



**SAVUNMA SANAYİ UYGULAMALARINDA TERMAL KAMUFLAJ
GERÇEKLEŞTİRMEK İÇİN METAMALZEME ANTEN TASARIMI**

Ahmet DEMİR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ ANA BİLİM DALI**

**SİVAS BİLİM VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2024

ETİK BEYAN

Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....
Ahmet DEMİR
30/04/2024

SAVUNMA SANAYİ UYGULAMALARINDA TERMAL KAMUFLAJ GERÇEKLEŞTİRMEK İÇİN METAMALZEME ANTEN TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet DEMİR

SİVAS BİLİM ve TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Nisan 2024

ÖZET

Kamuflaj teknoloji olarak, renk kontrolü, kızılötesi imza modülasyonu ve soğurum (yansıma bastırma) yoluyla görünür, orta kızılötesi ve radar spektrumlarında düşük görülebilirlik elde etmeyi içerir. Bu doğrultuda kullanılan doğal (geleneksel) malzemelerin optiksel verimlerinde sınırlamaları vardır. Optiksel uygulama çalışmaları için gerektiği kadar verimli değildirler veya kullanılamayacak kadar hacimlidirler. Geleneksel malzemeleri de yapısında bulunduran ancak çeşitli geometrik tasarımlarda olan metamalzemeler ise geleneksel malzemelere göre çok daha verimli performans sergileyebilen yapıların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Mükemmel ışık soğurucuları ışığı yapılarında hapsedebilmek için yarı iletken, metal veya farklı soğurma özelliği olan bir katmana ihtiyaç duyarlar.

Çalışmamızda düzlemsel metal-yalıtkan (Ag-Si) metayüzey üzerine halka metal-yalıtkan (Ag-ITO) şeklinde sıralanmış katmanlardan oluşan yeni bir Metal-Yalıtkan-Metal-Yalıtkan (MYMY) metamalzeme tasarımı yapılmıştır. Önerilen metamalzeme tasarımı, kızılötesi dalga boyu aralığı 800 ile 12.000 nm olan spektral bölge için incelenmiştir. Spektral özellikler sonlu farklar zaman alanı (FDTD) yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Bu tasarım ile, kısa dalga kızılötesi (SWIR) ve ışınsal soğutmayla uyumlu termal kamuflaj uygulamaları için geçirgen olmayan kızılötesi aralığında (NTIR) atmosferik pencerelerde düşük emisyon korunmuştur. Bununla birlikte MYMY yapısı ile soğurum tepe noktaları atmosferik soğurum pencereleriyle (SWIR’da ve NTIR’da) mükemmel bir şekilde eşleşen iki adet geniş bant ile mükemmel soğurumlar elde edilmiştir. Üstelik önerilen yapı, düzlem içi simetrik bir tasarıma sahip olduğundan polarizasyona duyarlıdır. Numerik simülasyon teknikleri kullanılarak yapının optik performansı optimize edilmiştir. Nanoyapı ile havanın empedans değerleri karşılaştırılmış ve mükemmel uyum sağladığı, ayrıca ortalama soğurum değerlerinin MWIR ve LWIR bölgelerinde arzu edilen değere çok yakın olduğu gösterilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen yapı, çeşitli uygulamalarda termal emisyonları yönetmek için ayarlanabilir ve yüksek verimli bir çözüm sunmakta olup, gizlilik teknolojisi alanında önemli bir yenilik olarak yer almaktadır.

Bilim Kodu : 93428

Anahtar Kelimeler : Metamalzeme, Kamuflaj, Nanoyapı, Soğurum

Sayfa Adedi : 47

Danışman : Doç.Dr.Timuçin Emre TABARU

METAMATERIAL ANTENNA DESIGN FOR THERMAL CAMOUFLAGE IN
DEFENSE INDUSTRY APPLICATIONS.

(M. Sc. Thesis)

Ahmet DEMİR

SİVAS UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

April 2024

ABSTRACT

As a technology, camouflage involves achieving low visibility in the visible, mid-infrared and radar spectrums through color control, infrared signature modulation and absorption (reflection suppression). Natural (traditional) materials used in this direction have limitations in their optical efficiency. They are not as efficient as needed for optical application work or are too bulky to be used. Metamaterials, which also contain traditional materials in their structure but have various geometric designs, have enabled the emergence of structures that can perform much more efficiently than traditional materials. Perfect light absorbers require a semiconductor, metal or a layer with different absorption properties to trap light in their structures.

In our study, a new Metal-Insulator-Metal-Insulator (MYMY) metamaterial design consisting of ring metal-insulator (Ag-ITO) arranged layers on a planar metal-insulator (Ag-Si) metasurface was designed. The proposed metamaterial design has been studied for the spectral region with infrared wavelength range from 800 to 12.000 nm. Spectral features were analyzed using finite difference time domain (FDTD) software. With this design, low emissivity is maintained in atmospheric windows in the nontransparent infrared range (NTIR) for thermal camouflage applications compatible with shortwave infrared (SWIR) and radiative cooling. However, with the MYMY structure, excellent absorptions were obtained with two broad bands whose absorption peaks perfectly matched the atmospheric absorption windows (in SWIR and NTIR). Moreover, the proposed structure is polarization insensitive as it has an in-plane symmetrical design. The optical performance of the structure was optimized using numerical simulation techniques. The impedance values of the nanostructure and air were compared and it was shown that they provide excellent compatibility and that the average absorption values are very close to the desired value in the MWIR and LWIR regions. The designed structure offers an adjustable and highly efficient solution to manage thermal emissions in various applications and is an important innovation in the field of privacy technology..

Science Code : 93428

Key Words : Metamaterial, Camouflage Technology, Absorption

Page Number : 47

Supervisor : Doc.Dr..Timuçin Emre TABARU

TEŞEKKÜR

Hazırladığım tez çalışmasında, konu seçiminden çalışma yöntemlerine kadar tüm aşamalarda gece gündüz demeden her vakitte yaptığımız toplantılar ile değerli akademik tecrübeleriyle bana yol gösteren, destekleriyle motivasyonumun her zaman üst seviyede kalmasını sağlayan çok kıymetli Danışman Hocam Doç. Dr. Timuçin Emre TABARU'ya, araştırma ve uygulama aşamalarında bilgi paylaşımı, program kurulumu, yazılım vb. alanlarında destek olan Atıf Kerem ŞANLI'ya çalışmalarım sürecindeki yardımlarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışma sürecinde bana sabırla destek olan değerli eşim Merve ÇITA DEMİR'e, bu süreçte dünyaya gelerek aramıza katılan oğlum Mehmet Selim DEMİR'e, her zaman yardımlarını esirgemeyen annem, babam ve kardeşlerime teşekkür ederim. |

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	8
3.1. Çok bantlı kızılötesi uyumlu kamuflaj	8
3.2. Nanoyapılarda yüzey plazmonları ve özellikleri.....	9
3.3. FDTD Nümerik Analiz Platformu	12
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	15
4.1. Tasarlanan Yapı	15
4.2. Analiz Sonuçları.....	21
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	27
KAYNAKLAR	29

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1. Çoklu bant termal kamuflaj şeması	8
Şekil 2. a) yansıyan ve b) geçen ışıpta MS 4. yüzyıldan kalma Lycurgus kupası [47].	11
Şekil 3. Nanopartiküllerin ışıkla aydınlatıldığında elektrik alan şeması [48]......	12
Şekil 4. Bir dielektrik ve metal ortam arasındaki arayüzde YP'ler uyarılmalarını gösteren şematik diyagram.....	12
Şekil 5. Ansys Lumerical FDTD 3D elektromanyetik simülasyon alanı	13
Şekil 6. Sunulan nanoantenin şematik tasarımı. a) Nanoanten dizisinin 3 boyutlu görünümü. b) Sunulan nanoanten birim hücrenin yan görünümü. c) Sunulan nanoanten birim hücrenin üstten görünümü	15
Şekil 7. (a-g) Çeşitli halka yapı kalınlığı, dalga boyu, ışığın geliş açısı, polarizasyon ve halka yapının iç ve dış yarı çap uzunluğuna göre yapısal davranış için hesaplanan nanoantenin tek parametrelili tarama analizi grafikleri.....	17
Şekil 8. (a-l) Sırasıyla 2,504 nm ve 6,390 nm dalga boyları için optimizasyon grafikleri..	19
Şekil 9. Simüle edilmiş soğurum spektrumları. (A: Atmosferik (geçirmez/aktarıcı) açıklık, S: Simülasyon sonucu ortaya konan metamalzeme anteni)	21
Şekil 10. Sırasıyla λ_1 ve λ_2 için Elektrik alan dağılım grafiği. a) ve b) Nanoantenin yandan görünümü. c) ve d) Nanoantenin üstten görünümü. Kesikli çizgiler, ITO, Ag ve Si katmanlarının konumunu vurgulamaktadır.	22
Şekil 11. Sırasıyla λ_1 ve λ_2 için manyetik alan dağılım grafiği. a) ve b) Nanoantenin yandan görünümü. c) ve d) Nanoantenin üstten görünümü.	23
Şekil 12. a) Dalga boyuna göre hesaplanan Etkin Empedans değerleri. b) Nanoanten yapının termal emisyonu ile kara cisim radyasyonunun oda sıcaklığında karşılaştırılması.	24
Şekil 13. Bir kara cismin üstündeki tasarımdan termal emisyon yollarının şematik gösterimi.	25
Şekil 14. Nanoanten yapının SWIR, MWIR ve LWIR için ortalama termal soğurum analizi.	26

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
λ	Dalga boyu
μm	Mikrometre
Ag	Gümüş
Au	Altın
CO₂	Karbondiyoksit
db	Desibel
E	Elektrik alan
GST (Ge₂Sb₂Te₅)	Germanyum antimon tellür
H	Manyetik alan
hBN	Altıgen bor nitrür
ITO	İndiyum kalay oksit (indium tin oxide)
K	Kelvin
nm	Nanometre
Sb₂S₃	Antimon trisülfür
Si	Silikon
SiC	Silisyum karbür
SiO₂	Silikon dioksit (silika)
ZnS	Çinko sülfür

Kısaltmalar	Açıklamalar
FDTD	Sonlu farklar zaman alanı (finite difference time domain)
GMR	Güdümlü mod rezonansı
GYP	Genişletilmiş yüzey plazmonları
IR	Kızılötesi
KCE	Kara cisim yayıcı
LWIR	Uzun dalga kızılötesi (Longwave infrared)
LYP	Lokalize yüzey plazmonları
MWIR	Orta dalga kızılötesi (midwave infrared)

MYMY	Metal-yalıtkan-metal-yalıtkan
NTIR	Geçirgen olmayan kızılötesi (non-transparent infrared)
PML	Mükemmel uyumlu katman (perfect match layer)
SWIR	Yakın dalga kızılötesi (shortwave infrared)
YGRS	Yüzeyle güçlendirilmiş raman saçılması
YP	Yüzey plazmonları
YPP	Yüzey plazmon polaritonları



1. GİRİŞ

Teçhizatı (muharebe araçlarını) ve/veya personeli kısacası orduyu düşman unsurlarının gözleminden korumak/ görünürlüğü çok az olmasını sağlamak için ordu tarafından kamuflaj teknolojileri kullanılır. Çoğunlukla askerî nitelikli operasyonlarda stratejik yöntem amaçlı kullanılır ve askerî aldatmanın bir çeşitidir [1]. Kamuflaj teknolojileri, kızılötesi işaretleme yöntemi (imza modülasyonu) [2, 3], renk kontrolü [4, 5] ve yansıma bastırma [6, 7] yoluyla görünür spektrum ve kızılötesi spektrumlarda düşük seviyede izlenebilirlik sağlamayı içerir. Kızılötesi kamuflajı özellikle, hedefi bulmak ve/veya sürekli görüntülemek için kullanılan düşman unsuru arama sisteminin sıklıkla kullanılması sebebiyle ilgi çekici olduğu söylenebilir. Kızılötesi kamuflajı oluşturabilmek amacıyla yüzeyden yayılım ve ısı kontrolünün sağlanması iki farklı yöntemdir. Isının kontrol edilmesi, direkt bir yöntem olmasıyla beraber ısı (soğutma/ısıtma) kontrol sistemlerine ihtiyaç duyması nedeniyle uygulanması güçtür. Bu durum ile birlikte, Kızılötesi sinyali verimli bir şekilde engelleyebilmek için düşük emisyonlu bir malzemenin kaplanması yüzey emisyonunun kontrolünü dahada kolaylaştırır. Geleneksel kızılötesi kamuflajı gerçekleştiren malzemeler yerine teknolojik, gelişmişliği yüksek, termal yönetimli, çok bantlı ve kızılötesi uyumlu kamuflaj teknolojisi arzu edilmiştir.

Savunma sanayine yönelik gerçekleştirdiğimiz bu çalışmada yakın kızılötesi, orta kızılötesi ve uzak kızılötesi bölgelerde çeşitli platformların/araçların gözlemlenebilirliğini düşürmek için kızılötesi termal kamuflaj sağlamak amacıyla metamalzemedan oluşan nanoanten tasarlanmıştır.

Seçici dalga boyu özellikli metamalzemeler; atmosferik görünürlük pencerelerini simgeleyen orta dalga kızılötesi (midwave infrared (MWIR): 3.000-5.000 nm) ve uzun dalga kızılötesi (longwave infrared (LWIR): 8.000-12.000 nm) bölgeleri içerisinde düşük bir emisyon sergilemeli, ayrıca termal ışımda ise 1.500-1.610 nm, 2.150-3.000 nm, 4.000-4.200 nm ve 5.000-8.000 nm dahil olmak üzere atmosferik soğurum açıklıklarından geçişi sağlamalıdır. Halihazırda, metal-yalıtkan-metal-yalıtkan (MYMY) nanoanten yapısı kullanarak atmosferik soğurum açıklıklarıyla uyumlu seçici dalga boyu özelliğine sahip metamalzeme tabanlı bir nanoanten yapısı tasarlanmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen yapı, atmosferik soğurum açıklıklarıyla çok iyi bir şekilde uyum yakalayan rezonans dalga boyları sırasıyla 2.504 nm ve 6.420 nm olan iki geniş bant ile kusursuz soğurumlar gerçekleştirmiştir. Tasarımla orta dalga kızılötesi aralıkta atmosferik açıklıkla uyumlu olarak

yayma gücü ortalama 0,15'in altına sınırlanırken, uzun dalga kızılötesi aralıklarda yayma gücü 0,10'un aşağısına sınırlanır. Tamamlayıcı araştırma olarak, havanın empedans değeriyle karşılaştırma yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında aşağıda belirtildiği şekilde 2'nci bölümde literatür taramalarına yer verilmiş, 3'üncü bölümde materyal ve yöntemlerden bahsedilmiş olup, çok bantlı kızılötesi uyumlu kamuflaj, nano yapılarda yüzey plazmonları ve tasarımını gerçekleştirdiğimiz yapının simülasyon ortamına değinilmiştir. Bulgular ve tartışmaların yer aldığı 4'üncü bölümde, özgün olarak tasarımını gerçekleştirdiğimiz yapıda kullanılan materyallere, tekli ve ikili tarama analizlerine ve geometrik yapının optimum değerlerine değinilmiştir. Ayrıca elde edilen mükemmel soğurum ve yayılım sonucu nanoanten yapıya ait spektrumun soğurma özelliklerinin ardındaki fiziksel mekanizmaları ortaya çıkarmak amacıyla elektrik alan ve manyetik alan grafikleri sergilenmiş, nanoantenin etkin empedansı, 3 boyutlu FDTD aracıyla yapılan port analiz simülasyonlarından elde edilen S parametreleri (saçılım parametreleri) kullanılarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte nanoanten yapının termal emisyonu, 300 K'deki kara cisim radyasyonu ile karşılaştırılmış ve son olarak nanoanten yapının çeşitli sıcaklık seviyeleri için ortalama termal soğurum yeteneklerine yer verilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Dalga boyundan küçük yapay nanoyapılar olarak tanımlanan metamalzemeler, doğal malzemelerde bulunamayan ayırt edici elektromanyetik özelliklere sahip üretilmiş bir malzeme sınıfını ifade eder. Bu özelliklere örnek olarak termal ayarlanabilirlik, negatif kırılma indisi, mükemmel soğurum ve görünmez perdeleme verilebilir. Bu nedenle geçmişten beri bu malzemeler ile yapılan farklı çalışmalar mevcut olmakla birlikte yeni çalışmalara ve farklı tekniklere duyulan ihtiyacın da devam etmesi kaçınılmazdır. Bu alanda yapılmış literatür çalışmaları aşağıda belirtildiği şekilde incelenmiştir.

