T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK KATMANLI KÜRESEL KUANTUM NOKTALARININ OPTİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE POTANSİYEL YAPISININ ETKİSİ

HANDE TEMEL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Fiğen BOZ

EDİRNE-2022

HANDE TEMEL'in hazırladığı "**ÇOK KATMANLI KÜRESEL KUANTUM NOKTALARININ OPTİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE POTANSİYEL YAPISININ ETKİSİ**" başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Fizik Anabilim Dalında bir **Yüksek lisans tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Ünvan, Ad, Soyad):	İmza
Prof. Dr. Ş. Erol OKAN	…….
Prof. Dr. Fiğen BOZ	…….
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ULAŞ	…….

Tez Savunma Tarihi: 27/12/2022

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Fiğen Boz İmza

Tez Danışmanı

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Hüseyin Rıza Ferhat KARABULUT
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

Hande Temel

Yüksek Lisans Tezi

Çok Katmanlı Küresel Kuantum Noktalarının Optik Özellikler Üzerine Potansiyel Yapısının Etkisi

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

ÖZET

Bu çalışmada bir ve iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktalarında safsızlık atomu varken ve yokken dört farklı sınırlayıcı potansiyel enerji değerleri için 1s, 1p, 1d, 1f, 2s, 2p, 2d, 2f durumlarının, enerjileri, dalga fonksiyonları ve bağlanma enerjisi tabaka kalınlıklarına bağlı olarak hesaplandı. Hesaplamalarda enerji özdeğerleri ve dalga fonksiyonları Runge-Kutta nümerik yöntemi kullanıldı. Sınırlayıcı potansiyelin, basamak sayısının ve tabaka kalınlıklarının tüm enerjiler üzerinde etkili olduğu görüldü. Bu enerji ve dalga fonksiyonları kullanılarak safsızlık atomu yokken ve varken 1s-1p, 1p-1d, 1d-1f toplam absorbsiyon katsayıları foton enerjisinin fonksiyonu olarak hesaplandı. Basamaklı sonsuz küresel kuantum noktalarında sınırlayıcı potansiyel değerlerinin artması absorbsiyon katsayıları maksimumlarını daha büyük foton enerjilerinde verdi. Tabaka kalınlıklarının büyütülmesi ile toplam absorbsiyon tepe değerlerinin enerjileri azaldı. Kuantum noktalarında safsızlık atomunun olması, tüm geçişler için absorbsiyon tepe değerini veren foton enerjilerini arttırmıştır. Bu tezde elde edilen sonuçlar gösteriyor ki, kuantum noktalarının optik ve elektronik özellikleri yapının geometrisine ve yapıda safsızlık atomu olup olmamasına bağlıdır.

Yıl : 2022

Sayfa Sayısı : 99

Anahtar Kelimeler : Çok katmanlı küresel kuantum noktası, enerjiler, sınırlayıcı potansiyel değeri, optik absorbsiyon katsayısı.

Master Thesis
Effect of Potential Structure on Optical Properties of Multilayer Spherical Quantum Dots
Trakya University Institute of Natural Sciences
Physics of Department

ABSTRACT

In this study, the energies, wave functions and binding energy of the states of 1s, 1p, 1d, 1f, 2s, 2p, 2d, 2f for four different confined potential energy values in the presence and absence of impurity atoms in one and two-step infinite spherical quantum dots were determined depending on the layer thicknesses. Energy eigenvalues and wave functions Runge-Kutta numerical method were used in the calculations. It was observed that the confined potential, number of steps and layer thicknesses were effective on all energies. Using these energy and wave functions, the total absorption coefficients of 1s-1p, 1p-1d, 1d-1f in the absence and presence of impurity atoms were calculated as a function of the energy of the photon. The increase in the confined potential values in the stepped infinite spherical quantum dots gave the absorption coefficients their maximums at larger photon energies. The energies of the total absorption peaks decreased with increasing the layer thicknesses. The presence of impurity atoms in the quantum dots increased the photon energies giving the absorption peak value for all transitions. The results obtained in this thesis show that the optical and electronic properties of quantum dots depend on the geometry of the structure and whether there is an impurity atom in the structure.

Year : 2022

Number of Pages : 99

Keywords : Multilayer spherical quantum dot, energies, confining potential, optical absorption coefficent.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında üzerimde büyük emeği ve sabrı olan, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Fiğen Boz'a (Trakya Üniversitesi) içten teşekkürlerimi borç bilirim. Bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım bölümdeki tüm hocalarıma saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte her türlü desteğini gösteren sevgili eşime ve anlayışlarından ötürü aileme çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

DOĞRULUK BEYANI ..... **iii**
ÖZET ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **ix**
SİMGELER DİZİNİ ..... **xiii**
BÖLÜM 1 ..... **1**
GİRİŞ **1**
BÖLÜM 2 ..... **6**
KUANTUM NOKTA YAPILAR **6**
BÖLÜM 3 ..... **10**
MODEL VE TEORİ **10**
3.1. Çok Katmanlı Sonsuz Küresel Kuantum Noktasındaki Elektronun Radyal Dalga Fonksiyonunun ve Enerji Değerlerinin Hesaplanması 10
3.2. Çok Katmanlı Sonsuz Küresel Kuantum Noktasındaki Safsızlığın Olduğu Durum İçin Dalga Fonksiyonunun ve Enerji Değerlerinin Hesaplanması 17
3.3. Çok Katmalı Sonsuz Küresel Kuantum Noktasının Merkezinde Yer Alan Safsızlık Atomunun Bağlanma Enerjisi 19
3.4. Çok Katmanlı Sonsuz Küresel Kuantum Noktasının Toplam Optik Absorbsiyon Katsayılarının Hesapları 20
BÖLÜM 4 ..... **24**
ÇOK KATMANLI SONSUZ KÜRESEL KUANTUM NOKTALARININ ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNE SINIRLAYICI POTANSİYEL ETKİSİ **24**
4.1. Bir Basamaklı Sonsuz Küresel Kuantum Noktalarının Sınırlayıcı Potansiyel ve Basamak Kalınlıklarına Bağlı Elektronik Özellikleri 24
4.2. İki Basamaklı Sonsuz Küresel Kuantum Noktalarının Sınırlayıcı Potansiyel ve Basamak Kalınlıklarına Bağlı Elektronik Özellikleri 30
BÖLÜM 5 ..... **35**

ÇOK KATMANLI SONSUZ KÜRESEL KUANTUM NOKTALARININ OPTİK ÖZELLİKLERİNE SINIRLAYICI POTANSİYEL ETKİSİ.....35

5.1. Bir Basamaklı Sonsuz Küresel Kuantum Noktalarının Toplam Lineer Absorbsiyon Katsayıları.....36

5.1.1. Bir Basamaklı Sonsuz Küresel Kuantum Noktalarının Katman Kalınlığına Bağlı Olasılık Yoğunlukları 46

5.1.2. Bir Basamaklı Sonsuz Küresel Kuantum Noktalarının Geçiş Enerjileri Farkı 50

5.2. İki Basamaklı Sonsuz Küresel Kuantum Noktalarının Toplam Absorbsiyon Katsayıları.....58

5.2.1. İki Basamaklı Sonsuz Küresel Kuantum Noktalarının Katman Kalınlığına Bağlı Olasılık Yoğunlukları.....68

5.2.2. İki Basamaklı Sonsuz Küresel Kuantum Noktalarının Geçiş Enerjileri Farkı 70

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....77

KAYNAKÇALAR.....79

ÖZGEÇMİŞ.....84

KONGRELER ve BİLDİRİLER.....85

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. GaAs/AlGaAs sonlu küresel kuantum noktası şematik gösterimi.....8
Şekil 2.2. Bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasının şematik gösterimi 8
Şekil 2.3. İki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktası şematik gösterimi. 9
Şekil 4.1. Bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktası ve potansiyel profilinin şematik gösterimi. 25
Şekil 4.2. Farklı potansiyel sınırlayıcı değerleri için bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasındaki 1s, 1p, 1d, 1f, 2s, 2p, 2d, 2f durumlarının enerjilerinin tabaka kalınlıklarına göre değişimi**.** 26
Şekil 4.3. Farklı potansiyel sınırlayıcı değerleri için bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasındaki 1si, 1pi ,1di, 1fi, 2si, 2pi, 2di, 2fi durumlarının safsızlık atomu olan enerjilerinin tabaka kalınlıklarına göre değişimleri. 28
Şekil 4.4. Farklı potansiyel değerleri için bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasındaki 1s, 1p, 1d, 1f, 2s, 2p, 2d, 2f durumlarının bağlanma enerjilerinin tabaka kalınlıklarına göre değişimleri. 29
Şekil 4.5. İki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasının ve potansiyel profilinin şematik gösterimi. 30
Şekil 4.6. Farklı potansiyel sınırlayıcı değerleri için iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasındaki 1s, 1p, 1d, 1f, 2s, 2p, 2d, 2f durumlarının enerjilerinin tabaka kalınlıklarına göre değişimleri. 31
Şekil 4.7. Farklı potansiyel sınırlayıcı değerleri için iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasındaki 1s, 1p, 1d, 1f, 2s, 2p, 2d, 2f durumlarının bağlanma enerjilerinin tabaka kalınlıklarına göre değişimleri. 33
Şekil 5.1. V_0 =78 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam absorbsiyon katsayısı değişimleri. 37
Şekil 5.2. V_0 =78 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri. 38
Şekil 5.3. V_0= 148 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absobsiyon katsayısı değişimleri. 39
Şekil 5.4. V_0 =148 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri. 40

Şekil 5.5. V_0 =228 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasındaki farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri. 41
Şekil 5.6. V_0 =228 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri. 42
Şekil 5.7. V_0 =313 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri. 44
Şekil 5.8. V_0 =313 meV potansiyel sınırlayıcı değerleri için safsızlık atomu varken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklaraında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri. 45
Şekil 5.9. V_0=313meV potansiyel sınırlayıcı değerinde R_1=R_2=50Å için 1s, 1p, 1d, 1f durumlarının bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktalasında tabaka kalınlıklarına bağlı olasılık yoğunlukları.....46
Şekil 5.10. V_0=313meV potansiyel sınırlayıcı değerinde R_1=R_2=100Å için 1s, 1p, 1d, 1f durumlarının bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı olasılık yoğunlukları.....47
Şekil 5.11. V_0=313meV potansiyel sınırlayıcı değerinde R_1=R_2=150Å için 1s, 1p, 1d, 1f durumlarının bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı olasılık yoğunlukları.....47
Şekil 5.12. V_0=313meV potansiyel sınırlayıcı değerinde R_1=R_2=50Å için için 1si, 1pi, 1di, 1fi durumlarının sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı olasılık yoğunlukları. 48
Şekil 5.13. V_0=313meV potansiyel sınırlayıcı değerinde R_1=R_2=100Å için 1si, 1pi, 1di, 1fi durumlarının bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı olasılık yoğunlukları.....48
Şekil 5.14. V_0=313meV potansiyel sınırlayıcı değerinde R_1=R_2=150Å için 1si, 1pi, 1di, 1fi durumlarının bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı olasılık yoğunlukları.....49
Şekil 5.15. V_0 =78 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri.....50
Şekil 5.16. V_0 =78 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri.....51
Şekil 5.17. V_0 =148 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri. 52
Şekil 5.18. V_0 =148 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri. 53

Şekil 5.19. V_0 =228 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri. 54
Şekil 5.20. V_0 =228 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri. 55
Şekil 5.21. V_0 =313 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri. 56
Şekil 5.22. V_0 =313 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri 57
Şekil 5.23. V_0 =78meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri. 59
Şekil 5.24. V_0 =78 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri. 60
Şekil 5.25. V_0 =148meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri. 61
Şekil 5.26. V_0 =148 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri. 63
Şekil 5.27. V_0 =228meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri. 64
Şekil 5.28. V_0 =228 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam absorbsiyon katsayısı değişimleri. 65
Şekil 5.29. V_0 =313 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonsiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri. 66
Şekil 5.30. V_0 =313 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri. 67
Şekil 5.31. V_0 =148 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken (sol sütun) ve safsızlık atomu varken (sağ sütun) iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında olasılık dağılımı ve enerjiler. 69
Şekil 5.32. V_0 =78 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri. 70
Şekil 5.33. V_0 =78 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri 71

Şekil 5.34. V_0 =148 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri. 72
Şekil 5.35. V_0 =148 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken iki basamaklı küresel kuantum noktasında tabaka kalınlılarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri. 73
Şekil 5.36. V_0 =228 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri. 75
Şekil 5.37. V_0 =228 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri. 75
Şekil 5.38. V_0 =313 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri. 76
Şekil 5.39. V_0 =313 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri. 76

SİMGELER DİZİNİ

Ψ	Dalga Fonksiyonu
R_l	Elektronun Radyal Dalga Fonksiyonu
R_{li}	Safsızlığın Olduğu Durumun Radyal Dalga Fonksiyonu
R_1	GaAs Küresinin Yarıçapı
E	Enerji
E_B	Bağlanma Enerjisi
H	Hamiltonyen
$\hbar$	Planck Sabiti
m^*	Elektronun Etkin Kütlesi
a^*	Etkin Bohr Yarıçapı
R^*	Etkin Rydberg Enerji
L	Açısal Momentum
V	Potansiyel Engeli
I	Işığın Optik Yoğunluğu
Γ_{if}	Gevşeme süresi
E_i	İlk Durum Enerjisi
E_f	Son Durum Enerjisi

e	Elektron Yükü
c	Boşluktaki Işık Hızı
σ	Elektron Yoğunluğu
n_r	Yarı İletken Materyalin Kırılma İndisi
$\hbar\omega$	Foton Enerjisi
ε_{GaAs}	GaAs Malzemesinin Dielektrik Sabiti
$\vec{E}$	Elektrik Alan Vektörü
$P(t)$	Lineer Optik Kutuplanma İfadesi
m_{GaAs}	GaAs Malzemesinin Etkin Kütlesi
$Y_{l,m}$	Küresel Harmoniklerde Özfonksiyon
M_{if}	Dipol Geçiş Matris Elemanı
α	Optik Absorbsiyon Katsayısı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1900 yılında Alman fizikçi Max Planck'ın karacisim ışımasında enerji kuantumlanması keşfi ile fizik biliminde önemli gelişmeler başlamış ve modern fizik ortaya çıkmıştır. Fizik bilimi için devrim niteliğinde olan bu keşif Albert Einstein'ın görelilik kuramı ve ışığın kuantum kuramları ile daha birçok keşfi beraberinde getirmiştir (Beiser, 1997). 1907 yılında Thomson'ın öne sürdüğü atom modelinin yetersizliği zamanla geliştirilmiş ve Danimarkalı fizikçi Niels Bohr, Rutherford'un atom modelini baz alarak ispatladığı prensipler ile 'Bohr Atom Modeli'ni' ileri sürmüştür (Başar, 2000, s.126). Bu atom modeli ilk başarılı atom çalışması olarak kabul edilmektedir. Makroskopik evrende açıklanabilen klasik fizik kanunları mikroskobik evrende yetersiz kaldığından Bohr'un geliştirdiği bu yeni atom modeli sayesinde, atom tayfının incelenmesi ve deney sonuçlarına uygunluğu ile kuantum fiziğinin temelleri atılmıştır. (Başar, 2000)

Kuantum fiziğinin keşfi ve yakın geçmişte yapılan çalışmalar günümüz teknolojisinde kuantum kuyu, kuantum tel ve kuantum nokta gibi nano boyutlu yapıların üretilmesine imkân sağladığı bilinmektedir (Arakawa, 1994, Ledentsov, Ustinov, Shchukin, Kop'ev, & Alferov, 1998, Minkov, Aleshkin, Rut, Sherstobitov, & Germanenko, 2020). Düşük boyutlu yarı iletken olan bu yapılar arasında özellikle kuantum noktalar birçok çalışmanın ilgi odağı olmuştur. Kuantum nokta yapılar farklı geometrik şekillere sahiptir (dikdörtgen, küresel, üçgen, disk gibi..) ve birtakım üretim teknikleri ile üretilmektedirler (Barseghyan, Mora-Ramos, & Duque, 2013, Harrison,

2009, Khordad & Bahramiyan, 2015, Rani, Dalal, & Srivastava, 2022, Barseghyan, Restrepo, Mora-Ramos, & Kirakosyan, 2012). 'Yapay atom' olarak da adlandırılan bu yapılar optoelektronik cihazlarda kullanımları bakımından kuantum tel ve kuantum kuyulara göre daha gelişmiş özellikler sunmaktadır (Liang, Xie, 2011). Kuantum noktalarda elektronun üç boyutta sınırlandırılması, kesikli enerji seviyelerinin oluşmasını sağlamakta ve bu sayede pek çok fiziksel özelliğin incelenmesine olanak vermektedir. Kuantum noktaların elektronik ve optik özelliklerine etki eden bir başka faktör de yapıda safsızlık atomunun bulunmasıdır. Safsızlık atomunun kuantum nokta yapılarda bulunması, bu yapıların optik ve elektronik niteliklerinin değişimlerinde önemli rol oynamaktadır (Yılmazer, Yakar, Çakır , & Özmen, 2017, Zhu, Xıong, & Gu, 1990). Bu durum araştırmacıları kuantum noktaların bağlanma enerjisi, elektronik özellikleri, optik özellikleri gibi pek çok farklı deneysel ve teorik çalışmaya teşvik etmiştir (Yılmazer vd., 2017).

Aktaş ve Boz çok katmanlı küresel kuantum noktalarındaki hidrojenik safsızlığın bağlanma enerjisi üzerine araştırmalar yapmışlardır (Aktas & Karaca Boz, 2008). Çakır ve arkadaşları hidrojen tipi safsızlığın olduğu sonlu GaAs/$Al_xGa_{1-x}As$ kuantum nokta yapısında taban durum enerjilerini farklı nokta yarıçapları için, Magdaleno ve arkadaşları çok kabuklu GaAs/$Al_xGa_{1-x}As$ sonlu kuantum noktasınının bant enerji seviyelerini, De Souza ve Bruno-Alfonso manyetik alan altında sonsuz potansiyelli küresel kuantum noktasındaki safsızlığın enerjilerini çalışmışlardır (Çakır, Sezer, Yakar, Özmen, & Yüksel, 2009, De Souza & Bruno-Alfonso, 2015, Rodríguez-Magdaleno, Pérez-Álvarez, Martínez-Orozco, & Pernas-Salomón, 2017). Boz ve arkadaşları manyetik alan altında merkezinde safsızlık bulunan çok katmanlı küresel kuantum noktalarının bağlanma enerjisini farklı malzeme konsantrasyonun ve bariyer kalınlığının bir fonksiyonu olarak çalışmışlardır (Boz, Aktas, Bilekkaya, & Okan, 2010). Yine Boz ve arkadaşları merkezinde safsızlık bulunan GaAs/$Al_xGa_{1-x}As$/AlAs küresel kuantum noktaları için, efektif kütle yaklaşımında 4. derece Runge-Kutta nümerik metodunu kullanarak enerji seviyeleri hesaplarını yapmışlar. Nokta yarıçapındaki değişimlerin taban durum ve uyarılmış durumlarında bağlanma enerjilerinin farklı davranışlar sergilediklerini görmüşlerdir (Boz F.K., Nisanci, Aktas, & Okan, 2016). Yılmazer ve arkadaşları küresel kuantum nokta yapının elektronik yapısı ve bağlanma enerjisi üzerine çalışmalarında sonlu ve sonsuz potansiyel yapıyı kullanmışlardır. Küresel kuantum nokta yapının taban

ve bazı uyarılmış durumlarının dalga fonksiyonlarını Kuantum Genetik Algoritma, Hartree-Fock Roothaan metodunu kullanarak hesaplamışlar, kuantum nokta yapının enerji seviyelerinde yarıçap ve sınırlandırıcı potansiyelin etkili olduğunu bulmuşlardır (Yılmazer vd., 2017). Aydın ve Şahin iki elektronlu çok kabuklu kuantum nokta ve kuatum kuyusu heteroyapısının elektronik özelliklerini merkezinde safsızlık atomunun olduğu ve olmadığı durumları (Aydin & Sahin, 2013), Yakar ve arkadaşları sonsuz küresel boşlukta sınırlandırılmış üç elektronlu atomların taban ve uyarılmış durumlarının hesaplarını yapmışlardır (Yakar, Çakır, Demir, & Özmen, 2021). Rabanian ve diğerleri CdSe/ZnS/CdSe, ZnS/CdSe/ZnS yapısındaki safsızlık katkılı kuantum noktalarının enerji durumlarının teorik çalışmasında kullandıkları farklı iki yapının da enerji seviyelerinin farklılıklar gösterdiğini, küresel kuantum noktasının kabuk kalınlığının artmasıyla radyal olasılık dağılımı ve bağlanma enerjisini etkilediğini rapor etmişlerdir (Rabanian, Neghabi, Zadsar, & Jafari, 2021).

Kuantum nokta yapının elektronik özellikleri üzerine çalışmaların yanı sıra literatürde optik özellikler üzerine çalışmalar da oldukça fazladır. Son yıllarda özellikle lineer ve lineer olmayan optik absorpsiyon katsayıları oldukça yoğun çalışılan konular arasındadır. Al ve arkadaşları küresel kuantum noktalarında manyetik alan altında sonlu hapsetme potansiyeline sahip küresel kuantum noktasındaki, 1s-1p, 1p-2s, 2s-2p, 1p-1d, 2p-2d geçişleri için gelen fotonun enerjisine karşın lineer ve lineer olmayan optik absorpsiyon katsayılarını hesaplamışlar; dış manyetik alanın ve nokta yarıçapındaki değişimin optik absorbsiyon katsayılarının büyüklüklerine etkili olduğunu gözlemlemişlerdir (Al, vd., 2020). Jafari homojen olmayan küresel bir kuantum noktasındaki safsızlık atomunun, 1s-2p, 2p-3d geçişlerine karşılık gelen lineer, lineer olmayan toplam absorbsiyon katsayısı hesaplamalarını yapmış ve optik özelliklerin iç yarıçapın değişiminden ve kabuk kalınlığından etkilendiğini gözlemlemiştir (Jafari, 2015). Küresel kuantum noktalarında sıcaklığın ve dış manyetik alan altında safsızlık varlığında, bağlanma enerjisine optik özelliklerine etkilerini Kırak ve arkadaşları (Kirak, Altinok, & Yilmaz, 2013), Yakar ve arkadaşları parabolik potansiyele sahip küresel kuantum noktanın 1s, 1p, 1d, 1f durumlarının bağlanma enerjilerini ve dalga fonskiyonlarını Hartree-Fock Roothan metodunu kullanarak hesaplamışlar ve 1s-1p, 1p-1d, 1d-1f geçişlerinin gelen foton enerjisinin fonksiyonu olarak da lineer ve üçüncü dereceden lineer olmayan optik absorbsiyon katsayılarını araştırmışlardır (Yakar, Çakır,

& Özmen, 2010). Taş ve Şahin safsızlığı olan ve olmayan küresel kuantum nokta ve kuantum kuyunun alt düzeyler arası optik özelliklerini; çekirdek yarıçapı, kuyu genişlikleri ve tabaka kalınlıklarına göre araştırmışlar, buldukları sonuçlarda optik özelliklerin tabaka kalınlığına bağlı olduğunu görmüşlerdir (Taş & Şahin, 2012). Kavruk ve arkadaşları, $Al_xGa_{1-x}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As/Al_yGa_{1-y}As/\ Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ çok kabuklu kuantum noktasının çekirdek ve kabuk bölgelerinde alüminyum konsantrayonuna bağlı (x) optik geçişlerinin değişimlerini hesapladıkları sonuçlara göre; çok kabuklu kuantum noktalarının absorbsiyon katsayılarının, çekirdek ve kuyu bölgelerindeki alüminyum (x) konsantrasyonundan etkilendiğini göstermiştir. Onlar bu çalışmada hassas bir fotodedektör üretimi için y konsantrasyon değerinin arttırılarak dalga boyununun düşürülebileceğini ya da yüksek dalga boylarına duyarlı bir fotodedektör için x konsantrasyonlarının arttırılması gerektiğini söylediler (Kavruk, Sahin, & Atav, 2014). Gambhir ve çalışma arkadaşları silindirik geometriye sahip disk şeklindeki kuantum noktalarda alt bantlar arası geçişlerin lineer ve lineer olmayan optik absorbsiyon katsayılarını ve kırılma indisi değişikliklerini, Karimi ve diğerleri lineer ve lineer olmayan absorpsiyon katsayılarına; safsızlığın, hidrostatik basıncın ve geometrik boyutun etkilerini 4. derece Runge-Kutta metodu ile araştırmalarını gerçekleştirmişlerdir (Gambhir, Kumar, Jha, & Mohan, 2013, Karimi, Rezaei, & Nazari, 2014). ZnS/ZnO/ZnS çok kabuklu küresel kuantum noktasının içerisinde hapsedilmiş bir elektronun, safsızlığın konumunun değiştirilmesine göre elektronik ve optik özelliklerine etkileri çalışılmıştır (Khou, Ibnouelghazı, & Abouelaoualım, 2022). Farklı geometrik yapılardaki kuantum nokta yapılar için optik özellikler üzerine; hidrostatik basınç, safsızlık varlığı, safsızlığın konumu, manyetik ve elektrik alan etkileri gibi birçok etkenin teorik ve deneysel çalışmaları literatürde mevcuttur (Barseghyan vd., 2012, Bose & Sarkar, 1998, Çakır, Yakar, & Özmen, 2017, Lu, Xie, & Hassanabadi, 2011, Restrepo vd., 2013, Sadeghi, 2009, Yakar vd., 2021).

Bütün bu çalışmalardan görüleceği üzere çok katmanlı küresel kuantum noktalarının elektronik ve optik özellikleri önemli bir çalışma konusudur. Optoelektronik ve elektronik cihaz yapmak ve geliştirmek, düşük boyutlu yapıların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyi anlaşılmasıyla mümkün olmaktadır. Günlük yaşantımızda kulladığımız birçok teknolojik ürün; televizyon ekranlarında ışık yayan diyotlar, dijital kameralarda fotodedöktörler vb., bu düşük boyutlu yapılar sayesinde üretilmiştir. Teknolojinin

gelişimi ile düşük boyutlu yapıların kullanımlarının artması da araştırmacıları bu konularda çalışmaya yönlendirmiştir (Afkir, Feddi, Dujardin, Zazoui, & Meziane, 2018, Bera, Qian, Tseng, & Holloway, 2010, Zhou & Coleman, 2016). Toplam absobsiyon düşük boyutlu yapılarda bant içi ve bantlar arası optik geçiş olarak tanımlanmaktadır. Elektromanyetik ışıma kuantum noktasından geçtiğinde optik absorbsiyon katsayıları ışımanın yoğunluğundaki azalma hakkında bilgi vermektedir (Al E. B., 2020). Biz de bu tez çalışmasında, yapılan araştırmalar ışığında çok katmanlı sonsuz küresel kuantum yapının merkezinde safsızlık atomu yokluğunda ve varlığında sınırlayıcı potansiyelin değerinin ve basamak sayısının optik ve elektronik özellikleri üzerine etkilerini araştırdık. Bu çalışmada bir ve iki basamaklı olmak üzere iki sonsuz küresel kuantum nokta yapısı incelenmiştir.

Tezin 2. bölümünde kuantum nokta yapılardan bahsedilmiş, modellenen çok katmanlı bir ve iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktaları tanımlanmış ve şematik gösterimi verilmiştir.

Tezin 3. bölümünde çok katmanlı sonsuz küresel kuantum noktalarında safsızlık atomu varlığı ve yokluğundaki durumlarının radyal dalga fonksiyonları ve enerji durumlarının dördüncü derece Runge Kutta nümerik yöntemiyle hesaplanması anlatılmıştır. Hesaplanan bu dalga fonksiyonları ve enerji durumları kullanılarak, çok katmanlı sonsuz küresel kuantum noktasında toplam optik absorbsiyon katsayıları hesaplarına yer verilmiştir.

