



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Raman yükselteç modeli üzerine bir çalışma

A study on the raman amplifier model

Yazar(lar) (Author(s)): Vehbi YOLCU¹, Murat YÜCEL²

ORCID¹: 0000-0001-6052-4218

ORCID²: 0000-0002-0349-4013

To cite to this article: Yolcu V. ve Yücel M., “Raman yükselteç modeli üzerine bir çalışma”, *Journal of Polytechnic*, *(*) : *, (*).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Yolcu V. ve Yücel M., “Raman yükselteç modeli üzerine bir çalışma”, *Politeknik Dergisi*, *(*) : *, (*).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1294773

Raman Yükselteç Modeli Üzerine Bir Çalışma

A Study on The Raman Amplifier Model

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Parçacık sürü optimizasyon algoritması (PSO) kullanıldı. (Particle swarm optimization algorithm (PSO) was utilized.)
- ❖ Fiber Raman yükselteç (FRY) denklemi çözümlendi. (Fiber Raman amplifier (FRA) equation was solved.)
- ❖ Pompa sayısı ile optimum dalga boyları ve güç değerleri bulundu. (Optimum wavelengths and power values were found with the number of pumps.)

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada standart optik fiberlerde kazancı düzleştirilmeye çalışılan 80 adet sinyal için sisteme gönderilen pompa sinyallerinin optimum dalga boyları ve güç değerleri sırasıyla 4,5 ve 6 adet pompa sinyali kullanılarak bulunmuştur. (In this study, the optimum wavelengths and power values of the pump signals sent to the system for 80 signals whose gain is tried to be smoothed in standard optical fibers were found by using 4,5 and 6 pump signals, respectively.)

Pompa Sayısı (Number of Pumps)	1	2	3	4	5	6
Güç (Power)(mW)	267	96,2	297	69,7		
Dalgaboyu (Wavelength)(nm)	1402,9	1446,1	1475,4	1432,4		
Güç (Power)(mW)	184,6	68	100,8	97,4	213,1	
Dalgaboyu (Wavelength)(nm)	1506	1448,2	1434,4	1422,1	1478,2	
Güç (Power)(mW)	148,5	92,7	109	128,3	72,5	205,9
Dalgaboyu (Wavelength)(nm)	1412,4	1492,1	1457,7	1415,6	1428,	1490,3

Çizelge. 4, 5 ve 6 adet pompa sinyali kullanılarak elde edilen sonuçlar/ Obtained results using 4,5 and 6 pump signal

Amaç (Aim)

Bu bağlamda, yapılan araştırmada başlangıç gücü değeri 1mW olan 80 adet optik sinyalin 80 km ilerlemesi sonucu kazancını düzleştirmek amaçlanmıştır. (In this context, it was aimed to flatten the gain of 80 optical signals with an initial power value of 1mW as a result of 80 km transmission.)

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Bunun için öncelikle Raman kazanç katsayısı ve optik zayıflama katsayısı sisteme polinom olarak işlenerek hazır hale getirilmiştir. İkinci olarak denkleme işlenmiş ve tüm denklemler PSO algoritmasına başarılı şekilde uyarlanmıştır. (For this, Raman gain coefficient and optical attenuation coefficient were first processed into the system as polynomials and made ready. Secondly, the constant terms were entered into the equation.)

Özgünlük (Originality)

Lineer olmayan FRY denklemi, 80 adet optik sinyalin kazancını düzleştirmek için PSO algoritmasına uyarlanmıştır. Sonrasında PSO algoritması 4,5 ve 6 pompa için işletilerek optimum değerler elde edilmiştir. (The nonlinear FRY equation is adapted to the PSO algorithm to flatten the gain of 80 optical signals. Afterwards, the PSO algorithm was operated for 4,5 and 6 pumps and optimum values were obtained.)

Bulgular (Findings)

Sonuçlar incelendiğinde 4 pompalı sistem için net kazanç farkı ± 3 dB, 5 pompalı sistem için net kazanç farkı ± 2 dB, 6 pompalı sistem için net kazanç farkı ± 1 dB olarak görülmüştür. (When the results are examined, the net gain difference for the 4-pump system is ± 3 dB, the net gain difference for the 5-pump system is ± 2 dB, and the net gain difference for the 6-pump system is ± 1 dB.)

Sonuç (Conclusion)

Optimizasyon algoritmalarının çözüm gücünün artması paralelinde daha iyi sonuçların elde edilmesi beklenmektedir. (It is expected that better results will be obtained in parallel with the increase in the solution power of the optimization algorithms.)

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makale çalışmasında kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni veya özel bir izin gerektirmediğini beyan ederiz. (We declare that the materials and methods used in this article study do not require ethical committee approval or a special permission.)

Raman Yükselteç Modeli Üzerine Bir Çalışma

Araştırma Makalesi / Research Article

Vehbi YOLCU¹, Murat YÜCEL²

¹Simav Meslek Yüksek Okulu, Bilgisayar Programcılığı Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Türkiye

²Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 12.05.2023 ; Kabul/Accepted : 05.07.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 01.09.2023)

ÖZ

İletişim teknolojilerinin gelişmesi paralelinde optik altyapı ihtiyaçları giderek artmaktadır. Artan veri yolu ihtiyacını karşılamak için dalga boyu bölmeli çoğullama (WDM) sistemleri geliştirilmiş ve kullanımı yaygınlaşmıştır. WDM sistemleri kullanımında optik sinyallerin uzak mesafelere iletiminde optik yükselteç sistemleri önemli rol üstlenmektedir. Bu sebeple çok pompalı dağıtık fiber Raman yükselteçler iyi bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Dağıtık Raman yükselteç sistemleri tasarlarken optik sinyallerin uzak mesafelere iletiminde sinyallerin kazancının düzleştirmek için, optik fibere dahil edilecek belirli sayıda optik sinyalle beraber pompanın güçleri optimize edilmelidir. Bu bağlamda, yapılan araştırmada başlangıç güç değeri 1mW olan 80 adet optik sinyalin 80 km ilerlemesi sonucu kazancını düzleştirmek amaçlanmıştır. Bunun için öncelikle Raman kazanç katsayısı ve optik zayıflama katsayısı sisteme polinom olarak işlenerek hazır hale getirilmiştir. Bununla beraber sabit terimler denkleme işlenmiş, sonrasında tüm denklemler PSO algoritmasına başarılı şekilde uyarlanmıştır. Sonrasında PSO algoritması 4,5 ve 6 pompa için işletilerek optimum değerler elde edilmiştir. Elde edilen net kazanç farkları incelendiğinde: 4 pompa için ± 3 dB, 5 pompa için ± 2 dB ve 6 pompa için ± 1 dB değerleri elde edilmiştir. Optimizasyon algoritmalarının çözüm gücünün artması paralelinde daha iyi sonuçların elde edilmesi beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: WDM, FRY, parçacık sürü optimizasyonu, PSO.

