





Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Tek ve İki Aşamalı Tulyum Katkılı Fiber Yükselteçlerin S-Bandındaki Kazanç ve Gürültü Analizi

 Murat YÜCEL^{a,*},  Ayten DİNCER^a

^a *Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE*

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: adincer@tse.org.tr

DOI: 10.29130/dubited.730502

ÖZET

Bu çalışmada S bandında çalışan tek ve iki aşamalı Tulyum Katkılı Fiber Yükselteçler (TKFY) optimize edilerek kazanç ve gürültü spektrumuna etkileri iki farklı durum için karşılaştırılmıştır. İlk durumda Tulyum Katkılı Fiber (TKF) uzunlukları 2.5 m'den 30 m'ye kadar her seferinde 2.5 m arttırılarak değiştirilmiştir. İkinci durumda ise pompa gücü 200 mW'tan 3000 mW'a kadar her seferinde 200 mW arttırılarak değiştirilmiştir. Her iki durum için kazanç ve gürültü spektrumları incelenmiştir. Ayrıca, sırayla -20 dBm ve -30 dBm giriş güçleri ile beslenen 1451-1520 nm bant aralığındaki 24 sinyal, 1050 nm pompa lazeri ile ileri yönlü pompalanmıştır. En yüksek kazancı veren 1469 nm dalgaboyundaki sinyal referans alınarak her iki parametre değişimi karşılaştırılmıştır. Sonuçta -30 dBm giriş gücü ile beslenen sinyalin daha geç doyuma ulaştığı ve daha yüksek kazanç sağladığı görülmüştür. Her iki giriş gücü için de iki aşamalı TKFY kullanmanın; 17.5 m TKF uzunluğunun kazancı %20-25 oranında arttırdığı, 800 mW- 2000 mW aralığındaki pompa gücünde ise kazancı %18-24 oranında arttırdığını göstermiştir. Devreler Optiwave 16.0 yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Tulyum katkılı fiber yükselteç, S-band, çok aşamalı TKFY*

Gain and Noise Figure Analysis of Single and Two Stage Thulium Doped Fiber Amplifiers in S-Band

ABSTRACT

In this study, single and two stage Thulium-Doped Fiber Amplifiers (TDFA) operating in S band were optimized and their effects on the gain and noise spectra were compared for two different situations. In the first case, the lengths of Thulium-Doped Fiber (TDF) were changed from 2.5 m to 30 m by increasing 2.5 m each time. In the second case, the pump power was changed from 200 mW to 3000 mW by increasing 200 mW each time. The gain and noise spectra were examined for both cases. In addition, 24 signals in the 1451-1520 nm bandwidth, respectively, fed with -20 dBm and -30 dBm input powers, were pumped forward direction with a 1050 nm pump laser. Both parameter changes were compared by taking the signal with the highest gain at 1469 nm wavelength. As a result, it was observed that the signal fed with -30 dBm input power reached a later saturation and provided higher gain. Using two stages of TDFA for signals with both input power; it has shown that length of 17.5 m TDF increases the gain by 20-25%, and the pump power in the range of 800 mW-2000 mW increases the gain by 18-24%. Circuits are simulated using Optiwave 16.0 software.

Keywords: *Thulium doped fiber amplifier, S-band, fiber length, multi-stage TDFA*

I. GİRİŞ

Yakın gelecekte hizmete alınması düşünülen 5G ve IoT (nesnelerin interneti) gibi teknolojik değişiklikler, telekomünikasyon şebekelerinde köklü altyapı değişiklikleri gerektirmektedir. Ayrıca şebekenin hızının ve kapasitesinin artırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaçların karşılanmasında fiber optik haberleşme sistemleri büyük önem arz kazanmıştır. Bu nedenle dalgaboyu bölmeli çoğullama (DBC) iletim sistemlerinde daha fazla bant genişliği sağlayabilecek optik fiber yükselteç çalışmaları yapılmaktadır [1-4].

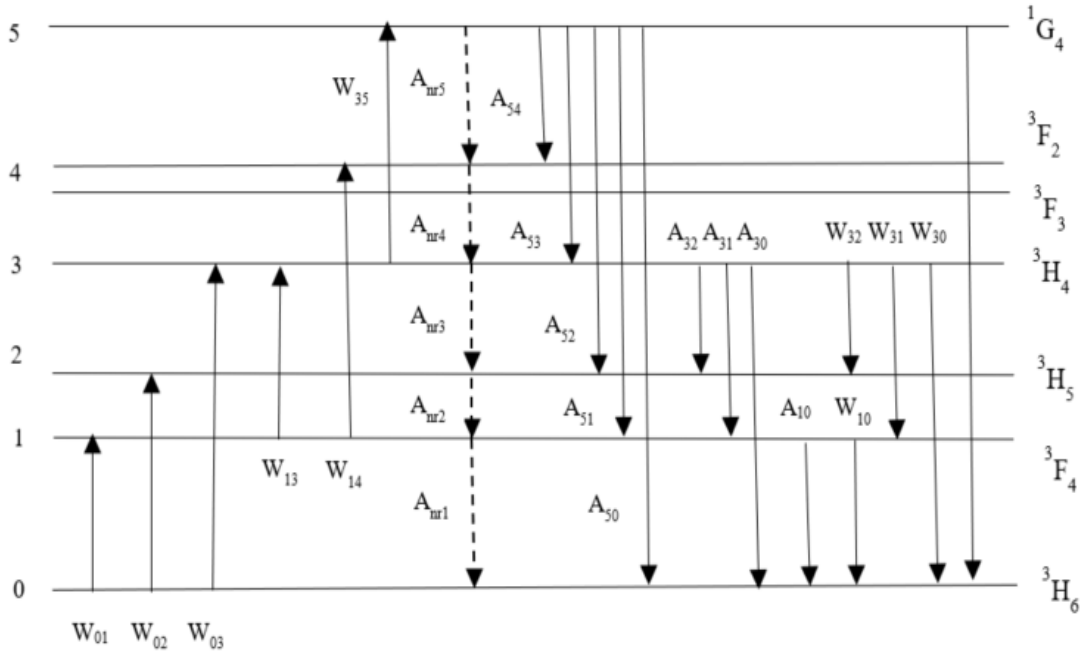
C-bandı ve L-bandında yüksek verim elde edilebilen Erbiyum katkılı fiber yükselteçler (EKFY) bunlardan en sık kullanılanıdır. S-bandında iyi bir kazanç elde edilebilen Tulyum katkılı fiber yükselteçler ise EKFY'lere iyi bir alternatif olarak görünmektedir [5-6].

