



**KIRILMA İNDİSİ GÜÇLENDİRİLMİŞ PLAZMONİK  
AYGITLARDA IŞIK YAYILIMI**

**PULSE PROPAGATION ON INDEX-ENHANCED  
PLASMONIC DEVICES**

**ELİF ÖZTÜRK**

**PROF. DR. MEHMET EMRE TAŞGIN**

**Danışman**

**DR.ÖĞR.ÜYESİ RASİM VOLGA OVALI**

**Eş Danışman**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı için Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

Mart 2024

## ÖZET

# KIRILMA İNDİSİ GÜÇLENDİRİLMİŞ PLAZMONİK AYGITLARDA IŞIK YAYILIMI

**Elif Öztürk**

**Yüksek Lisans, Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. MEHMET EMRE TAŞGIN**

**Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Rasim Volga OVALI**

**2024, 68 sayfa**

Metal nanoparçacıkların (MNP) sahip oldukları optik özellikler temelde lokalize yüzey plazmon rezonanslarıyla belirlenmektedir. Bir MNP’de, lokalize olmuş yüzey plazmonlarının frekansı; partikülün boyutu, geometrisi ve bulunduğu yerel ortamın kırılma indisine bağlıdır. MNP’lerin birbirine nanometre mesafesinde buldukları koşulda, nanoparçacık çevresinde lokalize olmuş sıcak noktalar (hot spot) oluşur. Plazmonik sıcak noktalar, özellikle optik alanlarda önemli rol oynar. Örneğin, plazmonik sıcak noktaların olduğu metal yüzeyler, ışık yolculuğu sırasında ışık dalgalarının yoğunlaştırılmasına ve güçlenmesine neden olabilir. Plazmonik sıcak noktaların oluşumu, metal yüzeylerin şekline ve yapısına bağlıdır. Özellikle, metal yüzeylerin düzgün ve simetrik olması plazmonik sıcak noktaların oluşumunu kolaylaştırır. MNP’ler bu sıcak noktalar aracılığıyla birbirleri ile etkileşebilirler. Bu etkileşimler beraberinde polarizasyon, duyarlılık ve indis değişimi gibi birçok etkiye neden olmaktadır. Kırılma indisinin başka (yardımcı) bir ışık ile kontrol edilmesi tüm fotonik teknolojilerini değiştirecektir. Bu tezde, böyle bir ortamda ışık yayılımı hem analitik hem de FDTD (finite difference time domain metodu) ile incelenmiştir. Bu tür bir inceleme sadece bu tarz fotonik cihazlarda ışık yayılımının örneklendirilmesi amacını içermemektedir. Aynı zamanda, bu tür bir sistemde gözlemlenebilecek yavaşlatılmış ışık (slow light) fenomeninin incelenilmesi amacı

güdülmektedir. Yavaşlatılmış ışık konusu fotonik kristallerle daha önceden çalışılmış olup fotonik kristallerin fotonik bant aralığının bilinçli kusurlarla değiştirilmesi tekniğine dayanmaktadır. Fakat bu çalışmalar fotonik kristallerle yapıldığına hem değişimler çok küçük olmakta hem süreç çok hassasiyet istemekte ve aynı zamanda tersinir olmayışından dolayı düşük proses verimliliğine götürmektedir. Plazmonik teknolojisi bu konudaki en efektif çözümü sunmaktadır. Bahsi geçen sistem sadece indeks güçlendirmesini değil, aynı zamanda sıfıra-yakın-epsilon (epsilon-near-zero, ENZ), yani indeksi sıfıra yakın, malzemeleri de incelemeyi vaatmektedir. MNP yapısını değiştirmeden kontrol ışığı ile hem artırılmış indeks hem de sıfıra-yakın-indeks elde edilebilmektedir. Literatürde de çalışmaları oldukça kısıtlı olan bu alanda değişen senaryolarla birlikte elde edilen verilerin daha sonra oluşturulacak çalışmalar için temel oluşturma etkisi bulunmaktadır. Bu çalışmayla birlikte gümüş nanoçubuklarda plazmonik etkiyle birlikte değişen kırma indisinin hem sonlu fark zaman alanı metoduyla hem de analitik olarak çözümü incelenmiştir. Bu sayede gümüş nanoçubuklarla kurulan bu sistemde değişen kırma indisıyla birlikte değişen grup hızları incelenmiştir. Tez kapsamında yapılan analitik temelli ve simülasyon temelli çalışmalar sayesinde birbiriyle tutarlı ve anlamlı sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmalar yardımcı bir ışık yardımıyla tüm bunların yapılabileceği gösterilmiştir. Şaşırtıcı ve değerli olan kontrol (Ex) kaynağının normal şartlarda sinyalin (Ey) polarizasyonu üzerinde bir etkisi olamayacak konumda olmasına rağmen sinyal (Ey) üzerinde değişiklik yaratmasıdır. Bunun nedeni direkt olarak kontrol (Ex); y eksenli rodun uzun eksen uçlarındaki polarizasyona katkı vermemesine rağmen sıcak noktada meydana gelen değişimin indirekt olarak sinyal (Ey) üzerindeki etkisidir. Simülasyon ilk olarak, sinyal ve kontrol kaynaklarının genliklerinin oranlarının 1 olduğu durumda incelenmiştir. Devamında ise farklı genlik oranları kullanılıp (1, 10, 100, 200) sistemin sıcak nokta çevresindeki tepkisi incelenmiştir. Buradaki incelemelerde kontrol kaynağın değişen genliğiyle kontrole dik olan sinyal kaynağıyla aynı yöndeki polarizasyon değişimi gözlemlenmiştir. Normal şartlarda kontrol kaynağındaki genlik değişiminin sinyalle aynı yönlü polarizasyonda bir değişim yaratması beklenmemektedir. Fakat eşleşme (coupling) dolayısıyla sinyal kaynağı sabit olduğu durumda dahi değişen kontrol genliğinin sinyal kaynağıyla aynı yönlü polarizasyona katkı sağladığı gözlenmiştir. Anormal dispersiyon, ESY ve diğer parametrelerin tamamının

gözlenmesi tamamen bu etkiden kaynaklanmaktadır. Birbiriyle tutarlı olan bu çalışma neticesinde ilerde yapılabilecek deneysel çalışmalara temel oluşturulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Plazmonik, Güçlendirilmiş kırılma indisi, Epsilon sıfıra yakın

## **ABSTRACT**

### **PULSE PROPAGATION ON INDEX-ENHANCED PLASMONIC DEVICES**

**Elif Öztürk**

**Master of Science, Department of Nanotechnology and Nanomedicine**

**Supervisor: Prof. Dr. MEHMET EMRE TAŞGIN**

**2nd Supervisor: Asst. Prof. RASİM VOLGA OVALI**

**2024, 68 sayfa**

The optical properties of metal nanoparticles (MNPs) are primarily determined by localized surface plasmon resonances. In an MNP, the frequency of localized surface plasmons depends on the particle's size, geometry, and the refractive index of the surrounding local medium. When MNPs are in close proximity, localized hot spots emerge around the nanoparticle, and these plasmonic hot spots play a crucial role, particularly in optical fields. Metal surfaces where plasmonic hot spots occur can lead to the concentration and enhancement of light waves during the journey of light.

The formation of plasmonic hot spots is contingent upon the shape and structure of metal surfaces, with smooth and symmetric surfaces facilitating their creation. MNPs can interact with each other through these plasmonic hot spots, resulting in various effects such as polarization, sensitivity, and refractive index changes. The ability to control the refractive index with another (auxiliary) light can revolutionize all photonic technologies.

This thesis investigates light propagation in such an environment using both analytical and FDTD (finite difference time domain) methods. This examination goes beyond illustrating light propagation in such photonic devices; it also aims to explore the phenomenon of slow

light that can be observed in such a system. The concept of slow light has been previously explored with photonic crystals, relying on deliberately altering the photonic bandgap of these crystals through precise defects. However, these studies are limited by their dependence on photonic crystals, requiring high precision and suffering from low process efficiency due to their irreversible nature. Plasmonic technology offers a more effective solution in this regard.

The discussed system not only promises index enhancement but also explores materials with epsilon-near-zero (ENZ) indices, where the index approaches zero. It is possible to achieve both increased index and near-zero index without altering the MNP structure using control light. In this area with limited literature, the data obtained with varying scenarios in this study will serve as a foundation for future research.

This study examines the analytical and simulation-based solutions for the changing refractive index due to plasmonic effects in silver nanorods. This allows for the investigation of changing group velocities along with the changing refractive index in the system established with silver nanorods. The consistent and meaningful results obtained from both analytical and simulation-based studies within the scope of the thesis provide a strong basis for future experimental studies.

The research demonstrates that all of these effects can be achieved with the assistance of auxiliary light. One surprising and valuable finding is that the control ( $E_x$ ) source, which would not have a direct impact on the polarization of the signal ( $E_y$ ) under normal circumstances, induces changes in the signal ( $E_y$ ). This is due to the indirect influence of the change in polarization at the hot spot, even though the control ( $E_x$ ) does not contribute to the polarization at the ends of the rod along the y-axis. This simulation first examined the case where the amplitude ratios of the signal and control sources were 1. Subsequently, different amplitude ratios (1, 10, 100, 200) were used, and the system's response around the hot spot was investigated. In these examinations, a polarization change in the same direction as the signal source, orthogonal to the control, was observed with the varying amplitude of the control source. Under normal circumstances, a change in the amplitude of the control source

would not be expected to induce a change in the polarization direction of the signal. However, due to coupling, it was observed that even when the signal source is constant, the changing amplitude of the control contributes to the polarization in the same direction as the signal. The observed anomalous dispersion, ENZ, and other parameters are entirely attributed to this effect. This internally consistent study lays the groundwork for future experimental studies.

**Keywords:** Plasmonic, Refractive index enhancement, Epsilon Near Zero



## TEŞEKKÜR

Nereden nasıl başlayacağımı bilmediğim bu teşekkür sayfasında ismini anmadan içimin rahat etmeyeceği çok isim var. Bu akademik yolculuğun en başına gidersem ilk olarak Prof. Dr. Semra İDE'ye benim yoluma ışık olduğu için sonsuz teşekkür ederim. Belki Semra Hocamın yönlendirmesi olmasaydı bu yola hiç çıkamazdım bile. İyi ki var.

Lisans sürecimden bu yana kıymetli desteklerini hiç esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Emre TAŞÇI Hocama emekleri, tavsiyeleri için çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim süresince; bana akademik hayatı öğreten, böyle bir alanla tanışmamı sağlayan Danışmanım Sayın Prof. Dr. Mehmet Emre Taşgın Hocama sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum

Tez süresince desteklerini benden hiç esirgemeyen Eş Danışmanım Dr. Rasim Volga OVALI Hocama sonsuz teşekkür ederim.

Doç. Dr. Ramazan Şahin Hocam için ne desem yeterli gelir bilmiyorum ama sabırla her soruma cevap verdiği için, bu yoldaki inancımı diri tuttuğu, beni yüreklendirdiği için çok teşekkür ederim.

Canım annimin, yıllar önce fizik okuyacağımı söylediğimdeki desteğinden bugüne dek inancına çok teşekkür ederim. Umarım daha çok başarılarımla onu gurulandırabilirim. Emeklerine çok teşekkür ederim.

Son olarak her anımda yanımda olan, sevgisini, inancını, desteğini hep hissettiğim canım eşim Serhat'a çok teşekkür ederim.

Işık olsun!

Elif ÖZTÜRK

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	9
2.1. Optik Sabitler	9
2.2. Plazmonik	11
2.3. Lokalize Yüzey Plazmonları	12
2.4. Sıcak Noktalar	13
2.5. Metallerin Optik Özellikleri	14
2.6. Hız Tanımları	16
2.6.1. Grup Hızı	16
2.6.2. Faz Hızı	17
2.7. Epsilon Sıfıra Yakın Malzemeler	18
2.8. Elektromanyetik Olarak Uyarılan Şeffaflık	18
2.9. Metallerin Elektromanyetik Olarak İncelenmesi	19
2.10. Maxwell Denklemleri	19
2.11. Zaman Uzayında Sonlu Farklar Yöntemi(FDTD)	21
2.12. Yee Hücresi	23
2.12.1. Ayrıklaştırma	24
2.13. Süperlüminal Bölge	26
3. YÖNTEM	29
3.1. Simülasyon Temelli Hesaplama Yöntemi	29
3.2. Analitik Temelli Hesaplama Yöntemi	34

4. BULGULAR	37
5. SONUÇLAR	46
6. KAYNAKÇA	47
EKLER	49
EK 1 - Tez Çalışması Orjinallik Raporu	49
ÖZGEÇMİŞ	51

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1	X ve Y polarize ışıkla etkilşen; X ve Y eksenine üzerine yerleştirilmiş gümüş nanorodlar[1] ..... 4
Şekil 1.2	Duyulganlık. (a) Standart dispersiyon eğrilerine sahip iki seviyeli bir sistemde, (b) EIT'yi gösteren koherent bir sistemde ve (c) Arttırılmış kırma indisi etkisi aracılığıyla koherent bir sistemdeki duyarlılığın gerçel ve sanal kısımları[1] ..... 5
Şekil 1.3	Yüzey plazmonlarının koherent kontrolüne dayalı optik nano anahtarın şematik gösterimi. Şeklin iç kısmı, L-şekilli metayüzeyden bir meta-atomun şematik gösterimini içerir, burada yatay polarize ışık sinyal demetini temsil ederken, dikey polarize ışık kontrol demeti olarak hareket eder[2]. ..... 6
Şekil 1.4	Kontrol ve sinyal demeti arasındaki faz farkının bir fonksiyonu olarak simüle edilmiş ve deneysel modüle edilmiş çıkış sinyal yoğunluğu, PC = 4 durumunda güçlü anahtarlama etkisini sergiler[2]. 7
Şekil 2.1	Lokalize Yüzey Plazmon Temsili. Elektromanyetik salınımını temsil eden kırmızı oklar, metal yüzeyinde yüklerin kutuplanmasına neden olmaktadır. .... 12
Şekil 2.2	Sıcak Nokta Temsili. E yönlü polarizasyon z ilerleme yönüne sahipken metal nanoparçacık üzerinde oluşturduğu dipolün gösterimi. 13
Şekil 2.3	Sırasıyla Metaller için a) Drude Model plazma frekasında( $\omega_p$ ) reel geçirgenlik( $\epsilon_1$ ) sanal geçirgenlik( $\epsilon_2$ ) b) Lorentz Model. Rezonans frekasında( $\omega_0$ ) reel geçirgenlik( $\epsilon_1$ ) sanal geçirgenlik( $\epsilon_2$ )[3] ..... 16
Şekil 2.4	Grup Hızı ve Faz Hızı Temsili[3] ..... 17
Şekil 2.5	FDTD Metodu Çalışma Diyagramı. Gauss darbesinin FDTD simülasyonunda zaman cevabı ve Fourier dönüşümüyle zamandan frekansa geçen cevabı[4]. .... 23

Şekil 2.6	Yee Hücresi.....	24
Şekil 2.7	Merkezi Fark Yaklaşımıyla Türev Hesabı .....	26
Şekil 3.1	Simülasyon Modeli. X ve Y polarize ışıkla etkileşen; X ve Y eksenine üzerine yerleştirilmiş gümüş nanorodlar. Z dalganın ilerleme doğrultusu[1]. .....	29
Şekil 3.2	Nanoçubuklar ve Elektrik Alan Kaynakları. Mavi oklar polarizasyon doğrultusunu, pembe yönelim dalganın ilerleme yönünü temsil etmektedir. ....	30
Şekil 3.3	Simülasyon Bölgesi. Turuncu bölge simülasyonun hesaplama yapacağı alanı temsil eder. ....	31
Şekil 3.4	Hesaplama Güçlendirmek İçin Yoğunlaştırılmış Izgara Yapılı Simülasyon Eklentisi. Nanorodların merkezinde sıcak nokta oluşumunun öngörüldüğü noktada merkezlenmiş bölge. ....	32
Şekil 3.5	Detaylı Simülasyon Temsili. Turuncu çizgilerle sınırlanmış alan; FDTD bölgesi. Sarı ve gri paralel alanlar; farklı monitörlerinin çalışma bölgeleri.....	33
Şekil 4.1	FDTD Simülasyonu ile elde edilen y-yönündeki polarizasyondan elde edilen duyulganlık. Monitör hem iki nanorodun ortasındaki sıcak noktaya hem de y-yönünde uzanan nanorodun diğer ucundaki sıcak noktaya konularak incelenmiştir.....	37
Şekil 4.2	Analitik Duyulganlık. Farklı E2/E1 oranlarında analitik olarak normalize frekans bölgesinde duyulganlık .....	38
Şekil 4.3	FDTD Simülasyonu ile elde edilen farklı E2/E1 oranlarında simülasyon üzerinden ölçeklendirilmiş elektrik alanlardan hesaplanan normalize frekans bölgesinde duyulganlık .....	39
Şekil 4.4	Analitik Kırma İndisi. Farklı E2/E1 oranlarında analitik olarak normalize frekans bölgesinde kırma indisi.....	40
Şekil 4.5	Analitik Grup Hızı. Farklı E2/E1 oranlarında analitik olarak hesaplanmış, ışık hızına göre skalalandırılmış normalize frekans bölgesinde kırma indisi .....	41

Şekil 4.6	$\omega = 0.90\omega_0$ Durumunda Hız Değişimi. Logaritmik skalalandırılmış grup hızına karşı kaynak ışık genliği .....	42
Şekil 4.7	$\omega = 0.97\omega_0$ Durumunda Hız Değişimi. Logaritmik skalalandırılmış grup hızına karşı kaynak ışık genliği .....	43
Şekil 4.8	$\omega = 0.97\omega_0$ Durumunda Hız Değişimi. Skalalandırılmış grup hızına karşı kaynak ışık genliği .....	43
Şekil 4.9	$\omega = \omega_0$ Durumunda Hız Değişimi. Logaritmik skalalandırılmış grup hızına karşı kaynak ışık genliği.....	44
Şekil 4.10	FDTD simülasyonu üzerinden hesaplanan, E2/E1 oranı 20 iken farklı faz farklarında sistemin duyulganlık tepkisi .....	44
Şekil 4.11	Analitik olarak E2/E1 oranı 20 iken farklı faz farklarında sistemin duyulganlık tepkisi .....	45

## KISALTMALAR

<b>MNP</b>	:	<b>Metal Nano Parçacık</b>
<b>ESY</b>	:	<b>Epsilon Sıfıra Yakın</b>
<b>MUK</b>	:	<b>Mükemmel Uyumlu Katman</b>
<b>SSK</b>	:	<b>Soğurucu Sınır Koşulları</b>
<b>EIT</b>	:	<b>Elektromanyetik İndüklenen Transparanlık</b>
<b>LYP</b>	:	<b>Lokalize Yüzey Plazmonu</b>

# 1. GİRİŞ

Plazmonik, ışık enerjisini yüzey plazmonu olarak bilinen, serbest elektronların nanometre ölçeğinde salınan alanıyla sınırlandırarak hem fotonik hem de elektroniğin özelliklerini birleştiren, nanofotonikte devrim niteliğinde bir kavramdır. Tanımı ilk olarak 20. yüzyılın ortalarında yapılan plazmonik konusu yeni keşiflere olanak vermesi sebebiyle, kuantum plazmonik başlığında yapılan bilimsel çalışmaların son birkaç yılda ivme kazanmasıyla da giderek artan bilimsel yaygınlığa kavuşmaktadır. Bu bilimsel çalışmaların temelinde plazmoniğin nanoölçekte ışığı hapsederken beraberinde getirdiği benzersiz gelişmeler yatmaktadır. Plazmonik cihazların, nanometre ölçeğinde ışığı hapsedme kapasitesi, nanofotonik araştırma alanının temelini oluşturan özel bir yetenek sunmaktadır. Plazmonik alan, çeşitli uygulamalar için özgün özellikler taşıyan yeni yapılar ve cihazlar ile sürekli olarak gelişmiş ve artan talepler doğrultusunda bilim ve teknolojinin geniş bir yelpazesine yayılmıştır.

