PLAZMONİK NANOPARÇACIKLARIN GÜNEŞ HÜCRELERİNİN VERİMİNE ETKİLERİ

THE EFFECTS OF PLASMONIC NANOPARTICLES ON SOLAR CELL EFFICIENCY

METİN FURKAN TANRIVER

DR. ÖĞR. ÜYESİ DİNÇER GÖKCEN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2021

ÖZET

PLAZMONİK NANOPARÇACIKLARIN GÜNEŞ HÜCRELERİNİN VERİMİNE ETKİLERİ

Metin Furkan TANRIVER

Yüksek Lisans, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Dinçer GÖKCEN

Ocak 2021, 146 sayfa

Artan enerji ihtiyaçlarının temiz ve yenilenebilir kaynaklar ile karşılanması çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik adına çok önemlidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş hücrelerinin verim ve maliyetlerinde yapılacak iyileştirmeler bu kaynağın tercih edilmesinde önemli rol oynayacaktır. Bunu sağlamak adına plazmonik nanoparçacıkların özgün optik karakteristiklerinin ve güneş hücresi üzerine uygulamalarının araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda güneş hücresi içerisinde yer alan plazmonik nanoparçacıkların bu kayıplı ortam içerisindeki optik özelliklerini incelemek için bir formülasyon geliştirilmiştir. Bu yöntem kullanılarak değişik parametre ve yapıların nanoparçacık karakteristiklerine etkileri incelenmiştir. Karakteristikleri belirlenen nanoparçacıkların güneş hücresi tarafından emilen optik güce etkisi hesaplanmıştır. Bu yolla nanoparçacıkların güneş hücrelerinde optimal kullanımı ve hücre emiliminde sağladıkları artış değerlendirilmiştir. Nanoparçacıkların hücre içerisinde kullanımı ile birkaç kata kadar emilim artışı görülmüş ve ince güneş hücrelerinde daha etkili oldukları gözlemlenmiştir. 200 nm kalınlığındaki silisyum emilimi hücre içerisine eklenen gümüş nanoparçacıklar ile 6.8 katına çıkmıştır. Bu artış

1 μm kalınlığındaki silisyum hücrede ise 2.48 kattır. Plazmonik nanoparçacıkların çok eklemli güneş hücrelerinde kullanımı ele alınmıştır. Farklı özelliklere sahip nanoparçacıkların birlikte kullanılmasıyla geniş bir ışık spektrumunda verim artışı sağlanmıştır. Böylece nanoparçacıkların güneş hücrelerinde kullanımının verimde artış ve malzeme maliyetinden kazanç elde edilmesini sağlayabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güneş Hücresi, Kayıplı Ortam, Nanoparçacık, Plazmonik, Sonlu Elemanlar Yöntemi

ABSTRACT

THE EFFECTS OF PLASMONIC NANOPARTICLES ON SOLAR CELL EFFICIENCY

Metin Furkan TANRIVER

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Dinçer GÖKCEN

January 2021, 146 pages

For environmental and economic sustainability it is very important to meet the increasing energy needs with clean and renewable resources. Improvements made in the efficiency and cost of solar cells will be crucial in the future role of this renewable energy source. To achieve this, the unique optical characteristics of plasmonic nanoparticles and their applications on solar cells are investigated. In this regard, a formulation is developed to examine the optical properties of plasmonic nanoparticles in the lossy medium of a solar cell. Using this method, the effects of different parameters and structures on nanoparticle characteristics are investigated. The effect of the characterized nanoparticles on the optical power absorption of the solar cell is calculated. In this way, the optimal use of nanoparticles in solar cells and their contribution to cell absorption are determined. With the addition of nanoparticles inside the cell, an absorption increase of up to several times is observed with increased effects in thinner solar cells. The absorption of a 200 nm thick silicon cell is increased by a factor of 6.8 when silver nanoparticles are incorporated. This increase is 2.48 times for a 1 μm thick silicon cell. The use of plasmonic nanoparticles in multi-junction solar cells

is also evaluated. The efficiency of the cell is increased in a wide spectrum of light by jointly using nanoparticles with different properties. Thus, it is shown that the use of nanoparticles in solar cells can provide an increase in efficiency and decrease in material costs.

Keywords: Finite Element Method, Lossy Environment, Nanoparticle, Plasmonics, Solar Cell

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarımda bilgi, birikim ve tecrübeleriyle bana yol gösteren değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Dinçer Gökcen'e,

Yüksek lisans eğitimimi teşvik eden ve tez çalışması kapsamında her türlü olanağı sağlayan Roketsan A.Ş.'ye,

Yüksek lisansa başlamam konusunda beni ikna eden ve bu süreçte bana destek olan iş arkadaşlarım Mehmet SAĞLAM ve Abdullah Bera İÇLİ'ye,

Motivasyon ve desteklerini esirgemeyen bütün arkadaşlarıma,

Mühendisliğe olan ilgimin kaynağı olan ve her zaman arkamda olduğunu hissettiren babam Metin TANRIVER'e,

Bilime olan merakımı pekiştiren, huzur ve sağlığın her şeyden öncelikli olduğunu hep hatırlatan annem Nurten TANRIVER'e,

Her zaman yanımda olan ve beni destekleyen ablam Kübra Dilara AYAR'a,

Sonsuz Teşekkürlerimle…

Metin Furkan TANRIVER

Ocak 2021, Ankara

İÇİNDEKİLER

ABSTRACT 3

TEŞEKKÜR 5

İÇİNDEKİLER 6

ŞEKİLLER DİZİNİ 8

ÇİZELGELER DİZİNİ 15

SİMGELER VE KISALTMALAR 16

1. GİRİŞ 1

1.1. Tezin Amacı 12

1.2. Tezin Kapsamı 12

2. PLAZMONİK NANOPARÇACIKLAR 14

2.1. Genel Terimler 14

2.2. Rayleigh Saçılım Modeli 15

2.3. Plazmonik Materyaller 19

3. GÜNEŞ ENERJİSİ VE FOTOELEKTRİK ETKİ 22

3.1. Güneş Işıması 22

3.2. Güneş Hücresi 24

4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ 29

4.1. Benzetim Modelleri 29

4.2. Kayıplı Ortamda Nanoparçacık Karakteristiği 31

4.3. Parametreler ve Etkileri 39

4.3.1. Derinlik ve Yüksekliğin Etkileri 39

4.3.2. Yarıçap ve Sıklığın Etkileri 50

4.3.3. Yarı İletken Kırılma İndisinin Etkileri 64

4.3.4. Nanoparçacık Kırılma İndisinin Etkileri 77

4.3.5. Çekirdek-Kabuk Yapısı 89

4.3.6. Nanoparçacık Düzlemsel Dizilim Şeklinin Etkileri 97

4.3.7. Farklı Materyaller Arasında Kullanımın Etkileri 103

4.3.8. Nanoparçacık Şeklinin Etkileri 109

5. PLAZMONİK GÜNEŞ HÜCRESİ 114

5.1. Optimal Nanoparçacık Kullanımı 114

5.2. Çok Eklemli Güneş Hücrelerinde Kullanım 122

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....134

7. KAYNAKLAR 139

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Sera gazlarının toplam ısıtma etkisi. Grafik, NOAA Climate.gov tarafından NOAA ESRL verilerine dayanarak hazırlanmıştır [4]. 2
Şekil 2. Kara ve okyanus verilerine dayalı küresel yıllık ortalama yüzey sıcaklığı değişimi. Sıcaklığın yükselmeye devam ettiği görülmektedir [5]. Daha fazla bilgi için [6]. 3
Şekil 3. Türkiye için küresel yatay ışınım haritası [11]. 4
Şekil 4. NREL'de kurulu Panasonic güneş paneli [14]. 5
Şekil 5. Küre altın nanoparçacıkların 100 nm ve 20 nm ölçülerde TEM görüntüleri [27]. 9
Şekil 6. İnce film P-N eklem güneş hücreleri için plazmonik NP'lar ile ışık hapsetme teknikleri. a) Güneş hücresi üst yüzeyine eklenen NP'ler ile ışık saçılımı, b) güneş hücresi içerisine gömülü NP'ler ile yakın alan bölgesinde emilim. [26] 10
Şekil 7. Uyarıcı elektrik alana göre normalize edilmiş altın nanoparçacıklar ile arttırılan elektrik alan 14
Şekil 8. Sabit elektrik alan altında oluşan elektrik dipol momenti [45] 16
Şekil 9. Güneş spektral ışınımı [48] 22
Şekil 10. Güneş hücresinde foto-akım üretimi. Altta P-N ekleminin tükenim bölgesine düşen hv enerjili foton tarafından uyarılan elektron-delik çifti ve bu yüklerin hareketi yer almaktadır. Üstte ise bu yük hareketinin enerji bandı diyagramı verilmiştir. [49] 25
Şekil 11. Birim hücre dilimi modeli, yarı iletken içerisinde yer alan NP 29
Şekil 12. Belirli bir dalga boyu için farklı periyotlara sahip dokulu yüzeyler üzerinde meydana gelen optik etkiler. λ dalga boyu ve Λ örüntü periyodudur. [19] 31
Şekil 13. NP konumu ve ışık etkileşimi ile ilgili parametreler. P güç, x uzunluktur. 32
Şekil 14. Kayıpsız ortamda NP karakteristikleri 35
Şekil 15. NP dizi karakteristikleri (yeşil ve sarı) ile yarı iletken (gri) üzerinde hapsedilen güçler 36
Şekil 16. Yarı iletken içerisinde NP konum parametreleri, derinlik ve yükseklik 39
Şekil 17. Gerçekçi ve kontrol modelleri için derinliğe bağlı olarak NP'lere ulaşan güç oranı ($\%PU$) 40

Şekil 18. Gerçekçi ve kontrol modelleri için derinliğe bağlı NP emilim oranı ($\%PNP.norm$) 41
Şekil 19. Gerçekçi ve kontrol modelleri için derinliğe bağlı NP iletim oranı ($\%P\dot{I}.norm$) 42
Şekil 20. Gerçekçi ve kontrol modelleri için derinliğe bağlı NP yansıma oranı ($\%PY.norm$) 43
Şekil 21. Gerçekçi ve kontrol modelleri için derinliğe bağlı yakın alan emilim oranı ($\%PYA.norm$) 44
Şekil 22. Gerçekçi ve kontrol modelleri için yüksekliğe bağlı olarak NP'lere ulaşan güç oranı ($\%PU$) 45
Şekil 23. Gerçekçi ve kontrol modelleri için yüksekliğe bağlı NP emilim oranı ($\%PNP.norm$) 46
Şekil 24. Gerçekçi ve kontrol modelleri için yüksekliğe bağlı NP iletim oranı ($\%P\dot{I}.norm$) 47
Şekil 25. Gerçekçi ve kontrol modelleri için yüksekliğe bağlı NP yansıma oranı ($\%PY.norm$) 48
Şekil 26. Gerçekçi ve kontrol modelleri için yüksekliğe bağlı yakın alan emilim oranı ($\%PYA.norm$) 49
Şekil 27. NP dizisinde yarıçap ve boşluk 50
Şekil 28. Gerçekçi ve kontrol modelleri için sıklığa bağlı NP emilim oranı ($\%PNP.norm$) 51
Şekil 29. Gerçekçi ve kontrol modelleri için sıklığa bağlı NP iletim oranı ($\%P\dot{I}.norm$) 52
Şekil 30. Gerçekçi ve kontrol modelleri için sıklığa bağlı NP yansıma oranı ($\%PY.norm$) 52
Şekil 31. Gerçekçi ve kontrol modelleri için sıklığa bağlı yakın alan emilim oranı ($\%PYA.norm$) 53
Şekil 32. Gerçekçi model için sıklığa bağlı $PYA.norm$ / $PNP.norm$ ve $PY.norm/PNP.norm$ 54
Şekil 33. Gerçekçi ve kontrol modelleri için yarıçapa bağlı NP emilim oranı ($\%PNP.norm$) 55
Şekil 34. Gerçekçi ve kontrol modelleri için yarıçapa bağlı NP iletim oranı ($\%P\dot{I}.norm$) 56

Şekil 35. Gerçekçi ve kontrol modelleri için yarıçapa bağlı NP yansıma oranı ($\%PY.norm$) 57
Şekil 36. Gerçekçi ve kontrol modelleri için yarıçapa bağlı yakın alan emilim oranı ($\%PYA.norm$) 58
Şekil 37. Gerçekçi model için yarıçapa bağlı $PYA.norm$ / $PNP.norm$ ve $PY.norm/PNP.norm$ 59
Şekil 38. Gerçekçi ve kontrol modelleri için boyutlara bağlı NP emilim oranı ($\%PNP.norm$) 60
Şekil 39. Gerçekçi ve kontrol modelleri için boyutlara bağlı NP iletim oranı ($\%P\text{İ}.norm$) 61
Şekil 40. Gerçekçi ve kontrol modelleri için boyutlara bağlı NP yansıma oranı ($\%PY.norm$) 61
Şekil 41. Gerçekçi ve kontrol modelleri için boyutlara bağlı yakın alan emilim oranı ($\%PYA.norm$) 62
Şekil 42. Gerçekçi model için boyutlara bağlı $PYA.norm$ / $PNP.norm$ ve $PY.norm/PNP.norm$ 63
Şekil 43. Gerçekçi ve kontrol modelleri için nyi ve knp 65
Şekil 44. Gerçekçi ve kontrol modelleri için nyi'ye bağlı rezonans ifadesi 65
Şekil 45. Gerçekçi ve kontrol modelleri için nyi'ye bağlı olarak NP'lere ulaşan güç oranı ($\%PU$) 66
Şekil 46. Gerçekçi ve kontrol modelleri için nyi 'ye bağlı NP emilim oranı ($\%PNP.norm$) 67
Şekil 47. nyi katsayısı K'nın 0.8 ve 1.2 olduğu durumlar için rezonans frekansında normalize elektrik alanlar 68
Şekil 48. Gerçekçi ve kontrol modelleri için nyi 'ye bağlı NP iletim oranı ($\%P\text{İ}.norm$) 68
Şekil 49. Gerçekçi ve kontrol modelleri için nyi 'ye bağlı NP yansıma oranı ($\%PY.norm$) 69
Şekil 50. Gerçekçi ve kontrol modelleri için nyi'ye bağlı yakın alan emilim oranı ($\%PYA.norm$) 70
Şekil 51. Gerçekçi model için nyi 'ye bağlı $PYA.norm$ / $PNP.norm$ ve $PY.norm/PNP.norm$ 70

Şekil 52. Kontrol modeli için nyi 'ye bağlı $PYA.norm$ / $PNP.norm$ ve $PY.norm/PNP.norm$ 71
Şekil 53. Gerçekçi ve kontrol modelleri için kyi ve nnp 72
Şekil 54. Gerçekçi ve kontrol modelleri için kyi'ye bağlı rezonans ifadesi 73
Şekil 55. Gerçekçi ve kontrol modelleri için kyi'ye bağlı olarak NP'lere ulaşan güç oranı ($\%PU$) 73
Şekil 56. Gerçekçi ve kontrol modelleri için kyi 'ye bağlı NP emilim oranı ($\%PNP.norm$) 74
Şekil 57. Gerçekçi ve kontrol modelleri için kyi 'ye bağlı NP iletim oranı ($\%P\dot{I}.norm$) 75
Şekil 58. Gerçekçi ve kontrol modelleri için kyi 'ye bağlı NP yansıma oranı ($\%PY.norm$) 75
Şekil 59. Gerçekçi ve kontrol modelleri için kyi'ye bağlı yakın alan emilim oranı ($\%PYA.norm$) 76
Şekil 60. Gerçekçi ve kontrol modelleri için knp ve nyi 77
Şekil 61. Gerçekçi ve kontrol modelleri için knp'ye bağlı rezonans ifadesi 78
Şekil 62. Gerçekçi ve kontrol modelleri için knp 'ye bağlı NP emilim oranı ($\%PNP.norm$) 78
Şekil 63. knp katsayısı K'nın 0.8 ve 1.2 olduğu durumlar için rezonans frekansında normalize elektrik alanlar 79
Şekil 64. Gerçekçi ve kontrol modelleri için knp 'ye bağlı NP iletim oranı ($\%P\dot{I}.norm$) 80
Şekil 65. Gerçekçi ve kontrol modelleri için knp 'ye bağlı NP yansıma oranı ($\%PY.norm$) 80
Şekil 66. Gerçekçi ve kontrol modelleri için knp'ye bağlı yakın alan emilim oranı ($\%PYA.norm$) 81
Şekil 67. Gerçekçi model için knp 'ye bağlı $PYA.norm$ / $PNP.norm$ ve $PY.norm/PNP.norm$ 82
Şekil 68. Kontrol modeli için knp 'ye bağlı $PYA.norm$ / $PNP.norm$ ve $PY.norm/PNP.norm$ 83
Şekil 69. Gerçekçi ve kontrol modelleri için nnp ve kyi 84
Şekil 70. Gerçekçi ve kontrol modelleri için nnp'ye bağlı rezonans ifadesi 84

Şekil 71. Gerçekçi ve kontrol modelleri için nnp 'ye bağlı NP emilim oranı ($\%PNP.norm$) 85
Şekil 72. nnp katsayısı K'nın 1 ve 3 olduğu durumlar için rezonans frekansında normalize elektrik alanlar 86
Şekil 73. Gerçekçi ve kontrol modelleri için nnp 'ye bağlı NP iletim oranı ($\%P\dot{I}.norm$) 86
Şekil 74. Gerçekçi ve kontrol modelleri için nnp 'ye bağlı NP yansıma oranı ($\%PY.norm$) 87
Şekil 75. Gerçekçi ve kontrol modelleri için nnp'ye bağlı yakın alan emilim oranı ($\%PYA.norm$) 87
Şekil 76. Gerçekçi model için nnp 'ye bağlı $PYA.norm$ / $PNP.norm$ ve $PY.norm/PNP.norm$ 88
Şekil 77. Çekirdek-kabuk yapısı 89
Şekil 78. Gerçekçi ve kontrol modelleri için kabuk kalınlığına bağlı NP emilim oranı ($\%PNP.norm$) 90
Şekil 79. Gerçekçi ve kontrol modelleri için kabuk kalınlığına bağlı NP iletim oranı ($\%P\dot{I}.norm$) 91
Şekil 80. Gerçekçi ve kontrol modelleri için kabuk kalınlığına bağlı NP yansıma oranı ($\%PY.norm$) 91
Şekil 81. Gerçekçi ve kontrol modelleri için kabuk kalınlığına bağlı yakın alan emilim oranı ($\%PYA.norm$) 92
Şekil 82. Gerçekçi model için kalınlığa bağlı $PYA.norm$ / $PNP.norm$ ve $PY.norm/PNP.norm$ 93
Şekil 83. Gerçekçi ve kontrol modelleri için nk 'ya bağlı NP emilim oranı ($\%PNP.norm$) 94
Şekil 84. Gerçekçi ve kontrol modelleri için nk 'ya bağlı NP iletim oranı ($\%P\dot{I}.norm$) 94
Şekil 85. Gerçekçi ve kontrol modelleri için nk 'ya bağlı NP yansıma oranı ($\%PY.norm$) 95
Şekil 86. Gerçekçi ve kontrol modelleri için nk'ya bağlı yakın alan emilim oranı ($\%PYA.norm$) 96
Şekil 87. Gerçekçi model için nk 'ya bağlı $PYA.norm$ / $PNP.norm$ ve $PY.norm/PNP.norm$ 96

Şekil 88. Kare dizilimin A ve B yönelimleri 97
Şekil 89. Altıgen dizilimin A ve B yönelimleri 98
Şekil 90. Kare ve altıgen dizilimlerin temsili gösterimi 98
Şekil 91. Kare dizilimin A ve B yönelimleri için NP emilim oranı ($\%PNP.norm$) 99
Şekil 92. Altıgen dizilimin A ve B yönelimleri için NP emilim oranı ($\%PNP.norm$) 99
Şekil 93. Kare dizilimin A ve B yönelimleri için NP iletim oranı ($\%P\dot{I}.norm$)..... 100
Şekil 94. Altıgen dizilimin A ve B yönelimleri için NP iletim oranı ($\%P\dot{I}.norm$) 100
Şekil 95. Kare dizilimin A ve B yönelimleri için NP yansıma oranı ($\%PY.norm$) ... 101
Şekil 96. Altıgen dizilimin A ve B yönelimleri için NP yansıma oranı ($\%PY.norm$) 101
Şekil 97. Kare dizilimin A ve B yönelimleri için yakın alan emilim oranı ($\%PYA.norm$)..... 102
Şekil 98. Altıgen dizilimin A ve B yönelimleri için yakın alan emilim oranı ($\%PYA.norm$)..... 102
Şekil 99. Hava-Si Modeli..... 103
Şekil 100. Si-Hava Modeli..... 104
Şekil 101. Hava-Si ve Si-Hava modelleri için NP'lere ulaşan güç oranı ($\%PU$) 105
Şekil 102. Hava-Si ve Si-Hava modelleri için NP emilim oranı ($\%PNP.norm$) 106
Şekil 103. Hava-Si ve Si-Hava modelleri için NP iletim oranı ($\%P\dot{I}.norm$) 106
Şekil 104. Hava-Si ve Si-Hava modelleri için NP yansıma oranı ($\%PY.norm$) 107
Şekil 105. Hava-Si ve Si-Hava modelleri için yakın alan emilim oranı ($\%PYA.norm$)..... 108
Şekil 106. Küre ve yarıküre NP şekilleri 109
Şekil 107. Küre NP için NP emilim oranı ($\%PNP.norm$) 109
Şekil 108. Düz Yarıküre NP için NP emilim oranı ($\%PNP.norm$) 110
Şekil 109. Ters Yarıküre NP için NP emilim oranı ($\%PNP.norm$) 110
Şekil 110. Küre NP için NP iletim oranı ($\%P\dot{I}.norm$)..... 110
Şekil 111. Düz Yarıküre NP için NP iletim oranı ($\%P\dot{I}.norm$)..... 111
Şekil 112. Ters Yarıküre NP için NP iletim oranı ($\%P\dot{I}.norm$) 111
Şekil 113. Küre NP için NP yansıma oranı ($\%PY.norm$) 111
Şekil 114. Düz Yarıküre NP için NP yansıma oranı ($\%PY.norm$) 111
Şekil 115. Ters Yarıküre NP için NP yansıma oranı ($\%PY.norm$) 112
Şekil 116. Küre NP için yakın alan emilim oranı ($\%PYA.norm$) 112

Şekil 117. Düz Yarıküre NP için yakın alan emilim oranı ($\%PYA.norm$) 112
Şekil 118. Ters Yarıküre NP için yakın alan emilim oranı ($\%PYA.norm$).....112
Şekil 119. NP eklenmiş güneş hücresi yapısı.....115
Şekil 120. NP'nin tükenim bölgesindeki derinliğine göre yarı iletken emilim oranı ...118
Şekil 121. NP_1 için yarı iletken kalınlığına göre hücre karakteristikleri.....118
Şekil 122. NP_2 için yarı iletken kalınlığına göre hücre karakteristikleri.....118
Şekil 123. İdeal Ayna için yarı iletken kalınlığına göre hücre karakteristikleri 119
Şekil 124. NP_1 ile yarı iletken kalınlığına göre hücre emilimindeki artış oranı.....119
Şekil 125. NP_2 ile yarı iletken kalınlığına göre hücre emilimindeki artış oranı.....119
Şekil 126. İdeal Ayna ile yarı iletken kalınlığına göre hücre emilimindeki artış oranı 120
Şekil 127. Çok eklemli güneş hücresi yapısı [55].....123
Şekil 128. NP eklenmiş çok eklemli güneş hücresi yapısı.....124
Şekil 129. 500 nm ışık için kalınlığa göre NP'li ve NP'siz 1. katman verimi 129
Şekil 130. 500 nm ışık için kalınlığa göre NP'li ve NP'siz 2. katman verimi 129
Şekil 131. 1045 nm ışık için kalınlığa göre NP'li ve NP'siz 2. katman verimi 130
Şekil 132. Kalınlığa göre NP'li ve NP'siz toplam hücre verimi.....130
Şekil 133. Kalınlığa göre NP'li ve NP'siz toplam hücre verimleri oranı 131
Şekil 134. Plazmonik güneş hücresinde mikro yapılar 133

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. Kontrol modeli için belirlenen kırılma indisleri 30
Çizelge 2. NP_1 dizisinin karakteristik parametreleri 116
Çizelge 3. NP_2 dizisinin karakteristik parametreleri 116
Çizelge 4. Al NP dizisinin karakteristik parametreleri 126
Çizelge 5. Cu NP dizisinin karakteristik parametreleri 127
Çizelge 6. İki eklemli (GaInP, Ge) NP'li (Al, Cu) ve NP'siz hücrelerin karşılaştırması 131

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	Kesit Alanı
c	Işığın Havadaki Yayılma Hızı
E	Enerji
$\boldsymbol{E}$	Elektrik Alan Vektörü
h	Planck Sabiti
n	Gerçek Kırılma İndisi
n_r	Rezonans Mertebesi
k	Sanal Kırılma İndisi
k_d	Dalga Sayısı
L_d	Difüzyon Uzunluğu
p	Elektrik Dipol Momenti
P	Güç
R	Yarıçap
x	Uzunluk
ε	Elektriksel Geçirgenlik
η	Verim
λ	Dalga Boyu
φ	Elektriksel Potansiyel

Kısaltmalar

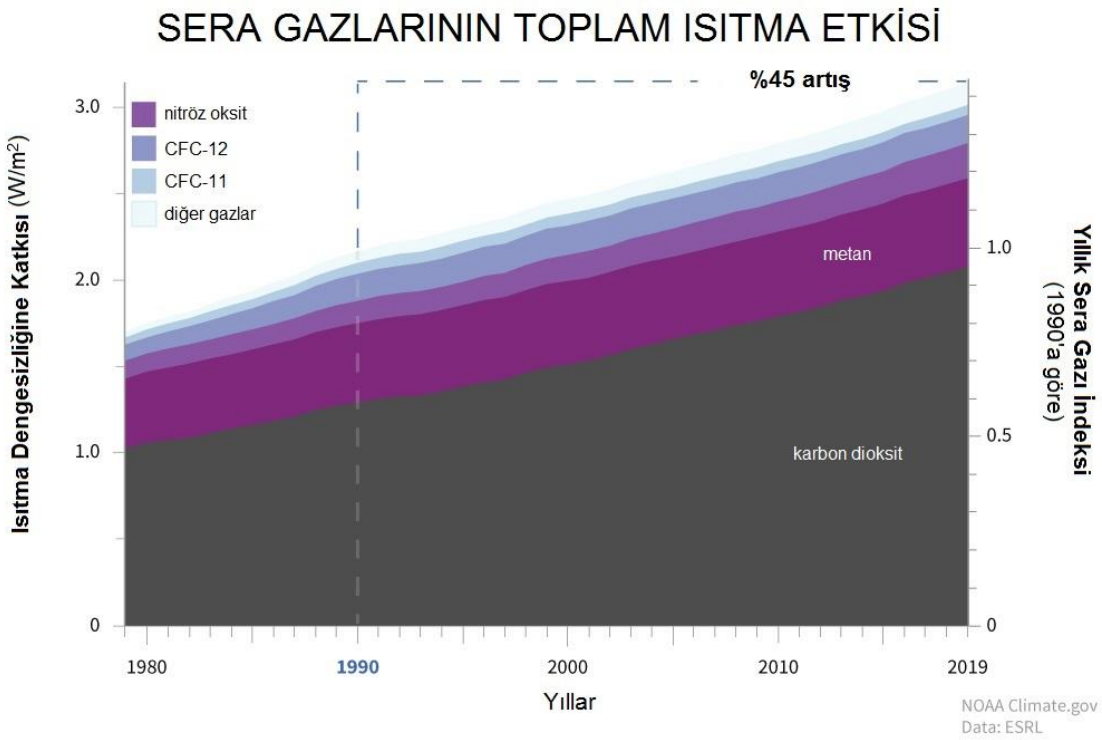
Ag	Gümüş
Au	Altın
DKV	Dahili Kuantum Verim
DO	Doluluk oranı
GaInP	İndiyum Galyum Fosfit
Ge	Germanyum
HKV	Harici Kuantum Verim
NP	Nanoparçacık
Si	Silisyum
W	Watt
YA	Yakın Alan
YPP	Yüzey Plazmon Polaritonu
YYP	Yerelleştirilmiş Yüzey Plazmonu

1. GİRİŞ

Enerji ve enerjinin verimli yönetimi insanlığı ilgilendiren en önemli konulardan biridir. Ev ve iş yerlerimize elektrik sağlayan enerji santrallerinden, kullandığımız makine ve araçlara kadar hayatımızın her alanında enerjiye ihtiyaç duymaktayız. Fakat mevcut enerji üretim sistemlerinin çoğu yenilenemez, sınırlı ve çevreye zararlı ham maddeler kullanmaktadır. Bu sebeple yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisinin kullanılabilir elektrik enerjisine dönüşümünü sağlayan güneş hücrelerinin verim ve maliyetlerinin iyileştirilmesi büyük önem teşkil etmektedir. Bu kapsamda, bu tez çalışmasında yer verilen plazmonik nanoparçacıkların optik özellikleri ve güneş hücrelerinde kullanımları üzerine yapılan araştırmalar umut vericidir.

İnsanların doğal kaynakları tüketmesinin sürdürülemez hale geldiği ve küresel ısınmanın insan temelli kirliliğin bir sonucu olduğu her geçen gün daha açık hale gelmektedir [1]. Fosil yakıtların yoğun kullanımı sera etkisinin artmasına sebep olmaktadır. Sera etkisi, atmosferde bulunan çeşitli gazların gelen güneş ışığının geçmesine izin vererek Dünya’nın yüzeyinden geri yayılan ısıyı soğurması ve güneş enerjisini hapsetmesidir [2].

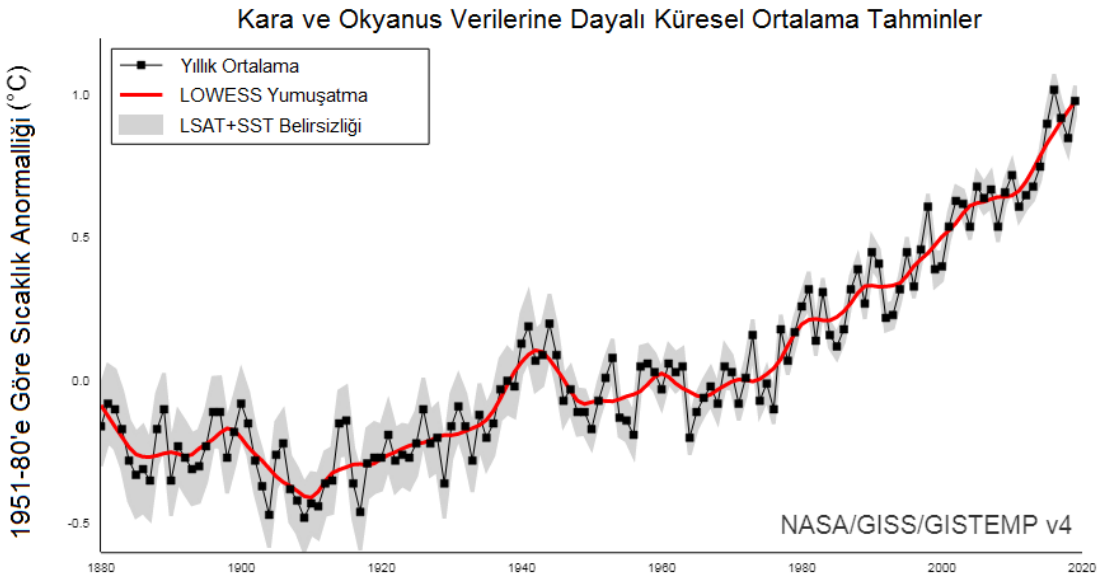
Dünya’nın sıcaklığı, Güneş'ten gelen radyasyon ile Dünya tarafından uzaya geri yayılan enerji arasında kurulan dengenin bir sonucudur. Dünya tarafından yayılan radyasyon, atmosferin varlığından ve bileşiminden büyük ölçüde etkilenir. Artan enerji üretim ve tüketimi, atmosfere giderek artan bir şekilde, 7-13 μm dalga boyu aralığında emilim yapan çeşitli gazların salınmasına yol açmaktadır [3]. Bu gazlar, Dünya’dan normal enerji kaçışını azaltır ve karasal sıcaklıkta artışa neden olur [2]. Bu da rüzgar düzenlerinde ve yağışlarda değişikliklere yol açarak kıtaların iç kısımlarında kuraklığa ve okyanusların yükselmesine neden olur.



Şekil 1. Sera gazlarının toplam ısıtma etkisi. Grafik, NOAA Climate.gov tarafından NOAA ESRL verilerine dayanarak hazırlanmıştır [4].

Şekil 1, 1750 yılına göre metrekare başına Watt (W) cinsinden, insan kaynaklı başlıca sera gazlarının neden olduğu ısınma dengesizliğini göstermektedir. Bunlar karbondioksit, metan, ozon, azot oksit ve kloroflorokarbonlar gibi sera etkisine yol açan gazlardır. Günümüzde atmosfer, Dünya yüzeyinin her metrekaresinde 1750 yılına göre yaklaşık 3 Watt (W) daha fazla güneş enerjisi soğurmaktadır. Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesinin (NOAA) Yıllık Sera Gazı Endeksine (sağ eksen) göre, tüm ana sera gazlarının toplam ısıtma etkisi 1990'a göre %43 artmıştır [4].

Şekil 2, 1880'den günümüze, 1951-1980 dönemi baz alınarak hazırlanmış kara-okyanus sıcaklık endeksidir. Siyah çizgi küresel yıllık ortalamayı, kırmızı çizgi ise beş yıllık yerel ağırlıklı dağılım grafiği düzeltmesini (*İng.* locally weighted scatterplot smoothing -LOWESS) göstermektedir. Gri gölgeleme, %95 güven aralığında toplam yer yüzeyi hava sıcaklığı (*İng.* land surface air temperature-LSAT) ve deniz yüzeyi sıcaklığı (*İng.* sea surface temperature-SST) yıllık belirsizliğini temsil eder [5].



Şekil 2. Kara ve okyanus verilerine dayalı küresel yıllık ortalama yüzey sıcaklığı değişimi. Sıcaklığın yükselmeye devam ettiği görülmektedir [5]. Daha fazla bilgi için [6].

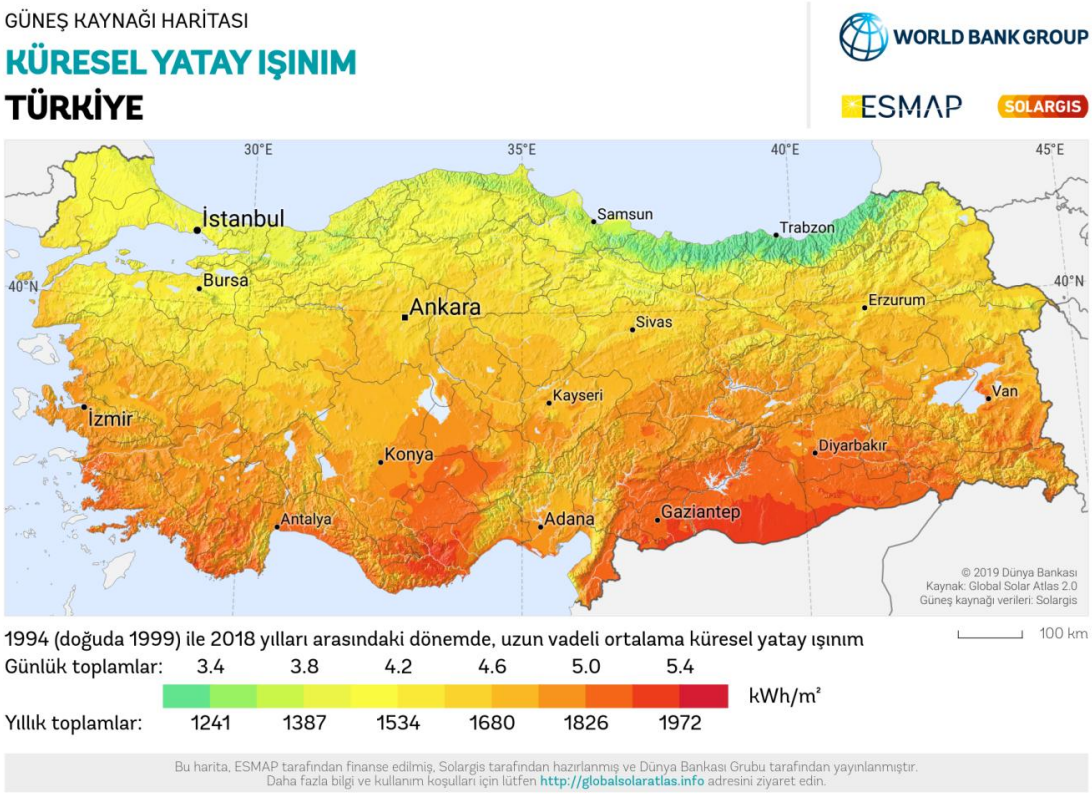
Şekil 1 ve Şekil 2'de görüldüğü üzere artan enerji üretim ve tüketimi artık gezegeni etkileyecek bir düzeye ulaşmıştır. Bu faaliyetlerin yan etkileri son derece yıkıcı olabilecek düzeydedir ve bu sebeple düşük çevresel etkiye sahip, sera gazı emisyonu olmayan teknolojilere olan ilginin giderek artması muhtemeldir [7]. Enerji sektörü fosil yakıtların yakılması yoluyla ortaya çıkan sera gazlarının en büyük üreticisi olduğu için, fosil yakıtların yerini alabilecek yenilenebilir enerji kaynaklarının artan talep ile birlikte giderek daha fazla kullanılması gerekecektir [8].

Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş, rüzgar, hidroelektrik, gelgit, biyoenerji ve jeotermal gibi bir dizi alternatif enerji üretim yöntemi kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları sınırsız olma, yaygın olarak bulunma ve nispeten ucuz olma gibi büyük avantajlara sahiptirler. Dahası, karbondioksit ve diğer kimyasal atıkları çok az seviyede üretirler, böylece çevreye asgari düzeyde zarar verirler. Bu yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi önemli bir rol oynamaktadır ve güneş hücrelerinin verimliliğini arttırmak için yoğun çaba ve araştırmalar yapılmaktadır [9].

Uygulanabilirlik adına, alternatif enerji kaynaklarının hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirlik ve tam erişilebilirlik gibi kriterleri karşılamaları gerekmektedir. Rüzgar, nükleer enerji, biyokütle ve hidroelektrik gibi alternatif kaynakların gelecekte

kullanımında sorun oluşturan bazı unsurlar bulunmaktadır. Örneğin, rüzgar enerjisi her yerde üretilememekte ve belirli çevre koşulları gerektirmektedir. Nükleer enerji, aşırı radyoaktif atık üretmesi nedeniyle çevreye zararlıdır. Öte yandan, güneş enerjisi, bu yönlerden herhangi bir engel teşkil etmemektedir. Tersine, bol bulunan ve çevreye zararsız yenilenebilir bir enerji kaynağıdır [10].

Türkiye, güneş enerjisi bakımından zengin bir ülkedir. Şekil 3, Türkiye için küresel yatay ışınım haritasıdır ve Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelini göstermektedir. Bu harita, enerji üretimi ve diğer enerji uygulamaları için, mevcut olan tahmini güneş enerjisinin bir özetidir. Küresel yatay ışınımın günlük ve yıllık toplamlarının uzun vadeli ortalamasını temsil eder. Bu güneş enerjisi veritabanı, Solargis modeli ile 15 ve 30 dakikalık zaman aralıklarıyla atmosfer ve uydu verilerinden hesaplanmıştır. Arazinin etkileri, 250 metrelik nominal uzaysal çözünürlükte ele alınmıştır. Küresel yatay ışınım, fotovoltaik teknolojilerinin enerji verimi hesaplaması ve performans değerlendirmesinde kullanılan önemli bir parametredir [11].



Şekil 3. Türkiye için küresel yatay ışınım haritası [11].

Güneş enerjisini toplamak için kullanılan teknolojilere örnek olarak güneş hücresi, termal güneş kollektörü ve güneş yakıtı verilebilir [12]. Bunlardan güneş hücresi, güneş enerjisinden yararlanmanın basit ve zarif bir yöntemi olan fotovoltaik etki ile çalışır.

Işık enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik cihazlar yaygın kullanım alanlarına sahiptir. Günümüzde, fotovoltaik cihazlar geleneksel fosil yakıtlı elektrik üretimine kıyasla hızla büyüyen ve önemi giderek artan yenilenebilir bir alternatiftir. Fotovoltaikler öncelikle şebekeden bağımsız olarak güç üretim alanındaki uygulamalarda ve küçük ölçekli taşınabilir uygulamalarda (hesap makineleri ve saatler gibi) kullanılmaya başlanmıştır. 1980'lerde silisyum (Si) güneş hücrelerine yönelik araştırmalar ile güneş hücrelerinin verimi artmaya başlamıştır. 1985 yılında silisyum güneş hücreleri %20 verim ile bir kilometre taşına ulaşmıştır [13]. Süregelen araştırmalar bu cihazların her geçen gün daha maliyet etkin olmalarını sağlamıştır. Şekil 4'te güneş hücrelerinin seri olarak bağlanmasıyla oluşturulan bir güneş paneli örneği görülmektedir.

Şekil 4. NREL'de kurulu Panasonic güneş paneli [14].

Fotovoltaik cihazlar aynı zamanda, gelen güneş radyasyonunu sessiz, çevreyi kirletmeden, sürdürülebilir, düşük bakım maliyetli bir şekilde doğrudan elektriğe dönüştürmeleri bakımından benzersizdirler [15]. Bu da onları sağlam, güvenilir ve uzun ömürlü kılmaktadır. Bu özellikler küresel fotovoltaik pazarının her geçen yıl daha da büyümesine katkı sağlamaktadır. Fotovoltaikler için artan pazar ve profil, daha önce hiç olmadığı kadar geniş uygulama alanlarında kullanıldıkları anlamına gelmektedir. Bu uygulamalar, birkaç megavatlık (MW) güç istasyonlarından her yerde bulunan güneş enerjili hesap makinelerine kadar uzanmaktadır. Günümüzde güneş hücreleri, şebekeye erişimi olmayanlara güç sağlayarak yaşam kalitelerini arttırmanın yanı sıra gelişmiş,

sanayileşmiş ülkelerde geleneksel elektrik üretiminin neden olduğu çevresel zararın etkisini önemli ölçüde azaltan bir araç olarak da kullanılmaktadır.

Güneş enerjisinin verimli bir şekilde dönüştürülmesine olan yüksek talep, güneş hücresi tasarımını iyileştirmek için birçok yöntemi ortaya çıkarmış [16], bu da farklı üretim türleri ve optimizasyon yöntemlerine sahip çeşitli güneş hücresi yapılarının tasarlanmasını sağlamıştır. Son geliştirilen güneş hücresi teknolojileri ve tasarımlarının uygulanmasına olumsuz etki eden başlıca faktörler; maliyetleri, hala genel olarak düşük olan tek eklem güneş hücresi verimliliği ve buna ek olarak da yeni geliştirilen teknolojiler için yetersiz olan seri üretim yöntemleridir.

Güneş hücresi içerisinde, foton tarafından uyarılarak ayrışan yük taşıyıcılarının toplanmasıyla harici bir devreye enerji aktarımı yapılabilmektedir [15]. Yarı iletken güneş hücrelerinde verimi arttırmak adına yıllar içerisinde değişik yöntemlerle yük taşıyıcıları oluşumundaki kayıplar azaltılmış, ışık tutucu yapılar geliştirilmiş ve farklı frekans aralıklarında daha verimli yük taşıyıcıları oluşturmak adına çok eklemli yapılar geliştirilmiştir.

Güneş hücreleri kullandıkları teknolojilere göre üç farklı nesil arasında sınıflandırılırlar.

Birinci nesil hücreler ticari olarak baskın fotovoltaik teknolojisi olan kristalin silisyum çeşitlerinden yapılmıştır. Birinci nesil güneş hücrelerinde kullanılan yarı iletkenlerin foton emilimlerinin düşük olması sebebiyle kalın bir yapıya sahiplerdir. Fakat bu kalın yapı yük taşıyıcılarının rekombinasyonunu kolaylaştırmakta ve oluşan açık devre gerilimini düşürmektedir.

İkinci nesil güneş hücreleri genellikle ince film güneş hücreleri olarak adlandırılır, çünkü birinci nesil kristalin silisyum esaslı hücrelerle karşılaştırıldığında çok daha ince olan birkaç mikrometre kalınlığındaki yarı iletken katmanlarından yapılırlar [17]. İnce film teknolojisiyle üretilen güneş hücrelerinde düşük yük taşıyıcısı rekombinasyonu ile açık devre gerilimi yüksek tutulmakla birlikte değişik ışık tutucu yapılar kullanılmakta ve böylece emilim dolayısıyla da kısa devre akımı da arttırılmaktadır. İnce film teknolojisiyle üretilen güneş hücreleri aynı zamanda daha az malzeme kullandığından daha hafif bir yapıya sahiptirler. Daha az malzeme kullanma ve daha düşük maliyetli üretim süreçlerinin birleşimi, bu teknolojiden yararlanan güneş paneli üreticilerinin çok daha düşük maliyetle panel üretip satmasına olanak tanır.

Üçüncü nesil güneş hücreleri ile de nadir elementlerin kullanımından kaçınılmaya çalışılmaktadır [18]. Bu güneş hücreleri, birçoğu hala araştırma ve geliştirme aşamasında olan çeşitli ince film teknolojilerini kullanırlar. Bunlar, inorganik materyallerin yanında çoğunlukla organometalik bileşikler olan organik malzemeler kullanmaktadır. Kullanılan bazı ışık emici malzemelerin kararlılığının ticari uygulamalar için kısa olmasına rağmen, yüksek verimli ve düşük maliyetli üretim hedefine ulaşmayı vaat ettikleri için bu teknolojiler üzerine yapılan çok sayıda araştırma vardır. Amaç, güneş enerjisi dönüşümünü daha geniş bir ışık spektrumunda (örneğin kızılötesi dahil) daha verimli ve ucuz hale getirerek, daha fazla insan tarafından kullanılabilmesini sağlamak ve çeşitli kullanım alanları geliştirerek halihazırda piyasada bulunan güneş hücrelerini iyileştirmektir.

Günümüzde, küresel fotovoltaik güneş hücresi pazarının %90'ından fazlasını, kristalin Si bazlı güneş hücreleri oluşturur. Farklı güneş hücresi teknolojilerinden ince kadmiyum tellürid (CdTe) filmleri, amorf silisyum (a-Si: H), mikrokristalin silisyum (μc-Si: H) ve bakır indiyum galyum selenid (CIGS) gibi diğer teknolojiler ise küresel pazarın %10'undan daha azı olsa da bu pazar payı hızla büyümektedir fakat güneş hücrelerini etkileyen genel sorunlardan bu teknolojiler de etkilenmektedirler [19].

Işık yönetimi, yüksek verimli güneş hücreleri inşa etmek için kritik öneme sahiptir. Optik kayıplar ikinci ve üçüncü nesil hücrelerdeki en önemli sorunlardan biridir. İnce film güneş hücreleri, aktif malzeme kullanımını en aza indirerek fotovoltaik üretim maliyetini büyük oranda düşürmektedirler. Fakat yansıma kayıpları, düşük emilim katsayısı ve yetersiz aktif katman kalınlığı nedeniyle düşen ışık emilimi, bu hücrelerin performansını sınırlar. İnce film güneş hücrelerinde ışık hapsetme teknikleri kullanılarak elektrik akımına dönüştürülebilen ışığın emiliminin arttırılması, genel verimliliği arttırmak ve maliyeti düşürmek için çok önemlidir [19]. Bu yapılar, yansıma azaltıcı özellik göstermekle birlikte aynı zamanda güneş ışığını aktif materyal içerisine hapsetmekte ve ışığın burada çok sayıda geçiş yaparak optik yol uzunluğunun artmasını da sağlamaktadır. Böylece optik kalınlık, aktif katmanın fiziksel kalınlığını arttırmaya gerek duymadan birkaç kat arttırılabilir. Optik emilimin arttırılması, kısa devre akımını da arttırır ve böylece güneş hücresi verimi de arttırılmış olur [20].

Si, %30'dan fazla olan bir yüzey yansıması oranına sahiptir. Bu yüzey yansımasını azaltmak ve yansıyan ışığın aktif katmana geri dönme şansını arttırmak için kullanılan

bazı ışık hapsetme teknikleri panel yüzeyinde yansıma önleyici kaplama, yüksek oranda yansıtıcı arka reflektör, ön ve arka yüzey dokuları gibi yapılardır.

Hücre yüzeylerinin kaplanması ile ışık emilim oranında artış sağlanmaktadır [21]. Yansıma önleyici ön yüzey kaplaması gelen ışığın yansımadan hücre içerisine geçişini sağlar. Bu kaplama çeşitli malzeme ve yapılardan oluşmaktadır. Arka reflektör kaplaması için gümüş gibi yansıtıcı yüzeyler kullanılmaktadır ve büyük ölçekli üretimlerde maliyet etkin olması sebebiyle genelde beyaz boya tercih edilir. Bu kaplama hücre içerisinden emilmeden geçen ışığı geri hücre içerisine yansıtarak hapsedilmesini sağlar.

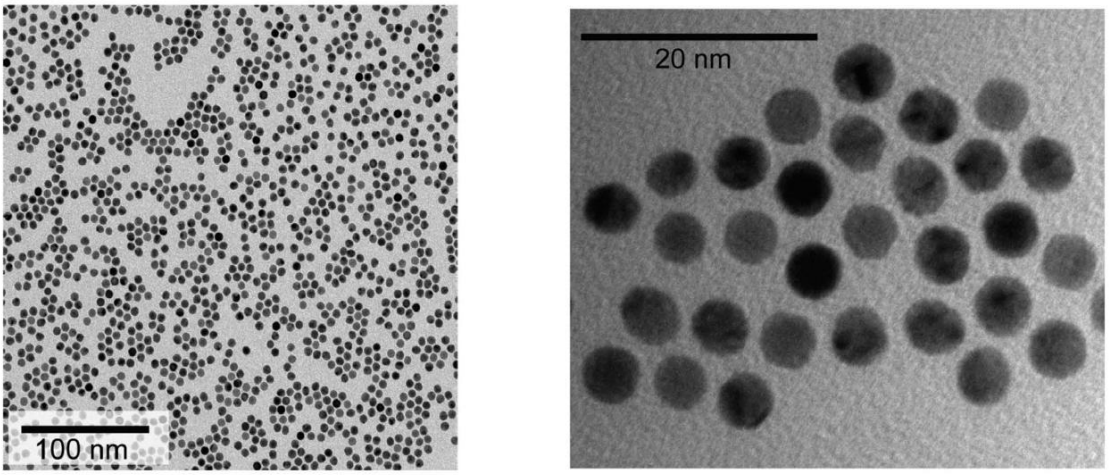
Işığı hücre içerisinde hapsetmek için kullanılan başka bir yöntem olan yüzey dokuları ince filmlerin üretimi sırasında oluşturulabilir. Bu dokular, ışığın güneş hücresine geniş açı ile dağılmasına ve çoklu yansımalar yapmasına neden olarak hücre içerisinde ışığın katettiği etkili optik yol uzunluğunu da arttırır. Endüstride en yaygın olarak kullanılan çözümler yüzeye yansıma önleyici kaplamalar uygulamak ve tipik olarak 3–10 μm boyutunda olan dikey [22] ve ters piramit yapısı [23] veya rastgele dokular [24] kullanmaktır.

Yüzey dokuları ticari güneş hücrelerinde yaygın olarak uygulanmış ve etkinlikleri kanıtlanmış olsa da, birkaç dezavantaja da sahiptirler. Dokulu yüzeyler güneş hücrelerinin yüzey alanını arttırarak yüzey rekombinasyonunun artmasına ve dolayısıyla güneş hücresi performansının düşmesine neden olabilmektedirler. Bu tür mikron ölçekli yapılar derin dağlama gerektirir ve malzemede kusurlara yol açabilmektedirler [25]. Aynı zamanda, güneş hücrelerinin maliyetini düşürmek için en etkili stratejilerden biri olarak tanımlanan ve sadece birkaç mikron hatta birkaç yüz nanometre kalınlığında olabilen ultra ince güneş hücrelerinde ışık yönetimi için uygun değildirler.

Yeni geliştirilen nanometre boyutlarındaki ışık hapsetme teknikleri, yüksek verimlilik ve düşük maliyet sağlayacak olan ince film güneş hücrelerinin geliştirilmesi için çok önemlidir. Bu sebeple, özellikle nanoparçacık ve nano yapılar aracılığıyla, daha verimli ışık hapsetme ve yoğunlaştırma üzerine yeni yollar araştırılmaktadır.

Plazmonik nanoparçacık (NP) ve nano yapıların kullanımındaki amaç, özellikle yüksek verimli güneş hücreleri için plazmon uyarımı ile ışık emilim ve saçılım özelliklerinden faydalanmaktır. Plazmonik nanoparçacık ve nano yapılar, ışık manipülasyonu özelliklerinden yararlanılarak hücrenin verimliliğini önemli ölçüde arttırma

potansiyelleri nedeniyle büyük ilgi görmüştür [26]. Şekil 5'te önemli seviyede plazmon uyarımı özellikleri gösteren küre şeklindeki altın nanoparçacıkların geçirimli elektron mikroskobu (*İng.* transmission electron microscopy-TEM) kullanılarak elde edilen görüntüleri yer almaktadır.

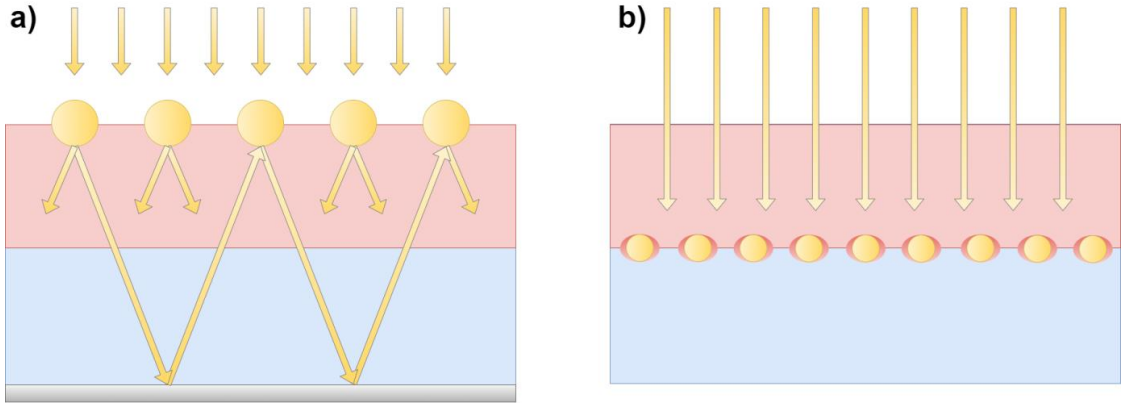


Şekil 5. Küre altın nanoparçacıkların 100 nm ve 20 nm ölçülerde TEM görüntüleri [27].

Plazmonik nanoparçacıklar, etkileştikleri ışığın dalga boyundan çok daha küçük olan ve üzerlerine düşen fotonların nanoparçacık elektronları ile etkileşmesi sonucu yüzeylerinde plazmon salınımı yapan yapılardır. Plazmon, etkileşimde bulunan plazma salınımının kuantumuna yani en küçük miktarına verilen addır ve topluca yüksek enerjili elektron yoğunluğunun salınımını temsil etmektedirler [28]. Işık ile etkileşen elektronların salınımı rezonans frekansı denilen frekansta en yüksek düzeye ulaşır.

Nanoparçacıklar, güneş ışığının en yoğun bulunduğu optik dalga boylarından daha küçük olan nanometre boyutlarındaki parçacıklardır. Nanoparçacığın küçük boyutu nedeniyle ışığın elektrik alanı, metal nanoparçacıktaki elektronların yer değiştirmesine sebep olur ve bu da ters yönlü bir tepki alanı oluşturur. Böylece, güneş enerjisinin emilmesi veya saçılmasıyla sonuçlanan bir salınım ortaya çıkar [29]. Bu etki, yerelleştirilmiş yüzey plazmon (YYP) rezonansı olarak adlandırılır. Bu rezonansları destekleyen metal nanoparçacıklar, metaldeki serbest elektronların toplu salınımı nedeniyle hem uzak alan saçılımı yaparlar hem de yakın alanda ışığın yoğunlaştırılmasını sağlarlar [28]. Rezonans genliği ve dalga boyu, NP ve onu çevreleyen malzemenin özelliklerine bağlıdır. Plazmonik rezonans, "2. PLAZMONİK NANOPARÇACIKLAR" bölümünde ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Plazmonik nanoparçacıklar, boyut, şekil, materyal ve dağılımlarının optimize edilmesiyle rezonans dalga boylarında elektromanyetik alanı hücrenin aktif bölgesine dağıtarak ve yoğunlaştırarak hücre veriminde önemli bir kazanç sağlayabilirler [30].



Şekil 6. İnce film P-N eklem güneş hücreleri için plazmonik NP'lar ile ışık hapsetme teknikleri. a) Güneş hücresi üst yüzeyine eklenen NP'ler ile ışık saçılımı, b) güneş hücresi içerisine gömülü NP'ler ile yakın alan bölgesinde emilim. [26]

Güneş hücrelerini geliştirmek adına plazmonik alanında birçok teorik ve deneysel çalışma yapılmıştır [31][32]. Yüzey plazmonik etkilerini kullanarak güneş hücrelerinde ışık hapsetme kapasitesini arttırmak için farklı teknikler vardır. Şekil 6'da bu tekniklerden bazıları görülmektedir. Bu teknikler fotovoltaik yarı iletken aktif bölgesinin optik kalınlığını arttırırken fiziksel kalınlığının yüksek oranda düşürülmesine katkı sağlar.

Kullanılan NP boyutlarını da etkileyen bu tekniklerin hücre verimine katkıları farklı fiziksel temellere dayanmaktadır. Işık, Şekil 6.a konfigürasyonunda hücrenin ön yüzeyine yerleştirilen NP'ler tarafından hücre içerisine geniş açılarla saçılarak yarı iletken içerisinde hapsedilir ve etkili optik yol uzunluğunun arttırılması sağlanır. NP tarafından saçılan ışık yüksek kırılma indisine sahip yarı iletken yönünde dağılmaya meyillidir, bu da yansımanın azaltılmasını sağlamaktadır [33]. Böylece foton emilimi ve verimde artış meydana gelmektedir. Bu NP'ler tipik olarak 100-200 nm boyutlarındadır [34].

Şekil 6.b konfigürasyonunda yarı iletken aktif bölgesi içerisine gömülü NP'ler tarafından yakın alanda fotonlar yoğunlaştırılarak ve elektrik alan arttırılarak foton emiliminin arttırılması sağlanır. Bu NP'ler tipik olarak daha küçüktür ve 10-20 nm boyutlarında olabilirler [35]. Bu boyutlardaki NP'ler güçlü yakın alan arttırma özelliği

gösterirler. Bu konfigürasyon özellikle kısa yük taşıyıcı difüzyon uzunluğuna sahip ince film yarı iletkenler ile birlikte kullanıldığında hücre performasında artış sağlanır.

Güneş hücrelerinde enerji dönüşümü enerji bant aralığının üzerindeki foton enerjisine sahip ışıkla sınırlıdır. Yarı iletken bir güneş hücresinde bir foton emilimi gerçekleştiğinde, sadece foton enerjisinin yarı iletken enerji bant aralığını aştığı durumda değerlik bandından iletim bandına doğru bir elektron uyarılabilir. Shockley-Queisser sınırı [36] olarak adlandırılan tek bir yarı iletken P-N ekleminin maksimum teorik verimliliği yaklaşık %34'tür (1.34 eV'lik bir bant aralığı varsayıldığında).

Plazmonik nanoparçacıkların güneş hücrelerinde kullanımı için geliştirilen yeni bir teknoloji ise plazmonik nanoparçacıkları doğrudan fotovoltaik olarak kullanarak elektrik üretimidir [37]. Yarı iletken hücrelerin aksine, plazmonik etkiden yararlanan metalik nanoyapılardan oluşan fotoelektrik cihazlarda teorik verimlilik daha yüksektir. Emilim, bir enerji bant aralığı ile sınırlı değildir ve güneş spektrumunun tüm dalga boylarındaki ışığı kullanabilecek şekilde ayarlanabilir. Bu özellik kullanılarak tasarlanan güneş hücrelerine doğrudan plazmonik güneş hücreleri denir. Burada nanoparçacık yüzeyinde oluşan plazmon, foton saçmak yerine sıcak elektron oluşumuna sebep olur. Bu elektron, metal-dielektrik arasında oluşturulan schottky yapısıyla toplanır ve katoda iletilir. Elektronun geride bıraktığı delik ise delik taşıyıcı bir yapıyla anoda iletilir. Böylece harici devrede elektrik akımı oluşur. Yerelleştirilmiş yüzey plazmonlarının fotona mı yoksa sıcak elektrona mı sönümleneceği nanoparçacıkların özelliklerine ve parçacıkların birbirleriyle etkileşimlerine göre değişiklik gösterir. Yapılan araştırmalara göre daha büyük yapıdaki nanoparçacıklar (Au ve Ag için 20-40 nm’den büyük) daha çok foton saçılımına meyilliyken daha küçük yapıdaki nanoparçacıklar ise (Au ve Ag için 15-10 nm’den küçük) sıcak elektron oluşumuna meyillidirler [38].

Farklı boyut ve şekillerdeki nanoparçacıkların birlikte kullanımıyla ardışık dizili yarı iletken güneş hücrelerinde olduğu gibi güneş ışığında bulunan farklı frekanslardaki fotonlarla rezonansa girebilecek daha verimli tasarımlar yapmak mümkündür. Güneş hücrelerinde genelde bu parçacıklar rezonans frekansları görünür bant aralığında olmasından dolayı altın ve gümüş gibi soy metallerden yapılıyor olsalar da foton enerjisinin bir kısmını ısıya dönüştürmelerinden ve pahalı olmalarından dolayı alternatif malzemeler araştırılmaktadır.

Plazmonik nanoparçacıklar, güneş hücrelerinin daha önce hiç olmadığı kadar inceltilebilmesine imkan sağlamışlardır. Böylece küresel enerji talebinin gereksinimlerini karşılamak için, güneş hücresi dönüşüm verimliliğinde iyileştirme ve üretim maliyetlerinde azalma sağlanabilecektir.

1.1. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, giderek artan enerji ihtiyacına yenilenebilir bir alternatif olan güneş enerjisinde verim ve erişilebilirlik üzerine yapılan çalışmalara katkı sağlamaktır. Güneş hücreleri üzerine yapılacak olan geliştirmelerin önemli avantajları bulunmaktadır. Altyapının zayıf kaldığı dağlık veya fakir bölgelerde ve afetlerin yaşandığı yerlerde kurulan geçici barınma alanlarında güneş hücreleri maliyetlerinin azalmasıyla elektriğe erişim kolaylaşacaktır. Aynı zamanda fosil yakıtlardan uzaklaşıp yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş sürecinde güneş enerjisi önemli bir yer edinme potansiyeline sahiptir. Güneş hücrelerinde artan verimlilik ve azalan boyut, ev ve iş yerlerinde, güvenlik alanında, taşınabilir cihazlarda pillere alternatif olarak, tarımda vb. birçok alanda kullanımlarının giderek artmasını sağlayacaktır. Güneş hücresi geliştirme çalışmalarının ülkemizde de gelişmekte olan güneş enerjisi ve uzay çalışmalarına da katkısı olması muhtemeldir.

Plazmonik nanoparçacıklar kullanılarak tasarlanan plazmonik güneş hücreleri daha küçük boyutta, daha az maliyete ve daha verimli ışık enerji dönüşümünün önünü açmaktadır. Amaç, plazmonik nanoparçacıkların özgün ışık emilim ve saçılım özelliklerini ve bu özelliklerden faydalanarak güneş hücrelerinde yapılabilecek iyileştirmeleri araştırmaktır.

1.2. Tezin Kapsamı

Bu tez çalışması kapsamında plazmonik nanoparçacıkların güneş hücrelerinde kullanımına yönelik verimde artış ve maliyette azalma sağlayabilecek yöntemler araştırılmıştır. Geliştirilen formülasyon ile nanoparçacık karakteristik özellikleri ve güneş hücresi verimine etkileri analiz edilmiştir. Nanoparçacıkların hücre içerisindeki optimal konumu ve çok eklemli bir güneş hücresinde kullanımı ele alınmıştır.

Bölüm 4.1'de pratikte üretim ve testi görece zor olan güneş hücresi içerisinde yer alan nanoparçacıkların kayıplı olan bu ortamda benzetim yoluyla incelenebilmesi için modeller hazırlanmıştır. Nanoparçacıkların hücre boyutuna oranla çok küçük olması güneş hücresi benzetiminin doğrudan yapılabilmesini engellemektedir. Bu sebeple

hazırlanan modeller periyodik yapılardan yararlanarak sadeleştirilmiştir. Modellerden birinde gerçekçi veri setleri kullanılmış ve bu model "Gerçekçi Model" olarak adlandırılmıştır. Bu modelin yanında gerçekçi veri setlerinin doğrusal olmayan dağılımlarından kaynaklı rastgeleliği azaltmak ve sonuçların doğruluğunu teyit etmek için bir de doğrusal veri setine sahip "Kontrol Modeli" oluşturulmuştur.

Bölüm 4.2'de periyodik birim hücre kesit alanı ve yüksekliği arasındaki boyut tutarsızlığı sebebiyle nanoparçacık dizisi karakterizasyonu yapmak ve analitik olarak hücre verimini hesaplayabilmek için bir formülasyon geliştirilmiştir. Bu yöntem, çok küçük boyutlardaki nanoparçacıkların bulundukları ortamın kalınlığından bağımsız olan normalize edilmiş optik karakteristiklerinin ve farklı parametrelerin bu karakteristiklere etkilerinin daha doğru bir şekilde tespit edilmesini sağlamaktadır. Bu yöntem ile elde edilen karakteristik verilerle hücre tarafından emilen optik gücün hesabının nasıl yapılabileceği anlatılmıştır.

Bölüm 4.3'te kayıplı ortam içerisinde bulunan nanoparçacıkların özelliklerini belirlemek adına ileri sürülen yöntem kullanılarak değişik parametrelerin nanoparçacık karakteristiklerini nasıl etkilediği yapılan benzetimler ile kontrol ve gerçekçi modeller üzerinden incelenmiş, yöntem tutarlılığı test edilmiştir. Buradan elde edilen veriler ile nanoparçacıkların güneş hücresi içerisinde optimal kullanımı ve kullanım kısıtlamaları hakkında bilgi edinilmiştir. Etkileri test edilen parametreler; nanoparçacığın hücre içerisindeki konumu, boyut ve sıklığı, ortam ve nanoparçacık kırılma indisleri, çekirdek-kabuk yapısı, kabuk kalınlığı ve kırılma indisi, periyodik dizilim şekli ve yönelimi, farklı materyaller arası kullanımı ve nanoparçacık şeklidir.

Bölüm 5.1'de yarı iletken ışık emilimini arttırmak için plazmonik nanoparçacıkların hücre içerisindeki optimal konumu, bu nanoparçacıklarda olması gereken ideal özellikler, tasarlanan nanoparçacıkların hücrenin optik güç emilimine ve inceltilmesine sağladığı katkı belirlenmiştir. Hücre tasarımının nanoparçacıkların sağladığı avantajı nasıl etkilediği analiz edilmiştir.

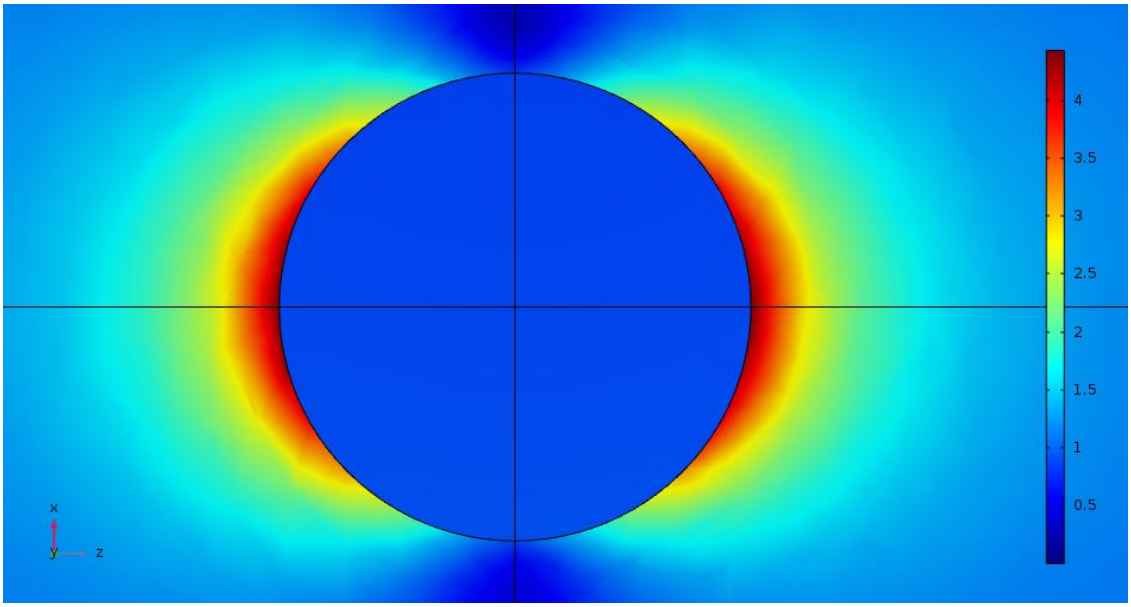
Bölüm 5.2'de nanoparçacık dizisinin çok eklemli güneş hücreleri içerisinde kullanımı ile hücre güç ve verim hesaplarının nasıl yapılabileceği anlatılmıştır. Ardışık ve farklı malzemelerden oluşan, farklı ışık frekanslarına en iyilenmiş hücre katmanlarına özel olarak tasarlanarak yerleştirilen nanoparçacıkların, güneş ışıması altında hücre verimine ve inceltilmesine sağladığı katkı analiz edilmiştir.