TKFY için 1600, 1700 ve 1800 nm dalgaboyunda [7-9] ve 2000 nm dalgaboyunda [9-14] yapılan çalışmalar mevcuttur. TKFY'nin kazanç değerini iyileştirmek, düşük gürültü değerleri elde edebilmek için TKF uzunluğu, tulyum iyon yoğunluğu, giriş gücü, pompalama gücü gibi temel parametrelerin veya TKFY sayısının değiştirildiği pek çok çalışma bulunmaktadır [14-19].

Bu çalışmada, S-bandında çalışan tek aşamalı TKFY ile iki aşamalı TKFY'nin TDF uzunluğu ve pompa lazer güçleri optimize edilerek, kazanç ve gürültü spektrumları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın 2. Bölümünde TKFY'nin teorik analizi yapılmış, 3. Bölümde simülasyon düzenekleri verilmiş, 4. Bölümde simülasyon sonuçları açıklanarak karşılaştırılmış ve son bölümde çalışmanın sonuçları tartışılmıştır.

II. TEORİK ANALİZ

TKFY'lerde kazanç, tulyum iyonlarının farklı enerji seviyelerindeki iyon yoğunluğuna ve ters birikmesine bağlıdır [20]. Şekil 1, silika fiberdeki tulyum iyonlarının enerji seviyelerini göstermektedir [21]. 0, 1, 2, 3, 5 numaralı enerji seviyeleri sırayla 3H_6 , 3F_4 , 3H_5 , 3H_4 , 3F_3 olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 1. Tulyum iyonlarının detaylı enerji diyagramı.

Tulyum'un farklı enerji seviyelerinin değer denklemi, P. Peterka ve arkadaşları tarafından aşağıdaki gibi önerilmiştir [21]:

$$\frac{dN_1}{dt} = N_0(W_{01} + W_{02}) - N_1(W_{10} + W_{13} + W_{14} + A_1^{nr} + A_{10}^r) + N_3(W_{31} + W_{32} + A_3^{nr} + A_{32}^r + A_{31}^r) + N_5(A_{51}^r + A_{52}^r) \quad (1)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = N_0(W_{03}) + N_1(W_{13} + W_{14}) - N_5(A_5^{nr} + A_{52}^r + A_{53}^r) - N_3(W_{35} + W_{32} + W_{31} + W_{30} + A_3^{nr} + \sum_{j=0}^2 A_{3j}^r) \quad (2)$$

$$\frac{dN_5}{dt} = N_0(W_{05}) + N_3W_{35} - N_5(W_{50} + A_5^{nr} + \sum_{j=0}^4 A_{5j}^r) \quad (3)$$

$$N_t = N_0 + N_1 + N_3 + N_5 \quad (4)$$

Burada N_t , N_0 , N_1 , N_3 , N_5 değerleri sırayla tulyumun ortalama iyon yoğunluğu, ${}^3\text{H}_6$, ${}^3\text{F}_4$, ${}^3\text{H}_4$, ${}^1\text{G}_4$ seviyelerindeki iyon sayısını göstermektedir. N_i ve W_{ij} değişkenleri r , φ , z konumlarının fonksiyonlarıdır. Tulyum iyonlarının fiber kesiti içerisinde homojen olarak uyarılmış olduğu düşünüldüğünde, iyonların elektromanyetik etkileşimini tanımlayan, geçiş değeri ifadesi W_{ij} (5) numaralı denklemdeki gibi yazılabilir [21].

$$W_{ij}(z) = \int_0^\infty \lambda \Gamma(\lambda) \sigma_{ij}(\lambda) \frac{(P_\lambda^+(z, \lambda) + P_\lambda^-(z, \lambda))}{hc\pi b^2} d\lambda \quad (5)$$

Burada σ_{ij} ilgili geçiş kesiti, h Plank sabiti, c ışık hızı, P_λ^+ ve P_λ^- fiber ekseninin pozitif ve negatif yönde yayılmış emisyonunun spektral güç yoğunluğudur. $\Gamma(\lambda)$ ise çakışma faktörü olup (6) numaralı denklemle tanımlanır [21].

$$\Gamma(\lambda) = \frac{\int_0^\infty |E(r, \varphi, \lambda)|^2 N(r) r dr}{N_t \int_0^\infty |E(r, \varphi, \lambda)|^2 r dr} \quad (6)$$

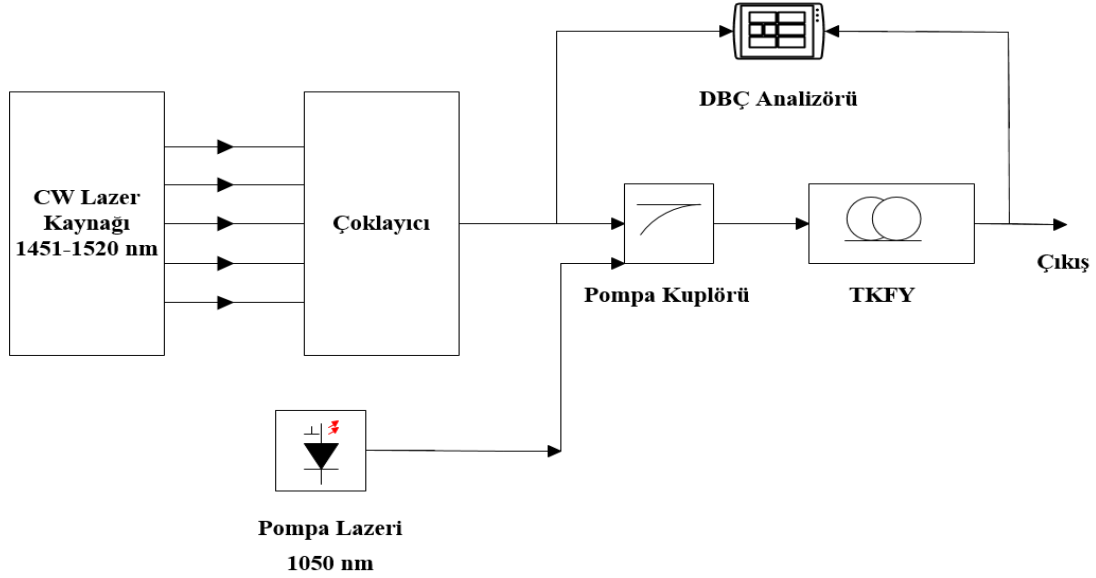
Pompa sayısı ve dalgaboyunu seçerken esneklik sağlaması amacıyla, dalganın her ileri bölümünün yayılımı için (7) numaralı aynı denklem tanımlanır [21].