Biraz geriye gidildiğinde, doğada bulunan elementlerin sınırlı oluşu bir noktada bilim insanlarını çeşitli kısıtlara soktuğu bilinmektedir. Plazmonik kapsamında düşünüldüğünde de bu kısıtlar o malzemenin uygulanan elektrik alana doğal tepkisinden kaynaklanmaktadır. Daha açık bir tabirle; periyodik tablodaki elementlerin her birinin bulk formdayken optik özellikleri şimdiye kadar hesaplanmıştır ve sabittir. Fakat bilim dünyasındaki ilerlemeler göstermiştir ki; nanoteknolojiyle birlikte ilk olarak malzemelerin değişen boyutlarıyla birlikte elektriksel, optik, termal birçok özelliği değişebilmektedir. Bununla birlikte gelişen kuantum plazmonik başlığıyla birlikte de, optik özellikler özelinde bakıldığında, nanoboyutta değişen özelliklerin de kontrol edilebileceği farkedilmiştir. Tez kapsamında ise bu kontrolün aktif ve sürekli bir şekilde ve bunun faz veya elektrik alan şiddetinin değişimiyle yapılabileceğinin gösterilmesi hedeflenmektedir.

Plazmonik alanındaki araştırmalar, belirli bir spektral pozisyonda dalgaboyu altı hacimlerde yüksek şiddetli alan lokalizasyonunu incelemektedir. Diğer bir perspektiften bakıldığında, kuantum plazmonik çalışmalarının çoğu, sürekli ışık kaynakları kullanılarak durağan hal



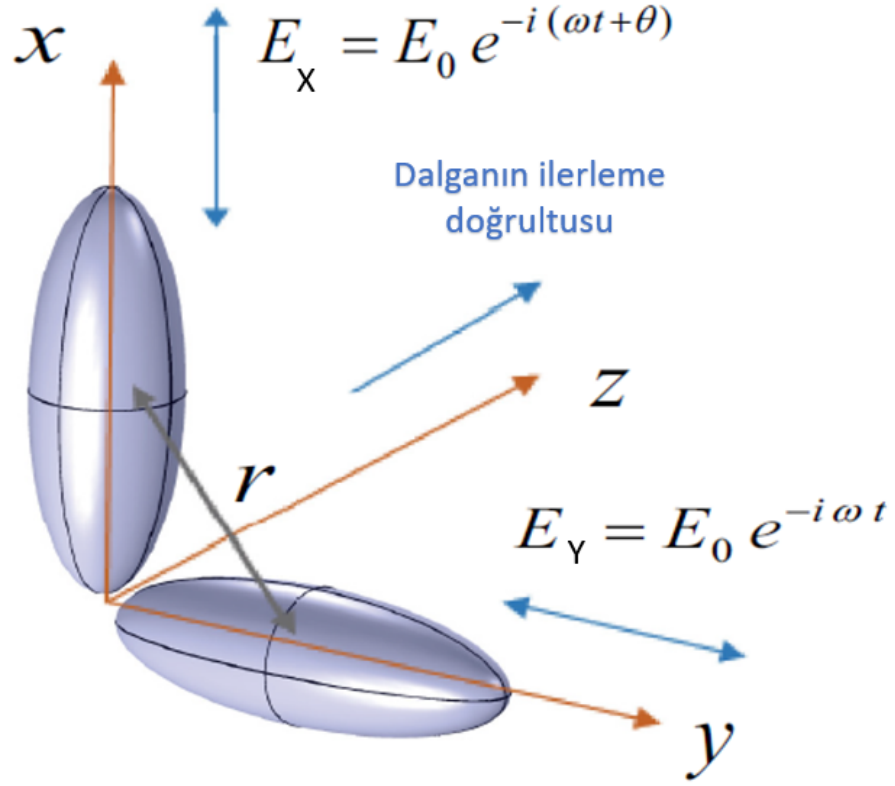
çözümlerini veya benzetimlerini içermektedir. İndeks güçlendirme başlığı, plazmonik sensör teknolojileri açısından önemli bir konudur ve gerçek zamanlı ve etkileşimli olarak tasarlanan sensör teknolojileri için büyük bir öneme sahiptir. Sensör uygulamalarında ise plazmonik indeks artırma, çevresel değişikliklere karşı yüksek hassasiyetle tepki veren sensörlerin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Biyolojik ve kimyasal maddelerin tespiti konusunda kullanılan plazmonik sensörler, plazmon rezonans frekanslarının kontrol edilebilirliği sayesinde duyarlılık ve ölçüm hassasiyetinde belirgin bir katkı sağlamaktadır[5].

Daha detaylı bakıldığında; metal nano parçacıkların (MNP) sahip oldukları optik özellikler temelde lokalize yüzey plazmon rezonanslarıyla belirlenmektedir. Bir MNP’de, lokalize olmuş yüzey plazmonlarının frekansı; partikülün boyutu, geometrisi ve bulunduğu yerel ortamın kırılma indisine bağlıdır. Plazmonik yapıların temel öğelerinden biri olan metalik yapılar, yüzey plazmonları adı verilen rezonanslı ışık-elektron salınımını destekler. İyi bir mühendislikle, plazmonlar metal yüzeyde veya metalik yapı çevresinde etkili bir şekilde lokalize edilebilir. Bu da ışık-madde etkileşimini önemli ölçüde artırabilir. Buna ek olarak, metalik nanoyapılar sayesinde yüzey plazmonları, son derece küçük ölçeklere hapsedilerek lokalize yüzey plazmonları olarak varlığını devam ettirebilir[6]. Bir MNP elektromanyetik alanla aydınlatıldığında elektromanyetik alanın etkisiyle, metaldeki iletim elektronları, ortak salınım gösterir. Uygulanan elektrik alanından dolayı elektron bulutu karşılıklı yönde hareket eder ve elektronlar ile core arasındaki Coulomb çekimi, nükleer çerçeveye göre zıt yönde salınım gerçekleştirerek geri çekici bir kuvvet oluşturur. MNP’nin içinde hapsedilmiş olan elektronlar, alanın etkisiyle bir tarafında negatif, diğer tarafında pozitif yük birikimine neden olur. Bu elektronların kolektif salınımı, alanla birlikte dipol plazmon rezonansı olarak adlandırılır[6]. Ancak, iyonik çekirdekler ve nanoparçacık yüzeyi, elektron hareketinde küçük ancak belirgin bir sönümlenme etkisi oluşturur. Bu sönümlenme ise klasik fizikteki osilatörlerdeki sönümlenmeye benzer bir etki gösterir. Bu da analitik çözümlerde kullanılan kütle yay benzetimini yapmaya olanak sağlamaktadır. Yine malzemelerin elektrik alanına karşı verdikleri tepkiler dielektrik fonksiyonlarıyla ilişkilendirilmektedir. Dielektrik fonksiyonların gerçek ve sanal kısımlarının işaretleri onların optik özellikleriyle ilgili bilgiler vermektedir. Malzemenin optik özellikleri, elektriksel ( $\epsilon$ ) ve manyetik ( $\mu$ )

geçirgenlik bilgilerinden elde edilmektedir. Ancak, optik frekanslarda genellikle tüm doğal malzemelerin göreceli manyetik geçirgenliği birine yakın olduğu için bu özellik genellikle göz ardı edilmektedir. Dielektrik fonksiyonunun gerçek bileşenine bağlı olarak, bir malzemenin dielektrik veya metalik özellikte olduğu ayırt edilir ve bununla birlikte farklı modellerle (Drude, Lorentz gibi) irdelenir. Aynı zamanda dielektrik fonksiyonu okunarak metal ışık etkileşimlerinde meydana gelen fenomenlerin takibi sağlanır.

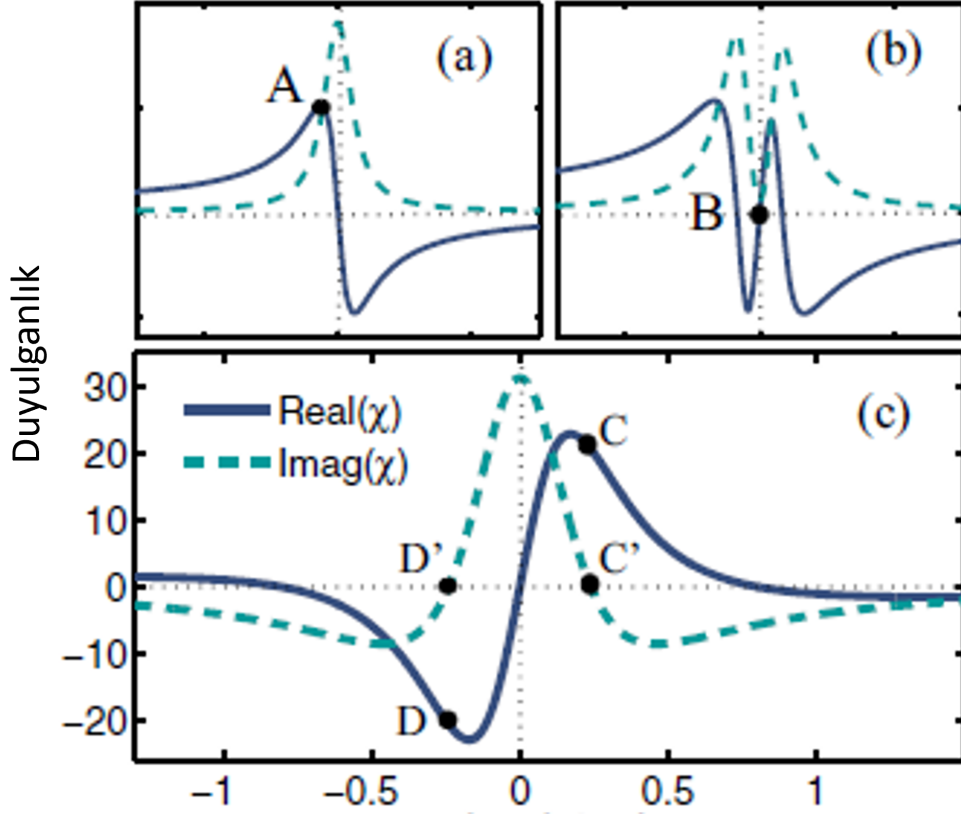
Elektrik alan varlığında MNP'lerin birbirine nanometre mesafesinde buldukları koşulda, nanoparçacık çevresinde lokalize olmuş sıcak noktalar (hot spot) oluşur. Plazmonik sıcak noktalar, özellikle optik alanlarda önemli rol oynar. Örneğin, plazmonik sıcak noktaların olduğu metal yüzeyler, ışık yolculuğu sırasında ışık dalgalarının yoğunlaştırılmasına ve güçlenmesine neden olabilir. Plazmonik sıcak noktaların oluşumu, metal yüzeylerin şekline ve yapısına bağlıdır. Özellikle, metal yüzeylerin düzgün ve simetrik olması plazmonik sıcak noktaların oluşumunu kolaylaştırır. Metal nanoparçacıklar bu sıcak noktalar aracılığıyla birbirleri ile etkileşebilirler. Normalde, optik malzemelerin kırılma indisi sabittir ve kolayca değiştirilemez. Bazı malzemelerin kırılma indisi ancak ısıtılarak, ya da doğrusal-olmayan özellikleri kullanılarak artırılabilir. Lakin, bu artış/azalış ancak yaklaşık %5 civarlarındadır ve optik malzemenin ciddi anlamda ısınması ile sonuçlanır. Yeni keşfedilen [1] bir optik olgu (fenomen) bütün bu kısıtlamaları değiştirmiştir. Şekil3.1de görülen yapıda birbirleri ile sıcak nokta aracılığıyla etkileşen iki nano rod (dimer) yapısında x-polarize (elektrik alan x-yönünde) bir ışığın bu ortamda yayılırken gördüğü kırılma indisi, y-polarize bir ışık kullanılarak birkaç kat değiştirilebilmektedir. Bu fenomen kuramsal olarak 2019 yılında gösterilmiştir[1].

2019 yılında yapılan bu çalışmada ışığın fazını ve polarizasyonunu kullanarak plazmonik nanoantenlerin absorpsiyonu ve dağılımının tutarlı kontrolü manipülasyonu için geliştirilen bir yöntemi tartışmaktadır. Plazmonik metamateryallerde optik dalgaların kayıp telafili yayılmasına izin veren kırılma indisi etkisinin artırılmasının plazmonik bir analogunun analitik modelini geliştirmiştir. Model klasik fizikteki iki kütle-üç yay sistemiyle benzeştirilip analitik çözüme zemin hazırlamıştır. Özetle klasik bir kütle-yay analogu ve kuantum optiğin artan kırılma indisi etkisinin plazmonik bir karşılığını teorik olarak



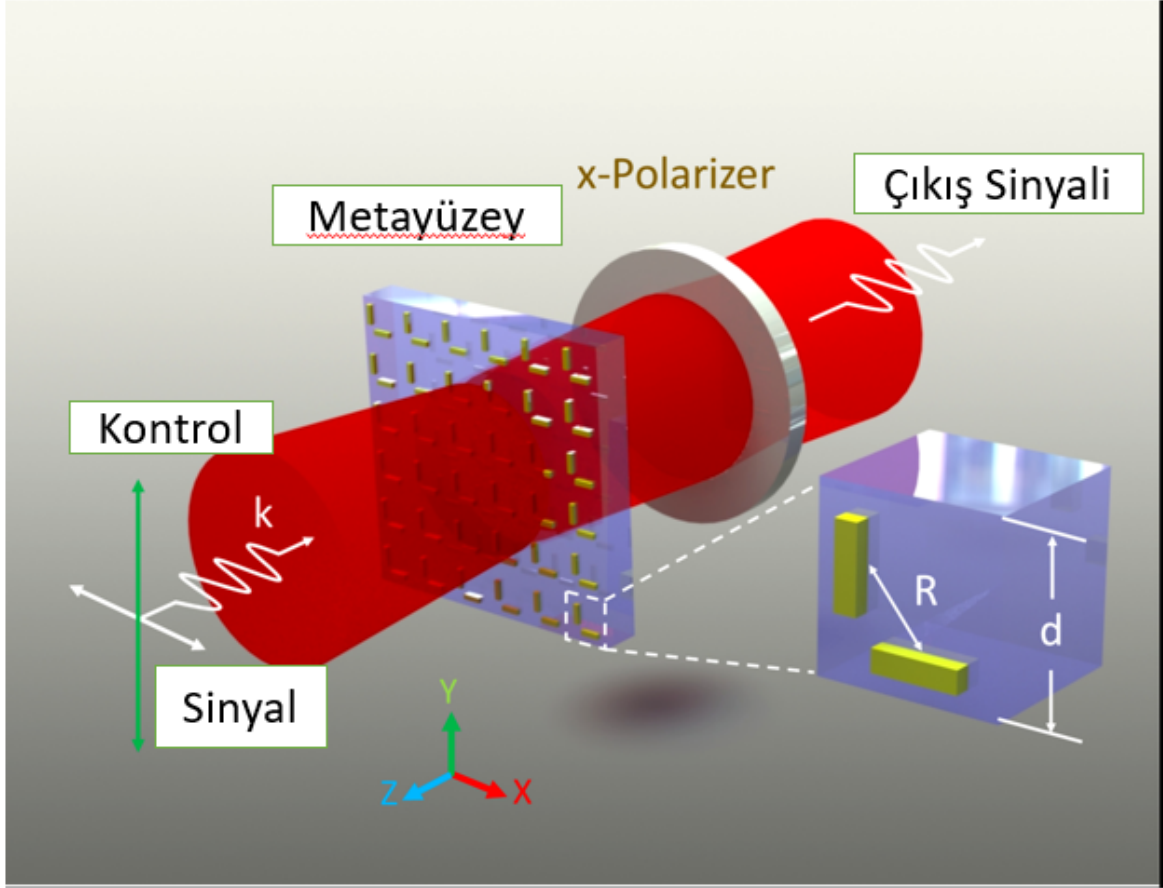
Şekil 1.1 X ve Y polarize ışıkla etkilşen; X ve Y eksenine yerleştirilmiş gümüş nanorodlar[1]

ispatlamıştır. Şekil3.1deki yapıyı temel alan çalışmada aynı zamanda farklı faz farklarında polarizasyon değişimlerini incelemiştir.



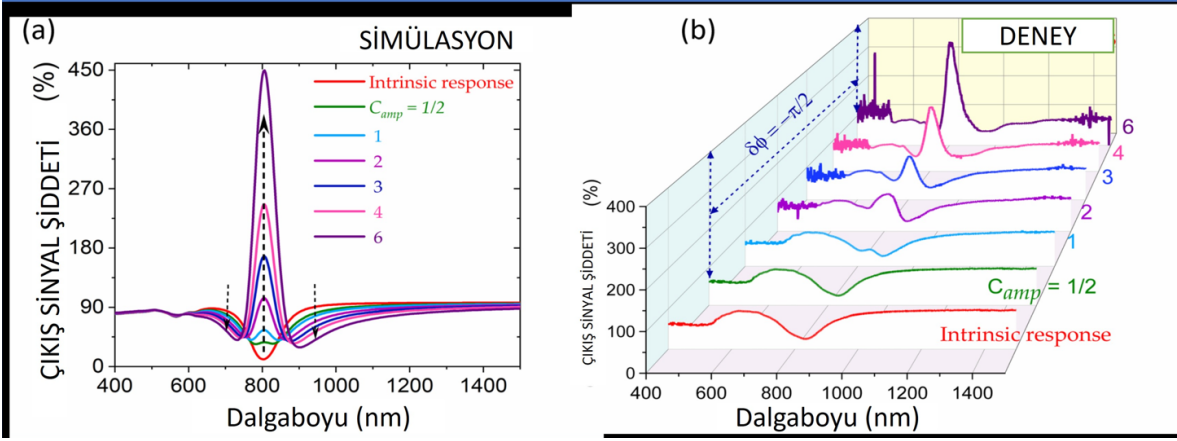
Şekil 1.2 Duyulganlık. (a) Standart dispersiyon eğrilerine sahip iki seviyeli bir sistemde, (b) EIT'yi gösteren koherent bir sistemde ve (c) Arttırılmış kırma indisi etkisi aracılığıyla koherent bir sistemdeki duyarlılığın gerçel ve sanal kısımları[1]

Yine aynı çalışmada Şekil 1.2de duyulganlık C noktasında büyüktür ve emilim C' noktasında tamamen yok olur. Bu, kuantum koherent sistemlerde kayıpsız büyük kırma indisleriyle ilişkilendirilmiştir. Ek olarak, duyulganlık D noktasında negatiftir ve emilim yine sıfırdır (D' noktası). Bu spektral bölge, sistem parametrelerinin uygun ayarlanmasıyla kayıpsız negatif veya sıfır geçirgenlikli [ $\text{Re}(\chi) = -1$ ] ortamların geliştirilmesi için ilginç sonuçları göstermiştir. Çalışma, belirli noktalarda duyulganlığın özel davranışını vurgulayarak, optik alanında yeni uygulamalar ve kayıpsız materyallerin geliştirilmesi üzerine potansiyel getirebilecek önemli bulgular sunmaktadır.



Şekil 1.3 Yüzey plazmonlarının koherent kontrolüne dayalı optik nano anahtarın şematik gösterimi. Şeklin iç kısmı, L-şekilli metayüzeyden bir meta-atomun şematik gösterimini içerir, burada yatay polarize ışık sinyal demetini temsil ederken, dikey polarize ışık kontrol demeti olarak hareket eder[2].

Bu çalışmanın ardından yakın zaman önce bir Türk bilim insanı tarafından deneysel olarak da gösterilmiştir. Makale, kuantum optikteki kırılma indeksi geliştirme etkisinin plazmonik analogunu ve doğrusal optik anahtarlama mekanizmasında uygulanmasını tartışmaktadır. Plazmon kaynaklı kırılma indeksi geliştirme etkisini elde etmek için kare bir L-şekilli meta-molekül dizisinden oluşan plazmonik bir meta yüzeyle yapılan deneysel çalışma, kazanç malzemelerine veya doğrusal olmayan işlemlere ihtiyaç duymadan tutarlı absorpsiyon kontrolü yoluyla gelen sinyal genliğinin modülasyonunun mümkün olduğunu ispatlamıştır[2].



Şekil 1.4 Kontrol ve sinyal demeti arasındaki faz farkının bir fonksiyonu olarak simüle edilmiş ve deneysel modüle edilmiş çıkış sinyal yoğunluğu, PC = 4 durumunda güçlü anahtarlama etkisini sergiler[2].