4. bölümde çok katmanlı sonsuz küresel kuantum noktalarının elektronik özelliklerine sınırlayıcı potansiyel etkisi araştırılır. Çalışma dört farklı potansiyel sınırlayıcı değer ($V_{0=}$78 meV, $V_{0=}$148 meV, $V_{0=}$228 meV, $V_{0=}$ 313 meV) için safsızlık atomu varlığı ve yokluğundaki durumlar için çalışılmış, çizilen grafiklerin yorumları sunulmuştur.

5. bölüm'de çok katmanlı sonsuz küresel kuantum noktalarının optik özelliklerine sınırlayıcı potansiyel etkisi çalışılmıştır. Grafiklerde kuantum noktasının farklı potansiyel sınırlayıcı değerleri için, 1s-1p, 1p-1d ve 1d-1f geçişlerinin farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisine bağlı toplam absorbsiyon katsayıları gösterilmiştir.

BÖLÜM 2

KUANTUM NOKTA YAPILAR

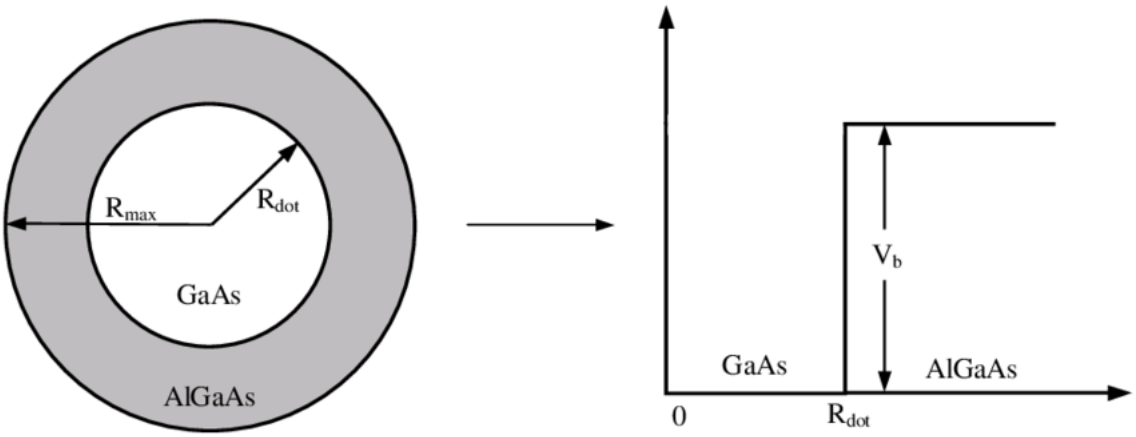
Kuantum noktalar; Rus Fizikçi Alexie Ekimov'un katılarda, Amerikalı Kimyager Louis E. Brus'un kolloidal çözeltilerde yaptıkları çalışmalarıyla keşfedilmiştir. Birkaç nano metre genişliğinde ve silikon gibi yarı iletken malzemelerden yapılmış olmalarından, küçücük bir madde zerresi olarak tanımlanır ve kuantum nokta adını alırlar (Bagher, 2016). Kuantum noktaların çap uzunluklaırı 2-15 nanometre (10-75 atom) uzunluktadır. Periyodik cetvelin II-VI, III-V grubu elementlerinden üretilen insan yapımı yapay atomlardır ve bu nedenle bilim insanları onlara "süper atom", "yapay atom" gibi isimler vermektedir. CdSe, InAs, CdS, GaN, InGeAS, CdTe, PbS, PbSe, ZnSe kuantum noktaları optik ve elektronik özellikleri bakımından en fazla üretilen ve çalışılanlar arasındadır. Kuantum noktaların tipik üretim teknikleri arasında moleküler ışın epitaksiyel, X- ışını litografisi ve iyon implantasyonu sayılabilir (Bagher, 2016, Karaca Boz vd., 2016, Hasanirokh, Asgari & Rokhi, 2019, Khou vd., 2022, Rabanian vd., 2021, Zhu vd., 1990).

Zhu ve arkadaşları GaAs/Ga_{1-x} Al_x /As yapısındaki bir küresel kuantum noktanın sonlu ve sonsuz hapsetme potansiyelinde elektron ve safsızlığın bağlanma enerjilerine kuyu boyutunun ve hapsetme potansiyel yüksekliğinin güçlü bir şekilde etkili olduğunu bulmuşlardır. CdS/ZnS küresel kuantum noktalarının doğrusal olmayan optik özellikleri üzerine nokta boyutunun etkileri çalışılmış, çekirdek yarıçapının dipol geçiş matrisi üzerine etkileri olduğu ve nokta boyutunun büyütülmesi ile toplam absorbsiyon tepe

değerlerinin enerjilerinin kırmızıya kaydığını yani enerjilerinin azaldığını söylemişlerdir (Hasanirokh, Asgari, & Rokhi, 2019).

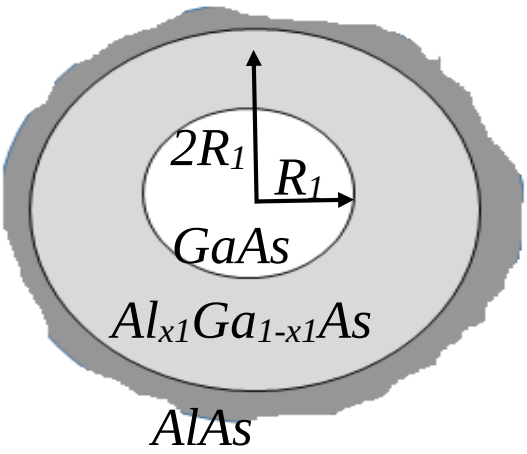
Kuantum noktalarına dışarıdan uygulanan dış etkenlerle yapısının değiştirilebilme özelikleri onların optik ve elektronik cihazlarda, teknolojik uygulamalarda kullanımlarını yaygın hale getirmiştir. Nokta boyutunun değiştiriliyor olması, onların optik özelliklerini etkileyen en önemli etkendir. Çünkü optik özellikler daha çok nokta boyutuna bağlıdır (Bagher, 2016). Kuantum noktalarının boyutlarının değiştirilmesi demek, dalga boylarındaki değişim ile yaptıkları ışımanın renginin de değişmesidir. Eğer bir atoma enerji verilirse elektron bulunduğu konumdan daha yüksek enerji seviyesine geçer ve absorbladığı enerjiyi eski enerji seviyesine dönerken foton olarak yayar. Kuantum noktalarda kısıtlanan elektronlar da atomlarda olduğu gibi foton salınımı yaparak, ayrık enerji seviyesi sergilerler. Bundan dolayı tıpta ve birçok teknolojik uygulamanın (LED'ler, güneş panelleri, elektronikte ve bilgisayar uygulamaları vb.) geliştirilebilmesinde kullanılmaktadırlar. Optik dünyası için hala çığır açan teknoloji olarak görülürler. Çünkü geleneksel yöntemlerle üretilmiş güneş pillerinden %10'luk daha verim sağladıkları görülmüştür. Ayrıca tıbbi araştırmalarda, kanser tedavi ve tanısı için organlara daha az zarar vererek uygulama yapılması öngörülmektedir (Durmuşoğlu, 2011, https://www.explainthatstuff.com/quantum-dots.html)

Kuantum noktalar geometrik yapılarına göre adlandırılırlar. Küresel, piramit, kübik, elipsoid olmak üzere farklı şekillere sahiptirler. Küresel kuantum noktalarda elektronun hareketi üç boyutta sınırlandırılmıştır. Küboid simetri yerine, küresel simetriye sahip sonlu bir kuantum noktanın çözümleri daha pratik olduğundan çalışmalarda tercih edilmektedir. Potansiyelin küresel simetrisi dikkate alındığında, dalga fonksiyonunun da küresel bir simetriye sahip olması beklenir ve Schrödinger denklemi küresel koordinatlar için üç boyutta yazılmaktadır (Harrıson, 2009, s. 254). Şekil 2.1'de şematik olarak GaAs küresinin AlGaAs tabakasıyla sarılarak oluşturulan sonlu kuantum noktası potansiyel profili ile verilmiştir. Kuantum noktalar farklı geometrik şekillerde, farklı hapsetme potansiyellerinde tek katmanlı olarak çalışılmıştır. Araştırmacılar son yıllarda çok katmanlı kuantum nokta yapılara da yoğunlaşmıştır (Jafari, 2015). Çok katmanlı küresel kuantum noktaları bir çekirdek kürenin farklı kalınlıktaki tabakalarla sarılmasıyla oluşur.



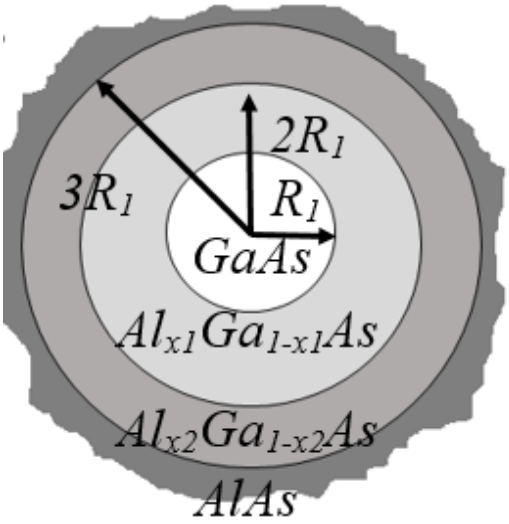
Şekil 2.1. GaAs/AlGaAs sonlu küresel kuantum noktası şematik gösterimi

Bu tezde çok katmanlı bir ve iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktası modellenmiştir. Çok katmalı sonsuz küresel kuantum noktası, R yarıçaplı GaAs küresi farklı "Al" konsantrasyonlarına sahip $Al_xGa_{1-x}As$ katmanları ve bu katmanları AlAs katmanı ile sararak oluşturulur. Şekil 2.2'de şematik olarak gösterilen bir basamaklı sonsuz kuantum noktası, R_1 yarıçaplı GaAs malzemesi, $Al_{x1}Ga_{1-x1}As$ ve AlAs tabakalarıyla sarılarak oluşturulur. Bu kuantum noktasında $Al_{x1}Ga_{1-x1}As$ tabaka kalınlığı $2R_1$-R_1'den R_1 olur.



Şekil 2.2. Bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasının şematik gösterimi

İki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktası, R_1 yarıçaplı GaAs malzemesi, farklı alüminyum konsantrasyonlarına sahip $Al_{x1}Ga_{1-x1}As$ ve $Al_{x2}Ga_{1-x2}As$ tabakalarıyla sarılır ve son tabakalar AlAs tabakasıyla sarılarak oluşturulmuş şekil 2.3'te gösterilen yapıdır. Bu kuantum noktasında $Al_{x1}Ga_{1-x1}As$ tabaka kalınlığı $2R_1$-R_1'den, $Al_{x2}Ga_{1-x2}As$ tabaka kalınlığı $3R_1$-$2R_1$'den R_1 olarak alınır.



Şekil 2.3. İki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktası şematik gösterimi.

BÖLÜM 3

MODEL VE TEORİ

Bu bölümde çok katmanlı sonsuz küresel kuantum noktasındaki bir elektronun safsızlık atomu yokken ve varken radyal dalga fonksiyonları ve enerji durumlarının dördüncü derece Runge Kutta nümerik yöntemiyle hesaplanması anlatılır. Hesaplanan bu dalga fonksiyonları ve enerji durumları kullanılarak, çok katmanlı sonsuz küresel kuantum noktasında toplam optik absorbsiyon katsayıları hesaplarına yer verilir.

3.1. Çok Katmanlı Sonsuz Küresel Kuantum Noktasındaki Elektronun Radyal Dalga Fonksiyonunun ve Enerji Değerlerinin Hesaplanması

Çok katmanlı küresel kuantum noktasındaki bir elektronun Hamiltonyeni;

$$H = \left[-\frac{\hbar^2}{2m^*}\nabla^2 + V(r)\right] \tag{3.1}$$

şeklinde verilir. Bu denklemde küresel koordinatlarda laplasyen

$$\nabla^2 = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2 sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r^2 sin\theta}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(sin\theta\ \frac{\partial}{\partial \theta}\right) \tag{3.2}$$

ifadesini yerine yazarak, denklem 3.3'teki zamandan bağımsız Schrödinger denklemi elde edilir.

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*}\left(\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2 sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2}+\frac{1}{r^2 sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(sin\theta\frac{\partial}{\partial\theta}\right)\right)\psi(r,\theta,\varphi)+$$
$$V(r)\psi(r,\theta,\varphi)=E_0\psi(r,\theta,\varphi) \quad (3.3)$$

Bu denklemin çözümünde, dalga fonksiyonu;

$$\psi(r,\theta,\varphi)=R_l(r)Y_{l,m}(\theta,\varphi) \quad (3.4)$$

değişkenlerine ayrılmış şekilde yazılır. Bu dalga fonksiyonu denklem 3.3'e uygulanırsa, Shrödinger denklemi aşağıdaki gibi yazılır;

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*}\left[\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2 sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(sin\theta\frac{\partial}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{1}{sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2}\right]R_l(r)Y_{l,m}(\theta,\varphi)+$$
$$V(r)R_l(r)Y_{l,m}(\theta,\varphi)=E_{nl}Y_{l,m}(\theta,\varphi). \quad (3.5)$$

Denklem düzenlenip, kısmi türevleri alınırsa;

$$\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial R_l(r)}{\partial r}\right)+\frac{2m^*r^2}{\hbar^2}\left[E_{nl}-V(r)\right]R_l(r)\right]Y_{l,m}(\theta,\varphi)+\left[\frac{1}{sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(sin\theta\frac{\partial Y_{l,m}(\theta,\varphi)}{\partial\theta}\right)+\right.$$
$$\left.\frac{1}{sin^2\theta}\frac{\partial^2 Y_{l,m}(\theta,\varphi)}{\partial\varphi^2}\right]R_l(r)=0 \quad (3.6)$$

olmaktadır. Bu ifade $R_l(r)Y_{l,m}(\theta,\varphi)$ terimine bölünürse;

$$\frac{1}{R_l(r)}\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial R_l(r)}{\partial r}\right)+\frac{2m^*r^2}{\hbar^2}\left[E_{nl}-V(r)\right]R_l(r)\right]=$$
$$-\frac{1}{Y_{l,m}(\theta,\varphi)}\left[\frac{1}{sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(sin\theta\frac{\partial Y_{l,m}(\theta,\varphi)}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{sin^2\theta}\frac{\partial^2 Y_{l,m}(\theta,\varphi)}{\partial\varphi^2}\right] \quad (3.7)$$

şeklini alır. 3.7'deki denklemin sol kısmı r'ye, sağ kısmı ise (θ, φ) değişkenlerine göre değişmektedir. (r, θ, φ) bağımsız değişken oldukları için böyle bir ifade yalnız tek bir sabite eşit olduğunda doğru olabilir (Karaoğlu, 1998, s.107). Denklemin sol tarafındaki θ ve φ'nin fonksiyonu olmadığından θ ve φ değiştikçe eşitliğin sol kısmı değişmemektedir, λ gibi bir sabite eşit olabilir. Denklemi sağlayabilmesi için sağ kısmında aynı sabit eşitlenmesi gerekir. 3.7'deki denklemin her tarafını λ sabitine eşitlenirse;

$$\frac{d}{dr}\left(r^2 \frac{dR_l(r)}{dr}\right) + \frac{2m^* r^2}{\hbar^2}\left[E_{nl} - V(r)\right] R_l(r) = \lambda R_l(r) \tag{3.8}$$

ve

$$\left[-\frac{1}{sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(sin\theta\frac{\partial}{\partial\theta}\right) - \frac{1}{sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2}\right] Y_{l,m}(\theta, \varphi) = \lambda Y_{l,m}(\theta, \varphi) \tag{3.9}$$

olmaktadır. Denklem 3.6'da verilen kısmi diferansiyel denklem iki farklı diferansiyel denkleme ayrılmış oldu. 3.8'deki denklem Schrödinger denkleminin radyal kısmını, 3.9'daki denklem de açıya bağlı kısmını tanımlamaktadır.

Denklem 3.9'da köşeli parantezdeki ifade operatör özdeğer denklemine benzemektedir (Karaoğlu, 1998, s.107). Bu ifade L^2 açısal momentum operatörünün özdeğer denklemi olarak yazılabilir. L^2 operatörü

$$L^2 = -\hbar^2\left[\left(\frac{1}{sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\right) + \frac{1}{sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2}\right] \tag{3.10}$$

olarak tanımlanır. 3.10 denklemindeki köşeli parantezin içindeki ifade, denklem 3.9'daki ifade ile aynıdır. Buradan L^2 operatörünün özdeğer denklemi;

$$L^2 Y_{l,m}(\theta,\varphi) = l(l+1)\hbar^2 Y_{l,m}(\theta,\varphi) \tag{3.11}$$

bulunur. Buradan λ sabiti,

$$\lambda = l(l+1) \tag{3.12}$$

elde edildiği görülmektedir. λ sabiti değerini denklem 3.9'da yerine yazdığımızda;

$$-\left[\frac{1}{sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(sin\theta\,\frac{\partial Y_{l,m}(\theta,\varphi)}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{sin^2\theta}\frac{\partial^2 Y_{l,m}(\theta,\varphi)}{\partial\varphi^2}\right] = l(l+1)Y_{l,m}(\theta,\varphi) \tag{3.13}$$

olur. Bu denklemin çözümü $Y_{l,m}(\theta,\varphi)$ 'dir. Hesaplamalarda kullanılacak birkaç $Y_{l,m}$ özfoksiyon listesi aşağıda listelenir.

$$Y_{0,0} = \sqrt{\frac{1}{4\pi}}$$

$$Y_{1,0} = \sqrt{\frac{3}{4\pi}}\,cos\theta$$

$$Y_{2,0} = \sqrt{\frac{5}{16\pi}}\,(3cos^2\theta - 1) \tag{3.14}$$

$$Y_{3,0} = \sqrt{\frac{7}{16\pi}}\,(5cos^3\theta - 3cos\theta)$$

Denklem 3.8'de λ yerine denklem 3.12'deki değeri yazıldığında,

$$\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{dR_l(r)}{dr}\right)+\frac{2m^*r^2}{\hbar^2}\left[E_{nl}-V(r)\right]R_l(r)=l(l+1)R_l(r) \tag{3.15}$$

eşitliği olur ve bu eşitlik düzenlenirse,

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m^*}\left(\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{d}{dr}\right)\right)+\frac{l(l+1)\hbar^2}{2m^*r^2}+V(r)\right]R_l(r)=E_{nl}R_l(r) \tag{3.16}$$

radyal kısmın diferansiyel denklemini elde ederiz. Çalışmada farklı potansiyellere sahip çok katmanlı küresel kuantum noktasının radyal diferansiyel denklemi çözülüp, enerjisi ve radyal fonksiyonları hesaplanır. Çok katmanlı küresel kuantum noktası olarak iki yapı bu çalışmada tanımlanır. Bölüm 2'de şematik şekilleri verilen yapılardan bir basamaklı çok katmalı sonsuz küresel kuantum noktasının $V(r)$ potansiyel enerjisi;

$$V(r)=\begin{cases}0, & 0<r\le R_1\\ V_0, & R_1<r\le 2R_1\\ \infty, & r>2R_1\end{cases} \tag{3.17}$$

olarak tanımlanır. İkinci yapı olan iki basamaklı çok katmanlı sonsuz kuantum noktasının potansiyel enerjisi

$$V(r)=\begin{cases}0, & 0<r\le R_1\\ V_0, & R_1<r\le 2R_1\\ 2V_0, & 2R_1<r\le 3R_1\\ \infty, & r>3R_1\end{cases} \tag{3.18}$$

olur. 3.16'daki denklemi, Rydberg birim sisteminde etkin Bohr yarıçapı $a^*=\frac{\varepsilon\hbar^2}{m^*e^2}$ ve etkin Rydberg enerjisi $R^*=\frac{m^*e^4}{2\hbar^2\varepsilon^2}$ tanımları kullanılarak,

$$\left[\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{dR_l(r)}{dr}\right)\right]+\left[E_{nl}-V(r)-\frac{l(l+1)}{r^2}\right]R_l(r)=0 \tag{3.19}$$

yazılır. Bu çalışmada tanımlanan çok katmanlı küresel kuantum noktalarda kullanılan $GaAs$ ve $Al_xGa_{1-x}As$ yarı iletken malzemenin, her bölgesinde etkin kütle ve dielektrik sabitleri eşit alınmıştır. Etkin Rydberg enerji birimi $R^* \cong 5{,}25\, meV$ ve etkin Bohr yarıçapı $a^* \cong 105\text{Å}$ değerlerindedir. Denklem 3.19'a aşağıdaki işlemler

$$\frac{1}{r^2}\left[2r\frac{dR_l(r)}{dr} + r^2\frac{d^2R_l(r)}{dr^2}\right] + \left[E_{nl} - V(r) - \frac{l(l+1)}{r^2}\right]R_l(r) = 0$$

$$\frac{2}{r}\frac{dR_l(r)}{dr} + \frac{d^2R_l(r)}{dr^2} + \left[E_{nl} - V(r) - \frac{l(l+1)}{r^2}\right]R_l(r) = 0 \qquad (3.20)$$

$$\frac{d^2R_l(r)}{dr^2} + \frac{2}{r}\frac{dR_l(r)}{dr} + \left[E_{nl} - V(r) - \frac{l(l+1)}{r^2}\right]R_l(r) = 0$$

yapılır. Bu denklemin çözümde, ayrıntılı olarak Boz ve arkadaşlarının (Boz F.K., 2005, Aktas vd., 2005, Boz F.K. vd., 2016) çalışmalarında anlatılan, dördüncü derece Runge-Kutta nümerik yöntemi kullanılmıştır. Bu nümerik hesaplamanın küresel kuantum noktalarına uygulanabilmesi için aşağıda verilen dönüşümler yapılmaktadır.

$$Y1 = R_l(r)$$

$$Y2 = \frac{dR_l(r)}{dr} \qquad (3.21)$$

Bu dönüşümler denklem 3.20'de kullanılarak;

$$\frac{dY1}{dr} = Y2 \qquad (3.22)$$

$$\frac{dY2}{dr} + \frac{2}{r}Y2 + \left[E_{nl} - V(r) - \frac{l(l+1)}{r^2}\right]Y1 = 0$$

şeklinde birbirine bağlı birinci derece diferansiyel denkleme dönüşmektedir. Bu diferansiyel denklemlere dördüncü derece Runge-Kutta metodu uygulanarak elde edilecek çözümler;

$$Y1_{i+1} = Y1_i + h\left[\frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4)\right] \tag{3.23}$$

$$Y2_{i+1} = Y2_i + h\left[\frac{1}{6}(L_1 + 2L_2 + 2L_3 + L_4)\right]$$

olmaktadır. Bu denklemdeki katsayılar

$$K_1 = F1(r, Y1, Y2, E_{nl}, R, V)$$

$$L_1 = F2(r, Y1, Y2, E_{nl}, R, V)$$

$$K_2 = F1(r + {}^{h}/_{2}, Y1 + {}^{K_1}/_{2}, Y2 + {}^{L_1}/_{2}, E_{nl}, R, V)$$

$$L_2 = F2(r + {}^{h}/_{2}, Y1 + {}^{K_1}/_{2}, Y2 + {}^{L_1}/_{2}, E_{nl}, R, V) \tag{3.24}$$

$$K_3 = F1(r + {}^{h}/_{2}, Y1 + {}^{K_2}/_{2}, Y2 + {}^{L_2}/_{2}, E_{nl}, R, V)$$

$$L_3 = F2(r + {}^{h}/_{2}, Y1 + {}^{K_2}/_{2}, Y2 + {}^{L_2}/_{2}, E_{nl}, R, V)$$

$$K_4 = F1(r + h, Y1 + K_3, Y2 + L_3, E_{nl}, R, V)$$

$$L_4 = F2(r + h, Y1 + K_3, Y2 + L_3, E_{nl}, R, V)$$

olarak tanımlanır. Bu katsayılardaki F1 ve F2 fonksiyonları,

$$F1 = Y2 \tag{3.25}$$

$$F2 = -[(2Y2)/r] + [V(r) - E_{nl} + (l\,(l+1)/r^2)]Y1$$

şeklinde tanımlanır. Bu yöntem kullanılarak $l = 0,1,2,3$ değerleri için, 1s, 1p, 1d, 1f, 2s, 2p, 2d, 2f durumlarında elektronun radyal dalga fonksiyonu ve enerjisi hesaplanmaktadır (Demirtaş, 2015).

3.2. Çok Katmanlı Sonsuz Küresel Kuantum Noktasındaki Safsızlığın Olduğu Durum İçin Dalga Fonksiyonunun ve Enerji Değerlerinin Hesaplanması

Safsızlık atomunun $r_i = 0$ konumunda olduğu çok katmanlı sonsuz küresel kuantum noktasının Rydberg birim sisteminde Hamiltonyeni;

$$H_i = -\nabla^2 - \frac{2}{r} + V(r) \tag{3.26}$$

olmaktadır. Bu denklemin çözümü için de safsızlık atomu olmayan sistemdeki gibi yol izlenir. Denklem 3.26'daki Hamiltonyen kullanılarak elde edilen zamandan bağımsız Schrödinger denklemi

$$-\left(\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2 sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r^2 sin\theta}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(sin\theta\frac{\partial}{\partial \theta}\right)\right)\psi_{imp}(r,\theta,\varphi) -$$
$$\frac{2}{r}\psi_{imp}(r,\theta,\varphi) + V(r)\psi_{imp}(r,\theta,\varphi) = E_{nli}\psi_{imp}(r,\theta,\varphi) \tag{3.27}$$

olur. Bu denklemin çözümünde, dalga fonksiyonu bir önceki bölümdeki gibi

$$\psi_{imp}(r,\theta,\varphi) = R_{li}(r)Y_{l,m}(\theta,\varphi) \tag{3.28}$$

değişkenlerine ayrılmış şekilde yazılır. Bu dalga fonksiyonunu denklem 3.27'ye uygularsak, Schrödinger denklemi aşağıdaki gibi yazılır;

$$-\left[\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2 sin\theta}\frac{\partial}{\partial \theta}.\left(sin\theta\frac{\partial}{\partial \theta}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{1}{sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}\right]R_{li}(r)Y_{l,m}(\theta,\varphi) -$$
$$\frac{2}{r}R_{li}(r)Y_{l,m}(\theta,\varphi) + V(r)R_{li}(r)Y_{l,m}(\theta,\varphi) = E_{nl}Y_{l,m}(\theta,\varphi). \tag{3.29}$$

Bu denklem de düzenlenip, $R_{li}(r)Y_{l,m}(\theta,\varphi)$ terimine bölünürse; denklemin iki tarafını λ sabitine eşitlenirse;

$$\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{dR_{li}(r)}{dr}\right)+r^2\left[E_{nli}+\frac{2}{r}-V(r)\right]R_l(r)=\lambda R_{li}(r) \tag{3.30}$$

ve

$$\left[-\frac{1}{sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(sin\theta\frac{\partial}{\partial\theta}\right)-\frac{1}{sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2}\right]Y_{l,m}(\theta,\varphi)=\lambda Y_{l,m}(\theta,\varphi) \tag{3.31}$$

denklemleri elde edilir. Dikkat edilirse açısal kısmın denklemi denklem 3.9 ile aynıdır. Bu yüzden denklem 3.9'un çözümleri burada geçerlidir. Fakat safsızlık atomunun $r_i=0$ konumunda olduğu durumda radyal denklem;

$$\frac{d^2R_{li}(r)}{dr^2}+\frac{2}{r}\frac{dR_{li}(r)}{dr}+\left[E_{nli}+\frac{2}{r}-V(r)-\frac{l(l+1)}{r^2}\right]R_{li}(r)=0 \tag{3.32}$$

olur. 3.32'deki denklemin çözümünde de 4.derece Runge-Kutta nümerik yöntemi kullanılır. Bu yöntemi kullanırken;

$$Y1=R_{li}(r)$$

$$Y2=\frac{dR_{li}(r)}{dr} \tag{3.33}$$

dönüşümleri yapılır.

$$\frac{dY1}{dr}=Y2$$

$$\frac{dY2}{dr}+\frac{2}{r}Y2+\left[E_{nli}-V(r)+\frac{2}{r}-\frac{l(l+1)}{r^2}\right]Y1=0 \tag{3.34}$$

3.32'deki denklemden 3.34'de yazılan iki diferansiyel denklem elde edilir. Safsızlık atomunun olmadığı bölümde izlenen yolla hesaplamalara devam edilir. Sadece katsayılardaki denklemlerde E_{nl} yerine E_{nli} alınır ve F1, F2 fonksiyonları

$$F1 = Y2 \tag{3.35}$$

$$F2 = -[(2Y2)/r] + \left[V(r) - E_{nli} - \frac{2}{r} + (l\,(l+1)/r^2)\right] Y1$$

olarak tanımlanır $l = 0, 1, 2, 3$ değerleri için, 1si, 1pi, 1di, 1fi, 2si, 2pi, 2di, 2fi durumlarında safsızlık atomu olan yapının radyal dalga fonksiyonu ve enerjisi hesaplanmaktadır (Demirtaş, 2015).

