



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Erbiyum katkılı fiber yükselteç modelinin nümerik analizi

Numerical analysis of Erbium-doped fiber amplifier model

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

ORCID¹: 0000-0001-6052-4218

ORCID²: 0000-0002-0349-4013

ERKEN GÖRÜNÜM

To cite to this article: Yolcu V. ve Yücel M., “Erbiyum katkılı fiber yükselteç modelinin nümerik analizi”, *Journal of Polytechnic*, *(*) : *, (*).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Yolcu V. ve Yücel M., “Erbiyum katkılı fiber yükselteç modelinin nümerik analizi”, *Politeknik Dergisi*, *(*) : *, (*).

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

DOI: 10.2339/politeknik.1602743

Erbium Katkılı Fiber Yükselteç Modelinin Nümerik Analizi

Numerical Analysis of Erbium-Doped Fiber Amplifier Model

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç (EKFY) tasarımı kuruldu. (Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA) design was established.)
- ❖ EKFY' da sinyal, pompa ve gürültü güçleri differansiyel denklemleri nümerik olarak çözümlendi. (In EDFA, signal, pump and noise power differential equations were solved numerically.)
- ❖ Elde edilen nümerik sonuçlarla simülasyon sonuçları karşılaştırıldı. (The numerical results obtained were compared with the simulation results.)

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu araştırmada öncelikle optik simülasyon programı yardımıyla EKFY tasarımı yapılarak çeşitli güçlerde optik çıkış gücü ve gürültü faktörü elde edilmiştir. Elde edilen nümerik değerler tablo halinde sunulmuştur. Sonrasında EKFY matematiksel oran denklemleri nümerik olarak çözümlenmiştir. Ardından simülasyon sonuçları ile denklem çözümü sonucu elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları analiz edildiğinde büyük benzerlik elde edilmiştir. (In this research, firstly, EDFA design was made with the help of optical simulation program and optical output power and noise power were obtained at various powers. Obtained numerical values are presented in a table. Then, EDFA mathematical equations were solved numerically. Then, simulation results and findings obtained as a result of equation solution were compared. When the comparison results were analyzed, great similarity was obtained.)

Amaç (Aim)

EKFY simülasyon sonuçları ile nümerik denklem çözümü sonucu elde edilen bulgular karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları analiz edildiğinde büyük benzerlik elde edilmiştir. (The results of the EDFA simulation were compared with the findings obtained from the numerical equation solution. When the comparison results were analyzed, a great similarity was obtained.)

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Sisteme sırasıyla 50mW, 100mW, 150mW pompa gücü verilerek Erbiyum katkılı optik fiber uzaklığına bağlı olarak optik çıkış gücü ve gürültü gücü elde edilmiştir. Elde edilen değerler tablo halinde sunulmuştur. Sonrasında EKFY fiziksel oluşumu ve bu oluşuma etki eden değişkenler detaylı açıklanarak matematiksel denklemler nümerik olarak çözümlenmiştir. (By giving 50mW, 100mW, 150mW pump power to the system, optical output power and noise power were obtained at various powers depending on the Erbium doped optical fiber distance. The numerical values obtained are presented in a table. Afterwards, the physical formation of EKFD and the variables affecting this formation are explained in detail and the mathematical equations are solved numerically.)

Özgünlük (Originality)

Bu çalışmada EKFY denklemlerinin nümerik çözümü kullanılan yöntemin ve elde edilen sonuçların EKFY kapsamında ileride yapılacak optimizasyon çalışmalarına kaynak olacağı düşünülmektedir. (In this study, it is thought that the method used for the numerical solution of the EDFA equations and the results obtained will be a source for future optimization studies within the scope of EDFA.)

Bulgular (Findings)

Nümerik ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında büyük benzerlik elde edilmiştir. (When the numerical and simulation results were compared, great similarity was obtained.)

Sonuç (Conclusion)

Bu bağlamda ileriki çalışmalarda, elde ettiğimiz sonuçlar fonksiyon şeklinde yazılarak optimizasyon denklemleri için kullanılabileceği düşünülmektedir. (In this context, it is thought that in future studies, the results we obtained can be written as functions and used for optimization equations.)

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.)

Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç Modelinin Nümerik Analizi

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 : 16.12.2024 ; Kabul/Accepted : 31.12.2024 ; Erken Görünüm/Early View : 11.02.2025)

ÖZ

Sanal/artırılmış gerçeklik, yapay zekâ, veri madenciliği, bulut hizmetleri ve video akışı gibi çeşitli yeni internet uygulamalarını desteklemek için optik iletim sisteminde kapasite artışına olan talep giderek artmaktadır. Son birkaç yılda, donanım seviyesindeki gelişmeler ve sosyal medya gibi teknolojiler yaygın şekilde kullanılmakta bu sebeple sistem kapasitesini teorik sınıra yaklaştırmaktadır. Bu bağlamda araştırmada öncelikle optik simülasyon programı yardımıyla EKFY tasarımı yapılarak sisteme sırasıyla 50mW, 100mW, 150mW pompa gücü verilerek Erbiyum katkılı optik fiber uzaklığına bağlı olarak optik çıkış gücü ve gürültü gücü elde edilmiştir. Sonrasında EKFY fiziksel yapısında, çeşitli uzunluklardaki Erbiyum katkılı optik fiber uzunlukları için sinyal gücü, pompa gücü ve gürültü faktörü denklemleri nümerik olarak çözümlenmiştir. Son olarak simülasyon sonuçları ile bulunan nümerik sonuçlar karşılaştırılmış elde edilen sonuçlar görsellerle ve tablolarla sunulmuştur. Karşılaştırma sonuçları analiz edildiğinde büyük benzerlik elde edilmiştir. Bu bağlamda ileriki çalışmalarda, elde ettiğimiz sonuçlar fonksiyon şeklinde yazılarak optimizasyon denklemleri için kullanılabileceği düşünülmekte ve bu tür çalışmalara kaynak olacağı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: EKFY, Optik fiber, Optik güç, Gürültü faktörü.