Çalışmada Şekil1.3deki yapı kullanılmıştır. Metal nanoparçacık olarak altın kullanılan sistemde 320 nm periyotla silika cam substrata elektron demet litografisiyle kaplanmıştır. Kontrol ve sinyal kaynaklarının farklı oranlarıyla sistemin optik çıkışındaki tepkisi deneysel ve analitik olarak karşılaştırılmıştır. Tutarlı sonuçları Şekil 1.4de karşılaştırılmıştır. Bu araştırmada, fotonik kristaller için farklı bir aktif kontrol mekanizması önerilmektedir. Fotonik kristaller için önemli olan modülasyon derinliği, frekans bant aralığı gibi özelliklerin aktif olarak ayarlanabildiği bir sistemde, yakın zamanda keşfedilen plazmonik nano-çubukların eşlenmesinden kaynaklanan olağanüstü indeks artırma fenomeni kullanılmaktadır. Bu yöntem, farklı polarizasyonlara sahip bir kontrol atımlı lazerin indeks değerini bir merteye kadar ayarlayabilme olanağı sağlamaktadır. Sistemde kullanılan sinyal ve kontrol lazerleri, 3-4 katmanlı nanoçubuk çiftine entegre edilmektedir. Kontrol lazerinin genliği ve fazı, nanoçubukların indeks artırımını kontrol etmektedir. Kontrol lazeri kapalı olduğunda sonda lazer darbesi iletilirken, kontrol darbesi açıkken sonda lazer darbesinin iletimi önlenir (stop-bant). Kontrol lazer darbesinin fazı x-doğrultusunda ayarlanarak nanoçubukların periyodik yapı oluşturma kuralının bozulmaması sağlanır. Elde edilen sonuçlar, 3-4 eşlenmiş nanoçubuk katmanının dahi çok yüksek modülasyon derinliği elde edilmesini sağlamıştır. Çalışma sonuçları doğrultusunda optik modülatörlerin ve anahtarların ultra düşük güç seviyelerinde modülasyon gücünün iyileştirilmesi de dahil

olmak üzere, bu doğrusal tamamen optik anahtarlama şemasının potansiyel uygulamalarını vurgulamaktadır. Kırılma indisinin başka (yardımcı) bir ışık ile kontrol edilmesi tüm fotonik teknolojilerini değiştirecektir. Tez kapsamında böyle bir ortamda ışık yayılımı hem analitik hem de FDTD (finite difference time domain) ile incelenecektir. Tez kapsamında, bu tür bir ortamda ışık yayılımını hem analitik hem de FDTD (finite difference time domain) yöntemi ile incelenecektir. Bu tür bir inceleme sadece bu tür fotonik cihazlarda ışık yayılımının modellenmesini içermez. Aynı zamanda sistemde değişen kırma indisi beraberinde yavaş ışık, elektromanyetik olarak uyarılan şeffaflık, negatif hız, süperlüminal hız gibi birçok parameterenin de gözlemlenmesine olanak sağlar. Elektromanyetik olarak indüklenmiş transparanlık, bir maddenin optik özelliklerinin elektromanyetik dalgalar tarafından etkileştirilerek değiştirilebilmesi olayıdır. Bu olay, ışık yolculuğu sırasında maddenin kırma indisinin değiştirilerek, maddenin geçirgenliğinin artırılması veya azaltılması şeklinde ortaya çıkar. Kuantum optiğinde, arttırılmış kırma indisi olarak bahsedilen fenomen ise elektromanyetik olarak uyarılmış transpanlık konusunun kuantum analogudur. Kırılma indeksinin artmasında , ortamın optik kaybı sıfır olabilir, hatta maksimum duyarlanlılık (susceptibility) ve ihmal edilebilir dispersiyon bölgesinde negatif olabilir[1]. Kazanç ortamında negatif absorpsiyonun gözlemlendiği bir durum söz konusu olur. Yani geçirgenlik artar. Bu özellik; ESY kavramıyla ilişkilendirilir. Ortamın ihmal edilebilir kayıpla güçlü bir elektromanyetik tepkisine ihtiyaç duyan elektronik sistemlerde çığır açan bir teknolojidir[1]. Minimum sayıda elektronik komponentle nano boyutta elektronik, elektro-optik çözümlerin önünü açar. Bu çalışma, oda sıcaklığında çalışan kuantum hafıza (memory) cihazlarının tasarlanması için de önem taşımaktadır. Çalışmalar ilk olarak kırma indisi verilerini gözlemleyip ardından kırma indisi bilgisiyle elde edilebilecek grup hızı, faz hızı gibi elektromanyetik dalgalara ait başka diğer verilerin de üretilmesine olanak sağladığından başka optik fenomenler hakkında da bilgi edinmeyi mümkün kılacaktır.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Optik Sabitler

Elektromanyetizma içindeki davranışları anlamak için öncesinde temel sabitlerin bilinmesi gereklidir.

$$D = \epsilon_0 E \quad (1)$$

$$B = \mu_0 H \quad (2)$$

Burada  $D$ , elektrik, ve  $B$ , manyetik akı yoğunluklarını ifade eder.  $E$  ve  $H$  ise sırasıyla elektrik ve manyetik alanları ifade eder.  $\epsilon_0$  ve  $\mu_0$  ise sırasıyla dielektrik ve manyetik geçirgenlik sabitleri olarak kullanılır ve sayısal olarak şu değerlere karşılık gelirler;

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad (3)$$

Işık hızı ve vakumun karakteristik empedansı,  $\epsilon_0$  ve  $\mu_0$  kullanılarak tanımlanır:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (4)$$

İzotropik bir malzemede  $D$ ;

$$D = \epsilon E \quad (5)$$

Geçirgenlik( $\epsilon$ ), duyulganlık ( $\chi$ ) kullanılarak tanımlanır. Duyulganlık kompleks bir fonksiyon olup, gerçek ve sanal olmak üzere iki bölümden oluşur:

$$\chi = \chi' + i\chi'' \quad (6)$$

Geçirgenlik ( $\epsilon$ ), duyulganlık ( $\chi$ ) kullanılarak aşağıdaki şekilde basitleştirilebilir:

$$\epsilon = \epsilon_0(1 + \chi') + i\epsilon_0\chi'' \quad (7)$$



Dielektrik malzemelerin bağıl dielektrik sabitinin, ışığın frekansına bakılmaksızın birden büyük olduğu kabul edilir[7]. Metallerin optik özellikleri farklıdır ve iki özelliğe bağlıdır[8].

- İletim bandındaki elektronlar her atom veya molekülün sınırından gelir ve balk malzemesinin içinde serbestçe hareket edebilir.
- Değerlik bandı ile iletim bandı arasındaki bantlar arası uyarım, yalnızca gelen fotonların enerjisinin söz konusu metalde aralarındaki bant aralığını aşması durumunda meydana gelebilir.

Elektrik polarizasyon ( $P$ ), birim hacim başına net ortalama dipol moment olarak tanımlanır.

$$P = \epsilon_0 \chi E \quad (8)$$

Kırma indisi ( $n$ ) ile göreceli geçirgenlik ( $\epsilon$ ) arasındaki ilişkiyi Fourier açılımını kullanarak, dalganın bileşenlerini incelenerek ve kırma indisine ( $n$ ) ve soğurma katsayısına ( $\kappa$ ) göre iki duyarlılık bileşeni hesaplayarak elde edilebilir. Bu işlem, dalga fonksiyonunu üstel formda ifade ederek yapılır.

$$Ae^{i(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t)} \equiv Ae^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \quad (9)$$

Burada:  $A$  bir reel sabittir.  $k_i$  dalga vektör elemanlarıdır (bir boyutlu durumda  $k$ , dalga vektörü yerine dalga sayısı olur).  $k$  dalga vektörünü temsil eder.  $r$  konum vektörünü temsil eder.  $\omega$ , elektrik alanın açısal frekansını ifade eder.  $t$ , zamanı temsil eder.

Elektrik alan için dalga denklemi şu şekildedir:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \left( \frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} \right) \quad (10)$$

Tüm bu denklemlerde kullanılan parametreler önceki tanımlamalarla aynıdır. 9 numaralı denklem 10 numaralı denklemin içine yerleştirilerek, açısal frekans aşağıdaki gibi ifade

edilir[9].

$$-\omega^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} (-k_x^2 - k_y^2 - k_z^2) \Rightarrow \omega^2 = \frac{|k|^2}{\mu_0 \epsilon_0} \Rightarrow \omega = c_0 |k| \quad (11)$$

Burada:  $\mu_0$  boşluk manyetik geçirgenlik sabiti,  $\epsilon_0$  boşluk elektriksel geçirgenlik sabiti,  $k_x$ ,  $k_y$  ve  $k_z$  dalganın vektör elemanlarıdır,  $|k|$  dalganın büyüklüğünü temsil eder,  $c_0$  ışığın hızını temsil eder. 9 numaralı denklem, boşluk için benzer bir yaklaşım kullanılarak çözülebilir [9]. Bir dielektrik malzeme için ise aşağıdaki gibi ifade edilecektir.

$$(kc/\omega)^2 = 1 + \chi \quad (12)$$

Bir ortamın içinden geçen  $kc/\omega$  karmaşık bir değeri ifade eder ve aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{kc}{\omega} = n + i\kappa \quad (13)$$

Burada  $n$ , ortamın gerçek kırma indisini temsil ederken,  $\kappa$  ortamın soğurma katsayısını ifade eder. 12 numaralı denklem kullanılarak duyulganlık bileşenleri şu şekilde ifade edilebilir [10].

$$\epsilon_{\text{real}} = n^2 - \kappa^2 = (1 + \chi') \quad (14)$$

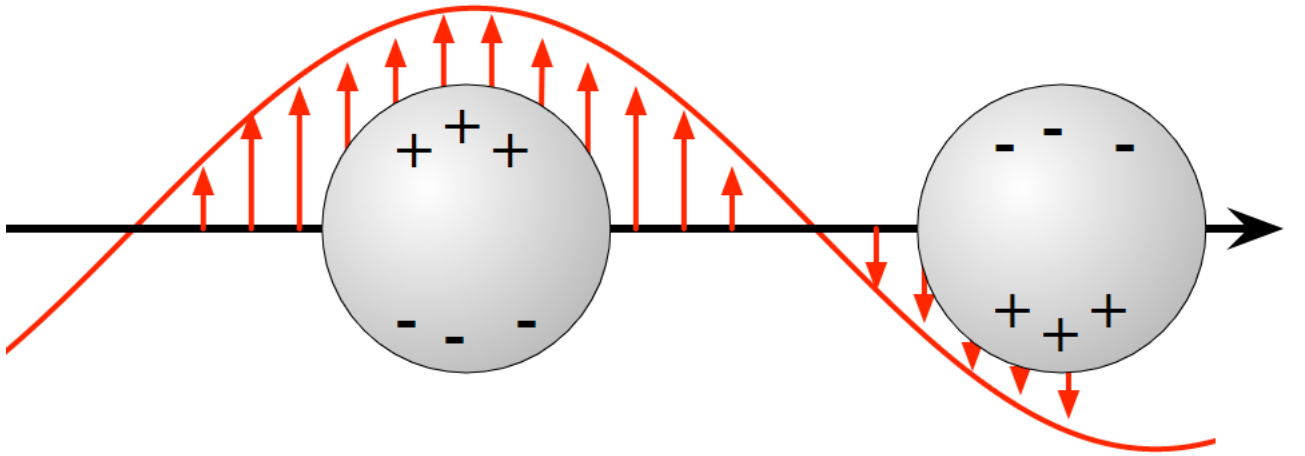
$$\epsilon_{\text{imag}} = 2n\kappa = \chi'' \quad (15)$$

## 2.2. Plazmonik

Plazmonlar, metallerde ve yarıiletkenlerde bulunan serbest elektronların kolektif dalgalanmaları olarak isimlendirilir[11][12]. Bu dalgalanmalar yüklerin bir noktada kümelenmesiyle ilişkilendirilir. Metallerdeki serbest elektronların ışığın elektrik alan bileşeniyle uyarılmasıyla kolektif plazma salınımları elde edilir. Bu plazma salınımları kuantasına plazmon ismi verilir. Plazmonik dalgalanmalar, metallerin yüzeyinde ve içinde

uyarılabilir [13]. Yüzey plazmonlarını tetiklemek istendiğinde, momentumun korunması gerekmektedir.[14]. Metal filmlerin yüzeyindeki plazmonları ışık kullanarak uyandırmak istendiğinde, fotonların ve yüzey plazmonlarının momentumlarının uyuşması için bir cam prizma kullanarak Kretschman düzeni [15] kullanılabilir. Fakat metal nanopartiküller için böyle bir kısıtlama geçerli değildir, çünkü MNP'ler küçük boyutları nedeniyle Fourier uzayında geniş bir karşılıklı örgü vektör yelpazesi sunarlar; yani MNP'ler gelen ışığın dalga boyundan çok daha büyük bir uzamsal aralıktan ışığı yakalayabilirler[16]. Bu da metalik nanoparçacıklarda plazmonların birçok özel kullanımını doğurmaktadır. Plazmonlar, ışığın mikro ve nano ölçekte kontrol edilmesine izin verirler ve bu nedenle nanofotonik, sensörler ve plazmonik devreler gibi birçok uygulamada önemli bir role sahiptirler.

### 2.3. Lokalize Yüzey Plazmonları

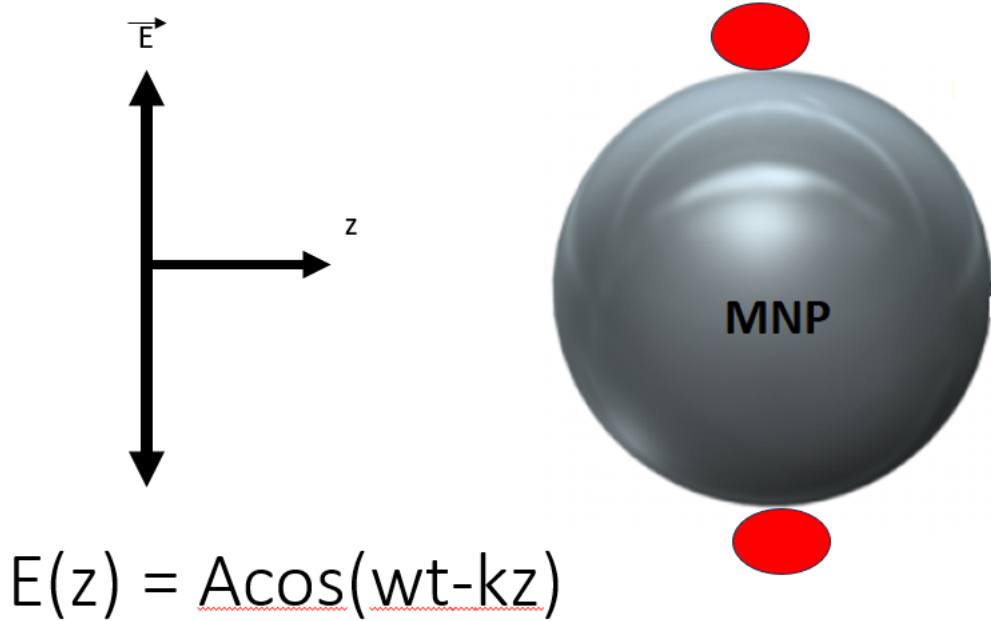


Şekil 2.1 Lokalize Yüzey Plazmon Temsili. Elektromanyetik salınımını temsil eden kırmızı oklar, metal yüzeyinde yüklerin kutuplanmasına neden olmaktadır.

Lokalize yüzey plazmonları (LYP), elektromanyetik uyarım ile etkileşen metal nano yapılarındaki iletim elektronlarından meydana gelir ve buldukları bölgede salınım yaparlar. Bu plazmonlar, metal nanoparçacıklarda elektromanyetik uyarım sonucu meydana gelen saçılmalar sonucunda oluşur ve temsili gösterimi Şekil2.1deki gibidir. LYP'ler,

metal yüzeyinde ve yakınında yoğun elektrik alan bölgelerini oluşturur, bu bölgelere "sıcak noktalar" denir. Sıcak noktalardaki elektrik alan yükseltmesi, gelen ışığın  $10^5$  katına kadar artırabilir. LYP'ler, yüzey plazmon polaritonlarından farklıdır çünkü ayrıca bir momentum eşlemesi gerektirmezler, yani boş uzayda ilerleyen bir ışık ile plazmon uyarımı yapılabilir. Salınım yapan elektromanyetik dalga ile etkileşim sonucu metal nanoparçacıklarda saçılmalar meydana gelir. Homojen bir ortam ve homojen dağılıma sahip küresel metal nanoparçacık için LYP'lerin durumu Klasik Mie Teorisi ile incelenebilir. Küresel nanoparçacığın çapı ( $d$ ), gelen ışığın dalga boyundan  $\lambda$  küçük olduğu durumlarda  $d/\lambda \leq 0.1$ , nanoparçacık etrafındaki elektrik alan sabit alınabilir ve bu durumda nanoparçacık ideal bir dipol gibi davranır.

#### 2.4. Sıcak Noktalar



Şekil 2.2 Sıcak Nokta Temsili. E yönlü polarizasyon z ilerleme yönüne sahipken metal nanoparçacık üzerinde oluşturduğu dipolün gösterimi

Sıcak noktalar, elektromanyetik alanın yoğunlaştığı bir bölgedir. Plazmonik yapılar, metallerin yüzeylerindeki plazmon rezonanslarını kullanarak sıcak noktalar oluşturabilir. Bu sıcak noktalarda optik etkileşimlerin yoğunlaştığı ve yüksek elektrik alan yoğunluklarına sahip olduğu gözlenir. Sıcak noktalar Şekil 2.2 de gösterilen yapıda E yönlü polarizasyona ve z yönlü ilerlemeye sahip bir elektrik alanla karşılaşan bir metal nanoparçacık üzerinde gösterilmiştir. Aslında E yönlü polarize kaynak sürekli olarak yukarı ve aşağı titreşen bir elektrik alanı göstermektedir. MNP üzerinde gösterilen sıcak noktalarda lineer polarize dipollerden meydana gelmektedir. Sıcak noktaların tanımlanması ve analizi, metallerin optik özelliklerine, plazmon rezonanslarının frekanslarına ve yapıların geometrisine bağlıdır. Optik alanın yoğunlaştığı sıcak noktalarda yüzey takviyeli Raman spektroskopisi, yüzey plazmonlarından yararlanan optik sensörler ve yüzey plazmon rezonansı mikroskopisi gibi uygulamalarda büyük önem taşır.

## 2.5. Metallerin Optik Özellikleri

Metallerin optik özellikleri, elektromanyetik dalgalarla olan etkileşimlerini açıklar. Metaller, genellikle optik frekansta yüksek iletkenlikleri ve negatif dielektrik sabitleri ile öne çıkarlar. Bu özellikler, metallerin yüzeylerinde plazmon rezonanslarının meydana gelmesine olanak tanır. Bu optik özellikleri tanımlamak için kullanılan önemli bir parametre, dielektrik fonksiyonlarıdır. Metallerin optik davranışını karakterize etmek için, karmaşık dielektrik fonksiyonları kullanılır. Genellikle, bir metalin karmaşık dielektrik fonksiyonu şu şekilde ifade edilir;

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_1(\omega) + i\epsilon_2(\omega) \quad (16)$$

Burada,  $\epsilon(\omega)$  kompleks dielektrik fonksiyonunu,  $\epsilon_1(\omega)$  gerçel kısmını ve  $\epsilon_2(\omega)$  sanal kısmını temsil eder. Gerçel dielektrik fonksiyonu  $\epsilon_1(\omega)$ , bir metalin iletkenliğini ve geçirgenliğini belirler. Genellikle Drude modeli kullanılarak ifade edilir. Serbest elektron hareketinden dolayı metallerin dispersiyon davranışı için bant içindeki absorpsiyonun nedenini açıklayan en temel modeldir.

$$\epsilon_1(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega} \quad (17)$$

Burada,  $\omega_p$  plazma frekansını ve  $\gamma$  sönüm oranını temsil eder.

Sanal dielektrik fonksiyonu  $\epsilon_2(\omega)$ , bir metalin optik kayıplarını temsil eder. Sönüm oranına bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\epsilon_2(\omega) = \frac{\gamma\omega_p^2}{\omega(\omega^2 + \gamma^2)} \quad (18)$$

Ek olarak Lorentz modeli ise bağlı elektronları incelemektedir. Lorentz modeli için dielektrik tanımı 19 numaralı denklemlerle verilir.

