T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİYOFOTONİK ALGILAMA İÇİN SPR TABANLI FİBER OPTİK ALGILAYICILARIN İNCELENMESİ

Hazırlayan
Gökbey Berat ÖZÇİFTÇİ

Danışmanlar
Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU
Öğr. Gör. Dr. Timuçin Emre TABARU

Yüksek Lisans Tezi

Temmuz 2021
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİYOFOTONİK ALGILAMA İÇİN SPR TABANLI FİBER OPTİK ALGILAYICILARIN İNCELENMESİ

Hazırlayan
Gökbey Berat ÖZÇİFTÇİ

Danışmanlar
Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU
Öğr. Gör. Dr. Timuçin Emre TABARU

Yüksek Lisans Tezi

Temmuz 2021
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Gökbey Berat ÖZÇİFTÇİ

İmza

"Biyofotonik Algılama için SPR Tabanlı Fiber Optik Algılayıcıların İncelenmesi" adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi' ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan	**Danışmanlar**
Gökbey Berat ÖZÇİFTÇİ	Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU
İmza	İmza
	Öğr. Gör. Dr. Timuçin Emre TABARU
	İmza

Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU

İmza

TEŞEKKÜR

Eğitim sürecim boyunca bilgi birikimime yapmış oldukları katkılardan, bilimsel araştırma yöntemlerinde sunmuş oldukları ufuk açıcı yöntemlerden ve her türlü desteği esirgemediklerinden dolayı değerli hocalarım Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU ve Öğr. Gör. Dr. Timuçin Emre TABARU' ya teşekkürü bir borç bilirim.

.

Gökbey Berat ÖZÇİFTÇİ

Temmuz 2021, KAYSERİ

BİYOFOTONİK ALGILAMA İÇİN SPR TABANLI FİBER OPTİK ALGILAYICILARIN İNCELENMESİ

Gökbey Berat ÖZÇİFTÇİ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2021
Danışmanlar: Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU
Öğr. Gör. Dr. Timuçin Emre TABARU

ÖZET

Bu tez çalışmasında YPS tabanlı fiber optik algılayıcılar incelenmiştir. İncelemeler sonucunda mikroorganizmaların tespitinde kullanılması amacıyla YPS tabanlı fiber optik algılayıcılar tasarlanıp simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları gerçekleştirilen YPS tabanlı fiber optik algılayıcılarda çok katmanlı yapılar dikkate alınmıştır. Çok katmanlı yapılar fiber öz, altın, grafen, MoS_2, ITO ve ZnO varsayılarak oluşturulmuştur. Bu malzemelerin kombinasyonları ile YPS tabanlı fiber optik algılayıcı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan algılayıcılar için hassasiyet, yarım genlikteki toplam genişlik, FOM, salınım dalga boyu, yansıma, iletilen güç vb. parametreler elde edilmiştir. Elde edilen verilerden hareketle malzemelerin olumlu ve olumsuz yönleri ortaya konmuştur. Grafen ve MoS_2' nin incelendiği simülasyonlarda en yüksek hassasiyet değeri 6375 nm/RIU elde edilmiştir. ITO' nun incelendiği simülasyonlarda en yüksek hassasiyet değeri 2825 nm/RIU elde edilmiştir. ZnO' nun incelendiği simülasyonlarda en yüksek hassasiyet değeri 2825 nm/RIU' dur. Tüm bu bilgiler ışığında mikroorganizmaların tespitinde yüksek hassasiyet ve doğruluk oranına sahip YPS tabanlı fiber optik algılayıcı tasarımları için grafen, MoS_2, ITO ve ZnO kullanımının uygun olduğu düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yüzey Plazmon Salınım, Fiber Optik Kablo, Çok Katmanlı Yapılar.

INVESTIGATION OF SPR BASED FIBER OPTIC SENSORS FOR BIOPHOTONIC SENSING

Gokbey Berat OZCIFTCI

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Master Thesis, July 2021
Supervisors: Prof. Dr. Omer Galip SARACOGLU
Asst. Dr. Timuçin Emre TABARU

ABSTRACT

In this thesis, SPR-based fiber optic sensors were investigated. As a result of the investigations, SPR-based fiber optic sensors were designed, and simulation studies were carried out in order to be used in the detection of microorganisms. Multilayer structures were considered in SPR-based fiber optic sensors for which simulation studies were carried out. Multilayer structures were constructed assuming fiber core, gold, graphene, MoS_2, ITO and ZnO. SPR-based fiber optic sensor design has been realized with the combinations of these materials. For the designed sensors, sensitivity, full width at half-minimum, FOM, resonance wavelength, reflection, transmitted power etc. parameters have been obtained. Based on the data obtained, the positive and negative aspects of the materials were revealed. In the simulations where graphene and MoS_2 were examined, the highest sensitivity value was 6375 nm/RIU. In the simulations where ITO was examined, the highest sensitivity value was 2825 nm/RIU. In the simulations where ZnO is examined, the highest sensitivity value is 2825 nm/RIU. In the light of all this information, it is seen that the use of graphene, MoS_2, ITO and ZnO is suitable for SPR-based fiber optic sensor designs with high sensitivity and accuracy in the detection of microorganisms.

Keywords: Surface Plasmon Resonance, Fiber Optic Cable, Multilayer Structures.

İÇİNDEKİLER

BİYOFOTONİK ALGILAMA İÇİN SPR TABANLI FİBER OPTİK ALGILAYICILARIN İNCELENMESİ

YÖNERGEYE UYGUNLUK....iii
KABUL VE ONAY....iv
TEŞEKKÜR....v
ÖZET....vi
ABSTRACT....vii
İÇİNDEKİLER....viii
KISALTMALAR....xi
SİMGELER VE SEMBOLLER....xii
TABLOLAR LİSTESİ....xiv
ŞEKİLLER LİSTESİ....xvi
GİRİŞ....1

1. BÖLÜM

YÜZEY PLAZMON SALINIM YÖNTEMİNE AİT GENEL BİLGİLER VE LİTARATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Yüzey Plazmon Salınım Temelleri....4
1.1.1. Yüzey Plazmon Salınım ile Algılama....6
1.1.2. Algılamadaki Parametreler....8
1.2. Geçiş Metali Dikalkojenitleri....12
1.3. Literatür Çalışması....13

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Yüzey Plazmonlarının Oluşum Mekanizması 17
2.2. YPS Tabanlı Algılama Sistemi ve Algılama Parametreleri 21
2.3. Çok Katmanlı Yapılarda Transfer Matris Metodu 24
2.4. Sellmeier Eşitliği 26
2.5. Drude Formülü 27
2.7. Simülasyonlarda Kullanılan 2 Boyutlu Malzemelerin Kırılma İndisi 27
2.8. ITO ve ZnO Katmanlarının Dielektrik Katsayılarının Bulunması 28

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. Araştırma Modeli 29
3.2. YPS Oluşumu için Ön Koşulların Simülasyonları 30
3.2.1. Hava Ortamında YPS 30
3.2.2. Kutuplu Dalgaların Uyartıma Etkisinin İncelenmesi 30
3.3. Çok Modlu Fiberin Görünür Spektrumdaki Kırılma İndisi 32
3.4. Altının Dielektrik Katsayısının Drude Formülü ile Bulunması 33
3.5. ITO için Karmaşık Dielektrik Katsayısının Bulunması 34
3.6. Simülasyon Çalışmaları 35
3.6.1. 40 nm Altın Kalınlığında Grafen ve MoS_2 Etkisi 35
3.6.2. 50 nm Altın Kalınlığında Grafen ve MoS_2 Etkisi 38
3.6.3. 60 nm Altın Kalınlığında Grafen ve MoS_2 Etkisi 41

3.7. Algılama Bölgesinin Uzunluğunun Uygunlaştırılması 44
3.7. Indiyum Tin Oksitin Çeşitli Kalınlıklardaki Etkisinin İncelenmesi 48
3.8. Çinko Oksitin Çeşitli Kalınlıklardaki Etkisinin İncelenmesi 57

4. BÖLÜM

SONUÇ-TARTIŞMA VE ÖNERİLER

4.1. Sonuç 63
4.2. Tartışma ve Öneriler 64
KAYNAKÇA 66
ÖZGEÇMİŞ 633

KISALTMALAR

SPR	: Surface Plasmon Resonance
ELISA	: Enzyme-Linked ImmunoSorbent Assay
PCR	: Polymerase Chain Reaction
YPS	: Yüzey Plazmon Salınım
YPD	: Yüzey Plazmon Dalgaları
YP	: Yüzey Plazmon
SA	: Sönen Alan
RIU	: Refractive Index Unit
FOM	: Figure of Merit
DNA	: Deoksiribo Nükleik Asit
NA	: Nümerik Açıklık
cm	: Santimetre
μm	: Mikrometre
nm	: Nanometre

SİMGELER VE SEMBOLLER

Sembol	**Anlamı**
MoS_2	: Molibden disülfit
ITO	: İndiyum tin oksit
ZnO	: Çinko oksit
ε_p	: Prizmanın dielektrik katsayısı
ε_s	: Algılama bölgesinin dielektrik katsayısı
ε_m	: Metal ortamın dielektrik katsayısı
ε_d	: Dielektrik ortamın dielektrik katsayısı
θ	: Işığın geliş açısı
n_s	: Algılama ortamının kırılma indisi
δn_s	: Algılama ortamının kırılma indisindeki değişim
$\delta\lambda_S$	: Salınım dalga boyundaki değişim
°	: Derece
$MoSe_2$	: Molibden diselenit
WS_2	: Tungsten disülfit
Ag	: Gümüş
WSe_2	: Tungsten diselenit
Au	: Altın
Cr	: Krom
Si	: Silisyum
GaAs	: Galyum arsenit
WO_3	: Tungsten trioksit
TiO_2	: Titanyum dioksit
IO	: İndiyum oksit

ω_p	: Plazma frekansı
φ	: Serbest elektron yoğunluğu
e	: Elektron yükü
m_0	: Elektron kütlesi
λ_p	: Plazma dalga boyu
λ_c	: Çarpışma dalga boyu
λ_s	: Salınım dalga boyu
ω	: Işığın açısal frekansı
c	: Işığın boşluktaki hızı
$\Delta\lambda_{0.5}$	: Yarım genlikteki toplam genişlik
d	: Çok katmanlı yapılarda ortam kalınlığı
n	: Kırılma indisi
n_{cl}	: Fiber optik kablonun yeleğinin kırılma indisi
n_1	: Fiber optik kablonun çekirdeğinin kırılma indisi
β	: Faz faktörü
q	: Optik admitans
S	: Hassasiyet
D	: Doğruluk oranı

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Sellmeier eşitliği için çok modlu fiber optik kabloya ait değerler. 26

Tablo 2.2. Bazı metallerin plazma ve çarpışma dalga boyu değerleri.....27

Tablo 3.1. Altın kalınlığı 40 nm iken grafen ve MoS_2 katman sayılarının hassasiyete etkisi.....36

Tablo 3.2. Altın kalınlığı 40 nm iken grafen ve MoS_2 katman sayılarının FOM değerine etkisi.....37

Tablo 3.3. Altın kalınlığı 50 nm iken grafen ve MoS_2 katman sayılarının hassasiyete etkisi.....39

Tablo 3.4. Altın kalınlığı 50 nm iken grafen ve MoS_2 katman sayılarının FOM değerine etkisi.....40

Tablo 3.5. Altın kalınlığı 60 nm iken grafen ve MoS_2 katman sayılarının hassasiyete etkisi.....42

Tablo 3.6. Altın kalınlığı 60 nm iken grafen ve MoS_2 katman sayılarının FOM değerine etkisi.....43

Tablo 3.7. Altın kalınlığının 20 nm olduğu durumda ITO katmanının hassasiyete etkisi.....51

Tablo 3.8. Altın kalınlığının 25 nm olduğu durumda ITO katmanının hassasiyete etkisi.....53

Tablo 3.9. Altın kalınlığının 30 nm olduğu durumda ITO katmanının hassasiyete etkisi.....54

Tablo 3.10. Altın kalınlığının 40 nm olduğu durumda ITO katmanının hassasiyete etkisi.....55

Tablo 3.11. Altın kalınlığının 50 nm olduğu durumda ITO katmanının hassasiyete etkisi.....56

Tablo 3.12. Altın kalınlığının 60 nm olduğu durumda ITO katmanının hassasiyete etkisi.....57

Tablo 3.13. Altın kalınlığının 20 nm olduğu durumda ZnO katmanının hassasiyete etkisi.....58

Tablo 3.14. Altın kalınlığının 30 nm olduğu durumda ZnO katmanının hassasiyete etkisi.....58

Tablo 3.15. Altın kalınlığının 40 nm olduğu durumda ZnO katmanının hassasiyete etkisi.....60

Tablo 3.16. Altın kalınlığının 50 nm olduğu durumda ZnO katmanının hassasiyete etkisi.....61

Tablo 3.17. Altın kalınlığının 60 nm olduğu durumda ZnO katmanının hassasiyete etkisi.....62

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Otto yapısının şematik gösterimi.……..5

Şekil 1.2. Kretschmann yapısının şematik gösterimi..……...5

Şekil 1.3. Temel seviyedeki YPS tabanlı fiber optikalgılayıcının şematik gösterimi.6

Şekil 1.4. YPS ile algılama 8

Şekil 1.5. Yarım genlikteki toplam genişlik grafiği.....11

Şekil 1.6. Tipik bir geçiş metali dikalkojeniti yapısı 12

Şekil 2.1. Yüzey plazma salınımı 18

Şekil 2.2. Metal ve dielektrik ortamdaki yayılım sabitlerinin sönümlenmesi 19

Şekil 2.3. Yayılım sabitleri eğrisi 20

Şekil 2.4. Transfer matris metodunda N katmanlı yapının şematik gösterimi 25

Şekil 3.1. Hava ortamında YPS fenomeni.....30

Şekil 3.2. Her iki kutuplu dalganın yüzey plazmon dalgalarını uyarmadaki etkisi. 32

Şekil 3.3. Çok modlu silika fiberin kırılma indisinin dalga boyu bağımlığının Sellmeier eşitliğiyle elde edilmesi.....33

Şekil 3.4. Altının karmaşık dielektrik katsayısı. 34

Şekil 3.5. 400nm ile 1200 nm aralığında ITO katmanının dielektrik katsayı değerleri. 35

Şekil 3.6. Altın kalınlığının 40 nm olduğu algılayıcı yapısında en yüksek hassasiyet ve FOM değerinin elde edildiği yapıya ilişkin iletilen güç-dalga boyu eğrisi. 38

Şekil 3.7. Altın kalınlığının 50 nm olduğu algılayıcı yapısında en yüksek hassasiyet ve FOM değerinin elde edildiği yapıya ilişkin iletilen güç-dalga boyu eğrisi. 41

Şekil 3.8. Altın kalınlığının 60 nm olduğu algılayıcı yapısında en yüksek hassasiyet değerinin elde edildiği yapıya ilişkin iletilen güç-dalga boyu eğrisi. 44

Şekil 3.9. Algılama uzunluğunun salınım dalga boyuna etkisi 45

Şekil 3.10. Altın kalınlığının 40 nm olduğu durumdaki belirsizlik. 46

Şekil 3.11. Altın kalınlığının 50 nm olduğu durumdaki belirsizlik. 47

Şekil 3.12. Altın kalınlığının 60 nm olduğu durumdaki belirsizlik. 48

Şekil 3.13. Altın kalınlığı 25 nm iken ITO katmanının yansımaya etkisi. 49

Şekil 3.14. Altın kalınlığı 50 nm iken ITO katmanının yansımaya etkisi 50

Şekil 3.15. 20 nm altın üzerine 12 nm ITO eklendiği durumda hassasiyetin elde edilmesi.....52

Şekil 3.16. ITO katmanının yansımaya olan etkisi.....55

Şekil 3.17. Altın kalınlığı 30 nm olduğu durumda 5 nm ZnO katmanın yansımaya etkisi.....59

GİRİŞ

İnsan sağlığını tehdit eden mikroorganizmalarla karşılaşmak günlük hayatın her aşamasında mümkündür. Pek çok mikroorganizma salgın tehdidi oluşturabilmekte ve enfeksiyonu kitlesel boyutlara getirebilmektedir. Günümüzde ELISA (Enzyme-Linked ImmunoSorbent Assay) ve PCR (Polymerase Chain Reaction) gibi etkili metotlar ile mikroorganizmaların varlığı tespit edilebilmektedir. Bahsedilen yöntemlerin uygulanabilmesi için geniş bir zaman aralığı ve oldukça karmaşık ekipmanlar içeren laboratuvarların bulunması gerekmektedir. Fakat kitlesel salgınların önlenebilmesi için mikroorganizmaların hızlı tespit edilmesi bir zorunluluktur. Bu sebeple bilim insanları mikroorganizmaların tespiti için yeni yaklaşımlar geliştirmektedir.

Son yıllarda optik teknolojilerin gelişmesi bu teknolojilerin algılamaya alternatif yöntemler olarak değerlendirilmesine sebep olmuştur. Bununla birlikte yakın bir gelecekte optik teknolojilerin hayatımızda daha fazla alanı işgal etmesi beklenmektedir. Öte yandan optik teknolojiler için neredeyse vazgeçilmez olan fiber optik kablolar sahip oldukları fiziksel ve optik özelliklerinden dolayı pek çok amaçla kullanılmaktadır. Fiber optik kabloların kullanım alanlarından bir tanesi ise algılama amaçlı kullanımıdır. Fiber optik kabloların fiziksel özellikleri arasında esneklik, küçük boyut, hafiflik vb. özellikler bulunmaktadır. Bu özelliklere ek olarak fiber optik kabloların elektromanyetik gürültüden etkilenmemesi bu kabloların bir diğer avantajıdır. Tüm bu bilgiler ışığında fiber optik kablolar tehlikeli bölgelerde kullanılabilen oldukça esnek ve küçük hacimli

algılayıcı bileşenleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Algılama amaçlı kullanılan fiber optik kablolar aracılığıyla sıcaklık, yoğunluk, buhar, nem, basınç vb. fiziksel niceliklerin ölçümünü temel alan çalışmalar mevcuttur [1-6]. Fiber optik kablolar ile algılamada temel prensip, fiber optik kablonun bir ucundan yönlendirilen ışığın diğer ucunda ölçülürken modülasyona uğramış olması esasına dayalıdır. Başka bir ifade ile toplam dahili yansımanın kayıplı olması ışığı modüle etmektedir. Buradaki modülasyon algılama için faydalı çıktılar üretmektedir. Fiber optik kablolar ile algılama temelde 3 ana grupta incelenmektedir. Bunlar; dışta etkileşimli, içte etkileşimli ve sönen alan etkileşimli olarak adlandırılmaktadır. Fiber optik kablolar ile algılama temellerine ek olarak fotonik algılama için çeşitli teknikler mevcuttur. Bu tekniklere örnek olarak; fotolüminesans, doppler temelli interferometri, YPS (Yüzey Plazmon Salınım) teknikleri verilebilir. Fakat YPS tekniği geçtiğimiz çeyrek yüzyılda en az diğer teknikler kadar yaygın araştırma konusu olmuştur [7]. Bu sebeple günümüzde YPS tabanlı fiber optik algılayıcılar hem YPS tekniğinin gelecek vadeden özellikleri dolayısıyla hem de fiber optik kabloların avantajları sebebiyle önemli bir seviyeye gelmiştir. YPS tabanlı fiber optik algılayıcılar temelde fiber optik kablo çekirdeğinin metal ile kaplanması sonucunda elde edilir [8]. YPS tabanlı fiber optik algılayıcının algılama yöntemi, fiber optik kablo boyunca yayılan ışığın bir metal yüzey ile karşılaşması sonucu meydana gelen yüzey plazmon dalgaları (YPD) aracılığıyla algılama yapmasıdır [9]. YPS tabanlı fiber optik algılayıcılar hızlı sonuç veren ve hassas algılayıcılar oldukları için geleneksel yöntemlere karşı oldukça üstündür [10]. Tüm bu bilgiler ışığında YPS tabanlı fiber optik algılayıcıların yakın gelecekte daha da gelişeceği beklenmektedir.

Bu tez çalışmasında çok katmanlı YPS tabanlı fiber optik algılayıcılar incelenmektedir. İncelemeler sonucunda elde edilen bilgiler aracılığıyla mikroorganizma tespitinde geleneksel yöntemlere alternatif oluşturabilecek YPS tabanlı fiber optik algılayıcı tasarımı hedeflenmektedir. Hedeflenen tasarımda metal katman olarak altın seçilmiştir. Çok katmanlı yapı YPS tabanlı fiber optik algılayıcılardaki altın katmanının üzerine grafen, molibden disülfit (MoS_2), indiyum tin oksit (ITO), çinko oksit (ZnO) bileşiklerinin kaplanması ile oluşturulmuştur. İlk olarak olağanüstü inceliklerinden dolayı iki boyutlu malzemeler olarak adlandırılan grafen ve molibden disülfit (MoS_2) bileşiklerinin YPS tabanlı fiber optik algılayıcılara ait parametrelere etkileri

araştırılmıştır. Sonrasında ise çeşitli kalınlıklardaki ITO ve ZnO bileşiklerinin YPS tabanlı algılayıcılardaki kullanımının sonuçlarından bahsedilmektedir. Grafen ve MoS_2 birlikte incelenmiş olup ITO ve ZnO bileşikleri birbirlerinden bağımsız olarak incelenmiştir. Simülasyonlar MATLAB programı kullanılarak yapılmıştır.

1. Bölümde YPS tekniğinin tarihsel gelişiminden bahsedilmektedir. YPS tekniğine ait genel bilgiler bu bölümde verilmiştir. YPS tekniğinde oldukça yaygın kullanılan iki boyutlu malzemeler anlatılmaktadır. YPS tekniğinin ve iki boyutlu malzemelerin genel hatlarından bahsedildikten sonra YPS tabanlı algılayıcıların literatür çalışması yapılmıştır.

2. Bölüm' de YPS fenomeninin matematiksel ifadeleri verilmektedir. YPS tabanlı algılayıcılara ait hassasiyet vb. parametreler bu bölümde detaylı olarak ifade edilmiştir. Çok katmanlı yapılar için transfer matris metodu 2. Bölüm' de ele alınmıştır. Ayrıca her bir katman için gerekli olan dielektrik sabitinin hesaplanmasında kullanılan denklemler verilmiştir.

3. Bölüm' de grafen, MoS_2, ITO ve ZnO katmanlarının algılayıcı parametrelerine etkisi incelenmiştir. Grafen ve MoS_2 katmanlarının etkilerinin incelenmesinde altın kalınlığının 40 nm, 50 nm ve 60 nm olduğu yapılar dikkate alınmıştır. Öte yandan ITO ve ZnO bileşikleri için altın katmanın kalınlığı 20 nm, 30 nm, 40 nm, 50 nm ve 60nm iken ITO ve ZnO tabakalarına ait kalınlıklar değiştirilmiştir. Elde edilen veriler tablolar halinde 3.Bölüm' de verilmektedir.