Numerical Analysis of Erbium-Doped Fiber Amplifier Model

ABSTRACT

Nowadays, the demand for increasing capacity in optical transmission systems is growing to support various new internet applications such as virtual/augmented reality, artificial intelligence, data mining, cloud services, and video streaming. Advances in hardware technologies and the widespread use of technologies like social media have pushed system capacity closer to its theoretical limits. In this study, an Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) design was implemented using an optical simulation program. Signal and noise powers at different pump powers (50mW, 100mW, 150mW) were obtained depending on the length of the erbium-doped optical fiber. Subsequently, the physical structure of the EDFA was examined, and the equations for signal power, pump power, and noise figure were solved numerically for various fiber lengths. The results obtained from simulations and numerical methods were compared, showing a strong similarity. It is anticipated that the results of this study can be used to create functional expressions for optimization equations and serve as a resource for future research.

Keywords: EDFA, Optic fiber, Optical power, Noise power.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sanal/artırılmış gerçeklik, yapay zekâ, veri madenciliği, bulut hizmetleri ve video akışı gibi çeşitli yeni internet uygulamalarını desteklemek için optik iletim sisteminde kapasite artışına olan talep giderek artmaktadır. Son birkaç yılda, donanım seviyesindeki gelişmeler ve sosyal medya gibi teknolojiler yaygın şekilde kullanılmakta bu sebeple sistem kapasitesini teorik sınıra yaklaştırmaktadır [1, 2].

Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç (EKFY), optik sinyalleri yükseltmek için Erbiyum iyon katkılı optik fiber kullanan bir optik yükselteç olarak tanımlanabilir.

Yükseltilecek sinyal ile bir pompa lazeri, katkılı fiber içine yönlendirilir ve sinyal, katkı iyonlarıyla etkileşim yoluyla yükseltilir. EKFY, silika bazlı fiberlerin düşük kayıp optik penceresine uygun olarak en iyi bilinen, uygulaması kolay ve en sık kullanılan optik yükselteçtir [3, 4].

EKFY'lerin dikkat çekici bir özelliği, genellikle C-bandı ismi verilen fiber zayıflamasının en düşük olduğu 1550 nm dalga boyu civarındaki geniş kazanç bant genişliğidir. Bu özellik, yüksek veri hızlarına sahip kanalları herhangi bir kazanç daralması etkisi olmadan yükseltmek için yeterlidir. Tek bir Erbiyum katkılı fiber, kazanç bölgesindeki farklı dalga boylarında birçok veri kanalını aynı anda yükseltmek için kullanılabilir [5]. Fiber yükselteçlerin kullanıma sunulmasından önce, uzun fiber-optik bağlantılarda tüm veri kanallarını yükseltmek için pratik bir yöntem yoktu. Kanalları ayırmak, elektronik olarak yükseltmek, optik olarak yeniden iletmek ve tekrar birleştirmek gerekiyordu. EKFY, Raman yükselteç gibi fiber yükselteçlerin tanıtımı, sistemin karmaşıklığını önemli ölçüde azaltarak güvenilirliği artırmıştır.

Dalga Boyu Bölmeli Çoğullama (DBÇ) sistemlerinde, C bant aralığında dalga boyu kanalları akışı aynı anda istenen güç seviyesine yükseltilebilir. Ancak, belirli bir

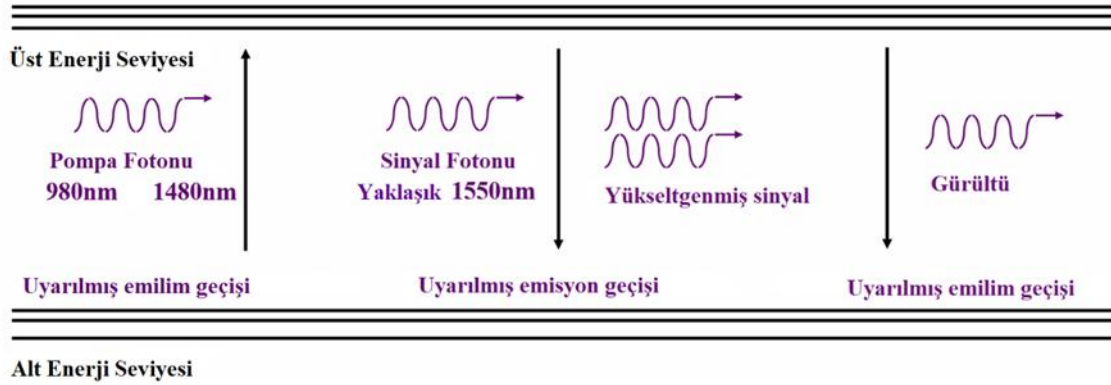
kanalın amplifikasyonu sinyal giriş ve pompa gücüne, sinyal dalga boyuna, sistemde mevcut sinyal sayısına optik fiber yarıçapına, Er^{3+} iyon yoğunluğuna v.b parametrelere bağıldır. EKFY 'nin optik sinyal güçlerini yükseltmek için kullandığı ana bileşen, Erbiyum katkılı fiber EKF' dir. EKF içindeki katkılı Erbiyum (Er^{3+}) iyonları, üst enerji seviyesi (I15/2 seviyesi) ile alt enerji seviyesi (I13/2 seviyesi) arasında geçişleri işleyen iki seviyeli bir sistemle sınırlıdır. Yaklaşık 1550 nm dalga boyunda sinyaller ve 980 nm veya 1480 nm dalga boylarında pompa ışıkları enjekte edildiğinde, Er^{3+} iyonları başlıca üç şekilde geçiş yapar [6]:

1. Uyarılmış emilim ile alt enerji seviyesinden üst enerji seviyesine geçiş.

2. Uyarılmış emisyon ile üst enerji seviyesinden alt enerji seviyesine geçiş.

3. Spontane emisyon ile rastgele faz ve dalga boyunda fotonlar yayılması sonucu gürültü oluşumu.

Bu geçişler sırasında sinyal güçleri yükseltilirken, bazı fotonlar yakalanır ve EKF içinde yükseltilir, bu da gürültü faktörünü (GF) oluşturur. Bu işlemler kararlı durum koşullarında dinamik dengeye ulaşır. Bu denge, alt ve üst enerji seviyelerindeki fraksiyonel popülasyonun sabit olarak kabul edilebileceği anlamına gelir. Alt ve üst enerji seviyeleri boyunca enerji seviyelerindeki geçiş ve EKFY' nin kazanç karakterizasyonu Şekil 1'de görsel olarak sunulmuştur [7].