$$\begin{aligned} \frac{dP^+(\lambda)}{dz} = & \Gamma(\lambda) P^+(\lambda) \sum_{ij \in \{10,30,31,50,32\}} (N_i \sigma_{ij}(\lambda) \\ & - N_j \sigma_{ji}(\lambda)) - \Gamma(\lambda) P^+(\lambda) (N_0 \sigma_{02}(\lambda) + N_1 \sigma_{14}(\lambda) + N_3 \sigma_{35}(\lambda)) \\ & + \Gamma(\lambda) \sum_{ij \in \{10,30,31,50,32\}} 2h\nu_{ij} \Delta\nu N_i \sigma_{ij}(\lambda) - \alpha(\lambda) P^+(\lambda) \end{aligned} \quad (7)$$

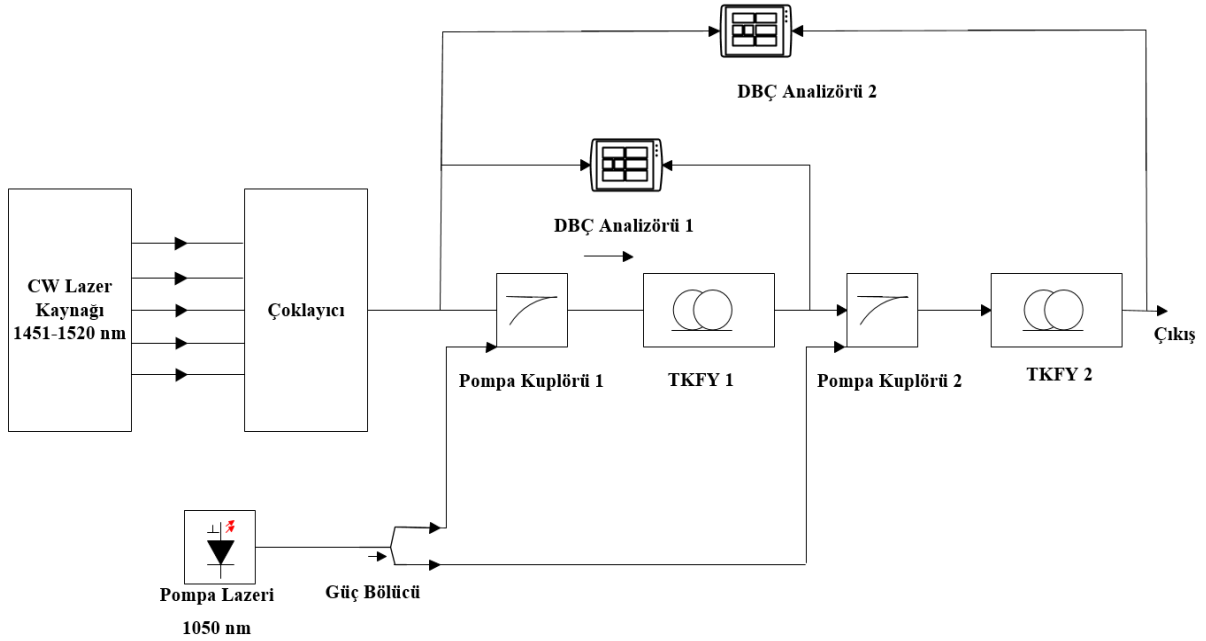
$z=0$ ve $z=L$ belirli sınır durumlarında, zaman türevleri $\frac{dN_1}{dt}$, $\frac{dN_3}{dt}$, $\frac{dN_5}{dt}$ sifira eşitlendiğinde, problem kararlı duruma indirgenir. L burada fiber yükseltcin uzunluğudur. TKFY'in kazanç karakteristiğini elde etmek için denklem, uzay ve frekans üzerinden tamamlanır.

III. TKFY SİMÜLASYONU

Şekil 2 ve 3, tasarlanan TKFY'leri göstermektedir. Her iki tasarımda, sisteme giriş sinyali veren bir lazer kaynağı, ideal bir DBÇ çoklayıcı, optik spektrum analizörü ortak bulunmaktadır. Tek aşamalı TKFY tasarımında bir pompa kuplörü ve bir yükselteç kullanılırken, çift aşamalı TKFY tasarımında iki adet pompa kuplörü ve iki adet yükselteç bulunmaktadır. Burada kullanılan TKF'lere ait parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Sisteme 1451 nm-1520 nm bandında, 3 nm aralıklarla 24 sinyal uygulanmıştır. En büyük kazanç değerini veren 1469 nm dalgaboyundaki sinyal üzerinden karşılaştırılma yapılmıştır. Tasarlanan TKFY, Optiwave 16.0 yazılımında simüle edilmiştir.



Şekil 2. Tasarlanan tek aşamalı TKFY.



Şekil 3. Tasarlanan çift aşamalı TKFY.

Şekil 2 ve 3'te görülen tasarımlar, giriş gücü -20 dBm ve -30 dBm olacak şekilde ilk olarak TKF uzunlukları daha sonra pompa gücü değiştirilerek iki durumda incelenmiştir. Her durumdaki

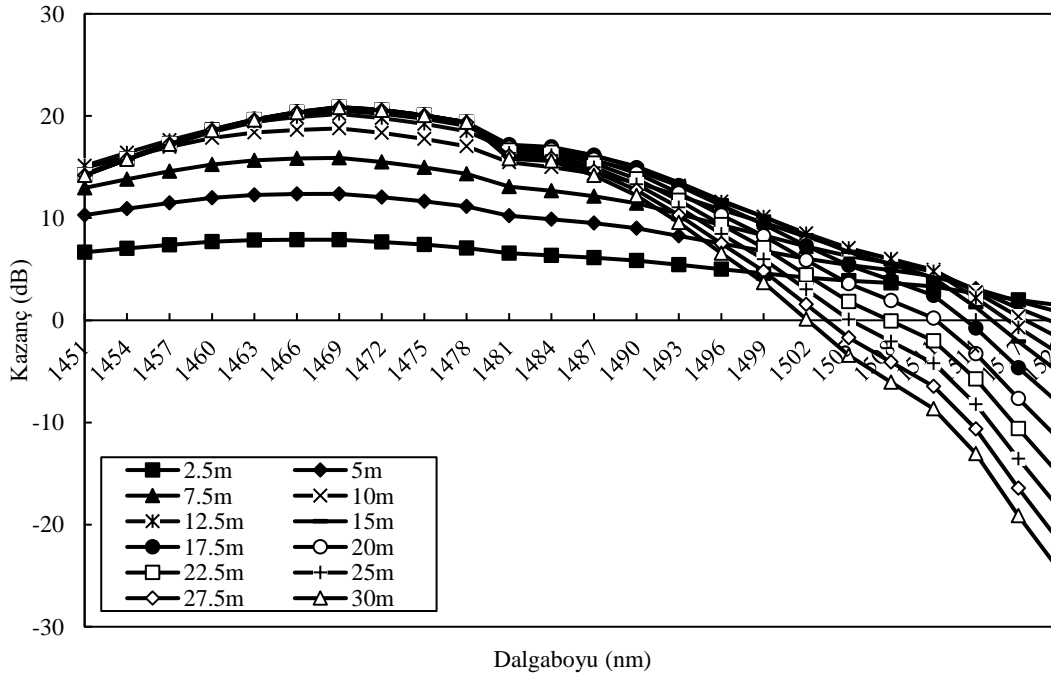
değişimlerin kazanç ve gürültü spektrumuna etkileri ayrı ayrı incelenmiştir. Tüm simülasyonlarda Tablo 1'deki parametre değerleri kullanılmıştır.