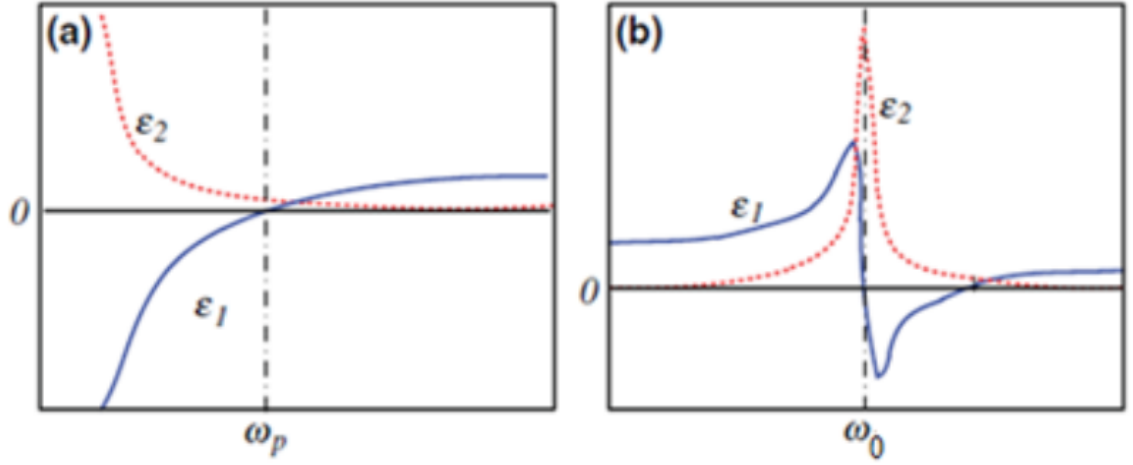
$$\epsilon(\omega) = \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega} \quad (19)$$

19 Numaralı denklemlerde  $\omega_0$  Lorentz modelde rezonans frekansıdır. Hem serbest hem bağlı elektronların hesaba katıldığı model; Drude-Lorentz modelidir. 19 denklemlerde modeli oluşturan parametreler gösterilmiştir.

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_r(\omega)_{\text{serbest}} + \epsilon_r(\omega)_{\text{bağlı}} \quad (20)$$

$$\epsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - j\gamma_e\omega} + \sum \frac{\omega_p^n}{\omega_0^n} \left( \frac{1}{\omega_0^n - \omega^2 + j\gamma_n\omega} \right) \quad (21)$$

Bu formüller, metallerin optik özelliklerini elektromanyetik dalgalara karşı tepkilerini anlamak için kullanılır. 2.3 numaralı şekilde metalik bir ortamdaki optik özelliklerin hem serbest hem de bağlı elektronlara bağlı olmasından dolayı birlikte gösterilmektedir. Bu özellikler, optik spektroskopide, plazmonik yapıların tasarımında ve nanoölçekli optik cihazlarda önemli bir rol oynar.



Şekil 2.3 Sırasıyla Metaller için a) Drude Model plazma frekasında( $\omega_p$ ) reel geçirgenlik( $\epsilon_1$ ) sanal geçirgenlik( $\epsilon_2$ ) b) Lorentz Model. Rezonans frekasında( $\omega_0$ ) reel geçirgenlik( $\epsilon_1$ ) sanal geçirgenlik( $\epsilon_2$ )[3]

## 2.6. Hız Tanımları

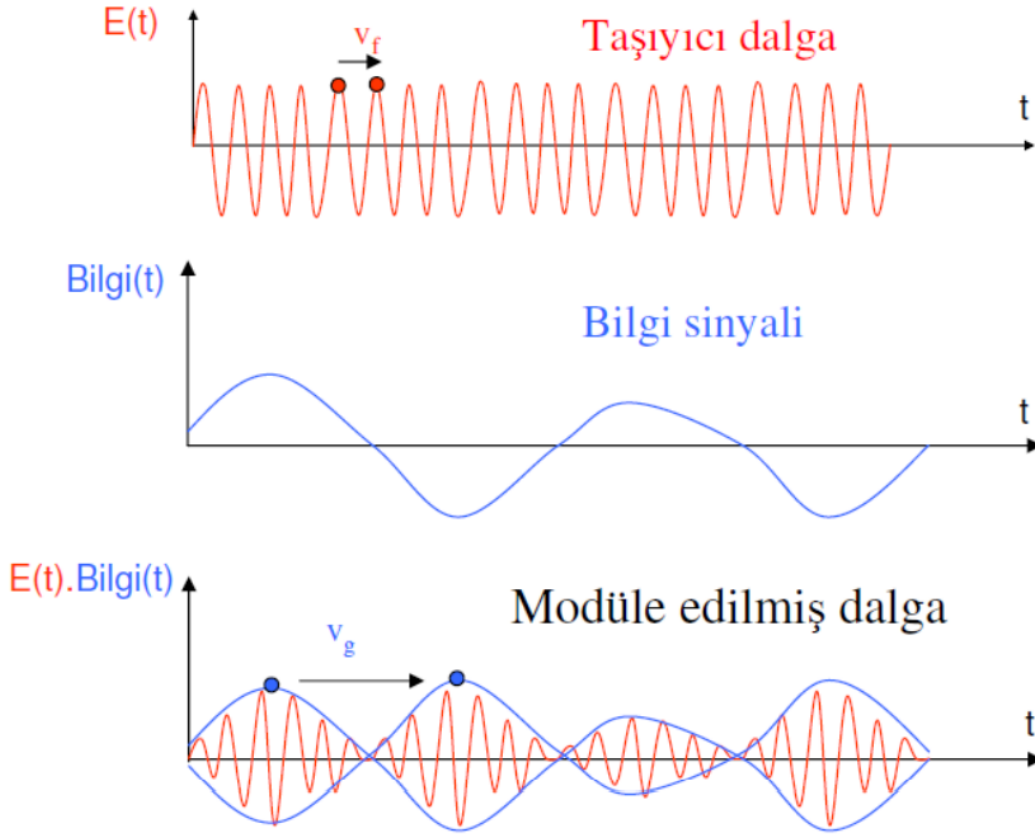
Hız, bir cismin konumunun zamana göre değişimini ifade eden bir büyüklüktür. Elektromanyetik dalgalarda, hız genellikle iki farklı kavramla ilişkilendirilmektedir. Bunlar grup hızı ve faz hızı olarak adlandırılır. 2.4 numaralı şekilde dalgaların tepe noktalarında faz hızının ve grup hızının temsili görülmektedir.

### 2.6.1. Grup Hızı

Grup hızı, bir dalga paketinin ilerleme hızını ifade eder. Bir dalga paketi, bir dalga sürekli spektrumunu dar bir frekans aralığında kapsayan bir dalga formudur. Grup hızı, dalga paketinin enerjisinin ortalama ilerleme hızını belirtir.

Grup hızı, frekans ve dalga sayısı vektörlerinin türevleriyle ilişkilendirilebilir. Bir boyutsal durum için grup hızı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (22)$$



Şekil 2.4 Grup Hızı ve Faz Hızı Temsili[3]

Burada,  $\omega$  dalga frekansını,  $k$  ise dalga sayısını temsil eder.

### 2.6.2. Faz Hızı

Faz hızı, bir dalganın fazının ilerleme hızını ifade eder. Bir dalga, periyodik bir desenin tekrarlanan birimlerinden oluşur. Faz hızı, bir dalga sürekli spektrumunu temsil eden tek bir frekans bileşeniyle ilişkilendirilir. Faz hızı, frekans ve dalga sayısı vektörlerinin oranı olarak ifade edilir:

$$v_{\phi} = \frac{\omega}{k} \quad (23)$$

Burada,  $\omega$  dalga frekansını,  $k$  ise dalga sayısını temsil eder.



## 2.7. Epsilon Sıfıra Yakın Malzemeler

ESY (Epsilon Sıfıra Yakın) malzemeleri,  $\epsilon$  değerinin çok küçük, hatta sıfıra yaklaşan değerlere sahip olduğu malzemelerdir. Elektromanyetik dalga teorisi açısından epsilon, bir malzemenin elektriksel geçirgenliğini ifade eder. Normalde,  $\epsilon$  değeri doğal malzemeler için pozitif ve farklı bir değere sahiptir. Ancak ESY malzemeleri, bu değerini yaklaşık olarak sıfır olduğu veya sıfıra çok yaklaştığı özel malzemelerdir. Bu özelliği sayesinde, elektromanyetik dalgaların bu tür malzemelerde nasıl davrandığı ve nasıl manipüle edilebileceği ilgili çalışmalara olanak sağlar. ESY malzemeleri, elektromanyetik dalgaların geçişini, yansımalarını ve saçılmasını kontrol etmek için de kullanılmaktadır. Bu, optik ve fotonik uygulamaları için de temel oluşturmaktadır. Örneğin, optik iletişim, görüntüleme sistemleri ve optik sensörler gibi alanlarda, ESY malzemelerinin kullanımı sayesinde daha iyi performans ve daha kompakt cihazlar tasarlanabilir.

## 2.8. Elektromanyetik Olarak Uyarılan Şeffaflık

Elektromanyetik olarak uyarılan şeffaflık, malzemelerin elektromanyetik dalgalarla etkileşimlerini değiştirerek, normalde opak olan bir malzemenin belirli dalga boylarında veya frekansta şeffaf hale gelmesini ifade eder. Bu, malzemenin optik özelliklerinin elektromanyetik dalgalar tarafından etkilendiği ve kontrol edilebildiği bir olgudur. Yüzey plazmonlarının optik tepkisi çoğunlukla ortam parametreleri, yapıların geometrisi ve ayrıca plazmonik sistemlerin Fano gibi bazı kuantum optik etkilerini taklit etmesini sağlayan yeni rezonans çizgi şekillerine yol açabilen plazmon hibridizasyonu tarafından yönetilir, bu da girişim ve elektromanyetik olarak indüklenen şeffaflık olarak anılır. [17] [18] [19] [20] Elektromanyetik olarak uyarılan şeffaflık, özellikle nano yapıların ve metamalzemelerin kullanımıyla gerçekleştirilebilir. Bu malzemeler, elektromanyetik dalgaların yayılmasını ve saçılmasını farklı şekillerde kontrol etmeye izin verir. Plazmonik malzemeler, elektromanyetik dalgaların yüzey plazmonları ile etkileştiği malzemelerdir. Bu malzemeler, belirli dalga boylarında yüzey plazmonlarını destekler ve bu da şeffaflığı veya opaklığı kontrol edebilir. Bu sayede optik cihazların daha etkili ve verimli olmasına olanak tanır.

## 2.9. Metallerin Elektromanyetik Olarak İncelenmesi

Metallerin elektromanyetik dalgalarla etkileşimi, Maxwell denklemleri temelinde klasik elektromanyetizma teorisine dayalı bir anlayışla açıklanabilir. Bu etkileşim, nanometre ölçeğindeki yapılar, özellikle metal nanoparçacıkları gibi, kuantum mekaniği gerektirmeksizin anlaşılabilir. Metal nanoparçacıkları, elektromanyetik alanın içlerine nüfuz etmeyerek genellikle görünür ışık spektrumuna kadar olan frekansta yansıma eğilimindedirler.

Düşük frekansta, mükemmel iletkenlik yaklaşımı, elektromanyetik radyasyonun büyük bir kısmının metalin içine nüfuz etmediği durumlarda geçerli olabilir. Ancak yakın kızılötesi ve görünür bölgeye doğru yüksek frekansta, elektromanyetik alan girciliği artar. Bu durum, metallerin mikrodalga ve kızılötesi frekansta elektromanyetik alan için dalga kılavuzları ve rezonans kutularının kaplamasında kullanılmasına imkan sağlar[4].

Metaller, ultraviyole frekansta elektronik bant yapısına bağlı olarak dielektrik özellik kazanabilir ve elektromanyetik radyasyonun ilerlemesine izin verebilirler. Özellikle altın ve gümüş gibi soy metallerde, elektronik bant arası geçişler yüksek soğurma seviyelerine neden olabilir. Metallerin optik özellikleri, kompleks dielektrik fonksiyonu çerçevesinde açıklanır.

Bu etkileşimler, elektromanyetik dalgaların malzeme içindeki elektronlar ve nükleonlar ile etkileşimlerine dayalı olarak mikroskobik bir bakış açısıyla incelenir. Kullanılan Maxwell denklemleri, mikroskobik Maxwell denklemleri olarak adlandırılır ve noktasal yüklerin mikroskobik bakış açısından makroskobik bir bakış açısına dönüştürülmesiyle Maxwell denklemleri detaylı bir şekilde analiz edilebilir[4]. Bu bağlamda, metallerin elektromanyetik etkileşimleri, hem klasik hem de nanoyapısal düzeyde kapsamlı bir anlayış sağlar.

## 2.10. Maxwell Denklemleri

Maxwell denklemleri, elektromanyetizma alanında temel olan dört bağımsız diferansiyel denklem grubudur. Bu denklemler, elektrik ve manyetik alanların davranışını ve

etkileşimlerini tanımlar. İşte Maxwell denklemlerinin formüllerine ve açıklamalarına geçelim:

- 1. Gauss Kanunu

Elektrik alanın kaynakları ile ilgili olan Gauss kanunu, elektriksel akı yoğunluğu ( $\mathbf{D}$ ) ve yük yoğunluğu ( $\rho$ ) arasındaki ilişkiyi ifade eder:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (24)$$

Bu denklem, bir kapalı yüzeyin üzerinden geçen elektrik akısının, bu yüzeyi saran yük yoğunluğuna eşit olduğunu söyler.

- 2. Gauss Kanunu (Manyetik Alan)

Manyetik alanın kaynakları ile ilgili olan Gauss kanunu (manyetik alanın dolaşımı), manyetik alan yoğunluğu ( $\mathbf{B}$ )'nın çizgi integralinin sıfır olduğunu ifade eder:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (25)$$

Bu denklem, herhangi bir kapalı yüzeyin üzerinden geçen manyetik akının toplamının sıfır olduğunu belirtir.

- 3. Faraday Yasası

Faraday yasası, bir değişen manyetik alanın elektriksel indüksiyona neden olduğunu ifade eder. Elektriksel indüksiyon, bir döngü üzerinde oluşan elektromotor kuvvetin (EMK) çizgi integrali ile manyetik akı değişiminin hızına eşit olduğunu belirtir:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (26)$$

Bu denklem, bir manyetik alanın zamanla değiştiğinde, buna bağlı olarak bir elektrik alanı oluştuğunu gösterir.

- 4. Ampere-Maxwell Yasası

Ampere-Maxwell yasası, bir elektrik akımı ve değişen manyetik alanın, manyetik alan yoğunluğu ve elektrik alan değişimine neden olduğunu ifade eder:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (27)$$

Bu denklem, elektrik akımının manyetik alan yaratma yeteneğini ve değişen elektrik alanın manyetik alana etkisini açıklar.

Bu şekilde, dört Maxwell denklemi elektromanyetizmanın temel yasalarını ifade eder. Bu denklemler, elektromanyetik alanların oluşumu, yayılımı ve etkileşimi hakkında bilgi sağlar.

## 2.11. Zaman Uzayında Sonlu Farklar Yöntemi(FDTD)

Zaman Uzayında Sonlu Farklar (FDTD) metodu, hesaplamalı elektromanyetik alanında yaygın olarak kullanılan bir sayısal tekniktir. Maxwell denklemlerini çözerek elektromanyetik dalgaların zaman ve uzaydaki davranışını simüle etmek için kullanılır. FDTD metodu, fotonik, plazmonik, antenler ve dalga yayılımı gibi çeşitli alanlarda geniş uygulamalar bulmuştur.

İlkelerine gelecek olursak FDTD metodu, temelde hem uzayı hem de zamanı ayrıklaştırır. Simülasyon alanı üç boyutlu uzayda küçük hücrelere bölünür ve her hücre, elektromanyetik alan değerlerini temsil eden ayrık noktalar içerir. Zaman da ayrık adımlara bölünür ve her adımda elektromanyetik alan değerleri önceki adıma dayanarak güncellenir.

Maxwell denklemlerini sayısal olarak çözmek için FDTD metodu, merkezi fark yaklaşımlarını kullanır. Elektromanyetik alanın bileşenlerini güncellemek için, zaman türetilerini uzay türetileriyle ve uzay türetilerini zaman türetileriyle ilişkilendirir.

FDTD metodu, aşağıdaki adımları içerir:

**Başlangıç Koşulları:** Simülasyon alanının başlangıç durumu belirlenir. Elektromanyetik alanın değerleri ve malzeme özellikleri bu adımda atanır.

Zaman ve Uzayın Ayrıklaştırılması: Uzay küçük hücrelere bölünür ve her bir hücrede elektromanyetik alan değerlerini temsil eden noktalar belirlenir. Zaman ise adımlara bölünerek her adımda elektromanyetik alanların güncellenmesi sağlanır.

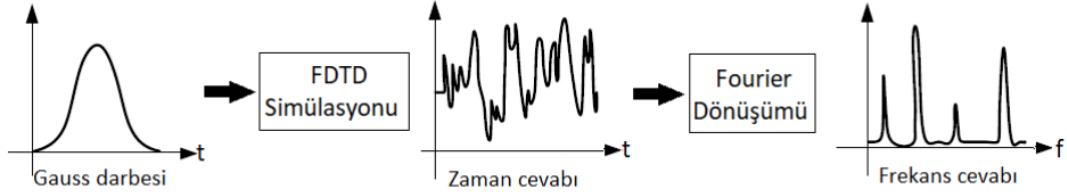
Maxwell Denklemlerinin Sayısal Çözümü: Elektromanyetik alanların güncellenmesi için Maxwell denklemleri kullanılır. Bu adımda, elektromanyetik alan bileşenleri bir sonraki adımdaki değerlerine bağlı olarak hesaplanır.

Kenar Koşulları: Simülasyon alanının kenarlarında uygun kenar koşulları uygulanır. Bu koşullar, yansımaları ve geçişleri doğru bir şekilde ele almayı sağlar.

Malzeme Özelliklerinin Modellenmesi: Simülasyon alanındaki malzemelerin optik özellikleri tanımlanır. Bu, elektromanyetik alanın malzemelerle etkileşimini hesaplamak için kullanılır.

Sınır koşulları: Elektromanyetik problemlerin çözümünde genellikle açık yapılarla çalışılır. Ancak FDTD çözüm uzayının bir sınırı vardır. Bu nedenle yapının sınırlarında uygun sınır koşulları belirlemek gerekmektedir[21]

Sınırlarda yansımaması sağlamak için soğurucu sınır koşulları (SSK) kullanılır. Ayrıca, dalganın boş uzayda ilerliyormuş gibi davranması sağlanır[22]. SSK sınır koşullarının iyileştirilmesine yönelik önemli bir adım, ilk olarak 1994 yılında Mükemmel Uyumlu Katman (MUK) olarak geliştirilmiştir[22]. MUK (Mükemmel Uyumlu Katman) sınır koşulu, kayıplı ortamlar için uygulanır. Bu sınır koşulunun en önemli özelliği, sınıra gelen dalganın tüm frekanslar ve geliş açıları için çözüm uzayına geri yansımalarını en aza indirmesidir. Sonuçların Analizi: Simülasyon sonuçları elektromanyetik alanların, saçılma desenlerinin, rezonans frekanslarının ve diğer önemli özelliklerin analizini içerir. FDTD yöntemi, frekans çözümünü elde etmek için Fourier dönüşümü kullanarak ışığın geçirgenliği, yansımaları gibi değerleri hesaplayabilmektedir, bu konsept 2.5 numaralı şekilde görselleştirilmiştir. FDTD metodu, elektromanyetik dalgaların davranışını anlamak ve karmaşık yapıların simülasyonunu gerçekleştirmek için güçlü bir araçtır. Plazmonik araştırmalarında, FDTD



Şekil 2.5 FDTD Metodu Çalışma Diyagramı. Gauss darbesinin FDTD simülasyonunda zaman cevabı ve Fourier dönüşümüyle zamandan frekansa geçen cevabı[4]

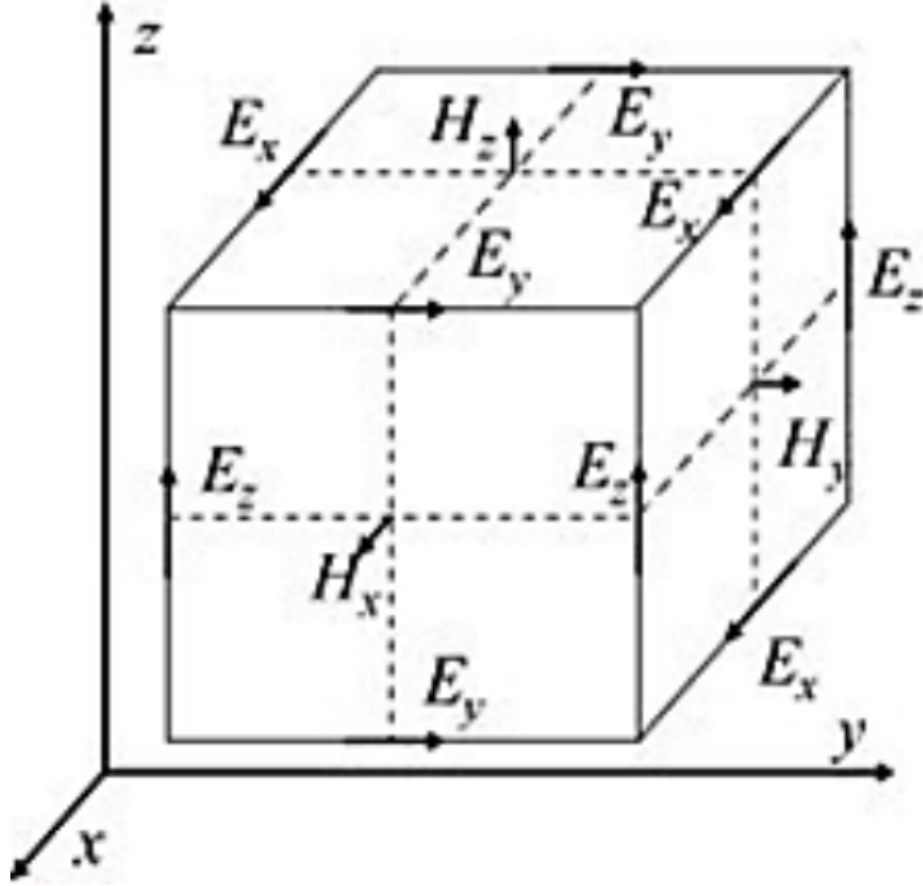
metodu plazmon rezonansları, saçılma, emilim, dağılım analizleri ve optik etkileşimlerin incelenmesinde yaygın olarak kullanılır.

