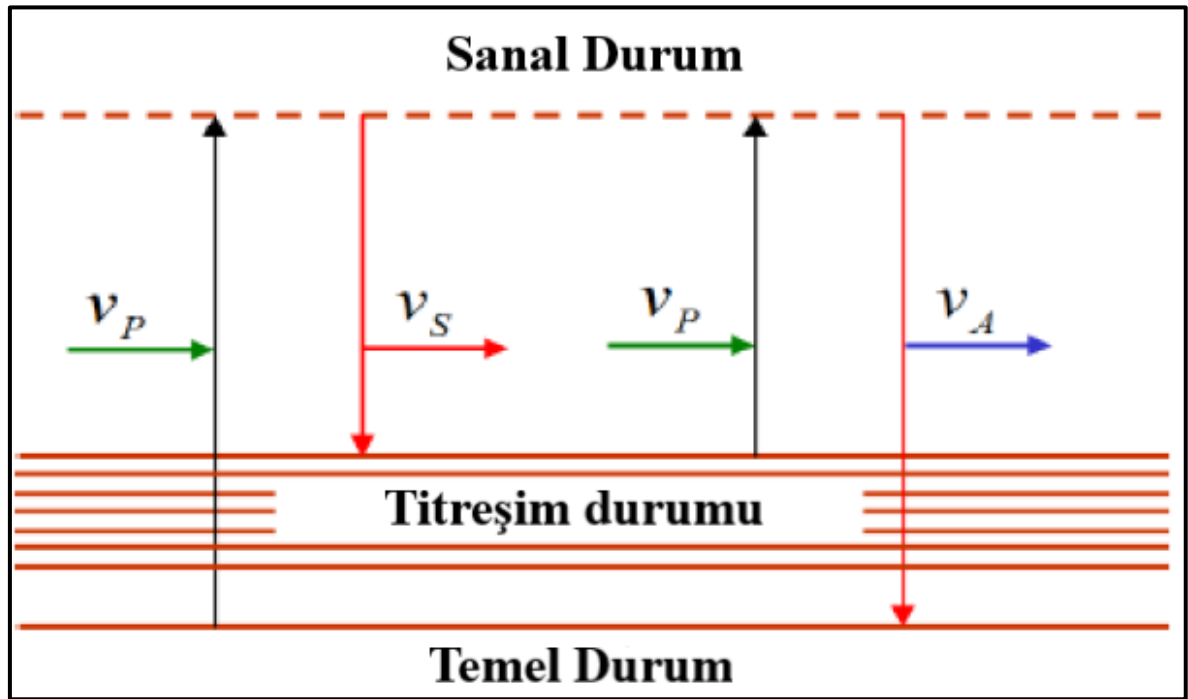
yoğun bir lazer ışığı gönderilirse, yüksek saçılma bileşeni meydana gelebilir ve gelen gücün %10' undan fazlası saçılma bileşenlerine aktarılır [48]. Eğer rastgele saçılan ışın kendi güç eşliğinden daha şiddetli olursa, ışın bir üst enerji seviyesine ulaşarak uyarılmış duruma geçmektedir. Bu tür doğrusal olmayan saçılma, 1962'de keşfedildi ve uyarılmış Raman saçılması olarak adlandırılır [49]. Raman saçılmasının genel olarak iki türü vardır. Stokes saçılımı, pompa ve sinyal arasındaki fark neticesinde bir üst enerji seviyesine geçen türdür. Anti-stokes saçılımı ise molekülün pompa fotonu soğurduğu durumda görülen türdür.

FRY' lerde ayırık (toplu) ve dağıtık olmak üzere iki tür Raman yükseltici sistemi bulunmaktadır. Dağıtık tip Raman yükselteç sistemleri, aktif bir ortam olarak taşıma optik fiberini kullanır. Eğer yükselteç, sistemin verici veya alıcı ucundaki bir kutuda yer alıyorsa buna ayırık Raman yükselteç denir. Bu iki yükselteç türü arasındaki diğer bir ayırt edici özellik, optik fiberin uzunluğudur. Tipik olarak, dağıtık Raman yükselteçleri 80 km' den uzun olarak modellenenirken, ayırık Raman yükselteçlerinde kullanılabilen optik fiber uzunluğu yaklaşık 5 km' dir.

Uyarılmış Raman saçılması, enerjiyi daha kısa dalga boyundan alıp daha uzun dalga boyuna aktaran bir mekanizmadır. Bu mekanizma, Raman yükseltecin zayıf bir optik sinyali başka bir dalga boyunda yükseltmek için bir pompa ışınından enerji çekebileceği anlamına gelir [50]. Raman etkisi, ışığın bir kısmının farklı bir dalga boyuna, genellikle daha uzun bir dalga boyuna kaydırılmasına neden olan, ışık ile bir malzeme arasındaki etkileşimdir. Kayma miktarı, otomatik titreşim gibi bir uyarımın malzemesine ve enerjisine bağlıdır. Uyarılmış Raman saçılması, optik fiberleri geniş bantlı Raman yükselticilere ve ayarlanabilir Raman fiber lazerlere dönüştürebilen önemli doğrusal (lineer) olmayan bir olgudur. Ayrıca, elde edilen saçılma gücünün bir kısmını bir dalga boyundan diğerine kaydırarak WDM iletişim sisteminin performansına olumlu yönde etki etmektedir.

Uyarılmış Raman saçılmasının temelinde, fotonlar ve malzemenin molekülleri arasındaki enerji alışverişi bulunmaktadır. Raman saçılmasının kuantum mekaniği açısından enerji diyagramı Şekil 3.7' de gösterilmiştir. Raman saçılması oluşturma işleminde, gelen frekans fotonu, bir molekülü temel durumdan sanal duruma uyarır. Daha sonra, bu molekül titreşim durumuna geri döner ve bir Stokes frekansı fotonunu serbest bırakır. Sanal durum ile titreşim seviyesi arasındaki enerji, zemin ve sanal durum seviyesi arasındaki enerjiden daha küçük olduğu için bu şekilde sonuçlanır. Aksine, anti-Stokes işleminde, uyarılmış molekül titreşim

seviyesi içinde olacaktır. Bu nedenle, anti-Stokes sinyalinin frekansından daha yüksek frekansta olur. Bununla beraber, Stokes dalgalarının foton yoğunluğu, anti-Stokes dalgaların yoğunluğundan kat kat daha yüksektir. Bunun nedeni, titreşim durumunun başlangıçta doğru enerji ve momentuma sahip bir fononla doldurulmasını sağlayan anti-Stokes işlemidir [51]. Bu sebeple FRY kapsamında yapılan birçok çalışmada anti-Stokes dalgaları, güçlerinin çok az olmasından dolayı göz ardı edilmektedir.

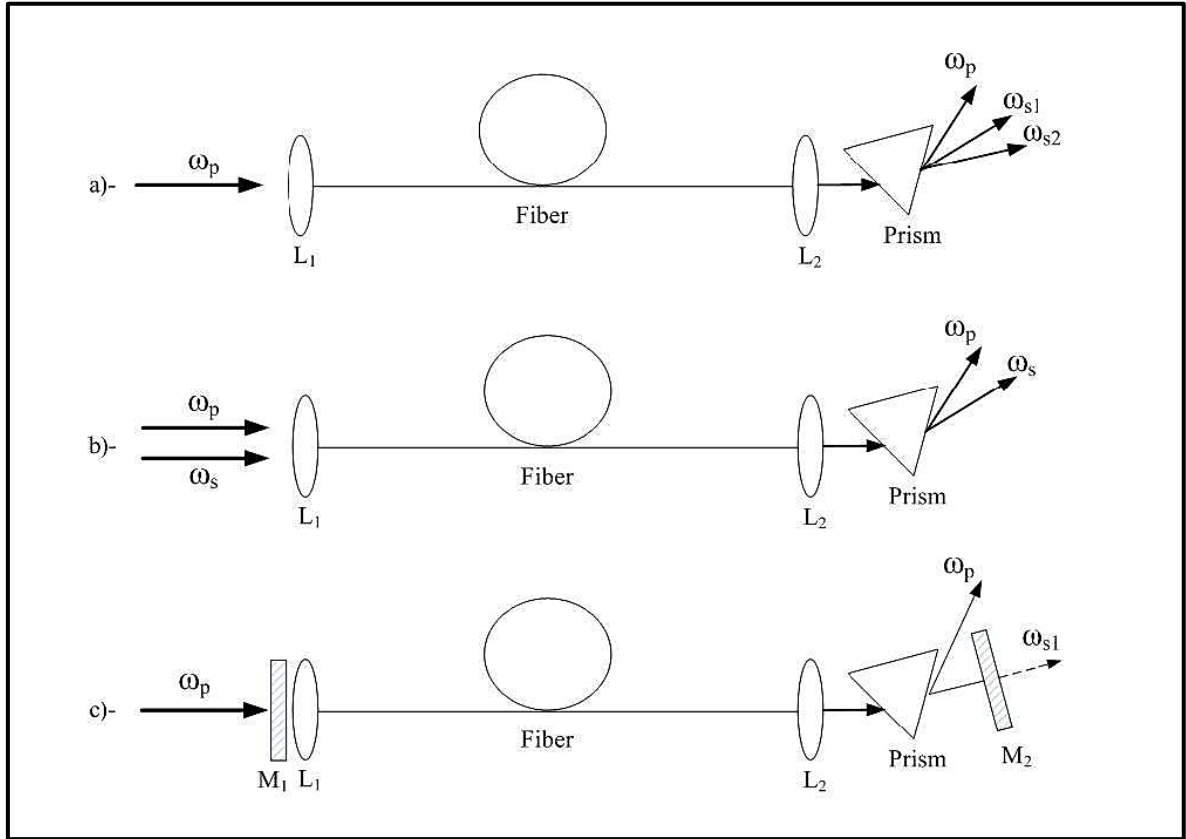


Şekil 3.7. Raman saçılmasının Kuantum mekaniği açısından enerji diyagramı

URS' yi tanımlayan klasik teori, basit bir iki atomlu molekül modelini kullanır. Atomun çekirdekleri, arasında bulunan bir yay modeli ile elektronik yük dağılımının bağlayıcı etkisine yaklaşır. Bu nedenle titreşim modu, sönümlenmeli basit bir harmonik osilatör olarak tanımlanabilir. Klasik teorelin temel varsayımı, molekülün optik polarize edilebilirliğinin sabit olmayıp, çekirdekler arasındaki mesafeye bağlı olmasıdır. Raman saçılma işlemi rezonanssız olmasına rağmen, uygulanan elektrik alan ile moleküler titreşim arasındaki etkileşim, polarize edilebilirliğin zaman içinde değişimi ve dolayısıyla kırılma indisinin de zaman içinde değişmesi vasıtasıyla gerçekleşir [52].

Fiber Raman yükselteçleri ve lazerleri (FRL), düşük kayıplı optik fiberlerin keşfinden bu yana tüm dünyada optik iletişimle uğraşan bilim adamları tarafından araştırma sahası olmuştur. Bu çalışmalar silika cam optik fiberde, uyarılmış Raman etkisinin

gözlemlenmesiyle hızlanmıştır. İlk çalışmalar, frekans dönüştürme için uyarılmış Raman saçılmasının kullanımına odaklandı. FRL, optik iletişimde Raman yükseltecini gösteren ilk deneylerde kritik bir rol oynamıştır [53].

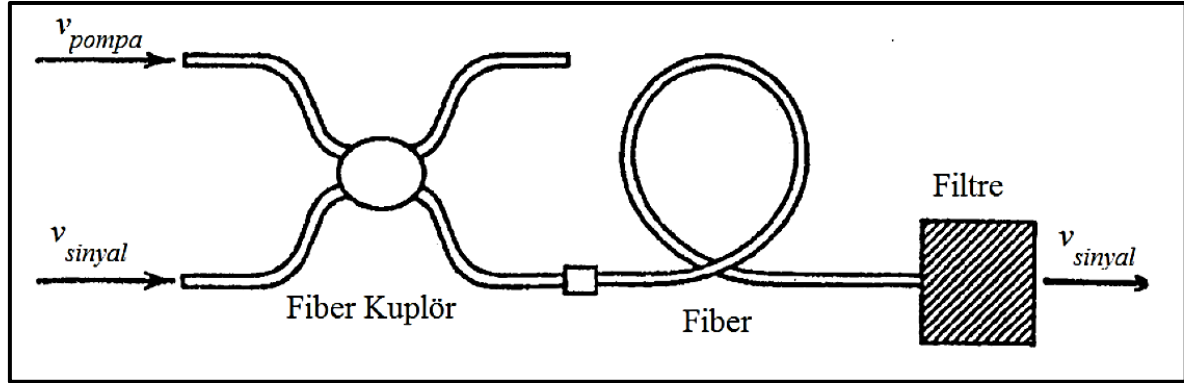


Şekil 3.8. Raman saçılmasının şematik görüntüsü, Uyarılmış Raman saçılması (a), Raman Yükselteç (b), Raman Lazer (c)

Şekil 3.8’ de, sırasıyla URS, FRY ve FRL süreci şematik olarak gösterilmektedir. Raman saçılımının verimli şekilde gerçekleşmesi için gerekli fiber gereksinimlerinden bazıları, düşük kayıplı, küçük etkili alana sahip ve uygun Raman spektrumuna sahip silika camdır. Etkileşim, orijinal iletim hattının parçası olmayan sınırlı fiber uzunluğu üzerinde gerçekleşirse, toplu Raman yükselteçleri (LRA) haline gelir. Dağıtık Raman yükselteçler kazanç ortamı olarak standart tek modlu fiberi kullanırlar. Bununla birlikte FRY’ ler tek başına veya LRA ile daha az gürültü oluşturur ve doğrusal olmayan etkiyi azaltır.

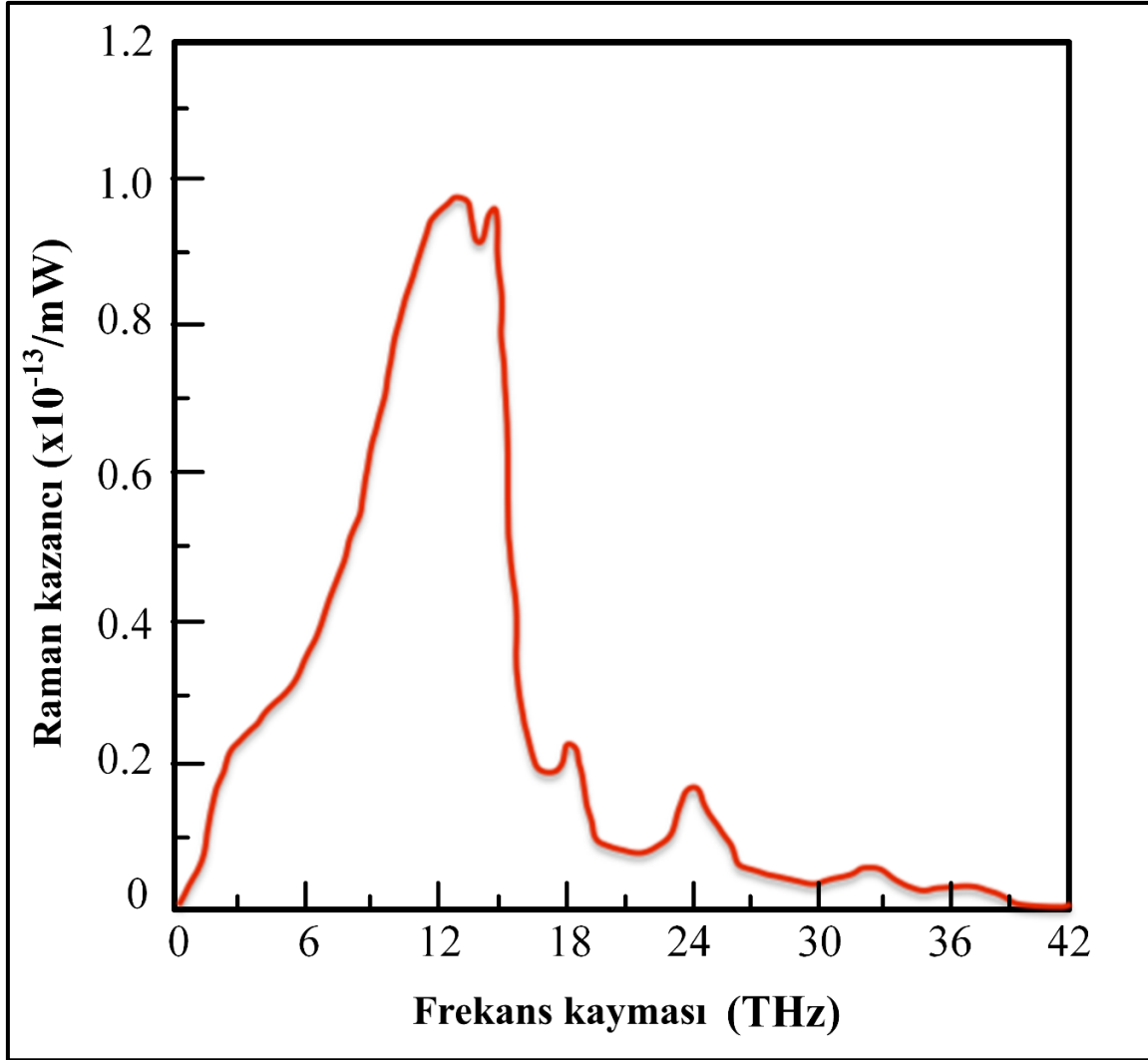
Raman yükselteç teorik yapısını pratikte kullanmak için ileri yönlü örnek kurulum Şekil 3.9’ daki gibi görülmektedir. Şekildeki ω_p ve ω_s frekanslarına sahip pompa ve optik sinyal ışınlarının kuplör kullanılarak optik fibere girişi sağlanır. Fibere enjekte edilen bu iki ışın

fiberde ilerlerken pompa ışınının enerjisi sinyal ışınına aktarılır. Bu sebeple, fiber içerisinde belirli zayıflama katsayısıyla ilerleyen sinyal, onlarca km ileriye hiç zayıflamadan hatta ışın gücü yükselerek ulaşabilmektedir. Fiberin çıkış ucuna ise istenmeyen dalgaların sönümlenmesi için filtre kullanılabilir [54].



Şekil 3.9. İleri yönde Raman kuvvetlendirici örnek tasarımı

Tüm optik fiberler içerisindeki katkı elementleri ve fiberin yapısal özellikleri (kesit, çap) bakımından birbirinden farklı olsa da, Raman kazanç spektrumları eşittir. Bu spektrum sadece pompa ve sinyal arasındaki frekans farkına bağlıdır. Bu frekans farkı 100nm (13 THz) dolaylarında ise, kazanç faktörü en yüksek seviyesine ulaşır. Bu durum Raman yükselteç tasarımı yapılmasında önemli rol oynar. Örnek vermek gerekirse, bir sinyal ve bir pompadan oluşan Raman kuvvetlendirici tasarımında en iyi kuvvetlendirme değerine ulaşmak için pompa ve sinyalin dalga boyu farkı 100nm (13 THz) civarında olmalıdır. Raman kazancı ve optik sinyal ve pompanın frekans farkı arasındaki ilişki Şekil 3.10' da sunulmuştur. Şekil dikkatli incelendiğinde, Raman kazancının 10^{-13} katsayısı ile çarpıldığı görülmektedir. Ayrıca Raman kazanç değerinin çift tepe şeklinde en yüksek değere 13THz frekans farkında ulaştığı açıktır. Bununla beraber, Raman kazanç değerinin sadece dar bir frekans bandında değil, yaklaşık 40 THz gibi çok uzun frekans bandında yükseltgenme yapabildiği açıkça görülmektedir. Bu durum Raman yükselteç tasarımının avantajını ortaya koymaktadır [55].



Şekil 3.10. Standart tek modlu optik fiber kabloya ait Raman kazanç katsayısı

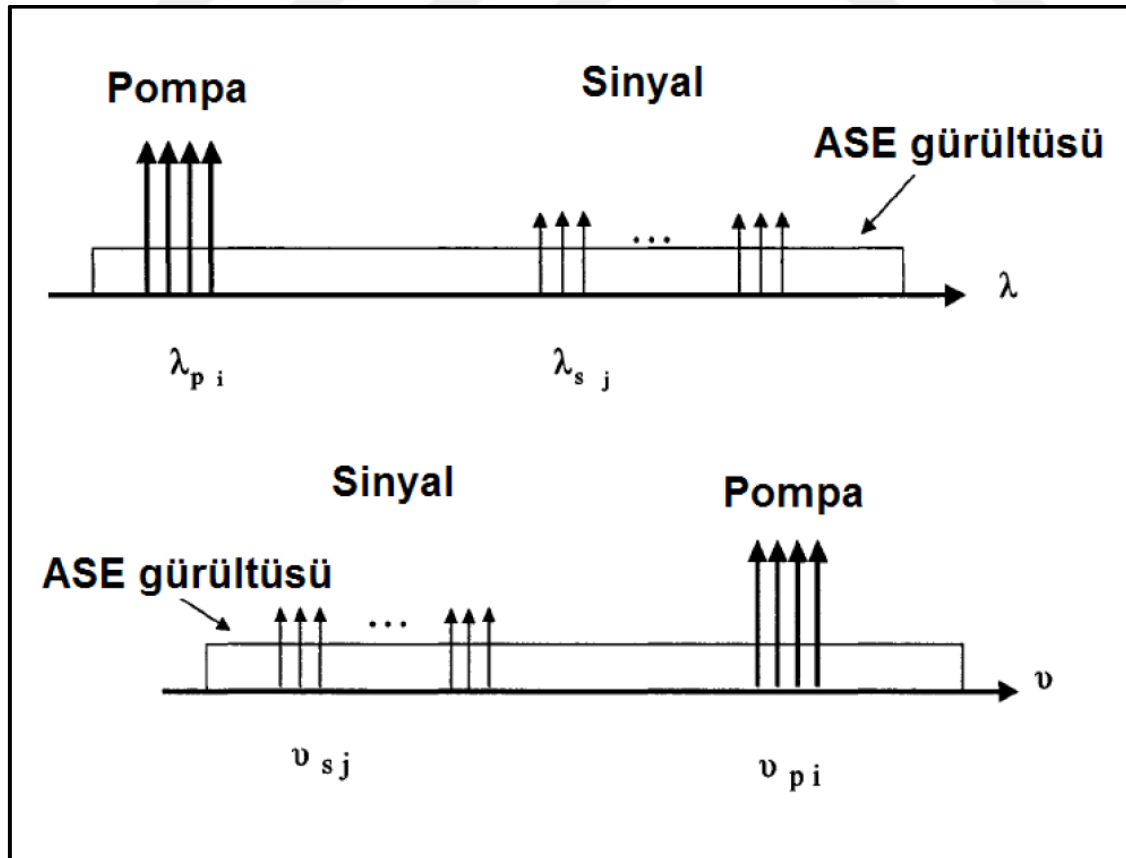
Raman kazancı polarizasyona bağlı olarak değişmektedir. Yani pompa ve sinyallerin birbirlerine göre polarizasyon durumları Raman kazancını etkilemektedir. Pompa ve optik sinyaller birbirlerine dik veya rastgele polarize olduklarında Raman etkileşimi olmayabilir. Bu durumda, optik sinyal ve pompalar birbirlerine paralel veya zıt olduğunda Raman etkileşiminin yüksek olduğu görülmüştür.

Raman kazancı, pompa ve optik sinyallerin birbirlerine göre zıt veya paralel olmasına bağlı değildir. Yani pompa ve sinyaller birbirlerine zıt yönde veya aynı yönde olabilir. Her iki durum için de Raman kuvvetlendirme sistemi tasarlanabilir. Her iki durumun kendine göre olumlu veya olumsuz yönde etkileri bulunmaktadır. Birinci durum için örnek vermek gerekirse, optik sinyal ve pompa güçlerinin aynı yönde ilerledikleri düşünüldüğünde yani

pompa ve sinyaller $z = 0$ noktasından $z = L$ noktasına beraber ilerlediklerinde, pompalar normalden fazla gürültü içermektedir. İkinci durum için örnek vermek gerekirse, optik sinyal ve pompa güçlerinin birbirlerine zıt yönde ilerledikleri düşünüldüğünde, yani pompalar $z = L$ noktasından $z = 0$ noktasına, sinyaller ise $z = 0$ noktasından $z = L$ noktasına ilerlemektedirler. Bu durumda pompalar fiberin zayıflama katsayısından etkilenmeyecek ve Raman performansında artış gözlenecektir [56]. Bu sebeple, alan yazında yapılan birçok çalışma ve tasarım, optik sinyal ve pompaların birbirlerine göre zıt yönde olduğu durumda yapılmıştır. Bu bağlamda, yapılan çalışmada optik sinyal ve pompaların birbirlerine göre zıt olduğu durum tercih edilerek bu yönde sistem tasarımı yapılmıştır.

3.3. Raman Yükselteç Denklemleri

Raman yükselteç sistemlerinde, sinyal ve pompa ışınlarının optik fibere girişleri sağlanır. Sinyal ve pompaların optik fiber içindeki hareketleri esnasında kuvvetlendirme oluşmaktadır. Şekil 3.11’ de sinyal ve pompaların frekans ve dalga boyları açısından görseli grafik olarak sunulmuştur.



Şekil 3.11. Sinyal, pompa ve ASE gürültüsünün dalga boyu ve frekans dağılımları

Grafikte pompalar optik fiberde ilerleme esnasında enerjilerini optik sinyallere aktarırlar. Böylece sinyallerin kuvvetlenmesi sağlanır. Bu sırada pompalar enerjilerini daha uzak dalga boylarındaki kanallara aktarırken güçleri tükenmektedir. Gerçek deney sistemlerinde birden fazla pompa (4-16) ve sinyal (80-100) aynı anda optik fiber üzerinde farklı kanallarda ilerlerler. Bu durumda, kısa dalga boyu kısa olan pompalar enerjilerini hem sinyallere hem de pompalara aktarırlar. Aynı zamanda, sinyallerin kendi arasında da enerji alışverişi olabilmektedir. Hesaplamalarda yukarıda bahsettiğimiz durumların hepsi yükselteç denkleminde dâhil edilir [57].