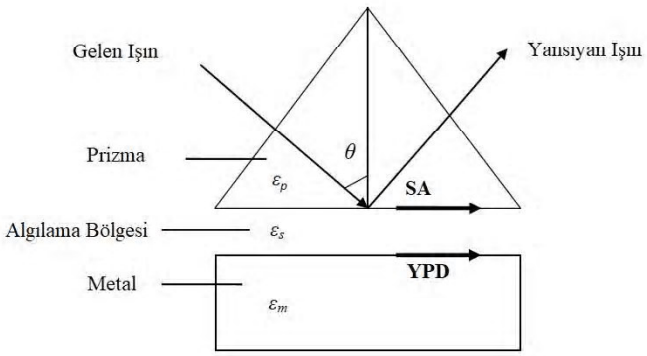
4. Bölüm' de elde edilen sonuçların literatürdeki konumu tartışılmıştır. Grafen, MoS_2, ITO, ZnO bileşiklerinin parametrelere olumlu ve olumsuz etkileri ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar ışığında mikroorganizmaların tespitinde kullanılabilecek çok katmanlı YPS tabanlı fiber optik algılayıcı yapıları önerilmektedir.

1. BÖLÜM

YÜZEY PLAZMON SALINIM YÖNTEMİNE AİT GENEL BİLGİLER VE LİTARATÜR ÇALIŞMASI

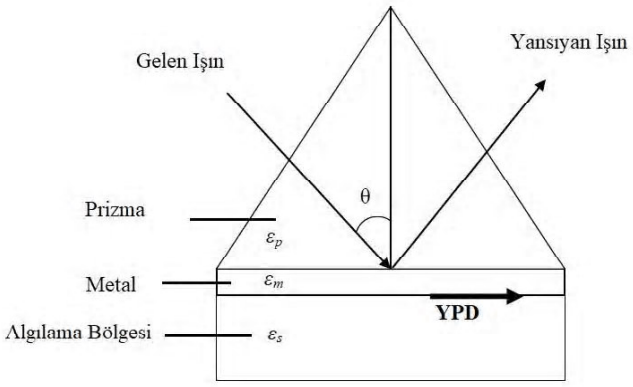
1.1. Yüzey Plazmon Salınım Temelleri

Geçtiğimiz çeyrek asırda oldukça popülerleşen yüzey plazmon salınım tekniğinin 100 yılı aşkın bir geçmişi bulunmaktadır. YPS tekniğinin ilk matematiksel eşitlikleri Zenneck tarafından 1907 yılında türetilmiştir. Zenneck metal ve dielektrik ortamın sınırında yüzey plazmon (YP) dalgalarının meydana geldiğini belirtmiştir [11]. Bununla birlikte ara yüzeydeki YP dalgalarının girişim oluşturmasına sebep olarak dielektrik katsayının kayıplı kısmını göstermiştir. Aradan geçen yıllardan sonra Otto 1968 yılında yapmış olduğu çalışmada toplam dahili iç yansımanın YP dalgalarının salınım oluşturduğu durumda zayıfladığını Şekil 1.1.' de gösterilen ve literatürde kendi ismi ile anılan prizma temelli yapı ile ifade etmiştir [12]. Şekil 1.1.' de ε_p**:** prizmanın dielektrik katsayısını, ε_s**:** algılama bölgesinin dielektrik katsayısını, ε_m**:** metal ortamın dielektrik katsayısını, **SA**: sönen alana ait vektörü, **YPD**: yüzey plazmon dalgasına ait vektörü, θ: ışığın geliş açısını ifade etmektedir.



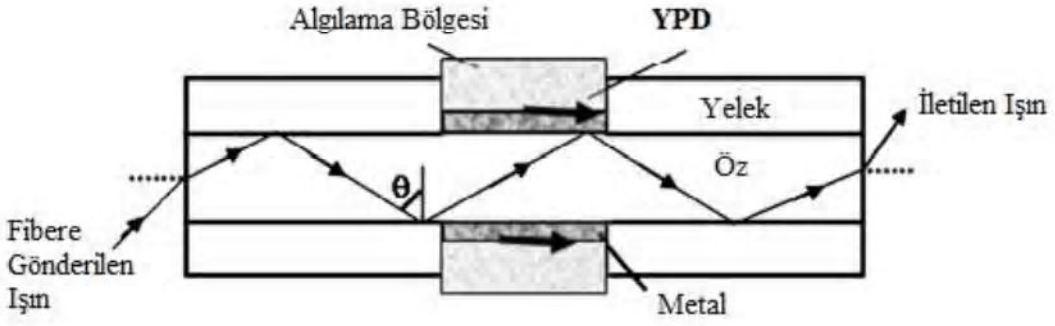
Şekil 1.1. Otto yapısının
şematik gösterimi [13].

Fakat Otto yapısının pratik olarak uygulanabilirliği pek de mümkün değildir. Nihayet 1971 yılında Kretschmann yapmış olduğu çalışmada Şekil 1.2.' de görüldüğü gibi prizmanın üzerine direkt olarak oldukça ince metal bir katman koymak suretiyle Otto yapısını ilerletmiştir [14]. Şekil 1.2.' de ε_p**:** prizmanın dielektrik katsayısını, ε_s**:** algılama bölgesinin dielektrik katsayısını, ε_m**:** metal ortamın dielektrik katsayısını, **SA**: sönen alana ait vektörü, **YPD**: yüzey plazmon dalgasına ait vektörü, θ: ışığın geliş açısını ifade etmektedir.



Şekil 1.2. Kretschmann yapısının
şematik gösterimi [13].

Her ne kadar Otto yapısı Kretschmann yapısına evrilmiş olsa da prizmaların hantal yapıları dolayısıyla uzaktan algılama veya küçük boyutlu ortamlarda kullanılabilen bir algılayıcı üretimi mümkün olamamıştır. Bu noktada fiber optik kabloların da gelişmesiyle beraber prizmaların yerine fiber optik kablo kullanımı alternatif olarak düşünülmüştür. Fiber optik kabloların esnek ve oldukça küçük boyutlara sahip olması hem dar ortamlarda kullanıma elverişli olmasına hem de uzaktan algılamaya imkan tanımasına sebep olmaktadır. Şekil 1.3.' de temel seviyedeki YPS tabanlı fiber optik algılayıcının şematik gösterimi görülmektedir. Şekil 1.3.' de θ: ışığın fiber içerisindeki yansıma açısını, **YPD**: yüzey plazmon dalgasına ait vektörü ifade etmektedir.



Şekil 1.3. Temel seviyedeki YPS tabanlı fiber optik algılayıcının şematik gösterimi [15].

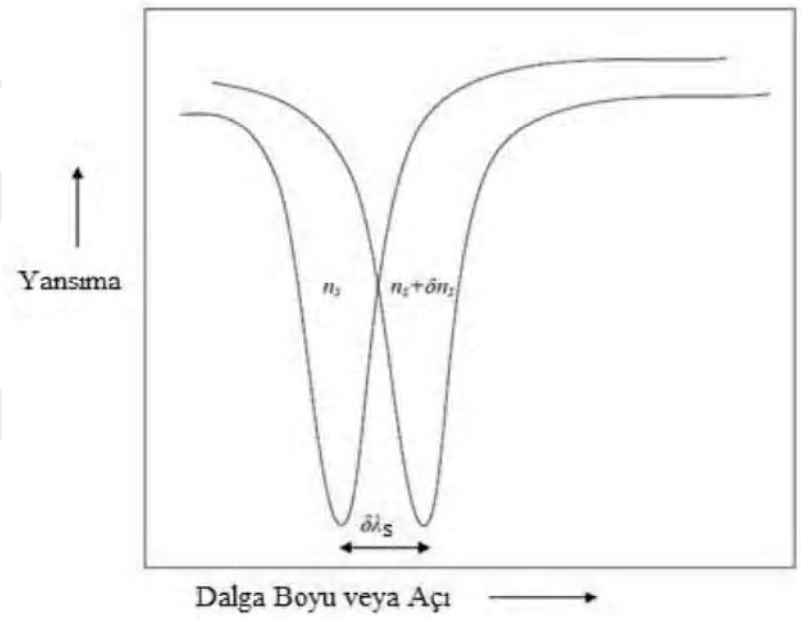
1.1.1. Yüzey Plazmon Salınım ile Algılama

Doğası gereği YP dalgaları sadece enine manyetik kutuplu dalgalar tarafından uyarılabildiği için ince bir metal tabaka ile dielektrik ortamdan oluşan plazmoniğin metal-dielektrik ara yüzeyine enine manyetik kutuplu ışığın gelmesi sonucu YP dalgaları uyarılmış olur [16]. YP dalgalarının sadece enine manyetik kutuplu dalgalar tarafından uyarılabilmesinin sebebi ise enine manyetik kutuplu dalgaların boyuna elektrik alan bileşenine sahip olmasıdır [17]. Enine manyetik kutuplu dalgaların sahip olduğu boyuna elektrik alan ara yüzey boyunca bir salınım meydana getirir. Plazma

salınımının meydana geldiği dalga boyunda yansıma minimum olur ve yansımanın minimum olması ışığın metal ortam tarafından soğurulduğu anlamını taşır [18]. Metal ortam tarafından soğurulan ışık YP dalgalarını uyarmaktadır. Ancak gelen ışığın soğurulması ve YP dalgalarını uyarması algılama ortamının dielektrik katsayısı ile ilişkilidir. Sönen alana (SA) ait dalga vektörü ile YP dalgasına ait dalga vektörü eşit olduğu zaman YPS gerçekleşmektedir. Böylelikle gelen ışın algılanacak madde tarafından modüle edilir ve algılama gerçekleştirilir.

Algılama iki farklı metot ile gerçekleştirilebilir. Bunlar; dalga boyu sorgulama metodu ve geliş açısı sorgulama metodudur [19]. Bu metotlardan yaygın olarak karşılaşılan metot dalga boyu sorgulama metodudur. Dalga boyu sorgulama metodunda ışığın metal-dielektrik ara yüzeyinin normali ile yaptığı açı sabit tutulmak suretiyle çok renkli bir ışık kaynağı ile YPD uyarılır. Uyarılan YPD tek bir dalga boyunda salınım meydana getirir. Bu dalga boyuna salınım dalga boyu denmektedir. Salınım dalga boyunda ışığın yansıması idealde 0 olur. Algılama ortamına ait kırılma indisi değiştiği taktirde salınım dalga boyu da dolaylı olarak değişmektedir [20]. Tek renkli ışık kaynağı ile yüzey plazma dalgalarının uyarıldığı metoda ise açısal sorgulama metodu denir. Açısal sorgulama metodunda ışığın dalga boyu sabittir. Buna karşın ışığın metal-dielektrik ara yüzey normali ile yaptığı açı değişmektedir. Işık belirli bir açıda (salınım açısı) geldiği durumda YPD salınım oluşturur. Işık metal-dielektrik ara yüzeye salınım açısıyla geldiğinde ışığın yansıması idealde 0 olur. Dalga boyu sorgulama metoduna benzer şekilde algılama ortamının kırılma indisi değiştiğinde salınım açısı da değişmektedir [21]. Algılama ortamının kırılma indisinin ilk durumundaki salınım açısı ile kırılma indisinin değiştirildikten sonraki salınım açısı farklı olacağından dolayı ışık modüle edilmiş olur. Bu modülasyon algılama amaçlı kullanılmaktadır. Şekil 1.4.' de görüldüğü gibi algılama ortamının kırılma indisi değiştiği taktirde salınım dalga boyu veya salınım açısı değişmektedir. Bu noktada algılama için faydalı çıktılar oluşmaktadır. Şekil 1.4.' deki koordinat sisteminde *x* ekseni açı veya dalga boyunu ifade edebilir. Literatürdeki çalışmalar [22,23] dalga boyu sorgulama metodunun YPS tabanlı fiber optik algılayıcılarda yaygın olarak kullanıldığını göstermektedir. Bu durumun başlıca sebebi ise ışığın spektral dağılımının fiber optik kablo içerisinde kolay muhafaza edilebilmesidir. Fakat aynı durumun prizma için geçerli olduğunu söylemek oldukça

zordur. Bu sebepten dolayı açısal sorgulama metodu prizma temelli algılayıcılarda daha sık tercih edilmektedir. Şekil 1.4' de n_s: algılama ortamının kırılma indisini, δn_s: algılama ortamındaki kırılma indisi değişimini, $\delta\lambda_S$: salınım dalga boyundaki değişimi ifade etmektedir.



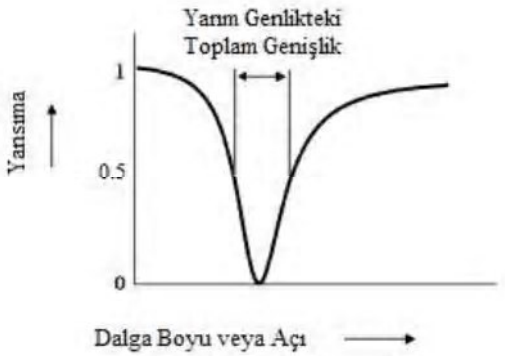
Şekil 1.4. YPS ile algılama [13].

1.1.2. Algılamadaki Parametreler

Algılamanın niteliğinin belirlenmesinde ve kıyaslanmasında bazı kilit parametreler bulunmaktadır. Hassasiyet bu parametrelerin başında gelmektedir. Hassasiyetin bilinmesi diğer parametrelerin elde edilmesi için önemlidir. Çünkü diğer parametrelerin bir kısmı hassasiyet aracılığıyla elde edilmektedir. Hassasiyetin elde edilmesi için salınım açısındaki veya salınım dalga boyundaki değişimin bulunması ilk adımdır. Bu aşamadan sonra elde edilen açı veya dalga boyu algılama ortamına ait kırılma indisi değişimine bölünür [24]. Böylelikle hassasiyet elde edilmiş olur. Şekil 1.4.' de algılama ortamının kırılma indisinin değişiminin salınım dalga boyunu değiştirdiği

görülmektedir. Şekil 1.4.' de *x* ekseni dalga boyunu ifade ederken *y* ekseni yansımayı ifade etmektedir. Literatürde YPS tabanlı algılayıcıların hassasiyet değerinin birimi °/RIU [25] veya nm/RIU [26] olarak verilmektedir. Han et al. [27] Kretschmann yapısında açısal sorgulama metodu uygulayarak YPS tabanlı algılayıcılar için hassasiyet ölçümleri yapmışlardır. Altın, gümüş ve bakır gibi metal katmanların üzerine ITO, grafen, MoS_2, molibden diselenit ($MoSe_2$) ve tungsten disülfit (WS_2) ile kaplamışlardır. Elde edilen en yüksek hassasiyet değeri Ag-ITO-WS_2 yapısında 219.4 °/RIU' dur. Han et al. [28] bir başka çalışmada 52 nm kalınlıktaki gümüş katmanının üzerine 10 nm ITO katmanının eklenmesinin hassasiyeti artırdığını göstermişlerdir. Bahsedilen hassasiyet değeri 122.8 °/RIU' dan 151.8 °/RIU' ya yükselmiştir. Rahman et al. [29] prizma üzerine Au-Grafen-WS_2 kaplamışlar ve açısal sorgulama metodunu uygulamışlardır. Grafen ve WS_2 katman sayılarının hassasiyete etkileri incelenmiştir. Elde ettikleri en yüksek hassasiyet değeri 95.71 °/RIU' dur. Literatürdeki açısal sorgulama metodu uygulanan çalışmalarda hassasiyet değerleri 50 °/RIU ile 500 °/RIU arasında değişmektedir. Fakat yapılan çalışmalar daha hassas algılayıcılar üretmeye yönelik olduğu için belirli bir üst sınır bulunmamaktadır. Odacı ve Aydemir [30] metal ortam olarak altın ve gümüşün iki katman şeklinde kullanıldığı yapıda MoS_2, $MoSe_2$, WS_2, tungsten diselenit (WSe_2) katmanların hassasiyete etkilerini incelemişlerdir. MoS_2' nin kullanıldığı yapıda hassasiyet değerini 4416 nm/RIU olarak elde etmişlerdir. WSe_2' nin kullanıldığı yapıda hassasiyet değeri artış göstermiş olup 5060 nm/RIU ölçülmüştür. WS_2 yapısında göre az da olsa biraz daha artış gözlemlenmiş ve hassasiyet 5152 nm/RIU' ya yükselmiştir. En yüksek hassasiyet tek katmanlı $MoSe_2$' de elde edilmiş olup 8096 nm/RIU' dur. Sultan et al. [31] altın ve gümüş kaplı YPS tabanlı çok modlu fiber optik kablonun hassasiyet değerini elde etmişlerdir. Metal ortam kalınlığının 50 nm olduğu durumlar göz önünde bulundurulmuştur. Teorik ve deneysel değerler birbirine oldukça yakındır. Altın katmanlı algılayıcı yapısı için hassasiyet değeri teorik çalışmada 3433.99 nm/RIU çıkarken deneysel çalışmada 3340 nm/RIU olarak çıkmıştır. Dalga boyu sorgulama metodunda hassasiyet değerleri genel olarak literatür çalışmalarında 1000 nm/RIU ile 10000 nm/RIU arasında değişmektedir. Açısal sorgulama metoduna benzer şekilde daha hassas algılayıcılar elde edilmesi hedeflenmekte olduğu için belirli bir üst sınır bulunmamaktadır.

Bir diğer önemli parametre ise doğruluk oranıdır. Doğruluk oranı bir algılayıcının ne kadar doğru algılama yaptığının ölçütüdür. Gayet hassas bir algılayıcı kabul edilebilir doğrulukta ölçüm yapmamış olabilir. İdealde bir algılayıcıdan yüksek hassasiyette ve doğrulukta ölçümler yapmış olması beklenmektedir. Doğruluk oranının belirlenmesi için yarım genlikteki toplam genişliğin bilinmesi gerekmektedir. Yarım genlikteki toplam genişlik, yansıma-salınım dalga boyu eğrisinde veya yansıma-salınım açısı eğrisinde genliğin 0.5 olduğu iki noktanın farkının mutlak değeridir [32]. Bu genişliğin büyük ölçüde dar olması doğruluğun o oranda yüksek olduğu anlamına gelir [32]. Bazı şartlarda yarım genlikteki toplam genişliğin sağ kolu oldukça sığ kalmaktadır. Böyle bir durumda doğruluk oranı belirsiz olur. Bu noktada algılayıcıya ait fiziksel özellikler veya algılayıcı tasarımında kullanılan materyaller doğruluk oranının belirlenebilmesi için yeniden düzenlenmelidir. Şekil 1.5.' de tipik bir algılayıcının yarım genlikteki toplam genişlik değerinin şematik gösterimi verilmektedir. Algılama, dalga boyu sorgulama metodunda görünür spektrumdaki ışık kaynağı ile gerçekleştirildiğinden dolayı dalga boyu sorgulama metodunda yarım genlikteki toplam genişlik parametresinin birimi nanometreyken açısal sorgulama metodunda derecedir. Doğruluk oranı, salınım dalga boyunun veya salınım açısının yarım genlikteki toplam genişliğe oranıdır. Doğruluk oranının birimi bulunmamaktadır. Basak et al. [33] altın (Au), çinko oksit (ZnO) ve tungsten diselenit (WS_2) kullanarak elde ettikleri algılayıcı yapısında en yüksek doğruluk oranını 2.97 bulmuşlardır. Yaptıkları çalışmalarda hassasiyet ile doğruluk oranı ters orantılı olarak değişmektedir. En yüksek hassasiyetin elde edildiği algılayıcı yapısında doğruluk oranı 1.57 bulunmuştur. Rahman et al [29] grafen ve WS_2 katman sayılarının parametrelere etkilerini araştırmışlardır. Elde ettikleri doğruluk oranı değerleri 1.708 ile 2.127 aralığında değişmektedir. Doğruluk oranı değeri literatürde yaygın olarak 0.5 ile 5 arasındadır.



Şekil 1.5. Yarım genlikteki toplam genişlik grafiği.

Ayrıca FOM (figure of merit) olarak adlandırılan başarım ölçüsü de oldukça önemli bir parametredir. Çünkü bu parametre matematiksel ifadesi gereği hassasiyet ve doğruluk oranını içerisinde barındırmaktadır. Algılayıcının etkinliğinin belirlenmesinde FOM değeri büyük bir önem taşımaktadır. Aynı zamanda FOM değeri literatürde pek çok algılayıcının kıyaslanması için referans parametre olarak görülmektedir. Basak et al. [33] bahsedilen çalışmada FOM değerinin 15.62 RIU^{-1} ile 29.66 RIU^{-1} arasında değiştiğini belirmektedir. Gan et al. [34] krom (Cr), gümüş (Ag), indiyum tin oksit (ITO) katmanlarının kullanıldığı yapıda algılayıcı parametrelerini incelemişlerdir. ITO katmanın 10 nm kalınlıkta eklenmesinin FOM değerini 15.19 RIU^{-1} değerinden 11.26 RIU^{-1} değerine düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Parametrelere ait matematiksel eşitlikler 2. bölümde verilmektedir.

Literatürde YPS tabanlı algılayıcılar için metal katman olarak sıklıkla altın ve gümüş tercih edilmektedir [35]. Bunun yanı sıra bakırın ve alüminyumun metal katman olarak kullanıldığı araştırmalar da mevcuttur [31,36]. Metal katman olarak altının tercih edildiği yapılar, gümüşün tercih edildiği yapılara göre genellikle daha yüksek hassasiyete sahip olmuştur [31,37]. Buna karşın gümüşün tercih edildiği yapılar, altının tercih edildiği yapılara göre genellikle daha yüksek doğruluk oranına sahiptir [37]. Bu tez çalışmasında hassasiyete öncelik verildiği için literatürdeki genel sonuçlardan hareketle metal katmanın altın olduğu durumlar incelenmiştir.

1.2. Geçiş Metali Dikalkojenitleri

Geçiş metali dikalkojenitleri nanoelektronikten nanofotoniğe kadar pek çok uygulama alanı bulmaktadırlar [38]. Bu yapılardan ilki Paulin tarafından 1923' de bulunmuştur [39]. 1960'lı yılların sonuna gelindiğinde yaklaşık 40 adet geçiş metali dikalkojeniti literatürde yerini almıştır [40].

Geçiş metali dikalkojenitleri temelde bir adet geçiş metali atomu ile iki adet kalkojenit atomunun adeta sıkışması ile oluşmaktadır. Sahip oldukları yapının kalınlığı neredeyse tek bir atom kalınlığındadır. Bu sebepten dolayı müthiş inceliklerini ifade etmek amacıyla 2 boyutlu materyaller olarak adlandırılmaktadırlar.