## 2.12. Yee Hücresi

İlk olarak 1900lü yılların ikinci yarısında ortaya çıkan FDTD (Zaman Uzayında Sonlu Farklar Yöntemi) algoritması ikinci dereceden merkezi farklar methoduna dayanmaktadır. Algoritma temelde 4 adıma dayanmaktadır.

- Amper yasaları ve Faraday yasalarındaki tüm türevler sonlu farklarla değiştirilir. Elektrik alanların ve manyetik alanların zamanda ve uzayda bölünmesi amacıyla; uzay ve zaman ayrılır.
- Ortaya çıkan fark denklemleri, "güncelleme denklemleri" elde etmek için çözülür. Bu denklemler gelecek alanları (bilinen) geçmiş alanlar açısından ifade eder.
- Manyetik alanlar bir zaman adımı olarak geleceğe doğru değerlendirilir, böylece bilinen parametre, etkin bir şekilde geçmiş alanlar haline gelir.
- İstenen süre boyunca alanlar elde edilene kadar önceki iki adım tekrarlanır [23].

FDTD Zaman Uzayında Sonlu Farklar Yöntemi) yönteminde, elektrik alan ( $E$ ) ve manyetik alan ( $H$ ) bileşenleri, çözüm gerçekleştirmek için üç boyutlu bir şekil 2.6deki Yee hücresine yerleştirilir. Şekil 2.6de görüldüğü gibi, Yee hücresinde elektrik alan kenarlarda, manyetik



Şekil 2.6 Yee Hücresi

alan ise yüzeylerde tanımlanır. Bu yaklaşımda, hesaplamalar zaman ve uzayı kesikli hale getirerek Yee hücreleri üzerinde yapılır. Sonuçlar yakınsayana dek devam eder. FDTD metodunda Fourier dönüşümü sayesinde frekans çözümünü elde eder, böylece ışığın ne kadarının geçtiği, ne kadarının yansıdığı hesaplanır.

### 2.12.1. Ayrıklaştırma

Bilgisayar ortamında Maxwell denklemlerini çözebilmek için, FDTD (Finite-Difference Time-Domain) yönteminde uzay ve zaman yaklaşımları olarak sonlu farklar açılımı kullanılmaktadır. Maxwell denklemlerinde yer alan türevler, özellikle Ampere ve Faraday yasalarındaki türevler, bir fonksiyonu  $f(x)$  için  $x_0$  civarında  $\pm \delta/2$  değişkeni kullanılarak

Taylor serisi açılımı yapılırsa şu şekilde ifade edilebilir:

$$f(x_0 + \delta/2) = f(x_0) + \frac{\delta}{2}f'(x_0) + \frac{1}{2!} \left(\frac{\delta}{2}\right)^2 f''(x_0) + \frac{1}{3!} \left(\frac{\delta}{2}\right)^3 f'''(x_0) + \dots$$

Bu Taylor serisi açılımı, Maxwell denklemlerinin sonlu farklar yöntemi ile sayısal olarak çözülmesinde kullanılır. Bu şekilde, elektrik ve manyetik alanların zaman ve uzayda değişimleri sonlu farklarla hesaplanabilir ve Maxwell denklemlerinin sayısal çözümleri elde edilebilir.

$$f(x_0 - \frac{\delta}{2}) = f(x_0) - \frac{\delta}{2}f'(x_0) + \frac{1}{2!} \left(\frac{\delta^2}{2}\right) f''(x_0) - \frac{1}{3!} \left(\frac{\delta^2}{2}\right) f'''(x_0) + \dots \quad (29)$$

28 numaralı denklemden 29 numaralı denklem çıkarılırsa 30 numaralıdenklem elde edilir:

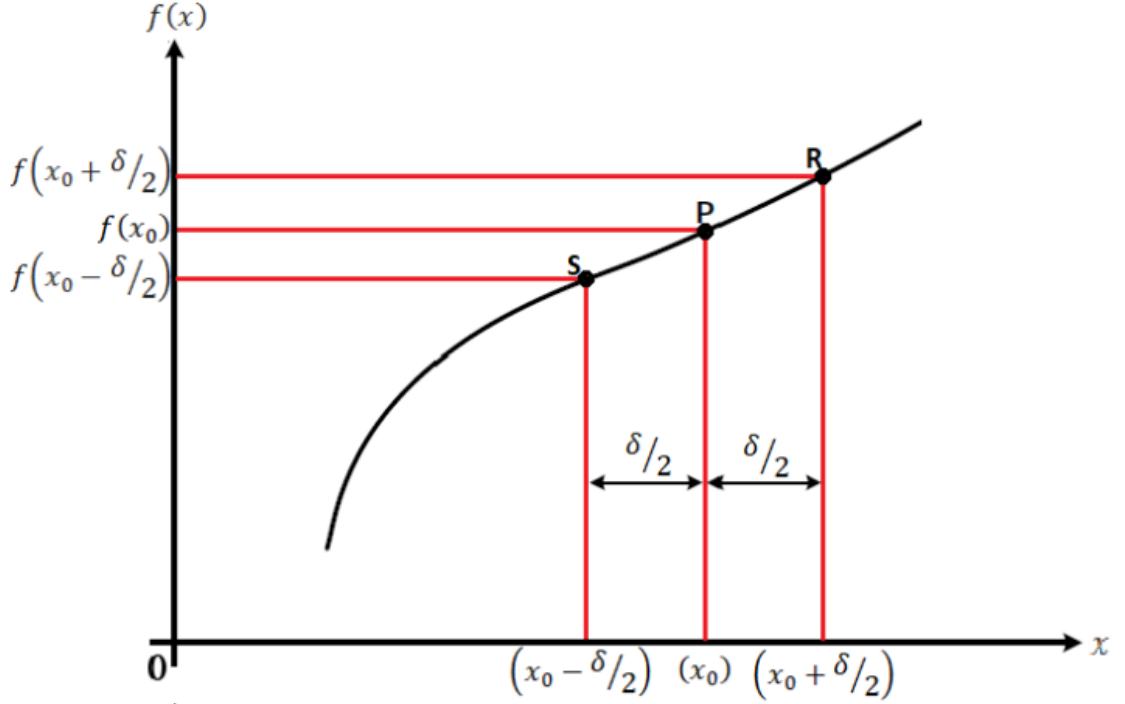
$$f(x_0 + \frac{\delta}{2}) - f(x_0 - \frac{\delta}{2}) = \delta f'(x_0) + \frac{2}{3!} \left(\frac{\delta^3}{2^3}\right) f'''(x_0) + \dots \quad (30)$$

Denklem, her iki tarafı  $\delta$  ifadesine böldükten sonra birinci dereceden türevi izole eder:

$$\left. \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right|_{x=x_0} = f'(x) \approx \frac{f(x_0 + \frac{\delta}{2}) - f(x_0 - \frac{\delta}{2})}{\delta} - \mathcal{O}(\delta^2) \quad (31)$$

Burada,  $\mathcal{O}(\delta^2)$  terimiyle, çözümde eksik bırakılan tüm terimler kapsanmıştır. Bu sayede,  $\delta^2$  ve  $\delta$  türev alındığı durumdaki değerlerine göre değerlendirilir. Küçük veya büyük olduğu durumlarda türevlerinin ihmal edilip edilmeyeceğine karar verilir. Böylelikle, merkezi fark yaklaşımı 31 bağıntısına ulaşılır. Merkezi farkın, fonksiyonun  $x_0$  noktasındaki türevine bir yaklaşım sağlamaktadır, fakat aslında fonksiyonun bu noktada örneklenmemektedir. Gerçekte fonksiyonun türevi,  $x_0 + \frac{\delta}{2}$  ve  $x_0 - \frac{\delta}{2}$  komşu noktaların birleşimiyle oluşturulan doğrunun eğimine eşittir[24].





Şekil 2.7 Merkezi Fark Yaklaşımıyla Türev Hesabı

2.7 numaralı şekilden görüldüğü üzere, P noktasında  $f(x)$  fonksiyonunun türeviyle olarak S ve R noktalarını birleştiren doğrunun eğiminin yaklaşık eşit olduğu görülür. Şekil 2.7, merkezi fark açılımının  $x_0$  noktasında  $f(x)$  fonksiyonunun yaklaşık olarak türevini vermektedir.

### 2.13. Süperlüminal Bölge

Süperlüminal Bölge, ışık hızının üzerindeki hızlarda hareket eden nesnelerin bulunduğu bir bölgedir. Bu bölge, Einstein'ın öne sürdüğü özel görelilik kuramına göre ışık hızının maksimum hız olduğunu varsayan bir postülatтан dolayı, normalde geçilemeyecek bir hız sınırı olan ışık hızını aşan hızlara sahip olan nesnelerin varlığıyla ilgilidir. Genel olarak faz hızının süperlüminal olması yaygın bir bilgiyken grup hızı için aynı şey geçerli değildir. Fakat grup hızının da süperlüminal olması mümkündür[25]. Grup hızının bir nedeni sonuca bağlayan fiziksel bir sinyal olduğu görüşünün temel alınmasından dolayı grup hızının

süperlüminal olmasının mümkün olmadığı düşünülmektedir. Fakat z ekseninde ilerleyen bir dalga incelenirse, kuantum teorisinde böyle bir dalga paketi içinde tek bir elektron bulunan bir Gauss dalga paketi tarafından temsil edilir. Grup hızının tanımının da dalga paketinin zirvesinin hareket ettiği hızdır tanımından yola çıkılarak,

$$v_{\text{grup}} = \frac{d\omega}{dk} \quad (32)$$

$$k(\omega) = \frac{n(\omega)\omega}{c} \quad (33)$$

$k(\omega)$  dalga vektörü ,  $n(\omega)$  ortamın kırma indisidir. 33 ve 34 numaralı iki denklem birlikte yazılıp düzenlendiğinde dalga vektörüne ve kırma indisine bağlı yeni bir grup hızı formülü elde edilir.

$$\frac{dk(\omega)}{d\omega} = \frac{1}{c} \left( n(\omega) + \omega \frac{dn(\omega)}{d\omega} \right) \quad (34)$$

$$v_{\text{grup}} = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n(\omega) + \omega \frac{dn}{d\omega}} \quad (35)$$

$$n_{\text{grup}} = n(\omega) + \omega \frac{dn(\omega)}{d\omega} \quad (36)$$

Işık hızının grup hızına bölümünden grup indeksi elde edilir.

$$n(\omega) + \omega \frac{dn(\omega)}{d\omega} = 0 \quad (37)$$

Bu, anormal bir dağılım olduğunda meydana gelebilir.

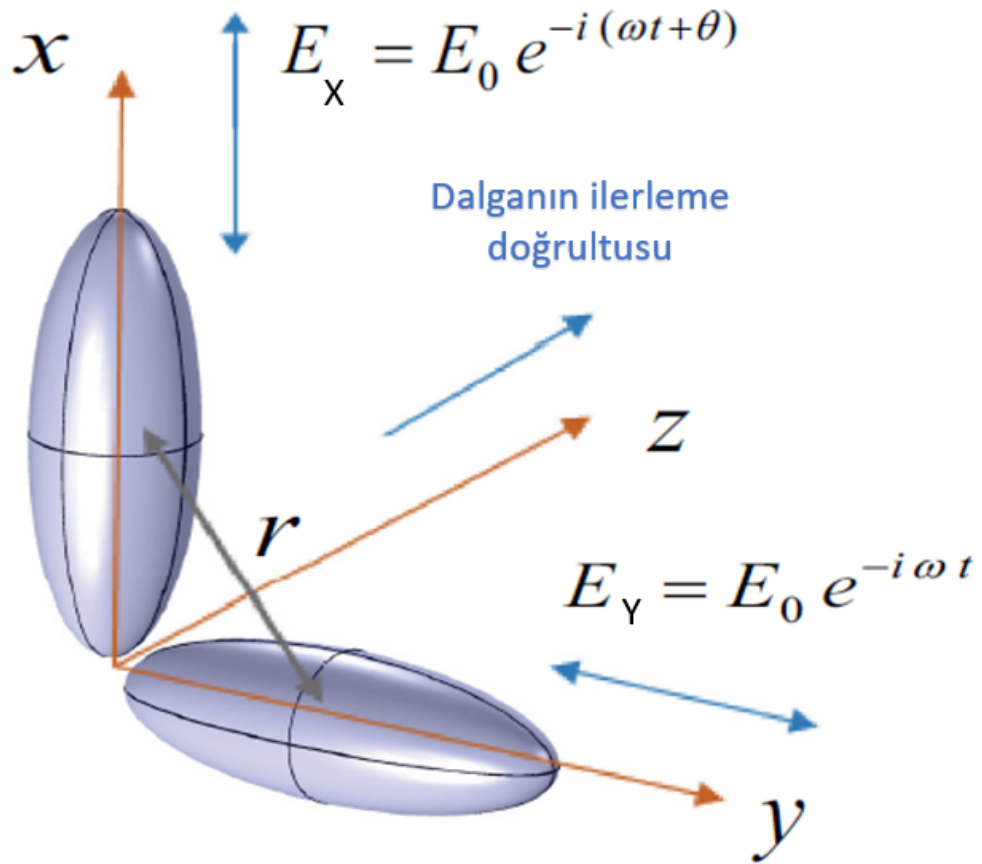
$$dn(\omega)/d\omega < 0 \quad (38)$$

Denklem 16nın ifade ettiği, bir gelen dalga paketinin zirvesi; ortamın giriş yüzeyine girmeden önce bir çıkış yüzeyinin terkeden bir başka dalga paketinin zirvesi zaten ortamın dışına çıkmıştır[25]. Dolayısıyla grup hızı negatif değerler alabilir. Bu da süperlüminal hızlara karşılık gelir. Işık hızının negatif olması ve grup hızının ışık hızından büyük olması olmak üzere iki tür süperlüminal hız vardır[26].

### 3. YÖNTEM

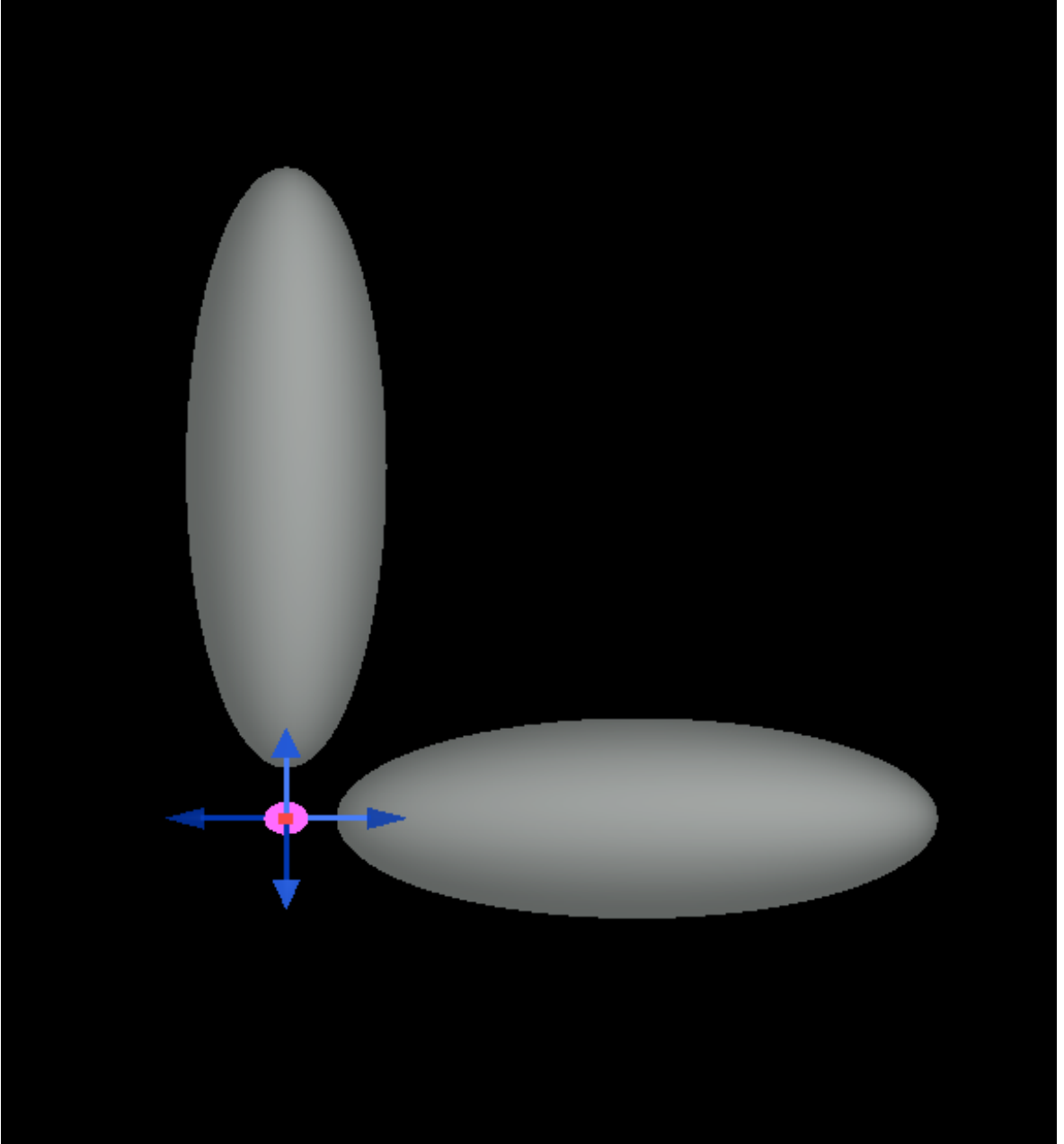
#### 3.1. Simülasyon Temelli Hesaplama Yöntemi

Bu tezde, ANSYS'in Lumerical yazılımının FDTD modülü kullanılarak, belirli bir plazmonik yapının elektromanyetik davranışını incelenmektedir. Simülasyon Şekil 3.1de