2. PLAZMONİK NANOPARÇACIKLAR

2.1. Genel Terimler

Plazmonik, elektromanyetik alan ve serbest elektronlar arasındaki etkileşime dayanır. Plazmon, elektromanyetik dalgalara bağlı olarak malzemede bir dipol oluşumunun sonucu olan serbest elektron salınımının kuantumudur ve bir foton ile eşleşerek plazmon polariton adı verilen başka bir yarı parçacığı oluşturabilir. Bu eşleşme, elektronların bulundukları ortamda plazma frekansına eşit veya daha düşük frekanslarda plazmon ve fotonların rezonansa girmesi ile gerçekleşir [39].

Yüzey plazmonları, yüzeylerle sınırlı olan ve ışıkla güçlü bir şekilde etkileşime girerek polariton oluşturan plazmonlardır. İlgili ışık frekansında gerçek elektriksel geçirgenliği pozitif olan dielektrik bir malzeme ile negatif olan metal veya ağır katkılı yarı iletken gibi plazmonik bir malzemenin arayüzünde meydana gelirler [39]. Güçlü elektrik alan arttırma özelliği gösterirler ve oluştukları yapının geometrisine son derece bağlıdırlar. Böylece uygun yapısal tasarımla hem spektral özelliklerinin hem de ilişkili elektromanyetik alan dağılımlarının kapsamlı mühendisliğine izin verirler. Altın plazmonik nanoparçacık kullanılarak yapılan benzetimlerde arttırılan elektrik alan Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7. Uyarıcı elektrik alana göre normalize edilmiş altın nanoparçacıklar ile arttırılan elektrik alan

Bir yüzey plazmonundaki yük hareketi metal içinde ve dışında elektromanyetik alanlar oluşturur. Yüzey plazmonu ile ilişkili yük hareketi ve oluşturduğu elektromanyetik alan ya düzlemsel bir arayüzde yüzey plazmon polaritonu (YPP) [40][41] ya da küçük bir parçacığın kapalı yüzeyi üzerinde yerelleştirilmiş yüzey plazmonu (YYP) oluşumuna sebep olur [42][43].

YPP, dielektrik ve plazmonik malzeme arayüzüne paralel bir yönde yayılan, ışıma yapmayan bir elektromanyetik yüzey dalgasıdır. YYP ise plazmonik nanoparçacık yüzeyinde meydana gelerek YPP'den farklı olarak ayrık elektromanyetik modlara sahiptir. Bu nanoparçacıklar görünür ışığın dalga boyundan çok daha küçük olan nanometre boyutlarındaki yapılardır. NP üzerinde oluşan bu modların herbiri kendi rezonansına sahiptir. Bu rezonanslar NP boyut ve şekline bağlıdır. Plazmonik NP'ler rezonans frekansında ışığı yoğunlaştırarak yakın alan bölgesinde elektrik alan genliğini arttırır, emilim ve saçılım özelliği gösterirler [44]. Aynı zamanda yan yana bulunan birden fazla NP birbirlerini etkileyerek elektrik alan artışında değişikliğe yol açabilir. Bu da NP sıklığı ve diziliminin de göz önünde bulundurulmasını gerektirir.

Sonlu nesneler üzerinde ışık saçılımı üç farklı koşul üzerinden incelenir. Bunlar dalga boyu (λ) ve parçacık boyutlarının kıyaslaması üzerinden sınıflandırılır. R yarıçapına sahip küre bir parçacık için bu sınıflar şu şekildedir [45]:

1) $\lambda >> 2R$ Rayleigh Saçılımı (Yarı statik yaklaşım)
2) $\lambda \sim 2R$ Mie Saçılımı
3) $\lambda << 2R$ Kırınım (Fraunhofer/Fresnel)

Işık dalga boyundan çok daha küçük plazmonik NP'leri açıklamak için Rayleigh saçılım modeli (yarı statik yaklaşım) kullanılabilir.

2.2. Rayleigh Saçılım Modeli

Yarı statik yaklaşımda dalga boyundan çok daha küçük boyutlardaki metal NP'ler için ortam elektromanyetik alanı NP'nin tamamında homojen olarak kabul edilebilir. Bu durumda ortamda bulunan ışıktan kaynaklanan elektrik alan, metal NP'lerin üzerindeki iletim elektronları ile etkileşir. Böylece elektromanyetik alan, metal-dielektrik arayüzünde dağılmak yerine serbest elektronlar ve çekirdekler arasında yer değişikliğine yol açar. Bu yer değişikliğine tepki olarak ters yönlü bir Coulomb kuvveti meydana gelir ve serbest elektronların dipol plazmon frekansında salınımlarına yol açar [29].

Ortam ışığı ve dipol plazmon frekanslarının benzeştiği noktada yapıcı etkileşim ile bir rezonans meydana gelir ve elektron salınımı en yüksek seviyeye ulaşır.

Yarı statik yaklaşımı açıklamak için öncelikle elektrodinamik Helmholtz denkleminden başlamak gerekir. Elektriksel potansiyel (φ) için elektrodinamik Helmholtz denklemi aşağıda verilmiştir [45].

$$\nabla^2\varphi(R) + k_d^2\,\varphi(R) = 0 \qquad (1)$$

Burada birinci terim elektriksel potansiyelin ikinci türevini, k_d dalga sayısını ifade eder. İlk terim $\frac{1}{R^2}$ ile orantılı iken ikinci terim $\frac{1}{\lambda^2}$ ile orantılıdır.

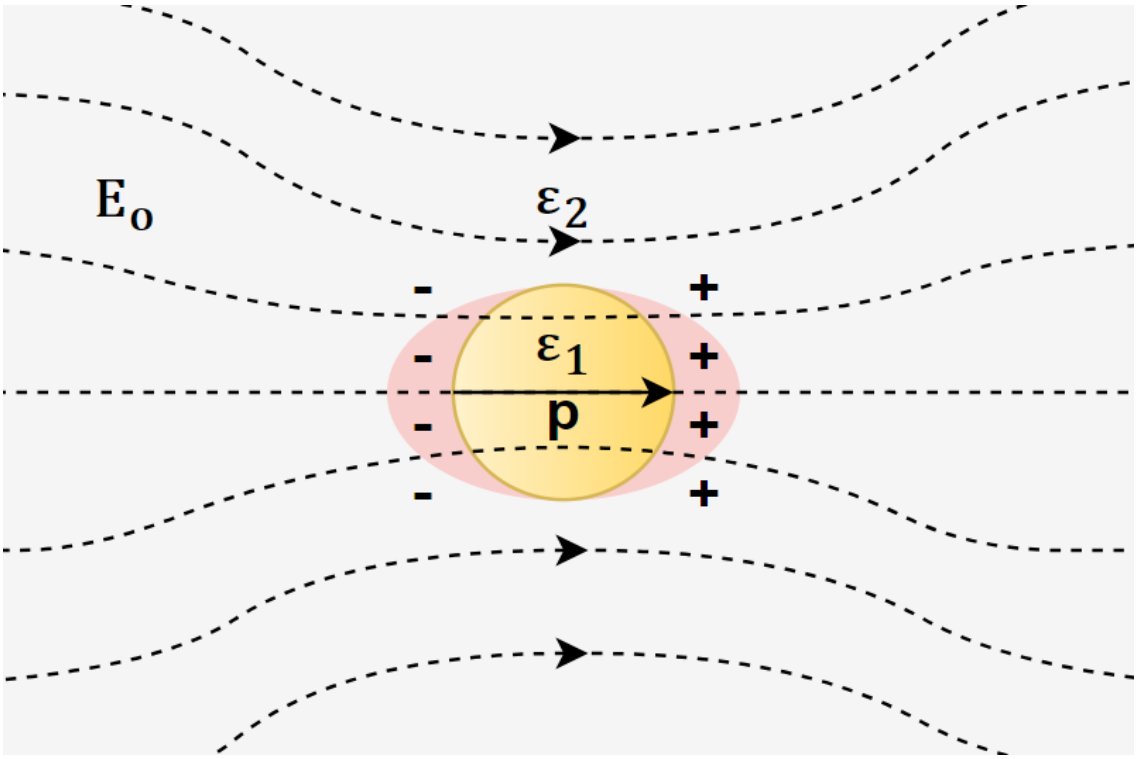
$$k_d = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad (2)$$

Yarı statik koşulda $\lambda >> 2R \rightarrow \nabla^2\varphi(R) >> k_d^2\,\varphi(R)$ olması sebebiyle ikinci terim ihmal edilir. Bu da aşağıdaki elektrostatik denklemini (Laplace denklemi) verir.

$$\nabla^2\varphi(R) = 0 \qquad (3)$$

NP dışında: $\nabla^2\varphi_2(R) = 0$

NP içinde: $\nabla^2\varphi_1(R) = 0$



Şekil 8. Sabit elektrik alan altında oluşan elektrik dipol momenti [45]

Elektrik alan şiddeti, elektriksel potansiyelin birinci türevidir ($E = -\nabla\varphi$). Yarı statik koşulda parçacıkların ışık saçılım ve emilim özelliklerini açıklamak için kullanılan bir yöntem bu parçacıkları elektromanyetik radyasyon kaynağı olarak tanımlamaktır. Bu saçılıma Rayleigh saçılımı denir. Yarı statik yaklaşım kullanılarak sabit elektrik alan ($\boldsymbol{E_0}$) altında birinci ve ikinci bölgeler için elektrik alanlar ($\boldsymbol{E_1}$, $\boldsymbol{E_2}$) verilmiştir [45].

$$\boldsymbol{E}_1 = \boldsymbol{E}_0 \frac{3\varepsilon_2}{\varepsilon_1+2\varepsilon_2} \tag{4}$$

Burada $\boldsymbol{E_1}$ NP içerisindeki elektrik alanı ifade eder ve parçacık içerisinde sabittir.

$$\boldsymbol{E}_2 = \boldsymbol{E}_0 + \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_2}\frac{3R(\boldsymbol{p}R)-\boldsymbol{p}R^2}{R^5} \tag{5}$$

$\boldsymbol{E_2}$'nin ikinci terimi NP üzerinde oluşan Şekil 8'de görülen dipol ($\boldsymbol{p}$) elektrik alanını ifade eder. Salınan elektrik dipol, Rayleigh saçılımının en temel radyasyon kaynağıdır. Dipol momenti $\boldsymbol{p} = \alpha\, \boldsymbol{E}$ şeklinde ifade edilir ve α burada elektriksel kutuplanabilirliktir. Küre NP için yarı statik elektriksel dipol kutuplanabilirliği aşağıdaki şekilde ifade edilir [45].

$$\alpha = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_2 R^3 \frac{\varepsilon_1-\varepsilon_2}{\varepsilon_1+2\varepsilon_2} \tag{6}$$

$\boldsymbol{E}_1$ ve $\boldsymbol{E}_2$ incelendiğinde ε_1 değerinin $-2\varepsilon_2$'ye yakınsadığı durum için paydaların sıfıra ve elektrik alanların sonsuza yaklaştığı görülür. Dielektrik malzemeler için elektriksel geçirgenlik pozitif olduğu için bu koşul gerçekleşmez fakat malzemelerden biri metal gibi negatif elektriksel geçirgenliği sahip ise bu mümkündür. $\varepsilon_1(\omega) = -2\varepsilon_2(\omega)$ koşulunu sağlayan frekansa, yerelleşmiş yüzey plazmon rezonans frekansı denir.

Parçacık tarafından emilen ve saçılan enerji oranları bu elektrik alanlar kullanılarak hesaplanabilir ve parçacığın emilim ve saçılım kesit alanlarıyla temsil edilebilir [45].

$$\sigma_{emilim} = \frac{P_{emilim}}{I_{ortam}} = \frac{k_d}{\varepsilon_0\varepsilon_2}\, Im(\alpha) \tag{7}$$

Burada σ_{emilim} emilim kesit alanı, P_{emilim} emilen güç, I_{ortam} ortam ışıma şiddetidir.

$$\sigma_{saçılım} = \frac{P_{saçılım}}{I_{giriş}} = \frac{{k_d}^4}{6\pi\varepsilon_0^2\varepsilon_2^2}\, |\alpha|^2 \tag{8}$$

Burada $\sigma_{saçılım}$ saçılım kesit alanı, $P_{saçılım}$ saçılan güç, I_{ortam} ortam ışıma şiddetidir.

α değerinin artmasıyla, emilim ve saçılım kesit alanı, parçacığın geometrik kesit alanını aşabilir. Böyle bir durumda, ortamdan daha az toplam kesit alanına sahip NP dizisi, gelen ışığı tamamen emebilme veya saçabilme özelliği gösterebilir.

Bu kesit alanları ile emilim ve saçılım verimleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir [45].

$$Q_{emilim} = \frac{\sigma_{emilim}}{\pi R^2} = 4\,(k_d R)\, Im\,(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2}) \tag{9}$$

$$Q_{saçılım} = \frac{\sigma_{saçılım}}{\pi R^2} = \frac{8}{3}\,(k_d R)^4 \left|\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2}\right|^2 \tag{10}$$

Yarıçapın (R) küçülerek sıfıra yakınsadığı durum için $k_d R >> (k_d R)^4$ olması sebebiyle çok küçük boyutlardaki NP'ler için Q_{emilim} daha baskındır. Bu da küçük NP'ler için emilimin, büyük NP'ler için saçılımın daha baskın olduğunu gösterir.

NP boyutu büyüdüğünde ve 100 nm çapını aştığında yüzeyde dipolden daha yüksek mertebeli plazmonlar meydana gelmeye başlar. Küçük NP yarıçapında dipol, kuadrupol, octupol vs. plazmon modları üst üste biner. Fakat yarıçap arttıkça düşük mertebeli çok kutuplu modlar (dipol gibi) daha hızlı bir şekilde düşük frekans bandına kaymaya başlar. Böylece birden fazla rezonans zirvesi ortaya çıkar. Bu rezonanslar büyük boyutlu NP'lerin farklı yönlerde saçılım yaparak ışık yönünde değişiklik meydana getirmelerine sebep olurlar. Yüksek mertebeli modlar aşağıdaki gibi belirlenebilir [39].

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = -\frac{n_r + 1}{n_r} \tag{11}$$

Burada n_r rezonans mertebesidir.

1) Dipol Modu: $n_r = 1$, $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$ = -2 → Dipol YYP

2) Yüksek mertebe rezonanslar $(n_r > 1)$: $n_r = 2$, $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$ = - $\frac{3}{2}$ → Kuadrupol YYP

3) YYP'den YPP'ye $(n_r >> 1)$: $n_r \rightarrow \infty$, $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$ = -1 → YPP sınır koşulu

Yan yana dizilen NP'ler de birbirleriyle etkileşerek emilim ve saçılım karakteristiklerinde değişikliğe sebep olurlar ve hatta yüksek mertebeli modların güçlenmesine de sebep olabilirler. NP dizileri ve rastgele NP şekillerini modellemek için yarı statik yaklaşım yetersiz kalır. Bu sebeple rastgele parçacık şekilleri ve dizilimlerini modellemek için değişik nümerik yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin

FDTD (Sonlu Farklar Zaman Bölgesi), FDFD (Sonlu Farklar Frekans Bölgesi), FEM (Sonlu Elemanlar Yöntemi), T-matris metodu, çok kutuplu yöntemler ve ayrık dipol bu yöntemlerden bazılarıdır.

2.3. Plazmonik Materyaller

Plazmonik özelliğin, sadece negatif gerçek elektriksel geçirgenlik sergileyen metaller veya metal benzeri materyaller ve pozitif gerçek elektriksel geçirgenlik sergileyen dielektrikler arasında gerçekleşebileceği "2.2. Rayleigh Saçılım Modeli" bölümünde anlatılmıştır. Materyallerde negatif gerçek elektriksel geçirgenlik yalnızca plazma frekansı altındaki frekanslarda meydana gelir. Yüksek miktarda serbest elektrona sahip olan metaller ve ağır katkılı yarı iletkenler genellikle optik frekanslarda bu özelliği gösterirler [46]. NP'ler bu özelliklere sahip plazmonik materyallerden yapıldığında çok özel optik karakteristikler gösterirler.

Tıpkı elektriksel geçirgenlik gibi malzemelerin kırılma indisleri de plazmonik özellik üzerine bilgi verir. Kırılma indisinin gerçek ve sanal kısımları elektriksel geçirgenlik ile bağlantılıdır [45].

$$\underline{n} = \sqrt{\varepsilon\mu} \tag{12}$$

Burada $\underline{n}$ kompleks kırılma indisini, ε kompleks elektriksel geçirgenliği ve μ kompleks manyetik geçirgenliği ifade eder. Çoğu doğal malzemede, manyetik tepki gigahertz frekans bandında azalmaya başlar ve optik frekanslarda önemli bir manyetizma gösterilmez. Bu frekanslarda $\mu \approx 1$ kabul edilirse $\underline{n}$ aşağıdaki biçimi alır [45].

$$n + ik = \sqrt{\varepsilon' + i\varepsilon''} \tag{13}$$

n gerçek kırılma indisi, k sanal kırılma indisi, ε' gerçek elektriksel geçirgenlik, ε'' ise sanal elektriksel geçirgenliktir.

Bu parametreler gerçek ve sanal kısımlarına ayrılarak aşağıdaki gibi ayrı ayrı incelenebilir [45].

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}}{2}} \tag{14}$$

$$\varepsilon' = n^2 - k^2 \tag{15}$$

$$k = \frac{\varepsilon''}{\sqrt{2\left(\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}\right)}} \tag{16}$$

$$\varepsilon'' = 2nk \tag{17}$$

Burada, yarı statik yaklaşımda da görüldüğü üzere, elektriksel geçirgenliğin gerçek kısmı ε' polarizasyonu, sanal kısmı ε'' ise emilim ve kayıpları etkiler.

Silisyum gibi düşük emilime sahip bir malzemede geçirgenliğin gerçek kısmı sanal kısmından çok daha büyüktür. Bu da geçirgenlik ve kırılma indisi arasındaki eşitliğin sadeleştirilmesini sağlar. $\varepsilon' >> \varepsilon''$ koşulu için yeni parametreler aşağıda verilmiştir.

$$n = \sqrt{\varepsilon'} \tag{18}$$

$$\varepsilon' = n^2 \tag{19}$$

$$k = \frac{\varepsilon''}{2\sqrt{\varepsilon'}} \tag{20}$$

$$\varepsilon'' = 2nk \tag{21}$$

Bu sadeleştirme ile n'nin daha çok polarizasyon ile k'nın ise emilim ve kayıplar ile ilgili olduğu görülmektedir.

Metallerde ve ağır katkılı yarı iletkenlerde gerçek elektriksel geçirgenlik ε', plazma frekansından düşük optik frekanslarda negatiftir. Bu da, kırılma indisi ve geçirgenlik arasındaki ilişkinin aşağıdaki şekilde değişmesine sebep olur.

$$n = \frac{\varepsilon''}{\sqrt{2\left(-\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}\right)}} \tag{22}$$

$$\varepsilon' = n^2 - k^2 \tag{23}$$

$$k = \sqrt{\frac{-\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}}{2}} \tag{24}$$

$$\varepsilon'' = 2nk \tag{25}$$

Dielektrikler için geçerli olan (14-17) numaralı eşitlikler, metaller için geçerli olan (22-25) numaralı eşitlikler ile karşılaştırıldığında n ve k'nın denk oldukları terimlerin tersine döndüğü görülmektedir. Bu da metal ve dielektrik için gerçek ve sanal kırılma indislerinin farklı şeyler temsil ettiğini göstermektedir.

Düşük emilime sahip kaliteli bir plazmonik materyalin gerçek geçirgenliği sanal geçirgenliğinden çok daha büyük olmalıdır. Bu koşul göz önüne alındığında $|\varepsilon'| >> \varepsilon''$ için yeni parametreler aşağıda verilmiştir.

$$n = \frac{\varepsilon''}{2\sqrt{-\varepsilon'}} \tag{26}$$

$$\varepsilon' = -k^2 \tag{27}$$

$$k = \sqrt{-\varepsilon'} \tag{28}$$

$$\varepsilon'' = 2nk \tag{29}$$

Yapılan bu sadeleştirme ile metaller gibi negatif gerçek geçirgenliğe sahip malzemelerde dielektriklerin tersine k'nın daha çok polarizasyon ile n'nin ise emilim ve kayıplar ile ilgili olduğu görülmektedir.

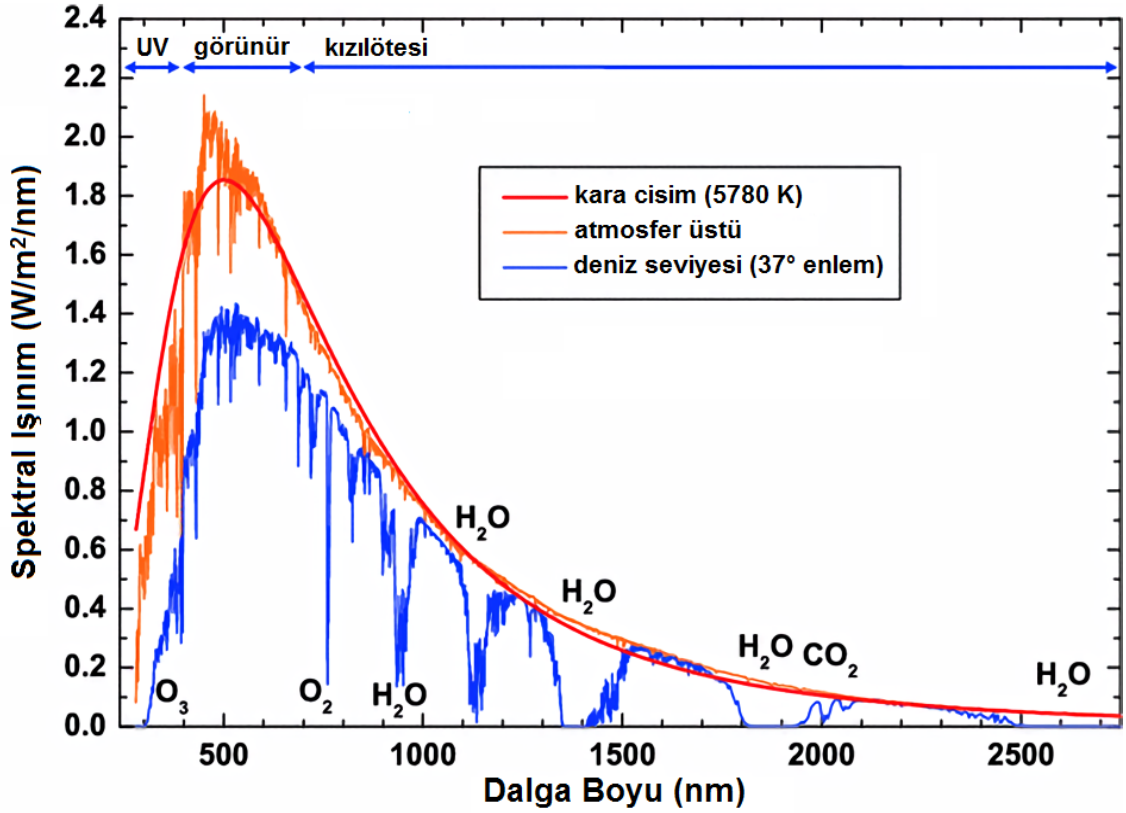
Bir malzemenin hem kaybı hem de polarize edilebilirliği, optik performansını etkiler. Bir YYP için kalite faktörü (Q_{YYP}) $-\varepsilon'/\varepsilon''$ olarak tanımlanır [47]. Bu kalite faktörü materyalin ne kadar iyi plazmonik özellik göstereceğini belirtir ve dalga boyuna göre değişiklik gösterebilir. Dalga boyuna göre materyal kalite faktörlerinde büyük farklılıklar meydana gelebilir ve kalite faktöründeki bu değişim dalga boyuna göre doğrusal olmayabilir. Bu sebeple NP materyali kullanılacak dalga boyu için özel olarak seçilmelidir. Aynı zamanda seçilecek olan materyalin üretime elverişliliği de göz önünde bulundurulmalıdır.

Plazmonik materyal olarak kullanılabilecek olan ağır katkılı yarı iletkenlerde, negatif gerçek elektriksel geçirgenlik taşıyıcı yoğunluğundan kaynaklanmakta iken, malzeme kayıpları yüksek taşıyıcı hareketliliği ve bantlar arası kayıplardan kaynaklanmaktadır. İdeal plazmonik materyal, sıfır bantlar arası kayıplara sahip olmalıdır fakat bu tür kayıpsız bir materyal henüz bulunamamıştır.

Plazmonik NP'lerin hazırlanması için, istenen boyut ve geometriye bağlı olarak birçok üretim süreci veya kimyasal sentez yöntemi mevcuttur. Örneğin kimyasal yöntemler ve litografi yöntemleri (e-ışını, fotolitografi) bunlardan bazılarıdır. Değişik üretim yöntemleri kullanılarak neredeyse her türlü şekil ve boyutta NP üretmek mümkündür.

3. GÜNEŞ ENERJİSİ VE FOTOELEKTRİK ETKİ

3.1. Güneş Işıması



Şekil 9. Güneş spektral ışınımı [48]

Şekil 9'da atmosfer üstü Güneş spektral ışınımı, bu ışınımın Planck'ın kara cisim ışıması modeli ve deniz seviyesi Güneş spektral ışınımı görülmektedir. Deniz seviyesi spektrumdaki soğurulma ve kesiklikler atmosferde bulunan su buharı gibi gazların soğurucu etkisi nedeniyle kaynaklanmaktadır.

Siyah renkli cisimler çok iyi soğurucu özellik gösterdikleri gibi bir o kadar da iyi ışınım yaparlar. Eğer bu doğru olmasaydı kara bir cisim sürekli olarak ortamdan enerji hapseder ve durdurulamaz bir şekilde ısınırdı, bu da termodinamiğin ikinci yasasına aykırıdır. Bu sebeple gelen ışığın tamamını soğuran mükemmel bir kara cisim aynı zamanda mükemmel bir ışınım kaynağıdır.

Kara cisim, belli sıcaklıkta yayılan en yüksek enerjinin hesaplanabilmesini sağlar. Güneş de kara cisim ışıması yoluyla modellenebilir. Güneş, 5780 K sıcaklıktaki bir kara cisim ile benzer bir güç yayılımına sahiptir. Bu göz önüne alınarak Güneş'in ışınım spektrumu Stefan-Boltzmann yasası kullanılarak hesaplanabilir. Bu ışınım modeli, girdi

gücü olarak kullanılarak doğrudan güneş ışığı altında yarı iletken emiliminin ve nanoparçacık kazancının benzetimi yapılabilecektir.

Güneş hücrelerinin performansını standart koşullar test etmek için hava kütlesi katsayısı kullanılır. Hava kütlesi (*İng.* air mass-AM), ışığın atmosferde katettiği optik yol uzunluğunu ifade eder. Bu katsayı ışığın atmosferden dik açıyla geçerken katettiği en kısa yol uzunluğuna göre normalize edilir. AM1.5, yani hava kütlesinin 1.5 katı optik uzunluk, güneş hücrelerini test ederken kullanılan bir standarttır.

AM1.5 için Dünya yüzeyindeki Güneş ışıması ($I_{AM1.5}$) aşağıda verilmiştir.

$$I_{AM1.5} = 1000.4 \quad (\mathrm{W/m^2}) \tag{30}$$

Bu, deniz seviyesinde birim alana Güneş tarafından yayılan güçtür.

Güneş ışımasını modelleyen kara cisim sıcaklığı (T) 5780 K'dır.

Stefan-Boltzmann yasası aşağıdaki biçimde ifade edilir.

$$I = \sigma T^4 \quad (\mathrm{W/m^2}) \tag{31}$$

Burada σ Stefan-Boltzmann sabitidir.

Stefan-Boltzmann yasasıyla (31) elde edilen değer Güneş'in birim alana bütün dalga boylarında yaydığı güç yoğunluğu toplamıdır. Deniz seviyesinde, Dünya'nın Güneşe olan uzaklığı ve atmosferin soğurucu etkisi nedeniyle bu güç yoğunluğu çok daha azdır ve (30)'de verildiği gibi 1000.4 W/m^2'dir. Deniz seviyesindeki spektral ışınımın hesaplanabilmesi için Güneş'in güç yoğunluğunun hangi oranla deniz seviyesine ulaştığının bulunması gerekir.

Dünya yüzeyine ulaşan ışıma oranı (K_d) aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$K_d = \frac{I_{AM1.5}}{\sigma T^4} \tag{32}$$

Bu oran (32) ve Planck'ın kara cisim ışıması yasası (33) kullanılarak deniz seviyesi spektral ışınımı hesaplanabilir.

Planck'ın kara cisim ışıması yasası aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$F(\lambda) = \frac{2\pi h \frac{c^2}{\lambda^5}}{e^{\left(\frac{h c}{k_B \lambda T}\right)} - 1} \quad (\mathrm{W/m^2/nm}) \tag{33}$$

Deniz seviyesi spektral ışınımı ($F_d(\lambda)$) (32) ve (33) kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$F_d(\lambda) = K_d\, F(\lambda) \quad (\mathrm{W/m^2/nm}) \tag{34}$$

Spektral ışınım belli bir dalga boyundaki güç yoğunluğudur. Simülasyon ayrık dalga boylarında gerçekleşeceği için model girdisi her adım için ayrık şekilde hesaplanmalıdır.

Simülasyon adımı başına Güneş ışıması aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

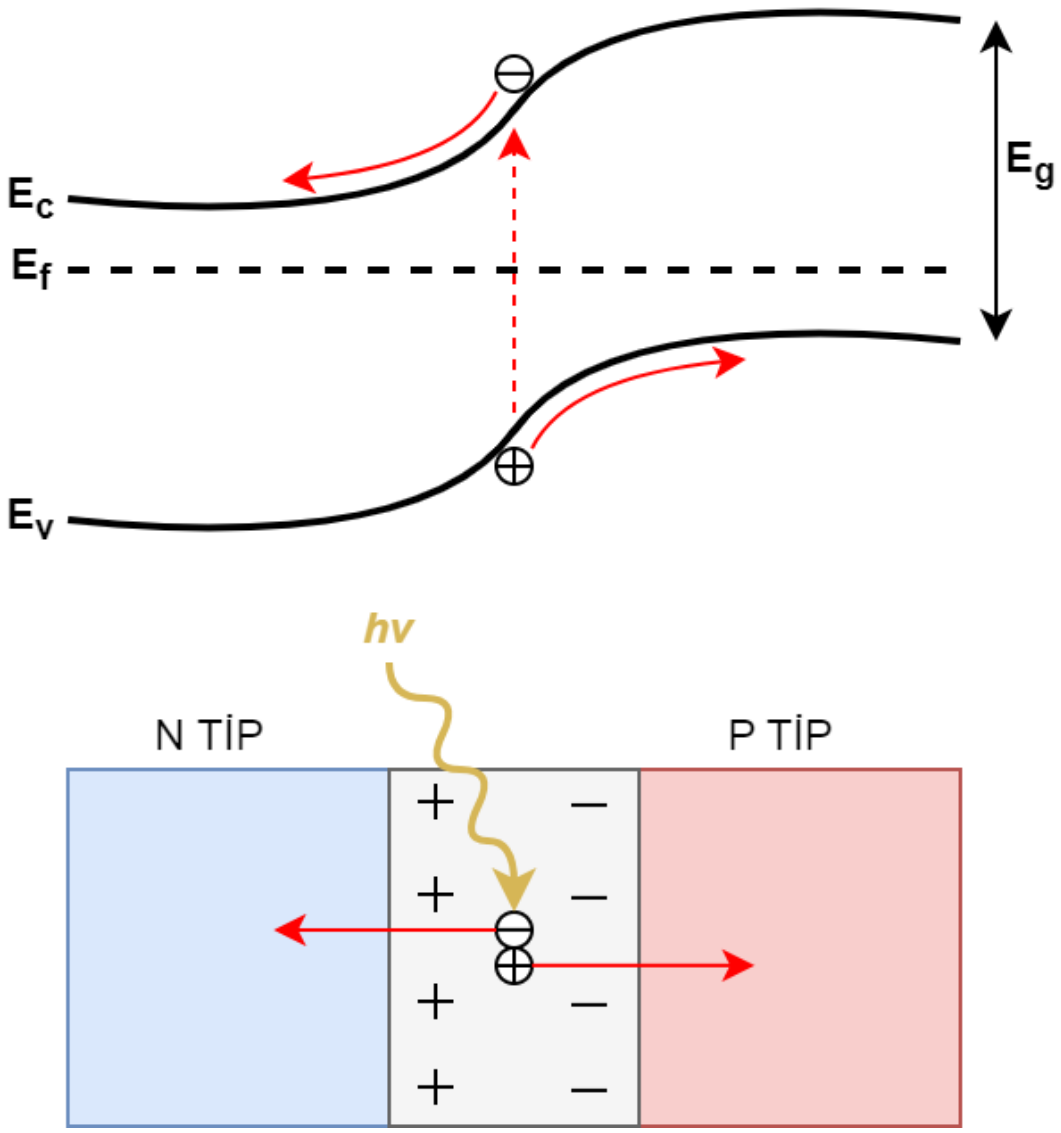
$$I_{AM1.5}(\lambda) = F_d(\lambda)\, \Delta\lambda_{adım} \quad (\mathrm{W/m^2}) \tag{35}$$

$\Delta\lambda_{adım}$ ayrık simülasyon adımları arası dalga boyu farkıdır. Tüm adımlardaki güç yoğunluklarının toplamı simülasyonda kullanılan dalga boyu bandında Güneş'in yaydığı toplam güç yoğunluğunu verir.

3.2. Güneş Hücresi

Güneş hücrelerinin çalışma prensibi, ışığın yarı iletken malzeme üzerinde serbest elektron oluşturmasını açıklayan fotoelektrik etkiye dayanır. Güneş hücreleri ardışık N ve P tipi yarı iletkenlerden meydana gelir. N tipi materyaller elektron vermeye, P tipi materyaller ise elektron almaya eğilimli katkılar içeren materyallerdir. N tipi materyal üzerindeki elektronlar, P tipi materyal üzerindeki delikler ile birleşerek P tipi materyal üzerinde negatif yüklü tükenim bölgesi oluşturur. N tipi materyal üzerinde ise kaybedilen elektronlar sebebiyle pozitif yüklü tükenim bölgesi oluşur.

Bu karşılıklı farklı yüklere sahip tükenim bölgeleri bir elektrik alan oluşturur ve bu bölgede bulunan elektronlar üzerine düşen foton ile elektron-delik çifti ayrışır. Ayrışan bu elektronlar iletim bandına (E_c), delikler değerlik bandına (E_v) aktarılır. Yarı iletken elektronlarını iletim bandına aktarabilmek için bu fotonların en az yarı iletken bant aralığı enerjisi (E_g) kadar bir enerjiye sahip olmaları gerekir. Şekil 10'da görüldüğü gibi foton tarafından uyarılan elektron-delik çifti, tükenim bölgesindeki iyonlar tarafından oluşturulan elektrik alanı takip ederek (elektron sürüklenmesi) elektroklarda toplanırlar.



Şekil 10. Güneş hücresinde foto-akım üretimi. Altta P-N ekleminin tükenim bölgesine düşen hv enerjili foton tarafından uyarılan elektron-delik çifti ve bu yüklerin hareketi yer almaktadır. Üstte ise bu yük hareketinin enerji bandı diyagramı verilmiştir. [49]

Bu elektronların harici bir devreye aktarılmadığı durumda elektrotlarda açık devre voltajı oluşur. Genel olarak yarı iletken bant aralığı ne kadar yüksek ise yerleşik potansiyel ve açık devre voltajı da o kadar yüksek olur. Sürüklenen yükler harici bir devre üzerine aktarılırsa akım ve dolayısıyla da güç aktarımı yapılmış olur. Hücre en fazla saniye başına oluşan serbest elektron sayısı kadar kısa devre akımı sağlayabilir. Bu da yarı iletken tarafından emilen foton sayısına bağlıdır. Işık bir güneş hücresi üzerine düştüğünde yansıtılabilir, emilebilir veya iletilebilir, ancak yalnızca emilen ışık elektrik üretir.

Taşıyıcı difüzyon uzunluğu (L_d), yük taşıyıcılarının üretildikleri yerden P-N eklemine doğru difüzyonunun gerçekleşebilmesi için yarı iletken kalınlığından daha büyük olmalıdır. Bu gereksinimin nispeten kalın güneş hücrelerinde karşılanması zordur, çünkü P-N eklemi ile arasında L_d'den daha fazla mesafe bulunan yük taşıyıcıları, materyaldeki diğer yüklerle rekombinasyona eğilimlidir. Rekombinasyona uğrayan yük taşıyıcıları foto-akım üretiminde ve açık devre voltajında kayıplara yol açar. Dolayısıyla güneş hücrelerinin optik kalınlığını arttırarak foton emilimini arttırmak ve fiziksel kalınlığını azaltarak rekombinasyonu azaltmak için plazmonik NP'lerin kullanımının da dahil olduğu farklı yöntemler üzerine çalışılmaktadır.

Genel olarak (silisyum) N tipi materyal, P tipi materyalden daha yüksek yüzey kalitesine sahiptir. Bu sebeple N tipi materyal ışığın çoğunluğun emildiği hücrenin ışığa dönük olan üst yüzeyine yerleştirilir. Böylece hücrenin üstü negatif ve altı pozitif elektrot olur. N tipi materyal ışığın geçişine izin vermek için ince tutulur ve daha yüksek oranda katkılıdır, P tipi materyal ise ışık emilimini arttırmak için kalın tutulur ve daha düşük oranda katkılıdır. Böylece yük taşıyıcıları, büyük çoğunluğu yüzeye yakın emilen ışık tarafından P-N eklemine difüzyon uzunluğundan daha yakın üretilmiş olur.

İdeal durumda elektron-delik çiftini oluşturmak için gerekli en düşük foton enerjisi yarı iletken bant aralığı enerjisine eşit olsa da yarı iletken üzerindeki kusurlar ve kayıplar sebebiyle bu enerjinin bir kısmı ısıya dönüşür. Bu nedenle pratikte yarı iletkenlerin en verimli enerji dönüşümü yaptığı frekans, bant aralığı enerjisine karşılık gelen frekanstan daha yüksektir. Fakat foton enerjisi elektron-delik çiftini oluşturmak için gerekli en düşük enerjiden daha fazla ise geriye kalan fazla enerji ısıya dönüşür. Bu sebeple yarı iletkenler en yüksek verimlerine belli bir frekans aralığında ulaşırlar.

Doğrudan ve dolaylı bant aralığına sahip yarı iletkenler arasında da farklılıklar vardır. Görünür bölgedeki foton emilimi için en çok kullanılan kristalin Si gibi dolaylı bant aralığına sahip yarı iletkenler, düşük optik emilime sahiptirler ve emilimleri ortam sıcaklığına bağlıdır. Bu sebeple Si güneş hücrelerinin, yüksek oranda ışık emilimi yapabilmeleri için optik olarak kalın olmaları gerekir. Bu yarı iletkenler, foton emilimini gerçekleştirebilmeleri ve yük taşıyıcıları oluşturabilmeleri için nispeten kalın filmler halinde üretilirler.

Belli bir dalga boyundaki foton enerjisi aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$E_f(\lambda) = \frac{h\,c}{\lambda} \quad \text{(eV)} \tag{36}$$

Burada h Planck sabitini, c ışık hızını ve λ ışık dalga boyunu belirtir.

Güneş hücrelerinde verim hesabı için literatürde sık kullanılan iki kuantum verim çeşidi vardır. Bunlardan biri harici kuantum verim (HKV), diğeri de dahili kuantum verim (DKV)'dir.

Harici kuantum verim (HKV), toplanan yük taşıyıcı sayısının hücre üzerine gelen foton sayısına oranıdır.

HKV = (Üretilen elektronlar/s) / (Gelen fotonlar/s) (37)

Dahili kuantum verim (DKV) ise, toplanan yük taşıyıcı sayısının hücre tarafından emilen foton sayısına oranıdır.

DKV = (Üretilen elektronlar/s) / (Emilen fotonlar/s) (38)

Hücre tarafından emilen güç yoğunluğu ($I_e(\lambda)$), frekansa ve malzemenin geçirgenliğine bağlıdır.

$$I_e(\lambda) = \frac{\pi\, c\, \varepsilon_o\, Im\big(\varepsilon(\lambda)\big)}{A\, \lambda} \int |E(\lambda)|^2\, dV \qquad (\mathrm{W/m^2}) \tag{39}$$

Burada A hücre kesit alanını, ε elektriksel geçirgenliği, E elektrik alanı ve V hücre hacmini ifade eder.

Hücre tarafından emilen foton akı yoğunluğu ($\Phi_e(\lambda)$), emilen güç yoğunluğunun foton enerjisine oranıyla bulunur.

$$\Phi_e\,(\lambda) = \frac{I_e(\lambda)}{E_f(\lambda)} \qquad (1/\mathrm{s/m^2}) \tag{40}$$

Tüm spektrum için emilen toplam foton akı yoğunluğunun (Φ_e) bulunması için bu değerin ilgili spektrumda integrali alınmalıdır.

$$\Phi_e \;= \int \Phi_e(\lambda)\, d\lambda \qquad (1/\mathrm{s/m^2}) \tag{41}$$

Emilen toplam foton akı yoğunluğu, her fotonun bir elektron uyardığı koşulda elektron üretim hızı yoğunluğuna eşittir. Burada kayıplar ihmal edilmektedir, fakat istenildiğinde dahil edilebilir. Bu koşulda DKV bire eşittir.

$$DKV = \frac{J_{kd}}{q\, \Phi_e} = \; 1 \tag{42}$$

J_{kd} kısa devre akımı, q elektron yüküdür.

İdeal durumda üretilen akım yoğunluğu (J_{kd}) aşağıdaki eşitlikte ifade edilmiştir.

$$J_{kd} = q\,\Phi_e \qquad (\mathrm{A/m^2}) \tag{43}$$

HKV için ise gelen foton akı yoğunluğu ($\Phi_{AM1.5}$) kullanılmalıdır.

$$\Phi_{AM1.5}\,(\lambda) = \frac{I_{AM1.5}(\lambda)}{E_f(\lambda)} \qquad (\mathrm{1/s/m^2}) \tag{44}$$

$$\Phi_{AM1.5} = \int \Phi_{AM1.5}(\lambda)\,d\lambda \qquad (\mathrm{1/s/m^2}) \tag{45}$$

Böylece HKV aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$\mathrm{HKV} = \frac{J_{kd}}{q\,\Phi_{AM1.5}} = \frac{\Phi_e}{\Phi_{AM1.5}} \tag{46}$$

(39), (40) ve (43) numaralı eşitlikler dikkate alındığında aşağıdaki gibi kabaca bir çıkarım yapılabilir.

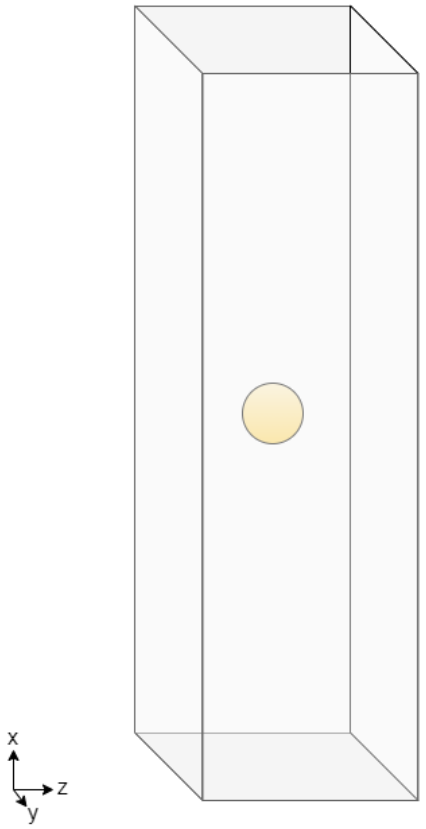
$$J_{kd}(\lambda) \sim I_e(\lambda) \sim E^2(\lambda)$$

Bu da plazmonik NP'lerin sağladığı elektrik alan arttırma ve ışık hapsetme özelliklerinin üretilen akıma yapabileceği katkıyı göstermektedir.

4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

4.1. Benzetim Modelleri

Yarı iletken gibi kayıplı bir ortam içerisinde yer alan NP'lerin optik etkilerini inceleyebilmek için üç boyutlu (3B) modeller hazırlanmıştır. Modellemede, tüm güneş hücresi yapısını tek bir benzetim ile hesaplamak çoğu zaman imkansızdır. Özellikle de model içerisinde yer alan NP boyutları ile hücrenin toplam boyutu arasındaki tutarsızlık hesaplamaları daha da karmaşık hale getirmektedir. Bu sebeple hesaplamaları kolaylaştırmak için belirli teknikler uygulanmalıdır. Örneğin, periyodik bir yapı birim hücrelerine ayrıştırılabilir ve hesaplamalar periyodik sınır koşulları kullanılarak yalnızca bu birim hücre üzerinden yapılabilir. Periyodik sınır koşulları kullanılarak benzetimi yapılan sonsuz NP dizisi de Şekil 11'de görüldüğü gibi tek bir NP bulunduran hücre dilimi kullanılarak modellenmiştir.



Şekil 11. Birim hücre dilimi modeli, yarı iletken içerisinde yer alan NP

Rastgele tasarlanan optik parçacık ve yapılar için, karmaşık sınır koşulları ve ışıkla etkileşimleri nedeniyle genellikle analitik bir çözüm bulmak mümkün değildir. Bu

nedenle, hazırlanan modellerin benzetimi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu yöntemde model, sonlu eleman adı verilen daha küçük bileşenlere ayrılır ve daha basit olan bu elemanların çözümlenmesi ile bir denklem sistemi elde edilir. Oluşturulan modelde dört yüzlü elemanlar kullanılmıştır ve ortalama eleman kalitesi 0.6554'tür. NP için daha küçük boyutlu elemanlar kullanılırken yarı iletken için daha büyük boyutlu elemanlar kullanılmıştır. Böylece çözümleme kalitesi ve zamanı arasında bir denge elde edilmiştir.

Hücre içerisine ışık yansımasız bir şekilde, Şekil 11'de görülen $-x$ yönünde ve dik açıyla verilmektedir. Model y ve z yönlerinde periyodik koşullara sahiptir. Verilen elektromanyetik dalganın elektrik alan polarizasyonu $+z$ yönünde, manyetik alan polarizasyonu $+y$ yönündedir. Bu ışığın frekans dağılımı Planck'ın kara cisim ışıması modeli kullanılarak deniz seviyesi Güneş spektral ışınımının analitik modellemesiyle oluşturulmaktadır.

Temel modelde gerçekçi bir hücre yapısını modellemek amacıyla ortam/yarı iletken için Si (Aspnes [50]) ve NP için Ag (Hagemann [51]) elementleri veri setleri kullanılmıştır. Veri setleri ile oluşturulan model "Gerçekçi Model" olarak adlandırılmaktadır. Bu modelin yanında gerçekçi veri setlerinin doğrusal olmayan dağılımlarından kaynaklı rastgeleliği azaltmak için bir de "Kontrol Modeli" oluşturulmuştur. Bu kontrol modelinde kullanılan kırılma indisleri rezonans frekansında gerçekçi model ile aynı değerlere sahiptir ve malzemelerin emilim katsayıları her frekans için sabit tutulmuştur.

Çizelge 1. Kontrol modeli için belirlenen kırılma indisleri

$\boldsymbol{n_{yi}}$	$\boldsymbol{k_{yi}}$	$\boldsymbol{n_{np}}$	$\boldsymbol{k_{np}}$
3.71	$\frac{\lambda}{101\ \mu m}$	$\frac{\lambda}{2.883\ \mu m}$	$\frac{\lambda}{143.4\ nm}$

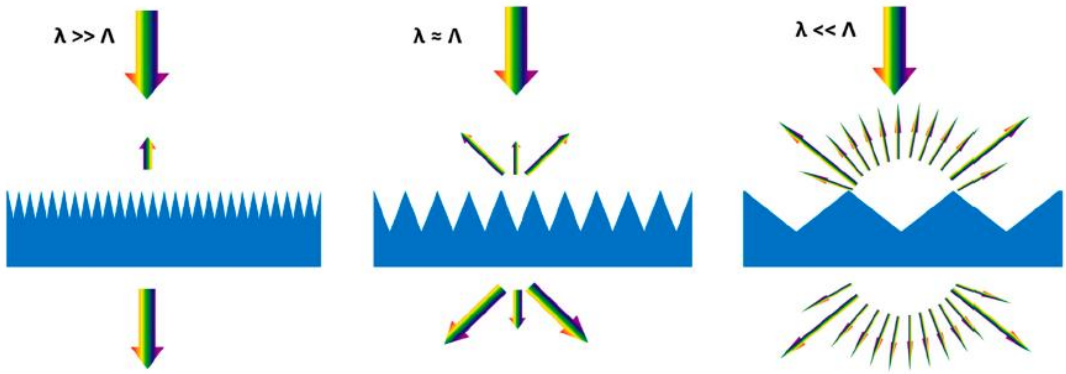
Burada n_{yi} ve k_{yi} Si gerçek ve sanal kırılma indisleri, n_{np} ve k_{np} Ag gerçek ve sanal kırılma indisleridir. λ dalga boyudur ve emilim katsayısının değişen frekanslarda sabit kalmasını sağlar. Gerçekçi modelin rezonansa girdiği 780 nm dalga boyunda iki model de aynı kırılma indisi değerlerine sahiptir. n_{yi} ve k_{np}'nin farklı değişim oranlarına sahip olması rezonans noktasının ortaya çıkmasını sağlar.

Oluşturulan modelde NP konumu, boyut ve sıklığı, hücre boyutları, ortam ve NP kırılma indisleri vs. tamamen parametrik olarak hazırlanmıştır. Böylece farklı

parametrelerin plazmonik rezonansa etkileri rahatlıkla incelenebilmektedir. Temel modelde NP yarıçapı 10 nm ve NP'ler arası boşluk 50 nm'dir.

Sonsuz NP dizisinin yer aldığı yapıyı periyodik dilimlerine ayırmak model kesit alanını sadeleştirse de gerçekçi bir hücrenin yüksekliği bu kesit alanına oranla çok daha büyüktür. Bu da NP'lerin kalın bir hücre yapısı içerisindeki etkisinin tutarlı bir şekilde modellenmesine ve hesaplanmasına engel olur. Bu probleme çözüm olarak kısa birim hücre modeli kullanarak gerçekçi bir hücre içerisinde güç hesaplarının yapılabilmesini sağlamak amacıyla "4.2. Kayıplı Ortamda Nanoparçacık Karakteristiği" bölümünde analitik bir yöntem geliştirilmiştir. Benzetim sonrası elde edilen veriler üzerinde gerekli analitik hesaplamalar yapılmıştır.

4.2. Kayıplı Ortamda Nanoparçacık Karakteristiği



Şekil 12. Belirli bir dalga boyu için farklı periyotlara sahip dokulu yüzeyler üzerinde meydana gelen optik etkiler. λ dalga boyu ve Λ örüntü periyodudur. [19]

Etkin ortam teorileri, gelen ışık dalga boyundan çok daha küçük boyutlu yapılardan oluşan periyodik dokulu yüzeylerin optik özelliklerini açıklamak için kullanılabilir [52]. Şekil 12'de görüldüğü gibi teoriye göre, ışık dalga boyundan çok daha küçük boyutlu yapılar yansımayı ve iletimi etkiler ancak ışık yönlendirme etkisine sahip olmadıkları için ışık yayılma yönünde herhangi bir değişikliğe neden olmazlar.

Bu teoriye dayanarak, çok küçük boyutlardaki plazmonik NP'lerden oluşan sonsuz dizinin, üzerine düşen ışığın yönünde değişiklik meydana getirmeyeceği varsayılarak kayıplı ortamda NP karakteristiği belirlemek için kullanışlı bir formülasyon ortaya çıkarılmıştır. Bu formülasyonun tutarlılığı yapılan benzetimler ile test edilmiş ve NP karakteristik özelliklerini etkileyen parametrelerin etkileri araştırılmıştır. Bu yöntem yarı iletken içerisine gömülü NP dizisinin optik özelliklerinin yarı iletkenin

kalınlığından bağımsız olarak incelenebilmesini sağlamanın yanı sıra farklı malzemeler arasında veya çok eklemli karmaşık yapılar içerisinde bulunan NP'lerin incelenebilmesini de sağlamaktadır.

Işık, yarı iletken gibi kayıplı bir ortamdan geçtiğinde, ışığın emilmesi ve elektron-delik çiftlerinin oluşması sonucu ışık şiddeti, mesafeye göre aşağıdaki şekilde azalır [49].

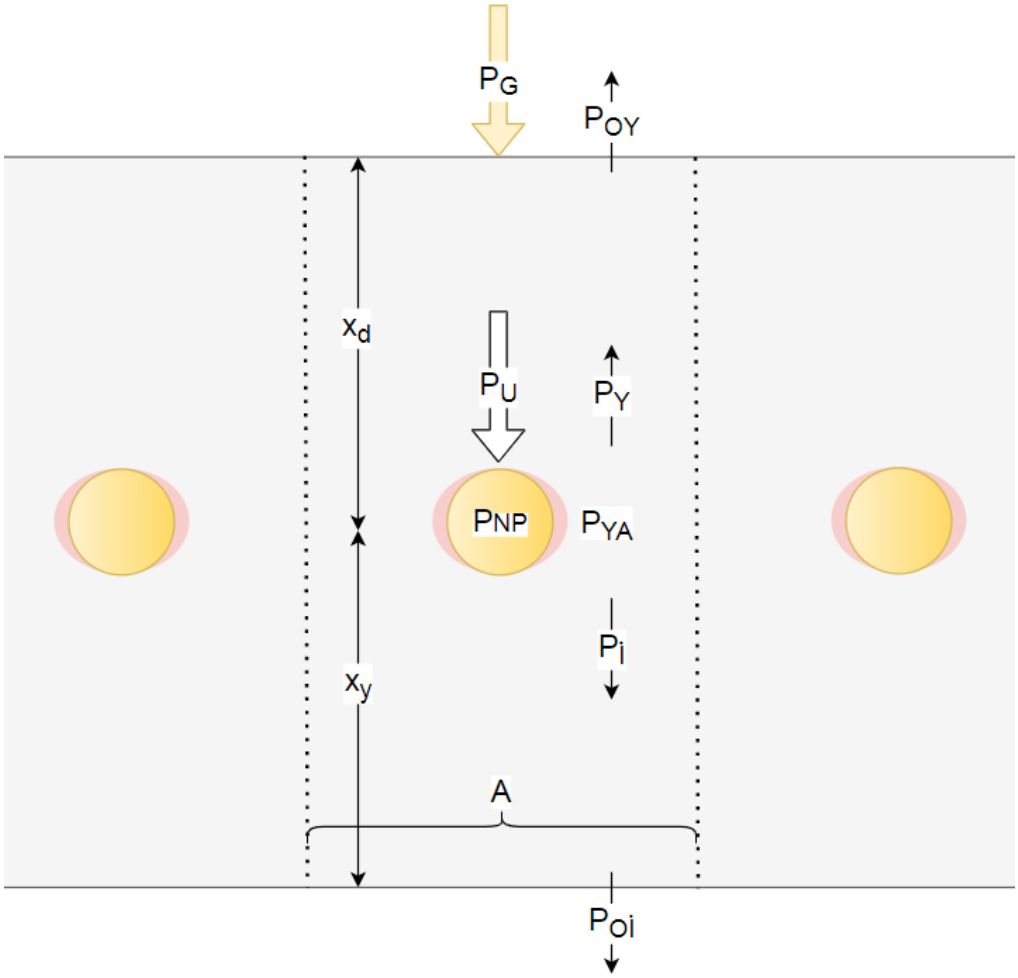
$$I = I_0 \, e^{-\alpha x} \tag{47}$$

Burada I ışık şiddeti, I_0 başlangıç ışık şiddeti, x mesafe ve α emilim katsayısıdır. Emilim katsayısı kırılma indisinin sanal bileşeniyle aşağıdaki ilişkiye sahiptir.

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \tag{48}$$

k sanal kırılma indisi ve λ dalga boyudur.

Bu azalma oranı kullanılarak Şekil 13'te görülen karakteristik özellikler hesaplanabilmektedir.



Şekil 13. NP konumu ve ışık etkileşimi ile ilgili parametreler. P güç, x uzunluktur.

Şekil 13'te kullanılan yöntem ile ilgili parametre ve özellikler verilmiştir. P_G giriş gücü, P_{OY} incelenen ortamdan yansıtılan güç, $P_{O\text{İ}}$ incelenen ortamdan iletilen güç, P_U NP'ye ulaşan güç, P_Y NP tarafından yansıtılan güç, $P_{\text{İ}}$ NP tarafından iletilen güç, P_{NP} NP tarafından soğurulan güç, P_{YA} yakın alan bölgesinde arttırılan elektrik alan sebebiyle yarı iletken tarafından emilen güç, x_d NP'nin yarı iletkenin üst yüzeyinden derinliği, x_y NP'nin yarı iletkenin alt yüzeyinden yüksekliği, A ise incelenen bölgenin kesit alanıdır. Burada P_G, P_{OY} ve $P_{O\text{İ}}$ güçleri ölçülmüş olan NP dizisinin yansıma, iletim ve emilim özellikleri incelenmektedir.

İncelenen bölgenin giriş gücü (P_G), giriş ışık şiddeti (I_G) ile aşağıdaki ilişkiye sahiptir.

$$P_G = A\, I_G \tag{49}$$

NP üzerine ulaşan güç (P_U), gücün mesafeye göre yarı iletken içerisinde azalma oranı kullanılarak giriş gücünden hesaplanabilir.

$$P_U = P_G\, e^{-\alpha\, x_d} \tag{50}$$

NP üzerine ulaşan gücün giriş gücüne oranı ($\%P_U$) aşağıda verilmiştir.

$$\%P_U = \frac{P_U}{P_G} = e^{-\alpha\, x_d} \tag{51}$$

NP tarafından yansıtılan gücün giriş gücüne oranı ($\%P_Y$), gücün mesafeye göre yarı iletken içerisinde azalma oranı kullanılarak yansıtılan güçten (P_{OY}) hesaplanabilir.

$$\%P_Y = \frac{P_Y}{P_G} = \frac{P_{OY}}{P_G}\, e^{\alpha\, x_d} \tag{52}$$

Burada ışığın NP tarafından yansıtıldıktan sonra x_d derinliği kadar mesafe katettikten sonra yarı iletkeni terkettiği göz önünde bulundurulmuştur.

Bu oran, NP üzerine ulaşan güce göre normalize edildiğinde yarı iletken kalınlığından bağımsız bir karakteristik ($\%P_{Y.norm}$) elde edilebilir.

$$\%P_{Y.norm} = \frac{P_Y}{P_U} = \frac{\%P_Y}{\%P_U} \tag{53}$$

NP tarafından iletilen gücün giriş gücüne oranı ($\%P_{\text{İ}}$), gücün mesafeye göre yarı iletken içerisinde azalma oranı kullanılarak iletilen güçten ($\%P_{O\text{İ}}$) hesaplanabilir.

$$\%P_{\text{İ}} = \frac{P_{\text{İ}}}{P_G} = \frac{P_{O\text{İ}}}{P_G}\, e^{\alpha\, x_y} \tag{54}$$

Burada ışığın NP tarafından iletildikten sonra x_y yüksekliği kadar mesafe katettikten sonra yarı iletkeni terkettiği göz önünde bulundurulmuştur.

Bu oran NP üzerine ulaşan güce göre normalize edildiğinde yarı iletken kalınlığından bağımsız bir karakteristik ($\%P_{İ.norm}$) elde edilebilir.

$$\%P_{İ.norm} = \frac{P_İ}{P_U} = \frac{\%P_İ}{\%P_U} \tag{55}$$

Sistem içerisinde emilen güç (P_E), yansıtılmayan ve iletilmeyen gücü kapsamaktadır. NP üzerine ulaşan güçten NP tarafından yansıtılan ve iletilen gücün çıkartılmasıyla emilen toplam güç aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$\%P_E = \frac{P_E}{P_G} = \%P_U - \%P_Y - \%P_İ \tag{56}$$

Emilen bu gücün bir kısmı NP tarafından soğurulmaktadır. NP'lerin herhangi bir şekle sahip olabilmelerinden dolayı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak güç kayıp yoğunluğunun hacim integrali ile hesaplanmaktadır.

$$\%P_{NP} = \frac{P_{NP}}{P_G} = \frac{\iiint_{NP} Q_{kayıp} dV}{P_G} \tag{57}$$

Burada $Q_{kayıp}$, NP güç kayıp yoğunluğu ve V hacimdir.

Bu oran NP üzerine ulaşan güce göre normalize edildiğinde yarı iletken kalınlığından bağımsız bir karakteristik ($\%P_{NP.norm}$) elde edilebilir.

$$\%P_{NP.norm} = \frac{P_{NP}}{P_U} = \frac{\%P_{NP}}{\%P_U} \tag{58}$$

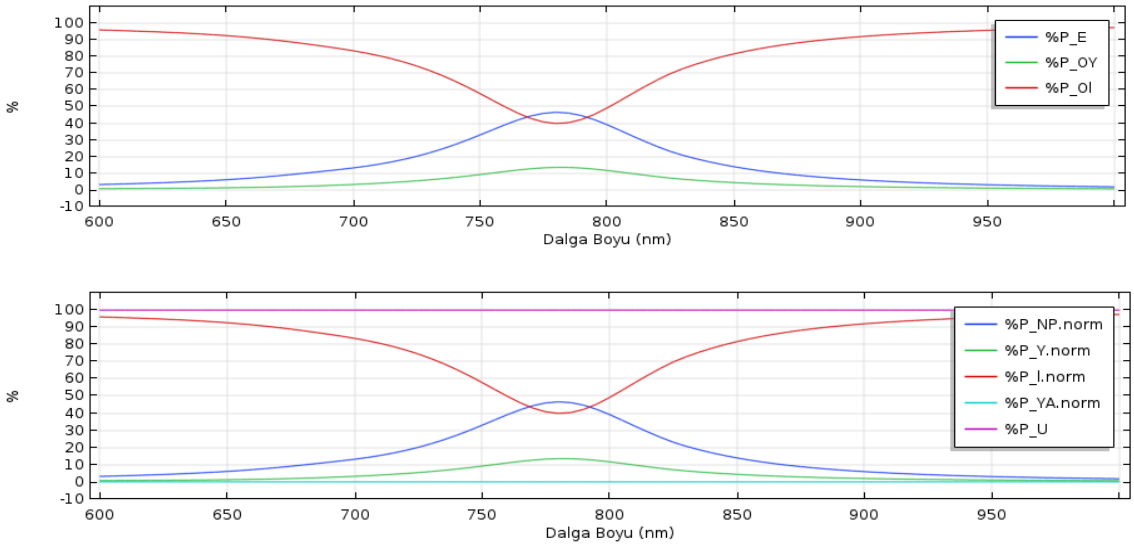
Plazmonik NP'lerin yakın alanda elektrik alanı yoğunlaştırmaları sebebiyle oluşan bir emilim karakteristiği daha vardır. Yakın alanda oluşan bu elektrik alan yoğunluğu yarı iletkenin emilim oranını da bu bölgede arttırır. Toplam emilime dahil olan yakın alan emiliminin giriş gücüne oranı ($\%P_{YA}$) toplam emilimden NP emiliminin çıkarılmasıyla elde edilebilir.

$$\%P_{YA} = \frac{P_{YA}}{P_G} = \%P_E - \%P_{NP} \tag{59}$$

Bu oran NP üzerine ulaşan güce göre normalize edildiğinde yarı iletken kalınlığından bağımsız bir karakteristik ($\%P_{YA.norm}$) elde edilebilir.

$$\%P_{YA.norm} = \frac{P_{YA}}{P_U} = \frac{\%P_{YA}}{\%P_U} \tag{60}$$

Dolayısıyla normalize edilmiş güçler, nanoparçacığa ulaşan gücün yüzde kaçının NP tarafından soğurulduğunu ($\%P_{NP.norm}$), geri yansıtıldığını ($\%P_{Y.norm}$), geçirildiğini ($\%P_{\text{İ}.norm}$) ve yakın alan artışıyla yarı iletken tarafından emildiğini ($\%P_{YA.norm}$) verir. Bu güç oranlarının toplamı bire eşittir. Güç oranları nanoparçacığa ulaşan güce göre normalize edilmiş olduğundan nanoparçacık karakteristiklerinin yarı iletkenin kalınlığından bağımsız olarak incelenebilmesini sağlar. NP dizisinden oluşan metayüzeyin özelliklerini incelemek için sadece bu karakteristikleri kullanmak yeterlidir.



Şekil 14. Kayıpsız ortamda NP karakteristikleri

Şekil 14'te içerisinde kayıplı Ag NP yer alan kayıpsız Si yarı iletken hücre için toplam emilim oranı ($\%P_E$), hücre yansıma oranı ($\%P_{OY}$), hücre iletim oranı ($\%P_{O\text{İ}}$), NP emilim oranı ($\%P_{NP.norm}$), NP yansıma oranı ($\%P_{Y.norm}$), NP iletim oranı ($\%P_{\text{İ}.norm}$), yakın alan emilim oranı ($\%P_{YA.norm}$) ve NP üzerine ulaşan güç oranı ($\%P_U$) verilmiştir. Burada $\%P_{OY}$ ve $\%P_{O\text{İ}}$ oranları;

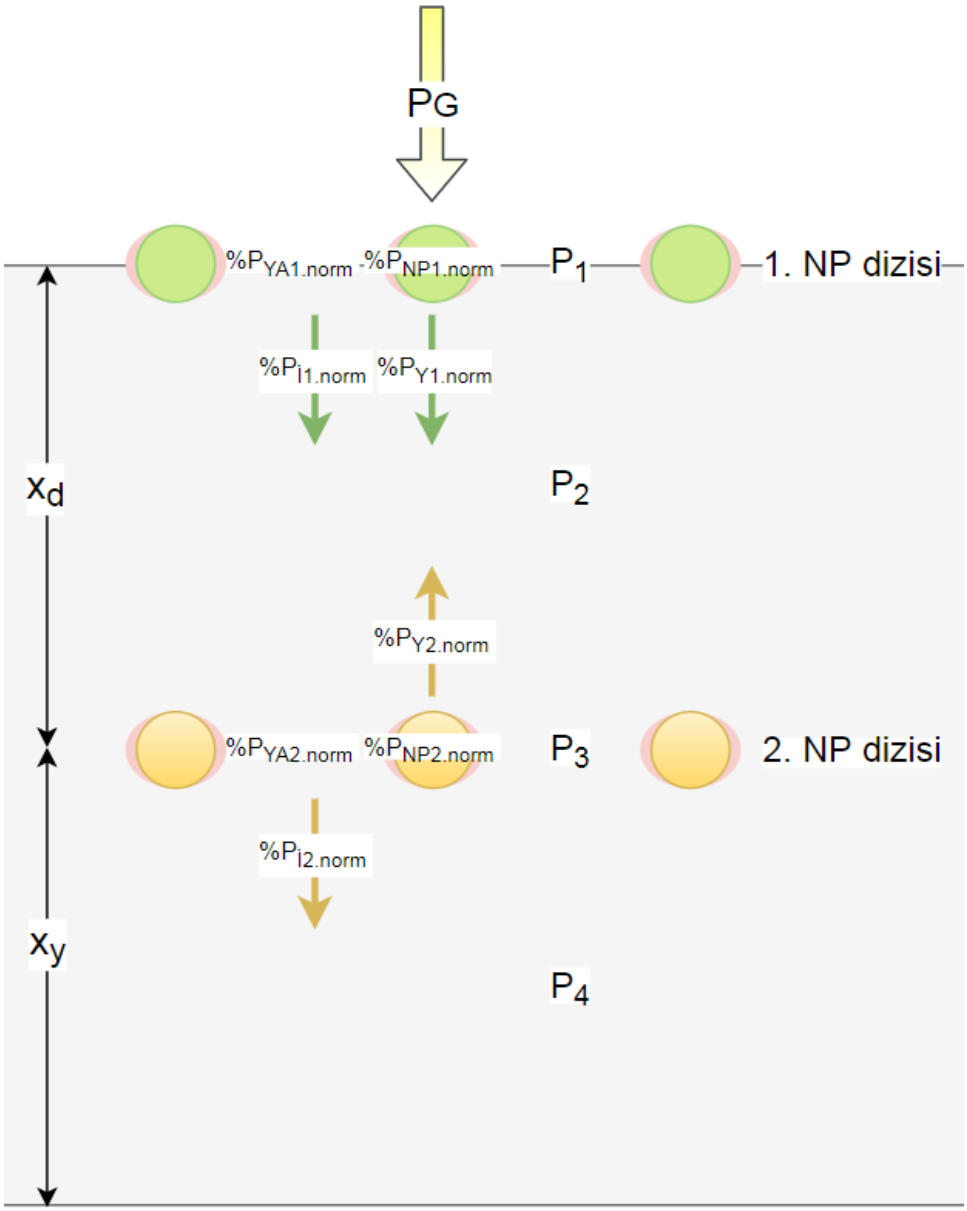
$$\%P_{OY} = \frac{P_{OY}}{P_G} \tag{61}$$

$$\%P_{O\text{İ}} = \frac{P_{O\text{İ}}}{P_G} \tag{62}$$

olarak ifade edilmektedir. Kayıpsız bir ortamda NP üzerine giriş gücünün tamamının ulaşacağı ve yakın alan emiliminin olmayacağı açıktır. Bu sebeple kayıpsız ortamda $\%P_U$ %100'e, $\%P_{NP.norm}$ $\%P_E$'ye, $\%P_{\text{İ}.norm}$ $\%P_{O\text{İ}}$'ye, $\%P_{Y.norm}$ $\%P_{OY}$'ye, $\%P_{YA.norm}$ ise %0'a eşit çıkmıştır.