3.3. Çok Katmalı Sonsuz Küresel Kuantum Noktasının Merkezinde Yer Alan Safsızlık Atomunun Bağlanma Enerjisi

Çok katmanlı sonsuz küresel kuantum noktasının merkezinde yer alan safsızlık atomu ile elektron arasındaki bağlanma enerjisi, kuantum yapıda safsızlık atomu olmadığı durumdaki enerjiden safsızlık atomu mevcut olduğu durumdaki enerjinin çıkarılmasıyla elde edilir.

$$E_B = E_{nl} - E_{nli} \tag{3.36}$$

Tezde çalışılan kuantum noktalarının 1s, 1p, 1d, 1f, 2s, 2p, 2d, 2f durumlarının bağlanma enerjileri

$$E_B = E_{1s} - E_{1si} \tag{3.37}$$

denklem 3.37'de gösterildiği gibi hesaplanır.

3.4. Çok Katmanlı Sonsuz Küresel Kuantum Noktasının Toplam Optik Absorbsiyon Katsayılarının Hesapları

Kırılma indisi, yansıma katsayısı gibi optik güçten bağımsız olarak kabul edilen özellikler lineer optiğin alanına girmektedir. Lineer olmayan optik ışık madde etkileşimleriyle ilgilidir. Işık elektron yörüngelerinin dış kabuklarındaki değerlik elektronları yoluyla madde ile etkileşir ve bu olay lineer olmayan optiğin temel parametresidir (Fox, 2014). Lineer olmayan optiğin açıklanabilmesi için bir malzeme sisteminin kutuplanmasıyla elektrik alan arasındaki ilişkiden yararlanır. Bir elektromanyetik alanın elektrik alan vektörü

$$E(t) = \vec{E}e^{i\omega t} + \vec{E}e^{-i\omega t} \tag{3.38}$$

şeklindedir. Lineer optikte kutuplanma ifadesi;

$$P(t) = \varepsilon_0 \, \chi^{(1)} E(t) \tag{3.39}$$

olarak verilmektedir. Bu formülde, boş uzayın geçirgenliği ε_0 , $\chi^{(1)}$ terimi de lineer alınganlık ifadeleridir. Denklem kutuplanmanın optiksel elektrik alana bağlı olduğunu göstermektedir. Lineer olmayan optikte ise,

$$P(t) = E_0\left[\chi^{(1)}E^1(t) + \chi^{(2)}E^2(t) + \chi^{(3)}E^3(t) + \cdots\right] \tag{3.40}$$

yukarıda gösterildiği gibi kutuplanma elektrik alanın kuvvet serisiyle tanımlanır. Bu denklemdeki terimler sırasıyla $\chi^{(2)}$ ve $\chi^{(3)}$ikinci ve üçüncü dereceden lineer olmayan optik alınganlıklardır. Denklemden 3.40'tan görüldüğü gibi gelen ışığın şiddeti zayıf olduğunda lineer kutuplanma baskın olmaktadır. Fakat ışık şiddeti güçlü olduğu durumlarda, örneğin lazer ışığı gibi lineer kutuplanmaya ek olarak yüksek dereceden lineer olmayan kutuplanma etkileri görülmektedir. Bilim insanları optik kutuplanma ifadesinin lineer kısmından ziyade daha çok lineer olmayan kısmıyla ilgilenmişlerdir.

Lineer olmayan kısımda kırılma indisi ve absorbsiyon katsayısının ışığın şiddetine (I) bağlı olması ve frekans kaynağa bağlı olmaktan çıkıp farklı frekanslar elde edilmesinin mümkün olmasından dolayı ilgi uyandırmaktadır (Bekâr, 2018). Tek renk için ve tek boyutta uygulanan elektrik alan

$$E(t) = E_0 cos\omega t \tag{3.41}$$

olarak uygulandığında kutuplanma;

$$P(t) = \varepsilon_0 \left[\chi^{(1)} E_0 cos\omega t + \chi^{(2)} (E_0 cos\omega t)^2 + \chi^{(3)} (E_0 cos\omega t)^3\right] \tag{3.42}$$

olur. Trigonometrik fonksiyonlar formüle dahil edildiğinde ilk dört terimi için aşağıdaki sonuç bulunur.

$$P(t) = \frac{1}{2}\chi^{(2)} {E_0}^2 + \left(\chi^{(1)} E_0 + \frac{3}{4}\chi^{(3)} {E_0}^3\right) cos\omega t + \frac{1}{2}\chi^{(2)} {E_0}^2 cos2\omega t + \frac{1}{4}\chi^{(3)} {E_0}^3 cos3\omega t \tag{3.43}$$

Polarizasyon denklemi 3.43'teki sağdaki birinci terim frekanstan bağımsızdır. İkinci terim, uygulanan alanın frekansına bağlıdır. Üçüncü terim ikinci harmonik üretimde uygulanan alanın iki katı büyüklüğünde enerjiye sahip bir radyasyon üretiminde kullanılır. Son terim ise uygulanan alanın üç katı büyüklükte bir enerjiye sahip radyasyon üretiminde kullanılır (Bekâr, 2018). Bu denklemde verilen optiksel alınganlık ifadelerine kuantum mekaniğinin yoğunlık matris formülasyonu uygulanarak aşağıda sırasıyla verilen birinci dereceden alınganlık ifadesi ve üçüncü dereceden alınganlık ifadeleri elde edilir (Gül, 2014, Kirak vd., 2013).

$$\varepsilon_0 \chi^{(1)}(\omega) = \sigma \frac{|M_{if}|^2}{(E_{if} - \hbar\omega - i\hbar\Gamma_{if})} \tag{3.44}$$

ve

$$\varepsilon_0\chi^{(3)}(\omega) = -\frac{\sigma}{2c\varepsilon_0 n_r}\frac{I|M_{if}|^2}{(E_{if}-\hbar\omega-i\hbar\Gamma_{if})}\frac{4|M_{if}|^2}{(E_{if}-\hbar\omega)^2+(i\hbar\Gamma_{if})^2}-\frac{|M_{ff}-M_{ii}|^2}{(E_{if}-i\hbar\Gamma_{if})(E_{if}-\hbar\omega-i\hbar\Gamma_{if})} \quad (3.45)$$

Bulunan birinci derece ve üçüncü derece alınganlık ifadelerindeki denklemlerde; ε_0 elektrik sabiti, c boşluktaki ışık hızı, σ elektron yoğunluğu, n_r yarı iletken materyalin kırılma indisi, I ışığın optik yoğunluğu, $\hbar\omega$ foton enerjisi, Γ_{if} gevşeme süresi, $E_{fi} = E_f - E_i$ son ve ilk durumlar arasındaki enerji farkı olarak tanımlanır. $\hbar\omega \geq E_{fi}$ enerjili bir foton absorblandığında E_f ve E_i enerjili farklı elektronik durumlar arasında optik geçiş meydana gelmektedir (Al E. B., 2020). Enerji korunumu kuralına göre soğurma spektrumundaki her geçiş gerçekte gözlenmez. Enerjinin korunumu ile açısal momentum korunumu ve bazı simetri kuralları da sağlanmalıdır. Küresel kuantum noktalarında küresel harmoniklerin özelliğinden sadece $\Delta l = \pm 1$ ve $\Delta m = 0, \pm 1$ seçim kurallarını karşılayan durumlar arasında dipol geçişleri izinlidir (Al E. B., 2020). Bu çalışmada $\Delta l = \pm 1$ ve $\Delta m = 0$ seçim kurallarını karşılayan durumlar arasındaki geçişler çalışılmıştır. Dipol geçişleri elektromanyetik radyasyonun z ekseni boyunca polarize olduğunu varsayarak, M_{if} ise son ve ilk durumlar arasındaki dipol geçiş matris elemanı olarak tanımlanmaktadır.

$$M_{if} = \left| e\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}\int_0^{\infty}\Psi_f(r,\theta,\varphi)\, r\cos\theta\, \Psi_i\,(r,\theta,\varphi)\, r^2\, dr\sin\theta\, d\theta d\varphi \right|. \quad (3.46)$$

Birinci derece lineer ve üçüncü derece lineer olmayan optik absorbsiyon katsayıları bu alınganlıklara bağlı şekilde;

$$\alpha(\omega) = \frac{\omega}{cn_r} Im\big(\chi(\omega)\big) \quad (3.47)$$

eşitliğinden

$$\alpha^1(\omega) = \frac{\sigma}{2c\varepsilon_0 n_r} \frac{\hbar\omega|M_{if}|^2 \Gamma_{if}}{\left(E_{if}-\hbar\omega\right)^2+\left(\hbar\Gamma_{if}\right)^2} \tag{3.48}$$

ve

$$\alpha^3(\omega, I) = -\frac{2\sigma}{(c\varepsilon_0 n_r)^2} \frac{I\hbar\omega|M_{if}|^4 \Gamma_{if}}{\left[\left(E_{if}-\hbar\omega\right)^2+\left(\hbar\Gamma_{if}\right)^2\right]^2} \tag{3.49}$$

olur. Simetrik geometrik yapıya sahip kuantum yapılarda yüksek dereceli harmonik terimler ihmal edilir ve toplam absorbsiyon katsayısı $\alpha(\omega, I)$ (Al, 2021, Bekâr, 2018, Çakır vd., 2010);

$$\alpha(\omega, I) = \alpha^1(\omega) + \alpha^3(\omega, I) \tag{3.50}$$

olarak bulunur.

BÖLÜM 4

ÇOK KATMANLI SONSUZ KÜRESEL KUANTUM NOKTALARININ ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNE SINIRLAYICI POTANSİYEL ETKİSİ

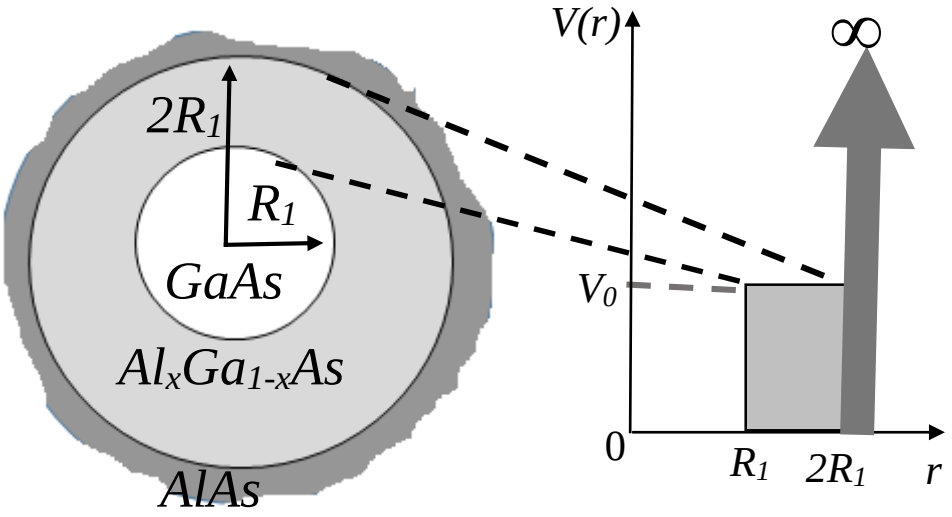
Çok katmanlı sonsuz küresel kuantum noktalarının potansiyel yapılarına göre elektronik özellikleri, bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktası ve iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktası şeklinde iki kısımda incelenir. Bu çalışmadaki küresel kuantum noktaları için kullanılan GaAs ve $Al_xGa_{1-x}As$ yarıiletken malzemeleri, her bölgede etkin kütle ve dielektrik sabitleri eşit alınmıştır. Bu yapıda materyal parametreleri m_{GaAs}=0,0665m_0 ve $\varepsilon_{GaAs} = 13.18$ değerlerindedir (Yılmazer vd., 2017). Hesaplamalarda Rydberg enerji birimi $R^* \cong 5{,}25\, meV$ ve Bohr yarıçapı $\alpha^* \cong 105$Å değerlerinde alınmıştır.

4.1. Bir Basamaklı Sonsuz Küresel Kuantum Noktalarının Sınırlayıcı Potansiyel ve Basamak Kalınlıklarına Bağlı Elektronik Özellikleri

Bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasının potansiyel profili ile şematik gösterimi şekil 4.1' de verilir. Bu kuantum noktasının potansiyel enerjisi;

$$V(r) = \begin{cases} 0, & 0 < r \leq R_1 \\ V_0, & R_1 < r \leq 2R_1 \\ \infty, & r > 2R_1 \end{cases} \quad (4.1)$$

olarak tanımlanır.

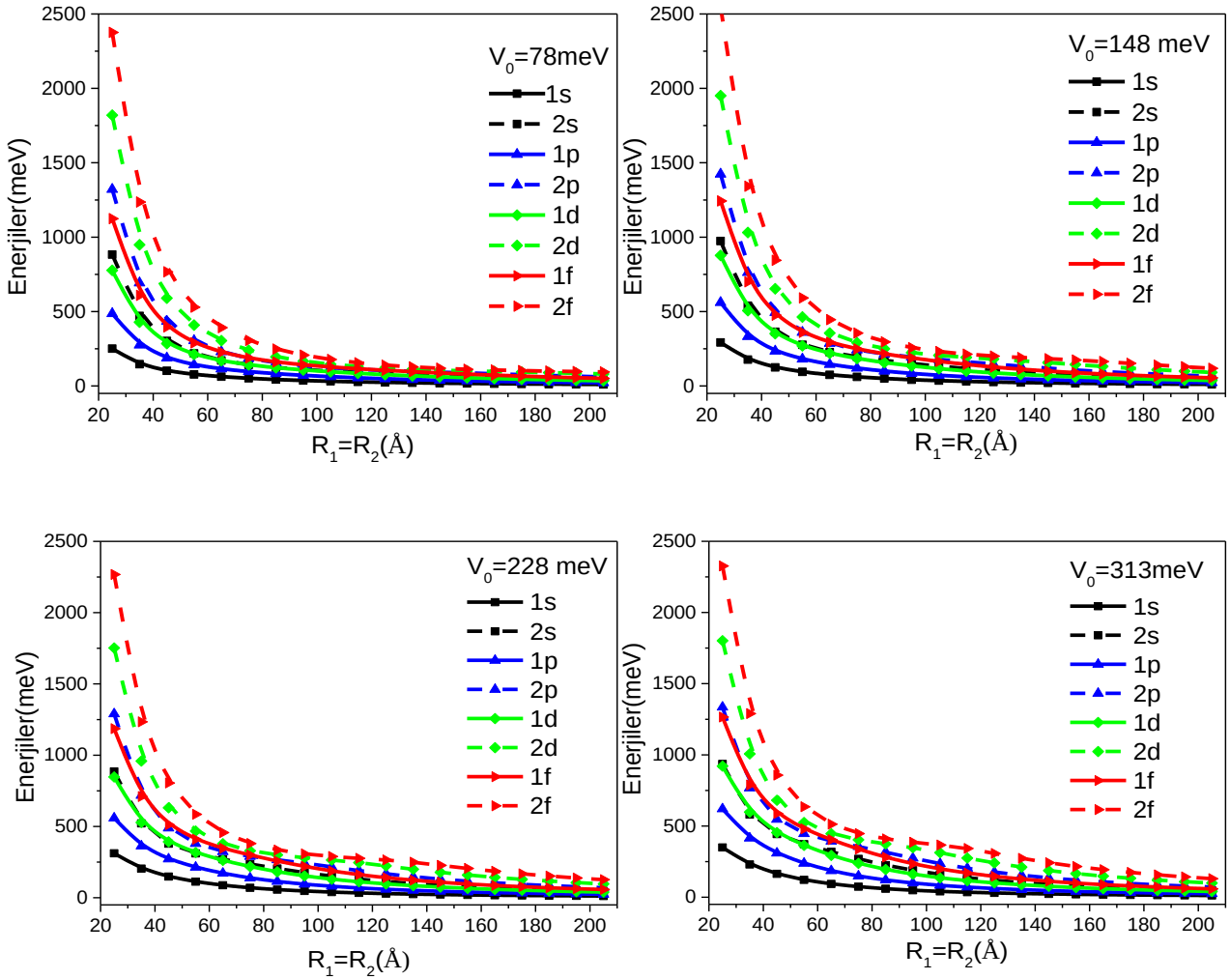


Şekil 4.1. Bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktası ve potansiyel profilinin şematik gösterimi.

Bu potansiyel enerji kullanılarak aşağıdaki radyal Schrödinger denklemi,

$$\left[\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{dR_l(r)}{dr}\right)\right] + \left[E_{nl} - V(r) - \frac{l(l+1)}{r^2}\right]R_l(r) = 0 \quad (4.2)$$

üçüncü bölümde açıklanan 4.derece Runge-Kutta metodu kullanılarak 1s, 1p, 1d, 1f, 2s, 2p, 2d, 2f durumlarının enerjileri ve dalga fonksiyonları hesaplanır. Şekillerde GaAs malzemesinin yarıçapı R_1 ve R_2, $Al_xGa_{1-x}As$ tabakasının kalınlığı olarak tanımlanır ve $R_2=2R_1-R_1=R_1$ olarak basamak kalınlıkları hesaplanır.



Şekil 4.2. Farklı potansiyel sınırlayıcı değerleri için bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasındaki 1s, 1p, 1d, 1f, 2s, 2p, 2d, 2f durumlarının enerjilerinin tabaka kalınlıklarına göre değişimi**.**

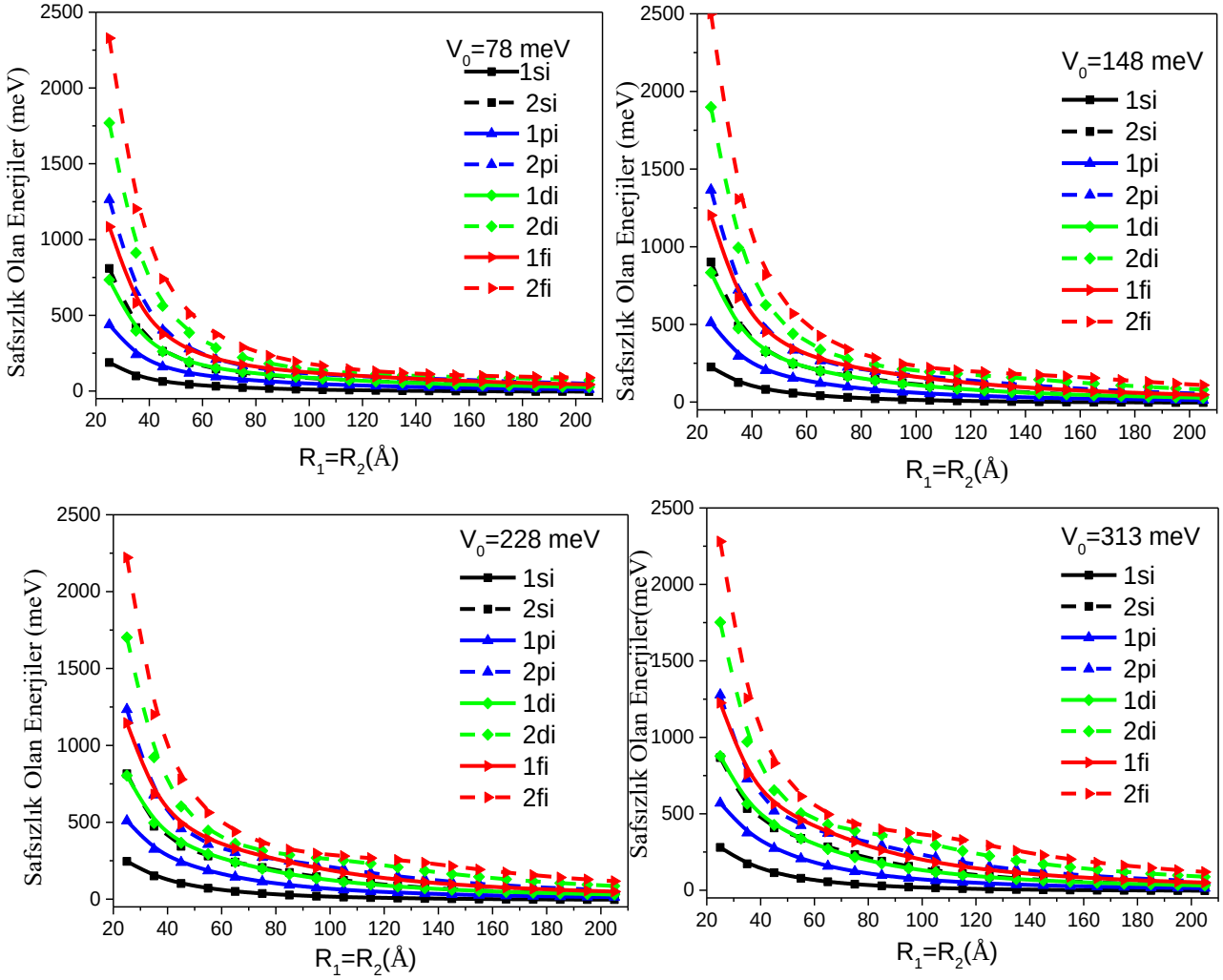
V_0'ın dört farklı değeri için eşit basamak kalınlıklarına bağlı olarak, 1s, 1p, 1d, 1f, 2s, 2p, 2d, 2f durumlarının enerjileri şekil 4.2'de sunulmaktadır. Bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasının farklı tüm potansiyel değerlerinde enerji seviyelerinin basamak kalınlıklarının büyük değerlerine gidildikçe azalma gösterdiği görülür ve belli bir kalınlık değerinden sonra sabit kalır. İkinci bölgenin potansiyel enerji değeri arttıkça enerjiler arasındaki farklar da artmaktadır.

Yapıda, safsızlık atomunun $r_i = 0$ konumunda yer aldığı, Rydberg birim sisteminde bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasının radyal Schrödinger denklemi;

$$\frac{d^2R_l(r)}{dr^2} + \frac{2}{r}\frac{dR_l(r)}{dr} + \left[E_{nli} + \frac{2}{r} - V(r) - \frac{l(l+1)}{r^2}\right] R_l(r) = 0 \qquad (4.3)$$

olmaktadır. Bu denklem de 4.derece Runge-Kutta nümerik yöntemi kullanılarak 1si, 1pi, 1di, 1fi, 2si, 2pi, 2di, 2fi durumlarının enerjileri ve dalga fonksiyonları hesaplanır.

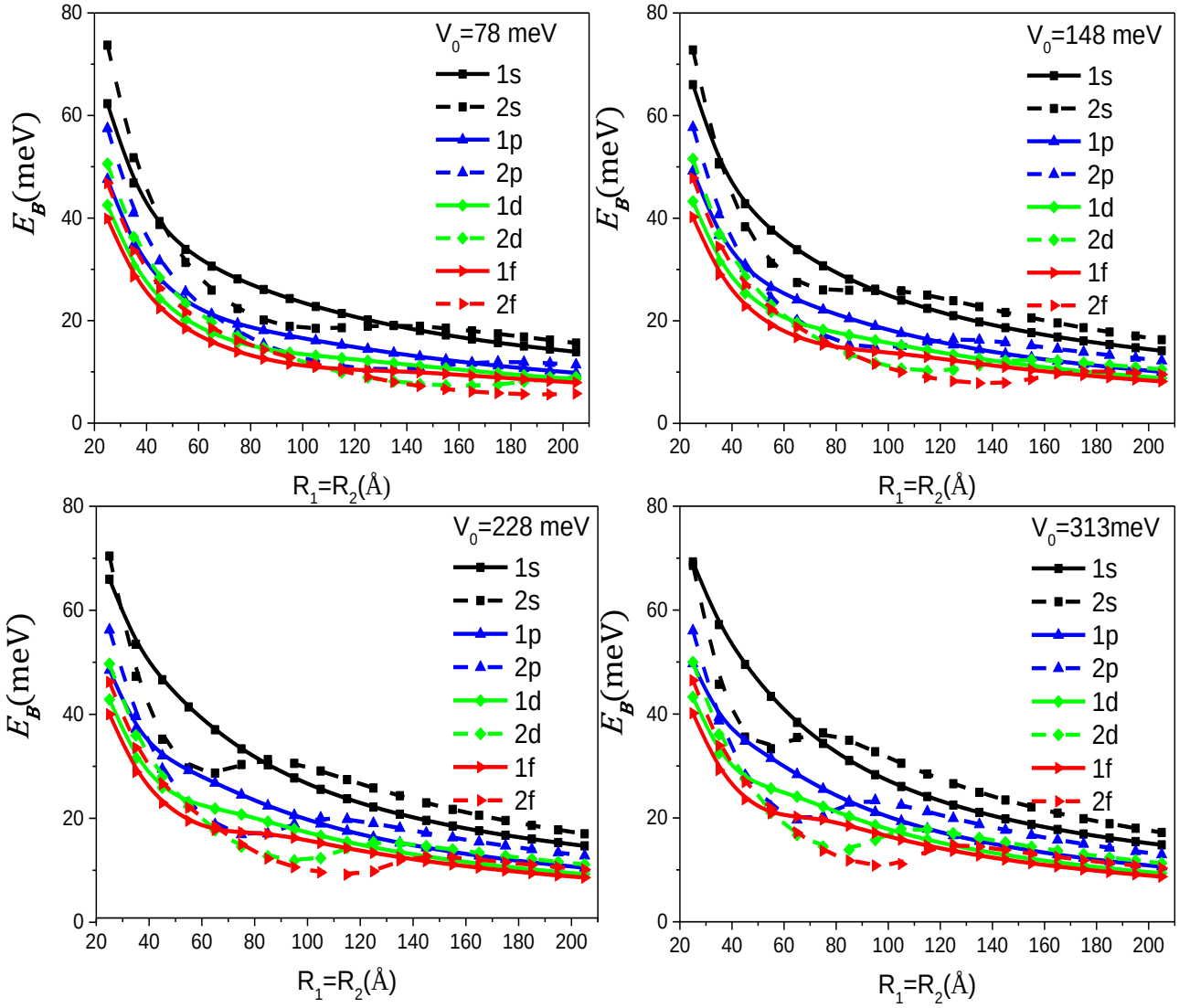
Şekil 4.3 farklı potansiyel sınırlayıcı değerleri için bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasındaki 1si, 1pi, 1di, 1fi, 2si, 2pi, 2di, 2fi durumlarının safsızlık atomu olan enerjilerinin tabaka kalınlıklarına göre değişimlerini vermektedir. Safsızlığın olduğu durumlarda da basamak kalınlığının artmasıyla enerjilerdeki değişimlerin azaldığı görülmüştür. İkinci bölgede sınırlayıcı potansiyel enerjinin artmasıyla şekil 4.2'de gördüğümüz davranışların benzeri bu grafiklerde de görülür. Merkezinde safsızlık atomu bulunan yapıların enerji durumlarının basamak kalınlığın artmasıyla negatif değerleri aldığı görülmektedir.