Tablo 1. Simülasyonlarda kullanılan TKFY parametreleri.

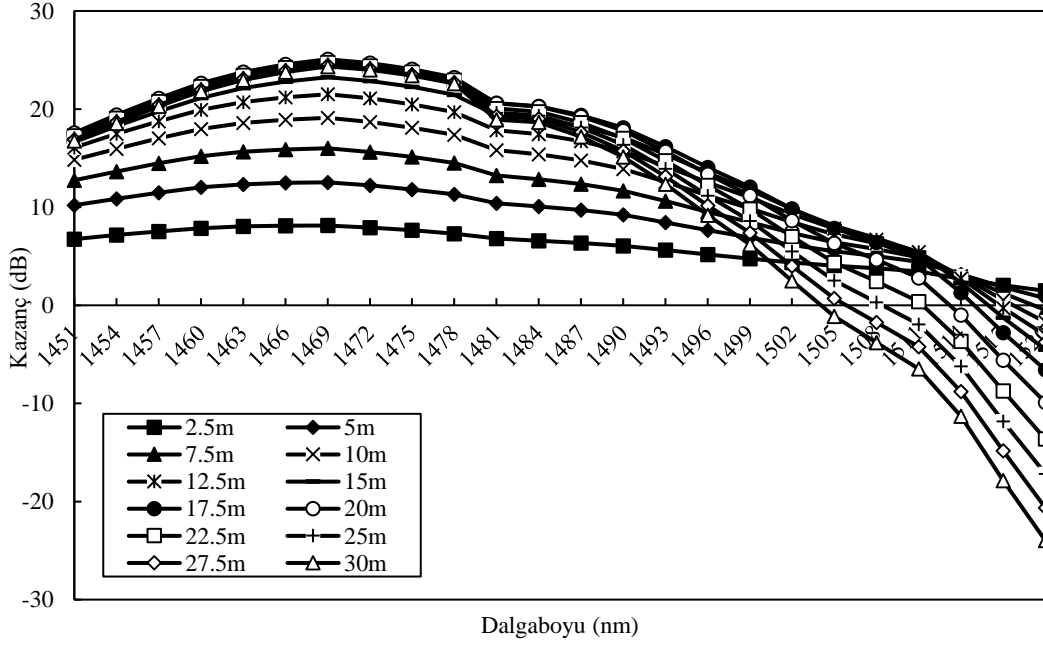
Durumlar	Parametreler	Değerler
Durum 1,2	Sayısal açıklık	1
Durum 1,2	Çekirdek çapı	1.3 μm
Durum 1,2	Katkı çapı	0.9 μm
Durum 1,2	Tulyum iyon yoğunluğu	15e+024 m^{-3}
Durum 1,2	Işımasız iyon ömrü 1	430 x 10 ⁻⁶ s
Durum 1,2	Işımasız iyon ömrü 2	45 x 10 ⁻⁶ s
Durum 1,2	Işımasız iyon ömrü 3	784 x 10 ⁻⁶ s
Durum 1,2	Ar10	285.7 (l/s)
Durum 1,2	Ar30	1353.85 (l/s)
Durum 1,2	Ar31	138.46 (l/s)
Durum 1,2	Ar32	46.153 (l/s)
Durum 1	TKF uzunluğu	2.5-30 m
Durum 1	Pompa gücü	1000 mW
Durum 2	TKF uzunluğu	20 m
Durum 2	Pompa gücü	200-3000 mW

IV. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Yapılan simülasyonların sonuçları her iki durum içinde giriş gücü -20 dBm ve -30 dBm olarak iki farklı şekilde ele alınmıştır. Birinci durumda tasarım için pompa gücü 1000 mW seçilmiş, TKF uzunluğu ise 2.5 m ile 30 m arasında her seferinde 2.5 m artacak şekilde değiştirilerek Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilen kazanç grafikleri, Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilen gürültü grafikleri elde edilmiştir.



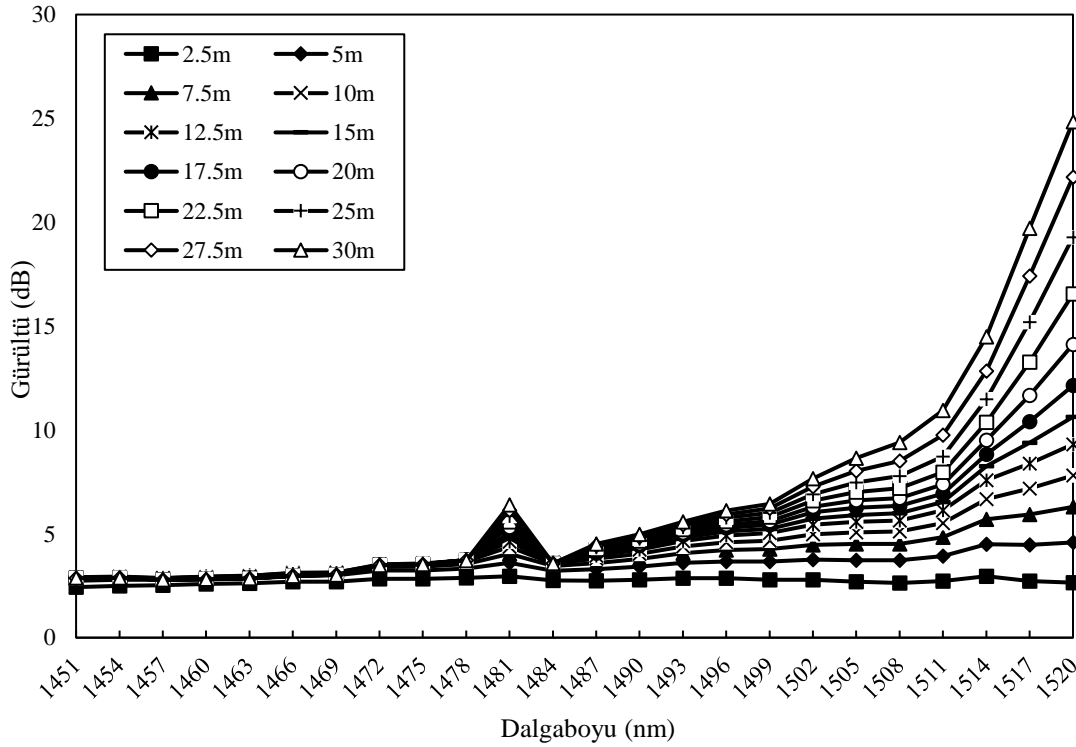
Şekil 4. Giriş gücü -20 dBm, tek aşamalı TKFY tasarımında TKF boyu – kazanç değişimi



