

E-ISSN 2458-9411

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

Fen Fakültesi

Fen Dergisi

1981'den beri Sayısal bilimlerin tüm ana bilim dallarına hizmet vermektedir.

Selçuk University

Faculty of Science

Journal of Science

Cilt / Volume 48

Sayı / Issue 2

Ekim / October 2022



**SELÇUK ÜNİVERSİTESİ FEN FAKÜLTESİ
FEN DERGİSİ**

**SELÇUK UNIVERSITY FACULTY OF SCIENCE
JOURNAL OF SCIENCE**

1981'den beri Sayısal bilimlerin tüm ana bilim dallarına hizmet vermektedir.
Since 1981, devoted in all branches of Science.

e-ISSN: 2458-9411

Dergi Sahibi / Journal Owner

Prof. Dr. Semahat Küçükkolbaşı
(Fen Fakültesi Dekanlığı Adına)

Baş Editör / Editor-in-Chief

Doç. Dr. İsmail Tarhan

Alan Editörleri / Associate Editors

İsmail Kınacı, Selçuk Üniversitesi, Türkiye, Alan: Aktüerya Bilimleri
Emre Aslan, Selçuk Üniversitesi, Türkiye, Alan: Biyokimya
Gökhan Zengin, Selçuk Üniversitesi, Türkiye, Alan: Biyoloji
Deniz Ulukuş, Selçuk Üniversitesi, Türkiye, Alan: Biyoteknoloji
Halit Çavuşoğlu, Selçuk Üniversitesi, Türkiye, Alan: Fizik
Yunus Akdoğan, Selçuk Üniversitesi, Türkiye, Alan: İstatistik
Ahmet N. Kurşunlu, Selçuk Üniversitesi, Türkiye, Alan: Kimya
Özlem Acar, Selçuk Üniversitesi, Türkiye, Alan: Matematik

Yayın ve Danışma Kurulu / Advisory Board

Adnan Kenar, Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Türkiye
Buğra Saraçoğlu, Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi, İstatistik Bölümü, Türkiye
Calogero Vetro, Degli Studi di Palermo Üniversitesi, Matematik Bölümü, İtalya
Jiri Barek, Charles Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Çekya
İmren Hatay Patır, Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoteknoloji Bölümü, Türkiye
Pınar Esra Erden, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Polatlı Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü,
Türkiye
Rıza Oğul, Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Türkiye
Vasile Berinde, Universitatea de Nord din Baia Mare, Matematik ve Bilgisayar Bilimi Bölümü, Romanya
Yavuz Bağcı, Selçuk Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, Eczacılık Meslek Bilimleri Bölümü, Türkiye

İletişim / Correspondence

Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Dekanlığı
Alaeddin Keykubat Kampusu, Selçuklu, 42130, Konya
Tel: +90 332 223 8853 Fax: +90 332 2412499

Web

<http://dergipark.gov.tr/sufefd>

E-posta / E-mail

selcukfendergi@gmail.com

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ FEN FAKÜLTESİ FEN DERGİSİ YAYIN İLKELERİ

Makaleler, A4 (210 mmx297 mm) boyutunda 12 punto Times New Roman yazı tipinde ve çift satır aralıklı yazılmalıdır. Sayfanın sağında, solunda, altında ve üstünde 2.5'er cm boşluk bırakılmalı ve yazılar sağa-sola dayalı olmalıdır. Makalenin her sayfası ve satırları numaralandırılmalıdır. Yazar ad(lar)ı açık olarak yazılmalı ve akademik unvan belirtilmemelidir. Türkçe hazırlanan makaleler Türk Dil Kurumu'nun son yazım kılavuzu dikkate alınarak yazılmalıdır.

Makale: Türkçe Başlık, Türkçe Öz, Anahtar Kelimeler, İngilizce Başlık, İngilizce Abstract, İngilizce Keywords, Giriş, Materyal ve Metot, Araştırma Sonuçları, Tartışma, Teşekkür (varsa), 6. Kaynaklar bölümlerinden oluşmalıdır. Bölüm adları koyu yazılmalıdır. Varsa her bir şekil ve tablolar makale içerisinde bahsedildikleri yerden sonra sırayla yerleştirilmelidir. Makale sonunda; Araştırmacıların Katkı Oranı beyanı, varsa Destek ve Teşekkür Beyanı, Çatışma Beyanına yer verilmelidir.

Başlık: Kısa ve açıklayıcı olmalı, 14 punto ve koyu, kelimelerin ilk harfi büyük olmalı, ortalanarak yazılmalı ve 15 kelimeyi geçmemelidir. İngilizce başlık Türkçe başlığı tam olarak karşılmalı, 14 punto ve koyu yazılmalıdır.

Öz: Türkçe ve İngilizce özlerin her biri 300 kelimeyi geçmemelidir. Türkçe ve İngilizce özlere sırasıyla "Öz" ve "Abstract" kelimeleri kullanılmalıdır. Öz, çalışmanın amacını, nasıl yapıldığını, sonuçları ve sonuçlar üzerine yazar(lar)ın yaptığı değerlendirmeleri içermelidir. Öz ve Abstract kısımlarında kesinlikle referans kullanılmamalıdır.

Anahtar Kelimeler: Özlerin 1 satır altına, her anahtar kelimenin ilk harfi büyük diğerleri küçük harflerle, mümkünse başlıkta kullanılmayan, çalışmayı en iyi biçimde tanımlayacak en fazla 6 anahtar kelime yazılmalıdır.

Giriş: Bu bölümde; çalışma konusu, gerekçesi, konu ile doğrudan ilgili önceki çalışmalar ve çalışmanın amacı verilmelidir.

Materyal ve Metot: Bu bölümde; makalede kullanılan materyal ve metot açıkça belirtilmelidir.

Araştırma Sonuçları: Elde edilen sonuçlar verilmeli, gerekirse çizelge, şekil ve grafiklerle desteklenerek bulgular açıklanmalıdır. Elde edilen bulgular tekrardan kaçınılması amacıyla ya çizelge ya da grafik olarak verilmelidir. İstatistikî olarak önemli bulunan faktörler, uygulanan istatistik analiz tekniğine uygun karşılaştırma yöntemi ile yorumlanarak ilgili istatistikler üzerinde harflendirme yapılmalıdır. İstatistikî analiz yönteminin doğru seçilmediği ve/ya analiz gereği gibi yapılmadığı durumlarda editörler kurulu makaleyi değerlendirme dışında tutabilir.

Tartışma: Bulgular çalışma ile ilgili güncel makalelerle tartışılmalı, ancak gereksiz tekrarlardan kaçınılmalıdır. Bulguların başka araştırmalarla benzerlik ve farklılıkları verilmeli, nedenleri açıklanmalıdır.

Teşekkür: Mümkün olduğunca kısa olmalı ve yapılan katkı ifade edilerek verilmelidir.

Kaynaklar: Atıflar ve kaynakçanın Endnote programı ile hazırlanması gerekmektedir. Dergimize ait endnote stil dosyaları, Türkçe ve İngilizce makaleler için ayrı olarak dosya yükleme aşamasında indirme linkleri ile paylaşılmıştır.

Kaynaklar listesi yazılırken, birinci yazar Soyadına göre alfabetik sıralanmalı, ilk satırdan sonraki satırlar 1.0 cm sağdan başlamalıdır. Aynı yazar/yazarların farklı eserleri eski tarihliden başlayarak, aynı tarihli eserler tek yazarlıdan başlayarak sıralanmalıdır. Kaynaklar, mümkün olduğunca orijinal dilinde sunulmalıdır. Orijinal dilinde verilemeyen kaynaklar, Türkçe veya İngilizce olarak verilebilir. Ancak bu durumda kaynağın orijinal dili parantez içerisinde belirtilmelidir.

• Kaynak bir makale ise: Yazarın soyadı, adının baş harfleri., yılı, makalenin başlığı, derginin adı (italik), cilt numarası (varsa no), sayfa aralığı.

Özgören, M., 2006, Flow Structure in the downstream of square and circular cylinders, Flow Measurement and Instrumentation, 17 (4), 225-235.

• Kaynak bir kitap ise: Yazarın soyadı, adının baş harfleri(leri), yılı, kitabın adı, cilt numarası, varsa editör(ler) / çeviri editörleri, yayımlayan yer (italik), yayımlandığı yer, sayfa aralığı.

Dasgupta, D., 1998, Artificial immune systems and their applications, Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg, 45-52.

Not: Çeviri kitaplarında orijinal kitabın değil çeviri kitabın yayın tarihi esas alınacaktır.

• Kaynak basılmış tez ise: Yazarın soyadı, adının baş harfleri(leri). (yılı), Tezin adı", Tezin Cinsi (Yüksek lisans/doktora), Tezin Sunulduğu Enstitü (italik), sunulduğu yer, sayfa aralığı.

• Kaynak kongreden alınmış ise: Yazarın soyadı, adının baş harfleri(ler)., yılı, Tebliğ Adı, kongre, seminer veya konferansın adı (italik), yapıldığı yer, bildiri kitabında yer aldığı sayfa aralığı.

Güneş, S. ve Polat, K., 2009, Elektrokardiyogram (EKG) aritmi teşhisinde en az kareli destek vektör makinaları kullanımına dayalı medikal teşhis destek sistemi, 13. Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı, BIYOMUT-2009, İstanbul, 170-173.

• Kaynak rapordan alınmış ise: Yazarın soyadı, adının baş harfleri(leri) (raporu hazırlayan tüzel kişi ise kuruluşun adı), yılı, raporun adı, raporu hazırlayan kuruluşun kısa adı ve rapor numarası (italik), yayımlandığı yer (italik), sayfa aralığı.

De Castro, L. N. and Von Zuben, F. J., 2000, Artificial immune systems: Part I- Basic theory and applications, DCA-RT 02/00, Brasil, 23-28.

• Kaynak aktüel dergi ve gazete haberinden alınmış ise:

Corliss, R., 1993, Pacific Overtures Times, 142 (11), 68-70.

• Kaynak yazarı bilinmeyen ulusal bir çalışmadan alınmış ise:

Anonim, 2006, Tarım istatistikleri özeti, DİE Yayınları, No;12, Ankara, 22-23.

• Kaynak yazarı bilinmeyen yabancı bir çalışmadan alınmış ise:

Anonymous, 1989, Farm accountancy data network, an A-Z of methodology, Commission Report of the EC, Brussels, 16-19.

• Eğer aynı yazarın aynı yılda basılmış birden fazla yayını kullanılmışsa basım yıllarının sonuna alfabetik bir karakter ilave edilir. Örneğin aynı yazarın (ların) 2003 yılındaki üç yayını için (2003a, 2003b, 2003c) şeklinde gösteriniz.

• Haritalar için gösterim

Yazarın soyadı, adının baş harf(ler)i., yılı, Başlık, Ölçek, Basım Yeri:Yayınevi.

Mason, J., 1832, Map of the countries lying between Spain and India, 1:8.000.000, London: Ordnance Survey.

• Web sayfaları için gösterim

Yazarın soyadı, adının baş harf(ler)i., yılı, Başlık [online], (Edition), Yayın Yeri, Web adresi:URL [Ziyaret Tarihi].

Holland, M., 2002, Guide to citing Internet sources [online], Poole, Bournemouth University,http://www.bournemouth.ac.uk/library/using/guide_to_citing_internet_sourc.html [Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2002].

Şekiller ve Tablolar: Şekil, grafik, fotoğraf ve benzerleri "Şekil", sayısal değerler ise "Tablo" olarak belirtilmelidir. Tüm şekil ve tablolar makalenin içine yerleştirilmelidir. Şekil ve tabloların boyu tek sayfa düzeninde en fazla 16x20 cm ve çift sütun düzeninde ise genişliği en fazla 8 cm olmalıdır. Şekil ve tabloların boyutu baskıda çıkabilecek çözünürlükte olmalıdır. Araştırma sonuçlarını destekleyici nitelikteki resimler 600 dpi çözünürlüğünde "jpg" formatında olmalıdır. Her tablo ve şekle metin içerisinde atıf yapılmalıdır. Tüm tablo ve şekiller makale boyunca sırayla numaralandırılmalıdır (Tablo 1 ve Şekil 1). Tablo ve şekil başlıkları ve açıklamaları kısa ve öz olmalıdır. Şekil ve tablo başlık yazıları 10 punto, şekil ve tabloların içindeki yazılar 9 punto, tablo altı yazılar 8 punto Times New Roman yazı karakterinde olmalıdır. Tablo ve şekillerde kısaltmalar kullanılmış ise hemen altına bu kısaltmalar açıklanmalıdır.

Birimler: Tüm makalelerde SI (System International d'Units) ölçüm birimleri kullanılmalıdır. Ondalık kesir olarak nokta kullanılmalıdır (1,25 yerine 1.25 gibi). Birimlerde "/" kullanılmamalı ve birimler arasında bir boşluk verilmelidir (m/s yerine $m s^{-1}$, J/s yerine $J s^{-1}$, kg m/s² yerine $kg m s^{-2}$ gibi). Sayı ile sembol arasında bir boşluk bırakılmalıdır (4 kg N ha⁻¹, 3 kg m⁻¹ s⁻², 20 N m, 1000 s⁻¹, 100 kPa, 22 °C gibi). Bu kuralın istisnaları düzlemsel açılar için kullanılan derece, dakika ve saniye sembolleridir (°, ' ve "). Bunlar sayıdan hemen sonra konmalıdır (10°, 45', 60" gibi). Litrenin kısaltması "l" olarak belirtilmelidir. Cümle sonunda değillerse sembollerin sonuna nokta konulmamalıdır (kg, değil kg).

Formüller: Formüller numaralandırılmalı ve formül numarası formülün yanına sağa dayalı olarak parantez içinde gösterilmelidir. Formüllerin yazılmasında Word matematik işlemcisi kullanılmalı, ana karakterler 12 punto, değişkenler italik, rakamlar ve matematiksel ifadeler düz olarak verilmelidir. Metin içerisinde atfı yapılacaksa "Eşitlik 1" biçiminde verilmelidir (...ilişkin model, Eşitlik 1' de verilmiştir).

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ FEN FAKÜLTESİ
FEN DERGİSİ

SELÇUK UNIVERSITY FACULTY OF SCIENCE
JOURNAL OF SCIENCE

e-ISSN: 2458-9411
Cilt 48, Sayı 2, Ekim 2022
Volume 48, Issue 2, October 2022

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Derleme Makaleleri

Toprak Solarizasyonu ve Bitki Paraziti Nematodlarla Mücadelede Kullanımı 53-62
Soil Solarization and Its Use in Management of Plant Parasitic Nematodes
İbrahim Mıstanoğlu, Gülsüm Uysal, Zübeyir Devran

İki-Boyutlu Nanomalzemeler: Özellikleri, Sentez Yöntemleri ve Uygulama Alanları Üzerine Genel Bir Bakış 63-71
Two-Dimensional Nanomaterials: An Overview of Their Properties, Synthesis and Applications
Sadık Çoğal

Araştırma Makaleleri

***Salvia candidissima* Vahl (*Lamiaceae*) Alt Türlerinin Morfolojik ve Anatomik Özelliklerinin İncelenmesi 72-78**
Investigation of Morphological and Anatomical Characters of Subsp. of The *Salvia candidissima* Vahl (*Lamiaceae*)
Yavuz Bağcı, Neriman Elmalı, Süleyman Doğu

Sistein Tayini İçin Yeni Bir Algılayıcı Molekülün Sentezi ve Karakterizasyonu 79-87
Synthesis and Characterization of A New Probe For The Detection of Cystein
Sait Malkondu , Serkan Erdemir

Çok Tabakalı Hiperbolik Metamalzeme ile Oluşturulan Geniş Band Optik Soğurucu 88-97
The Broad Band Optical Absorber Designed By Multilayered Hyperbolic Metamaterial
Sevinç Eşen, Haluk Şafak

Çok Yönlü s-Triazin Ligandlarının Sentezi ve Salen/Saloph Fe(III)/Cr(III) Metal Komplekslerinin İncelenmesi 98-105
Synthesis of Versatile s-Triazine Ligands and Investigation of Salen/Salophen Fe(III)/Cr(III) Metal Complexes
Figen Aydemir, Ziya Erdem Koç

Düzeltilme/Erratum Makalesi

Düzeltilme/Erratum “Ultrasonik yöntemle ve mekanik deneylerle belirlenen malzeme sabitlerinin karşılaştırılması” [Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi, 48 (1) 2022 Sayfa 25-33].....106
Hatice Güzel, Ersin Bozkurt

Mevcut sayıya ait içindekiler listesine [DergiPark](#) üzerinden ulaşılabilir

Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi

Dergi web sayfası: dergipark.org.tr/tr/pub/sufefd

Derleme Makale

Toprak Solarizasyonu ve Bitki Paraziti Nematodlarla Mücadelede Kullanımı

İbrahim Mıstanoğlu ^{a,1}, Gülsüm Uysal ^{b,2}, Zübeyir Devran ^{c,3,*}^a Bolvadin İlçe Tarım ve Orman Müdürlüğü, Afyonkarahisar^b Batı Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitü Müdürlüğü, Antalya^c Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Antalya

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi

Geliş 18 Mart 2022

Revizyon 13 Nisan 2022

Kabul 14 Mayıs 2022

Anahtar Kelimeler

Bitki paraziti nematodlar

Entegre mücadele

Fiziksel mücadele

Solarizasyon

ÖZ

Tarımsal üretimi sınırlandıran toprak kökenli birçok hastalık etmeni ve zararlı bulunmaktadır. Bitki paraziti nematodlar, gerek bitkilerde beslenmeleri ile yaptıkları direk zararlar gerekse diğer hastalık etmenleriyle oluşturdukları kompleks ilişkileri nedeniyle tarımsal üretim yapılan alanlarda önemli kayıplara neden olabilmektedir. Bu zararlılarla mücadelede birçok yöntem kullanılmakta olup bunlardan en sık başvuru kimyasal mücadeledir. Özellikle son yıllarda çevre bilinci konusunda artan farkındalık nedeniyle birçok kimyasalın kullanımı yasaklanmıştır. Buna karşın nematodlarla mücadelede kullanılan kimyasalların hem etkinliğini arttırmak hem de kullanım miktarlarını azaltabilmek için solarizasyon kullanılmaktadır. Dolayısıyla toprak solarizasyonu hem çevre ve insan sağlığı hem de etkili ve sürdürülebilir bir mücadele açısından önemli bir yöntemdir. Bu derlemede toprak solarizasyonu ve bitki paraziti nematodlara karşı kullanımı hakkında bilgi verilmiştir.

Review Article

Soil Solarization and Its Use in Management of Plant Parasitic Nematodes

ARTICLE INFO

Article History

Received 18 March 2022

Revised 13 April 2022

Accepted 14 May 2022

Keywords

Plant parasitic nematodes

Integrated management

Physical management

Solarization

ABSTRACT

There are many soil-borne diseases and pests that limit agricultural production. Plant parasitic nematodes can cause significant losses in agricultural production areas due to their direct damage by feeding on plants and their complex relationships with other diseases. While there are many different techniques to manage these pests, the most common one is chemical control. Many chemicals have been banned due to increasing awareness of environmental concerns especially in recent years. However, solarization is used both increase the effectiveness and reduce the amount of the chemicals used in the management against nematodes. Therefore, soil solarization is an important method that can facilitate an effective and sustainable management both in terms of environment and human health. In this review, information is given about soil solarization and its importance in the management of plant parasitic nematodes.

1. Giriş

Bitki paraziti nematodlar, birçok tarımsal üründe yapmış oldukları önemli zararlarla verim ve kalitede kayıplara neden olmaktadır. Toprakta yaşayan bu nematodlarla mücadele, bitkilerin toprak üstü kısımlarında zarar oluşturan diğer hastalık etmenlerine ve zararlılara göre daha zordur. Nematodlarla mücadelede birçok yöntem kullanılabilir. Kimyasal mücadele en yaygın kullanılan yöntemlerdendir. Bununla birlikte kimyasal mücadelede çeşitli alet ve ekipman gereksinimi, yetişmiş personele ihtiyaç duyulması, yüksek maliyet, pestisit

kalıntısı, bitkilerde fitotoksik etki ve toprakta yıkanma gibi olumsuz etkiler gözlemlenebilmektedir. Bu olumsuz etkilerin önlenmesi ve özellikle çevre, insan ve bitki sağlığına olan etkilerin azaltılabilmesi için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bu teknikler içerisinde toprak solarizasyonu uygulanmasının kolay olması, nispeten daha az kimyasal kullanılması, farklı mücadele yöntemleriyle birleştirilebilmesi (kombine olabilmesi) ve daha ekonomik bir maliyete sahip olması gibi özelliklerinden dolayı ön plana çıkmaktadır (Katan, 2014).

Bitki paraziti nematodlar, toprakta bitkilerle ve çok farklı mikroorganizmalarla birlikte bulunmaktadır. Dolayısıyla

* Sorumlu Yazar

E-posta adresleri: i_mistanoglu@hotmail.com (İ. Mıstanoğlu), gulsumuysal.gu@gmail.com (G. Uysal), zdevran@akdeniz.edu.tr (Z. Devran)¹ ORCID: 0000-0002-8635-0321² ORCID: 0000-0003-1722-2518³ ORCID: 0000-0001-7150-284X

yapılan solarizasyon uygulamalarının bu canlılar üzerinde de etkili olduğu bilinmektedir (Stapleton ve DeVay, 1995; D'Addabbo ve ark., 2010; Pokharel, 2011). Toprakta, bitkilerde hastalıklara neden olabilen funguslar ve bakteriler, yaşamlarının belirli dönemlerini (yumurta, pupa, larva gibi) toprakta geçiren zararlı böcekler ve kültür bitkileriyle rekabete girebilen yabancı otlar bulunmaktadır. Bu tarımsal hastalık etmenleri ve zararlılara karşı mücadelede solarizasyon kullanımı ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu derlemede tarımsal üretimde önemli bir yere sahip olan solarizasyonu ve bitki paraziti nematodlarla mücadelede kullanımı hakkında bilgi verilmeye çalışılmıştır.

2. Toprak Solarizasyonu

Tarımsal üretimde zararlı ve hastalık etmenleriyle mücadelede önemli bir yere sahip olan solarizasyon tekniği ilk kez 1976 yılında İsrail'de geliştirilmiş ve günümüze kadar 70'in üzerinde gelişmiş ve gelişmekte olan ülkede çalışılmıştır (Katan, 1987; 2014). Güneş enerjisi kullanılarak toprakta yapılan bu dezenfeksiyon işlemi için "toprak solarizasyonu" ifadesi daha yaygın kullanılmaktadır. Ancak toprağın güneş enerjisiyle ısıtılması, plastik malçlama (tarping), güneş pastörizasyonu ve güneş enerjisiyle arındırma gibi diğer terimler de bu işlemin tanımlanmasında kullanılmaktadır (Katan, 2014). Geniş anlamda toprak solarizasyonu, böcekler, toprak kaynaklı bitki patojenleri, nematodlar ve yabancı otlar için elverişsiz koşullar (fiziksel, biyolojik ve kimyasal) oluşturmak amacıyla uygun bir zaman periyodunda şeffaf plastik örtüler kullanılarak güneş enerjisi vasıtasıyla toprak sıcaklığının artırıldığı hidrotermal bir dezenfeksiyon yöntemi olarak tanımlanmaktadır (Stapleton ve DeVay, 1986; Katan, 1987; Sasanelli ve ark., 2021; Şekil 1).



Şekil 1. Solarizasyon yapılan seranın görünümü.

Doğal koşullarda gün boyunca güneş ışınlarına maruz kalan toprak ısı biriktirmektedir. Ancak bu enerji gerek ışınimsal (radiative) gerekse konvektif (convective) süreçlerle serbest bırakılmaktadır. Fakat toprak sıcaklığı, iklim ve toprak yapısı gibi bazı çevresel nedenlerden dolayı bu salınım belirli seviyelerde tutulmaktadır (Hasing, 2002; Kapoor, 2013). Solarizasyon işleminde kullanılan şeffaf malç, güneş enerjisinin toprak tarafından emilimine önemli ölçüde etki etmemekte ve ısı kaybını azaltarak toprak sıcaklığının artmasını sağlamaktadır (Hasing, 2002). Solarizasyonun oluşturmuş olduğu bu etki ise derinlik arttıkça azalmaktadır (Kapoor, 2013). Toprak tipine ve toprak işlemesine bağlı olarak 4-6 hafta süreyle uygulanan solarizasyonun 30 cm derinliğe kadar olan toprak katmanında sıcaklığı yaklaşık 35-50°C'ye kadar çıkarabildiği belirtilmiştir (Viaene ve ark., 2013). Oluşturulan bu yüksek sıcaklıklarla öncelikli olarak toprak patojenlerini kontrol etmek amaçlanmış ancak bu

yöntemin aynı zamanda tarımsal ürünlerin performansını etkileyebilecek besin konsantrasyonu ya da çözünür organik madde içeriği gibi toprak özellikleri üzerinde de etkileri olduğu tespit edilmiştir (Katan ve ark., 1976; Chen ve ark., 1991; 2000).

2.1. Toprak solarizasyonu sürecinde gözlemlenen mekanizmalar

Toprak solarizasyonunun etkinliğinin oluşmasında birçok mekanizma meydana gelmektedir (Katan, 1987; Stapleton ve DeVay, 1995). Ancak bu mekanizmalar içerisinde en önemli olanları solarizasyonun termal etkisi ve bunun sonucunda oluşan biyolojik ve kimyasal etkilerdir (D'Addabbo ve ark., 2010).

2.1.1. Termal mekanizmalar

Toprak sıcaklığının yükseltilmesi amacıyla toprak yüzeyinin şeffaf polietilen bir örtüyle kaplanması olarak tanımlanan solarizasyon özelliği bitki patojeni mikroorganizmalar ile mücadelede etkin bir şekilde kullanılabilir. Bunun nedeni ise solarizasyon sürecinde toprakta ulaşılan yüksek sıcaklıklar ve bu sıcaklıklara mikroorganizmaların maruz kalma süreleridir (Singh ve ark., 2012). Örneğin 40-50°C gibi sıcaklıklar fungal organizmaların popülasyonlarını büyük ölçüde azaltmaktadır. Bitki paraziti nematodlarda ise 41-47°C sıcaklıkların öldürücü olduğu veya nematodların enfeksiyon güçlerini azalttığı ayrıca nematodların biyotik ve abiyotik streslere karşı daha savunmasız kaldıkları ifade edilmektedir (Heald ve Robinson, 1987; D'Addabbo ve ark., 2010). Fakat bu etkiler nematod türlerine göre değişebilmektedir. Ancak istenilen etkinin elde edilebilmesi için sıcaklığın maruz kalma süreleri yüksek sıcaklıklarda dakikalar ya da saatlerle ifade edilirken düşük sıcaklıklarda ise günlerle ifade edilmektedir (Baker ve Cook, 1974; Pokharel, 2011; Singh ve ark., 2012). Toprakta solarizasyonla oluşturulan bu sıcaklığın etkinliği maruz kalma süresinin yanında toprak nemi ile de artırılabilir. Toprak nemi, özellikle sıcaklığın toprak içerisindeki iletiminde önemli bir rol oynamaktadır. Nem ayrıca topraktaki mikroorganizmaların hücresel aktiviteleri ve yabancı ot tohumlarının gelişimini desteklemektedir. Böylece söz konusu organizmalar sıcaklığa daha hassas hale gelmektedir. Dolayısıyla gelişimlerinin desteklenmediği kuru koşullarda ise mikroorganizmalar ısıya daha dayanıklı olabilmektedirler (Pokharel, 2011). Bitki paraziti nematodlar, nem ve suyun etkisiyle yumurtadan çıkışları teşvik edilerek sıcaklığa karşı daha korunaksız hale gelebilmektedirler. Bu nedenle solarizasyon süresince nemin varlığı etkinlik açısından çok önemli bir faktördür (Katan, 1987; D'Addabbo ve ark., 2010).

2.1.2. Biyolojik mekanizmalar

Solarizasyon sonrası topraktaki organik ve mineral besin maddelerinin artmasıyla bu topraklarda genellikle bitki patojenlerine antagonistik etkide bulunan mikroorganizmaların varlığında artışlar gözlemlenmektedir (Stapleton ve DeVay, 1995; D'Addabbo ve ark., 2010). Bu da birçok bitki patojeni hastalık etmeni ve zararlı solarize edilmiş topraklarda hızlı bir şekilde çoğalmasına engel olmaktadır. Özellikle *Bacillus* spp., floresan pseudomonadlar ve serbest yaşayan nematodlar gibi yüksek sıcaklıklara dayanabilen ve dolayısıyla solarizasyon sonrası toprakta hızlı bir şekilde çoğalabilen bazı mikroorganizmalar bitki

patojenlerinin çoğalmalarına engel olmakta ve böylelikle bitkilerin daha iyi gelişmelerini sağlayabilmektedir (Katan, 1987; Stapleton ve DeVay, 1995).

2.1.3. Kimyasal mekanizmalar

Solarizasyon esnasında toprakta oluşan yüksek sıcaklık nedeniyle bu süreçte ve sonrasında meydana gelen kimyasal değişiklikler farklı mekanizmaların oluşmasına neden olabilmektedir (Chen ve Katan, 1980; Chen ve ark., 1991). Özellikle solarizasyon sonrasında topraktaki çözülebilir mineral besin maddelerinin miktarı artmaktadır (Katan, 1987; Stapleton ve DeVay, 1995). Örneğin bu maddelerden azotun (N) solarizasyon koşullarında toksik özelliğe sahip amonyak azotu şeklinde birikiminin, nitrifikasyon yapan mikroorganizmaların faaliyetlerini etkilediği ve bu nedenle nitrat olarak gerçekleşen azot kaybını azalttığı tespit edilmiştir (Hasson ve ark., 1987). Ayrıca solarizasyon sonrası oluşan ortam, toprak pH'sının düşmesine neden olmaktadır. Bu da özellikle nitrifikasyon için uygun olmayan bir ortama neden olduğundan dolayı nitrat olarak azot kaybının azalmasını ve bitki gelişimi için gerekli olan en önemli besin maddelerinden olan azotun daha uzun süre toprakta bulunmasını sağlamaktadır (Hasson ve ark., 1987; D'Addabbo ve ark., 2010). Solarizasyonda bir diğer önemli kimyasal süreç organik maddeler üzerinde gerçekleşmektedir. Solarizasyon sırasında oluşan yüksek sıcaklık organik maddelerdeki parçalanmayı hızlandırmaktadır. Ayrıca bu etki sonucu toprak faunası için toksik olan uçucu bileşikler de üretilebilmektedir. Oluşan bu bileşikler ise toprağın daha az patojen ve farklı bir mikroflora içermesini sağlamakta, bu da patojenlerin toprakta yeniden yerleşmesini baskılayabilmektedir (Gamliel ve ark., 2000).

2.2. Toprak solarizasyonunun başarısını etkileyen faktörler

Toprak kökenli birçok hastalık ve zararlı ile mücadelede gerek çevre ve insan sağlığına herhangi bir olumsuz etkisinin olmaması, gerekse sürdürülebilir olması nedeniyle toprak solarizasyonu önemli bir yere sahiptir. Temel olarak, su ile doyurulmuş bir toprak, güneş enerjisi ve polietilen bir örtü kullanılarak yapılan bu işlem basit bir teknoloji gibi görünse de başarısında çok sayıda çevresel ve teknik faktörler etkili olmaktadır (D'Addabbo ve ark., 2010; Pokharel, 2011; Katan, 2014). Dolayısıyla etkin ve sürdürülebilir bir solarizasyon uygulaması için bazı temel konulara dikkat edilmesi gerekmektedir. Toprak solarizasyonu sürecinde mücadelenin etkinliğini artıracak noktalar aşağıda belirtilmiştir.

2.2.1. Uygulama zamanı

Toprağın malçlanması, yüksek sıcaklık ve özellikle yoğun güneş ışınımının olduğu yaz dönemlerinde yapılmalıdır. Bu dönemler bölgesel olarak değiştiği için yetiştiricilik yapılan bölgeye en uygun solarizasyon döneminin belirlenmesi gerekmektedir. Toprak solarizasyon işlemi esnasında üst toprak tabakasında daha yüksek sıcaklıklara ulaşılabilirken, alt tabakalarda bu sıcaklıklar düşmektedir. Dolayısıyla solarizasyon işleminin 4-8 hafta aralığında devam ettirilmesi gerekmektedir (Pokharel, 2011; Singh ve ark., 2012).

2.2.2. Toprak nemi ve sıcaklık

Hedeflenen hastalık etmenleri ve zararlıların sıcaklık hassasiyetlerini arttırmak ve topraktaki ısı iletimini

iyileştirmek için solarizasyon süresince toprağın nemli kalması sağlanmalıdır. Solarizasyon, tekrarlanan günlük döngüler yoluyla toprağı ısıtmaktadır. Artan derinliklerde ise ulaşılabilen maksimum sıcaklıklar düşmektedir. 10 ve 20 cm derinliklerde sıcaklıklar sırasıyla 45-50°C ve 38-45°C aralığında değişebilmektedir (Stapleton, 2000; D'Addabbo ve ark., 2010; Pokharel, 2011). Ayrıca solarize edilen alanlar, edilmeyen alanlara göre 5-15°C daha yüksek sıcaklıklara sahip olabilmektedir (Gamliel ve Katan, 1991).

2.2.3. Kullanılan örtü materyali

Başarılı ve etkili bir solarizasyon işlemi için 25-50 µm kalınlıkta polietilen malç materyali kullanılmalıdır (Sharma ve Sharma, 2002; Singh ve ark., 2012). Solarizasyonda kullanılan malç materyali şeffaf olmalıdır. Siyah ya da diğer renklerin kullanılması durumunda bu materyaller güneş ışınlarının iletimine mâni olabilmektedir. Dolayısıyla toprak sıcaklığı hedeflenen düzeylere ulaşmamaktadır.

2.2.4. Uygulama şekli

Solarizasyon işleminde hava boşluklarını ve rüzgârdan kaynaklı zararları en aza indirmek için polietilen malç materyali toprak yüzeyine sıkı bir şekilde uygulanmalıdır. Özellikle sera kenar şeritlerinin polietilen materyal ile dikkatlice kapatıldığından emin olunmalı ve üzerinde herhangi bir toprak parçası bırakılmamalıdır.

2.2.5. Toprak hazırlığı

Toprak solarizasyonunun etkinliğinin daha uzun süre devam edebilmesi için solarizasyon işlemi öncesinde toprağın ekim ve dikime hazır hale getirilmesi, sulama sistemlerinin de yerleştirilmesi önemlidir. Ayrıca kullanılacak üretim materyallerinin ve sulama suyunun hastalık etmenleri ve zararlılar açısından temiz olması gerekmektedir (Stapleton, 2000; Kapoor, 2013; Katan, 2014). Solarizasyon işleminden sonra toprağı işlemekten kaçınılmalı, toprağı sürmek gerekirse de derin sürülmemeli ya da 10-20 cm geçmeyecek şekilde yapılmalıdır.

2.3. Toprak solarizasyonunun avantajları ve dezavantajları

Toprak solarizasyonu birçok hastalık etmeni, zararlı ve yabancı otların eş zamanlı mücadelenin yapılabildiği kısa ve uzun vadede avantajlara sahip olan ve tarımsal üretimdeki diğer uygulamalara göre daha düşük bir maliyeti olan önemli bir mücadele yöntemidir (Singh ve ark., 2012; Kumar ve ark., 2017). Bu teknik gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde makineli ya da makinesiz olarak uygulanabilmektedir. Toprak solarizasyonu özellikle birden fazla hastalık ya da zararlının bulunduğu üretim alanlarında etkin bir mücadele sunabilmektedir. Ayrıca kimyasal kullanılmadan gerçekleştirilen uygulamaların çevre ve insan sağlığına herhangi bir olumsuz etkisi bulunmamakta ve kalıntı sorunu oluşturmamaktadır. Uygulama sonrası topraktaki hastalık ya da zararlı yoğunluğunun düşük olması özellikle bitkilerin hassas olduğu fide dönemlerinde daha sağlıklı gelişmelerine imkân sunmaktadır. Böylelikle söz konusu alanlardan sonraki üretim dönemlerinde daha fazla verim elde edilebilmektedir. Solarizasyonun elde edilen verimin artmasına neden olan bir diğer olumlu yanı ise toprak yapısının iyileşmesine imkân sunması ve bitkiler için gerekli olan birçok besin maddesinin toprakta yararlı formda dönüştürülebilmesidir (Elmore, 1991; Singh ve ark., 2012). Fakat toprak solarizasyonu, çeşitli sınırlamalar, zorluklar ve

bazı olumsuz yan etkiler de içerebilmektedir (Singh ve ark., 2012; Kumar ve ark., 2017). Bilindiği üzere toprak solarizasyonuna güneş enerjisinin kullanımı nedeniyle belirli iklim bölgelerinde ve yılın belirli aylarında yaklaşık 6-8 hafta boyunca uygulamanın sürmesi gerekmektedir. Bu da arazinin uzun bir süre kullanılmamasına neden olmaktadır (Kapoor, 2013; Kumar ve ark., 2017). Ayrıca daha serin bölgelerde solarizasyonun etkinliği düşebilmekte ve daha yüksek bir maliyete neden olabilmektedir (D'addabbo ve ark., 2010). Toprak solarizasyonu açık alanda yetiştiricilik yapılan bazı ürünler için oldukça pahalıdır. Ayrıca bu uygulama bazı hastalık etmenleri ve zararlılara karşı etkisiz olabilmektedir. Diğer yandan üst üste tekrarlanan uygulamalar toprakta bazı ısıya dayanıklı patojenlerin gelişmesine de neden olabilmektedir. Bir diğer olumsuz etkisi ise antagonistler üzerindeki zararlı etki nedeniyle patojen popülasyonunda bir artış olabilmektedir (Kumar ve ark., 2017). Ayrıca bu işlem esnasında kullanılan plastik materyaller uygulama sonrasında çevre kirliliği gibi bazı sorunlara yol açmaktadır (Singh ve ark., 2012). Bu sorun ise solarizasyonda kullanılan plastik materyalin doğada biyolojik olarak toprakta ayrışabilir özellikte olanlarının tercih edilmesi ile çözülebilmektedir (D'addabbo ve ark., 2010).

3. Toprak Solarizasyonunun Bitki Paraziti Nematodlara Karşı Mücadelede Kullanılması

3.1. Bitki paraziti nematodlar üzerine etkileri

Bitki paraziti nematodlar tarımsal üretimde doğrudan ya da dolaylı olarak neden oldukları zararlarla önemli bir yere sahiptir (Jones ve ark., 2013). Bununla birlikte günümüze kadar sadece yaklaşık 4100 bitki paraziti nematod türü (bilinen toplam nematod türlerinin yaklaşık %15'i) tanımlanmıştır (Decraemer ve Hunt, 2013). Özellikle *Meloidogyne* spp. (kök-ur nematodları) içinde yer alan türlerin, iletim sistemine sahip bitkilerin neredeyse tamamını enfekte edebildiği ve dünya genelinde yaklaşık 3000 kadar konukçusunun olduğu belirlenmiştir (Hussey, 1985; Karssen ve ark., 2013; Jones ve ark., 2013). Yapılan çalışmalarda bitki paraziti nematodların neden olduğu yıllık ekonomik kaybın yaklaşık 215.77 milyar ABD doları olduğu tahmin edilmektedir (Subedi ve ark., 2020). Bu nedenle bitki paraziti nematodlarla mücadele oldukça önemlidir. Bu zararlıların popülasyon yoğunluklarını ekonomik zarar eşiği (EZE)'nin altında tutmak için çeşitli mücadele yöntemlerini tek ya da birlikte kullanmak gerekmektedir. Bu mücadele yöntemleri içerisinde karantina önlemleri, kültürel yöntemler, fiziksel mücadele, biyolojik mücadele ve kimyasal mücadele yer almaktadır. Fiziksel mücadele içinde yer alan toprak solarizasyonunun bitki paraziti nematodlara karşı etkinliği ilk olarak İsrail'de gösterilmiştir (Hadar ve ark., 1983). Ardından Avustralya, Amerika, İtalya, Güney Afrika, Suriye ve Türkiye gibi birçok ülkede de solarizasyonun bitki paraziti nematodlar üzerindeki etkinliği ile ilgili çalışmalar yapılmıştır (Porter ve Merriman, 1983; LaMondia ve Brodie, 1984; Greco ve ark., 1985; Barbercheck ve Von Broenbsen, 1986; Sauerborn ve ark., 1990; Elekçioğlu ve ark., 1995; Göçmen ve Elekçioğlu, 1996). Yapılan çalışmalarda toprak solarizasyonunun patojenler ve bitki paraziti nematodlar üzerindeki etkinliğinin büyük ölçüde ulaşılan sıcaklık ve zamana bağlı olduğu belirtilmektedir (Kapoor, 2013; Sasanelli ve ark., 2021). Ayrıca tüm bitki paraziti nematod gruplarının toprak solarizasyonuna aynı hassasiyeti göstermedikleri de tespit edilmiştir (Stapleton ve DeVay, 1995; D'Addabbo ve ark., 2010). Yürütülen çalışmalarda 73

°C gibi yüksek toprak sıcaklıklarında serbest yaşayan ya da bitki paraziti nematod türlerinin tamamının yok edildiği (eradike), bununla birlikte 42-46 °C gibi toprak sıcaklığında ise yalnızca söz konusu nematod türlerinin popülasyon yoğunluklarının azaldığı belirtilmektedir. Ayrıca 42-46 °C toprak sıcaklıklarına serbest yaşayan nematod türlerinin bitki paraziti türlerden daha tolerant oldukları tespit edilmiştir (Heald ve Robinson, 1987; Stapleton ve ark., 2006; Wang ve McSorley, 2008). Ancak mücadelenin yapıldığı bölge için en uygun tarihte, yeterli sürede (4-8 hafta) ve gerekli koşullarla yapılan toprak solarizasyonunun çok sayıda serbest yaşayan ve bitki paraziti nematod türüne karşı etkili olduğu da tespit edilmiştir. Örneğin 2 saat süreyle 47,5-52,5 °C'lere ulaşabilen sıcaklıkların *Heterodera carotae* Jones, (1950)'nin yumurta açılımlarını önemli derecede etkilediği belirtilmiştir (Greco ve ark., 1998). *Globodera rosthochiensis* (Wollenweber, 1923)'de ise bu etkinin 50 °C'de 4 saat ya da 59 °C'de 30 dakika da gerçekleştiği bildirilmiştir (Evans, 1991). *Rotylenchulus reniformis* (Linford and Oliveira, 1940) ile yapılan bir çalışmada da 41-47 °C arasındaki sıcaklıklarda yaklaşık 24 saatlik bir sürede %90'lık bir ölüm oranına ulaşıldığı rapor edilmiştir (Heald ve Robinson, 1987). Giblin-Davis ve Verkade (1988)'de yaptıkları çalışmada *Belonolaimus longicaudatus* Rau ve *Hoplolaimus galeatus* (Cobb) Thorne türlerinin 48±2 °C sıcaklıkta 2 saatlik süre içerisinde öldüklerini belirtmişlerdir. *Helicotylenchus* spp., *Tylenchorhynchus* spp. *Tylenchus* spp., *Heterodera ciceri* Vovlas, Greco & Di Vito, 1985 ve *Pratylenchus thornei* Sher & Allen, 1953 gibi nematodlarla bulaşık bir alanda iki yıl üst üste yapılan ve 48-55 °C gibi yüksek toprak sıcaklıklarına ulaşılan bir başka çalışmada söz konusu nematodların 40 gün süreyle yapılan solarizasyon işleminden nematod cinsine göre değişmekle birlikte %83-100 oranlarında etkilendikleri tespit edilmiştir (Sauerborn ve ark., 1990). Kök-ur nematodlarıyla sera koşullarında 3 yıl üst üste yapılan solarizasyon ile söz konusu nematodların önemli oranda (%99) baskılandığı belirtilmiştir (Candido ve ark., 2008). Kök-ur nematodlarının farklı biyolojik dönemleri (yumurta, larva ya da ergin) için solarizasyon ile mücadelede gerekli olan etkili sıcaklık derecelerinin de farklı olduğu tespit edilmiştir (Wang ve McSorley, 2008; Tablo 1).

Tablo 1

Meloidogyne incognita'nın farklı biyolojik dönemlerinin ölümü için gerekli olan sıcaklık dereceleri ve süreleri (Wang ve McSorley, 2008).

Sıcaklık (°C)	Süre (saat)	
	Yumurta	Larva
38	389,8	-
39	164,5	47,9
40	32,9	46,2
41	19,7	17,5
42	13,1	13,8

Toprak solarizasyonu özellikle sebze alanlarında zararlılara neden olan kök-ur nematodlarına karşı yaygın şekilde kullanılsa da farklı cinslere ait nematod türlerinde de etkili olmaktadır (Stapleton ve DeVay, 1986; 1995; Giblin-Davis ve Verkade, 1988; Sauerborn ve ark. 1990; Chellemi ve ark. 1993; Greco ve ark., 1998; Oštrec ve Grubišič, 2003; Tablo 2).

Tablo 2

Toprak solarizasyonunun nematod türleri üzerindeki etkisi (Chellemi ve ark., 1993; Stapleton ve DeVay, 1995; Lamberti ve ark., 2000; Östrec ve Grubišič, 2003; D'Addabbo ve ark., 2010; Pokharel, 2011).

Solarizasyonla kontrol edilebilen nematod türleri	
<i>Aphelenchus</i> spp.	<i>Meloidogyne arenaria</i>
<i>Belonolaimus longicaudatus</i>	<i>Meloidogyne hapla</i>
<i>Criconemella xenoplax</i>	<i>Paratrichodorus porosus</i>
<i>Ditylenchus dipsaci</i>	<i>Paratrichodorus minor</i>
<i>Dolichodorus heterocephalus</i>	<i>Pratylenchus hamatus</i>
<i>Globodera rosthochiensis</i>	<i>Pratylenchus penetrans</i>
<i>Helicotylenchus digonicus</i>	<i>Pratylenchus thornei</i>
<i>Heterodera schachtii</i>	<i>Pratylenchus vulnus</i>
<i>Heterodera carotae</i>	<i>Radopholus similis</i>
<i>Hirschmanniella mucronata</i>	<i>Rotylenchulus reniformis</i>
<i>Hoplolaimus galeatus</i>	<i>Tylenchorhynchus</i> spp.
<i>Meloidogyne incognita</i>	<i>Tylenchulus semipenetrans</i>
<i>Meloidogyne javanica</i>	<i>Xiphinema</i> spp.