Geri yönde pompalı Raman yükselteç denklemi, lineer olmayan diferansiyel denklemden oluşur. Bu denklem pompadan-pompaya, sinyalden-sinyale, pompadan-sinyale etkileşimleri içermesinin yanında, Rayleigh ve ASE saçılmasını da içerir. Aşağıda Raman yükselteç denklemi Eş. 3.3' de sunulmuştur [58].

$$\begin{aligned}
 \frac{dP^{\pm}(z, v)}{dz} = & P^{\pm}(z, \mu) P^{\pm}(z, v) \left\{ \pm \sum_{\mu > v} \frac{g(\mu - v)}{K_{eff} A_{eff}} \mp \sum_{v > \mu} \frac{v g(v - \mu)}{\mu K_{eff} A_{eff}} \right\} \\
 & \mp 4hv\Delta v P^{\pm}(z, v) \sum_{v > \mu} \frac{g(v - \mu)}{K_{eff} A_{eff}} \left\{ 1 + \frac{1}{e^{\left(\frac{h(v-\mu)}{kT}\right)} - 1} \right\} \\
 & \mp \alpha(z, v) P^{\pm}(z, v) \\
 & \pm 2hv\Delta v P^{\pm}(z, \mu) \sum_{\mu > v} \frac{g(\mu - v)}{K_{eff} A_{eff}} \left\{ 1 + \frac{1}{e^{\left(\frac{h(\mu-v)}{kT}\right)} - 1} \right\} \\
 & \pm \epsilon(z, v) P^{\pm}(z, v)
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

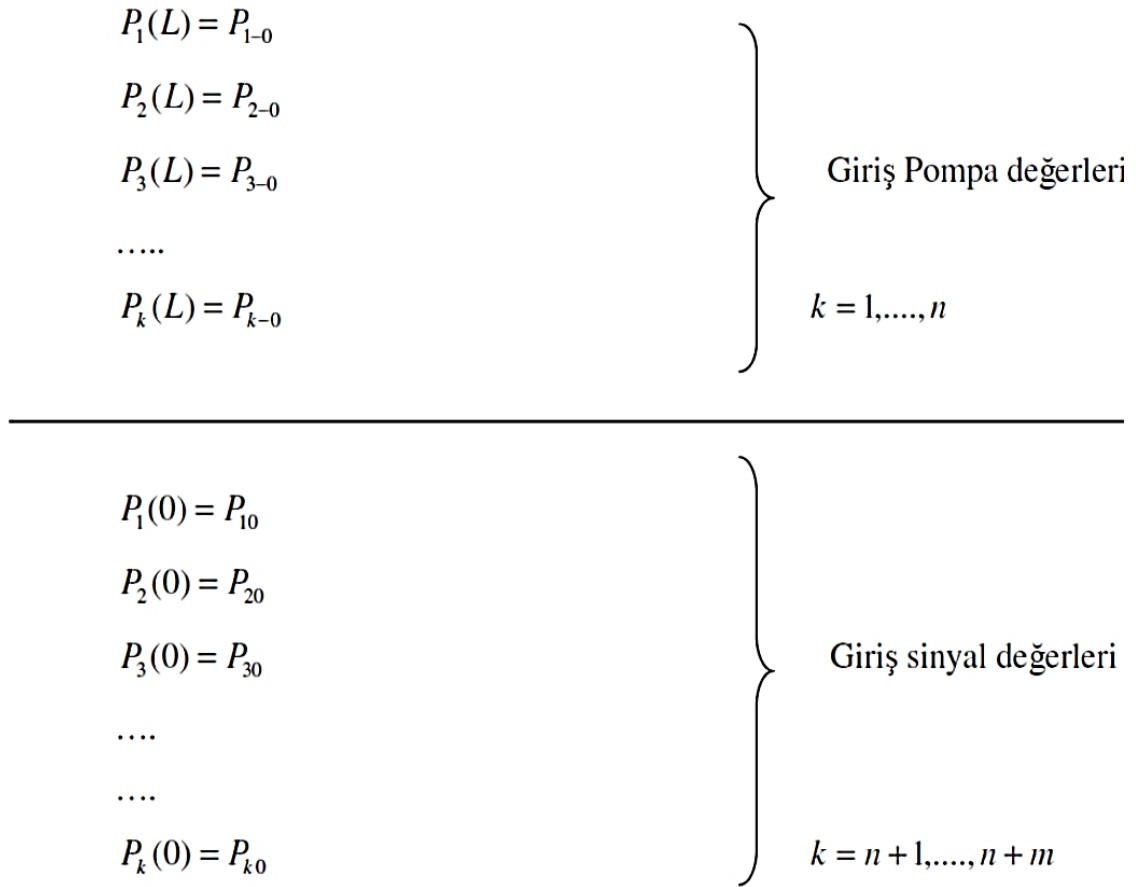
Denkleminde yer alan + ve - değerleri ileriye ve geriye doğru ilerleyen dalgaları temsil etmektedir. v ve μ sırasıyla sinyallerin ve pompaların frekanslarını ifade eder. $P(z, v)$ veya $P(z, \mu)$ v veya μ frekanslarındaki optik güçleri göstermektedir. $g(v - \mu)$ frekans ve pompa frekansları arasındaki kazancı, z ise fiber boyunu temsil eder. h ve k değerleri sırasıyla Plank ve Boltzman sabitini, T , α , ϵ , K_{eff} , A_{eff} ise sırasıyla sıcaklık, zayıflama katsayısı, Rayleigh saçılım katsayısı, polarizasyon faktörü ve optik fiberin etkin alan değerlerini ifade eder.

Ancak FRY modelinde en önemli etkilerin; pompa-pompa, pompa-sinyal etkileşimleri ve sinyal ve pompalara etki eden dalga boyuna bağlı zayıflama katsayısı olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple, hızlı ve etkili çözüm geliştirmek için Plank ve Boltzman sabiti, sıcaklık, Rayleigh geri saçılım katsayısı gibi etkisi çok sınırlı olan değerler denklemden çıkarılarak, basitleştirilmiş FRY denkleminin matematiksel eşitliği Eş. 3.4' de sunulmuştur [59].

$$\pm \frac{dP_k}{dz} = -\alpha_k P_k + \sum_{j=1}^{k-1} \frac{g_{vj}(v_j - v_k)}{\Gamma A_{eff}} P_j P_k - \sum_{j=k+1}^{m+n} \frac{v_j}{v_k} \frac{g_{vk}(v_k - v_j)}{\Gamma A_{eff}} P_j P_k \quad (3.4)$$

$k = 1,2,3,4 \dots \dots, n + m$

Yukarıda matematiksel denklemin lineer olmayan bir diferansiyel denklem olduğu açıkça görülmektedir. Denklemden öncelikle, sinyal dalga boylarının negatif olmaması için sinyaller azalan sırada birbirini takip etmelidirler. Bu sebeple, $j > i$ için $v_i > v_j$ olmalıdır. $k = 1,2,3,4 \dots \dots, n$ 'e kadar olan indisler $z = L$ noktasından $z = 0$ noktasına doğru geri yönde hareket eden pompa güçlerini ifade etmektedir. Pompa güçleri geri yönde hareket ettikleri için $-$ olarak denklemin başındaki katsayı ile ifade edilmiştir. $k = 1,2,3,4 \dots \dots, n + m$ 'e kadar olan indisler ise $z = 0$ noktasından $z = L$ noktasına doğru ileri yönde ilerleyen sinyal güçlerini ifade etmektedir. Sinyal güçleri ileri yönde hareket ettikleri için $+$ olarak denklemin başındaki katsayı ile ifade edilmiştir. $\alpha_k, P_k, P_j, v_k, v_j$ ise sırasıyla indis'e göre zayıflama katsayısı, pompa ve sinyal güçleri, pompa ve sinyal frekanslarını ifade etmektedir. Bununla birlikte Γ, A_{eff} sırasıyla polarizasyon faktörünü ve fiberin etkin alanını ifade etmektedir. Polarizasyon faktörü pompa ve sinyaller aynı yöne doğru hareket ediyorsa 1, karşı yöne doğru hareket ediyorsa 2 katsayısı ile çarpılmaktadır [60]. Raman yükselteç denkleminin çözümünün daha kolay anlaşılması için Şekil 3.12 aşağıda sunulmuştur.



Şekil 3.12. Pompa ve sinyal sayısına göre denklem çözümünün gösterimi

Yukarıdaki şekil incelendiğinde, yatay çizginin üzerindeki $P_1(L)$ ' den $P_k(L)$ ' ye kadar gösterilen kısım, fiber uzaklığına göre pompa güçlerinin değişimini gösterir. Yatay çizginin altında yer alan $P_1(0)$ ' dan $P_k(0)$ ' a kadar gösterilen kısım, fiber uzaklığına göre sinyal güçlerinin değişimini gösterir. Denklemi daha kolay anlayabilmek için öncelikle 1 pompa ve 1 sinyalden oluşan FRY diferansiyel denklemi düşünüldüğünde, pompa denklemi $k=1$ için:

$$\frac{dP_1}{dz} = +\alpha_1 P_1 + \sum_{j=2}^2 \frac{v_1}{v_2} \frac{g_R(v_1 - v_2)}{\Gamma A_{eff}} P_2 P_1 \quad (3.5)$$

Sinyal denklemi $k=2$ için:

$$\frac{dP_2}{dz} = -\alpha_2 P_2 + \sum_{j=1}^1 \frac{g_R(v_1 - v_2)}{\Gamma A_{eff}} P_1 P_2 \quad (3.6)$$

Eş 3.5 ve 3.6' daki gibi ifade edilebilir. Burada g_R Raman kazancı, v_1, v_2 sıra ile pompa ve sinyal dalga boyları α_1, α_2 sırasıyla pompa ve sinyalin zayıflama katsayısıdır. Γ pompa ve sinyal dalgalarının birbirlerine göre polarizasyon durumlarıdır. Her iki dalganın polarizasyon durumları birbirine paralel ise $\Gamma = 1$, zıt yönde polarizasyon durumları rastgele ise $\Gamma = 2$ 'dir. Bu durumda, birden fazla pompa ve sinyalden oluşan FRY denklemi için bu durumlar tek tek bulunarak hesaplanmalıdır [61].

4. İKİLİ ARAMA DENKLEMLİ ADAPTİF YAPAY ARI KOLONİSİ (İADAYAK) ALGORİTMASI

4.1. Optimizasyon Algoritmalarının Yapısı

Belirli şartlar ve kısıtlamalar altında en iyi sonuç alma süreci veya belirli şartlar altında bir fonksiyonun en çok veya en az olduğu değeri bulmak, alan yazında optimizasyon olarak adlandırılır. Optimizasyon problemi çözümünde, sınırlı çözüm uzayında amaç fonksiyonu değerini en büyük veya en küçük yapan değere odaklanılır. Gerçek dünyada karşılaştığımız problemlerin birçoğu karmaşık ve zor problemlerden oluşur [62]. Bu zor problemlerin çözümü için gelişen teknoloji paralelinde birçok algoritma geliştirilmiştir. Çözüm için geliştirilen algoritmalar genellikle Deterministik ve Sezgisel metotlar olmak üzere iki kategoride incelenebilir.

İlk kategori olan Deterministik çözüm metodu yaklaşımı genellikle probleme özel olarak geliştirilir. Bu sebeple her problemde uygulanabilirliği zayıftır. Ayrıca problemin çözümü için tek ve kesin çözüm üretme eğilimindedir. Yani bütün çözüm uzayını tarayarak tek ve kesin çözüme odaklanır. Bu bağlamda, hesaplama maliyeti problem durumuna göre çok fazla olabilmektedir. Ayrıca, bulduğu çözümlerin yerel en iyiye takılarak sekteye uğrama ihtimali fazladır [63].

İkinci kategori olan Sezgisel çözüm metodu yaklaşımı probleme kesin çözüm vermek yerine, doğru sonuca en yakın sonucu üretir. Bu sebeple, birçok probleme uygulamak kolay olduğu gibi aynı zamanda çözüm maliyeti de Deterministik yaklaşıma göre düşüktür. Çünkü tek çözümü bulmak için bütün çözüm uzayını dolaşmaktan ziyade, rassallık ilkesiyle az maliyetle etkili sonuçlar üretebilirler. Sezgisel algoritmalar alan yazında Meta sezgisel (MS) algoritmalar olarak da isimlendirilirler. Bu kavram, “üst seviye metot” anlamındaki “meta” ve “problem çözmek için yeni yöntem bulma” anlamındaki “heuristics” Yunanca kelimelerinin birleşiminden oluşur. Bu tür algoritmalar genelde mühendislik alanındaki problemlere çözüm ararlar ve genel olarak bazı ortak özelliklere sahiptirler [64]. Bunlar:

- Probleme özgü değildir. Tüm problemlere çözüm sunabilirler.
- Yapıları gereği rassal bileşenlerden faydalanırlar.
- Yerel en iyilerden kurtulma eğilimli olarak geliştirilirler.

- Kesin çözüm bulmayı garanti etmezler.

Meta sezgisel algoritmalar içerisinde Sürü zekâsı yaklaşımı, yani popülasyon temelli yaklaşım en fazla sayıda inceleme alanı oluşturmaktadır [65]. Bunun sebebi doğada sürü halinde hareket eden canlıların kollektif ve merkezi olmayan davranışlar göstermemesidir. Örneğin, karıncaların yiyecek kaynağı bulduktan sonra kolonide bulunan diğer karıncalara kaynak bilgilerini vererek en kısa yoldan kolonideki herkesin yiyeceklere yönelmesi gibi akıllı sayılabilecek davranışların tamamı bilim adamlarınca araştırılmaktadır. Sürü halinde hareket eden canlıların merkezi kontrol sistemleri yok denecek kadar azdır. Bununla birlikte, popülasyondaki her bir eleman basit kurallar kullanarak hareket eder. Bu araştırmalar neticesinde, sürü ve koloniler halinde yaşayan bu canlıların ortak özellikleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır [66].

- Sürülerde ve kolonilerde büyük ölçüde bireysel ajanlar homojen olarak dağılmıştır.
- Çok az sayıda merkezi koordinasyonlar işlem yaparlar.
- Eş zamanlı hareket sayısı fazlaca görülür.
- Sürüde yer alan bireylerin basit işler yapmaları
- İşbirlikçi olarak akıllı davranışta bulunmaları

Sürü ve koloniler bu ortak özellikleri kullanarak iş birliği içerisinde karmaşık davranışlar geliştirebilirler. Bunu yapabilmek için her bir birey sürekli etkileşim içerisinde olmaktadır. Bu etkileşimler neticesinde, her bir bireyin global bir bilgiye sahip olmadan yaptıkları basit davranışlar kendilerine yol göstermektedir. Sürü halinde yaşayan canlılar öz örgütlenme ve stigmerji olmak üzere iki iletişim türü kullanırlar [67].

Dinamik bir sistemin alt seviyede yer alan bileşenlerinin, birbirleriyle etkileşimi sonucunda ortaya çıkan yapının mekanizmalar kümesi öz örgütlenme olarak ifade edilir. Alt seviyede yer alan bileşenler, sistemin global düzeydeki bilgilerinden yoksun olmakla beraber, sadece yerel olarak elde ettikleri bilgiler ile hareket ederler. Sürüdeki bireyler yerel olarak elde edilen bilgiler sayesinde basit davranışlar göstererek, kolektif şekilde zeki davranışlar üretebilirler [68]. Öz örgütlenmeye örnek vermek gerekirse, doğadaki karınca kolonilerinin yiyecek bulma davranışları ile arıların kovanlarını inşa ederken yaptığı davranışlar öz örgütlenme olarak ifade edilebilir.

Karıncaların yiyecek aramada gösterdikleri akıllı davranışlar öz örgütlemenin alt unsuru olan pozitif geri beslemeye örnek gösterilebilir. Karınca, yiyecek aradığı sırada geçtiği yollara feromonu (pheromone) adında kimyasal bir madde salgılar [69]. Bir yiyecek kaynağı ile karşılaşan karınca yiyeceği bulduğu an hemen yuvasına geri döner. Dönerken de feromon izlerini bırakmaya devam eder. Yuvaya geldiğinde yuvadaki diğer karıncalar, yere bırakılan feromon izlerini takip ederek yiyecek kaynağına ulaşırlar. Bu karıncalar da diğer karınca gibi yiyecek kaynağına giderlerken geçtikleri yollara kimyasal feromon maddesini bırakırlar. Bu şekilde tüm karıncaların feromonları güçlü bir iz oluşturur. Güçlendirme ve izleri takip etme eylemi pozitif geri besleme olarak tanımlanabilir. Bununla beraber, tüm karıncaların yerel seviyede bıraktıkları izler global düzeye ulaşarak feromon ağı oluşturur [70].

Karınca kolonisinin yiyecek kaynağını tüketmesi sonucunda kaynağa giden karınca sayısında azalma gözlenmesi, negatif geri beslemeye örnek gösterilebilir. Bunun sonucunda, yola bırakılan kimyasal feromon izleri de azalmaya başlar. Böylelikle uzun bir zaman güçlendirilmeyen feromon izleri, buharlaşarak kaybolur. Bununla beraber, sürü şeklinde hareket eden canlıların davranışları rastgelelik barındırır [71]. Bu şekilde, daha önce keşfedilmemiş alanlar ve yiyecek kaynaklarının bulunma olasılığı artar. Buna örnek, yiyecek ararken yolunu kaybeden bir karıncanın rastgelelik ilkesi gereği yeni bir yiyecek kaynağı bulması ve bu bilgiyi pozitif geri besleme ile yuvada bekleyen diğer karıncalara haber vermesidir.

Sürüde yer alan bireyler sürekli etkileşim içerisindedirler. Bu etkileşim neticesinde, global düzeyde hareket etmek mümkün hale gelir. Bununla beraber, iletişim daha etkin olarak sağlanmaktadır [72]. Öz örgütlemeye doğrudan etkileşim söz konusudur. Doğrudan etkileşimde sürüdeki bireyler herhangi bir aracı olmadan birbirleri ile etkileşime geçerler. Buna örnek, bir yiyecek kaynağı bulan bal arısının kovana gelip sallanma dansı yaparak diğer bal arılarına bilgisini aktarmasıdır.

Sürü zekâsı algoritmaları, daha önce bahsedildiği gibi, doğada birlikte yaşayan ve akıllı davranışlar geliştiren hayvan ve böceklerden ilham alır [73]. Bakteri Yiyecek Arama Algoritması (Bacterial Foraging Optimization, BFO), Karınca Kolonisi Optimizasyon Algoritması (Ant Colony Optimization, ACO), Zıplayan Kurbağa Algoritması (Shuffled Frog Leaping Algorithm SFLA), Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması (Particle Swarm

Optimization, PSO) , Gri Kurt Optimizasyonu Algoritması (Gray Wolf Optimization GWO), Yapay Arı Kolonisi Algoritması (Artificial Bee Colony, ABC) ve Ateş Böceği Algoritması (Firefly Algorithm, FA) sürü zekâsı algoritmalarına örnek olarak verilebilir [74, 75].

4.2.Yapay Arı Kolonisi Algoritması (YAK)

Yapay Arı Kolonisi Algoritması (YAK) 2005 yılında doğadan ilham alan bilim insanı Derviş Karaboğa tarafından geliştirilen sürü zekâsı algoritmasıdır [76]. Bu algoritma bal arılarının zeki ve organize davranışlarından ilham alır. Algoritmanın bulunmasından sonra, farklı problem çözümünde başarı ile uygulanmıştır [77]. Bununla birlikte, farklı alanlardaki problemlere daha hızlı ve etkin çözümler bulması için bugüne kadar birçok defa bilim insanları tarafından algoritma üzerinde iyileştirmeler yapılmıştır. Bunlardan ilki, işçi arı ve gözcü arı adımlarının tek bir etkili arama denkleminin kullanılmasına dayanır. 2010 yılında, YAK algoritmasının yerel en iyiye takılmaması için bilim insanları tarafından algoritmada iyileştirmeler yapılmıştır [78]. 2011 yılında ise, bazı bilim insanları tarafından arama denklemi için rastgele çözümler üretmek yerine, popülasyonun o ana kadarki en iyi çözümü arama denklemine eklenmiştir [79]. Yine 2011 yılında, diferansiyel hesaplama algoritmasından ilham alan bilim insanları YAK algoritmasında yeni bir arama denklemi kullanmışlardır [80]. Ayrıca, 2012 yılında, orijinal YAK’ daki aday çözüm üretiminde kullanılan tek bir parametre değiştirme yaklaşımının problemi etkin çözmede yetersiz kaldığını iddia etmişlerdir [81]. Böylece, algoritmanın arama denklemini değiştirerek kâşif arı kısmındaki arama yeteneğini geliştirmişlerdir. 2014 yılında, bazı bilim insanları tarafından algoritmaya aday çözüm üretmek için işçi ve gözcü arı adımlarında ayrı arama denklemleri geliştirilmiştir [82]. 2011 yılında, Doğan Aydın tarafından, YAK algoritması öncelikli olarak artan sosyal öğrenme çatısı (Incremental Social Learning Framework, ISL) ile yerel arama algoritmaları birleştirilmiştir [83]. Sonrasında, 2017 yılında, YAK varyantlarının özelliklerini içinde barındıran ve bir otomatik yapılandırma aracı ile probleme özgü çözüm üretmesini sağlayan YAK-X isminde bir genelleştirilmiş algoritma çatısı önermişlerdir. Bu şekilde daha etkin çözümler elde etmeyi başarmışlardır [84].

Sürü zekâsı, doğada yer alan canlıların bir bütün olarak hareketleri sonucunda ortaya koydukları karmaşık davranışların bilgisayar sistemlerine modellenmesiyle ortaya çıkan tekniklerdir. Canlıların birlikte gösterdiği merkezi olmayan, öz-örgütlü ve bütünsel yapılar modellenerek bilim insanları tarafından problemlerin çözümlerinde kullanılmaya

başlanmıştır. Böylelikle, Sürü Zekâsı algoritmaları literatürde yer almaya başlamıştır [85]. Bu bağlamda, çok çeşitli sürü zekâsı algoritması geliştirilmiş ve literatüre sunulmuştur. Bunlardan biri, arıların yiyecek arama davranışından esinlenen Yapay Arı Kolonisi algoritmasıdır. YAK algoritmasında arıların bütün davranışları doğada oldukları gibi bire bir modellenmemiş ve bunun yanında da algoritma ile ilgili bazı ön kabullerde bulunulmuştur. Bu ön kabullerden biri, her bir besinin çıkarılmasında sadece bir görevli arının olmasıdır. Bu sebeple, algoritmada yer alan besin sayısı ile görevli arı sayısının birbirine eşit olduğu kabul edilir. Bir diğer ön kabul ise, günlük hayattaki sistemden farklı olarak işçi arı ile gözcü arı sayısının birbirine eşit olmasıdır. Böyle bir kabulde bulunulmasına rağmen, aslında bir besine gidip gelen arının görevli olduğu besin kaynağı tükendiğinde bu arının kâşif arı olarak görevini sürdürdüğü kabul edilir. Ayrıca, bir besinin kalitesi ne kadar yüksekse o kaynağın uygunluk değeri de o kadar iyidir. Yukarıda yer alan bu ön kabuller ışığında YAK algoritması ile optimum çözümün elde edilmesine çalışılır. YAK algoritmasının sözde kodu aşağıdaki gibi özetlenebilir [86].

- Başlangıç popülasyonu oluştur ve değerleri ilkle
- Bitiş koşulunu sağlayana kadar dön
- İşçi arı aşaması
- Gözcü arı aşaması
- Kâşif arı aşaması
- Döngü bitiminde hafızaya alınan en iyi değerleri döndür.

YAK algoritmasının ilk adımı olan değerlerin ilklendirilmesi adımı, algoritmanın kontrol parametrelerinin ayarlamaları yapılır. Çözümleri temsil eden yiyecek kaynağı sayısı, Kaynakların ömrünü temsil eden döngü sayısının bitiş değeri, bu parametrelerden bazılarıdır. Daha önce bahsedilmiş ön kabullerden olan popülasyonda yiyecek kaynağı sayısı kadar arı bulunmaktadır. Yiyecek kaynakları, aynı zamanda muhtemel çözümleri temsil ederek, D boyutlu vektör olarak gösterilirler. İlklendirme adımı, yer alan her x_i popülasyondaki çözüm olmakta ve arama evreninde düzgün dağılım yöntemiyle aşağıda yer alan Eş. 4.1 ile üretilir [88].

$$x_{i,j} = x_{i,j} + rand(0,1)(x_j^{max} - x_j^{min}) \quad (4.1)$$

Denklemden yer alan j problemde yer alan değişkenin başlangıç değerini, i ise yiyecek kaynağı içerisindeki başlangıç değerini ifade eder. x_j^{max} ve x_j^{min} x_i değerinin j yönündeki en yüksek ve en düşük değeri gösterir. $rand(0,1)$ ifadesi ise 0 ile 1 arasında random yani rastgele bir sayı üretir. Sonrasında rastgele atanan her bir çözüm için amaç fonksiyonunun değeri hesaplanır. Bu şekilde, algoritma bir kez döngüye girer. Sonuçta üretilen çözüm değeri en iyi veya en kötü olarak hesaplanmaya çalışılır. Her çözümün deneme sayısı ilkendirme aşamasında bir değişkenle belirlenir ve değişken değeri 0' dan başlar [89].

YAK algoritmasının ikinci adımı olan işçi arı adımında, problemin boyutuna bağlı olarak aday çözümlerin her biri uygulamaya alınarak çözümlenir ve iyi olan aday çözümler dikkate alınır. Her bir yiyecek kaynağı işçi arılar ile yeni bir yiyecek kaynağına dönüştürülür. Bunu yaparken x_i ' nin bir boyutu olan j sayısına farklı bir sayı atanarak, yeni oluşturulan Eş. 4.2 ile yeni aday çözüm üretilir [90].

$$\hat{x}_{i,j} = x_{i,j} + \phi_{i,j}(x_{i,j} - x_{r,j}) \quad (4.2)$$

Denklemden j ifadesi $\{1,2,3...D\}$ olarak rastgele bir sayıyı ifade eder. $\phi_{i,j}$ ifadesi 1 ile -1 aralığında rastgele bir sayıyı gösterir. $x_{r,j}$ ise rastgele seçilen sayıların oluşturduğu yeni bir çözümü ifade eder. Bu yeni oluşturulan çözüm dikkate alınarak yukarıdaki denklem yardımıyla yeni amaç fonksiyon değeri (f_i) belirlenir. Eğer yeni amaç fonksiyon değeri eskisinden daha iyi çözüme sahipse o çözüm değeri seçilir, eğer değilse *trial* değeri 1 artırılır.

YAK algoritmasının üçüncü adımı olan gözcü arı adımında, bulunan tüm çözümlerin kalitesi değerlendirilir. Sonrasında, bu adımda belirli amaç fonksiyonuna göre yeni aday çözüm üretilir. İşçi arı adımı ile gözcü arı adımı arasındaki fark, aday çözümlerinin birbirinden farklı olmasıdır. Bu adımda farklı çözümler üretilirken, işçi arı aşamasından farklı olarak, kaynağın kalitesi belirli bir olasılıkla seçilir. Bu sayede, gözcü arılar yiyecek kaynağının kalitesine göre Eş. 4.3' te yer alan bir olasılıkla yiyecek kaynaklarına giderler [91].

$$p_i = \frac{1}{1 + f(x_i)} \quad (4.3)$$

$$\sum_i^N \frac{1}{f(x_n)}$$

Denklemde p_i aday çözümün olasılık değerini temsil eder. f_i ise x_i 'nin amaç fonksiyon değeri olarak değerlendirilir. Aday çözüm değeri Eş. 4.4' te yer alan fonksiyon ile hesaplanır.

$$fitness_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + f(x_i)}, & f(x_i) > 0, \\ 1 + abs(f(x_i)), & f(x_i) < 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

Bu denklem sayesinde, yüksek kaliteli çözümlerin seçilme olasılığı daha yüksek olmaktadır. Bu şekilde gözcü arılar daha kaliteli çözümlere ulaşırlar. Döngü tekrar ettiğinde, artık işçi arı aşamasında daha kaliteli yiyecek kaynağı içerisinde seçimler yapılır [92].

YAK algoritmasının son adımı olan kâşif arı adımında, aday çözümlerin birçok defa ziyaret edilmesi sonrası *limit* değeri kadar iyileşme sağlanmazsa aday çözümler bu adımda terk edilir. Bu durumda, yeni aday çözüm rastgelelik ilkesiyle üretilerek tüm arama uzayı taranmış olmaktadır. Bu şekilde algoritmanın arama yeteneği artırılmış olur.

4.3.YAK İyileştirme Çalışmaları

YAK algoritması ve buna benzer algoritmaların problemten bağımsız en iyi sonuç vermeleri için bilim insanları uğraş vermektedir. Bu şekilde, algoritmanın kalitesini artıracak etmenler algoritmaya dâhil edilirler. Bunu yaparken uygulanan yöntemlerden birisi, farklı algoritmaların iyi yönlerini kendi algoritmamıza uyarlamaktır. Bu sayede, kendi algoritmamızın performansı artırılmış olur. Bunu yaparken algoritmaya dışarıdan parametre göndermek, başvuru en sık yöntemlerdendir. Bu parametreler de kontrol ve yapılandırma parametreleri olmak üzere iki yöntemle incelenebilir [93].

Kontrol parametreleri isminden anlaşılacağı üzere aday çözümlerin algoritmaya nasıl gireceği ile ilgilidir. Mesela ağ topolojilerinde kullanılan mesh, yıldız, ring... gibi yapılar aday çözümlerin seçilmesinde kullanılabilir. Bu seçim yollarının algoritmanın performansında önemli etkileri bulunmaktadır [94]. Genellikle kontrol parametreleri, algoritma ilk çalışacağı zaman veya algoritma çalışmaya başlamadan verilmektedir. Ancak YAK tipi algoritmalar rassal temele dayandıkları için, algoritma çalıştırılmadan olumlu veya olumsuz katkı verdiğini anlamak güçtür. Bundan dolayı, algoritma çalışmaya başlamadan önce, parametrelerin değerleri belirli yöntemle değiştirilmelidir [95]. Bu yöntemlerden ilki,

deterministik yöntem olup algoritmanın çalışma süresi, problemin zorluğu ve kontrol mekanizması yardımı ile önceden belirlenebilmektedir. Bu yöntemlerden ikincisi, uyarlanabilir parametre kontrolü olup, algoritmanın arama süresi geri besleme olarak giriş parametrelerinin güncellenmesine yardımcı olur [96]. Bu yöntemlerden sonuncusu, kendinden uyarlamalı parametre kontrolü olarak isimlendirilir. Bu yöntemde, parametreler dışarıdan değil de algoritmanın kendisine dâhil edilir. Örnek vermek gerekirse, oluşturulan parametreler YAK algoritmasında birer yiyecek kaynağı olarak bulunur. Böylece, algoritma çalışırken parametreler de aday çözümlere göre şekillenir.