Şekil 4.3. Farklı potansiyel sınırlayıcı değerleri için bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasındaki 1si, 1pi ,1di, 1fi, 2si, 2pi, 2di, 2fi durumlarının safsızlık atomu olan enerjilerinin tabaka kalınlıklarına göre değişimleri.

Bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasının merkezinde yer alan safsızlık atomunun bağlanma enerjisi, yapıda safsızlık atomu olmadığı durumdaki enerjiden safsızlık atomu mevcut olduğu durumdaki enerjinin çıkarılmasıyla bölüm 3'te tanımlanan denklem 3.36'dan elde edilir. Şekil 4.4'te farklı potansiyel sınırlayıcı değerleri için bir basamaklı kuantum noktasındaki 1s, 1p, 1d, 1f, 2s, 2p, 2d, 2f durumlarının bağlanma enerjilerinin tabaka kalınlıklarına göre değişimleri

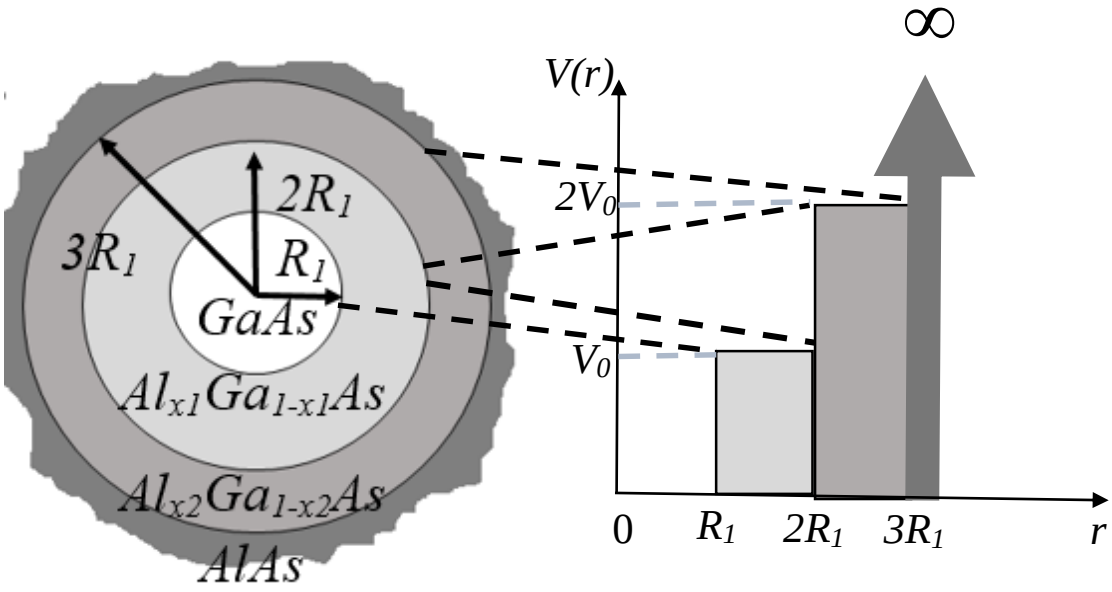
verilmektedir. 1s, 1p, 1d, 1f durumları için bağlanma enerjileri küçük tabaka kalınlıklarında hızlı bir azalma gösterir. Büyük tabaka kalınlıklarında ise enerji değerleri neredeyse sabit olarak kalır. V_0=148 meV, V_0=228 meV ve V_0=313 meV potansiyel sınırlayıcı değerlerinde 2s, 2p, 2d, 2f durumları için bağlanma enerjileri farklılık göstermiştir. Kısıtlayıcı potansiyel enerji arttıkça tüm durumların kritik bir basamak kalınlığı değerine kadar bağlanma enerjisi azalır küçük bir yükseliş yaparak tekrardan azalma yaptığı görülür. V_0=78 meV için ise bu davranış sadece 2s durumunda gözlenmiştir.



Şekil 4.4. Farklı potansiyel değerleri için bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasındaki 1s, 1p, 1d, 1f, 2s, 2p, 2d, 2f durumlarının bağlanma enerjilerinin tabaka kalınlıklarına göre değişimleri.

4.2. İki Basamaklı Sonsuz Küresel Kuantum Noktalarının Sınırlayıcı Potansiyel ve Basamak Kalınlıklarına Bağlı Elektronik Özellikleri

İki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktası, R_1 yarıçaplı GaAs malzemesi, farklı alüminyum konsantrasyonlarına sahip iki $Al_xGa_{1-x}As$ tabakalarıyla sarılır ve son tabakalar AlAs tabakasıyla sarılarak oluşturulmuş şekil 4.5 'te gösterilen yapıdır.

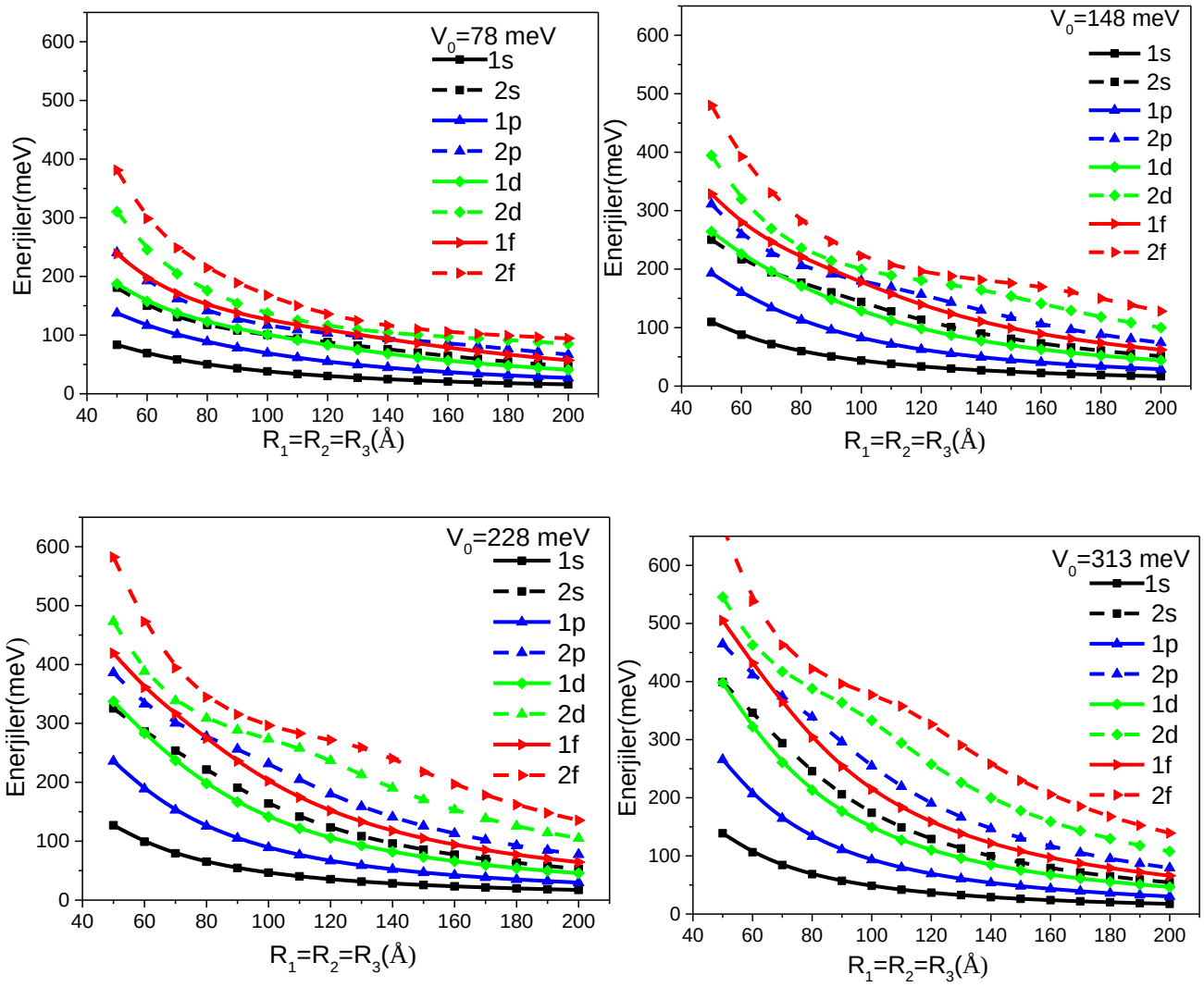


Şekil 4.5. İki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasının ve potansiyel profilinin şematik gösterimi.

İki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasının potansiyel enerjisi;

$$V(r) = \begin{cases} 0, & 0 < r \leq R_1 \\ V_0, & R_1 < r \leq 2R_1 \\ 2V_0, & 2R_1 < r < 3R_1 \\ \infty, & r > 3R_1 \end{cases} \tag{4.3}$$

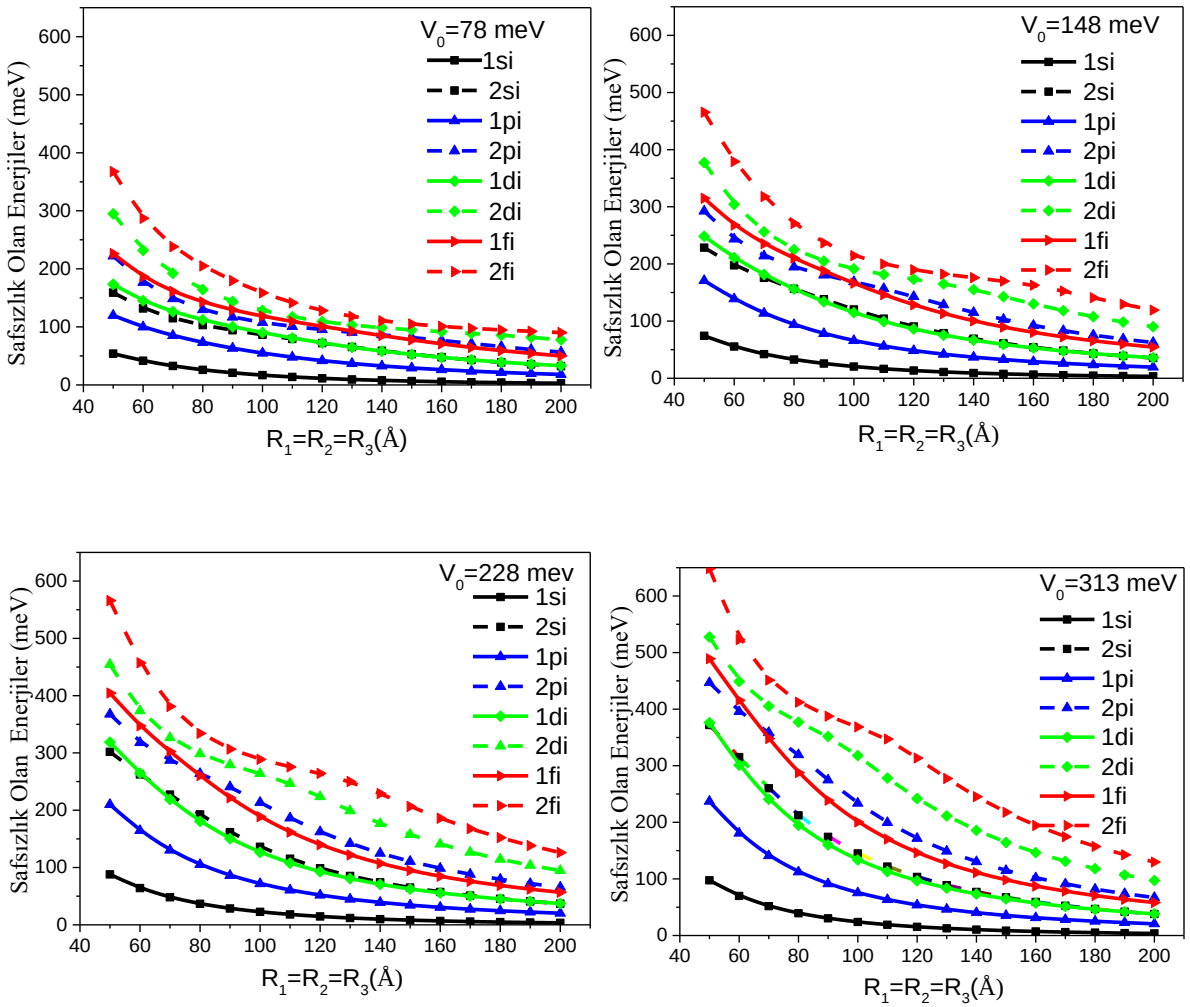
olarak kabul edilir. Bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında çizilen grafikler bu kısımda yukarıdaki potansiyel enerji ifadesi için tekrarlanır.



Şekil 4.6. Farklı potansiyel sınırlayıcı değerleri için iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasındaki 1s, 1p, 1d, 1f, 2s, 2p, 2d, 2f durumlarının enerjilerinin tabaka kalınlıklarına göre değişimleri.

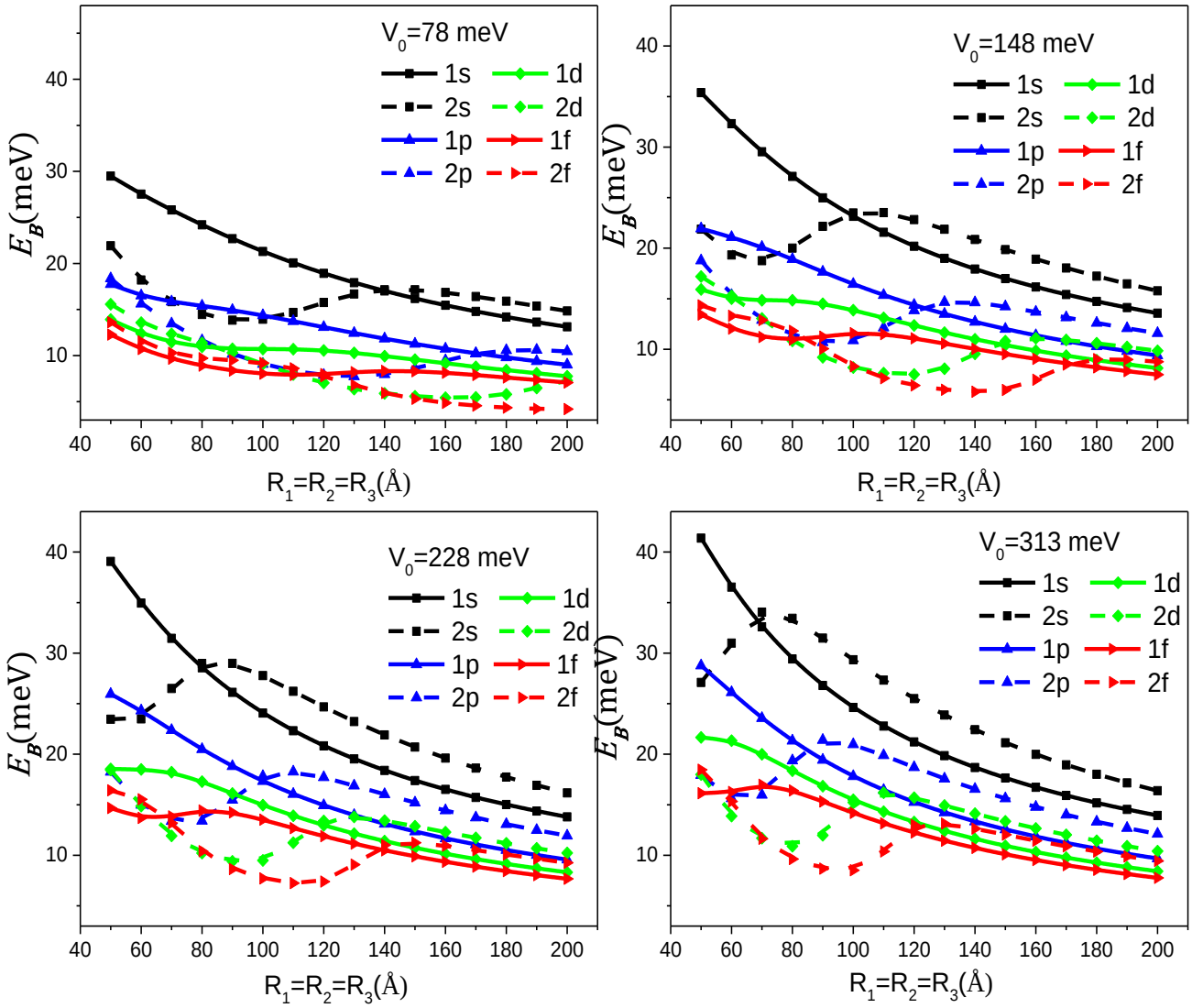
Şekil 4.6'da dört farklı potansiyel sınırlayıcı için tabaka kalınlıklarına bağlı olarak 1s, 1p, 1d, 1f, 2s, 2p, 2d, 2f durumlarının enerjileri hesaplanmış, sonuçları gösterilmiştir. Enerjiler tabaka kalınlıklarının artmasıyla azalma göstermişlerdir. Grafiklerde dikkat çeken noktalar; potansiyel sınırlayıcı değeri arttığında tüm enerji değerlerinin arttığı görülür. Potansiyel sınırlayıcı değeri küçük iken enerjiler arasındaki farkların az olduğudur. Potansiyel sınırlayıcı değeri büyüdükçe enerji durumlarının

farklı davranışlar sergilediği görülmektedir. 2d ve 2f durumları için basamak kalınlığının artmasıyla enerjilerde bir dalgalanma gözlenir.



Şekil 4.7 Farklı potansiyel sınırlayıcı değerleri için iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasındaki 1si, 1pi, 1di, 1fi, 2si, 2pi, 2di, 2fi durumlarının safsızlık atomu olan enerjilerinin tabaka kalınlıklarına göre değişimleri.

Şekil 4.7'de farklı potansiyel sınırlayıcı değerleri için iki basamaklı sonsuz kuantum noktasının tabaka kalınlıklarına bağlı olarak safsızlık olan enerjileri gösterilmiştir. Bu grafiklerdeki davranışlar safsızlığın olmadığı durumlardaki enerji değişimlerine benzerdir.



Şekil 4.7. Farklı potansiyel sınırlayıcı değerleri için iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasındaki 1s, 1p, 1d, 1f, 2s, 2p, 2d, 2f durumlarının bağlanma enerjilerinin tabaka kalınlıklarına göre değişimleri.

Şekil 4.8'de farklı potansiyel sınırlayıcı değerler için iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasının 1s, 1p, 1d, 1f, 2s, 2p, 2d, 2f durumlarının tabaka kalınlıklarına bağlı bağlanma enerjileri verilir. 1s, 1p, 1d, 1f durumları için bağlanma enerjisi basamak kalınlığının artmasıyla azalmaktadır. Fakat 2s, 2p, 2d, 2f durumları için bağlanma enerjisi farklı değişimler göstermektedir. Sınırlayıcı potansiyel 78 meV ve 148 meV değerlerinde iken 2s durumu göz önüne alındığında basamak kalınlığının

artmasıyla bağlanma enerjisinin azaldığını ve kritik bir değerden sonra ise basamak kalınlığına bağlı olarak bir maksimum yaptığını ve büyük tabaka kalınlıklarına doğru giderken azalarak sabit bir değere ulaştığını gözlemlenir. Sınırlayıcı potansiyel 228 meV ve 313 meV olduğunda 2s durumunun bağlanma enerjisinin belli bir kritik basamak kalınlığına kadar arttığını ve bu değerden sonra azalma gösterdiği gözlemlenir. Bu davranışların sebebinin sınırlayıcı potansiyel değerinin olduğu görülmüştür. Diğer durumlarda da böyle davranışlar gözlenir.

Sonuçta bu bölümde bir ve iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasının elektronik özellikleri incelendi. Bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında taban ve bazı uyarılmış durumlarında, safsızlık atomu varken ve yokken enerjilerde keskin azalmalar görülmüş karekteristikleri birbirlerine benzer çıkmıştır. Artan tabaka kalınlıklarında enerjilerin sabit değerlere geldiği görülmüştür. İki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında enerjiler hızlı bir düşüş göstermemiş, artan tabaka kalınlıklarında enerjiler arasındaki farklar açılmıştır. Bağlanma enerjileri karşılaştırıldığında bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktalarındaki durumların bağlanma enerjileri, iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasındakilerden daha büyüktür. Bu durum sınırlayıcı potansiyelin basamak sayısının enerji durumlarını etkilediğini göstermiştir. Bulduğumuz bu sonuçların deneyciler için yol gösterici olacağını düşünmekteyiz.

BÖLÜM 5

ÇOK KATMANLI SONSUZ KÜRESEL KUANTUM NOKTALARININ OPTİK ÖZELLİKLERİNE SINIRLAYICI POTANSİYEL ETKİSİ

Işık madde ile farklı şekillerde etkileşmektedir. Katıhal malzemelerde basitçe; yansıma, ilerleme ve geçme (iletilme) gibi olaylar maddenin optik özelliklerinin incelenmesinde olanak sağlamaktadır (Fox, 2014). 1917 yılında Albert Einstein uyarılmış salma işleminin var olmasını söylemiş fakat 1960 yılında T.H.Maiman yakutta optik frekanslarda bir lazer çalışmayı başararak, fizik biliminde ilgi çekici çalışmalara hız kazandırmıştır (Wilson & Hawkes, 2000, s. 174).

Bu bölümde, bir basamaklı ve iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktalarının optik özelikleri incelenecektir. Bölüm 4'te bu yapılar için enerji ve dalga fonksiyonlarının hesaplamaları yapılmıştır. Bu enerji ve dalga fonksiyonları değerleri kullanılarak toplam absorbsiyon katsayıları bölüm 3'te tanımlanan,

$$\alpha^1(\omega) = \frac{\sigma}{2c\varepsilon_0 n_r} \frac{\hbar\omega |M_{if}|^2 \Gamma_{if}}{\left(E_{if} - \hbar\omega\right)^2 + \left(\hbar\Gamma_{if}\right)^2} \tag{5.1}$$

ve

$$\alpha^3(\omega, I) = -\frac{2\sigma}{(c\varepsilon_0 n_r)^2}\frac{I\hbar\omega|M_{if}|^4\Gamma_{if}}{\left[(E_{if}-\hbar\omega)^2+(\hbar\Gamma_{if})^2\right]^2} \quad (5.2)$$

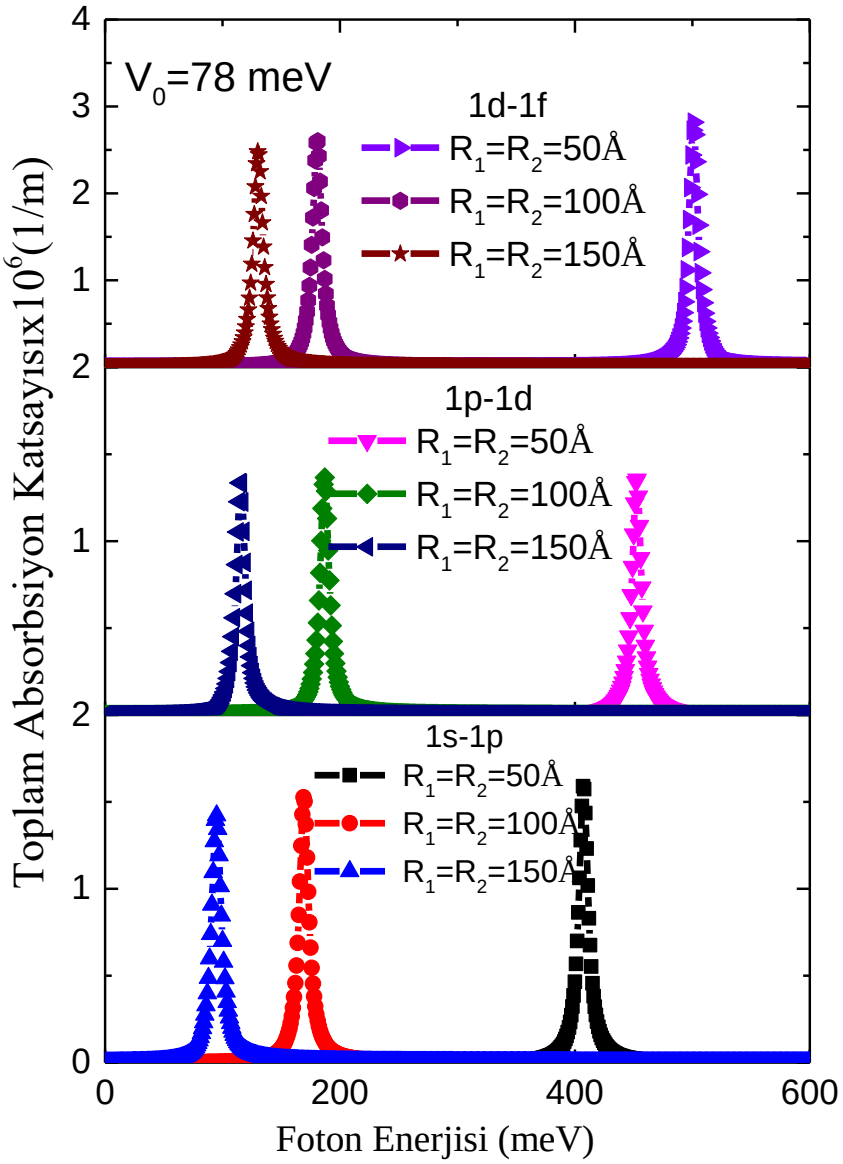
denklemlerinin toplamından

$$\alpha(\omega, I) = \alpha^{(1)}(\omega) + \alpha^{(3)}(\omega, I). \quad (5.3)$$

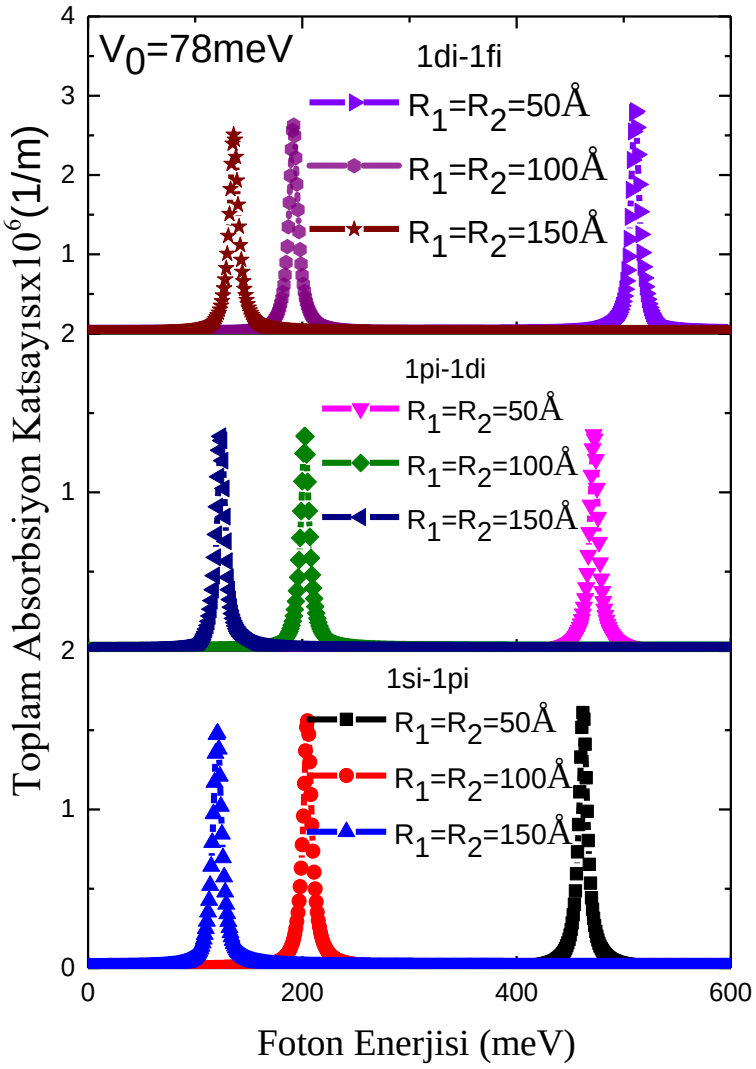
hesaplanır. Hesaplamalarda elektron yoğunluğu σ=3x10^{22} m^{-3}, yarı iletken materyalin kırılma indisi n_r=3.5, gevşeme süresi Γ_{if}=7.14x10^{12}s^{-1}, ışığın optik yoğunluğu I=400MW/m^2 alınır (Al vd., 2020, Kavruk vd., 2014). Grafiklerde kuantum noktasının farklı potansiyel sınırlayıcı değerleri için, 1s-1p, 1p-1d ve 1d-1f geçişlerinin farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisine bağlı toplam absorbsiyon katsayıları gösterilmiştir.