Buhara ve arkadaşlarının yaptıkları plazmon fonon polaritonlarının uyarılması yoluyla şeffaf görünür hBN-ITO nanoanten yayıcısı ile çoklu spektral kızılötesi kamuflaj çalışmasında, kamuflaja uyumlu soğutma için ideal bir platformda, termal yayıcının, ısı oluşumunu termal kameralar tarafından tespit edilmeden yayan spektral olarak seçici bir anten olması gerektiğinden ve ayrıca görsel görünümü korumak ve güneşten kaynaklanan ısınmayı en aza indirmek için yapının gözle görülür şekilde şeffaf olması gerektiğinden yola çıkarak; görsel olarak görünmez orta kızılötesi kamuflaj soğutma özelliğini elde etmek için, ITO-hBN heteroyapısına dayalı bir metayüzey tasarımı önerilmiştir. Önerilen ITO-hBN nanoanteninin, yakın kızılötesi (SWIR) ve geçirgen olmayan (NTIR) pencerelerde spektral olarak seçici geniş bant soğurumları gösterdiği, diğer aralıklarda baskın olarak yayıcı olmadığı, yapının hedeflenen dalga boylarındaki kamuflaj yeteneği güç hesaplamaları kullanılarak ortaya konulmuştur [8].

Pan ve arkadaşlarının yaptıkları çok bantlı orta kızılötesi uyumlu kamuflaj için termal yönetime sahip basit fotonik yapılar çalışması ile, ince film girişimini kullanan termal yönetim ile görsel ve MWIR kamuflajı için iki basit fotonik yapı tasarlamışlardır. Ek lazer kamuflajının, basit dalga boyu ölçekli ızgara yapılarının da dahil edilmesiyle gerçekleştirildiği, tasarlanan yapıların, düşük emisyon ile çift bantlı MIR kamuflajı ($3-5 \mu\text{m}=0,25$ ve $8-14 \mu\text{m}=0,33$), $10,6 \mu\text{m}$ 'de yüksek soğurum ($10,6 \mu\text{m}=0,90$) ile CO_2 lazere radar kamuflajı, yapısal renkler ile görsel kamuflaj ve $5-8 \mu\text{m}$ bantta yüksek emisyon ($5-8 \mu\text{m}=0,77$) ile termal yönetim sergilediği ortaya koyulmuştur [9].

Buhara ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada hem görünür hem de SWIR menzillerinde uyarlanabilir kamuflaj sağlamak için bir metayüzey tasarımı geliştirmiştir. Önerdiği metayüzey, bir metal-yalıtkan-metal (MYM, $\text{Ag-Sb}_2\text{S}_3$ (antimon trisülfür)-Ag) nano kovuk yapısı üzerinde bir indiyum kalay oksit (ITO) ızgarasından yapılmıştır. Amorf

durumda, tasarımın renkli bir aktarıcı pencere olarak çalıştığı, kristal fazda yansıtıcı bir aynaya dönüştüğü, ayrıca kovuk yapısının, 1.150-1.350 nm ve 1.400-1.700 nm’de iki aktarıcı bölgeyi kapsayacak şekilde ayarlanabilir SWIR soğurumu sağlayan ITO nanoanteni için termal olarak ayarlanabilen bir yuva görevi gördüğü belirtilmiştir. Genişletilmiş yüzey plazmonlarının (GYP’ler) uyarılmasının ve güdümlü mod rezonanslarının (GMR’ler) SWIR aralığında ışık soğurumundan sorumlu olduğu bulunmuştur [10].

Buhara ve arkadaşları yaptıkları termal olarak ayarlanabilir dar banttı geniş banda metamalzeme tabanlı nanoanten verici çalışmasında, meta malzeme soğuruculardan ve VO₂ ince filmlerinden oluşan hibrit bir tasarımın, spektral olarak seçici, termal olarak ayarlanabilir nanoanten yayıcıları gerçekleştirme fırsatı sağlayabileceği, yapılan tasarımın spektral yayma/soğurma özelliklerini ayarlayarak orta kızılötesi bölgede düşük gözlemlenebilirlik elde etmek için faz değişim malzeme tabanlı bir meta malzeme nanoanten yayıcı tasarımı önerilmiştir. Çalışmada 25 °C ve 90 °C'deki kara cisim ışınlmaları, önerilen tasarımın kara cisim ışınlmaları üzerindeki emisyon tepkileri ve önerilen tasarımın atmosferik iletim spektrumu dikkate alınarak gerçek emisyonları sunulmuştur. Nanoanten yayıcının sıcak ve soğuk durumlardaki emisyonu, kara cisim radyasyonuna kıyasla tüm bölge için sırasıyla %99,60 ve %97,63 oranında azaldığı ortaya koyulmuştur [11].

Osgouei ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, atmosferik soğurma pencereleriyle tutarlı bir metal-yalıtkan-metal (MIM) konfigürasyonu kullanan, dalga boyu seçiciliğine sahip, polarizasyona duyarlı olmayan meta malzeme bazlı ızgara yapıları bir soğurucu önerilmiştir. Önerilen yapının, atmosferik soğurum pencerelerine mükemmel şekilde uyan 1.524 nm, 2.290 nm ve 6.730 nm rezonans dalga boylarında üçlü dar bantlı mükemmel soğurumlar gerçekleştirdiği ve yapının MWIR ve LWIR aralıklarındaki emisyonu sırasıyla 0,10 ve 0,25’in altına bastırıldığı gösterilmiştir [12].

Zhu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, görünür, orta kızılötesi (3-5 µm), uzak kızılötesi (8-14 µm), lazerler (1,55 ve 10,6 µm) ve mikrodalga (8-12 GHz) bantları için atmosferik olmayan pencerede (5-8 µm) eşzamanlı verimli radyatif soğutmayı ve çok bantlı kamuflajı göstermişlerdir. Çok bantlı kamuflaj cihazı, dalga boyu seçici emisyon için bir ZnS/Ge çoklu katmanından ve mikrodalga emilimi için bir Cu-ITO-Cu meta yüzeyinden oluşturulmuştur. Geleneksel geniş bantlı düşük emittanslı malzeme ile karşılaştırma yapılmış ve bu cihazın IR kamuflaj performansının, 2.500W·m⁻² giriş güç yoğunluğunda, iç/yüzey sıcaklığında 8,4/5,9 °C azalma ve orta/uzun dalga boylu IR bantlarında %53,4/13,0

IR sinyal azalması gösterdiği ortaya koyulmuştur. Ayrıca, atmosferdeki doğal konveksiyonun, atmosferik olmayan penceredeki radyasyonla artırılabilceği, bunun da toplam soğutma gücünü $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ yüzey sıcaklığında $136\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 'den $252\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 'ye çıkardığını ortaya koymuşlardır [13].

Kim ve arkadaşlarının hiyerarşik meta malzemeler kullanarak kızılötesi ve mikrodalgaların çok bantlı kamufajını gerçekleştirmek için yaptıkları çalışmada, hiyerarşik meta malzemelerin birim hücre yapısından kızılötesi dalgaların seçici emisyonu yoluyla mikrodalgaların emilen enerjisini dağıtırken multispektral sinyal kontrolü için hiyerarşik meta malzemeler gösterilmiştir. Bir kızılötesi seçici yayıcının bir mikrodalga seçici soğurucu ile entegre edilmesiyle, 10 cm 'ye kadar büyük boyutlu birim hücre yapılarıyla multispektral sinyal kontrolü gerçekleştirilebileceği, bir kızılötesi seçici yayıcı ile hiyerarşik meta malzemeden $5\text{--}8\text{ }\mu\text{m}$ 'ye doğru emisyon gücünün Au yüzeyinden %1.570 daha yüksek olduğu, bu durumda termal kararsızlığın oluşmasını önlediği ortaya koyulmuştur. Ayrıca, hiyerarşik meta malzeme uygulandığında hedeflenen kızılötesi dalgalarının ($8\text{--}12\text{ }\mu\text{m}$) ve mikrodalgaların ($2,5\text{--}3,8\text{ cm}$) imza seviyelerinin sırasıyla %95 ve %99'a kadar azaldığını tespit edilmiştir [14].

Xiao-li ve arkadaşları yüksek görünür geçirgenliğe sahip kompozit ızgara yapısı ile lazer ve kızılötesi uyumlu gizlilik için yaptıkları çalışmada, iki boyutlu SiC ızgarası ve çok katmanlı film substratından oluşan kompozit bir ızgara yapısı önermişlerdir. Yüzey fonon polaritesi, SiC ızgarası tarafından uyarılarak $10,6\text{ }\mu\text{m}$ 'de bir emme zirvesi elde edilmiştir. Ag ve ZnS, $1,06\text{ }\mu\text{m}$ 'de yüksek soğuruma ve görünür ışık için yüksek geçirgenliğe sahip çok katmanlı yapılar tasarlamak için seçilmiş, yapıların yakın, orta ve uzak kızılötesi bantta yüksek spektral yansımaya sahip olduğu ortaya konulmuş, ayrıca kompozit ızgara optimize edilerek, yüksek görünür geçirgenliğe ulaşırken lazer ve kızılötesi uyumlu gizliliği karşılayabildiği ortaya konulmuştur [15].

Kang ve arkadaşlarının yaptıkları GST plazmonik meta malzemesine dayalı lazer kamufajla uyumlu çok bantlı ayarlanabilir termal kamufaj çalışmasında, ayarlanabilir çok bantlı kamufaj ve radyasyon ısı dağılımını gerçekleştirmek için GST malzemesine dayalı basit bir plazmonik yapı önermişlerdir. Orta kızılötesi (MWIR) ($3\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$) aralığında, önerilen yapının ortalama emisyonunun $0,18\sim 0,76$ olduğu ve GST'nin kristalizasyon fraksiyonu 0'dan 1'e arttıkça ayarlanabilir termal kamufajda uygulanabilir olduğu, $5\text{--}8\text{ }\mu\text{m}$ (güvenli pencere) aralığında önerilen yapının radyasyonla ısı yayılımı sistemin termal stabilitesini garanti edebileceği, ayrıca uzun kızılötesi ($8\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$) aralığında, tasarlanan yayıcı GST'nin

kristalizasyon fraksiyonu 0'dan 1'e deðiştiğinde, 0,13'lük nispeten kararlı ve düşük ortalama emisyonunu koruduğu ortaya koyulmuştur. Ek olarak, plazmonik meta malzemenin yüzey kafes rezonansı nedeniyle, tasarlanan yayıcının 10,6 μm dalga boyunda lazer radar kamuflajı da sunabildiği görülmüş, kamuflaj performansının GST'nin kristalizasyon fraksiyonlarına, polarizasyon açısına ve olay açısına bağımlılığı da analiz edilmiştir [16].

Zhu ve arkadaşlarının yaptığı yüksek sıcaklıkta verimli termal yönetimle kızılötesi kamuflaj çalışmasında verimli termal yönetim ile yüksek sıcaklıkta IR kamuflajını deneysel olarak göstermiş, ısı yalıtımı için bir silika aerogel ile eşzamanlı ışınlı soğutma (5-8 μm atmosferik olmayan pencerede yüksek yayılım) ve IR kamuflajı (8-14 μm atmosferik pencerede düşük emisyon) için bir Ge/ZnS çok katmanlı dalga boyu seçici yayıcının birleştirilmesiyle, bir nesnenin yüzey sıcaklığı 873'ten 410 K'ye düşürülmüştür. IR kamuflajı, 873/623 K'deki bir nesne için 310/248 K iç/dış mekân (toprak ışığı olan/olmayan) radyasyon sıcaklıkları ve toprak ışığı kilitlenme aralığında %78'lik azalma ile gösterilmektedir [17].

Kim ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, kızılötesi gizli teknolojide kullanım için metal-yalıtkan-metal yapıya (MIM) sahip çift bantlı bir metamalzeme mükemmel soğurucu önermişlerdir. MIM yapısı sırasıyla 1,54 μm ve 6,2 μm 'de yüzey plazmon polariton (YPP) ve manyetik polariton (MP) rezonans zirvelerine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Tepe noktasının birinin lazer güdümlü füzeler tarafından kullanılan saçılma sinyallerini bastırdığı, diğerinin atmosferik emilim bandıyla eşleştiği ve böylece havada yayılırken nesnelerden gelen LWIR ve MWIR sinyallerinin bastırılmasını sağladığı gösterilmiştir. Rezonans tepe noktalarının spektral özellikleri, sonlu farklar zaman alanı yöntemi kullanılarak hesaplanan MP tepe noktasının dalga boyunu, bir indüktör-kondansatör devre modeli kullanılarak elde edilen dalga boyuyla karşılaştırarak analiz edilmiştir. Çift bantlı metamalzeme mükemmel soğurucunun performansının yüzeydeki ışığın geliş açısına bağımlılığını değerlendirilmiştir. Önerilen soğurucunun, 1,54 μm IR lazer ışığının saçılmasını %90'dan fazla azaltabildiği ve MWIR ve LWIR imzalarını %92'den fazla bastırabildiği, ayrıca oda sıcaklığından 500 °C'ye kadar geniş bir sıcaklık aralığında MWIR ve LWIR sinyal azaltma oranlarını %90'dan fazla koruyabildiği ortaya koyulmuştur [18].

Lee ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, şeffaf metamalzemeleri görünür kızılötesi kamuflaj yüzeyleri olarak gerçekleştirmişlerdir. Şeffaf metamalzemelerin görünür rejimde ortalama 0,44 geçirgenliğe ulaştığı, aynı zamanda kara cisim kızılötesi imzasını 3-5 μm 'de

%64, 8-14 μm 'de ise %75 azalttığı ve kızılötesi kamuflajı için kullanılan Au yüzeye kıyasla 5-8 μm 'lik tespit edilemeyen bantta %2.200 daha fazla enerji dağıttığı gösterilmiştir. Elde edilen bulguların multispektral manipülasyonu ilerlettiği ve görünür kızılötesi dalgalarında enerji uygulamalarını genişlettiği ortaya koyulmuştur [19].