Yapılandırma parametreleri içerisinde en sık kullanılan yaklaşım, otomatik parametre yapılandırma yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır [97]. Bu yaklaşım bazı parametre araçlarından oluşmaktadır. Bu araçlardan ilki, Parametre Yinelemeli Yerel Arama yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda parametre yapılandırma uzayı yinelemeli yerel arama tekniği (Iterated Local Search, ILS) kullanılarak taranır. İlkendirme adımında, varsayılan ve rastgele ayarlar birleşim yöntemi kullanılır [98]. Bununla beraber, yaklaşım tek komşu değişim tabanı kullanır. Böylece aynı anda sadece tek bir kontrol parametresinin değeri değiştirilir. Bu tür parametrelerin kategorik olarak tanımlanması gerekmektedir.

Bu araçlardan ikincisi, Sıralı Model Tabanlı algoritma yapılandırmasıdır [99]. Parametre yapılandırmalarının performanslarını tahmin etmek için bir vekil model (SM) kullanılarak yapılandırma gerçekleşir. SM modeli, regresyon ve sınıflandırma için standart bir makine öğrenme aracı olan Rastgele Orman algoritmasına (RFA) dayanmaktadır. ILS' nin aksine bu yaklaşım reel sayı değeri veya kategorik parametreleri desteklemektedir. Parametreleri belirlenmeye çalışılan algoritmanın, her bir çalışmasına ait maksimum zamanı dinamik olarak kontrol edilir. Ayrıca, kötü yapılandırmaları daha önceden tahmin eden bir mekanizmaya sahiptir [100]. Böylelikle, algoritmanın hesaplama zamanı en aza indirilmektedir.

Bu araçlardan üçüncüsü, Alaka Tahmini ve Parametrelerin Değer Kalibrasyonu yapılandırmasıdır [101]. Bu yapılandırma, parametrenin dağılımlarını tahmin etmek için operatörlerden faydalanır. Bunun yanında, parametre yapılandırılmalarından oluşan bir popülasyon tahmin edici olarak çalışır. Ayrıca, iterasyonlar boyunca Mutasyon ve çaprazlama adımları kullanılarak parametre yapılandırmaları iyileştirilmeye çalışılır. Fakat alaka tahmini yöntemi, sadece sürekli parametrelerin olduğu yapılar ile çalışır.

Bu araçlardan sonuncusu, F-race ve yinelemeli F-race yapılandırmalarıdır [102]. F-race yapılandırma yaklaşımı, bir aday yapılandırma kümesi içerisinde seçim yapma mantığına dayanır. Bu şekilde, en iyi değere sahip olan yapılandırma yarışma yöntemi ile belirlenir. Bu yöntemin temelinde Friedman'ın parametrik olmayan iki yönlü varyans analiz testi yer alır. F-race yapılandırmasının ilk adımını, rastgele yapılandırmalar oluşturur. Bu değerler bir problem seti üzerinde denemeler yapılarak bulunur [103]. Sonrasında, en kötü değere sahip yapılandırmalar belirlenerek ve değerler Friedman'ın parametrik olmayan iki yönlü varyans analiz testi kullanılarak elenir. Yapılan test neticesinde, var olan yapılandırmalar arasında istatistiksel olarak doğrusal veya doğrusal olmayan bir ilişki olup olmadığı saptanır. Eğer doğrusal olmayan ilişki varsa, bu ilişkilere sahip yapılandırmalar aday yapılandırmalardan çıkartılır. F-race adı verilen yarış, sonuçta yalnız bir tek yapılandırma adayı kalana kadar çalışmaya devam eder. Yukarıda detaylı anlatılan eleme işlemi sonucunda yapılandırma seçimi sonuçlandırılarak, en iyi değere sahip olan yapılandırma değeri belirlenmiş olur.

Yinelemeli F-race (Iterated F-race) yaklaşımı ise kısaca, F-race yapılandırma yaklaşımı yönteminin tekrarlı uygulanması olarak tanımlanabilir [104]. Yinelemeli F-race yaklaşımı her iterasyon adımında, en iyi yapılandırmayı seçerek, geriye kalan son yapılandırma etrafında yeni bir yapılandırma kümesi oluşturur. Böylelikle, en iyi değere sahip olan yapılandırma geliştirilmiş olur. Bu adımlardan sonra, F-race yöntemi tekrar uygulanarak yinelemeli F-race yapılandırmasının bitme kriteri olan maksimum algoritma çalıştırma sayısına ulaşılan kadar döngü devam eder. Gerekli elemeler sonucu geriye kalan son yapılandırma değerleri, en iyi yapılandırma sonucu olarak belirlenir [105].

4.4. İkili Arama Denklemleri Adaptif Yapay Arı Kolonisi (İADAYAK) Algoritması

YAK algoritması için önerilen arama denklemlerinin bir kısmı odaklanmayı güçlendirirken bir kısmı da çeşitlendirmeyi güçlendirir. Adaptif arama denklemleri stratejisini kullanmak için de bu iki davranışı güçlendirecek iki örnek arama denklemleri kullanılmıştır. Bu arama denklemleri Eş. 4.5' deki gibidir:

$$\begin{aligned} 1. v_{i,j} &= x_{i,j} + [-\partial, +\partial](x_{r1,j} - x_{r2,j}) \\ 2. v_{i,j} &= x_{gb,j} + [-\partial, +\partial](x_{i,j} - x_{r1,j}) \end{aligned} \tag{4.5}$$

Burada $x_{r1,j}$ ve $x_{r2,j}$ rastgele seçilen iki çözümün j . değişken değeri, $x_{gb,j}$ o ana kadar bilinen en iyi çözümün j . değişken değeri, ∂ parametresi ise ölçeklendirme faktörüdür. 1. arama denklemi rastgele çözümlere yönlendirdiği için çeşitlendirmeyi güçlendirirken, 2. arama denklemi en iyi çözüme yönlendirdiği için odaklanma davranışına katkı sağlar. Ayrıca, her iki denklemi kullanarak birden çok boyutu değiştirebilmek mümkündür. Yani klasik arama denklemlerinde sadece j . boyut değiştirilmekte iken önerdiğimiz yaklaşımda bu seçeneğin yanında birden çok boyutun ve tüm boyutların değiştirilmesi mümkün hale getirilmiştir. Bu durum, değişikliğin sıklığı (ds , $1 \leq ds \leq D$) parametresi ile belirlenmektedir.

Önerdiğimiz arama denklemi belirleme stratejisinde, her bir problem için uygun ds değerini ve arama denklemini adaptif bir şekilde belirlemek için, rastgele oluşturulmuş bir arama denklemleri listesi önerilmiştir. Listedeki her satır, üç sütunlu bir yapı olarak tasarlanmıştır. İlk sütun bir arama denklemi içerir, ikinci sütun ds değerini içerir ve üçüncü sütun, karşılık gelen satır arama denkleminin başarı değerini içerir. 7 satırlı örnek bir liste yapısı Çizelge 4.1'de gösterilmektedir. Çizelge 4.1'de gösterildiği gibi, her satır farklı arama denklemi karakteristiğini ve dolayısıyla farklı arama yeteneğini temsil eder. Listenin her satırındaki denklem, sırayla algoritmanın her iterasyonunda (işçi arı ve gözlemci arı adımlarında) kullanılır. Eğer bir arı ilgili denklemi kullanarak bir çözümü iyileştirirse, ilgili satırdaki denklemin başarı sayısı bir artırılır ve işçi ve gözlemci arı adımları sonundaki toplam iyileştirme miktarı hesaplanır. Daha sonra ilgili satırdaki arama denkleminin başarı değeri aşağıdaki Eş. 4.6 kullanılarak güncellenir;

$$BD_t = BD_t \frac{Itr}{MaxItr} + IM_t \quad (4.6)$$

Burada BD_t t . satırdaki başarı değerini, Itr algoritmanın o anki iterasyon değerini, $MaxItr$ maksimum iterasyon sayısını ve IM_t t . satırdaki iyileşme miktarını ifade eder. Denklemden de görüldüğü gibi BD_t 'nin her güncelleme sırasında önceki değerinin bir kısmı azaltılır. Bu azaltma oranı iterasyonlar devam ettikçe azalır. Böylece ilk iterasyonlarda yanıltıcı olabilecek başarımların etkisi azaltılmış olur. Örnek bir arama denklem listesi Çizelge 4.1' de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Örnek bir arama denklemi listesi

Arama Denklemi	ds	Başarı Değeri (BD)*
$v_{i,j} = x_{i,j} + [-\partial, +\partial](x_{r1,j} - x_{r2,j})$	1	0
$v_{i,j} = x_{gb,j} + [-\partial, +\partial](x_{i,j} - x_{r1,j})$	3	0
$v_{i,j} = x_{gb,j} + [-\partial, +\partial](x_{i,j} - x_{r1,j})$	7	0
$v_{i,j} = x_{i,j} + [-\partial, +\partial](x_{r1,j} - x_{r2,j})$	2	0
$v_{i,j} = x_{i,j} + [-\partial, +\partial](x_{r1,j} - x_{r2,j})$	D	0
$v_{i,j} = x_{gb,j} + [-\partial, +\partial](x_{i,j} - x_{r1,j})$	4	0
$v_{i,j} = x_{gb,j} + [-\partial, +\partial](x_{i,j} - x_{r1,j})$	D	0
* Başarı değeri her satır için başlangıçta sıfır (0) olarak kabul edilir.		

Listedeki tüm arama denklemleri işçi ve gözlemci arılar tarafından kullanıldığında, listedeki denklemler başarı değerlerine göre azalan düzende sıralanır ve listenin boyutu (lb) aşağıda yer alan Eş. 4.7 kullanılarak küçültülür.

$$lb = \begin{cases} 2 & \text{Eğer } lb < 2 \text{ ise} \\ \left\lfloor lb * \frac{MaxItr - Itr}{MaxItr} \right\rfloor & \text{Aksi durumda} \end{cases} \quad (4.7)$$

Bu yaklaşım ile, yalnızca iki uygun arama denklemi kalana kadar liste daraltılır. Böylece, ele alınan problem için sadece uygun arama denkleminin adaptif olarak seçilmesi algoritmanın çalıştırılması sırasında sağlanmış olur. “İkili Arama Denklemli Adaptif Yapay Arı Kolonisi (İADAYAK)” adını vermiş olduğumuz algoritmanın sözde kodu Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. İADAYAK algoritmasının sözde kodu

1: Başlangıç()
2: while sonlandırma kriterine gelene kadar do
3: İşçiArıAdımı()
4: GözcüArıAdımı()
5: KaşifArıAdımı()
8: if Arama denklemi listesindeki tüm denklemler kullanılmış then
9: Listeyi daralt
10: end if
11: end while

```

12: en iyi çözümü döndür
13:
14: function Başlangıç()
15:   İADAYAK' nin parametrelerini ayarla ve arama denklemi listesini rasgele
    oluştur
16:   Başlangıç popülasyonunu rastgele oluştur
17:    $X_i$  çözümlerine göre fitness ( $f_i$ ) fonksiyonunu hesapla
18: fonksiyonu bitir
19:
20: function İşçiArıAdımı()
21:   for 1'den i ye kadar Aramaİşlemi( $X_i$ ) do
22:     end for
23: fonksiyonu bitir
24:
25: function GözcüArıAdımı()
26:   her çözümün ( $p_i$ ) olasılık değerini hesapla
27:   for 1'den i ye kadar do
28:     rastgele değer belirle  $r = \text{random}(0,1)$ 
29:     if  $r < p_i$  then Aramaİşlemi( $X_i$ )
30:     end if
31:   end for
32: fonksiyonu bitir
33:
34: function Aramaİşlemi( $X_i$ )
35:   listeden  $t$  sıradaki arama denklemini seç
36:    $t$  kullanarak  $V_i$  'leri üret
37:    $V_i$  nin fitness değerini hesapla
38:    $X_i$  ve  $V_i$  arasında aç gözlü seçimi uygula
39:   if  $V_i > X_i$  then
40:      $t$  değerlerini başarılı şekilde güncelle
41:      $deneme = 0$ 
42:   else
43:      $deneme = deneme + 1$ 

```

```

44:   end if
45: fonksiyonu bitir
46:
47: function KaşifArıAdımı()
48:   if  $\max(deneme_i) > Limit$  then
49:        $X_i$ ' yi yeniden ilkle
50:   end if
51: fonksiyonu bitir

```

Algoritmanın parametreleri başlatma adımında ayarlanır. Popülasyon büyüklüğü, çözümlerin ömrünü gösteren limit değeri ve algoritmanın sonlandırma kriteri bu parametrelerdir. Her potansiyel çözüm, optimize edilmesi gereken değişkenlerin değerlerini temsil eden bir dizi D-boyutlu vektörden oluşur. Başlatma adımında, popülasyondaki her bir çözüm (x_i), aşağıdaki Eş. 4.8' de yer alan denklem kullanılarak rastgele tek tip olarak üretilir:

$$x_{i,j} = l_j + rand(0,1)(u_j - l_j) \quad (4.8)$$

Burada $j(1 \leq j \leq D)$ problem değişkeninin indeks numarasıdır u_j ve l_j sırasıyla j . değişkenin üst ve alt sınırlarıdır. Daha sonra, her çözümün amaç fonksiyonunun değeri belirlenir. Algoritmanın geri kalan adımlarında her bir çözüm minimize edilmeye çalışılır. 0 olarak ilklendirilen $trial_i$ parametresi, her x_i çözümündeki başarısız girişimlerin miktarını saklar.

İşçi arı adımında, her görevli arı, sorumlu olduğu v_i çözümünden türetilen bir aday çözüm v_i üretir. Çalışmada sunduğumuz uyarlamalı arama denklemi tekniği, v_i çözümünü üretirken uygulanacak arama denklemini belirlemektedir. Daha sonra, yeni aday çözümün amaç fonksiyon değeri belirlenir. Bir aday çözüm bir referans çözümden daha iyi performans gösterdiğinde, referans çözüm değiştirilir ve arama denkleminin başarısı bir artar. Değilse, referans çözümün başarısız deneme değeri $trial_i$ bir artırılır.

İşçi arılar basamağında, tüm çözümler değerlendirildikten sonra gözcü arı basamağında bulunan en iyi çözümler kullanılır. Her gözcü arı, işçi arıdan farklı olarak, her bir çözümün

seçim olasılık değerine bağlı olarak rastgele bir seçim kuralına göre ziyaret edeceği çözümü seçer. Her çözümün seçim olasılığı değeri, p_i , aşağıdaki Eş. 4.9' daki gibi hesaplanır:

$$p_i = \frac{\frac{1}{1 + f(x_i)}}{\sum_{n=1}^{SN} \frac{1}{1 + f(x_n)}} \quad (4.9)$$

Seçim olasılığı kuralı kullanılırken yüksek kaliteli çözümlerin seçilme olasılığı daha yüksektir. İşçi arı adımıyla uygulanan arama prosedürü, gözcü arı çözüme eriştiğinde izlenir. Referans çözümün seçimi, işçi arılar ile gözcü arılar arasındaki tek farktır.

$trial_i$ değeri, x_i çözümü için sınır değerine eşit olduğunda, çözüm ziyaret sınırına ulaşır. İşçi arı aşamasındaki aday çözüm fonksiyonu kullanılarak, limit değere ulaşan çözümler popülasyondan elenir ve kâşif arı tarafından bulunan rastgele oluşturulmuş yeni bir çözüm popülasyona eklenir. Kâşif arı adımının amacı, algoritmanın daha iyi keşif yapmasını sağlamaktır. İADAYAK algoritmasının standart YAK algoritması ile farkları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Standart YAK algoritmasındaki iyileştirmeler sayesinde İADAYAK algoritması, daha verimli aday çözümlere hızla yönelerek ve durgunluktan kaçınarak daha hızlı pompa gücü ve dalga boyu çözümleri üretir.
- İADAYAK algoritması, önerilen ikili arama denklem sistemi ile algoritmanın yoğunlaştırma ve çeşitlendirme davranışını uyarlamalı olarak dengeler ve algoritmanın durgunluk olmadan global optimum noktalara daha hızlı yakınsamasına yardımcı olur.
- Metasezgisel yaklaşımlarda iyi sonuçlar elde edebilmek için algoritmanın parametrelerinin doğru ayarlanması gerekir. Algoritmaların literatürde varsayılan parametre değerleri olmasına rağmen, bunlar genellikle diğer problemler veya uygulama koşulları dikkate alınarak seçilir. FRY denkleminin çözümünde, bilim insanları en iyi pompa gücü ve dalga boyu çözümlerine ulaşırken algoritmalarda varsayılan parametre değerlerini kullanmışlar ya da parametrelerin uygun değerlerini manuel çaba ile belirlemişlerdir. Bununla birlikte, manuel parametre ayarlama yönteminin birkaç dezavantajı vardır. Birincisi, insan çabası açısından çok zaman alır. İkincisi, sıklıkla

sezgilere ve kişisel deneyime dayandığı için önyargıya tabidir. İADAYAK algoritmasında, algoritma parametrelerinin uygun değerleri, verilen optimizasyon problemi örneğine göre algoritma çalışması sırasında insan çabası olmadan uyarlanabilir bir şekilde belirlenebilir.





5. MATLAB BVP ÇÖZÜCÜ

Daha önceki bölümlerde anlatıldığı üzere, FRY denkleminin analitik olarak çözümü bulunmamaktadır. Bu durumda, birden fazla pompa ve sinyal içeren FRY denklemi nümerik olarak çözümlenmelidir. FRY sistem tasarımında pompa ve sinyaller sistem performansının artırılması için birbirlerine zıt yönde konumlandırılmıştır. Bu sebeple, FRY problemi nümerik analiz yöntemlerinden sınır değer problemi olarak tanımlanıp çözümlenmelidir.

Sınır değer problemlerinde fazlaca kullanılan yöntemlerden biri Shooting (atış) metodu olmuştur [106]. FRY gibi birinci derece diferansiyel denklem içeren bir sınır değer problemini çözmek için başlangıç ve bitiş değerinin bilinmesi gereklidir. Bu sebeple, atış metodu bitiş değerinin bilinerek başlangıç değerinin tahmin edildiği FRY denklemlerinde sıkça kullanılmıştır [107]. Sınır değer problemlerinde, FRY sistem tasarımında kullanılan pompaların başlangıç değerleri dikkate alınarak optik sinyallerin başlangıç değerleri belirli bir algoritma yardımıyla tahmin edilmeye çalışılır. Sonrasında, tahmin edilen değer belirlenen hata payından küçük olduğu takdirde ilerleme adım adım devam eder. Eğer tahmin edilen değer belirlenen hata payından büyükse algoritma, hata kriterini sağlayana kadar deneme yapmaya devam eder [108].

Atış yönteminde yapılan tahminler belli bir algoritma yardımıyla yapılır ve başlangıç değeri kendini düzelterek adım adım ilerler. Bu ilerleme bitiş koşulunu sağlayan sinyal ve pompalar arası uzaklığın bitimine kadar devam etmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, sinyal ve pompalar zıt yönde ilerlerken keskin değişimleri kararlı ve hızlı şekilde sonuca ulaştıran metotların kullanılmasıdır [109]. Ayrıca, bu metotları kullanırken hesaplamanın daha hızlı ve kararlı olmasında analitik Jacobian matrisi önemli etkiye sahiptir. Çünkü FRY denklemleri lineer değildir. Aynı zamanda birden fazla sinyal ve pompa gücü içerdiğinden karmaşık integral hesaplamaları fazlaca zaman almaktadır. Bu sebeple, analitik Jacobian matrisinin denklem çözümünde hazır olarak bulunması oldukça önemlidir. Örneğin, çalışmada ortaya koyulan 100 sinyal ve 8 pompadan oluşan FRY sisteminde $[108 \times 108]$ elemanlı matrisin sistem tarafından hesaplanması uzun zaman almaktadır. FRY denklemleri göz önüne alındığında analitik Jacobian matrisinin çözüm algoritmasına hazır bir şekilde verilmesinin nümerik hesaplama katkı sağlayacağı yapılan çalışmalar neticesinde görülmüştür [110].

Alan yazında FRY denkleminin çözümü kapsamında yapılan çalışmalar incelendiğinde, çözüm grafiğinde keskin değişimlerin fazlaca olduğu görülmüştür. Bilim adamları bu durumun lineer olmayan diferansiyel denklemlerde normal olduğunu tespit etmiş bu sebeple denklem çözümünde kararlı çalışan matematiksel yöntemleri kullanmaya çalışmışlardır. Bu bağlamda kullanılan matematiksel yöntemler incelendiğinde, Newton-Raphson metodunun fazlaca kullanıldığı görülmüştür [111]. Çünkü algoritmanın tahmin değeri sonuca yeterince yakın ise Newton-Raphson metodu sonuca hızlıca ulaşmaktadır. Ancak algoritmanın tahmin değeri sonuca yeterince yakın değilse Newton- Raphson metodu sonuca yavaş bir şekilde yakınsar. Hatta bazı durumlarda ıraksamaktadır. Yine bu durumun üstesinden gelebilmek için bu metoda farklı algoritmalar ile iyileştirmeler yapılmıştır [112].

FRY denklemi çözümünde sıkça kullanılan yöntemlerden biri Sonlu farklar yaklaşımıdır. Sonlu farklar yönteminin çözüme ulaşma hızının atış yöntemi ile aynı hızda olduğu birçok çalışma tarafından ortaya koyulmuştur. Ancak, çözüme daha kararlı olarak ulaştığı ayrıca belirtilmiştir. MATLAB BVP metodu sonlu farklar yöntemini kullanmaktadır [113]. Ayrıca, Sonlu farklar yaklaşımında tahmin fonksiyonu için Runge - Kutta (RK), Adams - Bashforth (AB), Adams - Bashforth-Moulton (ABM) ilerleme yöntemleri önerilmiştir. Bununla beraber, MATLAB BVP metodu trapezoid ilerleme yöntemini kullanır.

$a = x_0 < x_1 < x_2 \dots < x_n = b$ şeklinde tanımlı $[a, b]$ kapalı aralığındaki $[x_i, x_{i+1}]$ noktaları arasında belirli bir fonksiyon ile ilerleyerek sonuca ulaşır. Trapezoid yöntemindeki ilerleme şekli, h_i adım aralığını temsil etmek üzere

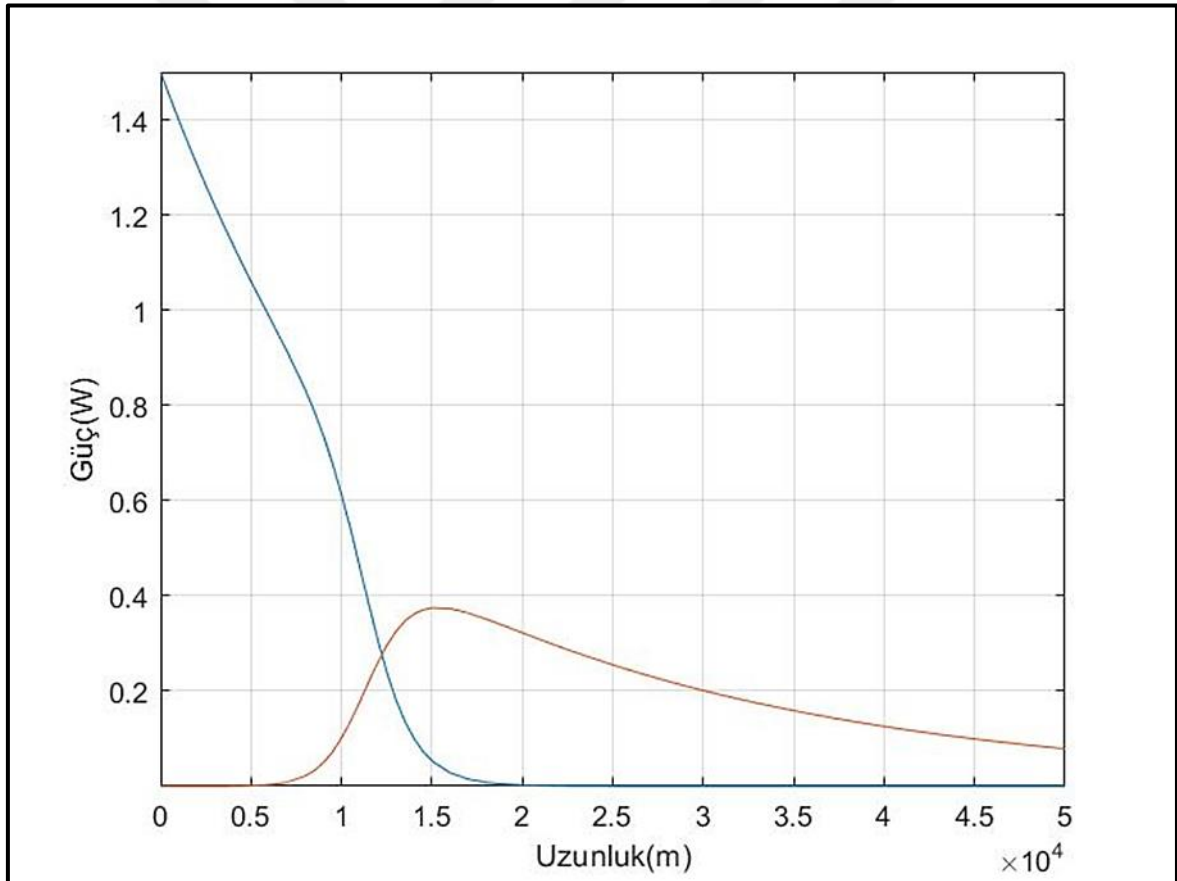
$$y_{i+1} - y_i = \frac{h_i}{2} [f(x_i, y_i) + f(x_{i+1}, y_{i+1})] \quad (5.1)$$

Eş. 5.1 ile ifade edilir [114]. Denklemden ilerleme noktası bir önceki noktaların durumuna bağlıdır. $[x_i, x_{i+1}]$ düğümleri üzerinde yukarıda verilen denklem uygulanırsa:

$$\left[-I - \frac{h_i}{2} J(x_i) \right] y_i + \left[-I - \frac{h_i}{2} J(x_{i+1}) \right] y_{i+1} = \frac{h_i}{2} [q(x_i) + q(x_{i+1})] \quad (5.2)$$

Eş. 5.2 elde edilir. Bu ifade MATLAB BVP çözüm fonksiyonunun ilerleme yöntemini ifade eder [115].

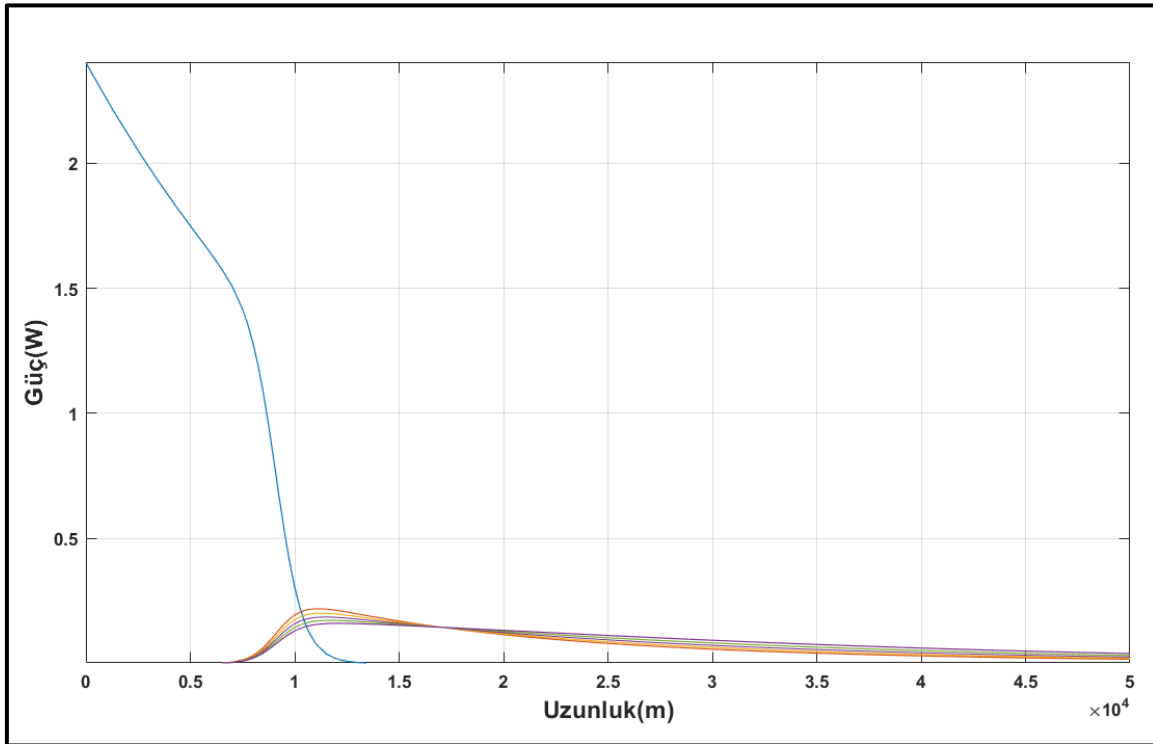
Lineer olmayan FRY denkleminde keskin değişimlere vurgu yapılmasının nedeni eşitliklerin lineer olarak hesaplama yapmasıdır. FRY denkleminde görülen keskin değişimlerin olduğu yerlerde yukarıda ifade edilen yöntemlerin başarısızlığa uğrama ihtimali artmaktadır. Bu sebeple, denklem çözümünde kullanılan yöntemlerin tahmin yeteneği yüksek olmalıdır. Tahmin değerinin en iyi şekilde elde edilmesi için matematiksel olarak bir önceki tahmin değerinin yani çözüm noktasının yüksek hassasiyette doğru olması gerekir. Fakat FRY denklemindeki keskin değişim olan yerlerdeki düğüm noktalarının daha doğru sonuçlar üretmesi için birbirlerine yakın olması daha iyi olacaktır. Bunun doğru bir şekilde ayarlanması da kullanılan yöntemin başarısını göstermektedir. Aşağıda bulunan Şekil 5.1’ de bir pompa ve bir optik sinyalin 50km uzunluktaki optik fiber boyunca aynı yönde ilerleme grafiği verilmiştir.