Şekil 1. EKFY fiziksel olayının yapısı (The structure of the EDFA physical event)

Alanyazın incelendiğinde EKFY alanında çeşitli kategorilerde araştırmalar yapılmıştır. Bazı araştırmacılar EKFY için fiber bragg ızgara dizayn edip bunu yükselteç tasarımlarında etkili olarak kullanmışlar bu sayede düşük yükseltilmiş kendiliğinden yayılma (ASE) gücü elde etmişlerdir [8-12]. Bazı araştırmacılar ise EKFY kapsamında farklı lazer çeşitleri kullanarak (CW, DBF) bu lazerlerin performans, sıcaklık, stabilite vs. gibi yönlerden etkinliği hakkında olumlu yönde sonuçlar elde etmişlerdir. Bu sayede Terabit düzeyde veri transferi gerçekleştirebilmişlerdir [13-16].

EKFY için bir diğeri çalışma alanı yüksek kazanç düşük gürültü elde etmek olmuştur. Bunun için araştırmacılar tasarımlarında tek geçişli, iki geçişli, üç geçişli...vs. EKFY tasarımı kullanmışlar bu sayede kazancı düzeltilmiş, yüksek kazanç düşük gürültü seviyesi elde etmişlerdir [17-20]. Diğeri bir çalışma alanı ise hibrit fiber yükselteç tasarımları olmuştur. Araştırmacılar farklı optik fiber bantlarında EKFY ve Raman yükselteçleri birleştirerek hibrit bir yapı oluşturmuşlar bu sayede, sinyali tek seferde en uzak mesafeye ileterek en yüksek kazancı elde etmeye çalışmışlardır [21-24]. Çalışma alanlarından bir diğeri ise, bilim insanları farklı optik fiber uzunlukları için sinyal ve pompanın mesafe, sinyal gücü ve pompa gücü değişimini nümerik olarak çözmüşler ve tasarım sonucu elde edilen bulguları optimizasyon problemi olarak tanımlayarak yapay zekâ algoritmaları yardımıyla çözmeye çalışmışlar, sonuç

olarak en yüksek seviyede kazanç elde eden optimum mesafeyi, sinyal gücünü veya dalga boyunu elde etmişlerdir [25-28].

Bu bağlamda bu çalışmada öncelikle simülasyon programı yardımıyla EKFY sistem tasarımı oluşturulmuştur. Sonrasında EKFY fiziksel yapısında, çeşitli uzunluklardaki Erbiyum katkılı optik fiber uzunlukları için sinyal gücü, pompa gücü ve gürültü faktörü denklemleri nümerik olarak çözümlenmiştir. Son olarak simülasyon sonuçları ile bulunan nümerik sonuçlar karşılaştırılmış elde edilen sonuçlar görsellerle ve tablolarla sunulmuştur. Bu çalışma özellikle alan yazındaki sınırlı Türkçe kaynaklara katkı sağlamanın yanında, kullanılan yöntemin ve elde edilen sonuçların EKFY kapsamında ileride yapılacak optimizasyon çalışmalarına kaynak olacağı düşünülmektedir.

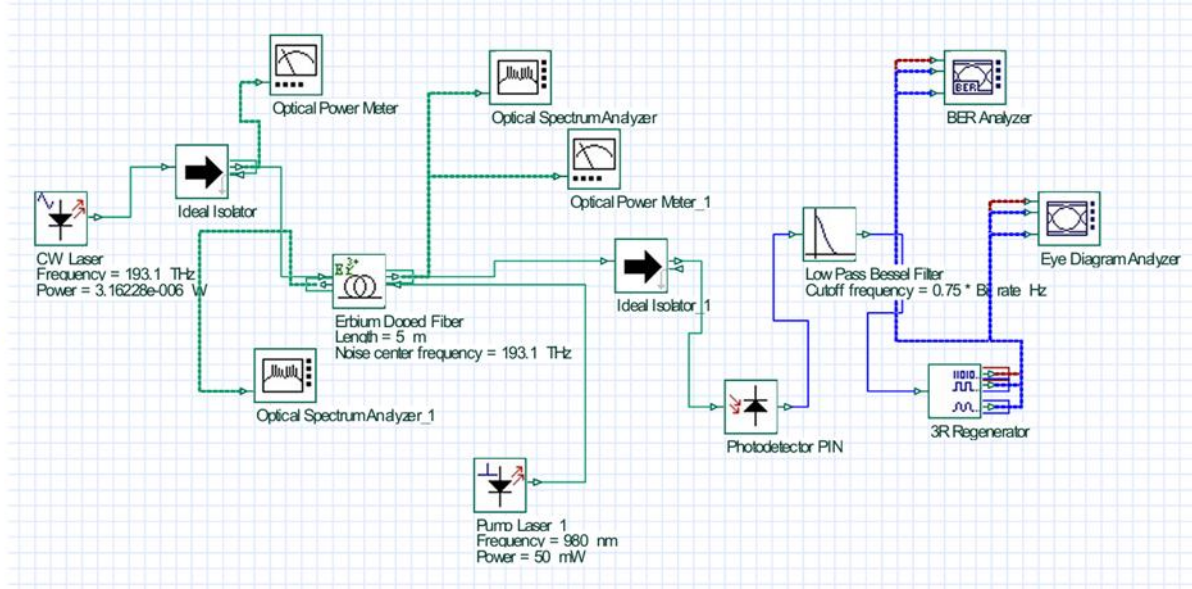
2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. EKFY Sistem Tasarımı (EDFA System Establish)