A Study On The Raman Amplifier Model

ABSTRACT

Optical infrastructure needs are increasing in parallel with the development of communication technologies. Wavelength division multiplexing (WDM) systems have been developed and widely used to meet the increasing bus need. Optical amplifier systems play an important role in the transmission of optical signals over long distances in the use of WDM systems. For this reason, multi-pump distributed fiber Raman amplifiers are a good alternative. When designing distributed Raman amplifier systems, the power of the pump must be optimized along with a certain number of optical signals to be included in the optical fiber to flatten the gain of the signals in the transmission of optical signals over long distances. In this context, it was aimed to flatten the gain of 80 optical signals with an initial power value of 1mW as a result of 80 km transmission. For this, Raman gain coefficient and optical attenuation coefficient were first processed into the system as polynomials and made ready. Then, the constant terms were entered into the equation, and then all the equations were successfully adapted to the PSO algorithm. Afterwards, the PSO algorithm was operated for 4,5 and 6 pumps and optimum values were obtained. When the net gain differences are examined: ± 3 dB for 4 pumps, ± 2 dB for 5 pumps and ± 1 dB for 6 pumps are obtained. It is expected that better results will be obtained in parallel with the increase in the solution power of the optimization algorithms.

Keywords: WDM, FRA, particle swarm optimization, PSO.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İletişim teknolojilerinin gelişmesi paralelinde optik altyapı ihtiyaçları giderek artmaktadır. Artan veri yolu ihtiyacını karşılamak için dalga boyu bölmeli çoğullama (WDM) sistemleri geliştirilmiş ve kullanımı yaygınlaşmıştır. WDM sistemleri kullanımında optik sinyallerin uzak mesafelere iletiminde optik yükselteç sistemleri önemli rol üstlenmektedir [1]. Erbiyum katkılı optik fiber kuvvetlendiricilerinde (EDFA) bulunan erbiyum iyonlarının enerji seviyeleri kuvvetlendirme bant genişliğini belirlediğinden, farklı gereksinimler için adapte edilmekte zorluklar gözlenmektedir.

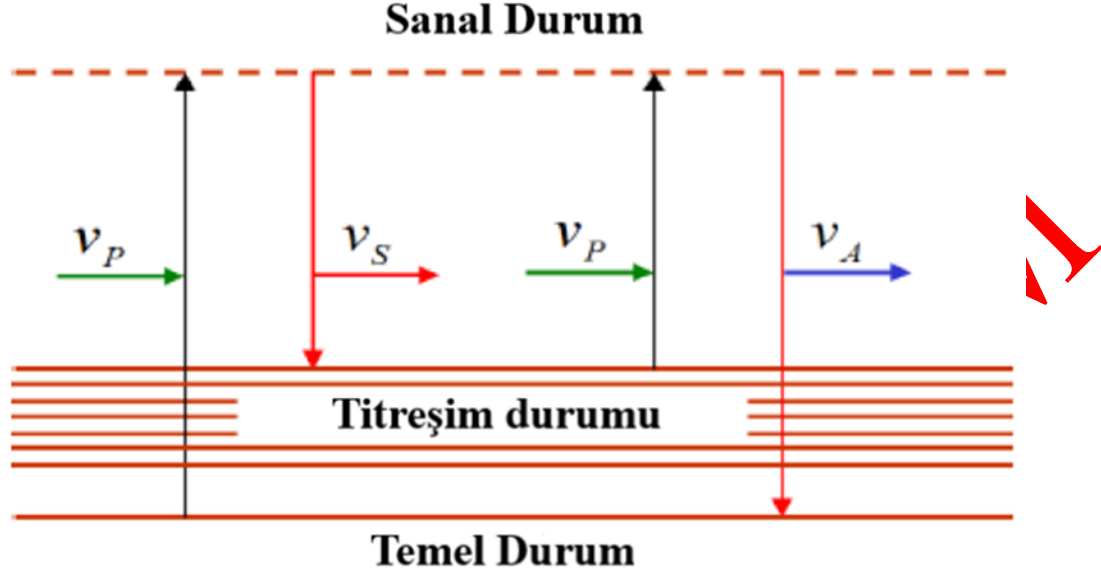
Bu sebeple, bant genişliğinden verimli şekilde faydalanmak için optik fiberli iletim sistemlerinde daha farklı fiziksel mekanizmalara ihtiyaç duyulmaktadır [2]. Bu bağlamda doğrusal olmayan uyarılmış Raman saçılması (URS), bu ihtiyacın karşılanması için araştırma konusu olmuştur.

Uyarılmış Raman saçılmasının temelinde fotonlar ve malzemenin molekülleri arasında enerji alışverişi bulunmaktadır. Raman saçılmasının kuantum mekaniği açısından enerji diyagramı Şekil 1' 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 [3]. 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

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : vehbi.yolcu@dpu.edu.tr

olacaktır. Bu nedenle, anti-Stokes sinyalinin frekansından daha yüksek frekansta olur. Bununla beraber Stokes dalgalarının foton yoğunluğu, anti-Stokes dalgaların yoğunluğundan onlarca kat daha yüksektir. Bunun nedeni, titreşim durumunun başlangıçta doğru

enerji ve momentuma sahip bir fononla doldurulmasını sağlayan anti-Stokes işlemidir [4]. Bu sebeple FRY kapsamında yapılan birçok çalışmada, anti-Stokes dalga güçlerinin çok az olmasından dolayı göz ardı edilmektedir.



Şekil 1. Uyarılmış Raman saçılması olayının yapısı (Structure of the stimulated Raman scattering event)

Doğrusal olmayan uyarılmış Raman saçılmasında, yüksek güçlü pompa dalgasından uyarılmaya sebep olan, farklı frekanstaki sinyal ve pompa dalgalarına optik güç aktarımı gerçekleşir. Bu fiziksel güç artarımı olayı, Raman kuvvetlendiricilerin EDFA kuvvetlendirici modeline göre büyük avantaja sahip olmasının nedenidir. Bu avantajın yanında URS fiziksel olayı sayesinde tasarım kolaylığı, düşük gürültü faktörü ve en önemlisi yüksek geniş bant aralığının verimli kullanılması ile öne çıkmaktadır [5]. Raman saçılması, katkı optik fiber yapısı ile zor ve maliyetli yükselteç sistemi yapılması yerine, fiber katkısı gerektirmeyen ve kendi pompa ve sinyal yapılarını kullanarak yine kendi içerisindeki pompa güçlerine ve pompa dalga boylarına güç aktarır. Tüm bu avantajlar neticesinde onlarca sinyal tek seferde onlarca km ileriye, sinyal güçleri bozulmadan iletilirler.