Şekil 5.1. Bir pompa ve bir sinyalden oluşan FRY denkleminin çözüm grafiği

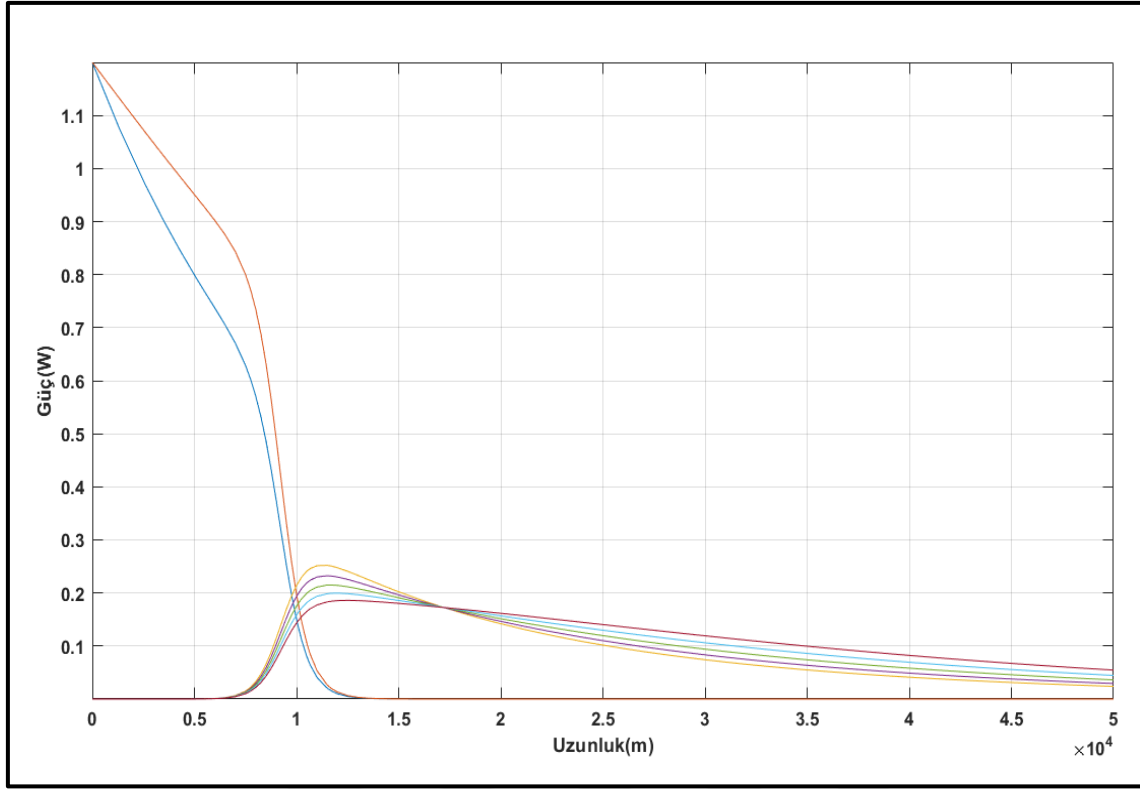
Yukarıdaki şekilde bir pompa ve bir sinyalin optik fiber üzerinde ilerleme grafiği görülmektedir. Giriş pompasının gücü 1,5W olarak, giriş sinyalinin gücü 1mW olarak seçilmiştir. Grafik incelendiğinde, pompa gücünün optik fiberde ilerlerken gücünü optik

sinyale aktardığı, bu sebeple azalıp tükendiği görülmektedir. Optik sinyalin ise optik fiberde ilerlerken optik zayıflama sebebiyle azalması gereken gücün arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi pompa ve sinyal arasındaki enerji geçişidir. Ayrıca, pompa ve sinyal gücünde 12km civarında keskin değişimler gözlemlenmiştir. Şekil 5.2’ de bir pompa ve beş optik sinyalden oluşan FRY sisteminin 50km uzunluktaki optik fiber boyunca aynı yönde ilerleme grafiği verilmiştir.



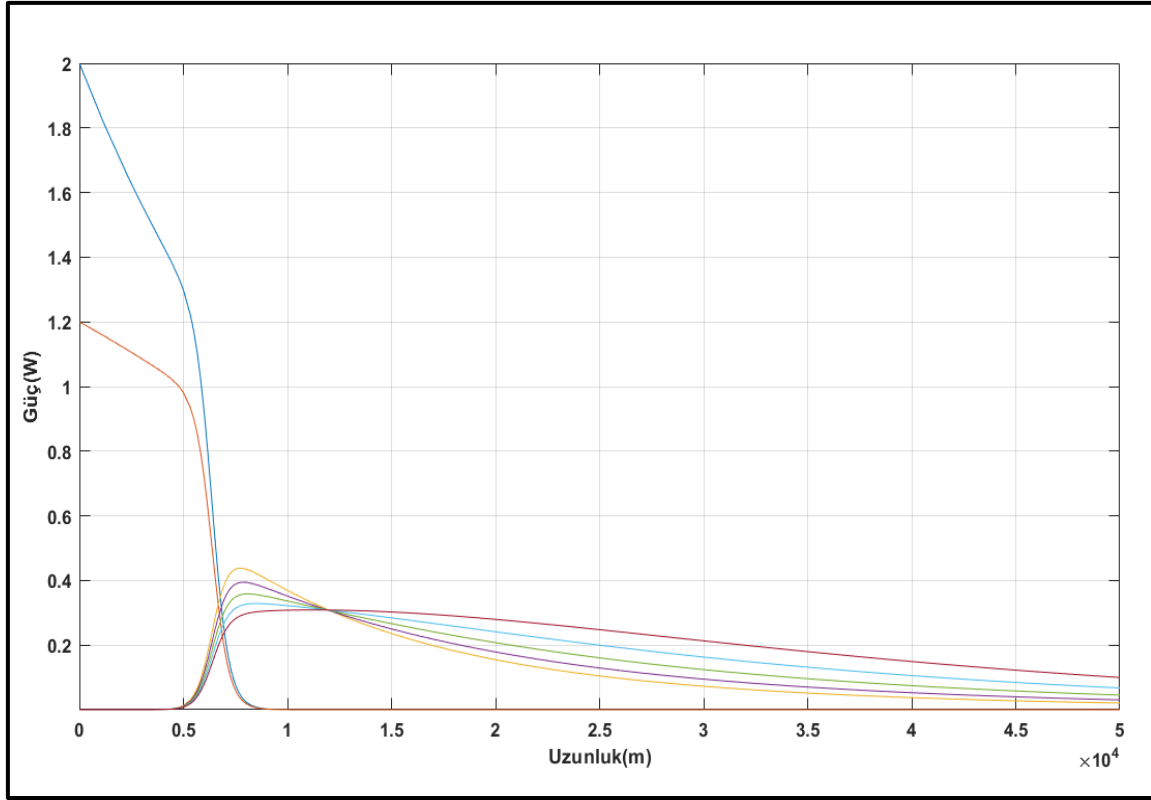
Şekil 5.2. Bir pompa ve beş sinyalden oluşan FRY denkleminin çözüm grafiği

Yukarıdaki şekilde bir pompa ve beş sinyalin optik fiber üzerinde ilerleme grafiği görülmektedir. Giriş pompasının gücü 2,4W olarak, giriş sinyalinin gücü 1mW olarak seçilmiştir. Grafik incelendiğinde, pompa gücünün optik fiberde ilerlerken gücünü optik sinyallere aktardığı, bu sebeple 13km sonra azalıp tükendiği görülmektedir. Optik sinyallerin ise optik fiberde ilerlerken öncesinde enerji geçişi sebebiyle arttığı sonrasında ise optik zayıflama sebebiyle güçlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, pompa ve sinyal gücünde 10km civarında keskin değişimler gözlemlenmiştir. Şekil 5.3’ de iki pompa ve beş optik sinyalden oluşan FRY sisteminin 50km uzunluktaki optik fiber boyunca aynı yönde ilerleme grafiği verilmiştir.



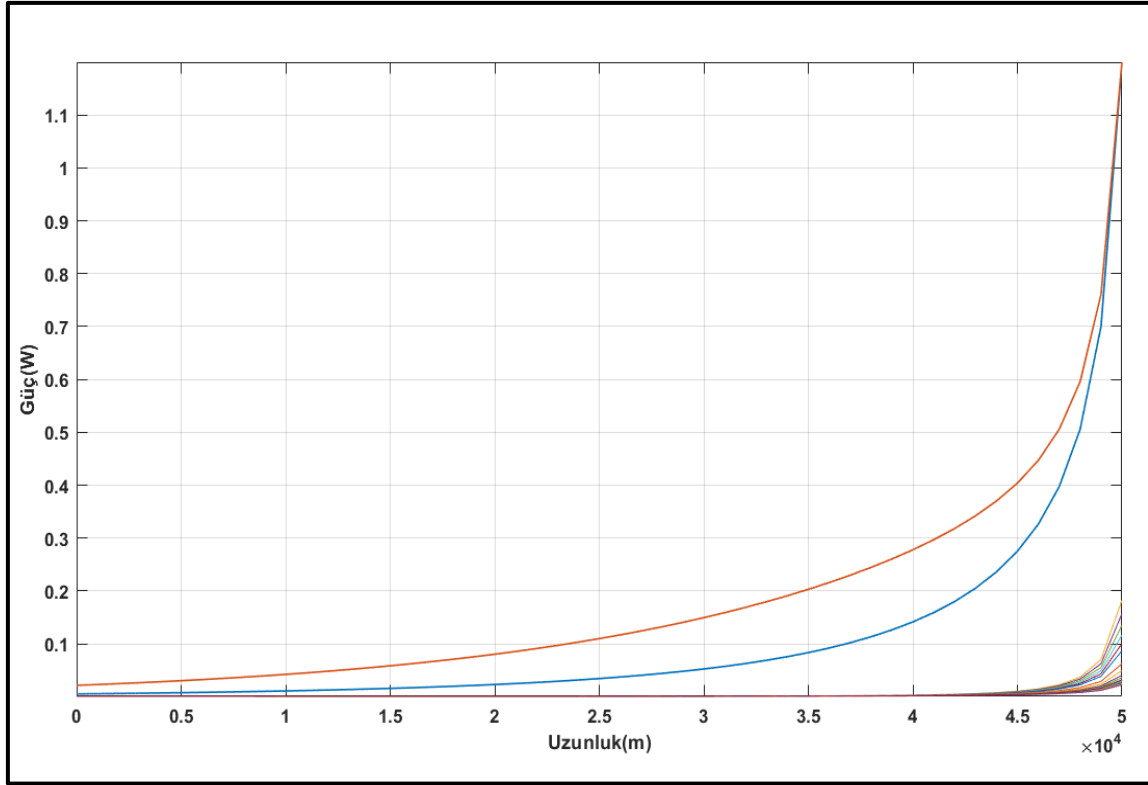
Şekil 5.3. İki pompa ve beş sinyalden oluşan FRY denkleminin çözüm grafiği

Yukarıdaki şekilde iki pompa ve beş sinyalin optik fiber üzerinde ilerleme grafiği görülmektedir. Giriş pompalarının her birinin gücü 1,2 W olmak üzere toplam 2,4W olarak, giriş sinyallerinin gücü 1mW olarak seçilmiştir. Grafik incelendiğinde, pompa güçlerinin optik fiberde ilerlerken gücünü optik sinyallere aktardığı, bu sebeple 13km sonra azalıp tükendiği görülmektedir. Ayrıca, pompa güçlerinin aynı güçte seçilmesinden dolayı yaklaşık aynı ivme ile tükendiği gözlemlenmiştir. Optik sinyallerin optik fiberde ilerlerken, öncesinde enerji geçişi sebebiyle güçlerinin arttığı, sonrasında ise optik zayıflama sebebiyle güçlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, pompa ve sinyal gücünde 9 km civarında keskin değişimler gözlemlenmiştir. Şekil 5.4' de iki pompa ve beş optik sinyalden oluşan FRY sisteminin 50km uzunluktaki optik fiber boyunca aynı yönde ilerleme grafiği verilmiştir.



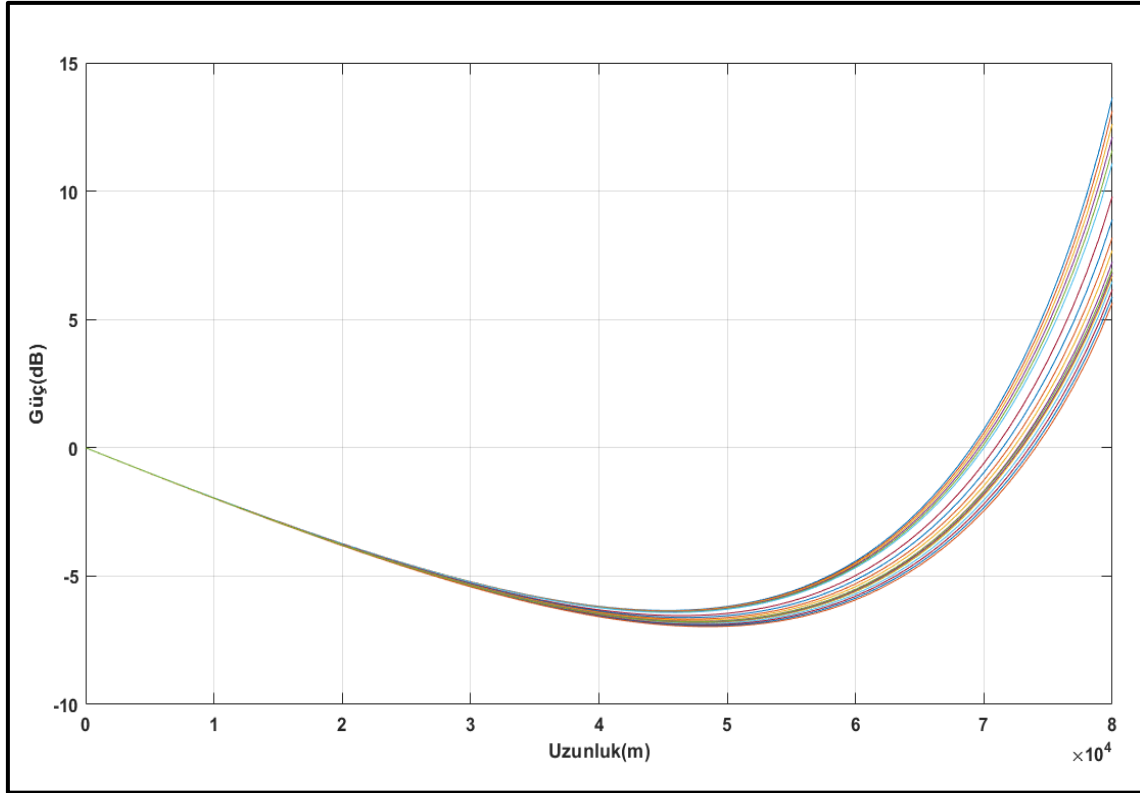
Şekil 5.4. İki pompa ve beş sinyalden oluşan FRY denkleminin çözüm grafiği

Yukarıdaki şekilde iki pompa ve beş sinyalin optik fiber üzerinde ilerleme grafiği görülmektedir. Giriş pompalarından birinin gücü 2W diğerinin gücü ise 1,2W olmak üzere toplam 3,2W olarak seçildiği, ayrıca giriş sinyallerinin gücünün 1mW olarak seçildiği görülmüştür. Grafik incelendiğinde, pompa güçlerinin optik fiberde ilerlerken gücünü optik sinyallere aktardığı, bu sebeple 9 km sonra azalıp tükendiği görülmektedir. Ayrıca, pompa güçlerinin farklı güçte seçilmesinden dolayı başta farklı hareket ettiği fakat sonrasında aynı ivme ile tükendiği gözlemlenmiştir. Optik sinyallerin optik fiberde ilerlerken, öncesinde enerji geçişi sebebiyle güçlerinin arttığı sonrasında ise optik zayıflama sebebiyle güçlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, pompa ve sinyal gücünde 9 km civarında keskin değişimler gözlemlenmiştir. Şekil 5.5' de iki pompa ve 19 optik sinyalden oluşan FRY sisteminin 50km uzunluktaki optik fiber boyunca zıt yönde ilerleme grafiği verilmiştir.



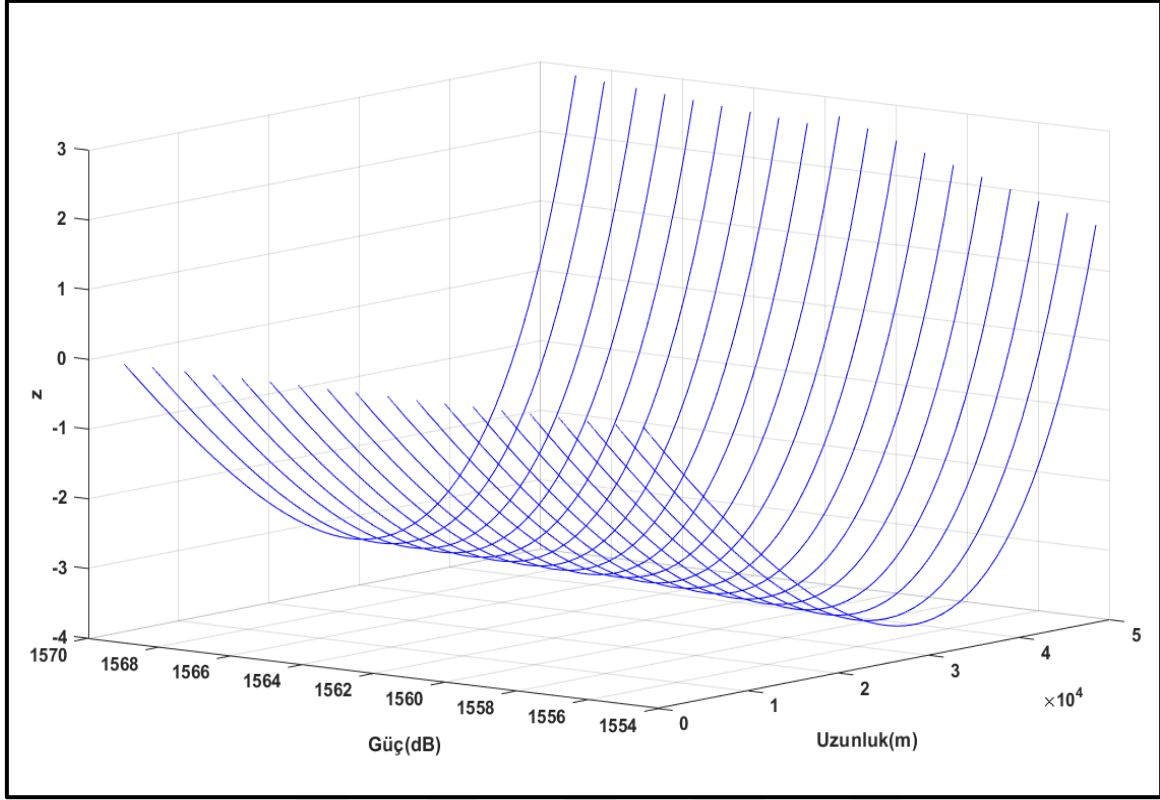
Şekil 5.5. İki pompa ve 19 sinyalden oluşan FRY denkleminin çözüm grafiği

Yukarıdaki şekilde 2 pompa ve 19 sinyalin optik fiber üzerinde ilerleme grafiği görülmektedir. Giriş pompalarının her birinin gücü 1,2 W olmak üzere toplam 2,4 W olarak, optik giriş sinyallerinin gücü ise 1mW olarak seçilmiştir. Ayrıca, pompa ve sinyallerin birbirlerine zıt yönde hareket etmesi sebebiyle sinyal güçlerinin artışı fazla detaylı görülememektedir. Bununla beraber, pompa güçlerinin 9 veya 10 km sonrasında tükenmediği aksine 50 km boyunca önce hızlı sonrasında yavaş yavaş tükendiği gözlenmektedir. Bunun sebebi, pompaların sinyallere zıt yönde ilerlemesidir. Optik sinyal güçleri incelendiğinde, güç artış hızlarının diğer şekillerdeki gibi optik fiberin ilk uzaklıklarında ani olmadığı, fakat optik fiberin sonlarına doğru artış hızının ivmelendiği görülmüştür. Pompa güçlerinin aynı güçte seçilmesinden dolayı yaklaşık aynı ivme ile tükendiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, optik sinyal gücünde 47 km civarında keskin değişimler gözlemlenmiştir. Şekil 5.6' da iki pompa ve 19 optik sinyalden oluşan FRY sisteminin 80 km uzunluktaki optik fiber boyunca zıt yönde ilerleme grafiği verilmiştir. Fakat, pompa ve optik sinyallerin aynı grafikte ilerlemesinin net anlaşılmamasından dolayı, sadece sinyal güçlerinin grafiği gösterilmiştir.



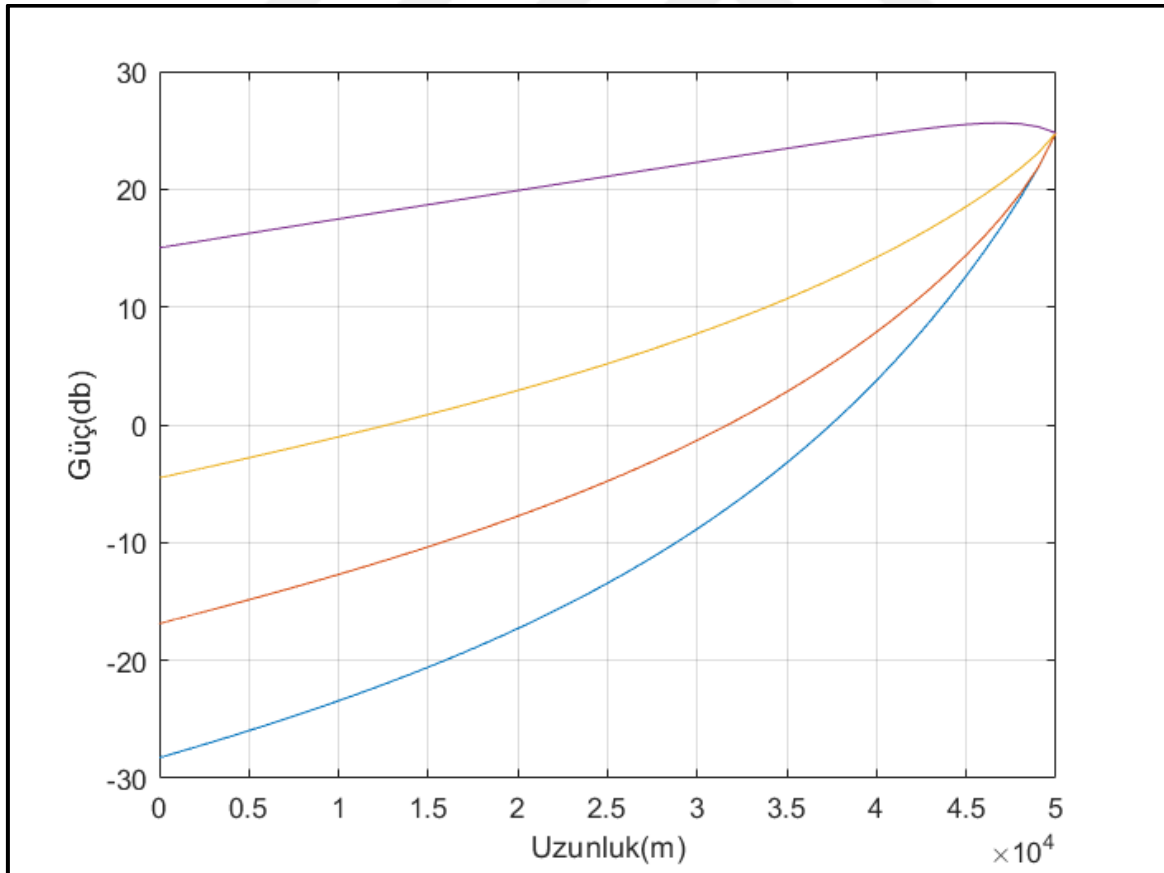
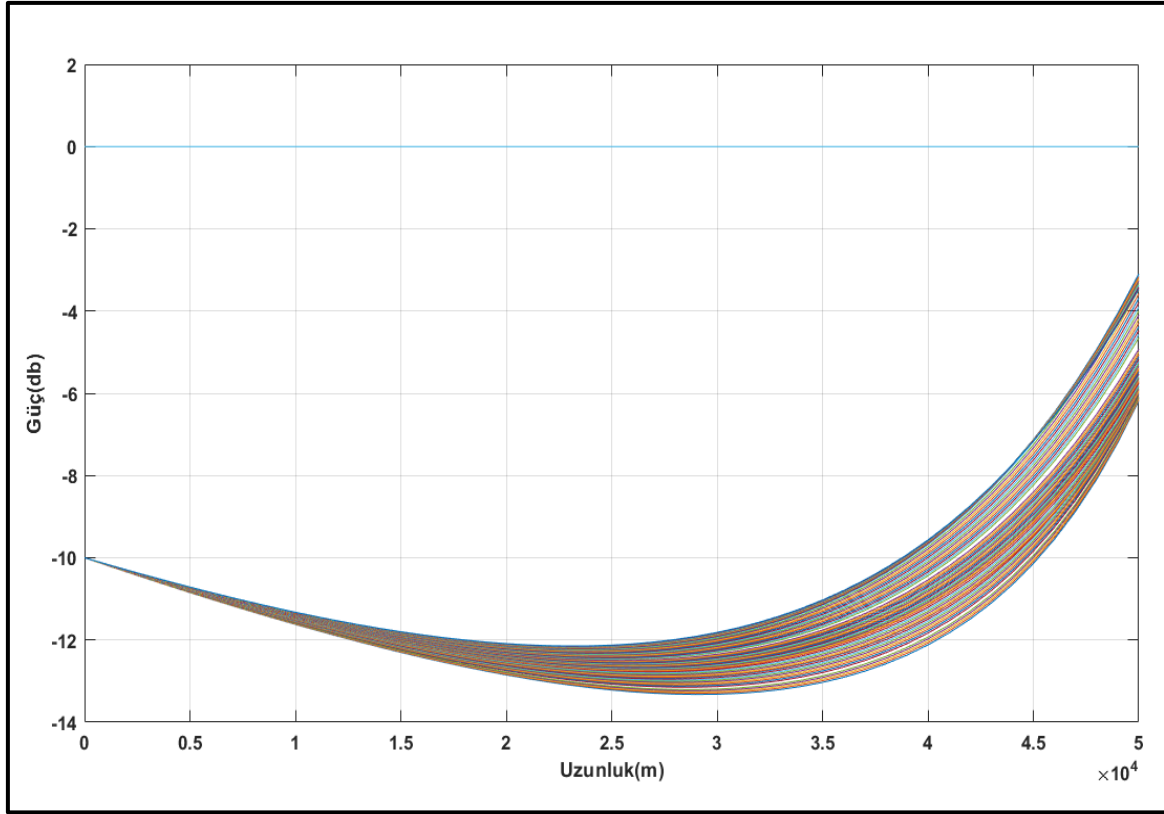
Şekil 5.6. 19 optik sinyalin 80km optik fiber boyunca hareketi