5.1. Bir Basamaklı Sonsuz Küresel Kuantum Noktalarının Toplam Lineer Absorbsiyon Katsayıları

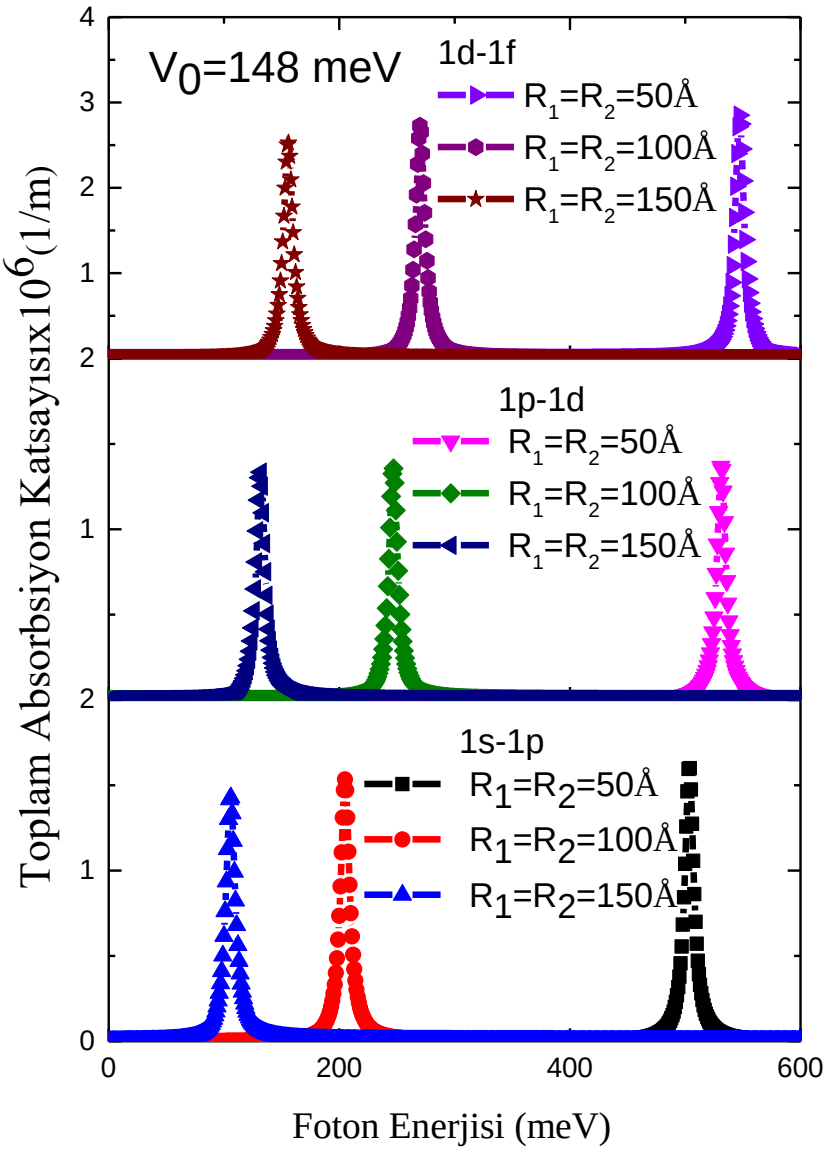
Bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasının farklı potansiyel sınırlayıcı değerleri için, 1s-1p, 1p-1d ve 1d-1f geçişlerinin farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisine bağlı toplam absorbsiyon katsayıları bu bölümde hesaplanmıştır. Şekil 5.1'de safsızlık atomu yokken V_0 =78meV değeri için üç geçişin, foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam absorbsiyon katsayıları değişimi gösterilir. Grafik incelendiğinde tabaka kalınlıklarının artmasıyla tüm geçişler için toplam absorbsiyon,



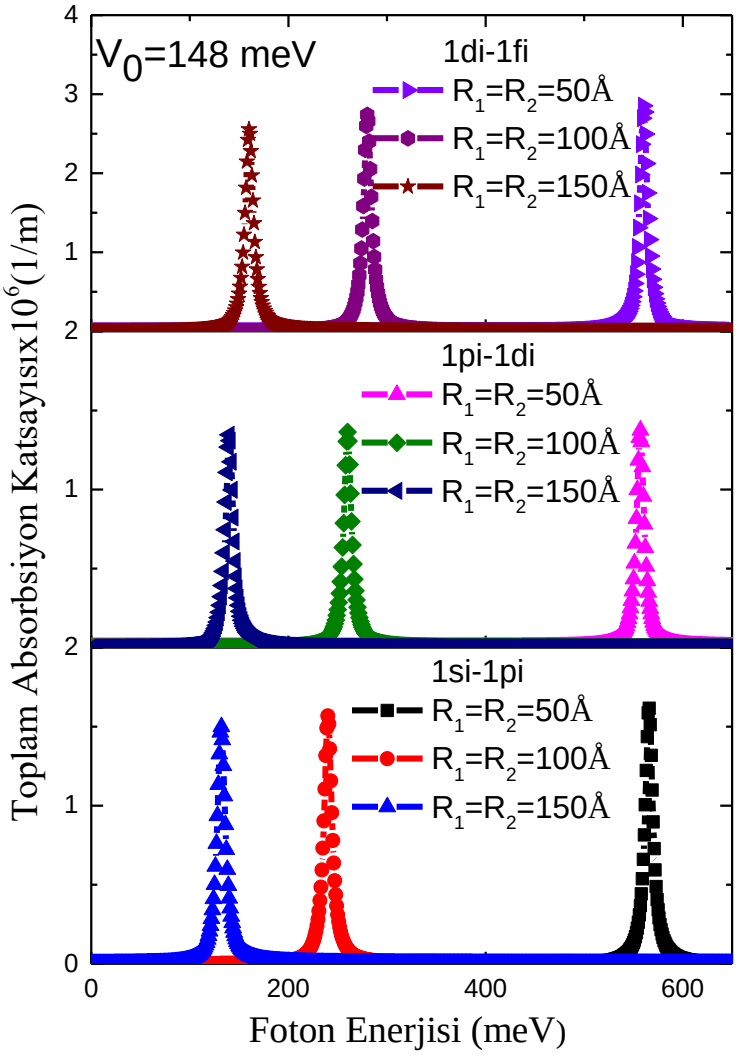
Şekil 5.1. V_0 =78 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam absorbsiyon katsayısı değişimleri.



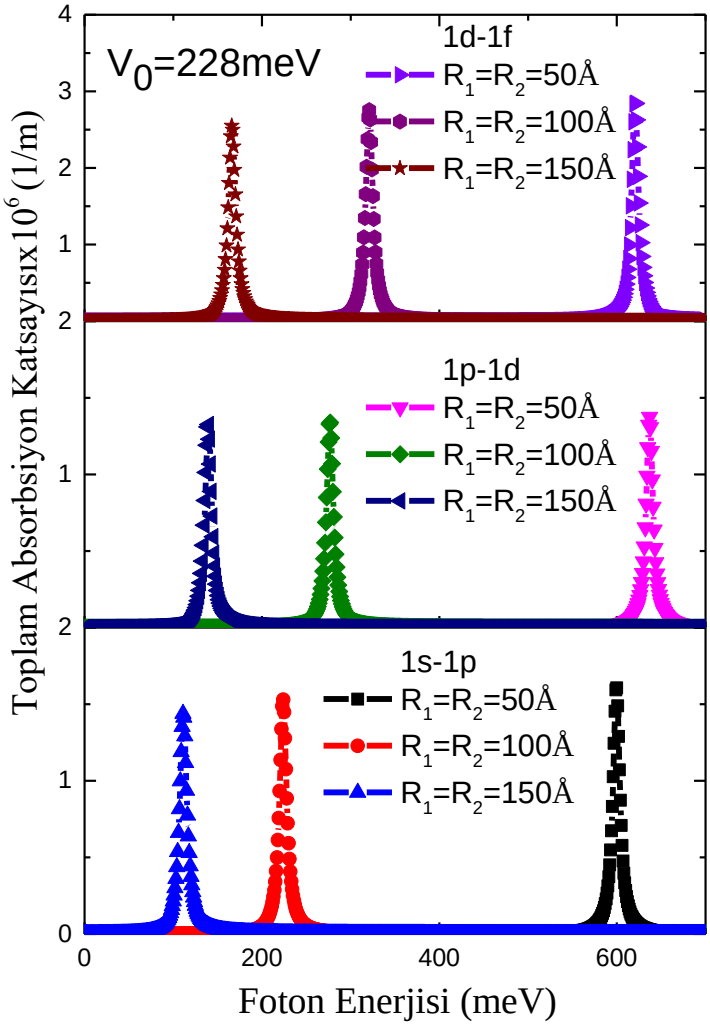
Şekil 5.2. V_0 =78 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri.



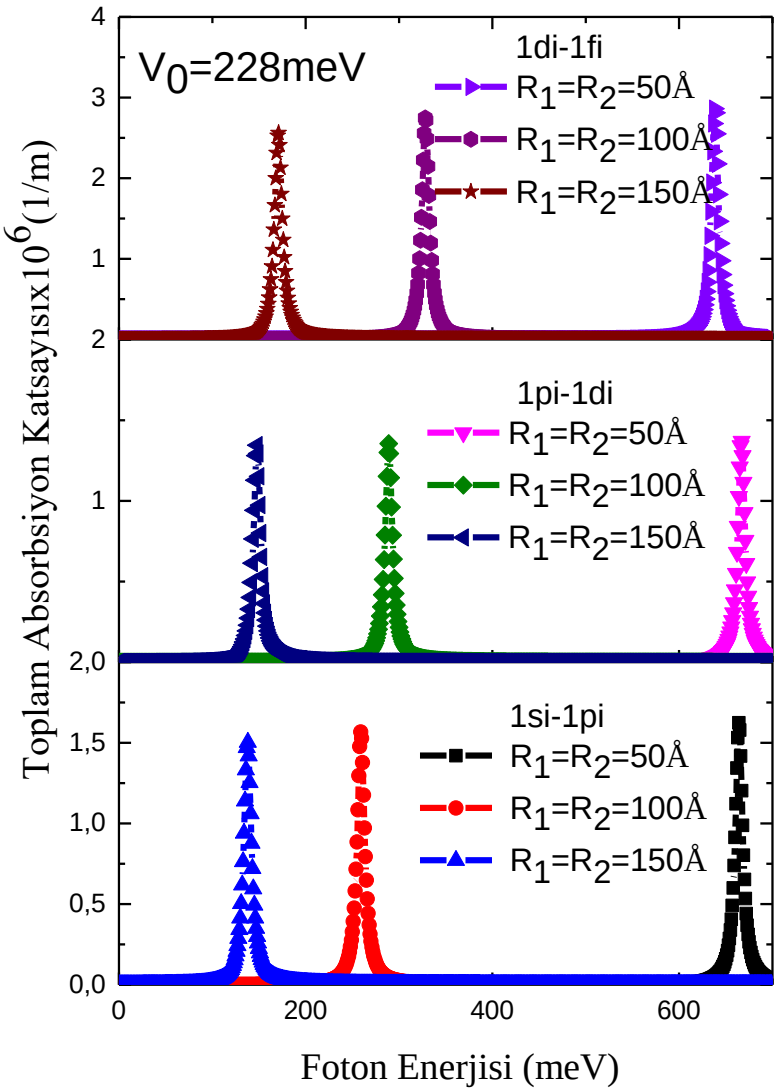
Şekil 5.3. V_0= 148 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absobsiyon katsayısı değişimleri.



Şekil 5.4. V_0 =148 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri.



Şekil 5.5. V_0 =228 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasındaki farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri.



Şekil 5.6. V_0 =228 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri.

katsayının maksimum olduğu foton enerji değerinin küçüldüğü görülmüştür. Literatürde bu karakteristik davranış kuantum noktalarında gözlenmiştir (Jafari, 2015, Özmen, Yakar, Çakır, & Atav, 2009). Aynı tabaka kalınlıklarında toplam asorbsiyon maksimum değeri aldığı foton enerjileri küçükten büyüğe doğru 1s-1p, 1p-1d ve 1d-1f geçişleri olarak sıralanır. Tabaka kalınlığı 100 Å ve 150 Å için bu geçiş enerjileri birbirine çok yakındır.

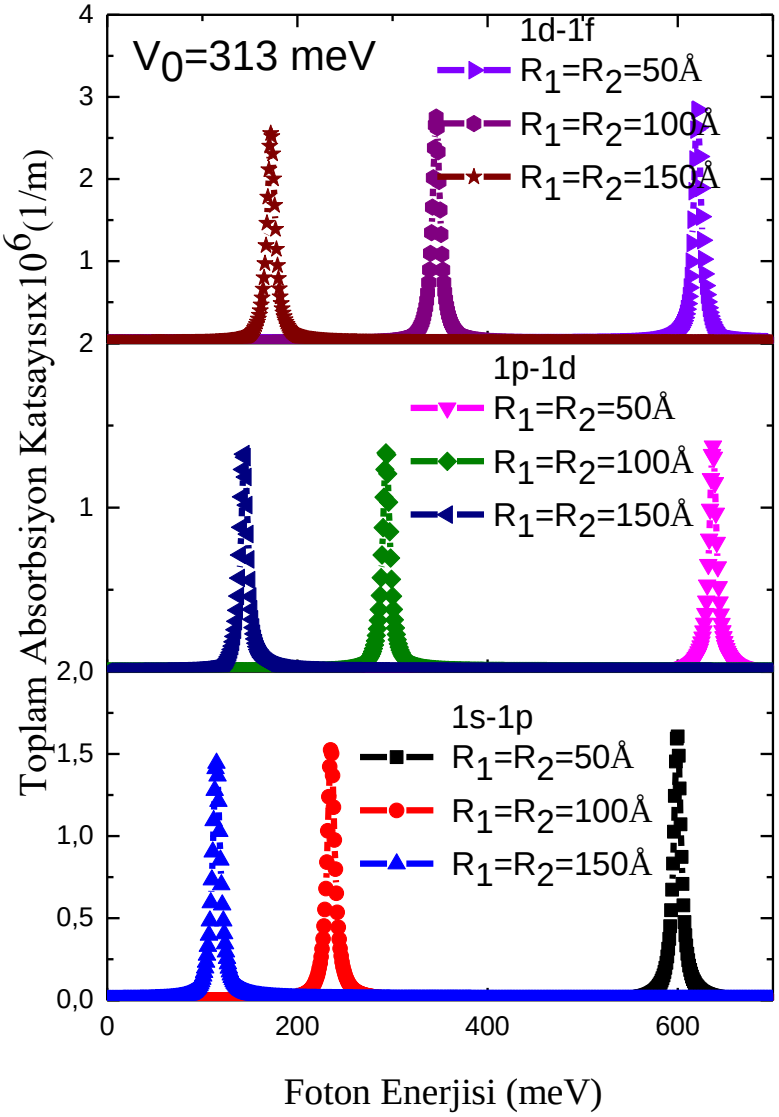
Safsızlık atomu kuantum noktasının merkezinde yer alırken V_0 = 78meV potansiyel sınırlayıcı değeri için üç geçişin foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam absorbsiyon katsayıları değişimi şekil 5.2'de gösterildi. Şekildeki geçişlerin davranışları safsızlık atomu yokken ki duruma benzerdir fakat absorbsiyon katsayılarının maksimum olduğu foton enerjisi değerleri büyümüştür. Geçişler daha büyük foton enerjilerinde gerçekleşmiştir.

Şekil 5.3 ve şekil 5.4'te bir basamaklı sonsuz kuantum noktasının V_0 = 148meV sınırlayıcı potansiyel değerleri için sırasıyla safsızlık atomu yokken ve varken toplam absorbsiyon katsayısının foton enerjisinin değişimi gösterildi. Bu şekillerde de basamak kalınlığını artmasıyla tüm geçişlerde foton enerjisinin azaldığı görüldü. Yapıya safsızlık atomu katıldığında absobsiyon değerini maksimum yapan foton enerjilerinin tümünün arttığı gözlendi. Basamak kalınlığı 50Å için safsızlık atomu varken geçişlerin foton enerji değerleri birbirine çok yakın ve geçişlerin enerjileri sıralamasında, 1pi-1di ve 1di-1fi geçişlerinin foton enerjileri neredeyse aynı 1si-1pi geçişinin foton enerjisi çok az bir farkla daha büyüktür.

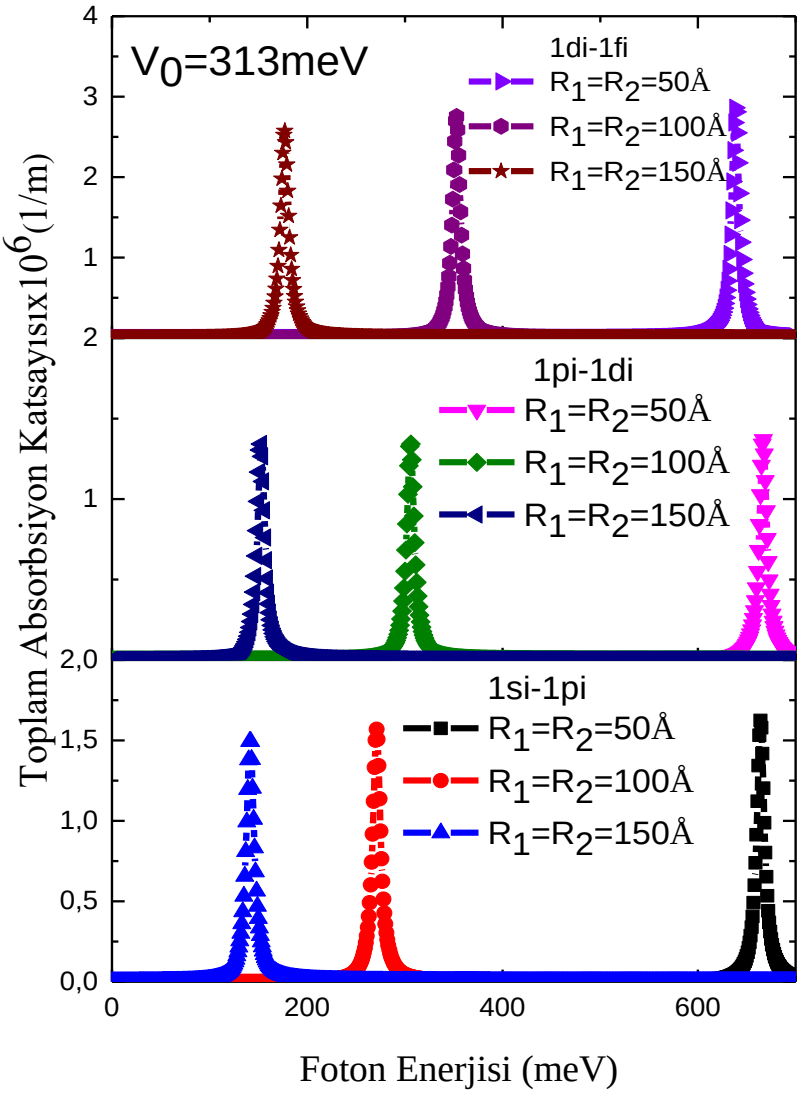
V_0 = 228meV potansiyel sınırlayıcı için sırasıyla şekil 5.5 ve şekil 5.6'da toplam absorbsiyon katsayılarının foton enerjisine bağlı olarak sırasıyla yapıda safsızlık atomu yokken ve varken değişimleri incelendi. Basamak kalınlığı 100 Å ve 150 Å için önceki şekillerdeki değişimler gözlendi. 50 Å için safsızlık atomu yokken toplam absorbsiyon katsayısının maksimum değeri aldığı foton enerjileri küçükten büyüğe doğru 1s-1p, 1d-1f ve 1p-1d geçişleri olarak sıralanır. Safsızlık atomu varken ise 50 Å basamak kalınlığında toplam absorbsiyon katsayısını maksimum yapan foton enerjilerinin büyükten küçüğe sıralaması 1si-1pi, 1pi-1di, 1di-1fi olmuştur. Bu farklılık enerji farklarından ve dalga fonksiyonlarının olasılık dağılımından kaynaklanır.

Şekil 5.7 ve şekil 5.8'de V_0 = 313meV potansiyel sınırlayıcı için toplam optik absorbsiyon katsayılarının safsızlık atomu varken ve yokken sırasıyla foton enerjisine bağlı olarak değişimleri gösterildi. Bu şekillerde de önceki grafiklerdeki karakteristikler gözlendi. Bu şekillerden, potansiyel enerji 78meV, 148meV ve 228meV olarak alındığında tüm geçişler için absorbsiyon katsayısının maksimum olduğu foton enerji değerlerinin sağa doğru kaydığı görüldü. Bu şekillerde potansiyel enerjinin 228meV ve 313meV değerleri için basamak kalınlığı 50Å'daki geçişlerde etkili olmadığı fakat

basamak kalınlığı 100 Å ve 150 Å'daki tüm geçişler için potansiyel enerjinin artmasıyla foton enerjilerini sağa doğru kaydırdığı görüldü.



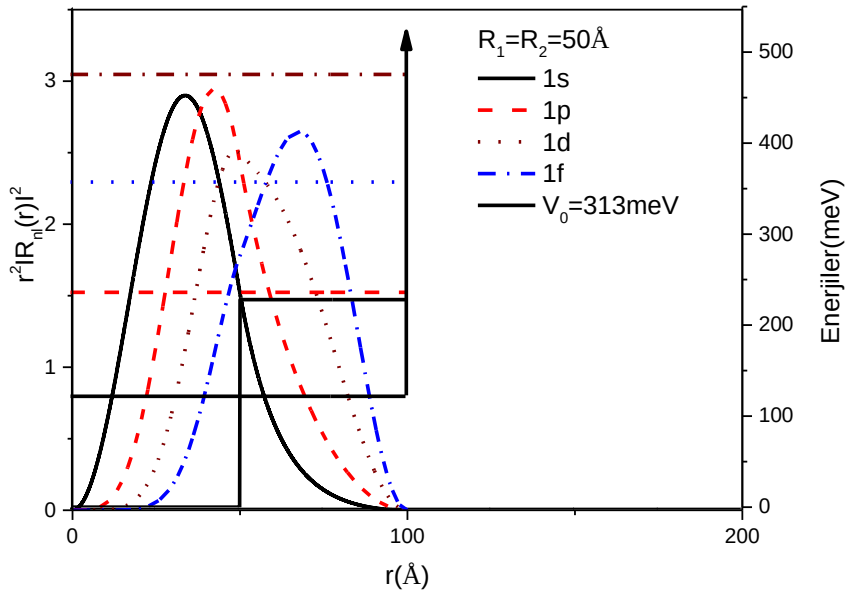
Şekil 5.7. V_0 =313 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri.



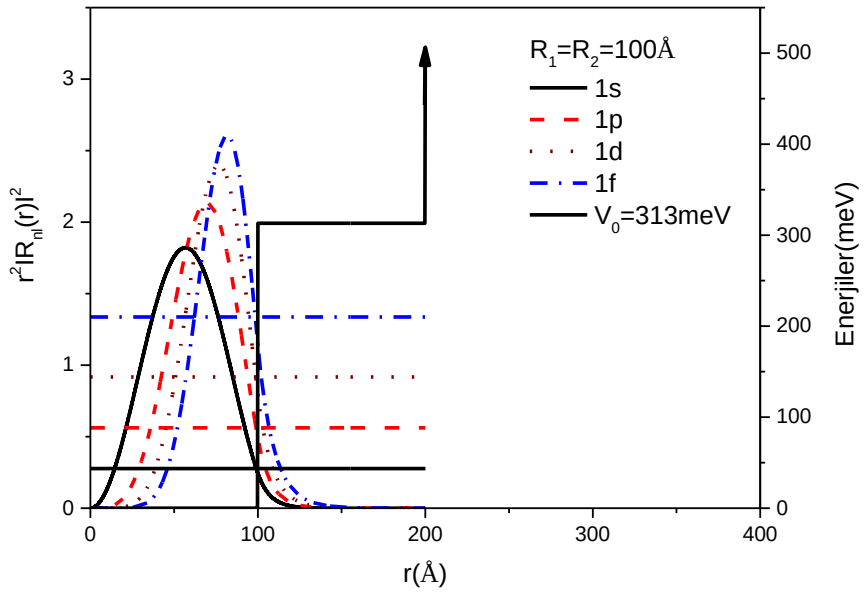
Şekil 5.8. V_0 =313 meV potansiyel sınırlayıcı değerleri için safsızlık atomu varken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklaraında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri.

5.1.1. Bir Basamaklı Sonsuz Küresel Kuantum Noktalarının Katman Kalınlığına Bağlı Olasılık Yoğunlukları

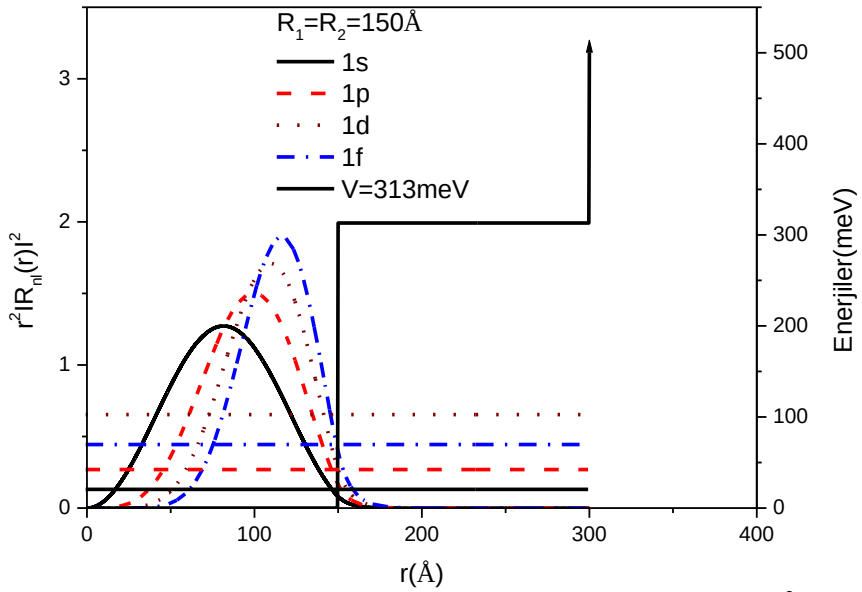
Toplam absorbsiyon katsayılarının hesabından görülür ki dalga fonksiyonlarının olasılık dağılımları önemlidir. Bundan dolayı bu kısımda sınırlayıcı V_0=313meV değerinde tabaka kalınlıklarının üç değeri için safsızlık atomu yokken ve varken olasılık yoğunlukları gösterilmiştir.