Optisystem yazılımı, optik fiberli sistemlerde EKFY' yi tasarlamak için kullanılır. Sistem tasarımı, Şekil 2' de gösterildiği gibi tek giriş sinyalinden (kanal), ideal bir çoklayıcıdan, iki izolatörden, bir pompa lazerinden, bir Erbiyum katkılı fiberden, iki optik spektrum analizörden, iki güç analiz metreden, bir fotodedektörden, bir göz diyagram analizörden, bir alçak geçişli Bessel

filtresinden ve bir 3R rejeneratöründen oluşur. Sistemin sinyal girişi, 1550 nm dalga boyu bölgesinde bir sinyalden oluşmaktadır. Sinyalin giriş gücü -26 dBm'dir. 980 nm'deki pompalama, katkılı atomları daha yüksek bir enerji seviyesine çıkarmak için kullanılır. Bir giriş optik izolatörü, yükseltilebilir kendiliğinden yayılma (ASE) ve sinyallerin geriye doğru yayılmasını önler. Aksi takdirde,

yansıyan ASE, popülasyon inversiyonunu azaltacaktır, dolayısıyla kazancı azaltacak ve gürültü katsayısını artıracaktır. Çıkış izolatörü, EKFY'ye tekrar giren çıkış yansımalarından gelen ışığı önler [29]. Yukarıda detaylı anlatılan EKFY sistem tasarımı Şekil 2 de detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 2. EKFY sistem tasarımı (EDFA system schematic design)

Sistem tasarımının kurulmasının ardından pompa gücü yükseltilmiş sinyal gücü elde edilmiştir. Bununla birlikte her bir yükseltme sonucu oluşan gürültü faktörü optik spektrum analizöründen okunarak kayıt edilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar Tablo 1’de sunulmuştur.

	2m	3m	4m	5m	6m	8m	10m	12m	15m
50mw için Çıkış gücü	0,7mw	5mw	11mw	15mw	17,3mw	19mw	19mw		
100mw için Çıkış gücü	0,8mw	8mw	22mw	32mw	38mw	43mw	45mw	46mw	46mw
150mw için Çıkış gücü	1mw	10mw	31mw	48mw	58mw	68mw	72mw	73mw	74mw
50mw için Gürültü faktörü	$3,6 \cdot 10^{-5}$ mw	$4,4 \cdot 10^{-5}$ mw	$1 \cdot 10^{-3}$ mw	$1,3 \cdot 10^{-3}$ mw	$1,5 \cdot 10^{-3}$ mw	$1,4 \cdot 10^{-5}$ mw	$1,4 \cdot 10^{-5}$ mw	$1,6 \cdot 10^{-5}$ mw	
100mw için Gürültü faktörü	$5 \cdot 10^{-5}$ mw	$9 \cdot 10^{-4}$ mw	$3 \cdot 10^{-3}$ mw	$4 \cdot 10^{-3}$ mw	$4,5 \cdot 10^{-3}$ mw	$4 \cdot 10^{-3}$ mw	$3,3 \cdot 10^{-3}$ mw	$3,1 \cdot 10^{-3}$ mw	$3,1 \cdot 10^{-3}$ mw
150mw için Gürültü faktörü	$5 \cdot 10^{-5}$ mw	$1,1 \cdot 10^{-3}$ mw	$4,4 \cdot 10^{-3}$ mw	$6,6 \cdot 10^{-3}$ mw	$7,4 \cdot 10^{-3}$ mw	$6,9 \cdot 10^{-3}$ mw	$5,6 \cdot 10^{-3}$ mw	$5 \cdot 10^{-3}$ mw	$4,8 \cdot 10^{-3}$ mw

Tablo 1. EKFY sistem tasarımı sonucu belirli pompa güçleri için yükseltilmiş sinyal gücü ve gürültü faktörü değerleri (Increased signal strength values for certain pump powers as a result of EDFA system design)

Tablo 1 detaylı incelendiğinde, zayıf sinyal gücü erbiyum katkılı optik fibere giriş yaptığında ilk metrelerde sinyal gücünde çok değişme olmadığı fakat 3. ve 8. metre

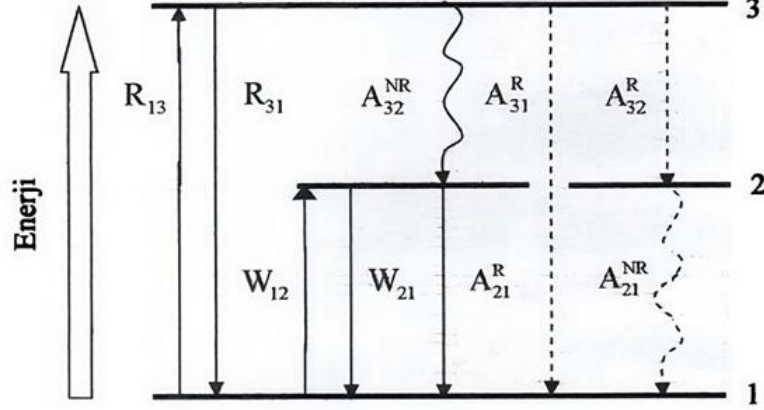
aralıklarında ivmeli artış sağladığı sonrasında ise erbiyum iyonlarının denge haline gelmesinden dolayı gücün sabit kaldığı anlaşılmış ve bazı düşük pompa güçlü

yapıların 10. metreden sonra çıkış sinyali gücünün spektrum analizinde ölçülemediği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte sisteme dahil edilen pompa gücü arttıkça sinyal gücünün daha fazla yükseldiği açıkça görülmektedir. Ayrıca oluşan gürültü güçleri incelendiğinde pompa gücü artışına paralel, gürültü

2.2.EKFY ya Ait Matematiksel Denklemlerin Çözümü (Solution of Mathematical Equations of EDFA)

EKFY sisteminde sinyal gücü, pompa gücü ve gürültü faktörü değişimi denklemleri büyük öneme sahiptir. Fakat bu denklemlerden önce EKFY 'da öncelikle erbiyum iyon yoğunluğu ve ona etki eden pompa ve sinyal geçiş oranları denklemleri çözümlenmelidir.