Solarizasyonun birçok bitki paraziti nematod türü üzerindeki bu etkisi özellikle toprağın üst kısmındaki belirli bir derinlikte (0-22,5 cm) gerçekleşmektedir (Heald ve Robinson, 1987). Ancak nematodların hareketli dönemleri toprağın daha derinlerine inerek solarizasyonun etkilerinden kurtulabilmektedir. Solarizasyonun etkisinin azalmasıyla tekrar bitki kök bölgesine gelen nematodlar bitkilerde yeniden zarar oluşturabilmektedirler (Kapoor, 2013; Çatalkaya ve Devran, 2019). Bu nedenle solarizasyon periyodunun uzunluğu bitki paraziti nematodların baskılanmasında önem taşımaktadır. Sıcaklığın toprağın derin profillerine ulaştırılabilmesi solarizasyonun etkinliği ve sürdürülebilirliği açısından çok önemlidir (Wang ve McSorley, 2008). Ayrıca solarizasyonun bitki paraziti nematodlara karşı her yıl uygulanması da gerekmektedir (Candido ve ark., 2008). Bununla birlikte ısı iletimi ve muhafazası yüksek olan plastik örtülerin kullanımı, düşük dozlarda kimyasal kullanımı veya kimyasal olmayan diğer yöntemlerle (biyolojik etmelerin, dayanıklı çeşitler vb.) birlikte yapılan uygulamalar solarizasyonun bitki paraziti nematodlar üzerindeki etkilerini arttırabilmekte ve süresini uzatabilmektedir (Söğüt ve Elekçioğlu, 2007; Candido ve ark., 2008; Çatalkaya ve Devran, 2019).

3.1.1. Solarizasyonun açık alanlarda bitki paraziti nematodlara karşı kullanımı

Solarizasyonun açık alanlarda kullanımı örtü altı alanlara göre daha sınırlı kalmaktadır. Dünyanın farklı ülkelerinde konuyla ilgili çalışmalar yürütülmüştür. İtalya'nın güneyinde bitki paraziti nematodlarla (*Ditylenchus dipsaci* (Kuhn, 1857), *Heterodera carotae* ve *Meloidogyne javanica*) bulaşık alanlarda yapılan çalışmalarda toprak solarizasyonunun bu nematod türlerini etkili bir şekilde kontrol edebildiği tespit edilmiştir (Greco ve ark., 1985). Suriye'de *Heterodera ciceri* ve *Pratylenchus thornei* ile bulaşık nohut üretim alanlarında yapılan solarizasyon uygulamalarının verimliliği arttırdığı, bitki paraziti nematodların popülasyon yoğunluklarını düşürdüğü ve bu zararlılarla mücadelede pestisit kullanımını azaltabileceği belirtilmiştir (Di Vito ve ark., 1991). Doğu Akdeniz Bölgesinde yerfıstığı üretim alanlarında yapılan bir çalışmada 6 hafta süreli solarizasyon uygulamasının bitki paraziti nematodların popülasyon yoğunluklarında %50-96 oranında azalmaya neden olduğu belirlenmiştir (Elekçioğlu ve ark., 1995). Patates kist nematodu (*Globodera rosthochiensis*) ile bulaşık alanlarda 4, 6 ve 8 hafta süreyle yapılan solarizasyon uygulamalarının nematod popülasyonunu azalttığı ve elde edilen ürünlerin kalitelerini arttırdığı tespit edilmiştir (Greco ve ark. 2000). İspanya'nın güneyinde zeytin fidanlıklarında 3 hafta süreyle kök-ur

nematodlarına karşı yapılan toprak solarizasyonunun bu nematodların kontrolünde etkili olduğu belirtilmiştir (Nico ve ark., 2003). Batı Anadolu bölgesinde açık alan çilek yetiştiriciliğinde solarizasyon, tavuk gübresi, metril bromid ve diğer bazı kimyasalların (1,3-dichloropropene + chloropicrin ve metam sodyum) tek ya da kombine olarak yabancıotlar ve toprak kökenli patojenlere karşı kullanımlarının karşılaştırıldığı çalışmada özellikle solarizasyonun tek ya da tavuk gübresi ile veya metam sodyum ile birlikte uygulanmasının metil bromid kadar verimde artışlara neden olduğu tespit edilmiştir (Benlioğlu ve ark., 2005). Yapılan çalışmalar, toprak solarizasyonunun açık alanlarda yetiştiriciliği yapılan gerek tek yıllık gerekse çok yıllık bitkilerde zararlara neden olan farklı bitki paraziti nematod türlerine karşı etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

3.1.2. Solarizasyonun örtü altı alanlarda bitki paraziti nematodlara karşı kullanımı

Toprak solarizasyonu örtü altı üretim alanlarında bitki paraziti nematodlarla alternatif ve etkili bir mücadele şekli olarak tercih edilmektedir. Bitki paraziti nematodların zararlarına karşı tek başına ya da kombine şekilde solarizasyon uygulamaları yapılabilmektedir. Antalya'da örtü altı patlıcan üretiminde sorun olan kök-ur nematodu ve diğer bitki paraziti nematodlara karşı uygulanan toprak solarizasyonunun bitkilerdeki nematod kaynaklı zararların ve topraktaki nematod popülasyonlarının önemli oranlarda azalmasına neden olduğu belirlenmiştir (Göçmen ve Elekçioğlu, 1996). Kıbrıs'ta kök-ur nematodları ile (*Meloidogyne* spp.) bulaşık örtü altı domates üretim alanlarında yapılan bir çalışmada solarizasyonun methyl bromide (MB)'e alternatif olabileceği ve etkin bir şekilde kullanılabilceği belirtilmiştir (Ioannou, 2000). Hırvatistan'da yapılan bir çalışmada hem açık hem de örtü altı üretiminde farklı bitki paraziti nematodlarla (*Meloidogyne*, *Pratylenchus*, *Paratylenchus*, *Tylenchus*, *Tylenchorhynchus* spp.) bulaşık olduğu bilinen üretim alanlarında solarizasyon uygulamaları sonrası söz konusu zararlıların farklı toprak derinliklerindeki popülasyon yoğunluklarını %89-100 oranlarında azalttığı belirtilmiştir (Östrec ve Grubišič, 2003). Türkiye'nin Batı Anadolu Bölgesi'ndeki domates üretimi yapılan seralarda, *Meloidogyne incognita*'ya karşı toprak solarizasyonu, dazomet, tavuk gübresi, zeytin karasuyu ile bunların kombine uygulamalarıyla yapılan çalışmada solarizasyonun tek başına ya da organik katkı maddeleri ile birlikte uygulamalarının nematod zararını azalttığı, verimde ise artışlara neden olduğu tespit edilmiştir (Kaşkavalcı, 2007). Doğu Akdeniz Bölgesinde örtü altı biber yetiştiriciliğinde solarizasyonun *Trichoderma* spp., farklı dozlarda dazomet (300, 400 ve 500 kg ha⁻¹ dozlarında) ve yaş tavuk gübresi (12.5 t ha⁻¹) ile kombine uygulamalarının kök-ur nematodlarıyla mücadelede başarılı bir şekilde kullanıldığı ve metil bromüre alternatif olabileceği belirtilmiştir (Söğüt ve Elekçioğlu, 2007). Doğu Akdeniz Bölgesinde plastik sera ve tünellerde biber ve patlıcanda, açıkta ise çilek yetiştiriciliğinde solarizasyon+yaş sığır gübresi, solarizasyon+düşük doz kimyasal (dazomet) ve antagonist mikroorganizma (*Trichoderma harzianum*) uygulamalarının toprak kökenli patojenler ve bitki paraziti nematodlara karşı etkinliği belirlenmiş ve bu yöntemlerin metil bromüre alternatif olabilecekleri rapor edilmiştir (Yücel ve ark., 2007). İtalya'da örtüaltı domates ve kavun üretiminde kök-ur nematodlarına karşı tek yıl yapılan solarizasyon uygulamalarının sınırlı bir etkinliğe sahip olduğu ancak iki ya

da üç yıl üst üste yapılan uygulamaların nematod popülasyonlarını neredeyse tamamen baskıladığı belirtilmiştir (Candido ve ark., 2008). Libya'da *Meloidogyne javanica*, *Aphelenchus avenae* Bastian, 1865, *Trichodorus* sp. gibi bitki paraziti nematodlarla bulaşık olduğu bilinen ve sebze üretimi yapılan iki farklı serada farklı süreler boyunca (30 ve 45 gün) gerçekleştirilen solarizasyon uygulamaları sonrası söz konusu zararlıların etkili bir şekilde kontrol edildiği rapor edilmiştir (Zaid ve ark., 2014). Mersin'de kök-ur nematodları ve toprak kökenli patojenlerle (*Fusarium* spp., *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid. (1947) ve *Rhizoctonia solani* J.G. Kühn, 1858) bulaşık olduğu bilinen domates serası ve çilek tarlalarında dikim öncesi solarizasyon ve düşük doz fumigant uygulamalarının hastalık çıkışı, ırlanma ve verime etkilerinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmada, kombine uygulamaların hastalık çıkışını ve ırlanma oranını azaltmada etkin olarak kullanılabilceği belirtilmiştir (Yücel ve ark., 2015). Suudi Arabistan'da örtü altı taze fasulye üretiminde zararlara neden olan kök-ur nematodlarına [*M. incognita* (Irk-2)] karşı farklı mücadele tekniklerinin [kimyasal (fumigant-Dazomet, fumigant olmayan-Fenamifos), biyolojik (yumurta paraziti fungus, *Paecilomyces lilacinus* (Thom) Samson (1974) ve mikorizal fungus *Glomus* sp.), fiziksel (toprak solarizasyonu), ve kültürel (tavuk gübresi ve üre)] karşılaştırıldığı çalışmada ise fumigant olmayan kimyasal (Fenamifos) uygulamaları ya da toprak solarizasyonunun en etkili tekniklerin olduğu tespit edilmiştir (Al-Hazmi ve ark., 2017). Ülkemizde örtü altı biber yetiştiriciliğinde solarizasyonun azaltılmış metam-sodyum ile birlikte kök-ur nematodlarına karşı uygulanması sonucunda %98,8-234,5 oranında verim artışı sağlandığı belirlenmiştir (Özarslandan ve ark., 2019). Bu çalışmalardan da anlaşılacağı üzere örtü altı üretiminin açık alanlardaki tarımsal üretime göre daha kontrollü koşullar sunması bitki paraziti nematodlara karşı toprak solarizasyonunun daha etkin bir şekilde kullanılmasına imkân sunmaktadır. Bu nedenle toprak solarizasyonu bitki paraziti nematodlarla mücadelede önemli bir teknik olarak kabul edilmektedir.

3.2. Bitki paraziti nematodlarla etkileşimde olan organizmalara etkileri

Toprak solarizasyonunda öncelikli hedef tarımsal üretimde önemli zararlara neden olan hastalık etmenleri, zararlılar ve yabancı otlardır. Toprakta, toprak kalitesinin sürekliliği için gerekli olan ve yapısının oluşumunda kritik rol oynayan çok çeşitli mikroorganizmalar bulunmaktadır (Scopa ve Dumontet, 2007). Bu canlılar toprak organik maddesinin yaklaşık %1-5'ini oluşturmaktadır. Ancak mineral madde döngüsünde ve organik maddelerin ayrışmasında önemli görevlere sahiptirler (Raison ve McGarity, 1979; Palese ve ark., 2004; Scopa ve Dumontet, 2007). Her ne kadar solarizasyonda asıl hedef olmasalar da özellikle bu süreçte ulaşılan 60°C gibi yüksek sıcaklıkların mikrobiyal biyokütle için zararlı olduğu tespit edilmiştir (Palese ve ark., 2004). Ancak toprak solarizasyonu diğer toprak ilaçlama yöntemlerine kıyasla toprak mikroflorası üzerinde daha seçici olabilmektedir (Gamliel ve Katan, 1991). Ayrıca mikorizal funguslar, bitki patojenlerini infekte edebilen fungus ve bakteriler gibi birçok faydalı organizmanın solarizasyondan etkilenmediği ya da daha sonra toprakta çok hızlı kolonize olabildikleri bildirilmiştir (Katan, 1981; Chen ve ark., 1991; Stapleton ve ark., 2019). Özellikle *Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma* türü funguslar, bakteri ve aktinomiset kolonilerinin termofilik ve termotolerant mikroorganizma türlerinin solarize olmayan topraklara kıyasla solarize topraklarda önemli ölçüde arttığı

belirtilmektedir (Gamliel ve Katan, 1991; Sharma ve Sharma, 2002). Dolayısıyla solarizasyon sonrası baskın hale gelebilen bu saprofit organizmalar bitki patojenlerini önemli ölçüde baskılayabilmektedir (DeVay ve Katan, 1991). Toprak solarizasyonu serbest yaşayan nematodların popülasyonlarını da önemli ölçüde azaltabilmektedir (D'Addabbo ve ark., 2010; Marahatta ve ark., 2012). Ancak tıpkı diğer saprofit olmayan toprak mikroorganizmaları gibi bu nematodların da solarizasyon sürecinde hayatta kalma ve sonrasında tekrardan kolonize olma durumlarının bitki paraziti nematodlara göre daha iyi olduğu belirtilmektedir (D'Addabbo ve ark., 2010). Ayrıca solarizasyonla birlikte uygulanan organik madde takviyelerinin bu canlıların gelişimlerine önemli derecede katkıda bulunduğu da tespit edilmiştir (Scopa ve Dumontet, 2007). Dolayısıyla solarizasyonda yapılacak olan bu gibi uygulamalarla hedef dışı canlıların en az düzeyde etkilenmesi ve solarizasyon sonrası oluşan toprak ortamında hızlı bir şekilde kolonize olmaları sağlanabilmektedir. Böylelikle oluşabilecek olan olumsuzlukların en az düzeye indirilmesi hedeflenmektedir.

3.3. Bitki paraziti nematodların yaşadığı ortam üzerine etkileri

Solarizasyon topraktaki birçok biyotik ve abiyotik etmen üzerinde etkilidir. Bitki gelişimine de doğrudan ve dolaylı olarak olumlu etkide bulunmaktadır (Katan, 1981; Chen ve ark., 1991). Bu etki ise artan büyüme tepkisi [Increased Growth Response (IGR)] olarak tanımlanmaktadır (Katan, 1981). Bu etkinin solarizasyonun özellikle bitki besin maddeleri üzerinde neden olduğu farklı süreçlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Solarizasyon uygulamasıyla bitkilerde gözlemlenen artan büyüme tepkisi, nematodların neden olduğu zararların bitkiler tarafından tolere edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca bu uygulamanın bitki besin maddelerinin bitkiler tarafından alınabilir formlarının daha uzun süre toprakta bulunmasına imkân sunması bitkilerin daha sağlıklı gelişmelerini sağlamaktadır. Bilindiği gibi toprağa uygulanan birçok besin maddesi toprak partikülleri tarafından tutulmakta ve bitkiler için kullanılamaz hale gelmektedir. Ayrıca gübre maliyetlerinin yüksekliliği, çevre ve insan sağlığına olumsuz etkileri ve aynı zamanda toprak sağlığı ve kalitesine olan etkileri nedeniyle bitki besleme amacıyla toprağa uygulanan her bir maddenin önemi artmaktadır. Bu nedenle solarizasyon sürecinde rizosfer bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıklar, toprak partikülleri tarafından tutulan ve bitkiler için kullanılamaz hale getirilen bu besin maddelerinin salınımına ve dolayısıyla bitkiler için kullanılabilir forma geçmesine yardımcı olmaktadır (Chen ve Katan, 1980; Ahmad ve ark., 1996; Yan ve ark., 2012). Solarizasyonun toprağın kimyasal bileşimi üzerindeki bu etkisi özellikle bitkilerin gelişimi için önemli olan NO₃⁻, NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ ve Cl⁻ gibi elementlerin topraktaki konsantrasyonlarının artmasında veya söz konusu kimyasalların bitki için yararlı forma dönüştürülmesinde gözlenmektedir (Chen ve Katan, 1980; Ahmad ve ark., 1996). Ancak S, Mn, Zn, Fe ve Cu gibi elementlerin ise solarizasyon sonrası topraktaki konsantrasyonlarının düştüğü belirtilmektedir (Grünzweig ve ark., 1999). Solarizasyonun toprak kimyasal bileşenleri üzerindeki bu etkilerinin yanında toprak pH'sı ve toprağın elektriksel iletkenliği [electrical conductivity (EC)] üzerinde de etkileri olabilmektedir. Özellikle solarizasyon müddetince çözünen ya da bitkiler için alınabilir forma dönüşen bitki besin maddeleri (NO₃⁻, Mg²⁺, Cl⁻ vs.) nedeniyle elektriksel iletkenlik artarken, organik madde ve diğer toprak bileşenlerinde gözlenen değişimler nedeniyle de pH

düşebilmektedir (Grünzweig ve ark., 1999). Ayrıca solarizasyon organik maddelerin parçalanmasını hızlandırmakta bu da toprak yapısının iyileşmesini sağlamaktadır (Koçar ve ark., 2006; Kapoor, 2013). Öte yandan toprağa solarizasyonla birlikte uygulanan organik maddeler (hayvan gübreleri ya da bitki artıkları) bozulma işlemleri esnasında hem ısı oluşum hızını hem de toprağın ısı taşıma kapasitesini (the heat-carrying capacity) artırmaktadır (Kapoor, 2013). Bu da daha etkin bir solarizasyon uygulamasına imkân sunmaktadır (Grünzweig ve ark. 1999; Gelsomino ve ark., 2006). Sonuç olarak solarizasyonun topraktaki besin maddelerini bitkilerin alabileceği forma dönüştürmesi ya da toprak yapısını bitki gelişimi için daha uygun hale getirmesi bitki verimliliğinde olumlu etkilere neden olmaktadır (Kurt ve Emir, 2004; Zayed ve ark., 2013). Bu nedenle solarizasyon sonrası rizosfer bölgesinde oluşan ortamın bitkilerin gelişmesinde ve verimlerinin artmasında etkili olduğu belirtilmektedir (Safdar ve ark., 2021).

3.4. Toprak solarizasyonunun etkinliğini arttıran uygulamalar

Toprak solarizasyonunun etkinliği, uygulama esnasında daha yüksek sıcaklık derecelerine ulaşılabilmesi ve bu sıcaklık değerlerinde toprağın daha uzun süre kalması ile sağlanmaktadır. Bu durum solarizasyonla birlikte yapılan bazı uygulamalarla gerçekleştirilebilmektedir. Bunlardan ilki toprağa solarizasyon öncesinde uygulanan çeşitli organik (hayvan gübresi, bitki artıkları vs.) maddelerdir. Bu maddelerin uygulanması normal solarizasyon uygulamalarına göre toprak sıcaklığını 1-3°C yükseltebilmekte, ulaşılan sıcaklıklarda daha uzun sürelerde kalınmasına imkan sağlanmakta ve ayrıca organik maddelerin bozulmasıyla salınan biyotoksik özellikteki çeşitli gazlarla da etkinlik arttırılabilmektedir (Stapleton, 1997; Gamliel ve ark., 2000; Rubin ve ark., 2007; Pokharel, 2011). Özellikle toprağa uygulanan hayvan gübreleri ya da bitki kalıntılarının biyolojik çözünmeleri sonucunda oluşan amonyak, Metantiyol (methanethiol), dimetil sülfür, alil izotiyosiyanat (allylisothiocyanate), fenil izotiyosiyanat (phenylisothiocyanate) ve aldehit (aldehyde) gibi biyosidal özellikteki bu gazlar solarizasyonun etkinliği için çok önemlidir. Çünkü toprak nemi ile birlikte oluşan sıcaklığın yeterli etkinliği gösteremediği ya da ulaşmadığı noktalarda üretilen bu biyosidal gazlar vasıtasıyla solarizasyonun etkisi artmaktadır (Gamliel ve ark., 2000; Pokharel, 2011). Amonyakın nematodlar başta olmak üzere birçok mikrobiyal etmenin toprakta gelişimini ve hayatta kalmasını olumsuz yönde etkilediği belirtilmektedir (Rodriguez-Kabana, 1986; Gamliel ve ark., 2000). Bununla birlikte *Meloidogyne* spp. *Heterodera* spp. ve *Helicotylenchus* spp. gibi bitki paraziti nematodlara karşı karanj, neem, hint fasulyesi, yabani hardal, pamuk tohumu ve susam gibi bazı azotlu bitkilerin solarizasyonda kullanımı ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Rodriguez-Kabana, 1986). Ayrıca hayvan gübreleri ile (tavuk, inek gübreleri vs.) yapılan çalışmalarda söz konusu uygulamaların sadece toprak kökenli hastalık etmenlerinin (*Fusarium* spp., *Streptomyces scabies* Lambert and Loria, *Verticillium dahliae* Kleb., (1913) gibi) değil ayrıca bitki paraziti nematodların popülasyonlarını önemli derecede azalttığı tespit edilmiştir (Conn ve Lazarovits, 1999). Solarizasyonla uygulanan bu organik maddelerin birçok yararlı toprak mikroorganizmasını ve enzimatik aktivitelerini sıcaklığın zararlı etkilerinden koruduğu da belirtilmektedir (Pokharel, 2011). Solarizasyonun etkinliğini arttıran diğer bir uygulama ise solarizasyona çeşitli kimyasalların dahil edilmesidir. Bu kimyasallar özellikle

solarizasyonun yeterli etkiyi gösteremediği toprak kökenli hastalık ve zararlılardaki etkisini ve solarizasyonun etki edeceği toprak derinliğini arttırabilmektedir (McSorley ve ark., 1999). Bu amaçla kullanılan pek çok kimyasal olsa da özellikle fumigant özellikte olan kloropikrin (chloropicrin), dazomet, dimetil disülfür (dimethyl disulfide), metam potasyum (metam potassium), metam sodyum (metam sodium), 1,3 dikloropropen (1,3-dichloropropene) gibi kimyasallar solarizasyonda etkili bir şekilde kullanılabilir (Benlioğlu ve ark., 2005; D'Addabbo ve ark., 2010; Özarslandan ve ark., 2019; Yücel ve Günaçtı, 2019). Ayrıca fumigant özelliği olmayan granüler formdaki kimyasalların da solarizasyonla birlikte etkili olabilecekleri belirlenmiştir (Lamberti ve ark., 2000). Ayrıca solarizasyonla birlikte kullanılan bazı biyolojik preparatların solarizasyonun etkisinin artmasında önemli olduğu belirtilmektedir. Özellikle solarizasyon sonrası uygulamalarda *Trichoderma harzianum* Rifai, (1969), *Streptomyces* spp., *Bacillus firmus* Bredemann and Werner 1933, *Purpureocillium lilacinum* (*Paecilomyces lilacinus*) ve floresan *Pseudomonas* strainlerinin toprak kökenli birçok hastalık ve zararlı etmene (*Pythium* spp., *Fusarium* spp., *Rhizoctonia solani*, *Sclerotium rolfsii* ve *Meloidogyne* spp. gibi) karşı etkin bir şekilde kullanıldığı bilinmektedir (McGovern ve ark., 2002; Giannakou ve ark., 2007; D'Addabbo ve ark., 2010). Solarizasyon sonrası bu biyokontrol ajanları ile yapılan uygulamalar bitki patojeni hastalık ve zararlı etmenlerin topraktaki kolonizasyonlarını baskılayabilmekte ve solarizasyonun topraktaki etkisinin daha uzun süre devam etmesine imkan sunmaktadır (D'Addabbo ve ark., 2010; Çatalıkaya ve Devran, 2019). Dolayısıyla bu şekildeki entegre uygulamalar toprak solarizasyonu ile birlikte tercih edilmektedir.

4. Sonuç

Bitki paraziti nematodlar, tarımsal ürünlerde verim ve kaliteyi önemli ölçüde düşürmekte ve kimi durumlarda tarımsal üretimi sürdürülemez hale getirebilmektedir. Ayrıca toprakta yaşamaları nedeniyle bunlara karşı mücadele diğer zararlılara göre daha zor ve maliyetli olabilmektedir. Bu nedenle bitki paraziti nematodlar gibi toprak altı zararlıları ile yapılacak mücadelelerde en uygun yöntemlerin entegre bir şekilde kullanımı gerekmektedir. Toprak solarizasyonu tek başına uygulanabileceği gibi, kimyasallar ve biyolojik kontrol ajanlarıyla veya başka mücadele yöntemleriyle de entegre olabilmektedir. Toprak solarizasyonun başarılı olması için belirlenen prensipler çerçevesinde, üreticiler tarafından uygulamalar yapılmalıdır. Toprak solarizasyonunun ekim-dikim öncesi ve sonrası, tarla, meyve bahçesi, fidanlık, sera ve bahçe üretimlerinde kullanımı mümkündür. Bu da solarizasyonun çok geniş bir etkinliğe sahip olduğunu göstermektedir (D'Addabbo ve ark., 2010). Ayrıca birçok hastalık ve zararlıyla etkili bir mücadele imkanı sunmasıyla sürdürülebilir bir üretim yapılmasını sağlamaktadır (Giannakou ve ark., 2007). Özellikle toprak içerisinde dikey yönlü hareket edebilme özelliğine sahip olan bitki paraziti nematodlarla mücadelede solarizasyon, entegre mücadele içerisinde uygulandığında etkili ve sürdürülebilir sonuçlar elde edilebilmektedir (Sauerborn ve ark., 1990; Candido ve ark., 2008; Çatalıkaya ve Devran, 2019). Buna karşın toprak solarizasyonu bitki paraziti nematodlarla mücadelede sihirli bir çözüm değildir. Ancak uygun koşullar altında ve yeterli bir sürede uygulanmasıyla, hastalık etmeni ve zararlı kontrolü için etkili, bitkilerin büyümesini ve verimini arttırabilen, ekonomik olarak kabul edilebilir ve çevresel olarak güvenli bir yöntemdir. Fakat

toprak solarizasyonunun bazı coğrafik bölgelerle sınırlı ve yılın belirli dönemlerinde uygulanabilir olması, ayrıca geniş alanlardaki uygulamalarının çok ekonomik olmaması gibi bazı olumsuzlukları bulunmaktadır. Dolayısıyla yapılan uygulamalarda bu olumsuzlukları en aza indirilebilecek entegre zararlı yönetim planlamalarının yapılmasıyla solarizasyon uygulamalarından elde edilen faydanın artırılması sağlanabilecektir.

Kaynaklar

- Ahmad, Y., Hameed, A., Aslam, M., 1996, Effect of soil solarization on corn stalk rot, *Plant and Soil*, 179, 17-24.
- Al-Hazmi, A. S., Dawabeh, A. A. M., Al-Nadhari, S. N., Al-Yahya, F. A. 2017, Comparative efficacy of different approaches to managing *Meloidogyne incognita* on green bean, *Saudi Journal of Biological Sciences*, 24, 149-154.
- Baker, K. F. and Cook, R. J., 1974, Biological control of plant pathogens. *W.H. Freeman & Co. Ltd.*, San Francisco, California, pp 433.
- Barbercheck, M. E. and Von Broembsen, S. L., 1986, Effects of soil solarization on plant-parasitic nematodes and *Phytophthora cinnamomi* in South Africa, *Plant Disease*, 70, 945-950.
- Benlioğlu, S., Boz, Ö., Yıldız, A., Kaşkavalcı, G. and Benlioğlu, K., 2005, Alternative soil solarization treatments for the control of soil-borne disease and weeds of strawberry in the western Anatolia of Turkey, *Journal of Phytopathology*, 153, 423-430.
- Candido, V., D'Addabbo, T., Basile, M., Castronuovo, D. and Miccolis, V., 2008, Greenhouse soil solarization: Effect on weeds, nematodes and yield of tomato and melon. *Agronomy for Sustainable Development*, 28, 221-230.
- Chellemi, D. O., Olson, S. M., Scott, J. W., Mitchell, D. J., and McSorley, R., 1993, Reduction of phytoparasitic nematodes on tomato by soil solarization and genotype, *Journal of Nematology*, 25(4S), 800-805.
- Chen, Y. and Katan, J., 1980, Effect of solar heating of soils by transparent polyethylene mulching on their chemical properties, *Soil Science*, 130(5), 271-277.
- Chen, Y., Gamliel, A., Stapleton, J. J., and Aviad, T., 1991, Chemical, physical and microbial changes related to plant growth in disinfested soils, Katan, J., and DeVay, J. E. (Eds.). *CRC Press*, Boca Raton, Florida, pp 103-129.
- Chen, Y., Katan, J., Gamliel, A., Aviad, T., and Schnitzer, M., 2000, Involvement of soluble organic matter in increased plant growth in solarized soils, *Biology and Fertility of Soils*, 32, 28-34.
- Conn, K. L. and Lazarovits, G., 1999, Impact of animal manures on verticillium wilt, potato scab, and soil microbial populations, *Canadian Journal of Plant Pathology*, 21, 81-92.
- Çatalkaya, M. and Devran, Z., 2019, Integrated management of *Mi-1* virulent *Meloidogyne incognita* (Kofoid & White, 1919) Chitwood, 1949 (Tylenchida: Meloidogynidae) in greenhouse tomatoes, *Turkish Journal of Entomology*, 43(2), 157-169.
- D'Addabbo, T., Miccolis, V., Basile, M., and Candido, V., 2010. Soil solarization and sustainable agriculture, In: Lichtfouse, E., (Eds.), *Sociology, organic farming, climate change and soil science, sustainable agriculture reviews 3*, Springer Science+Business Media B.V., London, pp. 217-274.
- Decreamer, W. and Hunt, D. J., 2013, Structure and classification, In: Perry, R. N. and Moens, M., (Eds), *Plant Nematology*, 2nd edition. *CAB International: Boston, MA, USA* pp. 3-37.
- DeVay, J. E., and Katan, J., 1991, Mechanisms of pathogen control in solarized soils, In: DeVay, J. E. and Katan, J., (Eds), *Soil solarization*, *CRC Press*, Boca Raton, Florida, pp. 87-101.
- Di Vito, M., Greco, N., and Saxena, M. C., 1991, Effectiveness of soil solarization for control of *Heterodera ciceri* and *Pratylenchus thornei* on chickpea in Syria, *Nematologia Mediterranea*, 19(1), 109-111.
- Elekçioğlu, İ. H., Gözel, U., Uygun, N., and Erkiş, A., 1995, Toprak solarizasyonunun nematodlar üzerindeki etkilerinin araştırılması, *Türkiye Entomoloji Dergisi*, 19(3), 185-192.
- Elmore, C. L., 1991, Cost of soil solarization, In: DeVay, J. E., Stapleton, J. J. and Elmore, C. L. (Eds), *Soil solarization*, Proceedings of the 1st International Conference Soil Solarization, Aman, Jordan, FAO plant production and protection paper, 19-25 February 1990, 109, 351-360.
- Evans, K., 1991, Lethal temperatures for eggs of *Globodera rostochiensis*, determined by staining with New Blue R, *Nematologica*, 37, 225-229.
- Gamliel, A., and Katan, J., 1991, Involvement of fluorescent pseudomonads and other microorganisms in increased growth response of plants in solarized soils, *Phytopathology*, 81, 494-502.
- Gamliel, A., Austerweil, M., and Kritzman, G., 2000, Non-chemical approach to soilborne pest management-organic amendments, *Crop Protection*, 19, 847-853.
- Gelsomino, A., Badalucco, L., Landi, L., and Cacco, G., 2006, Soil carbon, nitrogen and phosphorus dynamics as affected by solarization alone or combined with organic amendment, *Plant and Soil*, 279(1-2), 307-325.
- Giannakou, I. O., Anastasiadis, I. A., Gowen, S. R., and Prophetou-Athanasiadou, D. A., 2007, Effects of a non-chemical nematicide combined with soil solarization for the control of root-knot nematodes, *Crop Protection*, 26(11), 1644-1654.
- Giblin-Davis, R. M., and Verkade, S. D., 1988, Solarization for nematode disinfestation of small volumes of soil, *Journal of Nematology*, 2, 41-45.
- Göçmen, H. ve Elekçioğlu, İ. H., 1996, Antalya'da toprak solarizasyonunun seralarda *Meloidogyne Goeldi*, 1887 (Tylenchida, Meloidogynidae) türleri üzerindeki etkilerinin araştırılması, *Türkiye Entomoloji Dergisi*, 20(1), 81-86.
- Greco, N., Brandonisio, A., and Elia, F., 1985, Control of *Ditylenchus dipsaci*, *Heterodera carotae* and *Meloidogyne javanica* by solarization, *Nematologia Mediterranea*, 13, 191-197.
- Greco, N., D'Addabbo, T., Sasanelli, N., Senhorst, J. W., Stea, V., and Brandonisio, A., 1998, Effect of temperature and exposure times on the mortality of the carrot cyst nematode *Heterodera carotae*, *International Journal of Pest Management*, 44, 99-107.
- Greco, N., Brandonisio, A., and Dangelico, A., 2000, Control of the potato cyst nematode, *Globodera rostochiensis*, with soil solarization and nematicides, *Nematologia Mediterranea*, 28, 93-99.
- Grünzweig, J. M., Katan, J., Ben-Tal, Y., and Rabinowitch, H. D., 1999, The role of mineral nutrients in the increased growth response of tomato plants in solarized soil, *Plant and Soil*, 206, 21-27.
- Hadar, E., Sofer, S., Brosh, S., Mordechai, M., Cohn, E., and Katan, Y., 1983, Control of clover cyst nematode on carnation, *Hadasseh*, 63, 1698-1700.
- Hasing, J. E., 2002, Agroeconomic effect of soil solarization on fall-planted lettuce, Master's Thesis, *Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College*, 70 p.,

- https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_theses/2362
- Hasson, A. M., Hassaballah, T., Hussain, R., and Abbass, L., 1987, Effect of solar sterilization on nitrification in soil. *Journal of Plant Nutrition*, *Journal of Plant Nutrition*, 10, 1805-1809.
- Heald, C. M. and Robinson, A. F. 1987, Effect of soil solarization on *Rotylenchulus reniformis* in the lower Rio Grande Valley of Texas, *Journal of Nematology*, 19, 93-103.
- Hussey, R. S., 1985, Host parasite relationship and associated physiological changes, In: Sasser, J. N. and Carter, C. C. (Eds). An advanced treatise on Meloidogyne, Vol. I. biology and control. *North Carolina State University Graphics*, Raleigh, North Carolina, pp 143-153.
- Ioannou, N., 2000, Soil solarization as a substitute for methyl bromide fumigation in greenhouse tomato production in Cyprus, *Phytoparasitica*, 28, 248-256.
- Jones, J. T., Haegeman, A., Danchin, E. G. J., Gaur, H. S., Helder, J., Jones, M. G. K., Kikuchi, T., Manzanilla-López, R., Palomares-Rius, J. E., Wesemael, W. M. L., and Perry, R. N., 2013, Top 10 plant parasitic nematodes in molecular plant pathology, *Molecular Plant Pathology*, 14(9), 946-961.
- Kapoor, R. T., 2013, Soil Solarization: Eco-friendly technology for farmers in agriculture for pest management, *2nd International Conference on Advances in Biological and Pharmaceutical Sciences*, ICABPS 2013, Hong Kong, 17-18.
- Karssen, G., Decraemer, W., and Moens, M. 2013, Root-knot nematodes, In: Perry, R. N. and Moens, M., (Eds), *Plant Nematology*, 2nd edition, *CAB International: Boston*, MA, USA pp. 73-108.
- Kaşkavalcı, G., 2007, Effects of soil solarization and organic amendment treatments for controlling *Meloidogyne incognita* in tomato cultivars in Western Anatolia, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 31, 159-167.
- Katan, J., Greenberger, A., Alon, H., and Grinstein, A., 1976, Solar heating by polyethylene mulching for the control of disease caused by soil-borne pathogens, *Phytopathology*, 66, 683-688.
- Katan, J., 1981, Solar heating (solarization) of soil for control soilborne pests, *Annual review of phytopathology*, 19, 211-236.
- Katan, J., 1987, Soil solarization. In: Chet, I. (Eds), *Innovative approaches to plant disease control*, *New York: John Wiley & Sons*, pp. 77-105.
- Katan, J., 2014, Three decades of soil solarization: achievements and limitations, *Acta horticulturae*, 1015, 69-78.
- Koçar, G., Okur, B., ve Şafak, S., 2006, Toprak solarizasyonunda kullanılan değişik örtü malzemelerinin toprak sıcaklığı ile bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerine olan etkileri, *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 43(2), 109-120.
- Kumar, A., Azad, C. S., Kumar, R., Kumar, R., and Imran, M., 2017, Soil solarization: An eco-friendly and effective disease management approach for soil borne disease, *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, SP1, 513-515.
- Kurt, S., and Emir, B., 2004, Effect of soil solarization, chicken litter and viscera on populations of soilborne fungal pathogen and pepper growth, *Plant Pathology*, 13, 118-124.
- Lamberti, F., D'addabbo, T., Greco, P., Carella, A., and De Cosmis, P., 2000, Management of root-knot nematodes by combination of soil solarization and fenamiphos in southern Italy. *Nematologia Mediterranea*, 28, 31-45.
- LaMondia, J. A., and Brodie, B. B., 1984, Control of *Globodera rostochiensis* by solar heat, *Plant Disease*, 68, 474-476.
- Linford, M. B., and Oliveria, J. M., 1940. *Rotylenchulus reniformis* nov. gen., n.sp., a nematode parasite of roots. *Proceedings of the Helminthological Society of Washington*, 7, 35-42.
- Marahatta, S. P., Wang, K. H., Sipes, B. S., and Hooks, C. R. R., 2012, Effects of integration of sunn hemp and soil solarization on plant-parasitic and free-living nematodes, *Journal of Nematology*, 44(1), 72-79.
- McGovern, R. J., McSorley, R., and Bell, M. L., 2002, Reduction of landscape pathogens in Florida by soil solarization, *Plant Disease*, 86, 1388-1395.
- McSorley, R., Ozores-Hampton, M., Stansly, P. A., and Conner, J. M., 1999, Nematode management, soil fertility, and yield in organic vegetable production, *Nematropica*, 29, 205-13.
- Nico, A. I., Jiménez-Díaz, R. M., and Castillo, P., 2003, Solarization of soil in piles for the control of *Meloidogyne incognita* in olive nurseries in southern Spain, *Plant Pathology*, 52, 770-778.
- Oštrec, L., and Grubišič, D., 2003, Effects of soil solarization on nematodes in Croatia, *Journal of Pesticide Sciences*, 76, 139-144.
- Özarslandan, A., Dinçer, D., and Bozbuğa, R., 2019, Effect of combination of solarization and soil fumigation on root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) (Nematoda: Meloidogynidae) in greenhouses, *KSU Journal of Agriculture and Nature*, 22(1), 45-51.
- Palese, A. M., Giovannini, G., Lucchese, S., and Dumontet, S., 2004, Effect of fire on soil C, N, and microbial biomass, *Agronomie*, 24, 47-53.
- Pokharel, R., 2011, Soil solarization, an alternative to soil fumigants. *Colorado State University, Western Colorado Research Center*, Crop series, Soils, Fact sheet no, 0.505.
- Porter, I. J. and Merriman, P. R., 1983, Effect of solarization of soil on nematode and fungal pathogens at two sites in Victoria, *Soil Biology and Biochemistry*, 15, 39-44.
- Raison, R. J. and McGarity, J. W., 1979, Changes in carbon and nitrogen fractions of graminaceous straws after burning, *Plant and Soil*, 51, 311-318.
- Rodriguez-Kabana, R., 1986, Organic and inorganic nitrogen amendments to soil as nematode suppressants, *Journal of Nematology*, 18, 129-135.
- Rubin, B., Cohen, O., and Gamliel, A., 2007, Soil solarization: An environmentally-friendly alternative, *Technical Workshop on non-chemical alternatives to replace methyl bromide as a soil fumigant*, Budapest, Hungary, 71-78.
- Safdar, M. E., Safdar, M., Ali, A., Farooq, N., Sarwar, G., Hassan, I., Nadeem, M. A., and Abbas, T., 2021, Soil solarization improves soil fertility in addition to weed management in sesame under subtropical conditions of Pakistan, *Advances in Weed Science*, 39, e020219464.
- Sasanelli, N., Konrat, A., Migunova, V., Toderas, I., Iurcu-Straistaru, E., Rusu, S., Bivol, A., Andoni, C., and Veronico, P., 2021, Review on control methods against plant parasitic nematodes applied in southern member states (C Zone) of the European Union, *Agriculture*, 11, 602.
- Sauerborn, J., Saxena, M. C., and Masri, H., 1990, Control of faba bean nematodes by soil solarization in Syria, *Arab Journal of Plant Protection*, 8(1), 38-40.
- Scopa, A. and Dumontet, S., 2007, Soil solarization: Effects on soil microbiological parameters, *Journal of Plant Nutrition*, 30, 537-547.

- Sharma, M. and Sharma, S. K., 2002, Effect of soil solarization on soil microflora with special reference to *Dematophora necatrix* in apple nurseries, *Indian Phytopathology*, 55(2), 158-162.
- Singh, Y., Ojha, R. K., and Chawla, S., 2012, Soil solarization: An ecofriendly disease management strategy, In: Singh, V. K., Singh, Y., and Singh, A. (Eds), *Eco-friendly innovative approaches in plant disease management*, IBD Publishers & Distributors, India, pp. 55-70.
- Stapleton, J. J. and DeVay, J. E., 1986, Soil solarization: A non-chemical approach for management of plant pathogens and pests, *Crop Protection*, 5, 190-198.
- Stapleton, J. J. and DeVay, J. E., 1995, Soil solarization: A natural mechanism of integrated pest management, In: Reuveni, R. (Eds), *Novel Approaches to Integrated Pest Management*, Lewis Publishers, Boca Raton, pp. 309-322.
- Stapleton, J. J., 1997, Soil Solarization: An alternative soil disinfection strategy comes of age, *UC Plant Protection Quarterly*, 7, 1-5.
- Stapleton, J. J., 2000, Soil solarization in various agricultural production systems, *Crop Protection*, 19, 837-841.
- Stapleton, J. J., Marshall, M. N., VanderGheynst, J. S., 2006, Response of phytoparasitic nematodes and microbial soil community structure to high-temperature tent solarization for disinfecting container nursery soil, California Conference on Biological Control V (CCBC V), Riverside, California, USA, 25 - 27 July, pp. 184-187.
- Stapleton, J. J., Wilen, C. A., Molinar, M. H., 2019, UC IPM notes: Soil solarization for gardens and landscapes, *UC ANR Publication*, 74145, Oakland, CA.
- Söğüt, M. A. and Elekçioğlu, İ. H., 2007, Methyl bromide alternatives for controlling *Meloidogyne incognita* in pepper cultivars in the Eastern Mediterranean Region of Turkey, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 31, 31-40.
- Subedi, P., Gattoni, K., Liu, W., Lawrence, K. S., Park, S. W., 2020, Current utility of plant growth-promoting rhizobacteria as biological control agents towards plant-parasitic nematodes, *Plants*, 9(9), 1167.
- Viaene, N., Coyne, D. L., and Davies, K. G. 2013, Biological and cultural management, In: Perry, R.N. and Moens, M., (Eds), *Plant Nematology*, CAB International, Wallingford, Oxfordshire, pp. 384-404.
- Wang, K. H. and McSorley, R., 2008, Exposure time to lethal temperature for *Meloidogyne incognita* suppression and its implication for soil solarization, *Journal of Nematology*, 40, 7-12.
- Yan, Q., Duan, Z., Mao, J., Li, X., and Dong, F., 2012, Effect of root-zone temperature and N, P, and K, supplies on nutrient uptake of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings in hydroponics, *Soil Science and Plant Nutrition*, 58(6), 707-717.
- Yücel, S., Elekçioğlu, İ. H., Can, C., Söğüt, M. A., and Özarslandan, A., 2007 Alternative treatments to Methyl Bromide in the Eastern Mediterranean Region of Turkey, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 31(1), 47-53.
- Yücel, S., Özarslandan, A., ve Can, C., 2015, Örtü Altı sebze ve çilek yetiştiriciliğinde toprak dezenfeksiyonu uygulamaları, *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 19(3), 144-150.
- Yücel, S. ve Günaçtı, H., 2019, Toprak solarizasyonu ve fumigant uygulamalarının domates ve çilek seralarında fungal kök hastalıklarına etkisi, *Toprak Su Dergisi*, 8(2), 107-113.
- Zaid, A. M., Esmael, W., Bashie, F., and Gajeam, M., 2014, Control of plant parasitic nematodes and soil borne fungal pathogens by soil solarization in northern region of Libya, *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*, 16(1), 303-310.
- Zayed, M. S., Hassanein, M. K. K., Esa, N. H., and Abdallah, M. M. F., 2013, Productivity of pepper crop (*Capsicum annum* L.) as affected by organic fertilizer, soil, and endomycorrhizae, *Annals of Agricultural Sciences*, 58(2), 131-137.

Mevcut sayıya ait içindekiler listesine [DergiPark](#) üzerinden ulaşılabilir

Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi

Dergi web sayfası: dergipark.org.tr/tr/pub/sufefd

Derleme Makale

İki-Boyutlu Nanomalzemeler: Özellikleri, Sentez Yöntemleri ve Uygulama Alanları Üzerine Genel Bir Bakış

Sadık Çoğal^{a,1,*}^a Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Burdur

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi

Geliş 15 Nisan 2022

Revizyon 15 Haziran 2022

Kabul 24 Eylül 2022

Anahtar Kelimeler

Grafen

Hekzagonal Bor Nitrür

Geçiş Metal Dikalkojenit

Mxene

2D-pniktojen

ÖZ

İki-Boyutlu nanomalzemeler, sahip oldukları eşsiz özelliklerden dolayı son yirmi yılda oldukça fazla dikkat çekmişlerdir. Bu malzemeler, sadece nano ölçeğin sağladığı sıra dışı özelliklerden değil aynı zamanda atom kalınlığına kadar inebilen yapıları nedeniyle çok yönlü özelliklere sahiptirler. İki-boyutlu nanomalzemeler elde edildikleri katmanlı formlarından çok daha üstün elektronik, optik, mekanik, vb. özellikler sergilemektedirler. Bu özelliklerinden dolayı, bu nanomalzemeler enerji üretimi/depolama, optoelektronik uygulamalar, sensör geliştirme, çeşitli biyomedikal uygulamalar, kataliz, vb. birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Bu derleme çalışmasında, başta grafen olmak üzere çeşitli iki-boyutlu nanomalzemelerin özellikleri, yapıları, sentez yöntemleri ve uygulama alanları hakkında çeşitli bilgiler verilecektir.