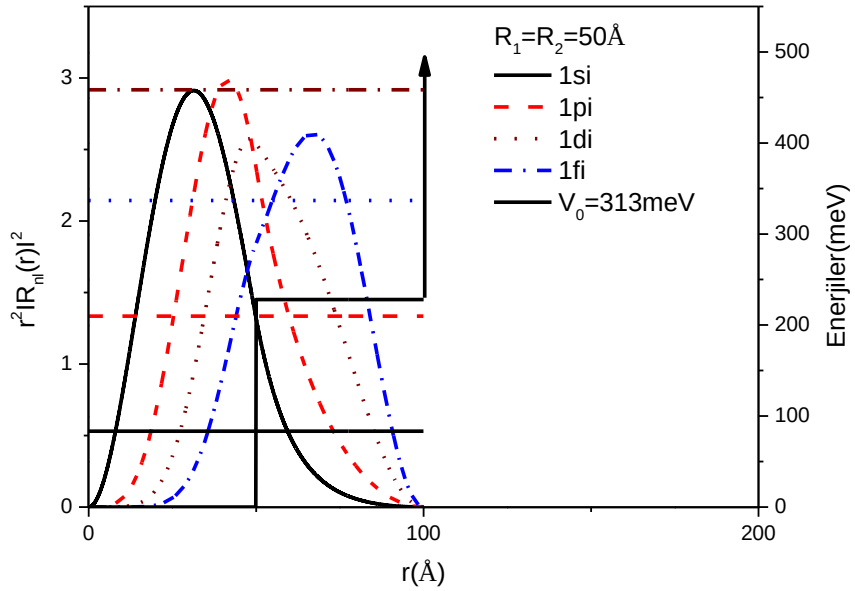
Şekil 5.9. V_0=313meV potansiyel sınırlayıcı değerinde R_1=R_2=50Å için 1s, 1p, 1d, 1f durumlarının bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktalasında tabaka kalınlıklarına bağlı olasılık yoğunlukları.



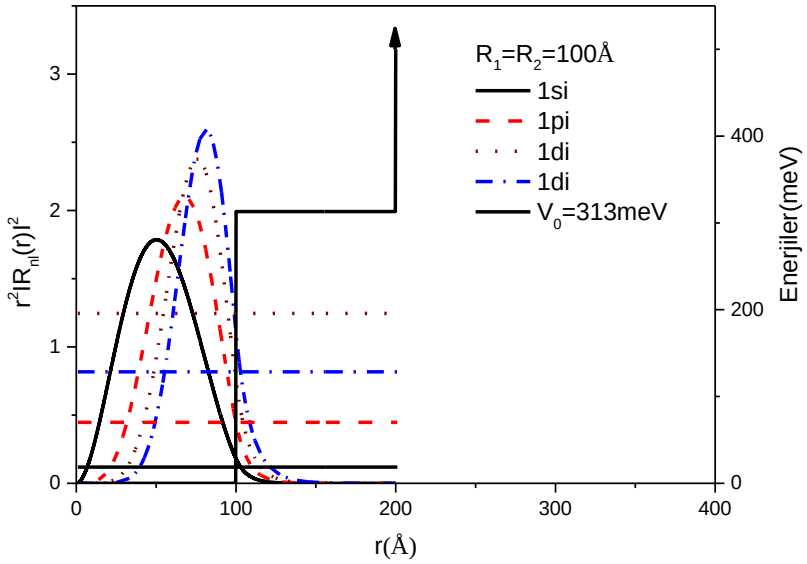
Şekil 5.10. V_0=313meV potansiyel sınırlayıcı değerinde R_1=R_2=100Å için 1s, 1p, 1d, 1f durumlarının bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı olasılık yoğunlukları.



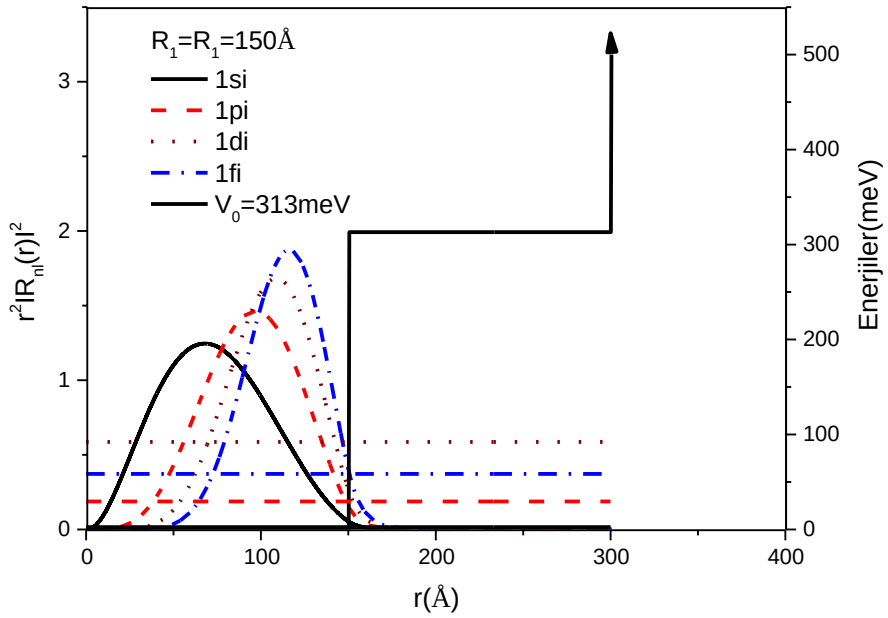
Şekil 5.11. V_0=313meV potansiyel sınırlayıcı değerinde R_1=R_2=150Å için 1s, 1p, 1d, 1f durumlarının bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı olasılık yoğunlukları.



Şekil 5.12. V_0=313meV potansiyel sınırlayıcı değerinde R_1=R_2=50Å için için 1si, 1pi, 1di, 1fi durumlarının sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı olasılık yoğunlukları.



Şekil 5.13. V_0=313meV potansiyel sınırlayıcı değerinde R_1=R_2=100Å için 1si, 1pi, 1di, 1fi durumlarının bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı olasılık yoğunlukları

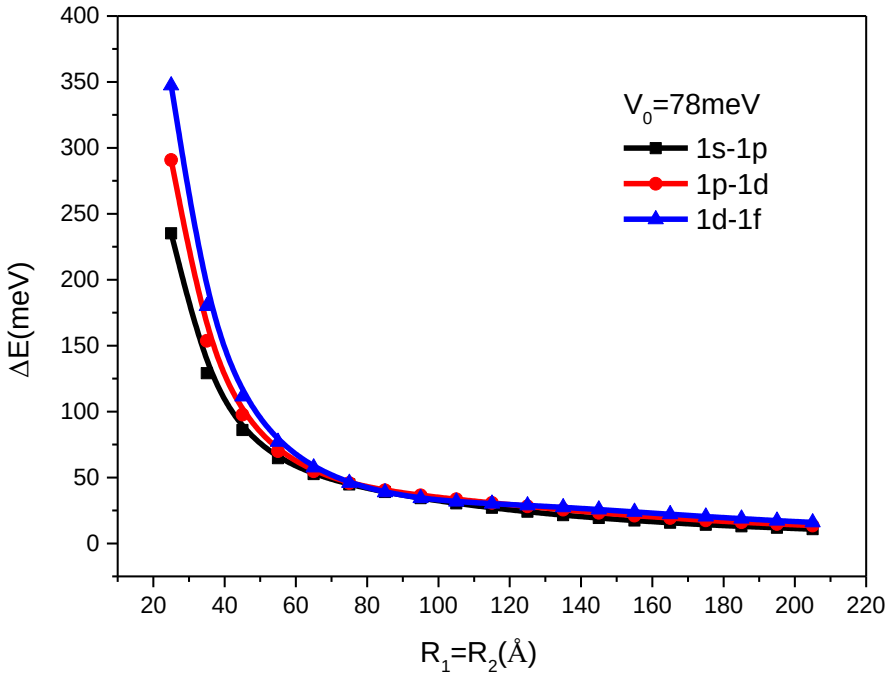


Şekil 5.14. V_0=313meV potansiyel sınırlayıcı değerinde R_1=R_2=150Å için 1si, 1pi, 1di, 1fi durumlarının bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı olasılık yoğunlukları.

Yukarıda, potansiyel değeri V_0=313meV olan bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı durumların olasılık yoğunlukları safsızlık atomu yokken şekil 5.9, şekil 5.10, şekil 5.11 ve safsızlık atomu varken şekil 5.12, şekil 5.13 ve 5.14'te verilir. Şekiller incelendiğinde, küçük tabaka kalınlıklarında tüm yapıya dağılan elektronun, tabaka kalınlıklarının artmasıyla tüm durumların maksimum bulunma noktaları GaAs bölgesinde olduğu görüldü. Tabaka kalınlıklarının artmasıyla tüm durumların enerjileri azalma gösterir. Yapıya safsızlık atomunun katılması tüm enerji durumlarının değerini azaltır.

5.1.2. Bir Basamaklı Sonsuz Küresel Kuantum Noktalarının Geçiş Enerjileri Farkı

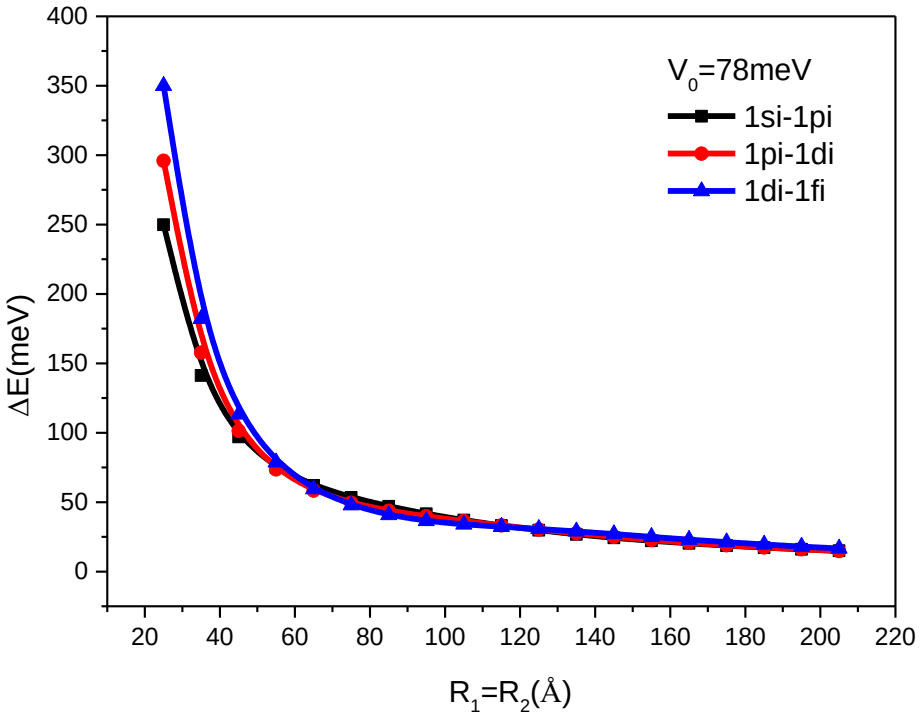
Bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktalarının 1s-1p, 1p-1d ve 1d-1f geçiş enerjileri farkları tabaka kalınlıklarına bağlı olarak bu bölümde gösterildi.



Şekil 5.15. V_0 =78 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri

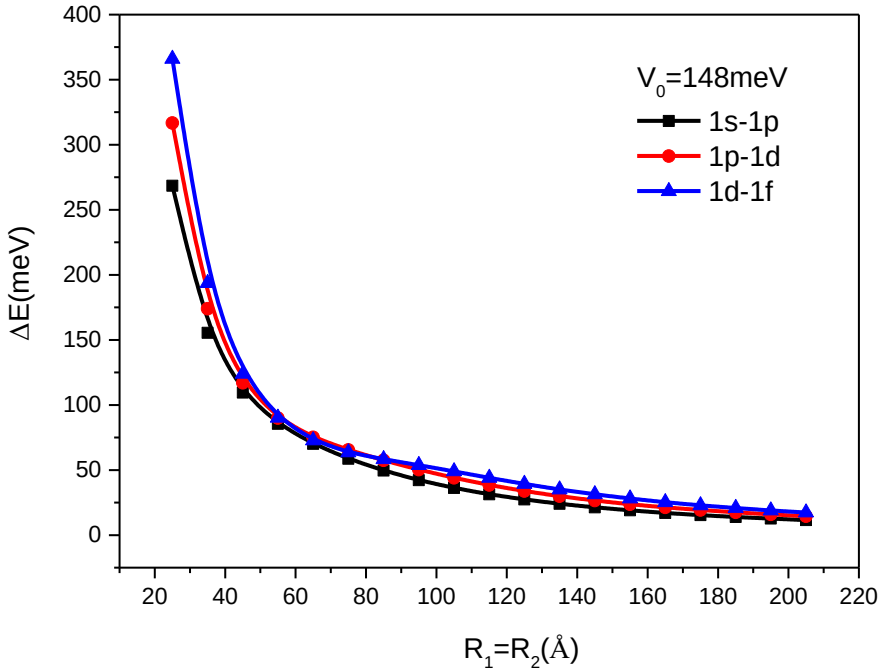
Şekil 5.15'te V_0 =78 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken bir basamaklı küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri gösterilir. Bu şekilde, basamak kalınlığı küçük değerler için enerji farkları keskin bir azalma gösterir. Tabaka kalınlıkları arttığında ise enerji farkları sabit bir değere doğru çok az bir değişim gözlenir. Örnek olarak tabaka kalınlıkları 40 Å'da büyükten küçüğe doğru enerji farkları 1d-1f, 1p-1d ve 1s-1p olurken belirli bir kritik basamak kalınlığında yaklaşık 80 Å'da eşit olup, 120 Å'a kadar ki belirli bölgede enerji farkları değişimlerinin sıralamaları değişir. 120 Å'dan sonra enerji sıralamaları 40 Å değerindeki gibi olur. Bu davranış Şekil 5.1'te gösterilen toplam absorbsiyon katsayılarının

maksimum olduğu geçişler için küçükten büyüğe doğru 1s-1p, 1p-1d ve 1d-1f sıralanmasını açıklamaktadır.



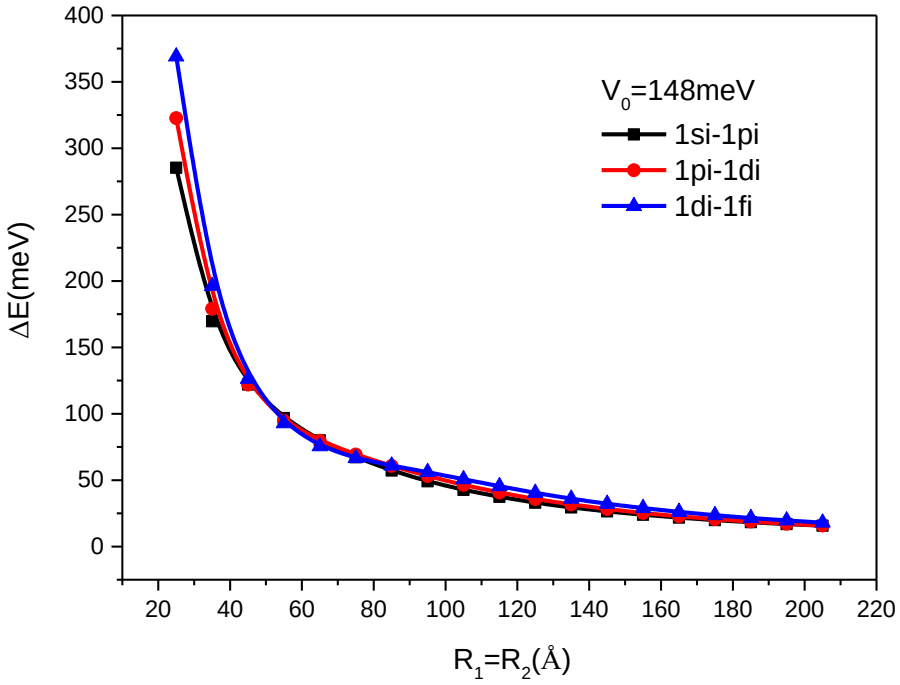
Şekil 5.16. V_0 =78 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri

Bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasının merkezinde safsızlık atomu varken V_0 =78 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji değişimleri şekil 5.16'da verilmiştir. Bu şekilde kritik basamak kalınlığı 50 Å civarında olmaktadır. Bu değere kadar değişim keskin olmaktadır. Enerji geçişlerinin sıralaması büyükten küçüğe doğru 1di-1fi, 1pi-1di ve 1si-1pi olarak sıralanır. Tabaka kalınlıklarının 50 Å ile 120 Å aralığında enerji geçişlerinin küçükten büyüğe doğru sıralaması 1di-1fi, 1pi-1di ve 1si-1pi olur. 120 Å'dan büyük tabaka kalınlık değerleri için geçiş enerjileri farkı hemen hemen aynıdır. Safsızlık atomu olmayan bir basamaklı sonsuz kuantum noktasıyla karşılaştırıldığında kritik basamak kalınlığının daha küçük değerlere kaydığı görülür. Bazı tabaka kalınlık aralığında da enerjilerin değişimleri farklı olur.



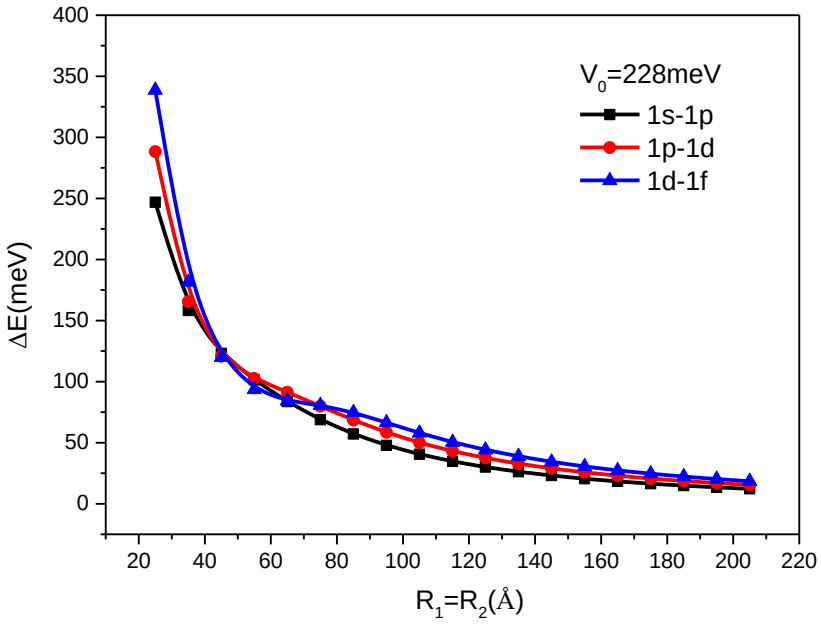
Şekil 5.17. V_0 =148 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri.

V_0=148 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken geçiş enerjileri farkı şekil 5.17'de gösterilir. Bu şekilde yaklaşık 60 Å basamak kalınlığı değerine kadar enerji farkları hızla azalır ve bu değerde enerjiler arası fark hemen hemen aynı olur. Bu değere kritik basamak kalınlığı değeri diyoruz. Bu değere kadar enerji farkları büyükten küçüğe 1d-1f, 1p-1d ve 1s-1p olarak sıralanırken, bu değerden sonra 90 Å'a kadar olan tabaka kalınlıkları için bu sıralama değişir. 90 Å tabaka kalınlıklardan sonra enerji farkları arasındaki büyükten küçüğe sıralama yine 1d-1f, 1p-1d ve 1s-1p olur fakat çok büyük tabaka kalınlıkları için farklar neredeyse eşit olur. Enerji değişimlerinin bu davranışı şekil 5.3'teki toplam absorbsiyon katsayılarının maksimum olduğu foton enerjilerinin değişimlerini de açıklıyor.



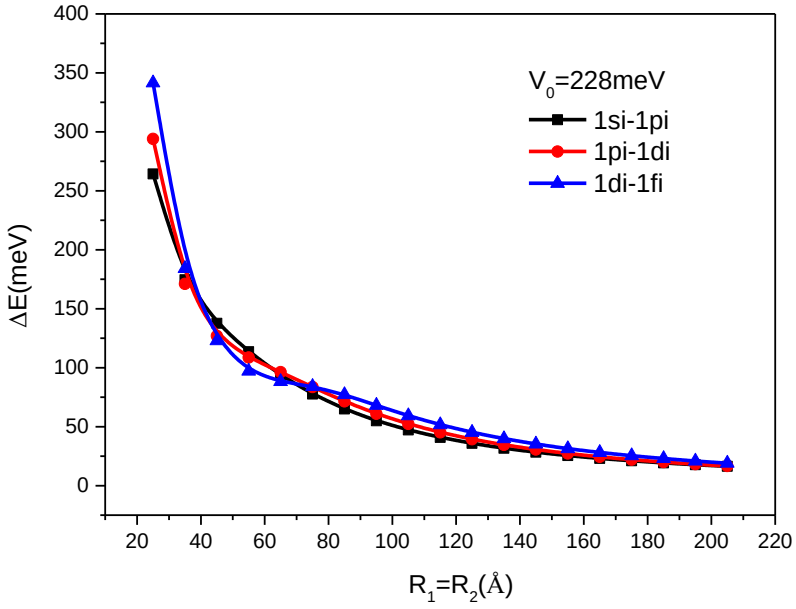
Şekil 5.18. V_0 =148 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri.

Bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasının merkezinde safsızlık atomu varken V_0 =148 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji değişimleri şekil 5.18'de verilmiştir. Bu şekilde kritik basamak kalınlığı 40 Å civarında olmaktadır. Bu değere kadar değişim keskin olmaktadır. Enerji geçişlerinin sıralaması büyükten küçüğe doğru 1di-1fi, 1pi-1di ve 1si-1pi olarak sıralanır. Tabaka kalınlıklarının 40 Å ile 80 Å aralığında enerji geçişlerinin küçükten büyüğe doğru sıralaması 1di-1fi, 1pi-1di ve 1si-1pi olur. 50 Å basamak kalınlığı için şekil 5.4'te gösterilen absorbsiyon pik değerleri bundan kaynaklanır. 80 Å ile 200 Å'arasındaki tabaka kalınlık değerleri için 1pi-1di ve 1si-1pi geçiş enerjileri farkı hemen hemen aynıdır. Bu basamak kalınlığı aralığında 1di-1fi geçiş enerjisi daha büyüktür. Yine 150 Å basamak kalınlığı için şekil 5.4'te gösterilen absorbsiyon pik değerlerinin konumlarının sebebi geçiş enerjilerindeki bu davranıştır.



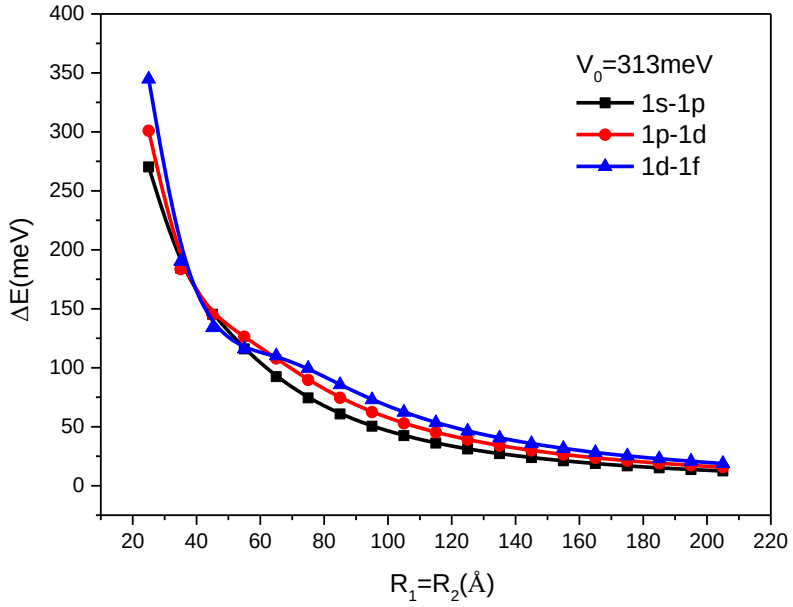
Şekil 5.19. V_0 =228 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri.

V_0 =228 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken geçiş enerjileri farkı şekil 5.19'da gösterilir. Bu şekilde yaklaşık 40 Å basamak kalınlığı değerine kadar enerji farkları hızla azalır ve bu değerde enerjiler arası fark hemen hemen aynı olur. Bu değer kritik basamak kalınlığı değerine kadar enerji farkları büyükten küçüğe 1d-1f, 1p-1d ve 1s-1p olarak sıralanırken, bu değerden sonra 80 Å'a kadar olan tabaka kalınlıkları için bu sıralama değişir. Dikkat edilirse basamak kalınlığı 50 Å, bu aralıkta kalır. 50 Å için geçiş enerji farklarının sıralanması küçükten büyüğe doğru 1s-1p, 1d-1f ve 1p-1d olur. Bu değişimler şekil 5.5'teki absorbsiyon katsayılarının maksimum olduğu foton enerjilerinin sıralamasını verir. 80 Å tabaka kalınlığından sonra enerji farkları arasındaki büyükten küçüğe sıralama yine 1d-1f, 1p-1d ve 1s-1p olur fakat çok büyük tabaka kalınlıkları için farklar neredeyse eşit olur.



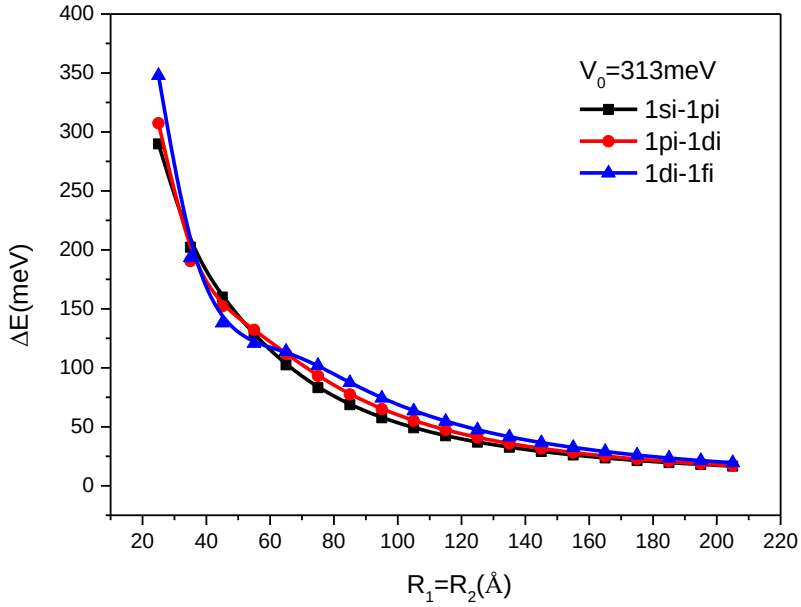
Şekil 5.20. V_0 =228 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri.

Bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasının merkezinde safsızlık atomu varken V_0 =228 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji değişimleri şekil 5.20'de verilmiştir. Bu şekilde kritik basamak kalınlığı 30 Å civarında olmaktadır. Bu değere kadar değişim keskin olmaktadır. Enerji geçişlerinin sıralaması büyükten küçüğe doğru 1di-1fi, 1pi-1di ve 1si-1pi olarak sıralanır. Tabaka kalınlıklarının 30 Å ile 70 Å aralığında enerji geçişlerinin değişimlerinde dalgalanmalar gözlenir. Bu dalgalanmadan dolayı 50 Å basamak kalınlığı için şekil 5.6'da gösterilen absorbsiyon pik değerleri büyükten küçüğe doğru 1si-1pi, 1pi-1di ve 1di-1fi olarak sıralanır. Basamak kalınlığının artmasıyla geçiş enerjisi değişimleri diğer grafiklerde gösterilen davranışı sergiler.



Şekil 5.21. V_0 =313 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri.

V_0 =313 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken geçiş enerjileri farkı şekil 5.21'de gösterilir. Bu şekilde yaklaşık 30 Å basamak kalınlığı değerine kadar enerji farkları hızla azalır ve bu değerde enerjiler arası fark hemen hemen aynı olur. Bu kritik basamak kalınlığı değerine kadar enerji farkları, büyükten küçüğe 1d-1f, 1p-1d ve 1s-1p olarak sıralanırken, bu değerden sonra 70 Å'a kadar olan tabaka kalınlıkları için bu sıralama değişir. Dikkat edilirse şekil 5.18'de gösterildiği gibi basamak kalınlığı 50 Å bu aralıkta kalır. 50 Å için geçiş enerji farklarının sıralaması küçükten büyüğe doğru 1s-1p, 1d-1f ve 1p-1d olur. Bu değişimler şekil 5.7'deki absorbsiyon katsayılarının maksimum olduğu foton enerjilerinin sıralamasını verir. 70 Å tabaka kalınlıklarından sonra enerji farkları arasındaki büyükten küçüğe sıralama yine 1d-1f, 1p-1d ve 1s-1p olur fakat çok büyük tabaka kalınlıkları için farklar neredeyse eşit olur.



Şekil 5.22. V_0 =313 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri

Bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasının merkezinde safsızlık atomu varken V_0 =313 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji değişimleri şekil 5.22'de verilmiştir. Bu şekil V_0 =228 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için bulunan sonuçlara benzer karakteristik göstermiştir.

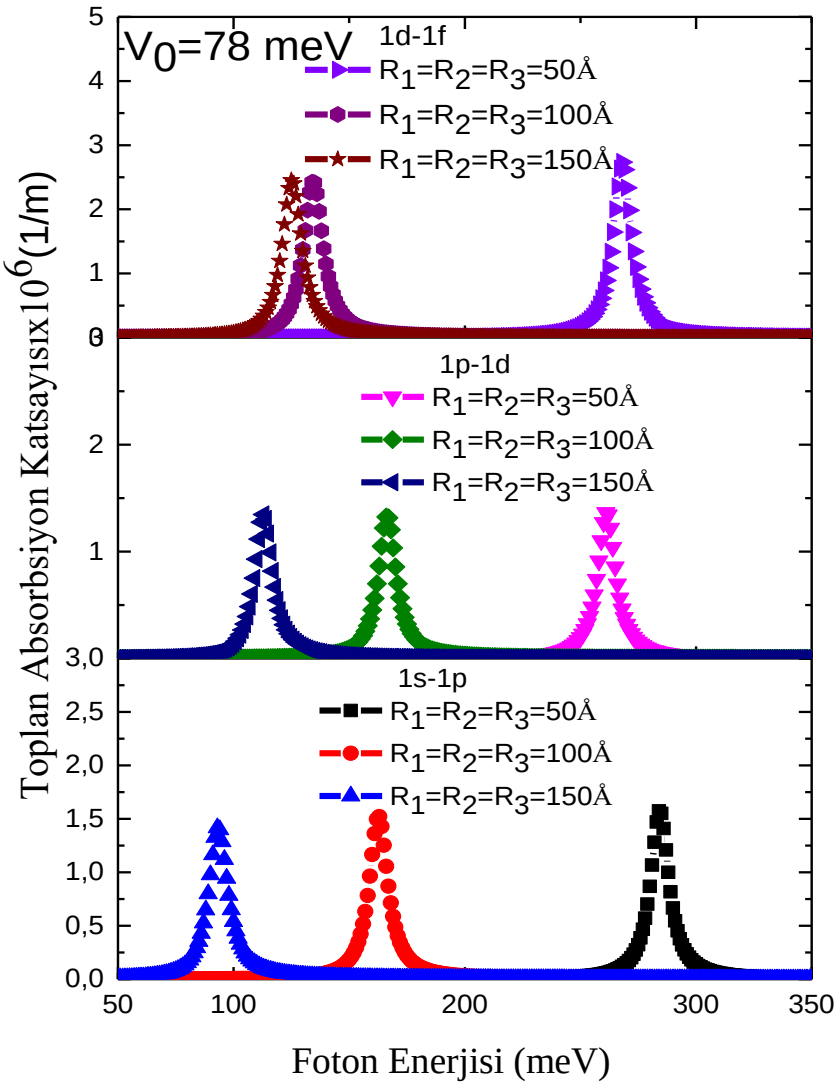
Safsızlık atomu yokken ve varken geçiş enerjileri farkları incelendiğinde bir basamağı oluşturan potansiyel sınırlayıcı değeri arttığında kritik basamak kalınlığının daha küçük tabaka kalınlık değerlerine doğru kaydığı görülür. V_0 =228 meV ve V_0 =313 meV potansiyel sınırlayıcı değerlerinde bu kritik değerin daha küçük tabaka kalınlıklarına kayması toplam absorbsiyon katsayısının pik değerlerinin geçiş enerjilerine göre sıralamasını değiştirdiği görülür.

5.2. İki Basamaklı Sonsuz Küresel Kuantum Noktalarının Toplam Absorbsiyon Katsayıları

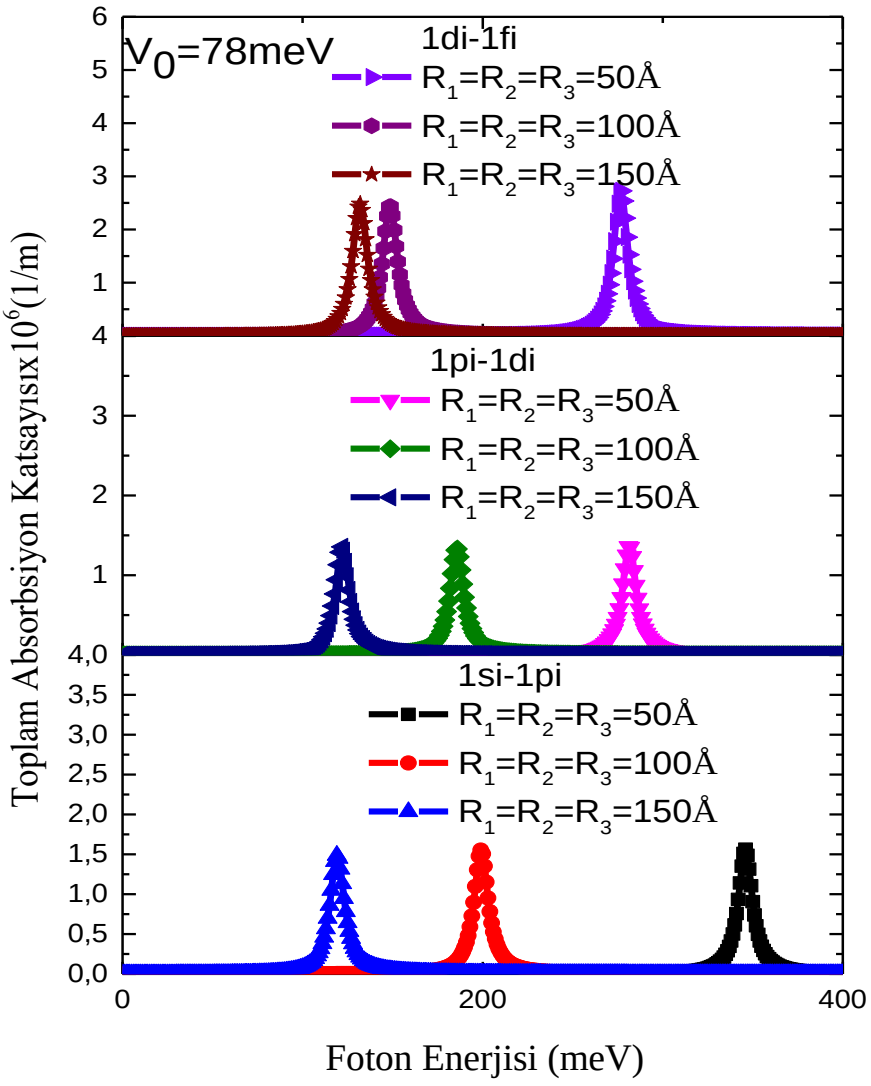
Bu bölümde potansiyel sınırlandırıcı iki tabakadan oluşan sonsuz kuantum noktasının toplam absorbsiyon katsayıları hesaplandı. Şekil 5.23'de V_0 =78meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken iki basamaklı küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri gösterildi. Şekilde basamak kalınlığı artarken tüm geçişlerinin toplam absorbsiyon katsayısını maksimum yaptığı foton enerjilerinin azaldığı görülmüştür. Tabaka kalınlıkları 50 Å değeri için toplam absorbsiyon katsayısının maksimum olduğu foton enerjisi değerleri büyükten küçüğe doğru 1s-1p, 1p-1d ve 1d-1f geçişleri olarak sıralanmıştır. Tabaka kalınlıkları 100 Å değeri için toplam absorbsiyon katsayısının maksimum olduğu foton enerjisi değerleri büyükten küçüğe doğru 1p-1d, 1s-1p, ve 1d-1f geçişleri olarak sıralanmıştır. Tabaka kalınlıkları 150 Å değeri için toplam absorbsiyon katsayısının maksimum olduğu foton enerjisi değerleri büyükten küçüğe doğru 1d-1f, 1p-1d, ve 1s-1p geçişleri olarak sıralanmıştır. Bu farklılıklar, geçişlerdeki enerji farklarından ve olasılık dalga fonksiyonunun konumundan kaynaklanır.

Aynı şekil yapının merkezinde safsızlık atomu varken hesaplanan toplam absorbsiyon katsayılarının foton enerjisine bağlı değişimi şekil 5.24'te gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde basamak kalınlığının artmasıyla tüm geçişler için maksimum yapan foton enerjileri azalmıştır. Basamak kalınlığına göre enerji geçişlerinin sıralamasına bakıldığında 50 Å ve 100 Å tabaka kalınlıkları için foton enerjisi değerleri büyükten küçüğe doğru 1si-1pi, 1pi-1di ve 1di-1fi geçişleri olarak sıralanmıştır. 150 Å basamak kalınlığı için maksimum yapan foton enerji değerleri çok yakın olmasına rağmen sıralama büyükten küçüğe doğru 1di-1fi, 1pi-1di ve 1si-1pi geçişleri olarak sıralanmıştır.

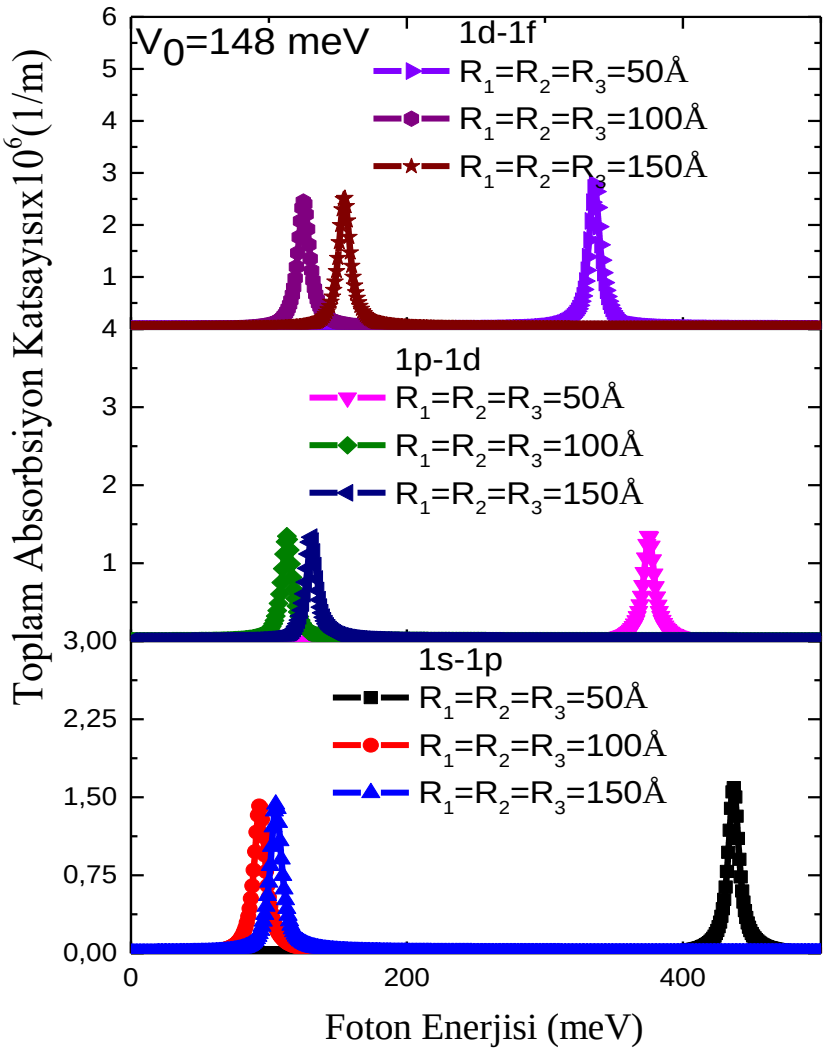
Yapıya safsızlık atomu katıldığında maksimum yapan foton enerjilerinin büyük değerlere doğru kaydığı gözlendi.



Şekil 5.23. V_0 =78meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri.



Şekil 5.24. V_0 =78 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri.



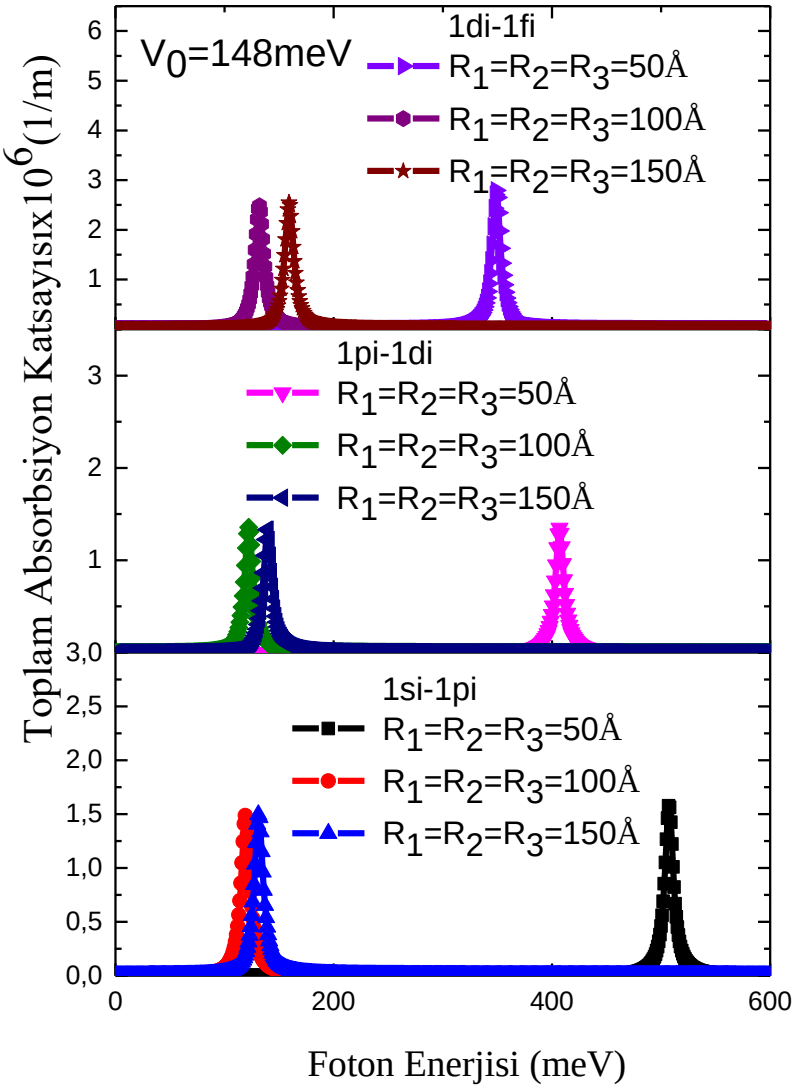
Şekil 5.25. V_0 =148meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri.

Şekil 5.25'te safsızlık atomu yokken V_0= 148 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için 1s-1p, 1p-1d ve 1d-1f geçişleriyle bağlantılı toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimi, farklı basamak kalınlıkları düşünülerek foton enerjisinin fonksiyonu olarak çizilmiştir. Absorbsiyon katsayısının maksimum olduğu foton enerjisi değerleri basamak kalınlıklarının artmasıyla üç geçiş için de aynı davranışı göstermektedir. Bu geçişlerde ilginç nokta basamak kalınlığı 150 Å için maksimum yapan foton enerji değeri, basamak kalınlığı 100 Å'dan az bir fark da olsa büyük olmasıdır. Bu davranış potansiyel sınırlama

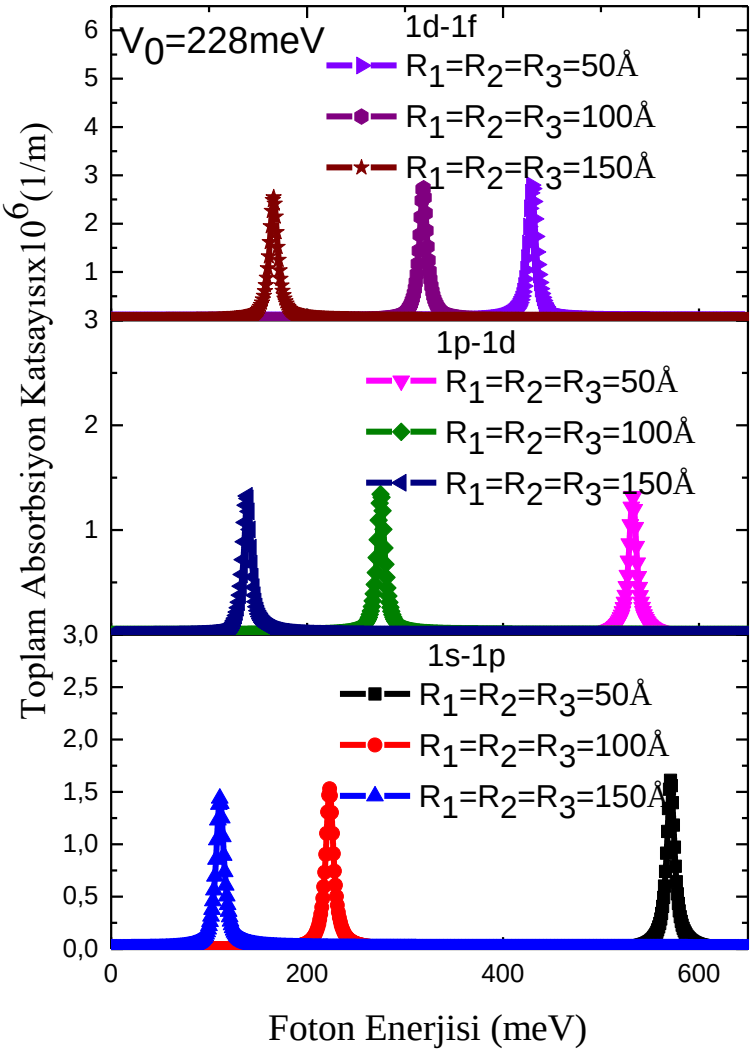
değeri 78 meV olan şekilden farklılık oluşturur. Potansiyel sınırlamadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu 148 meV potansiyel sınırlama değeri kritik bir değer olabilir.

Yapıda safsızlık atomunun etkisini incelemek için, 1si-1pi, 1pi-1di ve 1di-1fi geçişleriyle bağlantılı toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimi, Şekil 5.26'da farklı basamak kalınlıkları düşünülerek foton enerjisinin fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şeklin karakteristiği şekil 5.25'e benzese de yapıda safsızlık atomu varken absorbsiyon katsayılarını maksimum yapan foton enerji değerleri bu grafikte de büyük değerlere doğru kaymıştır. 50 Å basamak kalınlığı için durumlar arasındaki geçiş enerjilerinin sıralaması şekil 5.24'teki gibi olurken, 100 Å basamak kalınlığı için neredeyse aynı foton enerji değerinde maksimum absorbsiyon katsayısını göstermektedir.150 Å basamak kalınlığı için maksimum yapan foton enerji değerleri çok yakın olmasına rağmen sıralama büyükten küçüğe doğru 1di-1fi, 1pi-1di ve 1si-1pi geçişleri olarak sıralanmıştır.

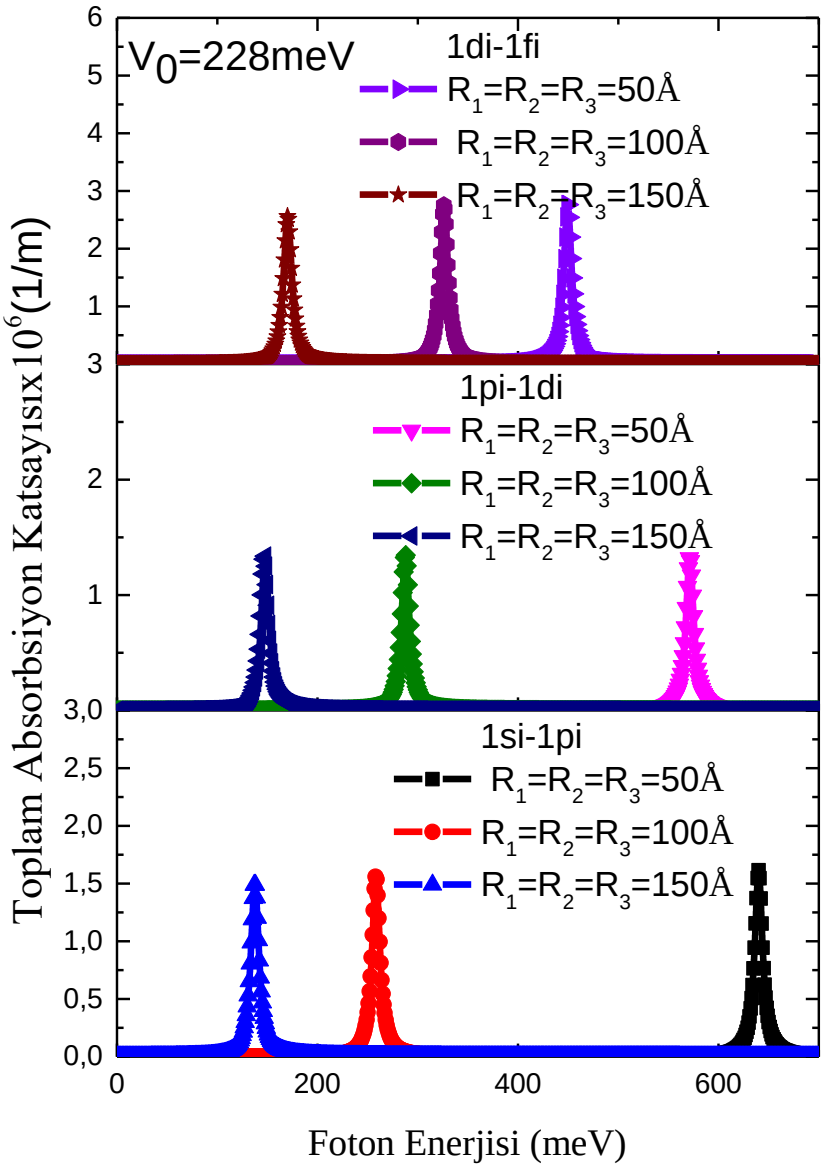
Şekil 5.27'de ve Şekil 5.28'de farklı basamak kalınlıkları için foton enerjisinin fonksiyonu olarak 1s-1p, 1p-1d ve 1d-1f geçişlerinin toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimi, V_0=228 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için sırasıyla safsızlık atomu yokken ve varken gösterilmiştir. Bu şekillerde basamak kalınlığının artmasıyla tüm geçişlerde maksimum yapan foton enerjisi değeri küçülmüştür. Şekillerde 50 Å basamak kalınlığı için foton enerjisi değerleri büyükten küçüğe doğru 1s-1p, 1p-1d ve 1d-1f geçişleri olarak sıralanırken 100 Å ve 150 Å tabaka kalınlıkları için maksimum yapan foton enerji değerleri sıralaması büyükten küçüğe doğru 1d-1f, 1p-1d ve 1s-1p geçişleri olarak sıralanmıştır. Yapıda safsızlık atomunun olması geçiş enerjilerinin değerlerini büyütmüştür.



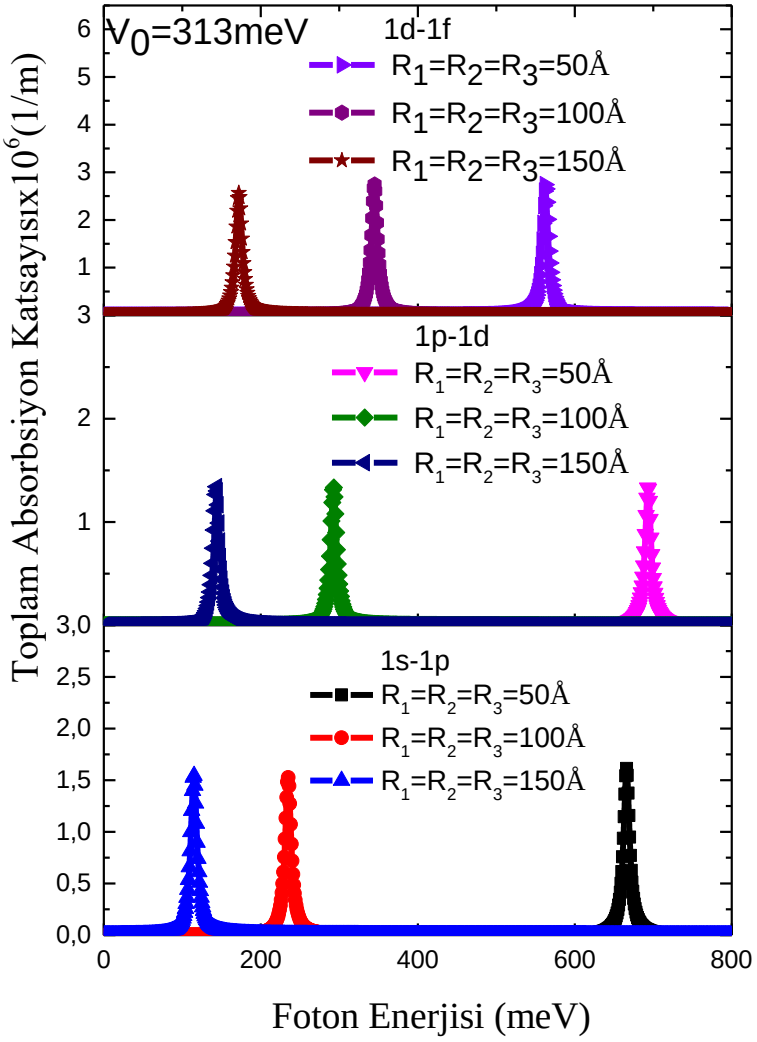
Şekil 5.26. V_0 =148 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri.