Örneğin S, C ve L iletim bantlarında optik fiberin başlangıç noktasında 0,1 mW gücüne sahip 100 adet sinyal, belli frekanslarda optik fibere aynı anda gönderildiğinde kayıp-kazancı mümkün olan en iyi şekilde düzeltililerek onlarca kilometre uzağa yine 0,1 mW güç seviyesinde taşınabilmesi için, sisteme eklenecek pompaların frekansları ve güçlerinin numerik analizle optimize edilerek lineer olmayan Raman yükselteç denkleminin çözülmesi bizim araştırmamızın problemini oluşturmaktadır [6].

Alan yazın incelendiğinde araştırmacılar FRY diferansiyel denklemini Genetik algoritmalar, Yapay Sinir ağları, Benzettirilmiş Tavlama algoritması, Yapay Arı Kolonisi algoritması gibi farklı algoritmalar ile

çözümlemeye çalışmışlardır. Bazı araştırmacılar ise denklem çözümünde yerel optimuma düşmemek için kullandıkları algoritmalarını daha fazla geliştirerek kazancı optimum seviyede düzeltirmeye çalışmışlardır [7]. Bu bağlamda, çalışmada öncelikle 80 adet optik sinyalin sırasıyla 4, 5, 6 adet pompanın birbirlerine zıt şekilde 80km boyunca ilerleyen bir Raman sistem tasarımı oluşturulmuştur. Sonrasında oluşturulan sisteme göre FRY diferansiyel denklemi Parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritması ile çözümlenmiştir. Bu çalışma alan yazındaki çalışmalardan farklı olarak sistem tasarımında 80 km gibi çok uzak iletim mesafesi seçilmiş aynı zamanda 80 optik sinyal sayısına kıyasla az sayıda pompa gücü kullanılarak kazanç kayıp değerleri elde edilmiştir. Bununla birlikte optik sinyallere zıt yönde pompa güçleri kullanılmış bu sayede verim artırılmıştır. Elde edilen sonuçların alan yazına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. PSO Algoritması (PSO Algorithm)

Nörobilimler, bilişsel psikoloji, sosyal etoloji ve davranış bilimlerindeki çalışmalardan ilham alan sürü zekâsı kavramı (SZ), 1989'da bilgi işlem ve yapay zekâ alanında kullanılmaya başlanmıştır [8]. Sürü zekâsı merkezi kontrol veya küresel bir modelin katkısı olmadan, çoğunlukla kolektif aklın, sürülerin sorunları çözmek için birlikte hareketlerinden ilham alır. Bu bağlamda, çok aracı dağıtılmış zekâ sistemlerini araştırmak için kuş,

balık, karınca, arı ve termitler gibi sosyal hayvanların kolektif davranışları araştırma konusu olmuştur. Bir sürü, oldukça basit görevleri yerine getiren ve merkezi bir kontrol olmaksızın kendi aralarında ve çevreleri arasında yerel olarak etkileşime giren homojen, basit etmenlerden oluşan bir popülasyondur. Kolektif davranış, kendi kendine örgütlenme ve yerel (stokastik) etkileşimlerin bir sonucu olarak ortaya çıkar [9]. Gerçekten de bu etmenler (sürü bireyleri) kendi başlarına sınırlı yeteneklere ve görece basit olmalarına rağmen, kolektif olarak nihai problem çözme ve hedefine ulaşma yeteneği bakımından oldukça başarılı davranışlar sergilemektedirler. Her sürü bilgi paylaşımı yoluyla davranışsal ve etkileşim kalıpları çerçevesinde uyum içinde hareket eder. Buna göre, sürü tabanlı algoritmalar son zamanlarda, çeşitli karmaşık problemlere düşük maliyetli, hızlı ve sağlam çözümler üretebilen, doğadan ilham alan, popülasyon tabanlı bir algoritma ailesi olarak ortaya çıkmıştır [10].

Parçacık sürüsü optimizasyonu, kuş ve balık sürülerinde gözlenen bilgi dolaşımı, sosyal davranışlardan ilham alan ve en uygun çözüm değerinin çok boyutlu uzayda maksimum veya minimum bir nokta olduğu durumlarda sorunları çözmek için ideal olan küresel bir optimizasyon algoritmasıdır. Doğal analoglardan, yani sürü halinden ilham alma, etmenlerin (parçacıkların) yalnızca bir konumla değil, aynı zamanda bir hızla da karakterize edildiği durumlarda kullanılır. PSO algoritması, düzensiz, gürültülü veya zamanla dinamik olarak değişebilen problemler için de çözümler elde etmeye izin veren meta sezgisel doğası nedeniyle, bilgisayar bilimi ve uygulamalı matematiğin birçok alanında geniş bir uygulama alanı bulmuştur [11].

Bilimde, optimizasyon terimi, bir dizi olası alternatif arasından en iyi unsuru (bir veya daha fazla kullanıcı tarafından belirlenen kritere göre) belirleme sürecini ifade eder. Matematik dilinde, bu genellikle hedefi parametreleştirilmiş bir f fonksiyonu cinsinden tanımlayarak gerçekleştirilir, böylece optimizasyon, f 'nin kendisini en aza indiren veya en üst düzeye çıkaran (belirli göreve bağlı olarak) parametrelerin değerlerini bulmaya indirgenir. Genellikle "amaç fonksiyonu" olarak anılan f fonksiyonunun D parametrelerine bağlı olduğunu varsayarak maksimizasyon görevi Eşitlik 1 ile tanımlanabilir [12].

$$f: R^D \rightarrow R \quad X_{opt} | f(opt) \geq f(x) \quad \forall x \in R^D \quad (1)$$

Burada R , f fonksiyonunun D -boyutlu alanı, arama (veya parametre) uzayı olarak adlandırılır. X koordinat vektörü ile karakterize edilen noktalarının her birini, X_{opt} ise problemlerin aday çözümlerini temsil eder. f 'yi maksimize eden belirli bir görev için belirli bir parametre setinin optimalite derecesini ölçen f 'nin değeri, genellikle fitness (uygunluk) değeri olarak adlandırılır. PSO'da, her aday çözüm bir "parçacık" olarak adlandırılır ve D optimize edilecek parametre sayısı ise, D -boyutlu uzayda bir noktayı temsil eder. Buna göre, i 'inci parçacığın konumu X_i vektörü ile tanımlanabilir [13].

$$X_i = [X_{i1}, X_{i2}, X_{i3} \dots X_{iD}] \quad (2)$$

ve N sayısı aday çözüm popülasyonu oluşturur.

$$X = \{X_1, X_2, X_3 \dots X_n\} \quad (3)$$

Problemin en uygun çözümünü ararken, parçacıklar aşağıdaki hareket denklemine dayalı olarak parametre uzayındaki yörüngeleri tanımlar (yani konumlarını yinelemeli olarak günceller) [14].