Bu yöntemde NP'lerin yarı iletkenden çok daha küçük ve noktasal oldukları varsayılmıştır. NP'lerin çok küçük boyutlara sahip olmaları sebebiyle kapladıkları alandaki yarı iletkenin emilimi ihmal edilmektedir. Bu emilimin NP emilimine kıyasla çok küçük olması da ihmal edilmesinin bir sebebidir.

Benzetim modellerinde ışık doğrudan dielektrik içerisine verildiği için ortamlar arası geçiş ve dolayısıyla da yüzey yansıması olmamaktadır. Bu sebeple buradaki kullanım için dielektrik yüzey yansıması bulunmamaktadır, fakat yüzey yansımasının geçerli olduğu durumlarda hesaba dahil edilmelidir.



Şekil 15. NP dizi karakteristikleri (yeşil ve sarı) ile yarı iletken (gri) üzerinde hapsedilen güçler

Şekil 15'te verilen karakteristikler kullanılarak sonsuz NP dizileri ile ışığın hapsedilmesi yoluyla bu diziler arasında kalan bölgedeki emilim (P_2), 2. NP dizisinin altında kalan bölgedeki emilim (P_4) ve NP dizilerinde yakın alan emilimleri (P_1, P_3) hesaplanacaktır.

1. ve 2. NP dizileri arasında kalan bölgede ışık iki dizi arasında yansıtılarak hapsedilir. Her yansımada yarı iletken tarafından emilen güç (P_2) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$P_2 = P_G \, \%P_{\text{İ}1.norm} \, (1 - \%P_U) \, [1 + \%P_U \, \%P_{Y2.norm} + \%P_U^2 \, \%P_{Y1.norm} \, \%P_{Y2.norm} + \%P_U^3 \, \%P_{Y1.norm} \, \%P_{Y2.norm}^2 + \%P_U^4 \, \%P_{Y1.norm}^2 \, \%P_{Y2.norm}^2 + \dots] \quad (63)$$

Bu ifade sonsuz seri olarak yazılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$P_2 = P_G \%P_{\text{İ}1.norm}(1 - \%P_U)(1 + \%P_U \%P_{Y2.norm}) \sum_{i=0}^{\infty} (\%P_U^2 \%P_{Y1.norm} \%P_{Y2.norm})^i \quad (64)$$

Bu sonsuz serinin çözümü yapıldığında P_2 aşağıdaki şekilde bulunur.

$$P_2 = P_G \frac{\%P_{\text{İ}1.norm} \, (1 - \%P_U) \, (1 + \%P_U \, \%P_{Y2.norm})}{1 - \%P_U^2 \, \%P_{Y1.norm} \, \%P_{Y2.norm}} \quad (65)$$

İletim sonrası 2. dizinin altında kalan bölgede yarı iletken tarafından emilen güç P_4 ile ifade edilmektedir. Bu gücü hesaplamak için öncelikle altta kalan bölgeye iletilen gücün hesaplanması gerekmektedir. NP'ler arasında gerçekleşen her yansımada bu gücün bir kısmı alt bölgeye aktarılır. 2. dizi tarafından alt katmana iletilen toplam güç aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$P_{iletilen} = P_G \, \%P_{\text{İ}1.norm} \, \%P_{\text{İ}2.norm} \, \%P_U \, [1 + \%P_U^2 \, \%P_{Y1.norm} \, \%P_{Y2.norm} + \%P_U^4 \, \%P_{Y1.norm}^2 \, \%P_{Y2.norm}^2 + \dots] \quad (66)$$

Bu ifade sonsuz seri olarak yazılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$P_{iletilen} = P_G \, \%P_{\text{İ}1.norm} \, \%P_{\text{İ}2.norm} \, \%P_U \sum_{i=0}^{\infty} (\%P_U^2 \, \%P_{Y1.norm} \, \%P_{Y2.norm})^i \quad (67)$$

Bu sonsuz serinin çözümü yapıldığında $P_{iletilen}$ aşağıdaki şekilde bulunur.

$$P_{iletilen} = P_G \frac{\%P_{\text{İ}1.norm} \, \%P_{\text{İ}2.norm} \, \%P_U}{1 - \%P_U^2 \, \%P_{Y1.norm} \, \%P_{Y2.norm}} \quad (68)$$

İletilen bu güçten ne kadarının yarı iletken tarafından emileceği (P_4) aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$P_4 = P_{iletilen} \, (1 - e^{-\alpha \, x_y}) = P_G \frac{\%P_{\text{İ}1.norm} \, \%P_{\text{İ}2.norm} \, \%P_U}{1 - \%P_U^2 \, \%P_{Y1.norm} \, \%P_{Y2.norm}} (1 - e^{-\alpha \, x_y}) \quad (69)$$

NP'ler tarafından yakın alanda arttırılan elektrik alan sebebiyle yarı iletken emiliminde artış gerçekleşir. Bu sebeple yansımalar sırasında NP'ler üzerine düşen gücün bir kısmı da Şekil 15'te P_1 ve P_3 ile gösterilen şekilde yarı iletken tarafından emilir. P_1 ve P_3, NP'ler üzerine düşen güçlerden aşağıdaki şekilde bulunabilirler.

$$P_1 = P_G\ \%P_{YA1.norm} + P_G\ \%P_{i1.norm}\ \%P_{YA1.norm}\ \%P_U^2\ \%P_{Y2.norm}\ [1+\%P_U^2\ \%P_{Y1.norm}\ \%P_{Y2.norm} + \%P_U^4\ \%P_{Y1.norm}^2\ \%P_{Y2.norm}^2 + \dots] \quad (70)$$

$$P_3 = P_G\ \%P_{i1.norm}\ \%P_{YA2.norm}\ \%P_U\ [1 + \%P_U^2\ \%P_{Y1.norm}\ \%P_{Y2.norm} + \%P_U^4\ \%P_{Y1.norm}^2\ \%P_{Y2.norm}^2 + \dots] \quad (71)$$

Bu ifadeler sonsuz seri olarak yazılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$P_1 = P_G \%P_{YA1.norm}(1+\%P_{i1.norm}\%P_U^2\%P_{Y2.norm}\sum_{i=0}^{\infty}(\%P_U^2\%P_{Y1.norm}\%P_{Y2.norm})^i) \quad (72)$$

$$P_3 = P_G \%P_{i1.norm}\ \%P_{YA2.norm}\ \%P_U \sum_{i=0}^{\infty}(\%P_U^2\ \%P_{Y1.norm}\ \%P_{Y2.norm})^i \quad (73)$$

Bu sonsuz serilerin çözümü yapıldığında P_1 ve P_3 aşağıdaki şekilde bulunur.

$$P_1 = P_G\ \%P_{YA1.norm}\ (1 + \frac{\%P_{i1.norm}\ \%P_U^2\ \%P_{Y2.norm}}{1 - \%P_U^2\ \%P_{Y1.norm}\ \%P_{Y2.norm}}) \quad (74)$$

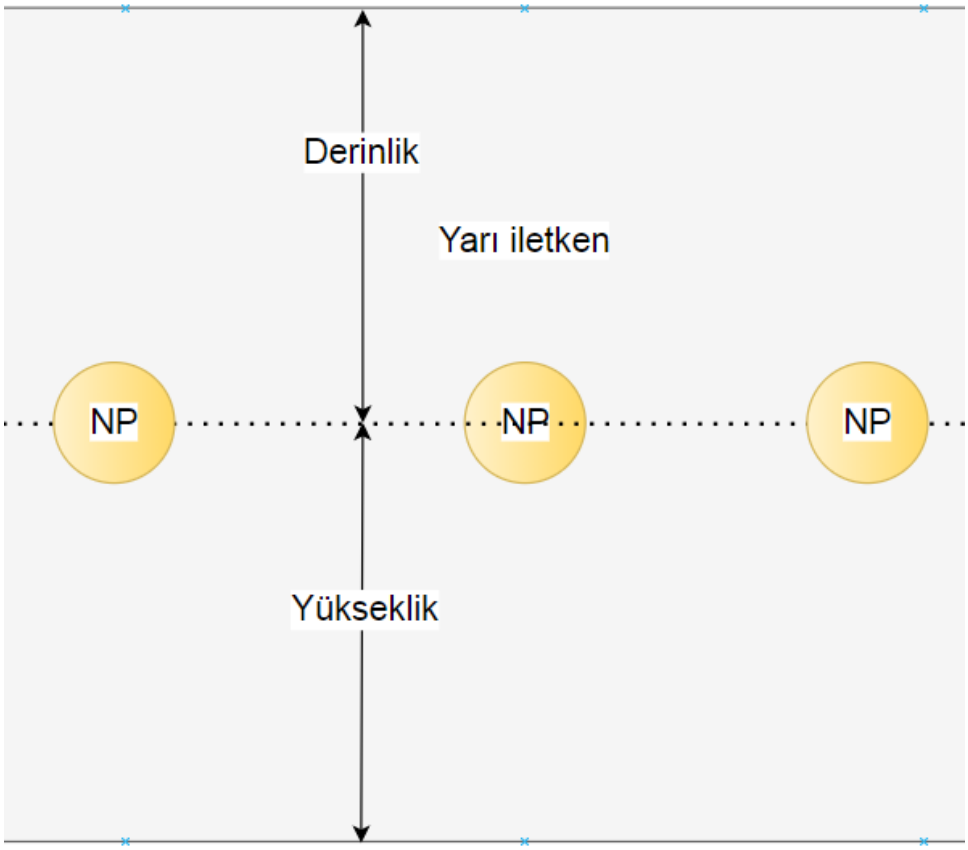
$$P_3 = P_G \frac{\%P_{i1.norm}\%P_{YA2.norm}\ \%P_U}{1 - \%P_U^2\ \%P_{Y1.norm}\ \%P_{Y2.norm}} \quad (75)$$

Farklı yapılarda benzer şekilde hesaplamalar yapılarak sadece normalize edilmiş NP karakteristikleri ile yarı iletkende toplam emilimi hesaplamak mümkündür. Farklı malzemelerden oluşan katmanlar arasına yerleştirilen NP'ler için de bu hesaplamaları yapmak mümkündür. Bu koşulda dikkat edilmesi gereken unsur emilim katsayılarının formüllerin geçerli olduğu katmanlara uygun olarak belirlenmesidir.

4.3. Parametreler ve Etkileri

Kayıplı ortam içerisinde bulunan NP'lerin karakteristik özelliklerini belirlemek adına bir önceki kısımda ileri sürülen yöntem, değişik parametrelerin etkilerini belirlemek için bu kısımda kullanılmıştır. Buradan elde edilen veriler NP'lerin güneş hücresi içerisinde optimal kullanımı ve kullanım kısıtlamaları hakkında bilgi verecektir.

4.3.1. Derinlik ve Yüksekliğin Etkileri



Şekil 16. Yarı iletken içerisinde NP konum parametreleri, derinlik ve yükseklik

Şekil 16'da belirtildiği şekilde nanoparçacığın hücre içerisindeki derinlik ve yüksekliği değiştirilmiş ve etkileri incelenmiştir. Derinlik, NP'nin yarı iletken üst yüzeyinden uzaklığını, yükseklik ise NP'nin yarı iletken alt yüzeyinden uzaklığını belirtir. Bu test, ileri sürülen NP karakteristiği test etme yönteminin doğruluğunu ve işe yararlılığını da destekler niteliktedir. NP'lerin yer aldığı düzlem soğurma, iletim, yansıma ve elektrik alan arttırma özelliklerine sahiptir ve bir metayüzey gibi davranır. Arttırılan elektrik alan da bu düzlem üzerinde yarı iletken tarafından daha fazla emilim yapılmasını sağlar.

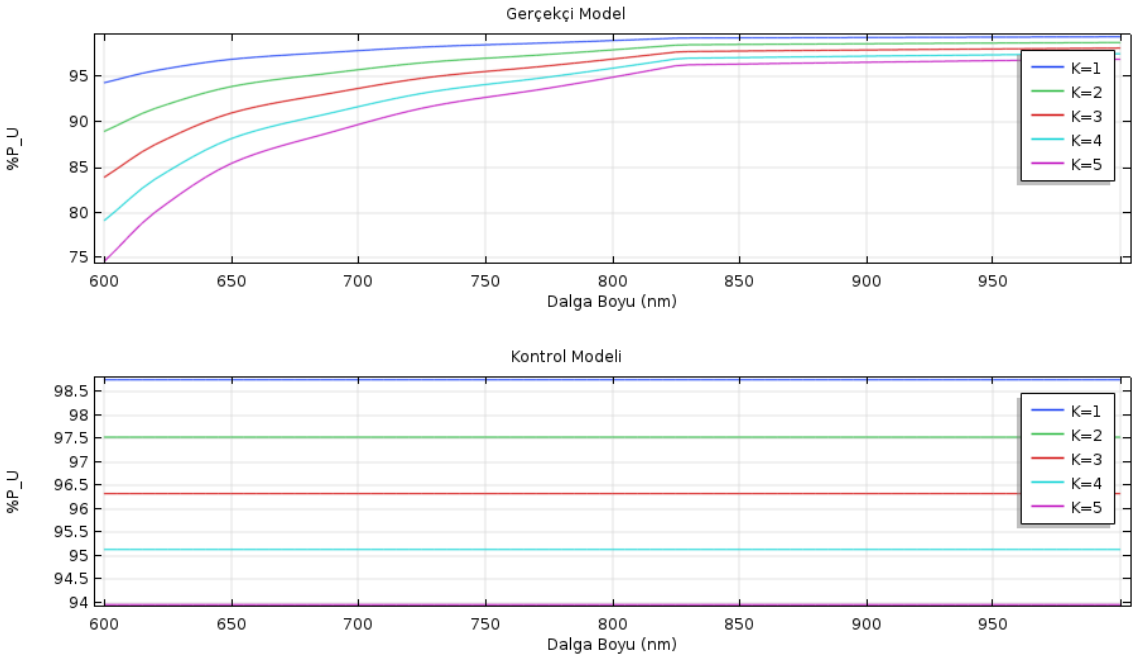
Bu dört özellik, düzlem üzerine düşen güce göre normalize edildiğinde düzlem dışında yapılan değişikliklerden etkilenmemelidir. Bu da ölçülen normalize edilmiş karakteristik değerlerin NP'nin ve dolayısıyla da düzlemin yarı iletken üzerinde bulunduğu derinlik ve yükseklikten etkilenmemesi gerektiğini gösterir.

4.3.1.1. Derinliğin Etkileri

Yüksekliğin sabit tutulup, derinliğin değiştirilmesiyle elde edilen sonuçlar, kontrol ve gerçekçi model için aşağıda verilmiştir. Benzetimde kullanılan derinlik değerleri şu şekildedir:

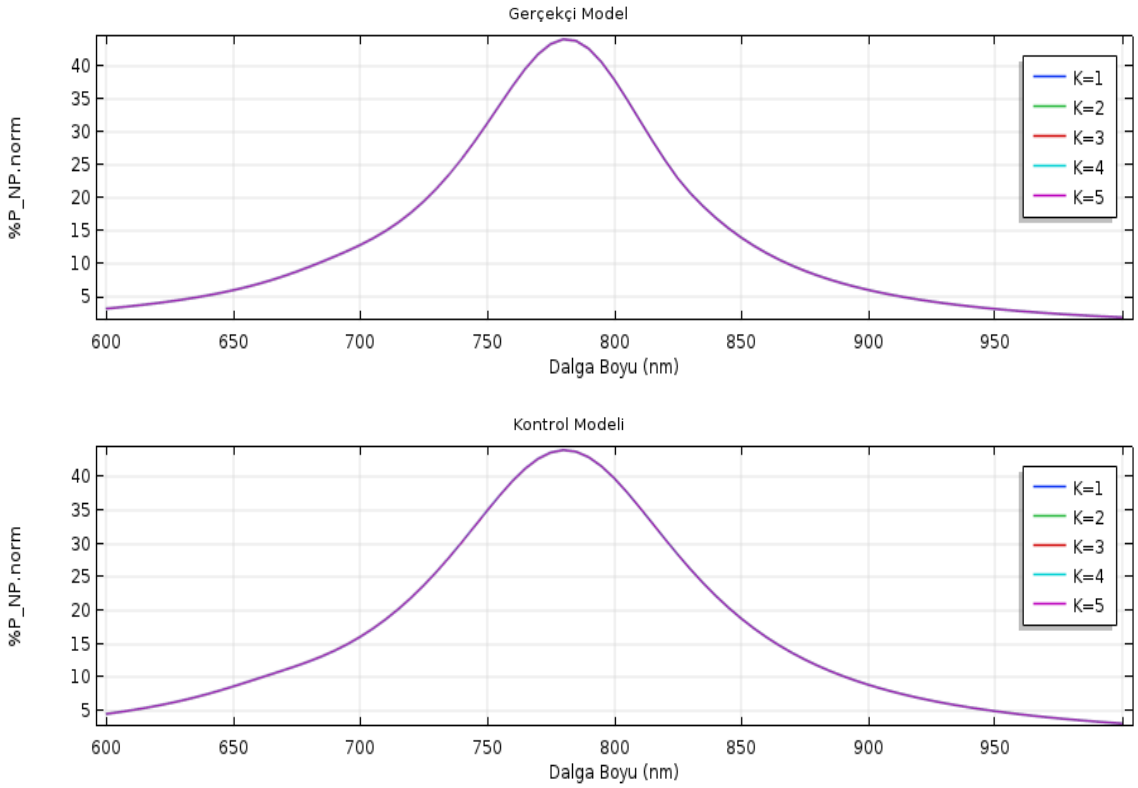
Derinlik = K×100 (nm), K = 1, 2, 3, 4, 5

Yükseklik = 500 (nm)



Şekil 17. Gerçekçi ve kontrol modelleri için derinliğe bağlı olarak NP'lere ulaşan güç oranı ($\%P_U$)

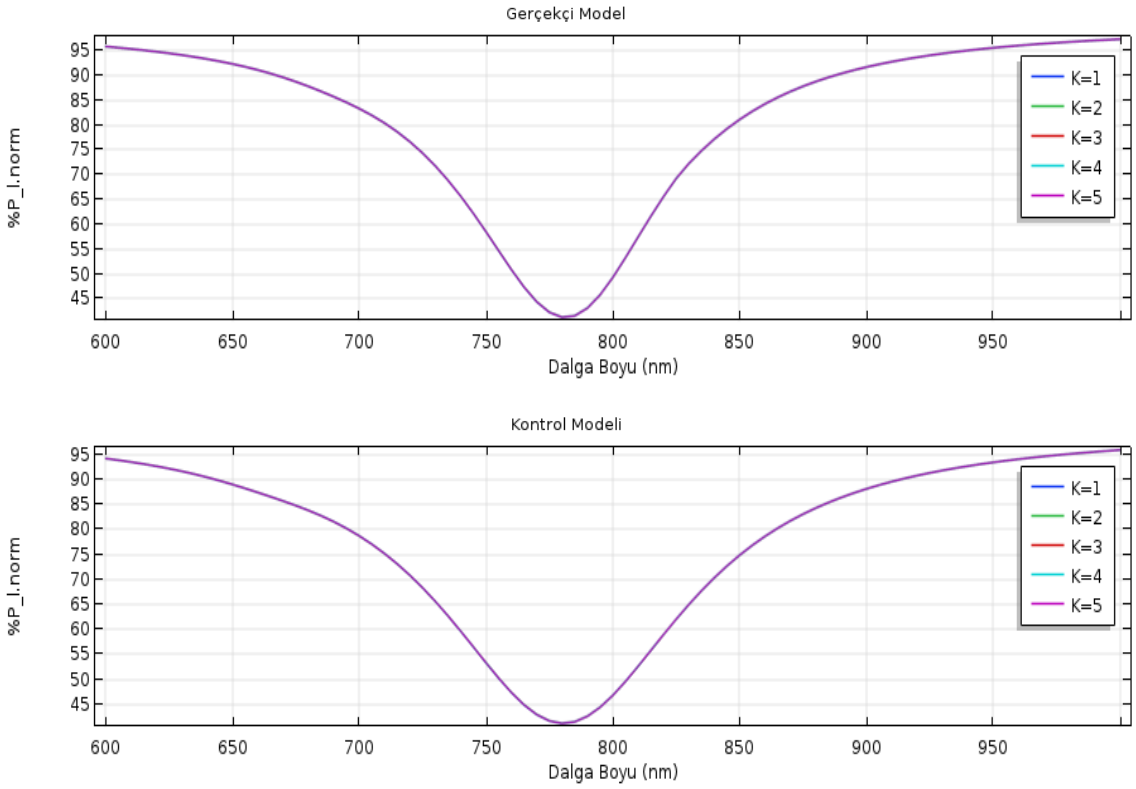
Şekil 17'de değişen derinlik için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün giriş gücüne oranı verilmiştir. Derinlik arttıkça yarı iletken tarafından emilen gücün artması sebebiyle NP düzlemine ulaşan güç oranı azalmaktadır. Örneğin kontrol modelinde derinlik 100 nm iken gücün %98.75'i ulaşırken, 500 nm iken %94'ü ulaşmaktadır.



Şekil 18. Gerçekçi ve kontrol modelleri için derinliğe bağlı NP emilim oranı ($\%P_{NP.norm}$)

Şekil 18'de değişen derinlik için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün NP tarafından soğurulma yüzdesi verilmiştir. Bütün derinlik değerlerinde rezonans frekansında soğurma %45 civarındadır ve değişmemektedir.

Düzlem üzerine ulaşan gücün %45'i NP tarafından soğurulmaktadır. Bu parametre normal kullanımda gelen gücün ısıya dönüştürülmesi ile kayıplara yol açması sebebiyle düşük tutulması istenen bir değerdir. Artan derinlik ile birlikte NP düzlemi üzerine ulaşan güç oranı azaldıkça toplam yarı iletken emiliminde bu kaybın etkisi de azalacaktır, fakat bu NP'nin etkinliğini de azaltır. NP'lerin fotovoltaik olarak kullanıldığı doğrudan plazmonik güneş hücrelerinde ise NP tarafından emilen gücün bir kısmı oluşan sıcak elektronların toplanarak akıma dönüştürülmesi ile geri kazanılabilir.

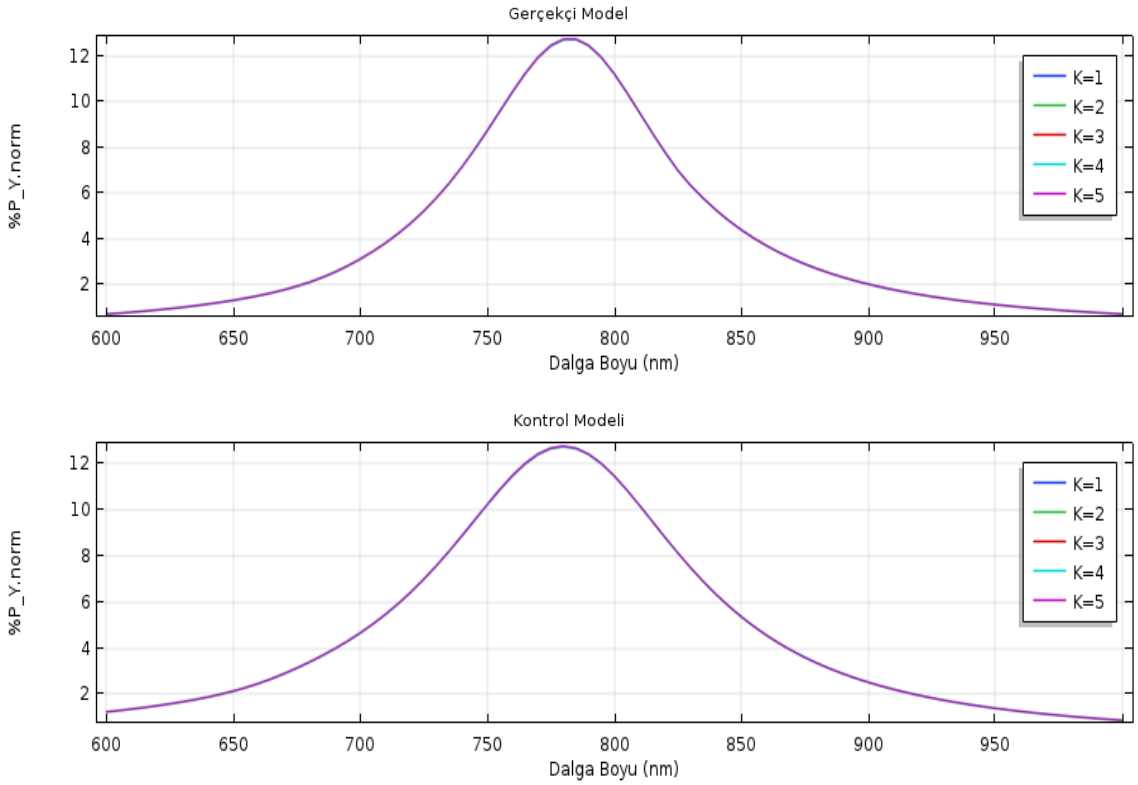


Şekil 19. Gerçekçi ve kontrol modelleri için derinliğe bağlı NP iletim oranı ($\%P_{\text{İ}.norm}$)

Şekil 19'da değişen derinlik için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün iletim yüzdesi verilmiştir. Bütün derinlik değerlerinde rezonans frekansında iletim %40 civarındadır ve değişmemektedir.

İletimin düşük veya yüksek olması NP'lerin kullanım şekline göre iyi veya kötü bir özellik olabilir. İletilen güç yarı iletken tarafından NP düzlemi sonrasında emileceği için düzlem sonrası emilimin arttırılması istendiği durumda bu değer arttırılmalı, gücün düzlem öncesine hapsedilmesi istendiği durumda ise bu değer azaltılmalıdır.

Derinliğin yüksekliğe oranının arttırılması durumunda emilimin daha büyük bir kısmı NP düzlemi öncesinde olacaktır. Dolayısıyla iletimin düşük olması gücün daha büyük bir kısmının bu alanda hapsedilmesini sağlayabilir.

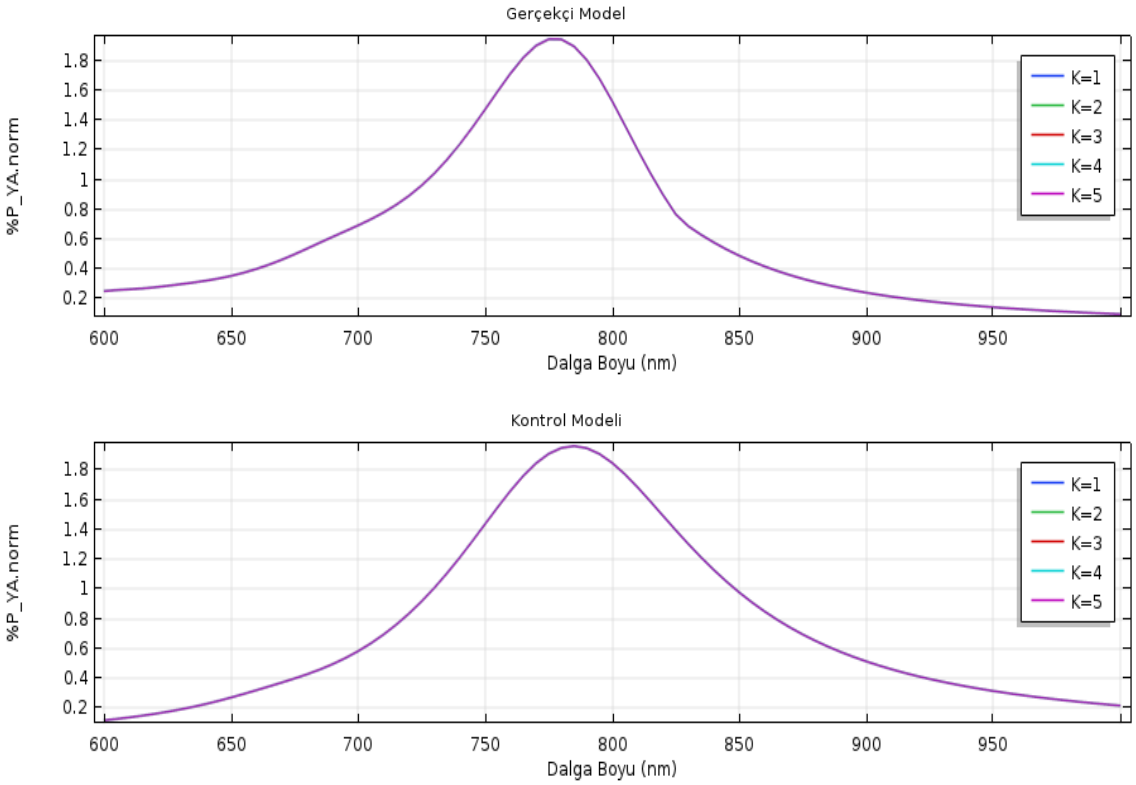


Şekil 20. Gerçekçi ve kontrol modelleri için derinliğe bağlı NP yansıma oranı ($\%P_{Y.norm}$)

Şekil 20'de değişen derinlik için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün yansıma yüzdesi verilmiştir. Bütün derinlik değerlerinde rezonans frekansında yansıma %13 civarındadır ve değişmemektedir.

Yansımanın düşük veya yüksek olması aynı iletim gibi NP'lerin kullanım şekline göre iyi veya kötü bir özellik olabilir. Yansıtılan güç, yarı iletken tarafından NP düzlemi öncesinde emileceği için düzlem sonrası emilimin arttırılması istendiği durumda bu değer azaltılmalı, gücün düzlem öncesine hapsedilmesi istendiği durumda ise bu değer arttırılmalıdır.

Derinliğin yüksekliğe oranının arttırılması durumunda emilimin daha büyük bir kısmı NP düzlemi öncesinde olacaktır. Dolayısıyla yansımanın yüksek olması gücün daha büyük bir kısmının bu alanda hapsedilmesini sağlayabilir.



Şekil 21. Gerçekçi ve kontrol modelleri için derinliğe bağlı yakın alan emilim oranı ($\%P_{YA.norm}$)

Plazmonik NP'ler yakın alan (YA) bölgesinde elektrik alanı yoğunlaştırarak şiddetlendirir ve bu da bu bölgede yarı iletkenin daha fazla emilim yapmasını sağlar. Şekil 21'de değişen derinlik için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan güce göre yakın alan bölgesinde yarı iletken emilimindeki artışın yüzdesi verilmiştir. Bütün derinlik değerlerinde rezonans frekansında YA emilim artışı %2 civarındadır ve değişmemektedir.

YA emilim artışı her durumda yarı iletken emiliminde kazanç sağlar. Bu sebeple bu değerin arttırılması istenilen bir durumdur. NP üzerine ulaşan güç ilk geçişte yarı iletken tarafından emilen güçten çok daha fazla ise YA emiliminin toplam emilen güce katkısı çok daha fazla olur. Artan derinlik ile birlikte yarı iletken emilimi arttıkça ve NP düzlemi üzerine ulaşan güç oranı azaldıkça toplam yarı iletken emiliminde bu değerin etkisi de azalacaktır. Bu sebeple bu özellik ultra ince güneş hücrelerinde önemli ölçüde katkı sağlayabilir.

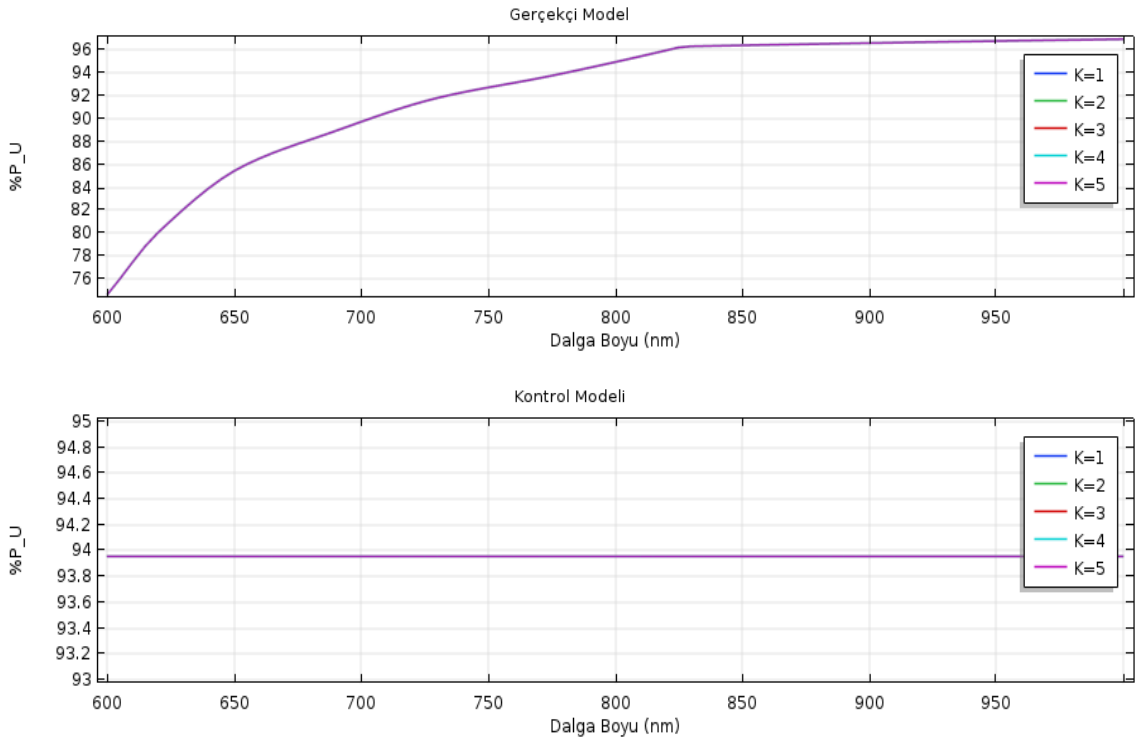
Bu karakteristiklerin NP derinliğinden ve dolayısıyla da NP düzlemi üzerine düşen güçten bağımsız olması NP karakteristik özelliklerinin kayıplı ortamda, ortamın kalınlığından bağımsız bir şekilde incelenebilmesini sağlar. Benzetim sonuçlarında da görüldüğü üzere bu yöntemin tutarlı bir yaklaşım olduğu ve plazmonik NP dizisinden oluşan metayüzeyin dik açıyla gelen ışığı mikron yapılı yüzeyler gibi rastgele yönlerde saçmak yerine tıpkı nano yapılı yüzeylerde olduğu gibi geldiği doğrultuda geri yansıttığı veya doğrudan ilettiği görülmektedir. Durum böyle olmasaydı yarı iletken içerisinde ilerleyen dik ve eğik ışınlar farklı miktarda soğurulmaları sebebiyle yarı iletkenin incelmesinden farklı miktarlarda etkileneceklerdi ve değişen derinlik ile birlikte karakteristiklerde değişmeler meydana gelecekti.

4.3.1.2. Yüksekliğin Etkileri

Derinliğin sabit tutulup, yüksekliğin değiştirilmesiyle elde edilen sonuçlar, kontrol ve gerçekçi model için aşağıda verilmiştir. Benzetimde kullanılan yükseklik değerleri şu şekildedir:

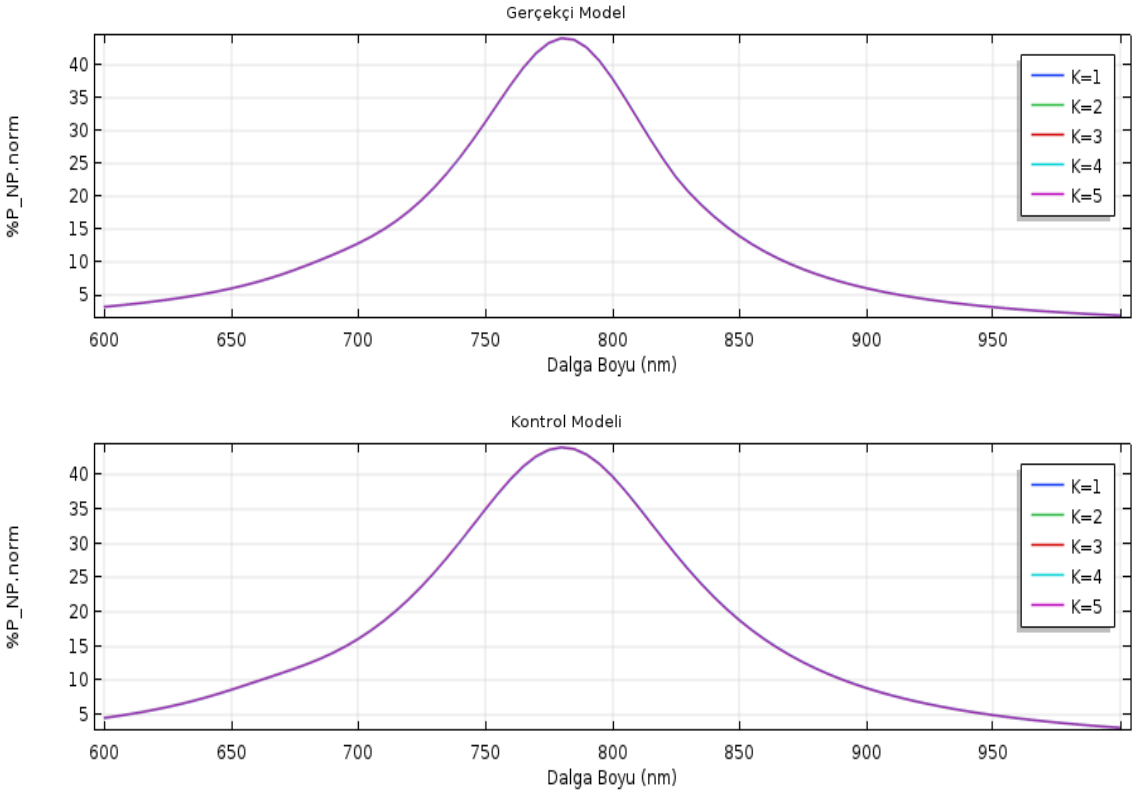
Yükseklik = K×100 (nm), K = 1, 2, 3, 4, 5

Derinlik = 500 (nm)



Şekil 22. Gerçekçi ve kontrol modelleri için yüksekliğe bağlı olarak NP'lere ulaşan güç oranı ($\%P_U$)

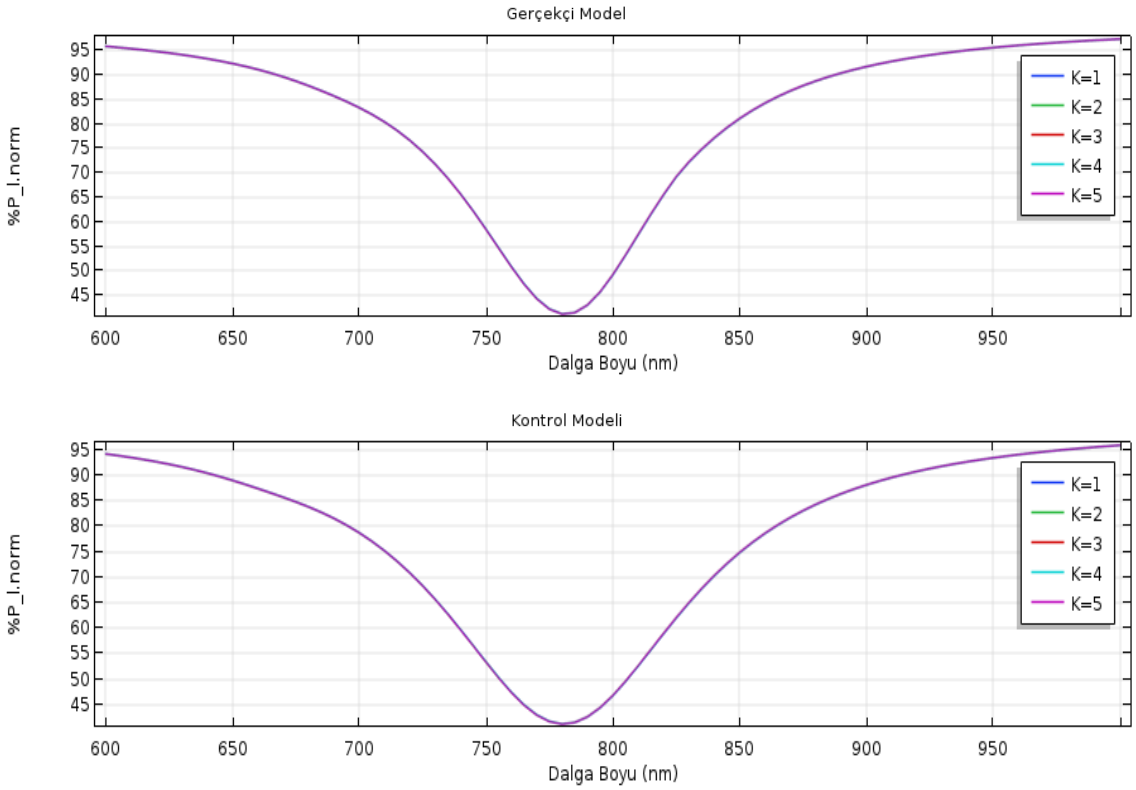
Şekil 22'de değişen yükseklik için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün giriş gücüne oranı verilmiştir. Yükseklik arttıkça NP düzlemi üstünde bulunan yarı iletkenin kalınlığında değişiklik meydana gelmemesi sebebiyle NP'lere ulaşan güç oranı değişmemektedir. Dolayısıyla farklı yükseklik değerleri için NP tarafından gelen ışığa yapılan etki NP düzleminin ön kısmını değil, değişkenlik gösteren arka kısmını etkileyecektir.



Şekil 23. Gerçekçi ve kontrol modelleri için yüksekliğe bağlı NP emilim oranı ($\%P_{NP.norm}$)

Şekil 23'te değişen yükseklik için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün NP tarafından soğurulma yüzdesi verilmiştir. Bütün yükseklik değerlerinde rezonans frekansında soğurma %45 civarındadır ve aynı derinlik gibi yükseklik için de bu değer değişmemektedir.

NP tarafından emilen güç NP düzlemi sonrasında yer alan arka kısma aktarılan güçte kayba yol açar. Yüksekliğin artması ve arka kısmın kalınlığının artması bu kaybın etkisini daha da belirgin hale getirir.

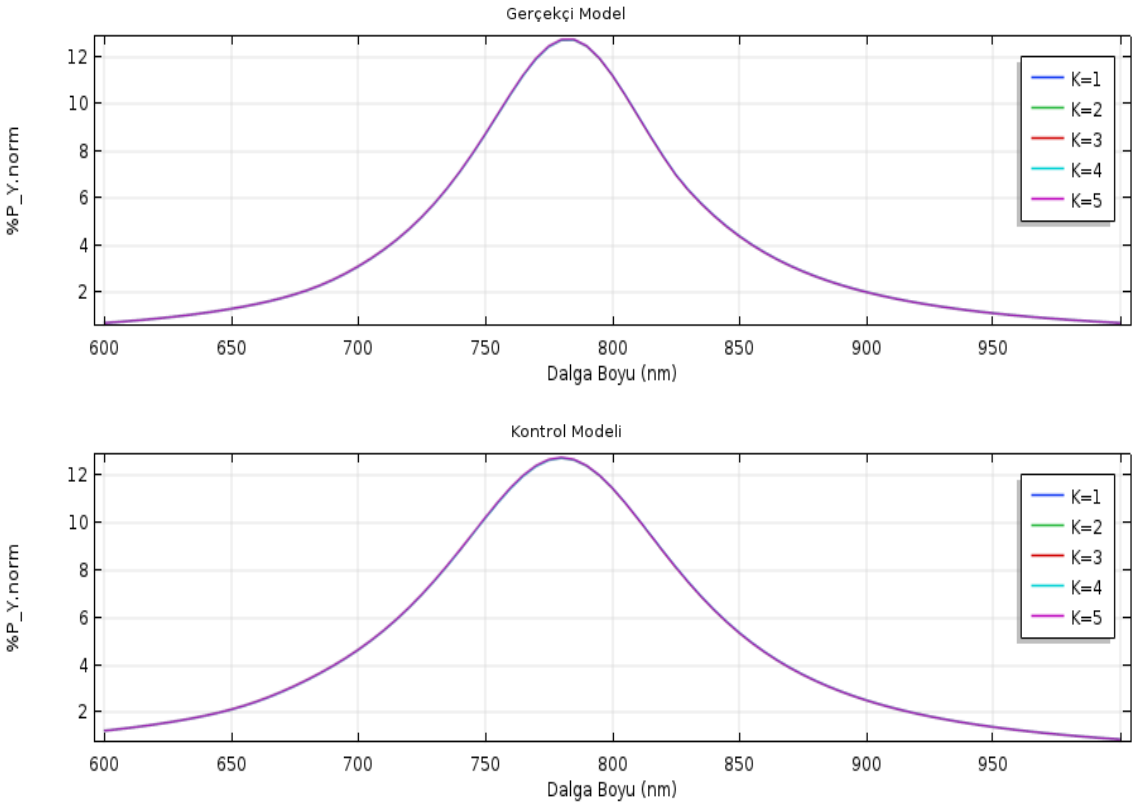


Şekil 24. Gerçekçi ve kontrol modelleri için yüksekliğe bağlı NP iletim oranı ($\%P_{\text{İ}.norm}$)

Şekil 24'te değişen yükseklik için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün iletim yüzdesi verilmiştir. Bütün yükseklik değerlerinde rezonans frekansında iletim %40 civarındadır ve aynı derinlik gibi yükseklik için de bu değer değişmemektedir.

Rezonans frekansında iletim oranının düşmesi yükseltilen arka kısımda emilimin de düşmesine sebep olur. Bu emilim NP'nin bulunduğu her koşulda bulunmadığı duruma kıyasla daha düşük olur. Bu sebeple gömülü NP kullanımında rezonans frekansındaki ışık emiliminin NP düzlemi öncesinde yapılması ve arka kısmın olabildiğince ince tutulması gerekir.

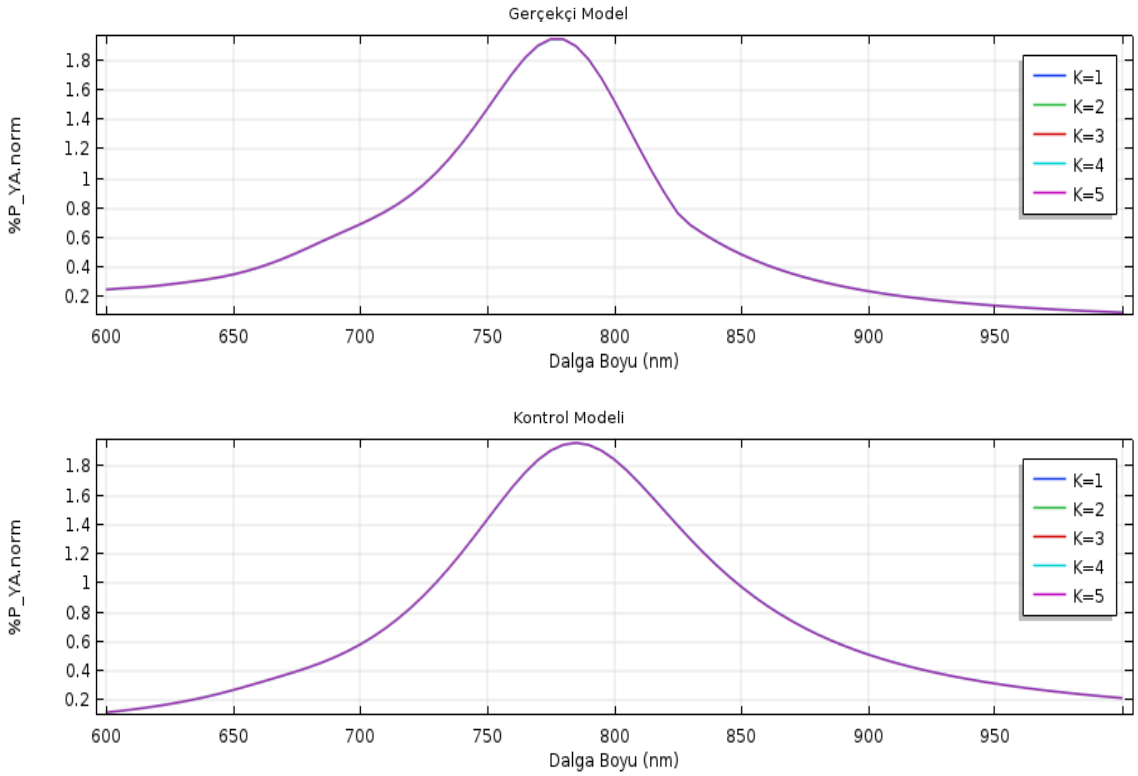
Havadan yarı iletkene veya katmanlar arası ışık geçişinde ışığın bir kısmı geri yansır. Emilimin alt katmanda olması sebebiyle yansımanın en aza indirilmesi ve iletimin olabildiğince arttırılması gerekmektedir. Bu durumda iletim, NP'siz duruma göre daha yüksek olabilme potansiyeline sahiptir. Aynı zamanda bu NP'ler hücre içerisinden geri yansıyan ışığın hücreyi terk etmesini engelleyerek hapsedilmesini de sağlayabilir.



Şekil 25. Gerçekçi ve kontrol modelleri için yüksekliğe bağlı NP yansıma oranı ($\%P_{Y.norm}$)

Şekil 25'te değişen yükseklik için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün yansıma yüzdesi verilmiştir. Bütün yükseklik değerlerinde rezonans frekansında yansıma %13 civarındadır ve aynı derinlik gibi yükseklik için de bu değer değişmemektedir.

Yansıyan güç alt katmana geçmeyeceği için yüksekliğin arttırıldığı durumda daha fazla kayba yol açar. Bu durumda yansımanın en aza indirilmesi daha yüksek verim sağlayacaktır.



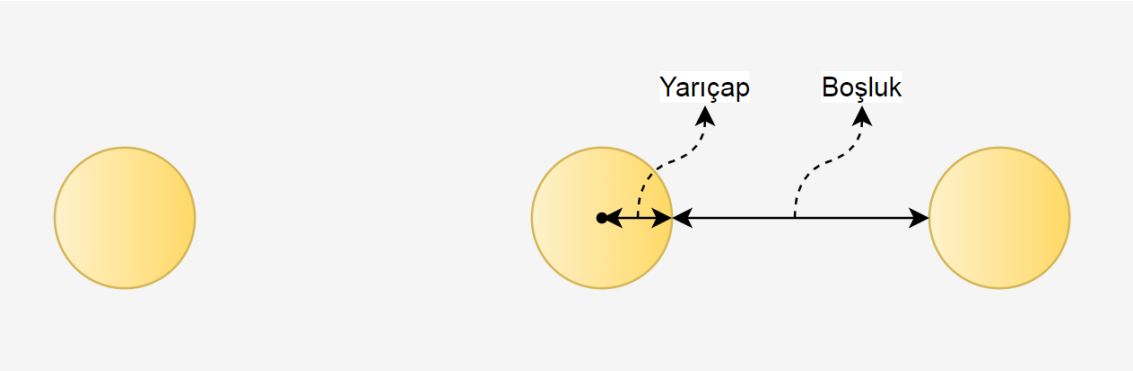
Şekil 26. Gerçekçi ve kontrol modelleri için yüksekliğe bağlı yakın alan emilim oranı ($\%P_{YA.norm}$)

Şekil 26'da değişen yükseklik için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan güce göre yakın alan bölgesinde yarı iletken emilimindeki artışın yüzdesi verilmiştir. Bütün yükseklik değerlerinde rezonans frekansında YA emilim artışı %2 civarındadır ve değişmemektedir.

Bu değerin artması alt kısma geçen güç oranını azaltsa da zaten yarı iletken tarafından yapılan emilimde artışı ifade ettiği için bu değerin artması verimde artış sağlayacaktır.

Genel olarak emilimin NP düzlemi öncesinde yapılması istendiğinde yakın alan emilimi ($\%P_{YA.norm}$) ve yansıma ($\%P_{Y.norm}$) arttırılmalı, NP emilimi ($\%P_{NP.norm}$) ve iletim ($\%P_{İ.norm}$) azaltılmalıdır. Emilimin NP düzlemi sonrasında yapılması istendiğinde ise yakın alan emilimi ($\%P_{YA.norm}$) ve iletim ($\%P_{İ.norm}$) arttırılmalı, NP emilimi ($\%P_{NP.norm}$) ve yansıma ($\%P_{Y.norm}$) azaltılmalıdır.

4.3.2. Yarıçap ve Sıklığın Etkileri



Şekil 27. NP dizisinde yarıçap ve boşluk

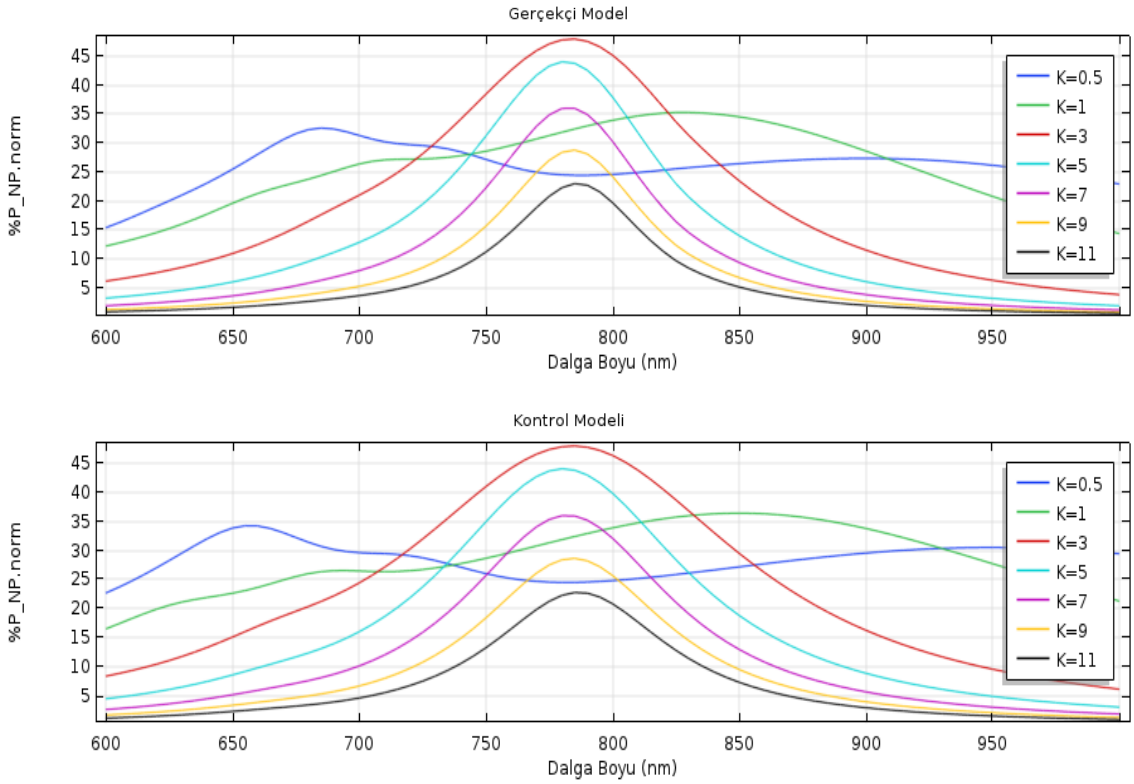
Yarıstatik yaklaşımda NP boyutunun dalga boyundan çok küçük olduğu varsayılır ve boyutun etkileri tam olarak temsil edilmez. Plazmonik NP yarıçap ve sıklığı karmaşık etkileşimler ve fiziksel olaylar sebebiyle aynı NP şekli gibi etkilerinin kestirilmesi zor parametrelerdir. Bu bölümde Şekil 27'de görülen NP yarıçap ve NP'ler arası boşluğun değiştirilmesiyle oluşan etkiler incelenmiş ve etkilerin ne şekilde daha kolay tahmin edilebileceği yönünde araştırma yapılmıştır.

4.3.2.1. Nanoparçacık Sıklığının Etkileri

NP yarıçapının sabit tutulup, NP sıklığının değiştirilmesiyle elde edilen sonuçlar, kontrol ve gerçekçi model için aşağıda verilmiştir. Benzetimde kullanılan NP'ler arası boşluk değerleri şu şekildedir:

Boşluk = $K \times 10$ (nm), K = 0.5, 1, 3, 5, 7, 9, 11

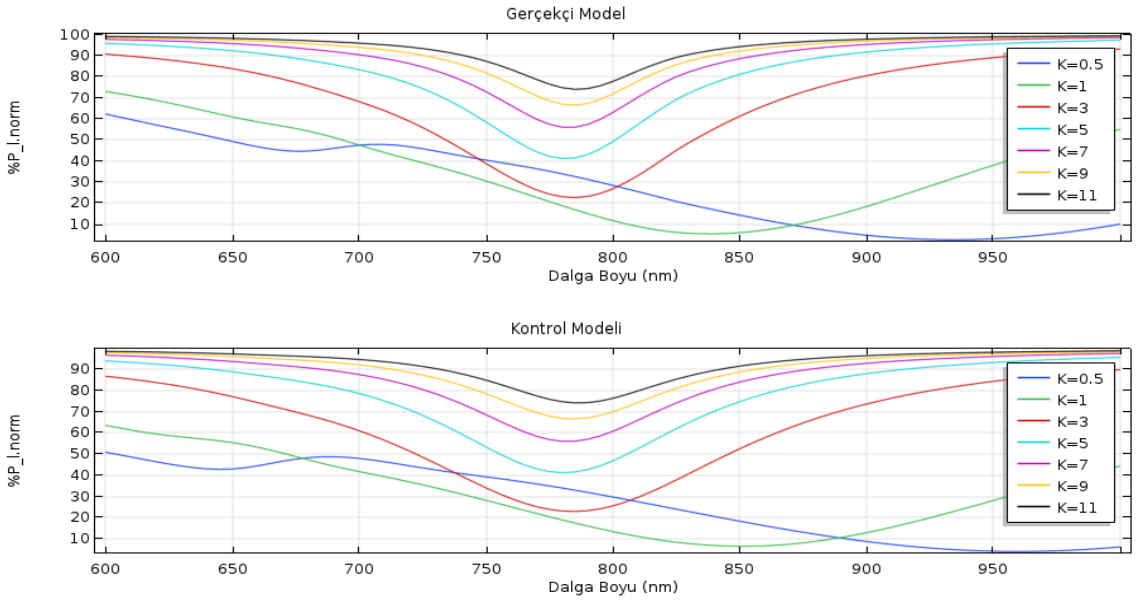
Yarıçap = 10 (nm)



Şekil 28. Gerçekçi ve kontrol modelleri için sıklığa bağlı NP emilim oranı ($\%P_{NP.norm}$)

Şekil 28'de değişen NP'ler arası boşluk için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün NP tarafından soğurulma yüzdesi verilmiştir. NP'ler arası boşluğun azalmasıyla birlikte NP tarafından soğurulan güç oranı da artmaktadır. Rezonans frekansı ise genel olarak değişmemektedir. Boşluğun NP yarıçapına yaklaştığı ve daha düşük olduğu durumlarda NP'ler arası etkileşim artmakta ve daha yüksek mertebe plazmonların etkisi daha belirgin olmaya başlamaktadır. Bu durumda ana dipol tepesi rezonans frekansı düşmekte ve tepe noktası azalmaktadır. Yüksek mertebe rezonansların etkisiyle de daha yüksek frekansta iki adet emilim zirvesi daha oluşmakta ve daha geniş bir spektrumda soğurma gerçekleştirilmektedir.

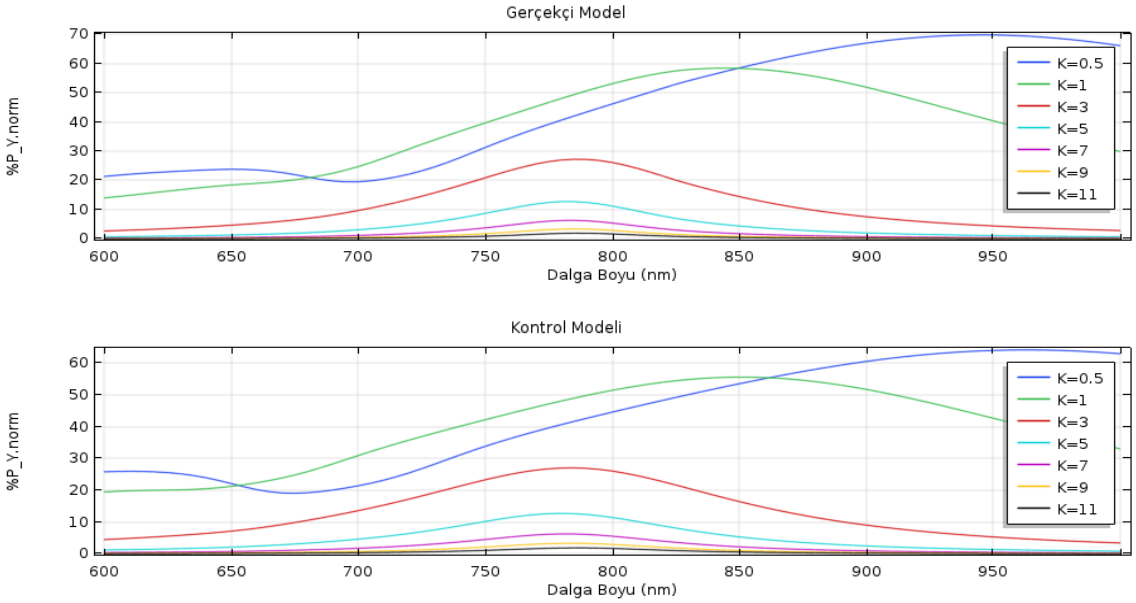
Güneş hücrelerinde kullanılabilecek NP sıklığının bir sınırı vardır. Çok sık bir oranda yerleştirilen NP'ler yarı iletken kalitesinde düşüşe neden olabilir. Bu sebeple boşluğun yarıçaptan büyük olacağı varsayılabilir. Bu durumda sıklığın rezonansa etkisi daha kolay bir şekilde kestirilebilir. Genel olarak boşluk arttıkça ve sıklık azaldıkça NP soğurma yüzdesinin azalacağı ve rezonans frekansının değişmeyeceği söylenebilir.



Şekil 29. Gerçekçi ve kontrol modelleri için sıklığa bağlı NP iletim oranı ($\%P_{\text{I}.norm}$)

Şekil 29'da değişen NP'ler arası boşluk için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün iletim yüzdesi verilmiştir. NP'ler arası boşluğun azalmasıyla gücün daha küçük bir kısmı alt katmana iletilmektedir. Rezonans frekansı boşluğun yarıçaptan büyük olduğu koşulda sabit kalmaktadır. Boşluğun daha küçük olduğu durumlarda ise frekans azalmaktadır.

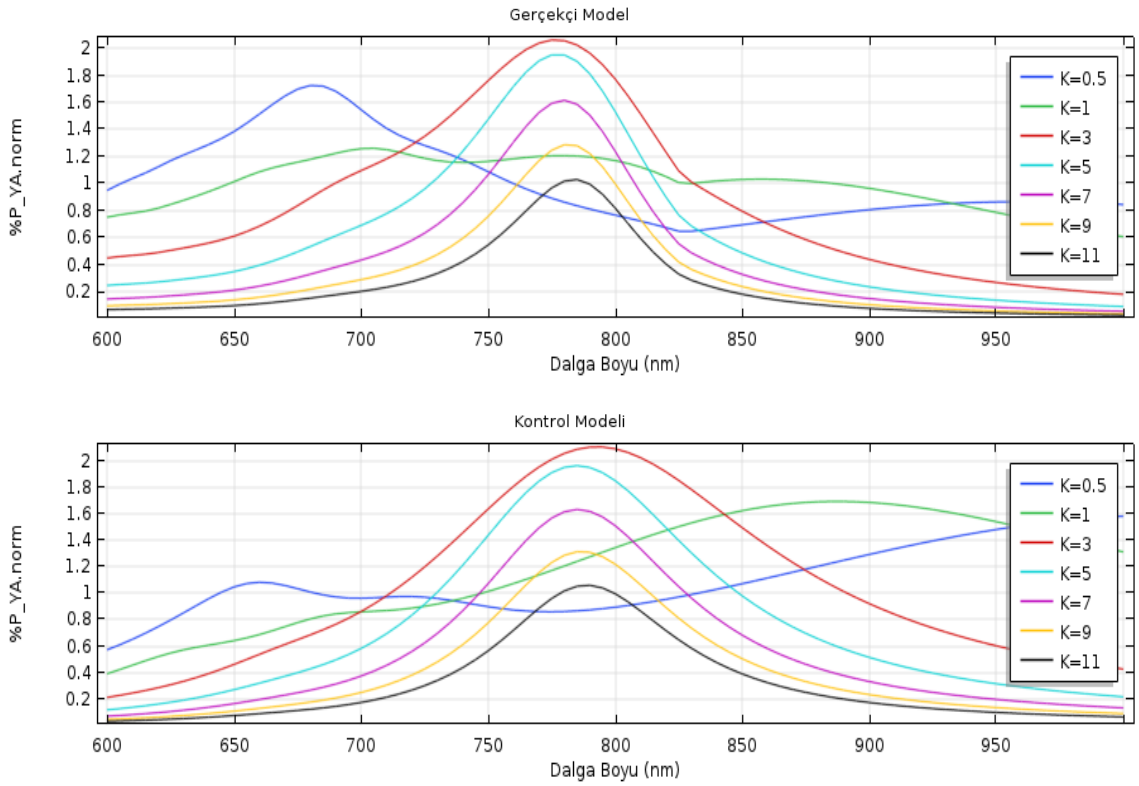
Boşluğun NP yarıçapından büyük olduğu koşullarda genel olarak boşluk arttıkça ve sıklık azaldıkça iletim yüzdesinin artacağı ve rezonans frekansının değişmeyeceği söylenebilir.



Şekil 30. Gerçekçi ve kontrol modelleri için sıklığa bağlı NP yansıma oranı ($\%P_{Y.norm}$)

Şekil 30'da değişen NP'ler arası boşluk için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün yansıma yüzdesi verilmiştir. NP'ler arası boşluğun azalmasıyla yansıtılan güç oranı artmaktadır. Rezonans frekansı boşluğun yarıçaptan büyük olduğu koşulda sabit kalmaktadır. Boşluğun daha küçük olduğu durumlarda ise frekans azalmaktadır. Yüksek mertebe rezonansların etkisinin NP emilimine oranla yansıma için daha az olduğu ve yüksek frekansta oluşan tepenin dipol tarafından oluşturulan tepeden daha küçük olduğu görülmektedir. Genel olarak plazmonik NP tarafından uyarılan tüm modlar emilimde etkilidir, ancak dipol ve oktupolar modlar gibi alternatif modlar yansımada (geri saçılımda) daha etkilidir [53].

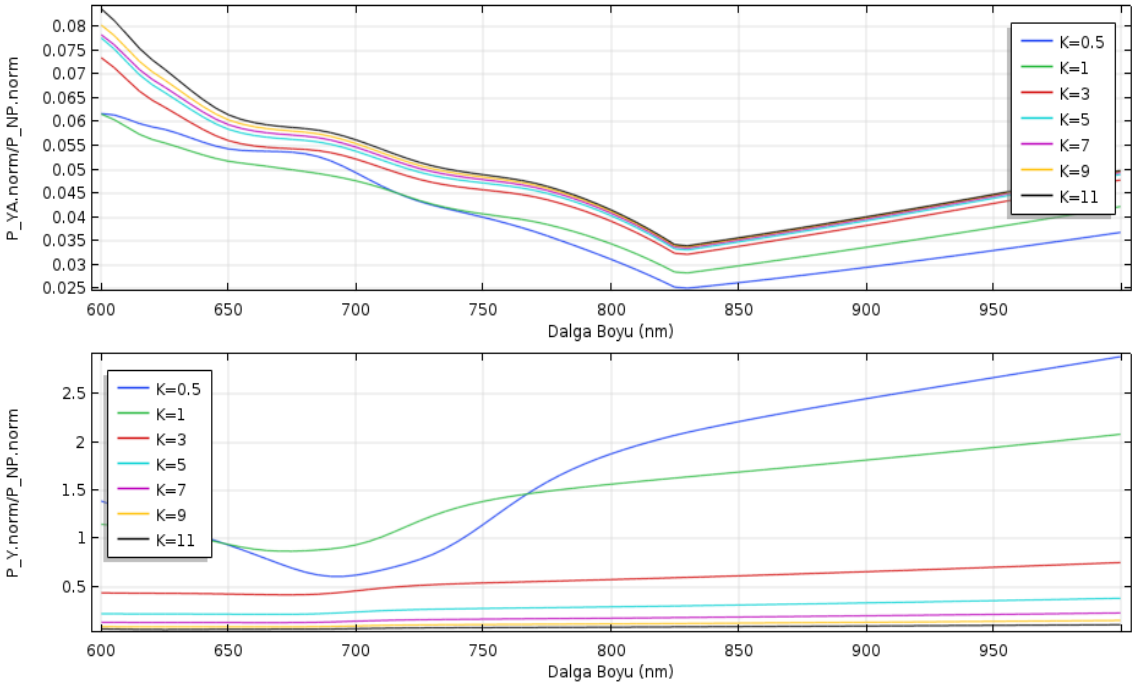
Boşluğun NP yarıçapından büyük olduğu koşullarda genel olarak boşluk arttıkça ve sıklık azaldıkça yansıma yüzdesinin azalacağı ve rezonans frekansının değişmeyeceği söylenebilir. Boşluk miktarı yansımayı NP soğurma oranına göre daha fazla etkilemektedir. Bu da yansımanın istendiği durumlarda NP'lerin daha sık bir şekilde yerleştirilmesinin daha etkili olacağını göstermektedir.