Wang ve arkadaşları, titiz birleştirilmiş dalga analizi ve genetik algoritmayı birleştirerek, radyatif soğutma ve görünür renklerle uyumlu çok bantlı kızılötesi kamuflaj elde eden, kuvars bir alt tabaka üzerinde termal olarak kararlı 3 malzemeden (SiO_2 , Ge ve TiO_2) oluşan 9 katmanlı bir film yapısı tasarlamışlardır. Spesifik olarak yapının, 3-5 μm ve 8-14 μm 'lik iki atmosferik pencere bandında 0,12 ve 0,21'lik düşük ortalama emisyon sergilediği, atmosferik olmayan 5-8 μm pencere bandında ise radyatif soğutmaya uygun spektral emisyon (ortalama 0,67) gösterdiği ortaya koyulmuştur. Yapının aynı zamanda yaygın olarak uygulanan 1,06 μm ve 10,6 μm lazer dalga boylarında yüksek soğuruculuğa ulaştığı, ek olarak, üst katmanın kalınlığının değiştirilmesiyle yapının, kızılötesi bantlardaki bahsedilen seçici absorpsiyon ve emisyon üzerinde fazla bir etkiye sahip olmaksızın, yeşil, mavi ve sarıyı vb. kapsayan ayarlanabilir görünür renkler sergilediği gösterilmiştir [20].

Xiao ve arkadaşları yaptıkları orta kızılötesi soğurucunun gerilim modülasyonuna dayalı ayarlanabilir ortamla geliştirildiği çalışmada, bir orta kızılötesi Metamalzeme Soğurucu (MIMA) tasarımı önermişlerdir. Tasarımın, sürekli grafen tabakası ile Ti'nin çapraz dairesel yapısının periyot dizisinin ince bir metamateriyal nanoyapısından oluştuğu ve alt tabakanın Al, orta dielektrik tabakanın Si_3N_4 ve SiO_2 'nin bir yığınının oluşturulmuştur. Grafen, metal Ti ve dielektrik katmanların yüzey plazmon rezonansının birleşmesi ve malzemenin içsel emiliminin geniş bant emilimini artırdığı görülmüştür. Tasarımın, 1,33 arka plan kırılma indisinde 3,8~6,5 μm 'de %97, 50'lik bir geliş açısı içinde ise %80 ortalama emilim sağladığı ve polarizasyona duyarlı olduğu, ayrıca grafen yüzeyine bir voltaj uygulayarak grafenin Fermi enerji seviyesini değiştirerek tasarımın soğurum bant genişliğinin dinamik olarak ayarlanabileceği ortaya koyulmuştur [21].

empedansı ile havanın empedansının birbirine eşit olması gerekir. Nanoantenin etkin empedansı, 3 boyutlu FDTD aracıyla yapılan port analiz simülasyonlarından elde edilen S parametreleri (saçılım parametreleri) kullanılarak hesaplanır. Soğurum,

$$A = 1 - I - Y \quad (1)$$

olarak ifade edilebilir, dolayısıyla 'S - parametreleri' kullanılarak yansıma

$$Y = |S_{11}|^2 \quad (2)$$

olarak ve iletim

$$I = |S_{21}|^2 \quad (3)$$

olarak temsil edilebilir. Metal bir alt tabaka kullanmamız nedeniyle iletimin neredeyse olmadığı gözlemlenmekte, dolayısıyla S_{21} sıfır olarak kabul edilmektedir. Sonuç olarak, soğurum

$$A = 1 - Y \quad (4)$$

olarak belirlenebilir, bu da

$$A = 1 - |S_{11}|^2 \quad (5)$$

olarak yazılabilir, böylece Denklem (6) [26] Denklem (7)'ye sadeleştirilebilir. Bu ifadeleri açıklığa kavuşturduktan sonra, Denklem (7) kullanılarak etkin empedansa ulaşmak mümkündür:

$$Z_{et} = \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - (S_{21})^2}{(1-S_{11})^2 - (S_{21})^2}} \quad (6)$$

$$Z_{et} = \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2}{(1-S_{11})^2}} \quad (7)$$

3.2. Nanoyapılarda yüzey plazmonları ve özellikleri

Yüzey plazmonları (YP), metalik nanoyapıların en önemli özelliklerinden biri olarak dikkat çekmektedir. Elektronların birlikte salınımları nedeniyle, metal ile dielektrik malzeme arasındaki arayüzeyde oluşurlar. YP'ler geleneksel dökümü sağlanan metallerin yüzeyinde uyarılabilirler olsalarda nanoyapılar dikkate alındığında özellikle önem kazanırlar [27, 29]. YP'ler nanoyapıların optik özelliklerini (yüzey-hacim oranının yüksek olması nedeniyle) yöneterek, çoklu malzemelerde bulunmayan yeni özellikleri ortaya çıkarabilir. Tasarlanan yapılarda nanoyapıların şekillerine ve geometrilerine göre harekete geçirilen değişik YP türleri vardır. Işığın dalga boyunun nanopartikül boyutlarından çok daha büyük olduğunda, nanopartiküller içindeki fazdaki yük yoğunluğu salınımları YP'leri uyarır. Bu plazmonlar genellikle bölgesel (lokalize) yüzey plazmonu (LYP'ler) olarak bilinirler ve rezonans

frekansı ile ayırt edici özellikleri ortaya konulur [30]. Nanopartikül boyutlarının ışığın dalga boyundan çok daha büyük boyutlara sahip olması durumunda YP'ler, yayılan dalgalar olup belirli bir dağılıma sahiptirler ve bunlar genişletilmiş yüzey plazmonları (GYP'ler) olarak adlandırılırlar [31]. Son olarak, ışığın dalga boyuna yakın boyutlar bahse konu olduğunda (mezoskopik sistemler), YP'ler metal ile dielektrik malzeme arasındaki arayüzeylerdeki hareketsiz dalgalar [27, 29]. Nanoyapı boyutlarının tamsayı katı olan belirli dalga boyları haricindeki, nanoyapıların kenarlarından yansıyan dalgalarla başlangıç dalgalarının girişimi yaklaşık olarak yıkıcıdır. Bu girişim, özellikli dalga boylarında plazmon modları olarak bilinen sabit dalgalar üretir [27, 29].

LYP'ler uzun zamandır sanatçılar tarafından cam eserlerde ve sanat eserlerinde parlak renkler yaratmak için kullanılmaktadır; örneğin, çeşitli boyutlarda veya şekillerde camın metal nanoparçacıklarının dahil edilmesi geniş bir renk yelpazesi yaratmıştır. En ünlü örneklerden biri, MS 4. yüzyıldan kalma, dışarıdan aydınlatıldığında yeşil parlayan ve yansıyan ışıkla gözlenen ve ışık ileten koşullarda içeriden aydınlatıldığında kırmızı renkte parlayan Lycurgus kupasıdır. Diğer örnekler kilise veya katedral pencere camlarında bulunabilir. Ancak LYP'ler ile ilgili ilk bilimsel çalışmalara 1904 yılında Maxwell Garnett'in metal katkılı camlarda gözlenen parlak renkleri Paul Drude'un metaller için teorisini kullanarak açıklamasıyla rastlanır [32]. Gustav Mie daha sonra, 1908'de yayınlanan homojen küresel parçacıklar tarafından ışık saçılması teorisini önerdi [33]. Daha sonra Richard Gans, 1912'de Au nanopartiküller için küresel parçacıklar için genişlemeyi yayınladı ve Mie-Gans teorisi şimdi nanoteknoloji alanında yaygın olarak kullanılıyor [34]. DeVoe ayrıca 1964'te daha karmaşık nanoparçacıklar için ayırık dipol yaklaşımı yöntemini uyguladı [35].

Öte yandan, GYP'ler üzerine kaydedilen en eski araştırmalar, Robert Woods'un metalik ızgaralar üzerindeki optik yansıma ölçümlerinde anormallikler fark ettiği 1902 yılına dayanmaktadır [36]. Ugo Fano daha sonra Woods tarafından keşfedilen anormallikleri araştırdı ve bunların metalik ızgara yüzeyindeki elektromanyetik dalgalarla bağlantılı olduğunu buldu [37]. David Pines, 1956'da metallerde hareket eden hızlı elektronların deneyimlediği enerji kaybının özelliklerini teorik olarak tanımladı ve bunları, plazmonlar olarak bilinen metaldeki serbest elektronların toplu salınımlarına bağladı [38]. Rufus Ritchie, YP'ler fikrini 1957'de ince filmlerdeki elektron enerjisi kayıpları bağlamında önerdi ve metal yüzeylerin yakınında plazmon modlarının var olabileceğini gösterdi. Powell ve Swan deneysel doğrulamayı iki yıl sonra sağladılar [39]. Daha sonra Ritchie, 1968'de Wood'un anormalliklerini fark etti ve bunları ızgarada uyarılan yüzey plazmon rezonansları

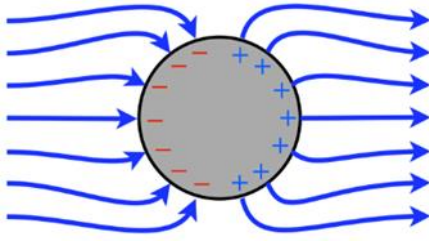
cinsinden açıkladı [40]. Andreas Otto, Enrich Kretschmann ve Heinz Raether, YP'lerin optik uyarılması için yöntemler sundu. 1968'de GYP araştırmalarında önemli gelişmeler sağlayan metal filmler [41-43] aynı zamanda, Uwe Kreibig ve Peter Zacharias, 1970'de metal nanoyapıların YP'lerinde önemli ilerlemeler kaydettiler [44]. Stephen Cunningham, yüzey plazmon polariton (YPP) terimini icat etti ve yüzeyle güçlendirilmiş Raman saçılması (YGRS) ilk olarak Martin Fleischmann [45, 46] tarafından tespit edildi. O zamandan beri, YGRS'nin genişletilmiş kullanımı, metal nanoyapıların optik özelliklerini kontrol etme yeteneği ve YP tabanlı sensörlerin geliştirilmesi, geniş bir uygulama yelpazesine hızlı genişlemeye katkıda bulunmuştur.



Şekil 2. a) yansıyan ve b) geçen ışıktaki MS 4. yüzyıldan kalma Lycurgus kupası [47].

YP'ler ışınım yapmazlar ve yüzeydeki elektron yoğunluğu dalgalanmalarını temsil ederler. Yüzey dalgalarının karakteristiği olan YP'ler, yüzeye yakın yerlerde maksimum yoğunluklara sahiptir. YP'ler sadece rezonans frekansı gösterirler, nanoparçacıklarda elektron salınımları yapamazlar ve bir dağılım ilişkisi göstermezler.

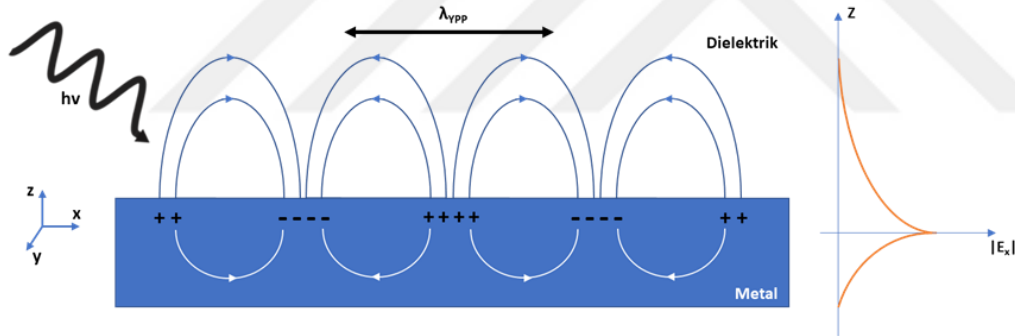
Boyutu, gelen ışığın dalga boyundan önemli ölçüde daha küçük olan metalik nanopartiküller durumunda, elektromanyetik alan, iletim elektronlarına bir kuvvet uygulayarak onların NP yüzeyine doğru hareket etmelerine neden olur. Bu nedenle, bir tarafta negatif yük, diğer tarafta pozitif yük biriktiğinde bir elektrik dipolü oluşur. Bu dipol, nanoparçacık içinde, ışığına zıt bir elektrik alanı yaratır ve bu, denge konumuna geri dönme kuvveti görevi görür. Elektronlar denge konumlarından kaydırıldığında ve ışık alanı kaldırıldığında, rezonans frekansı (plazmonik frekans) olarak bilinen ve çoğu geçiş metali için morötesi görünür spektruma giren bir frekansta salınırlar [27]. İyonik çekirdekler ve nanoparçacık yüzeyi arasındaki saçılma süreci nedeniyle, elektronlar hareketleri sırasında sönmeye maruz kalır ve salınım genliğini azaltır [27, 29]. Bu nedenle metalik nanopartiküller, optik spektrumda YP'lerle ilişkili soğurma bantları sergiler.



Şekil 3. Nanopartiküllerin ışıkla aydınlatıldığında elektrik alan şeması [48].

Nanopartiküller gelen ışıkla aydınlatıldığında, elektrik alanı serbest elektronların yerini alır ve bu da nanopartikülün yüzeyinde bir yük birikmesine neden olur. Bu yük, elektronları denge konumlarına doğru zorlayan ışığinkine zıt bir geri yükleme alanı üretir.

Daha önce bahsedildiği gibi, YP'ler metal ve dielektrik katmanlar arasındaki arayüz boyunca hareket eden salınan serbest elektron dalgalarıdır. Bu p-polarizasyon veya manyetik enine elektromanyetik dalgalar, Şekil 4'te gösterildiği gibi, metal/dielektrik katmanlara dik olarak hareket eden ve her iki ortama katlanarak bozunun dalgalarla birleştirilir. Metal/dielektrik ortamlarda, YP'lerin alan genliği maksimuma ulaşır. YPP'ler, elektromanyetik dalgalara bağlı YP'ler olarak tanımlanır [27].



Şekil 4. Bir dielektrik ve metal ortam arasındaki arayüzde YP'ler uyarılmalarını gösteren şematik diyagram.

Malzeme türünün özellikleri LYP soğurma bantlarının frekansı (yani maksimum soğurma veya renkler), bant genişliği ve yoğunluğudur. Bununla birlikte metalik nanoparçacıkların şekli, dağılımı, boyutu, çevre ortamı ve etkileşim etkilerinin tümü bu soğurma bantlarına karşı çok duyarlıdır [49, 50].