$$W_p = (\sigma_{sa} * P_p) / (h * v_p * A_{eff}) \quad (1)$$



Şekil 3. Er³⁺ iyonlarının enerji seviye diyagramı (Energy level diagram of Er³⁺ ions)

Seviye 1'den seviye 3'e pompalama oranı R13 ve seviye 3 ile seviye 1 arasındaki uyarılmış yayılma oranı R31'dir. Seviye 3'e karşılık gelen uyarılmış durumda sönümlemenin ışımalı oran ve ışımasız oran olmak üzere iki olasılığı vardır. Seviye 3 kendiliğinden bozulmada etkili varsayılan ışımadır. N1, N2 ve N3 sırasıyla Er³⁺ iyonlarının 1, 2 ve 3 enerji durumlarındaki atomların oransal yoğunluklarıdır. Bu çalışmada 3 seviyeli enerji diyagramını 2 seviyeli enerji diyagrama indirgenerek iki geçişli olarak ifade edilmiştir. Bu durumu ifade eden geçiş Denklem 2' de sunulmuştur.

$$N_t = N_1 + N_2 \quad (2)$$

Nt, N1 ve N2 terimleri sırasıyla toplam Erbiyum iyon yoğunluğunu, alt seviye Erbiyum iyon yoğunluğunu, üst seviye Erbiyum iyon yoğunluğunu ifade eder. Başlangıçta üst seviye Erbiyum iyon yoğunluğu (N2)'nin değeri sıfırdır. Zamanla üst seviye Erbiyum iyon

faktörünün de arttığı görülmekte ve 3. ve 8. metre aralıklarında ivmeli artış sağladığı anlaşılmıştır. İlerleyen bölümlerde çıkış sinyali gücü değişimi, pompa gücü değişimi ve gürültü faktörü değişimine ait matematiksel denklemler nümerik olarak çözümlenerek edilen sonuçlar Tablo 1' deki sonuçlar ile kıyaslanacaktır.

$$W_s = (\sigma_{sa} * P_s) / (h * v_p * A_{eff})$$

Denklem 1' de Wp, Ws, σ_{sa} , h, v_p , A_{eff} terimleri sırasıyla pompa geçiş oranı, sinyal geçiş oranı, sinyal emilim kesiti, Plank sabiti, optik fiberin etkin mod alanını ifade eder. EKFY' de başlangıçta alt seviye Erbiyum iyon yoğunluğu ve üst seviye Erbiyum iyon yoğunluğu toplamı, toplam Erbiyum iyon yoğunluğu olarak isimlendirilir. Zamanla alt seviye iyon yoğunluğu gittikçe azalırken zıttı olarak üst seviye iyon yoğunluğu zamanla aynı oranda artar. Belirli süre sonra dengeye ulaşır. Bu geçişi gösteren durum Şekil 3' de sunulmuştur.

yoğunluğu artarak toplam Erbiyum iyon yoğunluğuna eşit olur. N1 ise başlangıçta toplam Erbiyum iyon yoğunluğuna eşittir ve zamanla sıfıra yaklaşır. Bu bağlamda Erbiyum yoğunluklarının zamanla değişimini ifade eden Denklem 3 aşağıda sunulmuştur.

$$\frac{dN_2}{dt} = W_p * N_1 - W_s * N_2 - N_2/t_{sp} \quad (3)$$

Denklem 3 incelendiğinde, ifadenin zamanla değişen bir diferansiyel denklem olduğu görülmekte ve nümerik olarak çözümlenmesi gerekmektedir. Denklem 3' de yer alan Wp, Ws, t_{sp} terimleri sırasıyla pompa geçiş oranı, sinyal geçiş oranı ve spontane emisyon iyon ömrünü temsil eder. Bu değişim neticesinde alt seviye iyon yoğunluğu zamanla artacak sonunda dengeye ulaşacaktır. Bu sırada giriş sinyali, pompa sinyali, gürültü faktörü terimlerinin uzaklıkla değişimi aşağıda denklemlerle sunulmuştur.

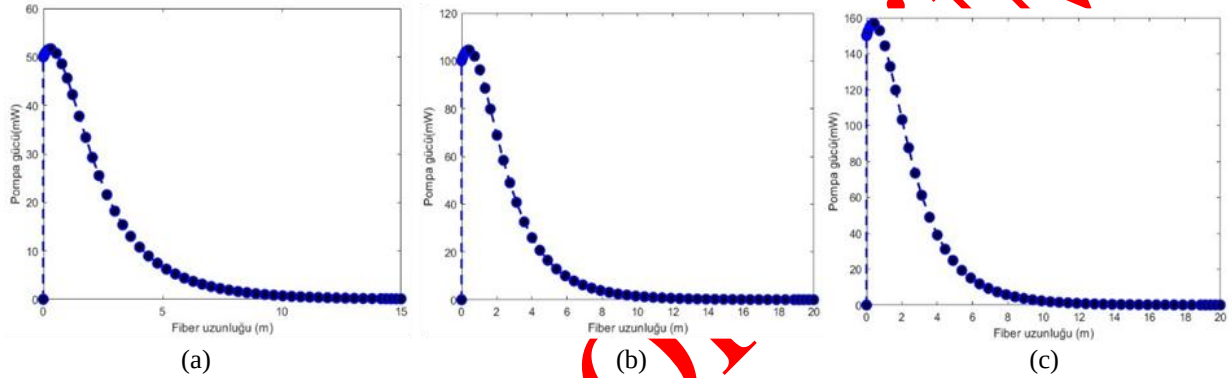
$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\rho\Gamma_p[\sigma_{se} N_2(z) - \sigma_{sa} N_1(z)] P_p(z) + \alpha_p P_{(z)} \quad (4)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = \rho \Gamma_p [\sigma_{se} N_2(z) - \sigma_{sa} N_1(z)] P_s(z) - \alpha_p P_s \quad (5)$$

$$\frac{dP_n(z)}{dz} = \rho \Gamma_p [\sigma_{se} N_2(z) - \sigma_{sa} N_1(z)] dP_n(z) - \alpha_s P_s \quad (6)$$

