

## Fibonacci-Thue Morse Çok Katmanlı Fotonik Kristal Optik Filtre Yapısının Yansıma Özelliklerinin İncelenmesi

Büşra Göröl, Umut Alan, Mehmet Furkan Ay, Çiğdem Seçkin Gürel  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Hacettepe Üniversitesi  
Ankara

busragoral97@gmail.com umudi0666@gmail.com mfurkanay.mfay@gmail.com cigdem@hacettepe.edu.tr

**Özet**— Bu çalışmada katman dizilimi Fibonacci ve Thue-Morse serilerine göre olan iki kısımdan oluşan yeni bir hibrit optik filtre yapısı oluşturulmuştur. Elde edilen yeni filtre yapısının sağladığı yansıma özellikleri, filtreyi oluşturan blokların tekrar sayıları birbirlerine göre farklı oranlarda değiştirilerek filtre davranışına etkileri incelenmiştir. Oluşturulan filtre yapısı, mevcut optik filtre davranışlarına alternatif bazı özellikler getirmiş olup, güncel optik haberleşme, lazer ve kaplama uygulamaları gibi birçok farklı alanda tercih edilebilir.

**Abstract**— In this study, by using two different multilayered blocks designed according to Fibonacci and Thue-Morse series, a new hybrid optical filter structure is designed. The effects of two different parts of the structure on the reflection characteristics of the filter are investigated by increasing repetition numbers of the blocks. The designed filter structure introduces some new characteristics as an alternative to the present filter structures and can be preferred in recent optical communication, laser and coating applications.

### 1. Giriş

Son yıllarda çok katmanlı optik filtrelerle ilgili teorik ve deneysel birçok çalışma literatürde yer almaktadır. Bu çalışmalarda fotonik kristal dizilimli yapılar farklı malzemeler kullanılarak tasarlanmaktadır [1-6]. Bazı fotonik kristal optik filtreler geniş bantlı iyi bir yansıtıcı olarak davranırken bazıları bant durduran veya geçiren davranışlar göstermektedir. Farklı iletim ve yansıma davranışları gösteren çok katmanlı yapılar, seçilen malzemelerin kırılma katsayıları, katman sayıları, kalınlıkları ve özel olarak ardışık dizilimleriyle ayarlanabilmektedir.

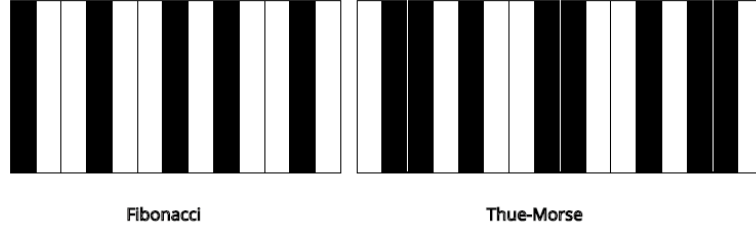
Çok katmanlı fotonik kristal optik filtre tasarımlarında düşük ve yüksek kırılma indeksine sahip malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemelerin özel bazı serilere göre art arda dizilimi ile yapının yansıma ve iletim davranışlarının özel bazı amaçları sağlayacak şekilde elde edilmesi mümkün olabilmektedir. Fibonacci, Cantor, Thue-Morse, Dodecanacci serileri ve bunların farklı formları bu tasarımlarda en sık kullanılanlardır [4-6].

Literatürde bu serilere göre tasarlanmış optik filtre yapıları mevcut olduğu gibi bu serilerin birlikte kullanılması ile tasarlanmış hibrit filtre yapıları da yer almaktadır. Bu çalışmada ise Thue-Morse ve Fibonacci serilerinden faydalanılarak literatür için yeni bir filtre yapısı tasarlanmıştır. Fibonacci serilerinin 6. Hücre yapısı ( $S_6$ ) ve Thue Morse serilerinin 4. Hücre yapısı ( $T_4$ ) seçilerek karma bir yapı oluşturulmuştur. Bu dizilim daha önceki tasarımlarda kullanılmamıştır. Yapının yansıma özellikleri, yüzeye dik gelen elektromanyetik dalga durumu için incelenmiştir. Merkez dalga boyu  $\lambda = 600 \text{ nm}$  olarak seçilmiştir. Düşük ve yüksek kırılma indislerine sahip güncel malzemelerle tasarlanan yapının, Thue Morse ve Fibonacci serilerinden oluşan bölümleri farklı sayılarda tekrar edilerek filtre performansına etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, tasarlanan yapının görünür ışık bölgesinde ve kızıl ötesi spektrumun alt bölgelerinde genel olarak geniş bantlı bir yansıtıcı olarak davrandığını göstermektedir. Tasarlanan filtre yapısı renk filtrelerinde, çeşitli lazer, detektör ve kaplama uygulamalarında ve çeşitli optik haberleşme sistemlerinde sağladığı geniş bantlı ayarlanabilir yansıma özellikleriyle farklı amaçlarla kullanılabilir.