Şekil 31. Gerçekçi ve kontrol modelleri için sıklığa bağlı yakın alan emilim oranı ($\%P_{YA.norm}$)

Şekil 31'de değişen NP'ler arası boşluk için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan güce göre yakın alan bölgesinde yarı iletken emilimindeki artışın yüzdesi görülmektedir. NP'ler arası boşluğun azalmasıyla birlikte yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen güç oranı artmaktadır. Rezonans frekansı boşluğun yarıçaptan büyük olduğu koşulda sabit kalmaktadır. Boşluğun orantısal olarak daha küçük olduğu durumlarda ise frekans azalmaktadır. Gerçekçi model için dipol modun etkisi çok azalmış ve yüksek mertebe rezonans tepe noktaları daha etkin hale gelmiştir.

Boşluğun NP yarıçapından büyük olduğu koşullarda genel olarak boşluk arttıkça ve sıklık azaldıkça yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen güç oranının azalacağı ve rezonans frekansının değişmeyeceği söylenebilir. Bu orandaki değişim NP soğurma oranındaki değişime çok yakındır.



Şekil 32. Gerçekçi model için sıklığa bağlı $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ ve $P_{Y.norm}/P_{NP.norm}$

Şekil 32'de değişen NP'ler arası boşluk için gerçekçi modelde yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen ve yansıtılan gücün NP tarafından soğurulan güce oranı verilmiştir. NP'ler arası boşluğun azalmasıyla $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ oranının azaldığı, $P_{Y.norm}/P_{NP.norm}$ oranının ise arttığı görülmektedir.

Boşluğun NP yarıçapından büyük olduğu koşullarda genel olarak boşluk arttıkça ve sıklık azaldıkça $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ oranının çok fazla değişmediği ve biraz arttığı, $P_{Y.norm}/P_{NP.norm}$ oranının ise düzenli bir şekilde azaldığı söylenebilir. Bu da sıklığın,

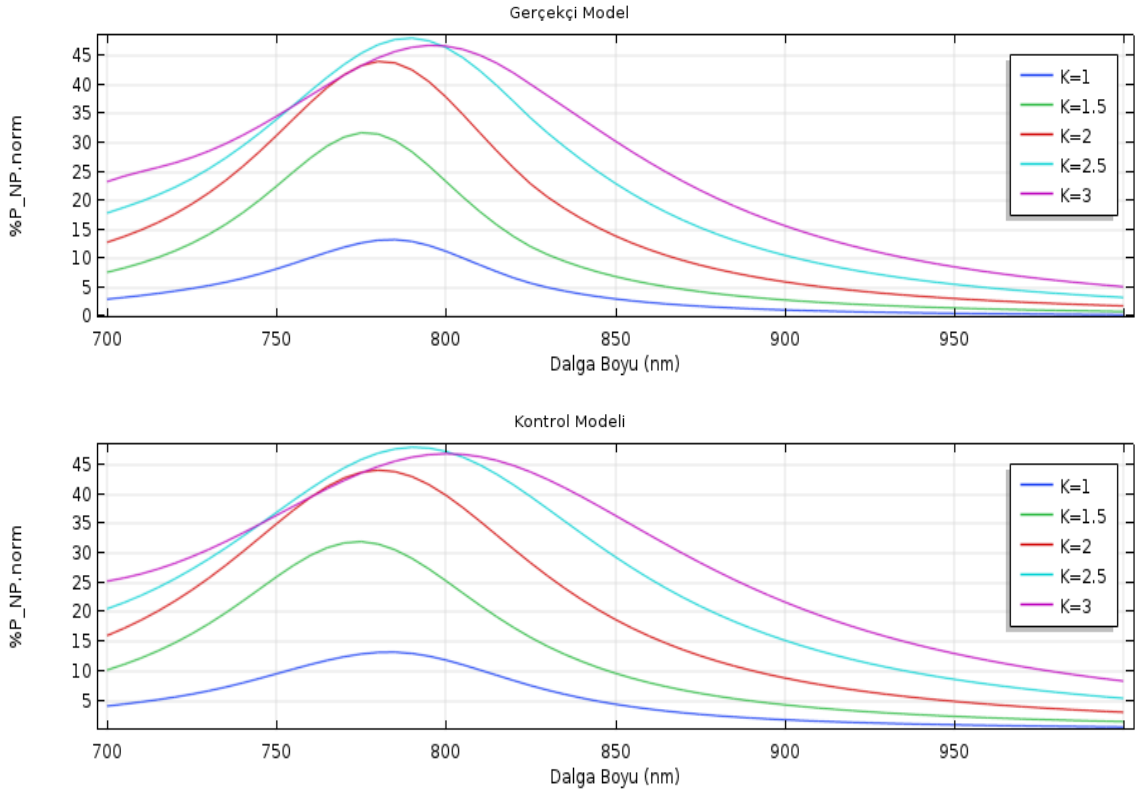
yansımayı kontrol etmek için kullanışlı bir parametre olduğunu göstermektedir. NP sıklığı arttıkça yansıma da büyük oranda artış gösterir, bu da emilimin NP üstünde olması istendiği durumda faydalıdır. Sıklığın artması aynı zamanda boşluğun NP yarıçapından büyük olduğu koşullarda hem NP hem de yakın alan emiliminde artışa sebep olması nedeniyle emilimin NP üstünde olması istendiği durumda tercih edilebilir, fakat emilimin NP sonrasında olması istendiği durumda iletimin daha önemli olması nedeniyle tercih edilmeyecek bir özelliktir.

4.3.2.2. Nanoparçacık Yarıçapının Etkileri

NP sıklığının sabit tutulup, NP yarıçapının değiştirilmesiyle elde edilen sonuçlar, kontrol ve gerçekçi model için aşağıda verilmiştir. Benzetimde kullanılan yarıçap değerleri şu şekildedir:

Yarıçap = K×5 (nm), K = 1, 1.5, 2, 2.5, 3

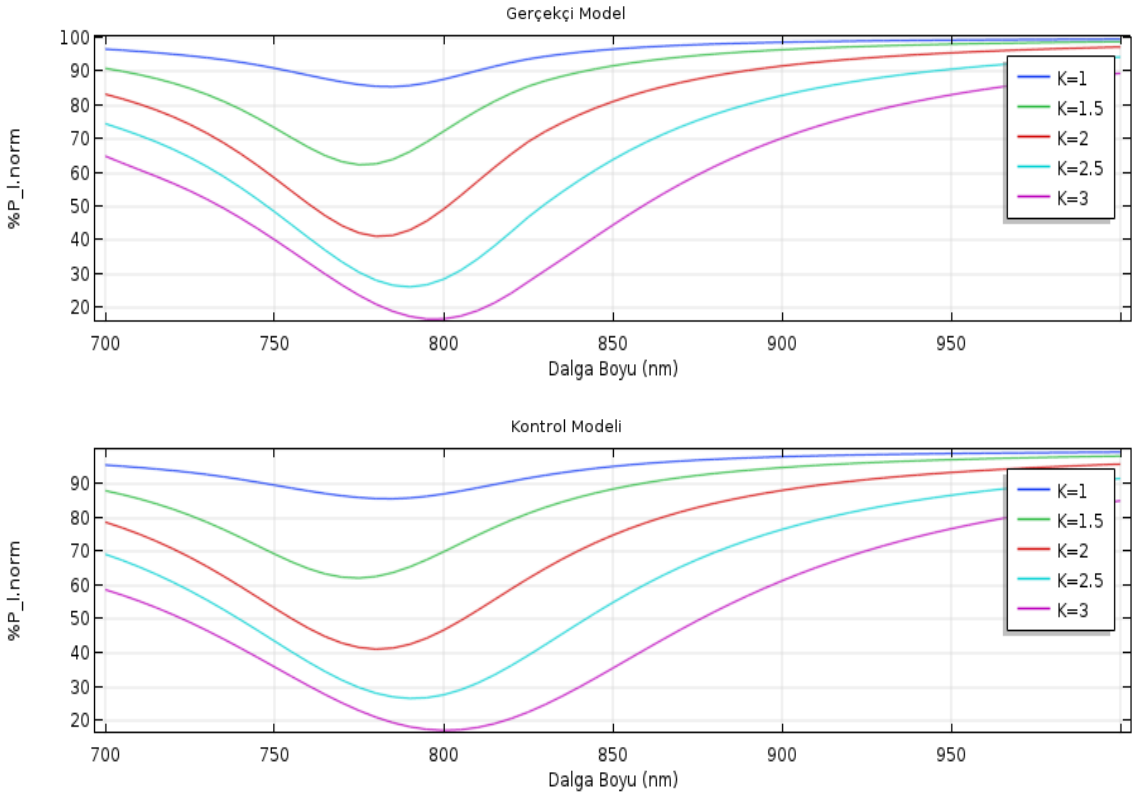
Boşluk = 50 (nm)



Şekil 33. Gerçekçi ve kontrol modelleri için yarıçapa bağlı NP emilim oranı ($\%P_{NP.norm}$)

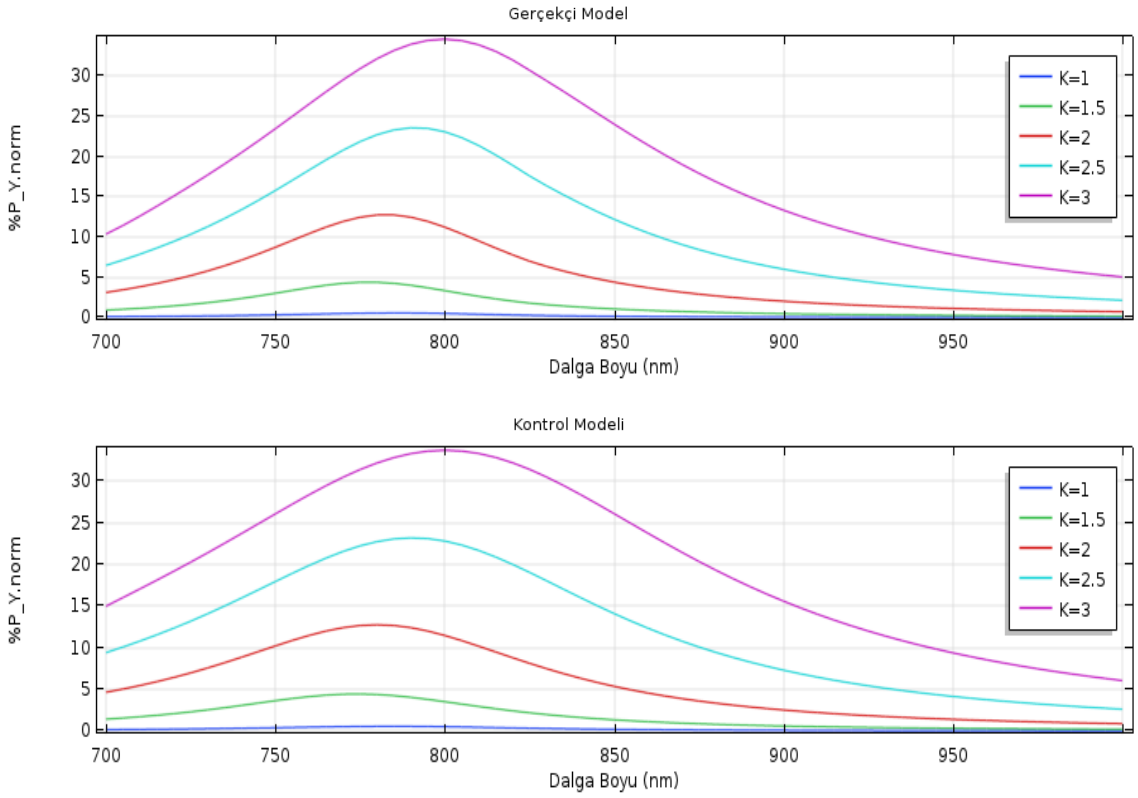
Şekil 33'te değişen NP yarıçapı için kontrol ve gerçekçi modelde NP tarafından soğurulan güç oranındaki değişim görülmektedir. NP yarıçapının artmasıyla birlikte NP tarafından soğurulan güç oranı da artmaktadır. Rezonans frekansı ise genel olarak değişmemektedir. Yarıçapın NP'ler arası boşluğa yaklaştığı durumda NP'ler arası etkileşim artmakta ve daha yüksek mertebe plazmonların etkisi daha belirgin olmaya başlamaktadır. Bu durumda ana dipol tepesi rezonans frekansı düşmekte ve tepe noktası azalmaktadır. Soğurma spektrumu da genişlemektedir. Böylece bu ilişki doğrusal olmaktan çıkmaktadır.

NP boyutunun NP'ler arası boşluğa göre çok küçük olduğu durumda genel olarak artan yarıçap ile birlikte NP soğurma oranı da artmaktadır, rezonans frekansı ise çok fazla bir değişiklik göstermemektedir.



Şekil 34. Gerçekçi ve kontrol modelleri için yarıçapa bağlı NP iletim oranı ($\%P_{\mathrm{i}.norm}$)

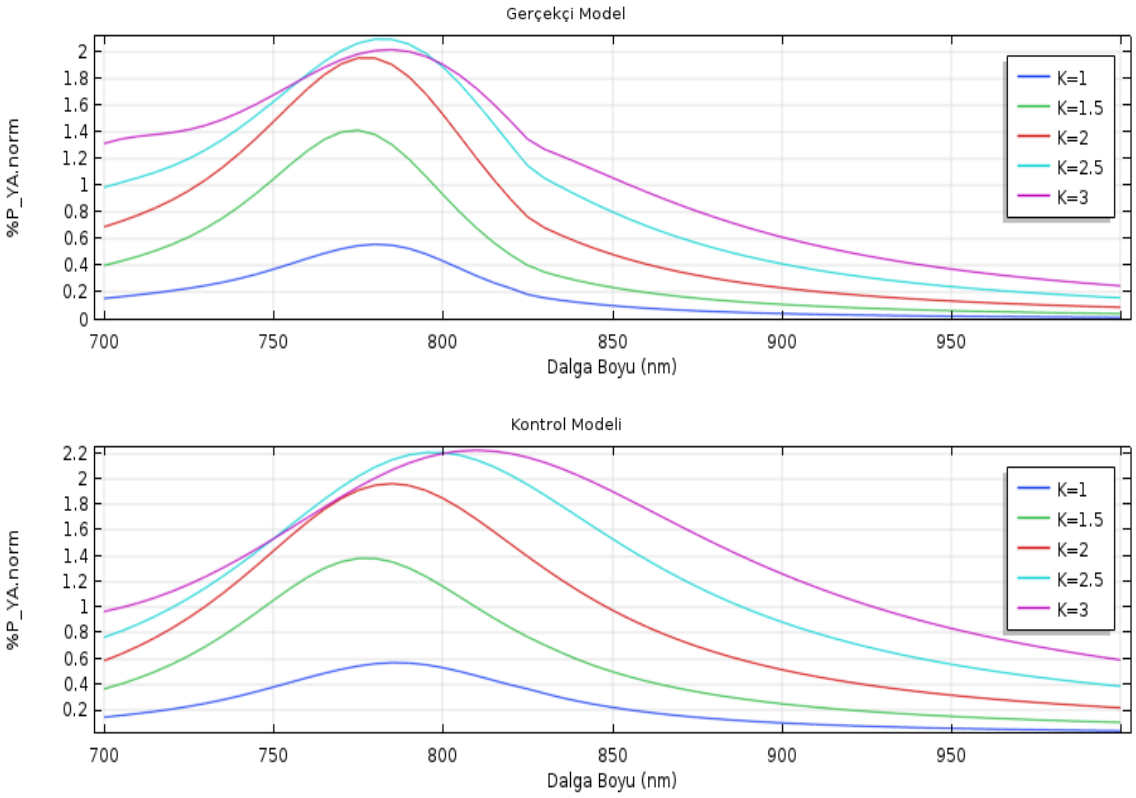
Şekil 34'te değişen NP yarıçapı için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün iletim yüzdesi verilmiştir. Artan boyut ile birlikte iletim oranı da düşmektedir. Rezonans frekansı ise az miktarda azalmaktadır. NP'ler arası boşluk ve NP yarıçapı arasındaki fark arttıkça frekansta oluşan kayma oranı azalmaktadır.



Şekil 35. Gerçekçi ve kontrol modelleri için yarıçapa bağlı NP yansıma oranı ($\%P_{Y.norm}$)

Şekil 35'te değişen NP yarıçapı için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün yansıma yüzdesi verilmiştir. NP yarıçapının artmasıyla yansıtılan güç oranı da artmaktadır. Bu artış NP emilimine kıyasla daha düzenlidir ve boyuttan büyük oranda etkilendiği gözlemlenmektedir. Rezonans frekansında ise büyük bir değişiklik meydana gelmemekle birlikte yarıçap boşluğa yaklaştıkça frekans azalmaktadır.

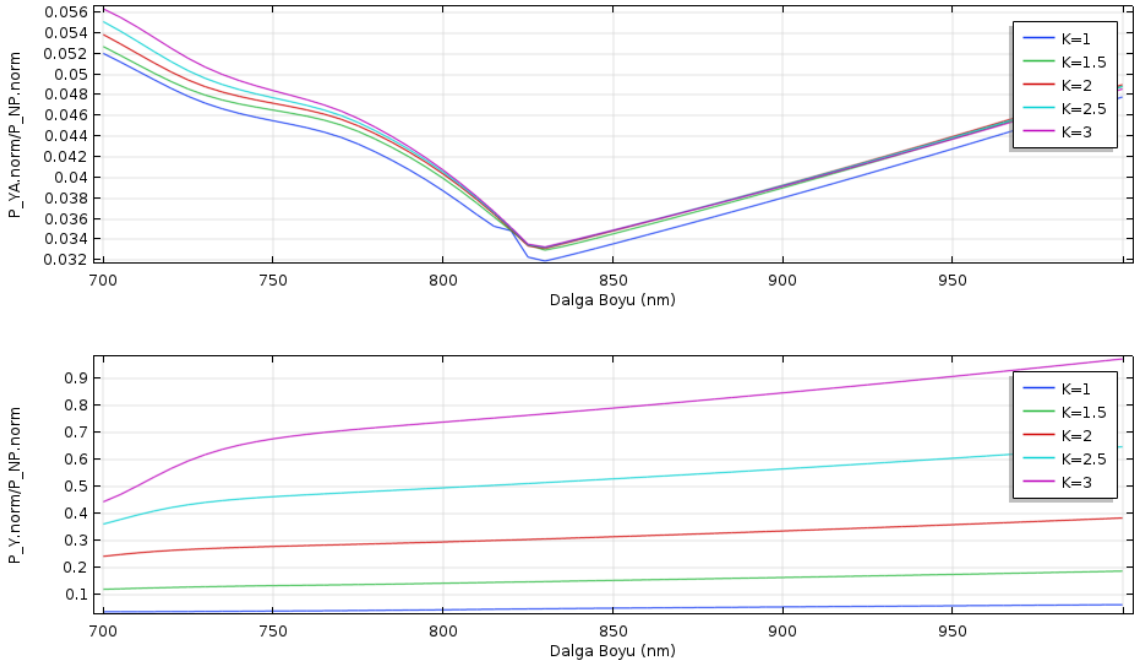
Rezonansın değiştirilmeden yansımanın arttırılmasının istendiği durumlarda boşluk ve yarıçap arasındaki fark yeterince büyük tutulduğu sürece NP boyutunun arttırılması etkili bir çözüm olarak kullanılabilir.



Şekil 36. Gerçekçi ve kontrol modelleri için yarıçapa bağlı yakın alan emilim oranı ($\%P_{YA.norm}$)

Şekil 36'da değişen NP yarıçapı için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan güce göre yakın alan bölgesinde yarı iletken emilimindeki artışın yüzdesi görülmektedir. NP yarıçapının azalmasıyla birlikte yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen güç oranı da azalmaktadır. Rezonans frekansı boşluğun yarıçaptan büyük olduğu koşulda çok fazla değişkenlik göstermemektedir. Boşluğun orantısal olarak daha küçük olduğu durumlarda ise frekans ve yakın alan emilimi azalmaya başlamaktadır.

Boşluğun NP yarıçapından büyük olduğu koşullarda genel olarak boşluk arttıkça ve sıklık azaldıkça yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen güç oranının azalacağı ve rezonans frekansının değişmeyeceği söylenebilir. Bu orandaki değişim NP soğurma oranındaki değişime çok yakındır.



Şekil 37. Gerçekçi model için yarıçapa bağlı $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ ve $P_{Y.norm}/P_{NP.norm}$

Şekil 37'de değişen NP yarıçapı için gerçekçi modelde yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen ve yansıtılan gücün NP tarafından soğurulan güce oranı verilmiştir. NP yarıçapının artmasıyla $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ ve $P_{Y.norm}/P_{NP.norm}$ oranının arttığı görülmektedir.

Genel olarak yarıçap arttıkça $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ oranının çok fazla değişmediği ve biraz arttığı, $P_{Y.norm}/P_{NP.norm}$ oranının ise düzenli bir şekilde artış gösterdiği söylenebilir. Bu da yarıçapın, yansımayı kontrol etmek için kullanışlı bir parametre olduğunu göstermektedir. NP yarıçapı arttıkça yansıma da büyük oranda artış gösterir, bu da emilimin NP üstünde olması istendiği durumda faydalıdır. Yarıçapın artması aynı zamanda boşluğun NP yarıçapından büyük olduğu koşullarda hem NP hem de yakın alan emiliminde artışa sebep olması nedeniyle emilimin NP üstünde olması istendiği durumda tercih edilebilir, fakat emilimin NP sonrasında olması istendiği durumda iletimin daha önemli olması nedeniyle tercih edilmeyecek bir özelliktir.

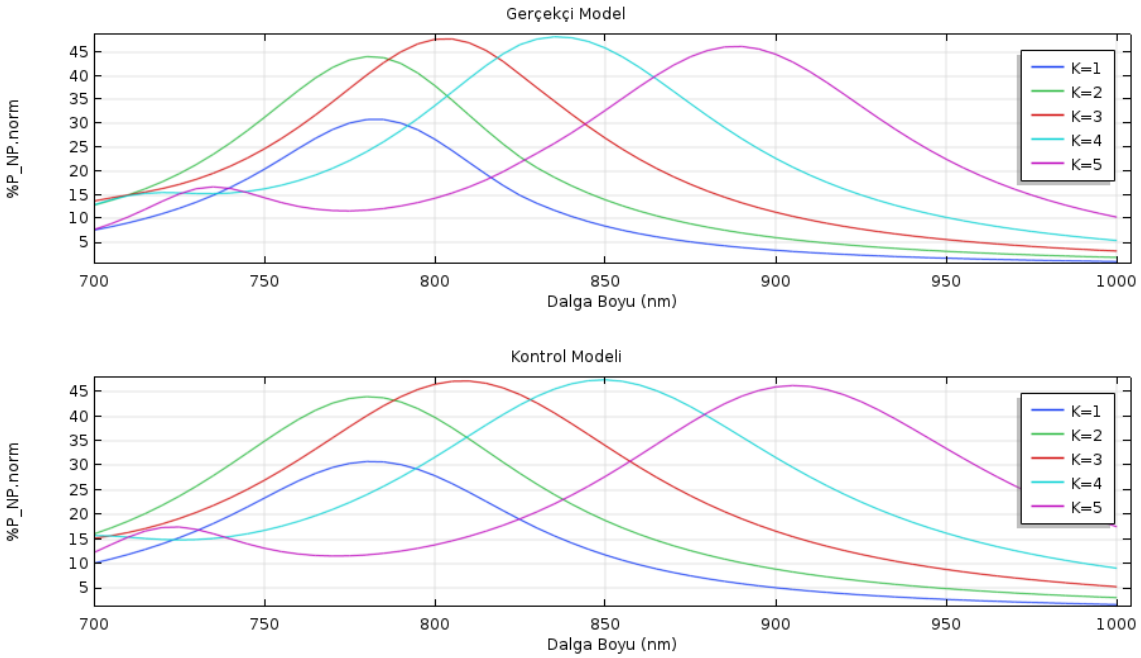
4.3.2.3. Nanoparçacık Sıklık ve Yarıçapının Birlikte Etkileri

NP'ler arası boşluğun ve NP yarıçapının birbirine yaklaşma koşulunu ortadan kaldırmak ve uygun ölçeklendirmenin etkisini incelemek adına sıklığın ve yarıçapın birlikte değiştirilmesi koşulu incelenmiştir. Burada yapılan araştırma NP yarıçapı ve bulunduğu kesit alanının birbirine oranın sabit tutulması ile boyutların etkisinin incelenmesi olarak da düşünülebilir.

NP sıklığının ve yarıçapının birlikte değiştirilmesiyle elde edilen sonuçlar, kontrol ve gerçekçi model için aşağıda verilmiştir. Benzetimde kullanılan boşluk ve yarıçap değerleri şu şekildedir:

Boşluk = K×25 (nm), K = 1, 2, 3, 4, 5

Yarıçap = K×5 (nm), K = 1, 2, 3, 4, 5

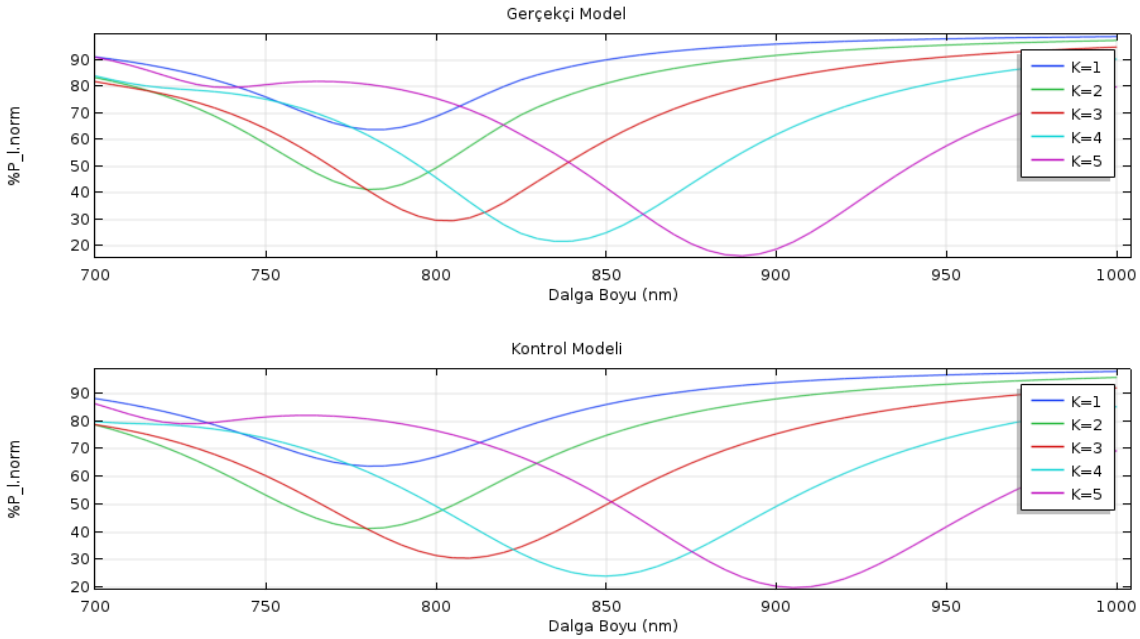


Şekil 38. Gerçekçi ve kontrol modelleri için boyutlara bağlı NP emilim oranı ($\%P_{NP.norm}$)

Şekil 38'de değişen NP sıklık ve yarıçapı için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün NP tarafından soğurulma yüzdesi verilmiştir. Boşluk ve yarıçapın artmasıyla birlikte NP tarafından soğurulan güç oranı belli bir boyutta zirve değerine ulaşmaktadır ve azalmaya başlamaktadır. Çok küçük boyutlar dışında boyutların artması rezonans frekansının azalmasına yol açmaktadır.

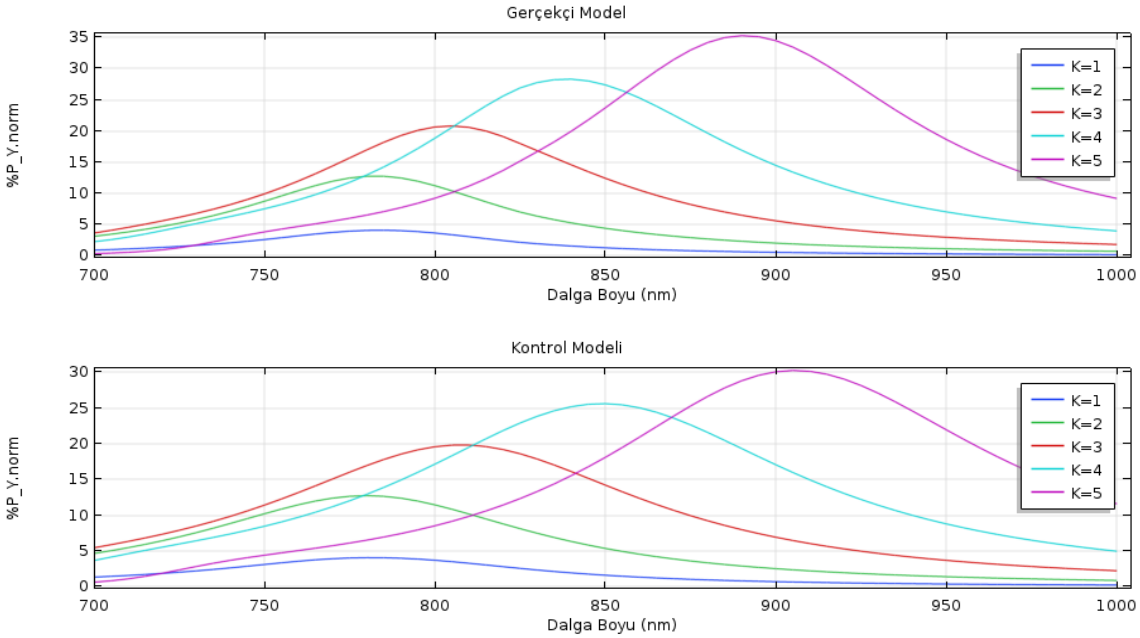
Boyutların çok küçük olduğu durumda genel olarak artan boşluk ve yarıçap ile birlikte NP soğurma oranının artacağı, rezonans frekansının ise değişmeyeceği söylenebilir. Boyutların daha da artmasıyla NP soğurma oranının azalmaya başladığı, rezonans frekansının ise düştüğü gözlemlenmektedir.

K, 5 iken ana zirveden (dipol) daha yüksek frekansta ikinci bir zirve görülmektedir. Bu zirve kuadrupol mod kaynaklıdır.



Şekil 39. Gerçekçi ve kontrol modelleri için boyutlara bağlı NP iletim oranı ($\%P_{\text{İ}.norm}$)

Şekil 39'da değişen NP sıklık ve yarıçapı için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün iletim yüzdesi verilmiştir. Artan boyutlar ile birlikte iletim oranı da rezonans frekansında azalmaktadır. Rezonans frekansı boyutların çok küçük olduğu koşulda sabit kalmaktadır. Boyutların daha da artması durumunda ise frekans azalmaktadır.

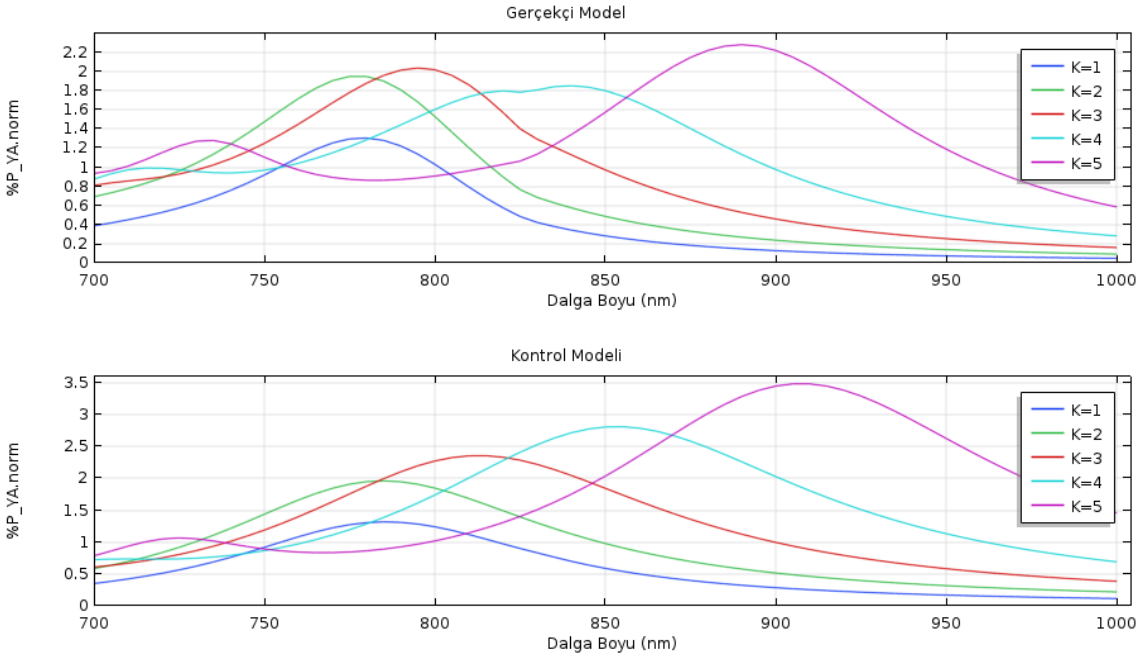


Şekil 40. Gerçekçi ve kontrol modelleri için boyutlara bağlı NP yansıma oranı ($\%P_{Y.norm}$)

Şekil 40'ta değişen NP sıklık ve yarıçapı için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün yansıma yüzdesi verilmiştir. Boşluk ve yarıçapın artmasıyla yansıtılan güç oranı da artmaktadır. Rezonans frekansı boyutların çok küçük olduğu koşulda sabit kalmaktadır. Boyutların daha da artması durumlarda ise frekans azalmaktadır.

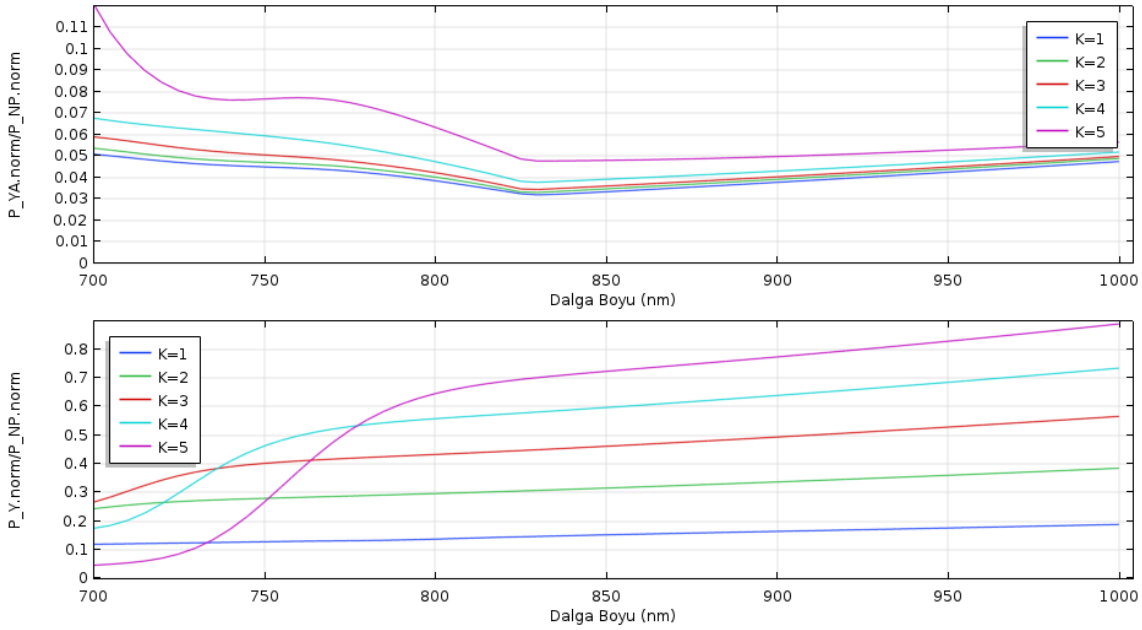
Boşluk ve yarıçapın birlikte arttırılması NP emiliminden daha çok yansımayı etkilediğinden dolayı yansımanın istendiği koşullarda kullanılabilecek bir yöntemdir.

K , 5 iken emilimde yüksek frekansta görülen kuadrupol kaynaklı ikinci zirve, yansımada çok etkin değildir. Bunun sebebi dipol ve oktupolar modların yansımada daha etkin olmasıdır.



Şekil 41. Gerçekçi ve kontrol modelleri için boyutlara bağlı yakın alan emilim oranı ($\%P_{YA.norm}$)

Şekil 41'de değişen NP sıklık ve yarıçapı için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan güce göre yakın alan bölgesinde yarı iletken emilimindeki artışın yüzdesi görülmektedir. Boşluk ve yarıçapın artmasıyla yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen güç oranı artmaktadır. Rezonans frekansı boyutların çok küçük olduğu koşulda sabit kalmaktadır. Boyutların daha da artması durumunda ise frekans azalmaktadır.



Şekil 42. Gerçekçi model için boyutlara bağlı $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ ve $P_{Y.norm}/P_{NP.norm}$

Şekil 42'de değişen NP sıklık ve yarıçapı için gerçekçi modelde yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen ve yansıtılan gücün NP tarafından soğurulan güce oranı verilmiştir. Boşluk ve yarıçapın artmasıyla $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ ve $P_{Y.norm}/P_{NP.norm}$ oranının arttığı görülmektedir.

Genel olarak boyutlar arttıkça $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ oranının arttığı, $P_{Y.norm}/P_{NP.norm}$ oranının ise daha fazla artış gösterdiği söylenebilir. Bu da boyutların, yansımayı kontrol etmek için kullanışlı bir parametre olduğunu göstermektedir. Boyutlar arttıkça yansıma da büyük oranda artış gösterir, bu da emilimin NP üstünde olması istendiği durumda faydalıdır. Boyutların artması aynı zamanda yakın alan emiliminde artışa sebep olması nedeniyle emilimin NP üstünde olması istendiği durumda tercih edilebilir bir özelliktir. Fakat emilimin NP sonrasında olması istendiği durumda iletimde azalma meydana gelmesi nedeniyle kayba yol açabilecek bir özelliktir. Boyutlar, rezonans frekansında da değişiklik yapılabilmesine imkan tanımaktadır. Bu sebeplerle NP yarıçap ve sıklığı belli bir yarı iletken içerisinde kullanılacak olan NP materyalinin belirlenmesinden sonra rezonans frekansını ayarlamak, istenilen emilim ve yansıma özelliklerini elde etmek için kullanılabilecek parametrelerdir.

4.3.3. Yarı İletken Kırılma İndisinin Etkileri

Bu bölümde yarı iletken kırılma indisleri değiştirilmiş ve etkileri incelenmiştir. Buradan elde edilen veriler farklı yarı iletkenlerin NP'ler ile göstereceği özelliklerin değerlendirilmesini sağlayabilecektir.

Bu testlerde bahsi geçen n_{yi} gerçek yarı iletken kırılma indisini, k_{yi} sanal yarı iletken kırılma indisini, n_{np} gerçek NP kırılma indisini, k_{np} sanal NP kırılma indisini ifade eder.

4.3.3.1. Gerçek Yarı İletken Kırılma İndisinin Etkileri

Kontrol modelinde n_{yi}, n_{np}/λ ve k_{yi}/λ sabit iken k_{np} değişkendir. Burada n_{np}/λ ve k_{yi}/λ sırasıyla NP ve yarı iletken emilim katsayılarıyla orantılıdır. Bu parametrelerin sabit tutulmasıyla tüm frekans bandı için emilim sabit tutulmakta ve emilimde sadece plazmonik etkiden kaynaklı değişiklikler meydana gelmektedir. n_{yi} ve k_{np} ise polariteyi belirler. Kontrol modeli için n_{yi} sabit tutulmuş ve k_{np} değişken yapılmıştır. Bunlardan birinin sabit tutulup diğerinin değişken yapılmasının sebebi ise plazmonik rezonansın oluşmasını sağlamaktır.

Bu teste özel olarak kontrol modelinde bir değişikliğe gidilmiştir. Bu test için k_{np} sabit tutulmuş ve n_{yi} değişken yapılmıştır. Böylece n_{yi} dışındaki bütün parametreler sabit kalmış ve sadece n_{yi} değerinin değişmesinden kaynaklı etkiler gözlenmiştir. Kontrol modeli için yeniden tanımlanan n_{yi} ve k_{np} şu şekildedir:

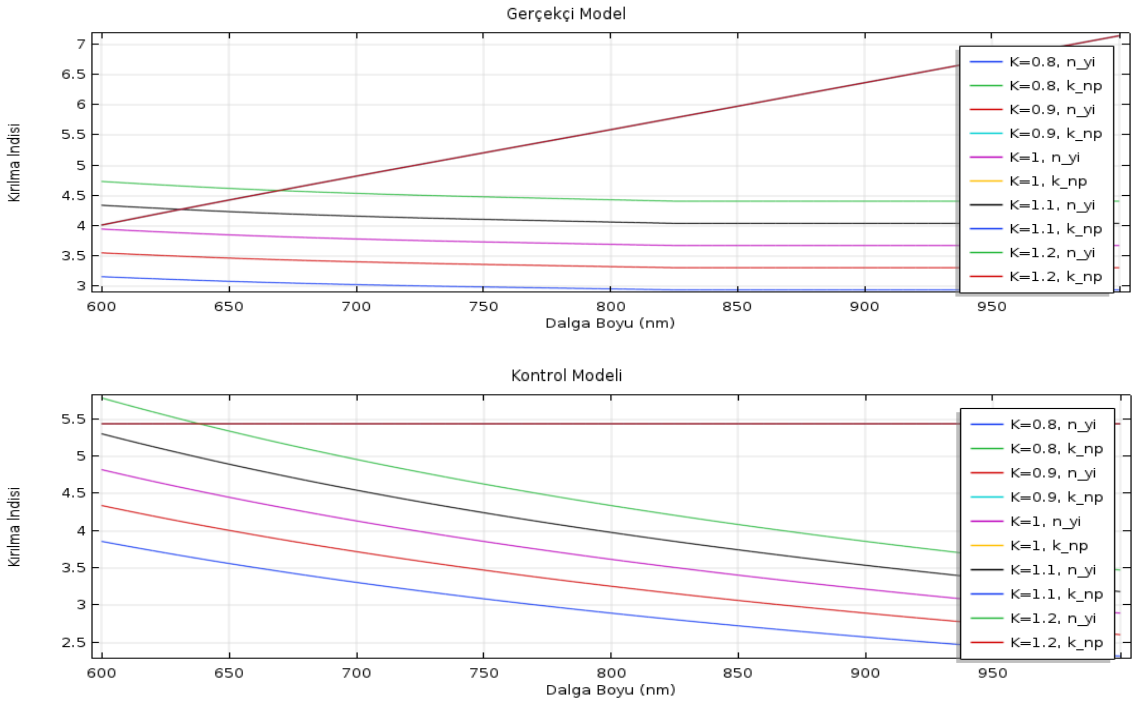
$$n_{yi} = 2.894\ (\mu m)\ /\ \lambda$$

$$k_{np} = 5.44$$

Burada λ dalga boyunu ifade eder. Değerler bu şekilde ayarlanarak rezonans frekansı sabit ve gerçekçi modele yakın tutulmuştur.

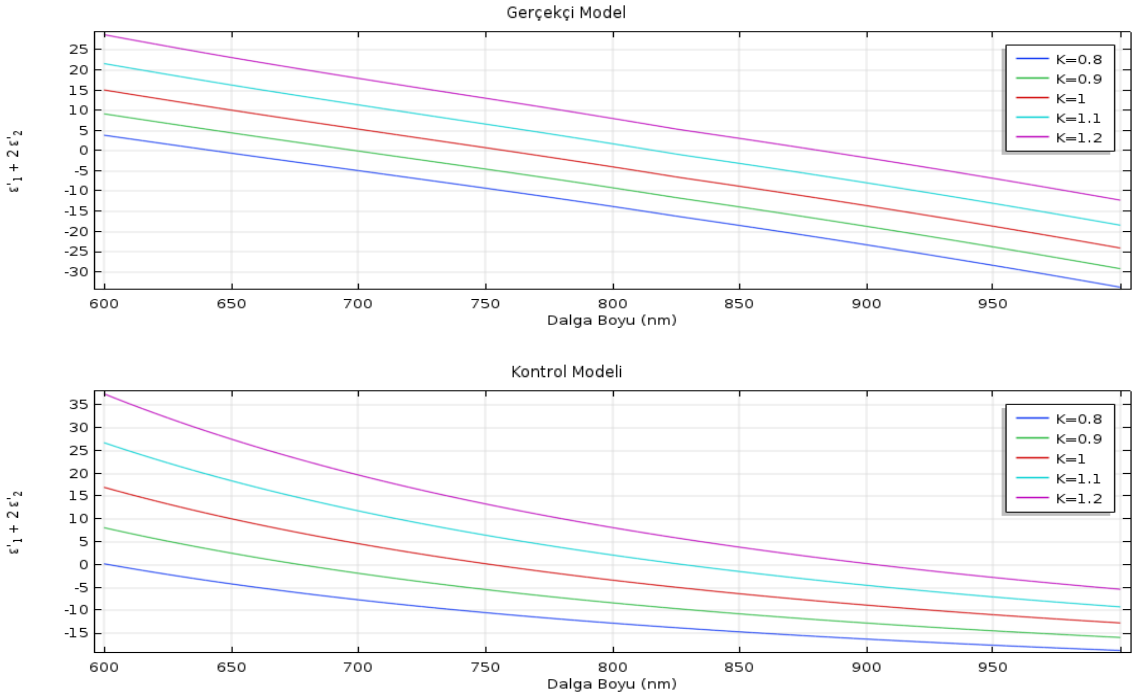
Yarı iletken gerçek kırılma indisinin (n_{yi}) değiştirilmesiyle elde edilen sonuçlar, kontrol ve gerçekçi model için aşağıda verilmiştir. Benzetimde kullanılan n değerleri şu şekildedir:

Gerçek kırılma indisi = $K \times n_{yi}$, K = 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2



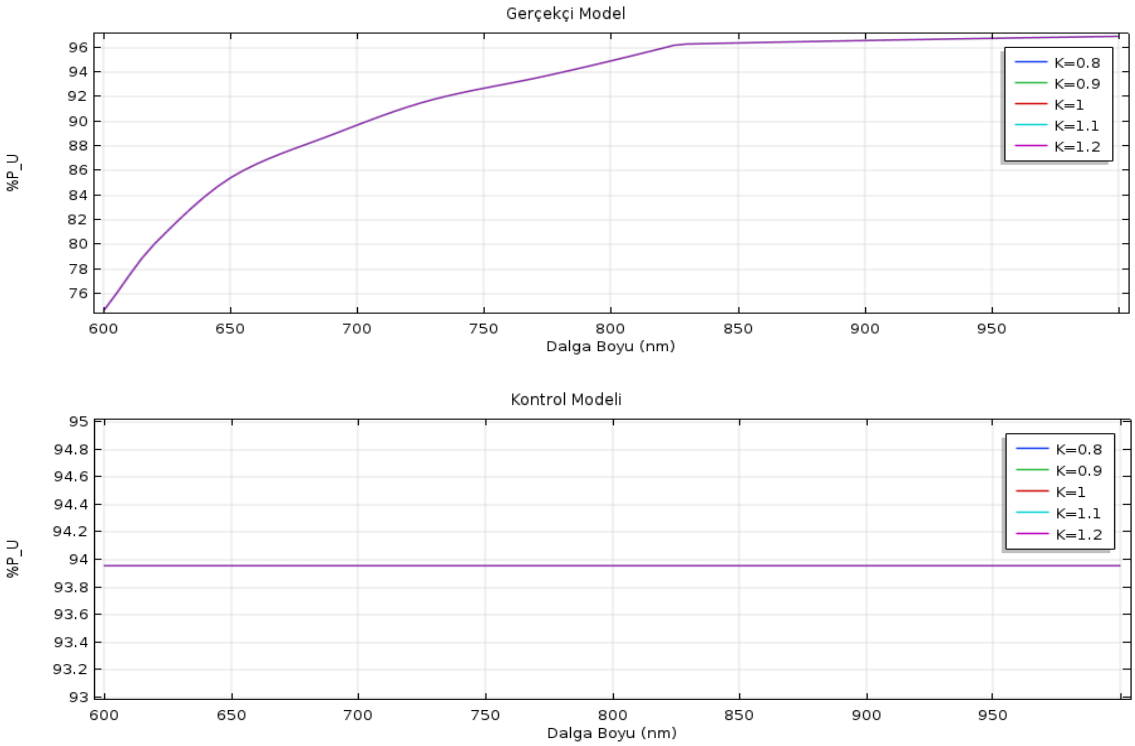
Şekil 43. Gerçekçi ve kontrol modelleri için n_{yi} ve k_{np}

Şekil 43'te değişen yarı iletken gerçek kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde polarizasyonu belirleyen n_{yi} ve k_{np} kırılma indisleri verilmiştir. n_{yi} değiştirilirken k_{yi}, k_{np}, n_{np} parametreleri sabit tutulmaktadır.



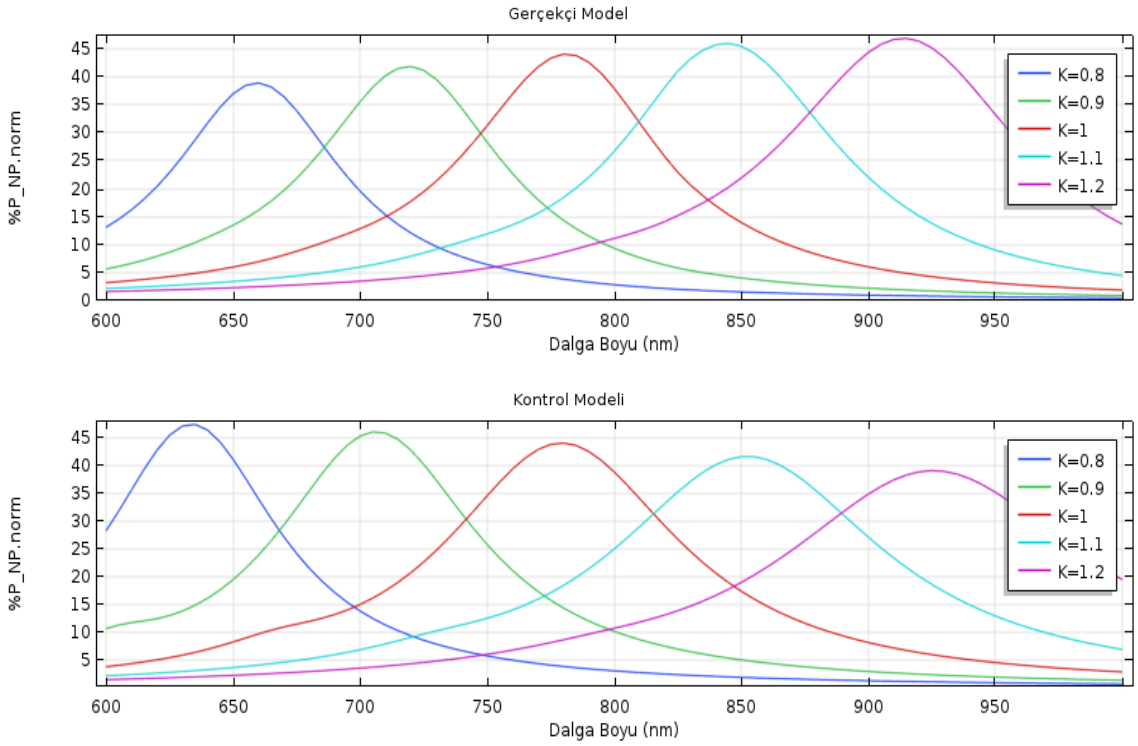
Şekil 44. Gerçekçi ve kontrol modelleri için n_{yi}'ye bağlı rezonans ifadesi

Şekil 44'te değişen yarı iletken gerçek kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde yarıstatik yaklaşımda rezonansı belirlemeyi sağlayan $\varepsilon_1' + 2\varepsilon_2'$ ifadesi hesaplanmaktadır. Bu ifadenin sıfıra eşit olduğu frekansta rezonans olması beklenmektedir. Bu rezonans frekansı ile gerçek rezonans frekansı arasında yarıstatik modelin bir yaklaşım olması sebebiyle bir fark oluşacaksa da rezonansın ne şekilde hareket edeceği konusunda bir fikir verecektir. Şekilde görüldüğü üzere n_{yi} arttıkça rezonans frekansının azalması beklenmektedir.



Şekil 45. Gerçekçi ve kontrol modelleri için n_{yi}'ye bağlı olarak NP'lere ulaşan güç oranı ($\%P_U$)

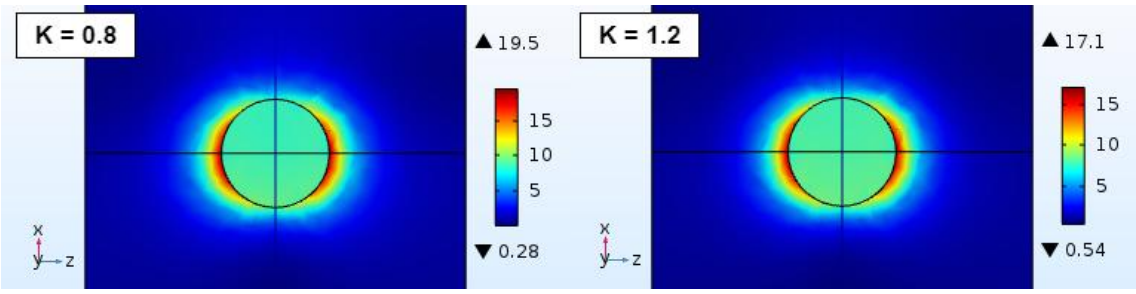
Şekil 45'te değişen yarı iletken gerçek kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan güç oranının gerçek kırılma indisiyle değişmediği görülmektedir. Bu da bu indisin yarı iletken emilimini etkilememesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 46. Gerçekçi ve kontrol modelleri için n_{yi}'ye bağlı NP emilim oranı ($\%P_{NP.norm}$)

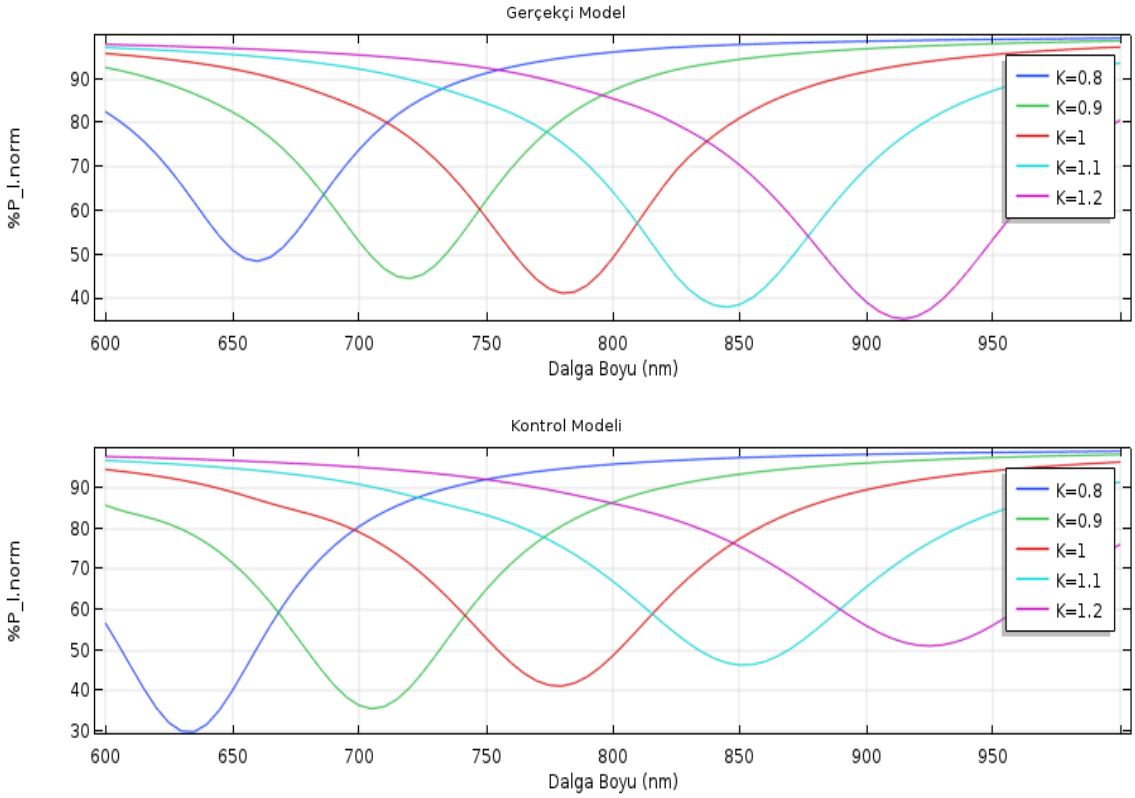
Şekil 46'da değişen yarı iletken gerçek kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP tarafından soğurulan güç oranındaki değişim görülmektedir. Artan n_{yi} ile NP emilimi rezonans frekansı hem kontrol hem de gerçekçi model için azalmaktadır. Bu, Şekil 44 ile tutarlı bir sonuçtur.

NP emilim oranı ise kontrol modeli için azalmakta, gerçekçi model için artmaktadır. Kontrol modelinde n_{yi} dışındaki bütün parametreler sabit kaldığı için n_{yi}'nin etkisi daha belirgindir. Bu modelde NP emilim katsayısı (α_{np}) sabit kalmasına rağmen emilim oranı, artan n_{yi} ile birlikte azalmıştır. Bunun sebebi rezonans frekansında elektrik alan yoğunluğunun yani arttırılmış elektrik alan tepe değerinin azalmış olmasıdır. Böylece n_{yi} artışının elektrik alan yoğunluğunu azalttığı sonucuna varılabilir. Şekil 47'de bu çıkarımın doğru olduğu görülmektedir. Kontrol modelinde K'nın 0.8 olduğu durumda gelen güce göre en yüksek normalize edilmiş elektrik alan 19.5'tir, K'nın 1.2 olduğu durumda ise 17.1'dir. Aynı şekilde NP içerisinde de elektrik alan şiddeti azalmaktadır. Elektrik alandaki bu azalış emilimi de azaltmaktadır.



Şekil 47. n_{yi} katsayısı K'nın 0.8 ve 1.2 olduğu durumlar için rezonans frekansında normalize elektrik alanlar

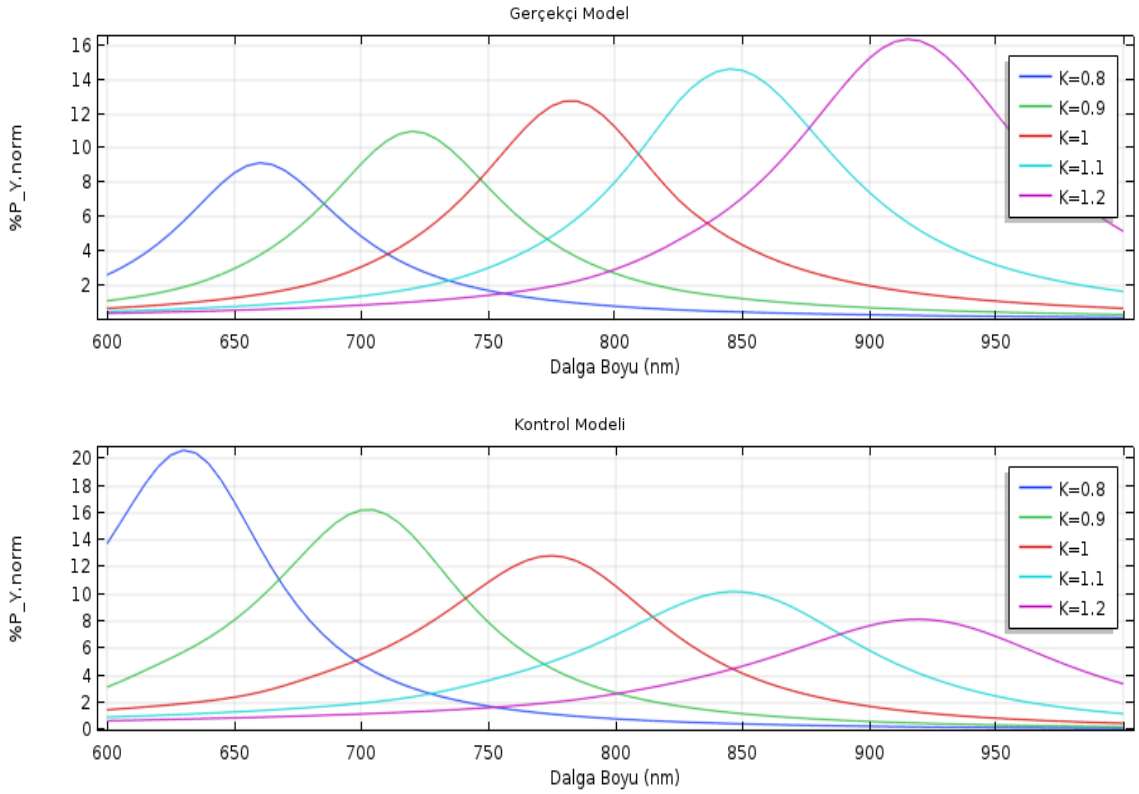
Gerçekçi modelde ise düşük frekanslarda NP emilim katsayısının azalması elektrik alanı arttıran bir etkiye sahiptir ve yanlış bir çıkarım yapmaya yönlendirir. Buradan kontrol modelinin oluşturulmuş olmasının daha doğru çıkarım yapılmasına yönelik katkısı görülmektedir.



Şekil 48. Gerçekçi ve kontrol modelleri için n_{yi}'ye bağlı NP iletim oranı ($\%P_{\text{i}.norm}$)

Şekil 48'de değişen yarı iletken gerçek kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün iletim yüzdesi verilmiştir. Artan n_{yi} ile birlikte iletim rezonans frekansı hem kontrol hem de gerçekçi model için azalmaktadır.

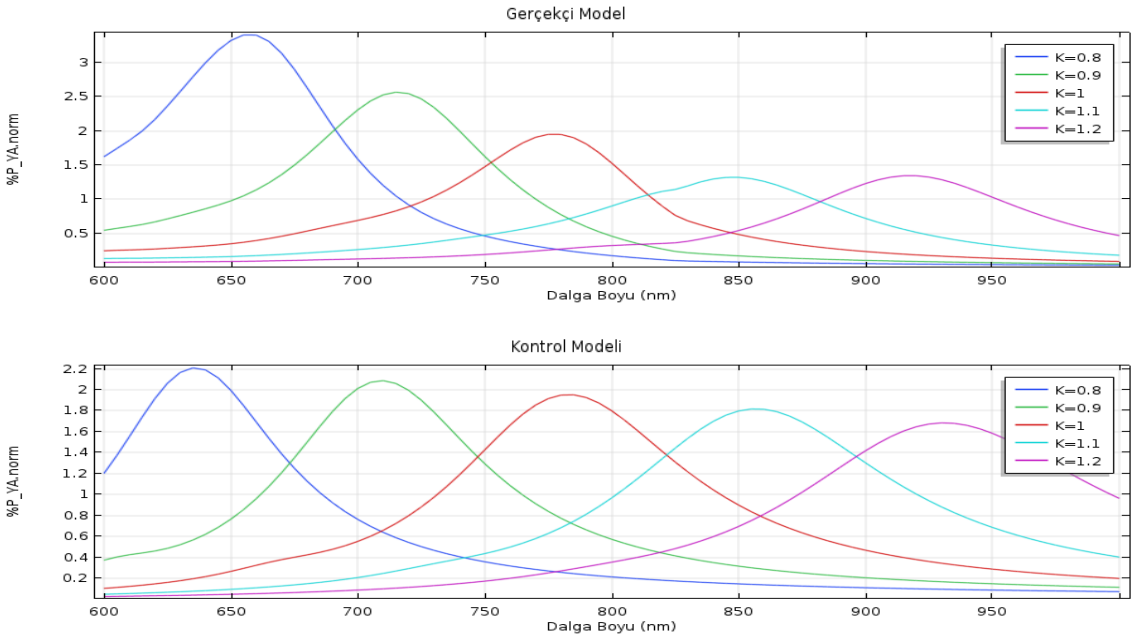
Artan n_{yi} ile elektrik alan yoğunluğunun azalması NP etkileşim oranını azaltmaktadır. Böylece kontrol modelinde iletim oranı da artmaktadır. Gerçekçi modelde ise düşük frekanslarda kayıpların azalması plazmonik etkiyi güçlendirerek iletimi azaltmaktadır.



Şekil 49. Gerçekçi ve kontrol modelleri için n_{yi}'ye bağlı NP yansıma oranı ($\%P_{Y.norm}$)

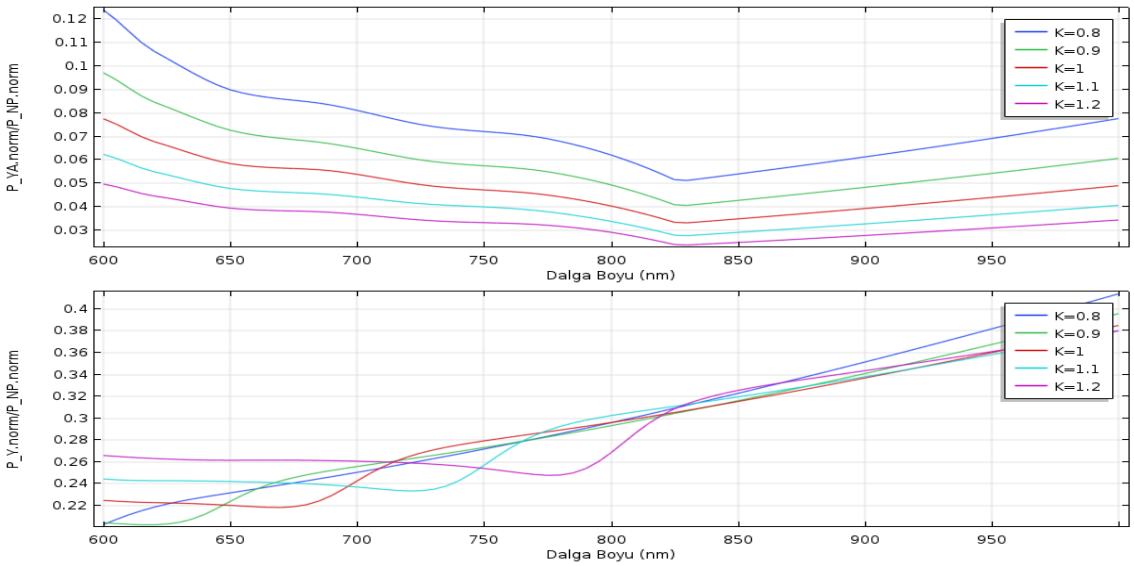
Şekil 49'da değişen yarı iletken gerçek kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün yansıma yüzdesi verilmiştir. Artan n_{yi} ile birlikte yansıma rezonans frekansı hem kontrol hem de gerçekçi model için azalmaktadır.

Artan n_{yi} ile elektrik alan yoğunluğunun azalması NP etkileşim oranını azaltmaktadır. Böylece kontrol modelinde yansıma oranı da azalmaktadır. Gerçekçi modelde ise düşük frekanslarda kayıpların azalması plazmonik etkiyi güçlendirerek yansımayı arttırmaktadır.



Şekil 50. Gerçekçi ve kontrol modelleri için n_{yi}'ye bağlı yakın alan emilim oranı ($\%P_{YA.norm}$)

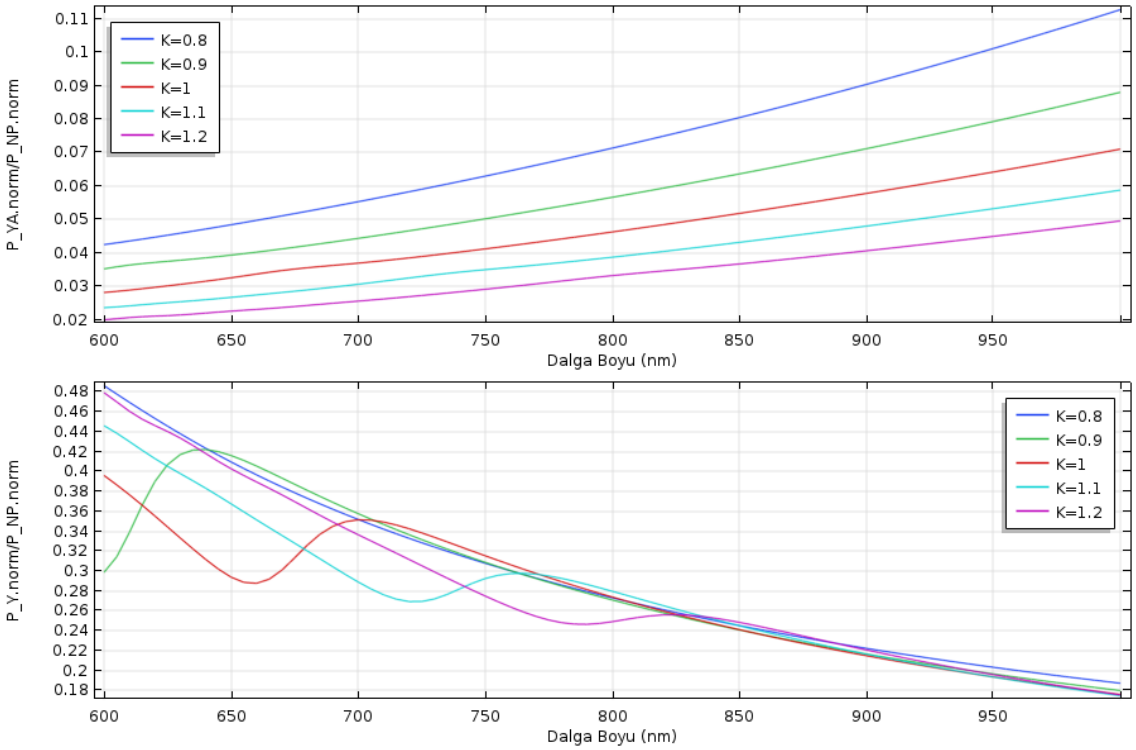
Şekil 50'de değişen yarı iletken gerçek kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan güce göre yakın alan bölgesinde yarı iletken emilimindeki artışın yüzdesi görülmektedir. Artan n_{yi} ile birlikte yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen güç oranı ve rezonans frekansı azalmaktadır. Emilimdeki bu azalma oranı kontrol modelinde NP emilimi ile benzerlik göstermektedir. Gerçekçi modelde ise doğrusal olmayan bir değişim görülmektedir. Bu değişimin nasıl ortaya çıktığı Şekil 51 incelenerek anlaşılabilir.