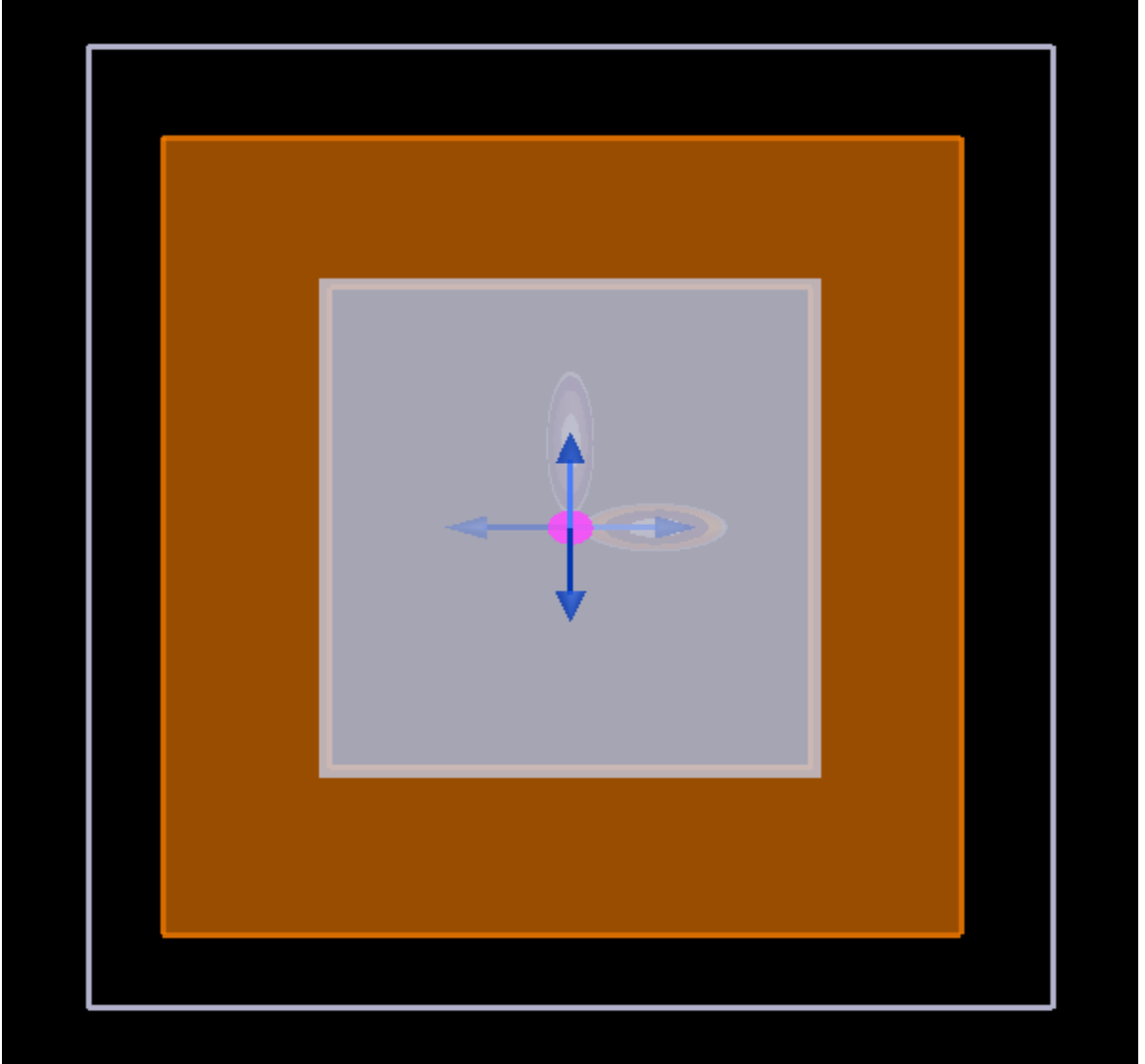
Şekil 3.1 Simülasyon Modeli. X ve Y polarize ışıkla etkileşen; X ve Y eksenine yerleştirilmiş gümüş nanorodlar. Z dalganın ilerleme doğrultusu[1].

gösterilen yapıyı temel almıştır. Yapı birbirine dik iki gümüş nanoçubuktan oluşmaktadır. Nanoçubukların kısa eksen yarıçapı 10 nm, uzun eksen yarıçapı ise 30 nm boyutundadır. Lumericalda ilk olarak bu yapı oluşturulmuştur.



Şekil 3.2 Nanoçubuklar ve Elektrik Alan Kaynakları. Mavi oklar polarizasyon doğrultusunu, pembe yönelim dalganın ilerleme yönünü temsil etmektedir.

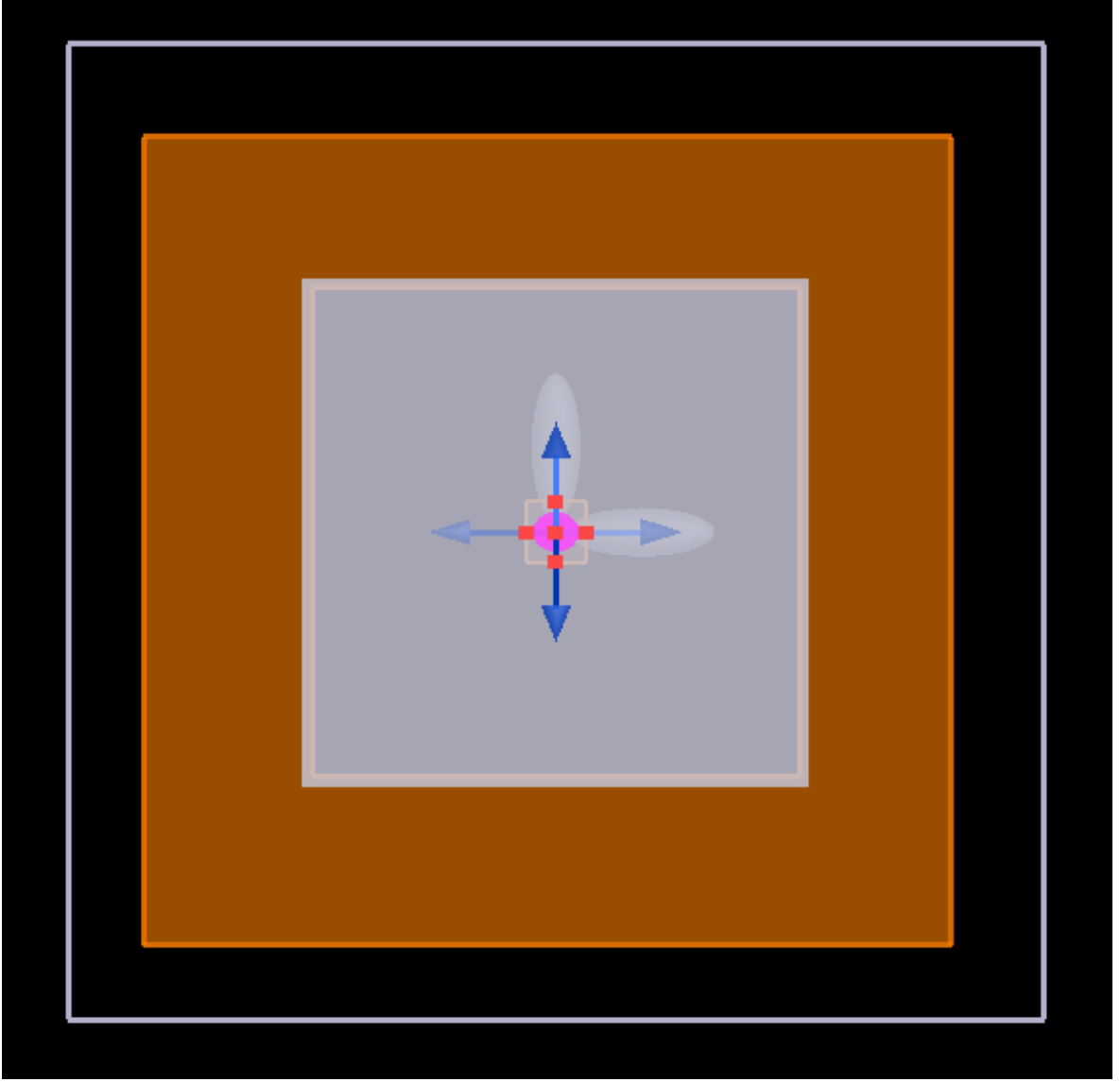
Ardından dik ve yatay durumdaki nanoçubukları bulunduğu ekseninde polarize olacak iki kaynak oluşturulmuştur. Şekil 3.2da Y ekseninde polarize olan kaynak sinyal, x ekseninde polarize olan kaynak ise kontrol olarak adlandırılmıştır.



Şekil 3.3 Simülasyon Bölgesi. Turuncu bölge simülasyonun hesaplama yapacağı alanı temsil eder.

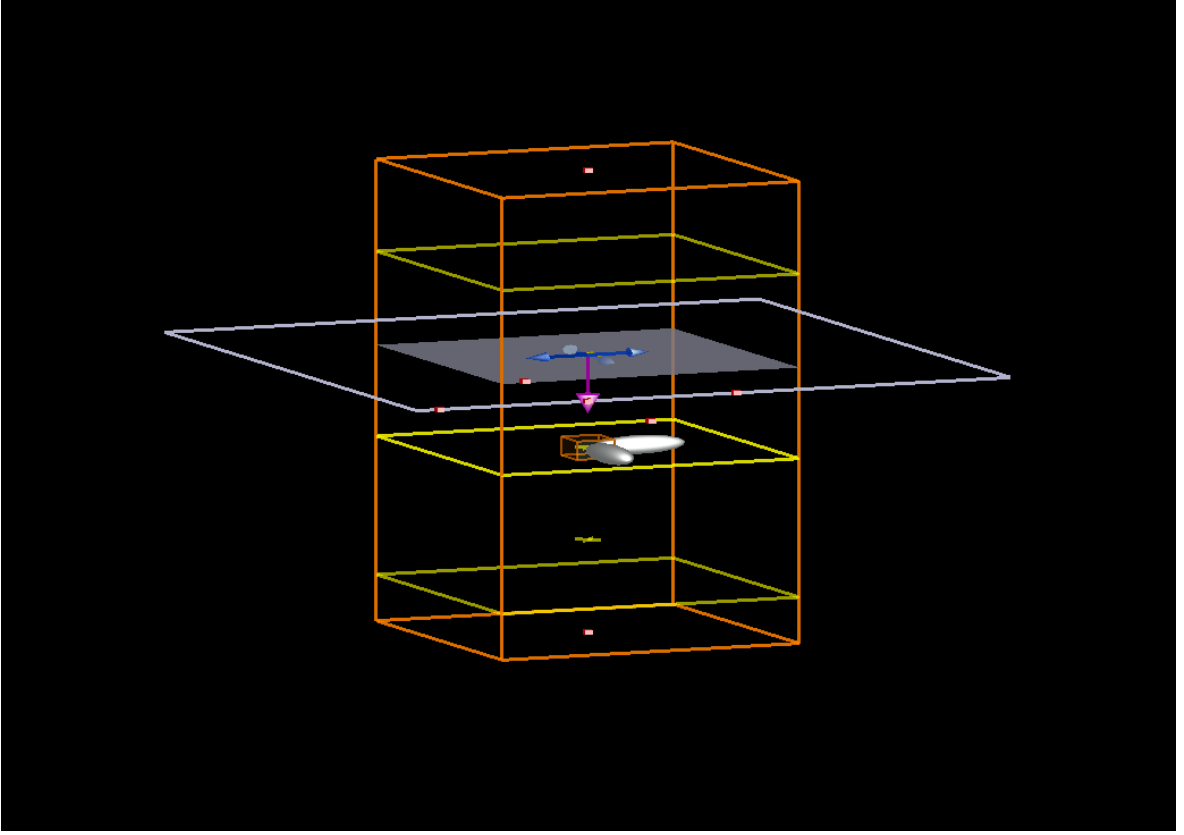
Hesaplama yapılacak bölge belirlenip FDTD simülasyon alanı seçilmiştir. Şekil 3.3de görülen turuncu bölge simülasyon alanını göstermektedir.

Sıcak nokta oluşumu beklenen bölgeye ise, simülasyonun daha kesin sonuçlar üretmesi amacıyla Şekil 3.4de görülen daha yoğun hesaplama yapmayı sağlayan ızgara yapısı eklenmiştir. Simülasyonda temel amaç kontrol (Ex) kaynağının genliğinin kontrollü biçimde değiştiği durumda; sinyal (Ey) kaynağının sabit bırakılıp sıcak noktadaki değişimleri incelemek; diğer bir deyişle tam sıcak nokta bölgesindeki polarizasyon değişimini gözlemlemektir. Temel simülasyon yapısı Şekil 3.5deki gibi oluşturulduktan sonra



Şekil 3.4 Hesaplama Güçlendirmek İçin Yoğunlaştırılmış Izgara Yapılı Simülasyon Eklentisi.  
Nanorodların merkezinde sıcak nokta oluşumunun öngörüldüğü noktada merkezlenmiş bölge.

ilk olarak x polarize kaynağın genliğinin 0 olduğu durumda (non-enhanced durum) simülasyon çalıştırılmıştır. Burada amaç rezonans frekansını bulmaktır. Rezonans frekansı ise simülasyondaki monitörler yardımıyla hesaplanan spektrumunun maksimum olduğu noktadır. Rezonans frekansı belirlenirken sinyal ( $E_y$ ) sabit tutulup kontrol ( $E_x$ ) genliğinin 0 olduğu durum incelendiği için takip edilmesi gereken nicelik sinyaldir. Simülasyondaki ilk önemli adım rezonans frekansı tayinidir. Ardından tespit edilen rezonans frekansıyla kontrol ( $E_x$ ) kaynaklarında daha keskin lazer benzeri bir kaynak olarak kullanılarak simülasyon



Şekil 3.5 Detaylı Simülasyon Temsili. Turuncu çizgilerle sınırlanmış alan; FDTD bölgesi. Sarı ve gri paralel alanlar; farklı monitörlerinin çalışma bölgeleri.

tekrar edilmiştir.

Simülasyon ilk olarak, sinyal ve kontrol kaynaklarının genliklerinin oranlarının 1 olduğu durumda incelenmiştir. Devamında ise farklı genlik oranları kullanılıp (1, 10, 100, 200) sistemin sıcak nokta çevresindeki tepkisi incelenmiştir.

Bu simülasyonlar sonucu farklı oranlardaki kontrol kaynak genliklerinin; sinyal kaynak genlikleriyle ortaya çıkan spektrum dataları toplanmıştır. Bunun temel nedeni; değişen genlikle kontrol (Ex) bilgisinin değişmesi beklenmektedir. Fakat normal şartlarda ilk bakışta kontrol (Ex) kaynağındaki genlik değişiminin sinyalle(Ey) aynı yönlü polarizasyonda bir değişim yaratması beklenmemektedir. Fakat eşleşme (coupling) dolayısıyla sinyal kaynağı sabit olduğu durumda dahi değişen kontrol genliğinin sinyal kaynağıyla aynı yönlü polarizasyona katkı sağladığı gözlenmiştir. Şaşırtıcı ve değerli olan kontrol (Ex) kaynağının normal şartlarda sinyalin (Ey) polarizasyonu üzerinde bir etkisi olamayacak



konumda olmasına rağmen sinyal ( $E_y$ ) üzerinde değişiklik yaratmasıdır. Bunun nedeni direkt olarak kontrol ( $E_x$ ); y eksenli rodun uzun eksen uçlarındaki polarizasyona katkı vermemesine rağmen sıcak noktada meydana gelen değişimin indirekt olarak sinyal ( $E_y$ ) üzerindeki etkisidir. Tez çalışmasının simülasyon temelli olan birinci kısmında sıcak noktada sinyalle aynı yönlü polarizasyondaki değişim ve beraberinde duyarlılık (susceptibility) bilgisi elde edilmiştir. Daha büyük bir pencereden bakılırsa özetle; simülasyon temel olarak sinyal kaynağın genliği değiştirilmeden sadece kontrol kaynağının genliğinin değiştiği durumda sıcak noktada oluşan; polarizasyon yönü sinyalle aynı olan; değişimi incelemeyi hedeflemiştir. Verilerin analizi yapılırken tam sıcak noktada bulunan zaman monitöründeki spektrumun sinyal ( $E_y$ ) bileşeni dışında o noktada yeni oluşan polarizasyona karşılık gelmesinden dolayı;

$$P = \epsilon_0 \chi E \quad (39)$$

39 denklemleriyle duyarlılık (arbitrary) elde edilmiştir.

### 3.2. Analitik Temelli Hesaplama Yöntemi

Tez çalışmasının analitik temelli ikinci kısmında ise; birbirine dik konumlandırılmış iki nanorodun dinamikleri, temel bir modelle açıklanabilir;

$$\ddot{q}_1 + \gamma \dot{q}_1 + \omega_1^2 q_1 - g q_2 = \tilde{E}_1(t) \quad (40)$$

$$\ddot{q}_2 + \gamma \dot{q}_2 + \omega_2^2 q_2 - g q_1 = \tilde{E}_2(t) \quad (41)$$

Burada  $q_1$  ve  $q_2$ , sırasıyla y-ekseninde ve x-eksenindeki nanorodun plasmon salınımlarının genliğini temsil eder. Y-eksenindeki nanorod ( $q_1$ ), y-polarize sinyal kaynağı  $\tilde{E}_1(t) = \tilde{E}_1 e^{-i\omega t}$  tarafından uyarılır. X-eksenindeki nanorod ( $q_2$ ), kontrol darbesi  $\tilde{E}_2(t) = \tilde{E}_2 e^{-i\phi} e^{-i\omega t}$  ile sürülür ve iki nanorodun köşesindeki sıcak nokta aracılığıyla  $q_1$  nanorod ile etkileşir.

$\gamma_1 = \gamma_2$  ve  $g = 0.06\omega_0$  , sırasıyla iki nanorodun plasmon salınımları arasındaki sönme oranları ve etkileşim katsayısıdır. İki gümüş nanorod aynı plazmon rezonansına sahiptir, yani  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$ . Burada, yalnızca  $\phi$  farklı faz farklarında kullanılmak üzere değiştirilmiştir[27].

$$\alpha = \frac{(\varepsilon - \varepsilon_h)}{\varepsilon_h + L(\varepsilon - \varepsilon_h)} \quad (42)$$

Formülü ile toplam polarizabilirlik (polarizability) bilgisi elde edilmiştir. Polarizabilirlik bir rodun hacminin toplam hacimdeki değerine bölüldüğünde polarizasyon bilgisi elde edilmiştir[28]. Burada,  $\varepsilon$  ve  $\varepsilon_h$  sırasıyla nanoçubuk ve ortamın dielektrik fonksiyonlarıdır, ve  $L = 1 - \frac{e^2}{(1-e)} \left(1 + \frac{e}{(1-e)}\right)$  rodların şeklinden kaynaklanan ( $e^2 = 1 - \frac{b^2}{a^2}$ ) ile ilgili geometrik bir faktördür.

$$\chi(\omega) = f\omega_0^2 \left( \frac{\delta_2 + ge^{-i\theta} \frac{E_x}{E_y}}{\delta_1\delta_2 - g^2} \right) \quad (43)$$

$\delta_i = \omega_i^2 - \omega^2 - i\gamma\omega$  eşitliğinde  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$  ve  $(\gamma_{1,2})$  sırasıyla rezonans frekansı ve sönüm sabitlerine karşılık gelmektedir. Başlangıçta (non-enhanced durumda)  $E_x = 0$  iken duyulganlık formülü  $\chi(\omega = \omega_0; \gamma = 0) = f/(\gamma_1/\omega_0)$  haline gelir. Bu sayede duyulganlık formülündeki  $f$  ve  $\gamma$  değerleri hesaplanmıştır. Güçlendirilmemiş (non enhanced) durumdan elde edilen bu bilgiler güçlendirilmiş (enhanced) durum için 43 numaralı denklemde yerine konulup, farklı  $E_x/E_y$  oranları için duyulganlık bilgileri elde edilmiştir.

$$n^2 = 1 + \chi \quad (44)$$

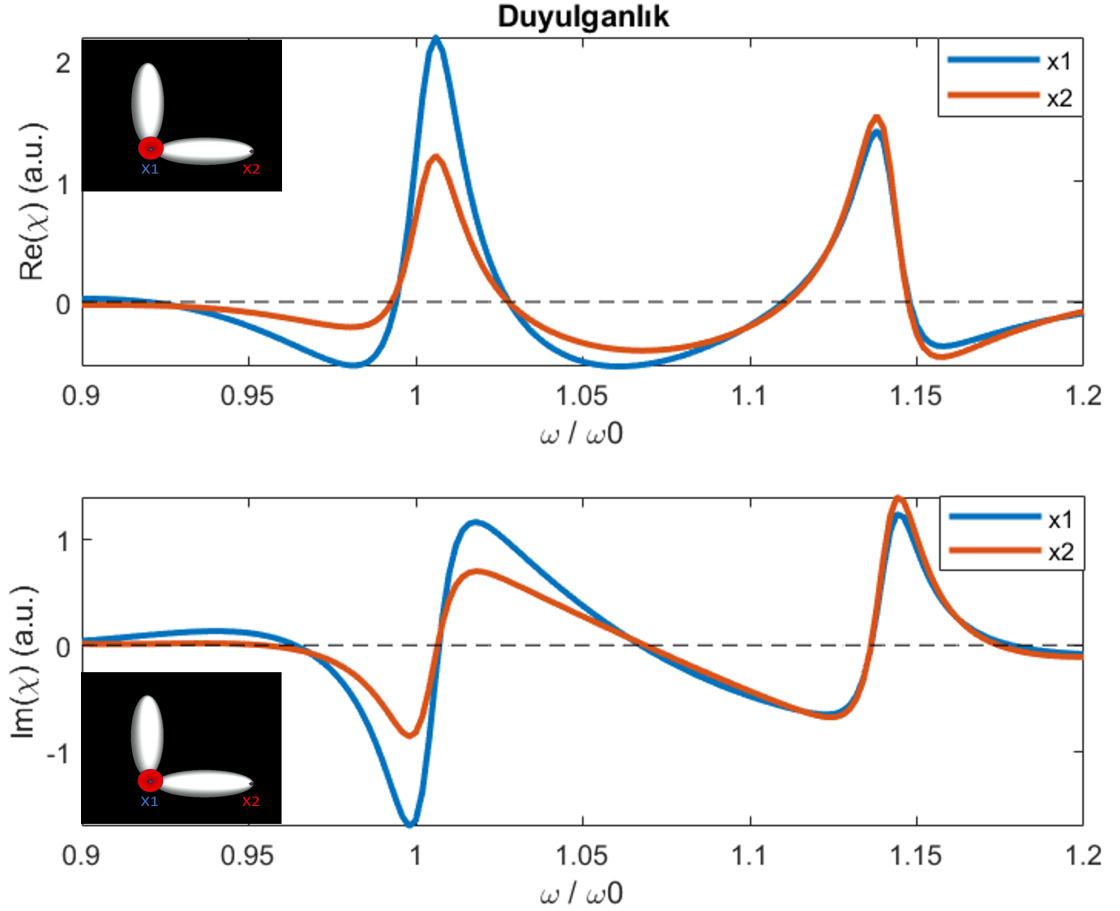
44 numaralı denklem yardımıyla da kırma indisi bilgileri elde edilmiştir.

$$v_{\text{grup}} = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n(\omega) + \omega \frac{dn}{d\omega}} \quad (45)$$

45 numaralı Denklem yardımıyla da son parametre olan grup hızları dataları üretilmiştir. Formül parametreleri tanımlanırken Matlabda Lumerical ile uyumlu olması amacıyla P. B. Johnson ve R. W. Christy isimli bilim insanlarının daha önceki çalışmalarından elde edilen dielektrik sabitleri kullanılmıştır[29].