Grafen ve molibden disülfit (MoS_2) literatürde oldukça popüler olan geçiş metali dikalkojenitleridir. Grafen yüksek mukavemet, optik saydamlık, adaptasyon, esneklik, moleküler etkileşimlerle karşı isteksiz olma gibi özelliklere sahiptir [41]. Aynı zamanda YPS tabanlı algılayıcılarda hassasiyeti artırıcı etki göstermektedir [27-29,41]. Fakat ışığın sönümlenmesi için uygun bir ortam olması grafenin kullanıldığı algılayıcılarda doğruluk oranını düşürmektedir. Metallerin sahip oldukları oksitlenme eğiliminden dolayı 2 boyutlu materyaller aynı zamanda koruyucu katman olarak da kullanılmaktadır. Bahsedilen 2 boyutlu malzemelere ek olarak molibden diselenit ($MoSe_2$), tungsten disülfit (WS_2), tungsten diselenit (WSe_2) gibi diğer geçiş metali dikalkojenitleri de YPS tabanlı algılayıcı yapılarında kullanılmaktadır. Şekil 1.6.' da tipik bir geçiş metali dikalkojeniti yapısı görülmektedir.



Şekil 1.6. Tipik bir geçiş metali dikalkojeniti yapısı [42].

1.3. Literatür Çalışması

Literatürde YPS tabanlı algılayıcılar her ne kadar karmaşık yapılarda karşımıza çıksa da belirli başlıklar altında sınıflandırılabilir. Bazı çalışmalarda kullanılan materyallerin birbirlerine göre etkileri incelenirken bazılarında ise bu materyallerin kalınlıkları da dikkate alınmaktadır. Bu çalışmalara ek olarak iki boyutlu malzemelerin YPS tabanlı algılayıcılardaki kullanımları literatürün daha da zenginleşmesini sağlamıştır.

YPS tabanlı algılayıcıların deneysel çalışmalarında biyolojik örneklerin algılanması literatürde büyük alan kaplamaktadır. Roy et al. [43] tarafından gerçekleştirilen çalışmada su içerisinde *Escherichia Coli (E. Coli)* bakterisini algılama amaçlanmıştır. Çalışmada incelenen yapılar metal ve dielektrik ortamlar için sırasıyla Au-Si, Ag-Si, Au-GaAs, Ag-GaAs dikkate alınmıştır. Algılama ortamındaki kırılma indisi değişimi 1.33-1.4 aralığındadır. Au-GaAs yapısındaki hassasiyet değeri 1071.42 nm/RIU' dur. Bu hassasiyet değerinin elde edildiği yapıda altın kalınlığı 74 nm ve galyum arsenit kalınlığı 220 nm' dir. Aminah et al. [44] inceltilmiş fiber optik kablo ile YPS tabanlı algılayıcı üretmeyi hedeflemişlerdir. Metal ortam olarak altın kullanmış olup kalınlığı 50 nm' de sabit tutmuşlardır. Çalışma sonucunda saf su ile *E. Coli* tarafından kirletilmiş su arasında 77 nm' lik bir salınım kayması gözlemlemişlerdir. Kaushik et al. [45] YPS tabanlı fiber optik algılayıcı kullanarak *E. Coli* bakterisini algılamayı hedeflemişlerdir. Bu çalışmada bakteri tarafından kirletilmiş çözeltinin yoğunluğu ile kırılma indisinin değişimi arasında kuvvetli bir doğrusal ilişki olduğu görülmüştür. Elde edilen en yüksek hassasiyet 3135 nm/RIU' dur. DNA hibritleşmesinin algılandığı çalışmalar da YPS tabanlı algılayıcıların biyoalgılamadaki örnekleri arasında verilebilir. Shushama et al. [46] YPS tabanlı fiber optik algılayıcı ile DNA hibritleşmesini algılamayı amaçlamıştır. Algılama ortamının kırılma indisi DNA hibritleşmesine bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada da grafen kullanılmış olup katman sayısı 0-10 arasında değiştirilmiştir. Katman sayısındaki değişim, hassasiyeti 2500nm/RIU ile 3000 nm/RIU arasında doğrusal olarak etkilemiştir.

2 boyutlu malzemelerin çeşitliliği ve kat kat eklenmesi pek çok kombinasyona olanak tanımaktadır. Bu sebeple 2 boyutlu malzemelerin YPS tabanlı algılayıcılardaki etkilerine dair pek çok çalışma mevcuttur. Mishra et al. [47] metal ortam ile fiber optik kabloya ek olarak 2 boyutlu malzemelerin YPS tabanlı fiber optik algılayıcıya etkilerini incelemişlerdir. Altın, gümüş ve bakır üzerine grafen ve MoS_2 kaplandığı şartlardaki algılayıcı yapılarına ait değerleri elde etmişlerdir. Metal kalınlıklarını 40 nm' den 60 nm' ye kadar değiştirerek verileri analiz etmişlerdir. Metal ortamın kalınlığının değişmesiyle birlikte grafen ve MoS_2 katman sayılarının etkisini de incelemişlerdir. Çalışmada en yüksek hassasiyet, bakır ve alüminyum metalleri kullanıldığında elde edilmiştir. Elde edilen en yüksek hassasiyet 6200 nm/RIU' dur. Bu değerin elde edildiği algılayıcı yapısında metal kalınlığı 50 nm' dir. Grafen ve MoS_2 kalınlıkları sırasıyla 0.34 nm ve 0.65 nm' dir. Bununla birlikte grafen ve MoS_2 katman sayıları ise grafen ve MoS_2 için sırasıyla alüminyum üzerine 27 ve 1 adet, bakır üzerine 16 ve 1 adettir. Sharma et al. [48] YPS tabanlı fiber optik algılayıcı ile nem ölçümünü hedeflemişlerdir. Bağıl nem oranının %0-%100 arasında değişimi kırılma indisini değiştirmektedir. Kırılma indisindeki değişim 1.377-1.4425 aralığındadır. Algılayıcı yapılarında tungsten diselenit (WS_2) ve molibden disülfit (MoS_2) 2 boyutlu malzemelerinin etkilerini incelemişlerdir.

Çok kanallı çalışmalar YPS tabanlı algılayıcıların araştırılmasında bir başka yaklaşımdır. Bu yaklaşım tek bir yapı üzerinde birden fazla kanal ile algılama yapmayı hedeflemektedir. Otupiri et al. [49] YPS tabanlı fiber optik algılayıcının teorik analizini gerçekleştirmişlerdir. Çok kanallı algılayıcı simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Altın kalınlığı 45nm' dir. Bu çalışmada kırılma indisi değişimi 0.00002 çözünürlüğünde incelenmiştir. Hoseinian et al. [50] 3 kanallı YPS tabanlı fiber optik algılayıcı tasarımı yapmışlardır. Vagon tekeri olarak adlandırılan bu yapı literatürdeki diğer çalışmalardan çeşitli noktalarda ayrılır. Kanallardan birisi referans olarak seçilmiştir. Bu çalışmada altın kalınlığının 20nm' den ince olduğu durumlarda ve 40nm' den kalın olduğu durumlarda meydana gelen ikinci tepe noktası da incelenmektedir.

YPS tabanlı algılayıcı yapılardaki en temel inceleme malzemelerin kalınlıklarının parametrelere etkisidir. 2 boyutlu malzemelerin katman sayısının artırılması da temelde kalınlığın değişimi prensibine dayanmaktadır. Bu sebeple YPS tekniğinin en geniş araştırmaları, kullanılan metal ortamın kalınlığının incelenmesidir. Suziki et al. [51] YPS oluşumunda beyaz ışık kullanarak altın kalınlığının algılamaya etkisini incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada en etkin kalınlığın 65 nm civarı olduğunu göstermişlerdir. Algılama ortamının kırılma indisi 1.333-1.3469 aralında değişmektedir. Elde edilmiş en yüksek hassasiyet değeri 1557 nm/RIU' dur. Balaa et al. [52] gümüş kaplanmış bir fiber optik kablo ile YPS tekniği kullanarak algılama yapmayı hedeflemişlerdir. Bu çalışmada algılama ortamına ait kırılma indisi değerleri 1.35-1.41 arasında değişmiştir. Çalışmada temel düzeyde 3 katmanlı bir algılayıcı tasarımı incelenmiştir. Gümüş katmanın kalınlığının 28 nm, 50 nm, 60 nm ve 73 nm olduğu şartlar göz önüne alınmıştır. Elde edilen sonuçlar 50 nm kalınlığın en uygun kalınlık olduğunu göstermektedir. Yuan et al. [53] yapmış oldukları çalışma YPS tabanlı fiber optik algılayıcıya yönelik pek çok matematiksel ifadeyi bünyesinde barındırması bakımından oldukça önemlidir. Yapmış oldukları çalışmada metal ortam kalınlığı 40 nm, 50 nm ve 60 nm değerlerindedir. Simülasyon çalışmalarında algılama ortamının kırılma indisini 1.33 almışlardır. Al-Qazwini et al. [54] algılama ortamını sıvı varsayarak nümerik bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada metal ortam kalınlığının 30 nm, 40 nm, 50 nm, 70 nm ve 100 nm olduğu şartlarda salınım dalga boyu, hassasiyet, doğruluk oranı ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Sıvı ortamın kırılma indisini 1.33, 1.388 ve 1.441 değerlerinde varsaymışlardır. Xinlong et al. [55] simülasyonunu gerçekleştirmiş oldukları 5 katmanlı yapıda faz değişimini algılamayı hedeflemişlerdir. Altın kalınlığının 30 nm ile 45 nm olduğu aralığı mercek altına almışlardır. Yapmış oldukları çalışmada prizma kullanıldığı için açısal sorgulama metodunu uygulamışlardır.

Metal kalınlığının etkilerinin incelenmesine benzer şekilde ITO, ZnO, Cr gibi malzemelerin kalınlıkları da değiştirilerek incelenmektedir. Bu malzemelerin metal katmana ek bir katman olarak eklendiği veya tek başlarına eklendiği yapılar literatürde mevcuttur. Bu yapılardaki YPS tabanlı algılayıcıların etkilerinin incelenmesi literatürdeki bir diğer araştırma konusudur. Singh ve Gupta [56] yapmış oldukları

çalışmada farklı materyallerin hassasiyete etkilerini incelemişlerdir. Bu noktadaki temel hedefleri düşük yoğunluktaki gazları algılamaktır. Metal ortam olarak altın, gümüş kullanmanın yanı sıra ITO da kullanmışlardır. Algılama ortamında ise tungsten trioksit (WO_3), çinko oksit (ZnO) ve titanyum dioksiti (TiO_2) kullanmışlardır. Elde ettikleri veriler sonucunda ITO ve TiO_2 60 nm kalınlığında en yüksek hassasiyeti göstermiştir. Mishra et al. [57] YPS tabanlı ITO ve gümüş kaplı fiber optik algılayıcının teorik çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışma sonucunda ITO kaplı algılayıcının daha iyi hassasiyet göstermesine karşın gümüş kaplı algılayıcının daha yüksek doğruluk oranına sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Kapoor ve Sharma [58] ITO katmanın üzerine indiyum oksit (IO) eklendiği durumda elde edilen YPS tabanlı fiber optik algılayıcıya ait parametreleri analiz etmişlerdir. Elde ettikleri çalışmada ITO kalınlığının 40 nm' de sabit tutulduğu taktirde indiyum oksit (IO) katmanın kalınlığını 0 nm ile 40 nm arasında değiştirmişlerdir. Elde edilen hassasiyet değeri başta artış göstermiş devamında ise azalmıştır. En yüksek hassasiyet 40 nm kalınlıkta olan ITO katmanının üzerine 30 nm kalınlığında IO katmanının eklendiği durumda elde edilmiştir. Bahsedilen hassasiyet değeri 2170 nm/RIU' dur.

Literatürdeki konumları gereği diğer çalışmalardan ayrılan özelliklere sahip çalışmalar mevcuttur. Geleneksel çok modlu fiberlerin kullanımının yerine fotonik kristal fiberlerin kullanımı gündeme gelmiştir. Altın ve gümüş gibi metallerin ikisinin birden çok eklemli metalik yapı oluşturacak şekildeki kullanımı bir başka fikirdir. YPS tabanlı fiber optik algılayıcılarda fiber optik kablonun şekillerinin değiştirilmesi de bir diğer yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır. Ahmet et al. [59] geleneksel fiber optik kablolar yerine fotonik kristal fiberleri kullanmışlardır. Bu çalışmadaki amaç alkol moleküllerini algılamaktır. Karbon sayılarına göre sınıflandırmalar yapılmış olup çift kırınım vb. özelliklerinden bahsedilmiştir. Fotonik kristal fiberlerin YPS tabanlı algılayıcılardaki kullanımının hassasiyeti artırdığını ve çözünürlüğü ciddi oranda yükselttiğini belirtmişlerdir. Tabassum ve Gupta [60] YPS tabanlı fiber optik algılayıcı yapılarında elektrik alan dağılımının çeşitli metallerde nasıl farklılar gösterdiği üzerine bir çalışma yapmışlardır. YPS temelde boyuna elektrik alan ile uyarıldığı için bu çalışma fiziksel açıdan oldukça zengindir. Kullanılan metaller bu alanda literatürde oldukça yaygın karşılaşılan altın, gümüş, bakır ve alüminyumdur. Burada asıl hedef metallerin ikili

kombinasyonlarının yani bir metal katmanın üzerine ikinci bir metal katmanın eklenmesinin elektrik alan dağılımını nasıl etkilediğini incelemektir. Bu sebepten dolayı çok katmanlı yapılar için farklı bir bakış açısı sunulmaktadır. Gupta ve Verma [61] yapmış oldukları çalışmada YPS tekniğinin en temel yapılarından U şekilli fiber optik kablolar ile oluşturulan yapılarına kadar olan genel uygulamalarına dikkat çekmişlerdir.

2. BÖLÜM

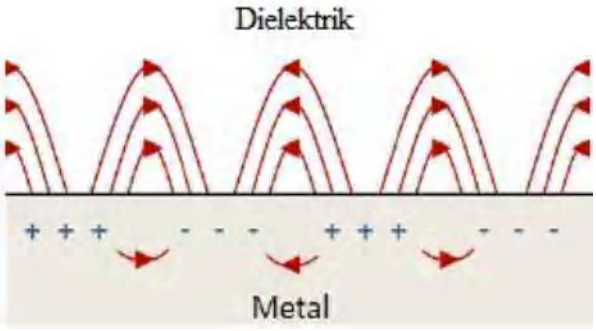
YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Yüzey Plazmonlarının Oluşum Mekanizması

Bir metalin içerisindeki serbest elektron sayısı yaklaşık olarak cm^3 başına 10^{23} adet civarındadır. Buna karşın pozitif yük kütlesi serbest elektronlar ile karşılaştırıldığında kıyaslanamayacak kadar fazladır. Serbest elektronların bölgesel yoğunluğu harici bir elektrik alan uygulanarak değiştirilebilir. Fakat bu değişim serbest elektronların pozitif yükler tarafından eski haline döndürülmesi ile sonuçlanır. Elektrik alanın uyguladığı kuvvete çekici yönlendirme gücü denmektedir. Pozitif yüklerin uyguladığı kuvvete ise itici restore kuvveti denmektedir. Bu iki kuvvetin sürekli birbirlerini dengelemeye çalışmaları sonucu Şekil 2.1.' de görüldüğü gibi metal ortamda boyuna bir salınım meydana gelir. YPS' nin oluşabilmesi için enine manyetik alanlı bir elektromanyetik dalganın metal-dielektrik yüzeye gelmek zorunda olmasının sebebi de budur. Enine manyetik alanlı dalganın sahip olduğu boyuna elektrik alan bileşeni yüzey plazmonlarını uyarmaktadır. Bir metal için plazma frekansı denklem (2.1)' de verilmektedir [13,62].

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi\varphi e^2}{m_0}} \tag{2.1}$$

Denklem (2.1)'de φ: serbest elektron yoğunluğunu, e: elektron yükünü ve m_0: elektron kütlesini ifade etmektedir.



Şekil 2.1. Yüzey plazma salınımı [63].

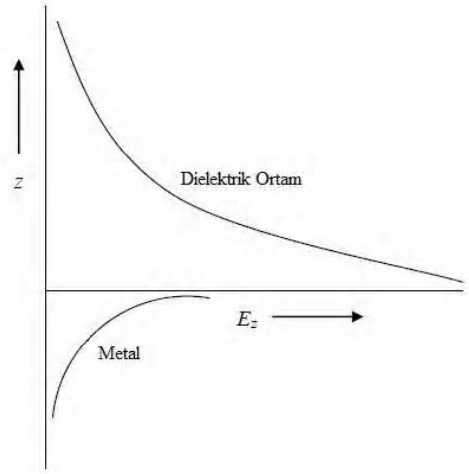
Burada bahsedilen salınımların metal-dielektrik ara yüzeyde girişim oluşturması evre uyumlu olduğunda yüzey plazmonları uyarılmış olur. YP dalgasına ait matematiksel ifade genel hali ile denklem (2.2)' de verilmektedir [13].

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E_0}\exp\left[i(k_x x \pm k_z z - \omega t)\right] \tag{2.2}$$

Bu denklem ifade edilirken metal-dielektrik ortamın z ekseni boyunca üst üste eklendiği varsayılmıştır. Buna ek olarak YP dalgasının ise x ekseni boyunca yayıldığı dikkate alınmıştır. Denklem (2.2)' de görülen ± ifadesi ise sırasıyla $z \geq 0$ için + ve $z \leq 0$ için – değerini almaktadır. Denklem (2.2)' deki bir diğer ifade olan k_z ifadesi üstel olarak sönümlenen yayılım sabitini ifade etmektedir. Dalga vektörünü ifade eden k_x değeri $\frac{2\pi}{\lambda_p}$, ye eşit olup λ_p: plazma dalga boyunu temsil etmektedir. Buradan hareketle YP dalgalarının metal-dielektrik ara yüzeydeki yayılım ilişkisi denklem (2.3)' de verilmektedir [44].

$$k_{yp} = k_x = \frac{\omega}{c}\sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{\varepsilon_m + \varepsilon_d}} \tag{2.3}$$

Bu denklemde ε_m ve ε_d sırasıyla metal ortamın ve dielektrik ortamın dielektrik katsayılarıdır. Ayrıca ω ve c değerleri ise sırasıyla gelen ışığın açısal frekansı ve ışığın boşluktaki hızıdır. Şekil 2.2.' de YP dalgasının üstel sönümlenmesinin şematik gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 2.2. Metal ve dielektrik ortamdaki yayılım sabitlerinin sönümlenmesi [13].

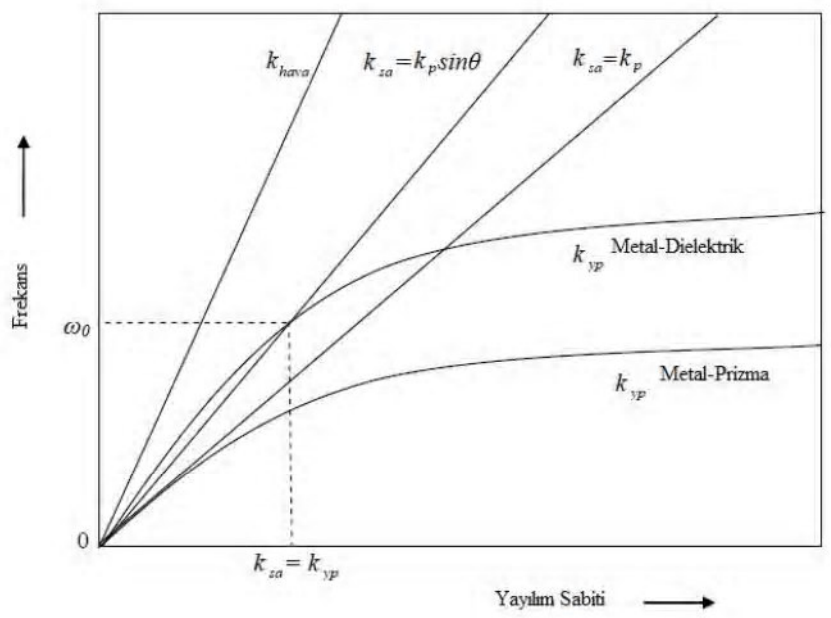
Bilindiği üzere hava ortamında yayılan ω frekanslı ışık dalgasına ait yayılım sabiti aşağıdaki denklemdeki gibidir [13,15].

$$k_h = \frac{\omega}{c} \tag{2.4}$$

Yüzey plazmon dalgalarının ışık ile uyarılabilmesi için yüzey plazmonuna ait dalga yayılım sabitinin ışığa ait dalga yayılım sabitine eşit olması gerekmektedir. Fakat dielektrik ortamın dielektrik katsayısının pozitif olmasına karşın metal ortamın dielektrik katsayısının negatif olması, YP dalgalarının yayılım sabitinin hava ortamında yayılan ışığın yayılım sabitinden daima daha büyük olması ile sonuçlanmaktadır. Bu sebepten dolayı ışığa ait yayılım sabitinin artırılması gerekmektedir. Bunun için ışığın daha yüksek momentuma sahip olması, dolayısıyla da gelen ışığın yüksek enerji ihtiyacının giderilmesi gerekmektedir. Bu amaçla ışığın yayıldığı ortamın kırılma indisinin artırılması için prizma kullanılmaktadır. Böylece prizmalarda ışığın sönen alan karakteristiği ortaya çıkmaktadır. Sönen alana ait yayılım sabiti yüzey plazmon dalgalarına ait yayılım sabitine eşit olduğu durumlarda YP dalgaları ışık tarafından uyarılmış olur. Denklem (2.5)' de bir prizmada yayılan ışığın sönen alan karakteristiğine ait yayılım sabiti eşitliği verilmektedir [53].

$$k_{sa} = \frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon_p}\sin\theta \qquad (2.5)$$

Burada ε_p: prizmaya ait dielektrik katsayısını, θ: ışığın geliş açısını ifade etmektedir. Işık tarafından yüzey plazmon dalgalarının uyarılması için yayılım sabitlerinin genel şeması Şekil 2.3.' de verilmektedir. Şekil 2.3.' de k_{hava}: hava ortamında yayılan ışığın yayılım sabitini, k_{sa}: sönen alana ait dalganın yayılım sabitini, k_p: prizmada yayılan ışığın yayılım sabitini, k_{yp}: yüzey plazmonu dalgasına ait yayılım sabitini ifade etmektedir.



Şekil 2.3. Yayılım sabitleri eğrisi [15].

Yüzey plazmonlarının uyarılmasında dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise metal ortamın dielektrik katsayısının karmaşık sayı olmasıdır. Burada ışığın yayıldığı ortamın dielektrik katsayısının sanal bileşeni bulunmadığından denklemin her iki tarafının eşitlenmesi için yüzey plazmon dalgalarına ait yayılım sabitinin sadece gerçek kısmının alınması gerekmektedir. Bahsedilen eşitlik denklem (2.6)' da verilmektedir [48].

$$\frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon_p}\sin\theta = Re\left\{\frac{\omega}{c}\sqrt{\frac{\varepsilon_m\varepsilon_d}{\varepsilon_m+\varepsilon_d}}\right\} \quad (2.6)$$

Denklem (2.6)' da verilen denklemin sol tarafı prizmada yayılan ışığın sönen alan karakteristiğine ait yayılım sabiti iken sağ tarafı ise yüzey plazmon dalgalarına ait yayılım sabitinin gerçek kısmıdır.