Denklem 4' de ifade edilen P_p , ρ , Γ_p , σ_{se} , α_p terimleri sırasıyla pompa sinyali, Erbiyum atom yoğunluğunu, pompa için örtüşme faktörünü, pompa sinyali emisyon kesitini ve pompa için zayıflama katsayısını ifade eder. Denklem 4 incelendiğinde, denklemin uzaklıkla değişen bir diferansiyel denklem olduğu görülmektedir. Ayrıca denklemde $N_1(z)$, $N_2(z)$ değişkenleri bulunmaktadır. Bu değişkenler yukarıda açıklandığı gibi zaman alanında

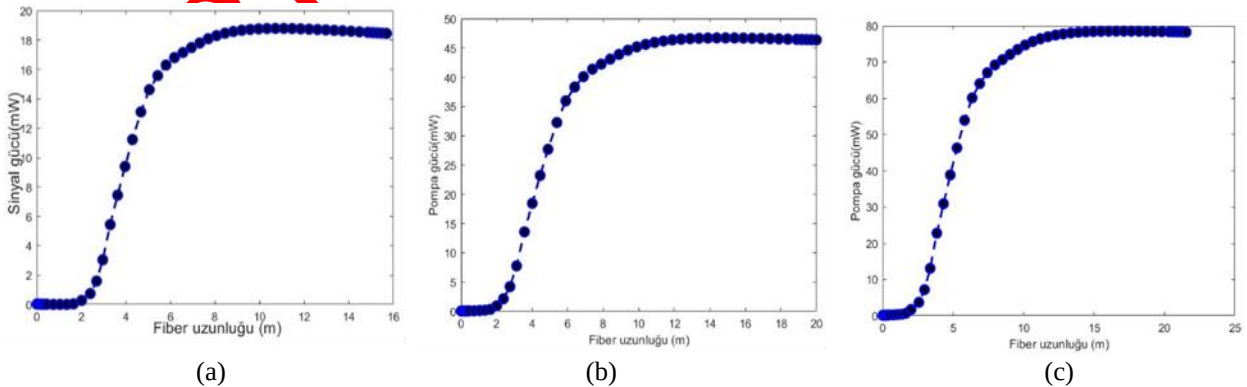
değişmiştir. Bu nedenle alt seviye ve üst seviye iyon yoğunluğunun nümerik çözümlerinin denklem çözümüne dahil edilmesi gerekmektedir. Bunun için zamanla değişen yoğunlukların, denklemde uzaklıkla değişen pompa gücüne dönüşümü yapılması lazımdır. Bu bağlamda zaman alanından uzaklık alanına dönüşüm yapıldıktan sonra denklem 4 nümerik olarak çözümlenmiş ve sonuçlar görsellerle sunulmuştur.



Şekil 4. Şekil 4. Pompa güçlerinin fiber uzunluğu ile değişimi (a) 50 mW, (b) 100 mW, c) 150 mW (Variation of pump powers with fiber length (a) 50 mW, (b) 100 mW, c) 150 mW)

Şekil 4 incelendiğinde sırasıyla 50 mW, 100 mW, 150 mW pompa güçlerinin uzaklık arttıkça azaldığı görülmektedir. Uzaklıkla beraber gücün azalması ilk metrelerde yavaş olmakta sonrasında ivmeli olarak artmaktadır. Belirli metreden sonra Erbiyum üst enerji seviye iyonlarının azalması sebebiyle pompa gücü azalarak bitmektedir. Denklem 5' de ifade edilen P_s , ρ , Γ_s , σ_{se} , α_s terimleri sırasıyla giriş sinyali, Erbiyum

atom yoğunluğunu, sinyal için örtüşme faktörünü, sinyal emisyon kesitini ve sinyal frekansı için zayıflama katsayısını ifade eder. Denklem 5 sinyal gücünün mesafeyle değişimini gösterir. Denklem nümerik olarak çözümlenmiş ve sırasıyla 50 mW, 100 mW, 150 mW pompa gücüne bağlı sinyal güçlerinin uzaklıkla değişimi görsellerle Şekil 5' de sunulmuştur.



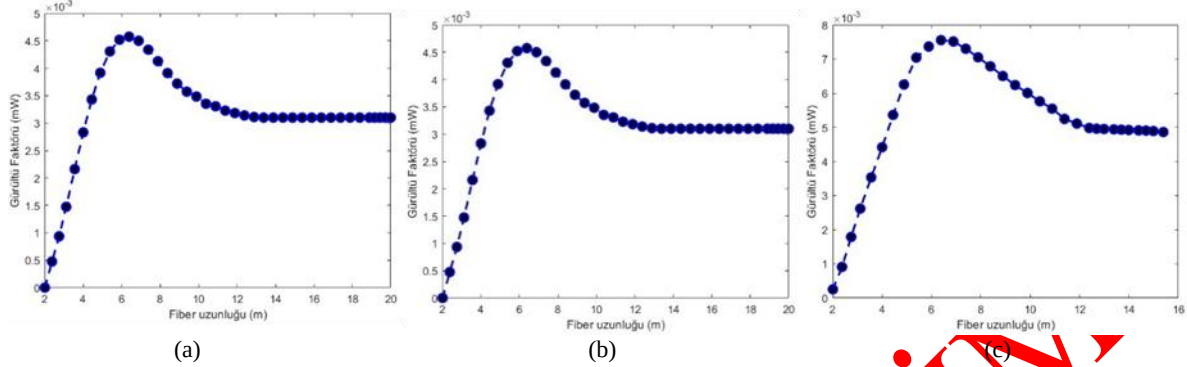
Şekil 5. Çıkış sinyal güçlerinin farklı pompa güçlerine göre fiber uzunluğu ile değişimi (a) 50 mW, (b) 100 mW, c) 150 mW (Variation of output signal power with fiber length (a) 50 mW, (b) 100 mW, c) 150 mW)

Şekil 5 incelendiğinde sırasıyla çıkış sinyal güçlerinin fiber boyunca doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir.