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (4)$$

burada t ve $t+1$, algoritmanın iki ardışık yinelemesini gösterir ve V_i , D boyutları boyunca i 'inci parçacığın hız bileşenlerini toplayan vektördür. Hız vektörleri, parçacıkların arama alanı boyunca hareket etme şeklini yönetir ve üç terimin katkısından oluşur. İlk atalet veya momentumu tanımlayıp önceki akış yönünü takip ederek parçacığın büyük ölçüde yön değiştirmesini önler. Bilişsel bileşen olarak adlandırılan ikinci terim, parçacıkların daha önce buldukları en iyi konumlarına dönme eğilimini açıklar. Sosyal bileşen olarak adlandırılan üçüncüsü, bir parçacığın tüm sürünün en iyi konumuna doğru hareket etme eğilimini tanımlar [15]. Yukarıdaki tanımlardan hareketle PSO algoritmasının sözde kodu aşağıda sunulmuştur.

1. Her bir N parçacığı için başlangıç değerlerini belirle
 - a. Konumu başlat $x_i(0) \forall i \in 1:N$
 - b. Parçacığın en iyi konumunu ilk konumuna başlat $P_i(0) = X_i(0)$
 - c. her bir parçacık için fitness' ı hesapla ve global en iyi olup olmadığını kontrol et
2. Bitiş kriterini sağlayana kadar aşağıdaki adımları uygula
 - a. Parçacık hızını aşağıdaki denkleme göre güncelle

$$v_i(t+1) = v_i(t) + c_1(P_i - x_i(t))R_1 + c_2(g - x_i(t))R_2$$
 - b. Parçacığın konumunu aşağıdaki denkleme göre güncelle

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1)$$
 - c. Parçacığın fitness 'ını değerlendir.
 - d. Eğer $f(X_i(t+1)) > f(P_i)$ ise en iyi değeri ($P_i = x_i(t+1)$) olarak güncelle
 - e. Eğer $f(X_i(t+1)) > f(g)$ ise en iyi değeri ($g = x_i(t+1)$) olarak güncelle
3. İlerleme işlemlerinin sonunda en iyi değeri yazdır.

2.2. FRY Denklemi ve Kurulan Sisteme Ait Bilgiler (FRA Equation and Information on the Established System)

Fiber Raman yükselteç modelinde en önemli etkilerin; pompadan sinyale, pompadan pompaya olan etkileşimler ve sinyal ve pompalara aynı anda etki eden belirli 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

$$\pm \frac{dP_k}{dz} = -\alpha_k P_k + \sum_{j=1}^{k-1} \frac{g_{vj}(v_j - v_k)}{\Gamma A_{eff}} P_j P_k - \sum_{j=k+1}^{m+n} \frac{v_j}{v_k} \frac{g_{vk}(v_k - v_j)}{\Gamma A_{eff}} P_j P_k \quad (5)$$

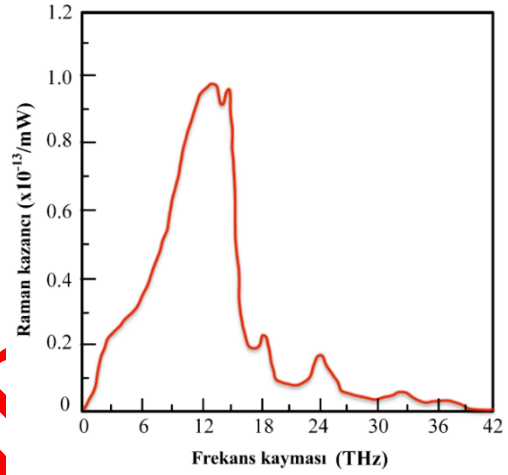
$k = 1, 2, 3, 4 \dots \dots, n + m$

Yukarıda sunulan matematiksel denklemin doğrusal olmayan diferansiyel denklemden oluştuğu net olarak gözlenmektedir. Matematiksel denklemde ilk olarak, sinyal dalga boylarının negatif olmaması için sinyal dalga boyları birbirlerine göre azalan sırada düzenlenmelidir. Bunun için $j > i$ sayısı için frekansları temsil eden v değişkenleri $v_i > v_j$ şeklinde dizilmelidir. $v_k, v_j, \alpha_k, P_k, P_j$ terimleri ise sırasıyla pompa ve sinyal frekansları, zayıflama katsayısı ve pompa ve sinyal güçlerini, temsil ederler. İndisleri ifade eden ve $k=1,2,3,4,\dots,n$ sayısına kadar değer alan sayılar belirli bir L noktasından sıfır noktasına doğru geri yönde ilerleyen pompa güçlerini temsil etmektedir. Sinyal güçleri sıfır noktasından belirli bir L noktasına doğru $k=1,2,3,4,\dots,n+m$ şeklinde sıralanan değerle ifade edilirken. Pompa güçleri sinyallere zıt olarak geri yönde hareket ettikleri için $-$ olarak denklemin başındaki katsayı ile gösterilmektedir. Ek olarak A_{eff}, Γ terimleri sırasıyla fiberin etkin alanını ve polarizasyon faktörünü temsil ederler. Polarizasyon faktörünün işareti pompa ve sinyaller aynı yöne doğru hareket ediyorsa 1 katsayısı ile birbirlerine zıt yönde hareket ediyorsa 2 katsayısı ile çarpılmalıdır.

Raman yükselteç denkleminin çözümünde yer alan en önemli değişkenlerden ilki Raman kazanç katsayısıdır. Bu değişken 10-13 katsayısı ile çarpılarak çok geniş spectrumda, uyarılmış Stokes dalgalarının birbirlerini etkileme gücü ile temsil edilir. Bu bağlamda uyarılmış Stokes dalgalarının şiddeti pompa-sinyal veya pompa-pompa arasındaki dalga boyu farkı ile ölçülür. Bu sebeple kullanılan fiber kablunun türü ve fiber katkısı oranı Raman kazanç katsayısında önemli değişikliğe yol açabilir. Standart tek modlu optik fibere ait Raman kazanç katsayısı Şekil 2' de görselleştirilmiştir.