Şekil 51. Gerçekçi model için n_{yi}'ye bağlı $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ ve $P_{Y.norm}/P_{NP.norm}$

Şekil 51'de değişen yarı iletken gerçek kırılma indisi için gerçekçi modelde yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen ve yansıtılan gücün NP tarafından soğurulan güce oranı verilmiştir. $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ grafiğinin doğrusal olmadığı görülmektedir. Rezonans frekansının bu dalga boyu aralığında hareket etmesi birçok değişken parametre sebebiyle değişken bir rezonans tepe noktasına sebep olur.

Yansıma ise genel olarak frekans azaldıkça NP emilimine oranla daha çok artmaktadır. n_{yi}'de yapılan değişiklik bu oran üzerinde fazla bir değişikliğe sebep olmamaktadır. Düşük frekansa kaydırılan rezonans, daha verimli bir yansıma olmasını sağlar.



Şekil 52. Kontrol modeli için n_{yi}'ye bağlı $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ ve $P_{Y.norm}/P_{NP.norm}$

Şekil 52'de değişen yarı iletken gerçek kırılma indisi için kontrol modelinde yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen ve yansıtılan gücün NP tarafından soğurulan güce oranı verilmiştir. $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ grafiğinde n_{yi}'lere göre rezonans noktaları incelendiğinde her nokta için bu oranın yaklaşık olarak sabit kaldığı ve 0.045 (%4.5) civarında olduğu görülmektedir. Bu da NP emilimi ile yakın alan bölgesinde yarı iletken emiliminin aynı oranda değişim gösterdiğini belirtir.

Yansıma ise genel olarak frekans azaldıkça NP emilimine oranla daha çok azalmaktadır. n_{yi}'de yapılan değişiklik bu oran üzerinde fazla bir değişikliğe sebep olmamaktadır. Bu modelde düşük frekansa kaydırılan rezonans, daha az yansımaya sebep olmaktadır.

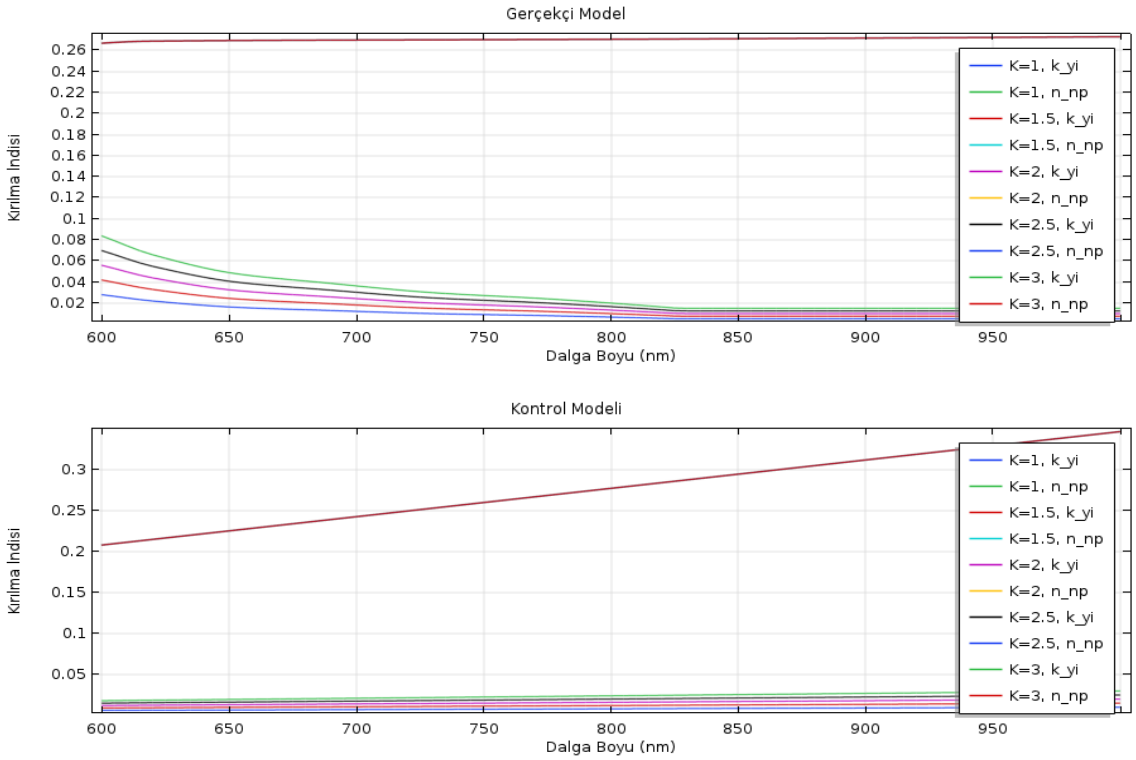
Genel olarak n_{yi}'nin değişmesi NP'nin yansıma karakteristiklerinde değişikliğe yol açmaz. NP kalite faktörünün frekansa bağlı olarak değişmesi nedeniyle değişen rezonans frekansı ile yansımada görünürde değişiklik meydana gelir.

n_{yi}'nin azalması yakın alan emiliminde artışa sebep olur ve bu nedenle tercih edilebilir bir özelliktir. Yarı iletkenler, daha çok bant aralıklarına göre seçildikleri için n_{yi} parametresinin etkilerinin bilinmesi tek tür nanoparçacığın birden fazla yarı iletkende kullanımı durumunda rezonans frekansının tespiti için kullanışlı olabilecektir.

4.3.3.2. Sanal Yarı İletken Kırılma İndisinin Etkileri

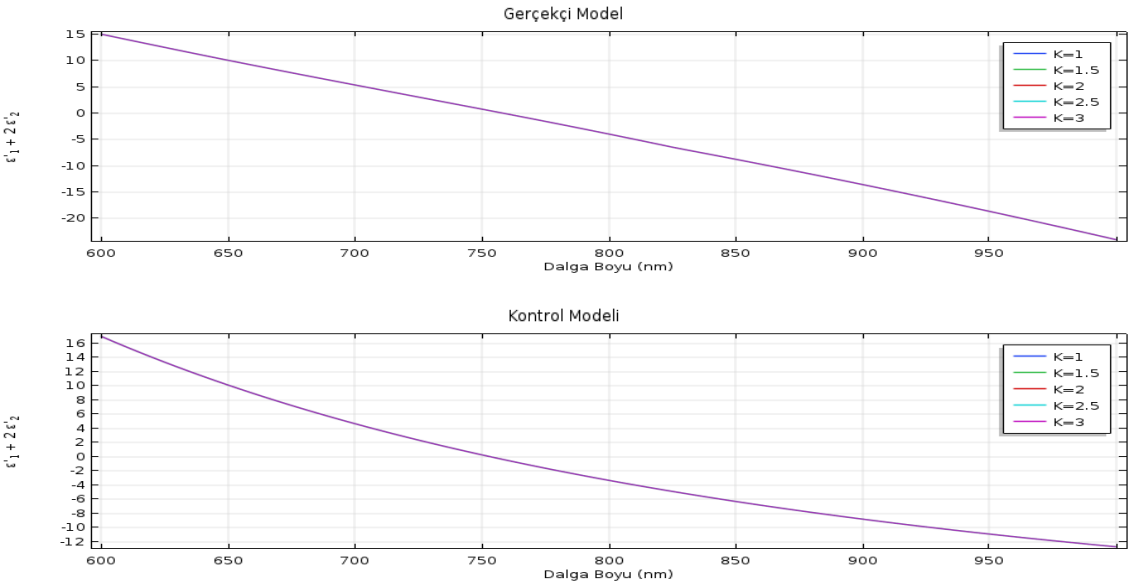
Yarı iletken sanal kırılma indisinin (k_{yi}) değiştirilmesiyle elde edilen sonuçlar, kontrol ve gerçekçi model için aşağıda verilmiştir. Benzetimde kullanılan k değerleri şu şekildedir:

Sanal kırılma indisi = $K \times k_{yi}$, K = 1, 1.5, 2, 2.5, 3



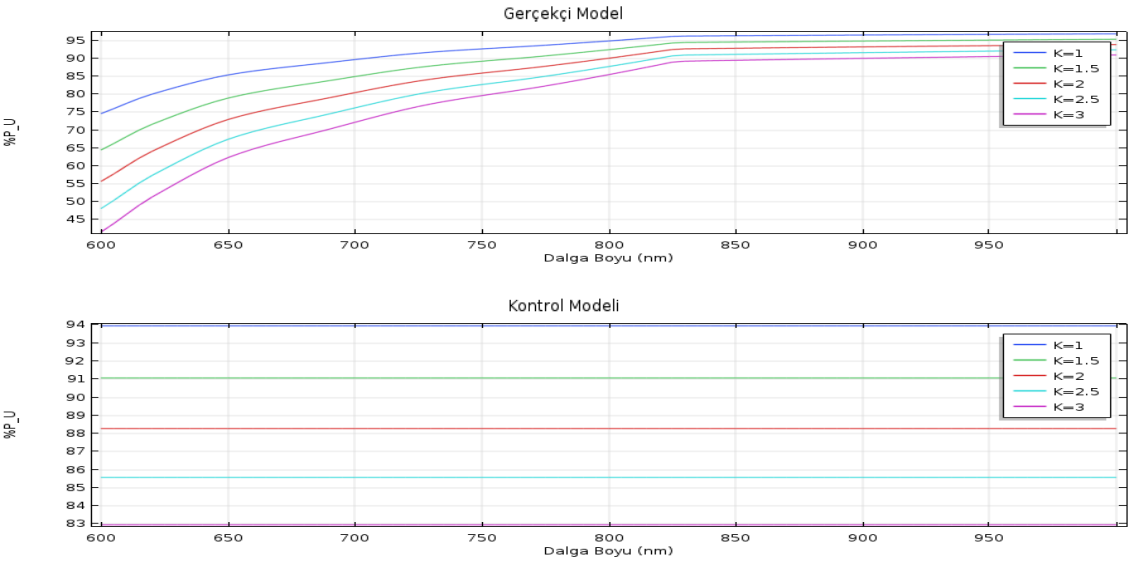
Şekil 53. Gerçekçi ve kontrol modelleri için k_{yi} ve n_{np}

Şekil 53'te değişen yarı iletken sanal kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde emilimi belirleyen k_{yi} ve n_{np} kırılma indisleri verilmiştir. k_{yi} değiştirilirken n_{yi}, k_{np}, n_{np} parametreleri sabit tutulmaktadır.



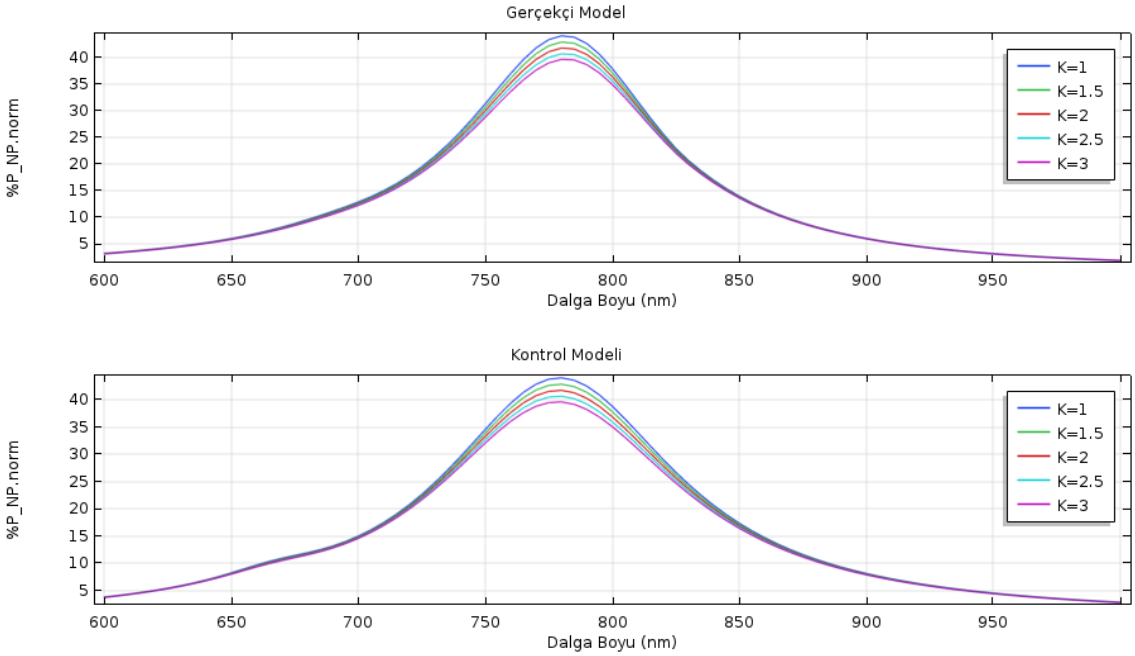
Şekil 54. Gerçekçi ve kontrol modelleri için k_{yi}'ye bağlı rezonans ifadesi

Şekil 54'te değişen yarı iletken sanal kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde yarıstatik yaklaşımda rezonansı belirlemeyi sağlayan $\varepsilon_1' + 2\varepsilon_2'$ ifadesi hesaplanmaktadır. Bu ifadenin sıfıra eşit olduğu frekansta rezonans olması beklenmektedir. Bu rezonans frekansı ile gerçek rezonans frekansı arasında yarıstatik modelin bir yaklaşım olması sebebiyle bir fark oluşacaksa da rezonansın ne şekilde hareket edeceği konusunda bir fikir verecektir. Şekilde görüldüğü üzere k_{yi} 'nin değişmesi n_{yi}'nin k_{yi}'den çok büyük olduğu durumda rezonans frekansında değişikliğe sebep olmaz.



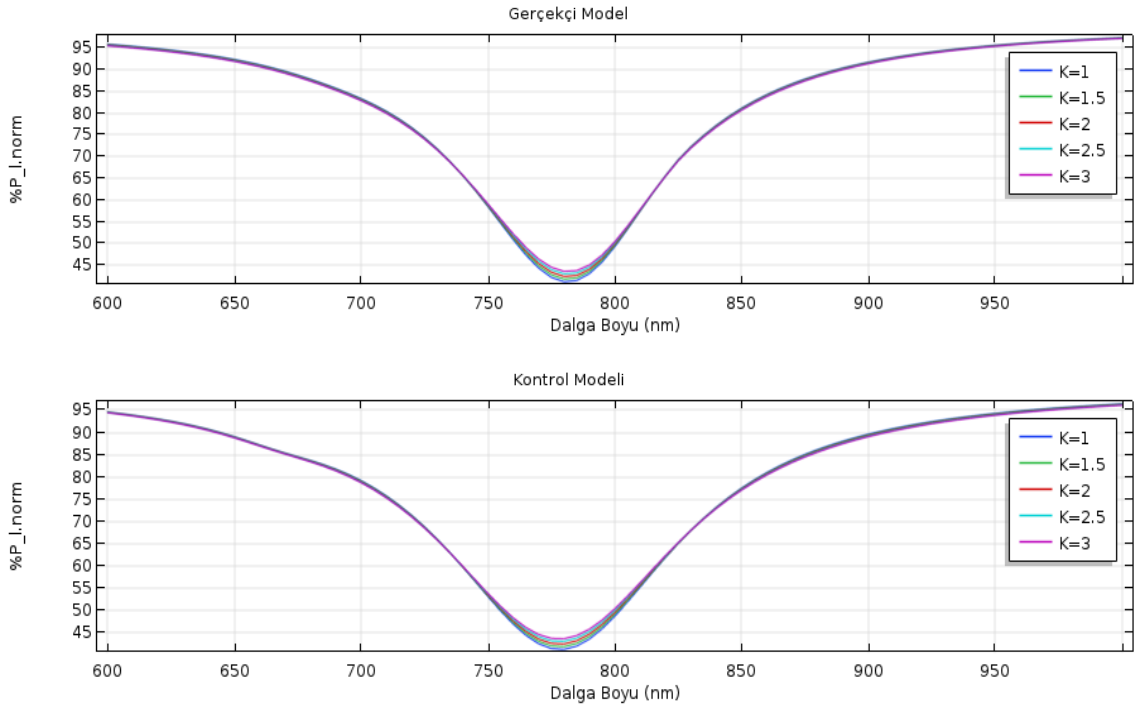
Şekil 55. Gerçekçi ve kontrol modelleri için k_{yi}'ye bağlı olarak NP'lere ulaşan güç oranı ($\%P_U$)

Şekil 55'te değişen yarı iletken sanal kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan güç oranı verilmiştir. Artan k_{yi} ile birlikte NP düzlemine ulaşan güç oranının hem kontrol hem de gerçekçi model için azaldığı görülmektedir. Bu da bu indisin yarı iletken emilimini arttırmasından kaynaklanmaktadır.



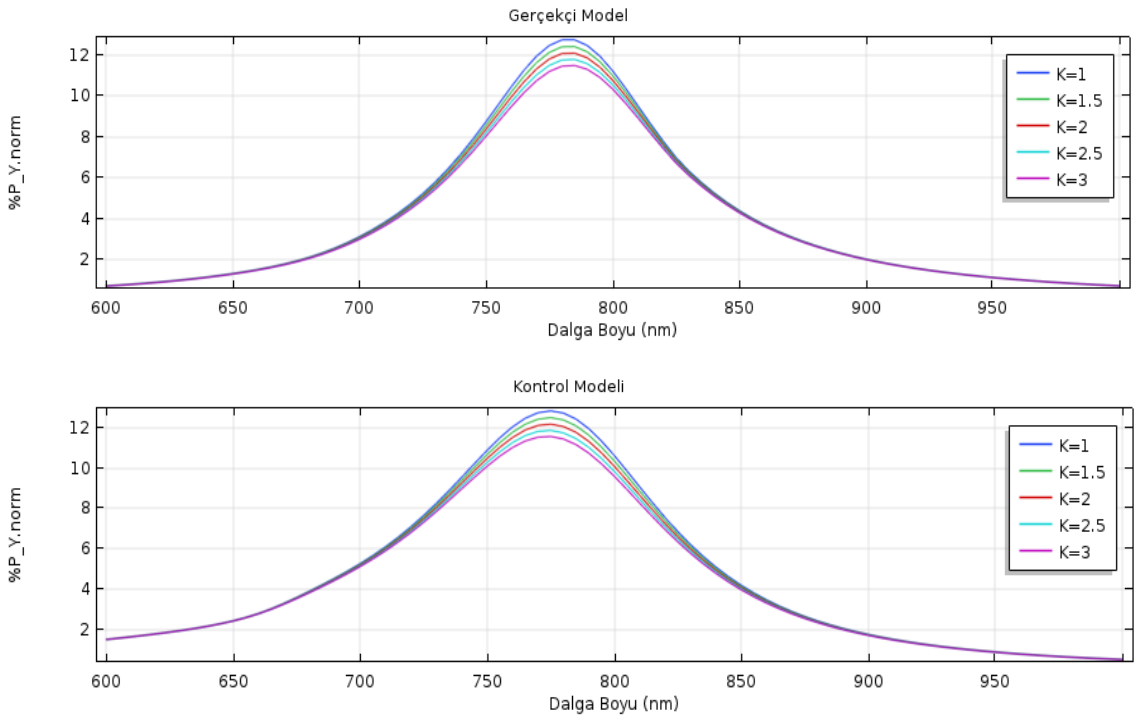
Şekil 56. Gerçekçi ve kontrol modelleri için k_{yi}'ye bağlı NP emilim oranı ($\%P_{NP.norm}$)

Şekil 56'da değişen yarı iletken sanal kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP tarafından soğurulan güç oranındaki değişim görülmektedir. Artan k_{yi} ile birlikte NP soğurma oranının hem kontrol hem de gerçekçi model için azaldığı görülmektedir. Fakat bu değişim çok az bir miktarda olmaktadır ve ihmal edilebilir seviyededir.



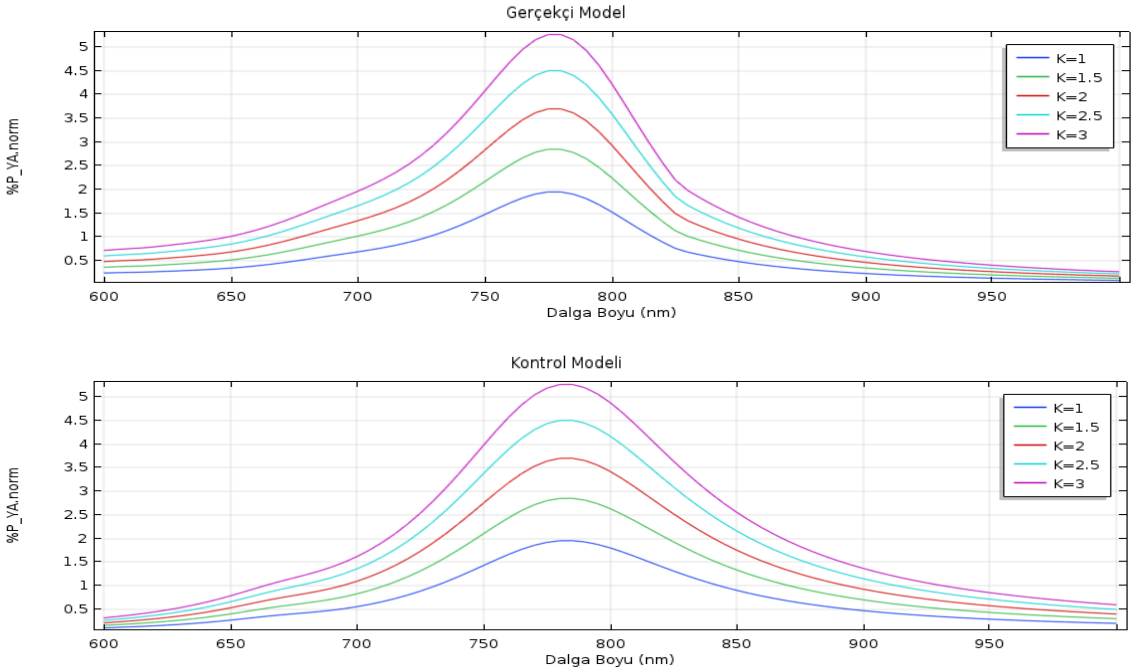
Şekil 57. Gerçekçi ve kontrol modelleri için k_{yi}'ye bağlı NP iletim oranı ($\%P_{\mathrm{I}.norm}$)

Şekil 57'de değişen yarı iletken sanal kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün iletim yüzdesi verilmiştir. Artan k_{yi} ile birlikte iletim oranı hem kontrol hem de gerçekçi model için artmaktadır. Fakat bu değişim çok az bir miktarda olmaktadır ve ihmal edilebilir seviyededir.



Şekil 58. Gerçekçi ve kontrol modelleri için k_{yi}'ye bağlı NP yansıma oranı ($\%P_{Y.norm}$)

Şekil 58'de değişen yarı iletken sanal kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün yansıma yüzdesi verilmiştir. Artan k_{yi} ile birlikte yansıma oranı hem kontrol hem de gerçekçi model için azalmaktadır. Fakat bu değişim çok az bir miktarda olmaktadır ve ihmal edilebilir seviyededir.



Şekil 59. Gerçekçi ve kontrol modelleri için k_{yi}'ye bağlı yakın alan emilim oranı ($\%P_{YA.norm}$)

Şekil 59'da değişen yarı iletken sanal kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan güce göre yakın alan bölgesinde yarı iletken emilimindeki artışın yüzdesi görülmektedir. Artan k_{yi} ile birlikte yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen güç oranı hem kontrol hem de gerçekçi model için artmaktadır. Bu değişim miktarı diğer karakteristiklere göre çok daha fazladır. Bu da yarı iletken sanal kırılma indisi ile yakın alan bölgesindeki emilimin diğer karakteristikleri çok fazla etkilemeden değiştirdiğini gösterir. k_{yi}'nin artması yarı iletken emilimini genel olarak arttırmakla birlikte plazmonik NP'ler ile birlikte yakın alan emiliminde de artışa sebep olur ve bu nedenle tercih edilebilir bir özelliktir. Bu, yarı iletken seçiminde göz önünde bulundurulabilecek bir sonuçtur.

4.3.4. Nanoparçacık Kırılma İndisinin Etkileri

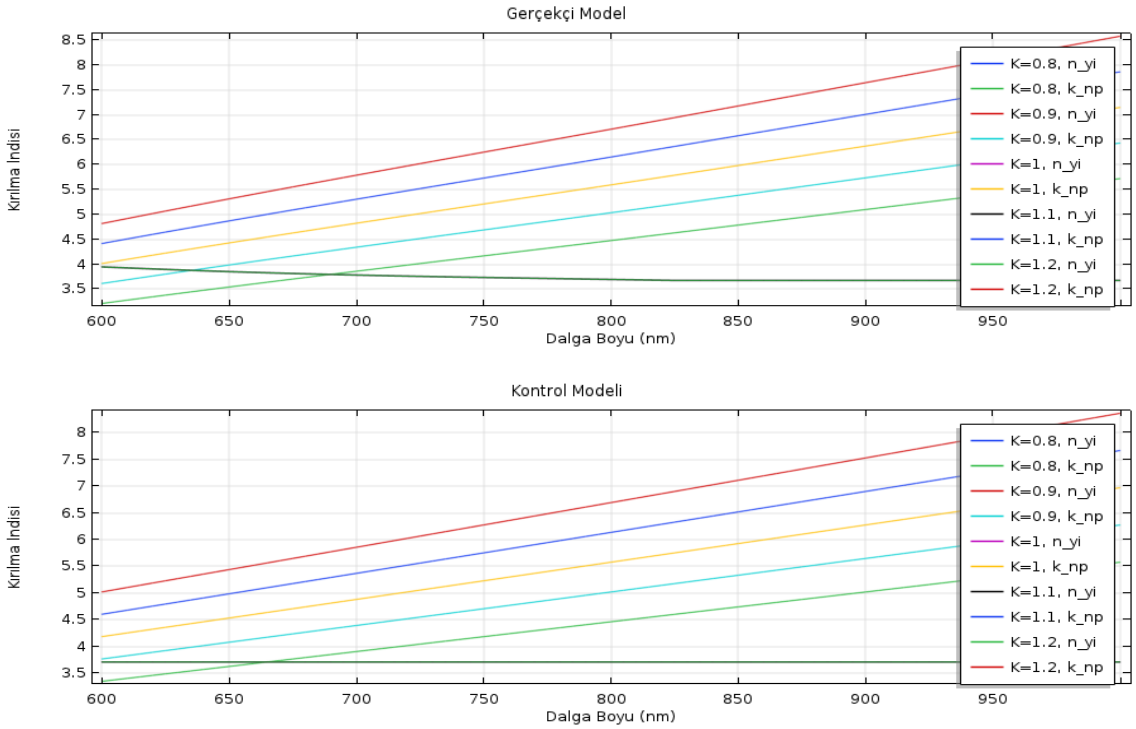
Bu bölümde NP kırılma indisleri değiştirilmiş ve etkileri incelenmiştir. Buradan elde edilen veriler NP materyali seçiminde ve seçilen materyalin göstereceği özelliklerin değerlendirilmesinde kullanılabilecektir.

4.3.4.1. Sanal Nanoparçacık Kırılma İndisinin Etkileri

Gerçek ve sanal kırılma indisleri olan n ve k parametrelerinin, NP ve yarı iletken için ters şeyler ifade etmekte olduğu "2.3. Plazmonik Materyaller" başlığı altında hesaplamalar sonucu gösterilmiştir. Yarı iletken için n polarizasyonu, k ise emilimi etkilese de NP için k polarizasyonu, n ise emilimi etkilemelidir. Bu bilgi, bu bölümde yapılan benzetimlerle doğrulanmıştır.

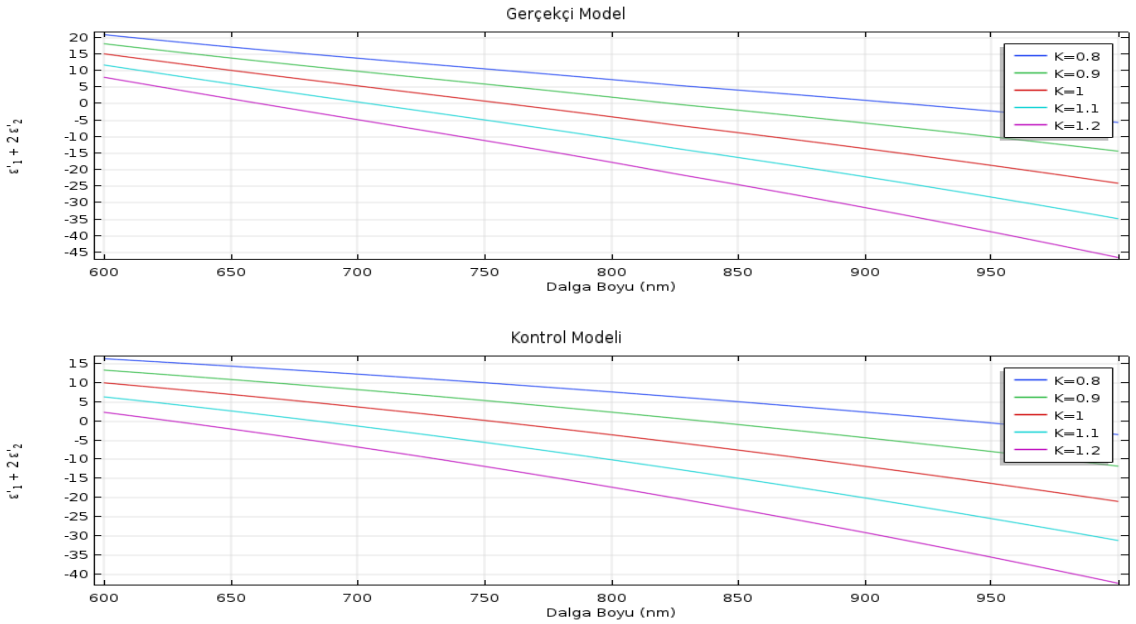
NP sanal kırılma indisinin (k_{np}) değiştirilmesiyle elde edilen sonuçlar, kontrol ve gerçekçi model için aşağıda verilmiştir. Benzetimde kullanılan k değerleri şu şekildedir:

Sanal kırılma indisi = $K \times k_{np}$, K = 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2



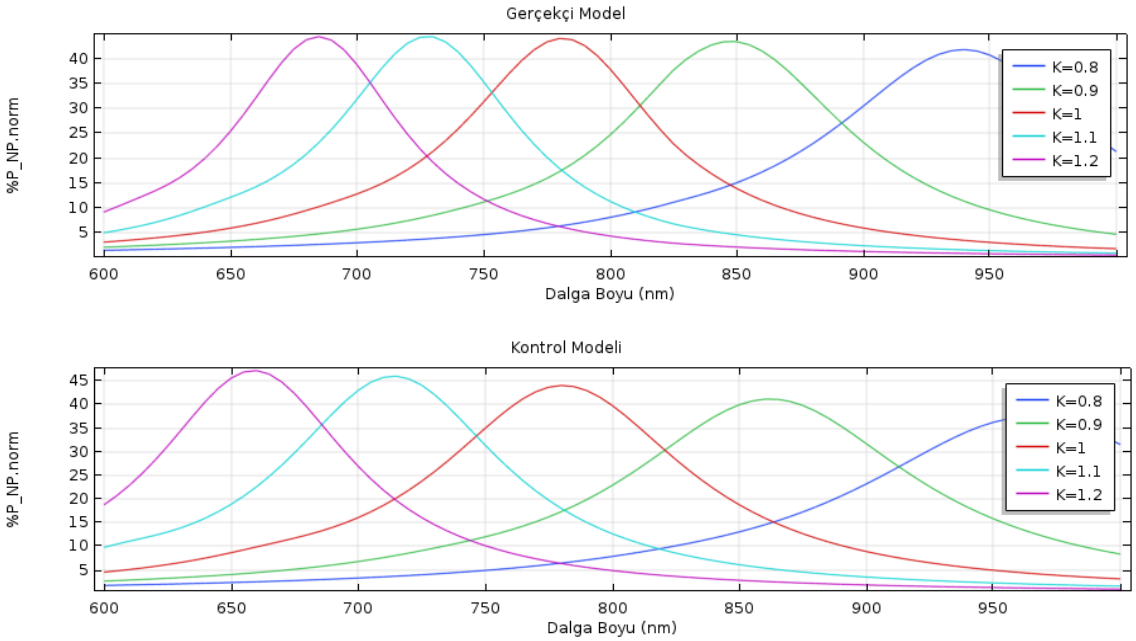
Şekil 60. Gerçekçi ve kontrol modelleri için k_{np} ve n_{yi}

Şekil 60'ta değişen NP sanal kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde polarizasyonu belirleyen n_{yi} ve k_{np} kırılma indisleri verilmiştir. k_{np} değiştirilirken n_{yi}, k_{yi}, n_{np} parametreleri sabit tutulmaktadır.



Şekil 61. Gerçekçi ve kontrol modelleri için k_{np}'ye bağlı rezonans ifadesi

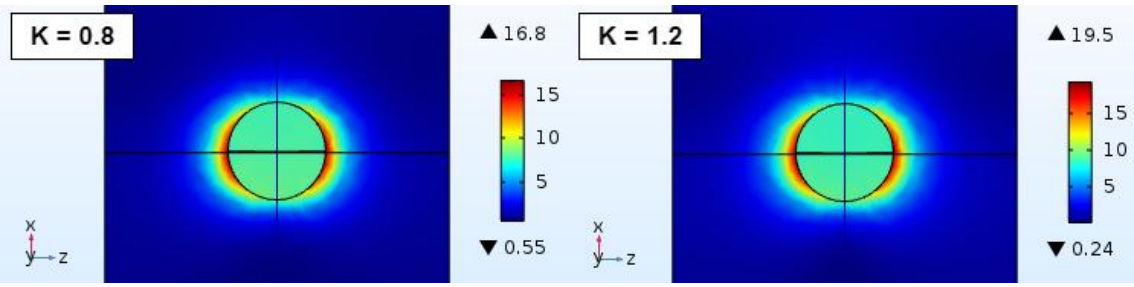
Şekil 61'de değişen NP sanal kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde yarıstatik yaklaşımda rezonansı belirlemeyi sağlayan $\varepsilon_1' + 2\varepsilon_2'$ ifadesi hesaplanmaktadır. Bu ifadenin sıfıra eşit olduğu frekansta rezonans olması beklenmektedir. Bu rezonans frekansı ile gerçek rezonans frekansı arasında yarıstatik modelin bir yaklaşım olması sebebiyle bir fark oluşacaksa da rezonansın ne şekilde hareket edeceği konusunda bir fikir verecektir. Şekilde görüldüğü üzere k_{np} arttıkça rezonans frekansının artması beklenmektedir.



Şekil 62. Gerçekçi ve kontrol modelleri için k_{np}'ye bağlı NP emilim oranı ($\%P_{NP.norm}$)

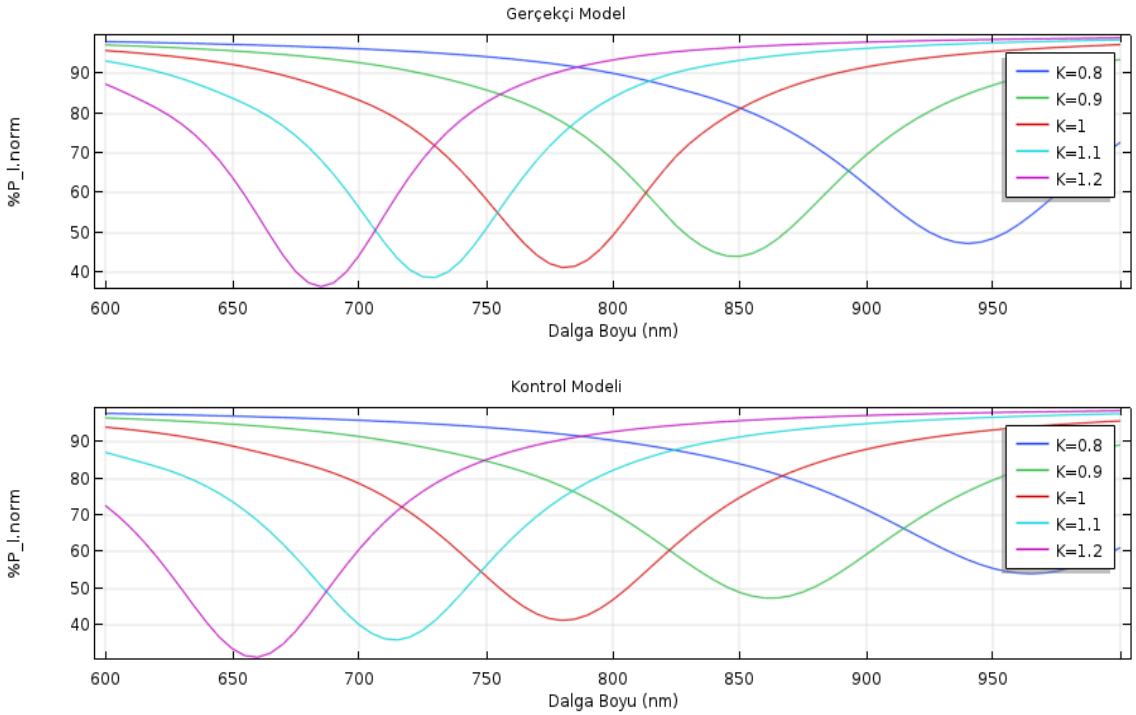
Şekil 62'de değişen NP sanal kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP tarafından soğurulan güç oranındaki değişim görülmektedir. Artan k_{np} ile NP emilimi rezonans frekansı hem kontrol hem de gerçekçi model için artmaktadır. Bu, Şekil 61 ile tutarlı bir sonuçtur.

NP emilim oranı ise hem kontrol hem de gerçekçi model için artmaktadır. NP emilim katsayısı sabit kalmasına rağmen emilim oranı artan k_{np} ile birlikte artmıştır. Bunun sebebi rezonans frekansında elektrik alan yoğunluğunun yani arttırılmış elektrik alan tepe değerinin artmış olmasıdır. Böylece k_{np} artışının elektrik alan yoğunluğunu arttırdığı sonucuna varılabilir.



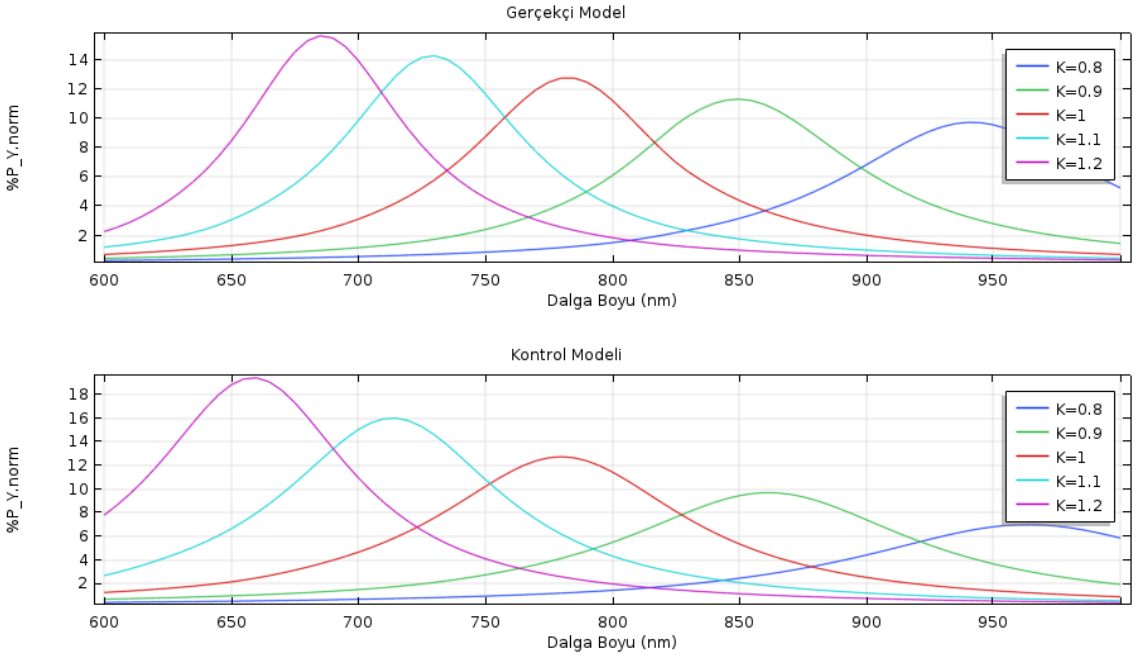
Şekil 63. k_{np} katsayısı K'nın 0.8 ve 1.2 olduğu durumlar için rezonans frekansında normalize elektrik alanlar

Şekil 63'te bu çıkarımın doğru olduğu görülmektedir. Kontrol modelinde K'nın 0.8 olduğu durumda gelen güce göre en yüksek normalize edilmiş elektrik alan 16.8'dir, K'nın 1.2 olduğu durumda ise 19.5'tir. Aynı şekilde NP içerisinde de elektrik alan şiddeti artmaktadır. Elektrik alandaki bu artış emilimi de arttırmaktadır.



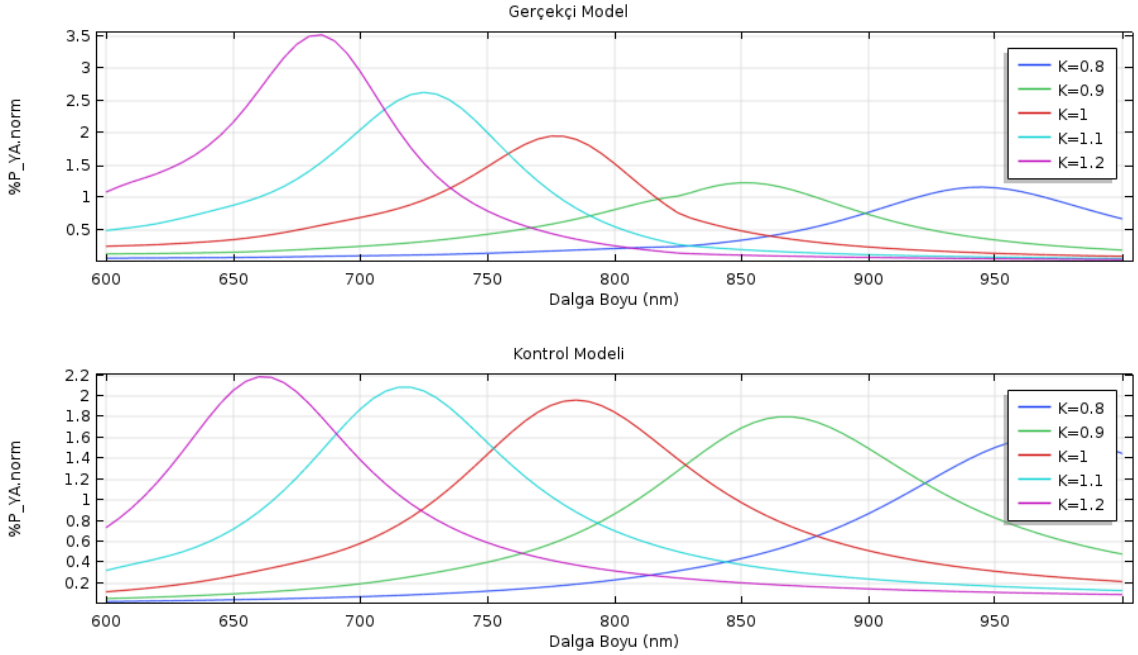
Şekil 64. Gerçekçi ve kontrol modelleri için k_{np}'ye bağlı NP iletim oranı ($\%P_{\text{İ}.norm}$)

Şekil 64'te değişen NP sanal kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün iletim yüzdesi verilmiştir. Artan k_{np} ile birlikte iletim rezonans frekansı hem kontrol hem de gerçekçi model için artmaktadır. Artan k_{np} ile elektrik alan yoğunluğunun artması NP etkileşim oranını arttırmaktadır. Böylece iletim oranı da azalmaktadır.



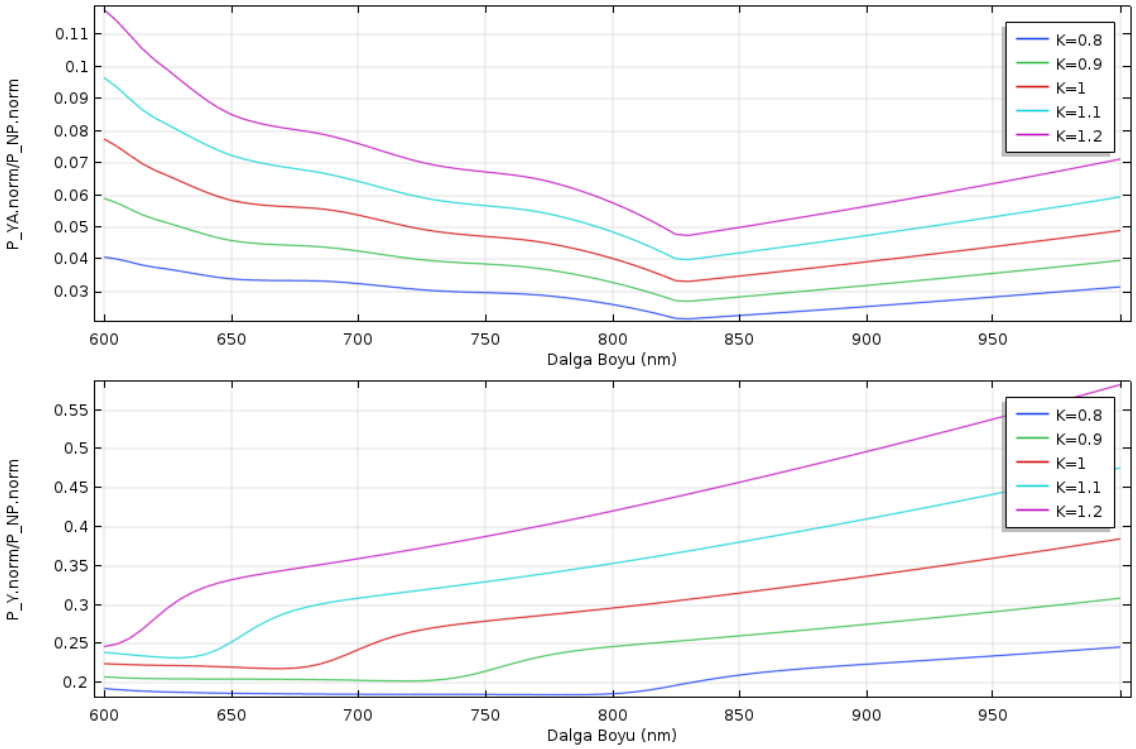
Şekil 65. Gerçekçi ve kontrol modelleri için k_{np}'ye bağlı NP yansıma oranı ($\%P_{Y.norm}$)

Şekil 65'te değişen NP sanal kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün yansıma yüzdesi verilmiştir. Artan k_{np} ile birlikte yansıma rezonans frekansı hem kontrol hem de gerçekçi model için artmaktadır. Artan k_{np} ile elektrik alan yoğunluğunun artması NP etkileşim oranını arttırmaktadır. Böylece yansıma oranı da artmaktadır.



Şekil 66. Gerçekçi ve kontrol modelleri için k_{np}'ye bağlı yakın alan emilim oranı ($\%P_{YA.norm}$)

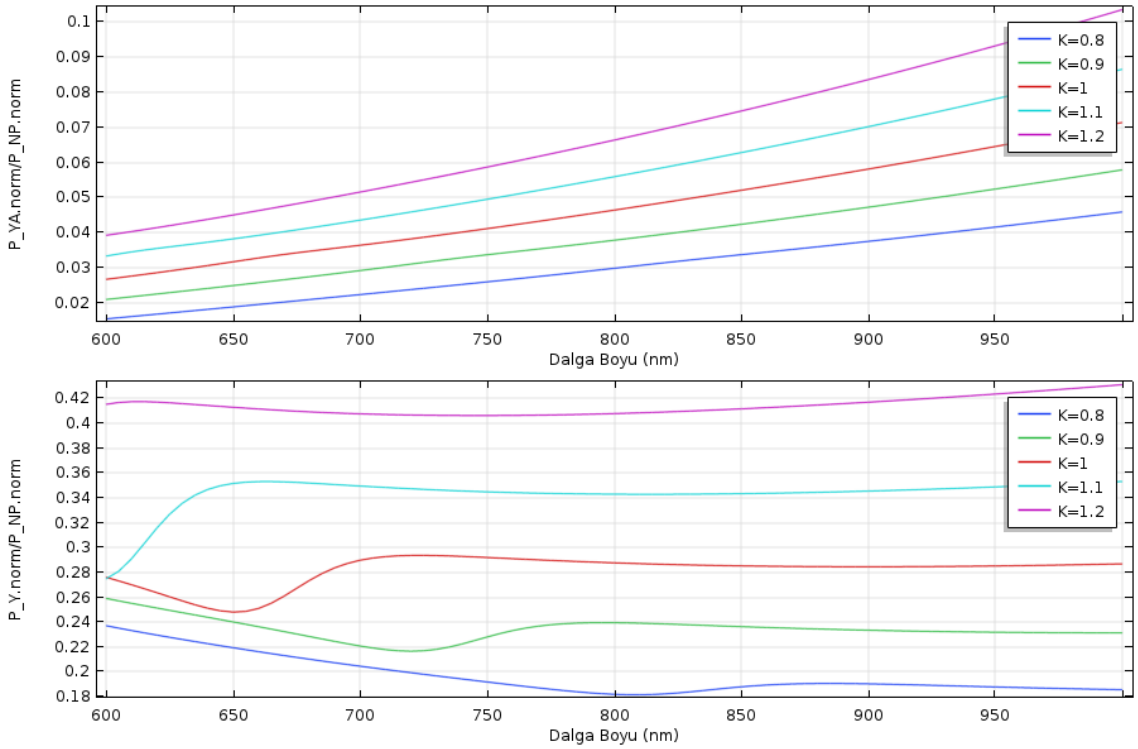
Şekil 66'da değişen NP sanal kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan güce göre yakın alan bölgesinde yarı iletken emilimindeki artışın yüzdesi görülmektedir. Artan k_{np} ile birlikte yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen güç oranı ve rezonans frekansı artmaktadır. Emilimdeki bu azalma oranı kontrol modelinde NP emilimi ile benzerlik göstermektedir. Gerçekçi modelde ise doğrusal olmayan bir değişim görülmektedir. Bu değişimin nasıl ortaya çıktığı Şekil 67 incelenerek anlaşılabilir.



Şekil 67. Gerçekçi model için k_{np}'ye bağlı $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ ve $P_{Y.norm}/P_{NP.norm}$

Şekil 67'de değişen NP sanal kırılma indisi için gerçekçi modelde yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen ve yansıtılan gücün NP tarafından soğurulan güce oranı verilmiştir. $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ grafiğinin doğrusal olmadığı görülmektedir. Rezonans frekansının bu dalga boyu aralığında hareket etmesi birçok değişken parametre sebebiyle değişken bir rezonans tepe noktasına sebep olur.

Yansıma ise genel olarak frekans azaldıkça NP emilimine oranla daha çok artmaktadır. k_{np} arttıkça yansıtılan güç oranı, NP emilim oranına kıyasla artmaktadır. Yüksek frekansa kaydırılan rezonans, daha verimsiz bir yansımaya sebep olmaktadır.



Şekil 68. Kontrol modeli için k_{np}'ye bağlı $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ ve $P_{Y.norm}/P_{NP.norm}$

Şekil 68'de değişen NP sanal kırılma indisi için kontrol modelinde yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen ve yansıtılan gücün NP tarafından soğurulan güce oranı verilmiştir. $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ grafiğinde k_{np}'lere göre rezonans noktaları incelendiğinde her nokta için bu oranın yaklaşık olarak sabit kaldığı ve 0.045 (%4.5) civarında olduğu görülmektedir. Bu da NP emilimi ile yakın alan bölgesinde yarı iletken emiliminin aynı oranda değişim gösterdiğini belirtir.

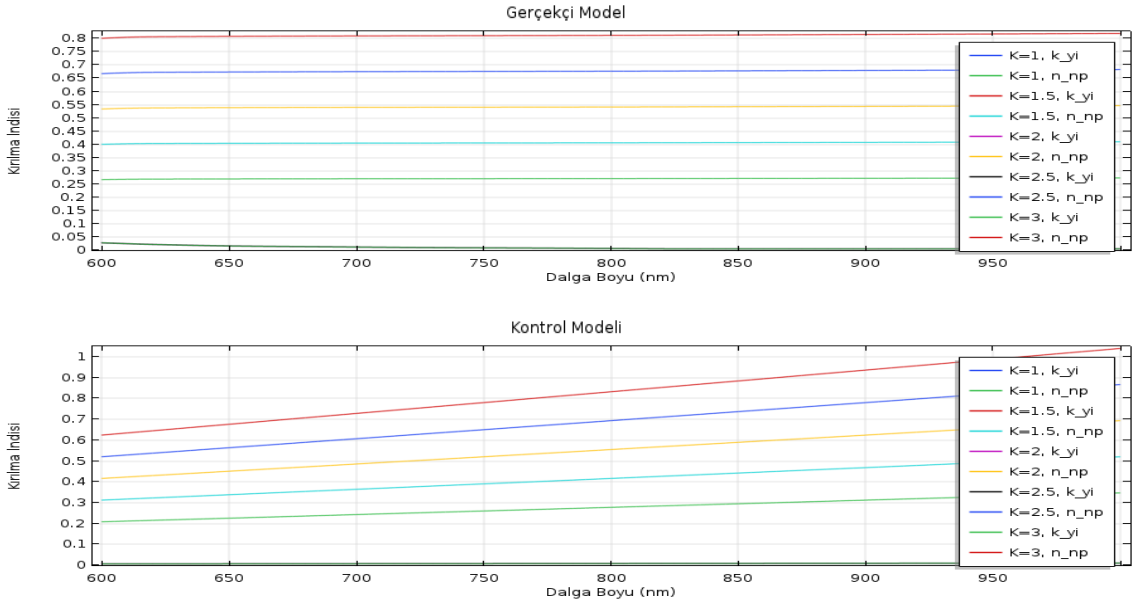
Yansıma ise genel olarak bu frekans aralığında NP emilimi ile aynı oranla kalmaktadır. k_{np} arttıkça yansıtılan güç oranı, NP emilim oranına kıyasla artmaktadır.

Genel olarak k_{np} arttıkça $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ ve $P_{Y.norm}/P_{NP.norm}$ grafiklerinin yukarı yönlü hareket ettiği görülmektedir. k_{np} arttıkça yansıma ve yakın alan emilim verimi artış gösterir, bu da emilimin NP üstünde olması istendiği durumda faydalıdır. Yakın alan emilimi, emilimin NP sonrasında olması istendiği durumda da faydalıdır fakat iletimde yansıma nedeniyle azalma meydana gelmesi kayba yol açabilecek bir özelliktir. k_{np} , rezonans frekansında da değişiklik yapılabilmesine imkan tanımaktadır. Bu sebeplerle yarı iletken materyalinin belirlenmesi sonrasında rezonans frekansını ayarlamak, istenilen emilim ve yansıma özelliklerini elde etmek için NP materyalinin belirlenmesinde kullanılabilecek bir parametredir.

4.3.4.2. Gerçek Nanoparçacık Kırılma İndisinin Etkileri

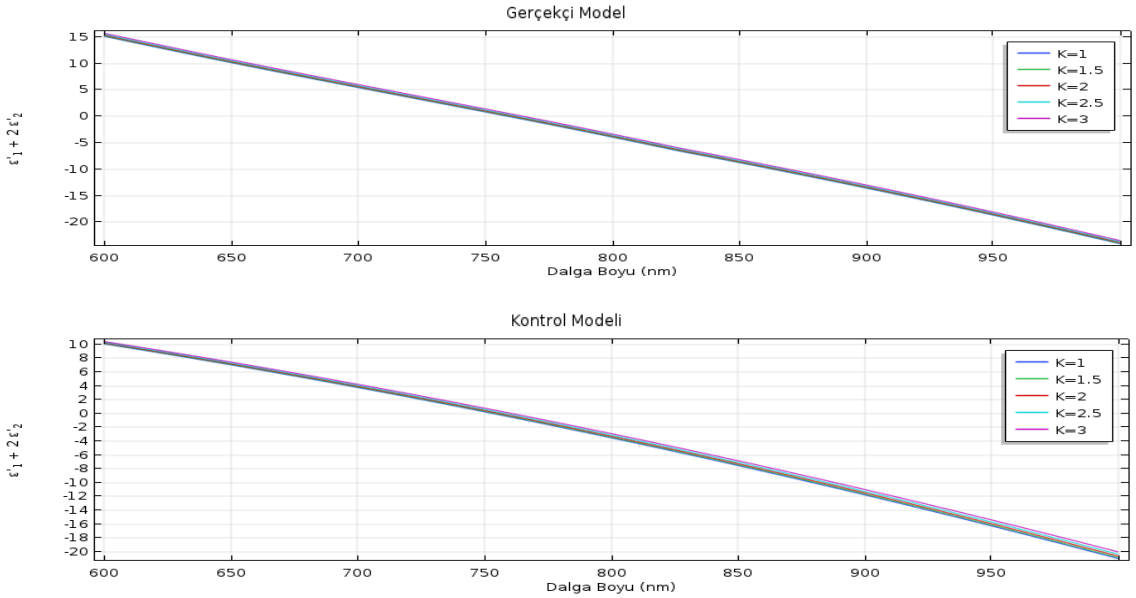
NP gerçek kırılma indisinin (n_{np}) değiştirilmesiyle elde edilen sonuçlar, kontrol ve gerçekçi model için aşağıda verilmiştir. Benzetimde kullanılan n değerleri şu şekildedir:

Sanal kırılma indisi = $K \times n_{np}$, K = 1, 1.5, 2, 2.5, 3



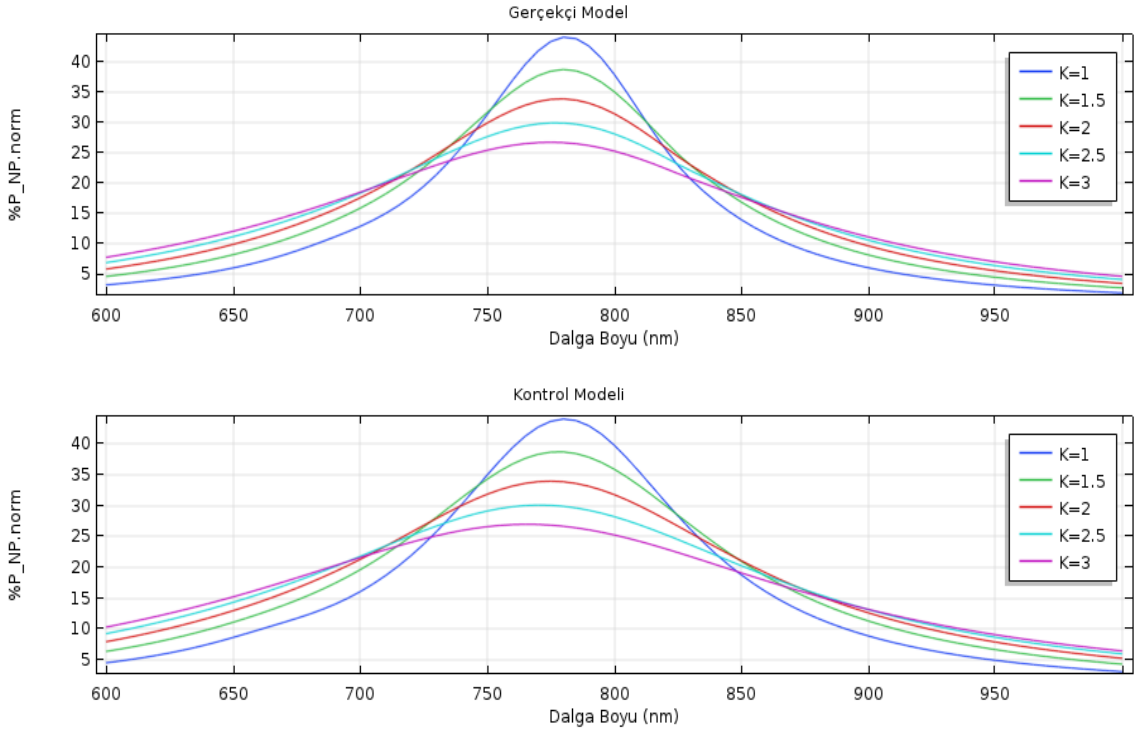
Şekil 69. Gerçekçi ve kontrol modelleri için n_{np} ve k_{yi}

Şekil 69'da değişen NP gerçek kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde emilimi belirleyen k_{yi} ve n_{np} kırılma indisleri verilmiştir. n_{np} değiştirilirken n_{yi}, k_{yi}, k_{np} parametreleri sabit tutulmaktadır.



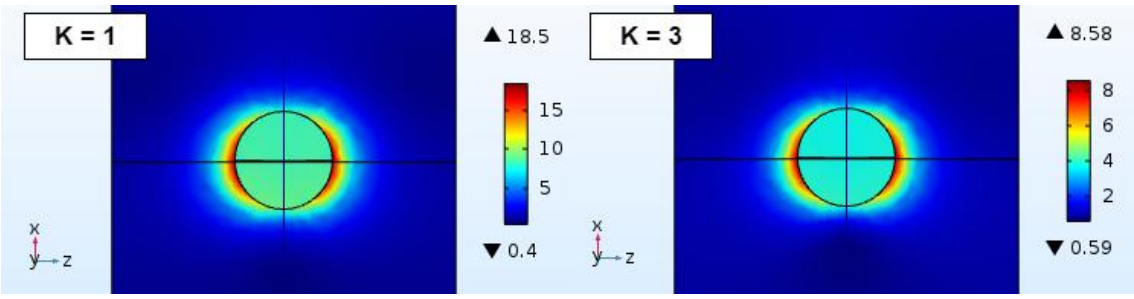
Şekil 70. Gerçekçi ve kontrol modelleri için n_{np}'ye bağlı rezonans ifadesi

Şekil 70'te değişen NP gerçek kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde yarıstatik yaklaşımda rezonansı belirlemeyi sağlayan $\varepsilon_1' + 2\varepsilon_2'$ ifadesi hesaplanmaktadır. Bu ifadenin sıfıra eşit olduğu frekansta rezonans olması beklenmektedir. Bu rezonans frekansı ile gerçek rezonans frekansı arasında yarıstatik modelin bir yaklaşım olması sebebiyle bir fark oluşacaksa da rezonansın ne şekilde hareket edeceği konusunda bir fikir verecektir. Şekilden görüldüğü üzere n_{np} 'nin değişmesi k_{np} 'nin n_{np} 'den çok büyük olduğu durumda rezonans frekansında çok fazla bir değişikliğe sebep olmaz. Gümüş için k_{np} ve n_{np} arasındaki fark silisyumun gerçek ve sanal kırılma indisleri arasındaki farktan çok daha düşük olması sebebiyle şekilde rezonanstaki değişim Şekil 54'e göre daha belirgindir fakat yine de ihmal edilebilir seviyededir.



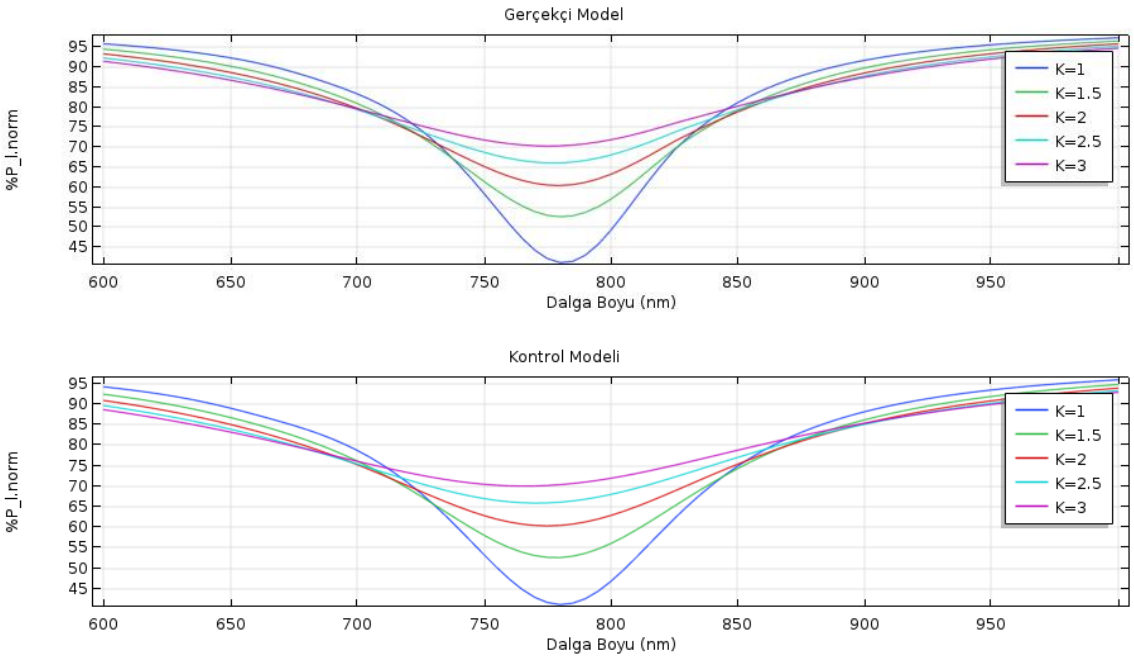
Şekil 71. Gerçekçi ve kontrol modelleri için n_{np}'ye bağlı NP emilim oranı ($\%P_{NP.norm}$)

Şekil 71'de değişen NP gerçek kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP tarafından soğurulan güç oranındaki değişim görülmektedir. Artan n_{np} ile birlikte NP soğurma oranının hem kontrol hem de gerçekçi model için rezonans noktasında azaldığı, fakat frekans bandının genişlediği görülmektedir. Burada emilimi arttıran ve azaltan iki farklı mekanizma vardır. n_{np}'nin artması NP emilimini doğrudan arttırır fakat artan emilim plazmon rezonansında kayıpların da artmasına sebep olur, bu da rezonans noktasında arttırılan elektrik alan yoğunluğunu ve dolayısıyla da emilimi azaltır.



Şekil 72. n_{np} katsayısı K'nın 1 ve 3 olduğu durumlar için rezonans frekansında normalize elektrik alanlar

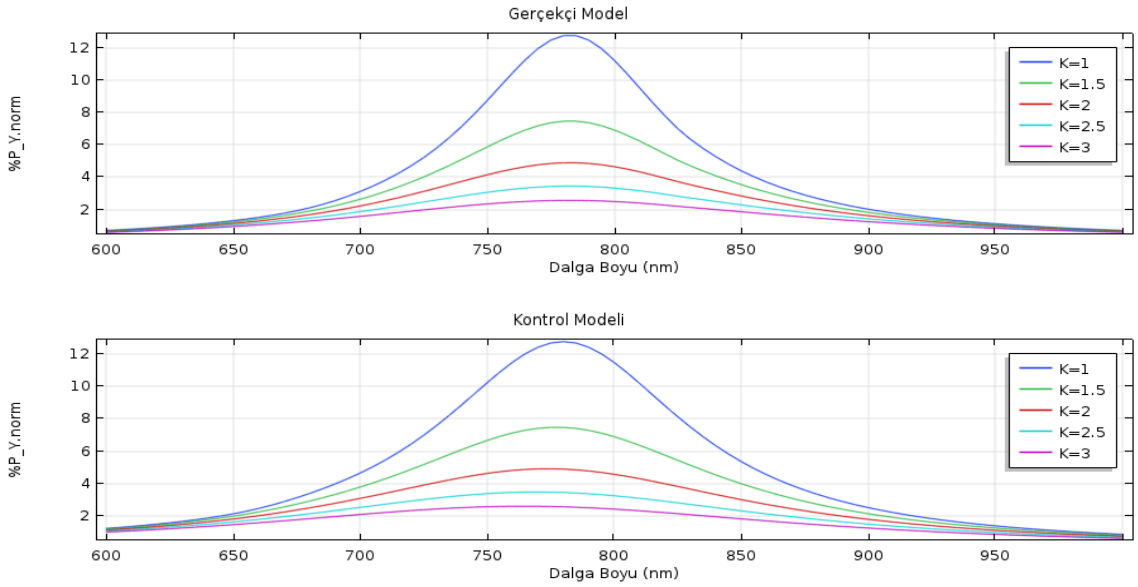
Şekil 72'de bu çıkarımın doğru olduğu görülmektedir. Kontrol modelinde K'nın 1 olduğu durumda gelen güce göre en yüksek normalize edilmiş elektrik alan 18.5'tir, K'nın 3 olduğu durumda ise 8.58'dir. Aynı şekilde NP içerisinde de elektrik alan şiddeti azalmaktadır. Rezonans noktasında elektrik alandaki bu azalış emilimi de azaltmaktadır.