Review Article

Two-Dimensional Nanomaterials: An Overview of Their Properties, Synthesis and Applications

ARTICLE INFO

Article History

Received 15 April 2022

Revised 15 June 2022

Accepted 24 September 2022

Keywords

Graphene

Hexagonal Boron Nitride

Transition-Metal-

Dichalcogenide

Mxene

2D-pnictogen

ABSTRACT

Two-dimensional nanomaterials have attracted much attention in the last two decades because of their unique properties. These materials have versatile properties not only because of the extraordinary properties provided by the nanoscale, but also because of their structures that can go down to atomic thickness. Two-dimensional nanomaterials exhibit better electronic, optical, mechanical, etc. properties than those bulk forms. Because of these properties, these nanomaterials have been widely used in various application fields such as energy conversion/storage, optoelectronic applications, sensor development, various biomedical applications, catalysis, etc. In this review, properties, structures, synthesis methods and application areas of various two-dimensional nanomaterials, especially graphene, will be introduced and discussed.

1. Giriş

Malzeme biliminde 2004 yılı önemli bir dönüm noktası olmuştur. Rus kökenli araştırmacılar Andre Geim ve Konstantin Novoselov İngiltere’de yer alan Manchester Üniversitesi’nde gerçekleştirdikleri çalışmalarla grafeni tek tabakalı olarak izole etmeyi başarmışlardır (Novoselov ve ark., 2004). Grafen tabakasını, grafitten bir Scotch bant kullanarak “mekanik eksfoliasyon” olarak da bilinen bir

yöntemle izole eden Geim ve Novoselov bu alandaki çalışmalarından dolayı 2010 yılında Nobel Fizik Ödülü’nü almaya hak kazanmışlardır. İsveç Bilimler Akademisi, grafenin elektronik uygulamalarda önemli bir rol oynaması beklendiği için bu araştırmacıları bu ödüle layık gördüğünü açıklamıştır. Grafen keşfedildikten sonra hem temel araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda önemli bir yer edinmiştir (Geim, 2009). Grafenin iki-boyutlu (2D) yapısı ve sergilediği çok yönlü üstün özellikler

* Sorumlu Yazar

E-posta adresleri: sadikcogal@mehmetakif.edu.tr (S. Çoğal)¹ ORCID: 0000-0001-8904-1332

araştırmacıları oldukça cezbetmiştir. Bundan dolayı, dünya genelinde birçok araştırma grubu çalışmalarını grafene benzer yapıya sahip farklı iki-boyutlu nanomalzemelerin (2D NM'ler) araştırılması üzerine yönlendirmiştir.

2D NM'ler fizik, kimya, malzeme bilimi ve nanoteknoloji alanlarında en aktif çalışma konularından bir tanesi haline gelmiştir. Şimdiye kadar, birbirinden farklı özelliklere sahip birçok 2D NM keşfedilmiştir. Bunlar içerisinde aşağıda verilen 2D NM'ler en çok dikkat çekenlerdir ve bu derlemede daha çok bu malzemeler üzerinde durulacaktır.

- Grafen
- Hekzagonal bor nitrid (h-BN)
- Geçiş metal dikalkojenitleri (TMD)
- MXene'ler
- Xene'ler: fosforen, arsenen, antimonen, bizmuten, germanen, siliken, stanen

Şekil 1, çeşitli 2D NM'lerin yıllara göre yayınlanmış çalışma sayılarını göstermektedir. Grafenin keşfedilmesinden hemen sonra grafen üzerine yapılan çalışmaların hızlı bir şekilde arttığı görülmektedir. Ancak bu artış hızının 2013 yılından itibaren yavaşladığı görülmektedir. Bunun nedeni, muhtemelen alternatif 2D NM'lerin keşfedilmesidir. Bu grafikte TMD malzemeler oldukça dikkat çekmiştir. Genel olarak TMD malzemeler üzerine yayınlanan çalışmalar belli sayılarda ilerlerken 2010 yılından itibaren önemli bir artış olduğu net bir şekilde görülmektedir. Bu grafiğe göre de grafenden sonra en çok çalışılan 2D NM TMD malzemelerdir. Bunun nedeni, TMD malzemelerin çok yönlü özelliklerinin olması ve birçok TMD malzemesinin bulunmasıdır. Bu grafikte dikkat çeken başka bir malzeme grubu ise MXene'lerdir. MXene'ler tanımlandıktan kısa bir zaman sonra bu malzemeler üzerine yayınlanan çalışma sayılarında çok hızlı bir artış gerçekleşmiştir. Diğer 2-boyutlu malzemelerin aksine, MXene'ler hidrofilik yüzey (Anasori ve ark., 2017) ve yüksek metalik iletkenlik (6000-8000 S/cm) (Dillon ve ark., 2016; Sang ve ark., 2016) özellikleri göstermektedir ve bu özelliklere bağlı olarak kullanım alanları oldukça geniştir. Diğer bir taraftan, TMD ve Mxene malzemelerin aksine fosforen ve siliken ile ilgili çalışmaların şu ana kadar sınırlı kaldığı görülmektedir.

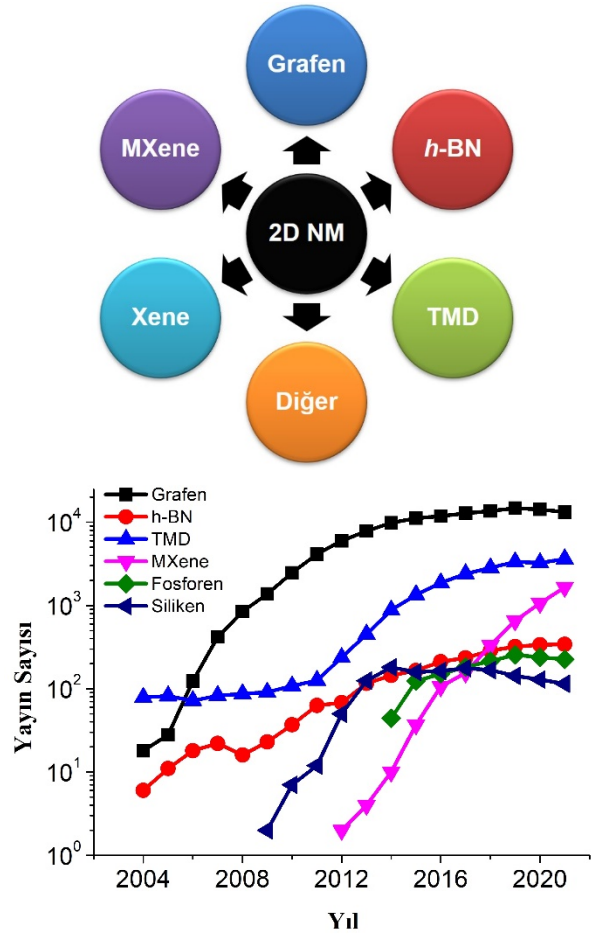
20. yy'da araştırmacılar klasik Fizik kurallarını göz önünde bulundurarak 2-boyutlu malzemelerin termodinamik açıdan kararlı olamayacaklarını ifade etmişlerdir (Han ve ark., 2015). Ancak, 2004 yılında grafenin izole edilmesi hem atom kalınlığında tabakaların kararlı olabileceğini hem de elde edilen malzemelerin bunları oluşturan yığın (bulk) formlarına göre farklı elektronik yapılar ve özellikler sergileyebileceğini göstermiştir.

Bunların yanında, 2D NM'ler yalıtkanlıktan süperiletkenliğe kadar geniş bir aralıkta farklı elektronik özellikler sergilemektedirler. Örneğin, grafen sıfır bant aralığı sergilerken TMD malzemeler yapılarına bağlı olarak 1-3 eV arasında farklı bağ aralıkları göstermektedir. Diğer bir taraftan, h-BN 6 eV civarında oldukça geniş bir bant aralığına sahiptir. Fosforen olarak da bilinen siyah fosfor ise 0.3-2 eV arasında bant aralığı değerleri sergilemektedir.

2. İki-Boyutlu Nanomalzemeler

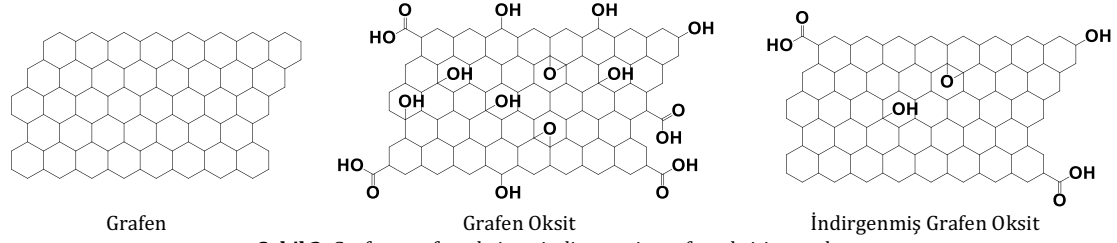
2.1. Grafen

Her ne kadar grafenin yukarıda da açıklandığı gibi 2004 yılında keşfedildiği bilinse de grafen ile ilgili bilgiler çok daha eskilere dayanmaktadır. Grafen ile ilgili dikkat çeken ilk çalışmalardan bir tanesi, teorik fizikçi Philip Wallace tarafından 1947 yılında grafitin elektronik davranışlarını konu aldığı çalışmasında ortaya koyulmuştur (Wallace, 1947). Ancak, termodinamik olarak kararlı olamayacağı için grafenin fiziksel olarak var olamayacağına inanılmıştır. Bununla birlikte, grafen 2004 yılına kadar gözlemlenebilir ve ölçülebilir formda keşfedilememiştir. 2004 yılında Novoselov ve Geim tek tabakalı grafeni izole ederek bilim dünyasına çok önemli bir katkı yapmıştır.



Şekil 1. Çeşitli 2D nanomalzemeler (üstteki) ve yıllara göre yayınlanan çalışma sayıları (Anahtar Kelimeler: graphene; hexagonal boron nitride; TMD için MoS₂, WS₂, MoSe₂, WSe₂, MoTe₂ ve WTe₂; MXene/MXenes; phosphorene; silicene. Başlıkta arama yapılmıştır ve sadece araştırma makaleleri göz önünde bulundurulmuştur. Kaynak: *Web of Science*. Tarama tarihi: 28.02.2022) (alttaki).

Grafen, 2D tek tabakalı (düzlemsel), sp²-bağlı karbon atomlarından oluşan bal peteği kristal kafes yapısına sahip bir malzemedir (Şekil 2). Grafen, grafit, karbon nanotüp ve fullerenin yapı taşıdır. Grafenin uygun şekilde bükülmesiyle karbon nanotüpler ve fulleren yapılar elde edilmektedir. Birçok grafen tabakasının üst üste gelmesiyle (genellikle ≥ 8 grafen tabakası) 3D grafit yapısı oluşmaktadır. Grafit yapısında, tabakalar birbirinden 0.335 nm mesafe ile ayrılmakta ve bu tabakalar arasında zayıf van der Waals etkileşimleri bulunmaktadır.



Şekil 2. Grafen, grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit yapıları.

Grafen yarı-metalik veya sıfır-bant aralıklı bir iletken malzeme olarak da tanımlanmaktadır. Grafenin bant aralığı sıfır olduğundan bir elektron kolaylıkla ve hızlı bir şekilde hareket edebilmektedir ve oda sıcaklığında oldukça yüksek elektron mobilitesine sahiptir. Bu yüzden, grafen yüksek elektriksel iletkenlik özelliği göstermektedir. Grafenin elektriksel iletkenliği -64 mS cm^{-1} olarak hesaplanmıştır ve bu değer tek duvarlı karbon nanotüpün (SWCNT) iletkenlik değerinin yaklaşık olarak 60 katıdır (Brownson & Banks, 2014). Elektriksel iletkenliğinin yanında termal iletkenliği de oldukça iyidir. Elektrikliği bakır kadar verimli iletir ve ısı iletkenliği de oldukça yüksektir. Termal iletkenliği $5000 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ olarak ölçülmüştür ve bir grafen tabakası termodinamik açıdan oldukça kararlıdır. Grafenin bazı özelliklerine ait değerler Tablo 1'de verilmiştir.

Grafen teorik olarak $2630 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ (Rao ve ark., 2009) yüzey alanına sahiptir ve karbon nanotüpün (CNT) ($1315 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$) (Peigney ve ark., 2001) yüzey alanından iki kat daha büyüktür.

Grafenin mekanik özellikleri de oldukça dikkat çekicidir. Bilim adamları, grafenin dayanıklılığını ölçmek için atomik kuvvet mikroskopunu (AFM) kullanmışlardır. Grafen elmadan daha güçlü ve çelikten 300 kat daha sağlam bir malzemedir.

Tablo 1

Grafenin çeşitli özellikleri (Mao ve ark., 2012; Reina ve ark., 2009).

Özellik	Değerler
Optiksel geçirgenlik	%97.7
Elektron mobilitesi	$200000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
Termal iletkenlik	$5000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Spesifik yüzey alanı	$2630 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$
Breaking strength	42 N m^{-1}
Elastik modülü	0.25 TPa

Grafen Oksit (GO), grafenin, yaygın olarak çalışılan başka bir formudur. GO, genellikle Hummers metodu olarak bilinen bir yöntemle elde edilmektedir (Hummers ve Offeman, 1958). Bu yöntemde, grafit potasyum permanganat (KMnO_4) ve sodyum nitratın (NaNO_3) olduğu ortamda derişik sülfürik asit (H_2SO_4) ile yükseltgenmektedir. Bu yöntem uygulanırken, grafen tabakası oksitlenmekte ve grafen yüzeyinde çeşitli fonksiyonel gruplar oluşmaktadır (Şekil 2). Böylelikle, grafen oksit su ve etanol gibi çeşitli çözücülerde dispers edilebilmektedir. Grafen oksit dispersiyonu grafenin çeşitli yüzeylere kaplanmasını sağlarken kompozitlerinin hazırlanmasında da önemli rol oynamaktadır. Ancak, grafen yüzeyindeki fonksiyonel gruplar iletkenlik değerini büyük ölçüde azaltmakta ve bu durum özellikle elektronik uygulamalardaki performansı düşürmektedir. Bundan dolayı, GO kullanılmadan önce genellikle indirgenmelidir ve bu şekilde indirgenmiş grafen oksit (RGO) elde edilmektedir (Şekil 2). RGO, çeşitli kimyasal ve elektrokimyasal yöntemlerle elde edilebilmektedir.

2.2. Hekzagonal bor nitrür (*h*-BN)

Bir grafen analogu olan *h*-BN (beyaz grafen olarak da bilinmektedir), özellikle yüksek mekanik sertliği, yüksek termal ve kimyasal kararlılığı gibi özellikleri nedeniyle çok önemli bir iki-boyutlu nanomalzemedir. Morfolojik olarak *h*-BN, bal peteği kristal yapısındaki grafene benzemektedir. Ancak, *h*-BN yapısında karbon atomlarına alternatif olarak eşit sayıda azot (N) ve bor (B) atomları bulunmaktadır ve bu atomlar sp^2 hibridizasyonu ile birbirine bağlanarak güçlü sigma (σ) bağı oluşturmaktadır (Han ve ark., 2008). *h*-BN'de, düzlemler zayıf van der Waals kuvvetleri ile birbirlerine bağlanırken düzlem içinde güçlü kovalent bağlar bulunmaktadır. Grafene benzer şekilde, iki *h*-BN katmanı arasındaki uzaklık 0.334 nm 'dir (Allen ve ark. 2009).

Grafenin aksine, *h*-BN geniş bant aralığına ($\sim 6 \text{ eV}$) (Song ve ark., 2010) sahip bir yalıtkandır ve dielektrik sabiti 2 ile 4 (Kim ve ark., 2012) arasında değişmektedir. Bu özellik, *h*-BN'yi birçok 2D elektronik ve optoelektronik sistemler için ideal bir malzeme yapmaktadır. Geleneksel dielektrik malzemelerle (SiO_2 , HfO_2 , TiO_2 ve Al_2O_3) karşılaştırıldığında, *h*-BN çeşitli uygulamalar için önemli avantajlar sunmaktadır:

Tek düze ve atomik kalınlıkta düz yüzeye sahip *h*-BN yapılar farklı yöntemlerle elde edilebilmektedir.

Sıra dışı kimyasal kararlılık sayesinde komşu katmanlarla istenmeyen reaksiyonlar önlenmektedir.

h-BN'nin yüksek termal iletkenliği (SiO_2 'den 20 kat daha büyük) cihazlar içerisindeki ısı dağılımını arttırarak yaşam süresini önemli derecede arttırmaktadır.

Diğer 2D NM gibi, *h*-BN esnek, mekanik olarak kararlı ve geçirgendir. Bu özellikler, *h*-BN'yi esnek optoelektronik uygulamalar için önemli bir malzeme yapmaktadır.

h-BN diğer 2D NM ile mükemmel kombinasyonlar yapabilmektedir

h-BN, özellikle grafen için mükemmel bir substrat görevi görmektedir. *h*-BN ve grafen birbirine çok yakın kafes sabitlerine sahiptir ve bu iki malzeme arasındaki kafes uyumsuzluğu sadece %1.7'dir (Giovannetti ve ark., 2007). Bundan dolayı, bu iki malzeme çok iyi etkileşim göstermekte ve özellikle elektronik cihazların üretiminde önemli potansiyele sahiplerdir.

2.3. Geçiş metal dikalkojenitler (TMD): MoS_2 , WS_2 , MoSe_2 ve WSe_2

TMD malzemelerin tarihçesi oldukça eskiye dayanmaktadır. Katmanlı yapıya sahip olmaları dolayısıyla özellikle elektronik uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmışlardır. İlginçtir ki tek tabakalı TMD malzemelerle ilgili ilk çalışmalardan bir tanesi 1986 yılında yayınlanmıştır (Joensen ve ark., 1986). Hatta birkaç katmanlı TMD'ler ile ilgili çok daha önce de çeşitli çalışmalar yayınlanmıştır (Frindt, 1966). Ancak, bu çalışmalar o zamanlarda pek ilgi görmemiştir. TMD malzemeler üzerine gerçekleştirilen çalışmalar grafenin keşfedilmesinden sonra farklı bir boyuta taşınmıştır. Grafenin, 2D yapısından ileri gelen önemli özellikler sergilemesi ve farklı alanlarda başarılı bir şekilde uygulanması araştırmacıları benzer farklı malzemeler

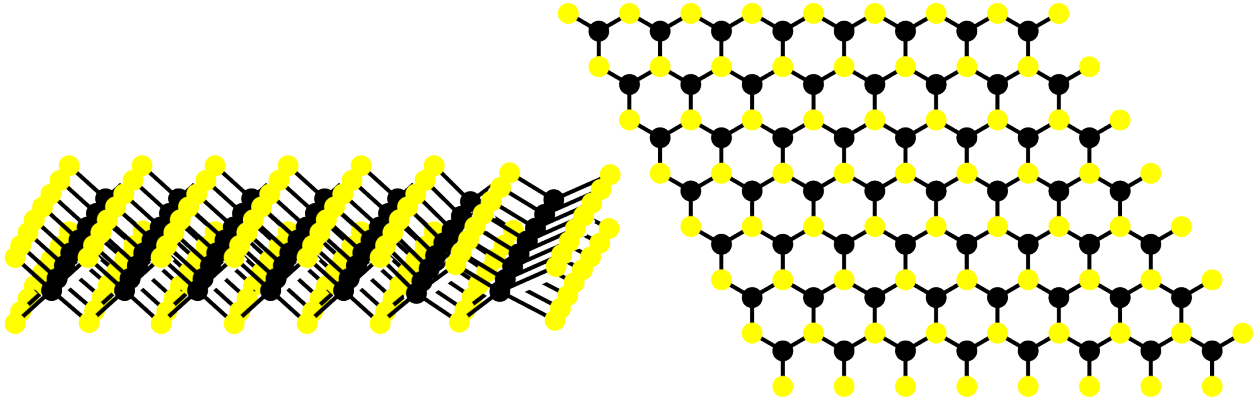
üzerine çalışmaya itmiştir. TMD'ler, olağanüstü elektriksel, kimyasal, optiksel, mekaniksel ve katalitik özelliklere sahip malzemeler olup bu özelliklerinden dolayı araştırmacılar tarafından oldukça ilgi görmektedirler.

TMD'ler, MX_2 stokiyometresine sahip bir malzeme grubu olup M genellikle periyodik tablonun 4-7 grubundaki geçiş metallerini (Ti, V, Zr, Nb, Mo, Tc, Hf, Ta, W, Mo, W veya Re) ve X kalkojen elementlerini (S, Se, veya Te) ifade etmektedir.

Bunların yanında, 9 ve 10 grubundaki geçiş metallerinin de az sayıda TMD malzeme oluşturduğu belirlenmiştir. Şekil 3, 2D-TMD nanoyapısı oluşturabilen elementler periyodik cetvel üzerinde gösterilmiştir. TMD'lerin her bir katmanı, belli bir düzlemdeki kalkojen atomlarının arasında sıkışmış geçiş-metal atomlarının bir düzlemi ile polimerik X-M-X formunda oluşmaktadır. Şekil 4, hegzagonal bir TMD katmanının yapısı gösterilmiştir.

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og

Şekil 3. 2-Boyutlu TMD nanomalzeme oluşturan elementler. M: geçiş metalini ve X: kalkojen elementini göstermektedir.



Şekil 4. Hekzagonal bir TMD katmanının yapısı (sağdaki) ve bu katmanın üstten görünümü (sağdaki).

Katmanlı TMD'lerdeki metal atomlarının koordinasyonu, sıklıkla ya oktahedral (1T polimorf) ya da trigonal prizmatik (2H polimorf) şeklindedir. Bu farklı formlar, polimorfaların oldukça farklı fiziksel özellikler sergilemelerine neden olmaktadır. Örneğin, tek katmanlı 1T-MoS₂ metalik özellik gösterirken, tek katmanlı 2H-MoS₂ oldukça büyük bir bant aralığına (~1.9 eV) sahiptir ve yarı-iletken özellik sergilemektedir. Bu durum, aynı MX_2 formülüne sahip diğer TMD malzemeleri için de geçerlidir.

İki-boyutlu TMD nanomalzemeler, eksfoliasyon ile kolaylıkla elde edilebilmekte ve oldukça ilginç elektriksel ve optik özellikler sergilemektedirler. Bu nanomalzemelerin elektronik yapısı güçlü bir şekilde geçiş metalinin koordinasyon çevresine ve d-elektron sayısına bağlıdır. Bu durum, TMD malzemelerinin farklı elektronik ve manyetik özellikler sergilemelerine neden olmaktadır. Örneğin, HfS₂ yalıtkan, MoS₂ ve WS₂ yarı iletken, WTe₂ ve TiSe₂ yarı-metal, NbS₂ ve VSe₂ metal ve NbSe₂ ve TaS₂ süperiletkenlik özellikleri sergilemektedir. Bunlar içerisinde, yarı iletken TMD'ler katman sayısına bağlı olarak ayarlanabilir bant aralığı sergileyebildiklerinden özel ilgi görmüşlerdir. Bu durum, yarı iletken TMD malzemelerini elektronik uygulamalar için önemli kılmaktadır. MoS₂ üzerine yapılan teorik çalışmalarda tek tabakalı MoS₂'nin 2.2 eV bant aralığına sahipken yığın formunda bu değer 1.4 eV

seviyelerine kadar düştüğü gösterilmiştir (Zhao ve Liu, 2018). Çeşitli geçiş metallerinin kalkojen elementleri ile oluşturdukları TMD malzemelerin sergiledikleri elektronik özellikler Tablo 2'de özetlenmiştir.

2.4. MXene'ler

Titanyum (IV) karbür (Ti₃C₂) malzemesinin 2011 yılında keşfedilmesiyle (Naguib ve ark., 2011), MXene'ler olarak sınıflandırılan 2D-geçiş metal karbür, karbonitrür ve nitrür malzemelerin sayısı hızlı bir şekilde artmıştır. MXene'ler, birbirine güçlü metalik, iyonik ve kovalent bağlarla bağlanmış katmanlı yapıya sahip MAX fazlarından metalik A (Ör. Al, Si, Ge, vb.) elementinin seçici olarak dağlanmasıyla elde edilmektedir. Hekzagonal katmanlı MAX yapısında, M katmanları sıkı-paketlenmiş ve X atomları oktahedral boşlukları doldurmaktadır. M-A bağları, M-X bağlarından daha zayıftır ve bununla birlikte, M-A bağları M-X bağlarından kimyasal olarak daha aktiftir. Bu durum, A elementinden oluşan katmanların oldukça yüksek seçicilikle dağlanmasına olanak vermektedir.

Tablo 2

TMD malzemelerin elektronik özellikleri (Chhowalla ve ark., 2013).

Grup	M	X	Özellikler
4	Ti, Hf, Zr	S, Se, Te	Yarıiletken ($E_g=0.2 - 2$ eV). Diyamanyetik.
5	V, Nb, Ta	S, Se, Te	Dar bant metaller veya yarımetaller. Süperiletkenlik. Paramanyetik, antiferromanyetik veya diyamanyetik.
6	Mo, W	S, Se, Te	Metal sülfürler ve metal selenürler yarıiletken ($E_g \sim 1$ eV). Metal tellürler yarı metalik. Diyamanyetik.
7	Tc, Re	S, Se, Te	Küçük-bant aralıklı yarıiletkenler. Diyamanyetik.
10	Pd, Pt	S, Se, Te	Metal sülfürler ve metal selenürler yarıiletken ($E_g \sim 0.4$ eV) ve diyamanyetik. Metal tellürler metalik ve paramanyetik. PdTe ₂ ise süperiletken.

Mxene'ler $M_{n+1}X_nT_x$ ($n = 1-3$) genel formülüne sahip bir malzeme grubu olup M geçiş metallerinin ön gruplarında yer alan geçiş metalini (Sc, Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, vb.), X karbon (C) ve/veya azot (N) elementini ve T_x ise yüzey sonlandırmalarını (hidroksil, oksijen veya flor gibi) ifade etmektedir. n değerinin 1 ve 3 arasında değişmesiyle 3, 5 veya 7 atomik katmanlara sahip M_2X , M_3X_2 ve M_4X_3 yapısında 3 farklı MXene formu bulunmaktadır.

Literatür incelendiğinde en çok çalışılan MXene malzemesinin titanyum alüminyum karbür olarak adlandırılan Ti_3AlC_2 MAX fazından elde edilen $Ti_3C_2T_x$ olduğu görülmektedir. Şekil 5'de MAX fazı oluşturabilen elementler periyodik cetvel üzerinde gösterilmiştir. Farklı kombinasyonlarla 150'den fazla MAX fazının oluşabildiği bilinmektedir. Şimdiye kadar ise, 30'un üzerinde MXene yapısı bildirilmiş ve bu sayıdan daha fazlasının yapıları ve özellikleri teorik olarak tahmin edilmiştir (Karahana ve ark., 2020).

H	M																A										X										He
Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne														
Na	Mg																	Al	Si	P	S	Cl	Ar														
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																				
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																				
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																				
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og																				

Şekil 5. MAX fazları oluşturduğu bilinen elementler. M: geçiş metalini, A: Cd hariç A grubu elementini ve X: C ve/veya N elementini ifade etmektedir.

Diğer bir taraftan, MAX yapısında olmayan Mo_2Ga_2C ve $Zr_3Al_3C_5$ gibi çeşitli başlangıç maddelerinden yola çıkarak Ga ve Al_3C_2 katmanlarının dağlanmasıyla sırasıyla Mo_2CT_x ve $Zr_3C_2T_x$ gibi MXene malzemeleri de sentezlenmiştir (Meshkian ve ark., 2015; Zhou ve ark., 2016).

Şimdiye kadar bildirilen MXene malzemelerinin yüzeyleri, onlara hidrofilik özellik kazandıran hidroksil, oksijen veya florin gibi gruplarla sonlanmaktadır. Katı çözeltilerin bulunması, yüzey sonlandırmalarının kontrol edilebilmesi ve son zamanlarda çok geçişli metal katmanlı Mxene'lerin keşfedilmesi birçok yeni yapının sentezlenmesine olanak vermektedir.

MXene'lerin önemli elektriksel, termal, mekanik ve kimyasal özelliklerinin yanında biyolojik özelliklerinin de iyi olması araştırmacıların oldukça fazla dikkatini çekmiştir. Bundan dolayı, Şekil 1'de de gösterildiği gibi, MXene'ler 2D NM içerisinde en hızlı büyüyen malzeme gruplarından bir tanesidir.

2.5. Xene'ler

Xene'ler tek bir elementten oluşan 2D NM'ler olup fosforen, siliken, germanen, stanen, borofen, arsenen, antimonen ve bizmuten gibi malzemeleri kapsamaktadır (Zavabeti ve ark., 2020). Bu malzemeler, büyük yüzey alanları, ultra-ince kalınlıkları, yüksek taşıyıcı mobiliteleri, ayarlanabilir bant aralıkları ve düzlem-içi anizotropi özellikleri dolayısıyla oldukça dikkat çekmişlerdir. Xene'ler diğer 2D NM'lere göre bazı avantajlara sahiptirler. Örnek olarak, Xene'lerin taşıyıcı mobiliteleri TMD malzemelerinkinden daha yüksektir. Geniş bant aralıklı h-BN ve sıfır bant aralıklı MXene'ler ile karşılaştırıldığında, Xene'lerin bant aralığı katman sayılarının değiştirilmesiyle kolaylıkla ayarlanabilmektedir. Bu durum, özellikle optik sensör uygulamaları için oldukça önemlidir. Ayrıca, yüksek yüzey alanları, basit element bileşimleri ve iyi biyobozunabilirlik özellikleri dolayısıyla, Xene'ler biyomedikal uygulamalar için de büyük potansiyele sahiptir (Wang ve ark., 2020).

2.6. Fosforen, arsenen, antimonen ve bizmuten (2D-pniktojenler)

Fosforen, grafit benzer şekilde, birbirine zayıf van der Waals bağları ile bağlanmış katmanlı yapılardan oluşmaktadır. Bu katmanların birbirinden ayrılmasıyla 2D forma sahip fosforen elde edilmektedir. Fosforen, siyah fosfor olarak da bilinmektedir. Siyah fosfor aslında yaklaşık yüzyıldır bilinmektedir. 1914 yılında Bridgeman tarafından beyaz fosfora yüksek hidrostatik basınç ve sıcaklık uygulanmasıyla ilk defa sentezlenmiştir (Bridgman, 1914). Ancak, 2D formunun keşfedilmesiyle, 2014 yılından itibaren dikkat çekmeye başlamıştır. Fosforen, mükemmel özelliklerinden dolayı özellikle elektronik ve enerji uygulamaları için oldukça dikkat çekmiştir. Fosforenin bant aralığı 0.3-2.0 eV arasında değişmektedir.

Fosforenin, katmanlı bulk formundan eksfoliasyon ile ultra ince yapılarının sentezlenmesi aynı grupta (VA) bulunan diğer elementlerin de araştırmacıların ilgisini çekmesine neden olmuştur. Fosforenin sentezlenmesinden birkaç yıl sonra teorik çalışmalar As, Sb ve Bi elementlerinin kararlı, tek katmanlı yapılarını ve ince filmlerini ortaya koymuştur. Bu malzemeler, arsenen, antimonen ve bizmuten olarak isimlendirilmişlerdir. Arsenen hem ortorombik (α fazı) hem de rombohedral (β fazı) kristal yapısı sergilerken antimonen ve bizmuten rombohedral kristal yapısı sergileme eğilimi göstermektedir (Yu ve ark., 2020). Grup IVA'da bulunan elementlerin yarı-metal özelliği gösteren tek katmanlarının aksine, grup VA elementlerinin tek katmanlı yapıları çeşitli uygulamalar için uygun bant aralığına sahip kararlı yarı iletken özellikler sergilemektedir (Ersan ve ark., 2019).

2D-pniktojen'lerin optik özellikleri, verimli ışık absorpsiyon ve dönüşüm özellikleri farklı fotovoltaiik ve optoelektronik uygulamalarda kritik rol oynamalarına olanak vermektedir (Li ve ark., 2019). Ayrıca, yakın infrared ve görünür ışık bölgelerinde bant aralığına sahip 2D-pniktojen malzemeler, fotokataliz ve biyomedikal uygulamalar için umut verici fotoelektrik özelliklere sahiptir (Tao ve ark., 2019). Diğer 2D NM'lerle karşılaştırıldığında, 2D-pniktojenlerin elektriksel özellikleri, elde edildikleri elementin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, fosforen doğrudan bant aralığına sahip olabilmekte ve bant aralığı yukarıda da açıklandığı gibi katman sayısına bağlı olarak ayarlanabilmektedir. Bu tür 2D NM'lerin ayarlanabilir bant aralıklarına sahip olması çeşitli uygulamalar için

oldukça önem kazanmaktadır. Arsenen ve antimonen gibi 2D-pniktojenler ise geniş bant aralığına sahip yarıiletken özellik göstermektedir. Tek-katmanlı yarıiletken özelliği sahip bizmuten ise dar bant aralığına sahiptir (Yu ve ark., 2020). Bu özelliklerinden dolayı bu 2D-NM son yıllarda farklı kataliz, biyomedikal, optoelektronik gibi uygulama alanları için oldukça dikkat çekmektedir.

2.7. Siliken, germanen ve stanen

Siliken, germanen ve stanen silisyum (Si), germanyum (Ge) ve kalay (Sn) atomlarının tek katmanlı 2D bir yapı oluşturmak üzere bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Si, Ge ve Sn, karbon ile aynı grupta (IVA grubu) yer alan ve karbona benzer şekilde en dış kabuklarında eşit sayıda s ve p elektronlarına sahiplerdir. Bundan dolayı, araştırmacılar grafitte benzer katmanlı yapıya sahip olup olmadıklarını ve 2D yapı oluşturup oluşturmayacaklarını merak etmişlerdir.

1994 yılının başlarında Takeda ve Shiraishi grafitin Si ve Ge analoglarını incelemiş ve kuantum mekaniksel hesaplamalara dayanarak Si ve Ge'un 2D tek katmanlarının düzlemselliğini tartışmışlardır (Takeda ve Shiraishi, 1994). 2007 yılında ise Guzman-Verri ve arkadaşları (2007) tarafından bu malzemeler tekrar araştırılmış ve 2009 yılında Cahangirov ve arkadaşları (2009) bu yapıların kararlı olduğu doğrulanmıştır.

Siliken, germanen ve stanen, grafene benzer şekilde hekzagonal bir yapı oluştursa da hacimlerinin karbona kıyasla daha büyük olması düzlemsel yapının aksine bükülmüş yapıya sahip olmalarını sağlamaktadır. Bu malzemelerin bükülmüş yapının yanında büyük spin-orbit etkileşime sahip olmaları, 2D topolojik yalıtkan (TI) olarak adlandırılan maddelerin yeni bir kuantum durumunun araştırılması için yeni bir alan sunmaktadır. Topolojik yalıtkanlar, gövdeleri yalıtkan ve kenarları elektrik iletebilen eşsiz elektronik yapıya sahip maddelerdir (Lyu ve ark., 2019). Bu tür malzemelerin, özellikle elektronik alanlarda önemli bir potansiyele sahip olacağı ön görülmektedir.

Bükülmüş yapıda elektronlar daha fazla delokalize durumdadır ve daha düşük elektronlar arası itme enerjisi üretmektedir. Bu deformasyonlar ayrıca kısmi sp^3 hibridizasyonuna neden olmaktadır. Bu özellik, bükülmüş yapının grafene göre ikinci belirgin farkını ortaya koymaktadır. Doymamış sp^3 bağlanmalarından kaynaklanabilen kararlılık problemlerine rağmen, bükülmüş yapı silikenin bazı özelliklerini (bant aralığı açılması, elektronik yapı, seçici kimyasal reaktivite, vb.) manipüle etmek için kullanılabilir. Diğer bir taraftan, bükülmüş yapı silikenin sp^2 ve sp^3 hibrit bağlara sahip olmasına olanak vermektedir ve bu da yüksek çevresel reaktiviteye ve sonuçta malzeme degradasyonuna yol açmaktadır (Molle v ark., 2018).

Si, Ge ve Sn sp^3 bağı tercih etmesinden dolayı sp^2 - sp^3 hibridizasyonu sergilemektedir. Siliken, germanen ve stanen yapılarında her bir atom (Si, Ge veya Sn) komşu üç atomla kovalent bağı oluşturarak basit hekzagonal birim hücreyle sonuçlanmaktadır. Bükülmeler birim hücrenin farklı yerlerinde gerçekleşmekte ve bu da farklı tür kafes sistemleri oluşmasına neden olmaktadır (Balendhran et al. 2015).

Siliken, germanen ve stanen 2D NM'lerin özellikleri için daha çok teorik hesaplamalar kullanıldığı görülmektedir. Bu malzemeler, grafenin aksine çoğunlukla çeşitli substratlar üzerinde elde edilmekte ve serbest filmler oluşturmak için yığın formda van der Waals katmanlı yapı oluşturamamaktadırlar (Vogt ve ark., 2012). Bundan dolayı araştırmacılar, uygulanabilir üretim yöntemleri geliştirmek için deneysel çalışmalar yürütmektedirler. Bu nedenlerden

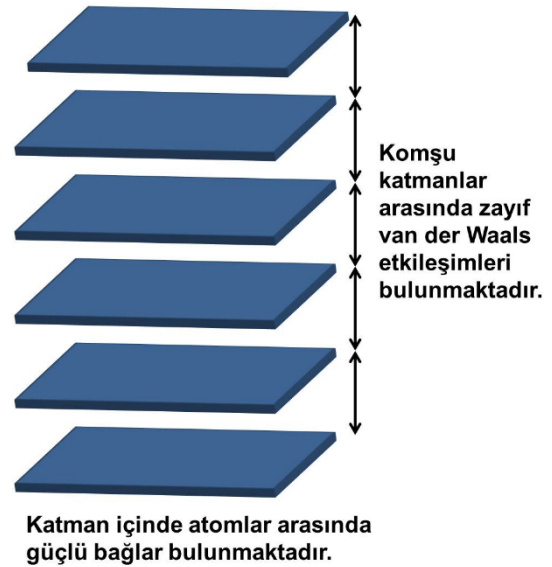
dolayı, bu 2D NM'lerin çeşitli uygulamalar için alternatif malzemeler haline gelmeden önce birçok problemin çözülmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Tablo 3. Fosforen, siliken, ve germanenin bazı özellikleri (Gablech ve ark., 2018).

Malzeme	Bant Aralığı (eV)	Taşıyıcı mobilitesi ($cm^2.V^{-1}.s^{-1}$)
Fosforen	1.5	260
Siliken	0.002-0.5	100 (ölçülen) 2.57x10 ⁵ (hesaplanan)
Germanen	<0.05	6x10 ⁵ (hesaplanan)

3. İki-Boyutlu Nanomalzemelerin Sentez Yöntemleri

İki-boyutlu nanomalzemelerin büyük çoğunluğu zayıf van der Waals kuvvetleri ile bir araya gelen katmanlı malzemelerden ileri gelmektedir (Şekil 6). Bu zayıf etkileşimler çeşitli eksfoliasyon yöntemleri ile koparılarak tek katmanlı veya birkaç katmanlı nanoyapılar elde edilmektedir.



Şekil 6. Katmanlı (yığın) yapının şematik gösterimi.

Eksfoliasyon yöntemlerini genel olarak *mekanik eksfoliasyon* ve *sıvı-bazlı eksfoliasyon* olmak üzere iki kısma ayırmak mümkündür. Sıvı-bazlı eksfoliasyon yöntemi, yığın halindeki malzemelerin kimyasal oksidasyonuna gerek duymadan sıvı ortamda 2D-nanomalzemelere doğrudan ayrılmasına olanak vermektedir. Bu yöntem, birçok 2D-nanomalzemenin üretiminde kullanılmaktadır. Sıvı-bazlı eksfoliasyon:

- Ultrasonik eksfoliasyon
- Elektrokimyasal eksfoliasyon
- Kesme (Shear) eksfoliasyon

gibi teknikleri içermektedir. Bu teknikler tek başlarına kullanılabilirler ancak genellikle birlikte kullanılmaktadır.

Ultrasonikasyon: Sıvı-faz eksfoliasyonun en önemli bileşenlerinden biri ultrasonikasyon aşamasıdır. Bu yöntem, 2D NM'lerin yığın formlarından elde edilmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ultrasonikasyonda eksfoliasyon ultrasonik banyoda ya da ultrasonik prob kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Katmanlı malzemeler bu cihazlar içerisinde ultrasonik dalgalara maruz bırakılarak doğrudan eksfolie edilebilmektedir. Bu yöntem ile eksfoliasyon

kavitasyon olayı ile açıklanabilmektedir. Katmanlı malzemeleri içeren sıvı ortam ultrasonik dalgalara maruz kaldığında kesme kuvvetleri veya kavitasyon baloncukları oluşmaktadır (Mason ve Lorimer, 2002). Kavitasyon baloncukları belli bir büyüklüğe gelince patlayarak çok yüksek sıcaklık ve basınç değerleri üretmektedir. Bu patlama, baloncunun çevresine de etki etmektedir. Patlamalar sırasında oluşan yüksek enerjiler ve sıvıda oluşan boşluklardan kaynaklanan kaymalar katmanlı malzemelerdeki zayıf bağları kırarak katmanların birbirinden ayrılmasına neden olmaktadır. Diğer bir taraftan, eksfoliasyonda kullanılan çözücünün de önemli bir yeri bulunmaktadır. Çözücü ortamı katmanlı malzemelerin ara katmanlarında bulunan potansiyel enerji bariyerini düşürmede ve daha sonra ekfolie edilen katmanların ara yüzeyel etkileşimler yardımıyla stabilizasyonunda önemli bir rol oynamaktadır (Niu ve ark., 2016).

Sıvı-bazlı eksfoliasyon, sıvı ortamın sağladığı avantajları da kullanarak çeşitli yüzey aktif maddeler, iyonik sıvılar, çeşitli tuzlar ve polimerlerin bulunduğu ortamlarda da gerçekleştirilmektedir (Niu ve ark., 2016). Çeşitli organik çözücülerde eksfoliasyon kolay ve hızlı bir şekilde yapıyorsa da çevresel kaygılardan dolayı sulu çözeltilerde yüzey aktif maddeler kullanılarak yüzey gerilimi ayarlanabilmekte ve etkin eksfoliasyon işlemleri yapılabilir.

2D NM'lerin eksfoliasyon yöntemleri ile katmanlı formlarından tek veya birkaç katmanlı formlarına dönüştürülmesi yukarıdan-aşağıya (top-down) yaklaşıma girmektedir. Diğer bir yandan, çeşitli 2D NM'ler (grafen, TMD, ...) aşağıdan-yukarıya (bottom-up) yaklaşım yöntemleri kullanılarak da sentezlenebilmektedir. Bu yöntemler:

CVD veya epitaksiyel büyüme: Genellikle film elde edilmektedir ve büyük alanlara uygulanabilmektedir. Ancak, bu yöntemlerde morfoloji kontrolü gerçekleştirmek zordur ve yüksek sıcaklık proseslerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Hidrotermal/solvotermal sentez: Su veya çeşitli çözücülerde yüksek basınç altında paslanmaz çelik otoklav reaktörlerinde gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem TMD malzemelerin sentezinde bir veya birkaç tabakalı yapılar elde etmek için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. İki-boyutlu hibrit veya kompozit malzemeler için de oldukça kullanışlı bir yöntemdir.

Diğer Sıvı Bazlı Kimyasal Yöntemler: Yukarıda sözü edilen yöntemlerin haricinde çeşitli sıvı bazlı kimyasal yöntemler de 2D NM'lerin sentezinde kullanılabilir.

2D NM'lerin sentezlenmesi için yukarıda bahsedilen yöntemlerin her biri kendi içerisinde bazı avantajları ve dezavantajları barındırmaktadır. Bundan dolayı, araştırmacılar çeşitli uygulamalar için iyi performans sergileyebilecek ve büyük miktarlarda ürün elde edebilecekleri yüksek kalitede 2D NM üretmek için yeni sentez yöntemleri üzerinde çalışmalara devam etmektedir.

Farklı sentez yöntemleriyle hazırlanan 2D NM'ler farklı yapısal özellikler ve buna bağlı olarak farklı fiziksel, elektronik, kimyasal ve yüzey özellikleri sergileyebilmektedir.

4. İki-Boyutlu Nanomalzemelerin Uygulama Alanları

2D NM'ler yapılarından ileri gelen oldukça dikkat çekici fiziksel, elektronik, kimyasal ve optik özelliklere sahiptirler ve bundan dolayı çok geniş kullanım alanları bulunmaktadır. Yukarıda da bahsedildiği gibi, 2D NM'lerin birçok çeşidi bulunmakta ve bu malzemelerin her biri farklı uygulamalar için spesifik özellikler sunmaktadır. Örneğin, grafen bant aralığına sahip değilken, h-BN geniş bant aralığına sahip bir

yalıtkan malzemedir. Diğer bir taraftan, TMD malzemeler kimyasal bileşimlerine ve yapısal konfigürasyonlarına bağlı olarak yalıtkan (HfS_2), yarıiletken (MoS_2 , WSe_2), yarı metal (WTe_2) ve süperiletken (NbSe_2 , TaS_2) olabilmektedir. Elektronik özelliklerinin haricinde, 2D NM'ler yapılarından ileri gelen mükemmel mekanik özelliklere (mekanik dayanım, esneklik) sahiptirler. Ayrıca, atom kalınlığına inebilen 2D yapıları nedeniyle oldukça yüksek ışık geçirgenliğine sahiptirler. Örneğin, grafen, beyaz ışığı %2.3 civarında absorplayabilmekte ve bu demek oluyor ki %97'sinden fazlasını geçirmektedir (Nair ve ark., 2008). Bu durum, diğer ultra ince 2D NM'lerin grafene benzer optiksel geçirgenlik özellikleri gösterebileceklerini ortaya koymaktadır. Yukarıda sözü edilen elektronik özelliklerinin yanında, mekanik dayanım, esneklik ve optiksel geçirgenlik gibi özellikler 2D NM'leri yüksek performanslı esnek, giyilebilir ve geçirgen elektronik/optoelektronik uygulamalar için oldukça çekici kılmaktadır. Diğer bir taraftan, yüksek yanal boyut ve atomik kalınlık 2D NM'lerin yüksek yüzey alanına ve daha çok aktif sayıda yüzey atomlarına sahip olmalarına neden olmakta ve bu durum 2D NM'leri süperkapasitör ve kataliz gibi pratik uygulamalar için önemli bir malzeme sınıfı yapmaktadır (Chen ve ark., 2021). Yüksek yüzey alanları ve aktif yüzey atomları dolayısıyla, 2D NM'ler ayrıca, organik kataliz, elektrokataliz, fotokataliz gibi katalitik uygulamalar için mükemmel katalitik özellikler sergilemektedirler. Burada bahsedilen uygulamaların yanında, 2D NM'ler, enerji depolama ve dönüşüm, su arıtma, sensörler, biyomedikal gibi uygulamalarda da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Tan ve ark., 2017).