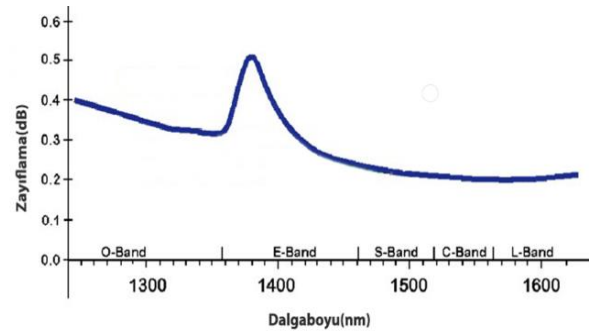
Yukarıda yer alan FRY denkleminde α_k ile ifade edilen optik fiber zayıflama katsayısı, bütün optik fiberli sistemler için büyük önem arz etmektedir.

gibi etkisi çok sınırlı olan değerler denklemden çıkarılarak, basitleştirilmiş FRY denkleminin matematiksel eşitliği Eşitlik. 5' de sunulmuştur [16].



Şekil 2. Raman kazanç katsayısı grafiği (Graphic of Raman gain coefficient)

Bununla birlikte optik fiber zayıflama katsayısı, optik fiber kablunun tek modlu ya da çok modlu olması ile değişkenlik göstermektedir. Aynı zamanda içerisindeki yabancı madde katkı oranına göre zayıflama katsayısı değişmektedir [17]. Bu bağlamda Şekil 3' de tek modlu standart optik fiber kabloya ait zayıflama eğrisi görülmektedir.



Şekil 3. Dalga boyuna göre standart fiber optik zayıflama katsayısı (Standard fiber optic attenuation coefficient by wavelength)

Şekillerde görülen Raman kazanç katsayısı ve zayıflama katsayısı FRY çözüm algoritmasına polinom olarak başarıyla işlenmiştir.

Bu sayede FRY denklemi hızlı ve etkin şekilde çözülmüştür. Eşitlik 5' de detaylı incelenen Raman kuvvetlendirici denklemi her bir sinyal kanalının

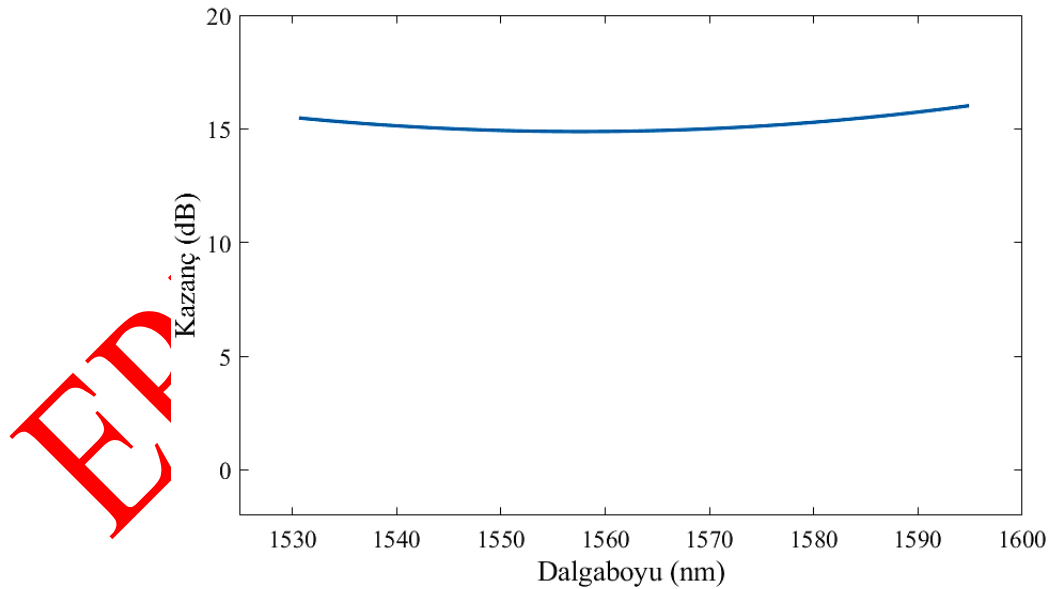
yükseltgenme faktörüne göre Eşitlik 6 ve 7'de tekrar matematiksel olarak ifade edilirse:

$$I_j \equiv \int_0^L P_j(z) dz, j = 1, 2, 3, \dots, n + m \quad (6)$$

$$G_k \equiv \frac{P_k(L)}{P_k(0)} = \exp\left(-a_k L + \sum_{j=n+1}^{m+n} g_{jk} I_j\right) \exp\left(\sum_{j=1}^n g_{jk} I_j\right) = G_{L,k}, G_{G,k} \quad (7)$$

Matematiksel iki formül ile ifade edilebilir. Formüllerden ilki (6) j indisli sinyal ve pompa güçlerinin iletim mesafesi boyunca integrallerinin alınarak toplanmasını ifade eder. Bu formülde yola çıkarak denklem (7) elde edilir. İkinci formüldeki (7) $G_{L,k}$ terimi, birinci exponensiyel kuvveti ifade eder. Bu değer de denklemde $\exp(-a_k L + \sum_{j=n+1}^{m+n} g_{jk} I_j)$ denklemi ile ifade edilmiştir. Bu denklem optik sinyallerin birbirleri ile olan etkileşimlerini ve fiber kayıpları çarpılması ile hesaplanır ve a_k terimi ile ifade edilir. L, I_j terimleri sırasıyla; optik fiber uzaklığı ve sinyallerin ve pompaların güçlerini temsil eder. İki denklemde de görülen g_{jk} terimi, fiber Raman kuvvetlendirici denkleminde sunulan $\frac{g_{vj}(v_j - v_k)}{\Gamma A_{eff}}$ terimlerinin sonucunu ifade eder. Formüldeki $G_{L,k}$ ise

ikinci exponensiyel kuvveti yani pompaların birbirleriyle olan etkileşimini temsil eder ve $\exp(\sum_{j=1}^n g_{jk} I_j)$ denklemi ile yukarıda (7) sunulmuştur. Denklem başındaki G_k terimi net kazanç değerini yani optik fiberin $z=L$ ' deki ucunda yer alan sinyal güçlerini göstererek bu değer 1'e yaklaştıkça her bir sinyalin belirli mesafe ilerlemesi sonrasındaki çıkış gücü başlangıç gücü değerine yaklaşmaktadır. Bu şekilde 80 sinyalin kazancı düzleştirilerek verim artırılmış olur. Yukarıda detayları açıklanan ve denklemde (7) $G_{L,k}$ terimi ile temsil edilen sinyaller arası Raman etkileşimi ve zayıflama değerleri 80 optik sinyalin 80 km ilerlemesi için tek tek çözümlenerek Şekil 4' de grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4. Dalga boyuna göre dB cinsinden ifade edilen 80 adet optik sinyalin kazanç-kayıp $G_{L,k}$ değerleri (Gain-loss $G_{L,k}$ values of 80 optical signals expressed in dB according to wavelength)