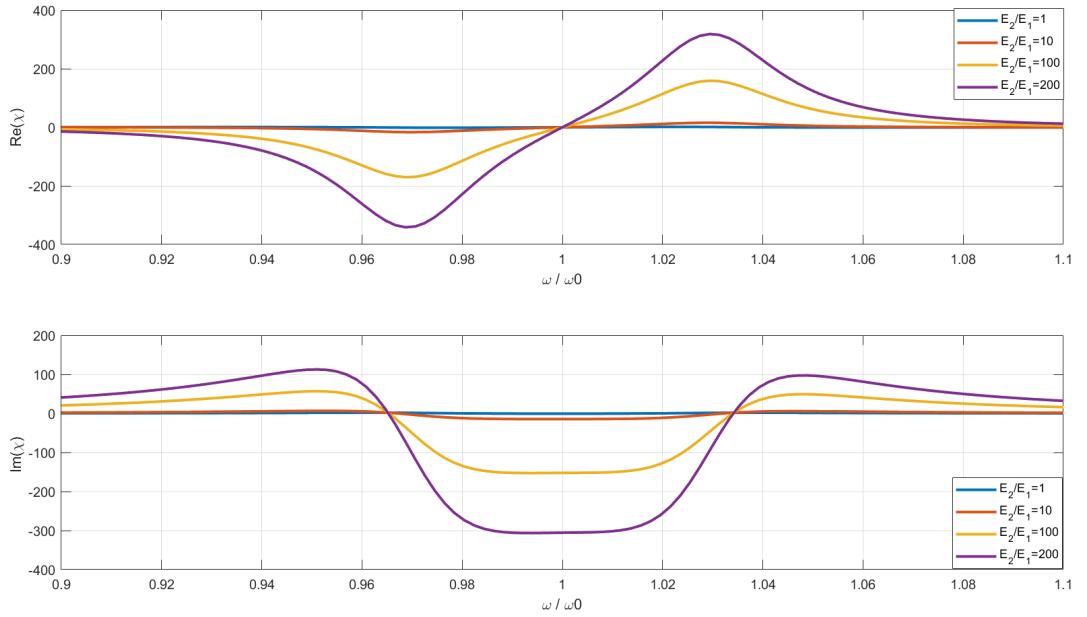
## 4. BULGULAR

Simülasyon sonuçları ve analitik çözümler üretildikten sonra karşılaştırma yapabilmek adına grafikleri düzenlenmiştir. Farklı elektrik alan genlikleri sırasıyla kontrol ve sinyal (E2, E1) değerlerinin farklı oranlarında hesaplama sonuçları listelenmiştir. Simülasyon temelli verilerde elektrik alanların kullanılan program dolayısıyla ölçeklendirmesi göreceli olduğu için sonuçlarda ölçeklendirmeli (arbitrary) birim kullanılmıştır. Ek olarak tüm grafiklerin yatay eksenleri rezonans frekansında, hızlar ışık hızında normalize edilmiştir. Son olarak tüm grafiklerin hemen yanında inceleme yapılan alan gösterilmiştir. Şekil4.1de sinyal

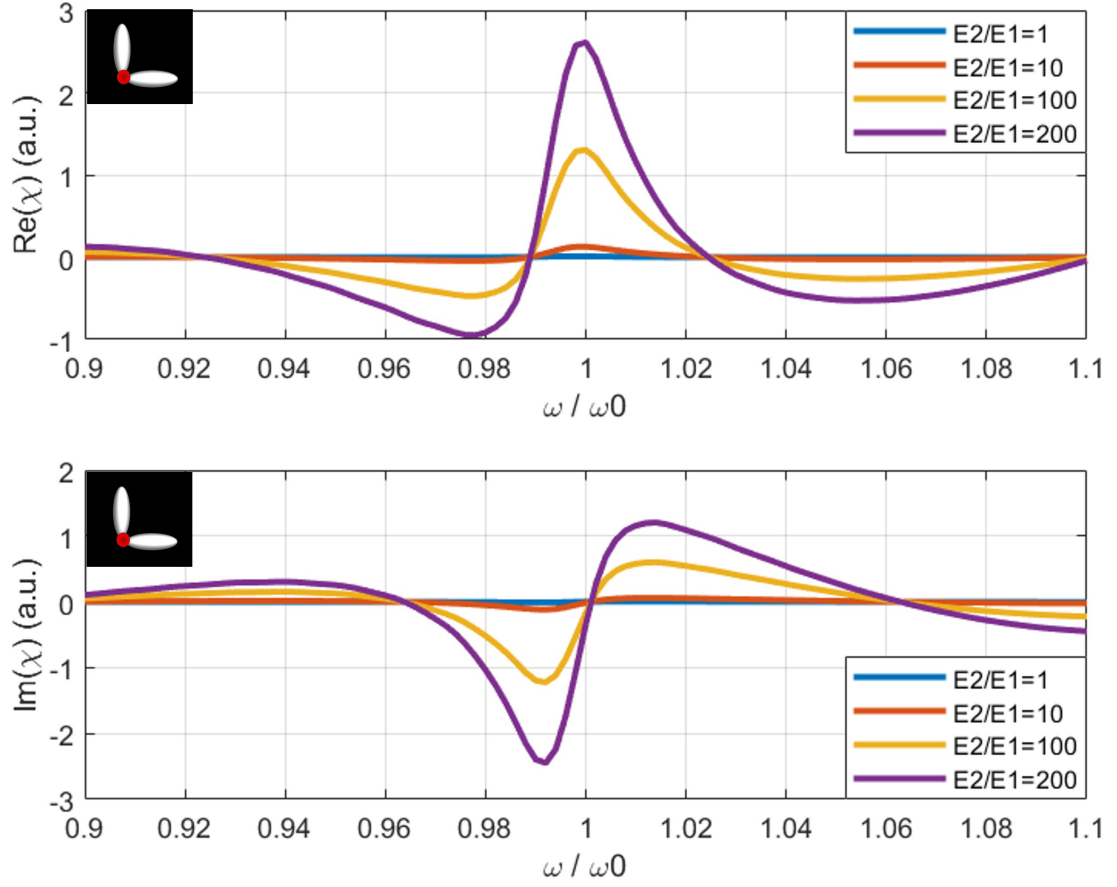


Şekil 4.1 FDTD Simülasyonu ile elde edilen y-yönündeki polarizasyondan elde edilen duyulganlık. Monitör hem iki nanorodun ortasındaki sıcak noktaya hem de y-yönünde uzanan nanorodun diğer ucundaki sıcak noktaya konularak incelenmiştir.

kaynağıyla aynı yönlü y nanorodunun farklı konumlarda sırasıyla x1 (sıcak nokta üzerinde), ve x2(sıcak noktanın zıt ucunda) nokta monitör yardımıyla ölçeklendirilmiş elektrik alan (polarizasyon) bilgileri simülasyon üzerinden elde edilmiştir. Yakın alandaki y-polarize elektrik alan, gönderilen elektrik alandan çok daha küçüktür. Bu yüzden çizim hemen hemen polarizasyonu vermektedir. Polarizasyonla duyulganlığın orantılı olmasıyla da, duyulganlık bilgilerine geçilmiştir. Sıcak nokta üzerindeki polarizasyona katkı hem sinyal hem kontrol kaynağından geldiği için x1 monitörüyle elde edilen dataların daha yüksek olması beklenen bir sonuçtur. Nanorodun kaynağa uzak ucundaki x2 monitöründen elde edilen sonuçlarında sadece sinyal kaynağının doğrudan polarizasyona sebep vermesinden dolayı sıcak noktadaki sonuçlara kıyasla daha küçük olduğu görülmektedir.



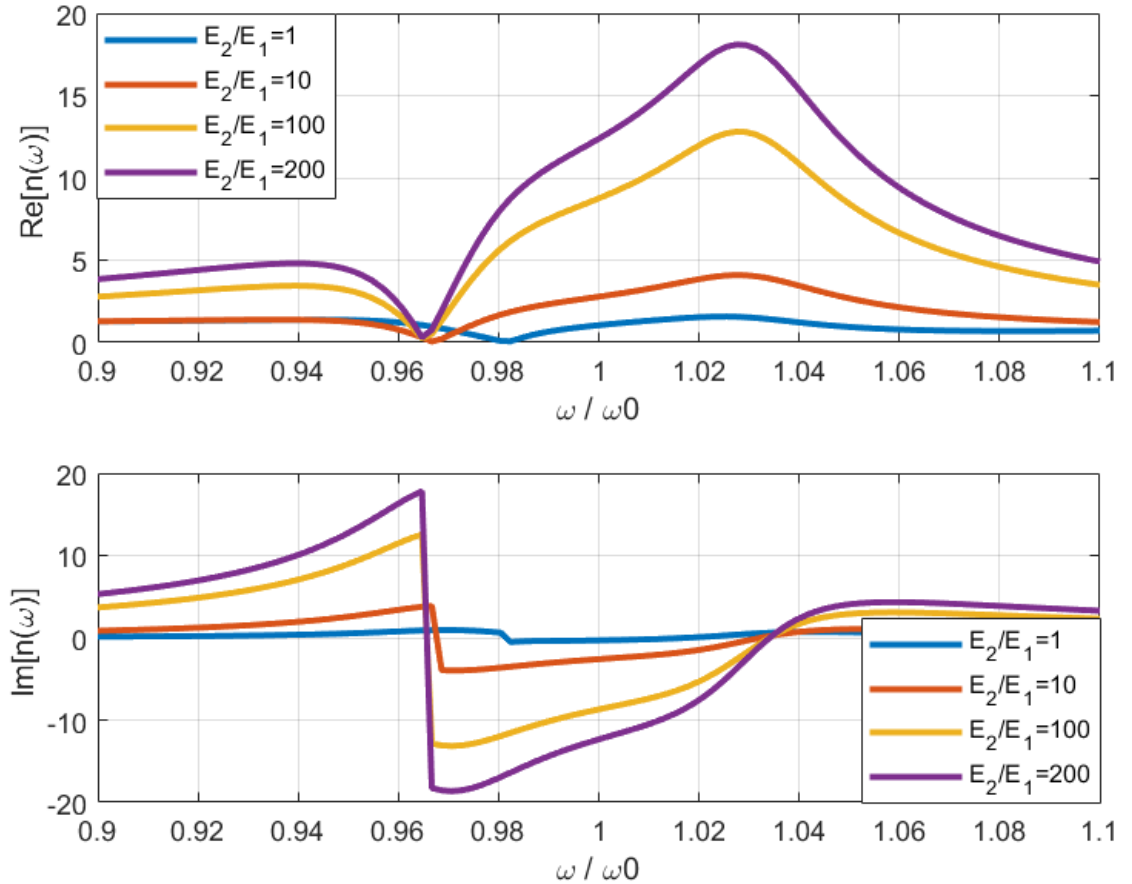
Şekil 4.2 Analitik Duyulganlık. Farklı  $E_2/E_1$  oranlarında analitik olarak normalize frekans bölgesinde duyulganlık



Şekil 4.3 FDTD Simülasyonu ile elde edilen farklı  $E2/E1$  oranlarında simülasyon üzerinden ölçeklendirilmiş elektrik alanlardan hesaplanan normalize frekans bölgesinde duyulganlık

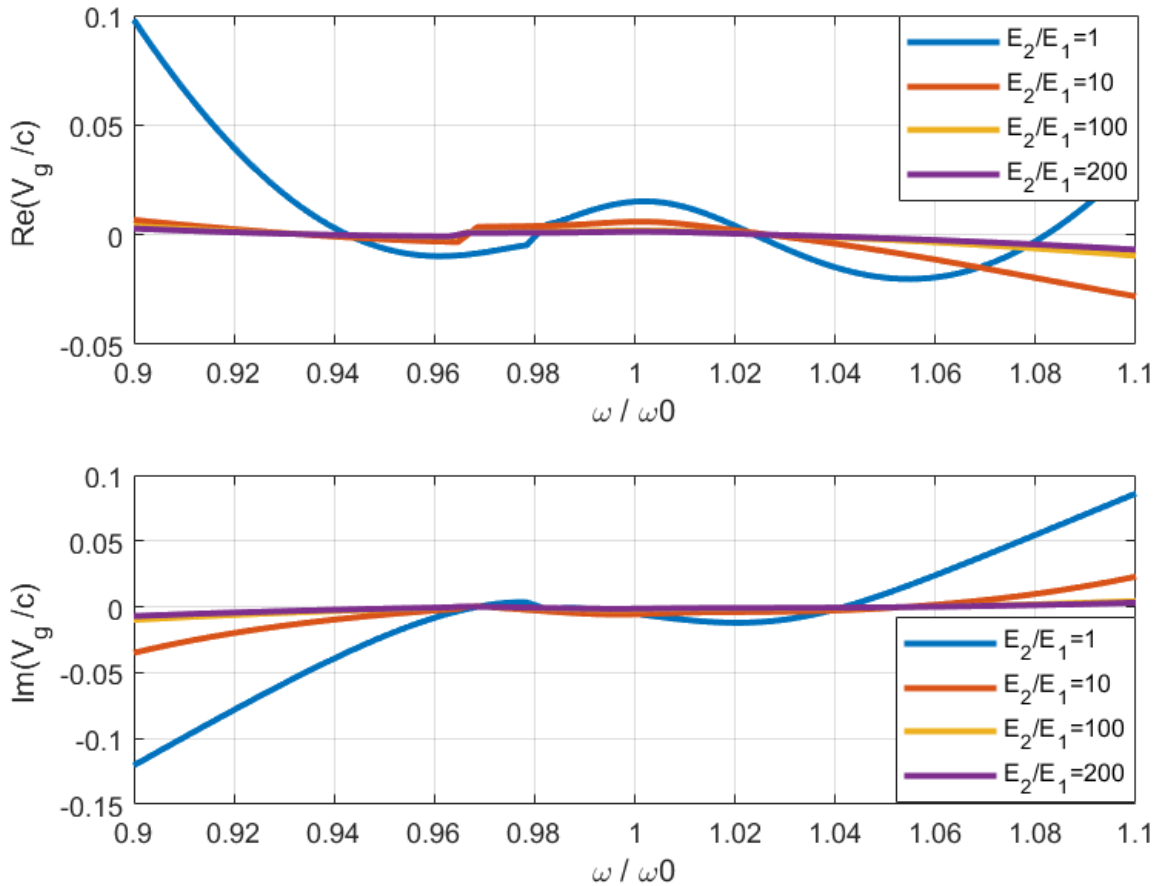
Duyulganlık, bir malzemenin elektrik alan etkisi altında nasıl cevap verdiğini ifade eder dolayısıyla negatif, pozitif veya 0 olmasının optik özelliklerinde major değişiklikler olduğu anlamına gelir. Tezdeki sonuçlar incelenirse; simülasyon sonuçları ve analitik sonuçlarının 0, tepe ve dip değerlerinin birbiriyle yaklaşık örtüştüğü Şekil4.2 ve4.3 de görülmektedir. Artan  $E2/E1$  oranıyla birlikte duyulganlığın artması tanımı gereği beklenen bir sonuçtur. Çünkü duyulganlık; polarizasyonla doğrudan ilişkili bir nicelikdir. Artan elektrik alanın polarizasyonu arttırması bunun da duyulganlığı arttırması beklenmekte olup sonuçlar tutarlıdır. Detaylı olarak incelenirse simülasyon sonucunda analitik sonuçtan farklı olarak normalize frekansın 1.03 olduğu noktada bir mod olduğu daha gösterilmiştir. Bunun nedeni analitik çözümün tek bir rezonans frekansında hesaplama yapmasındandır. Ama gerçek

sonuçlara daha uygun olan simülasyonda başka modların da olmasındandır. Duyulganlık sonuçlarında sanal kısımlar incelendiğinde negatif değerler görülmektedir. Sanal kısım, soğurma (absorption) ve kayıplarla ilişkilidir. Klasik fizikte soğurma grafiklerinde negatif bir değer olmaz. Fakat bu kısım kuantum fiziğinde EİT (Elektromanyetik olarak indüklenmiş transparanlık) konusuyla ilişkilidir ve onun aslında plasmon anaalogudur. Kayıpsız bir materyal olduğunu göstermektedir. Simülasyon sonuçlarında duyulganlık tek bir nokta üzerinden hesaplandığı için sonuçların toplam polarizasyon üzerinden değerlendirilmesi tam olarak gerçeği yansıtmayacaktır. Bu sebeble grafik trendlerinin takibi yapıp simülasyon sonuçlarından kırma indisi hesabı yapılmamıştır. Ama trendin benzerliği ve bu karşılaştırma literatürde ilk defa incelenip devamındaki çalışmalara temel oluşturmuştur.



Şekil 4.4 Analitik Kırma İndisi. Farklı  $E_2/E_1$  oranlarında analitik olarak normalize frekans bölgesinde kırma indisi

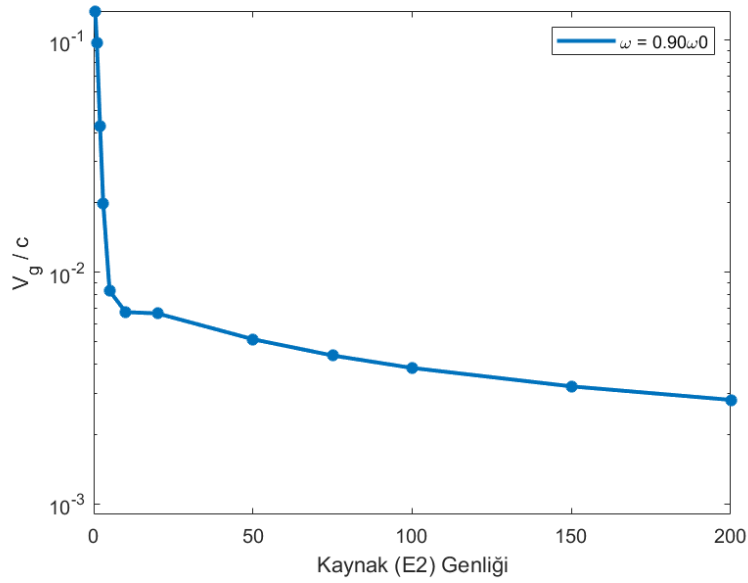
Kırma indisi sonucu incelenecek olursa da, yine dip ve tepe noktalarını önem taşımaktadır. Şekil 4.4 incelendiğinde normalize frekansta 0.95 değerine kadar artan frekansla kırma indisinin arttığı görülmektedir. Bu normal dispersiyonda beklenen bir durumdur. Fakat grafiğin 0.95 değerinden sonra azalma trendi görülmektedir. Artan frekansa rağmen azalan kırma indisi anormal dispersiyon durumuna karşılık gelmektedir. Anormal dispersiyon ışık hızının aşıldığı bir durumu göstermektedir. Anormal dispersiyon durumuna ek olarak yaklaşık normalize frekansın yaklaşık 0.97 değerinde kırma indisinin sıfıra yaklaştığı da görülmektedir. Boşluğun indisinin bir olduğu düşünüldüğünde sıfıra yakın kırma indisi tezdeki en önemli sonuçlardan birini göstermektedir. Optik konusunda oldukça kıymetli olan bu durum birçok teknolojik gelişmeye süper soğurucu özelliğiyle olanak sağlamaktadır.