2.2. YPS Tabanlı Algılama Sistemi ve Algılama Parametreleri

Temelde bir YPS tabanlı algılayıcı 3 materyalden oluşmaktadır. Bunlardan ilki ışığın ilerleyebileceği yoğun bir ortamdır. Bu ortam prizma veya fiber optik kablonun öz kısmıdır. İkinci materyal ise gayet ince metal bir katmandır. Üçüncü ortam ise algılama bölgesidir yani algılanacak materyalin kendisidir. Her üç ortamın da dielektrik katsayısı vardır. Işık yoğun bir ortam boyunca ilerlemekteyken metal ortama geldiğinde 3 durumla karşı karşıya kalmaktadır. Bunlar; yansıma, emilme ve iletimdir [15]. Işığın metal ortam ile karşı karşıya kaldığında metal ortama iletimi söz konusu değildir. Bu durumda ışık ya yansıma yapacak ya da sahip olduğu foton enerjisinin tamamını metal ortama aktaracaktır. Bir başka ifade ile enerji metal ortam tarafından emilecektir. Böylelikle yansıma değeri de 0 olacaktır. Yansıma değerinin sıfır olması ışığın enerjisinin tamamının metal ortama geçmesi demektir. Metal ortama geçiş, ışığın enerjisinin öz-metal ara yüzeyinde sönen alan dalgaları oluşturabilmesi durumunda söz konusudur. Sönen alan dalgalarının oluşması ise YP dalgalarının oluşabilmesine bağlıdır. Çünkü ışıktan alınan enerji metal-öz ara yüzeyinde sönen alan dalgalarına, sönen alan dalgaları da metal-algılama bölgesi ara yüzeyinde YP dalgalarına dönüşmektedir. Eğer ki sönen alan dalgaları, YP dalgalarını oluşturamayacaksa ışık emilme yapmak yerine yansıma yapacaktır. Yani YPS fenomeni en baştan sönen alan dalgalarının oluşamamasıyla başlamayacaktır. YP dalgalarının oluşması ise algılama bölgesinin optik özelliklerine bağlı olduğu için YPS tabanlı algılayıcılardaki algılama mekanizması algılama bölgesiyle ilişkilenmiş olur. Kısaca ışığın yansımasının 0 olması ışığın enerjisinin YPS oluşturmuş olması anlamına gelmektedir. YPS' nin yalnızca ışığın geldiği yüzeye paralel olan *p* kutuplu dalgalar ile gerçekleştirilmesinden dolayı *p* kutuplu dalgalara ait yansımanın bulunması yeterlidir. Temel bir YPS tabanlı algılayıcıda yansıma değeri aşağıdaki denklemlerden elde edilir.

$$r_{pm} = \frac{k_{pz}\varepsilon_m - k_{mz}\varepsilon_p}{k_{pz}\varepsilon_m + k_{mz}\varepsilon_p} \quad (2.7)$$

$$r_{ms} = \frac{k_{mz}\varepsilon_s - k_{sz}\varepsilon_m}{k_{mz}\varepsilon_s + k_{sz}\varepsilon_m} \quad (2.8)$$

$$k_{jz} = \sqrt{\left(\varepsilon_j \frac{\omega^2}{c^2} - k_x^2\right)} \quad (2.9)$$

$$k_x = \frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon_p}\sin\theta \quad (2.10)$$

$$R = \left|\frac{r_{pm} + r_{ms}\exp(2ik_{mz}d)}{1 + r_{pm}r_{ms}\exp(2ik_{mz}d)}\right|^2 \quad (2.11)$$

Bu denklemlerde *j* indisi *p* (prizma), *m* (metal), *s* (algılama ortamı) harfleri için belirteçtir. Yukarıda verilen denklemlerde k_{pz}: prizmaya ait yayılım sabitini, k_{mz}: metale ait yayılım sabitini, k_{sz}: algılama ortamına ait yayılım sabitini, ε_m: metale ait dielektrik katsayıyı, ε_p: prizmaya ait dielektrik kat sayıyı, ε_s: algılama ortamına ait dielektrik katsayıyı, θ: ışığın geliş açısını, *d*: metalin kalınlığını ifade etmektedir [64].

Hassasiyet değeri, salınım açısındaki veya salınım dalga boyundaki kaymaya bağlıdır. Algılama ortamının kırılma indisi değiştikçe salınım dalga boyu da değişmektedir. Hassasiyet kavramı, kırılma indisi değişimi başına salınım dalga boyundaki değişimdir. Değişimin algılanması için ilk durum ile ikinci durum arasında farklılıklar olması gerekmektedir. YPS tabanlı bir algılayıcının algılama prensibi, algılama ortamının kırılma indisi ile ilişkilidir. Algılama ortamının kırılma indisi belirli bir değerdeyken örneğin 1.33 değerindeyken algılayıcı yapısının salınım dalga boyu ölçülür. Algılama ortamının kırılma indisi değiştiğinde örneğin 1.33 değerinden 1.37 değerine değiştiğinde salınım dalga boyu da değişmektedir. Salınım dalga boyunun değişiminden hareketle algılama gerçekleştirilmiş olur. Denklem (2.12)' de hassasiyet değerinin matematiksel ifadesi görülmektedir [31,43,46]. Denklem (2.12)' de $\Delta\lambda_s$: salınım dalga boyundaki değişimi, Δn_s: algılama ortamının kırılma indisindeki değişimi ifade etmektedir.

$$S = \frac{\Delta\lambda_s}{\Delta n_s}, \left({}^{nm}/_{RIU}\right) \quad (2.12)$$

Doğruluk oranı bir algılayıcının hassasiyetinin bilinmesi kadar gereklidir. Doğruluk oranı bir algılayıcının ne kadar doğru ölçümler gerçekleştirdiğinin bir ölçütüdür. Doğruluk oranının yüksek olması için algılayıcı tepkisinin oldukça dar bir aralıkta gerçekleşmesi gerekmektedir. Bir başka ifade ile algılayıcı yapısının salınıma başlaması dar bir bantta gerçekleşmelidir. Denklem (2.13)' de doğruluk oranına ait matematiksel ifade görülmektedir [31,46]. Denklem (2.13)' de $\Delta\lambda_{0.5}$ ifadesi yarım genlikteki toplam genişliktir.

$$D = \frac{\Delta\lambda_S}{\Delta\lambda_{0.5}} \tag{2.13}$$

Doğası gereği bünyesinde hassasiyet ve doğruluk oranına ait bileşenleri barındırdığı için FOM parametresi de oldukça önemli bir parametredir. Bu sebeple FOM değeri bir algılayıcının etkinliğinin belirlenmesinde ve diğer algılayıcılar ile karşılaştırılmasında kullanılmaktadır. FOM parametresine ait matematiksel ifade, denklem (2.14)' de verilmektedir [31].

$$FOM = \frac{S}{\Delta\lambda_{0.5}}, (RIU^{-1}) \tag{2.14}$$

YPS tabanlı fiber optik algılayıcılarda iletilen güç algılanması hedeflenen materyalin ışığı modüle etmesiyle ilişkilidir. YPS tabanlı fiber optik algılayıcıda ışık fiberin bir ucundan diğer ucuna gidecek şekilde yönlendirilmektedir. Yönlendirilen ışık fiber içerisinde tam yansımalar oluşturacak şekilde ilerler. Işık algılama bölgesine geldiğinde sahip olduğu yayılım sabiti yüzey plazmonuna ait yayılım sabitine eşitse metal katman ile fiber özü arasında sönümlenir ve bu sönümlenme metal katman ile algılama bölgesi arasında YPS meydana getirir. Böylelikle fiberin bir ucundan diğerine iletim gerçekleşmez ve fiber optik kablonun diğer ucunda ışık görülemez. Buradan da anlaşılacağı gibi iletilen güç yansıma ile ilişkilidir. Normal şartlar altında bir fiber optik kablo boyunca iletilen gücün bulunması *p* ve *s* kutuplu dalgalar için ayrı ayrı hesaplanır ve aritmetik ortalaması alınır. Metal-dielektrik ara yüzeye dik olan düzlem boyunca ışığın geldiği varsayıldığında o düzleme paralel olan dalgalar *p* kutuplu dalgalar, dik gelen dalgalar *s* kutuplu dalgalar olarak adlandırılmaktadır. Almancadaki parallel ve senkrecht kelimelerinin baş harfleri ile adlandırılmaktadırlar. Doğası gereği YP dalgaları *p* kutuplu dalgalar ile uyarılmaktadır. Bu sebeple bu başlık altında yalnızca *p*

kutuplu dalgalara ait matematiksel ifadeler verilmektedir. Bir fiber optik kablonun bir ucundan diğer ucuna iletilen güç, denklem (2.15)' den hareketle elde edilmektedir [57].

$$P_{trans} = \left[\frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} R_p^{N_{ref}(\theta)} \frac{n_1^2 \sin\theta \cos\theta}{\left(1-n_1^2(\cos\theta)^2\right)^2} d\theta}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{n_1^2 \sin\theta \cos\theta}{\left(1-n_1^2(\cos\theta)^2\right)^2} d\theta} \right] \tag{2.15}$$

$$\theta_1 : \sin^{-1}\left({}^{n_{cl}}/_{n_1}\right) \tag{2.16}$$

$$\theta_2 : \frac{\pi}{2} \tag{2.17}$$

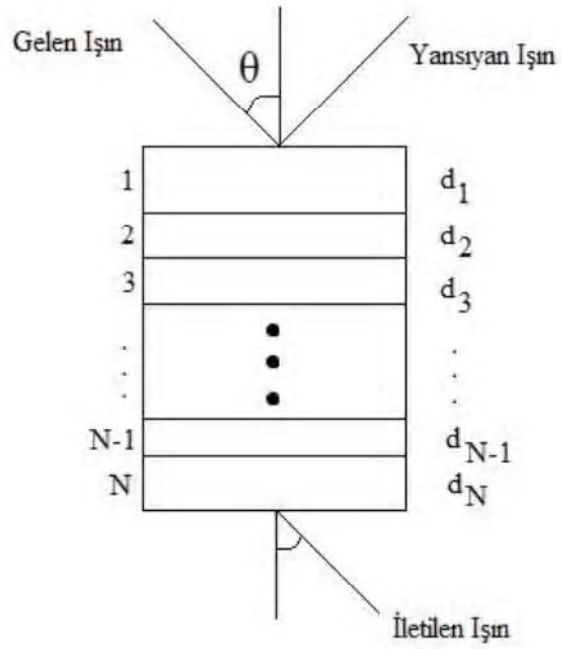
$$N_{ref}(\theta) = \frac{L}{D \tan\theta} \tag{2.18}$$

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_{cl}^2} \tag{2.19}$$

Denklem (2.18)' de ifade edilen L değeri algılama bölgesi olarak belirlenen kısmın uzunluğu iken D değeri ise fiber özünün çapıdır. Denklem (2.16) ve denklem (2.19)' da n_{cl}: fiber yeleğinin kırılma indisini, n_1: fiber özünün kırılma indisini ifade etmektedir.

2.3. Çok Katmanlı Yapılarda Transfer Matris Metodu

Çok katmanlı yapılarda yansımayı elde etmenin birden fazla yolu vardır. Bunlar; alan takibi metodu, nihai dalga metodu ve transfer matris metodudur [57]. Bunlardan transfer matris metodu oldukça pratiktir. Bu özelliğinin yanı sıra herhangi bir yaklaşık ifade barındırmamaktadır. Bu sebeplerden dolayı transfer matris metodu literatürde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Transfer matris metodunda N adet katmanın bulunduğu yapı Şekil 2.4.' de verilmiştir.



Şekil 2.4. Transfer matris metodunda N katmanlı yapının şematik gösterimi (görselde her bir katman dielektrik olabileceği için alttaki ifade iletilen ışın olarak adlandırılmıştır).

Transfer matris metodunda *p* ve *s* kutuplu dalgalar için yansıma değeri bulunabilir. Fakat YP dalgaları doğası gereği *p* kutuplu dalgalar ile uyarılmaktadır. Transfer matris metoduna ait ifadeler aşağıdaki denklemlerden görülmektedir [57,65].

$$M = \prod_{k=2}^{N-1} M_k = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \tag{2.20}$$

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta_k & -i\sin\beta_k/q_k \\ -iq_k\sin\beta_k & \cos\beta_k \end{bmatrix} \tag{2.21}$$

$$R_p = \left| \frac{(M_{11}+M_{12}q_N)q_1-(M_{21}+M_{22}q_N)}{(M_{11}+M_{12}q_N)q_1+(M_{21}+M_{22}q_N)} \right|^2 \tag{2.22}$$

Transfer matris metoduna ait denklemlerden hareketle *k* harfi sıralamadaki o katmana ait karakteristik özellikleri ifade etmektedir. Burada β_k faz faktörünü ifade eder ve denklem (2.23)' de verilmiştir.

$$\beta_k = \frac{2\pi d_k}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_k - n_1^2\,(\sin\theta)^2} \tag{2.23}$$

Aynı zamanda q_k ifadesi optik admitans olarak adlandırılmaktadır ve denklem (2.24)' de verilmiştir.

$$q_k = \frac{1}{\varepsilon_k}\sqrt{\varepsilon_k - n_1^2\,(\sin\theta)^2} \tag{2.24}$$

Denklem (2.23)' deki ve denklem (2.24)' deki n_1 ifadesi dielektrik ortamın kırılma indisini ifade etmektedir. Bir başka ifade ile 1. ortamın kırılma indisini ifade etmektedir. İlgili denklemlerdeki θ değeri ise ışığın geliş açısıdır. Yine benzer şekilde q_1 1. katmana ait ifadeleri, q_N en üst katmana ait ifadeleri belirtir.

Yukarıdaki denklemlerden anlaşılacağı üzere her katmana ait dielektrik katsayıların bulunması gerekmektedir. Bu sebeple simülasyon çalışmalarında kullanılan malzemelere ait dielektrik katsayıları hesaplanmaktadır.

2.4. Sellmeier Eşitliği

Fiber optik kablonun özünün kırılma indisi dalga boyu bağımlıdır. Literatürde çok modlu silika fiber için öze ait kırılma indisi Sellmeier eşitliğinden elde edilmektedir. Sellmeier eşitliği denklem (2.25)' de verilmektedir. Silika fiber için literatür çalışmalarında kullanılan değerler Tablo 2.1.' de verilmiştir [47].

Tablo 2.1. Sellmeier eşitliği için çok modlu fiber optik kabloya ait değerler.

a_1	0.6961663 µm	b_1	0.0684043 µm
a_2	0.4079426 µm	b_2	0.1162414 µm
a_3	0.8974794 µm	b_3	9.8961610 µm

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{a_1\lambda^2}{\lambda^2 - b_1^2} + \frac{a_2\lambda^2}{\lambda^2 - b_2^2} + \frac{a_2\lambda^2}{a^3 - b_3^2}} \tag{2.25}$$

2.5. Drude Formülü

Metallerin dielektrik katsayıları karmaşık sayılardır. Hem sanal hem de gerçek kısımlarının olması metallerin özelliklerinden birisidir. Literatürde metallerin dielektrik sabitlerinin bulunması için Drude formülü kullanılmaktadır. Drude formülü denklem (2.26)' da verilmektedir [31,47].

$$\varepsilon_m(\lambda) = \varepsilon_m' + i\varepsilon_m'' = 1 - \frac{\lambda^2\lambda_c}{\lambda_p^2(\lambda_c + i\lambda)} \tag{2.26}$$

Metalin dielektrik sabitinin bulunabilmesi için plazma dalga boyunun ve çarpışma dalga boyunun bilinmesi gerekmektedir. Denklem (2.26)' da λ_p plazma dalga boyunu ifade ederken λ_c değeri çarpışma dalga boyunu ifade etmektedir. Bazı metallerin plazma ve çarpışma dalga boyu değerleri Tablo 2.2.' de verilmiştir [31,47].

Tablo 2.2. Bazı metallerin plazma ve çarpışma dalga boyu değerleri.

Malzeme	λ_p(μm)	λ_c(μm)
Altın	0.16826	8.9342
Gümüş	0.14541	17.614
Bakır	0.13617	40.852
Alüminyum	0.10657	24.511

2.7. Simülasyonlarda Kullanılan 2 Boyutlu Malzemelerin Kırılma İndisi

Simülasyon çalışmalarında 2 boyutlu malzemeler olarak grafen ve MoS_2 kullanılmıştır. 2 boyutlu malzemelerin kırılma indisine ait bilgiler literatürdeki çalışmalardan elde edilmiştir. Grafen için genel geçer bir eşitlik literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Grafene ait kırılma indisinin verildiği matematiksel ifade denklem (2.27)' de verilmektedir [29].

$$n(\lambda) = 3 + i\frac{C}{3}\lambda \tag{2.27}$$

Denklem (2.27)' deki C değeri 5.446 μm^{-1}' dir.

MoS_2 ait kırılma indisinin dalga boyu bağımlılığını ifade eden genel geçer bir formül bulunmadığından dolayı MoS_2 ait kırılma indisini literatürdeki deneysel çalışmalardan elde edilmiştir [66].

2.8. ITO ve ZnO Katmanlarının Dielektrik Katsayılarının Bulunması

Simülasyon çalışmalarında altın katmanının üstüne ITO ve ZnO katmanları eklenmiştir. ITO katmanının optik modülatör özelliğinden, görünür spektrumda ve yakın kızıl ötesi bölgede büyük oranda transparan oluşundan dolayı YPS tabanlı fiber optik algılayıcıya olan etkileri simülasyon çalışmalarında analiz edilmiştir [28]. ITO katmanına ait dielektrik katsayı denklem (2.28)'de verilmektedir [27]. Denklem (2.28)' de λ_c: 11.2107 μm ve λ_p: 0.56497 μm' dir.

$$\varepsilon_{ITO}(\lambda) = 3.8 - \frac{\lambda^2 \lambda_c}{\lambda_p^2(\lambda_c + i\lambda)} \tag{2.28}$$

ZnO diğer malzemeler ile karşılaştırıldığında termal anlamda daha dayanıklıdır. Buna ek olarak kimyasal kararlılığı ve mekanik mukavemeti de gayet iyidir [67]. Bu sebeple simülasyon çalışmalarında ZnO katmanın etkileri incelenmektedir. ZnO katmanı için literatürdeki deneysel çalışmalar sonucu elde edilen dielektrik katsayı değerleri kullanılmıştır [68].

3. BÖLÜM

BULGULAR

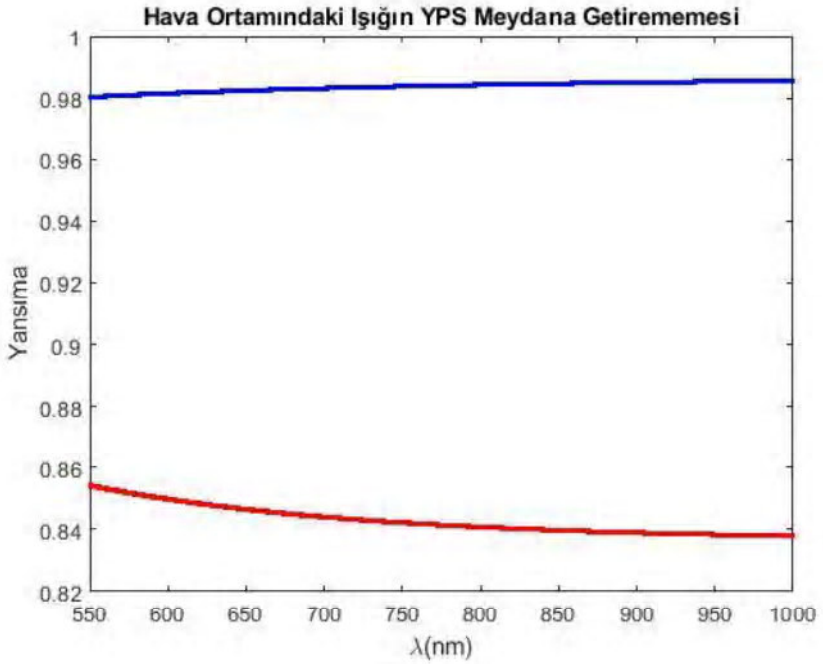
3.1. Araştırma Modeli

Tez çalışmasında YPS tabanlı fiber optik algılayıcıların incelenmesi ve simülasyon çalışmaları bulunmaktadır. Simülasyonlarda kullanılan algılayıcı tasarımı için seçilen dielektrik ortam çok modlu silika fiberdir. Kullanılan metot, fiber optik kabloların kullanıldığı YPS tabanlı algılayıcılarda literatürde yaygın olarak karşılaşılan dalga boyu sorgulama metodudur. Fiber özünün üzerindeki metal katmanda altın kullanılmaktadır. Altın kalınlığının 40 nm, 50 nm ve 60 nm olduğu durumlarda grafen ve MoS_2 geçiş metal dikalkojenitlerinin algılayıcı parametrelerine olan etkileri incelenmektedir. Altın kalınlığının değiştiği her durum için grafen katman sayısı 1' den 5' e kadar değiştirilerek etkileri incelenmiştir. Molibden disülfit katman sayısı 1 olarak belirlenmiştir. Buna ek olarak altın 20 nm, 25 nm ve 30 nm kalınlıktayken 0 nm, 1 nm, 3 nm, 6 nm, 12 nm ve 20 nm ITO kalınlığının hassasiyete etkisi incelenmiştir. Altın kalınlığının 40 nm, 50 nm ve 60 nm olduğu şartlarda 0 nm, 5 nm, 10 nm, 15 nm ve 20 nm kalınlığındaki ITO katmanının hassasiyete olan etkileri incelenmiştir. Benzer şekilde Altın kalınlığının 20 nm, 30 nm, 40 nm, 50 nm ve 60 nm olduğu durumda 0 nm, 5 nm, 10 nm, 15 nm ve 20 nm kalınlığındaki ZnO katmanının hassasiyete etkileri incelenmiştir. Algılama ortamının kırılma indisi değeri mikroorganizmalar için literatürde yaygın olarak kullanılan 1.333-1.337 aralığında belirlenmiştir.

3.2. YPS Oluşumu için Ön Koşulların Simülasyonları

3.2.1. Hava Ortamında YPS

Hava ortamında yayılıp gelen ışığın momentumunun yetersiz olması sebebiyle yüzey plazmon dalgaları uyarılamamaktadır. Şekil 3.1.' de görüldüğü üzere hava ortamında yayılıp gelen *p* ve *s* kutuplu dalgalar yüzey plazmon dalgalarını oluşturamamıştır. Bu sebeple yansıma en düşük değeri yani idealde 0 değerini gösterememektedir. Şekil 3.1.' de mavi ile gösterilen dalga *s* kutuplu dalgayken kırmızı ile gösterilen dalga *p* kutupludur.



Şekil 3.1. Hava ortamında YPS fenomeni.