Uzaklıkla beraber sinyal gücünün artması ilk metrelerde yavaş olmakta sonrasında ivmeli olarak artmaktadır.

Belirli metreden sonra Erbiyum üst enerji seviye iyonlarının azalması sebebiyle sinyal gücü artışı bitmekte, hatta sinyal zayıflama katsayısı etkisiyle küçük bir miktar azalmaktadır. Denklem 6 gürültü faktörünün

mesafeyle değişimini gösterir. Denklem nümerik olarak çözümlenmiş ve sırasıyla 50mW, 100mW, 150mW pompa gücüne bağlı gürültü güçlerinin uzaklıkla değişimi görsellerle Şekil 6' da sunulmuştur.



Şekil 6. Gürültü güçlerinin farklı pompa güçlerine göre fiber uzunluğuna bağlı değişimi (a) 50 mW, (b) 100 mW, c) 150 mW (Variation of noise power with fiber length (a) 50 mW, (b) 100 mW, c) 150 mW)

Şekil 6 incelendiğinde sırasıyla gürültü güçlerinin uzaklıkla doğru orantılı arttığı görülmektedir. Uzaklıkla beraber sinyal gücünün artması ilk metrelerde önemsiz olmasından dolayı gösterilmemiş, sonrasında ivmeli olarak artmaktadır. Belirli metreden sonra Erbiyum üst enerji seviye iyonlarının azalması sebebiyle gürültü

faktörü artışı bitmekte, hatta sinyal zayıflama katsayısı ve pompa gücü etkisiyle küçük bir miktar dalgalanma olmaktadır. Yukarıda detaylı olarak sunulan tüm sonuçları elde etmemizi sağlayan parametre değerleri aşağıda yer alan Tablo 2' de sunulmuştur.

Tablo 2. Nümerik çözümde kullanılan parametre değerleri (Parameter values used in the numerical solution)

$\sigma_{sa} = 2,85 \cdot 10^{-25} \text{ m}^2$	$\sigma_{se} = 5,03 \cdot 10^{-25} \text{ m}^2$
$A_{eff} = 15,2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$	$\alpha_s = 0,2 \text{ dB/km}$
$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$	Sinyal dalgaboyu= 1550nm
$P_s = 3 \cdot 10^{-6} \text{ W}$	Pompa dalgaboyu=980nm
$\rho = 300 \text{ ppm}$	$t_{sp} = 1/100 \text{ sn}$
$\Gamma_s = 0,8$	$N_t = 1 \cdot 10^{25}$

Yukarıda görsellerle sunulan bulguların Erbiyum katkılı optik fiber uzunluğuna göre anlaşılması zor olduğundan, sistem tasarımı sonuçlarına benzer

olarak, optik fiber uzunluklarına göre güç değerleri ölçülüp tablolaştırılarak Tablo 3' de sunulmuştur.

Tablo 3. EKFY denklemlerinin çözümü sonucu hesaplanan belirli pompa güçleri için yükseltilmiş sinyal gücü ve gürültü faktörü değerleri (Increased signal power and noise power values for certain pump powers calculated as a result of solving the EDFA equations)

	2m	3m	4m	5m	6m	8m	10m	12m	15m
50mw için Çıkış gücü	0,5mw	5mw	10,9mw	14,6mw	16,8mw	18,5mw	18,5mw		
100mw için Çıkış gücü	0,9mw	7,75mw	20mw	31mw	37,2mw	42,5mw	44,8mw	46mw	46mw
150mw için Çıkış gücü	1,2mw	8mw	30mw	46mw	57mw	69mw	74mw	75mw	74mw

Tablo 3. (devam). EKFY denklemlerinin çözümü sonucu hesaplanan belirli pompa güçleri için yükseltilmiş sinyal gücü ve gürültü faktörü değerleri (Increased signal power and noise power values for certain pump powers calculated as a result of solving the EDFA equations)

		2m	3m	4m	5m	6m	8m	10m	12m	15m
50mw için	Gürültü faktörü	4.10^{-6}	$4,8.10^{-4}$	1.10^{-3}	$1,3.10^{-3}$	$1,5.10^{-3}$	$1,4.10^{-3}$	$1,45.10^{-3}$	$1,6.10^{-3}$	
		mw	mw	mw	mw	mw	mw	mw	mw	
100mw için	Gürültü faktörü	4.10^{-5}	12.10^{-4}	3.10^{-3}	4.10^{-3}	$4,5.10^{-3}$	$4,1.10^{-3}$	$3,3.10^{-3}$	3.10^{-3}	$3,1.10^{-3}$
		mw	mw	mw	mw	mw	mw	mw	mw	mw
150mw için	Gürültü faktörü	8.10^{-5}	$1,2.10^{-3}$	$4,4.10^{-3}$	$6,7.10^{-3}$	$7,5.10^{-3}$	$6,8.10^{-3}$	$5,5.10^{-3}$	5.10^{-3}	$4,9.10^{-3}$
		mw	mw	mw	mw	mw	mw	mw	mw	mw

3. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu araştırmada öncelikle optik simülasyon programı yardımıyla EKFY tasarımı yapılarak sisteme sırasıyla 50mW, 100mW, 150mW pompa gücü verilerek Erbiyum katkılı optik fiber uzaklığına bağlı olarak çeşitli güçlerde sinyal gücü ve gürültü faktörü elde edilmiştir. Elde edilen nümerik değerler tablo halinde sunulmuştur. Sonrasında EKFY fiziksel oluşumu ve bu oluşuma etki eden değişkenler detaylı açıklanarak matematiksel denklemler nümerik olarak çözümlenmiştir. Bununla beraber çözümleme sonucu elde edilen sonuçlar grafiklerle sunulmuş, ardından simülasyon sonuçları ile denklemlerin çözümü sonucu elde edilen bulgular karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları analiz edildiğinde büyük benzerlik elde edilmiştir. Bu bağlamda ileriki çalışmalarda, elde ettiğimiz sonuçlar fonksiyon şeklinde yazılarak optimizasyon denklemleri için kullanılabileceği düşünülmekte ve bu tür çalışmalara kaynak olacağı sonucuna varılmıştır.