Yukarıdaki şekilde 19 sinyalin optik fiber üzerinde ilerleme grafiği görülmektedir. Optik sinyallerinin giriş gücü 1mW olarak seçilmiştir. Ayrıca, pompa ve sinyallerin birbirlerine zıt yönde hareket ettiği bu sebeple sinyal güçlerinin öncesinde azaldığı sonrasında ise başlangıç güç seviyesinden daha yükseğe çıktığı gözlenmiştir. Bunun sebebi, bu görsellerde herhangi bir optimizasyon yapılmadığı için pompa güçlerinin rastgele verilmesidir. Bununla beraber, fiber mesafesinin 80km seçilmesinden dolayı optik sinyal gücü değişimlerinin 50km fiber mesafesine göre farklı güç değişimleri göstermesi normaldir. Bunun sebebi pompaların sinyallere zıt yönde ilerlemesidir. Optik sinyal güçleri incelendiğinde, güç artış hızlarının diğer şekillerdeki gibi optik fiberin ilk uzaklıklarında ani olmadığı, fakat optik fiberin ortalarına doğru artış hızının ivmelendiği görülmüştür. Şekil 5.7' de iki pompa ve 19 optik sinyalden oluşan FRY sisteminin 50km uzunluktaki optik fiber boyunca birbirlerine zıt yönde ilerleme grafiği verilmiştir. Fakat, pompa ve optik sinyallerin aynı grafikte ilerlemesinin net anlaşılmamasından dolayı sadece sinyal güçlerinin grafiği gösterilmiştir. Aynı zamanda, optik sinyallerin ilerleme grafiği farklı fonksiyonlar kullanılarak 3 boyutlu olarak sunulmuştur. Bununla beraber, optik sinyal güçleri bazı kaynaklarda dB cinsinden ifade edildiğinden aşağıda optik sinyal güçleri dB olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.7. 19 optik sinyalin 50km optik fiber boyunca hareketi

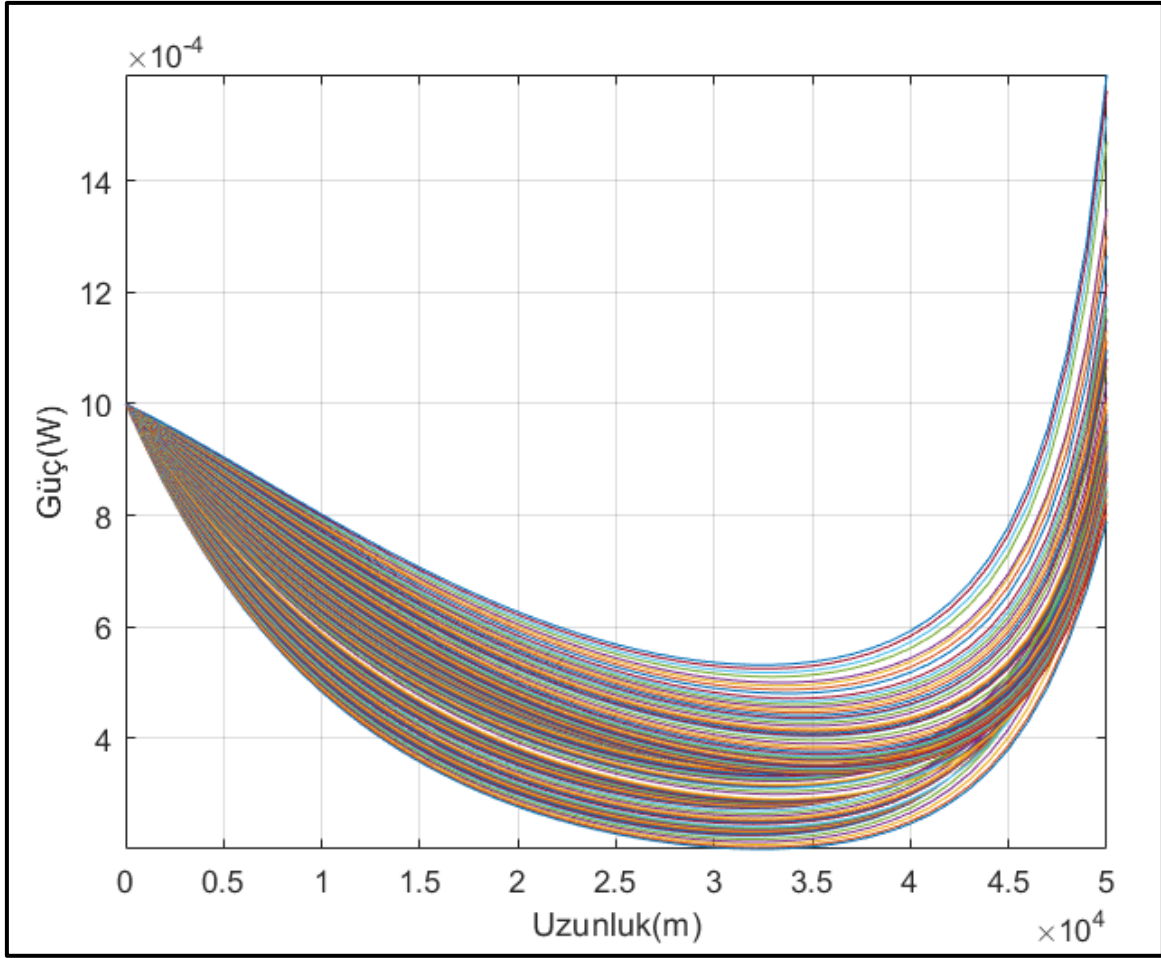
Yukarıda yer alan Şekil 5.7 ‘de 19 optik sinyalin optik fiber üzerinde üç boyutlu olarak ilerleme grafiği görülmektedir. Optik sinyallerinin giriş gücü 0dB (1mW) olarak seçilmiştir. Ayrıca, pompa ve sinyallerin birbirlerine zıt yönde hareket ettiği bu sebeple sinyal güçlerinin öncesinde azaldığı sonrasında ise başlangıç güç seviyesinden daha yükseğe çıktığı gözlenmiştir. Bunun sebebi, bu görsellerde herhangi bir optimizasyon yapılmadığı için pompa güçlerinin rastgele verilmesidir. Bununla beraber, fiber mesafesinin yaklaşık 20km civarına kadar optik sinyal güçlerinin sürekli olarak düştüğü, sonrasında ise ivmeli bir şekilde artarak giriş güç seviyesinin üstüne çıktığı görülmektedir. Bununla beraber, optik sinyallerin çıkış güçlerinin birbirlerine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.8’ de dört pompa ve 64 optik sinyalden oluşan FRY sisteminin 50km uzunluktaki optik fiber boyunca birbirlerine zıt yönde ilerleme grafiği verilmiştir. Fakat, pompa ve optik sinyallerin aynı grafikte ilerlemesinin net anlaşılmamasından dolayı pompa ve sinyal güçlerinin grafiği arka arkaya gösterilmiştir. Böylelikle, optik sinyal ve pompaların güç değişimleri net olarak anlaşılmaktadır. Bununla beraber, optik sinyal güçleri bazı kaynaklarda dB cinsinden ifade edildiğinden aşağıda optik sinyal güçleri dB olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.8. a) 64 optik sinyalin 50km optik fiber boyunca hareketi b) 4 pompanın 50km optik fiber boyunca hareketi

Yukarıdaki yer alan ilk şekilde (a) 64 optik sinyalin 50km optik fiber üzerindeki ilerleme grafiği görülmektedir. İkinci şekilde ise (b) 4 pompanın 50km optik fiber üzerindeki ilerleme grafiği görülmektedir. İlk şekil incelendiğinde, optik sinyallerinin giriş gücü -10dB (0, 1mW) olarak seçildiği görülmektedir. Ayrıca, sinyal güçlerinin optik fiber boyunca önce bir miktar azaldığı, sonrasında ise başlangıç güç seviyesinden daha yükseğe çıktığı gözlenmiştir. Bunun sebebi, bu görsellerde herhangi bir optimizasyon yapılmadığı için pompa güçlerinin rastgele verilmesidir. Bununla beraber, fiber mesafesinin yaklaşık 25km civarına kadar optik sinyal güçlerinin sürekli olarak düştüğü, sonrasında ise ivmeli bir şekilde artarak giriş güç seviyesinin üstüne çıktığı görülmektedir. Bununla beraber, pompa güçlerinin optik fiber boyunca değişimi incelendiğinde, bazı pompa güçlerinin 0dB altında tüketildiği, bir pompanın ise tam tüketilemediği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, bazı yüksek frekansa sahip pompaların düşük frekansa sahip pompalar ile etkileşime girerek güçlerini artırmasından kaynaklanmaktadır. Bununla beraber, bazı pompa güçleri incelendiğinde, pompaların güçlerinin başlangıçta bu etkileşimden dolayı arttığı açıkça görülmektedir.

Şekil 5.9' da 16 pompa 100 optik sinyalden oluşan FRY sisteminin 50km uzunluktaki optik fiber boyunca zıt yönde ilerleme grafiği verilmiştir. Fakat, pompa ve optik sinyallerin aynı grafikte ilerlemesinin net anlaşılmamasından dolayı sadece sinyal güçlerinin grafiği gösterilmiştir.



Şekil 5.9. 100 optik sinyalin 50km optik fiber boyunca hareketi

Yukarıdaki şekilde 19 optik sinyalin optik fiber üzerinde üç boyutlu olarak ilerleme grafiği görülmektedir. Giriş optik sinyallerinin giriş gücü 10mW olarak seçilmiştir. Ayrıca, pompa ve sinyallerin birbirlerine zıt yönde hareket ettiği, bu sebeple sinyal güçlerinin öncesinde azaldığı, sonrasında ise bazı sinyal güç seviyelerinin başlangıç güç seviyesinden daha yükseğe çıktığı, bazısının ise başlangıç güç seviyesinin altında olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, pompa güçlerinin aşırı olmadan ortalama değerler verilerek seçilmesidir. Bununla beraber, fiber mesafesinin yaklaşık 30km civarına kadar optik sinyal güçlerinin sürekli olarak düştüğü, sonrasında ise ivmeli bir şekilde artarak giriş güç seviyesi civarına çıktığı görülmektedir. Bununla beraber, optik sinyallerin çıkış güçlerinin birbirlerine yakın olduğu gözlemlenmiştir.

FRY denklemi çözümünde kullanılan MATLAB BVP çözücü metodunun etkin çalışması amacıyla Jacobian matrisi sisteme hazır olarak dahil edilmiştir. Oluşturulan bu matris diferansiyel denklemdeki sinyallerin ve pompaların güç ve dalga boylarına göre hazırlanmış

olup probleme özel olarak dâhil edilmiştir. Burada önemli nokta örneğin 100 optik sinyal ve 8 pompa için 108×108 ’ lik bir matrisin algoritmaya tek tek yerleştirilmesi zor ve zahmetli olmasıdır. Çünkü, hesaplamalarda bazı değişkenlerin değerlerini değiştirmek veya farklı değerlerle tekrar işlem yaptırmak gerektiğinde, bu matrisin de tekrar hesaplanması gerekmektedir. Bu sebeple, bu zor ve zahmetli işlemi basitleştirmek için bu matrisi hazır olarak hesaplayan algoritma, fonksiyon biçiminde ayrı olarak yazılmıştır. Bu sayede, tekrar işlem yapma sırasında Jacobian matrisini manuel olarak tek tek hesaplayıp yazmak yerine gerekli parametreleri değiştirerek istenen pompa ve sinyal sayısı ve özelliklere sahip matris, oluşturduğumuz fonksiyon tarafından hesaplanabilmektedir. Bu fonksiyona ait matrisler çok büyük olduğundan bu kısımda sadece örnek olması açısından 2 pompa 19 sinyalden oluşan sistemin analitik Jacobian matrisi Eş. 5.3’ de sunulmuştur.

```
sonuc=[
(+y(1)*y(2)*0.00013868 +y(1)*y(3)*0.00066161 +y(1)*y(4)*0.00061093
.....y(1)*y(21)*0.0001551  +y(1)*6.2101e-05)

(-y(1)*y(2)*0.00013495 +y(2)*y(3)*0.00062385 +y(2)*y(4)*0.00063249
.....y(2)*y(21)*0.0006708  +y(2)*5.7935e-05)

(+y(1)*y(3)*0.00056824 +y(2)*y(3)*0.00055064 -y(3)*y(4)*6.8878e-06
..... y(3)*y(21)*0.00010515 -y(3)*4.7894e-05)

(+y(1)*y(4)*0.00052404 +y(2)*y(4)*0.00055755 +y(3)*y(4)*6.879e-06 -
.....y(4)*y(21)*0.00010017 -y(4)*4.7986e-05)

(+y(1)*y(5)*0.00047995 +y(2)*y(5)*0.00056449 +y(3)*y(5)*1.3617e-05
.....y(5)*y(21)*9.5093e-05 -y(5)*4.8078e-05)

(+y(1)*y(6)*0.00043597 +y(2)*y(6)*0.00057143 +y(3)*y(6)*2.0213e-05
.....y(6)*y(21)*8.9905e-05 -y(6)*4.817e-05)

(+y(1)*y(7)*0.00039211 +y(2)*y(7)*0.0005784 +y(3)*y(7)*2.667e-05
.....y(7)*y(21)*8.4613e-05 -y(7)*4.8262e-05)
```

$$(+y(1)*y(8)*0.00034835 + y(2)*y(8)*0.00058539 + y(3)*y(8)*3.2988e-05 \\ \dots y(8)*y(21)*7.9217e-05 - y(8)*4.8355e-05)$$

$$(+y(1)*y(9)*0.00030471 + y(2)*y(9)*0.00057102 + y(3)*y(9)*3.9167e-05 \\ \dots y(9)*y(21)*7.3718e-05 - y(9)*4.8447e-05)$$

$$(+y(1)*y(10)*0.00026117 + y(2)*y(10)*0.00056762 + y(3)*y(10)*4.5208e-05 \\ \dots - y(10)*y(21)*6.8117e-05 - y(10)*4.8539e-05)$$

$$(+y(1)*y(11)*0.00022815 + y(2)*y(11)*0.00056424 + y(3)*y(11)*5.1112e-05 \\ \dots y(11)*y(21)*6.2415e-05 - y(11)*4.8631e-05)$$

$$(+y(1)*y(12)*0.00020741 + y(2)*y(12)*0.00056086 + y(3)*y(12)*5.688e-05 \\ \dots - y(12)*y(21)*5.6612e-05 - y(12)*4.8723e-05)$$

$$(+y(1)*y(13)*0.00018913 + y(2)*y(13)*0.00055748 + y(3)*y(13)*6.2512e-05 \\ \dots - y(13)*y(21)*5.0709e-05 - y(13)*4.8815e-05)$$

$$(+y(1)*y(14)*0.00017331 + y(2)*y(14)*0.00055412 + y(3)*y(14)*6.801e-05 \\ \dots - y(14)*y(21)*4.4708e-05 - y(14)*4.8907e-05)$$

$$(+y(1)*y(15)*0.00015994 + y(2)*y(15)*0.00055077 + y(3)*y(15)*7.3373e-05 \\ \dots - y(15)*y(21)*3.8608e-05 - y(15)*4.8999e-05)$$

$$(+y(1)*y(16)*0.00014899 + y(2)*y(16)*0.00054742 + y(3)*y(16)*7.8604e-05 \\ \dots - y(16)*y(21)*3.2411e-05 - y(16)*4.9091e-05)$$

$$(+y(1)*y(17)*0.00014046 + y(2)*y(17)*0.00054408 + y(3)*y(17)*8.3701e-05 \\ \dots - y(17)*y(21)*2.6119e-05 - y(17)*4.9184e-05)$$

$$(+y(1)*y(18)*0.00013433 + y(2)*y(18)*0.00054075 + y(3)*y(18)*8.8667e-05 \\ \dots - y(18)*y(21)*1.973e-05 - y(18)*4.9276e-05)$$

$$(+y(1)*y(19)*0.00013058 + y(2)*y(19)*0.00057053 + y(3)*y(19)*9.3501e-05$$

..... -y(19)*y(21)*1.3247e-05 -y(19)*4.9368e-05)

(+y(1)*y(20)*0.00012922 +y(2)*y(20)*0.00057464 +y(3)*y(20)*9.8205e-05
..... -y(20)*y(21)*6.6701e-06 -y(20)*4.946e-05)

(+y(1)*y(21)*0.00013021 +y(2)*y(21)*0.00057873 +y(3)*y(21)*0.00010278
..... +y(20)*y(21)*6.6617e-06 -y(21)*4.9552e-05)

];

Yukarıdaki eşitlikte, 19 optik sinyal ve 2 pompanın analitik Jacobian matrisi görülmektedir. Eşitlik incelendiğinde, her bir pompa ve sinyalin tüm pompa ve optik sinyallerle çarpım şeklinde tek tek yazıldığı, sonrasında artan sayıda pompa ve sinyalle tekrar yazılarak tüm etkileşimlerin matrise dahil edildiği görülmektedir. Ayrıca, matrisin her grup parantezi içerisindeki pompa ve sinyal etkileşimleri çok fazla uzun olduğundan noktalarla kısaltma yapılarak kısaca anlaşılması sağlanmıştır. Bu çalışmada 100 adet optik sinyalin ve birden çok pompanın FRY denklemi kapsamında aynı anda ilerlemesi ve optimizasyonu yapılmıştır. Çalışmanın detayları Yöntem kısmında sunulmuştur.



6. YÖNTEM

Bu bölümde, çalışma ile ilgili kullanılan denklem çözümleri, yöntem ve teknikler ayrıntılı olarak ele alınmıştır. İlk olarak, basitleştirilmiş FRY denklem çözümüne ilişkin bilgiler verilmiş, sonrasında çeşitli pompa sayısına göre optimum pompa dalga boyları ve güçleri İADAYAK algoritması ile bulunmuştur. İkinci olarak, bulunan optimum değerler değerlendirilerek çalışmada kaç pompa kullanılacağı kararlaştırılmıştır. Çalışmada son olarak, bulunan en iyi pompa değerlerine göre FRY denklemi MATLAB BVP metodu ile çözümlenerek kazancı düzleştirilmiş sinyal değerlerine ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar Bulgular bölümünde sunulmuştur.

6.1. FRY Denklemi ve Kurulan Sisteme Ait Bilgiler

FRY modelinde en önemli etkilerin; pompa-pompa, pompa-sinyal etkileşimleri ve sinyal ve pompalara etki eden dalga boyuna bağlı zayıflama katsayısı olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple, hızlı ve etkili çözüm geliştirmek için Plank ve Boltzman sabiti, sıcaklık, Rayleigh geri saçılım katsayısı gibi etkisi çok sınırlı olan değerler denklemden çıkarılarak, basitleştirilmiş FRY denkleminin matematiksel eşitliği Eş. 6.1' de sunulmuştur [45].

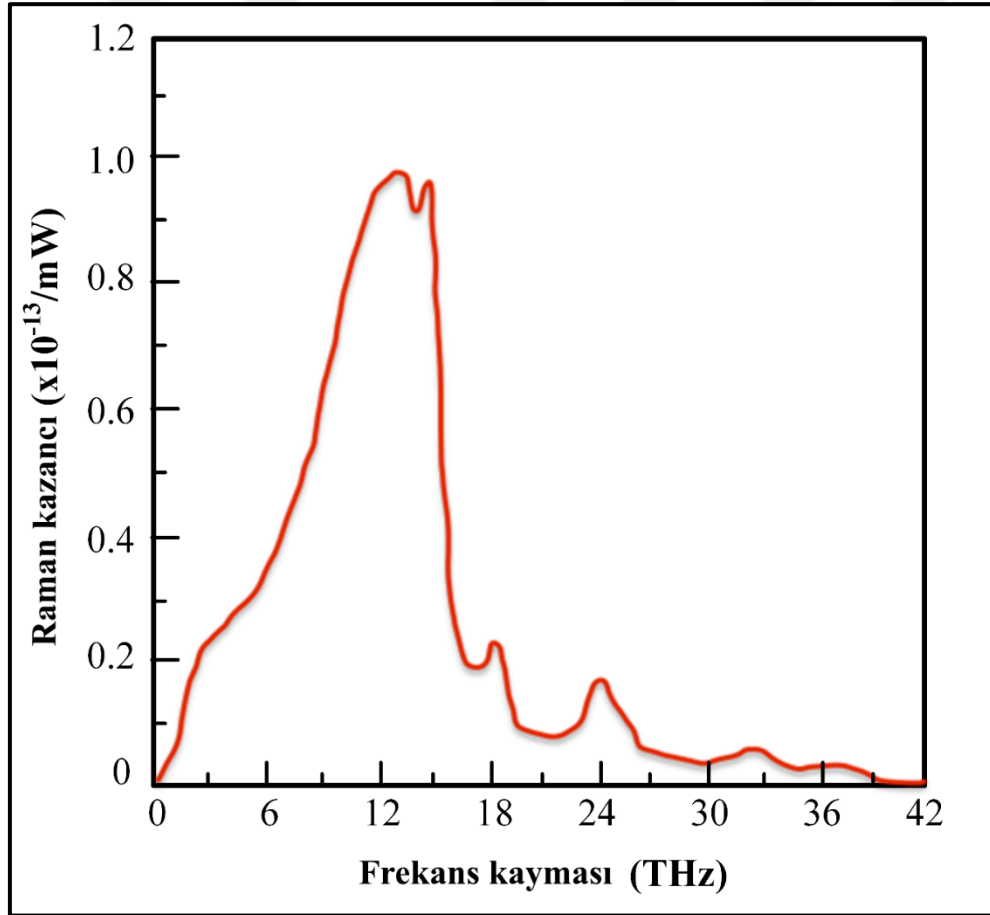
$$\pm \frac{dP_k}{dz} = -\alpha_k P_k + \sum_{j=1}^{k-1} \frac{g_{vj}(v_j - v_k)}{\Gamma A_{eff}} P_j P_k - \sum_{j=k+1}^{m+n} \frac{v_j}{v_k} \frac{g_{vk}(v_k - v_j)}{\Gamma A_{eff}} P_j P_k \quad (6.1)$$

$k = 1, 2, 3, 4 \dots \dots, n + m$

Yukarıda matematiksel denklemin lineer olmayan bir diferansiyel denklem olduğu açıkça görülmektedir. Denklemden öncelikle, sinyal dalga boylarının negatif olmaması için sinyaller azalan sırada birbirini takip etmelidirler. Bu sebeple, $j > i$ için $v_i > v_j$ olmalıdır. $k = 1, 2, 3, 4 \dots \dots, n'$ 'e kadar olan indisler $z = L$ noktasından $z = 0$ noktasına doğru geri yönde hareket eden pompa güçlerini ifade etmektedir. Pompa güçleri geri yönde hareket ettikleri için - olarak denklemin başındaki katsayı ile ifade edilmiştir. $k = 1, 2, 3, 4 \dots \dots, n + m$ 'e kadar olan indisler ise $z = 0$ noktasından $z = L$ noktasına doğru ileri yönde ilerleyen sinyal güçlerini ifade etmektedir. Sinyal güçleri ileri yönde hareket ettikleri için + olarak denklemin başındaki katsayı ile ifade edilmiştir. $\alpha_k, P_k, P_j, v_k, v_j$ ise sırasıyla indis' e göre zayıflama katsayısı, pompa ve sinyal güçleri, pompa ve sinyal frekanslarını ifade etmektedir. Bununla

birlikte, Γ , A_{eff} sırasıyla polarizasyon faktörünü ve fiberin etkin alanını ifade etmektedir. Polarizasyon faktörü pompa ve sinyaller aynı yöne doğru hareket ediyorsa 1, karşı yöne doğru hareket ediyorsa 2 katsayısı ile çarpılmaktadır.

FRY denklem çözümünde Raman kazanç katsayısı çok önemli bir rol üstlenmektedir. Raman kazanç katsayısı uyarılmış Stokes dalgalarının birbiriyle etkileşim gücü ile ifade edilir. Bu doğrultuda, Stokes dalgalarının şiddeti pompa ve optik sinyal arasındaki fark ile ölçülmesinden dolayı, kullanılan fiber kabloya göre Raman kazanç katsayısı ölçülür. Aşağıda yer alan Şekil 6.1' de standart tek modlu optik fiber kabloya ait Raman kazanç katsayısı görsel ile sunulmuştur [116].

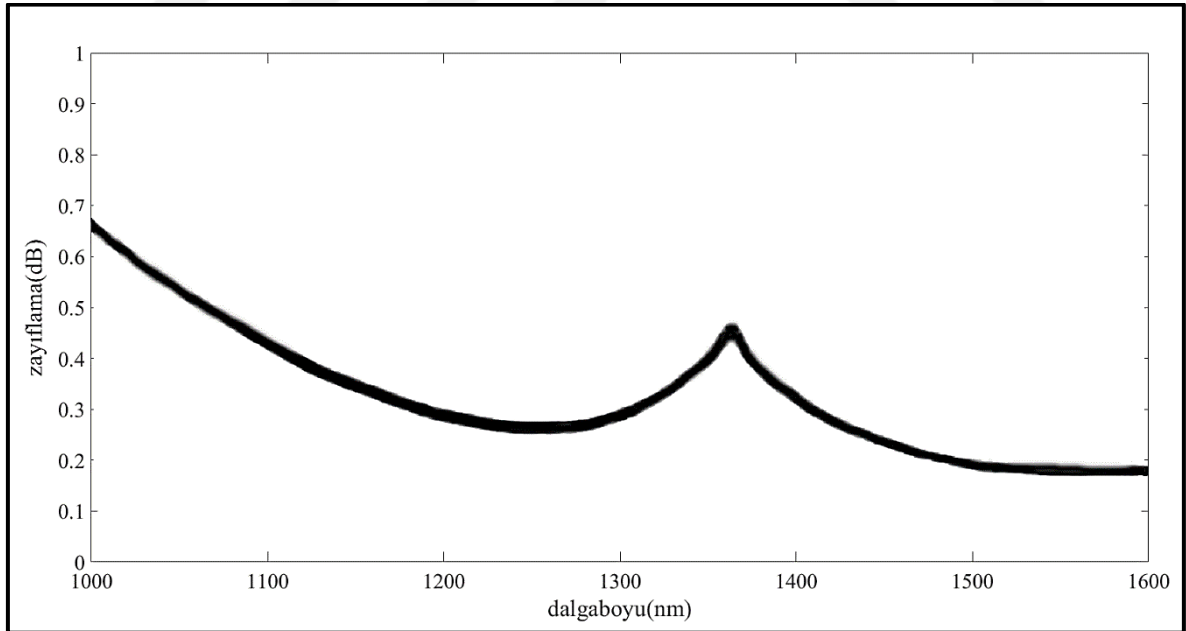


Şekil 6.1. Standart tek modlu optik fiber kabloya ait Raman kazanç katsayısı

Şekil 6.1' deki görsel, deneysel çalışmalar sonucu elde edilmiş ve literatüre sunulmuştur. Grafik incelendiğinde: Raman kazancı: katsayı $\times 10^{-13}$ m/W çarpanı ile ifade edilir. Burada belirtilen katsayı pompa ve optik sinyal arasındaki frekans farkı ile oluşmaktadır. Grafiğe

göre frekans farkının 13 THz (100nm) civarlarında Raman kazancının en yüksek seviyesine ulaştığı anlaşılmaktadır. Ayrıca, Raman kazanç grafiği dikkatli incelendiğinde kazanç spektrumunun 40 THz civarında olduğu görülmektedir. Bu kazanç aralığı neredeyse fiber optik sistemlerin her noktasında kullanılabilir. Yukarıda görseli sunulan Raman kazanç katsayısı grafiği FRY denklem çözümünde büyük önem arz etmektedir. Çünkü FRY denkleminde sinyal ve pompalar arası frekans farkı, çarpan olarak denkleminde açıkça görülmektedir. Bu sebeple, bu grafiğin basitleştirilmiş şekli oluşturduğumuz FRY çözüm algoritmasına polinom olarak başarıyla işlenmiştir. Bu sayede, FRY denklemi hızlı ve etkin şekilde çözülmüştür.