3.2.2. Kutuplu Dalgaların Uyartıma Etkisinin İncelenmesi

Belirli şartlar altında elde edilen salınım dalga boyu, her iki kutuplu dalga açısından incelenmiştir. Denklem (3.1), (3.2), (3.3), (3.4), (3.5), (3.6), (3.7) ve (3.8)' den

faydalanılarak elde edilen simülasyon sonuçları, YP dalgalarının *s* kutuplu dalgalar ile uyarımın gerçekleşmediğini ispatlamaktadır [15,62,64].

$$k_{jz} = \sqrt{\left(\varepsilon_j \frac{\omega^2}{c^2} - k_x^2\right)} \tag{3.1}$$

$$k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_p} \sin\theta \tag{3.2}$$

$$r_{pm}{}^{p} = \frac{k_{pz}\varepsilon_m - k_{mz}\varepsilon_p}{k_{pz}\varepsilon_m + k_{mz}\varepsilon_p} \tag{3.3}$$

$$r_{ms}{}^{p} = \frac{k_{mz}\varepsilon_s - k_{sz}\varepsilon_m}{k_{mz}\varepsilon_s + k_{sz}\varepsilon_m} \tag{3.4}$$

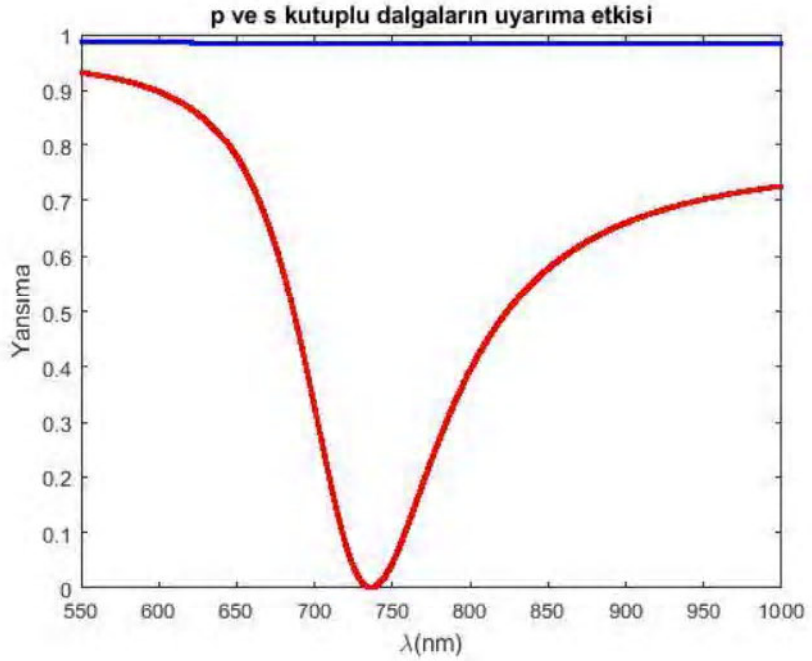
$$R^{p} = \left| \frac{r_{pm}{}^{p} + r_{ms}{}^{p} \exp(2ik_{mz}d)}{1 + r_{pm}{}^{p} r_{ms}{}^{p} \exp(2ik_{mz}d)} \right|^2 \tag{3.5}$$

$$r_{pm}{}^{s} = \frac{k_{pz} - k_{mz}}{k_{pz} + k_{mz}} \tag{3.6}$$

$$r_{ms}{}^{s} = \frac{k_{mz} - k_{sz}}{k_{mz} + k_{sz}} \tag{3.7}$$

$$R^{s} = \left| \frac{r_{pm}{}^{s} + r_{ms}{}^{s} \exp(2ik_{mz}d)}{1 + r_{pm}{}^{s} r_{ms}{}^{s} \exp(2ik_{mz}d)} \right|^2 \tag{3.8}$$

Yukarıdaki denklemlerde *j* indisi *p* (prizma), *m* (metal), *s* (algılama ortamı) harfleri için belirteçtir. Üstel olarak gösterilen *p* ve *s* indisleri sırasıyla paralel ve dik kutuplu dalgalar için yansıma değerlerini ifade etmektedir. Yukarıda verilen denklemlerde k_{pz}: prizmaya ait yayılım sabitini, k_{mz}**:** metale ait yayılım sabitini, k_{sz}**:** algılama ortamına ait yayılım sabitini, ε_m: metale ait dielektrik katsayıyı, ε_p**:** prizmaya ait dielektrik kat sayıyı, ε_s**:** algılama ortamına ait dielektrik katsayıyı, θ**:** ışığın geliş açısını, *d*: metalin kalınlığını, *c*: ışığın boşluktaki hızını, ω: ışığın açısal frekansını ifade etmektedir.



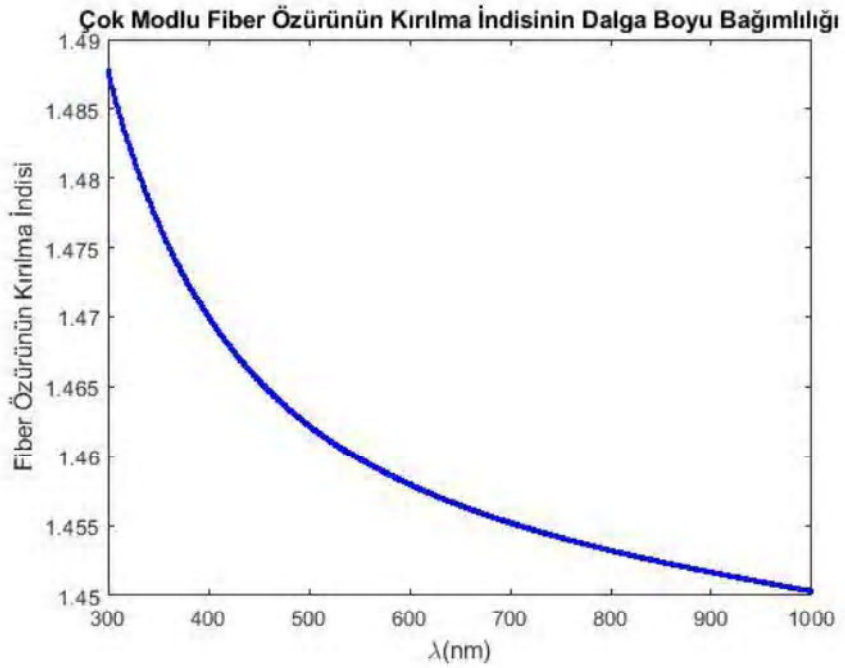
Şekil 3.2. Her iki kutuplu dalganın yüzey plazmon dalgalarını uyarmadaki etkisi.

Şekil 3.2.' de mavi ile gösterilen dalga *s* kutuplu dalgayken kırmızı ile gösterilen dalga *p* kutupludur. Yansımanın azalarak 0 olması ışığın enerjisinin YPD oluşturmaya başladığını göstermektedir.

3.3. Çok Modlu Fiberin Görünür Spektrumdaki Kırılma İndisi

Çok modlu silika fiberin kırılma indisinin bulunmasının gerekliliğinden önceki bölümlerde bahsedilmiştir. YPS tabanlı fiber optik algılayıcılarda dalga boyu sorgulama metodu uygulanmaktadır. Fiberin öz kısmının kırılma indisi de dalga boyuna bağımlıdır. Bu bağımlılık denklem (3.9)' dan hareketle elde edilmektedir [47]. Burada; a_1=0.6961663, a_2=0.4079426, a_3=0.8974794, b_1=0.0684043, b_2=0.1162414, b_3= 9.896161 olup λ dalga boyu mikrometre mertebesindedir. Bu sebeple dalga boyundaki değişim her ne kadar az da olsa YPS tabanlı algılayıcıların hassasiyeti sebebiyle dikkate alınmak zorundadır. Bu tez çalışmasında genellikle görünür spektrumda ve yakın kızıl ötesi bölgede incelemeler gerçekleştirildiği için fiber özünün dalga boyu bağımlılığı 300 nm ile 1000 nm aralığında elde edilmiştir. Şekil 3.3.' de kırılma indisinin değişim grafiği verilmektedir.

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{a_1\lambda^2}{\lambda^2 - b_1^2} + \frac{a_2\lambda^2}{\lambda^2 - b_2^2} + \frac{a_2\lambda^2}{a^3 - b_3^2}} \tag{3.9}$$

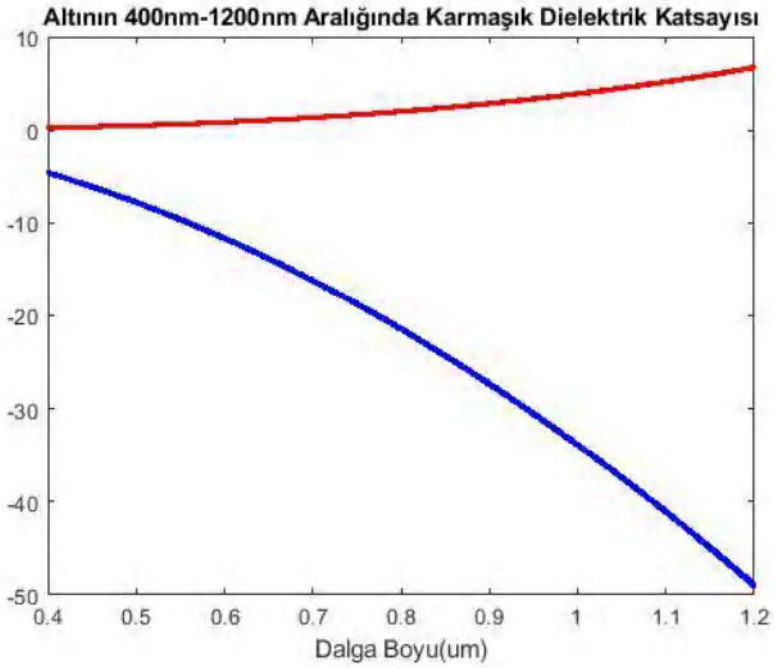


Şekil 3.3. Çok modlu silika fiberin kırılma indisinin dalga boyu bağımlığının Sellmeier eşitliğiyle elde edilmesi.

3.4. Altının Dielektrik Katsayısının Drude Formülü ile Bulunması

Drude formülünün kullanılması için metale ait plazma dalga boyunun ve çarpışma dalga boyunun bilinmesi gereklidir. Denklem (3.10)' dan hareketle Şekil 3.4.' de altının karmaşık dielektrik katsayısı görülmektedir. Altın için çarpışma ve plazma dalga boyu sırasıyla λ_c: 8.9342 μm ve λ_p: 0.16826 μm' dir. Şekil 3.4.' de görülen grafikte mavi renk karmaşık dielektrik katsayısının gerçek kısmını, kırmızı renk karmaşık dielektrik katsayısının sanal kısmını ifade etmektedir. Yapılan simülasyon çalışmalarının aralığı görünür spektrum ve yakın kızıl ötesi bölge olduğu için karmaşık dielektrik katsayısının 400 nm ile 1200 nm aralığındaki değerleri elde edilmiştir [47].

$$\varepsilon_m(\lambda) = \varepsilon'_m + i\varepsilon''_m = 1 - \frac{\lambda^2\lambda_c}{\lambda_p^2(\lambda_c + i\lambda)} \tag{3.10}$$

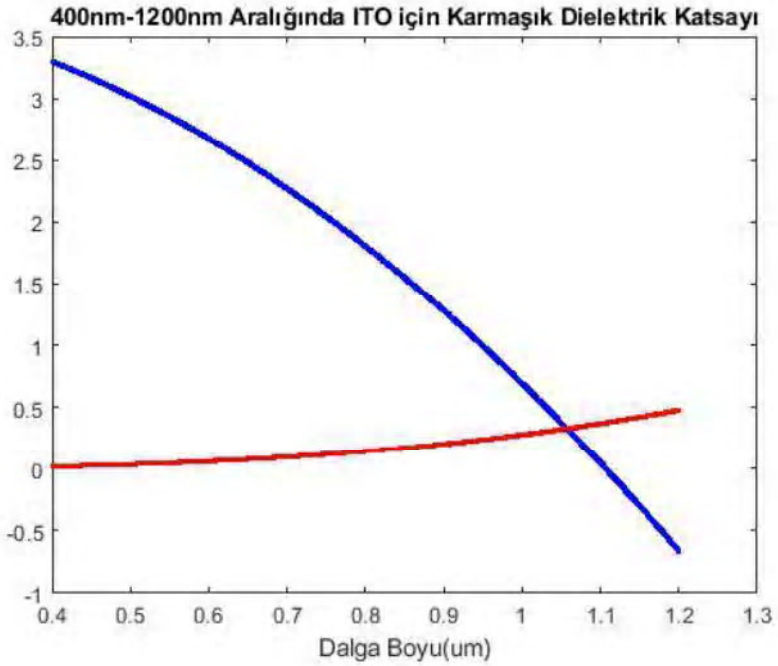


Şekil 3.4. Altının karmaşık dielektrik katsayısı.

3.5. ITO için Karmaşık Dielektrik Katsayısının Bulunması

Denklem (3.11)' den hareketle ITO' nun 400 nm ile 1200 nm aralığındaki dielektrik katsayısı bulunmuştur. ITO için çarpışma ve plazma dalga boyu sırasıyla λ_c: 11.2107 μm ve λ_p: 0.56497 μm' dir. [27]. Şekil 3.5.' de ITO' nun dielektrik katsayısının 400 nm-1200 nm aralığındaki grafiği verilmektedir. Şekil 3.5.' de görülen grafikte mavi renk karmaşık dielektrik katsayısının gerçek kısmını, kırmızı renk karmaşık dielektrik katsayısının sanal kısmını ifade etmektedir.

$$\varepsilon_{ITO}(\lambda) = 3.8 - \frac{\lambda^2\lambda_c}{\lambda_p^2(\lambda_c + i\lambda)} \tag{3.11}$$



Şekil 3.5. 400nm ile 1200 nm aralığında ITO katmanının dielektrik katsayı değerleri.

3.6. Simülasyon Çalışmaları

3.6.1. 40 nm Altın Kalınlığında Grafen ve MoS_2 Etkisi

Altın kalınlığı 40 nm olduğu durumda grafen ve MoS_2 katmanlarının hassasiyet ve FOM değerlerine etkisi incelenmiştir. Aynı zamanda salınım dalga boyu ve yansıma değerleri elde edilmiştir. Bahsedilen algılayıcı için fiber optik kablonun öz çapı 400 μm, algılama bölgesinin uzunluğu 0.6 cm, fiberin nümerik açıklık (NA) değeri 0.24 alınmıştır. Buna ek olarak grafen katmanın kalınlığı 0.34 nm MoS_2 kalınlığı ise 0.65 nm olarak varsayılmıştır. Algılama ortamının kırılma indisi değeri 1.333 ve 1.337' dir.

Tablo 3.1.' den hareketle en yüksek hassasiyet 40 nm kalınlıktaki altın katmanın üzerine 3 katman grafen ve 1 katman MoS_2 kaplandığı durumda elde edilmiştir. 3 katman grafen eklendiği durumda hassasiyet değerinde ani bir artış gözlemlenmiştir. Artış

değeri diğer yapılara göre yaklaşık 3 kat fazladır. Katman sayısının artmasıyla yansıma değerinde de artış gözlemlenmiştir. Ancak bu artış kabul edilebilir seviyededir. En yüksek hassasiyet değeri 5900 nm/RIU'dur.

Tablo 3.1. Altın kalınlığı 40 nm iken grafen ve MoS_2 katman sayılarının hassasiyete etkisi.

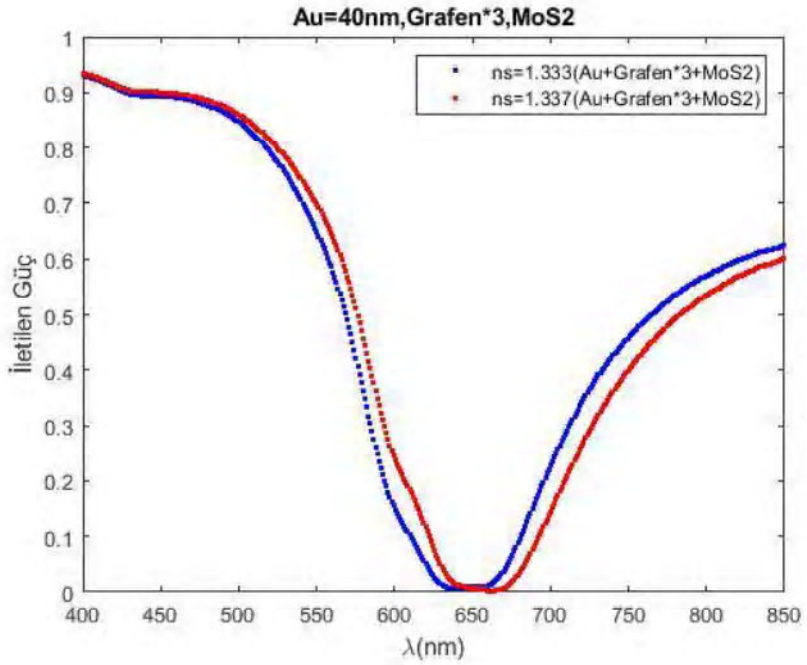
Au=40nm	n_s=1.333		n_s=1.337		S(nm/RIU)
Grafen/MoS_2	λ_s(nm)	$R_{p(min)}$	λ_s(nm)	$R_{p(min)}$	
1/1	625.7	0.0060	633.7	0.0040	2000
2/1	631.4	0.0156	640.7	0.0175	2325
3/1	638.4	0.0324	662.0	0.0174	5900
4/1	660.4	0.0374	669.7	0.0213	2325
5/1	667.4	0.0409	676.7	0.0285	2325

Ayrıca Tablo 3.2.' de görüldüğü gibi elde edilen en yüksek FOM değeri 3 katman grafen ve 1 katman MoS_2 olduğu durumda elde edilmiştir. Grafen katmanının 3 katman ve daha fazla eklendiği durumda yarım genlikteki toplam genişlik değerleri benzer olmasına rağmen 3 katman eklendiği durumdaki hassasiyet değeri fazla olduğu için FOM değeri de aynı yapıda daha yüksektir. Elde edilen en yüksek FOM değeri 26.16 RIU^{-1}' dir.

Tablo 3.2. Altın kalınlığı 40 nm iken grafen ve MoS_2 katman sayılarının FOM değerine etkisi.

Au=40nm Grafen/MoS_2	$\Delta\lambda_{0.5}$(nm)	FOM(RIU^{-1})
1/1	184.3	10.85
2/1	205.7	11.30
3/1	225.5	26.16
4/1	245.4	9.47
5/1	265.9	8.74

Şekil 3.6.' da altın kalınlığının 40 nm olduğu durumda en yüksek hassasiyet ve FOM değerinin elde edildiği algılayıcı yapısına ilişkin iletilen güç-dalga boyu eğrisi görülmektedir. Şekil 3.6.' da mavi renk ile ifade edilen eğri algılama ortamının kırılma indisinin 1.333 olduğu durumda oluşan eğridir. Buna karşın kırmızı ile ifade edilen eğri algılanacak malzemenin eklendiği durumda yani kırılma indisinin değiştirilerek 1.337 değerine yükseltildiği durumda oluşan eğridir. Şekil 3.6.' dan görüldüğü gibi dalga boyunun 600 nm civarında her iki eğri arasındaki mesafe nispeten artmıştır. Bu durum MoS_2 katmanının dielektrik katsayısının o aralıktaki ani değişiminden meydana gelmiştir. Fakat bu durum yarım genlikteki toplam genişliği belirsiz yapmak veya salınım dalga boyunu belirsiz yapmak gibi kayda değer bir olumsuzluk oluşturmamıştır.



Şekil 3.6. Altın kalınlığının 40 nm olduğu algılayıcı yapısında en yüksek hassasiyet ve FOM değerinin elde edildiği yapıya ilişkin iletilen güç-dalga boyu eğrisi.

3.6.2. 50 nm Altın Kalınlığında Grafen ve MoS_2 Etkisi

Altın kalınlığının 40 nm olduğu durum ile benzer şekilde grafen ve MoS_2 katmanlarının hassasiyete, FOM değerine, salınım dalga boyuna ve yansıma değerine etkileri incelenmiştir. Aynı şekilde bahsedilen algılayıcı için fiber optik kablonun öz çapı 400 μm, algılama bölgesinin uzunluğu 0.6 cm, fiberin nümerik açıklık değeri 0.24 alınmıştır. Grafen katmanın kalınlığı 0.34 nm, MoS_2 kalınlığı ise 0.65 nm olarak varsayılmıştır. Algılama ortamının kırılma indisi değeri 1.333 ve 1.337' dir.

Tablo 3.3.' den hareketle altın kalınlığının 50 nm olduğu bu algılayıcı yapısında en yüksek hassasiyet değeri, altın katmanın üzerine 1 katman grafen ve 1 katman MoS_2 eklendiği durumda, 6375 nm/RIU olarak karşımıza çıkmıştır. Grafen katman sayısının 1'den fazla olduğu durumlarda hassasiyet değerinde düzensiz değişim görülmektedir. Grafen katman sayısının 2 katman olduğu durumda hassasiyet değeri ani olarak düşmüştür. Sonrasında grafen katman sayısının 3 ve 4 olması durumunda hassasiyet

değerinde artış gözlemlenmiştir. Katman sayısı 5' e çıkarıldığı zaman hassasiyet değeri tekrar düşmüştür. Aynı zamanda grafen katman sayısının artmasına bağlı olarak yansıma değerinde artış gözlemlenmiştir.

Tablo 3.3. Altın kalınlığı 50 nm iken grafen ve MoS_2 katman sayılarının hassasiyete etkisi.

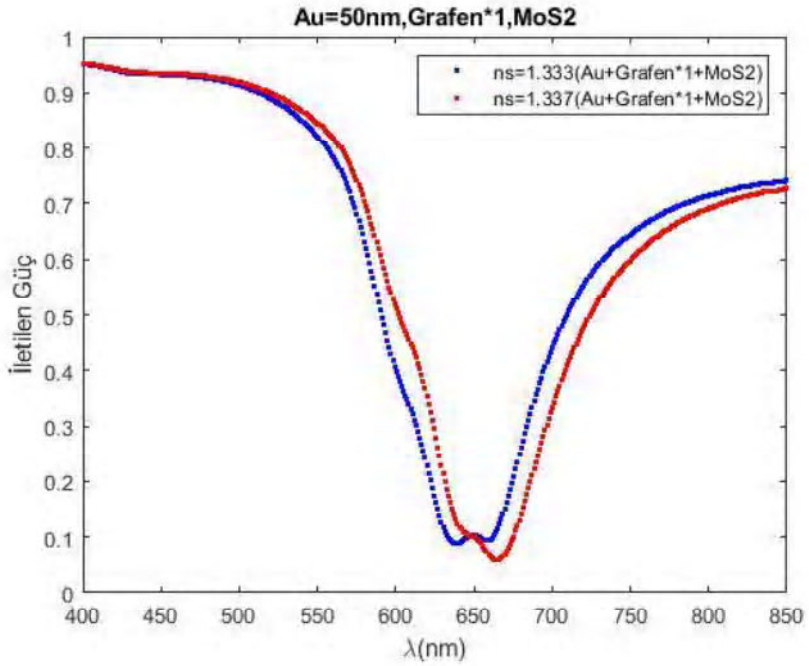
Au=50nm Grafen/MoS_2	n_s=1.333		n_s=1.337		S (nm/RIU)
	λ_s(nm)	$Rp_{(min)}$	λ_s(nm)	$Rp_{(min)}$	
1/1	638.4	0.1976	663.9	0.1511	6375
2/1	662.7	0.2013	670.9	0.1678	2050
3/1	669.7	0.2140	679.0	0.1888	2325
4/1	686.0	0.2325	676.0	0.2124	4000
5/1	683.7	0.2536	693.6	0.2367	2475

Tablo 3.4.' deki verilerden hareketle elde edilen FOM değeri yine aynı yapıda elde edilmiş olup değeri 53.44 RIU^{-1}' dir. Grafen katman sayısının 4 ve 5 adet olduğu durumlardaki yarım genlikteki toplam genişlik değerleri birbirlerine çok yakın olmasına rağmen FOM değerlerindeki farklılıklar göze çarpmaktadır. Bu durumun sebebi grafen katmanının 4 adet olduğu durumdaki hassasiyetin, 5 adet olduğu durumdaki hassasiyetten daha fazla olmasıdır.