Şekil 73. Gerçekçi ve kontrol modelleri için n_{np}'ye bağlı NP iletim oranı ($\%P_{İ.norm}$)

Şekil 73'te değişen NP gerçek kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün iletim yüzdesi verilmiştir. Artan n_{np} ile birlikte iletim oranı hem kontrol hem de gerçekçi model için artmaktadır.

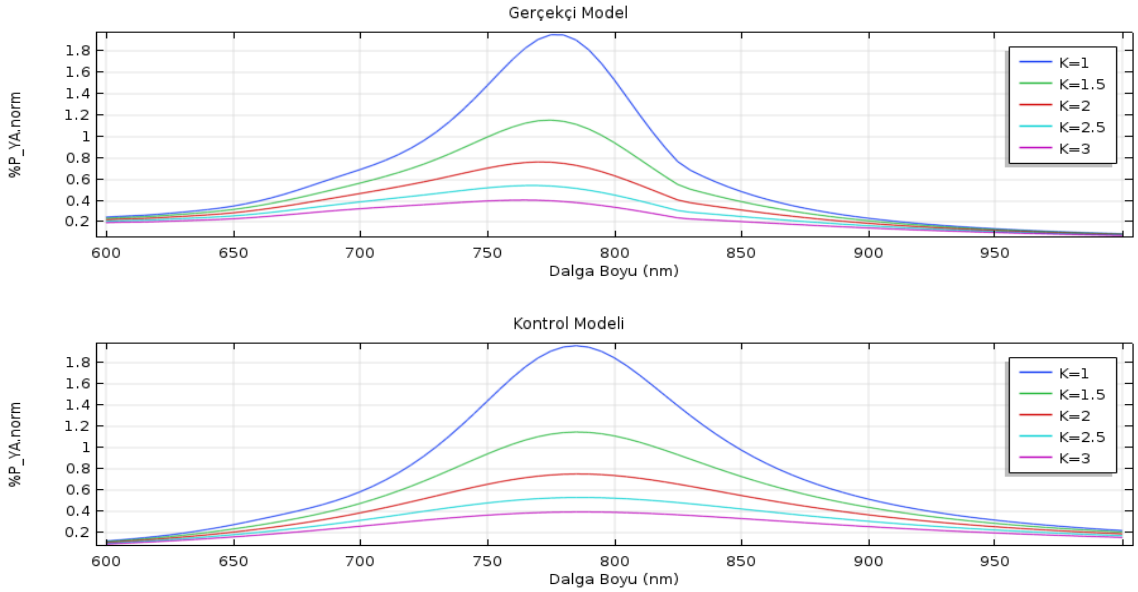
n_{np}'nin artmasıyla rezonans frekansında iletimin ve NP soğurma oranının azalması yüksek iletimin istendiği durumlarda tercih edilebilir bir özelliktir. Fakat rezonanstan daha yüksek ve daha düşük frekanslarda kullanım için n_{np}'nin düşük olması daha fazla iletim sağlayacaktır.



Şekil 74. Gerçekçi ve kontrol modelleri için n_{np}'ye bağlı NP yansıma oranı ($\%P_{Y.norm}$)

Şekil 74'te değişen NP gerçek kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün yansıma yüzdesi verilmiştir. Artan n_{np} ile birlikte yansıma oranı hem kontrol hem de gerçekçi model için azalmaktadır.

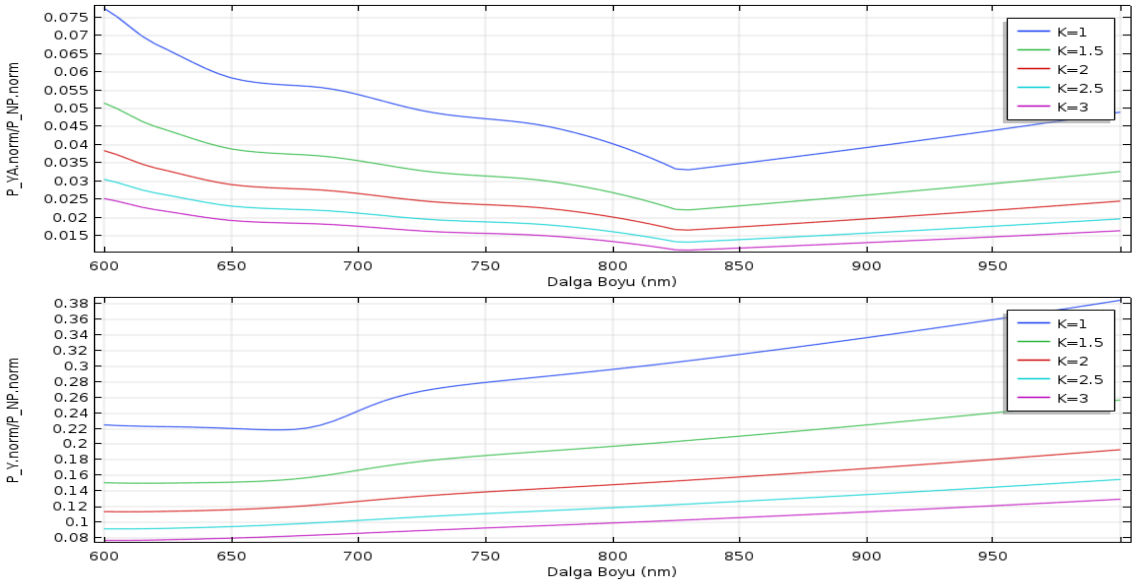
Yarı iletkene gömülü NP'ler ile ışık hapsetmek gibi yansımanın daha yüksek olmasının tercih edildiği durumlarda n_{np}'nin daha düşük olması daha kullanışlı olabilir. Bu durum elektrik alan yoğunluğunun artması sebebiyle NP soğurma kaybını arttırsa da NP emilim katsayısının düşmesi sebebiyle yansımaya oranla daha az kayıp olacaktır.



Şekil 75. Gerçekçi ve kontrol modelleri için n_{np}'ye bağlı yakın alan emilim oranı ($\%P_{YA.norm}$)

Şekil 75'te değişen NP gerçek kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan güce göre yakın alan bölgesinde yarı iletken emilimindeki artışın yüzdesi görülmektedir. Artan n_{np} ile birlikte yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen güç oranı hem kontrol hem de gerçekçi model için azalmaktadır.

n_{np}'nin azalması yarı iletkende sağlanacak emilim artışı ve yansımada yapılan artış ile birlikte yarı iletkene gömülü ışık hapsedici NP'lerin etkinliğini daha da arttırmaktadır. Şekil 76'da n_{np} ile P_{YA} ve P_Y'de NP emilimine kıyasla oluşan değişim görülmektedir.

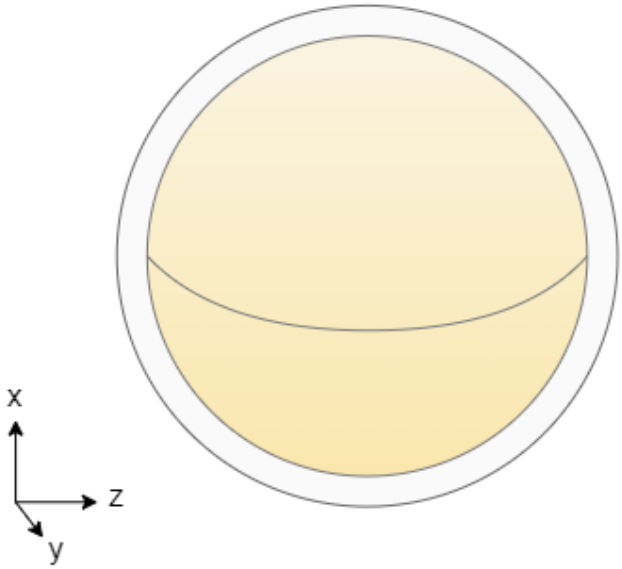


Şekil 76. Gerçekçi model için n_{np}'ye bağlı $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ ve $P_{Y.norm}/P_{NP.norm}$

Şekil 76'da değişen NP sanal kırılma indisi için kontrol modelinde yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen ve yansıtılan gücün NP tarafından soğurulan güce oranı verilmiştir. n_{np}'nin azalması hem yakın alan emilimi hem de yansımanın etkinliğini arttırmaktadır.

Genel olarak n_{np} azaldıkça $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ ve $P_{Y.norm}/P_{NP.norm}$ grafiklerinin yukarı yönlü hareket ettiği görülmektedir. n_{np} azaldıkça yansıma ve yakın alan emilim verimi artış gösterir, bu da emilimin NP üstünde olması istendiği durumda faydalıdır. Yakın alan emilimi, emilimin NP sonrasında olması istendiği durumda da faydalıdır fakat iletimde yansıma nedeniyle azalma meydana gelmesi kayba yol açabilecek bir özelliktir. Böylece, n_{np}'nin genel olarak düşük tutulması gerektiği söylenebilir.

4.3.5. Çekirdek-Kabuk Yapısı



Şekil 77. Çekirdek-kabuk yapısı

NP karakteristiğini değiştirmenin bir yolu da Şekil 77'de görüldüğü gibi bir çekirdek-kabuk yapısı kullanmaktır. Bu polimer kabuk yapısı NP karakteristiklerini değiştirmenin yanısıra NP'ler arası mesafeyi ayarlamak, çekirdeği (NP'yi) oksitlenmeye karşı korumak ve NP kaynaklı rekombinasyonları azaltmak için de kullanılabilir. Kullanılan dielektrik kabuk için gerçekçi modelde SiO2 (Malitson [54]) kırılma indisleri kullanılmıştır, kontrol modelinde ise yine SiO2 baz alınmıştır fakat kırılma indisleri sabit kabul edilmiştir:

$n_k = 1.45$

$k_k = 0$

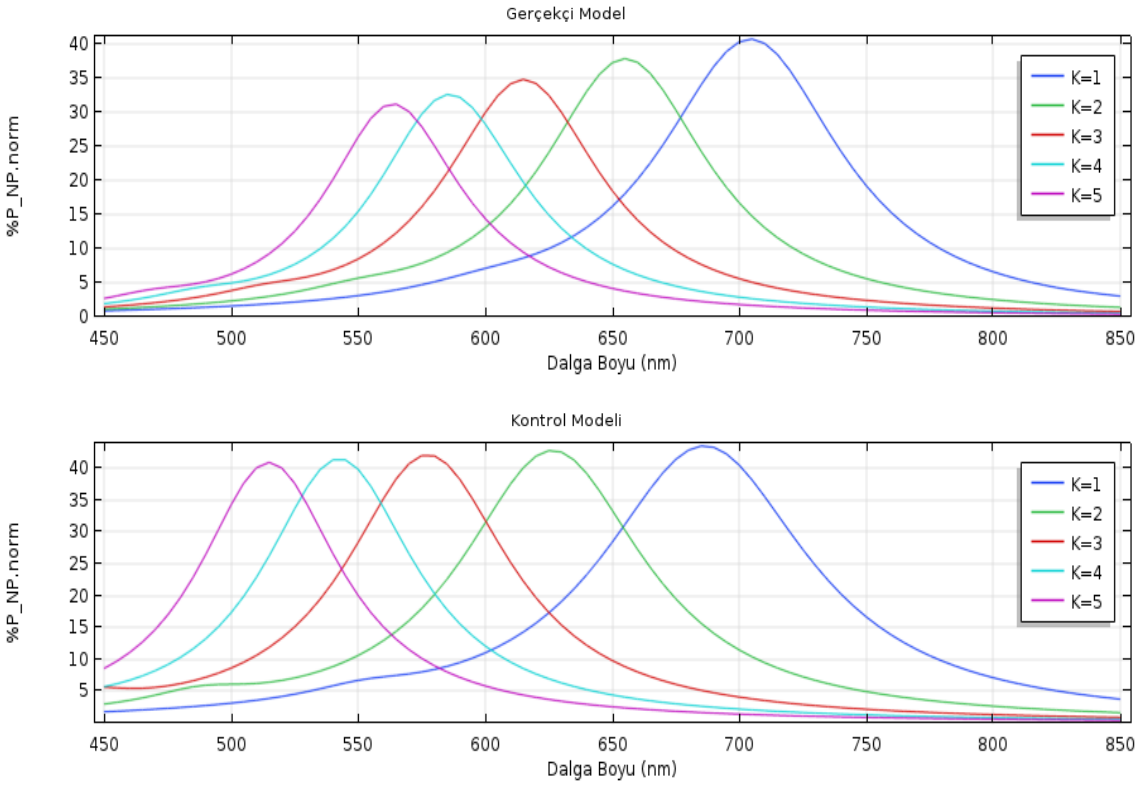
Böylece Ag çekirdek ve SiO2 kabuk yapısı benzetimi yapılmıştır.

4.3.5.1. Kabuk Kalınlığının Etkileri

Bu bölümde kabuk kalınlığının etkileri incelenmiştir. Çekirdek yarıçapı sabit tutularak dielektrik kabuk kalınlığının (t_k) değiştirilmesiyle elde edilen sonuçlar, kontrol ve gerçekçi model için aşağıda verilmiştir. Benzetimde kullanılan t_k değerleri şu şekildedir:

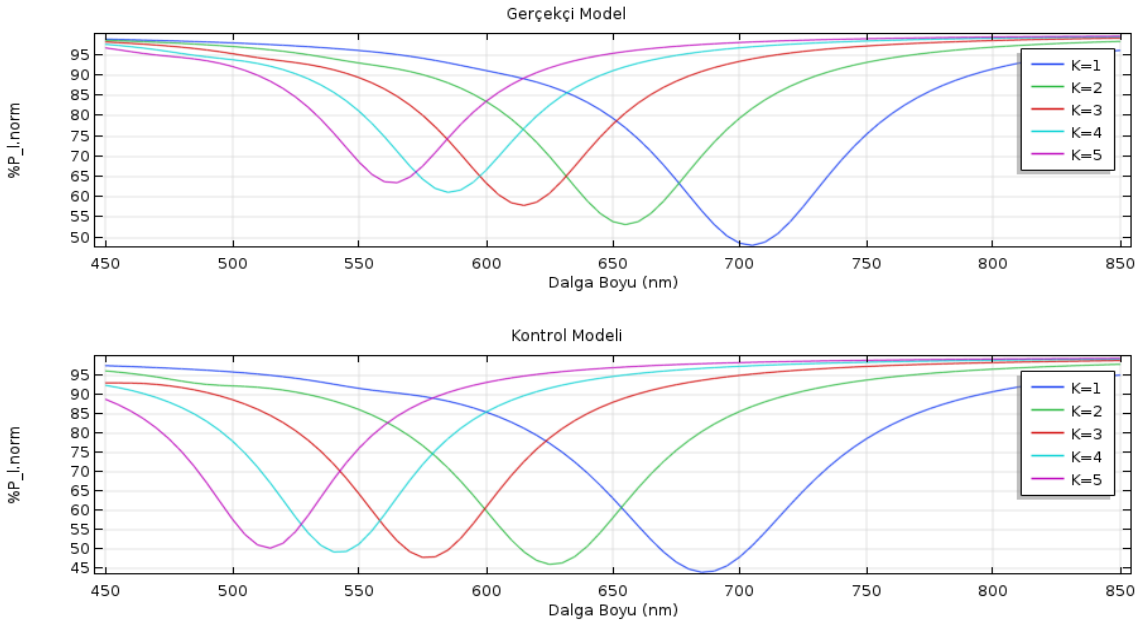
Kabuk kalınlığı = K×0.25 (nm), K = 1, 2, 3, 4, 5

Çekirdek yarıçapı = 10 (nm)



Şekil 78. Gerçekçi ve kontrol modelleri için kabuk kalınlığına bağlı NP emilim oranı ($\%P_{NP.norm}$)

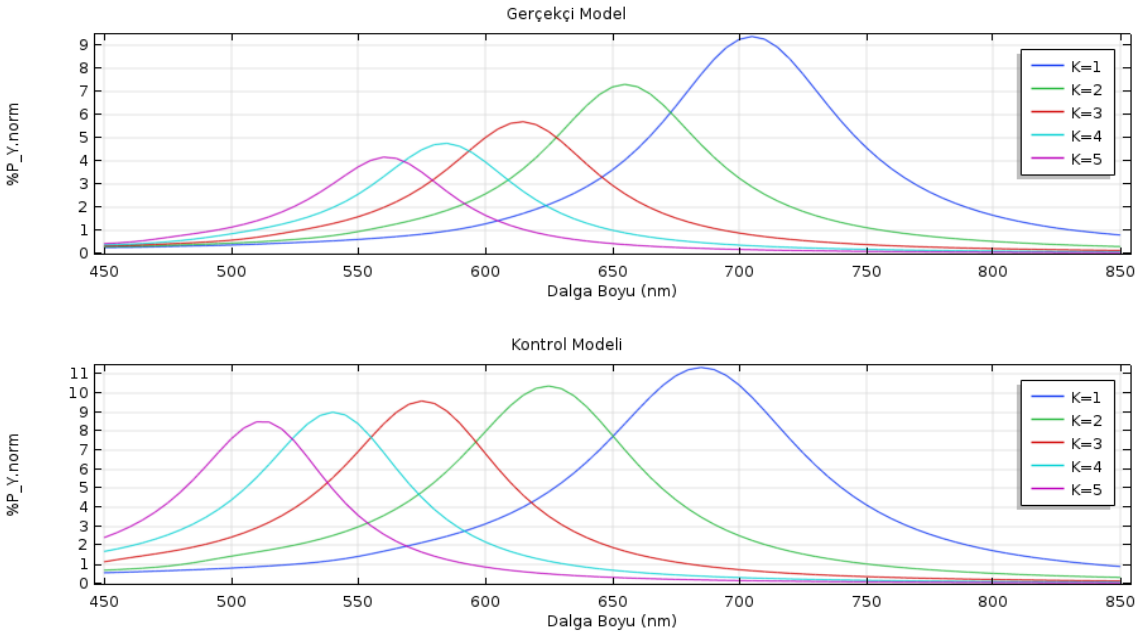
Şekil 78'de değişen kabuk kalınlığı için kontrol ve gerçekçi modelde NP tarafından soğurulan güç oranındaki değişim görülmektedir. Artan t_k ile birlikte NP soğurma oranının hem kontrol hem de gerçekçi model için azaldığı görülmektedir. Kontrol modeli için emilimdeki azalma NP içindeki elektrik alan şiddetinin azalmasından kaynaklanmaktadır ve çok azdır. Gerçekçi modelde ise yüksek frekansta emilim katsayılarındaki artış ile beraber kayıpların artması ile elektrik alanda daha büyük bir azalma meydana gelir. Rezonans frekansı ise hem kontrol hem de gerçekçi model için artmaktadır.



Şekil 79. Gerçekçi ve kontrol modelleri için kabuk kalınlığına bağlı NP iletim oranı ($\%P_{\text{İ}.norm}$)

Şekil 79'da değişen kabuk kalınlığı için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün iletim yüzdesi verilmiştir. Artan t_k ile birlikte iletim oranı hem kontrol hem de gerçekçi model için artmaktadır.

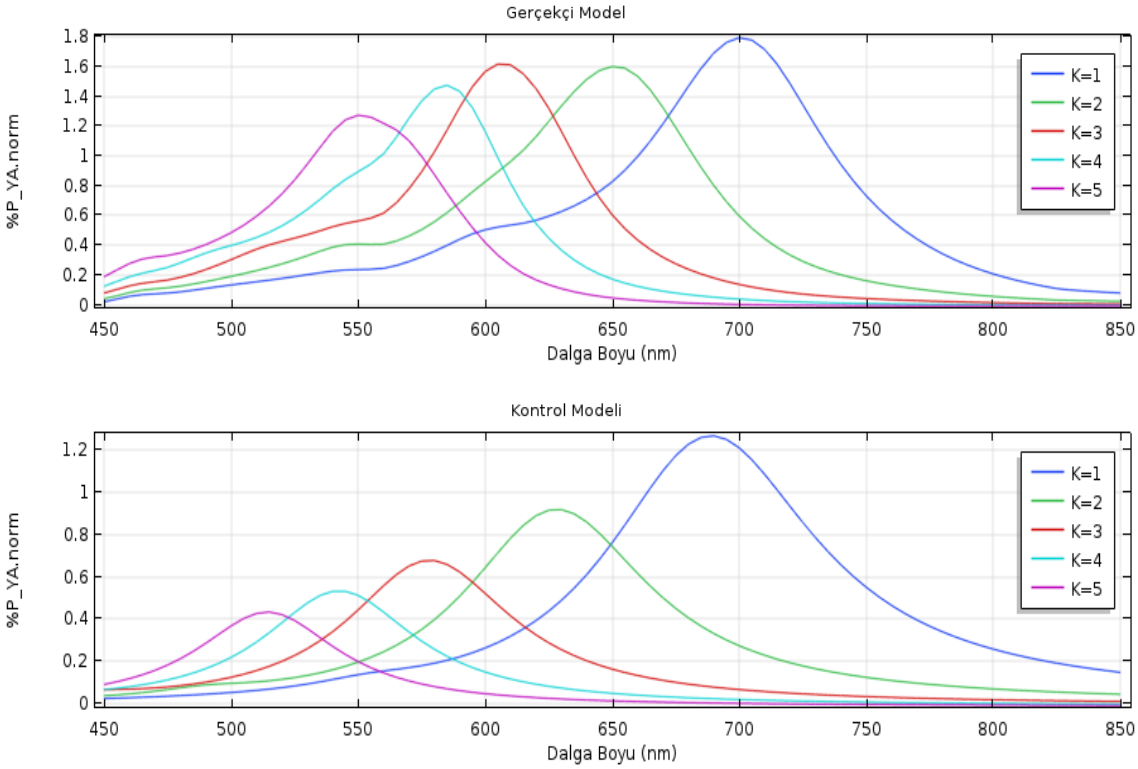
NP'ye eklenen kabuk yapısı rezonans frekansının veya iletimin arttırılmasının istendiği durumlarda kalınlaştırılabilir.



Şekil 80. Gerçekçi ve kontrol modelleri için kabuk kalınlığına bağlı NP yansıma oranı ($\%P_{Y.norm}$)

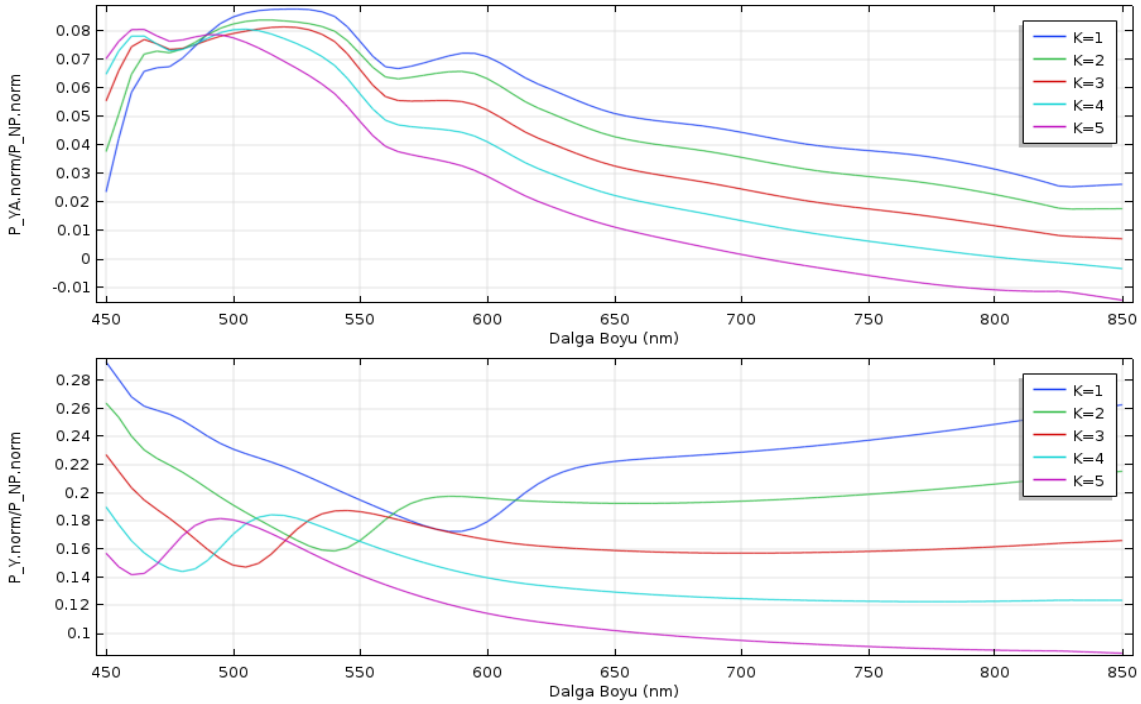
Şekil 80'de değişen kabuk kalınlığı için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün yansıma yüzdesi verilmiştir. Artan t_k ile birlikte yansıma oranı hem kontrol hem de gerçekçi model için azalmaktadır.

NP'ye eklenen kabuk yapısı rezonans frekansının arttırılmasının veya yansımanın azaltılmasının istendiği durumlarda kalınlaştırılabilir.



Şekil 81. Gerçekçi ve kontrol modelleri için kabuk kalınlığına bağlı yakın alan emilim oranı ($\%P_{YA.norm}$)

Şekil 81'de değişen kabuk kalınlığı için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan güce göre yakın alan bölgesinde yarı iletken emilimindeki artışın yüzdesi görülmektedir. Artan t_k ile birlikte yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen güç oranı kontrol modeli için azalmaktadır. Gerçekçi modelde ise genel olarak azalsa da doğrusal olmayan bir değişim görülmektedir. Bu değişimin nasıl ortaya çıktığı Şekil 82 incelenerek anlaşılabilir.



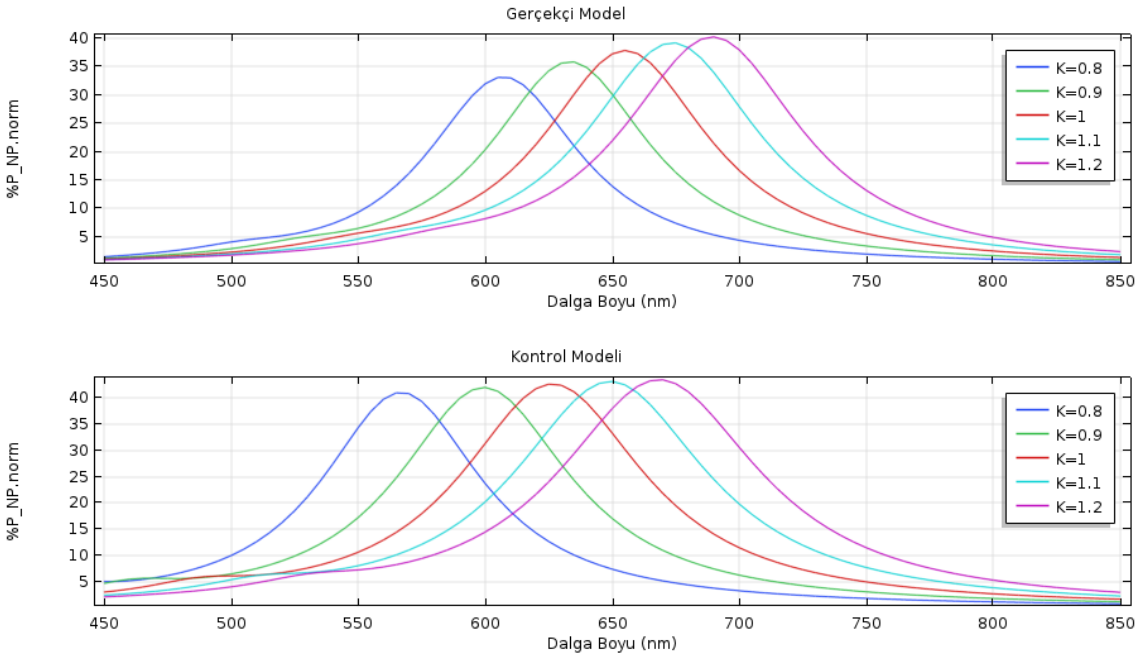
Şekil 82. Gerçekçi model için kalınlığa bağlı $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ ve $P_{Y.norm}/P_{NP.norm}$

Şekil 82'de değişen kabuk kalınlığı için gerçekçi modelde yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen ve yansıtılan gücün NP tarafından soğurulan güce oranı verilmiştir. $P_{YA.norm}$ / $P_{NP.norm}$ ve $P_{Y.norm}$ / $P_{NP.norm}$ grafiklerinin doğrusal olmadığı görülmektedir. Rezonans frekansının bu dalga boyu aralığında hareket etmesi birçok değişken parametre nedeniyle değişken bir rezonans tepe noktasına sebep olur. Artan t_k ile birlikte NP emilimine kıyasla hem yakın alan emilim verimi hem de yansıma verimi genel olarak azalmaktadır. Bu sebeple, kabuk yapısının rezonans frekansını değiştirmek, NP'ler arası mesafeyi ayarlamak, çekirdeği oksitlenmeye karşı korumak ve nanoparçacık kaynaklı rekombinasyonları azaltmak gibi özelliklerinden faydalanılmadığı durumda tercih edilmemesi gerektiği söylenebilir.

4.3.5.2. Kabuk Kırılma İndisinin Etkileri

Dielektrik kabuk gerçek kırılma indisinin (n_k) değiştirilmesiyle elde edilen sonuçlar, kontrol ve gerçekçi model için aşağıda verilmiştir. Benzetimde kullanılan n değerleri şu şekildedir:

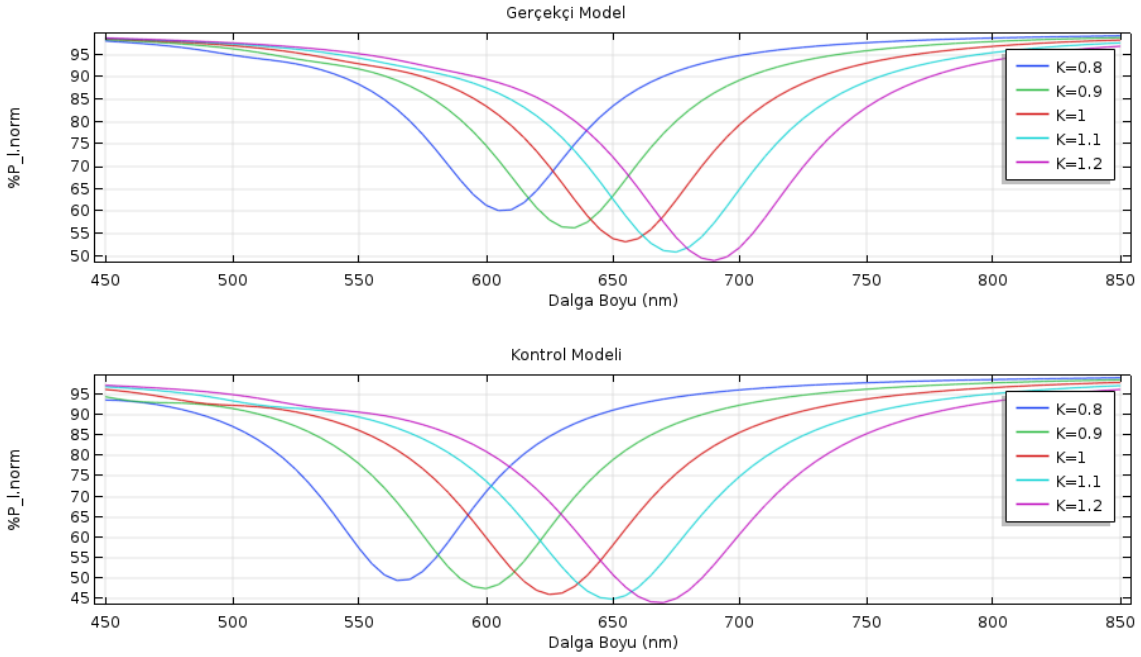
Gerçek kırılma indisi = $K \times n_k$, K = 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2



Şekil 83. Gerçekçi ve kontrol modelleri için n_k'ya bağlı NP emilim oranı ($\%P_{NP.norm}$)

Şekil 83'te değişen kabuk gerçek kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP tarafından soğurulan güç oranındaki değişim görülmektedir. Artan n_k ile NP emilimi rezonans frekansı hem kontrol hem de gerçekçi model için azalmaktadır. NP emilimi ise hem kontrol hem de gerçekçi model için artmaktadır.

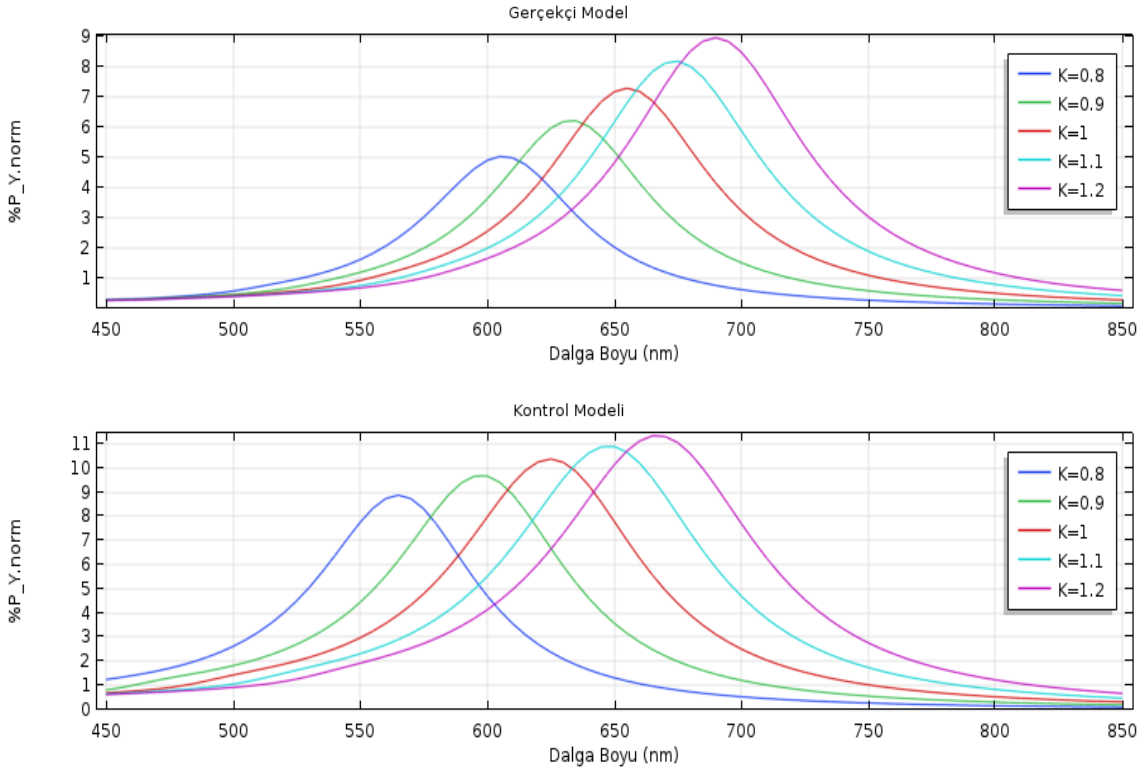
Kabuk gerçek kırılma indisi, rezonans frekansının azaltılmasının istendiği durumlarda arttırılabilir.



Şekil 84. Gerçekçi ve kontrol modelleri için n_k'ya bağlı NP iletim oranı ($\%P_{I.norm}$)

Şekil 84'te değişen kabuk gerçek kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün iletim yüzdesi verilmiştir. Artan n_k ile birlikte iletim oranı hem kontrol hem de gerçekçi model için azalmaktadır.

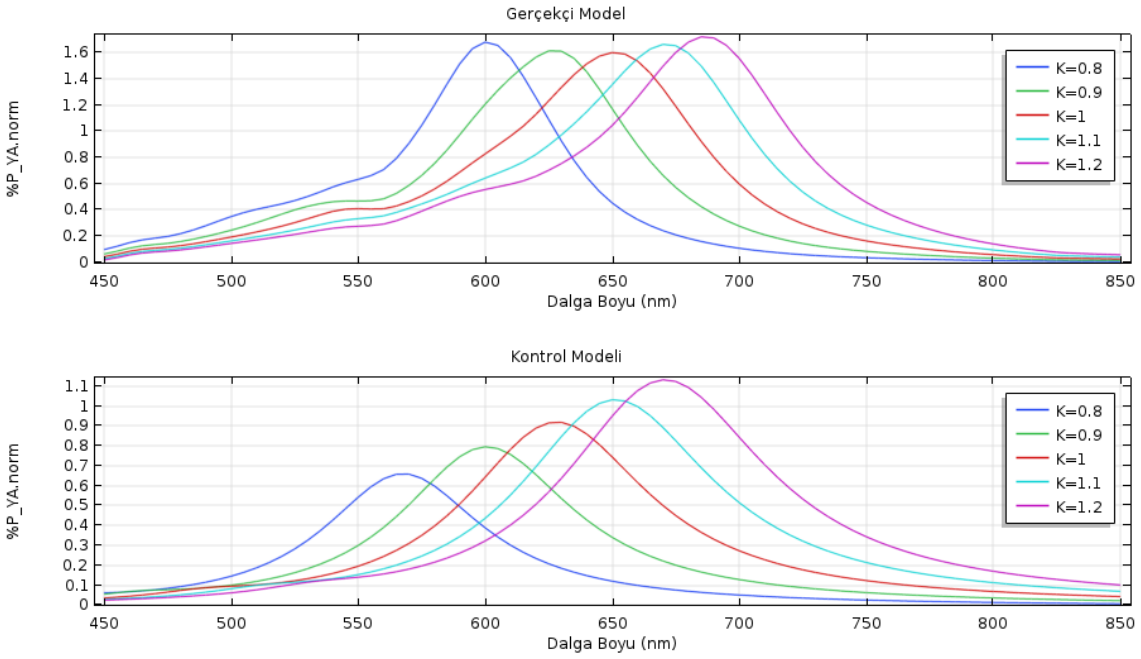
Kabuk gerçek kırılma indisi, rezonans frekansının veya iletimin azaltılmasının istendiği durumlarda arttırılabilir.



Şekil 85. Gerçekçi ve kontrol modelleri için n_k'ya bağlı NP yansıma oranı ($\%P_{Y.norm}$)

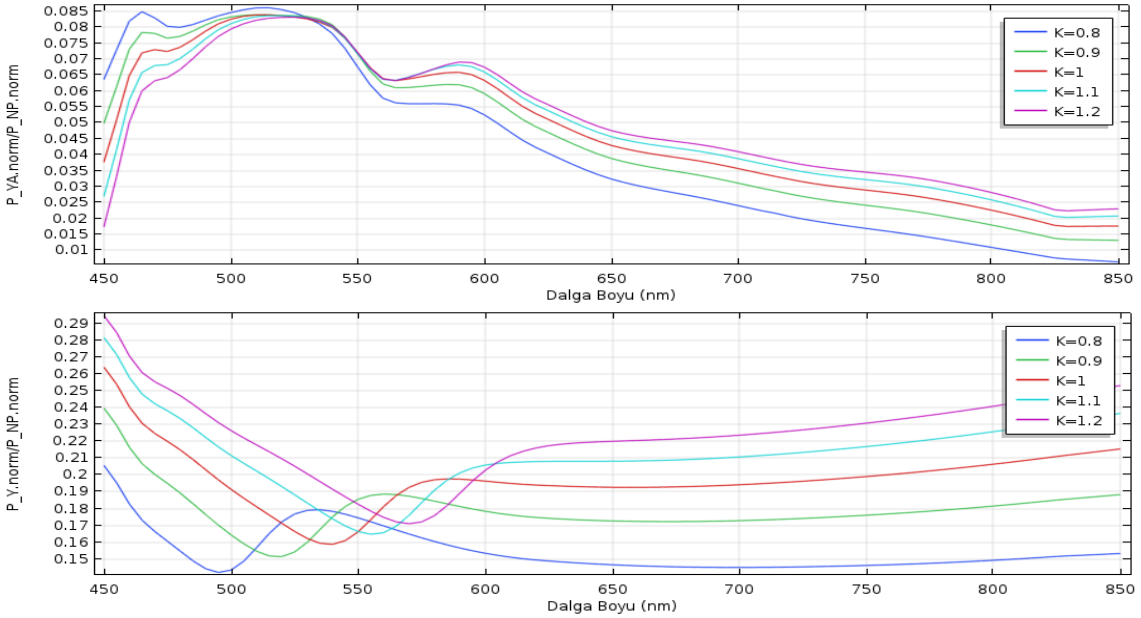
Şekil 85'te değişen kabuk gerçek kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan gücün yansıma yüzdesi verilmiştir. Artan n_k ile birlikte yansıma oranı hem kontrol hem de gerçekçi model için artmaktadır.

Kabuk gerçek kırılma indisi, rezonans frekansının azaltılmasının veya yansımanın arttırılmasının istendiği durumlarda arttırılabilir.



Şekil 86. Gerçekçi ve kontrol modelleri için n_k'ya bağlı yakın alan emilim oranı ($\%P_{YA.norm}$)

Şekil 86'da değişen kabuk gerçek kırılma indisi için kontrol ve gerçekçi modelde NP düzlemine ulaşan güce göre yakın alan bölgesinde yarı iletken emilimindeki artışın yüzdesi görülmektedir. Artan n_k ile birlikte yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen güç oranı kontrol modeli için artmaktadır. Gerçekçi modelde ise doğrusal olmayan bir değişim görülmektedir. Bu değişimin nasıl ortaya çıktığı Şekil 87 incelenerek anlaşılabilir.

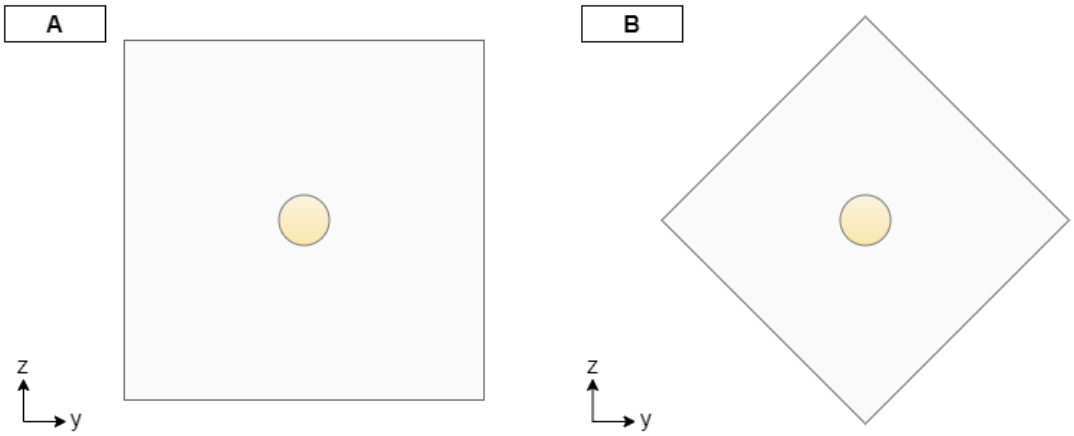


Şekil 87. Gerçekçi model için n_k'ya bağlı $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ ve $P_{Y.norm}/P_{NP.norm}$

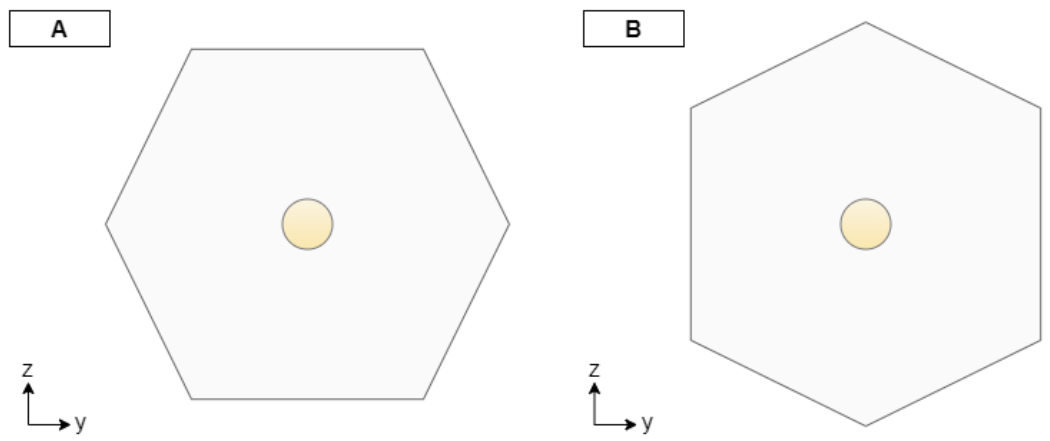
Şekil 87'de değişen kabuk gerçek kırılma indisi için gerçekçi modelde yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen ve yansıtılan gücün NP tarafından soğurulan güce oranı verilmiştir. $P_{YA.norm}/P_{NP.norm}$ ve $P_{Y.norm}/P_{NP.norm}$ grafiklerinin doğrusal olmadığı görülmektedir. Rezonans frekansının bu dalga boyu aralığında hareket etmesi birçok değişken parametre sebebiyle değişken bir rezonans tepe noktasına sebep olur. Artan n_k ile birlikte NP emilimine kıyasla hem yakın alan emilim verimi hem de yansıma verimi genel olarak artmaktadır. Fakat bu durum kabuğun rezonans frekansında sağladığı artışı azaltmakta ve rezonansın kabuksuz duruma yaklaşmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple kabuk yapısı gerekmedikçe tercih edilmemelidir ve kullanıldığı durumda kabuk kalınlığının belirlenmesi sonrası bu parametre kullanılarak rezonans frekansı ayarlanabilir.

4.3.6. Nanoparçacık Düzlemsel Dizilim Şeklinin Etkileri

NP'ler kullanıldıkları yüzeyde birçok farklı şekilde dizilebilirler. Bu düzlemsel dizilimlerin etkisi bu bölümde incelenmiştir. Nanoparçacık düzlemsel dizilim şekli ve sıklığı hücrenin kesit alanı ile ayarlanabilmektedir. İncelenmiş olan dizilim şekilleri kare ve altıgen dizilimin farklı yönelimleridir. Birim hücrelerin şekil ve yönelimlerinin tepeden görüntüsü Şekil 88 ve Şekil 89'da verilmiştir.

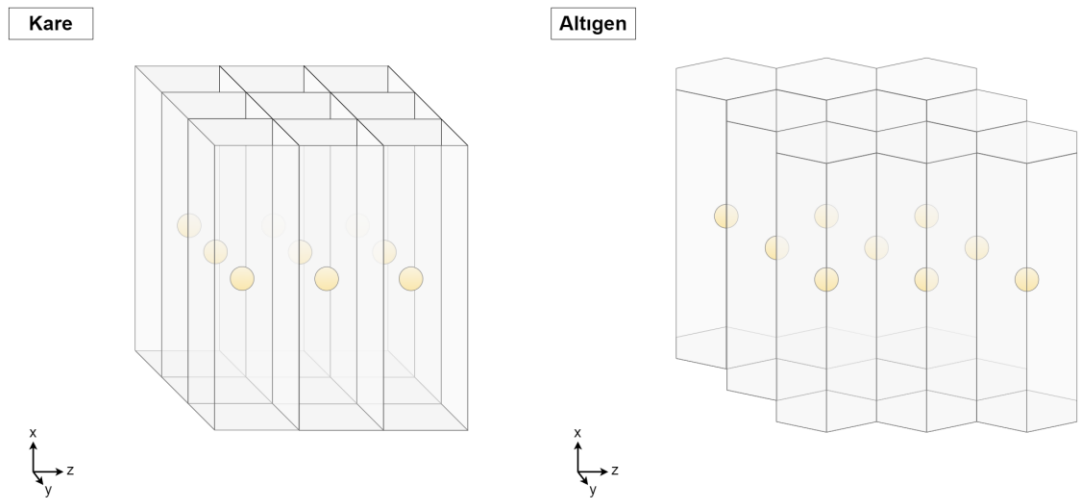


Şekil 88. Kare dizilimin A ve B yönelimleri



Şekil 89. Altıgen dizilimin A ve B yönelimleri

Kullanılan altıgen ve kare şekilleri periyodik dizilime izin veren şekillerdir. Bu birim hücre şekillerinin kullanılmasıyla NP'lerin sahip oldukları dizilim Şekil 90'da temsili olarak gösterilmiştir. Modellerde periyodik sınır koşullarının kullanılması sayesinde sonsuz NP dizisi benzetimi yapılmaktadır.



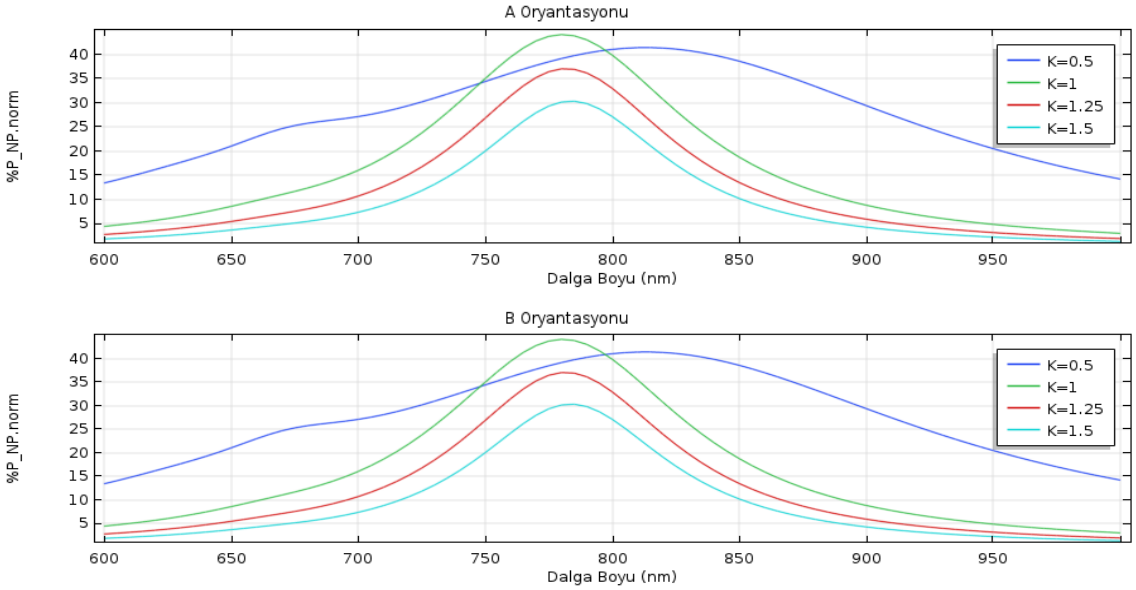
Şekil 90. Kare ve altıgen dizilimlerin temsili gösterimi

Bu şekillerin kenar uzunlukları istenildiği gibi ayarlanabilmektedir. Karşılıklı kenarların uzunluğu, nanoparçacıkların farklı eksenlerde birbirinde uzaklığının belirler. Güneş hücrelerinde gelen ışığın polarizasyonu farklı eksenlerde olabileceği için benzetimlerde eşkenar şekiller tercih edilmiştir. Böylece farklı eksenlerde farklı uzaklıklarda olan NP'ler ışık polarizasyon yönüne göre farklı etki göstermeyecektir.

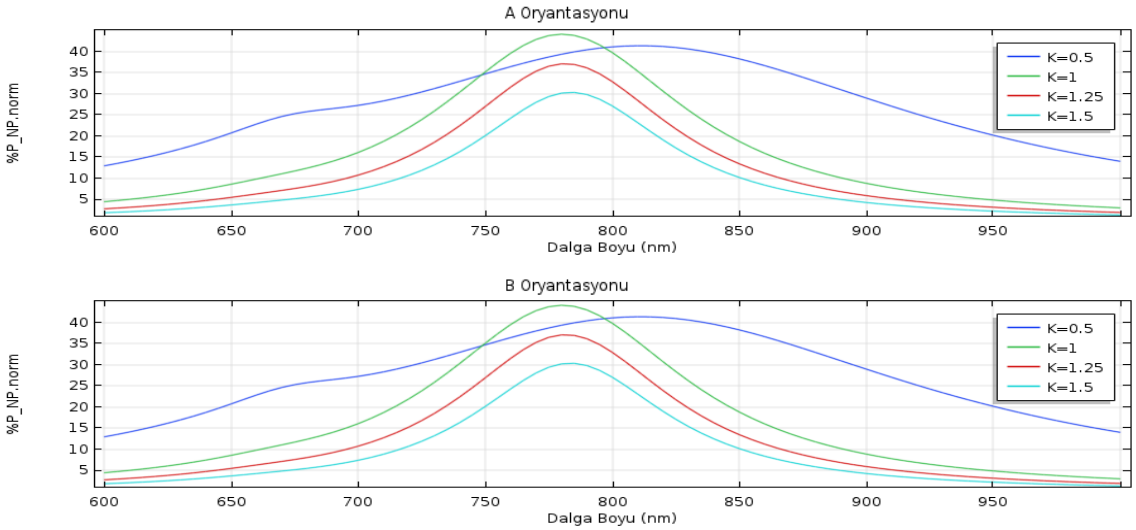
Benzetimlerde NP yarıçapı ve yarı iletken kesit alanı her dizilim şekli için aynıdır. Kesit alanlarının aynı oranda değiştirilmesinin etkileri incelenmiştir:

Yarı iletken Kesit Alanı = K^2×4900 (nm^2) , K = 0.5, 1, 1.25, 1.5

NP Yarıçapı = 10 (nm)



Şekil 91. Kare dizilimin A ve B yönelimleri için NP emilim oranı ($\%P_{NP.norm}$)

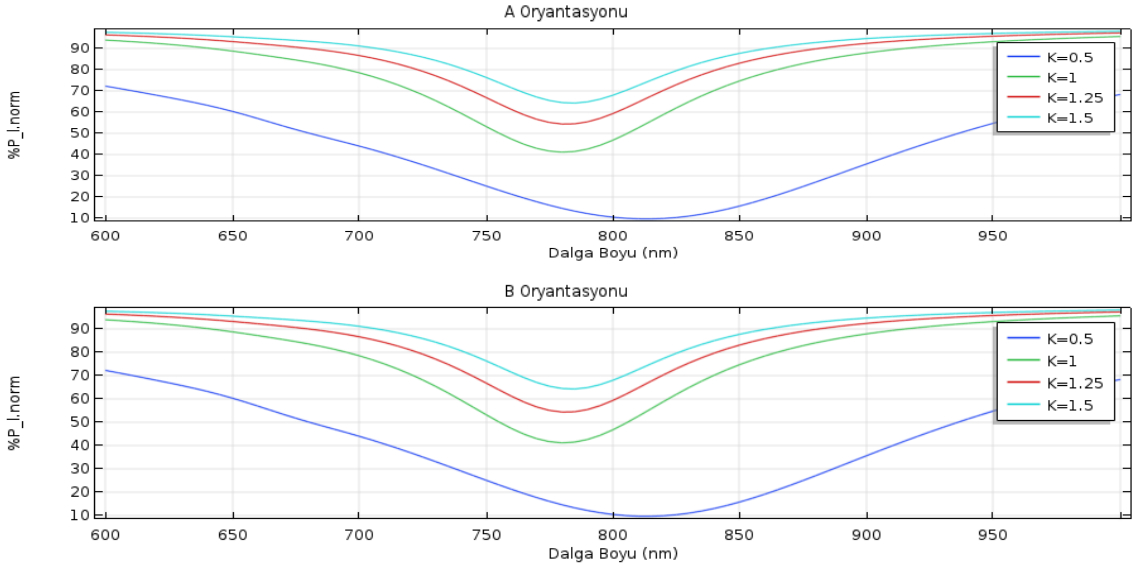


Şekil 92. Altıgen dizilimin A ve B yönelimleri için NP emilim oranı ($\%P_{NP.norm}$)

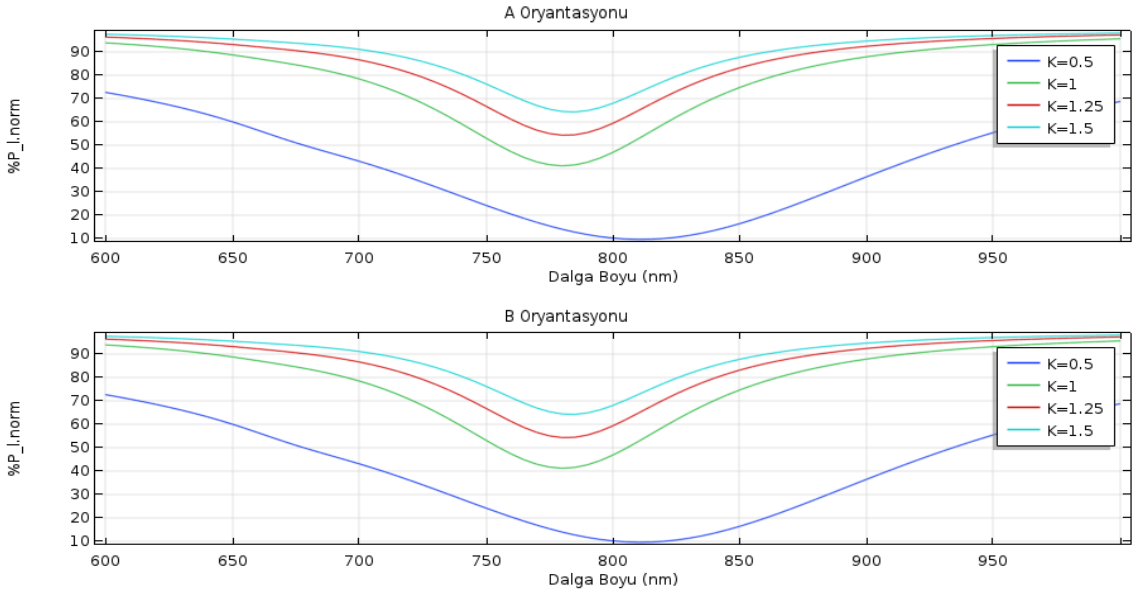
Şekil 91 ve Şekil 92'de değişen kesit alanı için NP düzlemine ulaşan gücün NP tarafından soğurulma yüzdesi verilmiştir.

Bu dizilim şekilleri aynı kesit alanına sahip olsalar da NP'ler arası uzaklıklarda ve etkileştikleri komşu NP sayısında değişikliklere sebep olurlar. Buna rağmen şekillerde görüldüğü üzere kesit alanları aynı kaldığı sürece NP emilimleri de her şekil için aynıdır.

Aynı şekle sahip kesit alanlarının farklı yönelimleri de aynı şekilde sonuçları değiştirmemiştir. Bu da eşkenar şekillerde gelen ışığın polarizasyon yönünün NP emilimini değiştirmediğini göstermektedir.



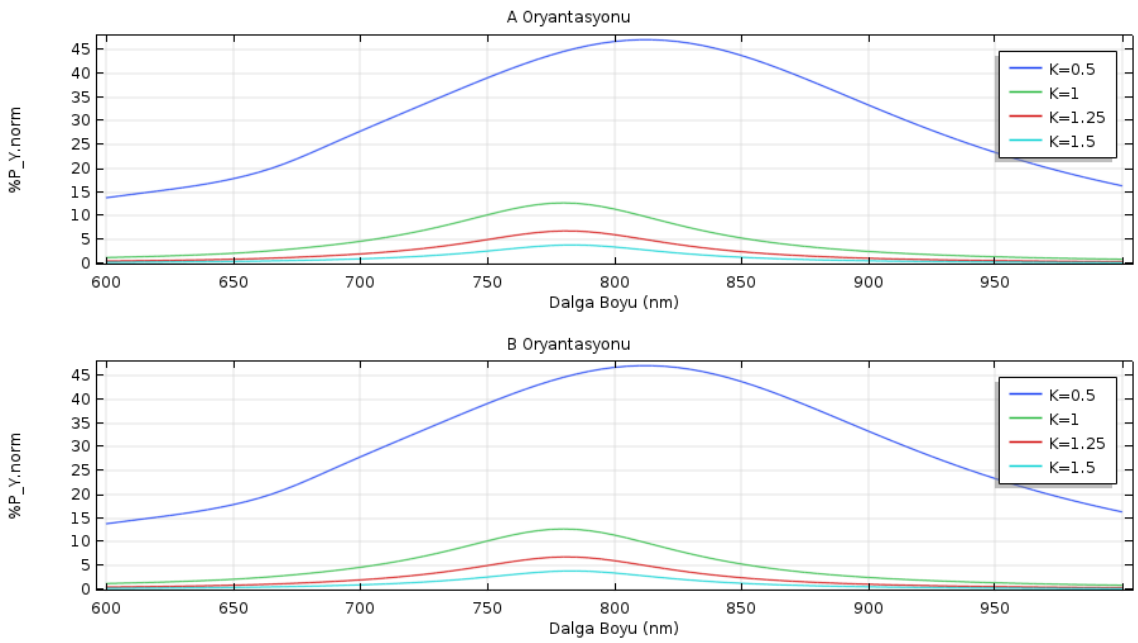
Şekil 93. Kare dizilimin A ve B yönelimleri için NP iletim oranı ($\%P_{İ.norm}$)



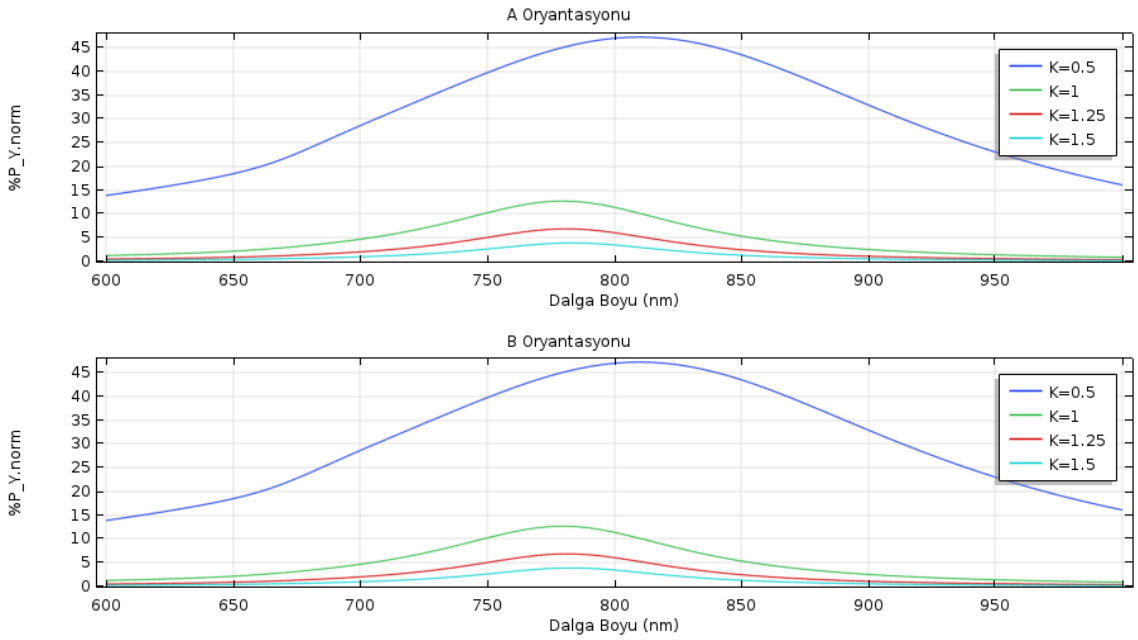
Şekil 94. Altıgen dizilimin A ve B yönelimleri için NP iletim oranı ($\%P_{İ.norm}$)

Şekil 93 ve Şekil 94'te değişen kesit alanı için kontrol modelinde NP düzlemine ulaşan gücün NP tarafından iletilme yüzdesi verilmiştir.

Farklı şekiller ve aynı şekillerin farklı yönelimleri değişen kesit alanına göre iletimi değiştirmemiştir. Bu da eşkenar şekillerde gelen ışığın polarizasyon yönünün kesit alanının sabit kalması durumunda NP iletimini değiştirmeyeceğini göstermektedir.



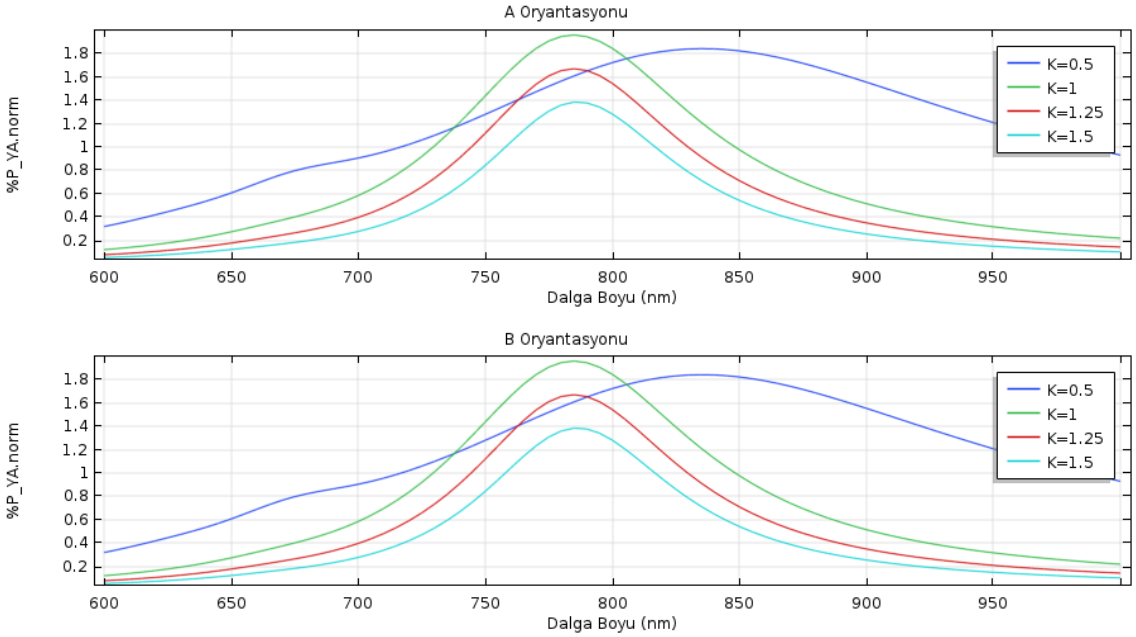
Şekil 95. Kare dizilimin A ve B yönelimleri için NP yansıma oranı ($\%P_{Y.norm}$)



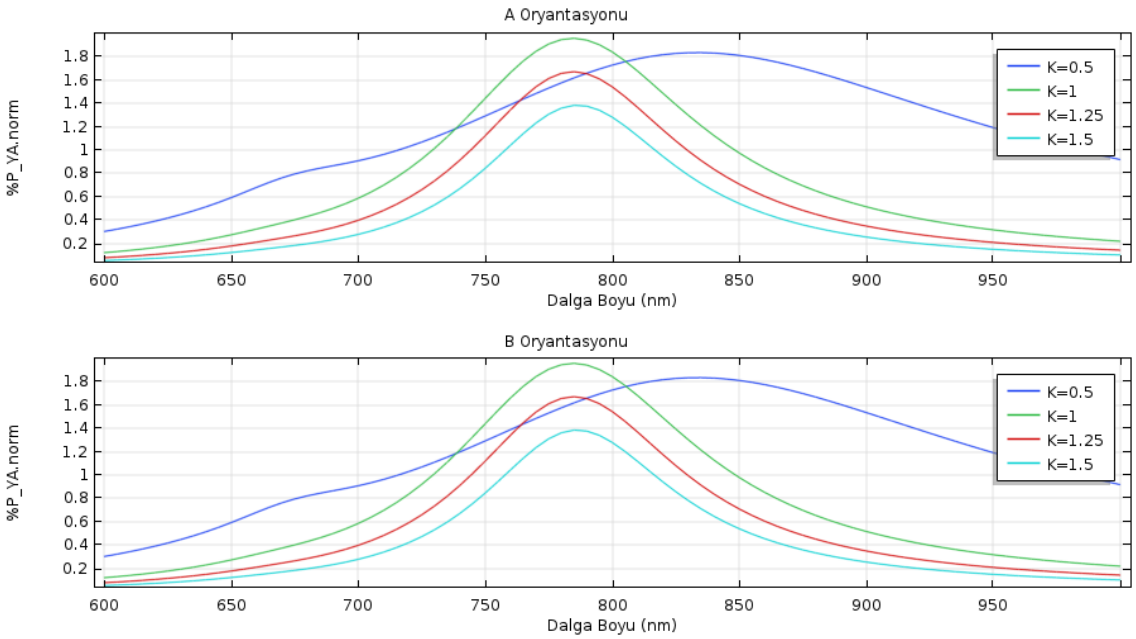
Şekil 96. Altıgen dizilimin A ve B yönelimleri için NP yansıma oranı ($\%P_{Y.norm}$)

Şekil 95 ve Şekil 96'da değişen kesit alanı için kontrol modelinde NP düzlemine ulaşan gücün NP tarafından yansıma yüzdesi verilmiştir.

Farklı şekiller ve aynı şekillerin farklı yönelimleri değişen kesit alanına göre yansımayı değiştirmemiştir. Bu da eşkenar şekillerde gelen ışığın polarizasyon yönünün kesit alanının sabit kalması durumunda NP yansımasını değiştirmeyeceğini göstermektedir.