### 2. Filtrenin Tasarımı ve İncelenmesi

Bu çalışmada, Fibonacci ve Thue-Morse serileri kullanılarak karma bir fotonik kristal filtre yapısı oluşturulmuş ve tasarımda yüksek ve düşük kırılma indislerine sahip güncel malzemelerden yararlanılmıştır (Şekil 1).

Thue-Morse serisi, 0 ile başlayıp her adımdaki elemanın ikilik sisteme göre tersi alınıp elemanın sonuna eklenmesiyle oluşturulan bir dizidir [5]. Fibonacci serisi ise her bir yeni hücrenin, kendinden önceki iki elemanın yan yana gelmesiyle oluşturulduğu bir dizilimdir. Thue-Morse ve Fibonacci serilerinin oluşturulması Tablo 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Fibonacci-Thue Morse dizilimli karma filtre yapısı.

Çok katmanlı optik filtre yapısının oluşturulmasında Thue-Morse serisinin dördüncü elemanı (T<sub>4</sub>) ve Fibonacci serisinin altıncı elemanı (S<sub>6</sub>) kullanılmıştır. Yüksek (H) ve düşük (L) kırılma indislerine sahip malzemelerle bu yapı modellenmiştir (1=H, 0=L) İkilik sistemde kodlanmış T<sub>4</sub> ve S<sub>6</sub> hücre yapıları Tablo.1 'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Thue-Morse ve Fibonacci serilerinin oluşturulması

| Thue-Morse Serisi | T <sub>0</sub> | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub>   |
|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| Eleman            | 0              | 01             | 0110           | 01101001       | 0110100110010110 |
| Eşlenik           | 1              | 10             | 1001           | 10010110       |                  |

| Fibonacci Serisi | S <sub>0</sub> | S <sub>1</sub> | S <sub>2</sub> | S <sub>3</sub> | S <sub>4</sub> | S <sub>5</sub> | S <sub>6</sub> |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Eleman           | 1              | 0              | 10             | 010            | 10010          | 01010010       | 1001001010010  |

S<sub>6</sub> ve T<sub>4</sub> hücre yapıları kullanılarak filtre yapısı  $Hava/(HLLHLLHLLHLL)^{N_1}/(LHLLHLLHLLHLLHLL)^{N_2}/Hava$  şeklinde oluşturulmuştur. Optik filtre yapısında merkez dalga boyu  $\lambda_0 = 600$  nm olarak seçilmiştir. Düşük kırılma indisli malzeme (L),  $SiO_2$  ( $n_L = 1.45$ ), ve yüksek kırılma indisli malzeme (H) için  $Te$  ( $n_H = 4.234$ ) seçilmiştir. Filtre yapısında kullanılan  $N_1$  ve  $N_2$  değişkenleri serilerin tekrar sayılarıdır. Yapıda kullanılan yüksek ve düşük kırılma indisli malzemelerin kalınlıkları ise  $d_H = \lambda_0/4n_H$  ve  $d_L = \lambda_0/4n_L$  şeklinde alınmıştır.

Yapının yansıma katsayısının hesaplanabilmesi için Transfer Matrisi Metodu kullanılmıştır. Bu yöntemle göre, her bir katmanın kendine ait karakteristik bir matrisi vardır. Yapının genel matrisi bu katman matrislerinin çarpılmasıyla

$$M = M_1 M_2 M_3 \dots M_n = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu genel M matrisinin elemanları kullanılarak yapının yansıma katsayısı (r) ve yansıyan güç oranı hesaplanabilir [3].

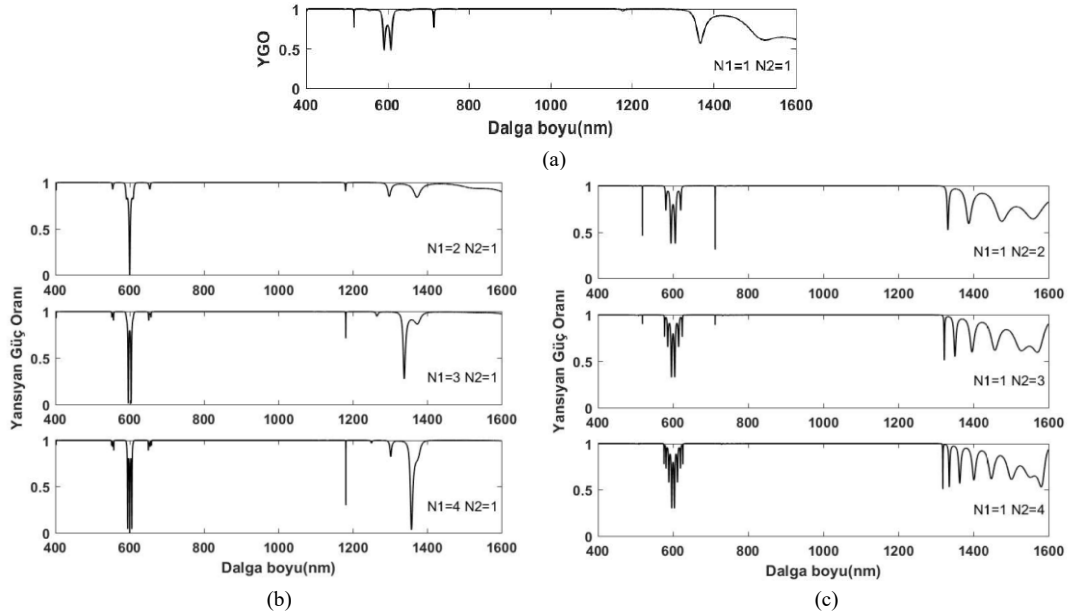
$$\frac{P_r}{P_i} = |r|^2 = \left| \frac{M_{21}}{M_{11}} \right|^2 \quad (2)$$