Şekil 4 incelendiğinde optik fiber içerisinde sıfır noktasından 80 km'ye ilerleyen 80 adet optik sinyalin kazanç kayıp $G_{L,k}$ değerleri görselden anlaşılmaktadır. 80 sinyal için bulunan $G_{L,k}$ değeri, sinyallere zıt yönde gönderilen pompa güçlerinin 80 km ilerlemesi

neticesindeki tüketimi ile telafi edilecektir. Fakat burada önemli nokta, pompaların hangi dalga boyu ve güç değerlerini kullanarak optik sinyallerin oluşturduğu bu şekle en yakın şekli oluşturabilecek değerlerin bulunmasıdır. Bununla birlikte PSO algoritması

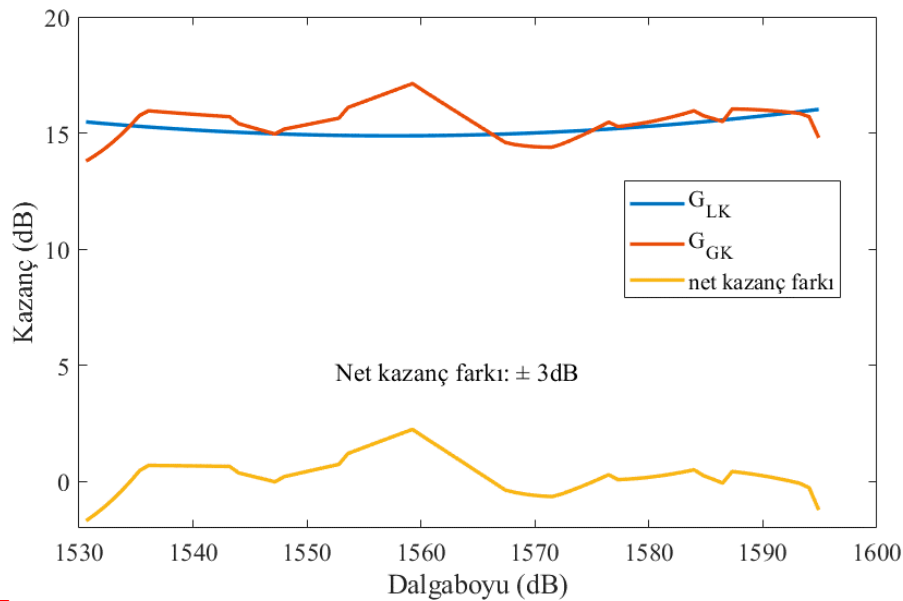
işletilerek elde edilen $G_{L,k}$ değerlerinin her bir sinyal değeri için hesaplanarak $G_{L,k}$ ve $G_{G,k}$ farkının her sinyal değeri için minimum olmasıdır [18]. Bu şekilde tüm sistemdeki sinyal değerleri taranmış ayrıca belirli fonksiyon çağırım değerine ve belirlenen amaç fonksiyonuna göre ifade edilmiştir. Bununla beraber bulunan optimum değerlere göre $G_{G,k}$ net kazanç değeri hesaplanarak FRY denklem çözüm performansı sonuçlara eklenmiştir. Sonrasında boyut sayısı sırası ile 4 pompa, 5 pompa, 6 pompa için PSO algoritması işletilmiş ve optimum değerler elde edilmiştir.

Optimum 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 [19]. Bu çalışmada kullanılan amaç fonksiyonu aşağıdaki Eşitlik 8 ile ifade edilmiştir.

$$\text{amaç fonksiyonu} = |(\log_e G_{L,k} - \log_e G_{G,k})^2|_{\min} \quad (8)$$

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 Eşitlik 7’ de üssel

kuvvetlerinin alınmasından kaynaklanmaktadır. Çalışmanın nümerik örneği 1500 nm dalga boyu bandında yapılarak kaybın en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Bununla birlikte optik sinyaller 1542-1574 nm arası seçilmiştir. Pompaların dalga boyu kısıtları 1400- 1500 nm (199-214 THz) arası ve güç kısıtları 50mW- 300mW güçleri arasında gerçek deneysel modellere uygun olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte etkin fiber alanı terimi 50 μm^2 ve polarizasyon faktörü değeri 2 olarak belirlenmiştir. Optik fiber uzaklığı 80 km ve optik sinyallerin başlangıç güç değerleri 1mW olarak belirlenmiştir. Ayrıca sinyaller arası mesafe 100 GHz olarak seçilmiştir. Şekil 2 ve Şekil 3’ de grafiklerle gösterilen dalga boyuna bağlı optik fiber zayıflama değeri ve Raman kazanç katsayısı algoritmaya başarılı şekilde uyarlanmıştır. Eşitlik 5, 6 ve 7’ de yer alan matematiksel ifadeler algoritmaya nümerik olarak işlenmiştir. Deneysel sonuçlar Ryzen 7 2 GHz işlemciye sahip ve 16 GB bellek kapasitesine sahip dizüstü bilgisayar üzerinde çalıştırılmıştır. Her bir boyut için on adet derleme üzerinden alınan sonuçlar raporlanmıştır. Tek bir derleme için kullanılan en büyük fonksiyon çağırım değeri 10^5 olarak belirlenmiştir. Son olarak oluşturulan tüm sistem pompa sayıları sırasıyla 4, 5, 6 adet olarak belirlenerek PSO algoritması işletilmiştir. 4 pompa kullanılarak elde edilen 80 adet optik sinyalin net kazanç değerleri Şekil 5’ de sunulmuştur.



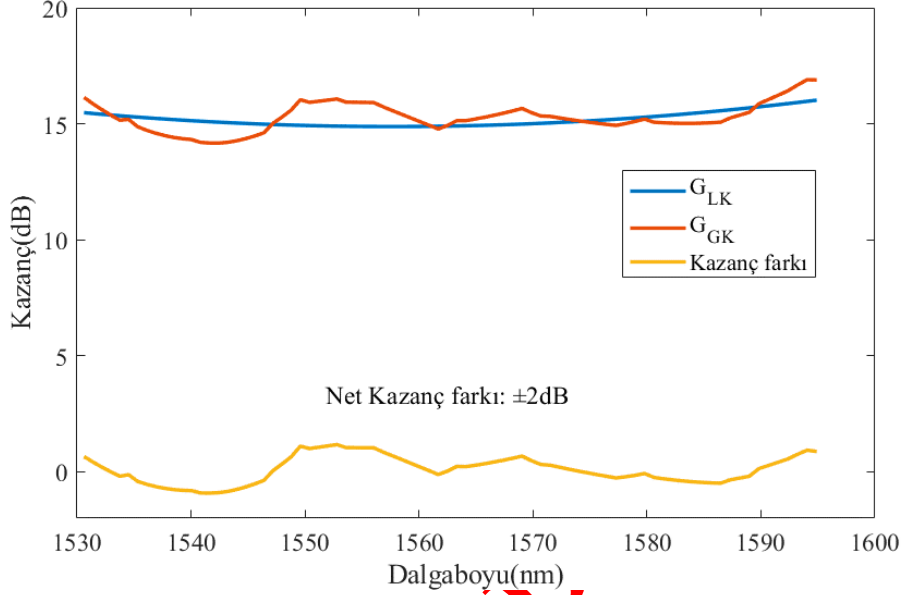
Şekil 5. FRY sistemine 4 adet pompa girişi ile alınan optimum G_k değerleri (Optimum G_k values taken with 4 pump inputs to the FRY system)