5. Sonuçlar

Bu derleme çalışmasında grafen başta olmak üzere çeşitli iki-boyutlu nanomalzemelerin özellikleri, sentez yöntemleri ve başlıca uygulama alanları sunulmuştur. Grafenin keşfedilmesiyle birlikte grafene benzer iki-boyutlu nanomalzemelere olan ilgi artmış ve bunun sonucunda birçok farklı iki-boyutlu nanomalzeme keşfedilmiştir. İki-boyutlu ve atom kalınlığına inebilen yapılarından dolayı eşsiz özellikler sunmaları birçok bilim dalının ilgisini çekmiştir ve bu alanda çok yoğun çalışmalar yürütülmektedir. Diğer bir taraftan, grafen ile ilgili yapılan çalışmaların belli bir seviyeye geldikten sonra doygunluğa ulaştığı görülmüştür. Ancak, grafenden sonra keşfedilen iki-boyutlu nanomalzemeler ile ilgili çalışmaların çok daha uzun süreceği ön görülmektedir. Bu çalışmalara bağlı olarak uygulama alanlarının ve endüstriyel kullanımlarının daha da artması beklenmektedir.

Kaynaklar

- Allen MJ, Tung VC, Kaner RB (2009). Honeycomb Carbon: A Review of Graphene. *Chem Rev* 110: 132-145.
- Anasori B, Lukatskaya MR, Gogotsi Y (2017). 2D Metal Carbides and Nitrides (MXenes) for Energy Storage. *Nature Rev Mater* 2: 16098.
- Balendhran S, Walia S, Nili H, Sriram S, Bhaskaran M (2015). Elemental Analogues of Graphene: Silicene, Germanene, Stanene, and Phosphorene. *Small* 11: 640-652.
- Bridgman PW (1914). Two New Modifications of Phosphorus. *J Am Chem Soc* 36: 1344-1363.
- Brownson DAC and Banks CE (2014). The Handbook of Graphene Electrochemistry. *The Handbook of Graphene Electrochemistry*. Springer, London.

- Cahangirov S, Topsakal M, Aktürk E, Şahin H, Ciraci S (2009). Two- and One-Dimensional Honeycomb Structures of Silicon and Germanium. *Phys Rev Lett* 102: 236804.
- Chen LX, Chen ZW, Jiang M, Lu Z, Gao C, Cai G, Singh CV (2021). Insights on the Dual Role of Two-Dimensional Materials as Catalysts and Supports for Energy and Environmental Catalysis. *J Mater Chem A*. 9: 2018-2042.
- Chhowalla M, Shin HS, Eda, G, Li L-J, Loh KP, Zhang H (2013). The Chemistry of Two-Dimensional Layered Transition Metal Dichalcogenide Nanosheets. *Nature Chem* 5: 263-275.
- Dillon AD, Ghidui MJ, Krick AL, Griggs J, May SJ, Gogotsi Y, Barsoum MW, Fafarman AT (2016). Highly Conductive Optical Quality Solution-Processed Films of 2D Titanium Carbide. *Adv Funct Mater* 26: 4162-4168.
- Ersan F, Kecik D, Özçelik VO, Kadioğlu Y, Üzengi Aktürk O, Durgun E, Aktürk E, Ciraci S (2019). Two-dimensional pnictogens: A review of recent progresses and future research directions. *Appl Phys Rev* 6: 021308.
- Frindt RF (1966). Single Crystals of MoS₂ Several Molecular Layers Thick. *J Appl Phys* 37: 1928-1929.
- Gablech I, Pekárek J, Klempa J, Svatoš V, Sajedi-Moghaddam A, Neužil P, Pumera M (2018). Monoelemental 2D materials-based field effect transistors for sensing and biosensing: Phosphorene, antimonene, arsenene, silicene, and germanene go beyond graphene. *TrAC - Trends in Anal Chem* 105, 251-262.
- Geim AK (2009). Graphene: Status and Prospects. *Science* 324: 1530-1534.
- Giovannetti G, Khomyakov PA, Brocks G, Kelly PJ, Van Den Brink, J (2007). Substrate-Induced Band Gap in Graphene on Hexagonal Boron Nitride: Ab Initio Density Functional Calculations. *Phys Rev B - Condens Matter Mater Phys* 76: 073103.
- Guzmán-Verri GG and Lew Yan Voon LC (2007). Electronic Structure of Silicon-Based Nanostructures. *Phys Rev B - Condens Matter Mater Phys* 76: 075131.
- Han SA, Bhatia R, Kim S-W (2015). Synthesis, Properties and Potential Applications of Two-Dimensional Transition Metal Dichalcogenides. *Nano Convergence* 2: 17.
- Han WQ, Wu L, Zhu Y, Watanabe K, Taniguchi T (2008). Structure of Chemically Derived Mono- and Few-Atomic-Layer Boron Nitride Sheets. *Appl Phys Lett* 93: 223103.
- Hummers WS and Offeman RE (1958). Preparation of Graphitic Oxide. *J Am Chem Soc* 80: 1339-1339.
- Joensen P, Frindt RF, Morrison, SR (1986). Single-Layer MoS₂. *Mater Res Bul* 21: 457-461.
- Karahan HE, Goh K, Zhang C, Yang E, Yıldırım C, Chuah CY, Ahunbay MG, Lee J, Tanteekin-Ersolmaz ŞB, Chen Y, Bae, T-H (2020) MXene Materials for Designing Advanced Separation Membranes. *Adv Mater* 32: 1906697.
- Kim KK, Hsu A, Jia X, Kim SM, Shi Y, Dresselhaus M, Palacios T, Kong, J (2012). Synthesis and characterization of hexagonal boron nitride film as a dielectric layer for graphene devices. *ACS Nano* 6: 8583-8590.
- Li B, Lai C, Zeng G, Huang D, Qin L, Zhang M, Cheng M, Liu X, Yi H, Zhou C, Huang F, Liu S, Fu, Y (2019). Black Phosphorus, a Rising Star 2D Nanomaterial in the Post-Graphene Era: Synthesis, Properties, Modifications, and Photocatalysis Applications. *Small* 15: 1804565.
- Lyu JK, Zhang SF, Zhang CW, Wang PJ (2019). Stanene: A Promising Material for New Electronic and Spintronic Applications. *Annalen Der Physik* 531: 1900017.
- Mao S, Pu H, Chen J (2012). Graphene Oxide and Its Reduction: Modeling and Experimental Progress. *RSC Adv* 2: 2643-2662.
- Mason TJ, Lorimer JP (2002). *Applied Sonochemistry. Applied Sonochemistry*. Wiley.
- Meshkian R, Näslund LÅ, Halim J, Lu J, Barsoum MW, Rosen J (2015). Synthesis of Two-Dimensional Molybdenum Carbide, Mo₂C, from the Gallium Based Atomic Laminate Mo₂Ga₂C. *Scripta Materialia* 108: 147-150.
- Molle A, Grazianetti C, Tao L, Taneja D, Alam MH, Akinwande D (2018). Silicene, silicene derivatives, and their device applications. *Chem Soc Rev* 47: 6370-6387.
- Naguib M, Kurtoglu M, Presser V, Lu J, Niu J, Heon M, Hultman L, Gogotsi Y, Barsoum, MW. (2011). Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti₃AlC₂. *Adv Mater* 23: 4248-4253.
- Nair RR, Blake P, Grigorenko AN, Novoselov KS, Booth TJ, Stauber T, Peres NMR, Geim AK (2008). Fine structure constant defines visual transparency of graphene. *Science* 320: 1308.
- Niu L, Coleman JN, Zhang H, Shin H, Chhowalla M, Zheng Z (2016). Production of Two-Dimensional Nanomaterials via Liquid-Based Direct Exfoliation. *Small* 12: 272-293.
- Novoselov KS, Geim AK, Morozov SV, Jiang D, Zhang Y, Dubonos SV, Grigorieva I V, Firsov AA (2004). Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science* 306: 666-669.
- Peigney A, Laurent C, Flahaut E, Bacsa RR, Rousset A (2001). Specific Surface Area of Carbon Nanotubes and Bundles of Carbon Nanotubes. *Carbon* 39: 507-514.
- Rao CNR, Sood AK, Subrahmanyam KS, Govindaraj A (2009). Graphene: The New Two-Dimensional Nanomaterial. *Angew Chem Int Ed* 48: 7752-7777.
- Reina A, Thiele S, Jia X, Bhaviripudi S, Dresselhaus MS, Schaefer JA, Kong J (2009). Growth of Large-Area Single- and Bi-Layer Graphene by Controlled Carbon Precipitation on Polycrystalline Ni Surfaces. *Nano Res* 2: 509-516.
- Sang X, Xie Y, Lin M-W, Alhabeab M, Van Aken KL, Gogotsi Y, Kent PRC, Xiao K, Unocic RR (2016). Atomic Defects in Monolayer Titanium Carbide (Ti₃C₂T_x) MXene. *ACS Nano* 10: 9193-9200.
- Song L, Ci L, Lu H, Sorokin PB, Jin C, Ni J, Kvashnin AG, Kvashnin DG, Lou J, Yakobson BI, Ajayan, PM (2010). Large Scale Growth and Characterization of Atomic Hexagonal Boron Nitride Layers. *Nano Lett* 10: 3209-3215.
- Takeda K, Shiraishi K (1994). Theoretical Possibility of Stage Corrugation in Si and Ge Analogs of Graphite. *Phys Rev B* 50: 14916-14922.
- Tan C, Cao X, Wu X-J, He Q, Yang J, Zhang X, Chen J, Zhao W, Han S, Nam G-H, Sindoro M, Zhang, H (2017). Recent Advances in Ultrathin Two-Dimensional Nanomaterials. *Chem Rev* 117: 6225-6331.
- Tao W, Kong N, Ji X, Zhang Y, Sharma A, Ouyang J, Qi B, Wang J, Xie N, Kang C, Zhang H, Farokhzad OC, Kim, JS (2019). Emerging two-dimensional monoelemental materials (Xenes) for biomedical applications. *Chem Soc Rev* 48: 2891-2912.
- Vogt P, De Padova P, Quaresima C, Avila J, Frantzeskakis E, Asensio MC, Resta A, Ealet B, Le Lay G (2012). Silicene: Compelling Experimental Evidence for Graphenelike Two-Dimensional Silicon. *Phys Rev Lett* 108: 155501.
- Wallace PR (1947). The Band Theory of Graphite. *Phys Rev* 71: 622-634.
- Wang T, Wang H, Kou Z, Liang W, Luo X, Verpoort F, Zeng Y-J, Zhang H (2020). Xenes as an Emerging 2D Monoelemental Family: Fundamental Electrochemistry and Energy Applications. *Adv Funct Mater* 30: 2002885.

- Yu X, Liang W, Xing C, Chen K, Chen J, Huang W, Xie N, Qiu M, Yan X, Xie Z, Zhang H (2020). Emerging 2D pnictogens for catalytic applications: status and challenges. *J Mater Chem A* 8: 12887-12927.
- Zavabeti A, Jannat A, Zhong L, Haidry AA, Yao Z, Ou JZ (2020). Two-Dimensional Materials in Large-Areas: Synthesis, Properties and Applications. *Nano-Micro Lett* 12: 66.
- Zhao ZY, Liu QL (2018). Study of the Layer-Dependent Properties of MoS₂ Nanosheets with Different Crystal Structures by DFT Calculations. *Catal Sci Technol* 8: 1867-1879.
- Zhou J, Zha X, Chen FY, Ye Q, Eklund P, Du S, Huang Q (2016). A Two-Dimensional Zirconium Carbide by Selective Etching of Al₃C₃ from Nanolaminated Zr₃Al₃C₅. *Angewandte Chemie* 128: 5092-5097.

Mevcut sayıya ait içindekiler listesine [DergiPark](#) üzerinden ulaşılabilir

Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi

Dergi web sayfası: dergipark.org.tr/tr/pub/sufefd

Araştırma Makalesi

Salvia candidissima Vahl (Lamiaceae) Alt Türlerinin Morfolojik ve Anatomik Özelliklerinin İncelenmesi

Yavuz Bağcı ^{a,1}, Nermin Elmalı ^{a,2}, Süleyman Doğu ^{b,3,*}^a Selçuk Üniversitesi Eczacılık Fakültesi, Konya^b Necmettin Erbakan Üniversitesi Meram Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Konya

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi

Geliş 20 Nisan 2021

Revizyon 23 Ekim 2021

Kabul 10 Mayıs 2022

Anahtar Kelimeler

Anatomi

Morfoloji

Salvia

Konya

Lamiaceae

ÖZ

Bu çalışmada *Lamiaceae* familyasına ait *Salvia candidissima* Vahl türüne ait *S. candidissima* subsp. *candidissima* ve *S. candidissima* subsp. *occidentalis* alt türleri morfolojik, anatomik, ve tohum mikromorfolojisi açısından değerlendirilmiştir. Morfolojik çalışmalarda alt türlerin; gövde, yaprak, çiçek ve meyve kısımlarının ölçümleri yapılmıştır. Anatomik incelemelerde, türün kök, gövde ve yapraklarından, mikrotom ve el ile kesitler alınarak boyanmış ve daimi preparatlar haline getirilmiştir. Daha sonra kameralı mikroskop yardımıyla bu preparatların fotoğrafları çekilerek, ayrıntılı anatomik incelemeler yapılmıştır. Bitkilerin yapraklarından yüzeysel kesitler alınarak stoma özellikleri incelendi ve stoma indeksi hesaplanmıştır.

Research Article

Investigation of Morphological and Anatomical Characters of Subsp. of The *Salvia candidissima* Vahl (Lamiaceae)

ARTICLE INFO

Article History

Received 20 April 2021

Revised 23 October 2021

Accepted 10 May 2022

Keywords

Anatomy

Konya

Lamiaceae

Morphology

Salvia

ABSTRACT

In this study, analysis of morphological, anatomical and ecological character of subsp. of the *Salvia candidissima* species which belong to family of Labiatae have been determined. In morphological studies of this species, parts of stem, leaves, flower and fruit have been measured. In anatomical investigations of this species have been taken from root, stem, leaves by microtom and hand. These sections have been painted and made constant slide. Afterwards, photographs of these preparations were taken with the help of a camera microscope and detailed anatomical examinations were made. Stomatal characteristics have been examined by section taken superficial from these plants leaves and stomatal index has been calculated.

1.Giriş

Türkiye 12.000 civarında eğrelti ve tohumlu bitki türü ile dünyada bulunduğu iklim kuşağında zengin floraya sahip ülkelerden biridir. Avrupa kıta florasının 12.000'e yakın türe sahip olduğu ve kıtanın ülkemizin yaklaşık 15 katı büyüklükte olduğu düşünülürse, yurdumuzun floristik

açından zenginliği daha da belirginleşir. Türkiye florasının ilginçliği, sahip olduğu tür zenginliğinin yanında, çok sayıda endemik tür de içermesinden kaynaklanır. Nitekim Türkiye' de bulunan endemik bitki sayısının Avrupa'daki endemik bitki sayısından daha fazla olduğu görülmektedir (Ekim ve ark., 2000).

* Sorumlu Yazar

E-posta adresleri: ybagci66@gmail.com (Y. Bağcı), nerminelmali@gmail.com (N. Elmalı), suleymandogu@gmail.com (S. Doğu)

¹ ORCID: 0000-0002-7714-856X² ORCID: 0000-0002-4861-6168³ ORCID: 0000-0002-5352-9288

Doi: 10.35238/sufefd.922719

E-ISSN: 2458-9411

Türkiye, aile, cins ve tür sayısı bakımından Avrupa'nın birçok ülkesi yanında, komşusu olan Asya ülkeleri arasında da bitki çeşitliliği açısından en zengin ülkelerden biri olmakla beraber endemik bitkiler açısından da dikkat çeken ülkelerden birisidir (Davis, 1965; Ekim ve ark., 2000). Ancak son 50 yılda ülkemizin var olan doğal zenginliği, bilinçsizce yapılan tarım, hayvancılık ve ağaç kesimi, erozyon, yangınlar, sanayileşme ve tarım ilaçlarının aşırı derecede kullanılması gibi çeşitli etkenlerden olumsuz şekilde etkilenmektedir. Bu problemlerin çözümüne katkı sağlamak amacı ile hazırlanan endemik bitkilerin tehlike kategorileri belirlenerek 12 türün neslinin tükenmiş olduğu belirtilmiştir. Bu olumsuz faktörler kimi zaman bitkinin yok olması ve yeryüzünde ortadan kalkması anlamına gelmektedir. Tehlikede olan bitki türlerini korumak amacı ile "Uluslararası Doğa ve Doğal Kaynakları Koruma Birliği (IUCN)" kurulmuştur. 2004 yılında yayınlanan IUCN tehlike kategorileri: EX - Extinct: Tükenmiş, EW - Extinct In The Wild: Doğada tükenmiş, CR - Critically Endangered: Çok tehlikede, EN - Endangered: Tehlikede, VU - Vulnerable: Zarar görebilir, LR - Lower Risk: Az tehdit altında, DD- Data Deficient: Veri yetersiz, NE - Not Evaluated: Değerlendirilemeyen şeklindedir (Ekim ve ark., 2000).

Dünyada yetişen bitki türlerinin, özellikle çoğunluğu dar ve sınırlı yayılışa sahip endemiklerin, korunmaları konusunda son yıllarda oldukça ciddi çalışmalar yapılmakta, öncelikle bunların uluslararası tehlike sınıflarından hangisine ait oldukları saptanarak, alınacak önlemlerde öncelik, halen çok baskı altında olup nesli kaybolma tehdidi altında olanlara verilmektedir.

Ekim ve ark. (2000)'e göre, bitkiler açısından neyin korunmasını bilmek onun sadece ismini bilmek demek değildir. Greuter'in de belirttiği gibi ideal olan, "bitkinin yayılışı, popülasyon genişliği ve yapısı, ekolojik istekleri, fizyolojik toleransı, döllenme sistemi, tozlaşma ve yayılma ekolojisi, çimlenme fizyolojisi, fide ve gelişmiş devrelerdeki rekabet derecesi, popülasyondaki böcekler gibi popülasyon yaşamının devamı ile doğrudan ilgili birçok konular hakkında ayrıntılı bilgiler gerekir."

Ayrıca Mayıs 1997 yılında Upsala'da toplanmış olan "Systematic Botany, Plant Utilization and Biosphere Conservation" adlı sempozyumda oy birliği ile alınmış bir kararda "Bitkiler dünya üzerinde temel hayatımızın dayanağı olan bir sistem oluştururlar. Buna rağmen birkaçı ılıman alan dışında onları nasıl korumamız gerektiği konusunda yeterli bilgiye sahip değiliz. Birçok ülkede bitki korumasında önerilerde bulunmak ve etkili planlar yapabilmek için emin bir temel dokümantasyon yoktur."

Labiatae familyası yaklaşık 200 cins ve 3200 kadar türle temsil edilen ve dünyanın kutup bölgelerine yakın yöreler hariç tüm karasal ekosistemlerinde bulunan bir familyadır. Tropikal bölgelerde sadece bir kaç adet cinsin bulunması bu familyanın özellikle ılıman Bölge'de yoğunlaştığına işaret etmektedir. Bu familya mensuplarının aromatik bileşikler ve uçucu yağlar bakımından zengin olması eski çağlardan beri bu familyaya olan ilgiyi artırmıştır (Heywood, 1978).

Labiatae familyası tıbbi ve ekonomik bakımdan değerli olan çok sayıda türe sahiptir. Labiatae familyası üyelerinin çoğu uçucu yağlar, aromatik yağlar ve benzeri sekonder metabolitler bakımından zengin olması sebebiyle; tıp, eczacılık, gıda, kozmetik ve parfümeri gibi alanlarda oldukça büyük öneme sahiptir. Labiatae familyası içinde önemli ve en büyük cinslerden bir tanesi *Salvia L.* ("adaçayı") cinsidir. Bu cinsin çok eski devirlerden beri bilinen tıbbi özelliği nedeni ile Latince de "kurtarıcı ya da tedavi edici" anlamına gelen "Salveo" kelimesinden esinlenerek isimlendirilmiştir.

belirtilmektedir. *Salvia cryptantha* Montbret & Aucher ex Benth., *S. candidissima* Vahl subsp. *occidentalis* Hedge and *S. forskahlei* L. türünün anatomik ve palinolojik özelliklerini araştırma teşebbüsleri ilk kez ışık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu altında gerçekleşmiştir. Çalışmaların bir çoğunda *Salvia* türleri tıpta çeşitli hastalıkların tedavisinde kullanılmaktadır (Başer, 1993; Kahraman ve ark., 2009a,b). Dünyada sıcak ve ılıman bölgelerde yayılış gösteren otsu ve çalimsı türlere sahip olan *Salvia* cinsi Türkiye'de 88 türle temsil edilmektedir. Bu türlerden 43 tanesi endemiktir (Davis, 1982; Dönmez, 2001).

Bu cinsle ilişkin (Davis, 1982) tarafından Türkiye Florası isimli eserde yapılan revizyon bu cinsin ülkemizde 86 türle temsil edildiğine işaret edilmiş ve bir türün ise şüpheli olduğunu belirtmiştir. Daha sonraki yıllarda bilim dünyasına tanıtılan yeni taksonlar ile bu sayı giderek artmış ve tür sayısı 89'a ulaşmıştır (Davis, 1982; Davis ve ark., 1988; Vural ve Adıgüzel, 1996; Dönmez, 2001; Tunçkol ve Akemik, 2013). Bu türlerden 46 tanesi endemik olup sadece Türkiye'ye özgüdür. Ülkemizin İç Anadolu Bölgesinde bu türlerden yaklaşık 50 tanesi bulunmakta ve bunların 35 tanesi endemik türler tarafından oluşturulmaktadır (Güner ve ark. 2012).

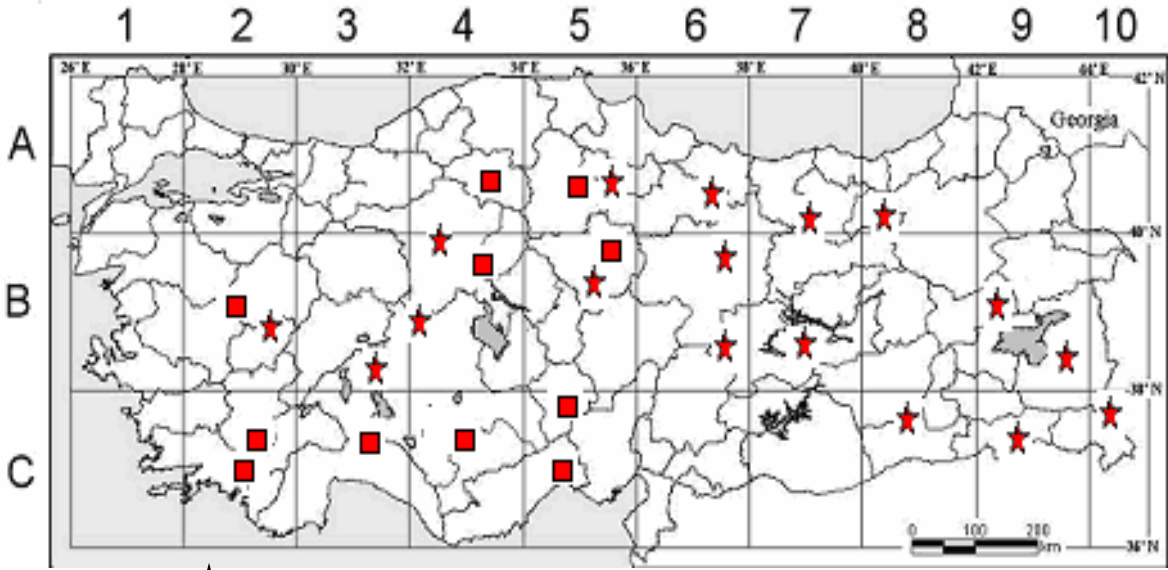
Ülkemizdeki *Salvia* türleri ya çalimsı ya da otsu türlerden oluşmaktadır. Çalimsı türler yaklaşık 1,5 m'ye kadar boylanabilmektedir. Çalimsı türlere örnek olarak İç Anadolu Bölgesinden *S. wiedemannii*, *S. tchihatcheffii*, Batı Anadolu'dan *S. pomifera*, *S. fruticosa*, Akdeniz Bölgesinden *S. pisidica*, *S. albimaculata* ve Doğu Anadolu'dan *S. euphratica* türleri örnek olarak verilebilir. Otsu türler ise ülkemizin tüm bölgelerinde dağılım göstermektedir. *S. viridis* (tek yıllık) hariç ülkemizden bilinen tüm *Salvia* türleri iki yıllık ya da çok yıllıktır. Yapraklar, kaliks ve çiçek durumunda bulunan tüyler, türlerin ayrımında kullanılan en önemli karakterlerden biridir. *Salvia* türlerinde çok çeşitli tüy tipleri gözlenmektedir. (Davis, 1982; Dönmez, 2001). Çalışmaların bir çoğunda *Salvia* türleri tıpta çeşitli hastalıkların tedavisinde kullanılmaktadır. Diğer taraftan bu familya üyelerinin ülkemizdeki etnobotanik kullanımı da oldukça yaygındır (Baytop, 1999; Sezik ve Yeşilada, 1999, 2001; Can Başer, 2008; Kargıoğlu, 2008).

Salvia türü güzel görünüşleri nedeniyle park ve bahçelerde dekoratif süs bitkisi olarak yetiştirilmektedir (Bhattacharya ve Ghosh, 1978; Nakipoğlu, 1993). *Salvia* türlerinin gerek tıbbi ve gerekse ekonomik önemleri nedeni ile kullanılmaları yanında güzel görünüşleri nedeni ile bahçe bitkisi olarak da yetiştirilmektedir. *Salvia* türleri parfümeri ve gıda sanayisinde tatlandırıcı olarak kullanılmaktadır (Stace, 1980).

2. Materyal ve Yöntem

Araştırmanın materyali, Konya ve Karaman il sınırları içerisinde doğal olarak yayılış gösteren *Salvia candidissima*'ya ait 2 alt türden oluşmaktadır. *Salvia candidissima* subsp. *candidissima* örnekleri, C4: Konya, Konya-Beyşehir yolu Altınapa civarı 1150 m, 16.06.2015, S.Doğu 3566 *Salvia candidissima* subsp. *occidentalis* örnekleri ise, C4; Karaman, Ermenek, Ermenek Gülnar yolu 3. Km, 20.06.2015 S.Doğu 3572 den toplanmıştır. Toplanan örneklerin bir kısmı anatomik çalışmalar için %70'lik alkol içerisinde fikse edilmiştir. Morfolojik incelemeler için örnekler klasik herbaryum yöntemleri ile kurutulmuş ve kontrol altına alınmıştır. Herbaryum örnekleri Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi KNYA Herbaryumunda saklanmaktadır. Örneklerin teşhisinde "Türkiye ve Doğu Ege Adaları Florası" (Davis, 1982) adlı kitap kullanılmıştır. Ayrıca

türlerin Türkiye Bitkileri Veri Servisinden (TUBİVES) coğrafi dağılım sorgulaması da yapılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. ★ *S. candidissima* subsp. *candidissima*, (■) *S. candidissima* subsp. *occidentalis* dağılım haritası.

İncelenen taksonlara ilişkin anatomik araştırmalarda kök, gövde, yaprak ve çiçek organlarının ayrıntılı anatomik yapıları Metcalfe ve Chalk (1972) referans alınarak değerlendirilmiştir. Bu yöntemler esas olarak ilgili örneklerin çeşitli morfolojik organlarından kesitlerin alınmasını, alınan kesitlerin standart yöntemlerle boyanmasını ve kalıcı preparatların hazırlanmasını içermektedir. Anatomik verilerin ortak özelliklerin derecesi ise taksonların akrabalık özelliklerinin anlaşılmasına yardımcı olacaktır. Parafin bloklara yerleştirilen örneklerden 8, 10, 12 ve 15 mikron kalınlığında kesitler alınmış, alınan kesitler önce 40°C'lik suda, daha sonra da albüminli suda kısa bir süre bekletilmiştir. Bu işlemi takiben kesit temiz bir lama çekilip kurumaya bırakılmıştır. Parafin bloklardan elde edilen kesitler Thermo Scientific Marka Rotary Mikrotom alınmıştır. Preparatlar entellan ile içerisinde hava kabarcığı kalmayacak şekilde kapatılarak daimi preparat haline getirilmiştir. Daha sonra bu daimi preparatlardan Leica DM LS2 araştırma mikroskobuna takılı Canon EOS 450D marka fotoğraf makinesi ile görüntüler alınmıştır. Morfolojik çalışmalar için taze örnekler ve herbaryum örneklerinden yararlanılmıştır. Bitkiyi morfolojik olarak görüntülemek için bitkinin doğal olarak yetiştiği lokalitelerde, fotoğrafları çekilmiştir. Elde edilen değerlerin minimum ve maksimum aralığı 'Türkiye Florası' ve kendi ölçümlerimiz esas alınarak belirlenmiştir. İncelemeler en az 20'şer tane bitki örneği kullanılarak yapılmıştır.

3. Bulgular

3.1. Morfolojik bulgular

Salvia candidissima Vahl subsp. *candidissima*: Gövdeler 30-60 (-110) cm. diktir, gövdenin aşağı kısmında tüyler, sapsız salgı bezi mevcuttur. Bu taksonda genellikle brakteler mevcuttur. Yapraklarında çeşitli yoğunlukta tüyler bulunmaktadır, genellikle rakım yükseldikçe daha yoğun lanat tüy örtüsü gözlenir. Yapraklar 5-10 (-16) x 3-9 cm yumurtamsı, geniş yumurtamsı, yoğun tüylü, yuvarlağımsı kalp şeklindedir, yaprak kenarı tırtıklı, genellikle renksiz ince bir epidermal tabakası vardır. Yaprak sapı 3-10 cm'dir.

Çiçekler beyaz ve üzerinde sarı noktalar vardır. Çiçek durumu panikül; dikeyde 2-6 çiçeklidir. Brakte yumurtamsı, 5-10 x 3-6 mm. Çiçek sapı 2-5 mm. Çanak yapraklar borulu kampanül, 12-15 mm, meyvede 20 mm, yoğun beze şeklinde kabarcıklı tüyler; üst dudak 3 dişli ve mukronat yapıdadır. Taç yapraklar tamamen beyaz, alt dudak 22-28 mm; tüp çapı 12-18 mm, şişkin, üst dudak orak şeklindedir. Stamen B. Fındıklar yuvarlak üç köşeli, yumurta şeklinde, 3 x 2.5 mm.

Çiçeklenme ve habitat: Mayıs-Ağustos (Eylül). Kayalık yamaçlar, yol ve tarla kenarları (700-2000 m). İndirgenmiş kimoze çiçek durumu hâkimdir. Genellikle çiçek durumu az dallanmıştır.

Salvia candidissima subsp. *occidentalis*: Çok yıllık otsudurlar. Gövdeler 30-60 (-90) cm. Dik, yukarıda dallanıcı, gövdenin aşağı kısmında tüyler ve sapsız salgı bezi mevcuttur. Yapraklarında çeşitli yoğunlukta tüyler bulunmaktadır, genellikle rakım yükseldikçe yoğun bir lanat tüy örtüsü gözlenir. Yapraklar basit, dikdörtgenimsi, 2,5-10 x 1-6 cm, yoğun tüylü, yaprak kenarı tırtıklı, yuvarlağımsı kalp şeklindedir. Yaprak sapı 4-12 cm'dir. Çiçek durumu panikül; dikeyde aralıklı 2-6 çiçeklidir. Brakte yumurtamsı - keskin, 5-10 x 3-6 mm. Çiçek sapı 2-4 mm. Çanak yapraklar borulu kampanül, 12-15 mm, yoğun beze şeklinde kabarcıklı tüyler; üst dudak 3 dişli ve mukronat yapıdadır. Taç yapraklar tamamen beyaz alt dudak, 22-28 mm; tüp çapı 12-18 mm, şişkin, üst dudak orak şeklinde ve 3 x 2,5 mm'dir.

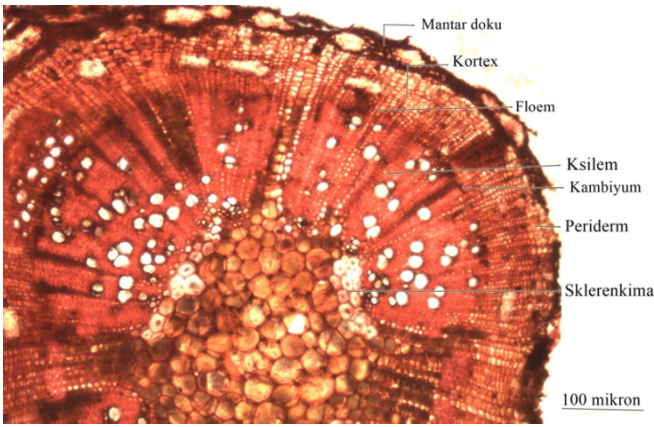
Çiçeklenme ve habitat: Haziran-Ağustos (Eylül). Kayalık yamaçlar, yol ve tarla kenarları. *Salvia* türlerinin hepsinde indirgenmiş kimoze çiçek durumu hâkimdir. Genellikle çiçek durumu az dallanmıştır.

3.2. Anatomik bulgular

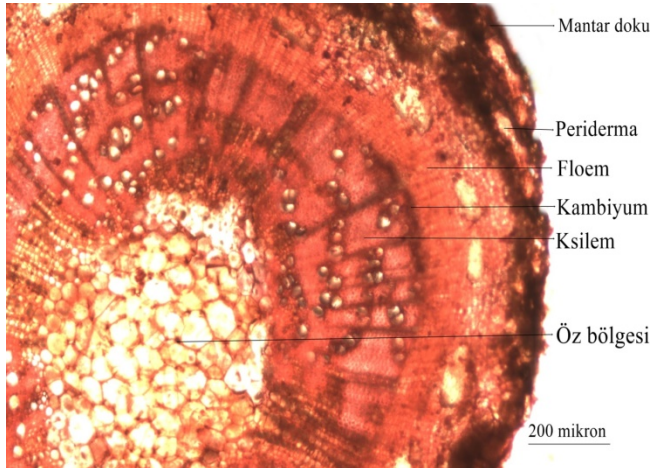
3.2.1. Kök

Çalışılan her iki taksonun kök anatomik yapısı da benzer özellikler gösterirler. *S. candidissima* subsp. *candidissima* örneklerinde: Olgun kökte epiderma dokusu, fellem, fellogen ve fellodermadan oluşan ve periderma denen yer yer parçalanmış yapıya yerini bırakmıştır ve yaklaşık 5-3 µm kalınlığındadır. Bu periderma tabakası kalınlığı *S.*

candidissima subsp. *occidentalis*'te 8.3-10 µm'dir. Peridermisin altında parankimatik korteks vardır. Periderma dokusunun altından başlayarak iletim demetini çevreleyen kambiyum halkasına kadar uzanan çok sıralı, oval ya da dikdörtgen şekilli, izodiyametik hücrelerden meydana gelmiştir. Korteks tabakası 13-18 sıralı hücre tabakasından oluşup yaklaşık olarak kalınlığı 86-113 µm arasındadır. *S. candidissima* subsp. *occidentalis*'te bu korteks tabakası 4-6 tabaka halindedir. Her iki türde de iletim demetine ait floem ve ksilem elemanları bulunmaktadır. Floemin aşağısında 3-4 sıralı dikdörtgenimsi hücrelerden oluşmuş kambiyum bulunmaktadır. Öz bölgesine kadar ksilem yer almaktadır. Ksilemde trake çapları 10.140-21.432 µ arasında değişiklik göstermektedir. İletim demetleri açık kollateral tiptedir. Kökteki öz ışınlarının sıra sayısı 10-22 sıralı ve oldukça heterojendir. Büyük, hücreler arası boşlukları bulunan, hacimli parankima hücrelerinden meydana gelmektedir (Şekil 2, Şekil 3).



Şekil 2. *Salvia candidissima* subsp. *candidissima* kökünün enine kesitinin genel görüntüsü.

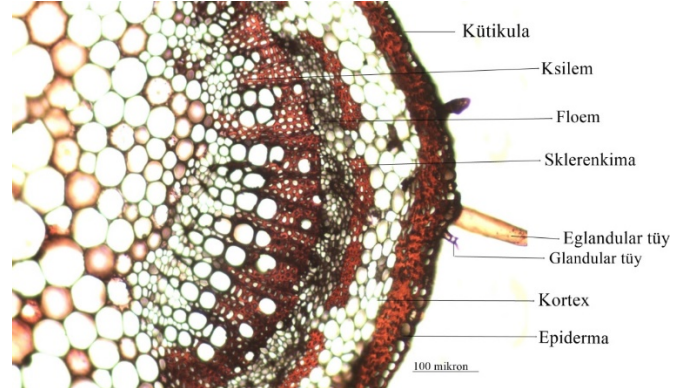


Şekil 3. *Salvia candidissima* subsp. *occidentalis* kökünün enine kesitinin ışık mikroskobu genel görüntüsü.

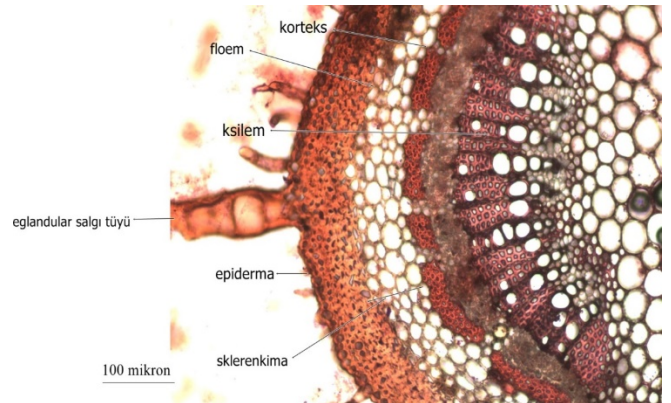
3.2.2. Gövde

Gövde enine kesitlerinde her iki taksonda da epiderma; dikdörtgen ve oval şekilli ve sıkı dizilmiş tek sıralı hücre tabakasından meydana gelmiştir ve üzerinde ince kütikula tabakası bulunmaktadır. Epiderma tabakası üzerinde salgı tüylerine de rastlanmaktadır. Korteks epiderma altında son derece iyi gelişmiş, ince çeperli; *S. candidissima* subsp. *candidissima*'da 6-10 sıra, *S. candidissima* subsp. *occidentalis*'te ise 3-6 sıralı hücre tabakasından meydana gelmektedir. Klorenkima, *S. candidissima* subsp. *occidentalis*'te 3-4, *S. candidissima* subsp. *occidentalis*'te 2-3

sıralı içleri kloroplast dolu hücre tabakası meydana getirmektedir. Klorenkimadan sonra endodermis tabakası belirgin şekilde değildir. İncelenen her iki türde korteks hücrelerinin hemen altında ise 3-6 sıralı kalın bir sklerenkima tabakası yer almaktadır. Ksilem ve floemden oluşan vaskular sistem, gövdenin öz bölgesi ile korteks dokusu arasında yer alır ve açık kollateral tiptedir. Ksilem ve floem elemanları arasında belirgin şekilde kambiyum görülmemektedir. Kambiyum halkasının içe bakan kısmında ksilem, dışa bakan kısmında floem yer alır. Merkezde geniş bir alan kaplayan parankimatik hücrelerden oluşan öz kısmı bulunur (Şekil 4-5).



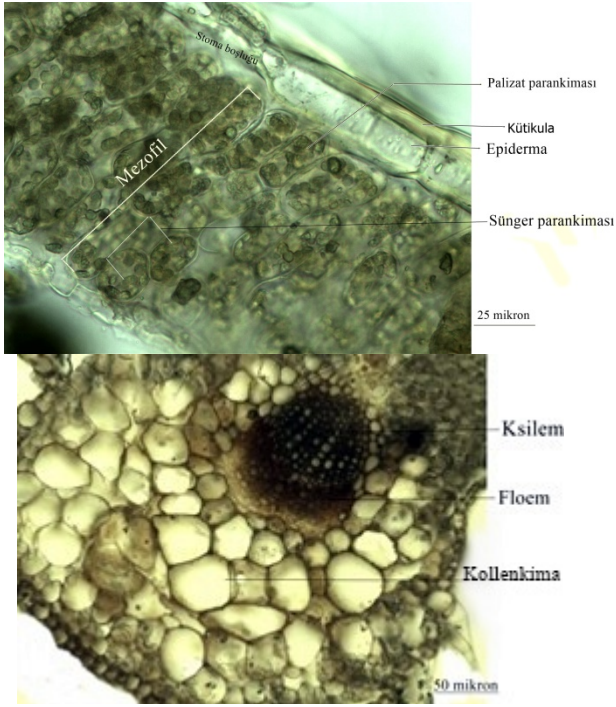
Şekil 4. *Salvia candidissima* subsp. *candidissima* gövdesinin enine kesitinin genel görüntüsü.



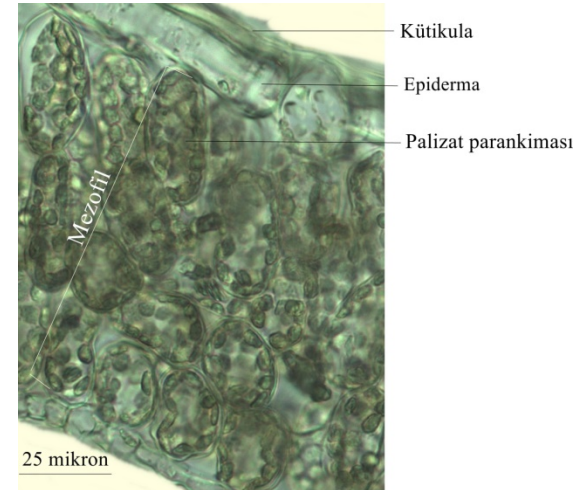
Şekil 5. *Salvia candidissima* subsp. *occidentalis* gövdesinin enine kesitinin genel görüntüsü.

3.2.3. Yaprak

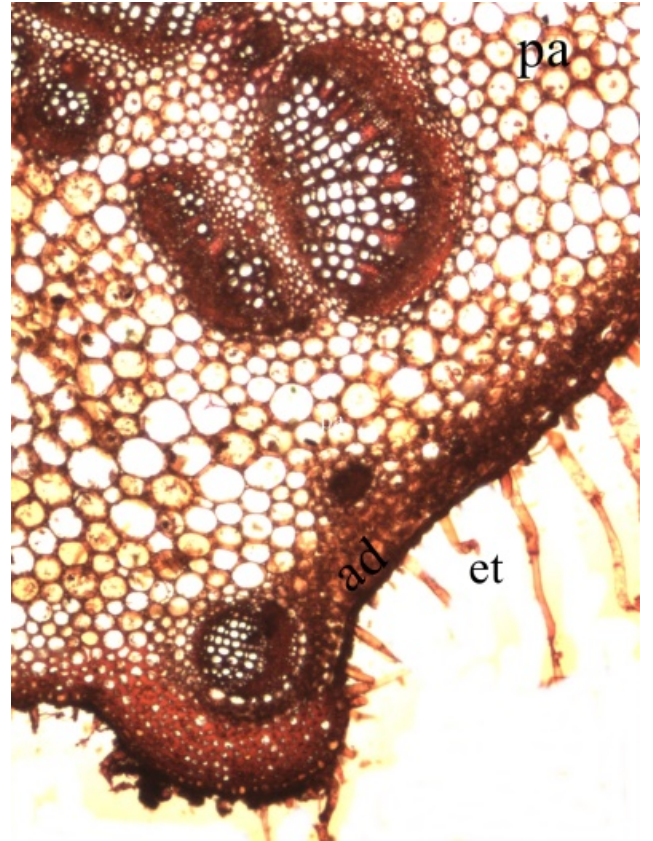
Yaprığın her iki yüzeyi kalın bir kütikula ile çevrili olup, her iki yüzeyde de gövde yüzeyinde bulunan salgılı ve salgısız tüyler bulunmaktadır. Üst epiderma yüzeyinde bulunan kütikula alt yüzeyde bulunan kütikuladan daha kalındır. Epiderma oval, hemen hemen dikdörtgen şekilli hücrelerden oluşmuştur, yaprığın alt ve üst yüzeyinde tek sıradan oluşmuştur. Üst epidermasının hemen altında dikdörtgenimsi-oval hücrelerden oluşan 2-4 sıralı palizat parankiması hücreleri bulunur. Palizat parankimasının altında 2-3 tabakalı dağılık sünger parankiması vardır. Yaprak orta damarından alınan enine kesitte yaprak üst epidermasının altında ve alt epidermasının hemen üzerinde 4-7 sıralı değişken şekilli kollenkima hücreleri bulunmaktadır. Yaprakta bulunan tüm iletim demetleri parankimatik hücrelerden oluşan demet kını ile çevrilmiştir. Yapraklar anatomik olarak dorsiventral yapıdır. Yani, mezofil hücreleri açıkça palizat ve sünger parankiması olarak farklılaşmışlardır (Şekil 6-7).



Şekil 6. *Salvia candidissima* subsp. *candidissima* yaprağının enine kesiti.



Şekil 7. *Salvia candidissima* subsp. *occidentalis* Hedge yaprak enine kesiti.



Şekil 8. *S. candidissima* subsp. *candidissima* yaprak sapı enine kesiti pa: parankima, ad: adaksiyal epidermis, et: eglandular tüy.



Şekil 9. *S. candidissima* subsp. *occidentalis* yaprak sapı enine kesiti pa: parankima, ad: adaksiyal epidermis, et: eglandular tüy.

3.2.4. Yaprak sapı

Her iki türde yaprak sapının enine kesitine bakıldığında; en dış kısmında epidermal hücreler vardır. Epidermal hücrelerin üst kısımlarında salgılı ve salgısız tüyler bulunur. Adaksiyal epidermisin hemen altında kollenkima hücreleri vardır. Kollenkima hücrelerini çok sayıda altıgen şekilde parankima hücreleri takip eder. İletim demetleri sıralıdır. Floemin üzerinde sklerenkima hücreleri yer alır. *Salvia* türünün yaprak saplarındaki iletim demetlerinin sayısının sekişyonların ayırt edilmesinde taksonomik önemi vardır (Şekil 8-9).