Şekil 4.5 Analitik Grup Hızı. Farklı  $E_2/E_1$  oranlarında analitik olarak hesaplanmış, ışık hızına göre skalalandırılmış normalize frekans bölgesinde kırma indisi

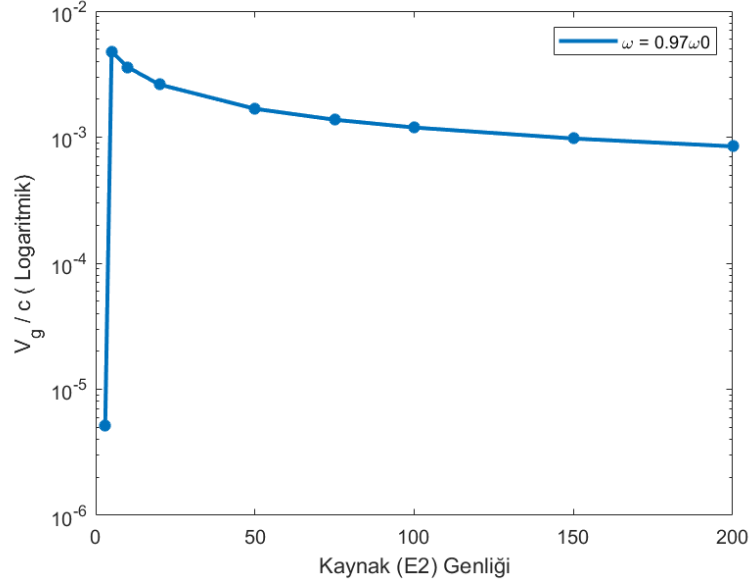


Şekil 4.5 sonuçları ışık hızına göre normalize edilmiş hızların normalize frekansa göre davranışlarını göstermektedir. Grup hızı sonuçları incelendiğinde özellikle normalize frekans bölgesinde 0.95 değerinde başlayan anormal dispersiyon bölgesindeki davranışa uygun olarak negatif hızlar görülmektedir. Hızların negatif olduğu durumlar süperlüminal hızları gösterirken, pozitif ama oldukça küçük hızlarında olması yavaş ışık fenomenine işaret etmektedir. Süperlüminal hızlarla yavaş ışık arasındaki bu geçişin de frekanstaki küçük değişimlerle yapılabilmesi sistemin önemini ve ilginçliğini vurgulamaktadır.

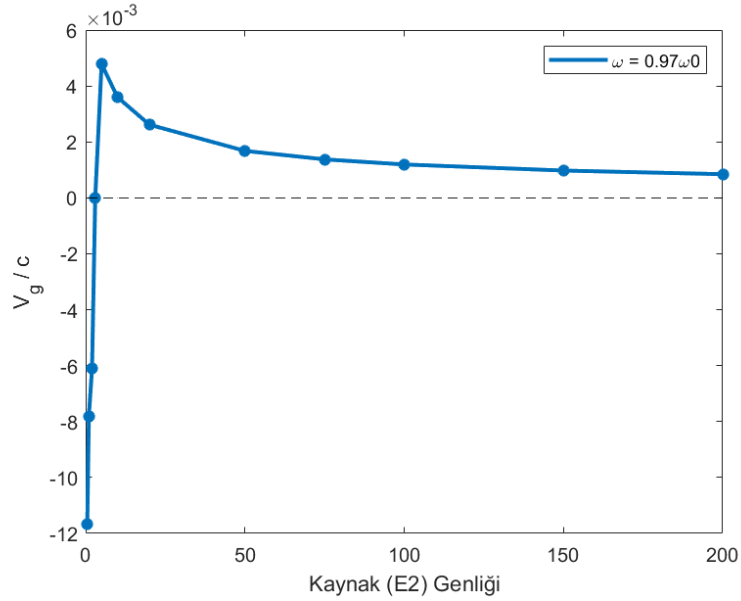


Şekil 4.6  $\omega = 0.90\omega_0$  Durumunda Hız Değişimi. Logaritmik skalalandırılmış grup hızına karşı kaynak ışık genliği

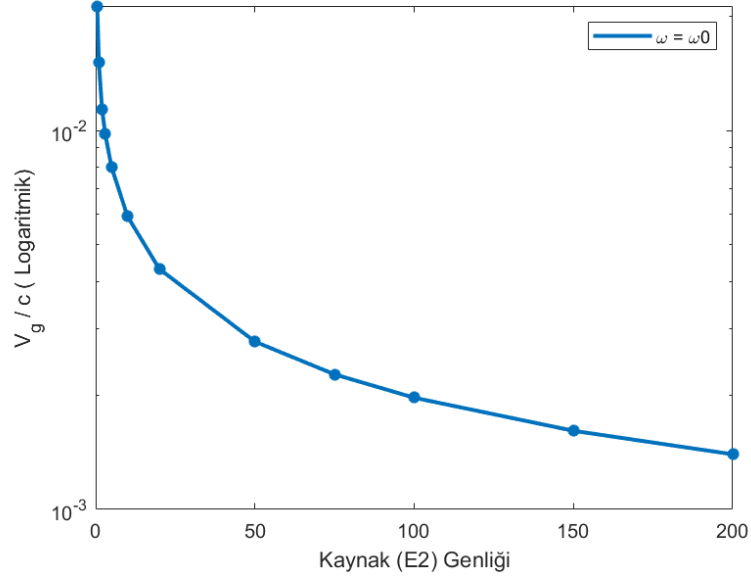
Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.9da farklı frekanslarda kontrol kaynak genliğinin değişimiyle sistemdeki grup hızının değişimi logaritmik olarak gösterilmektedir. Şekil 4.8 de ise logaritmik olmayan skalada dikkat çeken nokta hızın negatiften pozitive geçişidir. Grafiklerde görülen en önemli nokta da artan E2/E1 (kontrol/sinyal) oranıyla hızların ilişkisidir. Genlik değişimiyle sürekli ve aktif olarak farklı hızlara ulaşılabilmektedir. Üstelik bunun uygun frekansalarda pozitif hızlardan negatif hızlara mümkün olduğu Şekil 4.7 ile görülmektedir.



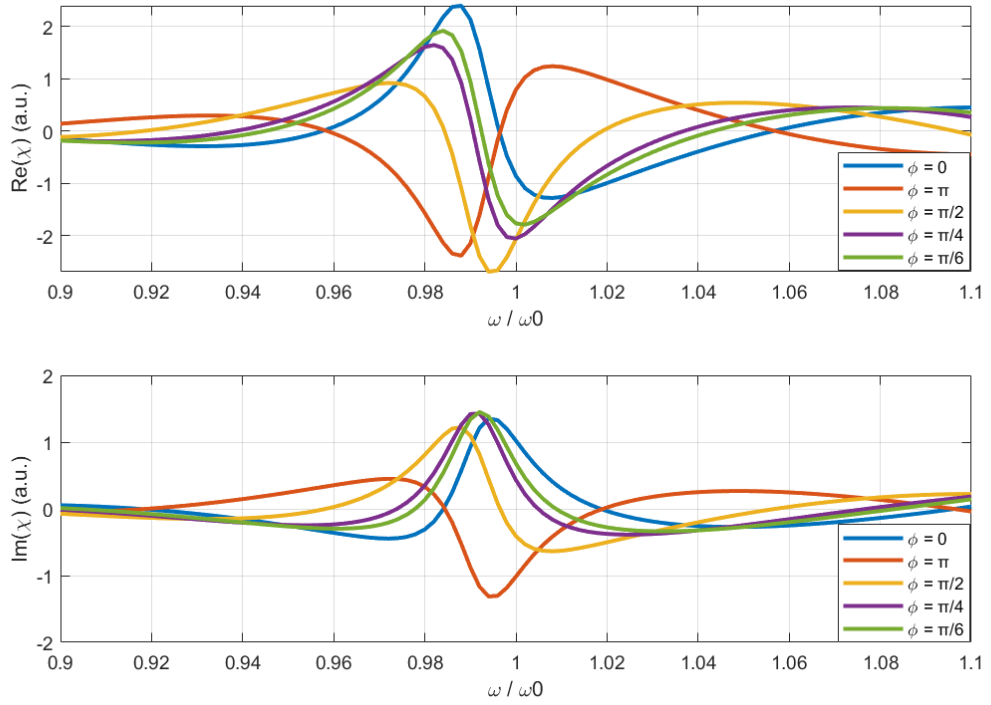
Şekil 4.7  $\omega = 0.97\omega_0$  Durumunda Hız Değişimi. Logaritmik skalalandırılmış grup hızına karşı kaynak ışık genliği



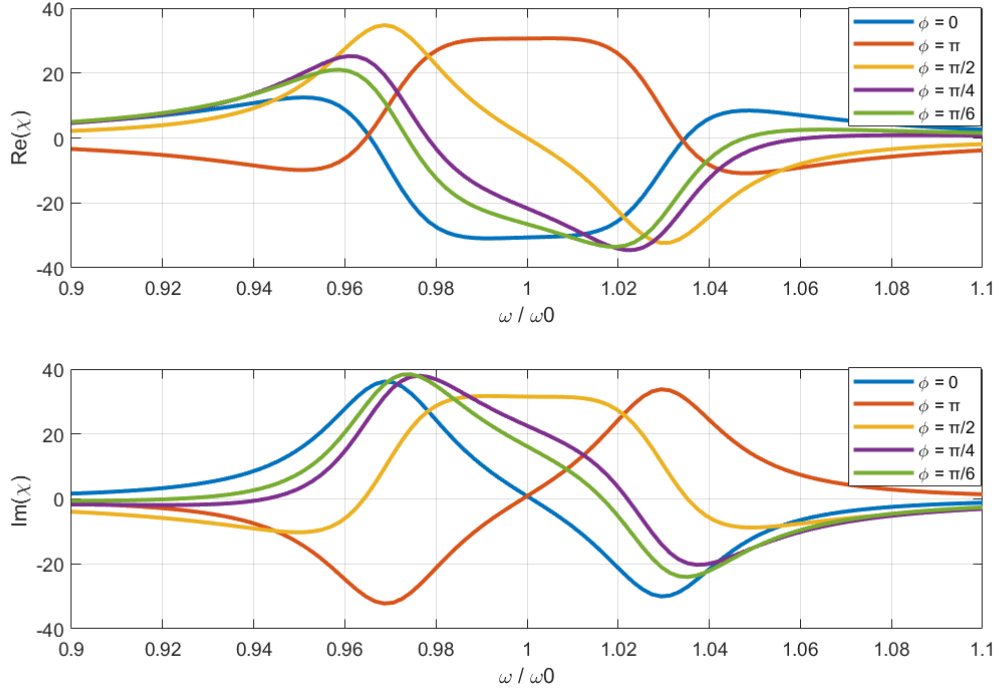
Şekil 4.8  $\omega = 0.97\omega_0$  Durumunda Hız Değişimi. Skalalandırılmış grup hızına karşı kaynak ışık genliği



Şekil 4.9  $\omega = \omega_0$  Durumunda Hız Değişimi. Logaritmik skalalandırılmış grup hızına karşı kaynak ışık genliği



Şekil 4.10 FDTD simülasyonu üzerinden hesaplanan, E2/E1 oranı 20 iken farklı faz farklarında sistemin duyulanlık tepkisi



Şekil 4.11 Analitik olarak E2/E1 oranı 20 iken farklı faz farklarında sistemin duyulganlık tepkisi

Şekil 4.11 ve 4.10 grafikleri kontrol kaynağının genliğinin, sinyal kaynağının genliğine oranı 20 de sabit tutulduğu durumda farklı faz farklarında analitik ve FDTD simülasyon sonuçları görülmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde faz farkının küçük değişimlerinde sistemin tepkisinin daha küçük; büyük değişimlerinde daha büyük olduğu görülmektedir. Buradan çıkarılabilecek en önemli ikinci sonuç ise, faz farkının değişiminin de sistemin doğrudan polarizasyon, duyulganlık, indis ve grup hızı gibi parametrelerini değiştirebileceğidir.

## 5. SONUÇLAR

Hızın pozitif ama çok küçük bir değeri yavaş ışık fenomenini işaret ederken; negatif değeri süperlüminal hızları işaret etmektedir. Bu da ışığın bir ortamda önce duruyormuş sonrasında da sanki ortama girmeden çıkıyormuş gibi davranmasını sağlar. Böyle önemli bir geçişin sadece uygun frekansta, genlik değişimiyle yapılabilmesi oldukça değerlidir. Aynı zamanda bunun farklı frekanslarda da mümkün olduğu düşünüldüğünde; farklı hızlara erişimin genlik veya frekans değişimiyle ulaşılabirliği kolaylaştırılmıştır. Tezde geniş ölçekte kontrol kaynağı ve sinyal kaynağı arasındaki faz farkının  $-\pi/2$  olduğu durum incelenmiştir. Bu sonuçlara ek; kontrol kaynağı ve sinyal kaynağının genlik oranları sabit tutulup faz farkının değişiminin incelenmesi durumunda daha çeşitli grup hızları verileri elde edilebileceği gösterilmiştir. Tüm bu sonuçlar gösteriyor tezde çalışılan plazmonik sistemde grup hızı ve kırma indisi değişimi gibi önemli işlemler basitçe bir kaynak genliği değişimi veya faz farkı değişimiyle mümkün olabilmektedir.

Kuantum fiziğinde EİT fenomeyliyle gözlenen indis arttırımın oda sıcaklığında mümkün olmamasına karşın plazmon analogu oda sıcaklığında sürekli kontrol edilebilir bir sistemi mümkün kılmıştır. Sonuç olarak tez kapsamında gözlenen anormal dispersiyon, epsilon sifıra yakın malzeme, negatif soğurmalı malzeme gibi fenomenler temelde aynı doğrulara ve teknolojik yeniliklere götürmektedir. Bu plazmon temelli analog hiçbir nonlineer etki ve süreç olmadan nanofotonikte ultra kompakt optik anahtarlar ve modülatörlerin geliştirilmesine olanak sağlayan teknolojilere zemin oluşturmakla birlikte bunu ultrakısa tepki süresi ve minimal enerji tüketimi ile yapabilecektir.

## KAYNAKÇA

- [1] Ali Panahpour, Abolfazl Mahmoodpoor, and Andrei V. Lavrinenko. Refraction enhancement in plasmonics by coherent control of plasmon resonances. *Phys. Rev. B*, 100:075427, **2019**. doi:10.1103/PhysRevB.100.075427.
- [2] Ritu Dhama, Ali Panahpour, Tuomas Pihlava, Dhyey Ghindani, and Humeyra Caglayan. All-optical switching based on plasmon-induced enhancement of index of refraction. *Nature Communications*, 13(1):1–9, **2022**.
- [3] Onur Alpay. *Görünür Bölgede Geçirgen, RF Kalkanlama Yapabilen Çok Katmanlı İnce Film Kaplamalarının Tasarlanması ve Sayısal Hesaplamalı Çözümlemesi*. Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, **2019**.
- [4] Gülten Onay. *Grafen Tabanlı Plazmonik Sensörler ve Uygulamaları*. Doktora tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı, **2019**.
- [5] Jiří Homola. Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species. *Chemical reviews*, 108(2):462–493, **2008**.
- [6] Aslı Gençaslan. *Grup IV Nitürlerin Fotonik ve Kuantum Plazmonik Uygulamaları*. Doktora tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı, **2023**.
- [7] D. B. Larson and D. B. Larson. *The Structure of the Physical Universe*. North Pacific Publ., **1979**.
- [8] A. Rahimi. Absorptive losses mitigation in gain-plasmon hybrid systems as optical metamaterials, **2013**.
- [9] P. Bertrand, D. Del Sarto, and A. Ghizzo. The vlasov equation: History and general properties. **2019**.
- [10] J. Weiner and F. D. Nunes. *Light-Matter Interaction: Physics and Engineering at the Nanoscale*. Oxford University Press, **2013**.

- [11] Stefan Enoch and Nicolas Bonod, editors. *Plasmonics: from basics to advanced topics*, volume 167. Springer, **2012**.
- [12] Heinz Raether. *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings*. Springer, **1988**.
- [13] Jon A Schuller, Edward S Barnard, Wenshan Cai, Young Chul Jun, Justin S White, and Mark L Brongersma. Plasmonics for extreme light concentration and manipulation. *Nat. Mater.*, 9:193–204, **2010**.
- [14] M. E. Taşgın, A. Bek, and S. Postacı. *Fano Resonances in the Linear and Nonlinear Plasmonic Response*, chapter 1. Springer, **2018**.
- [15] E. Kretschmann and H. Raether. Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light. *Zeitschrift für Naturforschung A*, 23:2135–2136, **1968**.
- [16] F. C. Bohren. How can a particle absorb more than the light incident on it? *American Journal of Physics*, 51:323–327, **1983**.
- [17] Philippe Tassin, Lei Zhang, Rongkuo Zhao, Aditya Jain, Thomas Koschny, and Costas M Soukoulis. Electromagnetically induced transparency and absorption in metamaterials: The radiating two-oscillator model and its experimental confirmation. *Physical Review Letters*, 109(18):187401, **2012**.
- [18] Na Liu, Lutz Langguth, Thomas Weiss, Johannes Kästel, Michael Fleischhauer, Tilman Pfau, and Harald Giessen. Plasmonic analogue of electromagnetically induced transparency at the drude damping limit. *Nature Materials*, 8(9):758–762, **2009**.
- [19] Nikitas Papasimakis, Vassili A Fedotov, Nikolay I Zheludev, and Sergey L Prosvirnin. Metamaterial analog of electromagnetically induced transparency. *Physical Review Letters*, 101(25):253903, **2008**.

- [20] Shuang Zhang, Dentcho A Genov, Yuan Wang, Ming Liu, and Xiang Zhang. Plasmon-induced transparency in metamaterials. *Physical Review Letters*, 101(4):047401, **2008**.
- [21] M. N. O. Sadiku. *Numerical Techniques in Electromagnetics*. CRC Press, **2000**.
- [22] J. P. Berenger. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics*, 114:185–200, **1994**.
- [23] J. B. Schneider. *Understanding the Finite-Difference Time-Domain Method*. **2017**.
- [24] Y. Erol. *İki Boyutlu Mikrostrip Hatların Zaman Domeni İçin Sonlu Farklar (FDTD) Metodu ile Analizi*. Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, **2001**.
- [25] Raymond Chiao. Superluminal phase and group velocities: A tutorial on sommerfeld’s phase, group, and front velocities for wave motion in a medium, with applications to the ”instantaneous superluminality” of electrons. **2011**.
- [26] Mehmet Emre Tasgin. Negative superluminal velocity and violation of kramers-kronig relations in causal optical systems. *Phys. Rev. A*, 103:013504, **2021**. doi:10.1103/PhysRevA.103.013504.
- [27] Emre Yüce, Zafer Artvin, Ramazan Sahin, Alpan Bek, and Mehmet Emre Tasgin. Actively tunable photonic crystal-based switch via plasmon-analog of index enhancement. *Applied Physics Letters*, 119(21):211103, **2021**. ISSN 0003-6951. doi:10.1063/5.0071984.
- [28] C. F. Bohren and D. R. Huffman. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. Wiley, New York, wiley professional paperback edition edition, **1998**.
- [29] P. B. Johnson and R. W. Christy. Optical constants of the noble metals. *Physical Review B*, 6:4370, **1972**.