FRY modelinde yer alan zayıflama katsayısı, tüm fiber optik sistemler için büyük önem taşımaktadır. Zayıflama katsayısı, fiber optik kablounun tek veya çok modlu olması ve içerisindeki yabancı madde miktarına göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada, pratikte çokça kullanılan SMF-28 optik fiberin zayıflama katsayısı kullanılmıştır. Bu sayede, çalışmada kurulan sistem pratikte kullanılan sistemlere kolaylıkla uyarlanabilir. Şekil 6.2' de tek modlu SMF-28 standart optik fiber kabloya ait zayıflama eğrisi görülmektedir [117].



Şekil 6.2. SMF-28 standart optik fiber kabloya ait dalga boyuna göre zayıflama katsayısı

Şekil 6.2 incelendiğinde, SMF-28 optik fiberin zayıflama katsayısının 1300 nm bandında 0.5 dB/km, 1550 nm bandında 0.2 dB/km olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuçlardan yola

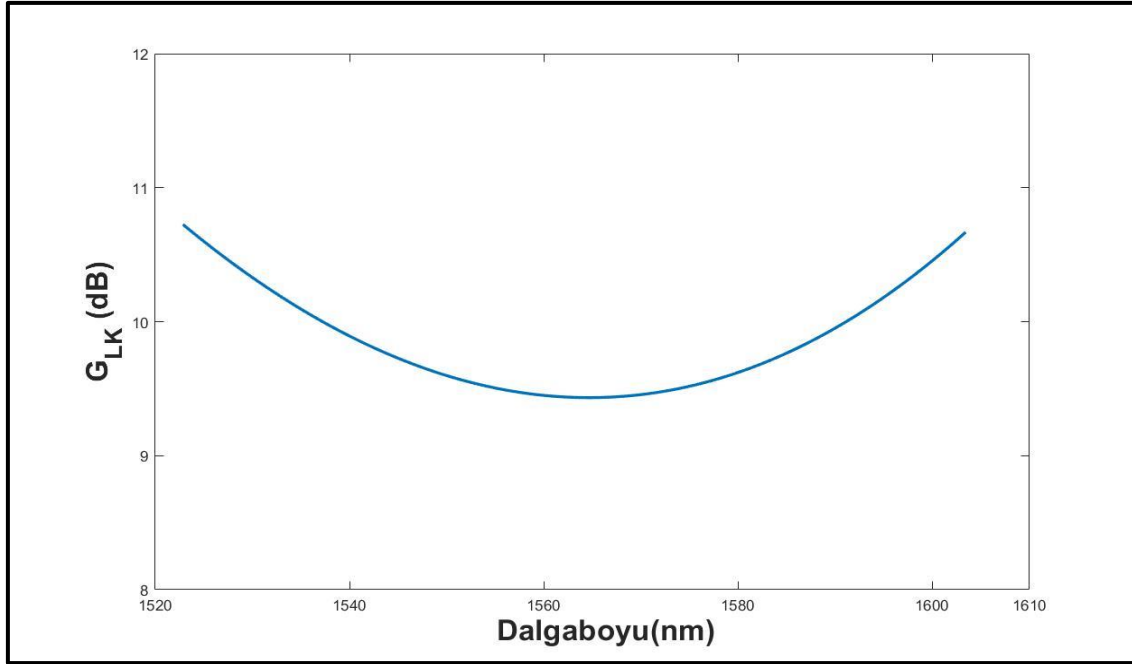
çıkarak FRY modeli oluştururken zayıflama katsayısının kısmen daha yüksek olduğu frekanslara pompaların yerleştirilmesi, zayıflama katsayısının kısmen daha düşük olduğu frekanslara ise sinyallerin yerleştirilmesi daha uygun olacaktır. Bununla beraber, yukarıda görseli sunulan SMF-28 optik fiberin zayıflama katsayısı grafiği FRY denklem çözümünde büyük önem arz etmektedir. Çünkü FRY denkleminde, sinyallerin optik fiberde ilerleme esnasındaki zayıflama katsayısı ile fiber mesafesinin çarpımının, denklemdaki etkisi açıkça görülmektedir. Bu sebeple, bu grafiğin basitleştirilmiş şekli Raman kazanç katsayısı grafiğinde olduğu gibi FRY çözüm algoritmasına polinom olarak başarıyla işlenmiştir. Bu sayede FRY denklemi hızlı ve etkin şekilde çözülmüştür.

Eş 6.1’ de detaylı incelenen basitleştirilmiş Raman kuvvetlendirici denklemi her bir sinyal kanalının yükseltgenme faktörüne göre Eş 6.2 ve 6.3’ de tekrar matematiksel olarak ifade edilirse [59] :

$$I_j \equiv \int_0^L P_j(z) dz, j = 1, 2, 3, \dots, n + m \quad (6.2)$$

$$G_k \equiv \frac{P_k(L)}{P_k(0)} = \exp \left(-a_k L + \sum_{j=n+1}^{m+n} g_{jk} I_j \right) \exp \left(\sum_{j=1}^n g_{jk} I_j \right) = G_{L,k}, G_{G,k} \quad (6.3)$$

Sonucu karşımıza çıkmaktadır. Formüldeki $G_{L,k}$ birinci eksponansiyel kuvveti yani optik sinyallerin birbirleri ile etkileşimini ve fiber kayıplarını kapsar. a_k, L, I_j sırasıyla; optik zayıflama, optik fiber uzaklığı, sinyal ve pompa güçlerini ifade etmektedir [21]. g_{jk} ise Raman kuvvetlendirici formülünde yer alan $\frac{g_{vj}(v_j - v_k)}{\Gamma A_{eff}}$ işleminin sonucunu gösterir. Formüldeki $G_{G,k}$ ise ikinci exponansiyel kuvveti yani pompaların birbirleriyle olan etkileşimini ifade eder. G_k net kazanç değeri, optik fiberin diğer ucunda her sinyal değeri için 1’e yaklaştıkça her bir sinyal çıkış değeri başlangıç değerine yaklaşacaktır. Yukarıda detaylı şekilde açıklanan $G_{L,k}$ değeri 100 optik sinyal için çözümlenerek Şekil 6.3’ de sunulmuştur.



Şekil 6.3. 100 adet optik sinyalin dalga boylarına göre dB cinsinden elde edilen $G_{L,k}$ değeri

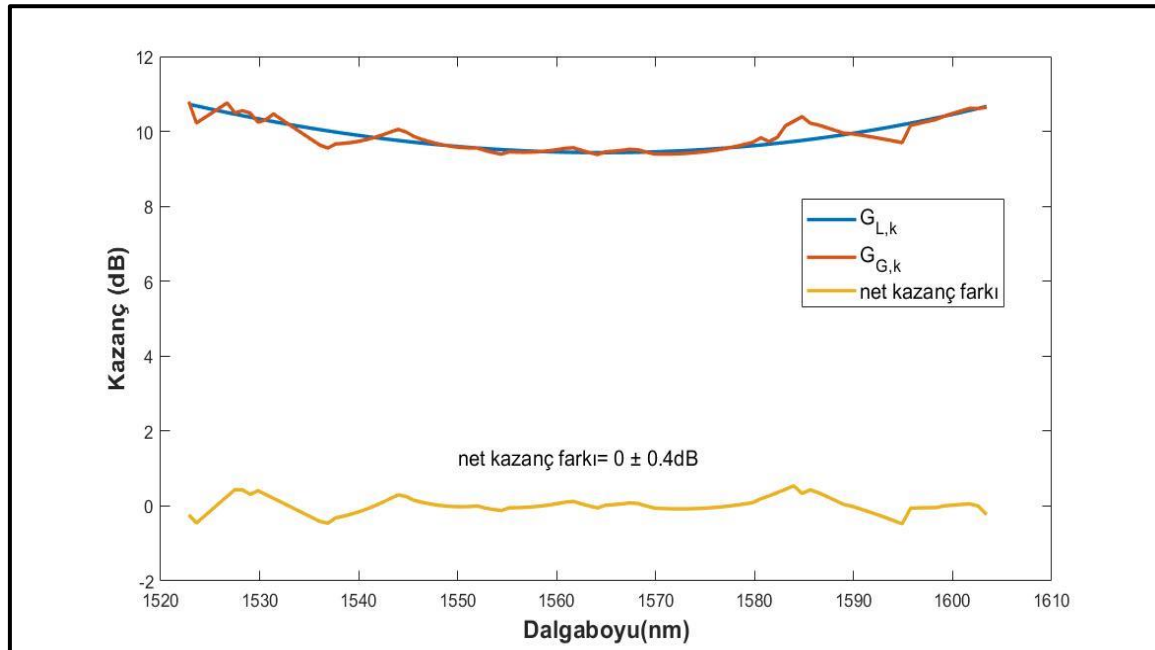
Şekil 6.3 incelendiğinde, 100 adet optik sinyalin optik fiber içerisinde 0 noktasından 50 km'ye ilerlemesi sonucunda oluşan $G_{L,k}$ değerleri açıkça görülmektedir. Sinyallerin $G_{L,k}$ değerleri şekildeki gibi olduğu için sinyallerin optik fiberdeki kayıpları ters yönde gönderilen pompa güçleri tüketilerek karşılanacaktır. Fakat burada önemli nokta, pompaların hangi dalga boyu ve güç değerlerini kullanarak optik sinyallerin oluşturduğu bu şekle en yakın şekli oluşturabilecek değerlerin bulunmasıdır. Bu değerleri elde etmek için iki boyutlu uzayda optimum pompa dalga boyları ve güç değerleri aranmıştır. Bu arama sırasında bulunan değerlerin en iyi değerler olduğunu anlamak için bir değerlendirme ölçütü olması gerekmektedir. Bu değerlendirme ölçütüne alan yazında amaç fonksiyonu adı verilir [93]. Bu çalışmada kullanılan amaç fonksiyonu aşağıdaki Eş. 6.4 ile ifade edilmiştir.

$$\text{amaç fonksiyonu} = |(\log_e G_{L,k} - \log_e G_{G,k})^2|_{\min} \quad (6.4)$$

Yukarıda yer alan eşitlik incelendiğinde, $G_{L,k}$ ve $G_{G,k}$ değerlerinin logaritmalarının alındığı görülmektedir. Bunun sebebi $G_{L,k}$ ve $G_{G,k}$ değerlerinin Eş. 6.3' de üssel kuvvetlerinin alınmış olmasıdır. Burada önemli nokta, İADAYAK algoritması işletilerek elde edilen $G_{G,k}$ değerlerinin her bir sinyal değeri için hesaplanarak $G_{L,k}$ ve $G_{G,k}$ farkının her sinyal değeri için minimum olmasıdır. Bu şekilde tüm sistemdeki sinyal değerleri taranmış, ayrıca belirli

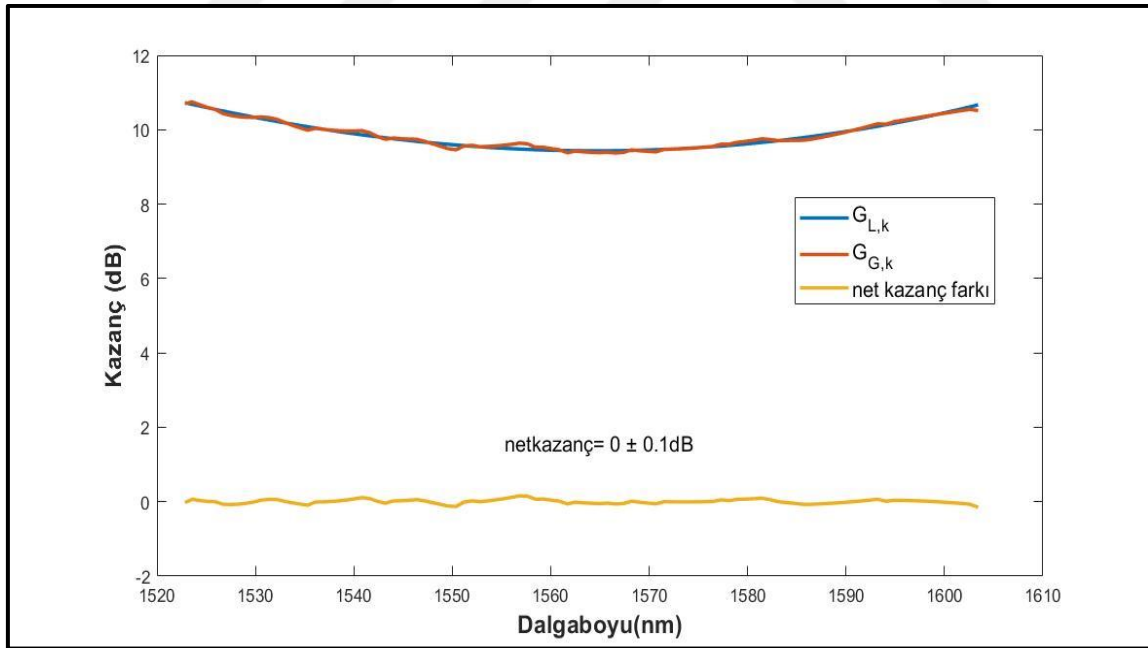
fonksiyon çağırım değerine ve belirlenen amaç fonksiyonuna göre ifade edilmiştir. Bununla beraber, bulunan optimum değerlere göre G_k net kazanç değeri hesaplanarak FRY denklem çözüm performansı sonuçlara eklenmiştir. Sonrasında, boyut sayısı sırası ile 4 pompa, 8 pompa, 16 pompa için İADAYAK algoritması işletilmiş ve optimum değerler elde edilmiştir.

Çalışmanın nümerik örneği 1500 nm bandında yapılmıştır. Sinyaller 1520-1620nm (197-187 THz) arası seçilmiştir. Pompaların dalga boyu kısıtları 1400- 1500nm (199-214 THz) arası ve güç kısıtları 10mW- 300mW arası seçilmiştir. Ayrıca, A_{eff} değeri $50 \mu m^2$, polarizasyon faktörü 2, $L=50$ km ve sinyallerin giriş değerleri 1mW olarak seçilmiştir. Bununla birlikte, sinyaller arası boşluk 1nm olarak belirlenmiştir. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’ de yer alan Raman kazanç katsayısı ve zayıflama değerleri algoritmaya nümerik olarak işlenmiştir. Eş. 6.1, Eş. 6.2 ve Eş. 6.3’ de yer alan matematiksel ifadeler algoritmaya uyarlanmıştır. Deneysel sonuçlar Intel i7 1.8 GHz işlemcili ve 16 GB bellek kapasiteli bir bilgisayar kullanılarak elde edilmiştir. Her bir örnek için 10 bağımsız çalıştırma üzerinden elde edilen sonuçlar raporlanmıştır. Her bir çalıştırma için maximum fonksiyon çağırım değeri 10^5 olarak seçilmiştir. Sonrasında, boyut sayısı sırasıyla 4, 8, 16 olarak seçilerek oluşturulan tüm sistem İADAYAK algoritması ile işletilmiştir. 4 pompa kullanılarak elde edilen 100 adet optik sinyalin net kazanç değerleri Şekil 6.4’ de sunulmuştur.



Şekil 6.4. Dört adet pompa kullanılarak elde edilen optimum sonuçlar

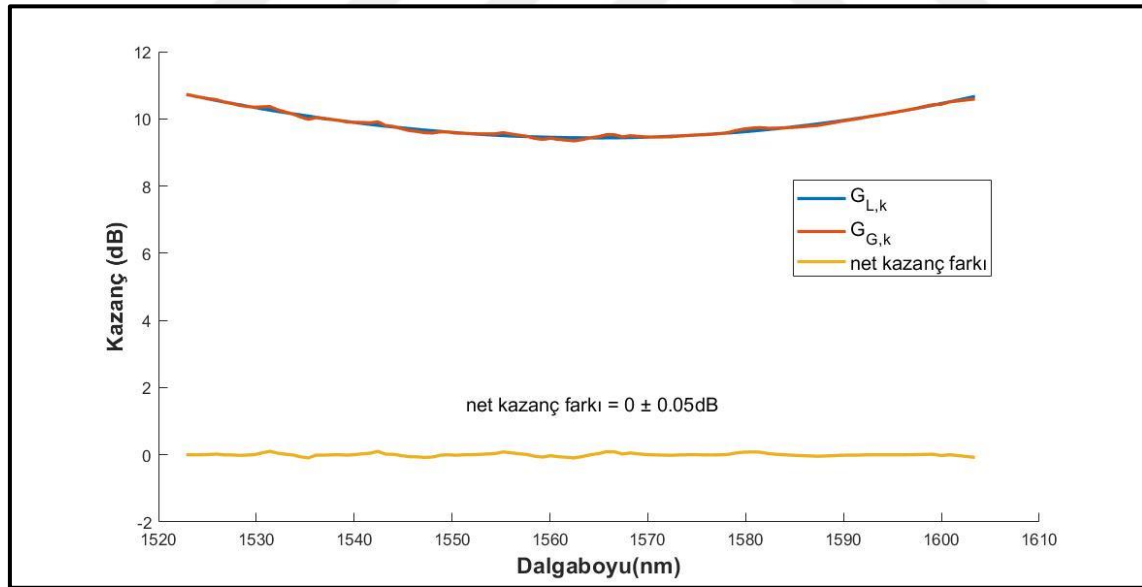
Şekil 6.4 incelendiğinde, yatay eksen boyunca uzanan mavi çizgiyi, $G_{L,k}$ değerlerinin oluşturduğu görülmektedir. Mavi çizginin üzerinde yer alan kırmızı çizginin ise 4 adet pompa kullanılarak elde edilen optimum pompa güç ve dalga boyu değerlerinin sisteme yerleştirilmesi sonucu oluşan sinyal kazanç değerleri tarafından oluşturulduğu görülmektedir. Kırmızı ve mavi çizgiler ne kadar birbirlerine örtüşürlerse sinyallerin kazancı o ölçüde düzeleşecektir. Bu sayede, optik sinyallerin 50km ilerleme sonrası güç değerleri başlangıçta sahip olduğu güç değerleri ile aynı olacaktır. Bu şekilde, kazancı düzeleştirilmiş FRY yapısı elde edilmiş olur. Ayrıca, görsellerde yer alan sarı çizgi de sinyallerin örtüşme miktarını net kazanç değeri bakımından ifade etmektedir. Elde edilen net kazanç farkı değeri ne kadar düşük olursa algoritma o derece başarılı olmuş demektir. Şekilden anlaşılaçağı üzere, 4 pompa için net kazanç farkı $0 \pm 0,4\text{dB}$ olarak bulunmuştur. 4 pompa için bulunan optimum pompa değerlerinin güçleri sırasıyla 41,2mW, 83,8mW, 58,8mW, 220,5mW olarak bulunmuştur. Bununla beraber, optimum pompa değerlerinin dalga boyları sırasıyla 1447,5nm, 1419,4nm, 1432,3nm, 1482,6nm olarak bulunmuştur. 8 pompa kullanılarak elde edilen 100 adet optik sinyalin net kazanç değerleri Şekil 6.5.' de sunulmuştur.



Şekil 6.5. 8 adet pompa kullanılarak elde edilen optimum sonuçlar

Şekil 6.5 incelendiğinde, yatay eksen boyunca uzanan mavi çizgiyi, $G_{L,k}$ değerlerinin oluşturduğu görülmektedir. Mavi çizginin üzerinde yer alan kırmızı çizginin ise 8 adet pompa kullanılarak elde edilen optimum pompa güç ve dalga boyu değerlerinin sisteme

yerleştirilmesi sonucu oluşan sinyal değerleri tarafından oluşturulduğu görülmektedir. Sistemde 8 pompa kullanılmasından dolayı mavi ve kırmızı çizgilerin 4 pompa kullanılmasına göre daha fazla örtüştüğü açıkça görülmektedir. Bu sayede, optik sinyallerin 50km ilerleme sonrası oluşan güç değerleri 4 pompa kullanılarak elde edilen güç değerlerinden daha başarılı olacaktır. Bu şekilde, daha başarılı kazancı düzleştirilmiş FRY yapısı elde edilmiş olur. Ayrıca, görsellerde yer alan sarı çizgi de sinyallerin örtüşme miktarını net kazanç değeri bakımından ifade etmektedir. Elde edilen net kazanç farkı değeri ne kadar düşük olursa algoritma o derece başarılı olmuş demektir. Şekilden anlaşılabileceği üzere, 8 pompa için net kazanç farkı $0 \pm 0,1\text{dB}$ olarak bulunmuştur. Ayrıca 8 pompa için bulunan optimum pompa değerlerinin güçleri sırasıyla 30,5mW, 45,7mW, 40,3mW, 24,1mW, 108,3mW, 233,7mW, 28,8mW, 70,5mW olarak bulunmuştur. Bununla beraber, optimum pompa değerlerinin dalga boyları sırasıyla 1453,2nm, 1444,1nm, 1430,6nm, 1400,9nm, 1402,1nm, 1506,5nm, 1461,2nm, 1414,6nm olarak bulunmuştur. 16 pompa kullanılarak elde edilen 100 adet optik sinyalin net kazanç değerleri Şekil 6.6' da sunulmuştur.



Şekil 6.6. 16 adet pompa kullanılarak elde edilen optimum sonuçlar

Şekil 6.6 incelendiğinde, yatay eksen boyunca uzanan mavi çizgiyi, $G_{L,k}$ değerlerinin oluşturduğu görülmektedir. Mavi çizginin üzerinde yer alan kırmızı çizginin ise 16 adet pompa kullanılarak elde edilen optimum pompa güç ve dalga boyu değerlerinin sisteme yerleştirilmesi sonucu oluşan sinyal değerleri tarafından oluşturulduğu görülmektedir.

Sistemde 16 pompa kullanılmasından dolayı mavi ve kırmızı çizgilerin 8 pompa kullanılmasına göre daha fazla örtüştüğü açıkça görülmektedir. Bu sayede, optik sinyallerin 50km ilerleme sonrası oluşan güç değerleri 8 pompa kullanılarak elde edilen güç değerlerinden daha başarılı olacaktır. Bu şekilde, daha başarılı kazancı düzleştirilmiş FRY yapısı elde edilmiş olur. Ayrıca, görsellerde yer alan sarı çizgi de sinyallerin örtüşme miktarını net kazanç değeri bakımından ifade etmektedir. Elde edilen net kazanç farkı değeri ne kadar düşük olursa algoritma o derece başarılı olmuş demektir. Şekilden anlaşılabileceği üzere, 16 pompa için net kazanç farkı $0 \pm 0,05\text{dB}$ olarak bulunmuştur. Ayrıca, 16 pompa için bulunan optimum pompa değerlerinin güçleri sırasıyla 36mW, 8,2mW, 17,7mW, 57,4mW, 22,7mW, 16mW, 2,1mW, 26,1mW, 23,2mW, 9,7mW, 4mW, 19,5mW, 51,2mW, 197mW, 34,8mW, 2mW olarak bulunmuştur. Bununla beraber, optimum pompa değerlerinin dalga boyları sırasıyla 1431,9nm, 1426,5nm, 1465,4nm, 1402,7nm, 1488nm, 1404,6nm, 1415nm, 1452,6nm, 1442,9nm, 1442,2nm, 1425,7nm, 1459,3nm, 1412,2nm, 1503nm, 1419nm, 1448,8nm olarak bulunmuştur.

Şekil 6.4, Şekil 6.5, Şekil 6.6 beraber incelendiğinde, sisteme ne kadar fazla sayıda pompa dahil edilirse algoritmanın başarısının o derece arttığı anlaşılmaktadır. Ancak, pratikte çok fazla pompa kullanmak hem sistemin maliyetini artırmakta hem de zayıf sinyal güçlerinin sisteme eklenmesi gereksiz olmaktadır. Bu sebeple hem kazancı optimum seviyede düzleştirmek hem de uygun sayıda pompa kullanmak en mantıklı seçenek olarak ön plana çıkmaktadır. Alan yazın incelendiğinde, kullanılan pompa sayılarının 2' nin üssel katı olarak seçildiği görülmüştür [45]. Bazı araştırmacılar 4 pompa ve 60 veya 80 optik sinyal kullanarak belirli düzeyde kazancı düzleştirilmiş sonuçlar elde etmişlerdir. Bazı araştırmacılar ise, 16 pompa ve 100 sinyal kullanarak mümkün olan en düz şekilde kazancı düzleştirilmiş sonuçlar elde etmeye çalışmışlardır [59]. Bu çalışmada ise, yukarıda yapılan bilgilendirmeler ve alan yazına uygun olarak 8 pompa ve 100 sinyal kullanılan sistem oluşturularak FRY denkleminin çözümü uygun görülmüştür. Bu şekilde, hem pratikte görülen 100 sinyal aynı anda iletilmiş hem de deneysel olarak uygulanabilir bir pompa sayısı kullanılmıştır. Ayrıca, çalışmada kullanılan pompa ve sinyal sayısı ile optik fiber uzunluğu değişkenlerinin alan yazında da araştırma değişkenleri olarak kullanıldığı görülmektedir [19].

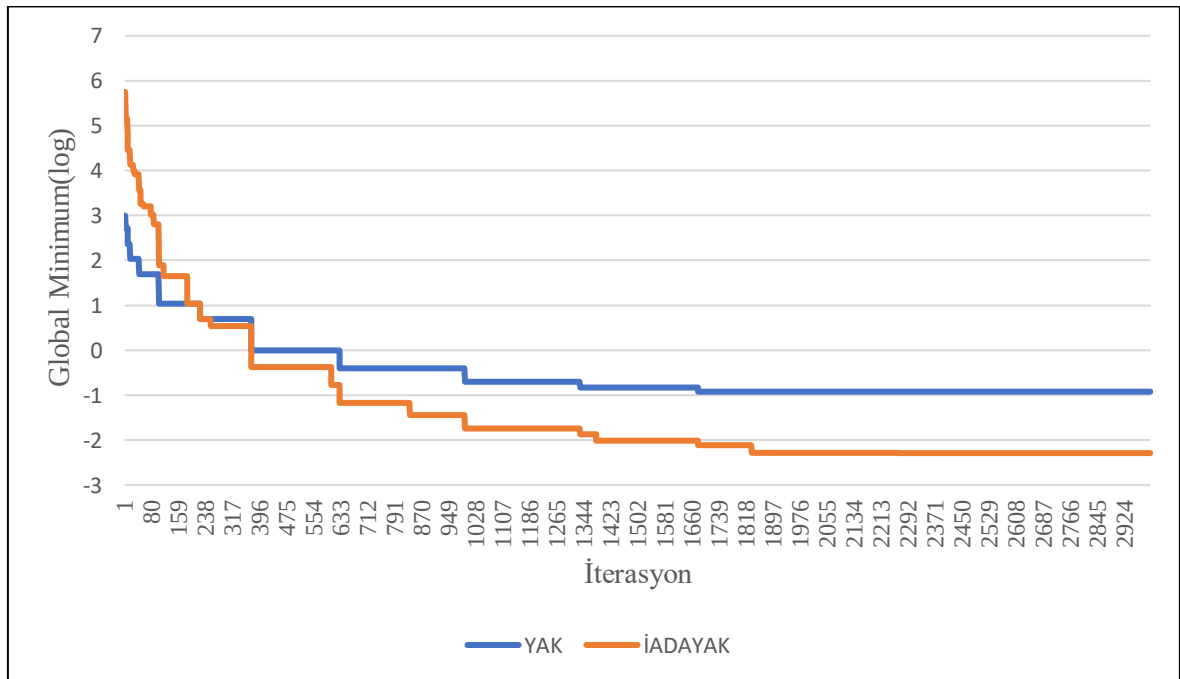
Klasik YAK algoritması ile bu çalışmada önerilen İADAYAK algoritması arasındaki başarı faktörünü ortaya koymak için ortalama net kazanç değeri, başarı kriteri olarak alan yazında

kullanılmaktadır [45]. Bu bağlamda, her iki algoritma için 8 boyut seçilerek 10 bağımsız çağırım değerleri sonuçları aşağıda çizelge ile sunulmuştur.