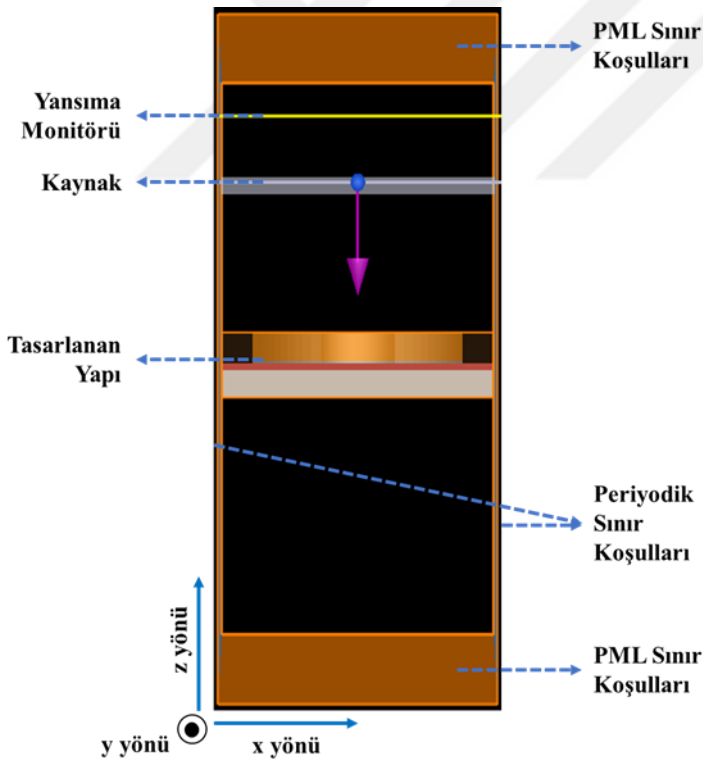
3.3. FDTD Nümerik Analiz Platformu

FDTD yöntemi, elektromanyetik problemlerin çözümünde en sık kullanılan methodlardan birisi olarak kabul edilir [51, 52]. Nümerik bir yöntem olan Yee methodu, temeli elektromanyetik teori olan Maxwell denklemlerinin zamana bağlı diferansiyel modelini

sınırlı bir alan üzerinde çözmek için kullanılır [53]. Bu denklemler hem uzay hem de zaman da merkezi sonlu fark yaklaşımı kullanılarak ayrıklaştırılır.

Yaptığımız çalışmada kullandığımız Ansys Lumerical FDTD 3D Electromagnetic Simulator yazılımı, çok katmanlı ve periyodik yapıların hızlı ve hassas analizi ile optimizasyonu güçlendirerek çeşitli uygulamalarda fotonik tasarımlar için güçlü 3 boyutlu çözümler sunar. Ayrıca diğer kodlama dilleri ile (Python, Matlab)'de iletişim halinde olunmasını sağlayan mimari çözümler sunmaktadır.

Programın simülasyon ekranı temel olarak Şekil 5'te gösterilmiştir. Genel itibariyle simülasyon ortamı; FDTD alanını (Genel olarak, tasarlanan birim hücrenin alanı, periyodik sınır koşulları kullanılarak sonsuza eş değer tekrarlanabilir olarak ayarlanır. Ayrıca tasarlanan alanın alt ve üst kısmı da gerçek ortamı canlandırması amacıyla mükemmel uyumlu katman (Perfect Match Layer (PML)) olarak ayarlanır.), tekdüze düzlem dalga aydınlatmalı bir kaynağı, tasarlanan yapıyı ve elektrik alan, manyetik alan, güç ve benzeri değerleri alabilmemizi sağlayan monitörleri içerir.



Şekil 5. Ansys Lumerical FDTD 3D elektromanyetik simülasyon alanı

Şekil 5, yapmış olduğumuz tasarımın 3 boyutlu simülasyon ortamını göstermektedir. Tasarımda materyalleri farklı iki adet dikdörtgen yapı ile iki adet halka (o-ring) yapı kullanılmıştır. En üstte yansıyan ışımayı kayıt altına almak için frekans alanı profil monitörüne yer verilmiştir. Yapıyı geniş olarak aydınlatmak için, tasarlanan yapı ile belli bir

mesafede (yaklaşık 1.000 nm) bir adet -z yönlü dalga kaynağı yerleştirilmiştir. Kaynağın dalga boyu aralığı 800-12.000 nm olarak ayarlanmıştır. Gerçekte uygulama yapılacak yüzeyi temsil etmesi amacıyla x ve y yönündeki sınırlar periyodik olarak, z yönündeki sınırlar PML olarak ayarlanmıştır. FDTD metodunun doğruluğunu ve verimliliğini artırmak için ‘mesh’ özelliğinin kullanılması önemlidir. Bununla birlikte mesh özelliği hesaplamayı çok arttırır ve mevcut bilgisayar kaynaklarının fazlasına ihtiyaç duyulmasına neden olur. Yapmış olduğumuz tasarımda mesh adımı x ve y yönünde 24 nm, z yönünde ise 8 nm olarak alınmıştır. Yazılım, tüm FDTD parametrelerinin hassas bir şekilde optimizasyonunu sağlamakta ve başarılı bir şekilde gerçek ortam koşullarına yakınsama yapmaktadır.

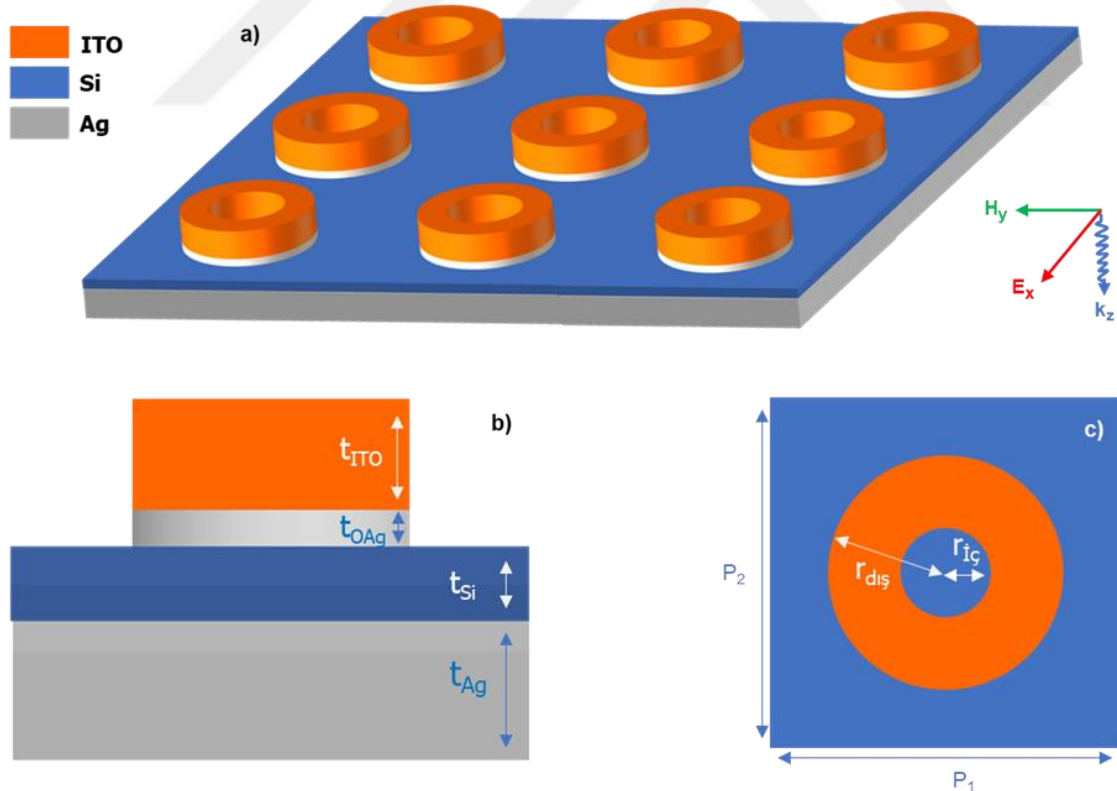


4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Tasarlanan Yapı

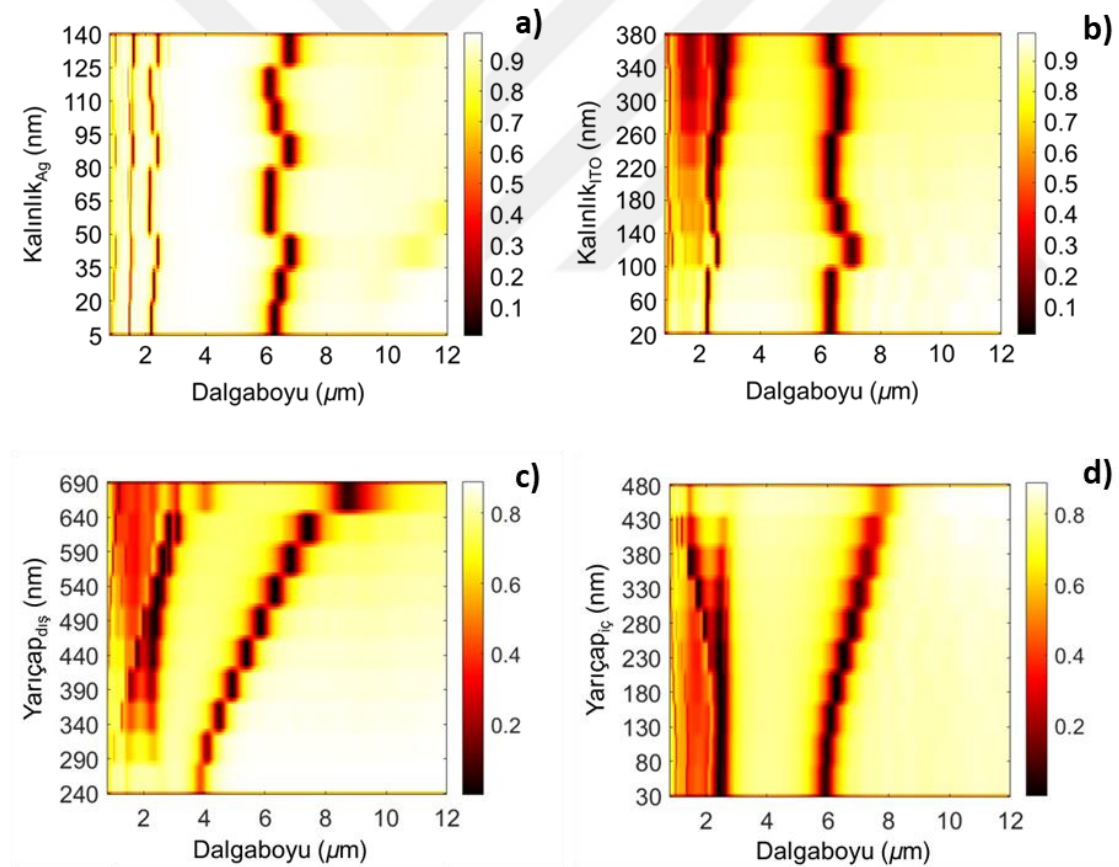
Metamalzemeler, doğada bulunmayan olağanüstü elektromanyetik özellikler sergileyen mühendislik yapılarıdır [54, 55]. Görünmez gizleme [56], asimetrik ışık iletimi [57], kalıcı [58] ve negatif kırılma [59] gibi çeşitli ilgi çekici fenomenleri elde etmek için kullanılabilirler. Işık soğurma, bu yapay yapıların bir başka olağanüstü potansiyel yeteneğidir [60]. Metamalzeme yapılarında kullanılan geometriye ve malzeme tipine bağlı olarak soğurma tepkileri dar bant veya geniş bant olarak kategorize edilebilir. Metamalzemelerin etkili empedansını çevreleyen ortamla eşleştirerek yansıma bastırılabilir. Aynı zamanda, ayna görevi gören optik olarak kalın bir metal tabaka kullanılarak iletim de ortadan kaldırılabilir [61, 62].

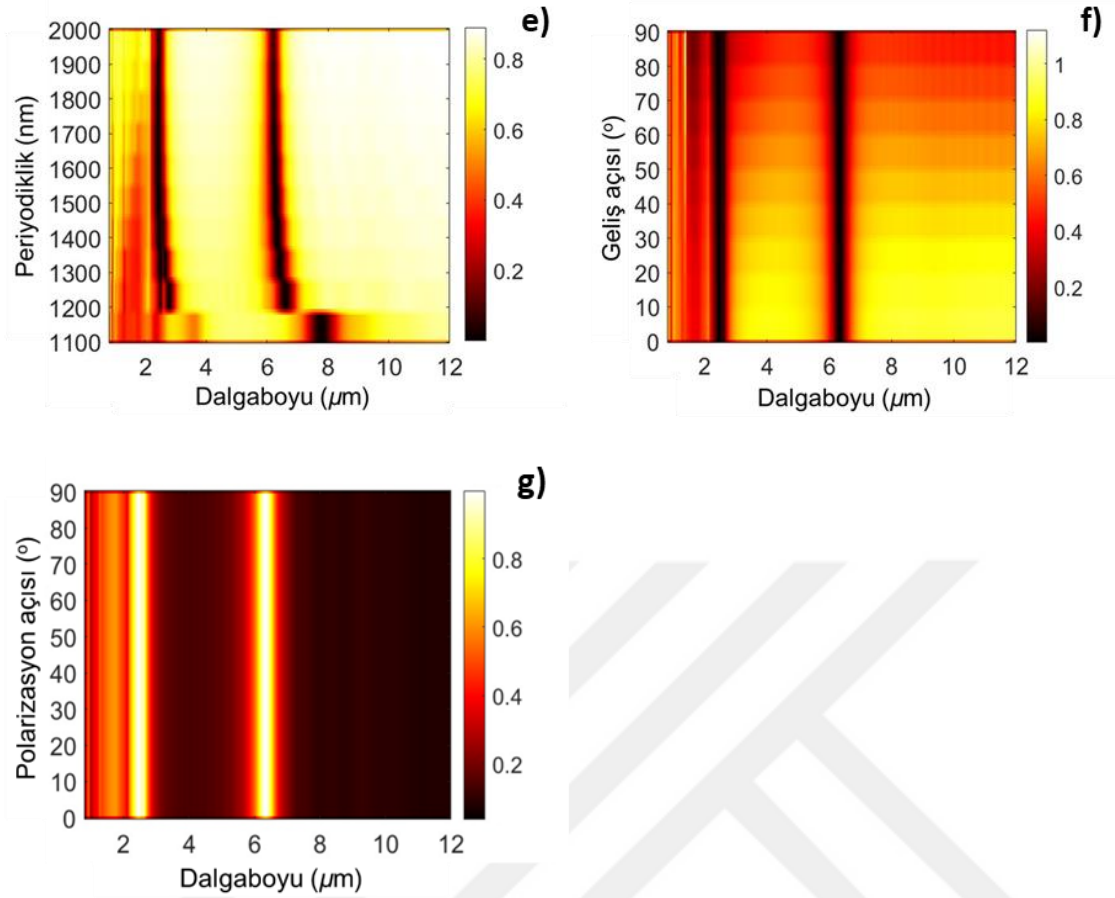
Atmosferik soğurum açıklıklarıyla eşleşen bir MYMY yapısı kullanarak tasarımı gerçekleştirilen seçici dalga boyu özelliği olan metamalzeme tabanlı nanoanten yapının şematik gösterimi Şekil 6 a)-c)'de gösterilmektedir.