Tablo 3.4. Altın kalınlığı 50 nm iken grafen ve MoS_2 katman sayılarının FOM değerine etkisi.

Au=50nm Grafen/MoS_2	$\Delta\lambda_{0.5}$ (nm)	FOM (RIU^{-1})
1/1	119.3	53.44
2/1	126.6	16.19
3/1	130.5	17.82
4/1	141.7	28.23
5/1	140.9	17.56

Şekil 3.7.' de parametrelerin en yüksek olduğu algılayıcı yapısına ait iletilen güç-dalga boyu grafiği verilmektedir. MoS_2 katmanına ait dielektrik katsayı değeri grafiğin oluşumunda doğal olarak önemli etki yaratmaktadır. Bunun sonuçları algılama ortamının kırılma indisi değerine göre olumlu ya da olumsuz olabilir. Grafikten görüldüğü gibi mavi renk ile ifade edilen eğride salınım dalga boyunda çok dar bir aralıkta dalgalanma oluşmuştur. Bu dalgalanmalar MoS_2' nin belirli şartlarda olumsuz etkiler gösterdiğini açıklamaktadır. Ancak bu tez çalışmasında fiber optik kabloya ve algılayıcı yapısında materyal seçimine olumsuz etkileri kabul edilebilir ölçüde olmuştur. Bu etkilere örnek olarak 600 nm civarında eğriler arasındaki mesafeyi artırması verilebilir.



Şekil 3.7. Altın kalınlığının 50 nm olduğu algılayıcı yapısında en yüksek hassasiyet ve FOM değerinin elde edildiği yapıya ilişkin iletilen güç-dalga boyu eğrisi.

3.6.3. 60 nm Altın Kalınlığında Grafen ve MoS_2 Etkisi

Altın kalınlığı 60 nm olduğu durumda grafen ve MoS_2 katmanlarının hassasiyete, FOM değerine, salınım dalga boyuna ve yansıma değerine etkileri incelenmiştir. Algılayıcı için fiber optik kablonun öz çapı 400 μm, algılama bölgesinin uzunluğu 0.6 cm, fiberin nümerik açıklık değeri 0.24 alınmıştır. Grafen katmanının kalınlığı 0.34 nm, MoS_2 katmanının kalınlığı ise 0.65 nm olarak varsayılmıştır. Algılama ortamının kırılma indisi değeri 1.333 ve 1.337' dir.

Tablo 3.5.' den hareketle altın kalınlığının 60 nm olduğu algılayıcı yapısındaki en yüksek hassasiyet değeri, altın katmanın üzerine 5 adet grafen katmanı ve 1 adet MoS_2 katmanı eklendiği yapıda elde edilmiştir. Hassasiyet değeri bu yapı için 2925 nm/RIU' dur.

Tablo 3.5. Altın kalınlığı 60 nm iken grafen ve MoS_2 katman sayılarının hassasiyete etkisi.

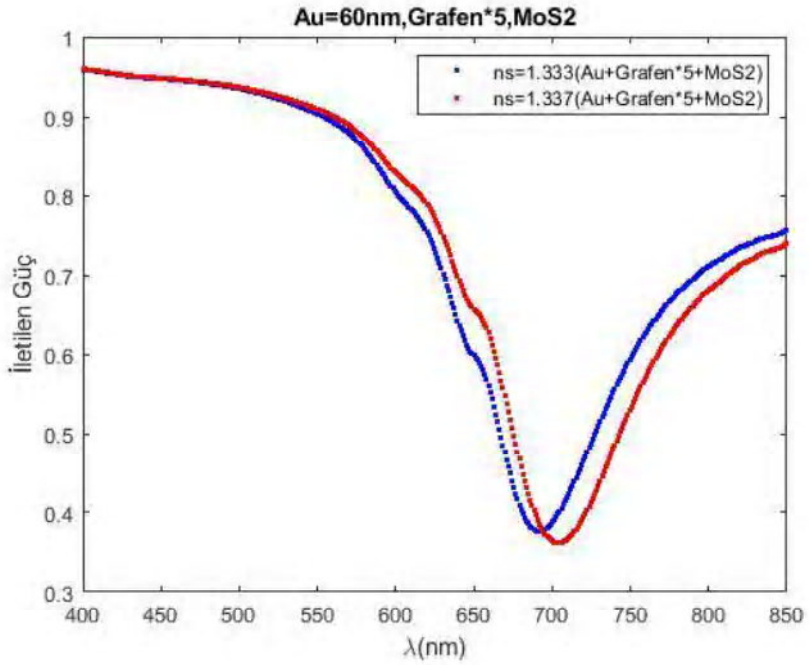
Au=60nm Grafen/MoS_2	n_s=1.333		n_s=1.337		S(nm/RIU)
	λ_s(nm)	$Rp_{(min)}$	λ_s(nm)	$Rp_{(min)}$	
1/1	663.3	0.4455	671.5	0.4086	2125
2/1	669.7	0.4597	679.0	0.4333	2325
3/1	676.8	0.4792	686.0	0.4594	2300
4/1	683.7	0.4996	694.2	0.4847	2625
5/1	691.9	0.5203	703.6	0.5065	2925

Tablo 3.6.' da en yüksek FOM değeri aynı yapıda elde edilmiş olup değeri 48.11 RIU^{-1}' dir. Grafen katmanının 3 katmana kadar eklendiği durumlarda hassasiyet değerlerinin çok yakın olmasından dolayı FOM değerleri de birbirine oldukça yakın çıkmıştır.

Tablo 3.6. Altın kalınlığı 60 nm iken grafen ve MoS_2 katman sayılarının FOM değerine etkisi.

Au=60nm Grafen/MoS_2	$\Delta\lambda_{0.5}$(nm)	FOM(RIU^{-1})
1/1	63.7	33.36
2/1	65.2	35.66
3/1	64.2	35.83
4/1	58.5	44.87
5/1	60.8	48.11

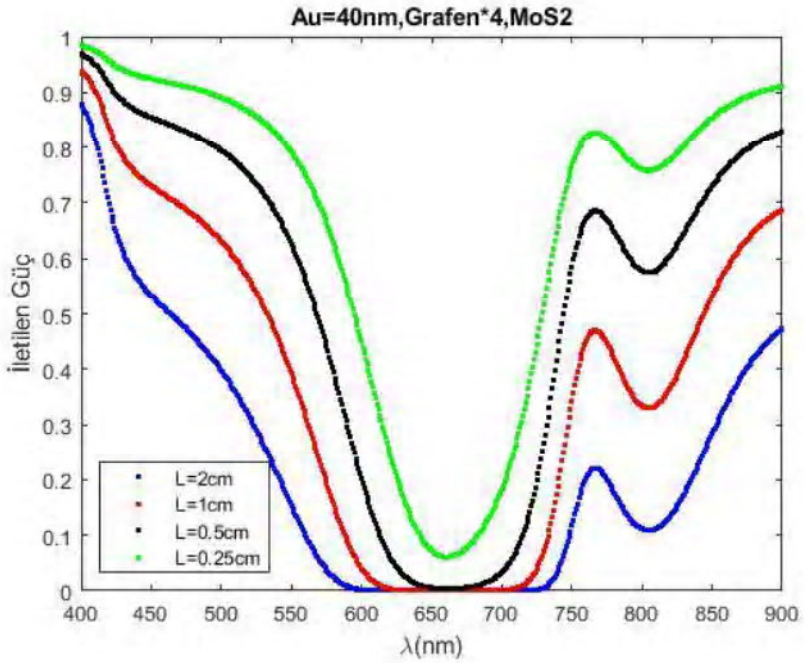
Şekil 3.8.' de altın kalınlığının 60 nm olduğunda hassasiyet ve FOM değerlerinin en yüksek değerlerde olduğu yapıya ilişkin iletilen güç-dalga boyu grafiği verilmektedir. Altın kalınlığının 60 nm' ye çıkarıldığı durumda dalga boyunun 650 nm olduğu dar bir aralıkta iki eğri arasındaki mesafe artmıştır. Bu mesafe artışı altın kalınlığının 40 nm ve 50 nm olduğu algılayıcı yapılarında da 600 nm civarında görülmüştür. Bu durum da MoS_2' ye ait dielektrik katsayıdaki ani değişimlerden oluşmaktadır.



Şekil 3.8. Altın kalınlığının 60 nm olduğu
algılayıcı yapısında en yüksek hassasiyet değerinin
elde edildiği yapıya ilişkin iletilen güç-dalga boyu eğrisi.

3.7. Algılama Bölgesinin Uzunluğunun Uygunlaştırılması

Fiber optik kablonun öz kısmının üzerine direkt olarak altın ve diğer materyaller ile kaplandığı bölümüne algılama bölgesi denmektedir. Algılama bölgesinin uzunluğunun artması yansıma değerinin 0' dan farklı olduğu durumlarda da iletilen gücü 0 yapmaktadır. Bu durum salınım dalga boyunu iletilen güç açısından belirsiz yapmaktadır. Algılamanın gerçekleştirilmesi için bu sorunun ortadan kaldırılması gerekmektedir. Şekil 3.9.' da diğer tüm parametreler sabit tutulurken algılama bölgesinin uzunluğunun 0.25 cm, 0.5 cm, 1 cm ve 2 cm olduğu durumlardaki salınım dalga boyuna etkisi görülmektedir.

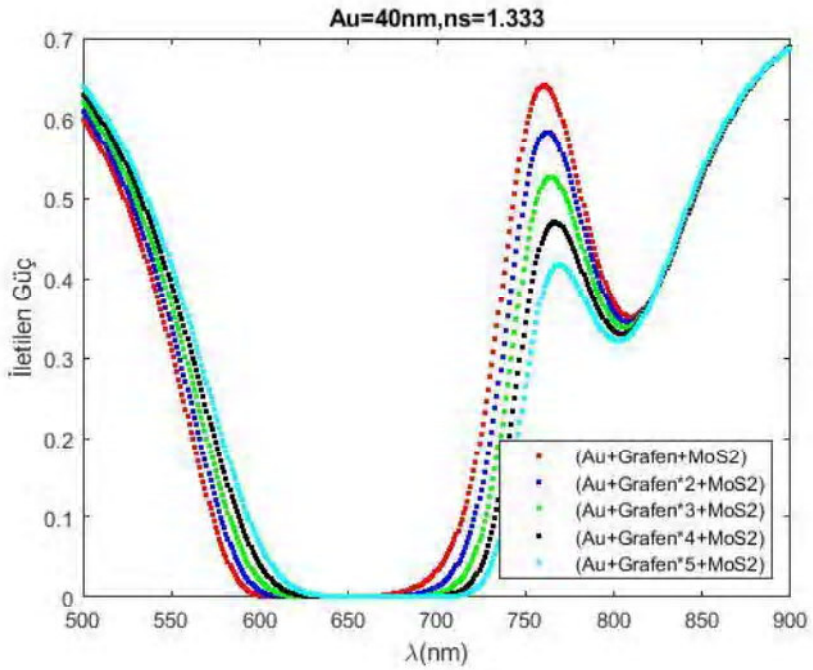


Şekil 3.9. Algılama uzunluğunun salınım dalga boyuna etkisi.

Şekil 3.9.' da açıkça görüldüğü gibi algılama bölgesinin uzunluğunun artması salınım dalga boyunu iletilen güç açısından belirsiz yapmaktadır. Buna ek olarak yarım genlikteki toplam genişliği ise artırmaktadır. Yarım genlikteki toplam genişliğin artması doğruluk oranını olumsuz etkiler. Önceki kısımlarda bahsedilen grafiğin sağ kolunun oldukça sığ kalması durumu bu gibi durumlarda ortaya çıkabilir. Bu problemlerin giderilmesi gerekmektedir. Bunun için algılayıcı yapısı çeşitli parametreler açısından analiz edilip en uygun değerler belirlenmelidir.

Bir diğer problem ikincil salınım eğilimleridir. Literatürde açısal sorgulama metodunun kullanıldığı çalışmalar için 2 boyutlu malzemelere ait dielektrik katsayıları formülleştirilmektedir. Fakat elde edilen formüller görünür spektrumda geçerli olurken yakın kızılötesi bölgede doğru sonuçlar üretmeyebilir. Şekil 3.9.' da görülen ikincil salınım eğilimleri malzemelerin yakın kızılötesi bölgede metalik karakter göstermesinden meydana gelmektedir. Bu durumların önlenmesi için deneysel çalışmalardan faydalanılmalıdır.

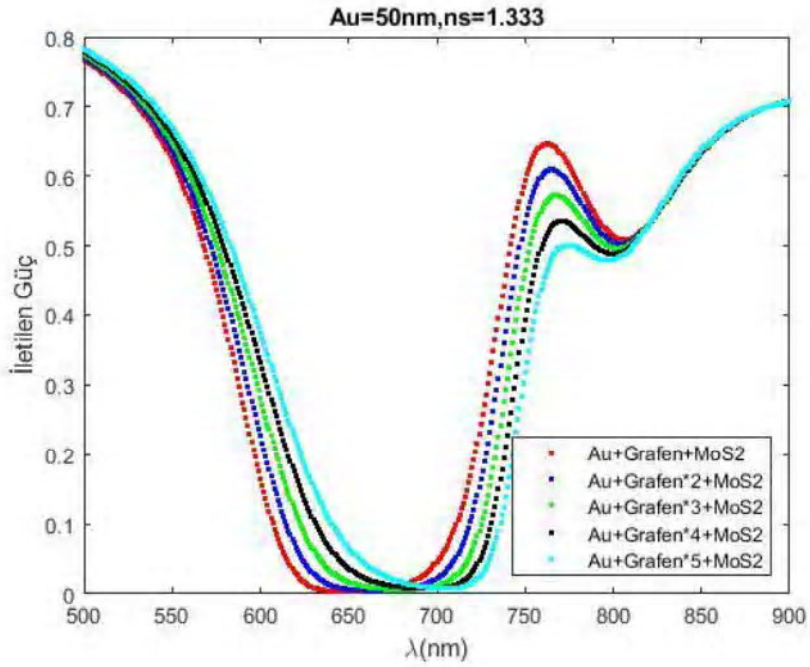
Altın kalınlığının artırılması durumunda salınım şartları değişeceği için yansıma değeri de değişecektir. Altın kalınlığının nispeten kalın olması önceki durumuna göre yansımayı genelde artırarak 1 değerine yaklaştırır. Yani nispeten ince olduğu durumda YP dalgalarını uyarmak için daha az enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. İletilen güç-dalga boyu eğrisinde salınım dalga boyunun belirsizliğinin giderilmesi için altın kalınlığının artırılması işlevsel olmaktadır. Şekil 3.10' da altın kalınlığının 40 nm olduğu durumda iletilen güç-dalga boyu eğrisindeki salınım dalga boyundaki belirsizlik görülmektedir. Aynı zamanda giderilmesi gereken ikincil salınım eğilimi de görülmektedir.



Şekil 3.10. Altın kalınlığının 40 nm olduğu durumdaki belirsizlik.

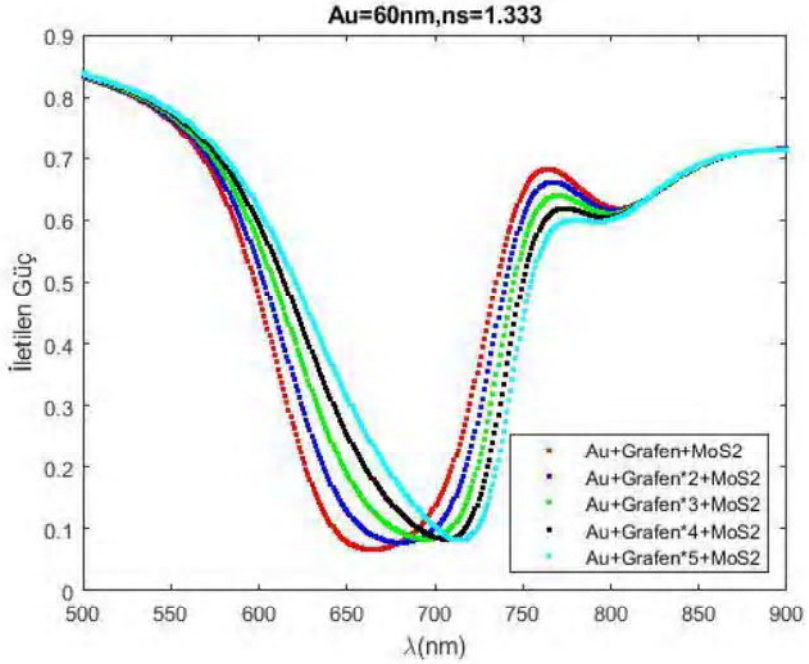
Bu grafikten de anlaşılacağı gibi altın kalınlığının 40 nm olduğu tüm yapılarda iletilen güç-dalga boyu eğrisinde uygunlaştırma çalışmaları gerekmektedir. Altın kalınlığı 40

nm' den 50 nm' ye çıkarıldığı zaman belirsizliğin biraz daha giderildiği Şekil 3.11.' den açıkça görülmektedir.



Şekil 3.11. Altın kalınlığının 50 nm olduğu durumdaki belirsizlik.

Altın kalınlığı 50 nm olduğu zaman belirsizlik dikkate değer ölçüde azalmaktadır. Aynı zamanda ikincil salınım eğiliminin de ortadan kalkmaya başladığı görülmektedir. Altın kalınlığının 60 nm olduğu durum göz önüne alındığında Şekil 3.12.' den hareketle salınım dalga boyundaki belirsizlik tamamen ortadan kalkmakla birlikte ikincil salınım eğilimi de neredeyse kaybolmuştur.



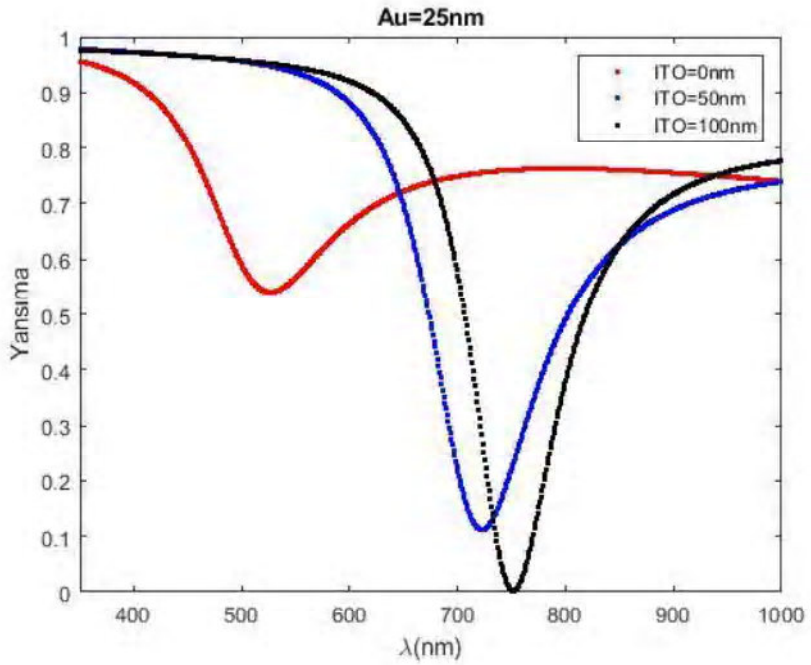
Şekil 3.12. Altın kalınlığının 60 nm olduğu durumdaki belirsizlik.

İletilen güç-dalga boyu eğrisinde salınım dalga boyunun belirsiz olmasındaki temel sebep, ışığın algılama bölgesinden geçerken YP dalgalarını uyarmasıdır. Fakat algılama bölgesinin uzunluğu olması gerekenden fazla olduğu durumda veya YPS oluşumu için gerekli ışık enerjisi nispeten düşük olduğu durumda ışık pek çok dalga boyunda fiberin diğer ucuna iletilememeye başlar. Örneğin ışığa ait yansıma değerinin 550 nm dalga boyunda 0.4 olduğu durumda, algılama ortamı uzun olduğu için veya metal kalınlığı çok ince olduğu için iletilen güç de 550 nm' de 0 olur.

3.7. Indiyum Tin Oksitin Çeşitli Kalınlıklardaki Etkisinin İncelenmesi

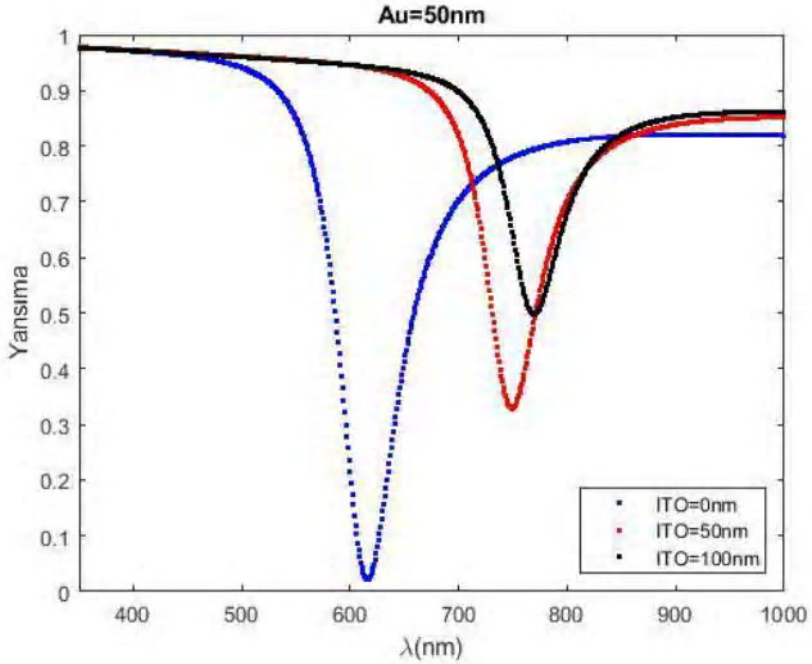
Altın kalınlığının düşük olduğu durumlarda ITO' nun belirli kalınlıklardaki kullanımı, yansımayı minimum noktaya yaklaştırmaktadır. Fakat altın kalınlığının arttığı şartlarda ITO' nun etkisi gerek hassasiyet gerekse yansıma açısından pek de faydalı görünmemektedir. Buradan hareketle altın kalınlığının nispeten ince olduğu durumlarda ITO malzemesi parametrelerin uygunlaştırılması için kullanılabilir. ITO' nun hassasiyete ilişkin olumlu etkisi altın kalınlığının 20 nm olduğu durumda elde edilmiştir.