Şekil 97. Kare dizilimin A ve B yönelimleri için yakın alan emilim oranı ($\%P_{YA.norm}$)



Şekil 98. Altıgen dizilimin A ve B yönelimleri için yakın alan emilim oranı ($\%P_{YA.norm}$)

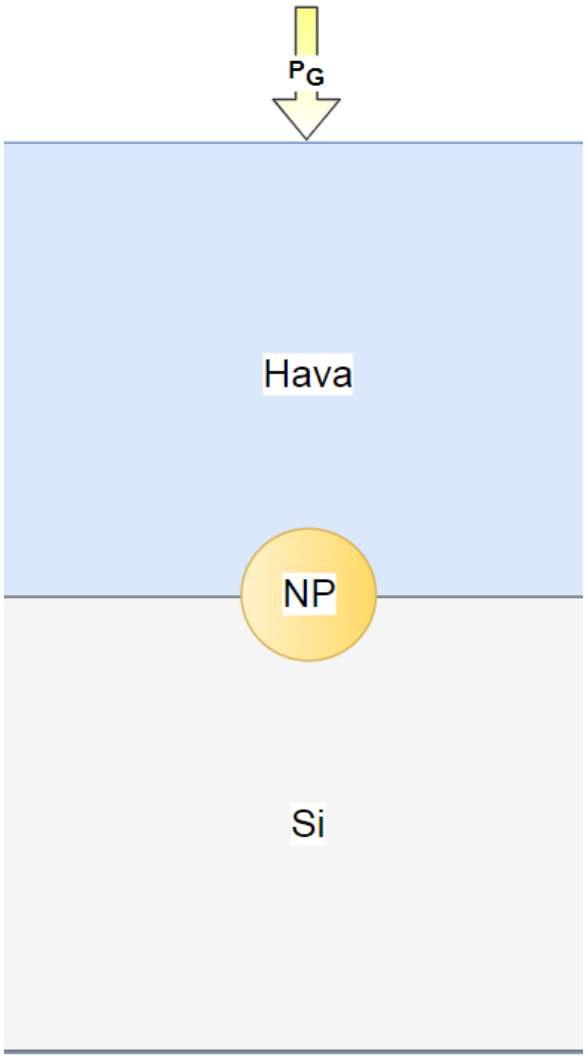
Şekil 97 ve Şekil 98'de değişen kesit alanı için kontrol modelinde NP düzlemine ulaşan gücün NP tarafından yakın alan emilim yüzdesi verilmiştir.

Farklı şekiller ve aynı şekillerin farklı yönelimleri değişen kesit alanına göre yakın alan emilimini değiştirmemiştir. Bu da eşkenar şekillerde gelen ışığın polarizasyon yönünün

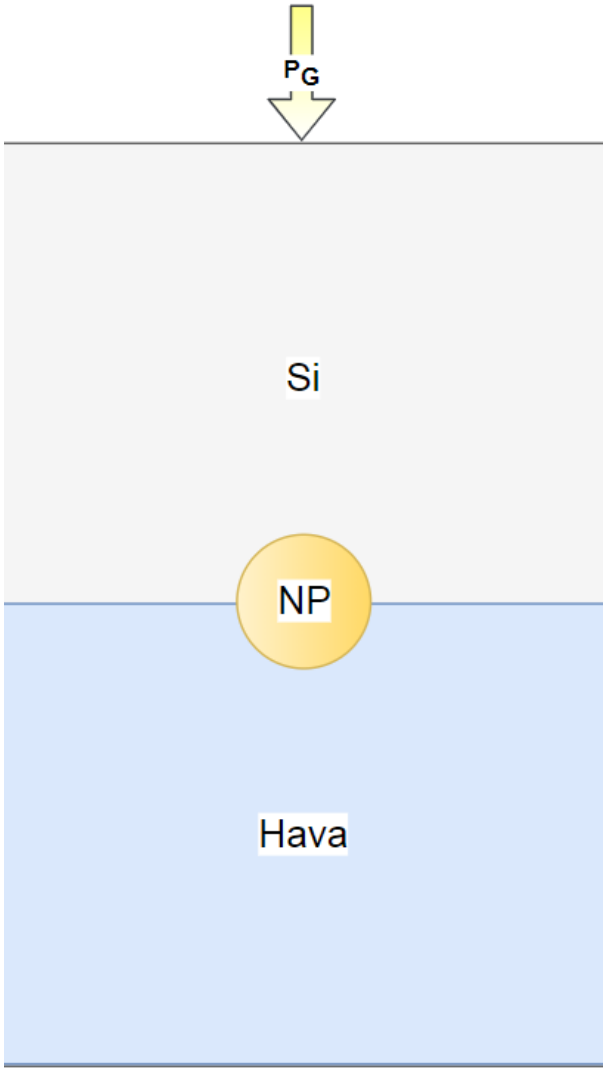
kesit alanının sabit kalması durumunda yakın alan emilimini değiştirmeyeceğini göstermektedir.

Bu karakteristiklerden görüldüğü üzere bir yüzeyde homojen ve düzgün bir dizilime sahip NP'ler sabit yoğunluğa sahip oldukları sürece karakteristikleri değişmemektedir. Bu, aynı zamanda ışık polarizasyon yönünün NP karakteristiklerinde değişiklik meydana getirmeyeceğini gösterir. Burada dikkat edilmesi gereken bir şey bu modellerde NP'ler arası boşluğun yarıçaptan büyük tutulmuş olduğudur. Bunun sebebi güneş hücrelerinde çok sık bir NP diziliminin yarı iletken kalitesini düşüreceğindendir. Yarıçaptan daha küçük boyutta boşluğa sahip dizilimlerde NP'ler arası etkileşimin artması ile sonuçların değişmesi mümkündür.

4.3.7. Farklı Materyaller Arasında Kullanımın Etkileri



Şekil 99. Hava-Si Modeli



Şekil 100. Si-Hava Modeli

Kullanılan yöntem ile NP dizisinden oluşan metayüzeyin karakteristiklerini sadece tek bir kayıplı ortam içine gömülü halde değil, iki farklı materyal arasında ve hatta çok eklemli bir hücre içerisinde de tespit etmek mümkündür. Fakat kullanılan modelde bazı değişikliklere gitmek gerekmektedir.

Yapılan benzetimlerde kontrol modeli baz alınmıştır, fakat NP'nin bulunduğu seviyenin alt ve üst katmanları iki farklı materyalden oluşmaktadır. Şekil 99 ve Şekil 100'de ortam için kullanılan hava (Ciddor) ve Si (Aspnes) materyallerinin üstte ve altta bulunmalarına göre modeller Hava-Si modeli ve Si-Hava modeli olarak adlandırılmışlardır. Böylece oluşturulan yapının ileri ve geri yönlü ışığa tepkisi ölçülmüştür.

Kullanılan materyallerin farklı emilim katsayılarına sahip olmaları sebebiyle karakteristik belirlemede kullanılan formüllerde değişiklik meydana gelmektedir. Giriş gücünün geldiği üst katman 1 olarak ve NP altında kalan alt katman 2 olarak isimlendirilirse "4.2. Kayıplı Ortamda Nanoparçacık Karakteristiği" bölümünde verilen (51), (53), (55), (58) ve (60) numaralı güç formülleri şu şekilde yeniden yazılabilir;

$$\%P_U = e^{-\alpha_1 x_d} \tag{76}$$

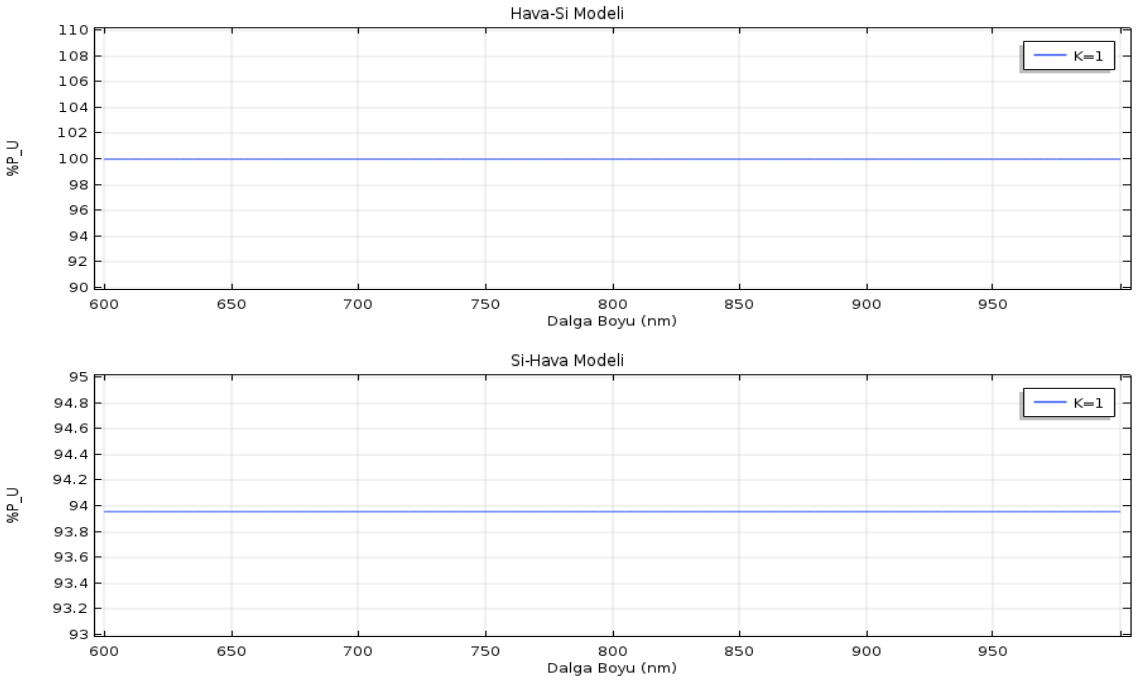
$$\%P_{Y.norm} = \frac{P_{OY}}{P_G} e^{2\alpha_1 x_d} \tag{77}$$

$$\%P_{İ.norm} = \frac{P_{Oİ}}{P_G} e^{\alpha_2 x_y} e^{\alpha_1 x_d} \tag{78}$$

$$\%P_{NP.norm} = \frac{\iiint_{NP} Q_{kayıp} dV}{P_G} e^{\alpha_1 x_d} \tag{79}$$

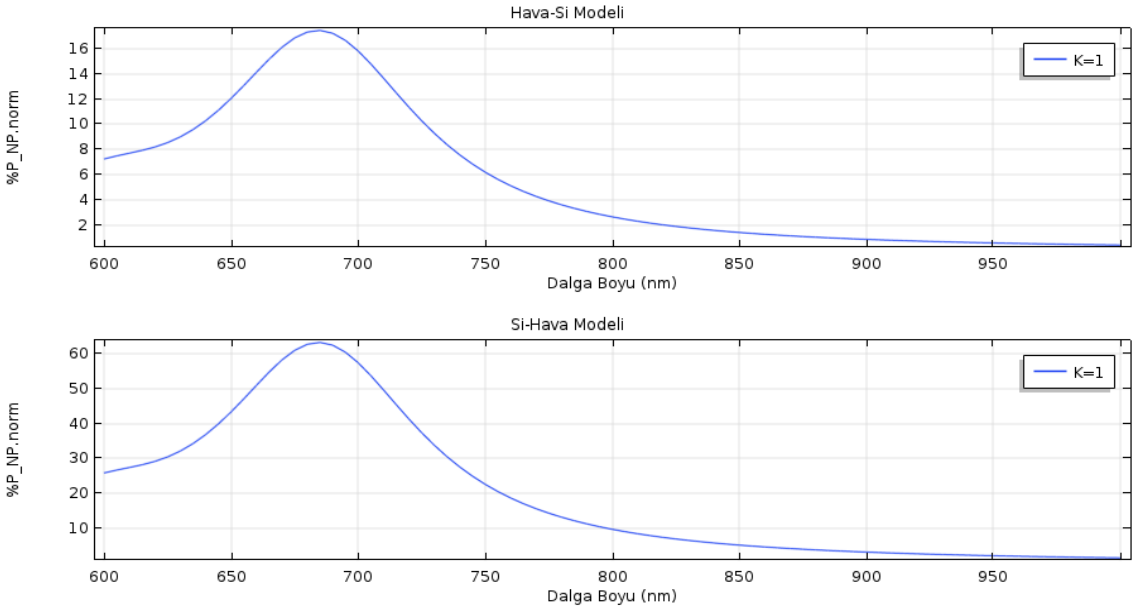
$$\%P_{YA.norm} = 1 - \%P_{Y.norm} - \%P_{İ.norm} - \%P_{NP.norm} \tag{80}$$

Burada α_1 1. katmanın emilim katsayısı, α_2 2. katmanın emilim katsayısıdır.



Şekil 101. Hava-Si ve Si-Hava modelleri için NP'lere ulaşan güç oranı ($\%P_U$)

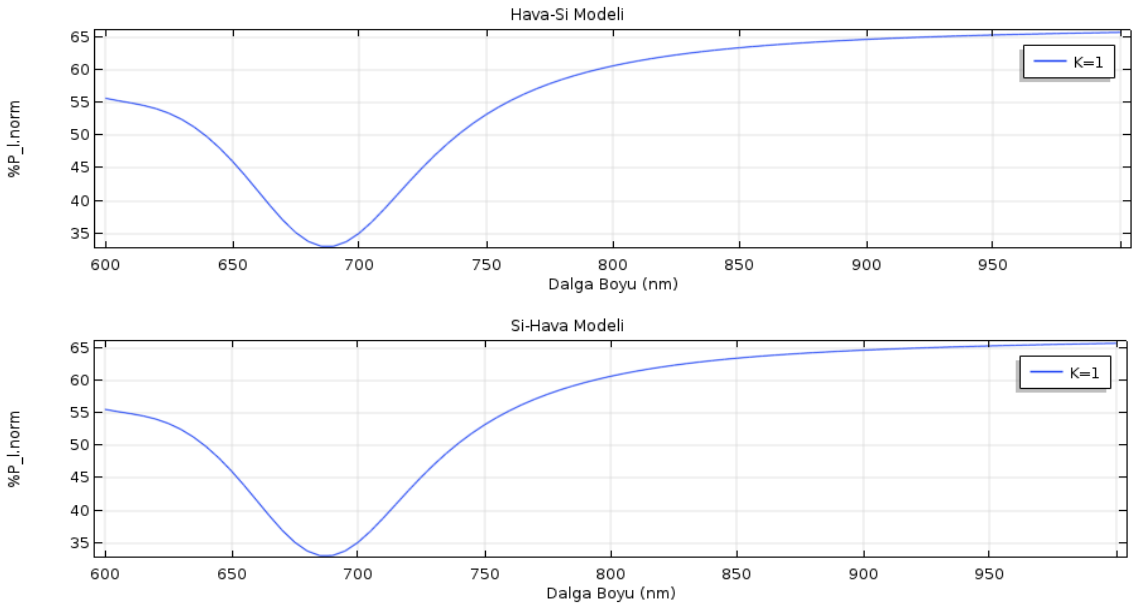
Şekil 101'de Hava-Si ve Si-Hava modellerinde NP düzlemine ulaşan gücün giriş gücüne oranı verilmiştir. Hava-Si modelinde NP dizisi üzerinde bulunan hava katmanının emilim katsayısının sıfır olması sebebiyle giriş gücünün tamamı NP üzerine ulaşır. Si-Hava modelinde ise giriş gücünün bir kısmı Si tarafından emilir ve %93.95'i NP üzerine ulaşır.



Şekil 102. Hava-Si ve Si-Hava modelleri için NP emilim oranı ($\%P_{NP.norm}$)

Şekil 102'de Hava-Si ve Si-Hava modellerinde NP düzlemine ulaşan gücün NP tarafından soğurulma yüzdesi verilmiştir. Hava-Si modelinde rezonans frekansında soğurma %17.4 civarındadır, Si-Hava modelinde ise rezonans frekansında soğurma %63.2 civarındadır.

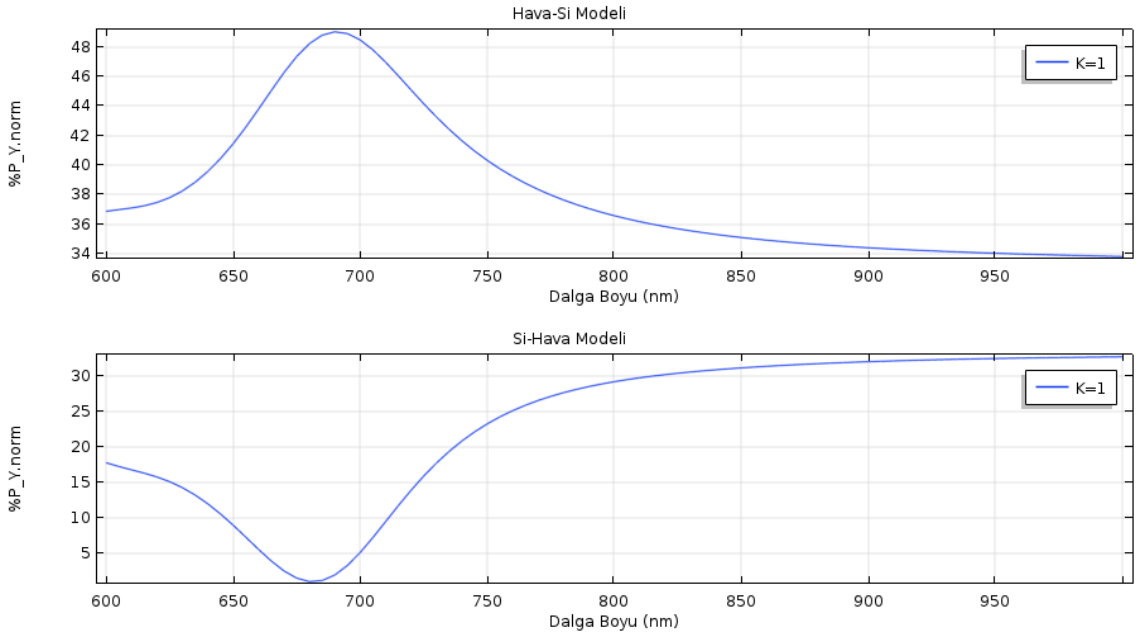
Aynı materyaller kullanılmasına rağmen ışığın geliş yönüne göre NP emilim oranları iki model için çok büyük değişim göstermektedir. Işık, daha büyük kırılma indisine sahip Si üzerinden gelip NP üzerine düştüğü Si-Hava modelinde NP tarafından yapılan emilim tersi duruma göre çok daha büyük çıkmıştır.



Şekil 103. Hava-Si ve Si-Hava modelleri için NP iletim oranı ($\%P_{\text{İ}.norm}$)

Şekil 103'te Hava-Si ve Si-Hava modellerinde NP düzlemine ulaşan gücün iletim yüzdesi verilmiştir. Hava-Si ve Si-Hava modellerinde rezonans frekansında iletim aynı orandadır ve %33.1 civarındadır.

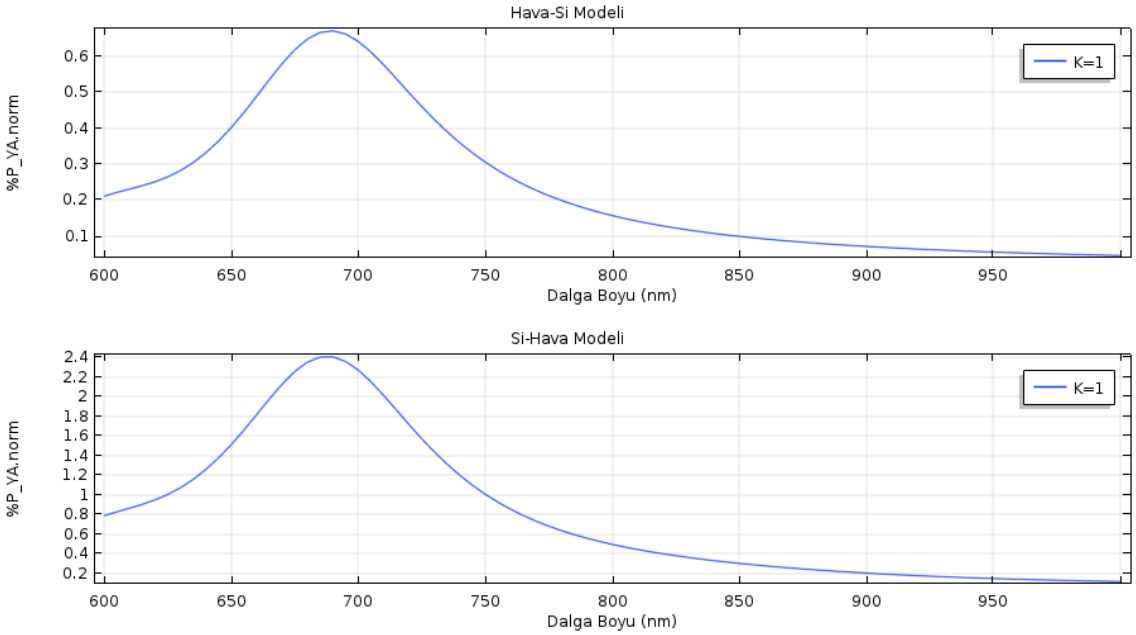
NP dizisinden oluşan düzlemin iki yönlü iletim oranı farklı materyaller arası geçişte değişmemektedir. Bu durumda NP dizisinin farklı materyaller arasına yerleştirilmesi ile iletim dışındaki karakteristikleri çift yönlü farklı davranış gösterecek şekilde ayarlanabilir.



Şekil 104. Hava-Si ve Si-Hava modelleri için NP yansıma oranı ($\%P_{Y.norm}$)

Şekil 104'te Hava-Si ve Si-Hava modellerinde NP düzlemine ulaşan gücün yansıma yüzdesi verilmiştir. Hava-Si modelinde rezonans frekansında yansıma %48.8 civarındadır, Si-Hava modelinde ise rezonans frekansında yansıma %1.3 civarındadır.

Si-Hava modelinde olduğu gibi ışığın yüksek kırılma indisli malzemeden düşük kırılma indisli malzemeye geçişinde araya NP eklenmesi ile yansıma oranının sıfıra yaklaştırılması mümkün olmaktadır. Yansımanın azaltılmasının istendiği durumlarda böyle bir uygulamaya gidilebilir.



Şekil 105. Hava-Si ve Si-Hava modelleri için yakın alan emilim oranı ($\%P_{YA.norm}$)

Şekil 105'te Hava-Si ve Si-Hava modellerinde NP düzlemine ulaşan güce göre yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilim yüzdesi verilmiştir. Hava-Si modelinde rezonans frekansında yakın alan emilimi %0.7 civarındadır, Si-Hava modelinde ise rezonans frekansında yakın alan emilimi %2.4 civarındadır.

NP'lerin iki farklı malzeme arasında kullanımı ile ileri ve geri yönde farklı karakteristikler gösteren bir yüzeyin elde edilebileceği görülmektedir. Yapılan benzetimlerde çift taraflı sabit iletim oranına sahip, bir yönden yüksek yansıma, düşük emilim oranına sahip diğer yönden de düşük yansıma, yüksek emilim oranına sahip bir yüzey elde edilmiştir. Bu yüzeyin karakterizasyonu öne sürülen yöntem ile yapılmıştır.

Böyle bir yüzey birçok pratik uygulamada kullanım yeri bulabilir. Örneğin azaltılan yansıma ve yüksek güç emilimi, radar sönümleme uygulamalarında kullanılabileceği gibi NP'lerin fotovoltaik olarak kullanıldığı doğrudan plazmonik güneş hücrelerinde de kullanılabilir. Yüksek yansıma ve düşük emilim oranı da belli bir rezonansta bu yüzeyin tek taraflı bir ayna gibi davranmasını sağlar ve farklı uygulama alanları bulabilir. İletim oranının en düşük seviyeye getirildiği koşulda NP metayüzeyi rezonans frekansındaki ışığı bir yönden büyük oranda sönümlerken diğer yönden ise büyük oranda yansıtır. Bu da ışık hapsetmek için kullanışlı bir özelliktir.

4.3.8. Nanoparçacık Şeklinin Etkileri

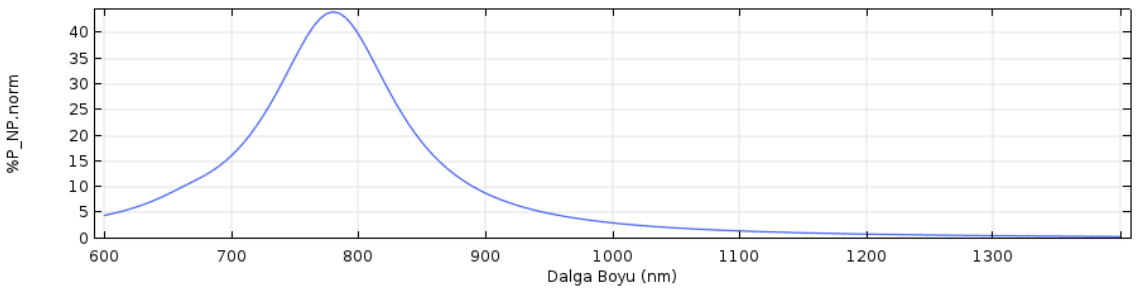
NP karakteristiklerini etkileyen bir değişken de NP şeklidir. NP, küre gibi modellemesi ve üretimi kolay bir şekle sahip olabileceği gibi çok köşeli karmaşık bir şekle de sahip olabilir. Bu bölümde küre haricinde bir şeklin NP karakteristiklerinde ne gibi değişikliklere yol açabileceği incelenmiştir. Bunun için küreye benzer şekilde üretimi kolay olan yarıküre NP'ler düz ve ters yönelimlerde test edilmiştir. Karakteristikleri bulmak için kullanılan yöntemin nanometre boyutlarındaki farklı şekillere sahip NP'ler için de kullanılabilir olduğu gösterilmiştir.

Şekil 106. Küre ve yarıküre NP şekilleri

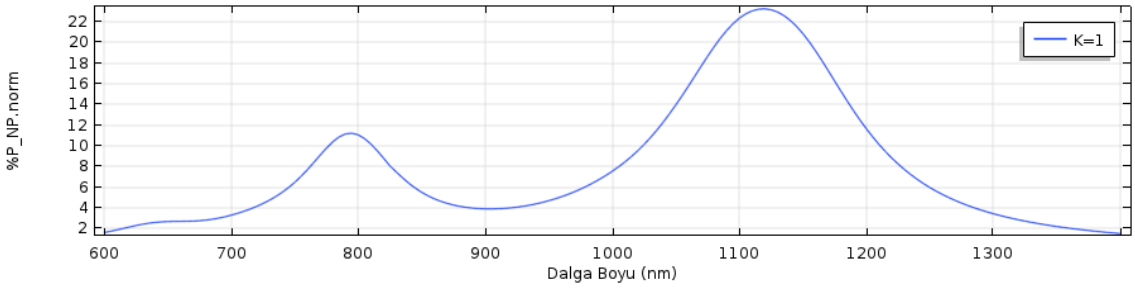
Şekil 106'da küre, düz yarıküre ve ters yarı küre şekilleri görülmektedir. Bu şekillerin karakteristikleri incelenmiştir. Benzetimler kontrol modeli üzerinden yapılmıştır ve benzetimlerde NP yarıçapı ve yarı iletken kesit alanı her şekil için aynıdır:

Yarı iletken Kesit Alanı = 4900 (nm^2)

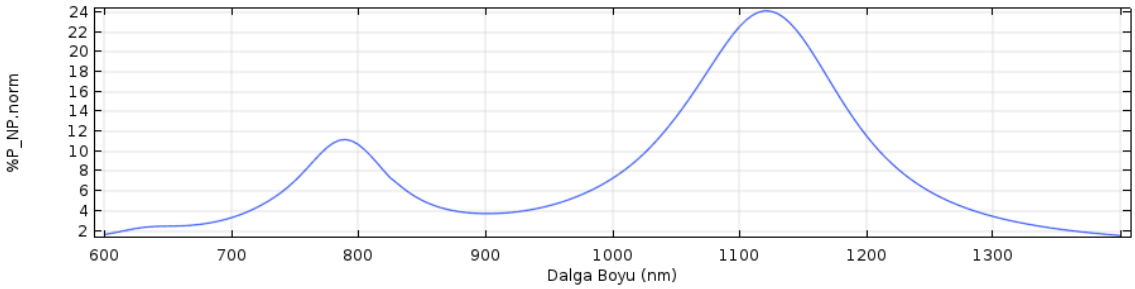
NP Yarıçapı = 10 (nm)



Şekil 107. Küre NP için NP emilim oranı ($\%P_{NP.norm}$)



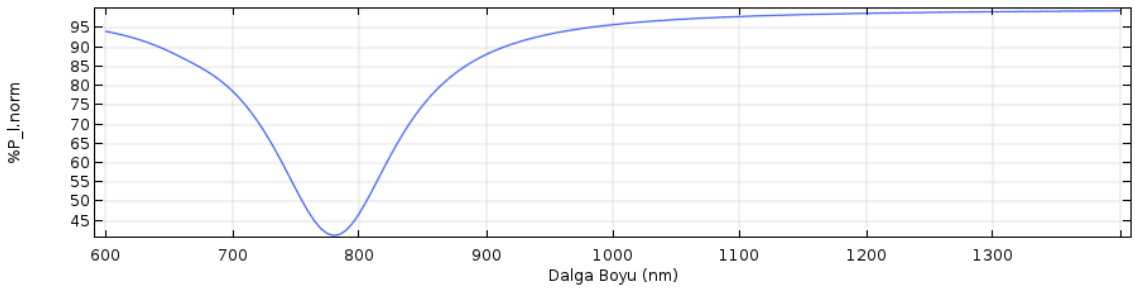
Şekil 108. Düz Yarıküre NP için NP emilim oranı ($\%P_{NP.norm}$)



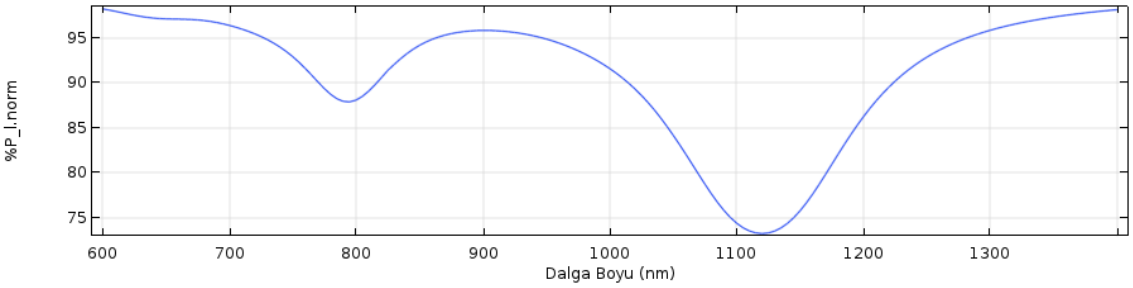
Şekil 109. Ters Yarıküre NP için NP emilim oranı ($\%P_{NP.norm}$)

Şekil 107, Şekil 108 ve Şekil 109'da küre, düz yarıküre ve ters yarı küre için kontrol modelinde NP tarafından soğurulan güç oranı görülmektedir. Küre NP için rezonans frekansında soğurma %44, düz yarıküre NP için %23.25, ters yarı küre NP için %24.15 oranındadır. Yarıküreler için soğurma oranı küreye oranla yaklaşık olarak yarı yarıyadır ve yarıkürenin yönelimi soğurma oranında büyük bir değişikliğe sebep olmamıştır.

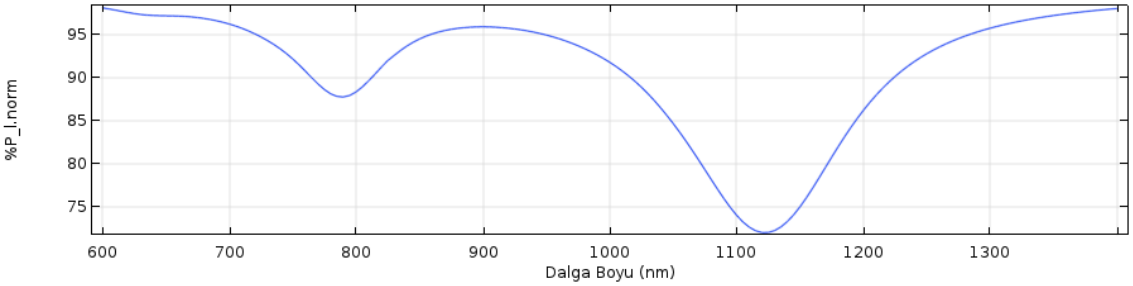
Yarıküre, küreye oranla daha düşük frekansta ana rezonansa sahiptir. Bunun yanında yarıkürenin daha yüksek frekansta ikinci bir rezonansı daha görülmektedir. Bu rezonans kuadrupol rezonansıdır. Bu rezonans tepesi iki yarıküre yönelimi için de aynıdır.



Şekil 110. Küre NP için NP iletim oranı ($\%P_{\text{İ}.norm}$)

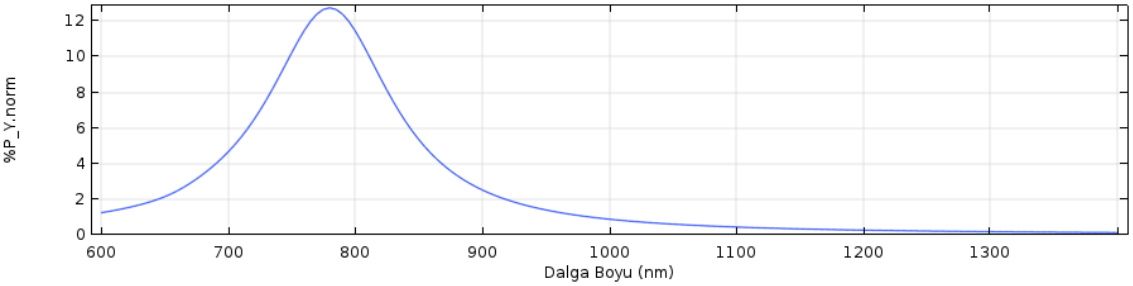


Şekil 111. Düz Yarıküre NP için NP iletim oranı ($\%P_{\text{İ}.norm}$)

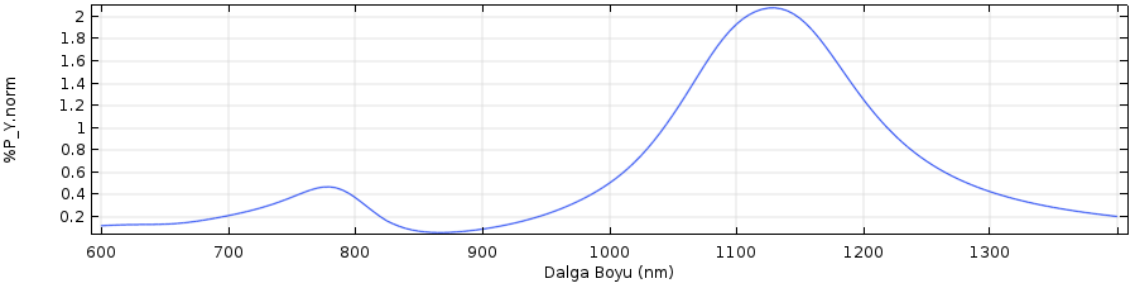


Şekil 112. Ters Yarıküre NP için NP iletim oranı ($\%P_{\text{İ}.norm}$)

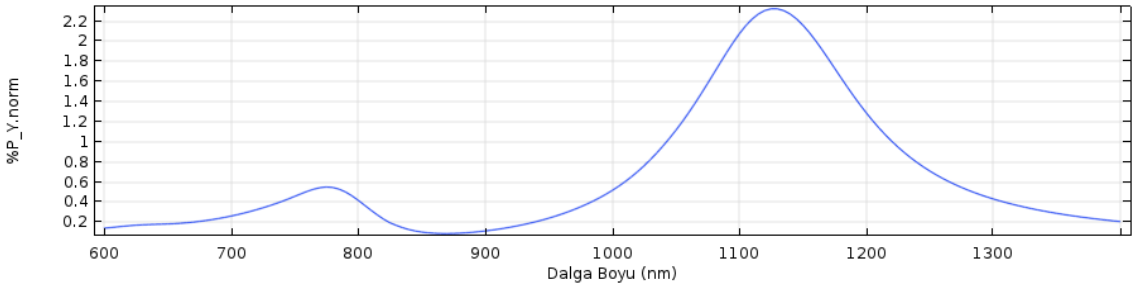
Şekil 110, Şekil 111 ve Şekil 112'de küre, düz yarıküre ve ters yarı küre için kontrol modelinde NP düzlemine ulaşan gücün iletim yüzdesi verilmiştir. Küre NP için rezonans frekansında iletim %41, düz yarıküre NP için %73.2, ters yarı küre NP için %72 oranındadır. Yarıküreler aynı yarıçap ve hücre kesit alanı için küreye oranla daha yüksek bir iletim oranına sahiptirler ve yarıkürenin yönelimi iletim oranında büyük bir değişikliğe sebep olmamaktadır.



Şekil 113. Küre NP için NP yansıma oranı ($\%P_{Y.norm}$)

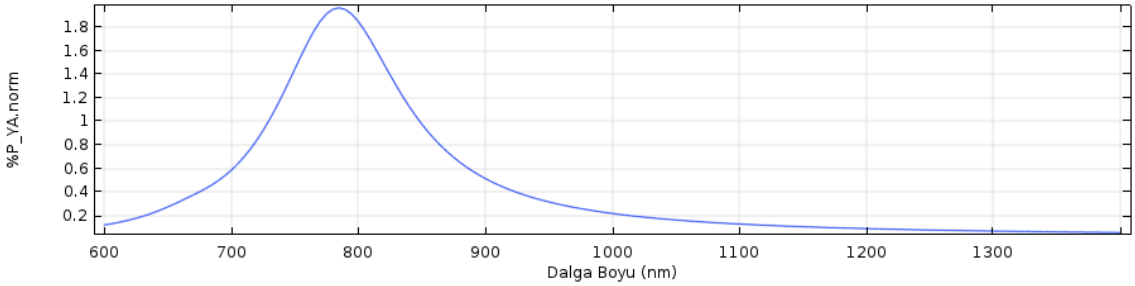


Şekil 114. Düz Yarıküre NP için NP yansıma oranı ($\%P_{Y.norm}$)

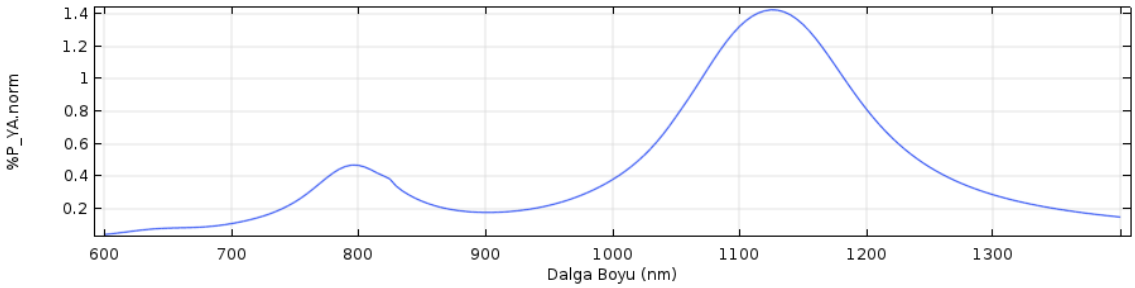


Şekil 115. Ters Yarıküre NP için NP yansıma oranı ($\%P_{Y.norm}$)

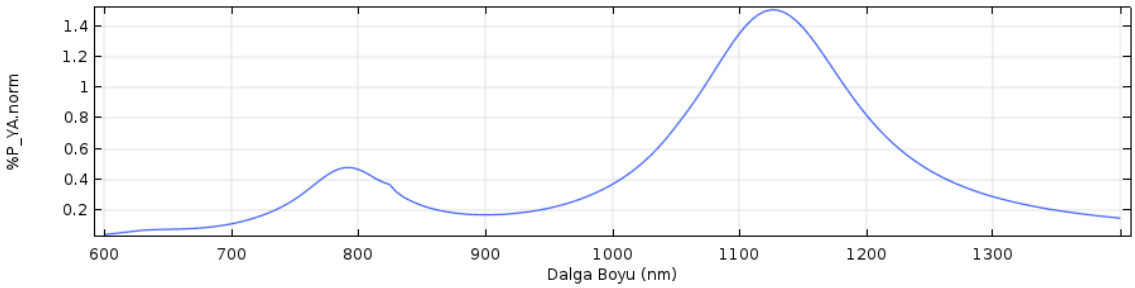
Şekil 113, Şekil 114 ve Şekil 115'te küre, düz yarıküre ve ters yarı küre için kontrol modelinde NP düzlemine ulaşan gücün yansıma yüzdesi verilmiştir. Küre NP için rezonans frekansında yansıma %13, düz yarıküre NP için %2.1, ters yarı küre NP için %2.35 oranındadır. Yarıküreler aynı yarıçap ve hücre kesit alanı için küreye oranla daha düşük bir yansıma oranına sahiptirler ve yarıkürenin yönelimi yansıma oranında büyük bir değişikliğe sebep olmamaktadır.



Şekil 116. Küre NP için yakın alan emilim oranı ($\%P_{YA.norm}$)



Şekil 117. Düz Yarıküre NP için yakın alan emilim oranı ($\%P_{YA.norm}$)



Şekil 118. Ters Yarıküre NP için yakın alan emilim oranı ($\%P_{YA.norm}$)

Şekil 116, Şekil 117 ve Şekil 118’de küre, düz yarıküre ve ters yarı küre için kontrol modelinde NP düzlemine ulaşan güce göre yakın alan bölgesinde yarı iletken emilim yüzdesi görülmektedir. Küre NP için rezonans frekansında yakın alan emilimi %2, düz yarıküre NP için %1.45, ters yarı küre NP için %1.5 oranındadır. Yarıküreler aynı yarıçap ve hücre kesit alanı için küreye oranla daha düşük bir yakın alan emilim oranına sahiptirler ve yarıkürenin yönelimi yakın alan emilim oranında büyük bir değişikliğe sebep olmamaktadır.

Kullanılan yöntemde farklı şekillerdeki NP'ler için yapılan işlemler aynıdır ve her türlü şekil için uygulanabilir. Nanometre boyutlarındaki NP’ler alışılageldik yansıma özellikleri göstermezler. Düz ve ters yarıküre NP’ler çok farklı ön yüzeylere sahip olsalar da karakteristiklerinde büyük bir değişiklik meydana gelmemiştir. Küre ile kıyaslandığında ise çok farklı özelliklere sahiptirler. Farklı şekiller rezonans sayısı, frekansı ve zirvesinde büyük değişikliklere sebep olabilir ve bu etkileri kestirmek oldukça güçtür. Bunları test etmenin en kolay yolu benzetim yoluyladır.

5. PLAZMONİK GÜNEŞ HÜCRESİ

5.1. Optimal Nanoparçacık Kullanımı

“4.3. Parametreler ve Etkileri” bölümünde plazmonik NP karakteristiklerinin farklı parametreler ile ne şekilde değiştiği incelenmiştir. Bu bölümde yarı iletken ışık emilimini arttırmak için plazmonik NP’lerin kullanımı, bu NP’lerde olması gereken ideal özellikler ve bu özelliklerin “4.3. Parametreler ve Etkileri” bölümündeki veriler yardımıyla nasıl elde edilebileceği üzerine durulmuştur. Hücre tasarımının NP’lerin güç emilimine katkısını nasıl etkilediği gösterilmiştir.

“3.2. Güneş Hücresi” bölümünde güneş hücrelerinin nasıl güç ürettiği anlatılmıştır. Foton enerjisiyle ayrışan yük taşıyıcılarının toplanması için tükenim bölgesinde oluşan elektrik alanı takip etmeleri (elektron sürüklenmesi) gerekmektedir. Dolayısıyla elektrik akımı güneş hücrelerinde tükenim bölgesinde üretilmektedir. Tükenim bölgesinde oluşan elektron-delik çifti sayısını arttırmak için NP’ler kullanılarak elektrik alan yoğunlaştırılmış ve böylece yarı iletken üzerinde foton emilimi arttırılmıştır.

Baz alınan model Si (Aspnes [50]) yarı iletken ve Ag (Hagemann [51]) NP’ler kullanmaktadır. Yarı iletken üzerinde foton ile yük taşıyıcılarının oluşturulabilmesi için foton enerjisinin (E_f) en az yarı iletken bant aralığı enerjisi (E_b) kadar olması gerekmektedir.

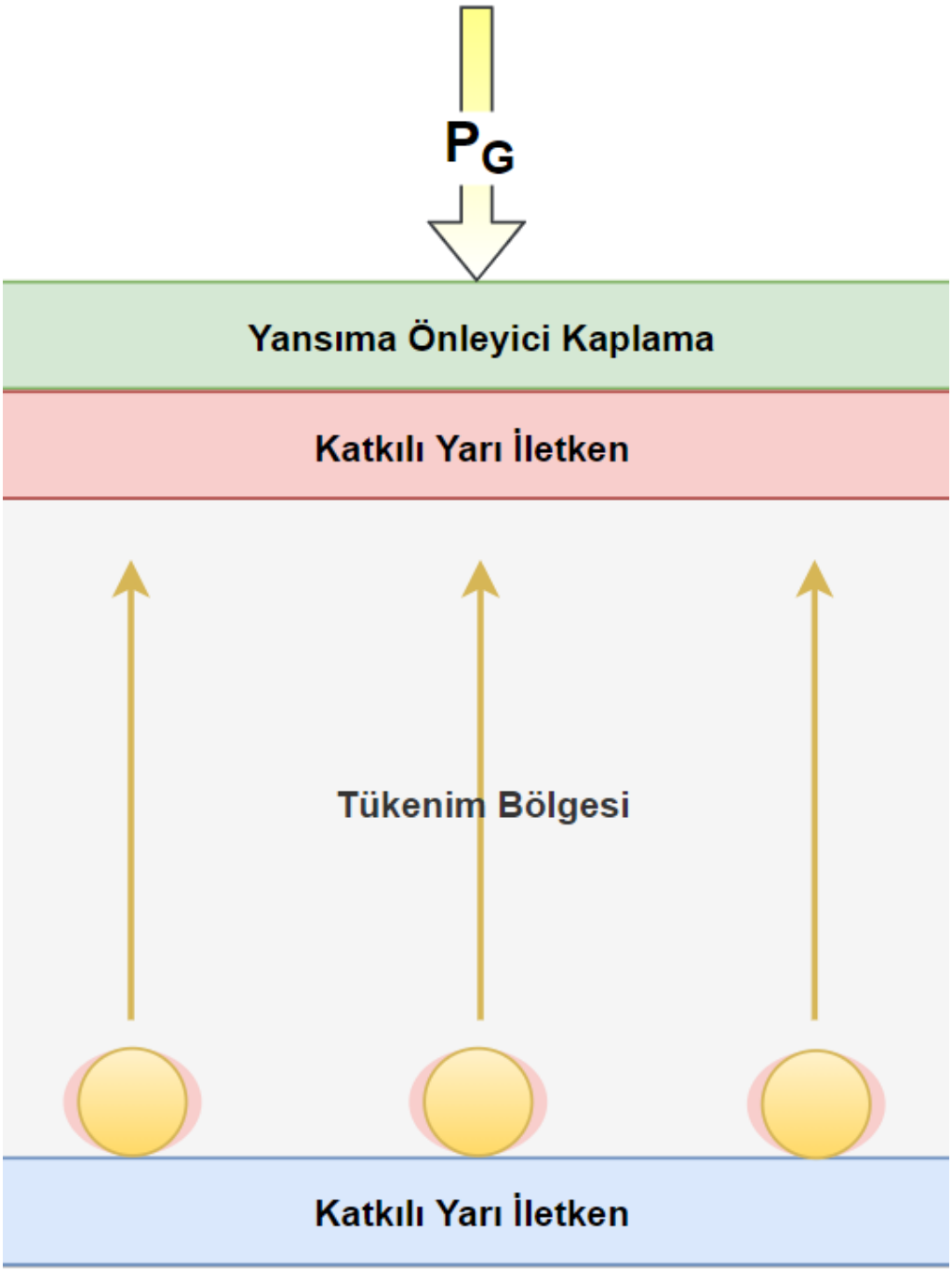
$$E_f \geq E_b$$

Foton enerjinin bant aralığı enerjisinden çok daha büyük olduğu koşulda da bu fazla enerji ısı olarak kaybedilir. Bu sebeple ideal bir silisyum güneş hücresi düşünüldüğünde en verimli dönüşüm yapacağı foton enerjisinin yarı iletken bant aralığı enerjisi kadar olacağı varsayılabilir. Si için bu bant aralığı enerjisi 1.11 eV’tur ve buna karşılık gelen foton dalga boyu aşağıdaki şekilde 1117 nm olarak bulunur.

$$E_f = \frac{h\,c}{\lambda} = 1.11 \qquad \text{(eV)}$$

$$\lambda = \frac{h\,c}{1.11\ \text{eV}} = 1117 \qquad \text{(nm)}$$

Fakat silisyumun foton emilimi bu frekansta çok düşüktür. NP’lerin ışık yoğunlaştırma ve hapsetme özelliklerinden faydalanılarak bu emilim arttırılabilir.



Şekil 119. NP eklenmiş güneş hücresi yapısı

Şekil 119'da yarı iletken içerisine yerleştirilen NP'ler ile ışık emiliminin arttırılması amaçlanmaktadır. Yarı iletken üzerine eklenen yansıma önleyici kaplama ile ışığın hava-yarı iletken geçişi sırasında yansıması engellenmektedir.

Şekilde güneş hücrelerini oluşturan P-N eklemi ve tükenim bölgesi görülmektedir. Elektrik üretiminin tükenim bölgesinde yapılması sebebiyle NP'ler bu bölge içerisine

yerleştirilmişlerdir. NP'ler tarafından yakın alan bölgesinde yoğunlaştırılan elektrik alan tükenim bölgesinin foton emilimini arttırır. Bunun yanında NP'ler tarafından yansıtılan gücün bir kısmı da tükenim bölgesinden tekrar geçerek yarı iletken tarafından emilir.

Bu hücre modelinde kullanılmak üzere istenilen özelliklere sahip NP'lerin tasarlanması gerekmektedir. NP rezonansını istenilen dalga boyuna (1117 nm) getirmek için "4.3.2. Yarıçap ve Sıklığın Etkileri" bölümünde yer alan veriler kullanılabilir. Gerçekçi modelde kullanılan 10 nm yarıçap ve 50 nm NP'ler arası boşluk için rezonans 780 nm'dedir. Bu bölümde frekansı azalmak için boyutların arttırılması gerektiği görülmektedir. Boşluk ve yarıçapın frekans üzerinde özellikle büyük NP'ler için ayrı ayrı etkilerinin olması sebebiyle aynı frekansa sahip farklı boyutlarda birden fazla NP dizisi tasarlanabilir. Bu sebeple 1117 nm dalga boyunda rezonansa sahip aşağıda özellikleri verilen iki NP dizisinin emilime etkileri incelenmiştir.

NP_1 için:

Yarıçap : 36 nm

Boşluk : 204 nm

Çizelge 2. NP_1 dizisinin karakteristik parametreleri

$\%\boldsymbol{P}_{NP.norm}$	$\%\boldsymbol{P}_{Y.norm}$	$\%\boldsymbol{P}_{YA.norm}$	$\%\boldsymbol{P}_{İ.norm}$
%38.1	%44.9	%6.1	%10.9

NP_2 için:

Yarıçap : 51 nm

Boşluk : 144 nm

Çizelge 3. NP_2 dizisinin karakteristik parametreleri

$\%\boldsymbol{P}_{NP.norm}$	$\%\boldsymbol{P}_{Y.norm}$	$\%\boldsymbol{P}_{YA.norm}$	$\%\boldsymbol{P}_{İ.norm}$
%21.8	%73.8	%2.8	%1.6

Şekil 119'da görülen hücrenin emilim, yansıma ve iletim özelliklerini hesaplamak için "4.2. Kayıplı Ortamda Nanoparçacık Karakteristiği" bölümünde anlatılan yöntem

kullanılabilir. Aşağıda $\%P_{Y.norm}$, $\%P_{YA.norm}$, $\%P_{NP.norm}$ ve $\%P_{İ.norm}$ özellikleri daha önceden bulunmuş olan NP dizisi için bu yapının güç hesapları verilmiştir.

NP üzerine ulaşan güç oranı ($\%P_U$) aşağıdaki gibidir.

$$\%P_U = \frac{P_U}{P_G} = e^{-\alpha\, x_d} \tag{81}$$

Tükenim bölgesinde emilen güç oranı ($\%P_T$) aşağıdaki gibidir.

$$\%P_T = (1 - \%P_U)(1 + \%P_{Y.norm}\, \%P_U) + \%P_{İ.norm}\, \%P_U\, (1 - e^{-\alpha\, x_y}) \tag{82}$$

NP yakın alan bölgesinde yarı iletken tarafından emilen güç oranı ($\%P_{YA}$) aşağıdaki gibidir.

$$\%P_{YA} = \%P_{YA.norm}\, \%P_U \tag{83}$$

Yarı iletken tarafından emilen toplam güç oranı ($\%P_{OYİ}$) aşağıdaki gibidir.

$$\%P_{OYİ} = \%P_T + \%P_{YA} \tag{84}$$

Hücre tarafından yansıtılan güç oranı ($\%P_{OY}$) aşağıdaki gibidir.

$$\%P_{OY} = \%P_{Y.norm}\, \%P_U^2 \tag{85}$$

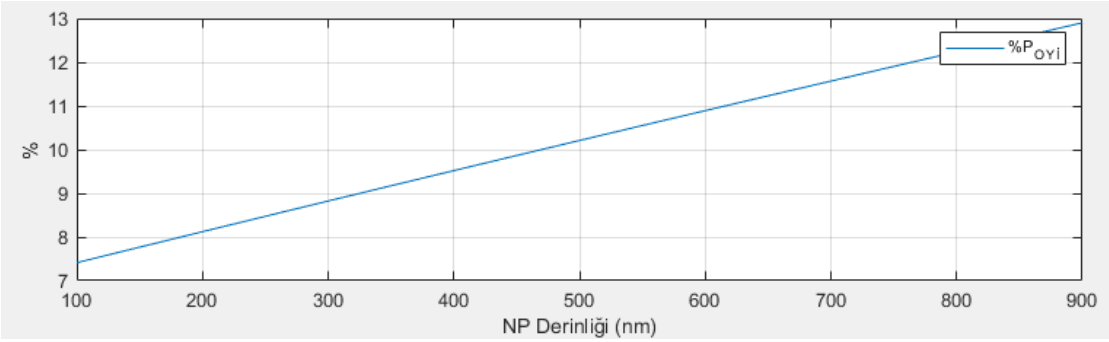
Hücre tarafından iletilen güç oranı ($\%P_{Oİ}$) aşağıdaki gibidir.

$$\%P_{Oİ} = \%P_İ = \%P_{İ.norm}\ \%P_U\, e^{-\alpha\, x_y} \tag{86}$$

Hücre içerisinde NP tarafından soğurulan güç oranı ($\%P_{ONP}$) aşağıdaki gibidir.

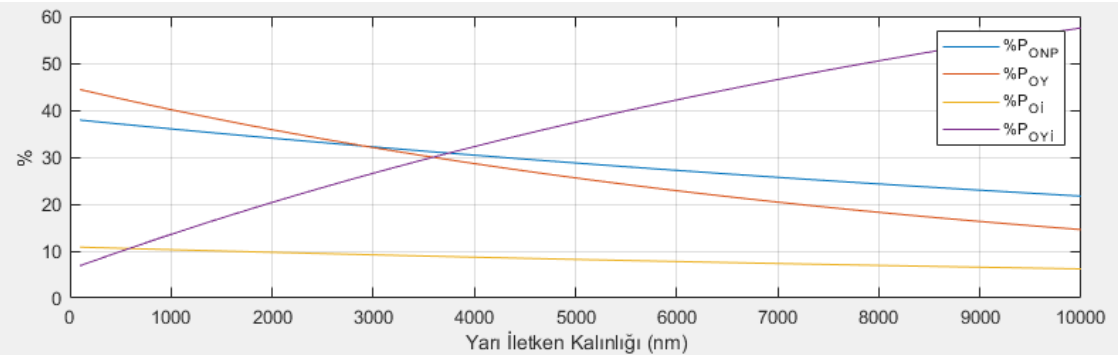
$$\%P_{ONP} = \%P_{NP} = \%P_{NP.norm}\, \%P_U \tag{87}$$

NP'ler, üzerlerine düşen gücün bir kısmını geri yansıtır, bir kısmının yakın alanda elektrik alanı arttırarak yarı iletken tarafından emilmesini sağlar, bir kısmını kendi üzerlerinde soğururlar ve geri kalan kısmını da iletirler. Yarı iletken içerisine gömülü NP için iletilen güç her zaman NP'siz durumdan daha düşüktür. Bu da NP'lerin gölgesinde kalan yakın alan haricindeki bölgede emilimin NP'siz bir hücreye göre daha düşük olacağını göstermektedir. Bu yüzden NP altında kalan aktif materyali azaltmak ve yansıtılan gücü en iyi şekilde kullanabilmek amacıyla gömülü NP'ler aktif katmanın olabildiğince en altına yerleştirilmişlerdir. Şekil 120'de NP_1 dizisinin sabit kalınlıktaki (1 μm) tükenim bölgesi içerisinde bulunduğu derinliğe göre yarı iletken emilim oranı ($\%P_{OYİ}$) verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere NP'lerin aktif katman içerisinde bulundukları derinlik arttıkça emilime sağladıkları katkı da artar.

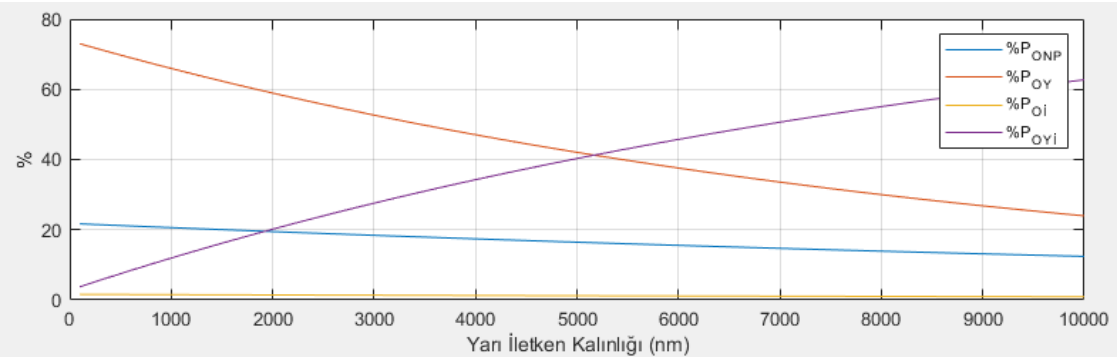


Şekil 120. NP'nin tükenim bölgesindeki derinliğine göre yarı iletken emilim oranı

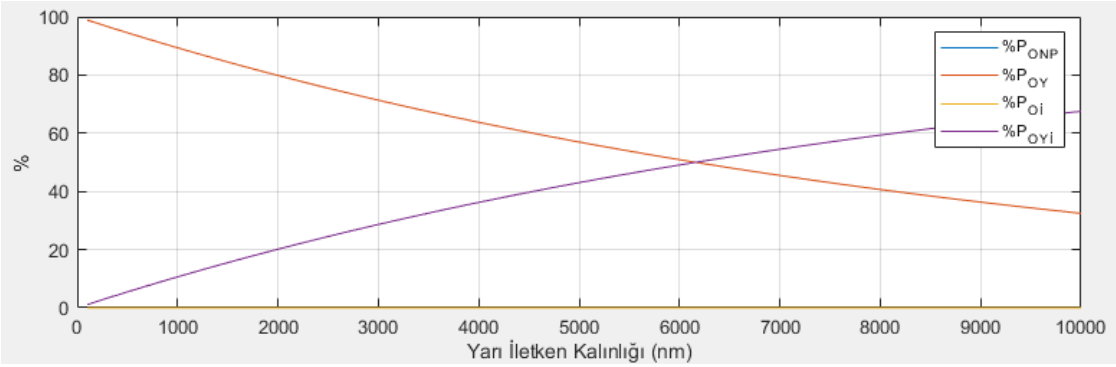
Bu yapı ışığın tek geçişte emilimini en üst düzeyde arttıracak şekilde tasarlanmıştır. Fakat yansıtıcı alt yüzey kullanılması gibi farklı tasarımlarda optimal NP konumunda değişiklik meydana gelebilir. Bu durumda optimal konum, benzer şekilde tasarıma yönelik gerekli emilim hesaplarının yapılması sonucunda elde edilebilir. Bu hesaplamaların ne şekilde yapıldığı "4.2. Kayıplı Ortamda Nanoparçacık Karakteristiği" bölümünde verilen örnekte görülmektedir. Burada kullanılan tasarım ultra ince güneş hücrelerine yöneliktir ve bu sebeple ışık yönünü değiştirecek mikro boyuttaki yapıların kullanılmadığı varsayılmıştır.



Şekil 121. NP_1 için yarı iletken kalınlığına göre hücre karakteristikleri

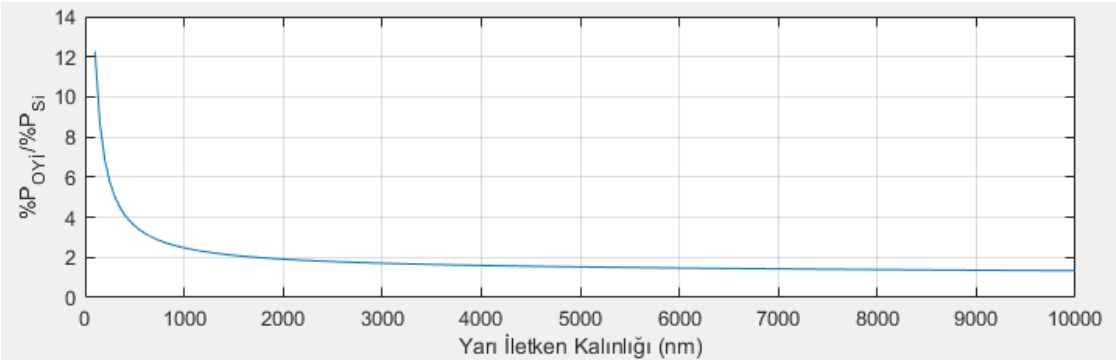


Şekil 122. NP_2 için yarı iletken kalınlığına göre hücre karakteristikleri

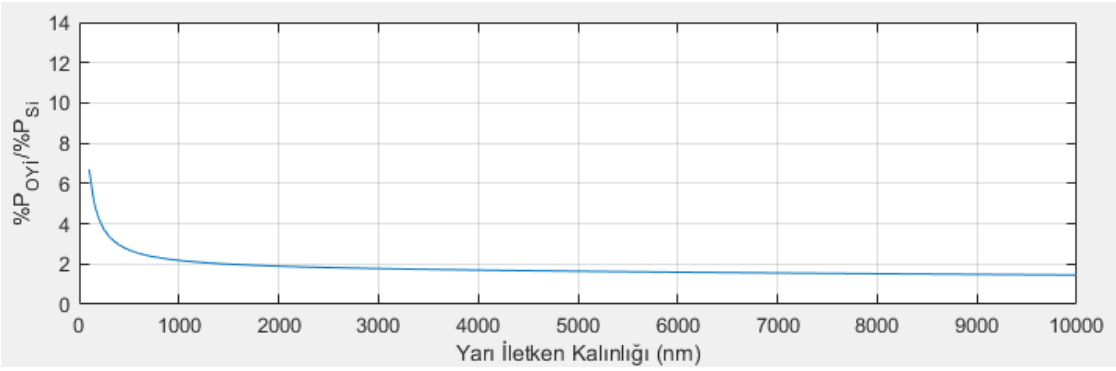


Şekil 123. İdeal Ayna için yarı iletken kalınlığına göre hücre karakteristikleri

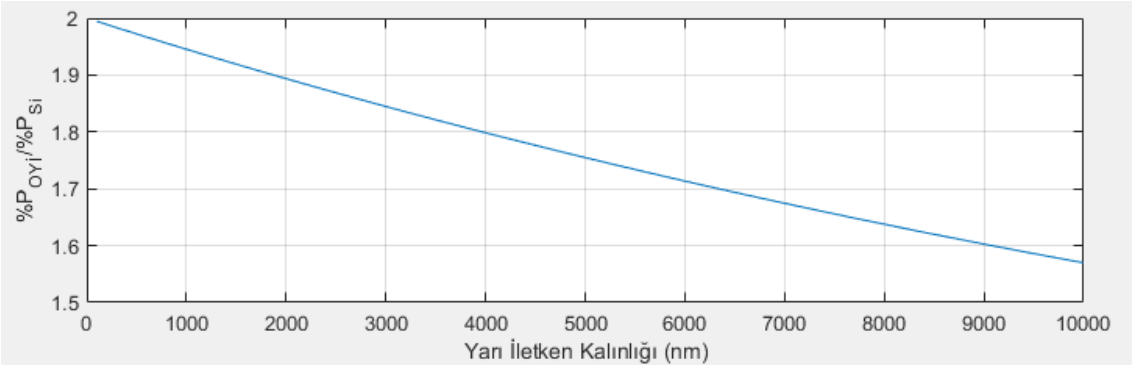
Şekil 121, Şekil 122 ve Şekil 123'te sırasıyla yarı iletkenin tabanına yerleştirilen NP_1, NP_2 ve ideal ayna ($\%P_{Y.norm}$ = 1, $\%P_{YA.norm}$ = 0, $\%P_{NP.norm}$ = 0, $\%P_{İ.norm}$ = 0) için ısıya soğurulan ($\%P_{ONP}$), yansıtılan ($\%P_{OY}$), iletilen ($\%P_{Oİ}$) ve yarı iletken tarafından emilen ($\%P_{OYİ}$) güç oranları verilmiştir. Bu değerlerin yarı iletken tükenim bölgesi kalınlığı ile değişimi görülmektedir. Kalınlık arttıkça yarı iletken emilim oranı ($\%P_{OYİ}$) artar, hücre tarafından yansıtılan ($\%P_{OY}$) ve iletilen ($\%P_{Oİ}$) güç oranı azalır ve NP üzerine ulaşan gücün azalması ile NP tarafından soğurulan güç oranı ($\%P_{ONP}$) da azalır.



Şekil 124. NP_1 ile yarı iletken kalınlığına göre hücre emilimindeki artış oranı



Şekil 125. NP_2 ile yarı iletken kalınlığına göre hücre emilimindeki artış oranı



Şekil 126. İdeal Ayna ile yarı iletken kalınlığına göre hücre emilimindeki artış oranı

Şekil 124, Şekil 125 ve Şekil 126'da sırasıyla yarı iletkenin tabanına yerleştirilen NP_1, NP_2 ve ideal ayna için kalınlığa göre yarı iletken emilim oranı ($\%P_{OYİ}$) aynı kalınlıktaki Si'nin emilim oranıyla ($\%P_{Si}$) kıyaslanmıştır. Hücre emilimindeki artış oranları aşağıdaki gibidir.

0.2 µm yarı iletken kalınlığında:

NP_1 : $\%P_{OYİ}/\%P_{Si} = 6.80$

NP_2 : $\%P_{OYİ}/\%P_{Si} = 4.20$

Ayna : $\%P_{OYİ}/\%P_{Si} = 1.99$

1 µm yarı iletken kalınlığında:

NP_1 : $\%P_{OYİ}/\%P_{Si} = 2.48$

NP_2 : $\%P_{OYİ}/\%P_{Si} = 2.18$

Ayna : $\%P_{OYİ}/\%P_{Si} = 1.95$

10 µm yarı iletken kalınlığında:

NP_1 : $\%P_{OYİ}/\%P_{Si} = 1.34$

NP_2 : $\%P_{OYİ}/\%P_{Si} = 1.46$

Ayna : $\%P_{OYİ}/\%P_{Si} = 1.57$

0.2 µm kalınlıkta tükenim bölgesine NP_1 eklenen hücre aynı kalınlıktaki yarı iletkene (Si) göre 6.80 kat (%680) emilime sahiptir. Bu değer NP_2 için 4.20 kat (%420), ideal ayna için 1.99 kattır (%199). Bu değerlerden NP'lerin ince hücrelerde kullanımının çok etkili olduğu söylenebilir. NP_1'de daha fazla NP emilim ($\%P_{NP.norm}$) ve iletim ($\%P_{İ.norm}$) kaybı olsa da ve NP_2 daha fazla yansımaya ($\%P_{Y.norm}$) sahip olsa da NP_1'in

sağladığı daha yüksek yakın alan emilimi ($\%P_{YA.norm}$) NP_2'den daha kazançlı olmasını sağlamaktadır. NP_1 ve NP_2 arasındaki kazanç farkı yarı iletkenin kalınlaşmasıyla azalır. Bunun sebebi yakın alan emiliminin toplam yarı iletken emilimi içinde daha az paya sahip olmaya başlaması ve yansımanın daha kazançlı olmasıdır. 1 µm kalınlıkta NP'ler ve ideal ayna arasındaki kazanç farkı azalsa da NP kullanımı hala daha verimlidir. NP_2 10 µm kalınlıkta NP_1'den daha verimli hale gelmiştir ve ideal ayna her iki NP'den de daha verimlidir. İnce güneş hücrelerinde Şekil 119'daki gibi kullanılacak olan NP'lerde en önemli parametre yüksek $\%P_{YA.norm}$ değeridir, aynı zamanda yüksek $\%P_{Y.norm}$ değeri de yarı iletken emilimine katkı sağlar. Fakat $\%P_{NP.norm}$ ısıl kayba dönüşür ve $\%P_{İ.norm}$ emilmeden iletilen ışığa neden olur. Bu değerlerin düşük olması verimi arttırıcı etkiye sahiptir.

Tükenim bölgesine yerleştirilen NP'ler metal üzerindeki serbest yük taşıyıcılar sebebiyle rekombinasyonu arttırıcı etkiye sebep olabilir. Bu da pratikte güç dönüşümünde kayıplara neden olabilir. NP'nin polimer kabuk ile kaplanması metali korumanın, rezonans frekansını değiştirmenin ve NP'ler arası boşluğun ayarlanabilmesini sağlamanın yanında rekombinasyonu azaltıcı etkiye de sahiptir. Hücre içerisinde kullanılacak optimal NP için tasarım önemli bir mühendislik gerektirir. "4.3. Parametreler ve Etkileri" bölümünde elde edilen kullanışlı veriler bu amaçla kullanılabilir.