Şekil 6. Sunulan nanoantenin şematik tasarımı. a) Nanoanten dizisinin 3 boyutlu görünümü. b) Sunulan nanoanten birim hücrenin yan görünümü. c) Sunulan nanoanten birim hücrenin üstten görünümü

Etkili termal kamuflaj tekniklerinin geliştirilmesi amacıyla yaptığımız çalışmada yapının dizi hali Şekil 6 a)'da, yapının tek birim hücresinin yandan görünümü Şekil 6 b)'de ve yapının üstten görünümü ise Şekil 6 c)'de gösterilmiştir. Bu yapı, " t_{Ag} " yüksekliğinde bir gümüş (Ag) alt tabakasına ve " t_{Si} " yüksekliğinde malzemesi silikon (Si) olan dielektrik katman üzerine oluşturulmuştur. Son olarak yapının, halka şekilli gümüş (Ag) kısmı " t_{OAg} ", İndiyum Kalay Oksitli (ITO) kısmı ise " t_{ITO} " kalınlığında ve hem Ag hem de ITO halka yapılarının iç yarı çapı " $r_{iç}$ " ve dış yarı çapı " $r_{dış}$ " olarak ifade edilmiştir. Yapı x ve y eksenine paralel konumlandırılmış olup periyodiklik değerleri " P_1 ve P_2 " ile gösterilmiştir. Optimum değerleri elde etmek için, öncelikle halka yapı kalınlığı (burada Ag halka yapısının kalınlığı analiz edilmiş ve üzerine ITO halka yapısı eklenmiştir), iç yarıçap ile dış yarıçap uzunlukları ve yapı periyodikliği için tek parametrelili tarama analizi, soğurumun bir fonksiyonu olarak Şekil 7 (a-g)'de gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir.





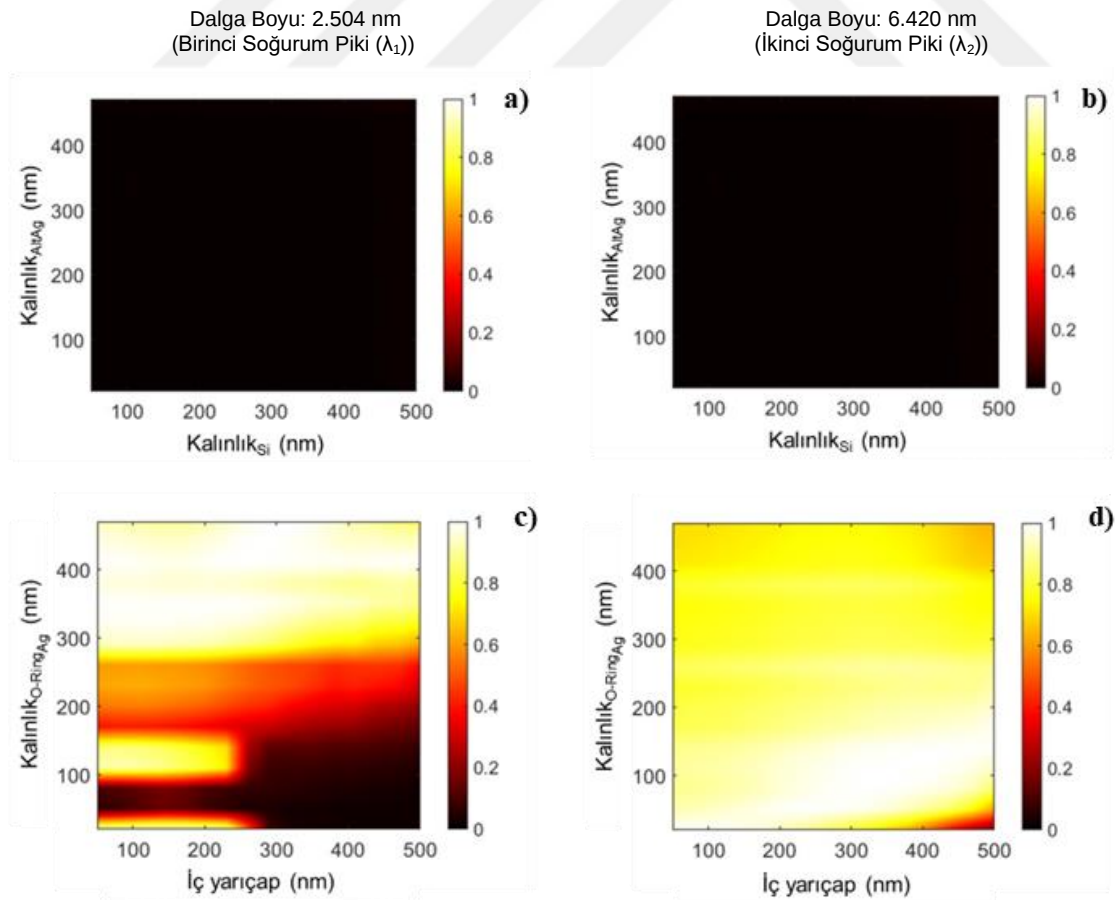
Şekil 7. (a-g) Çeşitli halka yapı kalınlığı, dalga boyu, ışığın geliş açısı, polarizasyon ve halka yapının iç ve dış yarı çap uzunluğuna göre yapısal davranış için hesaplanan nanoantenin tek parametrelili tarama analizi grafikleri.

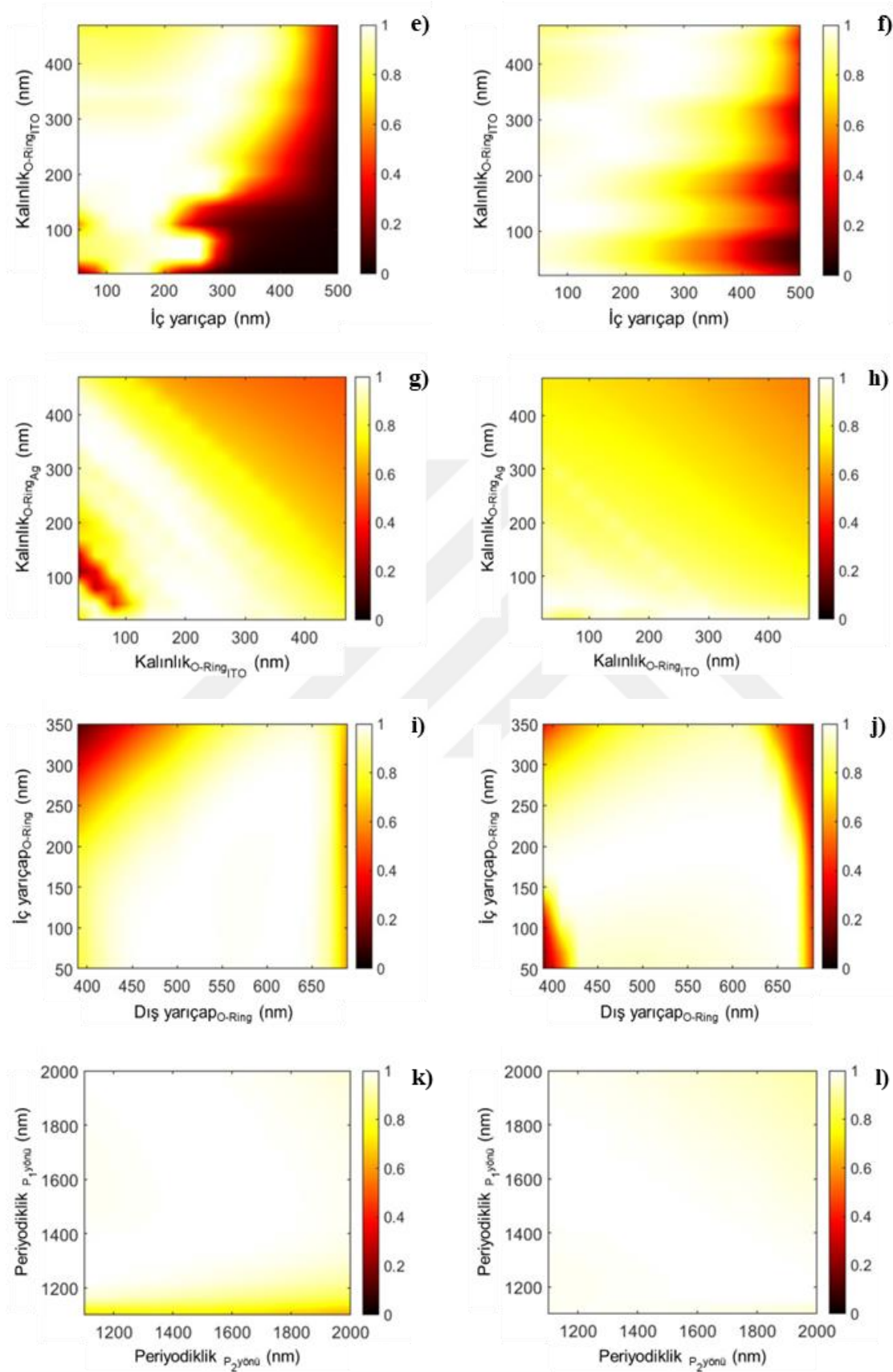
Şekil 7 a)'dan görülebileceği gibi, Ag halka yapısının kalınlık değeri, SWIR geniş bant rezonans zirvesinde (λ_1) genel olarak değişime sebebiyet vermemekte olup, geniş bant NTIR rezonans zirvesi için (λ_2) etki göstererek bölgesel yüksek dalga boylarına kaymaya neden olur. Şekil 7 b)'de ITO halka yapısının kalınlık değeri, λ_1 rezonans zirvesinde az da olsa yüksek dalga boylarına kayma yönünde değişime sebebiyet vermekte olup λ_2 rezonans zirvesinde ise bölgesel olarak yüksek dalga boylarına kaymaya neden olur. Şekil 7 c)'de dış yarı çap uzunluğunun, λ_1 rezonans zirvesinde düşüğe olsa yüksek dalga boylarına doğru kaymaya sebebiyet verdiği ancak λ_2 rezonans zirvesi için doğrudan etkileyerek daha yüksek dalga boylarına kayda değer kaymaya neden olduğu görülmektedir. Şekil 7 d)'de iç yarı çap uzunluğunun, λ_1 rezonans zirvesinde kısa dalga boylarına doğru kaymaya neden olduğu bununla birlikte λ_2 rezonans zirvesi için doğrudan etkileyerek daha yüksek dalga boylarına kayda değer kaymaya neden olduğu görülmektedir. Burada ITO ve Ag için halka yapının iç ve dış yarıçapları birlikte hareket ettirilmiştir. Bu arada periyodiklik, λ_1 ve λ_2 rezonans tepe noktalarında 1.100 nm'den 1.400 nm'ye kadar kısa dalga boylarına yönelime sebep olurken,

1.400 nm'den 2.000 nm'ye kadar λ_1 ve λ_2 rezonans zirvelerinin konumunu doğrudan etkilemez (Şekil 7 e)). Ayrıca ışığın geliş açısının ve önerilen yapının düzlem içi simetrik bir tasarıma sahip olmasından dolayı polarizasyon açısının mevcut dalga boylarında kaymalara sebebiyet vermediği de Şekil 7 f) ve g)'den anlaşılmaktadır.

Tek parametrelili analizden sonra, sırasıyla λ_1 ve λ_2 olan ilgili dalga boyu rezonans tepe noktaları için FDTD programı kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlarda uygulanabilir parametreleri elde etmek için ikili geometrik parametre optimizasyon simülasyonları yapılmıştır. Şekil 8 (a-l), yapının ikili tarama parametrelerine ait kontur çizimlerini temsil etmektedir.

Bu kapsamda ilk adımda metal-yalıtkan (Ag-Si) tabakanın kalınlıklarının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Devamında nanoanten yapıda yer alan metal malzemenin (Ag) kalınlığı ile iç yarı çapı optimize edildikten sonra yalıtkan malzeme (ITO) metal yapının üzerine eklenerek kalınlık ile iç yarı çap optimize edilmiştir. Burada yalıtkan katmanın iç yarı çapının optimizasyonu esnasında metal katmanın iç yarı çapı da beraber hareket ettirilmiştir. İç yarı çapın belirlenmesi ile son olarak nanoanten yapıda yer alan malzemelerin kalınlıkları optimize edilmiştir.





Şekil 8. (a-l) Sırasıyla 2.504 nm ve 6.390 nm dalga boyları için optimizasyon grafikleri

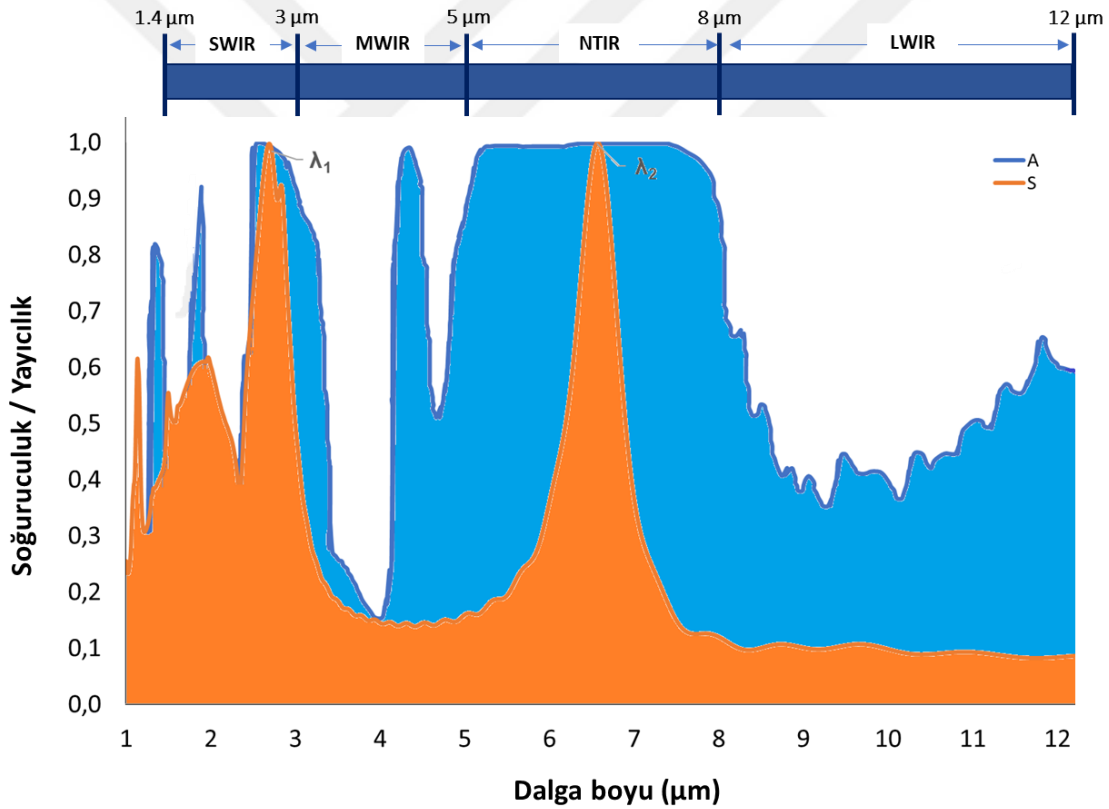
Nanoantende halka yapının kullanılmadan sadece alt tabaka olarak kullanılan malzemelerin

kalınlıklarının soğuruma etkisinin olmadığı Şekil 8 (a-b)'de görülmektedir. Şekil 8 (c-d)'de alt tabaka üzerine yerleştirilen halka şekilli Ag yapısının kalınlık ve iç yarıçap değişimlerinin λ_1 rezonans piki için optimizasyonu zorlaştırıcı değişimler sergilediği, λ_2 için soğurum değerinin kısmen aynı kaldığı gözlemlenmektedir. Yapı, şekil 8 (e-f)'de ve (g-h)'de her iki rezonans pikleri için yaklaşık olarak aynı karakteri sergilemektedir. Şekil 8 (i-l) rezonans pikleri için nanoanten yapı, geniş bir iç-dış yarıçap ve periyodiklik değerleri aralığı için birbirine yakın soğurma gösterir. Bu da esnek bir tasarım sunan diğer bir ayrıcalıktır. Öte yandan, yüksek soğurma genliklerine rağmen, bazı durumlarda rezonans tepe noktalarının istenilen kızılötesi pencerelerin dışına kaydığı da gözlemlenmektedir.