Şekil 3.13.' den hareketle altın kalınlığının nispeten ince olduğu durumda ITO katmanı yansımanın 0 değerini alması sağlamaktadır. Kırmızı renk ile ifade edilen eğri ITO katmanının olmadığı durumu gösterirken mavi eğri 50 nm ITO katmanının eklendiği durumu, siyah eğri 100 nm ITO katmanının eklendiği durumu ifade etmektedir.



Şekil 3.13. Altın kalınlığı 25 nm iken ITO katmanının yansımaya etkisi.

Buna karşılık ITO katmanı, Şekil 3.14.' de görüldüğü gibi altın kalınlığının artırılması durumunda yansımanın 0 değerini almasına engel olmaktadır. Şekil 3.14.' deki mavi renkli eğri ITO katmanının olmadığı durumu gösterirken kırmızı renkli eğri 50 nm ITO katmanının olduğu durumu, siyah renkli eğri 100 nm ITO katmanının olduğu durumu göstermektedir. Bu durum salınım dalga boyunun ve salınım şartının bozulması anlamına geldiği sonucunu çıkarmaktadır. Yapılan simülasyon çalışmalarından hareketle ITO katmanının uygunlaştırma çalışmaları için kullanılabileceği düşünülmektedir.



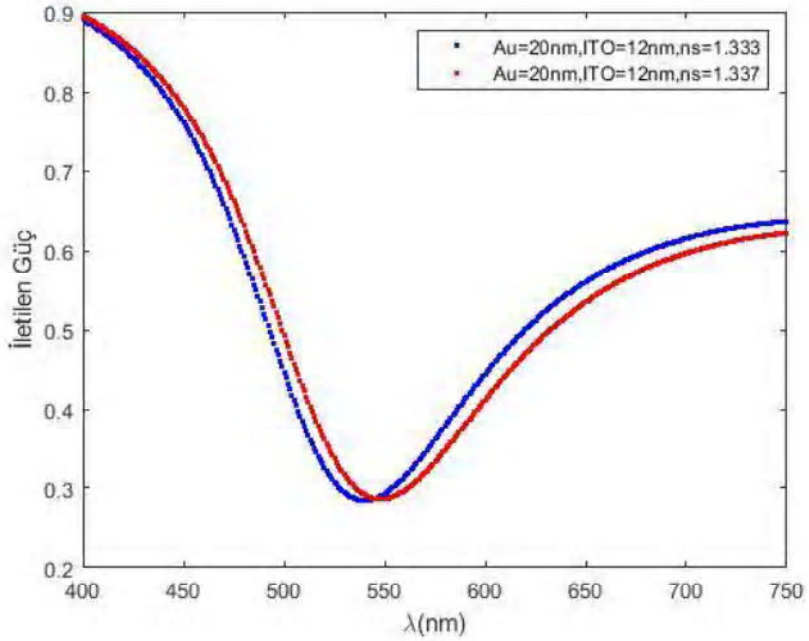
Şekil 3.14. Altın kalınlığı 50 nm iken ITO katmanının yansımaya etkisi.

Tablo 3.7.' den hareketle altın kalınlığı 20 nm' de sabit tutulduğunda, ITO katmanının 12 nm' ye kadar artırıldığı tüm kalınlıklarda hassasiyet artmıştır. Bununla birlikte ITO katmanının 6 nm kalınlıktan daha kalın olması yansımayı azaltmaktadır. ITO katmanının kalınlığının 20 nm olduğu durumdaki algılayıcı yapısının hassasiyet değeri ITO katmanının hiç eklenmediği durumdaki hassasiyet değerinden düşüktür. Hassasiyet değerindeki fark 50 nm/RIU olmasına karşın ITO katmanının hassasiyete olumsuz etki göstermeye başlamasından dolayı önemlidir. Her ne kadar yansıma değerinin azalması istenen durum olsa da asıl amaç hassasiyeti artırmaktır. Bu sebeple ITO katmanının varlığından faydalanmak için en etkin değerler araştırılmaktadır.

Tablo 3.7. Altın kalınlığının 20 nm olduğu durumda ITO katmanının hassasiyete etkisi.

Au=20nm	n_s=1.333		n_s=1.337		S
	λ_s	$R_{(min)}$	λ_s	$R_{(min)}$	
Au	465.8	0.64320	474.6	0.65170	2200nm/RIU
Au/ITO(1nm)	476.0	0.64720	484.9	0.65480	2225nm/RIU
Au/ITO(3nm)	495.7	0.65110	505.1	0.65710	2350nm/RIU
Au/ITO(6nm)	524.1	0.64790	534.0	0.65140	2475nm/RIU
Au/ITO(12nm)	574.1	0.61630	584.0	0.61520	2475nm/RIU
Au/ITO(20nm)	622.6	0.54340	631.2	0.53790	2150nm/RIU

Buna ek olarak Şekil 3.15.' de altın kalınlığının 20 nm olduğu durumda iletilen güç-dalga boyu eğrisi verilmektedir. Bu grafikte simülasyonu yapılan algılayıcının algılama ortamı 1.333 ve 1.337 değerlerindedir. Grafikteki salınım kaymasından hassasiyet elde edilmektedir. ITO katmanının dielektrik katsayısının dalga boyu bağımlılığı düzenli olarak değiştiği için algılama ortamının kırılma indisi değişimi ile elde edilen eğriler arasında düzenli bir ilişki görülmektedir. Kısaca ITO katmanı MoS_2 katmanının sebep olduğu dalgalanmaları oluşturmamıştır.



Şekil 3.15. 20 nm altın üzerine 12 nm ITO eklendiği durumda hassasiyetin elde edilmesi.

Tablo 3.8.' de görüldüğü gibi altın kalınlığının 25 nm olduğu algılayıcı yapısında elde edilen bazı hassasiyet değerleri 20 nm olduğu durumda elde edilen hassasiyet değerlerinden fazladır. Altın kalınlığının 20 nm olduğu durumda en yüksek hassasiyet değeri 2475 nm/RIU olmasına karşın 25 nm olduğu durumdaki en yüksek hassasiyet değeri 2650 nm/RIU' dur. Aynı zamanda altın kalınlığının 5 nm artmış olması tüm yapılarda yansımanın düşmesine sebep olmuştur.

Tablo 3.8. Altın kalınlığının 25 nm olduğu durumda ITO katmanının hassasiyete etkisi.

Au=25nm	n_s=1.333		n_s=1.337		S
	λ_s	$R_{(min)}$	λ_s	$R_{(min)}$	
Au	515.8	0.51100	526.3	0.51900	2625nm/RIU
Au/ITO(1nm)	525.6	0.51100	536.2	0.51790	2650nm/RIU
Au/ITO(3nm)	544.2	0.50690	554.8	0.51180	2650nm/RIU
Au/ITO(6nm)	569.6	0.49230	580.1	0.49440	2625nm/RIU
Au/ITO(12nm)	611.3	0.44220	620.9	0.43950	2400nm/RIU
Au/ITO(20nm)	650.3	0.35600	658.3	0.34940	2000nm/RIU

Tablo 3.9.' da altın kalınlığı 30 nm' de sabit tutulmuştur. Hassasiyetteki artış ITO kalınlığının 1 nm olduğu noktada zirve yapmıştır. ITO katmanının kalınlığının artması yansıma değerini azaltmaktadır. Bu durum istenen bir durumdur fakat kalınlığın 1 nm' den sonraki artışlarında hassasiyet değeri azalmaktadır.

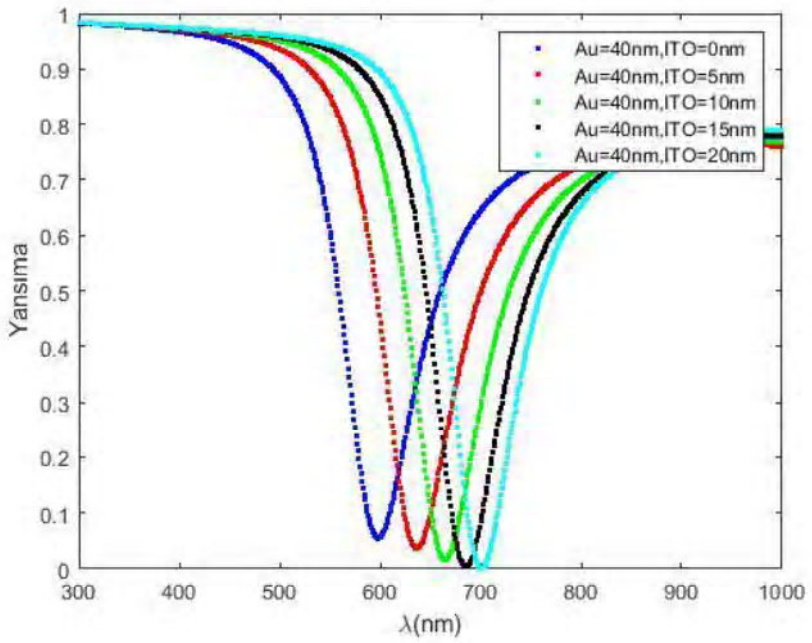
Tablo 3.9. Altın kalınlığının 30 nm olduğu durumda ITO katmanının hassasiyete etkisi.

Au=30nm	n_s=1.333		n_s=1.337		S
	λ_s	$R_{(min)}$	λ_s	$R_{(min)}$	
Au	550.0	0.3452	561.2	0.3523	2800nm/RIU
Au/ITO(1nm)	559.0	0.3424	570.3	0.3484	2825nm/RIU
Au/ITO(3nm)	576.0	0.3334	587.1	0.3373	2775nm/RIU
Au/ITO(6nm)	598.7	0.3130	609.4	0.3140	2675nm/RIU
Au/ITO(12nm)	635.0	0.2575	644.4	0.2541	2350nm/RIU
Au/ITO(20nm)	668.8	0.1773	676.4	0.1714	1900nm/RIU

Tablo 3.10' dan hareketle ITO kalınlığının hassasiyete etkisindeki en büyük dalgalanma altın kalınlığının 40 nm olduğu durumda gözlemlenmiştir. Altın kalınlığı 40 nm, ITO katmanı kalınlığı 5 nm iken hassasiyet değeri 2725 nm/RIU elde edilmiştir. ITO kalınlığı 20 nm' ye çıkarıldığı zaman hassasiyet değeri ani olarak 1100 nm/RIU değerine düşmüştür. ITO katmanının hassasiyete olan etkilerinin incelendiği çalışmadaki en düşük değer bu yapıda elde edilmiştir. ITO katmanının 0 nm' den 20 nm' ye kadar 5 nm' lik adımlarla değişmesi durumunda elde edilen yansıma-dalga boyu eğrileri Şekil 3.16.' da verilmiştir. ITO kalınlığının artması durumunda yansımanın azaldığı görülmektedir. ITO kalınlığının 15 nm ve 20 nm olduğu durumlarda yansıma değeri neredeyse eşittir. Fakat salınım dalga boyundaki farklılık Şekil 3.16' da açıkça görülmektedir.

Tablo 3.10. Altın kalınlığının 40 nm olduğu durumda ITO katmanının hassasiyete etkisi.

Au=40nm	n_s=1.333		n_s=1.337		S
	λ_s	$R_{(min)}$	λ_s	$R_{(min)}$	
Au	588.5	0.05285	600.7	0.05612	3050nm/RIU
Au/ITO(5nm)	625.1	0.03653	636.0	0.03700	2725nm/RIU
Au/ITO(10nm)	652.9	0.01824	662.5	0.01736	2400nm/RIU
Au/ITO(15nm)	674.0	0.00515	682.5	0.00428	2125nm/RIU
Au/ITO(20nm)	690.3	0.00006	697.7	0.00006	1100nm/RIU



Şekil 3.16. ITO katmanının yansımaya olan etkisi.

Tablo 3.11. ve Tablo 3.12.' de hassasiyet değerlerindeki yakınlık dikkat çekmektedir. Buna karşın yansıma değerindeki farklılıklar büyük orandadır. Altın kalınlığının 50 nm olduğu durumda 60 nm olduğu duruma göre yansıma neredeyse 10 kat daha azdır. Bu verilerden hareketle, benzer hassasiyet değerlerinin elde edildiği algılayıcı yapılarında yansıma değerini azaltmak amacıyla ITO katmanının kullanılabileceği sonucu çıkmaktadır.

Tablo 3.11. Altın kalınlığının 50 nm olduğu durumda ITO katmanının hassasiyete etkisi.

Au=50nm	n_s=1.333		n_s=1.337		S
	λ_s	$R_{(min)}$	λ_s	$R_{(min)}$	
Au	606.8	0.03274	619.2	0.03030	3100nm/RIU
Au/ITO(5nm)	641.0	0.04856	652.0	0.04805	2750nm/RIU
Au/ITO(10nm)	666.7	0.07421	676.2	0.07578	2375nm/RIU
Au/ITO(15nm)	686.0	0.10710	694.5	0.11050	2125nm/RIU
Au/ITO(20nm)	701.0	0.14390	708.0	0.14880	1750nm/RIU

Tablo 3.12. Altın kalınlığının 60 nm olduğu durumda ITO katmanının hassasiyete etkisi.

Au=60nm	n_s=1.333		n_s=1.337		S
	λ_s	$R_{(min)}$	λ_s	$R_{(min)}$	
Au	615.5	0.27210	628.0	0.26650	3125nm/RIU
Au/ITO(5nm)	648.8	0.30150	659.7	0.30020	2725nm/RIU
Au/ITO(10nm)	673.2	0.34120	683.0	0.34310	2450nm/RIU
Au/ITO(15nm)	691.9	0.38400	700.3	0.38790	2100nm/RIU
Au/ITO(20nm)	706.2	0.42550	713.2	0.4304	1750nm/RIU

3.8. Çinko Oksitin Çeşitli Kalınlıklardaki Etkisinin İncelenmesi

Altın kalınlığının 20 nm' den 60 nm' ye kadar 10 nm' lik adımlarla değiştirildiği şartlar altında ZnO katmanının hassasiyete olan etkisi incelenmiştir. Buna ek olarak ITO katmanının incelendiği duruma benzer olarak yansıma değeri de dikkate alınmıştır.

Tablo 3.13.'de altın kalınlığının 20 nm' de sabit tutularak 5 nm, 10 nm, 15 nm, 20 nm ZnO katmanları eklendiğinde elde edilen hassasiyet değerleri bulunmaktadır. Bu şartlar altında ZnO katmanının eklenmesi hassasiyeti artırmıştır. En yüksek hassasiyet değeri, her iki katmanın kalınlığının 20 nm olduğu durumda elde edilmiştir. Elde edilen hassasiyet değeri 2075 nm/RIU' dur.

Tablo 3.13. Altın kalınlığının 20 nm olduğu durumda ZnO katmanının hassasiyete etkisi.

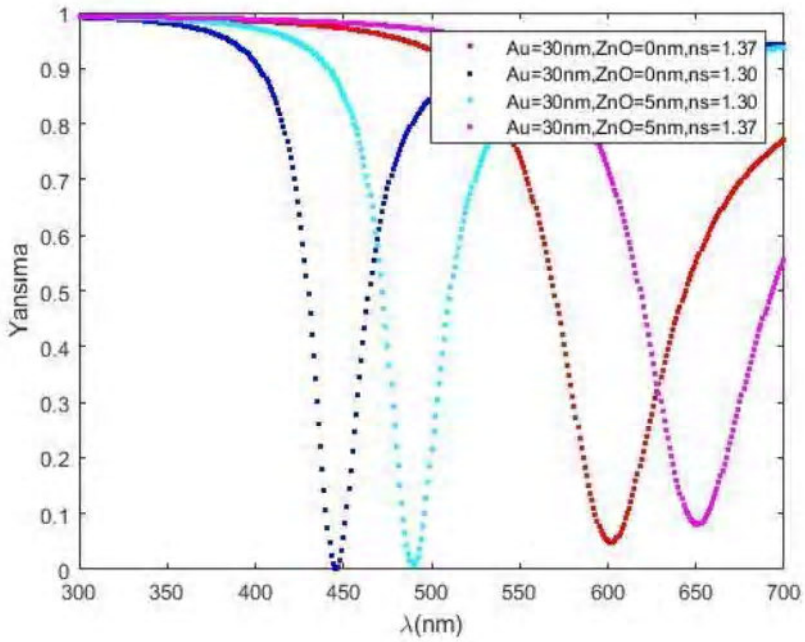
Au=20nm	n_s=1.333		n_s=1.337		S
	λ_s	$R_{(min)}$	λ_s	$R_{(min)}$	
Au/ZnO(0nm)	429.7	0.3861	436.1	0.3983	1600nm/RIU
Au/ZnO(5nm)	473.7	0.4715	480.6	0.4820	1725nm/RIU
Au/ZnO(10nm)	515.6	0.5413	523.1	0.5506	1875nm/RIU
Au/ZnO(15nm)	555.6	0.6026	563.6	0.6113	2000nm/RIU
Au/ZnO(20nm)	593.7	0.6605	602.0	0.6691	2075nm/RIU

Altın kalınlığı 30 nm olduğunda hassasiyet ve yansıma değeri artmıştır. En yüksek hassasiyet değeri Tablo 3.14.' den hareketle ZnO katmanının 20 nm olduğu yapıda elde edilmiş olup 2450 nm/RIU' dur.

Tablo 3.14. Altın kalınlığının 30 nm olduğu durumda ZnO katmanının hassasiyete etkisi.

Au=30nm	n_s=1.333		n_s=1.337		S
	λ_s	$R_{(min)}$	λ_s	$R_{(min)}$	
Au/ZnO(0nm)	508.3	0.1162	517.2	0.1240	2225nm/RIU
Au/ZnO(5nm)	555.6	0.1663	564.9	0.1739	2325nm/RIU
Au/ZnO(10nm)	599.1	0.2145	608.7	0.2220	2400nm/RIU
Au/ZnO(15nm)	639.2	0.2637	648.9	0.2716	2425nm/RIU
Au/ZnO(20nm)	676.0	0.3169	685.8	0.3258	2450nm/RIU

Şekil 3.17.' de algılama ortamının kırılma indisi 1.30 ve 1.37 alındığı durumlarda ZnO katmanının yansıma değerlerine etkileri görülmektedir. Bu grafikte algılama ortamına ait kırılma indisi daha geniş bir aralıkta değiştirilmiştir. ZnO katmanının eklenmesi salınım şartlarını değiştireceğinden dolayı salınım dalga boyu kızıla kaymıştır. Algılama ortamının kırılma indisi değişimi büyük oranda olduğundan dolayı salınım dalga boyunun kızıla kayması daha da belirginleşmiştir.



Şekil 3.17 Altın kalınlığı 30 nm olduğu durumda
5 nm ZnO katmanın yansımaya etkisi.

Tablo 3.15.' deki yansıma değerlerinin 0' a yakınlığı dikkat çekmektedir. ZnO kalınlığının 5 nm olduğu durumda yansıma neredeyse 0' dır. Bununla birlikte hassasiyet değerindeki artış oldukça düşüktür. ZnO katmanının varlığı hassasiyeti artırmıştır fakat ciddi ölçüde bir artıştan söz edilememektedir. ZnO katmanının 10 nm kalınlığında olduğu durumdaki hassasiyet, bu algılayıcı yapısı için en yüksek hassasiyet değeridir. Elde edilen hassasiyet 2625 nm/RIU' dur.

Tablo 3.15. Altın kalınlığının 40 nm olduğu durumda ZnO katmanının hassasiyete etkisi.

Au=40nm	n_s=1.333		n_s=1.337		S
	λ_s	$R_{(min)}$	λ_s	$R_{(min)}$	
Au/ZnO(0nm)	550.6	0.004100	560.8	0.00280	2550nm/RIU
Au/ZnO(5nm)	598.5	0.000008	608.8	0.00007	2575nm/RIU
Au/ZnO(10nm)	641.6	0.002977	652.1	0.00400	2625nm/RIU
Au/ZnO(15nm)	680.6	0.011780	691.1	0.01377	2625nm/RIU
Au/ZnO(20nm)	716.0	0.027160	726.3	0.03040	2575nm/RIU

Tablo 3.16' da altın kalınlığının 50 nm olduğu durumda ZnO katmanının hassasiyet ve yansıma değerlerine etkileri görülmektedir. Yansıma değeri, ZnO katman kalınlığının artışına bağlı olarak azalmaktadır. ZnO katman kalınlığı 15 nm olduğunda en yüksek hassasiyet ve en düşük yansıma değeri elde edilmiştir.

Tablo 3.16. Altın kalınlığının 50 nm olduğu durumda ZnO katmanının hassasiyete etkisi.

Au=50nm	n_s=1.333		n_s=1.337		S
	λ_s	$R_{(min)}$	λ_s	$R_{(min)}$	
Au/ZnO(0nm)	571.7	0.1984	582.5	0.1889	2700nm/RIU
Au/ZnO(5nm)	619.6	0.1566	630.5	0.1507	2725nm/RIU
Au/ZnO(10nm)	662.4	0.1239	673.3	0.1188	2725nm/RIU
Au/ZnO(15nm)	700.9	0.0947	711.8	0.09008	2725nm/RIU
Au/ZnO(20nm)	735.5	0.06759	746.1	0.06321	2650nm/RIU

Tablo 3.17' den hareketle 60 nm altın kalınlığının üstüne 5 nm ZnO kalınlığı eklendiği durumda en yüksek hassasiyet değeri elde edilmiştir. Bu hassasiyet değeri aynı zamanda ZnO' nun eklendiği algılayıcı yapıları arasındaki en yüksek hassasiyet değeridir. Bahsedilen hassasiyet değeri 2825 nm/RIU' dur.

Tüm bu bilgiler ışığında ZnO katmanlarının yansıma değerinin azalmasında ve hassasiyetin artırılmasında önemli rol oynadıkları görülmektedir. Hedeflenen YPS tabanlı algılayıcı yapısında belirli şartlar altında oluşan sınırlamaların önüne geçilmesi amacıyla ZnO katmanı kullanılabilir.

Tablo 3.17. Altın kalınlığının 60 nm olduğu durumda ZnO katmanının hassasiyete etkisi.