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., 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] Yıldırım, R., Hazet, A., "A New Approach to Increasing the Bandwidth of Fiber-Optic Communication Systems", *Politeknik Dergisi*, 27, (3), 1141–1145, (2024).
- [3] Yücel, M., Yiğit, E., "İki Aşamalı Üç Geçişli EKFY Tasarımı ve EKFY Parametrelerinin Optimizasyonu", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 8(2), (2020).
- [4] Yolcu V., Yücel M., "Raman Yükselteç Modeli Üzerine Bir Çalışma". *Politeknik Dergisi*, 27(4), 1399-1407, (2024).
- [5] Yıldız E., "GaSe yarıiletken kristallerine bor katılmanın optik sınırlama ve iki foton soğurma özellikleri üzerine etkileri". *Politeknik Dergisi*, 26(1), 161-168, (2023).
- [6] Mahad, F. D., Supa'at A. S. and Sahmah B. M., "EDFA gain optimization for WDM system", *In 2017 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)* (pp. 0087-0090). (2009).
- [7] Yichen L., et al., "Modeling EDFA gain: approaches and challenges". *Photonics*, Vol. 8, No:10, MDPI, (2021).
- [8] Talam C., David B., et al. "EDFA gain flattening using fiber Bragg gratings employing different host materials.", *Optical and Quantum Electronics*, 52, 1-17, (2020).
- [9] Kipriksiz S, Yücel M., "Düzgün Olmayan Yapılarda Fiber Bragg İzgara Sensör Tasarımı ve Uygulaması", *Politeknik Dergisi*, 24(3):843-51, (2021).
- [10] Aly, M. H., et al. "A Comprehensive Study on EDFA Gain Flattening for WDM Transmission using Cascaded Fiber Bragg Gratings.", *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 40.1, 96-108, (2024).
- [11] Gulzar, A., Qazi, G., "Numerical investigations of double pass, highly selective FBG based DFB-EDFA system for enhanced gain and ASE-mitigation.", *Optical and Quantum Electronics*, 56.11, 1802, (2024).
- [12] Burunkaya M. and Yücel M., "Measurement and control of an incubator temperature by using conventional methods and fiber Bragg grating (FBG) based temperature sensors", *Journal of Medical Systems*, vol.44, (2020).
- [13] Cui, L., et al. "Integrated source of telecom-band photon-pairs based on high index silica glass spiral waveguides",

- Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC).** IEEE, (2023).
- [14] Aradi, H. E., et al. "All-optical wavelength reuse for meter reading application using EDFA saturation and DFB laser." *Optik* 3(12), 171946, (2024).
- [15] Sadik, S. A., Durak F. E., and Altuncu A., "Widely tunable erbium doped fiber ring laser based on loop and double-pass EDFA design." *Optics & Laser Technology*, 124, 105979, (2020).
- [16] T. F. Al-Mashhadani et al., "Widely triple Brillouin frequency shift multiwavelength Brillouin erbium fiber laser," *Optical and Quantum Electronics*, vol.52, no.4, (2020).
- [17] Yücel M., and Aslan Z., "The noise figure and gain improvement of double-pass C-band EDFA." *Microwave and Optical Technology Letters* 55.11, 2525-2528, (2013).
- [18] Dincer A. and Yücel M., "Modeling and optimizations of triple-pass TDFAs for next-generation fiber optical communication systems," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, no.5-6, pp.219-227, (2024).
- [19] Yigit E. and Yücel M., "Three-stage six-pass EDFA preamplifier design and EDFA parameters' optimization," *Optical and Quantum Electronics*, vol.54, no.1, (2022).
- [20] Yücel M., and Göktaş H. H., "Examination of temperature dependence of double pass l band erbium doped fiber amplifier," *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Vol.27, No.2, Pp.237-243, (2012).
- [21] Gürkaynak I. A. et al., "An efficient wide flatness gain bandwidth with parallel hybrid fiber amplifier," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol.64, no.2, pp.251-258, (2022).
- [22] Gürkaynak I. A. et al., "Widely flatness gain bandwidth with double pass parallel hybrid fiber amplifier," *Optical and Quantum Electronics*, vol.53, no.7, (2021).
- [23] Ali, M. H., et al. "Pump power optimization for hybrid fiber amplifier utilizing second order stimulated Raman scattering." *Optical and Quantum Electronics*, 52.6 (2020).
- [24] Gürkaynak, Irfan Alp, et al. "An efficient wide flatness gain bandwidth with parallel hybrid fiber amplifier." *Microwave and Optical Technology Letters*, 64.2, 251-258, (2022).
- [25] Asha, A. and Dahiya S., "Optimization of high frequency radio over fiber system using cascaded amplifier and dispersion compensation fiber." *Journal of Optics*, 52.3, 1552-1565, (2023).
- [26] Miglani, R., et al. "Gain optimization of 100× 40 Gbps high capacity DWDM fiber optical link using hybrid amplification techniques." *Journal of Optics*, 49, 323-331, (2020).
- [27] Yankov M., P., Uilar C., and Rose F., "Power evolution modeling and optimization of fiber optic communication systems with EDFA repeaters". *Journal of Lightwave Technology*, 39.10. (2021).
- [28] Pradhan D., and Abhilash M., "Design optimization of EDFA for 16× 10 Gbps data rate DWDM system using different pumping configurations". *Wireless Personal Communications*, 106, 2079-2086, (2019).
- [29] Khadir, A., A., Baydaa F. D. and Xiquan F., "Achieving optical fiber communication experiments by optisystem." *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 3.6, 42-53, (2014).
- [30] Othman M. A., et al. "Erbium doped fiber amplifier (EDFA) for C-band optical communication system." *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*, 12.4, 48-50, (2012).
- [31] Yolcu V., Yücel M. & Aydın D., "Kazancı düzleştirilmiş fiber Raman yükselteç modelinin ikili arama denklemlili adaptif yapay arı kolonisi (İADAYAK) algoritması ile optimizasyonu", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39 (1), 29-38, (2023).