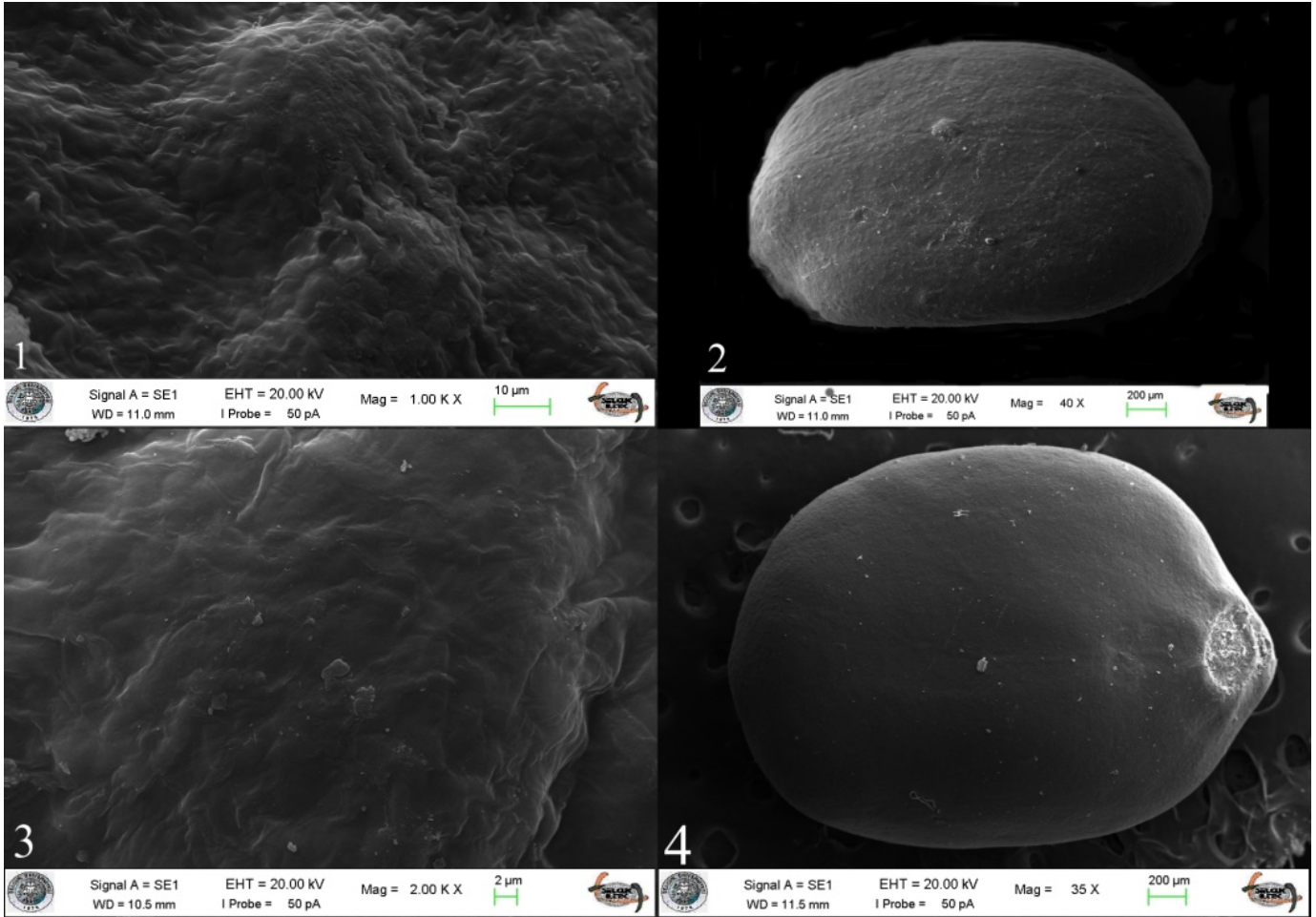
3.3. Tohumunun mikro morfolojik özellikleri

Taramalı elektron mikroskobu ve ışık mikroskobu ile yapılan çalışmalarda *Salvia* türlerinin tohumları arasında hem morfolojik olarak hem de yüzeyleri açısından farklılıklar tespit edilmiştir. *S. candidissima* subsp. *candidissima*'da, tohumların büyüklükleri genellikle 1,5-6 x

2-6,6 mm arasında değişen ebatlarda olduğu gözlemlenmiştir. Tohum şekilleri ovat, trigonous ve ovoid şeklindedir. Tohumların yüzeyleri glabrous olup X1000 büyütmedeki SEM resimlerinde tohum testasının hafif tüberküllü, dalgalı ve düzensiz girintili çıkıntılı olduğu gözlemlenmiştir. Tohum renginin açık kahverengi, şeklinin ovat, trigonous ve ovoid yüzeyinin ağısı çukurcuklu (reticulate-foveate) olduğu tespit edilmiştir (Şekil 10).

S. candidissima subsp. *occidentalis*'te tohumların büyüklükleri genellikle 1,5-6 x 2-6,6 mm arasında değişen ebatlarda olduğu gözlemlenmiştir. Tohum şekilleri oblong, ovate, suborbicular, ovoid şeklindedir. Tohumların yüzeyleri

glabrous olup X1000 büyütmedeki SEM resimlerinde tohum testasının hafif tüberküllü, dalgalı girintili çıkıntılı olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. *Salvia candidissima* tohum; subsp. *candidissima* (1-2), subsp. *occidentalis* (3-4).

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma; *Salvia candidissima* subsp. *candidissima* ve *Salvia candidissima* subsp. *occidentalis* örnekleri üzerinde yapılmıştır. Bu iki alt türün morfolojik ve anatomik özellikleri araştırılarak farklılıkları ortaya konulmuştur. Morfolojik incelemelerde *Salvia* cinsine dâhil olan türlerin tayin edilmesinde fertil stamen sayıları, stamen tipleri, kaliks ve korolla şekli, brakte yapısı, örtü ve salgı tüylerinin durumu önemli karakterlerdir (Kahraman ve ark. 2010). Araştırma yapılan taksonların morfolojik özellikleri Türkiye Florası'nda verilen tanımlaması genişletilmiş ve bu farklar ortaya konmuştur.

Anatomik incelemelerde her iki taksonun kök korteksinde sklerenkimatik dokuya rastlanmamıştır. *Salvia palestina* Bentam üzerinde yapılan çalışmada türün kök korteksinde sklerenkimatik dokunun varlığı tespit edilmiştir (Çobanoğlu, 1988). Ancak Çobanoğlu ve arkadaşları (1992), *Salvia trichoclada* Bentam türü üzerindeki çalışmalarında kökte sklerenkimatik bir dokuyu gözlemlenmemişlerdir. Metcalfe ve Chalk (1972), Lamiaceae familyasının öz kollarının 2-12 veya daha fazla hücre sırasından oluştuğunu belirtmişlerdir. Çalışılan iki taksona bakıldığında, kökteki öz ışınlarının 10-22 olduğu ve kök merkezinin primer ksilem tarafından doldurulmuş olduğu görülmüştür. Kök merkezinde parankimatik hücrelerden oluşan geniş bir öz bölgesi vardır.

Metcalfe ve Chalk (1972), Lamiaceae familyasının tipik özelliğinin gövdenin köşelerinde iyi gelişmiş bir kollenkima dokusunun varlığı olduğunu belirtmiştir. *S. candidissima* subsp. *occidentalis*'te gövde köşelerinde epidermanın altında iyi gelişmiş, kalın çeperli 6-10 sıra hücreden oluşan kollenkima tabakası bulunmaktadır. *Salvia candidissima* subsp. *candidissima*'da ise gövde köşelerinde bulunan kollenkima 5-8 sıra hücreden oluşmaktadır. Köşelerde bulunan kalın kollenkima tabakası gövde köşelerinde belirgin bir çıkıntı oluşturmadığından gövde yuvarlağımsıdır. Kollenkima ile endodermis arasında *Salvia candidissima* subsp. *candidissima* örneklerinde 6-10 tabaka dikdörtgenimsi ve yuvarlak hücrelerden oluşan korteks tabakası bulunmakta iken *Salvia candidissima* subsp. *occidentalis* örneklerinde 3-5 sıradır. Bunun yanı sıra, korteks parankiması hücrelerine göre ileri derecede bir farklılaşma göstermemişlerdir. Endodermisin altında iletim demetlerine rastgelen kısımlarda sklerenkimatik perisikl tabakası bulunmaktadır. Bu tabaka iletim demetleri üzerinde hilâl şeklindedir ve iletim demetlerini dıştan çevrelemiştir. Sklerenkimatik perisikl tabakası *Salvia candidissima* subsp. *occidentalis* 2-6 sıra hücreden oluşurken, *Salvia candidissima* subsp. *candidissima*'da 2-3 sıradır.

Salvia candidissima'nın iki alt türünde mezofil tabakası kalınlığının orta damar kalınlığına oranı ortalama 1/3'tür. Çalışılan iki taksonda da, yaprak enine kesitinde orta damarın bulunduğu kısımda iri yapılı yarım ay şeklinde bir

iletim demetinin bulunduğu görülmektedir. Her iki taksonda da orta damarın üst epidermisin altına rastlayan kesimlerinde iyi gelişmemiş kollenkima tabakası bulunmaktadır. Üst epidermisin altındaki kollenkima 2-4 tabakalıdır. Mezofil elemanı olan kloroplastlı hücreler, bu iki alt türde merkezi iletim demetinin iki yanına kadar sokulmuşlardır. Kollenkima altında bulunan iletim demetinde üst epidermise yönelmiş hilâl şeklinde ksilem dokusu ile onu dıştan saran ve alt epidermise yönelmiş olan floem elemanları bulunmaktadır. Floem elemanlarını ise en dıştan sklerenkimatik bir doku çevrelemiştir.

Petiyol yapısında iletim demetlerinin yapısının Lamiaceae familyası üyelerinde taksonomik bakımdan önemli olduğunu bilinmektedir (Metcalf ve Chalk, 1972; Akçin ve ark, 2011). Çiriğ ve Seçmen (1990) ise *Salvia kronenburgii*'nin petiyol yapısının 3 ana demetten oluştuğundan söz etmektedir. Çalışılan her iki türde yaprak sapının enine kesitine bakıldığında 2 ana demet olduğu gözlenmiştir. Nakipoğlu ve Oğuz (1990), taban yapraklı olan ve taban yapraklı olmayan türlerde petiyol yapısının farklı olduğunu belirtmiştir. Araştırma konumuzu oluşturan türlerde bu durum gözlenmemiştir.

Salvia üyelerinin merikarp karakterlerinin taksonomik bir karakter olarak kullanılabilirliği rapor edilmektedir (Kahraman ve ark., 2011). Taramalı elektron mikroskopu ve ışık mikroskopu ile yapılan çalışmalarda çalışılan taksonların tohumları arasında morfolojik ve yüzey süsleri açısından farklılıklar tespit edilmiştir. Tohumların büyüklükleri farklılık göstermekle beraber tohumların genellikle 1.3-5 x 2-6.5 mm arasında değişen boyutlarda olduğu gözlemlenmiştir. Tohumların yüzeyleri tüsüz olup tohum yüzeyinin hafif tüberküllü, dalgalı ya da düzensiz girintili-cıkıntılı olduğu gözlemlenmiştir.

Kaynaklar

- Akçin Ö E, Özyurt M S ve Şenel G (2011). Petiole anatomy of some Lamiaceae taxa. Pak. J. Bot 43 (3): 1437-1443.
- Başer H (1993). Uçucu yağların dünya ticareti. Tıbbi ve Aromatik Bitkiler Bülteni, Anadolu Üniv. Tıbbi ve Aromatik Bitkiler Araştırma Merkezi 9: 15-17.
- Baytop T (1999). Therapy with plants in Turkey. İstanbul Univ Publ (3255), 418.
- Bhattacharya R N ve Ghosh J K (1978). On the validity of the formal Edgeworth expansion. Ann. Statist 6 (2): 434-451.
- Can Başer K (2008). Biological and pharmacological activities of carvacrol and carvacrol bearing essential oils. Current pharmaceutical design 14 (29): 3106-3119.
- Çiriğ N ve Seçmen Ö (1990). *Salvia kronenburgii* Rech. Fil Türü Üzerinde Morfolojik, Taksonomik ve Ekolojik Çalışmalar X. Ulusal Biy. Kongresi 18-20 Temmuz 325-335 Erzurum.
- Çobanoğlu D (1988). *Salvia palaestina* Bentham'nin (Lamiaceae) Morfolojik ve Sitolojik Özellikleri. Doğa Türk Bot. Derg 12: 215-223.
- Çobanoğlu D, Özel S ve Evren H (1992). *Salvia trichoclada* Bentham (Lamiaceae)'nin morfolojik özellikleri, XI. Ulusal Biyoloji Kongresi 24-27. Elazığ.
- Davis P, Mill R ve Tan K (1988). *Astragalus* L., Flora of Turkey and the East Aegean islands. 114-124.
- Davis P H (1965). Flora of Turkey, Flora of Turkey.
- Davis P H, Mill R R, Tan K, ed. (1982). Flora of Turkey and the East Aegean Islands. Vol. 10.
- Dönmez A A (2001). A new Turkish species of *Salvia* L. (Lamiaceae). Botanical Journal of the Linnean Society 137 (4): 413-416.
- Ekim T, Koyuncu M, Vural M, Duman H, Aytac Z ve Adıgüzel N (2000). Türkiye Bitkileri Kırmızı Kitabı (Eğrelti ve Tohumlu Bitkiler).
- Güner A, Aslan S, Ekim T, Vural M. ve Babaç M.T (2012). Türkiye Bitkileri Listesi (Damarlı Bitkiler). Nezahat Gökyiğit Botanik Bahçesi ve Flora Araştırmaları Derneği yayını. İstanbul.
- Heywood V (1978). Flowering plants of the world. Mayflower Book, New York, New York, USA.
- Kahraman A, Celep F ve Dogan M (2009a). Morphology, anatomy and palynology of *Salvia indica* L. (Labiatae). World Applied Sciences Journal 6 (2): 289-296.
- Kahraman A, Celep F ve Doğan M, (2009b). A new record for the Flora of Turkey: *Salvia macrosiphon* Boiss. (Labiatae). Turkish Journal of Botany 33 (1): 53-55.
- Kahraman A, Celep F, Dogan M, Bagherpour S (2010) A taxonomic revision of *Salvia euphratica* sensu lato and its closely related species (sect. *Hymenosphace*, Lamiaceae) by using multivariate analysis. Turk J Bot 34: 261-276.
- Kahraman A, Celep F, Dogan M, Guerin G R ve Bagherpour S (2011). Mericarp morphology and its systematic implications for the genus *Salvia* L. section *Hymenosphace* Bentham (Lamiaceae) in Turkey. Plant Syst Evol 292: 33-39
- Kargioğlu M (2008). Afyonkarahisar Çevresi Flora ve Vegetasyon.
- Metcalf C ve Chalk L (1972). Anatomy of Dicotyledon. Clarendon, Press, vol. 1. Oxford.
- Nakipoğlu M (1993). Türkiye'nin *Salvia* L. türleri üzerinde karyolojik araştırmalar, I, *S. fruticosa*. 21-25.
- Nakipoğlu M ve Oğuz G (1990). İzmir ve Çevresinde Yayılış Gösteren Bazı *Salvia* L. (Adaçayı) Türlerinin Biyosistematiği Üzerine Araştırmalar, Doktora Tezi.
- Sezik E ve Yeşilada E (1999). Essential Oils 'Uçucu Yağ Taşıyan Türk Halk İlaçları, Eskişehir Anadolu Üniversitesi Yayınevi. Eskişehir, Turkey.
- Sezik E ve Yeşilada E (2001). Türkiye'de Bitkilerin Halk İlacı olarak Kullanılışı, XIII, Bitkisel İlaç Hammaddeleri Toplantısı Bildiri Kitabı. 103-112.
- Stace C A (1980). Plant Taxonomy and Biosystematics 7, Maryland: University Park, Baltimore.
- Tunçkol B ve Akkemik Ü (2013) Endemic Plants of Taşlıyayla and Kızık (Bolu-Seben) Surrounding, Journal of the Faculty of Forestry İstanbul University İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi 63 (2): 1-10.
- Vural M ve Adıgüzel N (1996) A new species from Central Anatolia: *Salvia aytachii* M. Vural et N. Adıgüzel (Labiatae), Turkish Journal of Botany 20 (6): 531-535.

Mevcut sayıya ait içindekiler listesine [DergiPark](#) üzerinden ulaşılabilir

Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi

Dergi web sayfası: dergipark.org.tr/tr/pub/sufefd

Araştırma Makalesi

Sistein Tayini İçin Yeni Bir Algılayıcı Molekülün Sentezi ve Karakterizasyonu

Sait Malkondu ^{a,1,*}, Serkan Erdemir ^{b,2}^a Giresun Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Giresun, Türkiye^b Selçuk Üniversitesi, Kimya Bölümü, Konya, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi

Geliş 13 Mayıs 2022

Revizyon 24 Haziran 2022

Kabul 27 Haziran 2022

Anahtar Kelimeler

Algılayıcı

ESIPT

Fluoresans

Sistein

ÖZ

Sistein canlı organizmada önemli rolleri olan tiyol grubu içeren bir amino asittir. Dolayısıyla sistein varlığının ve miktarının tespit edilmesi araştırmacıların ilgilendiği konuların başında gelmektedir. Bu çalışmada, sisteini ESIPT mekanizmasına dayalı fluoressans metodu ile tayin etmek amacı ile benzotiyazol temelli yeni bir algılayıcı molekül tasarlanmıştır. Hedef algılayıcının molekül yapısı FT-IR, NMR ve MALDI-TOF (Matriks aracılı lazer dezorpsiyon iyonizasyon uçuş zamanı) kütle spektrokopisi gibi metodlarla aydınlatılmıştır. Ayrıca, algılayıcı ve sistein arasındaki etkileşim mekanizması teorik hesaplamalar aracılığıyla incelenmiştir.

Research Article

Synthesis and Characterization of A New Probe For The Detection of Cystein

ARTICLE INFO

Article History

Received 13 May 2022

Revised 24 June 2022

Accepted 27 June 2022

Keywords

Cysteine

ESIPT

Fluorescence

Probe

ABSTRACT

Cysteine is an amino acid containing a thiol group, which has important roles in living organisms. Therefore, the determination of the presence and amount of cysteine is one of the main topics of interest for researchers. In the present study, a new benzothiazole-based sensor has been designed to detect cysteine by fluorescence method based on ESIPT mechanism. The molecule structure of the target probe molecule has been confirmed by methods such as FT-IR, NMR and MALDI-TOF (Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization time-of-flight) mass spectroscopy. In addition, the interaction mechanism between the probe and cysteine has been investigated through theoretical calculations.

Kısaltmalar

¹ H NMR	Hidrojen Nükleer Manyetik Rezonans
¹³ C NMR	Karbon Nükleer Manyetik Rezonans
APT	Attached Proton Test
FTIR	Fourier Dönüşümü Infrared Spektroskopisi
HOMO	En Yüksek Enerjili Dolu Molekül Orbitali
LUMO	En Düşük Enerjili Boş Molekül Orbitali
EN	Erime Noktası
CHCl ₃	Kloroform
CDCl ₃	Dötero Kloroform
DMSO	Dimetil sülfoksit
ESIPT	Uyarılmış seviye molekül içi proton transferi
GS IPT	Temel seviye molekül içi proton transferi

1. Giriş

Sistein kükürt atomu içeren önemli bir amino asittir ve insan vücudu için gereklidir (Dickinson ve Forman, 2002; Wu ve ark., 2004). L-sistein doğada bulunan en bilinen formudur (Stipanuk ve ark., 2006). Yapısı polardır ve tiyol grubu içerir. Tiyol grupları yükseltgendiğinde, iki L-sistein molekülü disülfür bağları ile bağlanarak sistini oluşturabilir. Tersinir bir tepkime ile, disülfid bağının indirgenmesi iki L-sistein molekülü oluşturur (Ralph ve ark., 1994; Paulsen ve Carroll, 2013). Disülfid bağları proteinlerin yapısını belirlemede önemli bir rol oynar. Günümüzde, sistein gıda, ilaç ve kozmetik gibi birçok endüstride yaygın olarak

* Sorumlu Yazar

E-posta adresleri: sait.malkondu@giresun.edu.tr (S. Malkondu), serdemir82@selcuk.edu.tr (S. Erdemir)¹ ORCID: 0000-0002-6806-4188² ORCID: 0000-0003-0790-0549Doi: [10.35238/sufefd.1115890](https://doi.org/10.35238/sufefd.1115890)

E-ISSN: 2458-9411

kullanılmaktadır. Kuruyemiş, et, tahıl, meyve ve sebzelerin doğal yapısında bulunur ve eksikliği bu gıdalar ile giderilebilir (Demirkol ve ark., 2004; Berehoiu ve ark., 2013). Dahası, vücut metabolizmasında önemli rolleri vardır. Protein ve hormon sentezi, biyolojik tiyol homeostasisin korunması, biyokataliz, metal bağlama ve ksenobiyotik detoksifikasyon gibi birçok fizyolojik proseste kritik rol oynar (Quig, 1998; Dickinson ve Forman, 2002; Dietz ve ark., 2002). Sistein seviyesinin anormal seviyelere çıkması birçok hastalığın oluşmasına yol açabilir. Dolayısıyla sistein seviyesinin biyolojik ortamda belirlenmesi oldukça önemlidir.

Şimdiye kadar sistein tayini için gaz kromatografisi, yüksek performanslı sıvı kromatografisi, voltametri, kapiler elektroforez gibi teknikler uygulanmıştır (Amini ve ark., 2003; Küster ve ark., 2008; Özyürek ve ark., 2012; Tao ve ark., 2012). İlave olarak raman spektroskopisi kullanılarak un numunelerindeki L-sistein miktarı tayin edilmiştir (Cebi ve ark., 2017). Bununla birlikte bu metotlar pahalı cihaz gereksinimi, yerinde ölçüm yapamama, pahalı, karmaşık ve uzun analiz süresi gibi birçok dezavantaja sahiptir. Floresans metodu kısa tayin zamanı, yüksek hassasiyet, anlık izleme, yerinde tayin gibi avantajlara sahip olduğundan son zamanlarda oldukça çok kullanılan bir metot haline gelmiştir. Uyarılmış hal molekül içi proton transferi (Excited state intramolecular proton transfer, ESIPT) reaktif analitlerin floresans temelli tayinini mümkün kılacak hızlı fotoizomerleşme yollarına dayalıdır (Bao ve ark., 2017). Uyarılmış moleküllerde proton transferi deneysel olarak ilk olarak gözlemlendiği 1956 yılından bu yana, ESIPT reaksiyonları ışık yayan diyotlar (OLED) (Gupta ve ark., 2021), moleküler anahtarlar (Das ve ark., 2021) ve floresans algılama (Qin ve ark., 2018; Sedgwick ve ark., 2018) alanında geniş uygulama bulmasından ötürü, birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir. Genelde, ESIPT floresansı tautomer (enol ve keton) oluşumuyla sonuçlanan ve molekülde proton vericisinden hidrojen bağı aracılığıyla komşu pozisyonundaki proton alıcısına transfer olan çok hızlı bir işlemdir (Li ve ark., 2011; Su ve ark., 2019). Bu fotofiziksel özelliğe dayalı olarak, birçok floresans algılayıcı ESIPT işleminin bozulmasıyla veya oluşmasıyla tasarlanmıştır (Zhao ve ark., 2012).

Sistein tayini için şimdiye kadar birçok floresans sensör molekülü rapor edilmiştir (Niu ve ark., 2015; Yan ve ark., 2018; Xu ve ark., 2019; Yang ve ark., 2019; Dai ve ark., 2020; Zhang ve ark., 2020). Bu tekniklerin çoğunun etkinlik önünden farklılık göstermekle birlikte düşük seçicilik, düşük hassasiyet, geç cevap alma gibi sınırlamaları mevcuttur. Dolayısıyla, bu çalışmada seçici ve hassas sistein tayininde kolorimetrik ve floresans sensör olarak kullanılabilen sentezi kolay ve ekonomik benzotiyazol temelli yeni bir algılayıcı molekül sentezi ve karakterizasyonu amaçlanmıştır. Yapısı itibarıyla oldukça seçimli ve hassas bir algılayıcı olması beklenmektedir. Çalışma kapsamı sadece algılayıcı molekülün sentezi ve karakterizasyonuna imkân vermiştir ve algılayıcının sistein ile etkileşim mekanizması teorik hesaplamalar aracılığıyla incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kullanılan cihazlar ve kimyasallar

Bu çalışmada kullanılan kimyasal maddeler Sigma-Aldrich, Merck ve Fluka şirketlerinden temin edildi. Ticari kimyasal maddeler ön saflaştırma işlemi yapılmadan alındığı

şekilde kullanıldı. Reaksiyonlar, ince tabaka kromatografisi (Merck 60 Kieselgel F 254) yapılarak UV lambası altında izlendi.

Sentezlenen bileşiklerin ^1H NMR ve ^{13}C NMR spektrumları Varian 400 MHz spektrometresinde CDCl_3 veya DMSO-d_6 çözücülerini kullanılarak alındı. NMR spektrumunda kimyasal kayma değerleri (δ) ppm cinsinden belirtildi. Erime noktası Gallenkamp marka erime noktası tayin cihazı ile yapıldı. FT-IR spektrumları Perkin Elmer spektrum 100 spektrofotometresinde alındı. MALDI-TOF-MS analizi ise Agilent 6230B TOF LC kütle spektrometresi ile gerçekleştirildi.

2.2. 4-(2-benzotiyazolil)fenol (2)

Bu bileşik literatürde belirtilen metoda göre hazırlanmıştır (Wang ve ark., 2009).

2.3. 5-(2-Benzotiyazolil)-2-hidroksibenaldehit (3)

Bu bileşik literatürde belirtilen metoda göre hazırlanmıştır (Dahal ve ark., 2017).

2.4. 2,4-Bis(benzo[d]tiyazol-2-il)fenol (DBF)

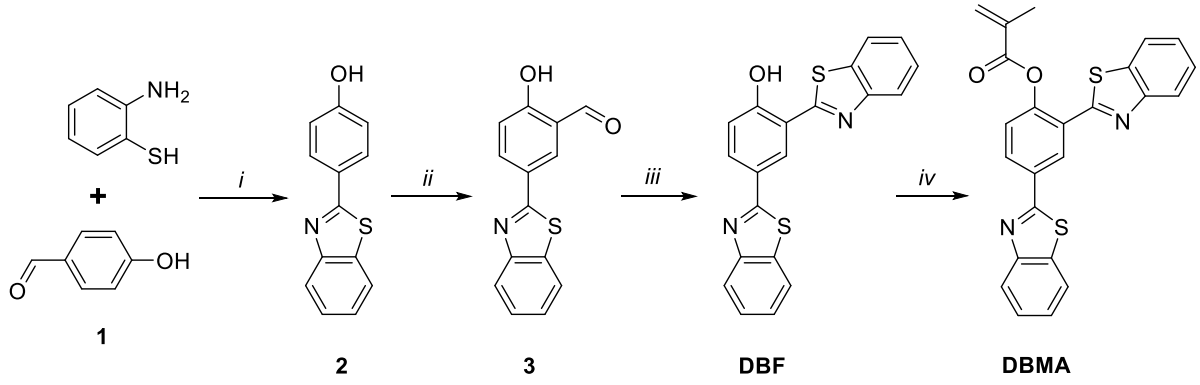
Bu bileşik literatürde belirtilen metoda göre hazırlanmıştır (Li ve ark., 2019).

2.5. 2,4-bis(benzo[d]tiyazol-2-il)fenil metakrilat (DBMA)

Buz banyosundaki bir balonda bulunan 2,4-bis(benzo[d]tiyazol-2-il)fenol (DBF) (360 mg, 1.0 mmol) ve trietilaminin (400 mg, 4.0 mmol) susuz diklormetan (8 ml) içerisindeki karışımı üzerinde metil metakrilik asit klorürü (3.0 ml) ilave edildi. Karışım 0°C sıcaklıkta 30 dk. boyunca karıştırıldı ve sonrasında oda sıcaklığına gelmesi için 4 saat daha karıştırıldı. Reaksiyon tamamlandıktan sonra, çözücü uzaklaştırıldı ve geride kalan kalıntı kolon kromatografisi ile etil asetat/hekzan (6/1, v/v) karışımından izole edildi. Ürün sarı renkli olarak %45 verimle 186 mg ürün elde edildi. FTIR (ATR, cm^{-1}): $\nu = 1733$ (C=O), 1637 (C=N), 1583 (C=C); ^1H NMR (400 MHz, DMSO-d_6) δ 9.05 (d, 1H, $J=2.4$ Hz, ArH), 8.26 (dd, $J = 6.3, 4.2$ Hz, 1H, ArH), 8.15 (dd, $J = 8.2, 5.0$ Hz, 4H, ArH), 7.60 (dd, $J = 12.3, 3.9$ Hz, 3H, ArH), 7.50 (d, $J = 2.6$ Hz, 2H), 6.48 (d, $J = 3.7$ Hz, 1H, akril CH), 6.10 (s, 1H, akril CH), 2.11 (d, 3H, CH_3). ^{13}C NMR (100 MHz, DMSO-d_6) δ 165.9, 165.4, 161.0, 153.9, 152.4, 150.6, 135.4, 135.4, 135.1, 131.7, 130.9, 130.2, 128.0, 127.4, 127.43, 126.9, 126.4, 126.3, 126.1, 123.6, 123.5, 122.9, 122.75, 18.4. MALDI-TOF-MS: hesaplanan $\text{C}_{24}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_2\text{S}_2$ (M+H) $^+$: 429.0800, bulunan: 429.0741.

3. Sonuçlar ve Tartışma

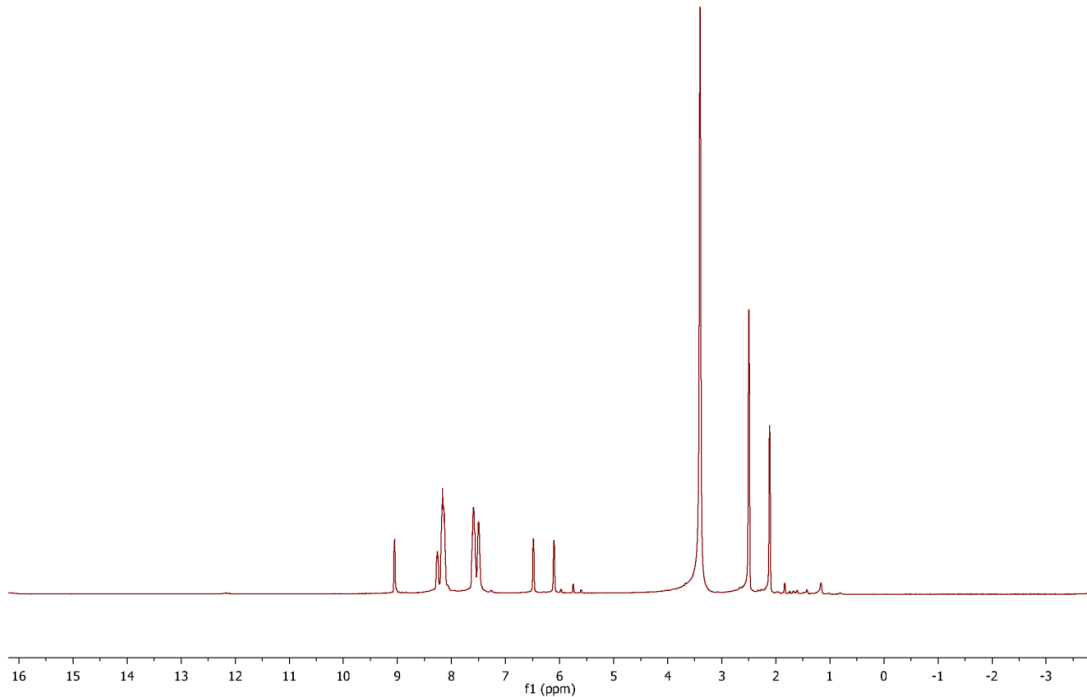
Algılayıcı molekülün sentezi dört sentez basamağı üzerinden gerçekleştirilmiştir (Şema 1). İlk basamakta 4-hidroksi benaldehit ile 2-aminotiyofenol arasındaki halkalaşma tepkimesinden 4-(2-benzotiyazolil)fenol (2) bileşiği elde edilmiştir. Ardından, bileşik 2 Duff reaksiyonu aracılığıyla aldehit türevine (3) dönüştürülmüştür. Birinci basamakta uygulanan halkalaşma tepkimesi aracılığıyla 2,4-bis(benzo[d]tiyazol-2-il)fenol (DBF) elde edilmiştir. Son basamakta metil metakrilik asit klorürü ile DBF bileşiği etkileştirilerek 2,4-bis(benzo[d]tiyazol-2-il)fenil metakrilat (DBMA) bileşiği elde edilmiştir.



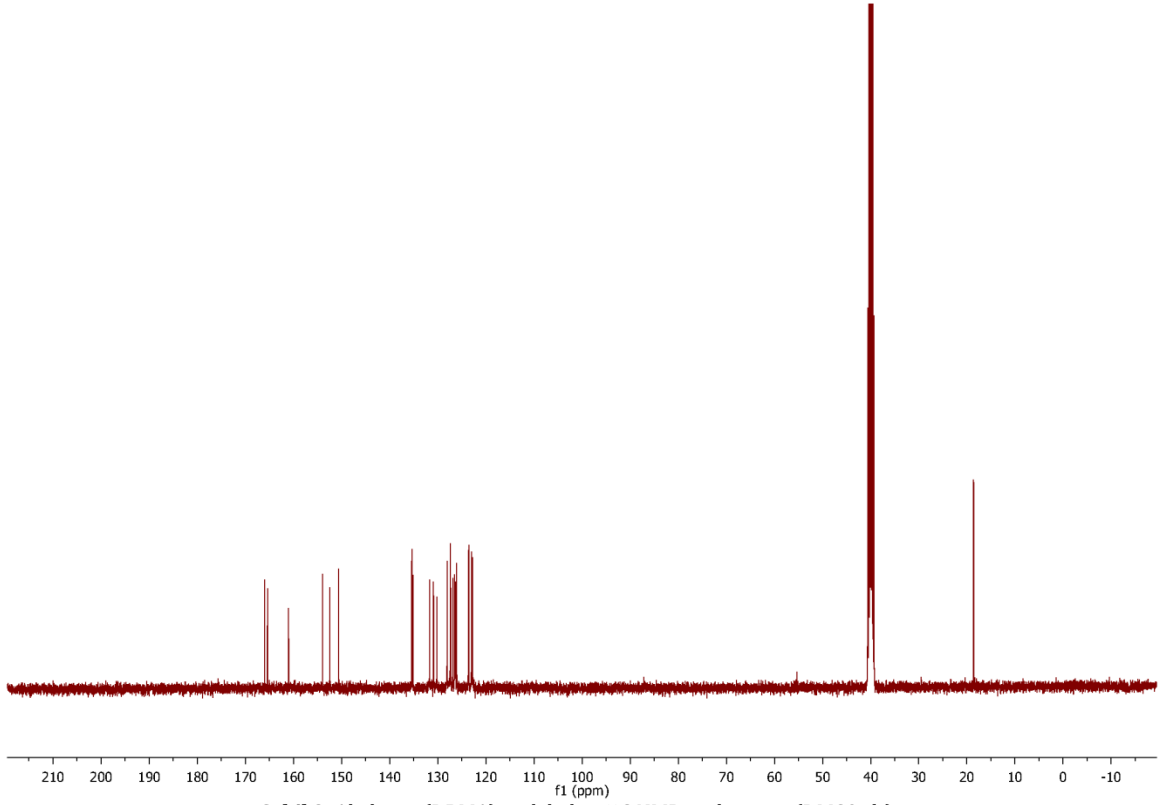
Şema 1. Sistein algılayıcısının (DBMA) sentez şeması, i) EtOH, ısı; ii) heksametilentetramin, trifloro asetik asit (iii) 2-aminotiyofenol, EtOH, ısı; iv) metil metakrilik asit klorürü, trietilamin, CH₂Cl₂, 0 °C.

Sentezlenen ara ürünlerin kimyasal yapıları ¹H NMR ve son ürünün yapısı ¹H, ¹³C, APT NMR, FT-IR ve TOF-MS teknikleri kullanılarak aydınlatılmıştır. 4-(2-Benzotriazolil)fenol (2) bileşiğinin ¹H NMR spektrumu incelendiğinde, δ 10.25 ppm de gözlenen singlet pik fenolik hidroksil grubuna ait olan proton sinyalidir (Şekil 1). Aromatik protonlara ait sinyaller δ 8.04-6.92 ppm aralığında dublet, dubletin dubleti ve multipler olarak gözlenmektedir. İntegrasyon değerleri de dikkate alındığında bileşik 2'nin kimyasal yapısı doğrulanmıştır. Bileşik 2'nin aldehit türevi olan 5-(2-benzotriazolil)-2-hidroksibenzoaldehit bileşiğine (3) dönüşmesi ¹H NMR spektrumunda δ 10.33 ppm de aldehit grubuna ait proton sinyalinin ortaya çıkması ile doğrulanmıştır. Bileşik 3'ün 2-aminotiyofenol ile halkalaşma tepkimesinden oluşan 2,4-bis(benzo[d]tiyazol-2-il)fenol (DBF) bileşiğinin yapısı, bileşik 3'ün ¹H NMR spektrumunda aldehit grubuna ait proton sinyalinin kaybolması ve yeni δ 9.00-7.22 ppm aralığında yeni aromatik proton sinyallerin gözlenmesi ile doğrulanmıştır. Son basamakta, algılayıcı birim metil metakrilik asit klorürün 2,4-bis(benzo[d]tiyazol-

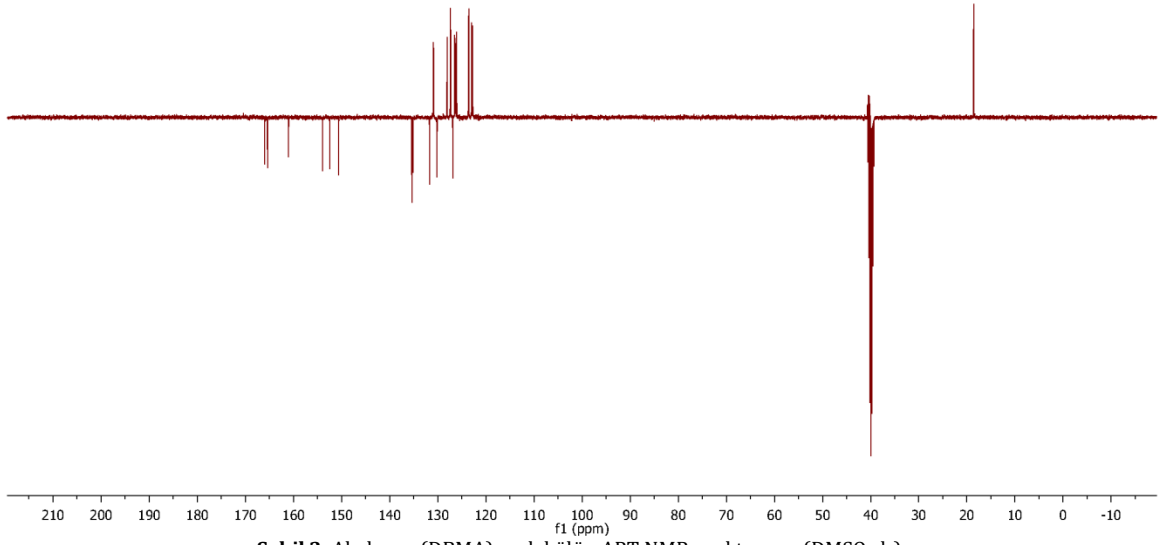
2-il)fenol bileşiğine dahil edilmesi, ¹H NMR spektrumunda, metakril grubuna ait alken hidrojenlerinin δ 6.48 ve 6.10 ppm de, metil hidrojenlerinin δ 2.11 ppm de gözlenmesiyle doğrulanmıştır. ¹³C NMR spektrumu incelendiğinde, beklenen 24 farklı karbon atomuna ait 24 adet sinyal gözlenmesi bileşiğin yapısı desteklenmiştir (Şekil 2). APT NMR spektrumu incelendiğinde bileşiğin yapısına uygun olarak karbon atomlarının hidrojen bağlı durumlarına göre uygun şekilde ayrıştığı görülmektedir (Şekil 3). FTIR spektrumunda 1733 cm⁻¹ bölgesinde gözlenen şiddetli bant C=O titreşim frekansına işaret etmektedir. C=N ve C=C gruplarına ait titreşim frekansları sırasıyla 1637 ve 1583 cm⁻¹ bölgesinde düşük şiddette gözlenmiştir (Şekil 4). Ayrıca, algılayıcı DBMA'nın yapısı TOF-MS analizi ile doğrulanmıştır. Teorik olarak hesaplanan C₂₄H₁₆N₂O₂S₂ [DBMA+H]⁺: 429.0800 kütle, deneysel olarak 429.0741 bulunmuştur (Şekil 5). Bu değerlendirmeler ışığında, hedef algılayıcı bileşiğin başarılı bir şekilde sentezlendiği görülmektedir.



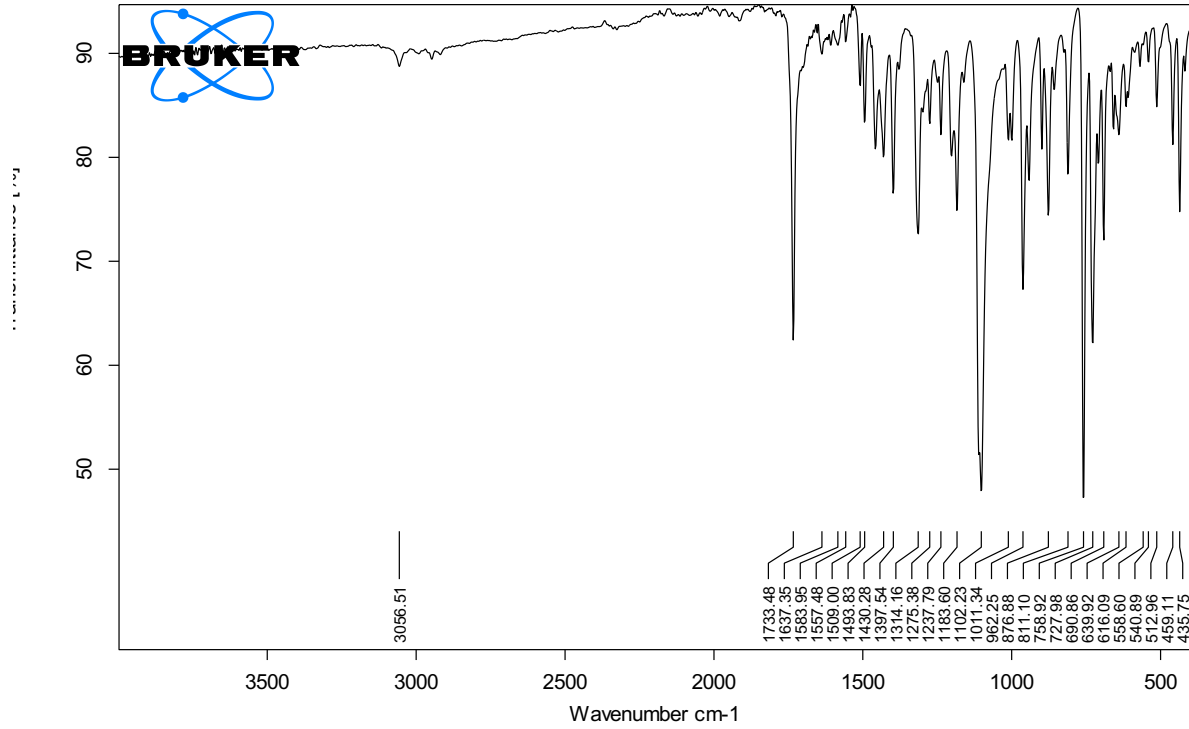
Şekil 1. Algılayıcı (DBMA) molekülün ¹H NMR spektrumu, (DMSO-d₆).



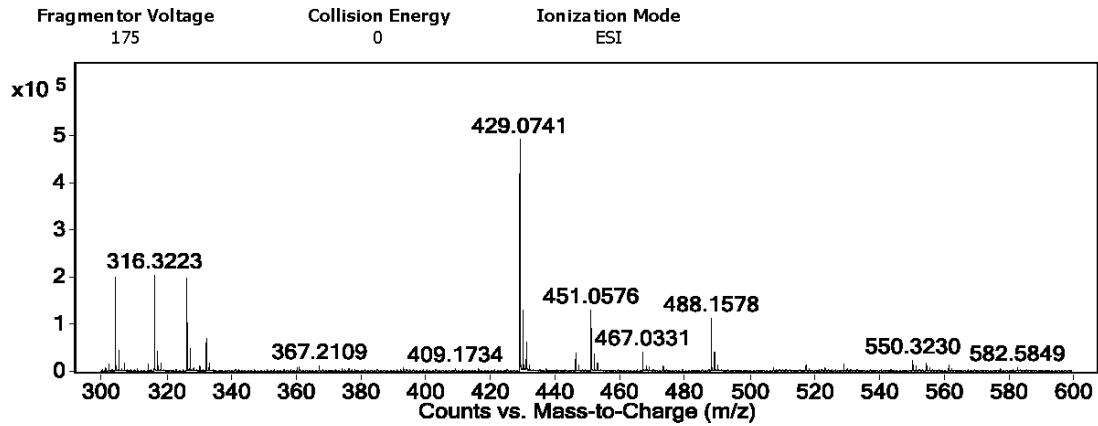
Şekil 2. Algılayıcı (DBMA) molekülün ^{13}C NMR spektrumu, (DMSO-d_6).



Şekil 3. Algılayıcı (DBMA) molekülün APT NMR spektrumu, (DMSO-d_6).



Şekil 4. Algılayıcı (DBMA) molekülün FT-IR spektrumu, (ATR, katı).