Çizelge 6.1. Klasik YAK ve İADAYAK algoritması arasındaki istatistiksel karşılaştırma sonuçları

Algoritma	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
YAK	0,125	0,288	0,210	0,070119
İADAYAK	0,043	0,151	0,085	0,036972

Çizelge 6.1 de her iki algoritma için istatistiksel karşılaştırma sonuçları görülmektedir. Sonuçlardan anlaşıldığı üzere, önerilen algoritmanın maksimum ve minimum ortalama net kazanç değerleri, standart YAK algoritmasından daha iyi sonuç verdiği açıkça görülmektedir. Bunun yanında, algoritmaların adilliği açısından her iki algoritmanın ilkleme popülasyonu 100 olarak seçilmiş, işçi arı ve gözlemci arı aşamasında her iki algoritma için 100' er yiyecek kaynağı belirlenmiştir. Ayrıca, 3000 iterasyon değeri her iki algoritma için eşit seçilerek yaklaşık 600 bin fonksiyon çağırımı değeri (FEs) ile her iki algoritma çalışmaktadır. Bu değerler ışığında, her iki algoritmanın yakınsama değeri şekil olarak sunulmuştur. Ayrıca, algoritmaların çalışmasından elde edilen yakınsamanın daha net görüntülenebilmesi için her iterasyonda elde edilen Global minimum değerlerinin logaritması alınarak aşağıdaki şekilde sunulmuştur.

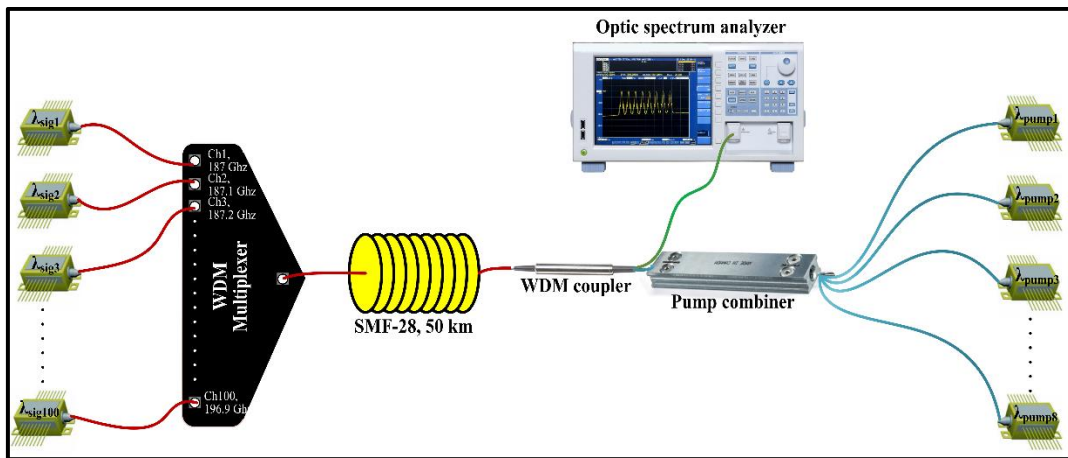


Şekil 6.7. Algoritmaların yakınsama değeri sonuçları

Şekil 6.7 incelendiğinde, klasik YAK ve çalışmada önerilen İADAYAK algoritmasının yakınsama grafiği görülmektedir. Mavi çizgi YAK algoritmasını, Turuncu çizgi ise İADAYAK algoritmasını temsil etmektedir. Algoritmaların başarı değerleri için ortalama net kazanç değerleri kriter olarak kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, önerilen İADAYAK algoritmasının klasik YAK algoritmasından daha başarılı sonuçlar verdiği açıkça görülmektedir.

6.2. FRY Denklem Çözümü ve Kurulan Sisteme Ait Bilgiler

Çalışma kapsamında, FRY denklemini çözmek için sistem oluşturulmuştur. Çalışma 50 km uzunluğunda fiber optik kablo üzerine kurulmuştur. Optik fiber kablo çeşidi olarak SMF-28 optik kablo kullanılarak bu kablounun zayıflama katsayısı dikkate alınmıştır. Bununla beraber, Raman kazanç katsayısı grafiği fonksiyon haline getirilerek sisteme dâhil edilmiştir. Bu şekilde, 100 adet optik sinyal L_0 noktasından farklı dalda boylarında aynı anda ilerleyecek şekilde yerleştirilmiştir. Ayrıca, herhangi bir nümerik hata olmaması için sinyal dalga boyları sisteme artan dalga boyu sırası ile yerleştirilmiştir. 8 adet pompa ise L_{50} noktasından optik sinyallere zıt yönde fakat optik sinyallerle aynı anda hareket edecek şekilde sisteme yerleştirilmiştir. Pompaların optimum dalga boyları sırasıyla 1453,2nm, 1444,1nm, 1430,6nm, 1400,9nm, 1402,1nm, 1506,5nm, 1461,2nm, 1414,6nm ve güçleri sırasıyla 30,5mW, 45,7mW, 40,3mW, 24,1mW, 108,3mW, 233,7mW, 28,8mW, 70,5mW 'dır. FRY denklem çözümü için kurulan sistem düzeneğinin basitleştirilmiş yapısı Şekil 6.8' de sunulmuştur.



Şekil 6.8. Oluşturulan sistem düzeneğinin basit gösterimi

Raman yükselteç denklem çözümü birçok araştırmacı tarafından çalışılmış ve denklem çözümünde oldukça keskin değişimler olduğu rapor edilmiştir. Lineer olmayan denklem çözümleri için de bu sonucun doğal olduğunu bildirmişler ve çözüm için çok sayıda yöntem önermişlerdir. Bunlardan biri, MATLAB BVP çözücüsüdür. BVP çözücü işlevinin amacı, sınır değer problemleri için hızlı ve etkili sonuçlar üretmektir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar incelendiğinde, hem hız hem de doğruluk açısından diğer çözüm yöntemlerine iyi bir alternatif olduğu sonucuna varılmıştır.

FRY denklem çözümünde dikkat edilmesi gereken nokta, sinyal ve pompalar zıt yönde ilerlerken, keskin değişimleri kararlı ve hızlı şekilde sonuca ulaştıran metotların kullanılmasıdır. Ayrıca, bu metotları kullanırken hesaplamanın daha hızlı ve kararlı olmasında analitik Jacobian matrisi önemli etkiye sahiptir. Çünkü FRY denklemi lineer değildir, aynı zamanda birden fazla sinyal ve pompa gücü içerdiğinden karmaşık integral hesaplamaları fazlaca zaman almaktadır. Bu sebeple, analitik Jacobian matrisinin denklem çözümünde hazır olarak bulunması oldukça önemlidir. Örneğin, çalışmada ortaya koyulan 100 sinyal ve 8 pompadan oluşan FRY sisteminde $[108 \times 108]$ elemanlı matrisin sistem tarafından hesaplanması uzun zaman almaktadır. FRY denklemi göz önüne alındığında, analitik Jacobian matrisinin çözüm algoritmasına hazır bir şekilde verilmesinin nümerik hesaplama katkı sağlayacağı yapılan çalışmalar neticesinde görülmüştür [118].

Bu çalışmada, FRY diferansiyel denklemini çözmek için MATLAB BVP çözücü fonksiyonu kullanılmıştır. Öncelikle, 100 sinyal için belirlenen dalga boyları ve başlangıç güç değerleri matris olarak programa girilmiştir. Daha sonra, pompalar için optimum dalga boyları ve güç değerleri de programa girilmiş ve FRY denklem çözümü için üç temel fonksiyon oluşturulmuştur.

Oluşturulan temel fonksiyonlardan ilki diferansiyel denklemdeki sinyallerin ve pompaların güç ve dalga boylarını içermekte olup probleme özel olarak yazılmış analitik Jacobian matrisi ile programa dâhil edilmiştir. Burada önemli nokta, 100 optik sinyal ve 8 pompa için $[108 \times 108]$ ’lik bir matrisin algoritmaya tek tek yerleştirilmesinin zor ve zahmetli olmasıdır. Çünkü, hesaplamalarda bazı değişkenlerin değerlerini değiştirmek veya farklı değerlerle tekrar işlem yaptırmak gerektiğinde bu matrisin tekrar hesaplanması gerekmektedir. Bu sebeple, bu zor ve zahmetli işlemi basitleştirmek için bu matrisi hazır olarak hesaplayan algoritma fonksiyon biçiminde ayrı olarak yazılmıştır. Bu şekilde, tekrar işlem yapma

sırasında Jacobian matrisini manuel olarak tek tek hesaplayıp yazmak yerine gerekli parametreleri değiştirerek istenen pompa ve sinyal sayısı ve özelliklere sahip Jacobian matris, oluşturduğumuz fonksiyon tarafından hesaplanabilmektedir. Bu fonksiyona ait matrisler çok büyük olduğundan bu kısımda sadece örnek olması açısından 2 pompa 5 sinyalden oluşan sistemin analitik Jacobian matrisi Şekil 6.9'de sunulmuştur.

```
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

];

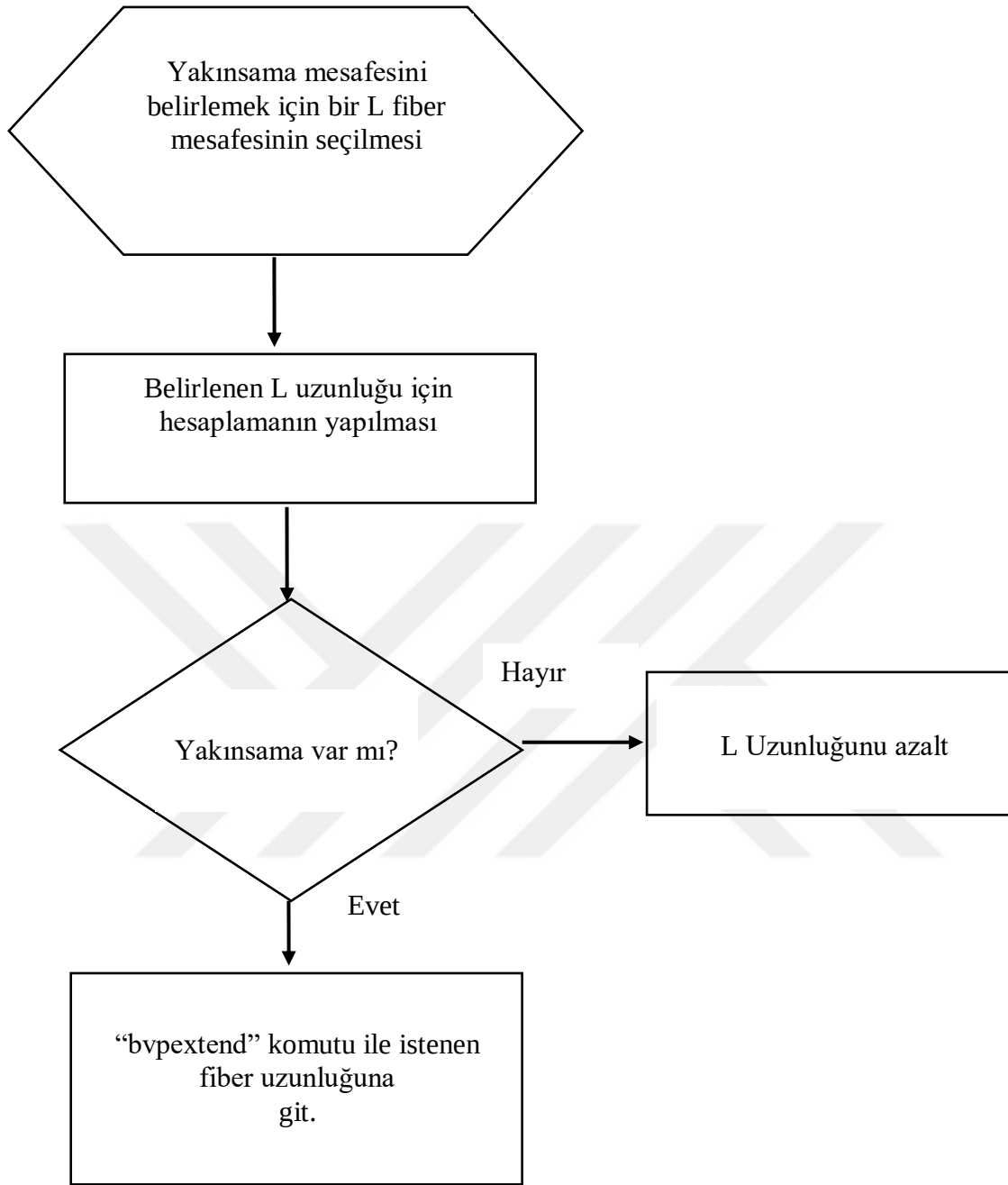
dFdy = jacobian(res,[y1; y2; y3; y4; y5])
```

Şekil 6.9. İki pompa beş sinyalden oluşan FRY çözümünde kullanılan analitik Jacobian matrisi örneği

İkinci fonksiyon, pompanın ve sinyallerin güç değerlerine göre yönlerini ve sınır değerlerini içerir. Örneğin, çalışmada kullanılan 100 optik sinyal ve 8 pompanın tüm güç değeri buraya işlenmekte ayrıca bu güç değerlerinin yönleri oluşturulan şablon denkleme göre yerleştirilmiştir. Üçüncü fonksiyon, sinyallerin pozitif yönde ve pompaların negatif yönde aynı anda 0 ila 50 km arasında yakınsamasını sağlayan tahmin değerlerinin hesaplanmasını içerir. Ayrıca, bu fonksiyon içerisindeki döngü yardımıyla belirli bir hata payı koşulunu sağlayarak sinyallerin ve pompaların belirlenen mesafeye kademeli ve maksimum derecede yakınsamasına yardımcı olur. Yakınsama esnasında çalışan tahmin fonksiyonunun iyi sonuçlar vermesi döngü sayısı ile de ilgilidir. Çözümde ne kadar fazla döngü kullanılırsa tahmin değeri o derece iyi sonuçlar verebilir, fakat bu durumda FRY denkleminin çözüm hızı yavaşlamaktadır. Ayrıca, az sayıda döngü kullanılan durumlarda ise tahmin değeri

belirli hata koşulunu sağlayamamaktadır. Bu durumda da çözüm performansı düşmektedir. Bu sebeple, tüm pompa ve sinyaller 500 adımda 50 km gibi uzun bir mesafeyi kat etmişlerdir. Bununla beraber, üçüncü fonksiyonun son kısmında FRY denklem çözümü sonucunda oluşturulan görsellerin kodları yer almaktadır. Bu sayede, çözüm sonucu bulunan değerler görselleştirilmiştir. Elde edilen görseller Bulgular kısmında sunulmuştur.

Tüm bu parametreler ve oluşturulan 3 fonksiyon eksiksiz olarak kodlanarak oluşturulan program başarıyla çalıştırılmıştır. Çalışma sırasında, optik fiberde sinyaller ve pompalar eş zamanlı olarak ters yönde ilerlerken, çalışmamızda kullanılan MATLAB BVP çözücü fonksiyonunun belirlenen hedef doğrultusunda kararlı ve hatasız çalıştığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, analitik Jacobian matrisi sisteme hazır olarak dâhil edildiğinden çözüm hızı açısından rekabetçi düzeyde denklemleri çözdüğü gözlemlenmiştir [7]. Bu sayede hem hız açısından hem de keskin değişimlerde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmanın tüm fonksiyonlarını ve kodlamasını burada sunmak mümkün olmadığından, sinyallerin ve ters yöndeki pompaların eş zamanlı kademeli olarak yakınsamasını içeren ve önemli görülen BVP çözücü fonksiyonunun işleyişi bir akış diyagramı olarak Şekil 6.10 'de sunulmuştur.



Şekil 6.10. MATLAB BVP çözücü fonksiyonun akış diyagramı

Akış diyagramı incelendiğinde, FRY diferansiyel denklemini çözmek için öncelikle optik fiber uzunluğunun belirlenmesi gerektiği açıktır. Çalışma için oluşturulan sistem düzeneği kısmında açıklandığı gibi deney için seçilen optik fiber uzunluğu 50km’ dir. Sonrasında, döngü yardımıyla seçilen fiber mesafesi belirli uzaklıklara bölünerek her döngüde tüm optik sinyal ve pompaların durumları tek tek değerlendirilerek yakınsama olup olmadığı kontrol edilir. Eğer belirlenen hata payından daha küçük sayıda yakınsama değerine ulaşırsa döngüde bir üst fiber mesafesine geçilir. Eğer belirlenen hata payından daha büyük

yakınsama değeriine ulaşılırsa sistem tarafından otomatik olarak fiber mesafesi kısaltılarak tüm pompa ve sinyaller için hata koşulunu sağlayana kadar süreç tekrar işler. Fakat, bu durumda çözüm için zaman kaybı artarak sistemin çözüm performansı düşer. Burada yöntem kısmı sonlanmış olup yöntem dahilinde elde edilen sonuçlar, Bulgular kısmında sunulmuştur.



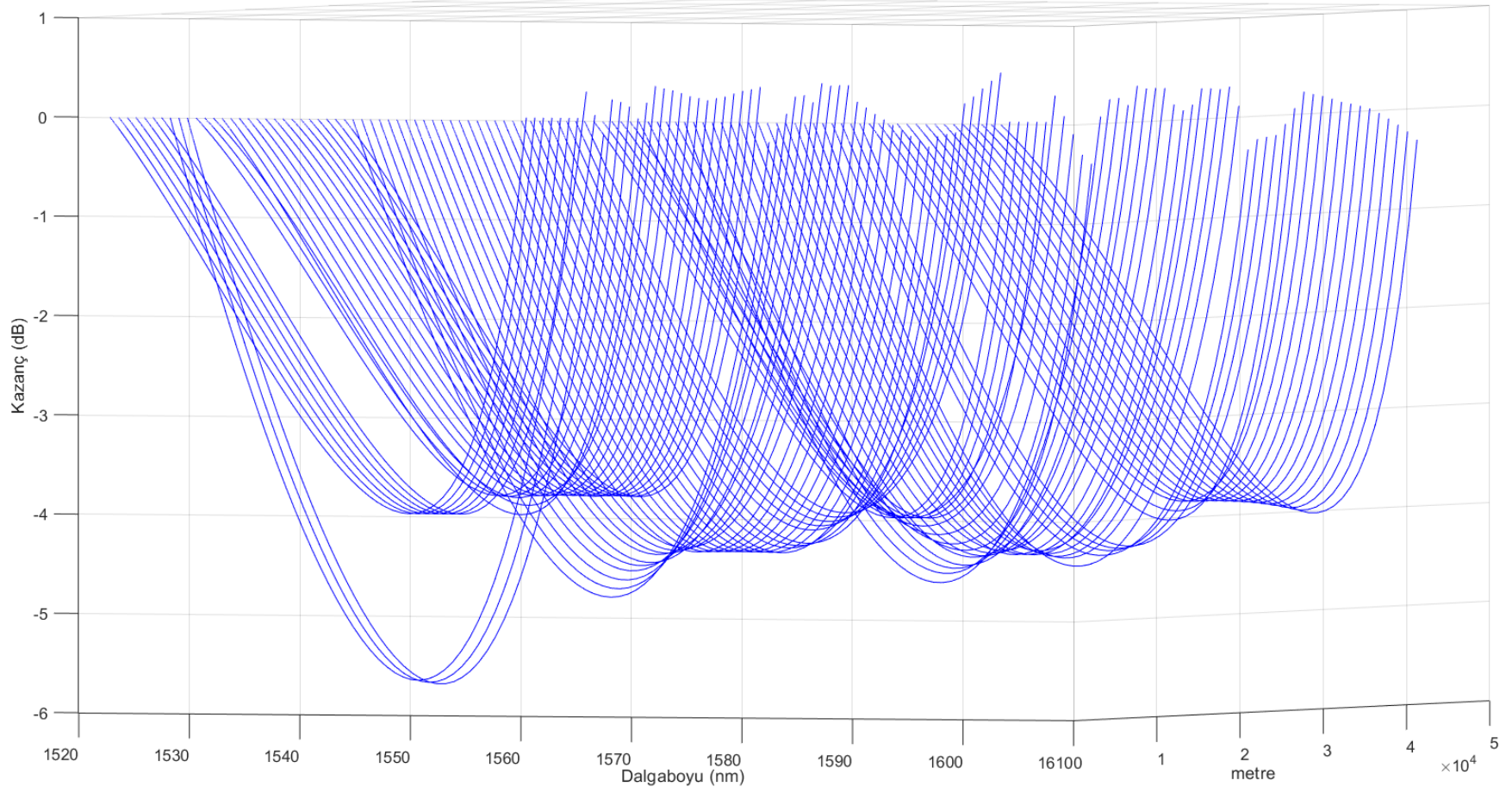
7. BULGULAR

Bu çalışmada 50km' lik optik fiber üzerinde 100 adet optik sinyal ve 8 adet pompanın birbirlerine zıt yönde hareket ettiği bir FRY sistemi oluşturulmuştur. 100 adet optik sinyalin kazancının düzleştirilmesi için öncelikle 8 adet pompanın optimum dalga boyu ve güçleri İADAYAK algoritması ile bulunmuştur. Sonrasında, FRY diferansiyel denklemi sınır değer problemi olarak tanımlanarak MATLAB BVP çözücü yardımıyla çözümlenmiştir. Aşağıda 8 pompa için elde edilen optimum dalga boyu ve güçleri Çizelge 7.1' de sunulmuştur.

Çizelge 7.1. 8 adet pompa sinyali kullanılarak elde edilen optimum dalga boyu ve güç değerleri

Dalga boyu(nm)	1453,2	1444,1	1430,6	1400,9	1402,1	1506,5	1461,2	1414,6
Giriş Gücü(mW)	30,5	45,7	40,3	24,1	108,3	233,7	28,8	70,5

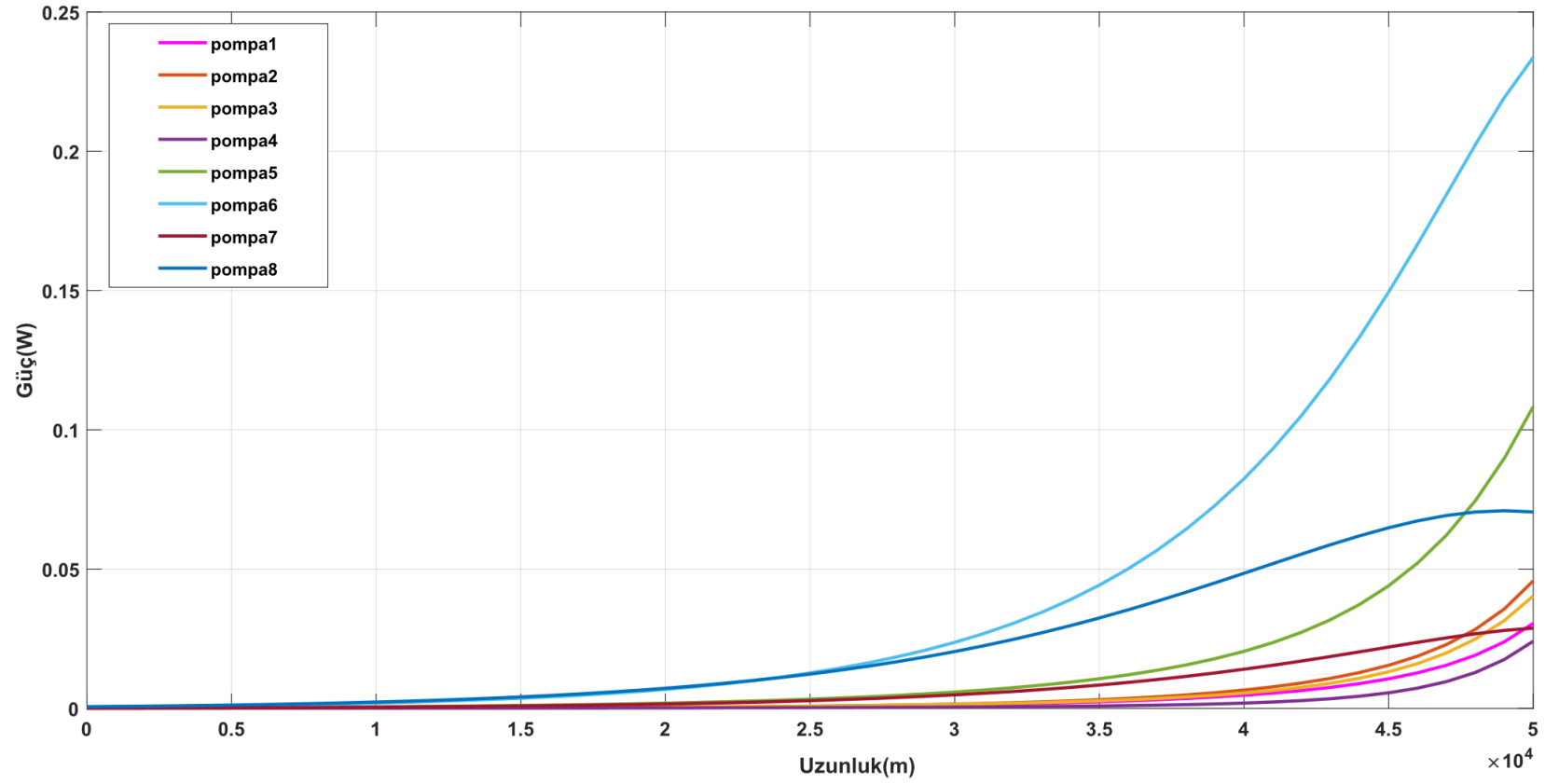
Yukarıda 8 pompa için elde edilen optimum dalga boyu ve güçleri FRY denklem sisteminde yerine yazılarak denklem nümerik olarak çözümlenmiştir. Elde edilen çözümlerin daha net anlaşılması için grafik üç boyutlu olarak görselleştirilerek Şekil 7.1.' de sunulmuştur.



Şekil 7.1. Kazancı düzleştirilmiş 100 adet optik sinyalin 50km uzunluğundaki optik fiberde ilerleme sonuçları

Çok pompalı dağıtık FRY sistemlerinde amaç, çıkış seviyesini olabildiğince düzleştirerek dalgalanmaları en aza indirmektir. 100 sinyalin 50 km boyunca yayılmasını gösteren Şekil 7.1 incelendiğinde; kazanç dalgalanmasının maksimum $\pm 0,5$ dB olduğu açıkça görülmektedir. Bazı sinyallerin çıkış seviyesi başlangıç değerine çok yakınken, bazı sinyaller başlangıç güçlerinden daha düşük veya daha yüksektir. Sinyallere ters yönde ilerleyen pompa güçlerinin yayılım sırasındaki değişimi ise Şekil 7.2.' de görsel olarak gösterilmiştir.





Şekil 7.2. Sinyallere zıt yönde ilerleyen 8 adet pompanın optik fiberdeki ilerleme sonuçları

Şekil 7.2 'de optik fiber boyunca pompa güçlerinin ilerleyişi incelendiğinde, bazı pompaların güçlerinin tükenme hızının yayılma sırasında önce yavaşladığı, sonrasında ise arttığı görülmektedir. Bunun nedeni pompaların yayılım sırasında birbirleriyle ve sinyallerle etkileşime girmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, optik fiberin pompaların ilerleme yönüne göre sonunda, tüm pompa güçlerinin tüketildiği de açıkça görülmektedir. Yukarıda sunulan şekillerden anlaşıldığı üzere, kazancı düzleştirilmiş FRY diferansiyel denklemi başarı ile çözümlenmiştir. Çözüm performansı ise Tartışma kısmında detaylı olarak incelenmiştir.





8. TARTIŞMA

Alan yazın incelendiğinde, çalışmaların başarı oranları genel olarak net kazanç dalgalanması, kullanılan pompa sayısı ve denklem çözme hızı açısından karşılaştırılmıştır. Aşağıda yer alan Çizelge 8.1.' de bazı çalışmalarda kullanılmış pompa ve sinyal sayısı, fiber yayılma mesafesi ve elde edilen kazanç dalgalanma değerleri sunulmuştur.