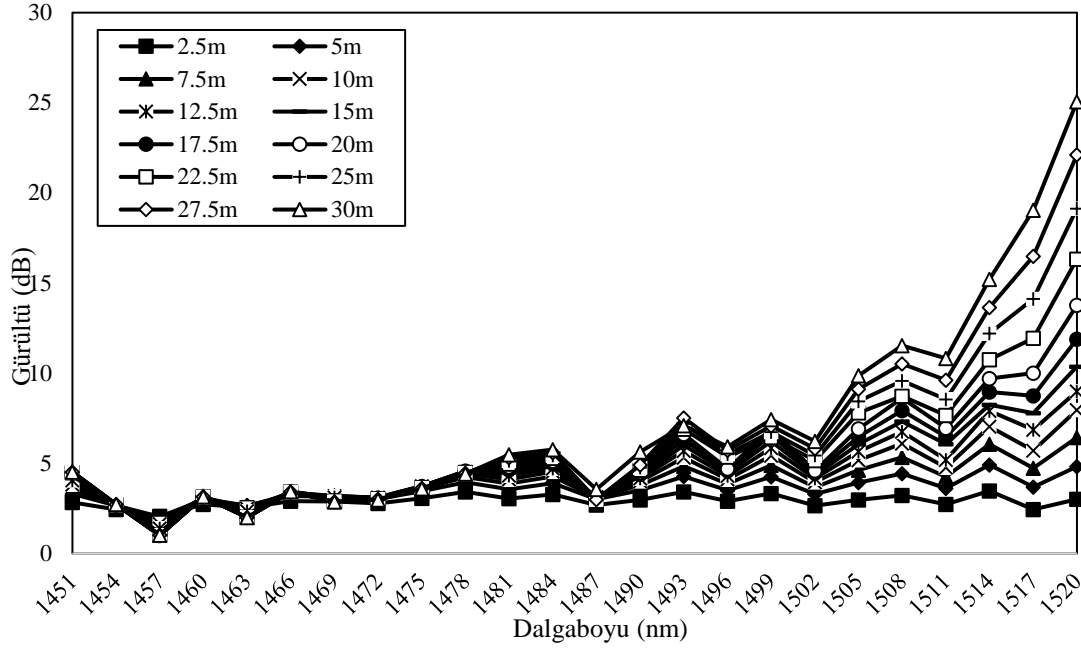
Şekil 5. Giriş gücü -20 dBm için, iki aşamalı TKFY tasarımında TKF boyu – kazanç değişimi

Grafikler incelendiğinde her iki tasarımda da en yüksek kazanç değerinin 1469 nm dalgaboyunda elde edildiği görülmektedir. Bu nedenle fiber boyu ve pompa gücü karşılaştırmaları 1469 nm dalgaboyundaki sinyal üzerinden yapılmıştır.

Şekil 4'te ve Şekil 5'te görüldüğü gibi tek aşamalı TKFY'de 12.5 m, iki aşamalı TKFY'de 17.5 m fiber uzunluğundan sonraki uzunluklarda kazanç artışı çok küçüktür. İkinci pompalama daha uzun fiber boylarında kazanç artışına olanak sağladığı görülmektedir.

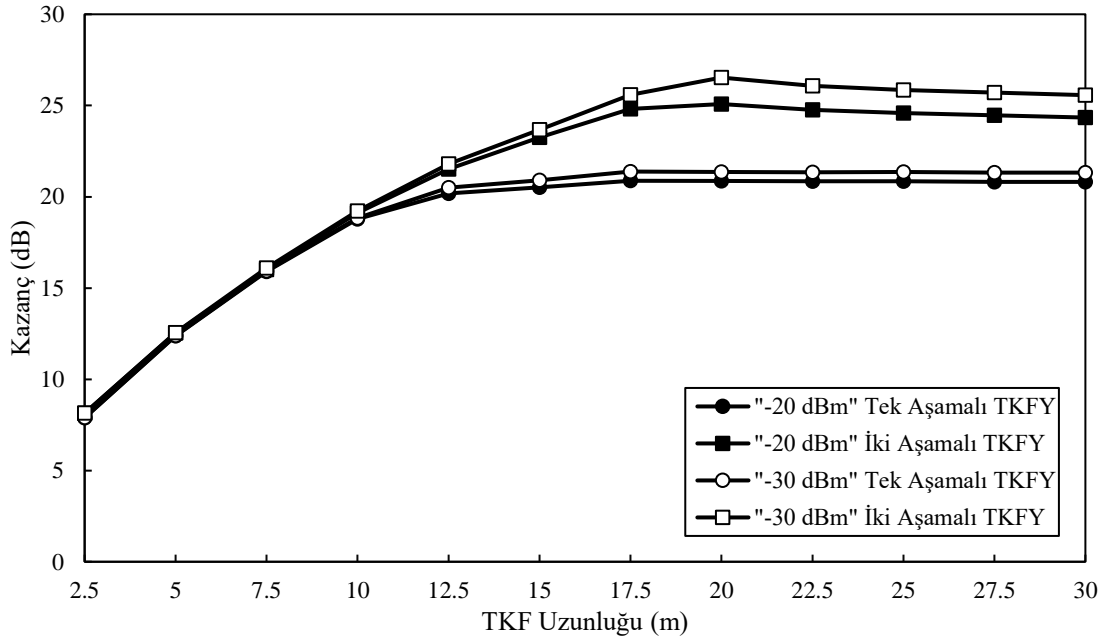


Şekil 6. Giriş gücü -20 dBm, tek aşamalı TKFY tasarımında TKF uzunluğu – gürültü değişimi