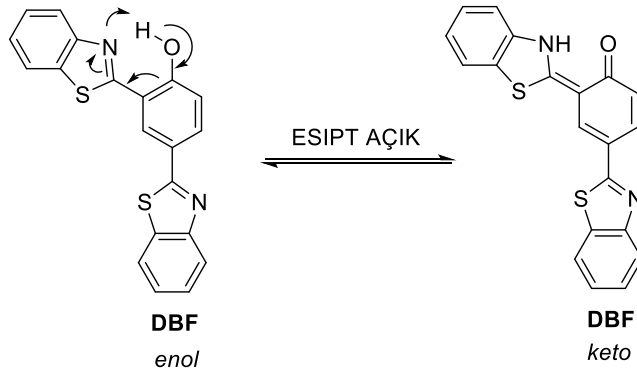
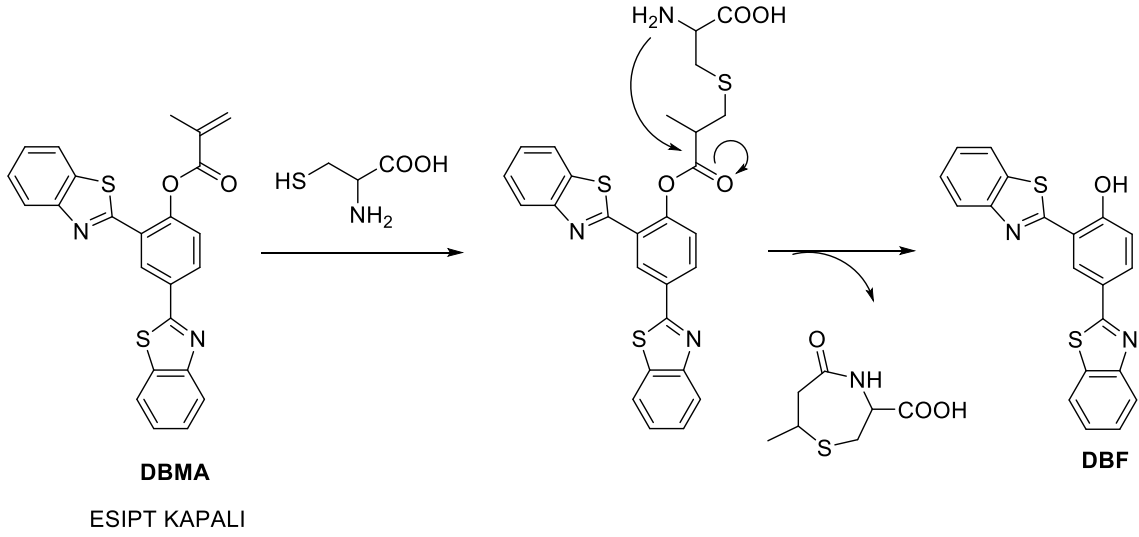


Şekil 5. Algılayıcı (DBMA) molekülün TOF-MS spektrumu.

Sistein tarafından başlatılan hızlı tiyolaktam halkalaşma reaksiyonu aracılığıyla sisteini kolorimetrik ve fluorimetrik olarak tayin edebilecek bir molekül tasarımı yapılmıştır (Şema 2). Algılayıcı molekül yapısında sinyal üretici birim olarak iki adet benzotiyazol ve algılama birimi olarak reaktif akril birimi içermektedir. Akrilat grubu algılayıcı molekülde mevcut olduğunda uyarılmış hal ESIPT işlemini engelleyecektir ve algılayıcının belirli bir dalga boyunda fluoresansı olacaktır. Sistein varlığında, algılayıcı DBMA katılma-halkalaşma reaksiyonuna uğrayarak fenolik OH grubunun serbest olduğu DBF bileşiğine dönüşecek ve ESIPT işlemi aktif hale gelerek kırmızıya kayan bir tautomer (enol-keto) emisyonuna yol açacaktır. 2-(2'-Hidroksifenil)benzotiyazol (HBT) ve türevleri oldukça hızlı dört seviyeli fotokimyasal bir proses üzerinden $k_{ESIPT} > 10^{12}$

S^{-1} katsayısı ile enol formundan keto formuna geçtiğinden araştırmacılar tarafından sürekli incelenmektedir. Uyarıldığında, ESIPT prosesi aktive olur ve güçlü molekül içi hidrojen bağı sayesinde molekülün düzlemselliği ve rijitliği artar.

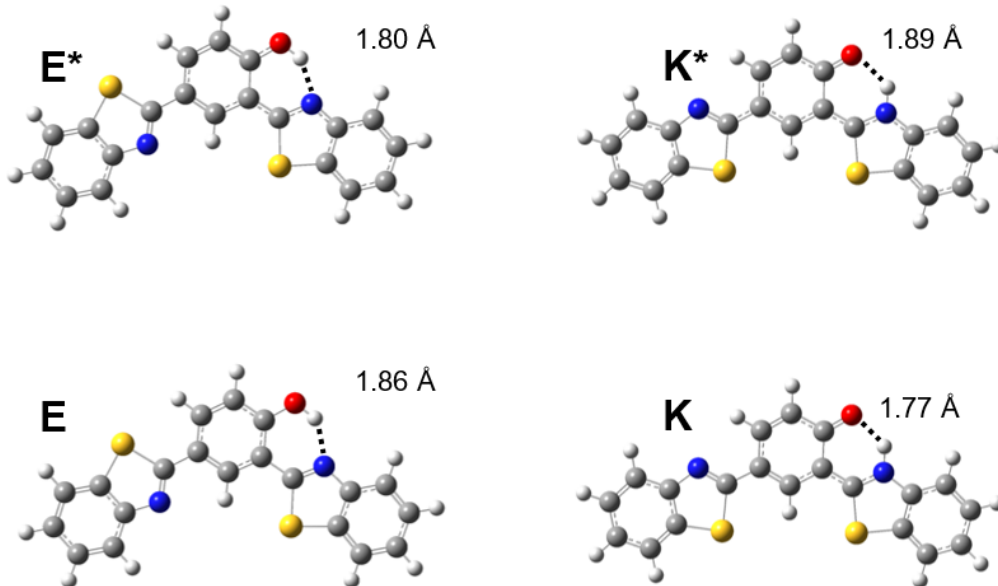
Sistein tayininde yer alan DBMA ve DBF bileşiklerinin molekül yapılarını ve fotofiziksel özelliklerini ortaya çıkarmak üzere, ab initio moleküler orbital yöntemlerini içeren hesaplamalar Gaussian 09 moleküler modelleme yazılımı üzerinde HF/6-31G baz seti ile gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, her iki bileşiğin temel hal geometrileri optimize edilmiştir. Daha sonra singlet uyarılmış hallerin enerjileri, λ_{max} , osilatör gücü (f) ve temel orbital katkıları hesaplanmıştır.



Şema 2. Algılayıcı DBMA ile sistemin etkileşimi neticesinde ortaya çıkan ESİPT mekanizması.

Bileşik DBF nin temel ve uyarılmış haldeki enol ve keto formlarının optimize geometrik yapıları ve karşılık gelen hidrojen bağ uzunlukları ab initio moleküler orbital yöntemi ve 6-31G baz seti kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 6). E (K*) ve E* (K) formlarına bakıldığında, molekül içi hidrojen bağının 1.86 (1.89) Å dan 1.80 (1.77) Å uzunluğuna azaldığı görülmüştür. Sonuçlar, $S_0 \rightarrow S_1$ ($S_1 \rightarrow S_0$) molekül içi hidrojen

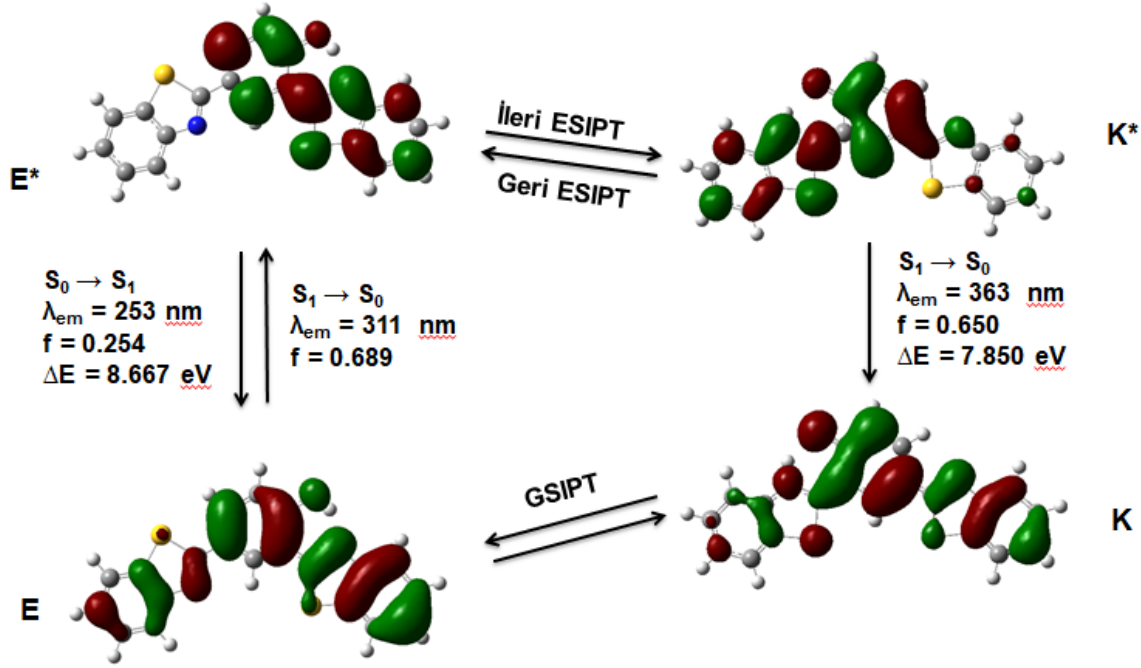
bağının gücünün önceki çalışmalar ile uyum içerisinde olduğunu göstermektedir (Chen ve ark., 2014). Dolayısıyla, molekül içi hidrojen bağ uzunluğunun E (K*) den E* (K) ya doğru azalması ESİPT (GSİPT: temel seviye molekül içi proton transferi) reaksiyonu için çok önemli pozitif bir faktördür.



Şekil 6. DBF bileşiğinin enol (E) ve keto (K) formlarının temel ve uyarılmış haldeki optimize geometrik yapıları ve molekül içi hidrojen bağ uzunlukları.

Şekil 7'de DBF bileşiğinin enol ve keto formları için en yüksek enerjili dolu molekül orbitaller (HOMO) ve en düşük enerjili boş molekül orbitaller (LUMO) görülmektedir. HOMO orbitallerin tüm π -konjüge sistem üzerine dağıldığı ve LUMO orbitallerinin ise 2-(2'-hidroksifenil)benzotiyazol grubu üzerine lokalize olduğu görülmektedir. Ayrıca, molekül içi hidrojen bağ sistemi etrafındaki HOMO ve LUMO orbitallerindeki elektron yoğunluğu başlıca hidroksil oksijeni ve tiyazol azot atomunda bulunmaktadır. Sonuçlar,

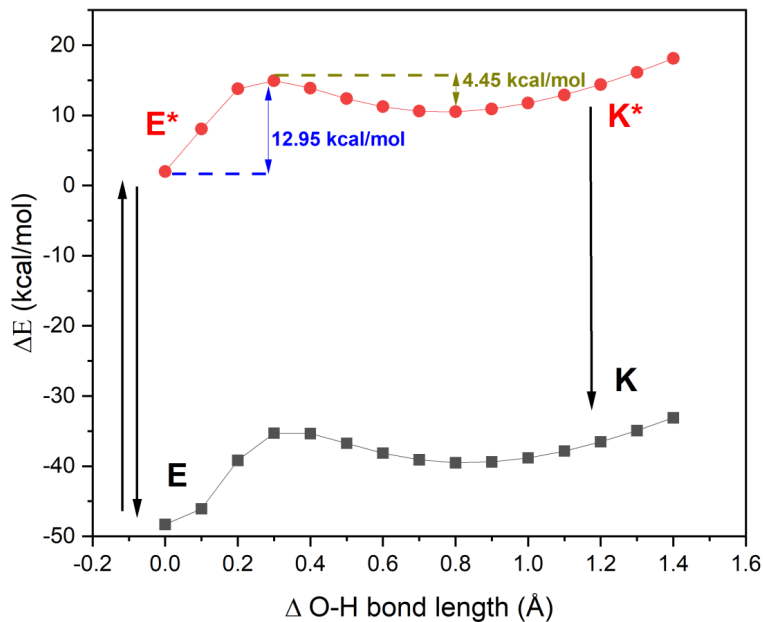
DBF bileşiği uyarıldığında proton transfer reaksiyonunu (ileri ESIPT) yönlendiren hidroksil protonunun en asidik olduğunu ve aksine temel seviyeye nazaran tiyazol azotunun daha bazik olduğunu göstermektedir. İleri ESIPT ($E^* \rightarrow K^*$) sonrasında oksijen üzerindeki elektron yoğunluğu artarken azot üzerindeki azalması, azottan oksijene belirgin molekül içi bir yük transferinin olduğuna işaret etmektedir. Bu durum azottan oksijene proton transferi için sürücü güç olabilir ve böylece uyarılmış halde denge söz konusu olabilir.



Şekil 7. Bileşik DBF nin E, E*, K ve K* formlarına ait sınır moleküler orbitalleri.

DBF bileşiğinin ESIPT özelliklerinin açıklamak için, O-H bağ uzunluğunun (enol formundan keto formuna geçiş) fonksiyonu olarak temel ve uyarılmış seviyede molekül içi proton transferinin potansiyel enerji eğrileri elde edilmiştir (Şekil 8). Diğer taraftan, HF/6-31G teorik seviyeye dayalı olarak tam geometri optimizasyonu temel ve uyarılmış seviyelerdeki enol formunun karşılık gelen keto seviyesinden daha kararlı olduğunu göstermektedir. Sonuç

olarak, ketodan enole proton transferi baskındır. Ayrıca, artan fenolik asitlik (hidrojen bağ uzunluğu) tautomerlerin kararlılaşmasıyla tautomerleşme enerjisini düşürür. Uyarılmış halde, ileri ESIPT (12.95 kcal/mol) ve geri ESIPT (4.45 kcal/mol) tepkimelerinin potansiyel enerji bariyerleri hesaplanmıştır. Dolayısıyla, ileri ve geri ESIPT benzer bir zaman ölçeğinde gerçekleşebilir ve sonuçta hızlı kurulan uyarılmış hal dengesine yol açabilir.



Şekil 8. Temel ve uyarılmış seviyede bileşik DBF nin enol ve keto formlarının potansiyel enerji eğrileri.

Özetle, ESIPT temelli yeni bir sistein algılayıcı molekül başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. Algılayıcı bileşiğin kimyasal yapısı FT-IR, NMR ve MS gibi metotlar yardımıyla karakterize edilmiştir. Bileşik DBMA sistein ile katılma-halkalaşma tepkimesi sonrasında, uyarılmış halde molekül için proton transfer reaksiyonuna uğrayan DBF bileşiğine dönüşür. DBF bileşiğinin enol ve keto formlarının dengede bulunmasından ötürü farklı dalga boylarında emisyon sergileyen tautomer yapılar ortaya çıkar. Teorik olarak geometrik yapıların analizi, molekül uyarıldığında molekül için hidrojen bağ uzunluğunun açıkça kısalacağını göstermiştir. Potansiyel enerji eğrileri ileri ve geri yönlü ESIPT prosesinde temel ve uyarılmış hal enol formunun baskın olacağına işaret etmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmaya (FEN-BAP-A-270220-58) maddi destek veren Giresun Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederiz.

Referanslar

- Amini, M. K., Khorasani, J. H., Khaloo, S. S. ve Tangestaninejad, S., 2003, Cobalt (II) salophen-modified carbon-paste electrode for potentiometric and voltammetric determination of cysteine, *Analytical biochemistry*, 320 (1), 32-38.
- Bao, D., Wang, M., Yang, C., Yang, Y. ve Ma, X., 2017, Concerted Mechanisms of Excited-State Proton Intramolecular Transfer for Bis-2, 4-(2-benzoxazolyl)-hydroquinone and Its Derivatives, *The Journal of Physical Chemistry A*, 121 (43), 8217-8226.
- Berehoiu, R. M. T., Popa, C. N. ve Popescu, S., 2013, Assessment of the E 920 additive (L-cysteine) in relation to some problems of modern food industry, *ASSESSMENT*, 13 (1).
- Cebi, N., Dogan, C. E., Develioglu, A., Yayla, M. E. A. ve Sagdic, O., 2017, Detection of L-Cysteine in wheat flour by Raman microspectroscopy combined chemometrics of HCA and PCA, *Food chemistry*, 228, 116-124.
- Chen, K.-Y., Tsai, H.-Y., Lin, W.-C., Chu, H.-H., Weng, Y.-C. ve Chan, C.-C., 2014, ESIPT fluorescent dyes with adjustable optical properties: Substituent and conjugation effects, *Journal of Luminescence*, 154, 168-177.
- Dahal, D., McDonald, L., Bi, X., Abeywickrama, C., Gombedza, F., Konopka, M., Paruchuri, S. ve Pang, Y., 2017, An NIR-emitting lysosome-targeting probe with large Stokes shift via coupling cyanine and excited-state intramolecular proton transfer, *Chemical Communications*, 53 (26), 3697-3700.
- Dai, J., Ma, C., Zhang, P., Fu, Y. ve Shen, B., 2020, Recent progress in the development of fluorescent probes for detection of biothiols, *Dyes and Pigments*, 177, 108321.
- Das, M., Brahma, M. ve Krishnamoorthy, G., 2021, Light-Driven Switching between Intramolecular Proton-Transfer and Charge-Transfer States, *The Journal of Physical Chemistry B*, 125 (9), 2339-2350.
- Demirkol, O., Adams, C. ve Ercal, N., 2004, Biologically important thiols in various vegetables and fruits, *Journal of agricultural and food chemistry*, 52 (26), 8151-8154.
- Dickinson, D. A. ve Forman, H. J., 2002, Cellular glutathione and thiols metabolism, *Biochemical pharmacology*, 64 (5-6), 1019-1026.
- Dietz, K.-J., Horling, F., Konig, J. ve Baier, M., 2002, The function of the chloroplast 2-cysteine peroxidoredoxin in peroxide detoxification and its regulation, *Journal of experimental botany*, 53 (372), 1321-1329.
- Gupta, A. K., Li, W., Ruseckas, A., Lian, C., Carpenter-Warren, C. L., Cordes, D. B., Slawin, A. M., Jacquemin, D., Samuel, I. D. ve Zysman-Colman, E., 2021, Thermally activated delayed fluorescence emitters with intramolecular proton transfer for high luminance solution-processed organic light-emitting diodes, *ACS applied materials & interfaces*, 13 (13), 15459-15474.
- Küster, A., Tea, I., Sweeten, S., Rozé, J.-C., Robins, R. J. ve Darmaun, D., 2008, Simultaneous determination of glutathione and cysteine concentrations and 2 H enrichments in microvolumes of neonatal blood using gas chromatography-mass spectrometry, *Analytical and bioanalytical chemistry*, 390 (5), 1403-1412.
- Li, H., Li, H., Yang, L., Xu, X., Zhang, S. ve Gao, F., 2011, Excited state intramolecular proton transfer fluorescence emission of o-hydroxyphenyl-triazine derivatives, *Chinese Science Bulletin*, 56 (14), 1457-1460.
- Li, M., Zheng, K., Chen, H., Liu, X., Xiao, S., Yan, J., Tan, X. ve Zhang, N., 2019, A novel 2, 5-bis (benzo [d] thiazol-2-yl) phenol scaffold-based ratiometric fluorescent probe for sensing cysteine in aqueous solution and serum, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 217, 1-7.
- Niu, L.-Y., Chen, Y.-Z., Zheng, H.-R., Wu, L.-Z., Tung, C.-H. ve Yang, Q.-Z., 2015, Design strategies of fluorescent probes for selective detection among biothiols, *Chemical Society Reviews*, 44 (17), 6143-6160.
- Özyürek, M., Baki, S., Güngör, N., Çelik, S. E., Güçlü, K. ve Apak, R., 2012, Determination of biothiols by a novel on-line HPLC-DTNB assay with post-column detection, *Analytica chimica acta*, 750, 173-181.
- Paulsen, C. E. ve Carroll, K. S., 2013, Cysteine-mediated redox signaling: chemistry, biology, and tools for discovery, *Chemical reviews*, 113 (7), 4633-4679.
- Qin, T., Liu, B., Huang, Y., Yang, K., Zhu, K., Luo, Z., Pan, C. ve Wang, L., 2018, Ratiometric fluorescent monitoring of methanol in biodiesel by using an ESIPT-based flavonoid probe, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 277, 484-491.
- Quig, D., 1998, Cysteine metabolism and metal toxicity, *Alternative Medicine Review*, 3, 262-270.
- Ralph, T., Hitchman, M., Millington, J. ve Walsh, F., 1994, The electrochemistry of l-cystine and l-cysteine: Part 1: Thermodynamic and kinetic studies, *Journal of electroanalytical chemistry*, 375 (1-2), 1-15.
- Sedgwick, A. C., Wu, L., Han, H.-H., Bull, S. D., He, X.-P., James, T. D., Sessler, J. L., Tang, B. Z., Tian, H. ve Yoon, J., 2018, Excited-state intramolecular proton-transfer (ESIPT) based fluorescence sensors and imaging agents, *Chemical Society Reviews*, 47 (23), 8842-8880.
- Stipanuk, M. H., Dominy Jr, J. E., Lee, J.-I. ve Coloso, R. M., 2006, Mammalian cysteine metabolism: new insights into regulation of cysteine metabolism, *The Journal of nutrition*, 136 (6), 1652S-1659S.
- Su, Y., Li, K. ve Yu, X., 2019, Theoretical studies on the fluorescence enhancement of benzaldehydes by intermolecular hydrogen bonding, *The Journal of Physical Chemistry B*, 123 (4), 884-890.
- Tao, Y., Zhang, X., Wang, J., Wang, X. ve Yang, N., 2012, Simultaneous determination of cysteine, ascorbic acid and uric acid by capillary electrophoresis with electrochemiluminescence, *Journal of electroanalytical chemistry*, 674, 65-70.
- Wang, Y.-T., Jin, K. J., Myers, L. R., Glover, S. A. ve Novak, M., 2009, Hydrolysis and photolysis of 4-Acetoxy-4-

- (benzothiazol-2-yl)-2, 5-cyclohexadien-1-one, a model anti-tumor quinol ester, *The Journal of organic chemistry*, 74 (12), 4463-4471.
- Wu, G., Fang, Y.-Z., Yang, S., Lupton, J. R. ve Turner, N. D., 2004, Glutathione metabolism and its implications for health, *The Journal of nutrition*, 134 (3), 489-492.
- Xu, Z., Qin, T., Zhou, X., Wang, L. ve Liu, B., 2019, Fluorescent probes with multiple channels for simultaneous detection of Cys, Hcy, GSH, and H₂S, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 121, 115672.
- Yan, F., Sun, X., Zu, F., Bai, Z., Jiang, Y., Fan, K. ve Wang, J., 2018, Fluorescent probes for detecting cysteine, *Methods and applications in fluorescence*, 6 (4), 042001.
- Yang, M., Ma, L., Li, J. ve Kang, L., 2019, Fluorescent probe for Cu²⁺ and the secondary application of the resultant complex to detect cysteine, *RSC Advances*, 9 (29), 16812-16818.
- Zhang, J., Wang, N., Ji, X., Tao, Y., Wang, J. ve Zhao, W., 2020, BODIPY-based fluorescent probes for biothiols, *Chemistry-A European Journal*.
- Zhao, J., Ji, S., Chen, Y., Guo, H. ve Yang, P., 2012, Excited state intramolecular proton transfer (ESIPT): from principal photophysics to the development of new chromophores and applications in fluorescent molecular probes and luminescent materials, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 14 (25), 8803-8817.

Mevcut sayıya ait içindekiler listesine [DergiPark](#) üzerinden ulaşılabilir

Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi

Dergi web sayfası: dergipark.org.tr/tr/pub/sufefd

Araştırma Makalesi

Çok Tabakalı Hiperbolik Metamalzeme ile Oluşturulan Geniş Band Optik Soğurucu

Sevinç Eşen ^{a,1}, Haluk Şafak ^{a,2,*}^a Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Kampüs, Konya, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi

Geliş 20 Mayıs 2022

Revizyon 20 Haziran 2022

Kabul 27 Temmuz 2022

Anahtar Kelimeler

Çok tabakalı hiperbolik-

metamalzeme

Optik soğurucu

Transfer Matris Metodu

ÖZ

Bu çalışmada, özellikle optik bölgede geniş band soğurma gösteren çok tabakalı bir hiperbolik metamalzeme tasarlanmıştır. Tasarlanan yapıda üç farklı metal (Ag, Au ve Al) ve yarıiletken bir malzeme (InGaAs) kullanılmıştır. Hesaplamalarda Transfer Matris Metodundan (TMM) yararlanılmıştır. Bu yöntem kullanılarak tasarlanan çok tabakalı yapıların optik soğurma ve yansıma spektrumları gelme açısına bağlı olarak incelenmiştir. Metal-dielektrik çok tabakalı yapıların hiperbolik dispersiyon gösterdiği bölgeler belirlenmiş, ayrıca gelme açısına bağlı kontur grafikleri elde edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, metal olarak gümüşün kullanıldığı heteroyapının en iyi soğurma spektrumu verdiği gözlenmiştir.

Research Article

The Broad Band Optical Absorber Designed By Multilayered Hyperbolic Metamaterial

ARTICLE INFO

Article History

Received 20 May 2022

Revised 20 June 2022

Accepted 27 July 2022

Keywords

Multilayered hyperbolic-

metamaterial

Optical absorber

Transfer Matrix Method

ABSTRACT

In this study, a multilayered hyperbolic metamaterial has been designed that exhibits a broad band optical absorption, especially in optical region. In that proposed structure, three different metals (Ag, Au, and Al) and a semiconductor material (InGaAs) have been employed. Optical calculations are performed by using the Transfer Matrix Method. Optical absorption and reflection spectra are determined for different incident angle values. Hyperbolic dispersion regions of the metal-dielectric multilayered structures have been determined, also contour graphs of the structures, depend on the incident angles are obtained. Consequently, the best optical absorption response is found for the structure in which Ag is used as metal component.

1. Giriş

Metamalzemeler benzersiz elektromanyetik özelliklerinden dolayı hem deneysel hem de teorik açıdan yaygın olarak incelenmektedir (Pendry, 2000; Li ve Pendry, 2008; Cai ve Shalaev, 2010). Bu yapılar, mükemmel görüntüleme, optik filtreler ve kaplama gibi özel uygulamalara izin veren negatif iletkenlik, negatif geçirgenlik ve negatif kırılma indisi gibi farklı malzeme özelliklerini elde etmek için yapay olarak tasarlanan yapılardır. Doğada bulunan maddelerden üretilen Metamalzemeler, gizleme (Li ve Pendry, 2008), süperlensler (Pendry, 2000), negatif kırılma (Valentine ve ark., 2008), asimetric geçirgenlik (Wu ve ark., 2014) ve soğurucular (Landy ve ark., 2008) gibi farklı uygulama alanları

bulmuştur. Son yıllarda birçok araştırmacı güneş pilleri (Min ve ark., 2010; Wang ve ark., 2012), fotodetektör (Yu ve ark., 2006; Rosenberg ve ark., 2009), termo-fotovoltaik (Sergeant ve ark., 2009; Liu ve ark., 2010a) ve termal yayıcılarda (Diem ve ark., 2009; Liao ve Zhao, 2017a) kullanılabilmesi nedeniyle iki boyutlu metamalzemeyle dayalı optik soğurucular üzerine odaklanmıştır. Landy ve arkadaşlarının 2008 de (Landy ve ark., 2008) ilk metamalzeme soğurucuyu rapor etmelerinden itibaren farklı uygulama talepleri için farklı yapılara sahip çeşitli soğurucular geliştirilmiştir (Hao ve ark., 2010; Liu ve ark., 2010b; Meng ve ark., 2014; Liao ve Zhao, 2017b). Ayrıca çoğu metamalzeme tabanlı soğurucunun soğurma bant genişliği, şiddetli elektrik ve manyetik rezonanstan dolayı dardır ve ışığı yalnızca dar bir açı aralığında tamamen soğurabilmektedir. Bu dar bant

* Sorumlu Yazar

E-posta adresleri: extraordinary613@gmail.com (S. Eşen), hsafak@selcuk.edu.tr (H. Şafak)

¹ ORCID: 0000-0001-6603-5730² ORCID: 0000-0001-7608-7753

Doi: 10.35238/sufefd.1119231

E-ISSN: 2458-9411

aralığı dedektör ve güneş pili gibi uygulamalarını kısıtlamaktadır. Bu kısıtlamayı aşabilmek için, metal-dielektrik tabakalarda girişim (Wang ve ark., 2014), metayüzeylerde çoklu rezonans (Deng ve ark., 2017) ve çok tabakalı yapılarda empedans eşleşmesi (Mattiucci ve ark., 2013; Deng ve ark., 2017) gibi çeşitli yöntemler önerilmiştir. Metamalzemelerin özel bir sınıfı olan hiperbolik metamalzemeler, ışığın herhangi bir geliş açısı için ışığı neredeyse tamamen soğurabilme yeteneği sayesinde dar bant genişliğinin üstesinden gelebilmeye olanak sağlamaktadır.

Hiperbolik bir dispersiyona sahip metamalzemeler, süper-çözünürlükle görüntüleme (Lu ve Liu, 2012), geniş band soğurma (Zhou ve ark., 2014), kendiliğinden emisyon (Krishnamoorthy ve ark., 2012), hiperbolik metamalzeme tabanlı kavite (Saleki ve ark., 2017) gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilen ilginç elektromanyetik özelliklere sahiptir. Etkin ortam teorisine göre, metal-dielektrik çiftinden oluşan çok tabakalı basit bir yapı ile hiperbolik bir metamalzeme oluşturulabilir (Poddubny ve ark., 2013). Açılan bağımsız Bragg band aralığı, tabakalı hiperbolik metamalzeme ve dielektrik bir malzemenin oluşan bir boyutlu fotonik kristal içerisinde elde edilebilmektedir (Xue ve ark., 2016; Wu ve ark., 2018). Böyle bir bant aralığı bütün yönlerde kullanılabilen karışık bant genişliğine sahip reflektör ya da filtre tasarımı için yararlı olabilir. Ayrıca bu fotonik kristal ve bir metal tabaka heteroyapı oluşturmak üzere kullanıldığında, plazmon polaritonları yardımıyla geniş açılı ve frekans seçici mükemmel soğurucular elde edilmiştir (Xue ve ark., 2016).

Bu çalışmada metal ve dielektrik (yarıiletken) tabakalardan oluşan anizotropik metamalzeme yardımıyla geniş bir aralıkta mükemmel yakın soğurucu yapı tasarlanmıştır. Hesaplamalarda kullandığımız heteroyapı, Lu ve arkadaşları tarafından incelenen heteroyapı ile benzerdir (Lu ve ark., 2019). Belirtilen çalışmada, metal olarak gümüş, dielektrik malzemeler içinse TiO_2 ve SiO_2 kullanılmıştır. Burada incelenen heteroyapıda ise, 3 farklı metal ve dielektrik olarak da $x=0.48$ katkı oranına sahip bir yarıiletken olan $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ seçilmiştir. Ayrıca, tabaka kalınlıkları ve periyodun optik spektrumlar üzerine etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. İncelenen heteroyapı, nispeten geniş-açılı mükemmel optik soğurucu tasarımı için yararlı bir model olma özelliği taşımaktadır.

2. Teori

Üzerinde yoğun çalışma yapılan önemli bir metamalzeme türü, etkin elektrik ve manyetik tensörler ile tanımlanan ve hiperbolik metamalzeme olarak adlandırılan hiperbolik dispersiyona sahip yüksek oranda anizotropik ortamlardır. Bu tür metamalzemeler, geleneksel tek eksenli kristallerin ultra-anizotropik limitini gösterir ve permitivite veya permeabilite tensörlerinin temel bileşenlerinden biri diğer iki bileşenle zıt işaretlidir.

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{\parallel} \end{pmatrix} \quad \hat{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{\parallel} \end{pmatrix} \quad (1)$$

\parallel ve \perp ifadeleri anizotropi eksenine paralel ve dik bileşenleri göstermektedir. Permitivite matrisinin köşegen elemanlarının işaretleri ile ayırt edilebilen iki tip hiperbolik metamalzeme vardır. Ortamın dielektrik tensör bileşenleri yardımıyla tanımlanan hiperboloidin dispersiyon karakterleri $\epsilon_{\parallel} < 0$; $\epsilon_{\perp} > 0$ ya da $\epsilon_{\perp} < 0$; $\epsilon_{\parallel} > 0$ şartını

sağlamaktadır. Hiperbolik dispersiyona sahip bir metamalzeme, dielektrik ve metal tabakalardan oluşan çok tabakalı bir yapı şeklinde tasarlanabilmektedir. Etkin ortam teorisi, metamalzemenin birim hücresi içindeki elektromanyetik alanın ortalamasına bağlı bir yöntemdir ve çok tabakalı periyodik sistemlere uygulanabilmektedir. Çok tabakalı metal-dielektrik sistem, periyodik ise ve kalınlıkları dalga boyundan çok daha küçük ise etkin permitivite tensörüne sahip anizotropik bir ortam gibi davranır (Wood ve ark., 2006).

$$\epsilon_{eff} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \epsilon_0 \frac{\epsilon_1 d_1 + \epsilon_2 d_2}{d_1 + d_2}$$

$$\epsilon_{zz} = \epsilon_0 \frac{(\epsilon_1 \epsilon_2)(d_1 + d_2)}{d_1 \epsilon_2 + d_2 \epsilon_1} \quad (2)$$

d_1 ve d_2 sırasıyla dielektrik ve metal tabakaların kalınlığı, ϵ_0 boşluğun permitivitesi ve ϵ_1 ve ϵ_2 dielektrik ve metalin bağlı permitivitesidir. Bir anizotropik metamalzemenin dispersiyon bağıntısı

$$\frac{k_x^2}{\epsilon_{zz}} + \frac{k_y^2}{\epsilon_{xx}} = \frac{k_0^2}{\epsilon_0} \quad (3)$$

şeklinindedir. Bu malzemelerin benzersiz özellikleri, metamalzemede oluşan eş frekans yüzeylerinin şekliyle kaynaklanmaktadır. k_x , k_y ve k_z dalga vektörünün bileşenleri, ω dalga frekansı ve c ışık hızıdır. $\epsilon_{zz} < 0$; $\epsilon_{xx} > 0$ ise dispersiyon bağıntısı hiperboliktir (Argyropoulos ve ark., 2013). Büyük dalga vektörüne sahip dalgalar, izotropik malzemelerde eş frekans yüzeylerinden dolayı sönüme uğrarken, anizotropik ortamlarda ilerlemesini sürdürmektedir.

Bu çalışmada metal ve katkılı yarıiletken malzemenin oluşan bir heteroyapının optik spektrumları Transfer Matris Metodu (TMM) kullanılarak hesaplanmıştır. Çok tabakalı yapılarda elektromanyetik dalgaların ilerlemesi, yapıya gelen dalga için formüle edilen transfer matris metodu, ya da sonlu farklar yöntemi gibi değişik sayısal metotlar kullanılarak analiz edilebilmektedir. TMM bu metotlar arasında oldukça yaygın kullanılan bir tekniktir. TMM de, çok tabakalı yapı boyunca elektromanyetik dalganın ilerlemesi, yansımaları ve soğurulması, alan bileşenlerinin matris formunda ifade edilmesi yardımıyla belirlenmekte ve yapı boyunca ilerleyen dalganın yansıma ve geçirgenlik katsayı değerleri hesaplanabilmektedir (Lekner ve Dorf, 1987).

Tasarlanan çok tabakalı heteroyapıda metal tabaka olarak altın (Au), gümüş (Ag) ve alüminyum (Al), dielektrik tabaka içinse InGaAs seçilmiştir. Metallerin permitivitesi Lorentz-Drude modeli ile belirlenmekte olup

$$\epsilon_M = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} + \sum_{n=1}^n \frac{f_n \omega_n^2}{\omega_n^2 - \omega^2 - i\gamma_n \omega} \quad (4)$$

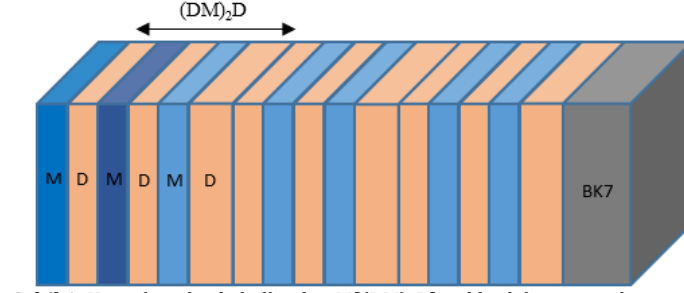
şeklinindedir. Burada ω_p plazma frekansı, γ sönüm sabiti ve f_n osilatör şiddetidir. InGaAs tabakanın permitivitesi ise Drude modeli kullanılarak ifade edilmektedir;

$$\epsilon_{InGaAs} = \epsilon_{\infty} \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\omega/\gamma_0} \right] \quad (5)$$

Burada ω_p plazma frekansı ve $\gamma = 0.1 \times 10^{-12} \text{s}^{-1}$ sönüm parametresidir. λ_0 da $\epsilon_{InGaAs} = 0$, yarıiletken malzemenin katkı yoğunluğu arttıkça ω_p ye karşılık gelen dalga boyu ve

λ_0 ın değeri azalır. InGaAs tabakanın plazma frekansından uzakta $\epsilon_{||}$, ϵ_{\perp} bileşene eşit olur ve malzeme izotropik bir ortam gibi davranır. Dalga boyu arttıkça ve izotropik InGaAs tabakaların plazma frekansına yaklaştıkça ϵ_{\perp} azalır ve sonunda $\lambda > \lambda_0$ için negatif olur.

Hesaplamalarda kullanılan heteroyapı, $M[(DM)_2D]_3$ şeklinde tasarlanan periyodik çok tabakalı bir yapıdır (Şekil 1). Burada M metal, D ise dielektrik tabakayı göstermektedir. Metal tabaka için Au, Ag ve Al, dielektrik tabaka içinse bir yarıiletken malzeme olan InGaAs seçilmiştir.

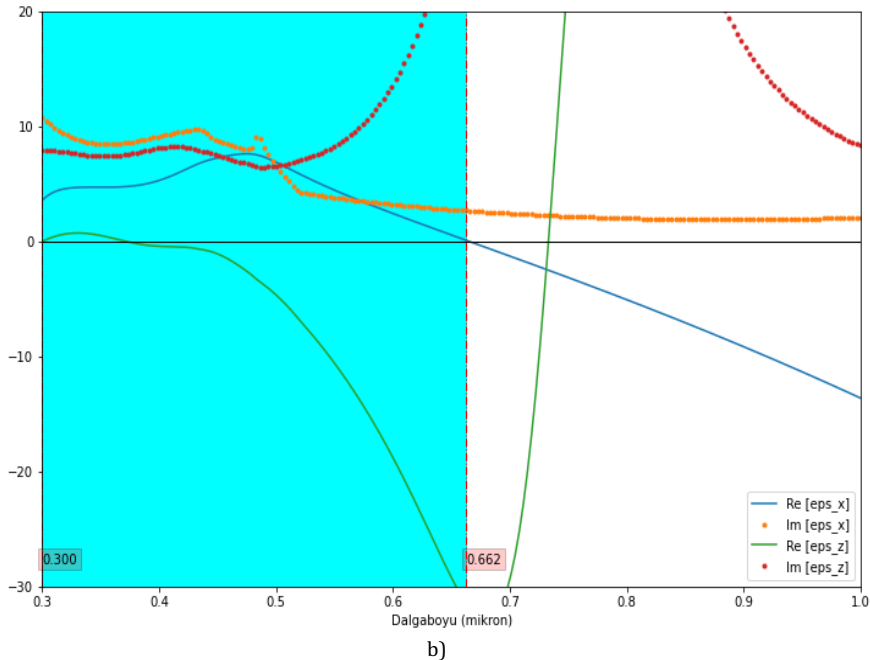
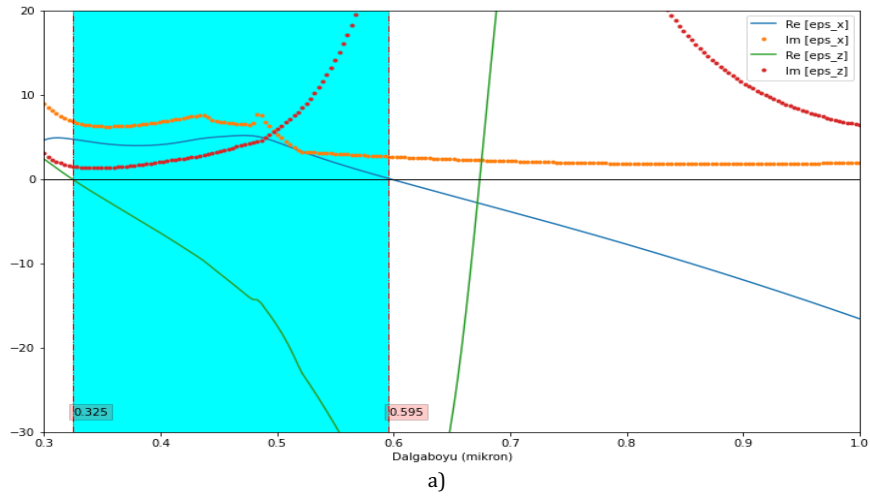


Şekil 1. Hesaplamalarda kullanılan $M[(DM)_2D]_3$ şeklindeki metamalzeme yapısı.

3. Hesaplama Sonuçları

Çok tabakalı yapıda kullanılan gümüş (Ag) ve altın (Au) için etkin permittivite tensörünün dalga boyu ile değişimi Şekil 2a ve Şekil 2b'de gösterilmiştir. Her iki şekilde gösterilen taraflı bölge, hiperbolik metamalzemede

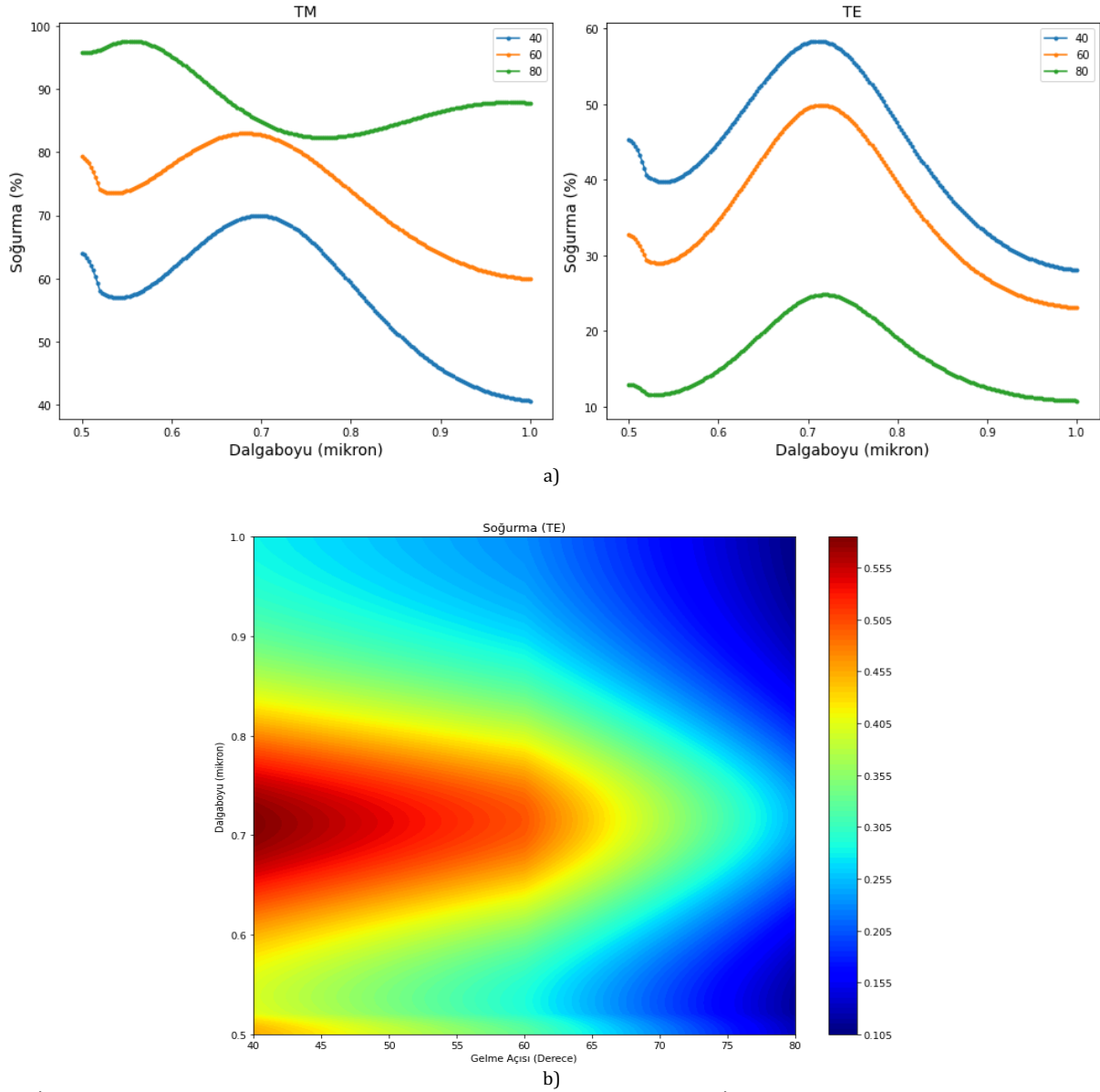
permittivite tensörünün $\epsilon_{||}$ ve ϵ_{\perp} bileşenlerinin birbirine zıt işaretli olduğu ($\epsilon_{||} > 0$; $\epsilon_{\perp} < 0$) dalga boyu aralığına karşılık gelmektedir. Buna göre, gümüşün $0.325 \mu\text{m} - 0.595 \mu\text{m}$ dalga boyu aralığında metayapı hiperbolik dispersiyon göstermektedir. Altında ise bu bölge $0.300 \mu\text{m} - 0.662 \mu\text{m}$ aralığındadır (Şekil 2b).



Şekil 2. a) Gümüşün etkin permittivite tensörünün dalga boyu ile değişimi. b) Altının etkin permittivite tensörünün dalga boyu ile değişimi.

Optik bölgede geniş band bir soğurma tepkisi elde edebilmek için farklı heteroyapı modelleri seçilmiştir. İlk olarak metal ve yarı iletken tabakalardan oluşan iki periyotlu $(\text{InGaAs}/\text{Au})_2$ şeklinde bir yapı ele alınmıştır. Metal tabaka için altın (Au), yarı iletken tabaka için InGaAs seçilmiş olup, $d_{\text{InGaAs}}=50$ nm ve $d_{\text{Au}}=5$ nm değerleri kullanılmıştır.