Materyallerin emilim katsayıları ışık dalga boyu arttıkça genel olarak azalır. Bu sebeple uzun dalga boylarında emilim yapan güneş hücresi eklemleri kalın imal edilmek zorundadır. Fakat NP yakın alan emiliminin katkısı bu yarı iletken emiliminin düşük olduğu boyut ve frekanslarda orantısal olarak daha fazla katkı sağlar. Düşük yarı iletken emilimi sebebiyle NP üzerine giriş gücünün daha büyük bir bölümü düşecektir. Bu sebeple yakın alanda emilim artışı daha büyük bir oranda olacaktır. Daha uzun dalga boylarında NP kullanımı hücrenin inceltilmesi ve verimin arttırılması için daha büyük katkı sağlar.

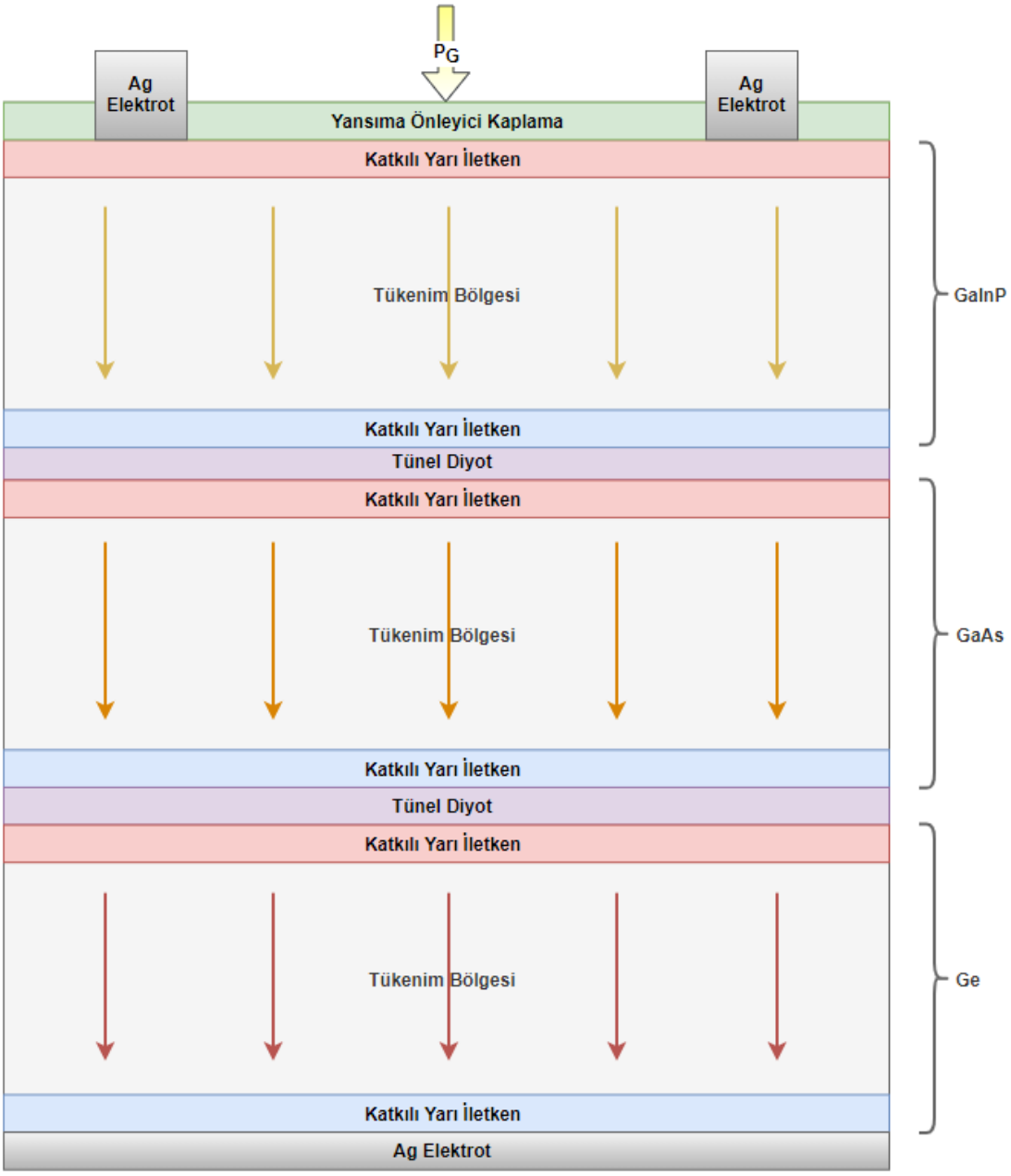
NP'lerin sadece belli bir frekans bandı (rezonans) ile etkileşime girmesi ultra ince güneş hücreleri dışında da kullanım alanı sunmaktadır. "5.2. Çok Eklemli Güneş Hücrelerinde Kullanım" bölümünde nispeten daha kalın ve çok eklemli hücrelerde NP dizilerinin ne şekilde kullanılabileceği üzerine durulmuştur.

5.2. Çok Eklemli Güneş Hücrelerinde Kullanım

Tek bir yarı iletkenden oluşan güneş hücreleri için güneş enerjisi dönüştürme verimi çok kısıtlıdır. Yarı iletkenlerin özel koşullar dışında sadece bant aralıklarından daha yüksek enerjiye sahip fotonları elektrik enerjisine dönüştürebilmelerinden dolayı daha geniş bir ışık frekansı spektrumunu kapsayabilmek için düşük bant aralığı enerjisine sahip olmaları gerekir. Fakat bu, üretilen yük taşıyıcısı sayısını arttırsa da yüksek frekanslı fotonların enerjilerinin büyük bölümü kullanılamaz hale gelir ve ısıya çevrilerek kaybedilir. Yüksek bant aralığı enerjisine sahip yarı iletkenler ise yüksek frekansta çok verimli dönüşüm yapabilseler de düşük enerjili fotonlardan yararlanamazlar. Bu ikilemi çözmek için bir güneş hücresi içerisinde farklı bant aralığı enerjisine sahip birden fazla yarı iletken kullanmak mümkündür.

Her biri farklı ışık frekansında verimli çalışan çok sayıda ince film güneş hücresinin üst üste dizilmesiyle daha yüksek bir verim elde edilebilir. Bu katmanlarda bulunan farklı materyallerden oluşturulan P-N eklemleri farklı dalga boyları için elektrik akımı üretir. Güneşe en yakın olan üst katmana eklenen ince film güneş hücresi en yüksek bant aralığına sahiptir. Bu üst katmanda bant aralığı enerjisine eşit veya daha yüksek enerjiye sahip fotonlar emilir, daha az enerjiye sahip fotonlar ise yarı iletken tarafından emilemez ve bir alt katmana iletilir. Bu katmandan sonra gelen her katman bir öncekinden daha düşük bant aralığı enerjisine sahiptir ve benzer şekilde bant aralığı enerjilerinden daha yüksek enerjili fotonları emerek düşük enerjili fotonların alt katmana geçmesine izin verirler. Her katman daha dar bir ışık spektrumuna özelleşerek daha verimli çalışır ve çok sayıda olmaları sebebiyle geniş bir ışık spektrumunda enerji dönüşümü sağlarlar.

Bu hücrelerde bulunan bir yapı da ara katmanlarda oluşturulan tünel diyotlardır. Çok eklemli güneş hücreleri üst üste bulunan çok sayıda P-N ekleminden oluşmaları sebebiyle katmanlar arasında bu eklemlere ters yönlü zararlı diyot eklemleri meydana gelir. Bu sebeple ara katmanlarda yüksek katkılı yarı iletken kullanılarak tünel diyotlar oluşturulur. Tünel diyotlarda elektronlar kuantum tünelleme yoluyla, oluşan bariyerden rahatlıkla geçerler ve böylece zararlı diyot yerleşik potansiyelinin azaltılması sağlanmış olur.



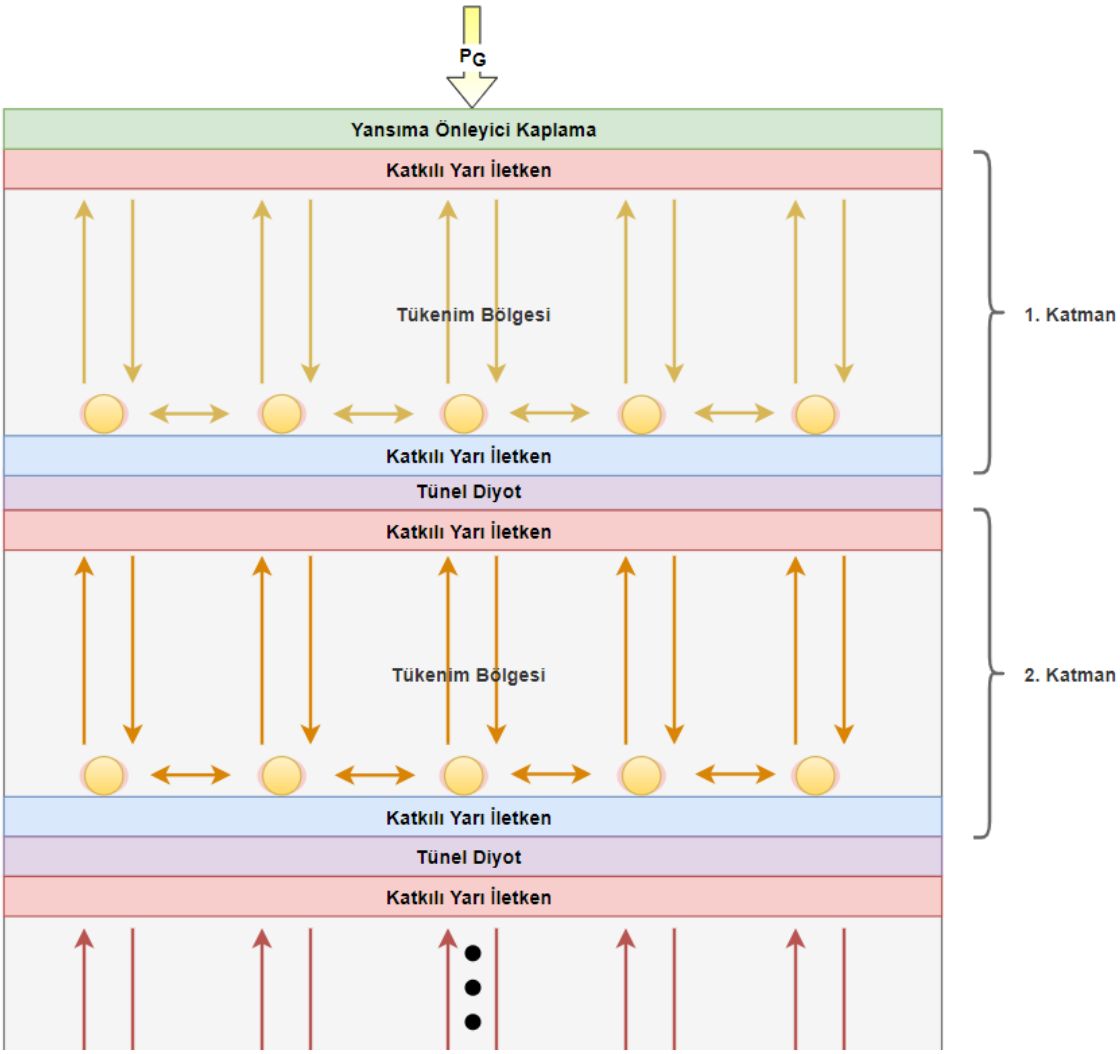
Şekil 127. Çok eklemli güneş hücresi yapısı [55]

Çok eklemli güneş hücrelerinde teorik olarak kullanılabilecek katman sayısı sınırsız olsa da pratikte birkaç katman kullanılır. Şekil 127'de görüldüğü üzere üç eklemli bir güneş hücresi GaInP, GaAs ve Ge yarı iletkenlerinden oluşabilir. Bu hücrede mavi ve yeşil ışık GaInP üst katman tarafından emilir, kırmızı ve turuncu ışık GaAs orta katman tarafından emilir, kızılötesi ışık ise Ge alt katman tarafından emilir.

Çok eklemli güneş hücrelerinde kullanılan ince film yarı iletkenler ışığın tek geçişinde özelleştikleri frekanstaki ışığın tamamının emilimini sağlayamayabilirler. Bu güneş hücrelerinde ışık çok eklemli yapı içerisinde hapsedilmektedir, bu da üst katmanda

tamamı emilemeyen yüksek enerjili ışığın alt katmanda verimsiz bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürülmesine yol açmaktadır. Alt katmanlara geçen yüksek enerjili fotonların bu düşük bant enerjili eklemlerde verimsiz olarak emilme olasılıkları yüksektir ve hücre tabanından yansıyarak verimli emildikleri katmana dönme olasılıkları düşüktür. Bunun bir çözümü ışığın her katmanda katettiği optik yol uzunluğunu arttırmaktır. Plazmonik NP'ler, eşsiz özellikleri sayesinde bu sorunun çözümüne katkı sağlayabilecek niteliktedirler.

Plazmonik NP'lerin spektral karakteristiklerinin ışığın dalga boyuna bağlı olması ve bu karakteristiklerin "4.3. Parametreler ve Etkileri" bölümünde de incelendiği üzere farklı parametreler ile ayarlanabilmesi sayesinde çok eklemli güneş hücrelerinde önemli bir rol oynayabilirler.



Şekil 128. NP eklenmiş çok eklemli güneş hücresi yapısı

Şekil 128'de NP'lerin çok eklemli güneş hücrelerinde potansiyel bir kullanım şekli verilmiştir. Burada "5.1. Optimal Nanoparçacık Kullanımı" bölümünde incelenen gömülü NP'lerin çok eklemli güneş hücresi dahilinde kullanımı görülmektedir. Bu yapıda, gelen ışığı oluşturan farklı frekanslar elektrik enerjisine daha verimli dönüştürüldükleri katmanlarda hapsedilmektedirler.

Bu katmanlarda kullanılan NP'lerin rezonansları kullanıldıkları katmanın özelleştiği spektruma göre ayarlanmışlardır ve birbirlerinden farklı karakteristiklere sahiptirler. Tükenim bölgesinde bulunan NP'ler bulundukları katmanda en verimli emilimin olduğu frekans aralığında rezonansa sahip olmalı, yansıma ve yakın alan emilim oranları yüksek olmalıdır.

Işığın hücreden ilk geçişinde emilemeyen kısmının NP'lerin üzerine düşmesiyle NP ile etkileşen ışık yoğunlaştırılarak ya da geri yansıtılarak verimli bir şekilde emildiği üst katmanda hapsedilir. NP tarafından yoğunlaştırılan ışık, yakın alanda verimli dönüştürüldüğü katmanda emilir. Geri yansıtılan ışık ise verimli emildiği katmandan tekrar geçerek emilir. Bu NP'ler daha düşük enerjili ışık ile etkileşime girmeyip alt katmana geçmelerine izin verirler. Böylece farklı frekanslardaki ışık sadece en verimli kullanılabileceği katmana hapsedilmiş olur. Böyle bir kullanımda basit tasarımlara ve dar rezonans spektrumuna sahip birçok farklı NP bir arada kullanılarak geniş frekans spektrumunda güneş enerjisi dönüştürme verimine katkı sağlayabilirler.

NP'lerin çok eklemli güneş hücresi verimine etkilerini incelemek adına 1.82 eV bant aralığı enerjisine sahip GaInP 1. katman ve 0.65 eV bant aralığı enerjisine sahip Ge 2. katman olacak şekilde iki eklemli bir güneş hücresi düşünülebilir. NP eklenmeden hücrenin sahip olduğu verim, NP eklendikten sonra elde edilen verim ile kıyaslanabilir.

GaInP yaklaşık olarak 300-680 nm, Ge ise yaklaşık olarak 680-1870 nm dalga boyu aralığındaki ışığın emilimini yapar. Bu iki eklemli hücrede verim hesabı yapmak için yarı iletkenlerin emilim yaptığı dalga boyu bantlarındaki ışık, bir yaklaşım olarak tek renkli ve tek frekansa sahip ışıklar olarak temsil edilmişlerdir. "3.1. Güneş Işıması" bölümünde anlatılan ve (34-35) numaralı eşitliklerle verilen kara cisim ışıması modeli ile bu frekans bantlarındaki ışık şiddetleri ve ışık dalga boylarının ağırlıklı ortalaması hesaplanabilir. GaInP yarı iletkeninin emilim yaptığı 300-680 nm bant aralığındaki toplam ışık şiddeti 1.5 hava kütlesi altında 437 W/m^2, ışık dalga boyunun ağırlıklı ortalaması 500 nm'dir. Ge yarı iletkeninin emilim yaptığı 680-1870 nm bant

aralığındaki toplam ışık şiddeti ise 1.5 hava kütlesi altında 459 W/m^2, ışık dalga boyunun ağırlıklı ortalaması 1045 nm'dir.

Bu eklemlere eklenecek uygun NP'ler "2. PLAZMONİK NANOPARÇACIKLAR" ve "4.3. Parametreler ve Etkileri" bölümlerinde anlatıldığı şekilde yarı iletken ve NP metalinin elektriksel geçirgenlik, kırılma indisleri ve NP boyutlarının dikkate alınması ile seçilebilir. GaInP için emilim yaptığı yüksek frekansta NP rezonansı gerekmektedir. Bu sebeple Al görece yüksek mutlak elektriksel geçirgenlik ve yüksek plazma frekansı sayesinde yüksek frekanslarda rezonansa girebilen ve GaInP ile birlikte tercih edilebilecek bir metaldir. Yarı statik modele göre ışık dalga boyuna kıyasla çok küçük boyutlarda Al (Hagemann [51]) NP'ler GaInP (Schubert [56]) içerisinde 468 nm dalga boyunda rezonansa sahiptir. Ge için ise daha düşük frekansta rezonans gerekmektedir. Dolayısıyla görece düşük mutlak elektriksel geçirgenliğe sahip olan Cu NP'ler kullanılabilir. Yarı statik modele göre ışık dalga boyuna kıyasla çok küçük boyutlarda Cu (Hagemann [51]) NP'ler Ge (Aspnes [50]) içerisinde 992 nm dalga boyunda rezonansa sahiptir. NP'leri uygun rezonans frekansına getirmek için boyut ve sıklıklarıyla ince ayar yapılmıştır ve aşağıdaki NP'ler kullanılmıştır. Aşağıda bu NP'lerin boyut, sıklık ve karakteristikleri verilmiştir.

GaInP içine gömülü Al NP için:

Yarıçap : 15 nm

Boşluk : 20 nm

$\lambda_{rezonans} = 500$ nm

Çizelge 4. Al NP dizisinin karakteristik parametreleri

$\%\boldsymbol{P}_{NP.norm}$	$\%\boldsymbol{P}_{Y.norm}$	$\%\boldsymbol{P}_{İ.norm}$	$\%\boldsymbol{P}_{YA.norm}$
%37.7	%29.9	%13.3	%19.1

Ge içine gömülü Cu NP için:

Yarıçap : 12.25 nm

Boşluk : 24.5 nm

$\lambda_{rezonans} = 1045$ nm

Çizelge 5. Cu NP dizisinin karakteristik parametreleri

$\%P_{NP.norm}$	$\%P_{Y.norm}$	$\%P_{İ.norm}$	$\%P_{YA.norm}$
%21.9	%22.1	%27.4	%28.6

Hücre katmanlarında güç hesapları "5.1. Optimal Nanoparçacık Kullanımı" bölümünde anlatıldığı şekilde yapılmıştır. GaInP ile Al NP'lerin 1045 nm dalga boyundaki ışık ile etkileşimi ve Cu NP'lerin 500 nm dalga boyundaki ışık ile etkileşimi çok düşük düzeydedir ve güç hesabında ihmal edilmişlerdir. 500 nm ışığın GaInP 1. katmandan iletildikten sonra Ge 2. katman tarafından da emildiği göz önünde tutulmuştur.

Güneş hücresini oluşturan yarı iletkenlerin ışık emilim oranları hücre verimini etkileyen tek faktör değildir. Hücre verimini etkileyen faktörler şu şekilde özetlenebilir:

- Hücre tarafından emilen optik güç oranı

Hücre tarafından emilim katsayısına bağlı olarak üzerine düşen ışığın ne kadarının emildiğini veren orandır. Bu oran ($\%P_{OYİ}$) plazmonik NP'ler tarafından arttırılabilir ve nasıl hesaplandığı "4.2. Kayıplı Ortamda Nanoparçacık Karakteristiği" ve "5.1. Optimal Nanoparçacık Kullanımı" bölümlerinde anlatılmıştır, (84) numaralı eşitlik ile ifade edilmiştir.

- Hücre tarafından kullanılabilir güneş enerjisi oranı

Hücreyi oluşturan yarı iletkenlerin bant aralığı enerjileri sebebiyle enerji dönüşümü yapabildikleri frekans spektrumu kısıtlıdır. Bu sebeple güneş hücreleri güneş ışığının tamamını kullanamazlar. Hücre eklemi tarafından dönüşüm yapılabilen güneş ışığı spektrumunun ışık şiddeti I_H ve 1.5 hava kütlesi altında güneşin toplam ışık şiddeti $I_{1.5AM}$ (1000.4 W/m^2) ile ifade edilirse kullanılabilir güç oranı $I_H / I_{1.5AM}$ ile ifade edilebilir. I_H "3.1. Güneş Işıması" bölümünde anlatılan ve (34-35) numaralı eşitliklerle verilen kara cisim ışıması modeli kullanılarak hesaplanabilir.

GaInP ve Ge hücrelerinin güç dönüşümü yaptığı 300-1870 nm dalga boyu bandındaki ışık, 1.5 hava kütlesi altındaki toplam güneş enerjisinin %89.56'sını kapsamaktadır.

- Foton enerjisi ve yarı iletken bant aralığı enerjisi farkından kaynaklanan kayıp oranı

Yarı iletken üzerinde ancak bant aralığı enerjisinden daha yüksek enerjili fotonlar kullanışlı yük taşıyıcıları oluşturabilirler. Oluşan bu elektron-delik çifti kendilerini

oluşturan fotonun enerjisine sahip olurlar. Bu enerjinin bant aralığı enerjisinden büyük olan kısmı kullanılamaz ve ısı olarak kaybedilir. Bant aralığı enerjisi E_g ve foton enerjisi E_f ile ifade edilirse kullanılabilir enerji oranı E_g/E_f ile ifade edilebilir.

- Dahili kuantum verim

Hücre tarafından emilen fotonların yeterli enerjiye sahip oldukları koşulda bile her biri tarafından yük taşıyıcıları oluşturulamayabilir. Dahili kuantum verim (DKV), birim sürede toplanan yük taşıyıcı sayısının birim sürede hücre tarafından emilen foton sayısına oranıdır, (38) numaralı eşitlik ile ifade edilmiştir.

Bu bölüm dahilinde emilen her fotonun bir elektron-delik çifti uyardığı varsayılmıştır. Bu koşulda DKV bire eşittir.

- Rekombinasyon kayıp oranı

Rekombinasyon, foton tarafından üretilen yük taşıyıcılarının çeşitli nedenler sebebiyle toplanamadan yok olmalarıdır. Hücre yapısı, kalınlığı, sıcaklıklığı, yarı iletken kalitesi vb. sebeplerden kaynaklanan, sızıntı akımını arttıran ve açık devre voltajında düşüşe neden olan kayıplardır.

- Doluluk oranı

Kısa devre akımı ve açık devre voltajı, sırasıyla güneş hücresi tarafından oluşturulan en yüksek akım ve voltajdır. Fakat bu çalışma noktalarının her ikisinde de çıkış gücü sıfırdır. Bu sebeple doluluk oranı yaygın olarak, kısa devre akımı ve açık devre voltajı kullanılarak güneş hücresi tarafından yüke verilebilecek en yüksek gücü belirlemek için kullanılır. Doluluk oranı, aşağıdaki şekilde ifade edilir.

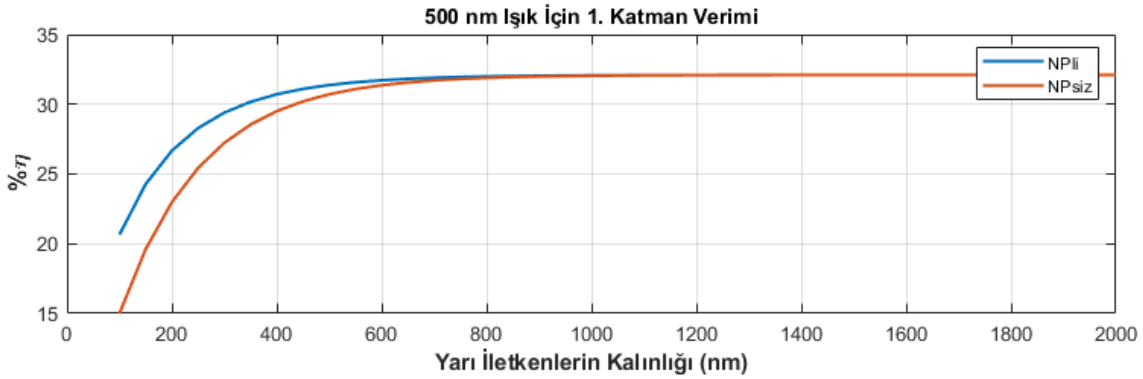
$$\mathrm{DO} = \frac{V_{mg} * I_{mg}}{V_{ad} * I_{kd}} \tag{88}$$

Burada DO doluluk oranı, V_{mg} maksimum çıkış gücü voltajı, I_{mg} maksimum çıkış gücü akımı, V_{ad} açık devre voltajı, I_{kd} kısa devre akımıdır.

Açık devre voltajı ve doluluk oranı pratikte üretilen hücre üzerinde ölçümler yapılarak bulunabilir. Bu kayıplar çok sayıda ve kompleks fiziksel değişkene bağlı oldukları için bu bölümde verim hesabına dahil edilmemişlerdir. Bu bölüm kapsamında, “optik verim” aşağıdaki parametreler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\%\eta = \%P_{OY\text{i}} \times I_H/I_{1.5AM} \times E_g/E_f \times DKV \tag{89}$$

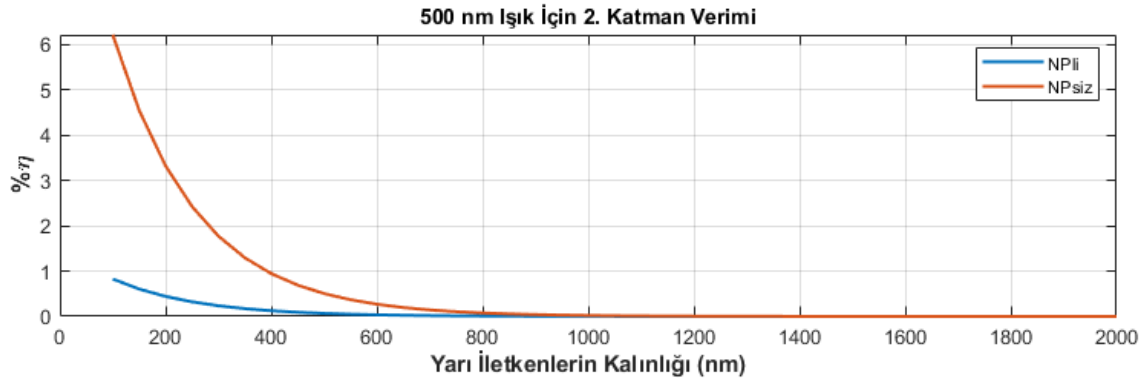
Toplam hücre verimini elde etmek için her katmanın verimi ayrı ayrı hesaplanıp toplanabilir. Yapılan hesaplarda hücre katman kalınlıkları birbirine eşit kabul edilmiştir ve verimin katman kalınlıkları ile değişimi aşağıdaki şekillerde görülmektedir.



Şekil 129. 500 nm ışık için kalınlığa göre NP'li ve NP'siz 1. katman verimi

Şekil 129'da güneş hücresi 1. katmanının NP'li ve NP'siz durumda 500 nm ışık için yarı iletken kalınlığına bağlı olarak hesaplanan güç dönüştürme verimi görülmektedir. Katman kalınlığı azaldıkça NP eklenen GaInP ekleminin veriminde NP eklenmeyen duruma göre daha az düşüş meydana gelir.

Aktif katman tabanına eklenen NP'ler katman tarafından iletilen ışık miktarını azaltarak ve bulunduğu eklemde hapsederek bu gücün daha büyük bir oranda emilmesini sağlar. Işık emilim oranında sağlanan artış eklem verimini arttırır. Katman kalınlığı arttıkça ve emilim oranı %100'e yaklaştıkça NP tarafından sağlanan katkı azalır.

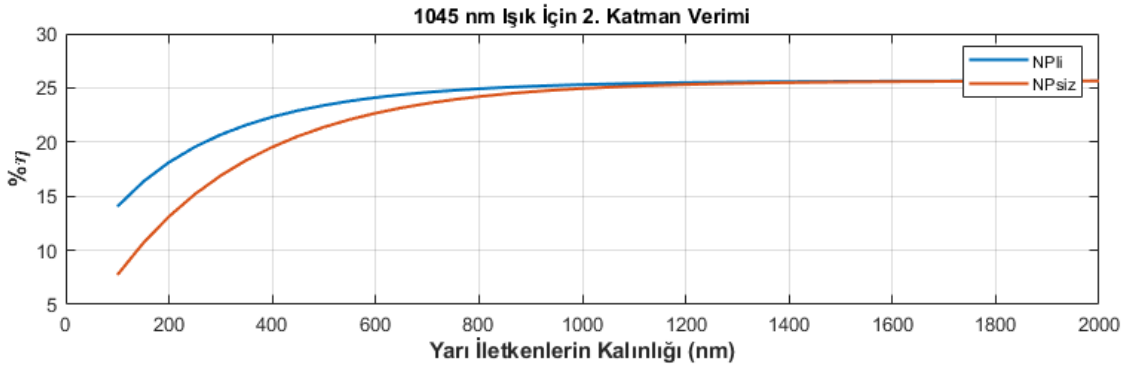


Şekil 130. 500 nm ışık için kalınlığa göre NP'li ve NP'siz 2. katman verimi

Şekil 130'da güneş hücresi 2. katmanının NP'li ve NP'siz durumda 500 nm ışık için yarı iletken kalınlığına bağlı olarak hesaplanan güç dönüştürme verimi görülmektedir. Katman kalınlıkları azaldıkça 1. katmandan 2. katmana iletilen güç miktarı artar.

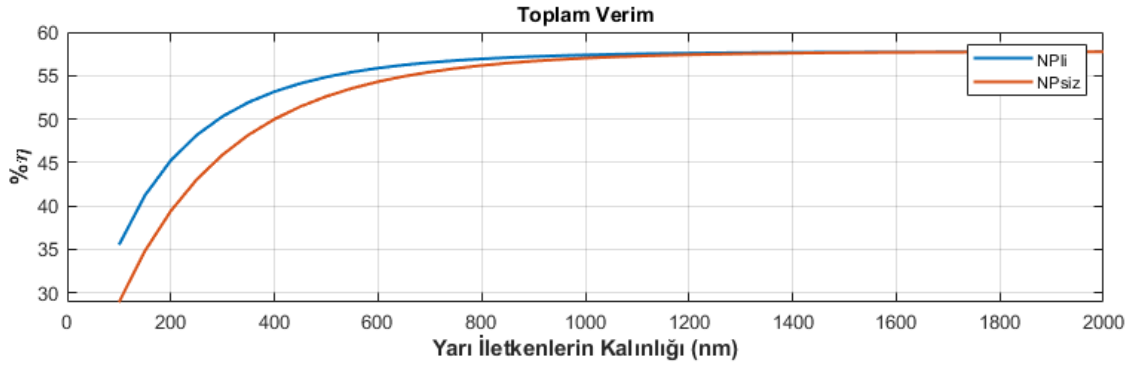
Hücreye NP eklendiğinde 500 nm dalga boyunda 1. katmandan iletilen güç oranı azalır ve 2. katmanda yapılan güç dönüşümü de azalmış olur.

2. katmanda bant aralığı enerjisinin düşük olması sebebiyle 500 nm dalga boyuna sahip yüksek enerjili fotonlar bu eklemde verimli bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürülemezler ve enerjilerinin büyük bir kısmı ısı olarak kaybedilir. Bu sebeple istenildiği gibi 1. katmana eklenen NP'ler yüksek frekanslı ışığın 2. katmana geçmesini engeller.



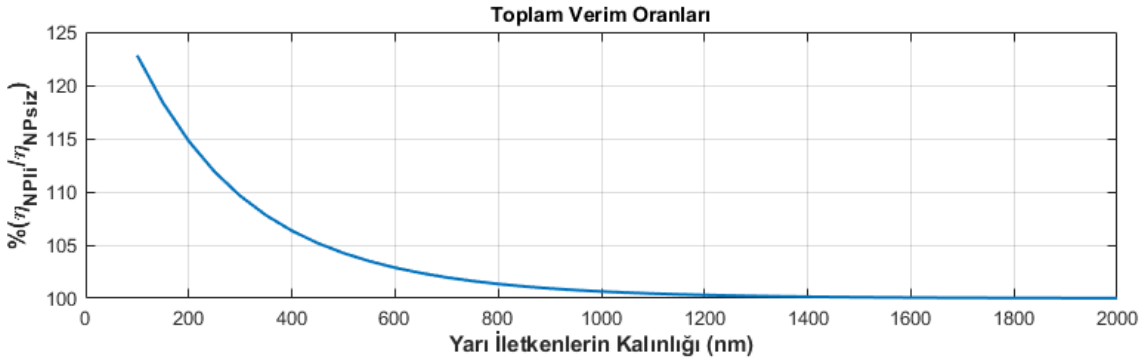
Şekil 131. 1045 nm ışık için kalınlığa göre NP'li ve NP'siz 2. katman verimi

Şekil 131'de güneş hücresi 2. katmanının NP'li ve NP'siz durumda 1045 nm ışık için yarı iletken kalınlığına bağlı olarak hesaplanan güç dönüştürme verimi görülmektedir. Uzun dalga boylu, düşük enerjili ışığın emiliminin 1. katmanda düşük olması, serbest yük taşıyıcıları oluşturamaması ve 1. katmandaki NP'ler ile etkileşime girmemesi sebebiyle bu fotonların büyük çoğunluğu 2. katmana ulaşır. Katman kalınlığı azaldıkça NP eklenen Ge ekleminin veriminde NP eklenmeyen duruma göre daha az düşüş meydana gelir. Eklenen NP dizisi bu frekanstaki ışığın 2. katmanda emilim oranını arttırır, bu da eklem veriminde artış sağlar.



Şekil 132. Kalınlığa göre NP'li ve NP'siz toplam hücre verimi

Şekil 132‘de güneş hücresi 1. ve 2. katmanlarında NP’li ve NP’siz durumda kullanılabilir tüm ışık spektrumu için yarı iletken kalınlığına bağlı olarak hesaplanan toplam güç dönüştürme verimi görülmektedir. Aktif katman tabanlarına eklenen NP’ler ışığın belli frekanslarını geri yansıtarak ve yoğunlaştırarak en verimli dönüştürüldükleri eklemde emilimlerini arttırırlar. Aynı zamanda NP rezonans frekansından çok daha büyük dalga boylu ışık ile de etkileşimleri zayıftır ve alt katmana iletilmelerine izin verirler.



Şekil 133. Kalınlığa göre NP’li ve NP’siz toplam hücre verimleri oranı

Şekil 133‘te NP’li hücre veriminin NP’siz hücre verimine oranı katman kalınlıklarına göre verilmiştir. Hücre katmanları inceldikçe ve tek geçişte emilen ışık oranı azaldıkça NP’lerin verime sağladığı katkı oranı artmaktadır. Plazmonik NP’lerin kullanıldığı hücre aynı verimdeki NP’siz hücreden daha incedir ve aynı kalınlıktaki NP’siz hücreden daha verimlidir. Çizelge 6’da farklı katman kalınlıkları için NP’li hücrenin NP’siz hücre ile kıyaslaması yapılmıştır.

Çizelge 6. İki eklemli (GaInP, Ge) NP’li (Al, Cu) ve NP’siz hücrelerin karşılaştırması

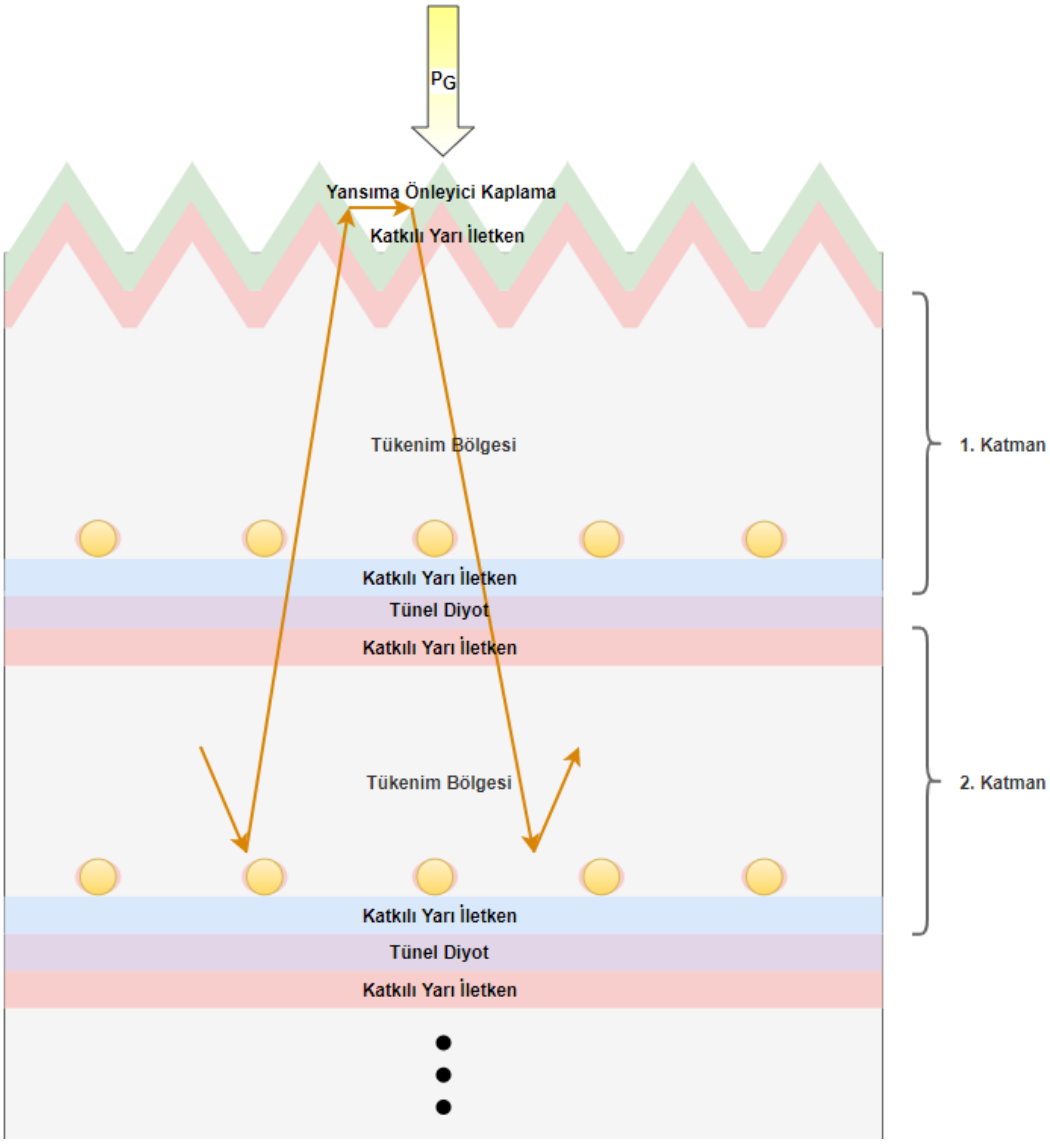
	Katman Kalınlıkları	**Optik Verim**	**Fark**
NP’li	**500 nm**	**%54.83**	-
NP’siz	500 nm	%52.60	%4.24 daha verimsiz
NP’siz	643.1 nm	%54.83	%28.62 daha kalın
NP’li	**300 nm**	**%50.31**	-
NP’siz	300 nm	%45.90	%9.61 daha verimsiz
NP’siz	411.3 nm	%50.31	%37.10 daha kalın

NP'li	**100 nm**	**%35.51**	**-**
NP'siz	100 nm	%28.91	%22.83 daha verimsiz
NP'siz	157.6 nm	%35.51	%57.60 daha kalın

Bu veriler, eklenen NP'lerin hücrelerin inceltilmesi için sağlayabileceği avantajı göstermektedir. NP eklenen plazmonik güneş hücresi klasik güneş hücresine kıyasla aynı kalınlıkta daha verimli olmasının yanında aynı verim oranında çok daha incedir. Hücrenin incelmesi rekombinasyonu azaltarak açık devre voltajını da arttırır ve böylece verimin arttırılmasına dolaylı olarak da katkı sağlanmış olur.

NP'ler "5.1. Optimal Nanoparçacık Kullanımı" bölümünde de görüldüğü üzere Si gibi düşük emilimli ucuz yarı iletkenler ile birlikte kullanıldığında verime katkıları daha büyük kalınlıklarda daha belirgin olur. GaInP ve Ge, emilimleri yüksek olan yarı iletkenlerdir ve bu sebeple NP'lerin ışık emilimlerine katkısı daha çok ultra ince tasarımlarda etkisini göstermektedir. Çok eklemli güneş hücrelerinde katmanların emilim oranları birbirinden çok farklı da olabilir. Böyle bir durumda sadece düşük emilime sahip yarı iletkenlerin kullanıldığı katmanlarda NP'ler ile ışık emilimi arttırılabilir. Böylece daha az kullanılan yarı iletken ile birlikte ağırlıkta ve maliyette azalma sağlanabilir, gerek görülmeyen katmanlarda ise NP kullanılmaz.

Çok eklemli güneş hücrelerinde optimal durumda katmanlar tarafından üretilen foto-akımlar birbirine eşit olmalıdır. Aksi takdirde hücre akımı, az akım üreten katman tarafından sınırlandırılır. Pratikte çok eklemli güneş hücresi tasarımında bu durum da göz önünde bulundurulmalıdır ve katman foto-akımlarını eşitlemek için de NP'lerin spektral emilim güçlendirme özelliklerinden faydalanılabilir.



Şekil 134. Plazmonik güneş hücresinde mikro yapılar

NP rezonansı ışığın geliş açısından bağımsızdır ve plazmonik NP'ler ışık yönünü değiştiren mikro yüzey dokuları ile birlikte kullanılabilir. Bu şekilde ışığın katmanlar içerisinde aldığı optik yol uzunluğu ve yarı iletken emilimi arttırılabilir. Ayrıca NP tarafından yansıtılan ışığın alt katmandan üst katmana geçmesi durumunda bu ışık üst katmanın yüksek bant aralığı enerjisi sebebiyle burada emilemez, mikro yapılı yüzey dokusundan geri yansıyarak verimli emildiği katmana geri döner. Şekil 134'te 2. katmanda bulunan NP'lerden yansıyan ışığın 2. katmana dönerken katedebileceği yol görülmektedir. Böylece ışığın düşük bant aralığı enerjisine sahip katmanlarda verimsiz bir şekilde dönüştürülmesinin önüne geçilmiş olur. Aynı zamanda ışığın katmanlardan geçiş sayısının arttırılması sebebiyle daha ince katmanlar kullanılabilir ve malzemeden tasarruf edilmiş olur.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında yarı iletken içerisine yerleştirilen, dalga boyundan çok daha küçük boyuttaki plazmonik nanoparçacıkların güneş hücresi içerisindeki kullanımı ve hücre verimine etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda bu nanoparçacıkların ışık yönünde değişikliğe neden olmayacağı varsayılarak, nanoparçacık dizisinden oluşan yüzeyin kayıplı ortamda optik karakteristiklerini tanımlayan bir formülasyon geliştirilmiştir. Bu formülasyon, yapılan benzetimler ile test edilmiş ve tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Böylece çok küçük boyutlardaki plazmonik nanoparçacıklardan oluşan metayüzeyin, üzerine düşen ışığı rastgele yönlerde saçmak yerine geldiği doğrultuda yansıttığı veya ilettiği doğrulanmıştır. Bu nanoparçacıklarda dipol plazmon modu aktiftir ve tek bir doğrultuda saçılım yapmaktadırlar. Daha büyük boyutlardaki nanoparçacıklarda ise yüksek mertebe plazmon modları ortaya çıkarak ışığın farklı yönlerde saçılmasına neden olmaktadırlar. Yapılan benzetimlerde uyarılan tüm modların emilimde etkili olduğu, ancak yansımada dipol ve oktupolar modlar gibi alternatif modların daha etkili olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, kullanılan bu yöntemin yarı iletken içerisine gömülü nanoparçacık dizisinin optik karakteristiklerinin yarı iletkenin kalınlığından bağımsız olarak tespit edilebilmesini sağladığı doğrulanmıştır. Böylece bu yöntem kullanılarak karmaşık hücre benzetimleri yapmak yerine çok daha basit yapıların modellenmesi ile hızlı ve kolay bir şekilde hücre analizi yapılabilmektedir.

Bu yöntem ile model parametrelerinin nanoparçacık karakteristiklerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Hücre içerisinde kullanılacak olan nanoparçacıkların rezonans frekansını değiştirmek için en iyi parametrelerin sıklık, yarıçap, yarı iletken gerçek kırılma indisi, nanoparçacık sanal kırılma indisi, kabuk kalınlığı ve kabuk gerçek kırılma indisi olduğu tespit edilmiştir. Rezonans genliğinin ise en fazla sıklık, yarıçap, yarı iletken gerçek kırılma indisi, nanoparçacık gerçek ve sanal kırılma indisleri ile değiştiği tespit edilmiştir. Aynı zamanda nanoparçacık kalite faktörünün frekansa bağlı olarak değişmesi sebebiyle değişen rezonans frekansının genliğe de etkisi olmaktadır. Böylece genliğe negatif etkisi olan bir parametrenin rezonans frekansını daha yüksek kalite faktörü olan bir frekansa taşıması görünürde pozitif etkinin oluşmasına sebep olabilmektedir.

Değişik parametrelerin etkilerinin tespit edilebilmesi kullanım alanlarını belirlemeye yardımcı olmaktadır. Nanoparçacık boyut ve sıklığı belli bir yarı iletken içerisinde

kullanılacak olan nanoparçacık materyalinin belirlenmesinden sonra rezonans frekansını ayarlamak, istenilen emilim ve yansıma özelliklerini elde etmek için kullanışlı parametrelerdir.

Yarı iletken kırılma indisinin etkilerinin bilinmesi, yarı iletkenlerin daha çok bant aralıklarına göre seçilmeleri sebebiyle tek tür nanoparçacığın birden fazla yarı iletkende kullanımı durumunda rezonansın tespiti için kullanışlı olabilmektedir. Nanoparçacık kırılma indisinin etkilerinin bilinmesi, nanoparçacık materyali seçiminde ve seçilen materyalin göstereceği özelliklerin değerlendirilmesinde kullanılabilmektedir.

Ortam ve nanoparçacık için gerçek ve sanal kırılma indislerinin ters etkilere sahip olduğu hesaplamalar sonucu gösterilmiş ve benzetim yoluyla doğrulanmıştır. Yarı iletkenler için gerçek kırılma indisi polarizasyonu, sanal kırılma indisi ise emilimi etkilerken plazmonik materyaller için sanal kırılma indisi polarizasyonu, gerçek kırılma indisi ise emilimi etkilemektedir.

Nanoparçacığın polimer bir kabuk ile kaplanmasıyla elde edilen çekirdek-kabuk yapısı analiz edilmiştir. Bu yapının nanoparçacıklar arası mesafeyi ayarlamak, rezonans frekansını değiştirmek, çekirdeği oksitlenmeye karşı korumak ve nanoparçacık kaynaklı rekombinasyonları azaltmak gibi faydalı özellikleri olsa da rezonans genliğinde düşüşe neden olduğu görülmüştür.

Periyodik olarak dizilen nanoparçacıkların kare ve altıgen dizilim şekilleri için farklı yönelimlerinin karakteristiklere etkileri incelenmiştir. Hücre kesit alanının sabit kaldığı ve nanoparçacıklar arası boşluğun yarıçaptan büyük olduğu durumda düzlemsel dizilim şekli ve yöneliminin nanoparçacık karakteristiklerini değiştirmediği görülmüştür. Buradan çıkan sonuç ile homojen ve düzgün bir dizilime sahip nanoparçacıkların sabit yoğunluklu dağılımlarında dağılım şeklinden ve güneş ışığı polarizasyon yönünden etkilenmeyerek karakteristiklerinin sabit kalacağı yorumu yapılabilmektedir.

Kullanılan yöntemde yapılan modifikasyon ile iki farklı materyal arasına yerleştirilen nanoparçacıklar için karakteristik tespiti yapılmıştır. Böyle bir yapı ile ileri ve geri yönde farklı karakteristikler gösteren bir yüzeyin elde edilebileceği görülmüştür.

Yöntemin farklı şekillere sahip nanoparçacıkların analizi için de kullanılabilir olduğu gösterilmiştir. Küre haricindeki şekillerin plazmonik karakteristiklerinin hesaplanmasının çok zor olması sebebiyle bu yöntem ile bu nanoparçacıkların benzetim yoluyla analiz edilmesi sağlanmıştır. Küre ve yarı küre nanoparçacık şekillerinin

karakteristiklerinde büyük farklılıklar olduğu görülmüştür. Yarı küre şeklindeki nanoparçacıkların düz ve ters yönelimlerinin ise karakteristikleri arasında büyük bir farklılık olmadığı tespit edilmiştir.

Silisyum yarı iletkeni için optimal gümüş nanoparçacık boyutları belirlenmiş, nanoparçacık karakteristik verileri kullanılarak yarı iletken emilimi hesaplanmıştır. En yüksek emilim değeri için nanoparçacığın hücre içerisindeki optimal konumu ve güç emiliminde sağladığı artış belirlenmiştir. Nanoparçacıkların hücre emilimine katkısının en yüksek olduğu konumun tükenim bölgesinin en altı olduğu hesaplamalar sonucu bulunmuştur. Bu şekilde yerleştirilen nanoparçacıkların hücre emiliminde tüm kalınlıklarda pozitif etkiye sahip olduğu ve hücrenin inceltilmesiyle etkilerinde artış meydana geldiği gösterilmiştir.

Nanoparçacıkların yansıtma ve yakın alanda ışık emilimini arttırma özelliklerinin hücre tabanına yerleştirilen ideal yansıtıcı ayna ile kıyaslaması yapılmış, hücrenin ince olduğu boyutlarda nanoparçacıkların hücre emilimine sağladığı katkının ideal aynadan daha fazla olduğu görülmüştür. 200 nm kalınlığındaki yarı iletken emilimi hücre tabanına eklenen ideal ayna ile %99 artış gösterirken nanoparçacıklar ile %580 artış göstermiştir. Bu değerler 1 μm yarı iletkende ayna için %95, nanoparçacık için %148 çıkmıştır. Ultra ince güneş hücrelerinde emilimde artış sağlayan en önemli özelliğin nanoparçacık tarafından yakın alanda arttırılan elektrik alan olduğu belirlenmiştir.

Plazmonik nanoparçacıkların kısıtlı ışık spektrumu ile etkileşime girmesi özelliğinden faydalanarak çok eklemli güneş hücrelerinde kullanımı ele alınmıştır. Bu güneş hücreleri belli ışık spektrumlarına özelleşmiş çoklu ince film hücre katmanlarından oluşmaktadır. Her bir katmana, özelleştikleri ışık spektrumunu kapsayan rezonanslara sahip nanoparçacıkların eklenmesiyle bu spektrumdaki ışığın hapsedilerek verimin arttırıldığı ve verimsiz dönüşüm oranına sahip ışığın nanoparçacıkla etkileşmeyerek bir sonraki katmana iletilmesine izin verildiği gösterilmiştir. Böylece basit tasarıma ve dar rezonansa sahip nanoparçacıkların birlikte kullanılmasıyla geniş bir spektrumda verim artışı sağlanabilmektedir.

Al nanoparçacıklar eklenen GaInP ve Cu nanoparçacıklar eklenen Ge yarı iletken katmanlarından oluşan çok eklemli hücre, nanoparçacık eklenmemiş aynı hücre ile kıyaslanmıştır. 500 nm katman kalınlıklarına sahip nanoparçacıklı çok eklemli hücrenin %54.83 optik verime sahip olduğu hesaplanmıştır. Nanoparçacıksız hücrenin aynı

kalınlıkta %4.24 daha verimsiz, aynı verimde %28.62 daha kalın olduğu hesaplanmıştır. Katman kalınlıklarının inceltilmesiyle bu farkın daha da arttığı görülmüştür. 100 nm katman kalınlıklarına sahip nanoparçacıklı hücrenin %35.51 optik verime sahip olduğu hesaplanmıştır. Nanoparçacıksız hücrenin ise aynı kalınlıkta %22.83 daha verimsiz, aynı verimde %57.60 daha kalın olduğu hesaplanmıştır. Böylece nanoparçacıkların hücre veriminde sağladığı artıştan ziyade hücrenin inceltilmesine sağladığı katkı daha ön plana çıkmıştır.

Plazmonik nanoparçacıkların güneş hücrelerinde kullanımında göz önünde bulundurulması gereken bir konu da üretimdir. Bu nanoparçacıkların dahil edildiği hücrelerin yüksek sıcaklıklı tavlama işlemlerinden geçmemesi nanoparçacık yapısının korunması için gereklidir [57]. Aynı zamanda üretim maliyetlerinin düşük olması da gerekmektedir. Bu kullanım için görece düşük sıcaklıklarda plazma ile geliştirilmiş kimyasal buhar biriktirme (İng. plasma-enhanced chemical vapor deposition-PECVD) yöntemi ile üretilebilen, toksik olmayan, bol bulunan ve ucuz bir element olan silisyumun farklı allotropları tercih edilebilir. Amorf silisyum (a-Si) ve nanokristalin ya da mikrokristalin silisyumdan (nc-Si/µc-Si) yapılmış çok eklemli bir güneş hücresi, farklı bant aralığı enerjilerine sahip bu malzemelerin birlikte kullanılmasıyla geniş bir ışık spektrumunun emilimini sağlayabilir [58]. Silisyumun düşük emilim katsayısına sahip olması sebebiyle de plazmonik nanoparçacıkların bu hücrenin optik emilimine ve inceltilmesine büyük katkı sağlayabileceği beklenebilir. Böylece hücrenin büyük oranda inceltilmesiyle malzeme miktarından ve maliyetinden kazanç elde edilmesi sağlanabilecektir. Bu da üçüncü nesil güneş hücreleri ile ulaşılmaya çalışılan hedefler ile uyumludur. Yapılan tez çalışması, daha ucuz üretim teknikleri ve materyallerin geliştirilmesi ile gelecekte tasarlanacak olan plazmonik güneş hücreleri için gerekli bilimsel altyapıya katkı sağlayacaktır.

Plazmonik nanoparçacıkların aktif bölge içerisine yerleştirilmesi ile yük taşıyıcıların katettiği yolun uzaması ve nanoparçacık üzerindeki serbest elektronların rekombinasyonlara yol açması gibi sebepler nedeniyle kayıpların meydana gelmesi beklenebilir. Fakat aynı zamanda bu kayıpların kısmen azaltılması veya yok edilmesi de mümkündür. Örneğin nanoparçacık eklenen hücrenin daha ince tasarlanabilmesi sayesinde üretilen foto-taşıyıcıların katedecekleri yol kısaltılmış olacaktır. Bunun yanında nanoparçacığın polimer kabuk ile kaplanması nanoparçacık ve yarı iletken arasındaki teması keserek hem kimyasal etkileşimi engelleyecek hem de nanoparçacık

üzerinde oluşan rekombinasyonların azaltılmasını sağlayacaktır. Böylece güneş hücresine eklenen plazmonik nanoparçacıklar ile arttırılan optik emilimle kısa devre akımında, azalan rekombinasyonla açık devre voltajında ve dolayısıyla da hücre veriminde artış sağlanabilecektir.

Gelecek çalışmalarda nanoparçacıkların güneş hücrelerinde kullanımında ortaya çıkan nanoparçacık emilimi kaynaklı ısıl kayıpların azaltılması ve bu gücün bir kısmının geri kazanılması için doğrudan plazmonik güneş hücresi yapıları bu tasarıma dahil edilebilecektir. Plazmonik nanoparçacıkların fotovoltaik olarak kullanıldığı bu yapıların klasik güneş hücrelerinde kullanılmasıyla hem yarı iletken optik emilim artışı hem de nanoparçacıkların güç dönüşümünde aktif rol oynamaları ile kayıplarda azalma sağlanmış olabilecektir.

Tez kapsamında öne sürülen yöntemin ve elde edilen verilerin kullanım alanı güneş hücreleriyle sınırlı değildir. Bu yöntem ve veriler güneş hücrelerinin dışında plazmonik nanoparçacık dizilerinin kullanıldığı ve kullanılabileceği her araştırma alanında uygulanabilir yapıdadır. Geliştirilen yöntem nanoparçacık dizileri dışında nano yapılardan oluşan her türlü metayüzeyin optik karakteristiklerini tanımlamak için de kullanılabilecek esnekliktedir.

7. KAYNAKLAR

[1] IPCC, & Stocker, Thomas & Qin, Dawei & Plattner, Gian-Kasper & Tignor, M. & Allen, S.K. & Boschung, J. & Nauels, Alexander & Xia, Y. & Bex, V. & Midgley, P.M. (2013). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013.

[2] Kerr, R. A. (1995). Sun's Role in Warming Is Discounted. Science, 268(5207), 28-29. 10.1126/science.268.5207.28.

[3] Hansen, James & Sato, Makiko & Ruedy, R. & Lo, Kw & Lea, David & Medina-Elizalde, Martín. (2006). Global temperature change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 103. 14288-93. 10.1073/pnas.0606291103.

[4] NOAA Climate.gov, Combined Heating Influence by Greenhouse Gasses, https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide (Erişim tarihi: 7 Ekim 2020).

[5] NASA, Global Annual Mean Surface Air Temperature Change, https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/ (Erişim tarihi: 7 Ekim 2020).

[6] Lenssen, Nathan & Schmidt, Gavin & Hansen, James & Menne, Matthew & Persin, Avraham & Ruedy, R. & Zyss, Daniel. (2019). Improvements in the uncertainty model in the Goddard Institute for Space Studies Surface Temperature (GISTEMP) analysis. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 124. 10.1029/2018JD029522.

[7] Lee, T., Markowitz, E., Howe, P. et al. Predictors of public climate change awareness and risk perception around the world. Nature Clim Change 5, 1014–1020 (2015). 10.1038/nclimate2728.

[8] Blakers, A. (1991). The Role of photovoltaics in reducing greenhouse gas emissions: Opportunities and benefits for the Australian photovoltaic industry: A study prepared on behalf of Unisearch Ltd. Canberra: The Department.

[9] Green, Martin. (2003). Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion. Physics Today. 57. 71-72. 10.1063/1.1878345.

[10] Weisser, Daniel. (2007). A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. Energy. 32. 1543-1559. 10.1016/j.energy.2007.01.008.

[11] Map obtained from the “Global Solar Atlas 2.0, a free, web-based application is developed and operated by the company Solargis s.r.o. on behalf of the World Bank Group, utilizing Solargis data, with funding provided by the Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP). For additional information: https://globalsolaratlas.info.

[12] Lewis, N. S. (2016). Research opportunities to advance solar energy utilization. Science, 351(6271). 10.1126/science.aad1920.

[13] Blakers, A. & Green, Martin. (1986). 20% Efficiency Silicon Solar Cells. Applied Physics Letters. 48. 215 - 217. 10.1063/1.96799.

[14] NREL, Panasonic PV Lifetime installation at NREL, https://www.nrel.gov/pv/assets/images/panasonic-installation.jpg (Erişim tarihi: 7 Ekim 2020).

[15] Goetzberger, A. & Hoffmann, V.U. (2005). Photovoltaic Solar Energy Generation. Fraunhofer ISE.

[16] Akimov, Yuriy & Koh, Wee Shing. (2010). Resonant and nonresonant plasmonic nanoparticle enhancement for thin-film silicon solar cells. Nanotechnology. 21. 235201. 10.1088/0957-4484/21/23/235201.

[17] Edoff, M. (2012). Thin Film Solar Cells: Research in an Industrial Perspective. Ambio. 41 Suppl 2. 112-8. 10.1007/s13280-012-0265-6.

[18] Green, Martin. (2001). Third generation photovoltaics: recent theoretical progress. 17th European Photovoltaic Solar Energy Conf., Munich 2001.

[19] Peter Amalathas, Amalraj & Alkaisi, Maan. (2019). Nanostructures for Light Trapping in Thin Film Solar Cells. Micromachines. 10. 619. 10.3390/mi10090619.

[20] Mallick, Shrestha & Agrawal, Mukul & Peumans, Peter. (2010). Optimal light trapping in ultra-thin photonic crystal crystalline silicon solar cells. Optics express. 18. 5691-706. 10.1364/OE.18.005691.

[21] Polman, Albert & Knight, Mark & Garnett, Erik & Ehrler, Bruno & Sinke, Wim. (2016). Photovoltaic Materials - Present Efficiencies and Future Challenges. Science. 352. aad4424-aad4424. 10.1126/science.aad4424.

[22] Campbell, Patrick & Green, Martin. (1987). Light trapping properties of pyramidally textured surfaces. Journal of Applied Physics. 62. 243 - 249. 10.1063/1.339189.

[23] Smith, Arlynn & Rohatgi, Ashish. (1993). Ray tracing analysis of inverted pyramid texturing geometry for high efficiency silicon solar cells. Solar Energy Materials

and Solar Cells. 29. 37-49. 10.1016/0927-0248(93)90090-P.

[24] Kim, Kyunghae & Dhungel, Suresh Kumar & Jung, Sungwook & Mangalaraj, Devanesan & yi, Joonjeong. (2008). Texturing of large area multi-crystalline silicon wafers through different chemical approaches for solar cell fabrication. Solar Energy Materials and Solar Cells. 92. 960-968. 10.1016/j.solmat.2008.02.036.

[25] Ganesan, Kumaravelu & Alkaisi, Maan & Bittar, Antoine & Macdonald, Daniel & Zhao, J. (2004). Damage studies in dry etched textured silicon surfaces. Current Applied Physics. 4. 108-110. 10.1016/j.cap.2003.10.008.

[26] Atwater, Harry & Polman, Albert. (2010). Plasmonics for Improved Photovoltaic Devices. Nature materials. 9. 865. 10.1038/nmat2866.

[27] Raliya, Ramesh & Saha, Debajit & Chadha, Tandeep & Raman, Baranidharan & Biswas, Pratim. (2017). Non-invasive aerosol delivery and transport of gold nanoparticles to the brain. Scientific Reports. 7. 10.1038/srep44718.

[28] Maier, Stefan & Atwater, Harry. (2005). Plasmonics: Localization and guiding of electromagnetic energy in metal/dielectric structures. Journal of Applied Physics. 98. 10.1063/1.1951057.

[29] Sarid, Dror & Challener, William. (2010). Modern Introduction to Surface Plasmons, Cambridge, UK: Cambridge University Press 1-371. 10.1017/CBO9781139194846.

[30] Kelly, K.L., Coronado, E., Zhao, L.L., Schatz, G.C. (2003). The Optical Properties of Metal Nanoparticles: The Influence of Size Shape and Dielectric Environment. The Journal of Physical Chemistry B. 107. 668-677.

[31] Pillai, Supriya & Green, Martin. (2012). Harnessing plasmonics for solar cells. Nature Photonics - NAT PHOTONICS. 6. 130-132. 10.1038/nphoton.2012.30.

[32] Pillai, Supriya & Green, Martin. (2010). Plasmonics for photovoltaic applications. Solar Energy Materials and Solar Cells. 94. 1481-1486. 10.1016/j.solmat.2010.02.046.

[33] Mertz, Jerome. (2000). Radiative absorption, fluorescence, and scattering of a classical dipole near a lossless interface: A unified description. Journal of The Optical Society of America B-optical Physics - J OPT SOC AM B-OPT PHYSICS. 17. 10.1364/JOSAB.17.001906.

[34] Zhang, Debao & Yang, Xifeng & Hong, X.K. & Liu, Yushen & Feng, Jinfu. (2014). Aluminum nanoparticles enhanced light absorption in silicon solar cell by

surface plasmon resonance. Optical and Quantum Electronics. 47. 1421-1427. 10.1007/s11082-014-0103-0.

[35] Spinelli, Pierpaolo & Polman, A. (2012). Prospects of near-field plasmonic absorption enhancement in semiconductor materials using embedded Ag nanoparticles. Optics express. 20 Suppl 5. A641-54. 10.1364/OE.20.00A641.

[36] Shockley, W., & Queisser, H. J. (1961). Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. Journal of Applied Physics, 32(3), 510-519. doi:10.1063/1.1736034.

[37] Liu, Tianji & Vazquez Besteiro, Lucas & Wang, Zhiming & Govorov, Alexander. (2018). Generation of Hot Electrons in Nanostructures incorporating Conventional and Unconventional Plasmonic Materials. Faraday Discussions. 214. 10.1039/C8FD00145F.

[38] Clavero, Cesar. (2014). Plasmon-induced hot-electron generation at nanoparticle/metal-oxide interfaces for photovoltaic and photocatalytic devices. Nature Photonics. 8. 95-103. 10.1038/nphoton.2013.238.

[39] Klimov, Vasily. (2014). Nanoplasmonics. 10.1201/b15442.

[40] Haug, Franz-Josef & Söderström, Thomas & Cubero, Oscar & Terrazzoni-Daudrix, V. & Ballif, Christophe. (2008). Plasmonic absorption in textured silver back reflectors of thin film solar cells. Journal of Applied Physics. 104. 064509 - 064509. 10.1063/1.2981194.

[41] Paetzold, Ulrich & Moulin, Etienne & Pieters, Bart & Carius, Reinhard & Rau, Uwe. (2011). Design of nanostructured plasmonic back contacts for thin-film silicon solar cells. Optics express. 19 Suppl 6. A1219-30. 10.1364/OE.19.0A1219.

[42] Pillai, Supriya & Catchpole, Kylie & Trupke, Thorsten & Green, Martin. (2007). Surface plasmon enhanced silicon solar cells. Journal of Applied Physics. 101. 093105-093105. 10.1063/1.2734885.

[43] Schaadt, D.M. & Feng, B. & Yu, E.T. (2005). Enhanced Semiconductor Optical Absorption via Surface Plasmon Excitation in Metal Nanoparticles. Applied Physics Letters. 86. 063106. 10.1063/1.1855423.

[44] Bohren, Craig F., and Donald R. Huffman. (2008) Absorption and scattering of light by small particles. John Wiley & Sons.

[45] Maier, Stefan. (2007). Plasmonics: Fundamentals and Applications. 10.1007/0-387-37825-1.

[46] Liu, Xin & Swihart, Mark. (2014). ChemInform Abstract: Heavily-Doped Colloidal Semiconductor and Metal Oxide Nanocrystals: An Emerging New Class of Plasmonic Nanomaterials. Chemical Society reviews. 43. 10.1039/c3cs60417a.

[47] Blaber, Martin & Arnold, Matthew & Ford, Michael. (2010). A review of the optical properties of alloys and intermetallics for plasmonics. Journal of physics. Condensed matter : an Institute of Physics journal. 22. 143201. 10.1088/0953-8984/22/14/143201.

[48] Schleppi, Patrick & Paquette, Alain. (2017). Solar Radiation in Forests: Theory for Hemispherical Photography. 10.1007/978-94-024-1098-3_2.

[49] Sze, S.M. (2007). Physics of Semiconductor Devices. Wiley. 27. 111-126.

[50] Aspnes, D.E. & Studna, A. (1983). Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV. Phys. Rev. B. 27. 10.1103/PhysRevB.27.985.

[51] Hagemann, H.-J & Gudat, W. & Kunz, C. (1974). Optical constants from the far Infrared to the x-ray region: Mg, Al, Cu, Ag, Au, Bi, C, and Al2O3. Report of the Deutsches Elektronen-Synchrotron, DESY Sr-74/7.

[52] Wu, Feifei & Shi, Gang & Xu, Hongbo & Liu, Lingxiao & Wang, Yandong & Qi, Dianpeng & Lu, Nan. (2013). Fabrication of Antireflective Compound Eyes by Imprinting. ACS applied materials & interfaces. 5. 10.1021/am404168d.

[53] Diukman, Iddo & Orenstein, Meir. (2011). How front side plasmonic nanostructures enhance solar cell efficiency. Solar Energy Materials and Solar Cells. 95. 2628-2631. 10.1016/j.solmat.2011.05.019.

[54] Malitson, I.H. (1965). Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica. JOSA. 55. 1205-1208. 10.1364/JOSA.55.001205.

[55] Lee, Ya-Ju & Yao, Yung-Chi & Tsai, Meng-Tsan & Liu, An-Fan & Yang, Min-De & Lai, Jiun-Tsuen. (2013), Current matching using CdSe quantum dots to enhance the power conversion efficiency of InGaP/GaAs/Ge tandem solar cells. Optics express. 21 Suppl 6. A953-63. 10.1364/OE.21.00A953.

[56] Rheinländer, Bernd & Schubert, Mathias & Gottschalch, V. (1995). Dark-field spectroscopy on spontaneously ordered GaInP2. Physica Status Solidi (a). 152. 287-292. 10.1002/pssa.2211520129.

[57] Tavares, Jason & Swanson, Edward & Coulombe, Sylvain. (2008). Plasma Synthesis of Coated Metal Nanoparticles with Surface Properties Tailored for Dispersion. Plasma Processes and Polymers. 5. 759-769. 10.1002/ppap.200800074.

[58] Pearce, Joshua & Podraza, Nikolas & Collins, R. & Al-Jassim, M. & Jones, Kimberly & Deng, Jiangmin & Wronski, C.R. (2007), Optimization of open circuit voltage in amorphous silicon solar cells with mixed-phase (amorphous+nanocrystalline) p-type contacts of low nanocrystalline content. Journal of Applied Physics. 101. 114301 - 114301. 10.1063/1.2714507.