Böylece, parametrelerin atmosferik soğurum dalga boylarıyla ve birbirleriyle uyumu incelenmiş olup uygun konfigürasyon için yapılan ve Şekil 8 (a-l)'de sonuçlarına yer verilen simülasyonlar ile birbirinden farklı kalınlıklar ve malzemelerden oluşan tabakanın soğurum miktarındaki etkisi göz önünde bulundurularak iletimi engellemek için alt tabaka olarak $t_{Ag}=250$ nm kalınlığına sahip (optik iletim olmayacak kadar kalın) gümüş (Ag kırılma indisi-CRC) kullanılmıştır. Halka şekilli geometrik yapı ile alt tabaka arasında seçici emisyonları havanın empedansına uygunlaştırmak için yalıtkan (dielektrik ayırıcı) malzeme olarak ise $t_{Si}=60$ nm kalınlığına sahip Silikon (Si kırılma indisi-Shkondin) kullanılmıştır. Beraberinde geometrik yapı olarak halka (o-ring) kullanılmıştır. Nanoanten yapının alt kısmında $t_{OAg}=20$ nm kalınlığına sahip gümüş (Ag kırılma indisi-Johnson ve Christy modeli), üst kısmında ise $t_{ITO}=275$ nm kalınlığında indium kalay oksit (ITO) (kırılma indisi-[48]) malzemesi kullanılmıştır. Nanoanten yapının dış yarıçapı $r_{dış}=540$ nm, iç yarıçapı ise $r_{iç}=190$ nm olarak optimizasyonu sağlanmıştır. Mevcut yapıdaki görünür tepkinin bozulmadan rezonans modlarının uyarılması ile soğurum üst noktalarının yükseltilmesi için ITO malzemesi kullanılmıştır. Çalışmaları yürütülen simülasyonlar boyunca, periyodik biçimde polarize elektrik alanlı geniş bir düzlemsel dalganın yayılma yönü birim hücrenin uyarılması için, xy düzlemine dik olacak biçimde -z yönünde belirlenmiştir. Yansıyan ışınlar, çok katmanlı yapıdaki ışık kaynağının üstünde yer alan frekans alan monitörü tarafından kaydedilmiştir. Birim hücrenin sınır koşulları; istenmeyen yansımaların önlenmesi amacıyla z eksenı boyunca mükemmel uyumlu katman (PML) x ve y yönünde ise periyodik (tekrarlanabilir) olarak ayarlanmıştır. Yapının optik özellikleri, $P_1=P_2=P=1,400$ nm olarak belirlenerek araştırmalar yapılmıştır. Tasarımı yapılan yapının kızılötesi bölgedeki sergileyeceği davranışın görülebilmesi için spektral bölge (kaynak) olarak 800 nm-12.000 nm'lik dalga boyu aralığı seçilmiştir.

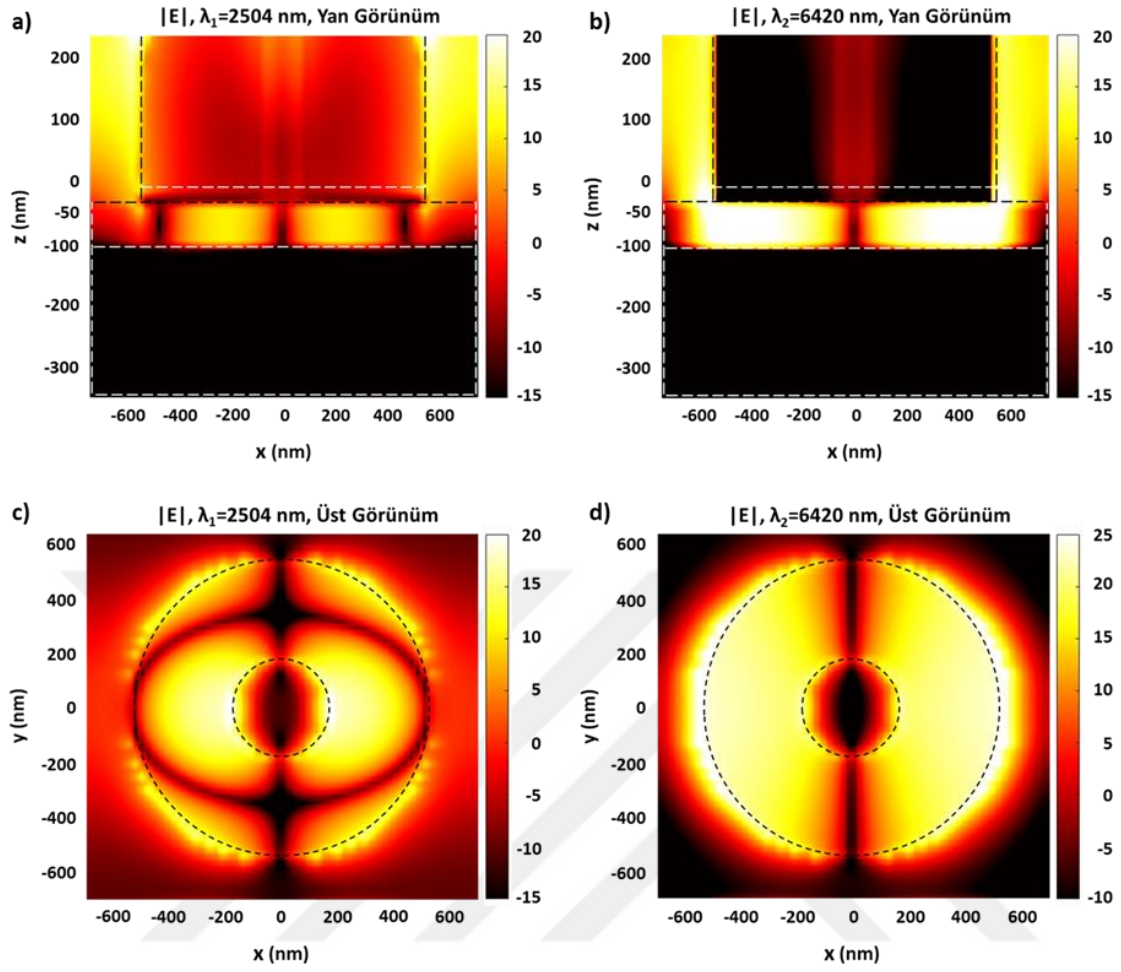
4.2. Analiz Sonuçları

İncelenen dalga boyu aralığındaki farklı kızılötesi bölgeleri ve önceki bölümde bahsedilen tüm optimizasyonlardan sonra nanoanten yapının temsil edilen soğurma davranışı Şekil 9’da gösterildiği gibi elde edilmiştir. Burada, atmosferik soğurum pencerelerinde (3-5 μm ’de yaklaşık %85 ve 8-12 μm ’de %90) düşük yayılım gösterirken atmosferik soğurum bölgeleriyle hem $\lambda_1 = 2.504 \text{ nm}$ hem de $\lambda_2 = 6.420 \text{ nm}$ rezonansları çok iyi bir uyum içindedir. Nanoanten yapının, rezonans tepe noktasının λ_1 olan bölgede soğurum değerinin %98’in üzerinde olduğu geniş bantlı ideale çok yakın bir soğurum sergilemekte olup, λ_2 olan bölgede ise soğurum değerinin %99 olduğu geniş bantlı mükemmel soğurum göstermektedir. Bu sonuçlar sadece nanoanten yapının çoklu atmosferik soğurum durumlarına işaret etmekle kalmamakta, aynı zamanda iyi bir soğutma karakterini de sergilemiş olmaktadır.

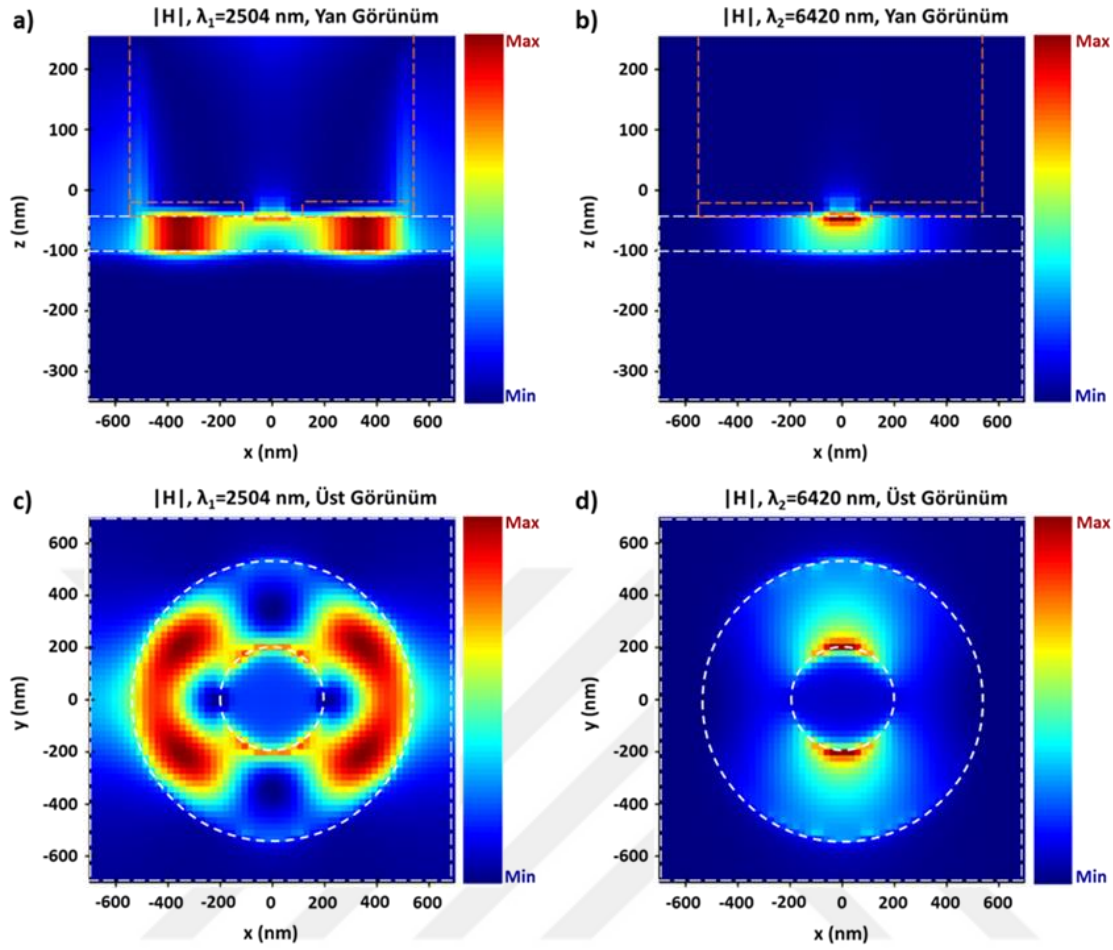


Şekil 9. Simüle edilmiş soğurum spektrumları. (A: Atmosferik (geçirmez / aktarıcı) açıklık, S: Simülasyon sonucu ortaya konan metamalzeme anteni)

Ayrıca tasarlanan nanoanten yapıya ait spektrumun soğurma özelliklerinin ardındaki fiziksel mekanizmaları ortaya çıkarmak amacıyla, Şekil 10 ve Şekil 11’de geniş bant rezonans soğurum dalga boylarında ($\lambda_1 = 2.504 \text{ nm}$ ve $\lambda_2 = 6.420 \text{ nm}$) elektrik alan (E) ve manyetik alan (H) profillerinin üstten görünüşü ile yandan görünüşü gösterilmektedir.



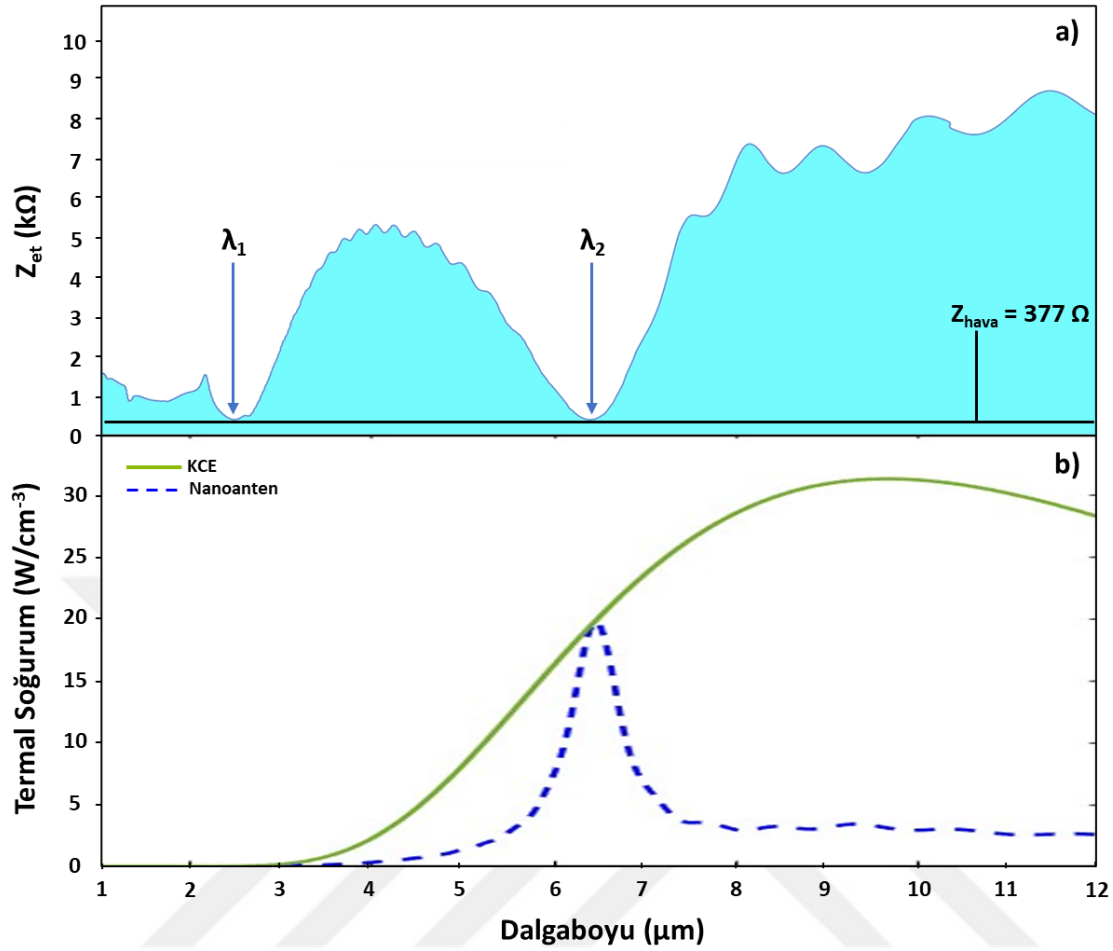
Şekil 10. Sırasıyla λ_1 ve λ_2 için Elektrik alan dağılım grafiği. a) ve b) Nanoantenin yandan görünümü. c) ve d) Nanoantenin üstten görünümü. Kesikli çizgiler, ITO, Ag ve Si katmanlarının konumunu vurgulamaktadır.