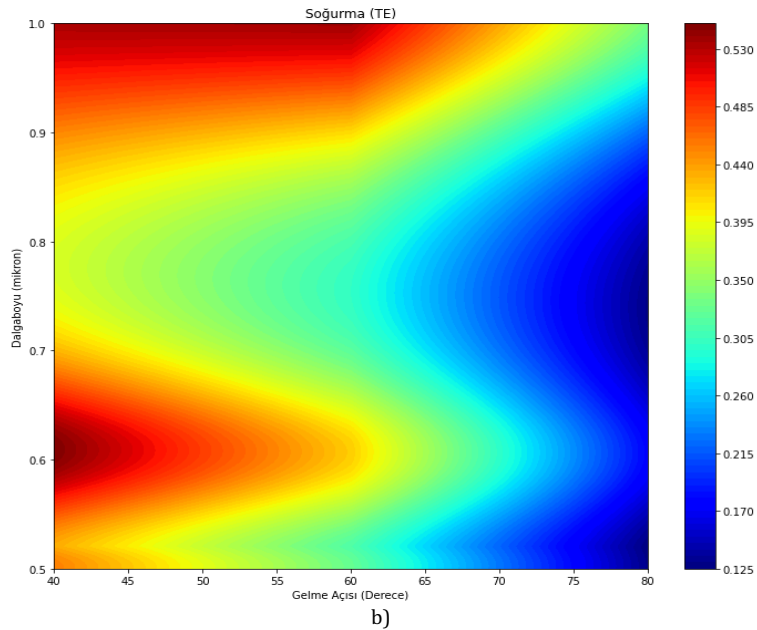
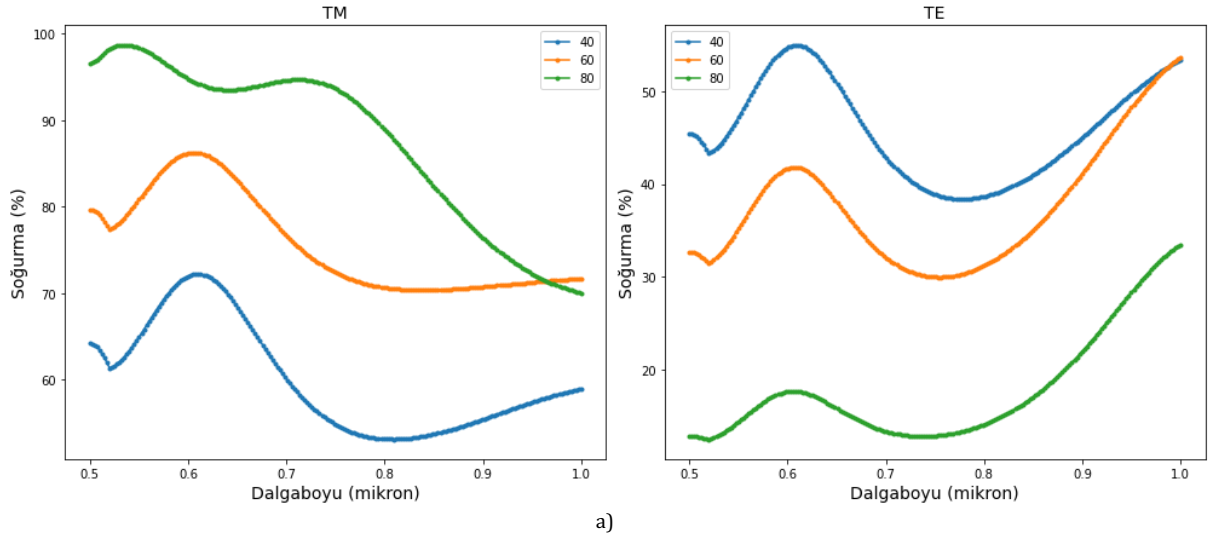
Elektromanyetik dalganın geldiği ortam hava, çıkış ortamı ise kırılma indisi $n_{\text{BK7}}=1.52$ olan BK7 cam malzeme seçilmiştir. Transfer matris yöntemi kullanılarak ışığın gelme açısına göre TM ve TE kutuplu dalgalar için soğurma spektrumları hesaplanmıştır (Şekil 3a ve Şekil 3b).



Şekil 3. a) İki periyoda sahip InGaAs/Au yapının TM ve TE modu için soğurma spektrumu. b) İki periyotlu InGaAs/Au heteroyapının TE modu için soğurmanın ışığın gelme açısı ile değişiminin kontur grafiği.

Şekil 3a'dan iki periyotlu Au-InGaAs çiftinin TM modu için gelme açısı 40° ve üzerindeki açılarda $0.7 \mu\text{m}$ dalga boyu civarında oluşan soğurma pikinin değerinin arttığı, TM modunun aksine TE modu için soğurmanın azaldığı görülmektedir. Göz önüne alınan bu yapının sonuna kalınlığı

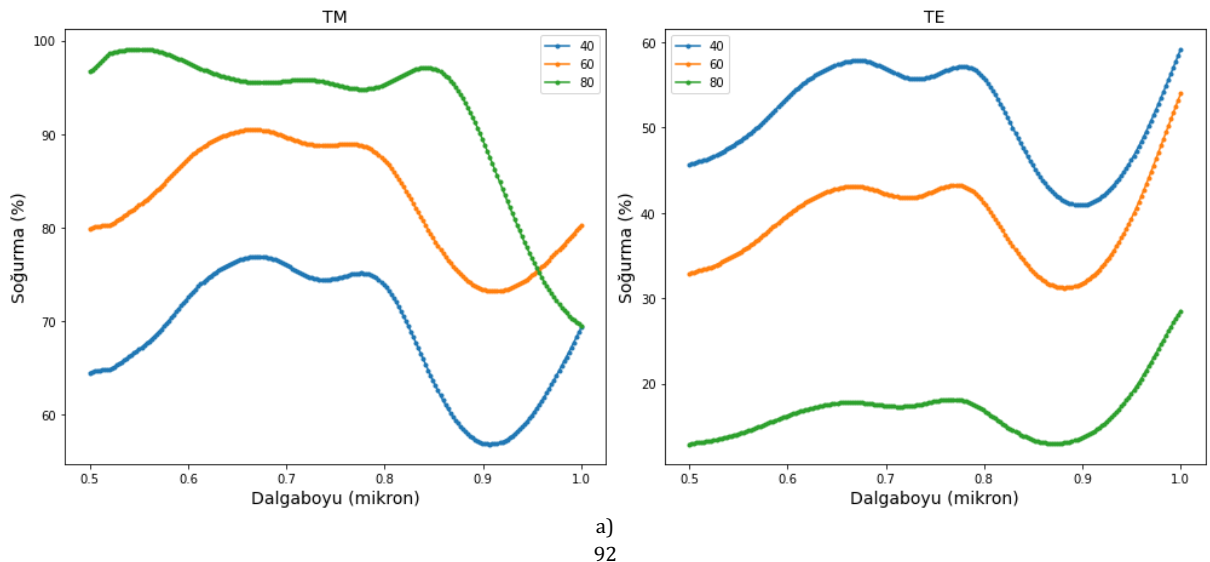
50 nm olan bir InGaAs tabakası daha eklenerek $(\text{InGaAs}/\text{Au})_2/\text{InGaAs}$ şeklinde bir yapı için hesaplanan soğurma spektrumu ve kontur grafiği sırasıyla Şekil 4a ve Şekil 4b' de gösterilmiştir.

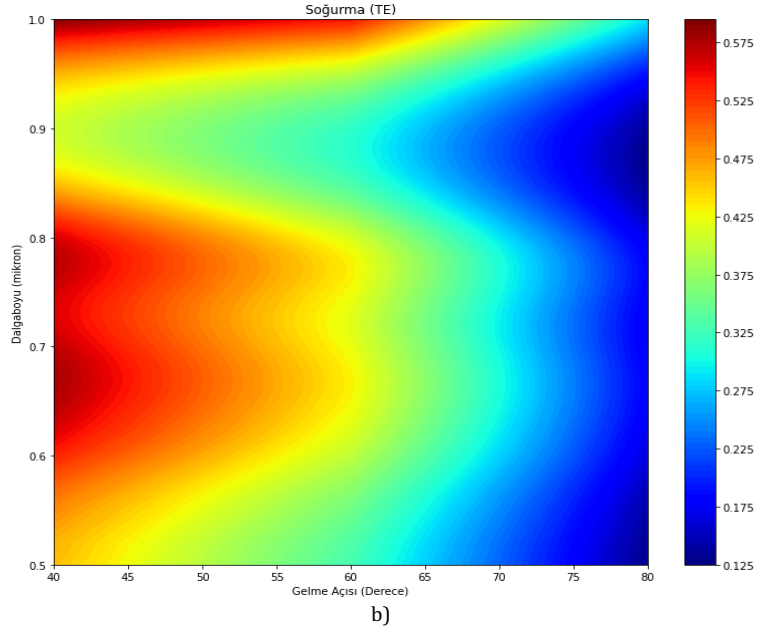


Şekil 4. a) $(\text{InGaAs}/\text{Au})_2/\text{InGaAs}$ heteroyapının TM ve TE modu için soğurma spektrumu. b) $(\text{InGaAs}/\text{Au})_2/\text{InGaAs}$ heteroyapının TE modu için soğurmanın ışığın gelme açısı ile değişiminin kontur grafiği.

Şekil 4'ten görüldüğü gibi ikinci yapının soğurma pikleri dalga boyu 0.6 μm civarında olan bölgeye kaymış ve soğurma değeri artmıştır. Ayrıca 80° gelme açısında soğurma bandının genişlediği gözlenmiştir. Yapının soğurma tepkisini artırabilmek için göz önüne alınan $(\text{InGaAs}/\text{Au})_2/\text{InGaAs}$

heteroyapının periyodu üçe çıkartarak $[(\text{InGaAs}/\text{Au})_2/\text{InGaAs}]_3$ şeklinde bir yeni bir heteroyapı tasarlanmıştır ve elde edilen soğurma grafikleri ise Şekil 5a ve Şekil 5b'de verilmiştir.





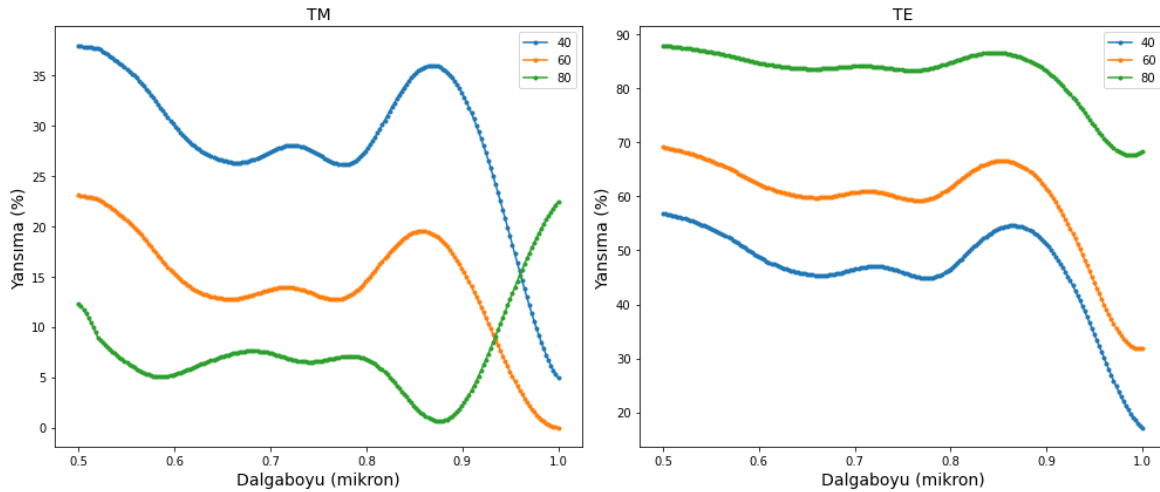
Şekil 5. a) [(InGaAs/Au)₂/InGaAs]₃ yapısının TM ve TE modu için soğurma spektrumu. b) [(InGaAs/Au)₂/InGaAs]₃ heteroyapının TE modu için soğurmanın ışığın gelme açısı ile değişiminin kontur grafiği.

Son tasarlanan [(InGaAs/Au)₂/InGaAs]₃ şeklindeki yapıda, Şekil 5'ten de görüldüğü gibi, soğurma band aralığı genişlemiş olup, dalga boyu 0.5 µm - 0.9 µm civarına kadar soğurmanın değerinin tüm açılarda arttığı görülmüştür.

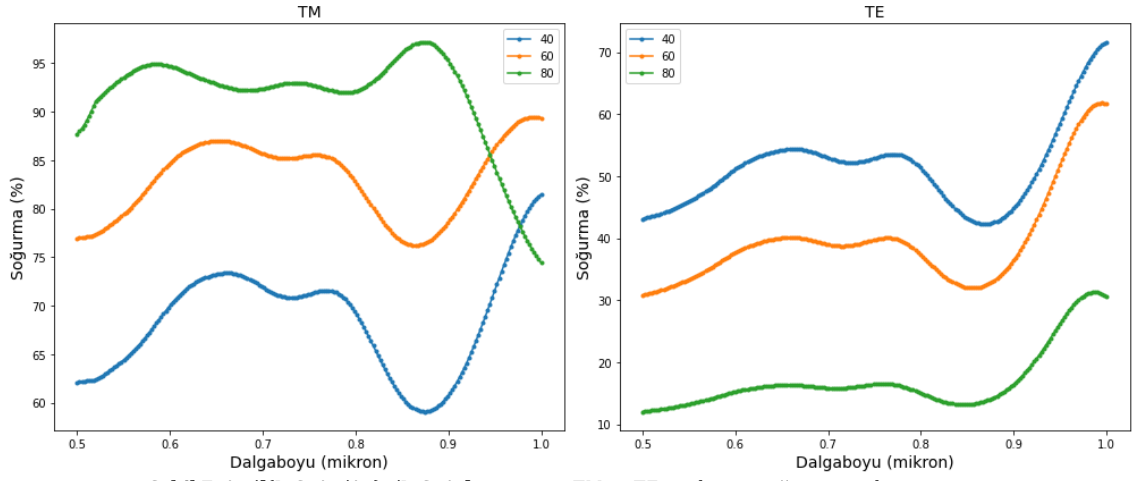
Son olarak, [(D/M)₂/D]₃ şeklinde tasarlanan yapıda, heteroyapının ön kısmına bir metal tabaka eklenerek ve farklı metaller kullanılarak metalin türünün, yapının soğurma performansına etkisi incelenmiştir. Tasarlanan yapı Metal/[(InGaAs/Metal)₂/InGaAs]₃ şeklindedir. $d_{Metal1} = 5$ nm, $d_{InGaAs1} = 50$ nm, $d_{Metal2} = 5$ nm ve $d_{InGaAs} = 50$ nm alınmıştır. İlk olarak altın (Au) tabaka kullanıldı. Bu yapının yansımaya, soğurma spektrumları ve ilgili kontur grafiği sırasıyla Şekil 6,

Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmiştir. Dalga boyu $\lambda = 0.874$ µm' de soğurmanın maksimum değeri 0.95 ten 0.971' e yükselmiştir. Ayrıca tüm gelme açısı değerleri için yapının soğurma performansı oldukça yüksektir. Yapıda altın yerine gümüş (Ag) kullanılarak yansımaya ve soğurma spektrumları hesaplanmıştır (Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11).

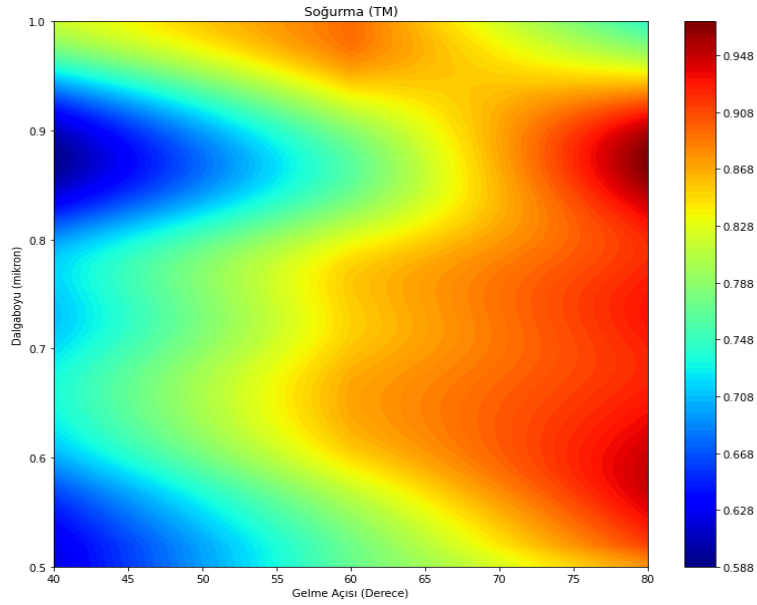
Ag tabaka kullanılarak yapılan hesaplamalarda soğurmanın maksimum değerinin 0.974 e yükseldiği gözlenmiştir. Son olarak metal tabaka için alüminyum (Al) kullanılmıştır. Alüminyum, çalışılan dalga boyu aralığında altın ve gümüş gibi hiperbolik bir dispersiyon özelliği göstermemektedir.



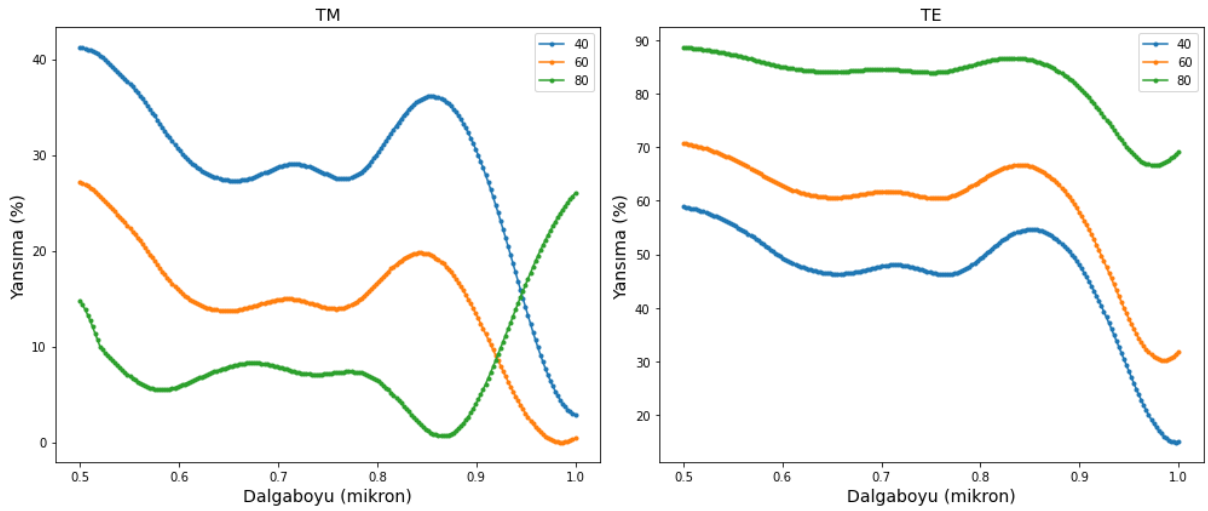
Şekil 6. Au/[(InGaAs/Au)₂/InGaAs]₃ yapısının TM ve TE modu için yansımaya spektrumu.



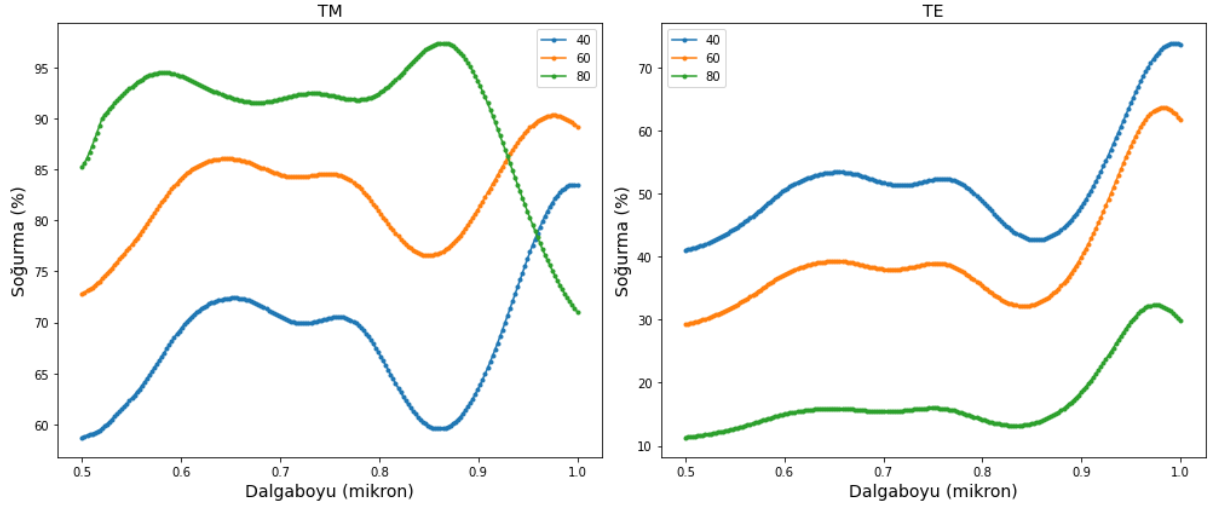
Şekil 7. Au/[(InGaAs/Au)₂/InGaAs]₃ yapısının TM ve TE modu için soğurma spektrumu.



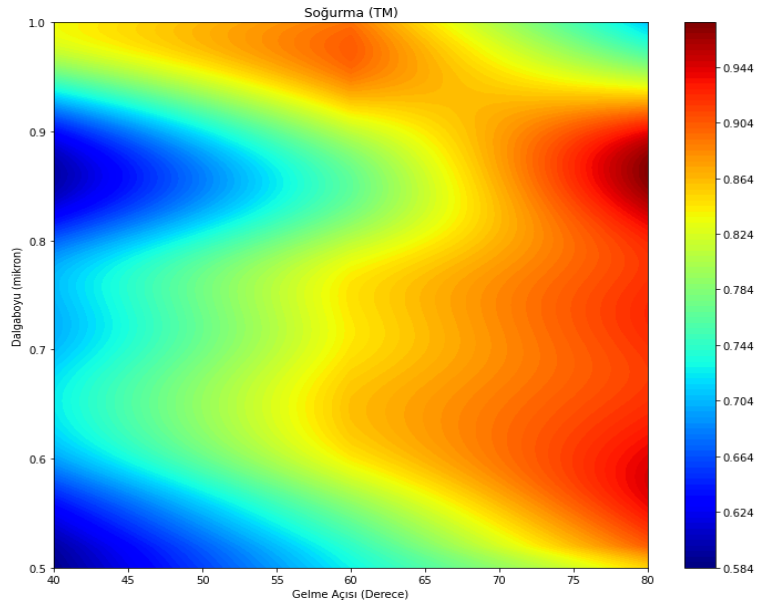
Şekil 8. Au/[(InGaAs/Au)₂/InGaAs]₃ heteroyapının TM modu için soğurmanın ışığın gelme açısı ile değişiminin kontur grafiği.



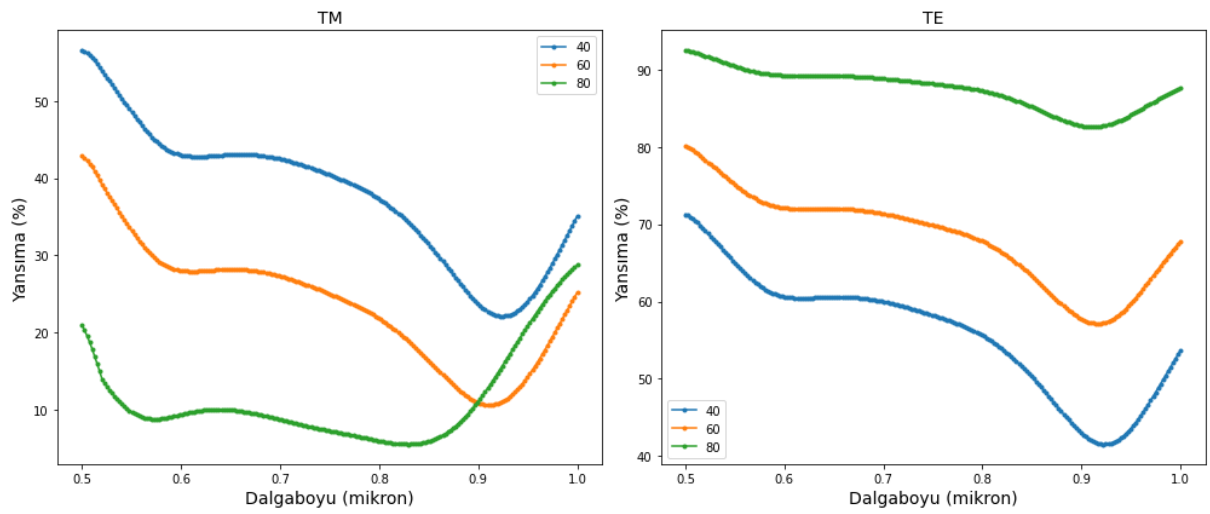
Şekil 9. Ag/[(InGaAs/Ag)₂/InGaAs]₃ yapısının TM ve TE modu için yansımaya spektrumu.



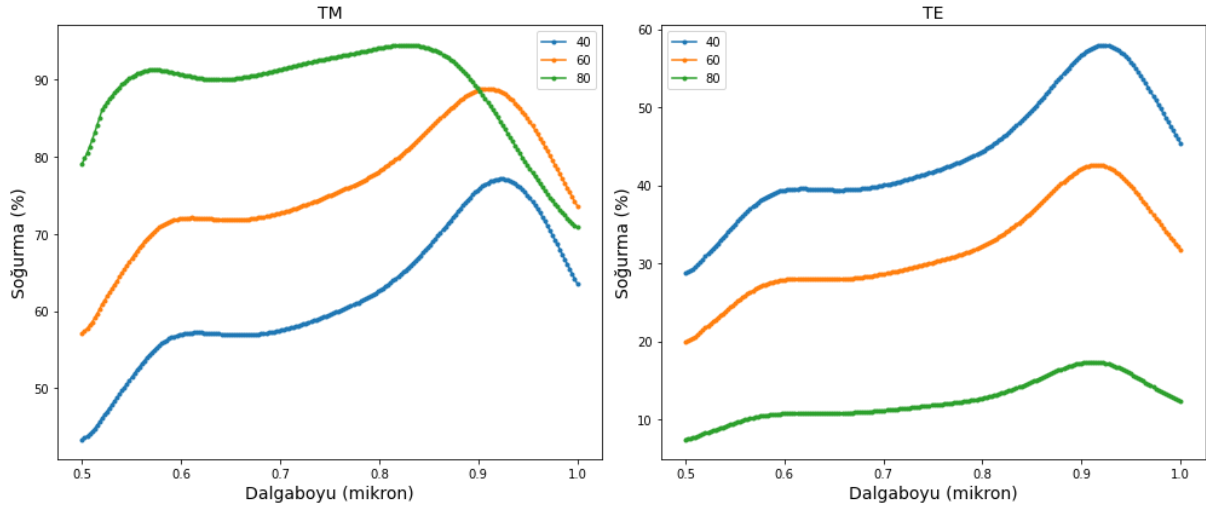
Şekil 10. Ag/[(InGaAs/Ag)₂/InGaAs]₃ yapısının TM ve TE modu için soğurma spektrumu.



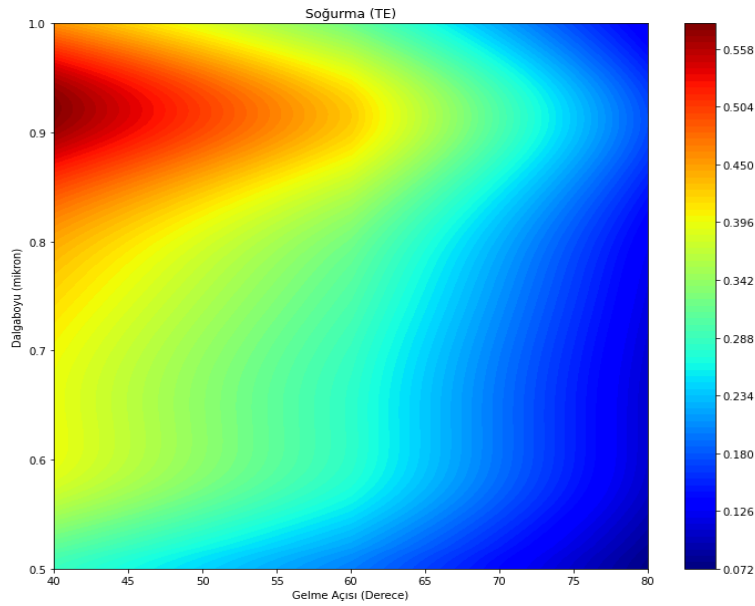
Şekil 11. Ag/[(InGaAs/Ag)₂/InGaAs]₃ heteroyapısının TM modu için soğurmanın ışığın gelme açısı ile değişiminin kontur grafiği.



Şekil 12. Al/[(InGaAs/Al)₂/InGaAs]₃ yapısının TM ve TE modu için yansımaya spektrumu.



Şekil 13. Al/[(InGaAs/Al)₂/InGaAs]₃ yapısının TM ve TE modu için soğurma spektrumunun ışığın gelme açısı ile değişimi.



Şekil 14. Al/[(InGaAs/Al)₂/InGaAs]₃ heteroyapının TE modu için soğurmanın ışığın gelme açısı ile değişiminin kontur grafiği.

Bu yapının ortalama soğurmasının % 0.94 civarında olduğu gözlenmiştir (Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14). Alüminyum hem yüksek yansıtıcılık özelliğine sahip olması, hem de geniş band soğurma göstermesi nedeniyle farklı optik cihaz tasarımlarında kullanılacak uygun bir malzeme olabilir.

4. Tartışma

Bu çalışmada çok tabakalı metal-dielektrikten hiperbolik metamalzeme kullanılarak tasarlanan geniş band bir optik soğurucu yapı incelenmiştir. Dielektrik tabaka için bir yarı iletken malzeme olan InGaAs, metal tabaka içinse Au, Ag ve Al kullanılmıştır. Üç farklı metal ile oluşturulan heteroyapıların hiperbolik dispersiyon gösterdiği dalga boyu aralıkları incelendiğinde, Au ve Ag'nin benzer dalga boyu aralığında hiperbolik davranış gösterdiği, ancak Al metali ile oluşturulan yapının incelenen spektral aralıkta herhangi bir hiperbolik dispersiyon göstermediği görülmüştür. Tasarlanan optik soğurucu yapıların tümü, özellikle 60° derece ve üzerindeki büyük gelme açılarında, TM modu için, 0.55 µm - 0.9 µm dalga boyu aralığında ortalama %90 ve üzeri soğurma değerlerine sahiptir. TE modu incelendiğinde, tüm yapılar için yansıma değerlerinin ilgili dalga boyu aralığında daha yüksek olduğu, soğurmanın ise daha düşük

oranlarda gerçekleştiği görülmüştür. Beklendiği gibi, TM ve TE modları arasında açıya bağlılık bakımından birbirine zıt bir davranış söz konusudur. Soğurma grafiklerinden kolayca görüleceği gibi, gelme açısı arttıkça TM modu için soğurma artmakta, TE modu için ise azalmaktadır. Aynı şekilde yansıma spektrumları incelendiğinde, genel anlamda TE modu için yansıma değerlerinin TM modundan çok daha yüksek olduğu, ayrıca gelme açısı arttıkça TE modu için yansımanın arttığı, TM modu için ise azaldığı görülmektedir.

İncelenen dalga boyu aralığında, Au ve Ag metallerinin kullanıldığı heteroyapılar birbirine çok benzer soğurma spektrumları vermiştir. Ayrıca, göz önüne alınan yapıda tabaka sayısı değiştirilerek, soğurma spektrumu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Soğurma bandının genişliğinin gelme açısına fazla bağlı olmaması, tasarlanan soğurucunun iyi bir performansa sahip olduğunu ve büyük gelme açılarında geniş band optik soğurucu tasarımlarında kullanılabilirliğini göstermektedir. Farklı metal ve dielektrik malzemeler kullanılarak ve yapının geometrik parametreleri değiştirilerek, göz önüne alınan optik bölgede daha iyi soğurma spektrumuna sahip heteroyapılar tasarlanabilir. Örneğin, In_{1-x}Ga_xAs yarıiletkeninin x stokiyometrik oranının farklı değerleri için inceleme yapılabilir. Ayrıca, uygun gelişmiş deneysel yöntemler yardımı ile, tasarlanan yapıların üretimi mümkündür.

Kaynaklar

- Cai, W. ve Shalaev, V., 2010, Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications, *Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications*, 1-200.
- Deng, H. X., Stan, L., Czaplewski, D. A., Gao, J. ve Yang, X. D., 2017, Broadband infrared absorbers with stacked double chromium ring resonators, *Optics Express*, 25 (23), 28295-28304.
- Diem, M., Koschny, T. ve Soukoulis, C. M., 2009, Wide-angle perfect absorber/thermal emitter in the terahertz regime, *Physical Review B*, 79 (3).
- Hao, J. M., Wang, J., Liu, X. L., Padilla, W. J., Zhou, L. ve Qiu, M., 2010, High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial, *Applied Physics Letters*, 96 (25).
- Krishnamoorthy, H. N. S., Jacob, Z., Narimanov, E., Kretzschmar, I. ve Menon, V. M., 2012, Topological Transitions in Metamaterials, *Science*, 336 (6078), 205-209.
- Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R. ve Padilla, W. J., 2008, Perfect metamaterial absorber, *Physical Review Letters*, 100 (20).
- Lekner, J. ve Dorf, M. C., 1987, Matrix-Methods for the Calculation of Reflection Amplitudes, *Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision*, 4 (11), 2092-2095.
- Li, J. S. ve Pendry, J. B., 2008, Hiding under the Carpet: A New Strategy for Cloaking, *Physical Review Letters*, 101 (20).
- Liao, Y. L. ve Zhao, Y., 2017a, An ultra-narrowband absorber with a dielectric-dielectric-metal structure based on guide-mode resonance, *Optics Communications*, 382, 307-310.
- Liao, Y. L. ve Zhao, Y., 2017b, Graphene-based tunable ultra-narrowband mid-infrared TE-polarization absorber, *Optics Express*, 25 (25), 32080-32089.
- Liu, N., Mesch, M., Weiss, T., Hentschel, M. ve Giessen, H., 2010a, Infrared Perfect Absorber and Its Application As Plasmonic Sensor, *Nano Letters*, 10 (7), 2342-2348.
- Liu, X. L., Starr, T., Starr, A. F. ve Padilla, W. J., 2010b, Infrared Spatial and Frequency Selective Metamaterial with Near-Unity Absorbance, *Physical Review Letters*, 104 (20).
- Lu, D. L. ve Liu, Z. W., 2012, Hyperlenses and metalenses for far-field super-resolution imaging, *Nature Communications*, 3.
- Lu, G., Wu, F., Zheng, M. J., Chen, C. X., Zhou, X. C., Diao, C., Liu, F., Du, G. Q., Xue, C. H., Jiang, H. T. ve Chen, H., 2019, Perfect optical absorbers in a wide range of incidence by photonic heterostructures containing layered hyperbolic metamaterials, *Optics Express*, 27 (4), 5326-5336.
- Mattiucci, N., Bloemer, M. J., Akozbek, N. ve D'Aguzzo, G., 2013, Impedance matched thin metamaterials make metals absorbing, *Scientific Reports*, 3.
- Meng, L. J., Zhao, D., Ruan, Z. C., Li, Q., Yang, Y. Q. ve Qiu, M., 2014, Optimized grating as an ultra-narrow band absorber or plasmonic sensor, *Optics Letters*, 39 (5), 1137-1140.
- Min, C. J., Li, J., Veronis, G., Lee, J. Y., Fan, S. H. ve Peumans, P., 2010, Enhancement of optical absorption in thin-film organic solar cells through the excitation of plasmonic modes in metallic gratings, *Applied Physics Letters*, 96 (13).
- Pendry, J. B., 2000, Negative refraction makes a perfect lens, *Physical Review Letters*, 85 (18), 3966-3969.
- Poddubny, A., Iorsh, I., Belov, P. ve Kivshar, Y., 2013, Hyperbolic metamaterials (vol 7, pg 948, 2013), *Nature Photonics*, 7 (12).
- Rosenberg, J., Sheno, R. V., Vandervelde, T. E., Krishna, S. ve Painter, O., 2009, A multispectral and polarization-selective surface-plasmon resonant midinfrared detector, *Applied Physics Letters*, 95 (16).
- Saleki, Z., Entezar, S. R. ve Madani, A., 2017, Optical properties of a one-dimensional photonic crystal containing a graphene-based hyperbolic metamaterial defect layer, *Applied Optics*, 56 (2), 317-323.
- Sergeant, N. P., Pincon, O., Agrawal, M. ve Peumans, P., 2009, Design of wide-angle solar-selective absorbers using aperiodic metal-dielectric stacks, *Optics Express*, 17 (25), 22800-22812.
- Valentine, J., Zhang, S., Zentgraf, T., Ulin-Avila, E., Genov, D. A., Bartal, G. ve Zhang, X., 2008, Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index, *Nature*, 455 (7211), 376-U332.
- Wang, W. Y., Cui, Y. X., He, Y. R., Hao, Y. Y., Lin, Y. Y., Tian, X. M., Ji, T. ve He, S. L., 2014, Efficient multiband absorber based on one-dimensional periodic metal-dielectric photonic crystal with a reflective substrate, *Optics Letters*, 39 (2), 331-334.
- Wang, Y., Sun, T. Y., Paudel, T., Zhang, Y., Ren, Z. F. ve Kempa, K., 2012, Metamaterial-Plasmonic Absorber Structure for High Efficiency Amorphous Silicon Solar Cells, *Nano Letters*, 12 (1), 440-445.
- Wood, B., Pendry, J. B. ve Tsai, D. P., 2006, Directed subwavelength imaging using a layered metal-dielectric system, *Physical Review B*, 74 (11).
- Wu, F., Lu, G., Xue, C. H., Jiang, H. T., Guo, Z. W., Zheng, M. J., Chen, C. X., Du, G. Q. ve Chen, H., 2018, Experimental demonstration of angle-independent gaps in one-dimensional photonic crystals containing layered hyperbolic metamaterials and dielectrics at visible wavelengths, *Applied Physics Letters*, 112 (4).
- Wu, S., Xu, S., Zhang, Y., Wu, Y. N., Jiang, J. J., Wang, Q. J., Zhang, X. J. ve Zhu, Y. Y., 2014, Asymmetric transmission and optical rotation of a quasi-3D asymmetric metallic structure, *Optics Letters*, 39 (22), 6426-6429.
- Xue, C. H., Ding, Y. Q., Jiang, H. T., Li, Y. H., Wang, Z. S., Zhang, Y. W. ve Chen, H., 2016, Dispersionless gaps and cavity modes in photonic crystals containing hyperbolic metamaterials, *Physical Review B*, 93 (12).
- Yu, Z. F., Veronis, G., Fan, S. H. ve Brongersma, M. L., 2006, Design of midinfrared photodetectors enhanced by surface plasmons on grating structures, *Applied Physics Letters*, 89 (15).
- Zhou, J., Kaplan, A. F., Chen, L. ve Guo, L. J., 2014, Experiment and Theory of the Broadband Absorption by a Tapered Hyperbolic Metamaterial Array, *Acs Photonics*, 1 (7), 618-624.

SELÇUK
ÜNİVERSİTESİMevcut sayıya ait içindekiler listesine [DergiPark](http://dergipark.org.tr/tr/pub/sufefd) üzerinden ulaşılabilir

Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi

Dergi web sayfası: dergipark.org.tr/tr/pub/sufefd

Araştırma Makalesi

Çok Yönlü s-Triazin Ligandlarının Sentezi ve Salen/Saloph Fe(III)/Cr(III) Metal Komplekslerinin İncelenmesi

Figen Aydemir ^{a,1}, Ziya Erdem Koç ^{a,2,*}^a Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Konya-TURKEY

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi

Geliş 2 Eylül 2022

Revizyon 13 Eylül 2022

Kabul 16 Eylül 2022

Anahtar Kelimeler

s-Triazin

Siyanür klorür

5-Hidroksiizoftalik asit

Salen

Saloph

Geçiş Metaller

ÖZ

Bu çalışmada çıkış maddesi olarak siyanür klorür kullanıldı. Siyanür klorür, literatürde verilen metotlardan faydalanılarak asetonlu ortamda farklı klor uçlarından 5-hidroksiizoftalik asit kullanılarak 0 °C bir yönlü (monopodal) 2,4-dikloro-6-(3,5-dikarboksifenoksi)-1,3,5-triazin (MNCHIPA) ve oda sıcaklığında iki yönlü (dipodal) 2-kloro-4,6-(2,5-dikarboksifenoksi)-1,3,5-triazin (DPCHIPA) bileşikler sentezlendi. Etanolü ortamda çözülmüş, ligandlara ve yine etanolde çözülmüş ligand kompleksleri [Fe(salen/saloph)]₂O, [Cr(salen/saloph)]₂O ilave edilerek çift oksijenle koordine olmuş monopodal/dipodal komplekslerinin sentezi gerçekleştirildi. Sonuç olarak, monopodal/dipodal-s-triazin ligandı ve bu ligandın salen/salophFe(III)/Cr(III) kompleksleri izole edilerek, elemental analizleri, FT-IR, ¹H-NMR spektrumları ve manyetik süssettilite ölçümleri alınarak yapıları aydınlatıldı.

Research Article

Synthesis of Versatile s-Triazine Ligands and Investigation of Salen/Salophen Fe(III)/Cr(III) Metal Complexes

ARTICLE INFO

Article History

Received 2 September 2022

Revised 13 September 2022

Accepted 16 September 2022

Keywords

s-Triazine

Cyanuric chloride

5-Hydroxyisophthalic acid

Salen

Salophen

Transition Metals

ABSTRACT

In this study, cyanuric chloride was used as a starting material. Cyanuric chloride, given in the literature making use of methods in acetone end of the 5-hydroxyisophthalic acid chloride using 0 °C onedirectional (monopodal) 2,4-dichloro-6-(3,5-dicarboxyphenoxy)-1,3,5-triazine (MNCHIPA) and at room temperature bidirectional (dipodal) 2-chloro-4,6-(2,5-dicarboxyphenylphenoxy)-1,3,5-triazine (DPCHIPA) compounds were synthesized. Dissolved in ethanol 2,4,6-tris(3,5-dicarboxyphenoxy)-s-triazines ligands dissolved in ethanol ligand complexes [Fe(salen/saloph)]₂O, [Cr(salen/saloph)]₂O by the addition of double-oxygen-coordinated, synthesis of complexes with monopodal/dipodal was performed in conclusion, two different ligands and this ligands of salen/salophenFe(III)/Cr(III) complexes were isolated and their structures were characterized by FT-IR and ¹H NMR spectra, elemental analysis and magnetic susceptibility.

1. Giriş

Heterosiklik Bileşiklerden, siyanür klorür (2,4,6-trikloro-1,3,5-triazin) kullanarak son yıllarda literatürde pek çok s-triazin merkezli bileşikler sentezlenmiştir (Koc ve Ucan, 2008). Bu s-triazin ve hidroksil gruplu molekülün yer değiştirme reaksiyonu ile farklı donör gruba sahip bir ve iki yönlü oksi-s-triazin bileşikler sentezlenmiştir (Koc ve Uysal,

2010). Bu tür çok yönlü yapılar monopodal ve dipodal moleküller olarak adlandırılmıştır (Tahmassebi ve Sasaki, 1994; 1998). İlk 4-hidroksikarboksilik asit ile literatüre uygun olarak sentezlenen salen ve saloph Schiff bazlarının metal kompleksleri ile çift koordinasyonlu bileşikler sentezlenmiş ve yapı tayinleri yapılmıştır (Koc, 2011). s-Triazin türevleri koordinasyon kimyası, biyokimya, boyar maddeler, plastik sanayiinde, ilaç kimyası, elektronik

* Sorumlu Yazar

E-posta adresleri: figenertus@hotmail.com (F. Aydemir), zerdemkoc@gmail.com (Z. E. Koç)

¹ ORCID: 0000-0003-2441-0517² ORCID: 0000-0002-5875-9779

Doi: 10.35238/sufefd.1170087

E-ISSN: 2458-9411

sanayinde ve ziraat alanında pestisit ve herbisit olarak pek çok sahada önem kazanmaktadır (Koc ve Uysal, 2011). s-Triazinler bir çok kullanım alanlarının olmasından dolayı bu konuda araştırmalar hızlı bir şekilde devam etmektedir. Bu yapıların geçiş metalleri ile kompleks vermesi koordinasyon kimyasının yanı sıra biyoinorganik kimya açısından da ayrı bir öneme sahiptir (Uysal ve ark., 2012). Son yıllarda s-triazin türevlerinin antitümör, antiviral etkilerinin ortaya çıkması ile farmakolojik alanda önemli bir yere sahip oldukları belirlenmiştir (Celikbilek ve Koc, 2014). Pek çok organik reaksiyonda, metal iyonlarının yönlendirme etkisi dolayısıyla elde edilmesi mümkün olmayan veya çok düşük verimle elde edilebilen birçok heterosiklik bileşiğin elde edilmesini mümkün kılmıştır (Koc ve Uysal, 2016). Ayrıca, bazılarının da sıvı kristal özelliğe sahip olması, bu konular üzerinde çalışmaların artmasına neden olmuştur (Candlın. J. P. ve ark., 1968; Tan ve Bekaroglu, 1983).

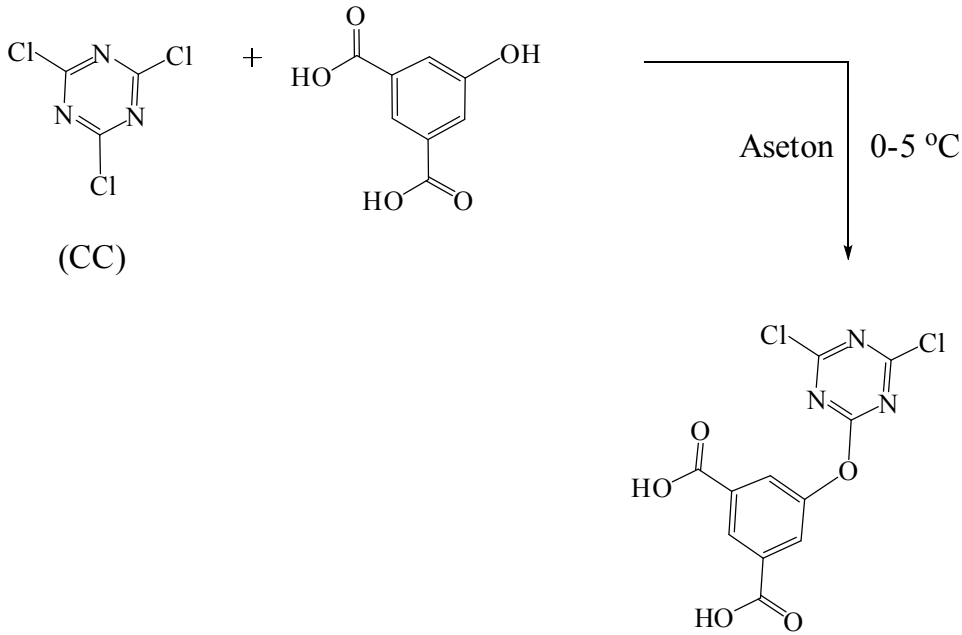
2. Materyal ve Metot

Çalışmada kullanılan maddeler Merck, Fluka ve Aldrich'ten temin edildi. Etil alkol, metil alkol, etil asetat, n-hekzan, siyanür klorür, FeCl₃, CrCl₃.6H₂O, 5-hidroksiizoftalik asit, NaOH, K₂CO₃ ve NaHCO₃ susuz Na₂SO₄, kullanıldı. Kullanılan bazı reaktifler de laboratuvar şartlarında sentezlendi. Kullanılan cihazlar: Perkin Elmer 1600 Spectrum 100 with Universal ATR Polarization Accessory, ¹H NMR Spektrometresi, Varian, 400 MHz spektrometre,

Elementel Analiz, LECO kullanımı için uygundur, CHNS-932 model analyzer, pH meter, Orion Expandable Ion Analyzer EA 940. Erime Noktası Tayin Cihazı, Büchi Melting Point, B-540. Manyetik süssebtibilite, Sheerwood Scientific MX1 Gouy Magnetic Susceptibility.