Şekil 7. Giriş gücü -20 dBm, iki aşamalı TKFY tasarımında TKF uzunluğu – gürültü değişimi

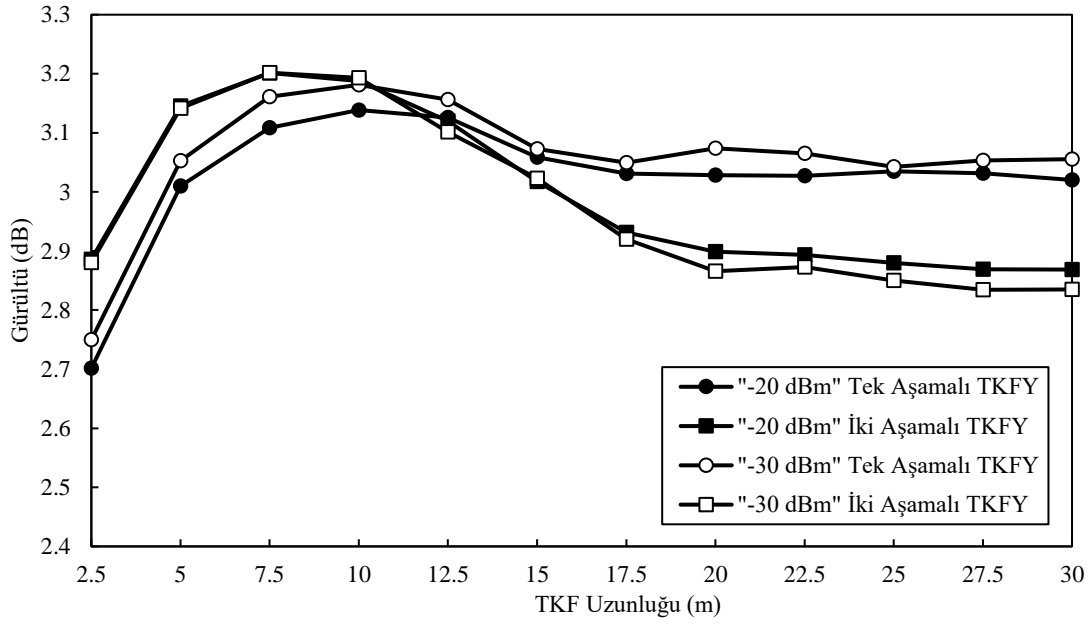
Her iki giriş gücünde tek ve iki aşamalı TKFY tasarımlarının TKF uzunluğu–gürültü değişimleri Şekil 6 ve 7’de görülmektedir. Grafikler incelendiğinde tek aşamalı TKFY’nin gürültü spektrumu daha kararlı iken, genel olarak her iki tasarımın gürültü değerleri yakındır. 1505 nm dalgaboyundan sonra gürültü değerlerinin ciddi olarak artmakta olduğu görülmektedir.



Şekil 8. 1469 nm sinyal dalgaboyu, -20 dBm ve -30 dBm giriş sinyal gücü değerleri için; TKF uzunluğuna karşılık kazanç değişimi

Şekil 8’deki grafikte görüleceği üzere her iki giriş gücü değerinde tek aşamalı TKFY, 12.5 m TKF uzunluğunda doyumuna ulaşmıştır. İki aşamalı TKFY de ise -20 dBm giriş gücünde, 17.5 m TKF uzunluğunda doyumuna ulaşırken, -30 dBm giriş gücünde kazanç artmaya devam etmiş ve 20 m TKF uzunluğunda doyumuna ulaşmıştır. Tek ve iki aşamalı TKFY kazançları karşılaştırıldığında her iki giriş

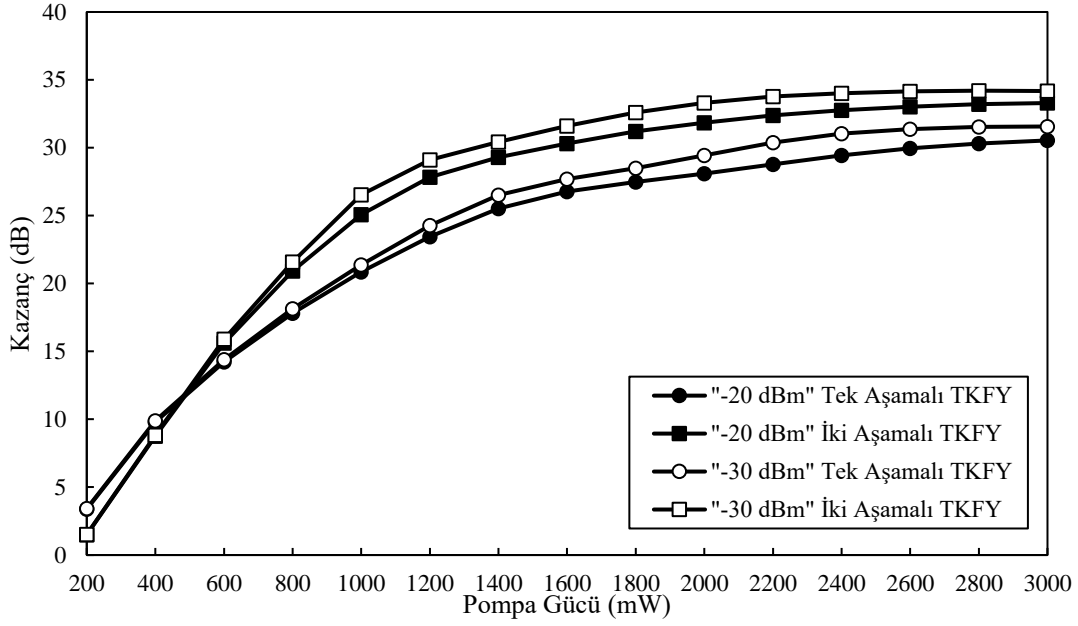
gücü değerinde de 17.5 m TKF uzunluğunda iki aşamalı TKFY kullanmanın kazancı %20-25 oranında arttırdığı görülmektedir.