Şekil 11. Sırasıyla λ_1 ve λ_2 için manyetik alan dağılım grafiği. a) ve b) Nanoantenin yandan görünümü. c) ve d) Nanoantenin üstten görünümü.

E'nin λ_1 'de yandan ve üstten görünüm modu profilleri ile, elektrik alanının çoğunlukla halka yapının iç ve dış kenarlarına odaklanan önemli bir elektrik alanı artışının olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, YPP'lerin varlığını gösterir [19, 63]. Aynı zamanda ışığın çoğunlukla halka yapı ile alt yansıtıcı yüzey arasında yer alan Si tabakasında lokalize olduğu görülmüştür. Bu gözlem, Fabry-Perot modunun her iki dalga boyunda da meydana geldiğini ve soğurumu mükemmelleştirmeyi sağladığını ifade etmektedir [65]. Bununla birlikte, renk cetvelinde temsil edilen yoğunluk değerleri, halka yapı ve tüm yapı boyunca değişen alan yoğunluklarını gösterir. Bu alan dağılım analizi, yalnızca belirli bölgelerdeki alanların büyüklüğünü vurgulamakla kalmaz, aynı zamanda dielektrik katmanın içinde meydana gelen farklı optik olaylara ilişkin bilgiler de sağlar [65].

Nanoantenin etkin empedansı, 3 boyutlu FDTD aracıyla yapılan port analiz simülasyonlarından elde edilen S parametreleri (saçılım parametreleri) kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 12. a) Dalga boyuna göre hesaplanan Etkin Empedans değerleri. b) Nanoanten yapının termal emisyonu ile kara cisim radyasyonunun oda sıcaklığında karşılaştırılması.

Şekil 12 a), incelenen 1-12 μm dalga boyu bölgesi için nanoantenin etkili empedansını göstermektedir. Gözlemlenen rezonans dalga boylarının etkin empedansları, çevredeki havanın etkin empedansı ile neredeyse tamamen eşleşir. Bu durum, mevcut dalga boylarında neredeyse hiç yansıma olmadığı ve nanoanten de hiçbir iletim göstermediği için temsil edilen dalga boylarında önemli bir soğurum görmenin mümkün olduğu anlamına gelir.

$$\varepsilon_{et}(T, \lambda) = \sum_{j=1}^3 \varepsilon_j(T, \lambda) \quad (8)$$

$$\varepsilon_1(T, \lambda) = 1 - R(T, \lambda) - T(T, \lambda) \quad (9)$$

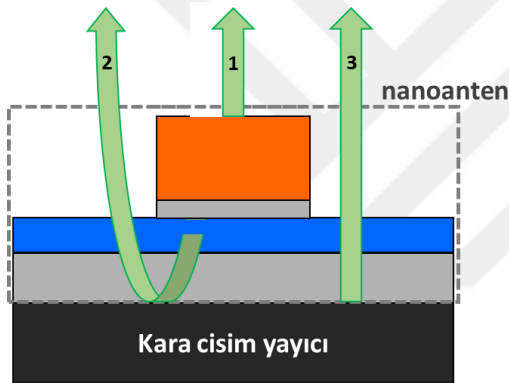
$$\varepsilon_2(T, \lambda) = (1 - \varepsilon_{karacisim}) T_{geri}(T, \lambda) \varepsilon_1(T, \lambda) \quad (10)$$

$$\varepsilon_3(T, \lambda) = T(T, \lambda) \varepsilon_{karacisim} \quad (11)$$

$$KCE(T, \lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (12)$$

$$TE(T, \lambda) = \varepsilon_{et}(T, \lambda) \times KCE(T, \lambda) \quad (13)$$

Şekil 12 b), nanoanten yapının termal emisyonunun ve 300 K'deki kara cisim radyasyonunun teorik hesaplamasını göstermektedir. Nanoanten yapı ve kara cisim yayıcının (KCE) termal emisyonu Denklem (8-13) kullanılarak hesaplanır; burada “T” sıcaklık, “λ” dalga boyu ve “ε” emisyonudur [8]. Bu yaklaşımla KCE'nin ve nanoanten yapı içeren bir uygulamanın termal emisyonu hesaplanabilir. Şekil 13'te şematize edildiği gibi potansiyel uygulamanın toplam termal emisyonunu elde etmek için üç emisyon hesaplanmalıdır.



Şekil 13. Bir kara cismin üstündeki tasarımdan termal emisyon yollarının şematik gösterimi.

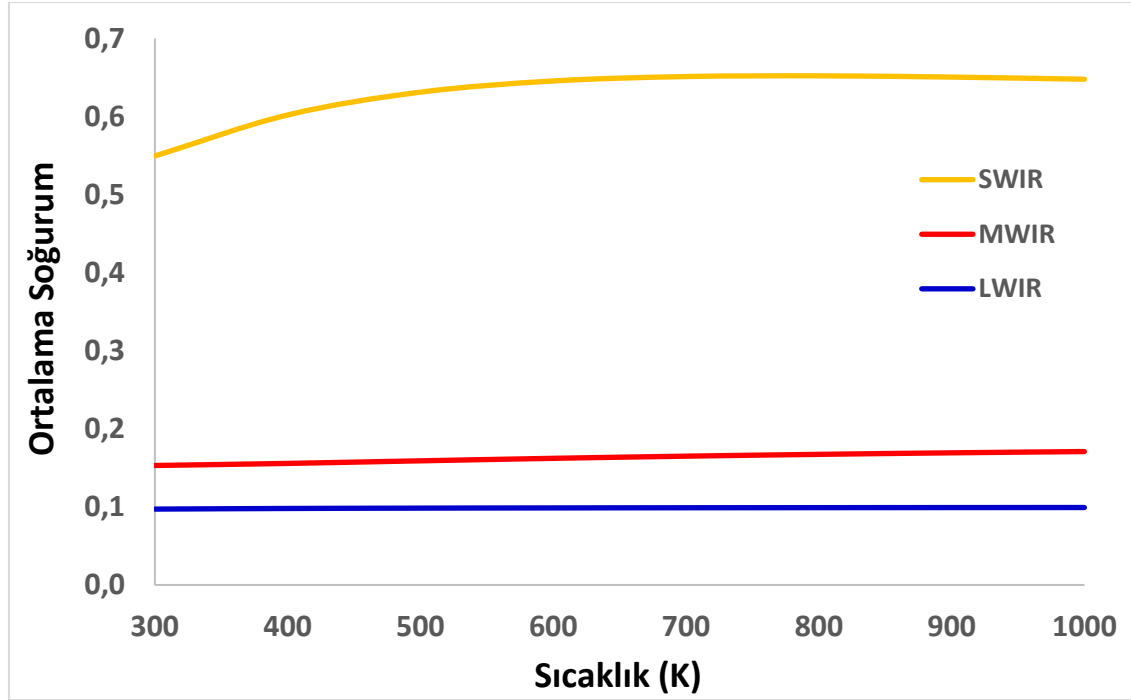
Bunlardan ilki Denklem (9)'da hesaplanan nanoanten yapının emisyonudur. İkincisi, Denklem (10)'da hesaplanan, nanoanten yapıya iletilen, KCE'den yansıyan ve yüzeye geri iletilen emisyonudur. Son olarak üçüncü emisyon Denklem (11)'de hesaplanan, kara cisimde oluşan ve nanoanten yapı üzerinden iletilen kara cisim emisyonudur. Bu üç emisyonun toplamı (Denklem 9-11), etkin emisyonu (Denklem 8) verir. Kara cisim emisyonu Denklem (12) kullanılarak hesaplanıp Denklem (8) ile çarpıldıktan sonra Denklem (13)'de gösterilen uygulamanın toplam termal emisyonunu hesaplamak mümkündür. Bu hesaplamalar sonucunda, Şekil 12 b)'den görülebileceği gibi, nanoanten yapının MWIR (3-5 µm) ve LWIR'de (8-12 µm) önemli bir azalmaya sahip olduğu, burada hesaplanan termal emisyonun KCE'nin termal emisyonunun altında kaldığı görülmektedir. Ayrıca NTIR'daki termal emisyon miktarından (5-8 µm) görülebilen güçlü bir soğutma özelliğine sahiptir.

Son olarak, nanoanten yapının çeşitli sıcaklık seviyeleri için termal iz azaltma yetenekleri, Denklem (14) kullanılarak gösterilen bir dalga boyu aralığı arasındaki ortalama termal

soğurum hesaplanarak araştırılmıştır [19].

$$\varepsilon[\lambda_1, \lambda_2]_{avg} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda) I_{BB}(\lambda, T) d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{BB}(\lambda, T) d\lambda \quad (14)$$

$I_{BB}(\lambda, T) = 2hc^2/\lambda^5 \cdot [\exp(hc/\lambda k_B T) - 1]^{-1}$, Planck yasasına göre λ dalga boyunda ve T sıcaklığında bir kara cismin yayılan enerjisidir.



Şekil 14. Nanoanten yapının SWIR, MWIR ve LWIR için ortalama termal soğurum analizi.

SWIR, MWIR ve LWIR bölgelerinde nanoanten yapının ortalama termal soğurum değerleri Şekil 14'te gösterilmektedir. Sıcaklık değerleri 300 K'den başlayıp 1.000 K'ye kadar çıkarılmıştır. SWIR (1,4-3 μ m) bölgesinde sıcaklık 300 K'den 900 K'ye kadar arttığı durumda ortalama soğurum değerleri 0,55'ten 0,65'e artış göstermiş ve 1.000 K'de hafif bir düşüşle 0,64'e gerilemiş olup yaklaşık değer 0,62 olarak ortaya çıkmıştır. Sıcaklık arttıkça, MWIR (3-5 μ m) bölgesinde ortalama soğurum değerleri sırasıyla 0,15'ten 0,17'ye çok düşük bir artış gösterirken yaklaşık değer 0,16 olarak belirlenmiş, LWIR (8-12 μ m) bölgesinde ise ortalama soğurum değeri her zaman 0,09 değerinde sabit kalmıştır. Bu durum artan sıcaklığa rağmen nanoanten yapının, SWIR bölgesinde sıcaklık dağılımının iyi seviyelerde olduğunu, hem MWIR hem de LWIR bölgelerinde ise ortalama soğurum değerlerinin çok uygun olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç olarak, termal kamuflaj uygulamaları için optimize edilmiş, kendine özgü seçici dalga boyu özelliğine sahip metamalzeme tabanlı atmosferik soğurum açıklıklarıyla eşleşen düzlemsel metal-yalıtkan (Ag-Si) yüzey üzerine halka metal-yalıtkan (Ag-ITO) şeklinde sıralanmış katmanlardan oluşan bir MYMY yapılı soğurucu önerdik. Spectral özellikler FDTD yazılımı kullanılarak elde edilmiş, numerik simülasyon teknikleri kullanılarak yapının optik performansı optimize edilmiştir. Tavsiye edilen nanoanten yapı, ışığın geliş açısına ve önerilen yapının düzlem içi simetrik bir tasarıma sahip olmasından dolayı polarizasyon açısına duyarsızdır. Tasarımla MWIR'da yaklaşık %85 oranında ve LWIR'da ise yaklaşık %90 oranında atmosferik soğurum penceresiyle uyumlu olarak düşük yayılım göstermektedir. Atmosferik soğurum bölgeleriyle rezonans dalga boyları sırasıyla $\lambda_1=2.504$ nm ve $\lambda_2=6.420$ nm olan tepe noktaları çok iyi bir uyum içerisindedir. Nanoanten yapı, rezonans tepe noktası λ_1 olan bölgede soğurum değeri %98'in üzerinde olan geniş bantlı ideale çok yakın bir soğurum sergilemekte olup, λ_2 olan bölgede ise soğurum değeri %99 olan geniş bantlı mükemmel soğurum göstermektedir.

Tasarımı gerçekleştirilen nanoanten yapıya ait spektrumun soğurma özelliklerinin ardındaki fiziksel mekanizmaları ortaya çıkarmak amacıyla λ_1 ve λ_2 dalga boyları için elektrik alan ve manyetik alan profilleri incelenmiştir. λ_1 'de çoğunlukla halka yapının iç ve dış kenarlarına odaklanan önemli bir elektrik alanı artışı ile YPP'lerin varlığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda ışığın çoğunlukla halka yapı ile alt yansıtıcı yüzey arasında yer alan Si tabakasında lokalize olması ile Fabry-Perot modunun her iki dalga boyunda da meydana geldiği ve soğurumu mükemmelleştirmeyi sağladığı gözlemlenmiştir.

Bunula birlikte yansımanın minimum düzeyde olabilmesi için, nanoanten yapının empedansı ile havanın empedansının birbirine eşit olması gerektiğinden nanoantenin etkin empedansı ile havanın etkin empedansının uyumluluğunun analizi yapılarak birbiriyle neredeyse tamamen eşleştiği ortaya koyulmuştur.

Son olarak, nanoanten yapının çeşitli sıcaklık seviyeleri için termal iz azaltma yetenekleri, ortalama termal emisyon hesaplanarak araştırılmıştır. Sıcaklık değeri 300 K'den başlayıp 1.000 K'ye kadar çıkarılmış olup, SWIR bölgesinde ortalama soğurum değerinin yaklaşık 0,62 ile iyi seviyelerde olduğu ortaya koyulmuştur. Ayrıca hem MWIR hem de LWIR bölgelerinde sırasıyla yaklaşık 0,16 ve 0,09 ile ortalama soğurum değerlerinin çok uygun olduğu gösterilmiştir.