2.1. 2,4-Dikloro-6-(3,5-dikarboksifenoksi)-s-triazin sentezi (MNCHIPA) sentezi

Siyanür klorür (1.84 g, 10 mmol) 50 mL asetondaki çözeltisi üzerine 5-hidroksiizoftalik asitin (1.82 g, 10 mmol) aseton/su (25/25 mL) çözeltisi 0-5 °C'de damla damla karıştırılarak ilave edildi. Meydana gelen çamurumsu siyanür klorür üzerine NaHCO₃ (2.10 g, 25 mmol) 50 mL sudaki çözeltisi (pH 6-7) ilave edilir. 3 saat sonra ince tabaka kromatografisi ile (hekzan/etilasetat: 1:4 v/v) kontrol edilerek reaksiyon sonlandırılır. Elde edilen çökelek Fujiwara testi ile klor tayini yapılır. Daha sonra vakum ile aseton buharlaştırılır. Ham ürün su (100 mL) süspansiyonu hazırlanarak süzülür ve elde edilen süzüntüye 5M HCl ilave edilerek pH 4'e getirilir. Elde edilen çökelek su ile yıkanır (Şekil 1). FT-IR (cm⁻¹): 3299 (OH), (C=O) 1694, 1575 (C=N triazine), 1358 (COC). ¹H NMR (400 MHz, DMSO-d₆): δ (ppm), 13.60 (s, 2H, OH), 8.10 (s, 1H, CH_{arom.}), 7.99 (d, 2H, J = 21.00 Hz). ¹³C NMR (400 MHz, DMSO-d₆): δ (ppm), 167.40, 164.41, 154.87, 141.72, 181.02, 127.07, 212.22.

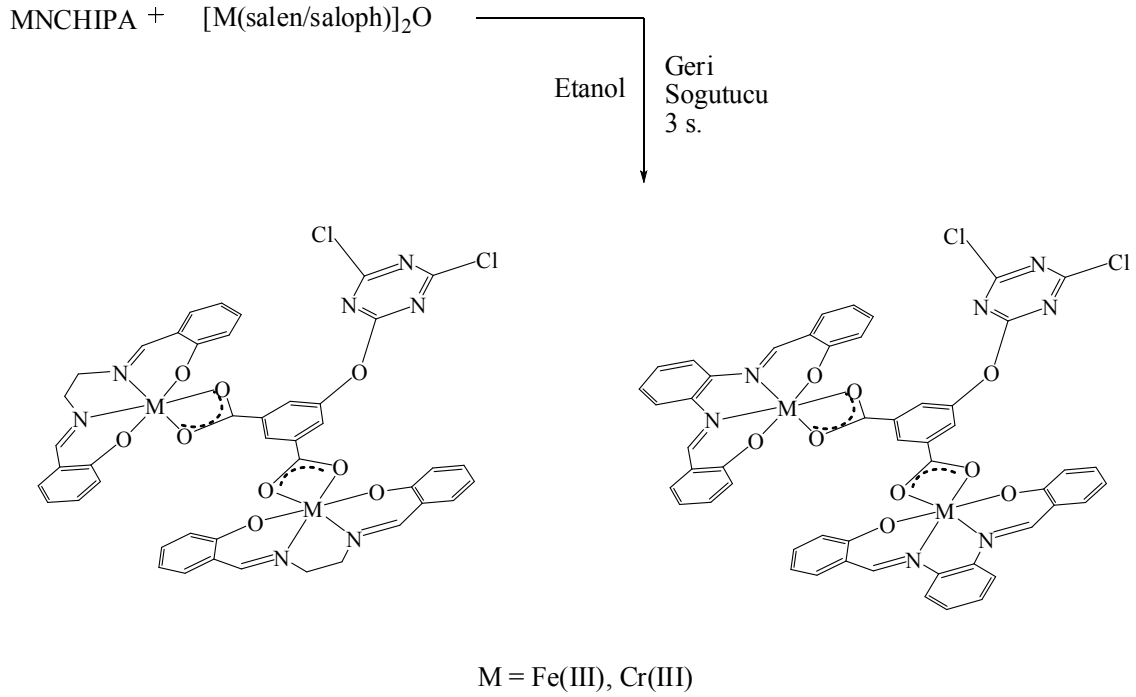


Şekil 1. 2,4-dikloro-6-(3,5-dikarboksifenoksi)-1,3,5-triazin (MNCHIPA).

2.1.1. 2,4-Dikloro-6-(3,5-dikarboksifenoksi)-s-triazin'in (MNCHIPA) [Fe(salen/saloph)]₂O ve [Cr(salen/saloph)]₂O komplekslerinin sentezi

2,4-Dikloro-6-(3,5-dikarboksifenoksi)-s-triazin'in (0.48 g, 1 mmol) 20 mL etanoldeki süspansiyonu 100 mL'lik balonda hazırlanarak, üzerine sırasıyla 2 mmol [Fe(salen/saloph)]₂O ve [Cr(salen/saloph)]₂O 20 mL etanoldeki çözeltileri ilave edildi. 80 °C civarında 3 saat geri

soğutucu altında kaynatıldıktan sonra çözücüsü yarıya kadar buharlaştırılarak, soğumaya bırakıldı (oda şartlarında). Elde edilen çözelti üzerine 50 mL su ilave edilerek süzüldü ve suyla yıkandı. Bir gece bekletilip vakumda süzülür ve etüde kurutulur (Şekil 2). [Fe(salen)]₂O FT-IR (cm⁻¹): 2873 (CH), 1685 (CH=N_{salen}), 1578 (C=N_{triazin}), 1423 (COO), 1330 (COC). [Cr(saloph)]₂O FT-IR (cm⁻¹): 2875 (CH), 1687 (CH=N_{saloph}), 1570 (C=N_{triazin}), 1427 (COO), 1337 (COC).

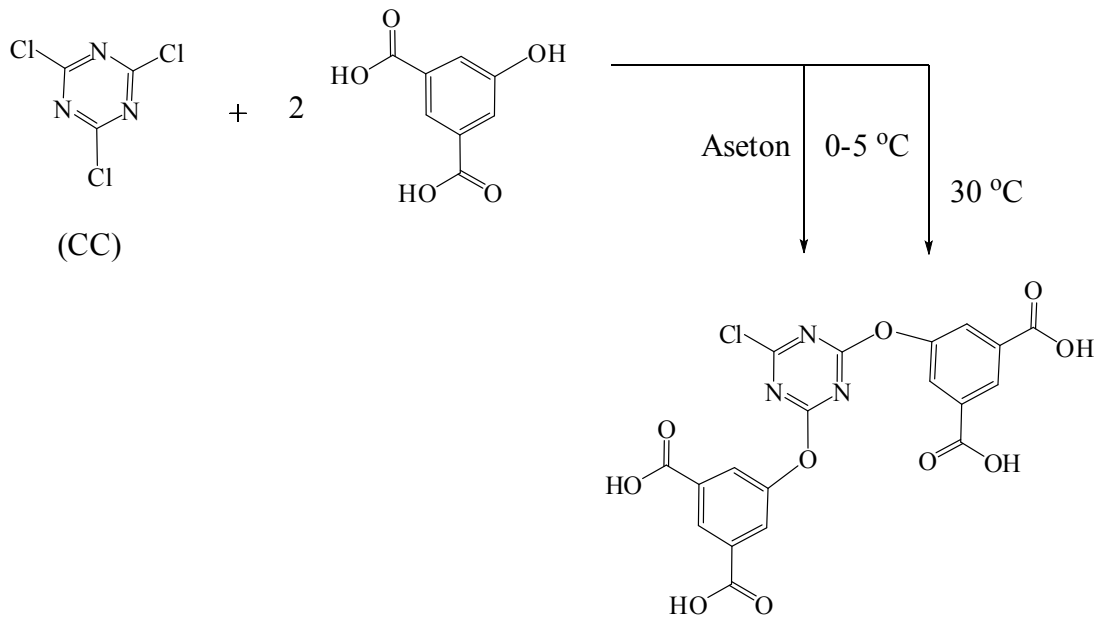


Şekil 2. (MNCHIPA) ligandının monopodal-dinükleer kompleksleri.

2.2. 2-Kloro-4,6-bis(4-karboksifenoksi)-s-triazin (DPCHIPA) sentezi

Siyanür klorür (1.84 g, 10 mmol) 50 mL asetondeki çözeltisi üzerine 5-hidroksiisofthalik asidin (1.82 g, 10 mmol) aseton/su (25/25 mL) çözeltisi 0-5 °C'de damla damla karıştırılarak ilave edildi. Meydana gelen çamurumsu siyanür klorür üzerine NaHCO₃ (2.10 g, 25 mmol) 50 mL sudaki çözeltisi (pH 6-7) ilave edildi. 3 saat sonra ince tabaka kromatografisi ile (heksan/etilasetat: 1:4 v/v) kontrol edilerek reaksiyon sonlandırıldı. Elde edilen çökelek Fujiwara testi ile klor tayini yapıldı. Daha sonra sıcaklık 25

°C'ye çıkarılır, 2 saat sonra sıcaklık 30 °C'ye kadar yükseltilir ve 5-hidroksiisofthalik asidin (1.82 g, 10 mmol) aseton/su (25/25 mL) çözeltisi ve NaHCO₃ (2.10 g, 25 mmol) 50 mL sudaki çözeltisi damla damla karıştırılarak ilave edildi. Sıcaklık 40 °C'ye çıkarılarak 3 saat karıştırıldı. Elde edilen üründen vakum ile aseton buharlaştırıldı. Ham ürün su ile (100 mL) süspansiyonu hazırlanarak süzüldü, elde edilen süzüntüye 5M HCl ilave edilerek pH 4'e getirildi. Elde edilen çökelti su ile yıkandı (Şekil 3). FT-IR (cm⁻¹): 3284 (OH), (C=O) 1748, 1571 (C=N triazine), 1382 (COC). ¹H NMR (400 MHz, DMSO-d₆): δ (ppm), 13.62 (s, 4H, OH), 7.95 (s, 2H, CH_{arom.}), 7.86 (d, 4H, J = 21.00 Hz).



Şekil 3. 2-kloro-4,6-bis(2,5-dikarboksifenilfenoksi)-1,3,5-triazin (DPCHIPA).

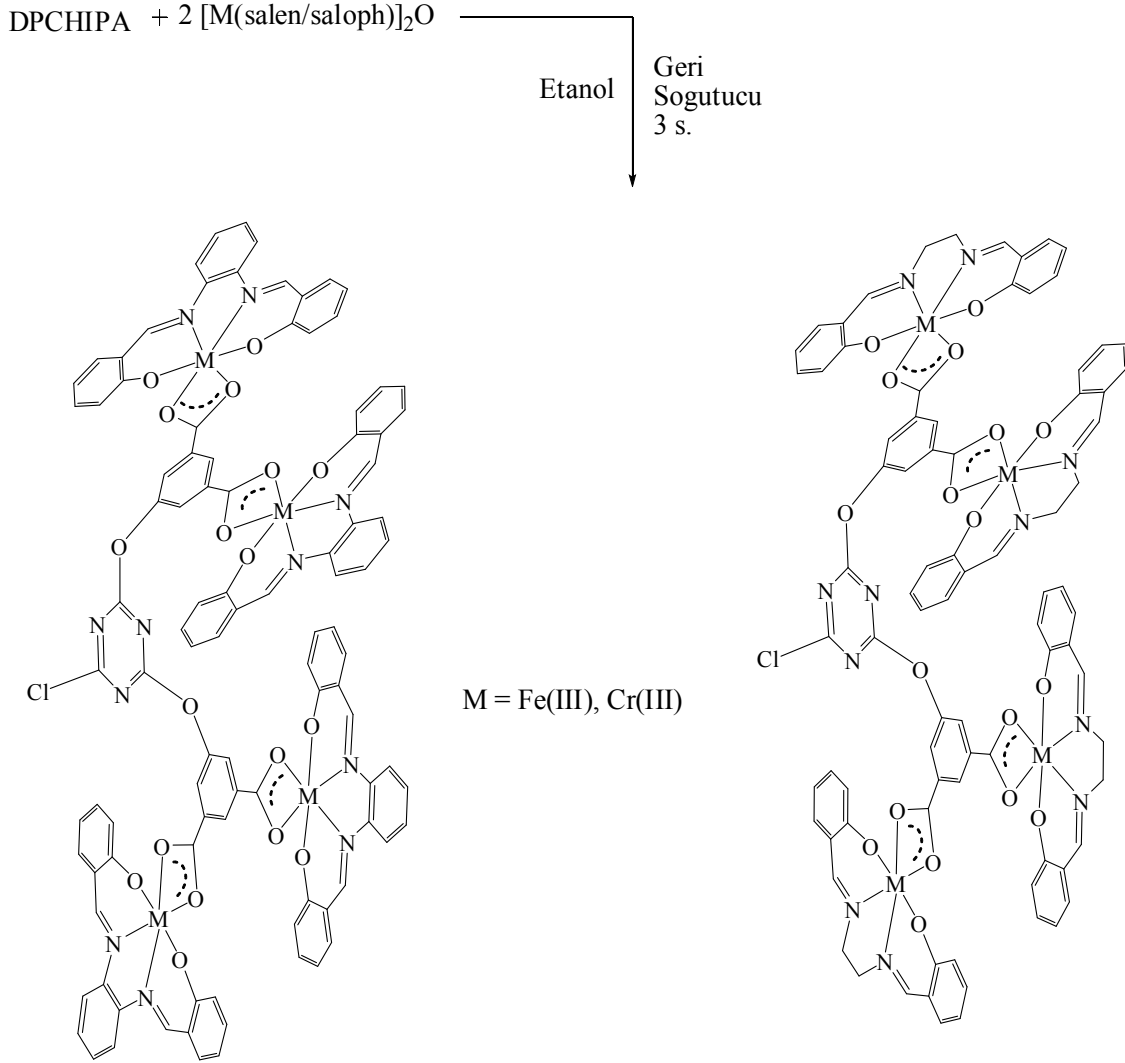
2.2.1. 2-Kloro-4,6-bis(4-karboksifenoksi)-s-triazin'in (DPCHIPA) [Fe(salen/saloph)]₂O ve [Cr(salen/saloph)]₂O komplekslerinin sentezi

2-Kloro-4,6-bis(4-karboksifenoksi)-s-triazin'in (0.33 g, 1mmol) 20 mL etanoldeki süspansiyonu 100 mL'lik balonda

hazırlanarak, üzerine sırasıyla 1 mmol [Fe(salen/saloph)]₂O ve [Cr(salen/saloph)]₂O 20 mL etanoldeki çözeltileri ilave edildi. 80 °C civarında 3 saat geri soğutucu altında kaynatıldıktan sonra çözücüsü yarıya kadar buharlaştırılarak, soğumaya bırakıldı (oda şartlarında). Elde edilen çözelti üzerine 50 mL su ilave edilerek süzüldü ve

suyla yıkandı. Bir gece bekletilip vakumda süzülde ve etüvede kurutuldu. (Şekil 4). [Fe(salen)]₂O FT-IR (cm⁻¹): 2887 (CH), 1604 (CH=N_{salen}), 1575 (C=N_{triazin}), 1430 (COO), 1365 (COC).

[Cr(saloph)]₂O FT-IR (cm⁻¹): 2897 (CH), 1628 (CH=N_{saloph}), 1578 (C=N_{triazin}), 1437 (COO), 1358 (COC).



Şekil 4. (DPCHIPA) ligandının dipodal-tetranükleer kompleksleri.

3. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada başlangıç maddesi olarak kullanılan siyanür klorür ve 5-hidroziizoftalik asidin asetonlu ve sulu ortam içerisinde, NaHCO₃ süspansiyonu ile (DPCHIPA) ve (MNCHIPA) elde edilmiştir. Bu reaksiyonlar klor ve hidroksil gruplu moleküllerin kenetlenme reaksiyonu ile çok yönlü s-triazin merkezli bileşikler sentezlenmiştir. Bu çok yönlü yapılar MONO/DİPODAL moleküller olarak adlandırılmıştır (Koc ve Ucan, 2007).

Sentezlenen ligandların yapıları, ¹H NMR, FT-IR ve elementel analiz ile aydınlatılmıştır. Etanol ortamda çözülmüş olan DPCHIPA ve MNCHIPA ligandları ile [Fe(salen/salop)]₂O, [Cr(salen/salop)]₂O ligandlarının çift oksijenle koordine olmuş çok yönlü komplekslerinin sentezi gerçekleştirilmiştir. Bu komplekslerin yapıları elementel analiz, FT-IR spektroskopisi, manyetik süsebtibilite ölçümleri ile aydınlatılmıştır (Koc ve Uysal, 2010).

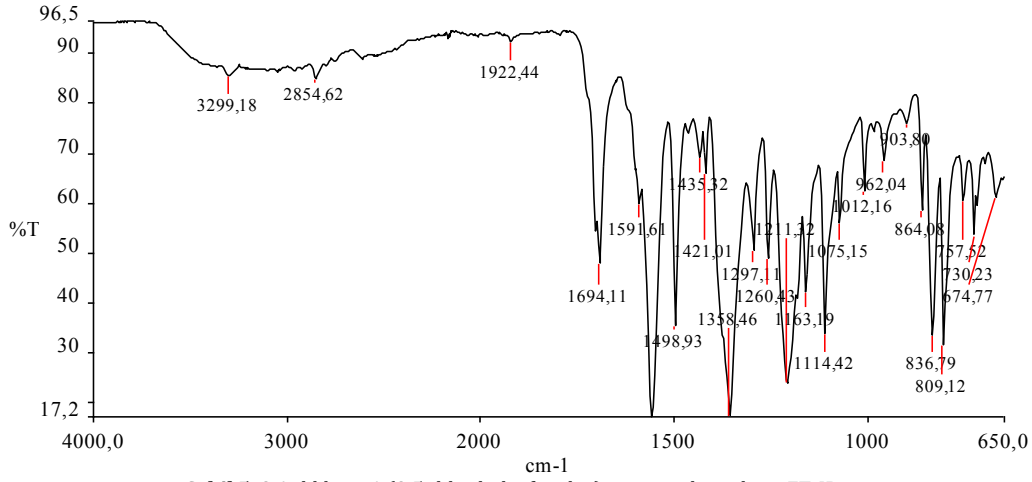
Ligandların (2,4-dikloro-6-(3,5-dikarboksifenoksi)-s-triazin (MNCHIPA) ve 2-kloro-4,6-bis(3,5-dikarboksifenoksi)-s-triazin (DPCHIPA)) ¹H NMR spektrumları incelendiğinde, 9.60 ppm de OH protonlarına karşılık gelen bir singlet kimyasal kayma değerinin gözlenmediği onun yerine asit gruplarının OH protonlarına ait sırasıyla 13.60-13.67 ppm değerleri gözlenmiştir. Ayrıca

her farklı yönün bağlanmasında hidrojen sayıları artarak beklenen sonuçları vermiştir.

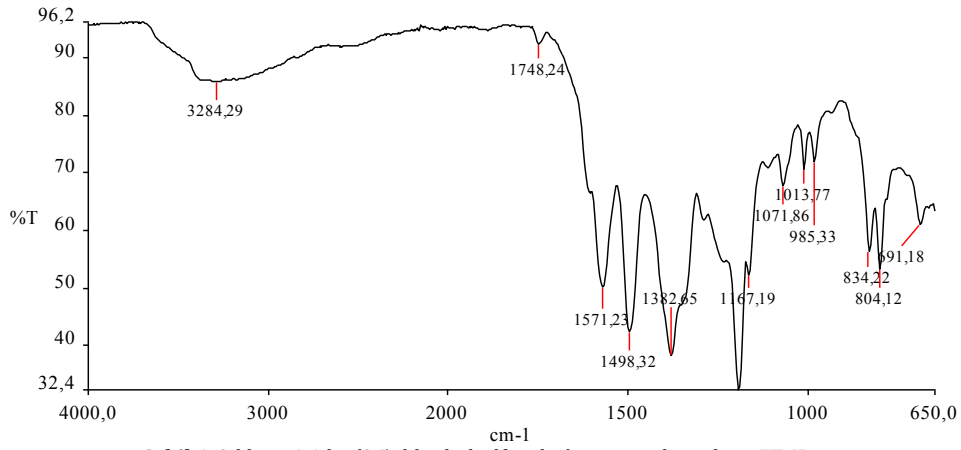
Ligandların ve metal komplekslerinin FT-IR spektral verileri deneysel bölümde ayrı ayrı verilmiştir. Bu değerleri incelediğimizde; 2,4-dikloro-6-(3,5-dikarboksifenoksi)-s-triazin (MNCHIPA) ve 2-kloro-4,6-bis(3,5-dikarboksifenoksi)-s-triazin (DPCHIPA) ligandlarının FT-IR spektral verilerinde meydana gelen karboksilli aside ait OH titreşimleri 3299-3284 cm⁻¹'de geniş pikler halinde gözlenmiştir. Bunun yanında meydana gelen COC titreşimleride kenetlenme reaksiyonunun oluşması hakkında bilgi vermektedir. 2,4-dikloro-6-(3,5-dikarboksifenoksi)-s-triazin (MNCHIPA), 2-kloro-4,6-bis(3,5-dikarboksifenoksi)-s-triazin (DPCHIPA) ligandlarının ve [Fe(salen/saloph)]₂O, [Cr(salen/saloph)]₂O ligand kompleksleri ile elde edilen koordinasyon bileşiklerinin IR bantları alınmış ve bu maddelerin sentezlendiği düşünülmüştür. IR bantlarına bakıldığında, her üç liganda da bulunan OH gruplarının IR bantları kompleks yapılarının oluşumundan sonra kaybolduğu gözlenmiştir. Ligandlarda 3299-3284 cm⁻¹'de gözlenen -COOH bandının komplekslerde gözlenmemesinin nedeni metallerin, -COOH'ın hidrojenini kopararak oksijen üzerinden koordine olduğunu göstermektedir. Komplekslerin meydana gelmesi sonucunda oluşan Schiff bazı salen/saloph C=N pikleri de 1685-1623 cm⁻¹'de

gözenmiştir. Karboksilli asit grubundan gelen 1694-1717 cm^{-1} 'deki C=O bandı köprülü bileşiklerin oluşmasıyla konjügasyon ile 1430-1432 cm^{-1} dönüşmüştür. Bunun

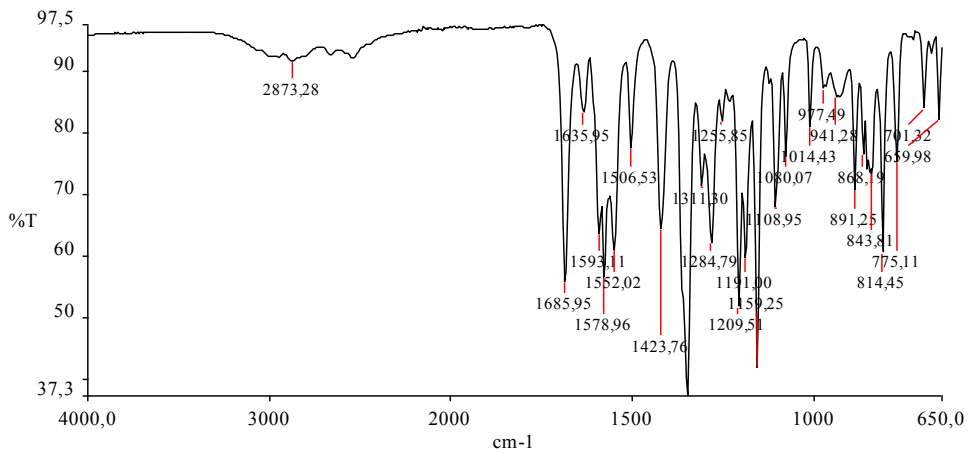
yanında diğer bir bant olarak COO^- iyonları literatüre uygun olarak 1390 cm^{-1} civarında da görülmüştür (Kopel ve ark., 1998; Koc, 2011).



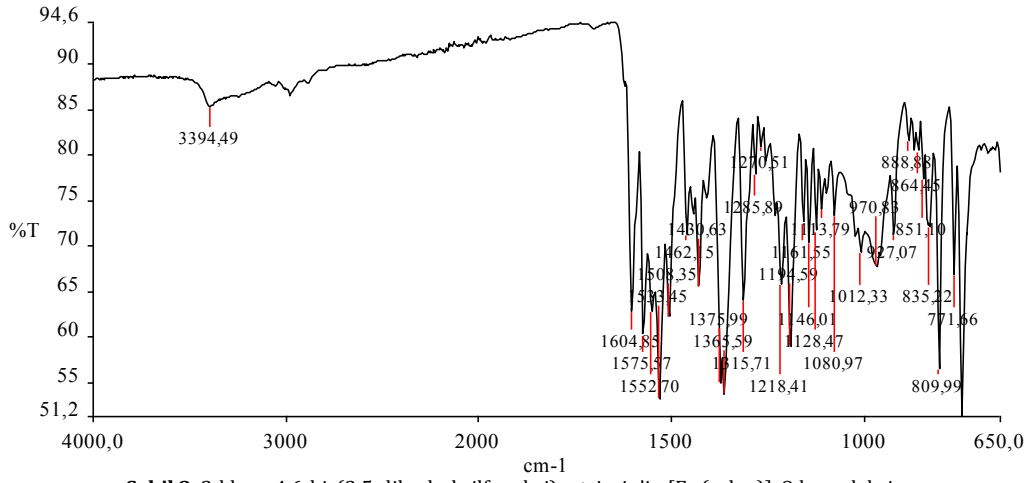
Şekil 5. 2,4-dikloro-6-(3,5-dikarboksifenoksi)-s-triazin ligandının FT-IR.



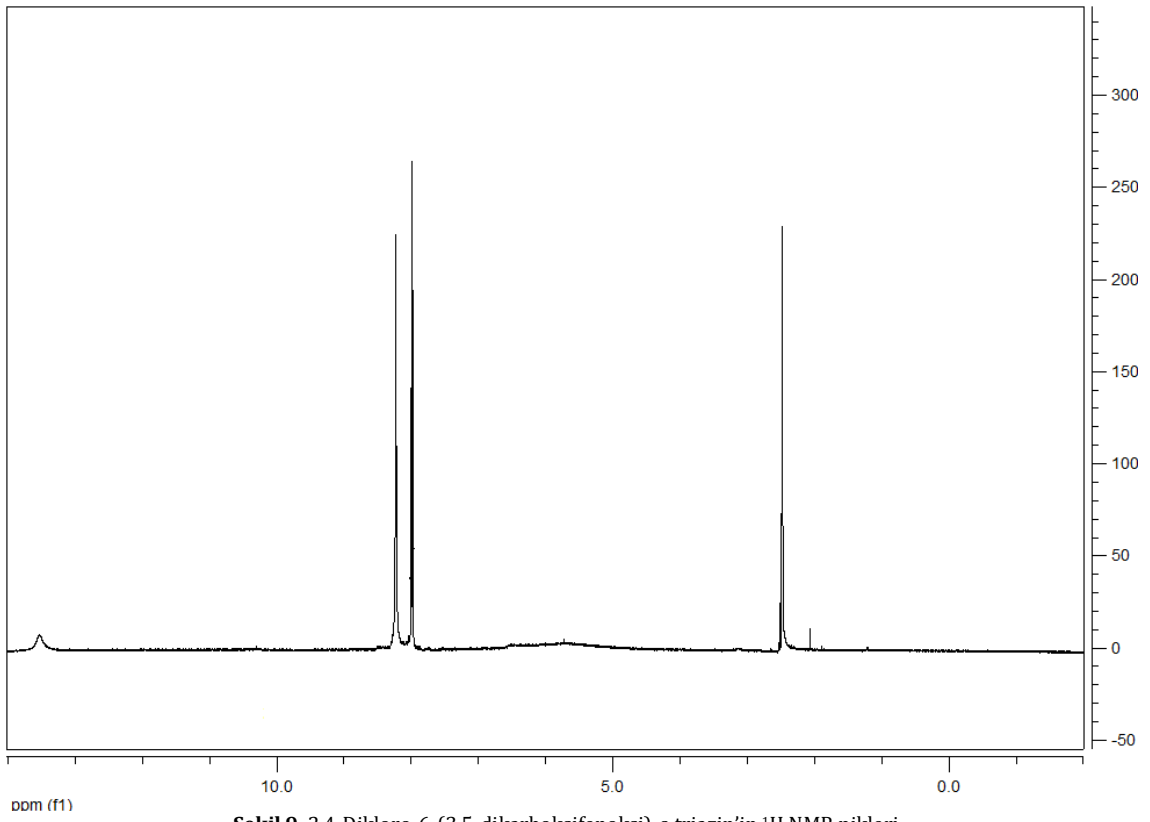
Şekil 6. 2-kloro-4,6-bis(3,5-dikarboksifenoksi)-s-triazin ligandının FT-IR.



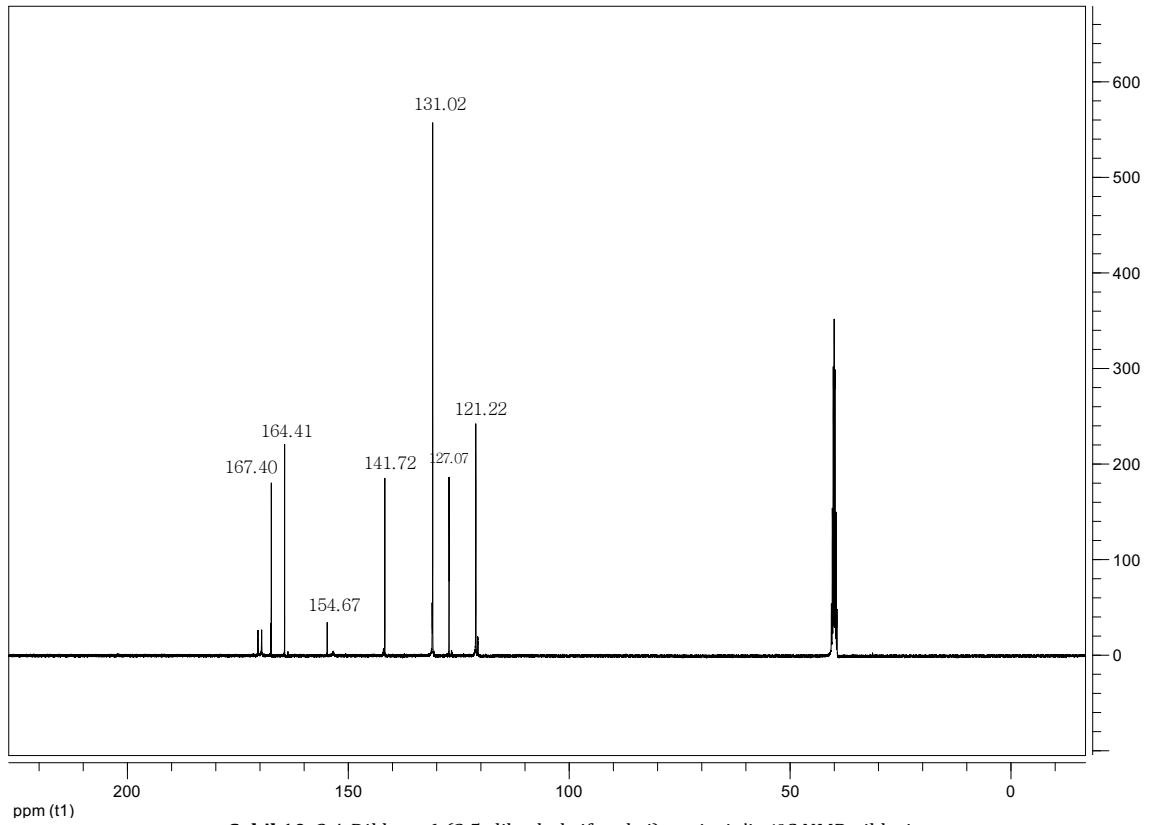
Şekil 7. 2,4-Dikloro-6-(3,5-dikarboksifenoksi)-s-triazin'in $[\text{Fe}(\text{salen})]_2\text{O}$ kompleksinin FT-IR.



Şekil 8. 2-kloro-4,6-bis(3,5-dikarboksifenoksi)-s-triazin'in [Fe (salen)]₂O kompleksi.



Şekil 9. 2,4-Dikloro-6-(3,5-dikarboksifenoksi)-s-triazin'in ¹H NMR pikleri.

Şekil 10. 2,4-Dikloro-6-(3,5-dikarboksifenoksi)-s-triazin'in ¹³C NMR pikleri

2,4-dikloro-6-(3,5-dikarboksifenoksi)-s-triazin (MNCHIPA) ve 2-kloro-4,6-bis(3,5-dikarboksifenoksi)-s-triazin (DPCHIPA) ligandlarının [Fe(salen/salop)]₂O, [Cr(salen/salop)]₂O, çift oksijenle koordine olmuş komplekslerinde ölçülen manyetik süsebtibilite değerlerinin düşük spinli olduğu tespit edilmiştir. Ligandların d⁵ metal iyonu düzenine sahip [{Fe(salen/saloph)}₂O] köprülü kompleksleri paramanyetik ve sırasıyla her bir metal atomu için 1.77-1.75 arasında BM değerlerine sahiptir. DIPODAL ligandların d³ metal iyonu düzenine sahip [{Cr(salen/saloph)}₂O] köprülü kompleksleri de paramanyetik ve 3.52-3.30 BM değerlerine sahiptir. Bu sonuçlara göre çift oksijenle koordine olmuş komplekslerinin oktahedral yapıya sahip olduğu

düşünülmektedir (Kopel ve ark., 1998). Ligandların ve metal komplekslerinin bazı fiziksel özellikleri, komplekslerin geometrileri, manyetik süsebtibilite değerleri ve elementel analiz sonuçları hakkında Tablo 1'de bilgi vermektedir. Ligandlar ile ilgili olarak literatürde benzer çalışmalara rastlanılmasına karşılık triazin merkezli 5-hidroksiizoftalik asit ile ilgili bir bileşiğe rastlanmamıştır. Kompleksleri ile ilgili çift oksijen ile koordine olmuş çalışmalar literatürde mevcuttur. Elde edilen kompleksler DMSO, THF ve DMF'de çözünmektedir. Kompleks oluşumu sırasında çözünme ve kompleksleşme reaksiyonu art arda gerçekleşmekte ve renk değişimi ile kompleksleşmenin tamamlandığı anlaşılmaktadır.

Tablo 1

Ligandların ve metal komplekslerinin bazı fiziksel özellikleri.

Bileşikler	M _w Renkler	% V.	M.p. (°C)	μ _{eff} (B.M.) 296 K	Bulunan (Hesaplanan) (%)			
					C	H	N	M
C ₁₁ H ₅ N ₃ O ₅ Cl ₂	[330.08]	85	258*	-	40.72	1.75	12.14	-
MNCHIPA	Beyaz				(40.52)	(1.51)	(12.73)	-
C ₁₉ H ₁₀ N ₃ O ₁₀ Cl	[475,75]	62	292*	-	47.72	2.25	8.54	-
DPCHIPA	Gri				(47.97)	(2.12)	(8.83)	-
C ₄₃ H ₃₁ N ₇ O ₉ Cl ₂ Fe ₂	[972.34]	75	300>	1.86	52.85	3.38	10.02	11.32
[MNCHIPA-salenFe]	Kahverengi				(53.11)	(3.21)	(10.08)	(11.48)
C ₅₁ H ₃₁ N ₇ O ₉ Cl ₂ Fe ₂	[1068.43]	67	300>	1.82	57.12	2.88	9.14	10.35
[MNCHIPA-salophFe]	Kahverengi				(57.33)	(2.92)	(9.17)	(10.45)
C ₄₃ H ₃₁ N ₇ O ₉ Cl ₂ Cr ₂	[964.65]	61	300>	3.20	53.50	3.38	10.11	10.65
[MNCHIPA-salenCr]	Yeşil				(53.54)	(3.24)	(10.17)	(10.78)
C ₅₁ H ₃₁ N ₇ O ₉ Cl ₂ Cr ₂	[1060.73]	68	300>	3.30	57.82	2.98 (2.95)	9.44	9.78
[MNCHIPA-salophCr]	Yeşil				(57.75)		(9.24)	(9.80)
C ₈₃ H ₆₂ N ₁₁ O ₁₈ ClFe ₄	[1760.28]	57	300>	1.77	56.52	3.48	8.64	12.61
[DPCHIPA-salenFe]	Kahverengi				(56.63)	(3.55)	(8.75)	(12.69)
C ₉₉ H ₆₂ N ₁₁ O ₁₈ ClFe ₄	[1952.45]	59	300>	1.71	51.92	2.38	8.54	11.40
[DPCHIPA-salophFe]	Kahverengi				(60.90)	(3.20)	(7.89)	(11.44)
C ₈₃ H ₆₆ N ₁₁ O ₁₈ ClCr ₄	[1748.92]	52	300>	3.55	56.92	3.88	8.74	11.82
[DPCHIPA-salenCr]	Yeşil				(57.00)	(3.80)	(8.81)	(11.89)
C ₉₉ H ₆₂ N ₁₁ O ₁₈ ClCr ₄	[1937.05]	58	300>	3.52	61.32	3.38	7.84	10.68
[DPCHIPA-salophCr]	Yeşil				(61.37)	(3.23)	(7.95)	(10.74)

Kaynaklar

- Candlin, J. P. , Taylor, K.A. ve Thompson, D. T., 1968, Reactions of Transition Metal Complexes, *Elsevier*, 87.
- Celikkbilek, S. ve Koc, Z. E., 2014, Investigation of Dipodal oxy-Schiff base and its salen and salophen Fe(III)/Cr(III)/Mn(III) Schiff bases (N2O2) capped complexes and their magnetic and thermal behaviors, *Journal of Molecular Structure*, 1065, 205-209.
- Koc, Z. E. ve Ucan, H. I., 2007, Complexes of iron(III) salen and saloph Schiff bases with bridging 2,4,6-tris(2,5dicarboxyphenylimino-4-formylphenoxy)-1,3,5-triazine and 2,4,6-tris(4-carboxyphenylimino-4'-formylphenoxy)-1,3,5-triazine, *Transition Metal Chemistry*, 32 (5), 597-602.
- Koc, Z. E. ve Ucan, H. I., 2008, Complexes of Iron(III) and Chrom(III) Salen and Saloph Schiff Bases with Bridging 2,4,6-tris(4-nitrophenylimino-4'-formylphenoxy)-1,3,5-triazine, *Journal of Macromolecular Science Part a-Pure and Applied Chemistry*, 45 (12), 1074-1079.
- Koc, Z. E. ve Uysal, S., 2010, Synthesis and Characterization of Dendrimeric Bridged Salen/Saloph Complexes and Investigation of Their Magnetic and Thermal Behaviors, *Helvetica Chimica Acta*, 93 (5), 910-919.
- Koc, Z. E., 2011, Complexes of Iron(III) and Chromium(III) Salen and Salophen Schiff Bases with Bridging 1,3,5-Triazine Derived Multidirectional Ligands, *Journal of Heterocyclic Chemistry*, 48 (4), 769-775.
- Koc, Z. E. ve Uysal, S., 2011, Synthesis and Characterization of Tripodal Oxy-Schiff base (2,4,6-Tris(4-Carboxymethylenephenylimino-4'-formylphenoxy)-1,3,5-triazine) and the Thermal and Magnetic Properties of its Fe(III)/Cr(III) Complexes, *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 21 (3), 400-406.
- Koc, Z. E. ve Uysal, A., 2016, Investigation of novel monopodal and dipodal oxy-Schiff base triazine from cyanuric chloride: Structural and antimicrobial studies, *Journal of Macromolecular Science Part a-Pure and Applied Chemistry*, 53 (2), 111-115.
- Kopel, P., Sindelar, Z. ve Klicka, R., 1998, Complexes of iron(III) salen and saloph Schiff bases with bridging dicarboxylic and tricarboxylic acids, *Transition Metal Chemistry*, 23 (2), 139-142.
- Tahmassebi, D. C. ve Sasaki, T., 1994, Synthesis of a New Trialdehyde Template for Molecular Imprinting, *Journal of Organic Chemistry*, 59 (3), 679-681.
- Tahmassebi, D. C. ve Sasaki, T., 1998, Synthesis of a three-helix bundle protein by reductive amination, *Journal of Organic Chemistry*, 63 (3), 728-731.
- Tan, N. ve Bekaroğlu, Ö., 1983, Synthesis of some organometalik compounds of 1,2-acenaphtylene-dione dioxime and comparison with B Model Compounds, *Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry*, 13, 667-682.
- Uysal, S., Koc, Z. E., Celikkbilek, S. ve Ucan, H. I., 2012, Synthesis of Star-Shaped Macromolecular Schiff Base Complexes Having Melamine Cores and Their Magnetic and Thermal Behaviors, *Synthetic Communications*, 42 (7), 1033-1044.



Mevcut sayıya ait içindekiler listesine [DergiPark](#) üzerinden ulaşılabilir

Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi

Dergi web sayfası: dergipark.org.tr/tr/pub/sufefd



Düzeltilme

Düzeltilme/Erratum “Ultrasonik yöntemle ve mekanik deneylerle belirlenen malzeme sabitlerinin karşılaştırılması” [Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi, 48 (1) 2022 Sayfa 25-33]

Hatice Güzel ^{a,1}, Ersin Bozkurt ^{b,2,*}

^a Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Fen Bilgisi Eğitimi ABD, Karaman

^b Necmettin Erbakan Üniversitesi, Ahmet Keleşoğlu Eğitim Fakültesi, Fizik Eğitimi ABD, Konya

Özet

Bu “Düzeltilme” makalesinin amacı daha önce Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi, 48 (1) 2022 Sayfa 25-33’de basılmış olan “Ultrasonik yöntemle ve mekanik deneylerle belirlenen malzeme sabitlerinin karşılaştırılması” isimli makaledeki düzeltmeyi ifade etmektir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit malzemeler, Poisson oranı, Young modülü, Ultrasonik yöntem, Çekme testi

1. Giriş

Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi, 48 (1) 2022 Sayfa 25-33’de basılan “Ultrasonik Yöntemle ve Mekanik Deneylerle Belirlenen Malzeme Sabitlerinin Karşılaştırılması (Hatice Güzel, Ersin Bozkurt)” isimli makalede 3., 4., 5., 6., 7. ve 9. nolu tablolar, Measurement of the elastic properties of orthotropic materials by ultrasonic method (Güzel ve ark., 2019) ve Determining Elastic Coefficients of Composite Materials by Mechanical Methods (Güzel ve ark., 2020) isimli iki kitap bölümlerinden alınmıştır.

Kaynaklar

- Güzel H, Oral İ, and İşler H, (2019). Measurement of the elastic properties of orthotropic materials by ultrasonic method. Science and Mathematics Research Papers, Chapter 4, Gece kitaplığı.
- Güzel H, Karabulut M, and Oral İ (2020). Determining Elastic Coefficients of Composite Materials by Mechanical Methods. Multidisciplinary Studies on Recent Advances in Science and Engineering – Experimental and Theoretical Chapter 2, İksad Yayınevi.

* Sorumlu Yazar

E-posta adresleri: bozkurt@erbakan.edu.tr (E. Bozkurt), haticeguzel95@gmail.com (H. Güzel)

¹ ORCID: 0000-0001-5678-4447

² ORCID: 0000-0001-9079-6847

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Derleme Makaleleri

Derleme Makaleleri

Toprak Solarizasyonu ve Bitki Paraziti Nematodlarla Mücadelede Kullanımı 53-62
Soil Solarization and Its Use in Management of Plant Parasitic Nematodes
İbrahim Mıstanoğlu, Gülsüm Uysal, Zübeyir Devran

İki-Boyutlu Nanomalzemeler: Özellikleri, Sentez Yöntemleri ve Uygulama Alanları Üzerine Genel Bir Bakış 63-71
Two-Dimensional Nanomaterials: An Overview of Their Properties, Synthesis and Applications
Sadık Çoğal

Araştırma Makaleleri

Salvia candidissima Vahl (Lamiaceae) Alt Türlerinin Morfolojik ve Anatomik Özelliklerinin İncelenmesi 72-78
Investigation of Morphological and Anatomical Characters of Subsp. of The *Salvia candidissima* Vahl (Lamiaceae)
Yavuz Bağcı, Neriman Elmalı, Süleyman Doğu

Sistein Tayini İçin Yeni Bir Algılayıcı Molekülün Sentezi ve Karakterizasyonu 79-87
Synthesis and Characterization of A New Probe For The Detection of Cystein
Sait Malkondu , Serkan Erdemir

Çok Tabakalı Hiperbolik Metamalzeme ile Oluşturulan Geniş Band Optik Soğurucu 88-97
The Broad Band Optical Absorber Designed By Multilayered Hyperbolic Metamaterial
Sevinç Eşen, Haluk Şafak

Çok Yönlü s-Triazin Ligandlarının Sentezi ve Salen/Saloph Fe(III)/Cr(III) Metal Komplekslerinin İncelenmesi 98-105
Synthesis of Versatile s-Triazine Ligands and Investigation of Salen/Salophen Fe(III)/Cr(III) Metal Complexes
Figen Aydemir, Ziya Erdem Koç

Düzeltilme/Erratum Makalesi

Düzeltilme/Erratum “Ultrasonik yöntemle ve mekanik deneylerle belirlenen malzeme sabitlerinin karşılaştırılması” [Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi, 48 (1) 2022 Sayfa 25-33].....106
Hatice Güzel, Ersin Bozkurt

İletişim / Correspondence

Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Dekanlığı
Alaeddin Keykubat Kampusu, Selçuklu, 42130, Konya
<http://dergipark.gov.tr/sufefd>
selcukfendergi@gmail.com

E-ISSN 2458-9411