Burada  $P_i$  filtre yüzeyine gelen dalga gücünü,  $P_r$  ise yapıdan oluşan toplam yansıyan güç miktarını göstermektedir.

### 3. Sonuçlar

Bu bölümde oluşturulan karma optik filtre yapısında, Fibonacci ve Thue-Morse serilerinin yapıdan oluşan toplam yansıma etkileri tartışılmıştır.

İlk olarak, filtreyi oluşturan bu iki farklı serinin birer kez tekrarlandığı durum için yapının yansıma davranışı Şekil 2.a'da gösterilmiştir. Buna göre tasarlanan filtre yapısı görünür ışık bölgesinin büyük bir kısmında ve alt kızılötesi bölgede iyi bir yansıtıcı gibi davranmaktadır. Merkez dalga boyu olan  $\lambda = 600$  nm civarında yansıyan güç oranı yaklaşık yarıya düşmektedir.



**Şekil 2.** a) Fibonacci ve Thue-Morse serilerinin birer kez tekrarlandığı durum için ( $N_1=1, N_2=1$ ) yapıdan yansıyan güç oranı (YGO). b) Thue-Morse serilerinin tekrar sayısı sabit tutularak ( $N_2=1$ ) Fibonacci serisinin tekrar sayısına göre ( $N_1=2,3,4$ ) yapıdan yansıyan güç oranı. c) Fibonacci serilerinin tekrar sayısı sabit tutularak ( $N_1=1$ ) Thue-Morse serisinin tekrar sayısına göre ( $N_2=2,3,4$ ) yapıdan yansıyan güç oranı.

Filtrenin davranışına serilerden gelen katkıları değerlendirmek üzere önce Thue-Morse tekrar sayısı sabit tutularak, Fibonacci dizilimli kısmın tekrar sayısı  $N_1=2,3,4$  alınmıştır (Şekil 2.b). Buna göre Fibonacci serisinin özellikle görünür bölgede daha iyi bir yansımaya karakteri oluşturduğu, alt-kızılötesi bölgede ise yansımada oluşan dalgalanmaları toparlayarak daha kararlı bir yapı oluşturduğu gözlenmektedir. Merkez dalga boyu etrafında ise tekrar sayısı arttıkça yeni iletim kanalları oluşmaktadır. Fibonacci serisinin tekrar sayısı sabit tutularak, Thue-Morse serisi farklı sayılarda tekrarlandığında alt-kızılötesi bölgede ve merkez dalga boyu etrafında yapının yansımaya davranışındaki kararlılığın azaldığı gözlenmektedir. Ancak, özellikle  $\lambda=650$  nm-1250 nm arasında yapı daha kusursuz bir yansıtıcı olarak davranmaktadır.

Bundan sonraki çalışmalarda filtrenin farklı malzemelerle tasarlanması ile farklı yeni sonuçlar elde edilmesi ve tasarlanan yapının özel bazı amaçlarla birçok güncel optik uygulamalarda yer alması beklenebilir.

## Kaynaklar

- [1]. Trabelsi Y., Benali N., Bouazzi Y. ve Kanzari M., "Microwave Transmission Through One-Dimensional Hybrid Quasi Regular (Fibonacci and Thue-Morse) /Periodic Structures", Photonic Sensors, s.246-255, 2013.
- [2]. Singh B. K. ve Pandey P. C., "A study of optical reflectance and localization modes of 1-D Fibonacci photonic quasicrystals using different graded dielectric materials", Journal of Modern Optics, s.887-897, 2014.
- [3]. Gürel Ç. S. ve Kılıç Ö., "Band-blocking optical filter including ultrathin metallic film", Journal of Electromagnetic Waves and Applications, s.2485-2491, 2016.
- [4]. Ali N. B., "Narrow stop band microwave filters by using hybrid generalized quasi-periodic photonic crystals", Chinese Journal of Physics, s. 2384-2392, 2017.
- [5]. Abbasiyan A., Noori M. ve Baghban H., "Investigation of quasi-periodic structures to increase the efficiency of thin film silicon solar cells: A comparative study", Solar Energy Materials and Solar Cells, s.1-9, 2019.
- [6]. Nayak C., Aghajamali A., Solaimani M., Rakshit J. K., Panigrahy D., Kumar K. V. P. ve Ramakrishna B., "Dodecannacci superconductor-metamaterial photonic quasicrystal", Optik, s.1-5, 2020.