Bu bulgular, tasarımı gerçekleştirilen nanoanten yapının termal işaretleri seçici soğurum yoluyla etkili ve yüksek verimli bir şekilde yönetebildiğini, askeri ve gözetleme stratejilerini ve diğer kızılötesi tabanlı teknolojileri önemli ölçüde etkileyebilecek termal kamuflaj için yeni fırsatlar açabileceğini göstermektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Askerî kamuflaj, https://tr.wikipedia.org/wiki/Asker%C3%AE_kamuflaj (Erişim tarihi: 04.02.2023)
- [2] Ilic, O., Bermel, P., Chen, G., Joannopoulos, J.D., Celanovic, I., & Soljacic, M. (2016). Tailoring high-temperature radiation and the resurrection of the incandescent source. *Nat. Nanotechnol.* 11, 320-324. <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.309>
- [3] Li, Y., Bai, X., Yang, T., Luo, H., & Qiu, C.-W. (2018). Structured thermal surface for radiative camouflage. *Nat. Commun.* 9. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02678-8>
- [4] Teyssier, J., Saenko, S.V., van der Marel, D., Milinkovitch, M.C. (2015). Photonic crystals cause active colour change in chameleons. *Nat. Commun.* 6, 6368. <https://doi.org/10.1038/ncomms7368>
- [5] Pikul, J.H., Li, S., Bai, H., Hanlon, R.T., Cohen, I., & Shepherd, R.F. (2017). Stretchable surfaces with programmable 3D texture morphing for synthetic camouflaging skins. *Science* 358, 210-214, <https://doi.org/10.1126/science.aan5627>
- [6] Iwaszczuk, K., Strikwerda, A.C., Fan, K., Zhang, X., Averitt, R.D., & Jepsen, P.U. (2012). Flexible metamaterial absorbers for stealth applications at terahertz frequencies. *Opt. Express* 20, 635-643. <https://doi.org/10.1364/oe.20.000635>
- [7] Bai, B.W., Li, X.P., Xu, J., & Liu, Y.M. (2015). Reflections of electromagnetic waves obliquely incident on a multilayer stealth structure with plasma and radar absorbing material. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 43, 2588-2597. <https://doi.org/10.1109/tps.2015.2447536>
- [8] Buhara, E., Buhara, E., Ghobadi, A., Ghobadi, A., & Ozbay, E. (2021). Multi-spectral infrared camouflage through excitation of plasmon-phonon polaritons in a visible-transparent hBN-ITO nanoantenna emitter. *Opt. Lett.* 46(19), pp. 4996-4999. 46, 4996-4999. <https://doi.org/10.1364/OL.437933>
- [9] Pan, M., Huang, Y., Li, Q., Luo, H., Zhu, H., Kaur, S., & Qiu, M. (2020). Multi-band middle-infrared-compatible camouflage with thermal management via simple photonic structures. *Nano Energy*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104449>
- [10] Buhara, E., Ghobadi, A., & Ozbay, E. (2021). Adaptive visible and short-wave infrared camouflage using a dynamically tunable metasurface. *Optics Letters*, 46(19), 4777. <https://doi.org/10.1364/ol.439435>
- [11] Buhara, E., Osgouei, A. K., Khalichi, B., Kocer, H., Ghobadi, A., & Ozbay, E. Thermally tunable from narrowband to broadband metamaterial-based nanoantenna emitter

- [12] Osgouei, A. K., Buhara, E., Khalichi, B., Ghobadi, A., & Ozbay, E. Wavelength selectivity in a polarization-insensitive metamaterial-based absorber consistent with atmospheric absorption windows.
- [13] Zhu, H., Li, Q., Tao, C., Hong, Y., Xu, Z., Shen, W., Kaur, S., Ghosh, P., & Qiu, M. (2021). Multispectral camouflage for infrared, visible, lasers and microwave with radiative cooling. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22051-0>
- [14] Kim, T., Bae, J. Y., Lee, N., & Cho, H. H. (2019). Hierarchical metamaterials for multispectral camouflage of infrared and microwaves. *Advanced Functional Materials*, 29(10). <https://doi.org/10.1002/adfm.201807319>
- [15] Xiao-li, C., Chang-hui, T., & Tian-ping, C., (2019). Composite grating structure for laser and infrared compatible stealth with high visible transmittance. *Optik*, 183, 863-868. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.03.007>
- [16] Kang, Q., Li, D., Wang, W., Guo, K., & Guo, Z. (2022). Multiband tunable thermal camouflage compatible with laser camouflage based on GST plasmonic metamaterial. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55(6). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac31f5>
- [17] Zhu, H., Li, Q., Zheng, C., Hong, Y., Xu, Z., Wang, H., Shen, W., Kaur, S., Ghosh, P., & Qiu, M. (2020). High-temperature infrared camouflage with efficient thermal management. *Light: Science and Applications*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41377-020-0300-5>
- [18] Kim, J., Han, K. & Hahn, J.W. (2017). Selective dual-band metamaterial perfect absorber for infrared stealth technology. *Scientific reports*, 7, 6740. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06749-0>
- [19] Lee, N., Lim, J.S., Chang, I., Lee, D., & Cho, H.H. (2021). Transparent metamaterials for multispectral camouflage with thermal management. *Int. J. Heat Mass Transf*, 173, 121173. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121173>
- [20] Wang, L., Zhang, S., Dong, J., Ma, L., Zheng, C., Zhang, W., & Liu, L. (2023). Multi-band infrared camouflage compatible with radiative cooling and visible colors via a simple multilayer film structure. *Optical Materials Express*, 13(10), 2746. <https://doi.org/10.1364/ome.497654>
- [21] Xiao, G., Lai, Z., Yang, H., Wang, B., & Li, H. (2023). Tunable environment-enhanced mid-infrared absorber based on voltage modulation. *IEEE Photonics Journal*, 15(5). <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2023.3300535>
- [22] Buhara, E., Ghobadi, A., Khalichi, B., Kocer, H., & Ozbay, E. (2021). Mid-infrared adaptive thermal camouflage using a phase-change material coupled dielectric nanoantenna. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 54(26). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abf53d>
- [23] Osgouei, A.K., Hajian, H., Khalichi, B., Serebryannikov, A. E., Ghobadi, A., & Ozbay,

- E. (2021). Active Tuning from Narrowband to Broadband Absorbers Using a Sub-wavelength VO₂ Embedded Layer. *Plasmonics*, 16(4), 1013-1021. <https://doi.org/10.1007/s11468-020-01370-w>
- [24] Khalichi, B., Ghobadi, A., Osgouei, A. K., & Ozbay, E. (2021). Diode like high-contrast asymmetric transmission of linearly polarized waves based on plasmon-tunneling effect coupling to electromagnetic radiation modes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 54(36). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac0ab8>
- [25] Osgouei, A. K., Ghobadi, A., Khalichi, B., & Ozbay, E. (2021). A spectrally selective gap surface-plasmon-based nanoantenna emitter compatible with multiple thermal infrared applications. *Journal of Optics (United Kingdom)*, 23(8). <https://doi.org/10.1088/2040-8986/ac16b7>
- [26] Xiao, G., Lai, Z., Yang, H., Wang, B., & Li, H. (2023). Tunable environment-enhanced mid-infrared absorber based on voltage modulation. *IEEE Photonics J.*, 15. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2023.3300535>
- [27] Bard, A. J. (2004). Fundamentals and Applications Plasmonics : Fundamentals and Applications. 677(1).
- [28] Müller, H. (1996). Optical Properties of Metal Clusters. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 194(2). https://doi.org/10.1524/zpch.1996.194.part_2.278
- [29] Kik, P. G., & Brongersma, M. L. (2007). Surface plasmon nanophotonics. *Springer Series in Optical Sciences*, 131. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4333-8_1
- [30] Chen, Y., & Ming, H. (2012). Review of surface plasmon resonance and localized surface plasmon resonance sensor?. *Photonic Sensors*, 2(1) <https://doi.org/10.1007/s13320-011-0051-2>.
- [31] Serrano, A., de La Fuente, O. R., & García, M. A. (2010). Extended and localized surface plasmons in annealed Au films on glass substrates. *Journal of Applied Physics*, 108(7), <https://doi.org/10.1063/1.3485825>
- [32] Garnett, J. C. M. (1906). VII. Colours in metal glasses, in metallic films, and in metallic solutions.-II. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 205(387-401), <https://doi.org/10.1098/rsta.1906.0007>
- [33] Mie, G. (1908). Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. *Annalen der Physik*, 330(3). <https://doi.org/10.1002/andp.19083300302>
- [34] Eustis S., & El-Sayed, M. A. (2006). Determination of the aspect ratio statistical distribution of gold nanorods in solution from a theoretical fit of the observed inhomogeneously broadened longitudinal plasmon resonance absorption spectrum. *Journal of Applied Physics*, 100(4). <https://doi.org/10.1063/1.2244520>
- [35] Devoe, H. (1964). Optical properties of molecular aggregates. I. Classical model of electronic absorption and refraction. *The Journal of Chemical Physics*, 41(2).

<https://doi.org/10.1063/1.1725879>

- [36] Wood, R. W. (1901). On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum. *Proceedings of the Physical Society of London*, 18(1). <https://doi.org/10.1088/1478-7814/18/1/325>
- [37] Fano, U. (1941). The Theory of Anomalous Diffraction Gratings and of Quasi-Stationary Waves on Metallic Surfaces (Sommerfeld's Waves). *Journal of the Optical Society of America*, 31(3). <https://doi.org/10.1364/josa.31.000213>
- [38] Pines, D. (1956). Collective energy losses in solids. *Reviews of Modern Physics*, 28(3). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.28.184>
- [39] Powell C. J., & Swan, J. B. (1959). Origin of the characteristic electron energy losses in magnesium. *Physical Review*, 116(1). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.116.81>
- [40] Ritchie, R. H., Arakawa, E. T., Cowan, J. J., & Hamm, R. N. (1968). Surface-plasmon resonance effect in grating diffraction. *Physical Review Letters*, 21(22). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.21.1530>
- [41] Kretschmann, E. (1971). Die Bestimmung optischer Konstanten von Metallen durch Anregung von Oberflächenplasmaschwingungen. *Zeitschrift für Physik*, 241(4). <https://doi.org/10.1007/BF01395428>
- [42] Kretschmann, E., & Raether, H. (1968). Radiative Decay of Non Radiative Surface Plasmons Excited by Light. *Zeitschrift für Naturforschung - Section A Journal of Physical Sciences*, 23(12). <https://doi.org/10.1515/zna-1968-1247>
- [43] Otto, A. (1968). Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection. *Zeitschrift für Physik*, 216(4). <https://doi.org/10.1007/BF01391532>
- [44] Kreibig, U. & Zacharias, P. (1970). Surface plasma resonances in small spherical silver and gold particles. *Zeitschrift für Physik*, 231(2). <https://doi.org/10.1007/BF01392504>
- [45] Fleischmann, M., Hendra, P. J., & McQuillan, A. J. (1974). Raman spectra of pyridine adsorbed at a silver electrode. *Chemical Physics Letters*, 26(2). [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(74\)85388-1](https://doi.org/10.1016/0009-2614(74)85388-1)
- [46] Cunningham, S. L., Maradudin, A. A., & Wallis, R. F. (1974). Effect of a charge layer on the surface-plasmon-polariton dispersion curve. *Physical Review B*, 10(8). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.10.3342>
- [47] Lycurgus kupası, <https://www.bmimages.com/results.asp?txtkeys1=lycurgus%20cup> (Erişim tarihi: 09.01.2024)
- [48] Osgouei, A. K., Hajian, H., Serebryannikov, A. E., & Ozbay, E. (2021). Hybrid indium tin oxide-Au metamaterial as a multiband bi-functional light absorber in the visible and near-infrared ranges. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 54(27).

- [49] Noguez, C., (2007). Surface plasmons on metal nanoparticles: The influence of shape and physical environment. *Journal of Physical Chemistry C*, 111(10). <https://doi.org/10.1021/jp066539m>
- [50] Garcia, M. A. (2011). Surface plasmons in metallic nanoparticles: Fundamentals and applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(28). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/28/283001>
- [51] Teixeira, F. L. (2010). A Summary Review on 25 Years of Progress and Future Challenges in FDTD and FETD Techniques. *ACES Journal (İngilizce)*, 25 (1) 1-14
- [52] Shlager, K.L. & Schneider, J.B. (1996). A selective survey of the finite-difference time-domain literature. *IEEE Antennas and Propagation Magazine (İngilizce)*. 37(4): 39-57, 2010
- [53] Yee, K. S. (1966). Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 14(3), 302-307
- [54] Tretyakov, S., Urbas, A., & Zheludev, N. (2017). The century of metamaterials. *Journal of Optics (United Kingdom)*, 19(8). <https://doi.org/10.1088/2040-8986/aa77a8>
- [55] Boardman, A. (2011). Pioneers in metamaterials: John Pendry and Victor Veselago. *Journal of Optics*, 13(2). <https://doi.org/10.1088/2040-8978/13/2/020401>
- [56] Valentine, J., Li, J., Zentgraf, T., Bartal, G., & Zhang, X. (2009). An optical cloak made of dielectrics. *Nature Materials*, 8(7). <https://doi.org/10.1038/nmat2461>
- [57] Li, Z., Mutlu, M., & Ozbay, E. (2013). Chiral metamaterials: From optical activity and negative refractive index to asymmetric transmission. *Journal of Optics (United Kingdom)*, 15(2). <https://doi.org/10.1088/2040-8978/15/2/023001>
- [58] Fang, A., Koschny, T., & Soukoulis, C. M. (2010). Lasing in metamaterial nanostructures. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 12(2). <https://doi.org/10.1088/2040-8978/12/2/024013>
- [59] Hoffman, A. J., Alekseyev, L., Howard, S. S., Franz, K. J., Wasserman, D., Podolskiy, V. A., Narimanov, E. E., Sivco, D. L., & Gmachl, C. (2007). Negative refraction in semiconductor metamaterials. In *Nature Materials* 6(12), 946-950. *Nature Publishing Group*. <https://doi.org/10.1038/nmat2033>
- [60] Watts, C. M., Liu, X., & Padilla, W. J. (2012). Metamaterial electromagnetic wave absorbers. *Advanced Materials*, 24(23). <https://doi.org/10.1002/adma.201200674>
- [61] Chen, H.-T. (2012). Interference theory of metamaterial perfect absorbers. *Optics Express*, 20(7). <https://doi.org/10.1364/oe.20.007165>
- [62] Hajian, H., Ghobadi, A., Butun, B., & Ozbay, E. (2019). Active metamaterial nearly perfect light absorbers: a review [Invited]. *Journal of the Optical Society of America B*, 36(8), F131. <https://doi.org/10.1364/josab.36.00f131>

- [63] Zhang, J., Zhang, L., & Xu, W. (2012). Surface plasmon polaritons: physics and applications. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 45, 113001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/11/113001>
- [64] Aslan, E., Aslan, E., Turkmen, M., & Saracoglu, O.G. (2017). Experimental and numerical characterization of a mid-infrared plasmonic perfect absorber for dual-band enhanced vibrational spectroscopy. *Opt. Mater. (Amst.)*, 73, 213-222. <https://doi.org/10.1016/J.OPTMAT.2017.08.023>
- [65] Şanlı, A.K., Tabaru, T.E. & Kılıç, V.T. (2024). Triple band diamond-shaped polarization insensitive plasmonic nano emitter for thermal camouflage and radiative cooling. *Opt Quant Electron* 56, 1074. <https://doi.org/10.1007/s11082-024-06970-y>

|



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : D****, A*****
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri :
Medeni hali :
Telefon :
Faks :
e-mail :



Eğitim

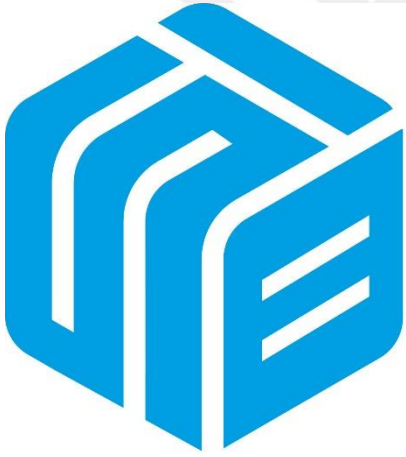
Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	SBTÜ/ Savunma Teknolojileri	2024
Lisans	CÜ / Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2012
Lise	Cumhuriyet Anadolu Lisesi	2007

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Satranç, Masa tenisi



**SİVAS
BİLİM VE TEKNOLOJİ
ÜNİVERSİTESİ**

KÖKLERDEN GÖKLERE...