Şekil 5 incelendiğinde yatay eksen boyunca uzanan mavi çizgiyi, $G_{L,k}$ sinyal değerlerinin oluşturduğu açıkça gözlenmektedir. Mavi çizginin üzerinde görünen kırmızı çizgiyi 4 adet pompa kullanılarak bulunan optimum pompa güç ve dalga boyu değerlerinin sisteme entegre edilmesi sonucu elde edilen sinyal kazanç değerlerinin oluşturduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte optik sinyallerin kazancı kırmızı ve mavi renkteki çizgilerin

örtüşmesi ile doğru orantılıdır [20]. Bu sayede optik sinyallerin 80km ilerleme sonrası güç değerleri başlangıçta sahip olduğu güç değerleri ile aynı olacaktır. Bu şekilde kazancı düzeltilmiş 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 olacaktır [21]. Şekilden anlaşılacağı üzere 4 pompa için net kazanç farkı ± 3 dB olarak bulunmuştur. 4 pompa için bulunan optimum pompa değerlerinin güçleri sırasıyla 267mW, 96,2mW, 297mW, 69,7mW olarak bulunmuştur. Bununla beraber optimum pompa

değerlerinin dalga boyları sırasıyla 1402,9 nm, 1446,1 nm, 1475,4 nm, 1432,4 olarak tespit edilmiştir. 5 pompa kullanılarak elde edilen 80 adet optik sinyalin net kazanç değerleri Şekil 6' da sunulmuştur.

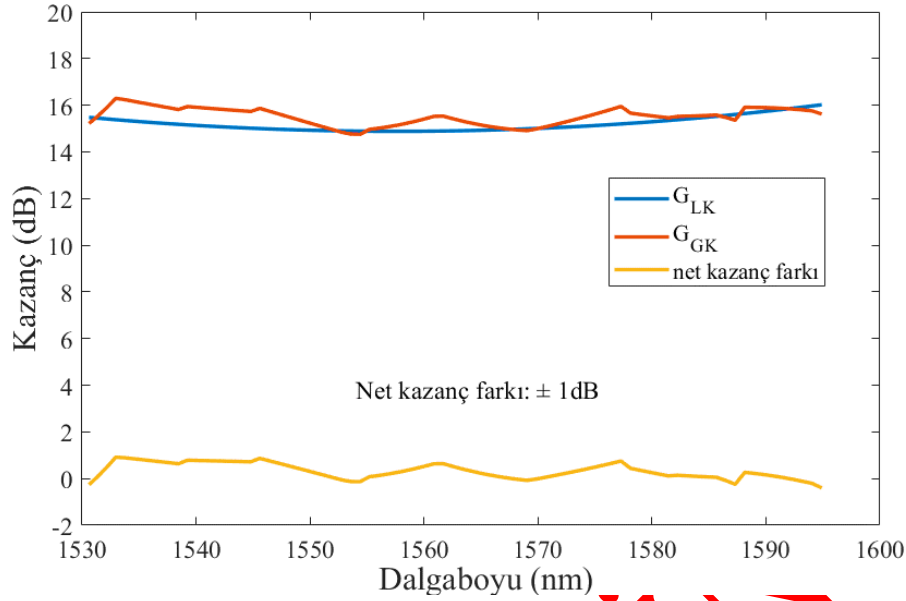


Şekil 6. FRY sistemine 5 adet pompa girişi ile alınan optimum G_k değerleri (Optimum G_k values taken with 5 pump inputs to the FRY system)

Şekil 6 incelendiğinde yatay eksen boyunca uzanan mavi çizgiyi, $G_{L,k}$ sinyal değerlerinin oluşturduğu açıkça gözlenmektedir. Mavi çizginin üzerinde görünen kırmızı çizgiyi 5 adet pompa kullanılarak bulunan optimum pompa güç ve dalga boyu değerlerinin sisteme entegre edilmesi sonucu elde edilen sinyal kazanç değerlerinin oluşturduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte optik sinyallerin kazancı kırmızı ve mavi renkteki çizgilerin örtüşmesi ile doğru orantılıdır. Bu sayede optik sinyallerin 80km ilerleme sonrası güç değerleri başlangıçta sahip olduğu güç değerleri ile aynı olacaktır. Bu şekilde kazancı düzeltilmiş 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 olacaktır. Şekilden anlaşılacağı üzere 5 pompa için net kazanç farkı ± 2 dB olarak bulunmuştur. Ayrıca 5 pompa için bulunan optimum pompa değerlerinin güçleri sırasıyla 184,6mW, 68mW, 100,8mW, 97,4mW, 213,1mW olarak bulunmuştur. Bununla beraber optimum pompa değerlerinin dalga boyları sırasıyla 1506 nm, 1448,2 nm, 1434,4 nm, 1422,1 nm, 1478,2 nm olarak

tespit edilmiştir. 6 pompa kullanılarak elde edilen 80 adet optik sinyalin net kazanç değerleri Şekil 7' da sunulmuştur.

Şekil 7 incelendiğinde yatay eksen boyunca uzanan mavi çizgiyi, $G_{L,k}$ sinyal değerlerinin oluşturduğu açıkça gözlenmektedir. Mavi çizginin üzerinde görünen kırmızı çizgiyi 4 adet pompa kullanılarak bulunan optimum pompa güç ve dalga boyu değerlerinin sisteme entegre edilmesi sonucu elde edilen sinyal kazanç değerlerinin oluşturduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte optik sinyallerin kazancı kırmızı ve mavi renkteki çizgilerin örtüşmesi ile doğru orantılıdır. Bu sayede optik sinyallerin 80km ilerleme sonrası güç değerleri başlangıçta sahip olduğu güç değerleri ile aynı olacaktır. Bu şekilde kazancı düzeltilmiş 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



Şekil 7. FRY sistemine 6 adet pompa girişi ile alınan optimum G_k değerleri (Optimum G_k values taken with 6 pump inputs to the FRY system)

olacaktır. Şekilden anlaşılabileceği üzere 6 pompa için net kazanç farkı ± 1 dB olarak bulunmuştur. Ayrıca 6 pompa için bulunan optimum pompa değerlerinin güçleri sırasıyla 148,5mW, 92,7mW, 109mW, 228,3mW, 72,5mW, 205,9mW olarak tespit edilmiştir. Bununla beraber optimum pompa değerlerinin dalga boyları sırasıyla 1412,4nm, 1492,1nm, 1457,7nm, 1415,6nm, 1428,1nm, 1490,3nm olarak bulunmuştur.

3. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu araştırmada başlangıç gücü değeri 1mW olan 80 adet optik sinyalin 80 km ilerlemesi sonucu kazancını düzleştirmek amaçlanmıştır. Bunun için öncelikle Raman kazanç katsayısı ve optik zayıflama katsayısı sisteme polinom olarak işlenerek hazır hale getirilmiştir. Sonrasında sabit terimler denkleme işlemi, sonrasında tüm denklemler PSO algoritmasına başarılı şekilde uyarlanmıştır. Sonrasında PSO algoritması 4,5 ve 6 pompa için işletilerek optimum değerler elde edilmiştir. Buna göre ilk olarak 80 optik sinyal ve 4 pompa kullanılarak elde edilen net kazanç farkı ± 3 dB olmuştur. İkinci olarak 80 optik sinyal ve 5 pompa kullanılarak elde edilen net kazanç farkı ± 2 dB olarak tespit edilmiştir. Son olarak 80 optik sinyal ve 6 pompa kullanılarak elde edilen net kazanç farkı ± 1 dB olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar literatür ile kıyaslandığında, kullanılan PSO algoritmasının geliştirilerek net kazancın daha da düşürülmesi gerektiği sonucuna varılabilir. Bu bağlamda sonraki çalışmalarda PSO algoritması geliştirilip FRY denkleminin çözümlenerek daha iyi sonuçların elde edilmesi amaçlanmaktadır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI

(AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Vehbi YOLCU: Metni yazmış, deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

Murat YÜCEL: Metinde, deney ve sonuçlarda gerekli düzenlemeleri yapmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yolcu V., Yücel M. and Aydın D., Solution of fiber Raman amplifier model using binary search equation-based adaptive artificial bee colony algorithm. *Optical Engineering*, 62(2), 026105, (2023).
- [2] Agrawal, G. P., *Nonlinear fiber optics.*, In Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century. Berlin, Heidelberg. (2000).
- [3] Yıldız, E., GaSe Yarıiletken Kristallerine Bor Katkılamanın Optik Sınırlama ve İki Foton Soğurma Özellikleri Üzerine Etkileri. *Politeknik Dergisi*, 26 (1), 161-168, (2023).
- [4] Moura, U. C., Da Ros, F., Brusin, A. M. R., Carena, A., and Zibar, D., Experimental characterization of Raman amplifier optimization through inverse system design. *Journal of Lightwave Technology*, 39(4), 1162-1170, (2020).

- [5] Yücel, M., Göktaş, H. H., "Fiber Raman Yükselteçlerde Pompalama Yönünün Kazanç Spektrumuna Etkisi Üzerine Bir Simülasyon". *Politeknik Dergisi*, 9, 161-164, (2006)
- [6] Jiang, H. M., Xie, K. and Wang, Y. F., Novel design of flat gain spectrum Raman fiber amplifiers based on ant colony optimization. *IEEE Photonics Technology Letters*, 23(23), 1823-1825, (2011).
- [7] Jiang, H. M., Xie, K. and Wang, Y. F., Shooting algorithm and particle swarm optimization-based Raman fiber amplifiers gain spectra design. *Optics Communications*, 283(17), 3348-3352, (2010).
- [8] Tekerek, A. and Dörterler, M., The Adaptation of Gray Wolf Optimizer to Data Clustering. *Politeknik Dergisi*, 25 (4), 1761-1767, (2022).
- [9] Marini, F., and Walczak, B. Particle swarm optimization (PSO). A tutorial. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 149, 153-165, (2015).
- [10] Garcia-Gonzalo, E., and Fernandez-Martinez, J. L., A brief historical review of particle swarm optimization (PSO). *Journal of Bioinformatics and Intelligent Control*, 1(1), 3-16, (2012).
- [11] Akyol, K. & Feneaker, S. O. F., Kaynaklı Kiriş Tasarımı Mühendislik Problemi İçin Kaotik Çoklu-sürü Parçacık Sürü Optimizasyonu. *Politeknik Dergisi*, 25 (4), 1645-1660, (2022).
- [12] Solihin, M. I., Tack, L. F., & Kean, M. L. Tuning of PID controller using particle swarm optimization (PSO). *In Proceeding of The International Conference on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, Vol. 1, No. 11, pp. 458-461, (2011).
- [13] Miranda, L. J. PySwarms: a research toolkit for Particle Swarm Optimization in Python. *Journal of Open Source Software*, 3(21), 433, (2018).
- [14] Akhlaghi, M., & Emami, F. Fuzzy adaptive modified PSO-algorithm assisted to design of photonic crystal fiber Raman amplifier. *Journal of the Optical Society of Korea*, 17(3), 237-241, (2013).
- [15] Manickam, C., Raman, G. R., Raman, G. P., Ganesan, S. I., & Nagamani, C. A hybrid algorithm for tracking of GMPP based on PSO and PSO with reduced power oscillation in string inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(10), 6097-6106, (2016).
- [16] Perlin, V. E., Winful H. G., Optimal Design of Flat-Gain Wide-Band Fiber Raman Amplifiers, *Journal of Lightwave Technology*, 20, 250-254, (2002).
- [17] Perlin, V. E., Winful H. G., On Distributed Raman Amplification For Ultrabroad-Band Long-Haul WDM Systems, *Journal of Lightwave Technology*, 20, 409-416, (2002).
- [18] Hu, J., Marks B. S., Menyuk C. R., Flat-Gain Fiber Raman Amplifiers Using Equally Spaced Pumps, *Journal of Lightwave Technology*, 22, 1519-1522, (2004).
- [19] Jiang, H. M., Xie K. and Wang Y. F., Shooting Algorithm and Particle Swarm Optimization Based Raman Fiber Amplifiers Gain Spectra Design, *Optics Communications*, 283, 3348-3352, (2010).
- [20] Yolcu, V., Yücel, M. and Aydın, D., Kazancı düzleştirilmiş fiber Raman yükselteç modelinin ikili arama denklemleri adaptif yapay arı kolonisi (İADAYAK) algoritması ile optimizasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39 (1), 29-38, (2023)
- [21] Yolcu, V. Yücel, M., "RAMAN Yükselteç Modeli Üzerine Bir Çalışma- YAK Algoritması", *5. Uluslararası Palandöken Kongresi*, (Erzurum), 4 (5), 930-939, (2023)