şekil 9. 1469 nm sinyal dalgaboyu, -20 dBm ve -30 dBm giriş sinyal gücü değerleri için; TKF uzunluğuna karşılık gürültü değişimi

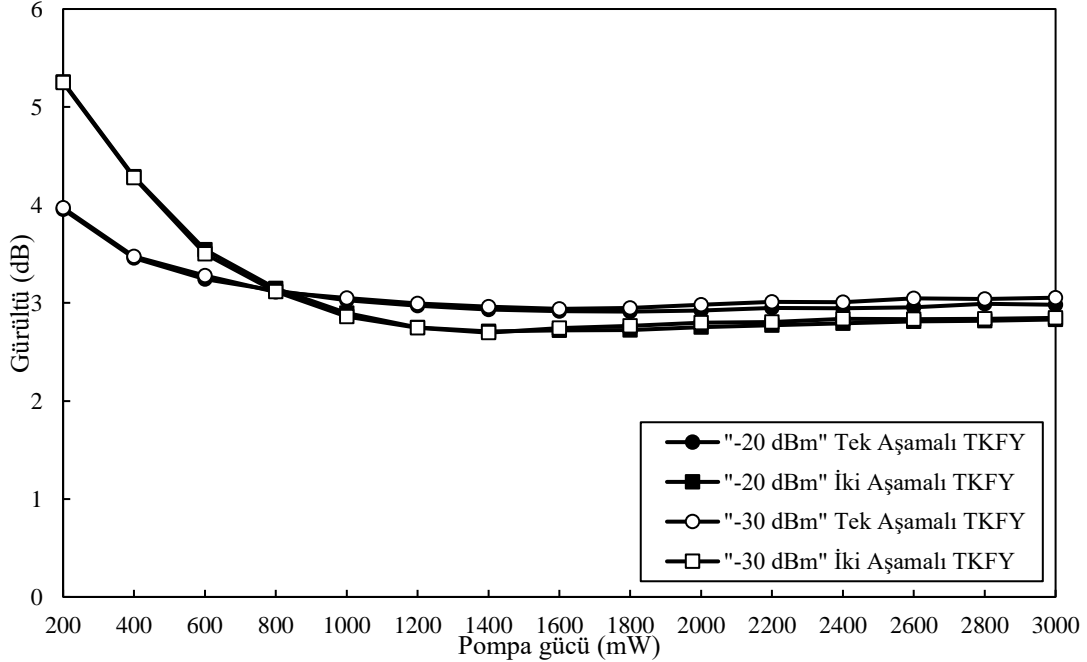
şekil 9'da her iki giriş gücündeki gürültü değerlerini göstermektedir ve bu değerler birbirine oldukça yakındır. -20 dBm giriş gücünde 12.5 m, -30 dBm giriş gücünde ise 10 m TKF uzunluğundan sonra çift aşamalı TKFY tasarımınnın gürültü değerleri tek aşamalı TKFY tasarımınnın gürültü değerlerinden daha düşük seyretmekte ve uzunluk arttıa düşmektedir. 20 m TKF uzunluğundan sonra ise gürültü değerlerinde değişim hepsi için oldukça azdır.

İkinci durumda ise, ilk durumda her iki giriş gücü içinde en fazla kazancı veren 20 m TKF uzunluğu seçilmiştir. Pompa gücü 200 mW'tan 3000 mW'a kadar her seferinde 200 mW artacak şekilde değiştirilerek kazanç spektrumuna etkileri incelenmiştir. Yapılan karşılaştırma sonucunda şekil 10'daki ve şekil 11'deki grafikler oluşmuştur. Grafik incelendiğinde pompa gücü arttıa kazancın her iki düzenekte de arttığı görülmektedir.



Şekil 10. 1469 nm sinyal dalgaboyu, -20 dBm ve -30 dBm giriş sinyal gücü değerleri için; pompa gücü değişimine karşılık kazanç değişimi

İki aşamalı TKFY tasarımında pompa gücü yükselteç başına yarısı düşecek şekilde paylaştırılarak toplam 2000 mW'a kadar kazanç değeri artmakta, bu değerden sonra ise yükselteçler yavaş yavaş doyuma ulaşmaktadır. Tek aşamalı TKFY tasarımında pompa gücü 2400 mW değerlerinde doyuma ulaşmaktadır. Her iki giriş gücünde de kazanç değeri iki aşamalı TKFY tasarımında daha yüksektir.



Şekil 11. 1469 nm sinyal dalgaboyu, -20 dBm ve -30 dBm giriş sinyal gücü değerleri için; pompa gücü değişimine karşılık gürültü değişimi

Şekil 11'de görüldüğü gibi her iki giriş gücü için de gürültü değerleri birbirine çok yakın ve ortalama 2.8 dB'dir. Yine her iki giriş gücünde de pompa gücü 800 mW'da tek ve iki aşamalı TKFY tasarımı gürültü değerleri çakışmakta, 800 mW pompa gücünden büyük değerlerde iki aşamalı TKFY gürültü değeri, tek aşamalı TKFY tasarımının gürültü değerine göre daha düşük seyretmektedir.

V. SONUÇ ve TARTIŞMA

Bu çalışmada tasarlanan tek ve iki aşamalı TKFY, TKF uzunluğu ve pompa gücü gibi iki temel parametre üzerinden karşılaştırılmıştır. Bu parametrelerin kazanç ve gürültüye olan etkileri analiz edilmiştir. En büyük kazanç değerini veren 1469 nm dalgaboyu seçilmiş ve karşılaştırma bu dalgaboyundaki sinyal üzerinden yapılmıştır. Tek aşamalı TKFY’de yükselteç doyuma 12.5 m TKF değerinde ulaşırken iki aşamalı TKFY’de ikinci bir pompalama yapıldığı için 17.5 m değerinde ulaşmıştır. TKF uzunluğunu bu değerlerden fazla seçmek sisteme bir fayda sağlamamaktadır. TKF değişiminde tek ve iki aşamalı TKFY kazançları karşılaştırıldığında her iki giriş gücü değerinde de çift aşamalı TKFY kullanmanın kazancı %20-25 arttırdığı görülmektedir. Gürültü değerleri ise her iki devre içinde birbirine yakın değerlerde olup, iki aşamalı TKFY’lerde daha düşük değerlerdedir. Pompa gücü arttıkça kazanç değeri artmaktadır. İki aşamalı TKFY de kazanç artarken gürültü değeri pompa gücü arttıkça azalmaktadır. Pompa gücü 2000 mW’ın üzerinde yükselteç doyuma ulaştığı için kazanç değişimi azalmaktadır. Pompa gücü değişiminde tek ve iki aşamalı TKFY kazançları karşılaştırıldığında her iki giriş gücü değerinde de 800 mW- 2000 mW aralığında iki aşamalı TKFY kullanmanın kazancı %18-24 aralığında değişen değerlerde arttırdığını göstermektedir. 1200 mW değerinin üzerinde lazer pompa piyasada zor bulunabildiği için bu pompa gücündeki değer dikkate alındığında iki aşamalı TKFY tasarımında -20 dBm giriş gücünde kazanç %14.4 artarken, -30 dBm giriş gücünde kazanç %19,75 artmıştır. Gürültü değerleri ise birbirine yakın değerlerde iken iki aşamalı TKFY’lerde pompa gücü değişimlerinde 800 mW pompa gücünün üzerindeki değerlerde gürültü değerleri tek aşamalı TKFY’lere göre daha düşük, yaklaşık 2.7 dB değerlerindedir.