Çizelge 8.1. Optik fiber uzunluğu, sinyal ve pompa sayılarına göre alan yazındaki çalışmalar

Araştırmacılar	Pompa sayısı	Sinyal sayısı	Fiber uzunluğu(km)	Kazanç dalgalanması(dB)
Jiang, Xie, Wang	8	100	50	0,7
Cui ve ark.	8	120	50	0,5
Hu ve ark.	8	80	50	0,64
Perlin and Winful	16	100	50	0,2
Yan, Chen, Jiang ve ark.	4	64	20	1,8
Bastos-Filho, Figueiredo	4	40	75	1
Han, Ning, Zhang	4	45	80	0,8
Yolcu, Yücel, Aydın	8	100	50	0,5

Çizelge 8.1' de sunulan değerler kazanç dalgalanması açısından incelendiğinde, her çalışmada farklı parametrelerin kullanıldığı görülmektedir. Bazıları farklı fiber uzunluklarına sahipken, bazıları farklı pompa ve sinyal numaralarına sahiptir. Bu nedenle, kazanç dalgalanması açısından objektif bir karşılaştırma yapmak mümkün değildir. Ayrıca, kullanılan pompa sayısı da düşük kazançlı dalgalanmanın elde edilmesinde önemli rol oynamaktadır. Genel olarak, kullanılan pompa sayısı arttıkça kazanç dalgalanması azalır. Ancak bu durumda hesaplama süresi artmakta ve performans düşmektedir. Aynı şekilde, kısa fiber mesafesi kullanmak düşük kazançlı dalgalanmaya katkıda bulunur. Alan yazında yer alan parametreler dikkate alınarak yapılan çalışmada, 100 optik sinyal, 8 pompa kullanılmış ve 50 km fiber mesafesi kullanılmıştır. Yapılan çalışmada kullanılan optik sinyal sayısı, pompa sayısı ve fiber mesafesine bağlı olarak alan yazında yapılan çalışmalar ile kıyaslandığında başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bunun yanında, yapılan çalışmalar çözüm hızı açısından değerlendirildiğinde, çalışmada kullanılan parametrelerden sinyal sayısı, iletim mesafesi, maksimum fonksiyon çağrısı değeri ve kullanılan bilgisayar sistemlerinin

birbirinden farklı olduğu görölmüştür. Bu konuda yapılan çalışmalarda kullanılan parametreler, çözüm hızının karşılaştırılmasında önemli bir rol oynadığı için objektif karşılaştırmalar yapmak zordur. Bu çalışmada tüm optimizasyon işlemleri sisteme dahil edilerek sistemin toplam çalışma süresi ölçüldüğünde, denklemin çözümünün $4 \cdot 10^3$ saniyede tamamlandığı gözlemlenmiştir. İlgili alan yazın incelendiğinde, toplam harcanan sürenin çözüm hızı açısından rekabetçi sonuçlar arasında yer aldığı görölmektedir. Ayrıca, toplam sürenin yaklaşık $2 \cdot 10^2$ saniyesi (10 bağımsız çalışma), 8 pompanın optimum pompa dalga boylarını ve güçlerini bulmak için harcanmıştır. Bu kadar kısa sürede 8 pompanın optimum pompa dalga boyları ve güçlerinin bulunması, geliştirdiğimiz İADAYAK algoritmasının başarılı olduğunun bir kanıtıdır.



9. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, 50km' lik optik fiber üzerinde 100 adet optik sinyal ve 8 adet pompanın birbirlerine zıt yönde hareket ettiği bir FRY sistemi oluşturulmuştur. 100 adet optik sinyalin kazancının düzleştirilmesi için öncelikle 8 adet pompanın optimum dalga boyu ve güçleri İADAYAK algoritması ile bulunmuştur. Sonrasında, FRY diferansiyel denklemi sınır değer problemi olarak tanımlanarak MATLAB BVP çözücü fonksiyonu yardımıyla çözümlenmiştir. Çalışmamızda kullanılan sistem parametreleri özellikle günümüz teknolojisine uygun olarak seçilmiştir. Bu sayede, gelecekte ilgili alanda yapılacak deneysel çalışmalara öncülük edilmesi amaçlanmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, kazanç dalgalanmasının $\pm 0,5$ dB ve toplam çalışma süresinin $4 \cdot 10^3$ saniye olduğu tespit edilmiştir. Bu sayede, gerçek zamanlı sistemler için gerekli olan hız ve performans aynı anda sağlanmaya çalışılmıştır. Bunun yanında, geliştirdiğimiz optimizasyon algoritması ve FRY denklemini çözmek için kullandığımız yöntem, iki adet SCI kapsamında makale ve bir adet uluslararası sempozyumda bildiri olarak sunulularak toplam üç adet olmak üzere literatüre katkı sağlamıştır. Her ne kadar alan yazında yer alan çalışmaların çoğunluğu teorik olarak FRY denklem sistemini çözümlerse de, FRY denklem çözümünün deneysel olarak yapılamaması araştırmanın sınırlılığı olarak ifade edilebilir. Bununla beraber bu kapsamda, ilerleyen çalışmalarda daha uzak fiber mesafesi ve daha az sayıda pompa kullanılarak FRY denkleminin daha performanslı olarak çözülmesi amaçlanmaktadır. Bu bağlamda, FRY denklem çözümünde daha başarılı algoritmaların kullanılması düşünülmektedir. Bu sayede yapay zekâ teknolojisi alanında üretilen algoritmaların geliştirilmesi ile bu çalışmaya benzer optimizasyon problemlerinin çözüm başarısının artacağı düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

1. Yücel M., Öztürk N. F., Torun M. and Yücel M. (2017). Design and application of a fiber Bragg grating array-based temperature measurement system. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(3), 957-964.
2. Durak F., Navruz İ. and Altuncu A. (2013). Design and production of long period fiber grating using electrical arc technique. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28(1), 27-32.
3. Yücel M, Göktaş ve H. Haldun (2006). Fiber Raman yükselteçlerde pompalama yönünün kazanç spektrumuna etkisi üzerine bir simulasyon, *Journal of Polytechnic*, 9(3), 161–164.
4. Agrawal, G. P. (2000). *Nonlinear fiber optics*. In *Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century* (pp. 195-211). Berlin, Heidelberg.
5. Moura, U. C., Da Ros, F., Brusin, A. M. R., Carena, A., and Zibar, D. (2020). Experimental characterization of Raman amplifier optimization through inverse system design. *Journal of Lightwave Technology*, 39(4), 1162-1170.
6. Agrawal, G. P. (2012). *Fiber-optic communication systems*. John Wiley & Sons.
7. Yolcu V., Yücel M. and Aydın D. (2023). Solution of fiber Raman amplifier model using binary search equation-based adaptive artificial bee colony algorithm. *Optical Engineering*, 62(2), 026105.
8. Karaboga, D., and Akay, B. (2009). A comparative study of artificial bee colony algorithm. *Applied mathematics and computation*, 214(1), 108-132.
9. Yavuz, G. and Aydın, D. (2019). Improved self-adaptive search equation-based artificial bee colony algorithm with competitive local search strategy. *Swarm and Evolutionary Computation*, 51, 570-582.
10. Perlin V. E. and Winful H. G. (2002). On Distributed Raman Amplification for Ultrabroad-Band Long-Haul WDM Systems, *Journal of Lightwave Technology*, 20, 409–416.
11. Hu, J., Marks, B. S. and Menyuk, C. R. (2004). Flat-gain fiber Raman amplifiers using equally spaced pumps. *Journal of lightwave technology*, 22(6), 1519-1522.
12. Jiang, H. M., Xie, K. and Wang, Y. F. (2010). Shooting algorithm and particle swarm optimization-based Raman fiber amplifiers gain spectra design. *Optics communications*, 283(17), 3348-3352.
13. Liu, T., Liu, L., Chen, J., Jiang, H., Sun, Q. and Xie, Y. (2018). Optimal design of Raman fibre amplifier based on terminal value optimization strategy and shuffled frog leaping algorithm. *Journal of Modern Optics*, 65(14), 1680-1687.

14. Jiang, H. M., Xie, K. and Wang, Y. F. (2011). Novel design of flat gain spectrum Raman fiber amplifiers based on ant colony optimization. *IEEE Photonics Technology Letters*, 23(23), 1823-1825.
15. Chen, J. and Jiang, H. (2018). Optimal design of gain-flattened Raman fiber amplifiers using a hybrid approach combining randomized neural networks and differential evolution algorithm. *IEEE Photonics Journal*, 10(2), 1-15.
16. Zibar, D., Brusin, A. M. R., de Moura, U. C., Da Ros, F., Curri, V. and Carena, A. (2019). Inverse system design using machine learning: the Raman amplifier case. *Journal of Lightwave Technology*, 38(4), 736-753.
17. Liu, X. and Lee, B. (2003). Optimal design for ultra-broad-band amplifier. *Journal of Lightwave Technology*, 21(12), 3446.
18. Han, Q., Ning, J., Zhang, H. and Chen, Z. (2006). Novel shooting algorithm for highly efficient analysis of fiber Raman amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 24(4), 1946-1952.
19. Cui, S., Liu, J. & Ma, X. (2004). A novel efficient optimal design method for gain-flattened multiwavelength pumped fiber Raman amplifier. *IEEE photonics technology letters*, 16(11), 2451-2453.
20. Coe, L. (2003). *The telegraph: A history of Morse's invention and its predecessors in the United States*. McFarland.
21. Evans, W. E. and Rohne, J. C. (1979). An Intercity Coaxial Cable Electronic Highway. *IEEE Transactions on Cable Television*, (2), 56-62.
22. Osepchuk, J. M. (2009, June). The history of the microwave oven: A critical review. In *2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. 23, 1397-1400.
23. Faltas, S. (1988). The invention of fibre-optic communications. *History and Technology, an International Journal*, 5(1), 31-49.
24. Agrawal, G. P. (2011). Nonlinear fiber optics: its history and recent progress. *JOSA B*, 28(12).
25. Pinnow, D. A., Rich, T. C., Ostermayer Jr, F. W. and DiDomenico Jr, M. (1973). Fundamental optical attenuation limits in the liquid and glassy state with application to fiber optical waveguide materials. *Applied Physics Letters*, 22(10), 527-529.
26. Bueker, H., Haesing, F. W. and Gerhard, E. (1992, April). Physical properties and concepts for applications of attenuation-based fiber optic dosimeters for medical instrumentation. In *Fiber Optic Medical and Fluorescent Sensors and Applications*. 164(8), 63-70.

27. Bogatyrev, V. A., Bubnov, M. M., Dianov, E. M., Kurkov, A. S., Mamyshev, P. V., Prokhorov, A. M. and Miroshnichenko, S. I. (1991). A single-mode fiber with chromatic dispersion varying along the length. *Journal of lightwave technology*, 9(5), 561-566.
28. Golovchenko, E. A., Pilipetskii, A. N., Bergano, N. S., Davidson, C. R., Khatri, F. I., Kimball, R. M. and Mazurczyk, V. J. (2000). Modeling of transoceanic fiber optic WDM communication systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6(2), 337-347.
29. Dar, R., Feder, M., Mecozzi, A. and Shtaif, M. (2014). Accumulation of nonlinear interference noise in fiber-optic systems. *Optics express*, 22(12), 14199-14211.
30. Amiri, I. S., Rashed, A. N. Z., Jahan, S., Paul, B. K., Ahmed, K. and Yupapin, P. (2019). Technical specifications of the submarine fiber optic channel bandwidth/capacity in optical fiber transmission systems. *Journal of Optical Communications*, 13(8), 2441-2453.
31. Wilkins, G. (2000). Fiber Optic Telemetry in Ocean Cable Systems. *The Ocean Engineering Handbook*.
32. Keiser, G. E. (1999). A review of WDM technology and applications. *Optical Fiber Technology*, 5(1), 3-39.
33. Liao, Y., Austin, E., Nash, P. J., Kingsley, S. A. and Richardson, D. J. (2012). Highly scalable amplified hybrid TDM/DWDM array architecture for interferometric fiber-optic sensor systems. *Journal of Lightwave Technology*, 31(6), 882-888.
34. Terrones, G. and Pearlstein, A. J. (2001). Effects of optical attenuation and consumption of a photobleaching initiator on local initiation rates in photopolymerizations. *Macromolecules*, 34(10), 3195-3204.
35. G. Vairelle, F. Pitel, and J. F. Marcereou, Paper PD22, *Proc. Optical Fiber Commun. Conf.*, Optical Society of America, Washington, DC, 2001.
36. Kreibig, U. and Genzel, L. J. S. S. (1985). Optical absorption of small metallic particles. *Surface Science*, 156, 678-700.
37. Hall, D. C., Burns, W. K. and Moeller, R. P. (1995). High-stability Er/sup 3+/-doped superfluorescent fiber sources. *Journal of lightwave technology*, 13(7), 1452-1460.
38. Günday A., Karlık S. and Yilmaz G. (2014). The impact of temperature and strain formations on young and shear modul in usage of optical fiber distributed sensing for power cables, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(3), 517-525.
39. Göktaş, H. H. ve Yücel, M. (2011). Erbiyum katkılı fiber yükselteçlerde ASE' nin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(2), 207-210.

40. Ismail, M. M., Othman, M. A., Zakaria, Z., Misran, M. H., Said, M. M., Sulaiman, H. A. and Mutalib, M. A. (2013). EDFA-WDM optical network design system. *Procedia Engineering*, 53, 294-302.
41. Dianov, E. M. and Mashinsky, V. M. (2005). Germania-based core optical fibers. *Journal of lightwave technology*, 23(11), 3500-3508.
42. Yamada, M., Mori, A., Kobayashi, K., Ono, H., Kanamori, T., Oikawa, K. and Ohishi, Y. (1998). Gain-flattened tellurite-based EDFA with a flat amplification bandwidth of 76 nm. *IEEE Photonics Technology Letters*, 10(9), 1244-1246.
43. Blow, K. J. and Wood, D. (1989). Theoretical description of transient stimulated Raman scattering in optical fibers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 25(12), 2665-2673.
44. Golovchenko, E. A., Mamyshev, P. V., Pilipetskii, A. N. and Dianov, E. M. (1990). Mutual influence of the parametric effects and stimulated Raman scattering in optical fibers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 26(10), 1815-1820.
45. Perlin V. E. and Winful H. G. (2002). On Distributed Raman Amplification for Ultrabroad-Band Long-Haul WDM Systems, *Journal of Lightwave Technology*, 20, 409-416
46. Gökhan, F. S. (2010). *Optik fiberli brillouin ve dağınık raman kuvvetlendiricilerinin matlab nümerik çözümleri ile performans analizleri*. Doctoral dissertation, Bursa Uludag Üniversitesi, Türkiye.
47. Ippen, E. P. and Stolen, R. H. (1972). Stimulated Brillouin scattering in optical fibers. *Applied Physics Letters*, 21(11), 539-541.
48. Berberoğlu, H. (2007). *Numerical simulations on stimulated raman scattering for fiber raman amplifiers and lasers using spectral methods*. Ph.D. Doctoral Program, Middle East Technical University.
49. Farahani, M. A. and Gogolla, T. (1999). Spontaneous Raman scattering in optical fibers with modulated probe light for distributed temperature Raman remote sensing. *Journal of Lightwave Technology*, 17(8), 1379.
50. Bigo, S., Gauchard, S., Bertaina, A. and Hamaide, J. P. (1999). Experimental investigation of stimulated Raman scattering limitation on WDM transmission over various types of fiber infrastructures. *IEEE Photonics Technology Letters*, 11(6), 671-673.
51. Choi, I., Young, R. J. and Townsend, P. D. (2011). Quantum information to the home. *New Journal of Physics*, 13(6), 063039.
52. Li, X., Chen, J., Voss, P., Sharping, J. and Kumar, P. (2004). All-fiber photon-pair source for quantum communications: Improved generation of correlated photons. *Optics express*, 12(16), 3737-3744.

53. Nose, K., Ozeki, Y., Kishi, T., Sumimura, K., Nishizawa, N., Fukui, K. and Itoh, K. (2012). Sensitivity enhancement of fiber-laser-based stimulated Raman scattering microscopy by collinear balanced detection technique. *Optics express*, 20(13), 13958-13965.
54. Islam, M. N. (2002). Raman amplifiers for telecommunications. *IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics*, 8(3), 548-559.
55. Yücel, M. ve Göktaş, H. H. (2006). Fiber Raman yükselteçlerde pompalama yönünün kazanç spektrumuna etkisi üzerine bir simülasyon. *Politeknik Dergisi*, 9(3), 161-164.
56. Boydak, S., & Yücel, M. (2017). Fiber optik kabloda meydana gelen Raman saçılmasının analizi. *Politeknik Dergisi*, 20(2), 257-265.
57. Yan, M., Chen, J., Jiang, W., Li, J., Chen, J., & Li, X. (2001). Automatic design scheme for optical-fiber Raman amplifiers backward-pumped with multiple laser diode pumps. *IEEE Photonics Technology Letters*, 13(9), 948-950.
58. Bromage, J. (2004). Raman amplification for fiber communications systems. *journal of lightwave technology*, 22(1), 79-93.
59. Perlin V. E. and Winful H. G. (2002). Optimal design of flat-gain wide-band fiber Raman amplifiers, *Journal of Lightwave Technology*, 20, 250–254.
60. Headley, C. and Agrawal, G. P. (2005). *Raman amplification in fiber optical communication systems*. Academic press.
61. Perlin, V. E. and Winful, H. G. (2002, March). On trade-off between noise and nonlinearity in WDM systems with distributed Raman amplification. In *Optical Fiber Communication Conference* (p. WB1). Optica Publishing Group.
62. Blum, C., ve Li, X. (2008). Swarm intelligence in optimization. *Swarm Intelligence*, 272, 43-85.
63. Kennedy, J. (2006). *Swarm intelligence* (pp. 187-219). Springer US.
64. Beheshti, Z., & Shamsuddin, S. M. H. (2013). A review of population-based meta-heuristic algorithms. *Int. J. Adv. Soft Comput. Appl*, 5(1), 1-35.
65. Yang, X. S. (2010). *Nature-inspired metaheuristic algorithms*. Luniver press.
66. Blum, C. (2005). Ant colony optimization: Introduction and recent trends. *Physics of Life reviews*, 2(4), 353-373.
67. Osman, I. H. and Kelly, J. P. (1997). Meta-heuristics theory and applications. *Journal of the Operational Research Society*, 48(6), 657-657.
68. Dokeroglu, T., Sevinc, E., Kucukyilmaz, T., & Cosar, A. (2019). A survey on new generation metaheuristic algorithms. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106040.

69. Birattari, M., Blum, C., Gambardella, L. M., Mondada, F. and Stutzle, T. (2008). Ant colony optimization and swarm intelligence. In *4th International Workshop, ANTS 2004: September 5–8, 2004, Brussels, Belgium; Proceedings*.
70. Blum, C. (2005). Ant colony optimization: Introduction and recent trends. *Physics of Life reviews*, 2(4), 353-373.
71. Selvi, V. and Umarani, R. (2010). Comparative analysis of ant colony and particle swarm optimization techniques. *International Journal of Computer Applications*, 5(4), 1-6.
72. Blum, C., & Li, X. (2008). Swarm intelligence in optimization. *Swarm intelligence: introduction and applications*, 43-85.
73. Krause, J., Ruxton, G. D. and Krause, S. (2010). Swarm intelligence in animals and humans. *trends in ecology & evolution*, 25(1), 28-34.
74. Das, S., Biswas, A., Dasgupta, S. and Abraham, A. (2009). Bacterial foraging optimization algorithm: theoretical foundations, analysis, and applications. *Foundations of computational intelligence volume 3: global optimization*, 23-55.
75. Hussain, K., Mohd Salleh, M. N., Cheng, S. and Shi, Y. (2019). Metaheuristic research: a comprehensive survey. *Artificial intelligence review*, 52, 2191-2233.
76. Karaboga, D. and Akay, B. (2009). A comparative study of artificial bee colony algorithm. *Applied mathematics and computation*, 214(1), 108-132.
77. Akay, B. and Karaboga, D. (2012). Artificial bee colony algorithm for large-scale problems and engineering design optimization. *Journal of intelligent manufacturing*, 23, 1001-1014.
78. Karaboga, D. and Basturk, B. (2008). On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm. *Applied soft computing*, 8(1), 687-697.
79. Zhang, C., Ouyang, D. and Ning, J. (2010). An artificial bee colony approach for clustering. *Expert systems with applications*, 37(7), 4761-4767.
80. Karaboga, D. and Ozturk, C. (2011). A novel clustering approach: Artificial Bee Colony (ABC) algorithm. *Applied soft computing*, 11(1), 652-657.
81. Gao, W., Liu, S. and Huang, L. (2012). A global best artificial bee colony algorithm for global optimization. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 236(11), 2741-2753.
82. Wang, H., Wu, Z., Rahnamayan, S., Sun, H., Liu, Y. and Pan, J. S. (2014). Multi-strategy ensemble artificial bee colony algorithm. *Information Sciences*, 279, 587-603.

83. Liao, T., Montes de Oca, M. A., Aydin, D., Stützle, T. and Dorigo, M. (2011, July). An incremental ant colony algorithm with local search for continuous optimization. In *Proceedings of the 13th annual conference on Genetic and evolutionary computation* (pp. 125-132).
84. Aydın, D., Yavuz, G. and Stützle, T. (2017). ABC-X: a generalized, automatically configurable artificial bee colony framework. *Swarm Intelligence*, 11, 1-38.
85. Parpinelli, R. S. and Lopes, H. S. (2011). New inspirations in swarm intelligence: a survey. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 3(1), 1-16.
86. Akay, B. and Karaboga, D. (2012). A modified artificial bee colony algorithm for real-parameter optimization. *Information sciences*, 192, 120-142.
87. Karaboga, D. and Akay, B. (2011). A modified artificial bee colony (ABC) algorithm for constrained optimization problems. *Applied soft computing*, 11(3), 3021-3031.
88. Babayigit, B. and Ozdemir, R. (2012, July). A modified artificial bee colony algorithm for numerical function optimization. In *2012 IEEE symposium on computers and communications (ISCC)* (pp. 000245-000249). IEEE.
89. Yavuz, G., Durmuş, B. and Aydın, D. (2022). Artificial bee colony algorithm with distant savants for constrained optimization. *Applied Soft Computing*, 116, 108343.
90. Kashan, M. H., Nahavandi, N. and Kashan, A. H. (2012). DisABC: a new artificial bee colony algorithm for binary optimization. *Applied Soft Computing*, 12(1), 342-352.
91. Abraham, A., Jatoth, R. K. and Rajasekhar, A. (2012). Hybrid differential artificial bee colony algorithm. *Journal of computational and theoretical Nanoscience*, 9(2), 249-257.
92. Kıran, M. S. and Findık, O. (2015). A directed artificial bee colony algorithm. *Applied Soft Computing*, 26, 454-462.
93. Talbi, E. G. (2009). *Metaheuristics: from design to implementation*. John Wiley & Sons.
94. Jourdan, L., Basseur, M., & Talbi, E. G. (2009). Hybridizing exact methods and metaheuristics: A taxonomy. *European Journal of Operational Research*, 199(3), 620-629.
95. Sörensen, K. (2015). Metaheuristics, the metaphor exposed. *International Transactions in Operational Research*, 22(1), 3-18.
96. Sörensen, K., Sevaux, M. and Glover, F. (2018). A history of metaheuristics. In *Handbook of heuristics* (pp. 791-808). Springer, Cham.
97. Jourdan, L., Basseur, M. and Talbi, E. G. (2009). Hybridizing exact methods and metaheuristics: A taxonomy. *European Journal of Operational Research*, 199(3), 620-629.

98. Lourenço, H. R., Martin, O. C. and Stützle, T. (2003). *Iterated local search* (pp. 320-353). Springer US.
99. Lourenço, H. R., Martin, O. C., & Stützle, T. (2019). Iterated local search: Framework and applications. *Handbook of metaheuristics*, 129-168.
100. Bursa, M., Lhotska, L. and Macas, M. (2007, September). Hybridized swarm metaheuristics for evolutionary random forest generation. In *7th International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS 2007)* (pp. 150-155). IEEE.
101. Trindade, Á. R. and Campelo, F. (2019). Tuning metaheuristics by sequential optimisation of regression models. *Applied Soft Computing*, 85, 105829.
102. Birattari, M., Yuan, Z., Balaprakash, P. and Stützle, T. (2010). F-Race and iterated F-Race: An overview. *Experimental methods for the analysis of optimization algorithms*, 311-336.
103. Birattari, M., Stützle, T., Paquete, L. and Varrentrapp, K. (2002, July). A Racing Algorithm for Configuring Metaheuristics. In *Gecco* (Vol. 2, No. 2002).
104. Doerner, K. F., Gendreau, M., Greistorfer, P., Gutjahr, W., Hartl, R. F. and Reimann, M. (Eds.). (2007). *Metaheuristics: progress in complex systems optimization* (Vol. 39). Springer Science and Business Media.
105. Birattari, M., Balaprakash, P., and Dorigo, M. (2005, March). ACO/F-Race: Ant colony optimization and racing techniques for combinatorial optimization under uncertainty. In *MIC 2005: The 6th Metaheuristics International Conference* (pp. 107-112). Vienna, Austria: University of Vienna, Department of Business Administration.
106. Morrison, D. D., Riley, J. D. and Zancanaro, J. F. (1962). Multiple shooting method for two-point boundary value problems. *Communications of the ACM*, 5(12), 613-614.
107. Ji-Ping, N., Qun, H., Zhi-Qiang, C., Jia-Qiang, L. and Xiao-Guang, L. (2004). A powerful simple shooting method for designing multi-pumped fibre Raman amplifiers. *Chinese Physics Letters*, 21(11), 2184.
108. Han, Q., Ning, J., Chen, Z., Shang, L. and Fan, G. (2005). An efficient shooting method for fibre Raman amplifier design. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 7(8), 386.
109. Lali-Dastjerdi, Z., Kroushavi, F., & Rahmani, M. H. (2008). An efficient shooting method for fiber amplifiers and lasers. *Optics & Laser Technology*, 40(8), 1041-1046.
110. Serdar Gokhan, F. and Yilmaz, G. (2011). Solution of Raman fiber amplifier equations using MATLAB BVP solvers. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 30(2), 398-411.
111. Ji-Ping, N., Qun, H., Zhi-Qiang, C., Jia-Qiang, L. and Xiao-Guang, L. (2004). A powerful simple shooting method for designing multi-pumped fibre Raman amplifiers. *Chinese Physics Letters*, 21(11), 2184.

112. Liu, X. (2006). Fast and effective analysis methods for fiber Raman amplifiers. *Japanese journal of applied physics*, 45(1R), 121.
113. Tarman, H. I. and Berberoğlu, H. (2009). A spectral collocation algorithm for two-point boundary value problem in fiber Raman amplifier equations. *Optics Communications*, 282(8), 1551-1556.
114. Kierzenka, J. and Shampine, L. F. (2008). A BVP solver that controls residual and error. *Journal of Numerical Analysis, Industrial and Applied Mathematics*, 3(1-2), 27-41.
115. Kierzenka, J. and Shampine, L. F. (2001). A BVP solver based on residual control and the Matlab PSE. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 27(3), 299-316.
116. Newbury, N. R. (2002). Raman gain: pump-wavelength dependence in single-mode fiber. *Optics letters*, 27(14), 1232-1234.
117. Zhou, X., Yu, J., Huang, M. F., Shao, Y., Wang, T., Magill, P. and Mishra, S. K. (2009, March). 32Tb/s (320× 114Gb/s) PDM-RZ-8QAM transmission over 580km of SMF-28 ultra-low-loss fiber. In *2009 Conference on Optical Fiber Communication* (pp. 1-3). IEEE.
118. Shampine, L. F., Kierzenka, J. and Reichelt, M. W. (2000). Solving boundary value problems for ordinary differential equations in MATLAB with bvp4c. *Tutorial notes*, 2000, 1-27.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YOLCU, Vehbi
Uyruğu : T.C

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Bilişim Sistemleri	Devam Ediyor
Yüksek Lisans	Süleyman Demirel Üniversitesi/ B.Ö.T. E	2018
Lisans	Ege Üniversitesi / B.Ö.T. E	2010

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Dumlupınar Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2010-2017	MEB	Bilgisayar Öğretmeni

Yayınlar

1. Yolcu, V., Yücel, M. and Aydın, D. (2023). Solution of fiber Raman amplifier model using binary search equation-based adaptive artificial bee colony algorithm. **Optical Engineering**, 62(2), 026105.
2. Yolcu, V., Yücel M., Aydın D. (2023). Kazancı düzleştirilmiş fiber raman yükselteç modelinin ikili arama denklemleri adaptif yapay arı kolonisi (İADAYAK) algoritması ile optimizasyonu. **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi. (Erken Görünüm)**
3. Yolcu, V. and Demirel, V. (2017). A review on the studies about the use of robotic technologies in education. **SDU International Journal of Educational Studies**, 4(2), 127-139.
4. Demirel, V. ve Yolcu, V. (2018). Meslek yüksek okulu öğrencilerinin bilişim teknolojilerinden yararlanma düzeyleri ile akademik başarıları arasındaki ilişki. **Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi**, (45), 105-131.



GAZİLİ OLMAK AYRICALIKTIR.