Au=60nm	n_s=1.333		n_s=1.337		S
	λ_s	$R_{(min)}$	λ_s	$R_{(min)}$	
Au/ZnO(0nm)	582.0	0.4932	593.1	0.4856	2775nm/RIU
Au/ZnO(5nm)	629.8	0.4524	641.1	0.4458	2825nm/RIU
Au/ZnO(10nm)	672.5	0.4154	683.7	0.4092	2800nm/RIU
Au/ZnO(15nm)	710.8	0.3791	721.8	0.3727	2750nm/RIU
Au/ZnO(20nm)	745.0	0.3411	755.8	0.3342	2700nm/RIU

4. BÖLÜM

SONUÇ-TARTIŞMA VE ÖNERİLER

4.1. Sonuç

Bu tez çalışmasında YPS tabanlı fiber optik algılayıcılar incelenmiştir. İncelemeler sonucunda mikroorganizmaların tespitinde kullanılması amacıyla YPS tabanlı fiber optik algılayıcılar tasarlanıp simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları gerçekleştirilen YPS tabanlı fiber optik algılayıcılarda çok katmanlı yapılar dikkate alınmıştır. Çok katmanlı yapılar fiber öz, altın, grafen, MoS_2, ITO ve ZnO varsayılarak oluşturulmuştur. Bu malzemelerin kombinasyonları ile YPS tabanlı fiber optik algılayıcı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan algılayıcılar için hassasiyet, yarım genlikteki toplam genişlik, FOM, salınım dalga boyu, yansıma, iletilen güç vb. parametreler elde edilmiştir. Elde edilen verilerden hareketle malzemelerin olumlu ve olumsuz yönleri ortaya konmuştur.

Altın katmanının 40 nm, 50 nm ve 60 nm olduğu durumlarda altın katmanının üzerine grafen ve MoS_2 eklenmiştir. Grafen katman sayısı 1' den 5' e kadar değiştirilirken MoS_2 katmanı tek katmandır. Oluşturulan yapılara ilişkin hassasiyet ve FOM değerleri elde edilmiştir. Grafen ve MoS_2' nin incelendiği simülasyonlarda en yüksek hassasiyet

değeri 6375 nm/RIU elde edilmiştir. Bu hassasiyet değeri 50 nm altın kalınlığının üzerine 1 katman grafen ve 1 katman MoS_2 eklendiği durumda elde edilmiştir.

Altın katmanının 20 nm, 25 nm, 30 nm, 40 nm, 50 nm ve 60 nm kalınlığında olduğu durumlarda ITO katmanının kalınlığının hassasiyete ve yansıma değerine etkisi incelenmiştir. Altın kalınlığı 20 nm, 25 nm ve 30 nm olduğu durumlarda ITO katmanının kalınlığı 1 nm, 3 nm, 6 nm, 12nm ve 20 nm alınmış ve simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Altın kalınlığının 40 nm, 50 nm ve 60 nm olduğu durumlarda ITO katmanının kalınlığı 0 nm, 5 nm, 10 nm, 15 nm ve 20 nm alınmış ve simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen tasarımlarda ITO katmanının hassasiyete ve yansımaya olan etkileri incelenmiştir. ITO' nun incelendiği simülasyonlarda en yüksek hassasiyet değeri 2825 nm/RIU elde edilmiştir. 30 nm altın kalınlığının üzerine 1 nm kalınlıktaki ITO katmanının eklenmesi hassasiyeti 25 nm/RIU artırmıştır.

Altın katmanının 20 nm, 30 nm, 40 nm, 50 nm ve 60 nm kalınlığında olduğu durumlarda ZnO katmanının hassasiyete ve yansıma değerine etkileri incelenmiştir. Simülasyon çalışmaları ZnO katmanının kalınlığının 0 nm, 5 nm, 10 nm, 15 nm ve 20 nm olduğu şartlar altında gerçekleştirilmiştir. ZnO' nun incelendiği simülasyonlarda en yüksek hassasiyet değeri 2825 nm/RIU' dur. En yüksek hassasiyet değeri 60 nm altın kalınlığının üzerine 5 nm kalınlıktaki ZnO katmanının eklenmesi ile elde edilmiştir.

4.2. Tartışma ve Öneriler

Yapılan simülasyon çalışmaları 2 boyutlu malzemelerin hassasiyeti artırdığını göstermektedir. Altın kalınlığının 40 nm olduğu durumda 2 boyutlu malzemelerin etkisiyle hassasiyet değeri önce artmış sonra azalmıştır. Altın kalınlığı 50 nm olduğu durumda 2 boyutlu malzemelerin hassasiyet değerlerine olan etkileri düzensizdir. Hassasiyet değerleri grafen katmanının eklenmesine bağlı olarak artıp azalış göstermiştir. Altın kalınlığı 60 nm' ye çıkarıldığı zaman hassasiyet değeri grafen katmanının artışına bağlı olarak artmıştır. Fakat bu artış 2 boyutlu malzemelerin hassasiyete olan etkilerinin incelendiği simülasyon çalışmalarındaki en yüksek hassasiyet değerini geçememiştir.

ITO katmanının, altın kalınlığının 20 nm, 25 nm, 30 nm ve 40 nm olduğu algılayıcı yapılarında yansıma değerini ciddi oranda düşürdüğü gözlemlenmiştir. ITO katmanı, altın kalınlığının 20 nm olduğu durumda hassasiyet değerini artırmıştır. Buna karşın ITO katmanının varlığı altın katmanının 25 nm, 30 nm, 40 nm, 50 nm ve 60 nm olduğu yapılarda hassasiyeti düşürmüştür. ITO katmanının yansıma değerini azalması, ITO' nun uygunlaştırma amaçlı kullanılmasına olanak tanımaktadır. Örneğin tasarlanmış bir algılayıcıda oldukça yüksek hassasiyet değeri elde edilmişken yansıma değeri 0' a oldukça uzaksa yansımanın 0 yapılması amacıyla çeşitli kalınlıklardaki ITO katmanları algılayıcı yapısına dahil edilebilir.

ZnO katmanın eklenmesi altın kalınlığının 20 nm, 30 nm ve 40 nm olduğu durumlarda hassasiyeti artırmıştır. Fakat hassasiyeti artırmakla birlikte yansıma değerini de artırmıştır. Altın kalınlığının 50 nm ve 60 nm olduğu durumda ZnO katmanının eklenmesi hassasiyete neredeyse etki etmemiştir. Hassasiyetin çok az değişimlere uğramasına karşın yansıma değerinde azalmalar görülmüştür. Bu sebeple ITO katmanına benzer şekilde ZnO katmanının da belirli şartlar altında uygunlaştırma için kullanılabileceği düşünülmektedir.

2 boyutlu malzemelerin dielektrik katsayılarının görünür spektrumdaki ani değişimi bazı şartlar altında salınım dalga boyunu belirsiz yapmak veya yansımada ikincil salınım üretmek gibi istenmeyen durumları meydana getirmektedir. Bu durumların giderilmesi amacıyla algılayıcı yapısında düzenlemeler yapılmalıdır. İlk katman fiber optik kablonun özü olduğundan dolayı düzenlemeye fiber optik kabloya ait parametrelerden başlanmalıdır. Algılama bölgesi, ışığın algılanması hedeflenen madde ile etkileştiği bölge olduğu için oldukça önemlidir. Algılama bölgesinin uzunluğundaki değişimler salınım dalga boyunda oluşabilecek potansiyel problemlerin giderilmesinde etkili olmaktadır. Bir diğer çözüm yansımanın artırılması veya azaltılmasıdır. Hedeflenen tasarımda metal kalınlığını artırmak veya azaltmak zorunlu ise yansıma değerini uygunlaştırmak amacıyla ITO ve ZnO kullanımı faydalı olmaktadır.

KAYNAKÇA

1. Velázquez-González, J. S., Monzón-Hernández, D., Moreno-Hernández, D., Martínez-Piñón, F., Hernández-Romano, I., 2017. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a SPR-based fiber optic sensor. **Sensors and Actuators B: Chemical**, **242:** 912-920.
2. Paliwal, N., John, J., 2017. Design and modeling of highly sensitive lossy mode resonance-based fiber-optic pressure sensor. **IEEE Sensors Journal, 18(1):** 209-215.
3. Pevec, S., Donlagic, D., 2017. Multiparameter fiber-optic sensor for simultaneous measurement of thermal conductivity, pressure, refractive index, and temperature. **IEEE Photonics Journal, 9(1):** 1-14.
4. Limodehi, H. E., Légaré, F., 2017. Fiber optic humidity sensor using water vapor condensation. **Optics express, 25(13):** 15313-15321.
5. Shao, Y., Wang, Y., Cao, S., Huang, Y., Zhang, L., Zhang, F., Liao C. Wang, Y., 2018. Mechanism and characteristics of humidity sensing with polyvinyl alcohol-coated fiber surface plasmon resonance sensor. **Sensors, 18(7):** 2029.
6. Verma, R., Srivastava, S. K., Gupta, B. D., 2012. Surface-plasmon-resonance-based fiber-optic sensor for the detection of low-density lipoprotein. **IEEE Sensors Journal, 12(12):** 3460-3466.
7. Shah, K., Sharma, N. K., Sajal, V., 2017. SPR based fiber optic sensor with bi layers of indium tin oxide and platinum: A theoretical evaluation. **Optik, 135:** 50-56.
8. Wang, Q., Sun, B., Hu, E., Wei, W., 2019. Cu/ITO-coated uncladded fiber-optic biosensor based on surface plasmon resonance. **IEEE Photonics Technology Letters, 31(14):** 1159-1162.
9. Saad, Y., Selmi, M., Gazzah, M. H., Belmabrouk, H., 2018. The Effect of Physical and Geometric Parameters on the Surface Plasmon Resonance Response of a Fiber Optic Biosensor: Sensitivity Analysis and Numerical Optimization. **Sensor Letters, 16(6):** 403-409.
10. Zhou, J., Qi, Q., Wang, C., Qian, Y., Liu, G., Wang, Y., Fu, L., 2019. Surface plasmon resonance (SPR) biosensors for food allergen detection in food matrices. **Biosensors and Bioelectronics, 142:** 111449.

11. Zenneck, J., 1907. Über die Fortpflanzung ebener elektromagnetischer Wellen längs einer ebenen Leiterfläche und ihre Beziehung zur drahtlosen Telegraphie. **Annalen der Physik, 328(10):** 846-866.
12. Otto, A., 1968. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection. **Zeitschrift für Physik A Hadrons and nuclei, 216(4):** 398-410.
13. Rani, M., 2014. Studies On Surface Plasmon Resonance Based Fiber Optic Sensors, Jaypee Institute Of Information Technology, Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis, Noida, 193.
14. Kretschmann, E., 1971. Die bestimmung optischer konstanten von metallen durch anregung von oberflächenplasmaschwingungen. **Zeitschrift für Physik A Hadrons and nuclei, 241(4):** 313-324.
15. Sharma, A. K., Jha, R., Gupta, B. D., 2007. Fiber-optic sensors based on surface plasmon resonance: a comprehensive review. **IEEE Sensors Journal, 7(8):** 1118-1129.
16. Rahman, M. S., Abdulrazak, L. F., 2019. Utilization of a phosphorene-graphene/TMDC heterostructure in a surface plasmon resonance-based fiber optic biosensor. **Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 35:** 100711.
17. Kushwaha, A. S., Kumar, A., Kumar, R., Srivastava, S. K., 2018. A study of surface plasmon resonance (SPR) based biosensor with improved sensitivity. **Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 31:** 99-106.
18. Maurya, J. B., Prajapati, Y. K., Singh, V., Saini, J. P., 2015. Sensitivity enhancement of surface plasmon resonance sensor based on graphene–MoS 2 hybrid structure with TiO 2–SiO 2 composite layer. **Applied Physics A, 121(2):** 525-533.
19. Homola, J., Koudela, I., Yee, S. S., 1999. Surface plasmon resonance sensors based on diffraction gratings and prism couplers: sensitivity comparison. **Sensors and Actuators B: Chemical, 54(1-2):** 16-24.
20. Bhatia, P., Gupta, B. D., 2013. Surface plasmon resonance based fiber optic refractive index sensor utilizing silicon layer: Effect of doping. **Optics Communications, 286:** 171-175.

21. Jamil, N. A. B., Menon, P. S., Mei, G. S., Shaari, S., Majlis, B. Y., 2017. Urea biosensor utilizing graphene-MoS 2 and Kretschmann-based SPR. 1973-1977. *TENCON 2017-2017 IEEE Region 10 Conference* (pp.). IEEE.

22. Singh, S., Mishra, S. K., Gupta, B. D., 2013. Sensitivity enhancement of a surface plasmon resonance based fibre optic refractive index sensor utilizing an additional layer of oxides. **Sensors and Actuators A: Physical, 193:** 136-140.

23. Rani, M., Shukla, S., Sharma, N. K., Sajal, V., 2014. Theoretical study of nanocomposites based fiber optic SPR sensor. **Optics Communications, 313:** 303-314.

24. Kai-Qun, L., Lai-Ming, W., Dou-Guo, Z., Rong-Sheng, Z., Pei, W., Yong-Hua, L., Hai, M., 2007. Temperature effects on prism-based surface plasmon resonance sensor. **Chinese Physics Letters, 24(11):** 3081.

25. Sharma, N. K., Yadav, S., Sajal, V., 2014. Theoretical analysis of highly sensitive prism based surface plasmon resonance sensor with indium tin oxide. **Optics Communications, 318:** 74-78.

26. Haddouche, I., Cherbi, L., Ferhat, M. L., 2017. Analytical modelization of a fiber optic-based surface plasmon resonance sensor. **Optics Communications, 402:** 618-623.

27. Han, L., He, X., Ge, L., Huang, T., Ding, H., Wu, C., 2019. Comprehensive study of SPR biosensor performance based on metal-ITO-graphene/TMDC hybrid multilayer. **Plasmonics, 14(6):** 2021-2030.

28. Han, L., Chen, Z., Huang, T., Ding, H., Wu, C., 2020. Sensitivity enhancement of Ag-ITO-TMDCs-graphene nanostructure based on surface plasmon resonance biosensors. **Plasmonics, 15(3):** 693-701.

29. Rahman, M. S., Hasan, M. R., Rikta, K. A., Anower, M. S., 2018. A novel graphene coated surface plasmon resonance biosensor with tungsten disulfide (WS2) for sensing DNA hybridization. **Optical Materials, 75:** 567-573.

30. Odacı, C., Aydemir, U., 2021. The surface plasmon resonance-based fiber optic sensors: A theoretical comparative study with 2D TMDC materials. **Results in Optics, 3:** 100063.

31. Sultan, M. F., Al-Zuky, A. A., Kadhim, S. A., 2018. Surface Plasmon Resonance Based Fiber Optic Sensor: Theoretical Simulation and Experimental Realization. **Al-Nahrain Journal of Science, 21(1):** 65-70.

32. Said, F. A., Menon, P. S., Rajendran, V., Shaari, S., Majlis, B. Y., 2017. Investigation of graphene-on-metal substrates for SPR-based sensor using finite-difference time domain. **IET nanobiotechnology, 11(8):** 981-986.
33. Basak, C., Hosain, M. K., Sazzad, A. A., 2020. Design and Simulation of a High Sensitive Surface Plasmon Resonance Biosensor for Detection of Biomolecules. **Sensing and Imaging, 21(1):** 1-19.
34. Gan, S. M., Menon, P. S., Mohamad, N. R., Jamil, N. A., Majlis, B. Y., 2019. FDTD simulation of Kretschmann based Cr-Ag-ITO SPR for refractive index sensor. **Materials Today: Proceedings, 7:** 668-674.
35. Liu, Q., Liu, Y., Yuan, H., Wang, F., Peng, W., 2018. A smartphone-based red–green dual color fiber optic surface plasmon resonance sensor. **IEEE Photonics Technology Letters, 30(10):** 927-930.
36. Tabassum, R., Kant, R., 2019. Mechanistic understanding of excitation of surface plasmons in a fiber-optic SPR sensor utilizing Al/Cu bimetallic configuration: mode field approach. **Physica Scripta, 94(12):** 125012.
37. Mukhtar, W. M., Ayob, N. R., Halim, R. M., Samsuri, N. D., Murat, N. F., Rashid, A. R. A., Dasuki, K. A., 2018. Effect of noble metal thin film thicknesses on surface plasmon resonance (SPR) signal amplification. **Journal of Advanced Research in Materials Science, 49(1):** 1-9.
38. Manzeli, S., Ovchinnikov, D., Pasquier, D., Yazyev, O. V., Kis, A., 2017. 2D transition metal dichalcogenides. **Nature Reviews Materials, 2(8):** 1-15.
39. Dickinson, R. G., Pauling, L., 1923. The crystal structure of molybdenite. **Journal of the American Chemical Society, 45(6):** 1466-1471.
40. Wilson, J. A., Yoffe, A. D., 1969. The transition metal dichalcogenides discussion and interpretation of the observed optical, electrical and structural properties. **Advances in Physics, 18(73):** 193-335.
41. Shushama, K. N., Rana, M. M., Inum, R., Hossain, M. B., 2017. Sensitivity enhancement of graphene coated surface plasmon resonance biosensor. **Optical and Quantum Electronics, 49(11):** 1-13.
42. Pumera, M., Loo, A. H., 2014. Layered transition-metal dichalcogenides (MoS2 and WS2) for sensing and biosensing. **TrAC Trends in Analytical Chemistry, 61:** 49-53.

43. Roy, S. K., Sharan, P., 2020. Design of ultra-high sensitive biosensor to detect E. Coli in water. **International Journal of Information Technology, 12(3):** 775-780.
44. Aminah, N. S., Liani, P. H., Hidayat, R., Djamal, M., 2018. Fabrication and simulation of surface plasmon resonance (SPR)-based tapered fiber sensor for E. coli detection. **Materials Today: Proceedings, 5(6):** 14177-14182.
45. Kaushik, S., Tiwari, U. K., Pal, S. S., Sinha, R. K., 2019. Rapid detection of Escherichia coli using fiber optic surface plasmon resonance immunosensor based on biofunctionalized Molybdenum disulfide (MoS2) nanosheets. **Biosensors and Bioelectronics, 126:** 501-509.
46. Shushama, K. N., Rana, M. M., Inum, R., Hossain, M. B., 2017. Graphene coated fiber optic surface plasmon resonance biosensor for the DNA hybridization detection: Simulation analysis. **Optics Communications, 383:** 186-190.
47. Mishra, A. K., Mishra, S. K., Verma, R. K., 2016. Graphene and beyond graphene MoS2: a new window in surface-plasmon-resonance-based fiber optic sensing. **The Journal of Physical Chemistry C, 120(5):** 2893-2900.
48. Sharma, A. K., Kaur, B., Popescu, V. A., 2020. On the role of different 2D materials/heterostructures in fiber-optic SPR humidity sensor in visible spectral region. **Optical Materials, 102:** 109824.
49. Otupiri, R., Akowuah, E. K., Haxha, S., 2015. Multi-channel SPR biosensor based on PCF for multi-analyte sensing applications. **Optics express, 23(12):** 15716-15727.
50. Hoseinian, M. S., Bolorizadeh, M. A., 2019. Design and simulation of a highly sensitive SPR optical fiber sensor. **Photonic Sensors, 9(1):** 33-42.
51. Suzuki, H., Sugimoto, M., Matsui, Y., Kondoh, J., 2008. Effects of gold film thickness on spectrum profile and sensitivity of a multimode-optical-fiber SPR sensor. **Sensors and Actuators B: Chemical, 132(1):** 26-33.
52. Balaa, K., Kanso, M., Cuenot, S., Minea, T., Louarn, G., 2007. Experimental realization and numerical simulation of wavelength-modulated fibre optic sensor based on surface plasmon resonance. **Sensors and Actuators B: Chemical, 126(1):** 198-203.
53. Yuan, Y., Ding, L., Guo, Z., 2011. Numerical investigation for SPR-based optical fiber sensor. **Sensors and Actuators B: Chemical, 157(1):** 240-245.

54. Al-Qazwini, Y., Arasu, P. T., Noor, A. S. M., 2011. (pp. 1-4). Numerical investigation of the performance of an SPR-based optical fiber sensor in an aqueous environment using finite-difference time domain. *2nd International Conference on Photonics,* IEEE.
55. Xinglong, Y., Dingxin, W., Zibo, Y., 2003. Simulation and analysis of surface plasmon resonance biosensor based on phase detection. **Sensors and Actuators B: Chemical, 91(1-3):** 285-290.
56. Singh, S., Gupta, B. D., 2010. Simulation of a surface plasmon resonance-based fiber-optic sensor for gas sensing in visible range using films of nanocomposites. **Measurement Science and Technology, 21(11):** 115202.
57. Mishra, A. K., Mishra, S. K., Gupta, B. D., 2015. SPR based fiber optic sensor for refractive index sensing with enhanced detection accuracy and figure of merit in visible region. **Optics Communications, 344:** 86-91.
58. Kapoor, V., Sharma, N. K., 2020. Surface plasmon resonance-based fiber optic sensor prepared from bilayers of indium tin oxide-indium oxide. **Microwave and Optical Technology Letters, 62(7):** 2439-2443.
59. Ahmed, K., Haque, M. J., Jabin, M. A., Paul, B. K., Amiri, I. S., Yupapin, P., 2019. Tetra-core surface plasmon resonance based biosensor for alcohol sensing. **Physica B: Condensed Matter, 570:** 48-52.
60. Tabassum, R., Gupta, B. D., 2016. SPR based fiber-optic sensor with enhanced electric field intensity and figure of merit using different single and bimetallic configurations. **Optics communications, 367:** 23-34.
61. Gupta, B. D., Verma, R. K., 2009. Surface plasmon resonance-based fiber optic sensors: principle, probe designs, and some applications. **Journal of sensors, 2009.**
62. Hamola J., Surface Plasmon Resonance Sensors, Springer, 253.
63. Guo, X., 2012. Surface plasmon resonance based biosensor technique: a review. **Journal of biophotonics, 5(7):** 483-501.
64. Kurihara, K., Suzuki, K., 2002. Theoretical understanding of an absorption-based surface plasmon resonance sensor based on Kretchmann's theory. **Analytical chemistry, 74(3):** 696-701.
65. Hansen, W. N., 1968. Electric fields produced by the propagation of plane coherent electromagnetic radiation in a stratified medium. **JOSA, 58(3):** 380-390.

66. Hsu, C., Frisenda, R., Schmidt, R., Arora, A., de Vasconcellos, S. M., Bratschitsch, R., Zant H. S. J, Castellanos-Gomez, A., 2019. Thickness-dependent refractive index of 1L, 2L, and 3L MoS2, MoSe2, WS2, and WSe2. **Advanced Optical Materials, 7(13):** 1900239.

67. Shukla, S., Sharma, N. K., Sajal, V., 2015. Sensitivity enhancement of a surface plasmon resonance based fiber optic sensor using ZnO thin film: a theoretical study. **Sensors and Actuators B: Chemical, 206:** 463-470.

68. Aguilar, O., de Castro, S., Godoy, M. P., Dias, M. R. S., 2019. Optoelectronic characterization of Zn 1-x Cd x O thin films as an alternative to photonic crystals in organic solar cells. **Optical Materials Express, 9(9):** 3638-3648.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Gökbey Berat ÖZÇİFTÇİ

Uyruğu: Türkiye (T.C)

Doğum Tarihi ve Yeri: [redacted]

Medeni Durum:

e-mail:

Yazışma Adresi:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Müh.	2018
Lise	2000 Evler Anadolu Lisesi, Nevşehir.	2014

YABANCI DİL

İngilizce