TEŞEKKÜR: Çalışmaya yapmış oldukları destekten ötürü Optiwave Systems Inc.’e teşekkür ederiz.

V. KAYNAKLAR

- [1] M. Yücel, “Kazancı düzleştirilmiş geniş bantlı fiber yükselteçlerin tasarımı,” Doktora Tezi, Bilişim Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2008.
- [2] M. Yücel, H. H. Göktaş, G. Akkaya, “Üç aşamalı L-band EDFA optimizasyonu,” *IEEE 20. Sinyal İşleme ve Haberleşme Uygulamaları Kurultayı*, Muğla, Türkiye, 2012, ss. 1-4.
- [3] M. Yücel, H. H. Göktaş, “Fiber raman yükselteçlerde pompalama yönünün kazanç spektrumuna etkisi üzerine bir simülasyon,” *Politeknik Dergisi*, c. 9, ss. 161-164, 2006.
- [4] M. Yücel, H. H. Göktaş, “Kazancı düzleştirilmiş çok geniş bantlı hibrit optik yükselteç tasarımı,” *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, c. 22, ss. 863-868, 2007.
- [5] J. Kani, M. Jinno, “Wideband and flat-gain optical amplification from 1460 to 1510 nm by serial combination of a thulium-doped flouride fiber amplifier and fiber Raman amplifier,” *Electron. Letters*, c. 35, ss. 1004-1006, 1999.
- [6] S. S.Yam, K. Jaedon, “Ground state absorption in thulium-doped fiber amplifier experiment and modeling,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, c. 12, ss. 797-803, 2006.
- [7] Z. Li., Y. Jung, O. Daniel, N. Simakov, P. C. Shardlow, A. M. Heidt, A. Clarkson, S. Alam and D. J. Richardson, “Extreme short wavelength operation (1.64-1.7 μm) of silica-based thulium doped fiber amplifier,” *Optical Fiber Communication Conference*, California, USA, 2015, ss. Tu2C.1.
- [8] S. D. Emami, M. M. Dashtabi, H. J. Lee, A. S. Arabanian, H. A. Rashid, “1700 nm and 1800 nm band tunable thulium doped mode-locked fiber lasers,” *Scientific Reports*, c. 7, p. 12747, 2017.

- [9] Z. Li, A. M. Heidt, N. Simakov, Y. Jung, O. Daniel, S. Alam and D. J. Richardson, "Diode-pumped wideband thulium doped fiber amplifiers for optical communications in the 1800-2050 nm window," *Optics Express*, c. 21, ss. 26450-26455, 2013.
- [10] M. A. Khamis and K. Ennser, "Gain control dynamics of thulium doped fiber amplifier at 2 μ m," *Optical Components and Materials XIII*, California, USA, 2016, p. 974419.
- [11] Z. Liu, Y. Chen, Z. Li., B. Kelly, R. Phelan, J. O'Carroll, T. Bradley, J. P. Wooler, N. V. Wheeler, A. M. Heidt, T. Ritcher, C. Schubert, M. Becker, F. Poletti, M. N. Perovich, S. Alam, D. J. Richardson, R. Slavik, "High-capacity directly modulated optical transmitter for 2 μ m spectral region," *Journal of Lightwave Technology*, c. 33, ss. 1373-1379, 2015.
- [12] Z. Li, A. M. Heidt, J. Sahu, P. Shardlow, "100 kW peak power picosecond thulium doped fiber amplifier system seeded by a gain switched diode laser at 2 μ m," *Optics Letters*, c. 38, ss. 1615-1617, 2013.
- [13] Z. Li, A. M. Heidt, J. M. O. Daniel, Y. Jung, S. Alam, D. J. Richardson, "Thulium doped fiber amplifier for optical communications at 2 μ m," *Optic Express*, c. 21, ss. 9289-9297, 2013.
- [14] N. M. Yusoff, A. H. Sulaiman, M. S. K. Jamal, "Simulation of dual stage thulium-doped fiber amplifier using pump power distribution technique," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, c. 15, ss. 1203-1211, 2019.
- [15] F. I. El-Nahal, A. H. M. Husein, "Optimizing thulium doped fiber amplifier (TDFA) gain and noise figure for S-band 16x10 Gb/s WDM systems," *Optik*, c. 124, ss. 4052-4057, 2013.
- [16] F. I. El-Nahal, A. H. M. Husein, "Thulium doped fiber amplifier (TDFA) for S-band WDM systems," *Open Journal of Applied Sciences*, c. 2, ss. 5-9, 2012.
- [17] A. Dincer, M. Yücel, "Farklı pompalama yönleri için giriş sinyal gücünün Tulyum katkılı fiber yükselteç kazancına etkisi ve küçük sinyal kazancı analizi," *Uluslararası Karadeniz ile Kıyısı Olan Ülkeler Sempozyumu*, Batum, Gürcistan, 2019, ss. 28-33.
- [18] A. Dincer, M. Yücel, "Tulyum katkılı fiber yükselteçlerde pompalama yönü, fiber uzunluğu ve iyon yoğunluğunun kazanç ve gürültüye etkisi," *Uluslararası Karadeniz ile Kıyısı Olan Ülkeler Sempozyumu*, Batum, Gürcistan, 2019, ss. 333-339.
- [19] R. Caspary, W. Kowalsky, M. Kozak, "Fluoride glass fiber amplifiers for S-band.," *Photonics 2004*, Cochin, India, 2004.
- [20] R. Singh, M. L. Singh, "Evaluating the effect of doping concentration and doping Radius on the gain of silica based thulium doped fiber amplifier," *2016 International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering*, Jaipur, India, 2016, ss. 1-5.
- [21] P. Peterka, B. Faure, W. Blanc, M. Karasek, B. Dussardier, "Theoretical modelling of S-band thulium-doped silica fibre amplifiers," *Optical and Quantum Electronics*, c. 36, ss. 201-212, 2004.