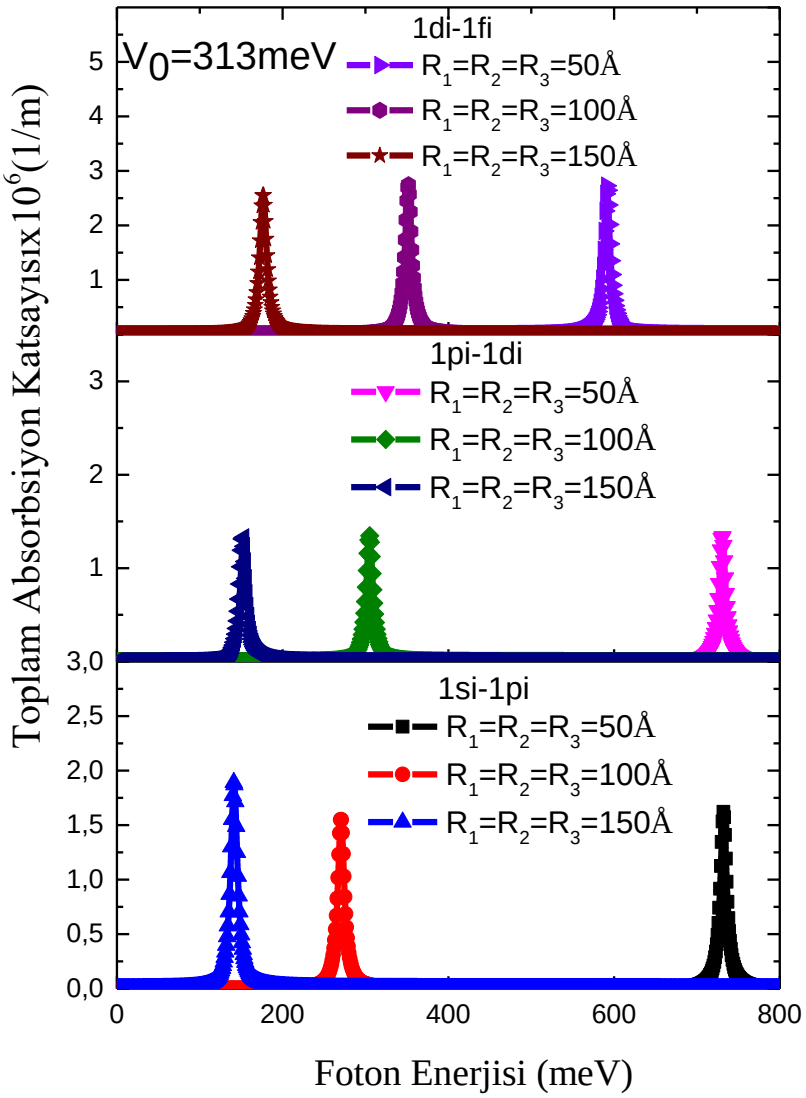
Şekil 5.27. V_0 =228meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri.



Şekil 5.28. V_0 =228 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam absorbsiyon katsayısı değişimleri.



Şekil 5.29. V_0 =313 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonsiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri.



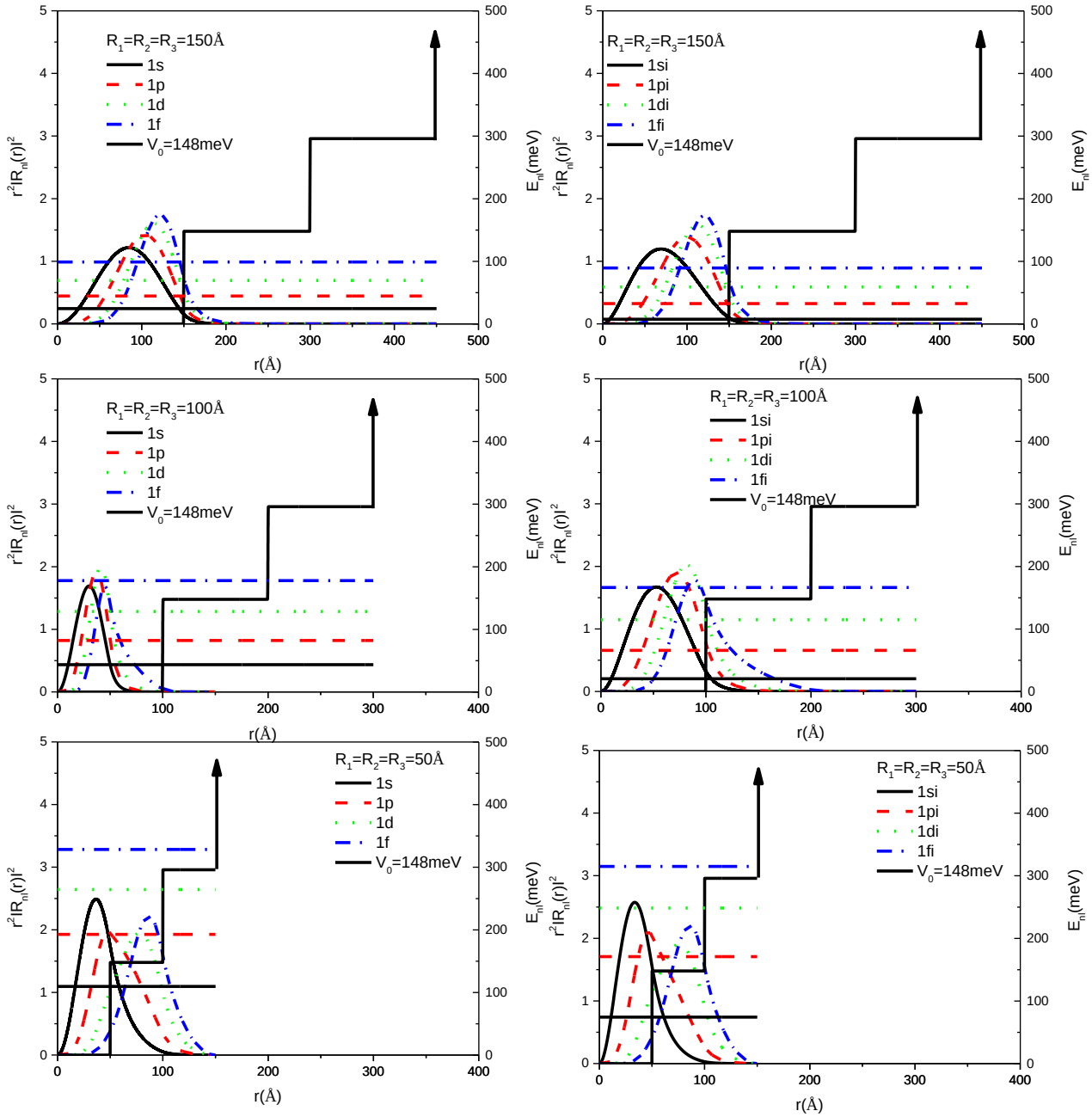
Şekil 5.30. V_0 =313 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında foton enerjisinin fonksiyonu olarak toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimleri.

Şekil 5.29'da ve Şekil 5.30'da farklı basamak kalınlıkları için foton enerjisinin fonksiyonu olarak 1s-1p, 1p-1d ve 1d-1f geçişlerinin toplam optik absorbsiyon katsayısı değişimi, V_0=313 meV değeri için sırasıyla safsızlık atomu yokken ve varken gösterilmiştir. Bu şekillerdeki davranışlar potansiyel sınırlayıcının 228meV değeri için olan şekillerdeki davranışlara benzerdir.

Bu bölümde potansiyel sınırlayıcının değerinin artması tüm geçişler için toplam absorbsiyon katsayısının maksimum olduğu foton enerji değerini büyütmüştür. Yani enerjileri sağa doğru kaydırmıştır.

5.2.1. İki Basamaklı Sonsuz Küresel Kuantum Noktalarının Katman Kalınlığına Bağlı Olasılık Yoğunlukları

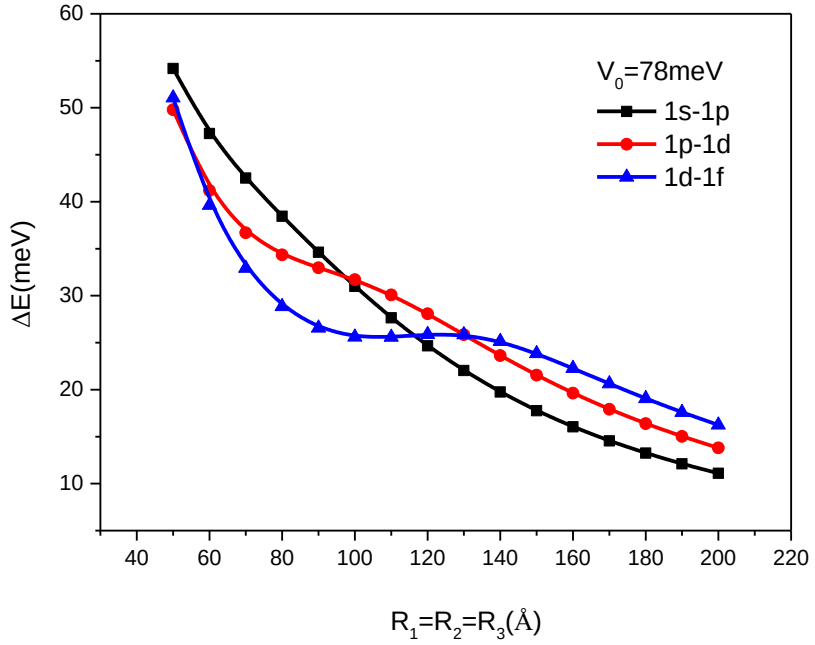
Bölüm 5.2'de gösterdiğimiz toplam optik absorbsiyon katsayılarının değişimlerinde ilginç olarak görülen potansiyel sınırlayıcı değerinin 148meV değeri için şekil 5.31'de dalga fonksiyonlarının olasılık yoğunlukları ve enerjileri gösterilmiştir. Şekilde sol sütunda safsızlık atomu içermeyen ve sağ sütunda safsızlık atomu içeren yapılarda üç farklı basamak kalınlığı için enerji durumları ve olasılık yoğunlukları gösterilmiştir. Basamak kalınlıklarının artmasıyla her iki sistem için de enerjilerin azaldığı görülmüştür. Olasılık dağılımlarına bakıldığında basamak kalınlıklarının küçük değerleri için dalga fonksiyonları tüm yapıya dağılmışken, basamak kalınlığının artmasıyla dalga fonksiyonlarının GaAs bölgesinde çoğunlukla yer aldığı görülmüştür. Toplam absorbsiyon katsayılarının foton enerjilerine bağlı değişimleri M_{if} dipol geçiş matris elemanına da bağlıdır. Dipol geçiş matris elemanı denklem 3.46'da tanımlandığı gibi durumların dalga fonksiyonlarına bağlıdır. Bu grafikten anlaşılacağı gibi küçük tabaka kalınlıklarında dalga fonksiyonlarının tüm yapıya dağılmasından dolayı enerji geçişlerindeki sıralamalar değişebilir.



Şekil 5.31. V_0 =148 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken (sol sütun) ve safsızlık atomu varken (sağ sütun) iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında farklı tabaka kalınlıklarında olasılık dağılımı ve enerjiler.

5.2.2. İki Basamaklı Sonsuz Küresel Kuantum Noktalarının Geçiş Enerjileri Farkı

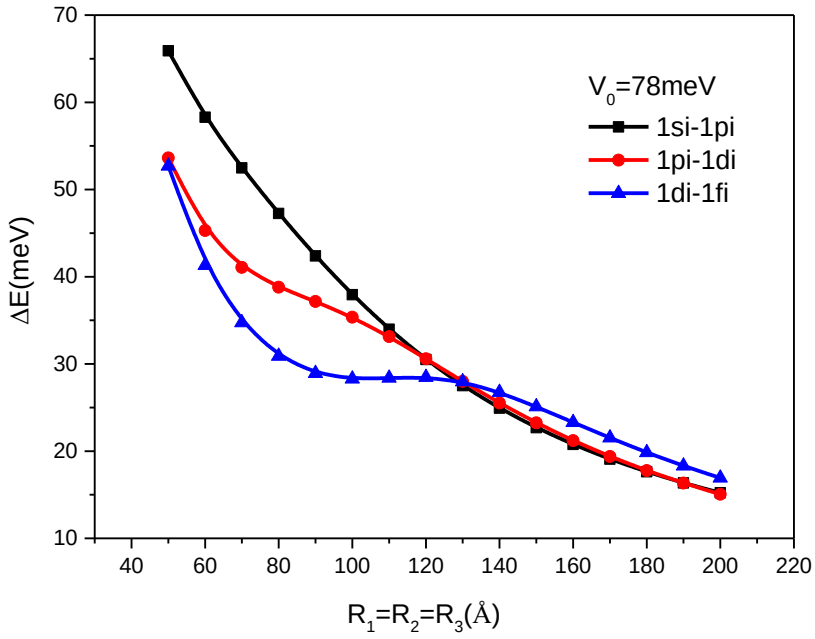
İki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktalarının 1s-1p, 1p-1d ve 1d-1f geçiş enerjileri farkları tabaka kalınlıklarına bağlı olarak bu bölümde gösterildi.



Şekil 5.32. V_0 =78 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri.

Şekil 5.32'de V_0 =78 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken iki basamaklı küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri gösterilir. Bu şekilde 1s-1p geçiş enerjileri basamak kalınlığının artmasıyla azalma göstermektedir. 1p-1d ve 1d-1f geçiş enerjileri ise küçük tabaka kalınlıklarında hızlı bir azalıştan sonra belirli aralıktaki basamak kalınlıkları için küçük bir dalgalanma yapıp tekrardan azalma gösterir. Örnek olarak tabaka kalınlıkları 50 Å'da büyükten küçüğe doğru enerji farkları 1s-1p, 1p-1d ve 1d-1f olurken, belirli bir kritik tabaka kalınlıklarında yaklaşık 100 Å'da 1s-1p, 1p-1d neredeyse eşit olup, 1d-1f enerji farkı ise bu değerden küçük olmaktadır. 120 Å civarında ise enerji farkları1s-1p ile 1d-1f

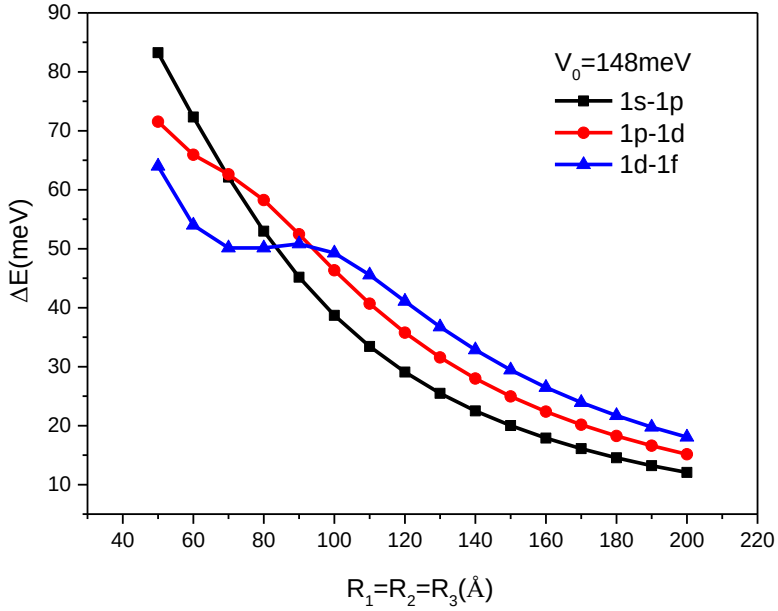
eşit olurken 1p-1d enerji farkı bu değerden daha büyük olmaktadır. 130 Å'da ise enerji farkları 1p-1d ile 1d-1f eşit olurken 1s-1p enerji farkı bu değerden daha küçük olmaktadır. 130 Å'dan sonra enerji sıralamaları büyükten küçüğe doğru 1d-1f, 1p-1d, 1s-1p olur. Bu davranış Şekil 5.23'te 150 Å için gösterilen toplam absorbsiyon katsayılarının maksimum olduğu geçişler için küçükten büyüğe doğru 1s-1p, 1p-1d ve 1d-1f sıralamasını açıklamaktadır.



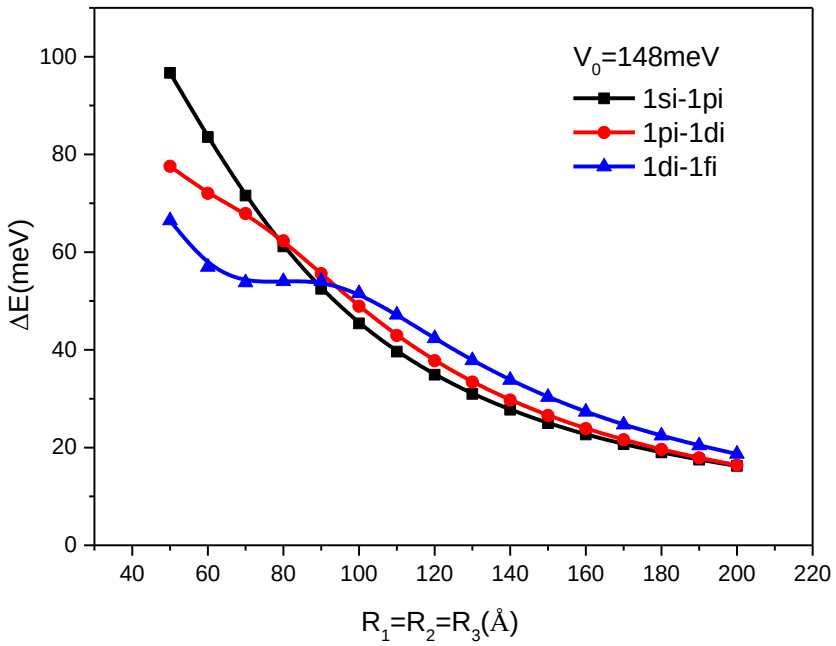
Şekil 5.33. V_0 =78 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri

V_0 =78 meV potansiyel sınırlayıcı değerine sahip sonsuz iki basamaklı kuantum noktasında safsızlık atomu varken geçiş enerjileri şekil 5.33'te verilmiştir. 1si-1pi geçiş enerjisi basamak kalınlığının artmasıyla azalma gösterir. 1pi-1di geçiş enerjisi dalgalanmalı azalma gösterir. 1di-1fi geçiş enerjisi basamak kalınlığı 80 Å değerine kadar keskin bir azalma gösterirken, 80 Å ile 130 Å aralığında bir plato oluşturur. Bu değerden sonra basamak kalınlığının artımıyla azalma gösterir. Şekildeki dikkat çeken noktalar küçük tabaka kalınlıklarında geçiş enerjilerinin büyükten küçüğe doğru sıralanması 1si-

1pi, 1pi-1di ve 1di-1fi'dir. Bu durum şekil 5.24'te gösterilen 50 Å basamak kalınlığının foton enerjilerinin maksimum yaptığı toplam absorbsiyon katsayı değelerinin sıralamasıyla aynıdır. Toplam absorbsiyon katsayısının değişiminde geçiş enerjisinin önemli olduğu görülür. Dikkat çeken bir başka nokta 130 Å basamak kalınlığında tüm geçiş enerjileri eşit olmaktadır. Basamak kalınlığından büyük değerlerde 1si-1pi ve 1pi-1di geçişlerinin enerji farkları aynı olur. 1di-1fi geçiş enerji farklarının değeri diğer geçişlerden büyük olur. Bu sonuçlar şekil 5.24'te 150 Å basamak kalınlığı için bulunan sonuçların nedenini açıklar.



Şekil 5.34. V_0 =148 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri.



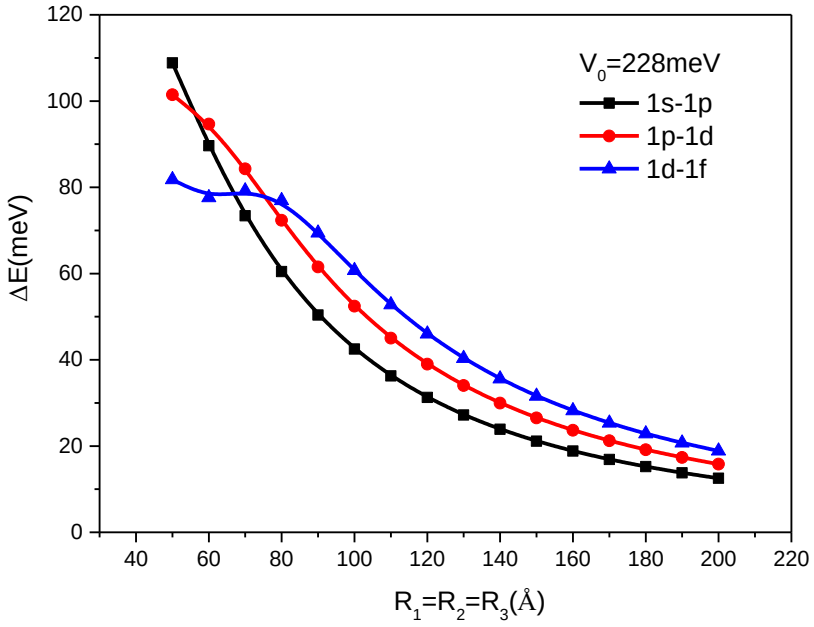
Şekil 5.35. V_0 =148 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken iki basamaklı küresel kuantum noktasında tabaka kalınlılarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri.

Şekil 5.34 ve şekil 5.35'te sırasıyla safsızlık atomu yokken ve varken V_0 =148 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için geçiş enerjileri verilir. Basamak kalınlığı artımıyla geçiş enerjilerinin azaldığı görülür. 1pi-1di ve 1di-1fi enerjileri arasındaki geçişlerde küçük basamak kalınlıklarında dalgalanma olur. Küçük basamak kalınlıklarında enerji farklarının büyük olduğu görülür. Hatta 1s-1p enerjileri arasındaki fark en büyükken, basamak kalınlığının artmasıyla en küçük değere düştüğü gözlendi. Kritik basamak kalınlıklarında geçiş enerjileri arasındaki farkların birbirine yakın olduğu görüldü. Safsızlık atomu içermeyen yapıda 70 Å civarında 1s-1p ile 1p-1d enerjileri arasındaki fark neredeyse aynı olduğu görüldü. 1d-1f enerjileri arasındaki fark 70 Å ile 110 Å arasında sabit bir davranış sergiledi. 1d-1f enerji farkları bu değerden sonra diğer enerji farklarından büyük olduğu gözlendi. Basamak kalınlığı 150 Å için enerji farklarına baktığımızda büyükten küçüğe doğru 1d-1f, 1p-1d ve 1s-1p geçişlerinin sıralandığı görüldü. Buna bağlı olarak maksimum absorbsiyon katsayını veren foton enerjilerinin de Şekil 5.25'te sırasıyla 1d-1f, 1p-1d ve 1s-1p geçişleri için büyükten küçüğe doğru

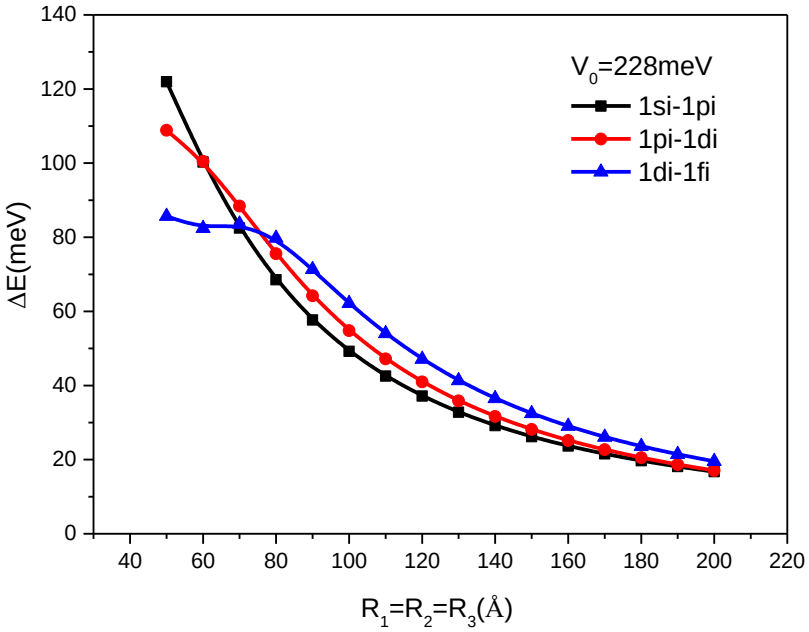
sıralanmış olmasının sebebi açıklanıyor. Safsızlık atomu içeren kuantum noktasında da benzer davranışlar gözlendi. Fakat büyük basamak kalınlıkları için enerji farklarının yakın olduğu görüldü. Şekil 5.26'da 50 Å basamak kalınlığı için durumlar arasındaki geçiş enerjileri daha küçük foton değerlerine kayarken, 100 Å basamak kalınlığı için nerdeyse aynı foton enerji değerinde maksimum absorbsiyon katsayısını göstermişti. Bunun nedeni geçişler arasındaki enerji farklarının neredeyse eşit olmasıdır.

Şekil 5.36 ve şekil 5.37'de sırasıyla safsızlık atomu yokken ve varken V_0 =228 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için geçiş enerjileri verilir. Geçiş enerjilerinin basamak kalınlığı artımıyla azaldığı görülür. Sadece bu şekilde, 1d-1f geçişinde küçük basamak kalınlıklarında dalgalanma olur. Küçük basamak kalınlığında geçiş enerjileri arasındaki farkların büyükten küçüğe doğru sıralaması 1s-1p, 1p-1d, 1d-1f olarak sıralanırken kritik basamak kalınlığı 80 Å'dan büyük değerler için tam tersi sıralama olur. Bu sıralamalar toplam absorbsiyon katsayısını maksimum yapan foton enerjilerinde de görülür. Yapıda safsızlık atomunun olması ile geçiş enerji farkları birbirine yakın olur.

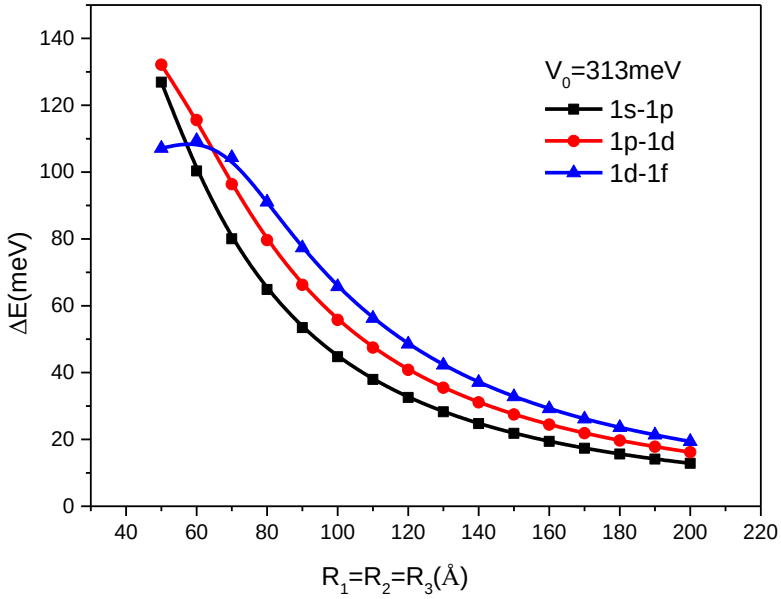
Şekil 5.38 ve şekil 5.39'da sırasıyla safsızlık atomu yokken ve varken V_0 =313 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için geçiş enerjileri verilir. Hemen hemen tüm geçiş enerjilerinin basamak kalınlığı artımıyla parabolik azaldığı görülür. Küçük basamak kalınlığında geçiş enerjileri arasındaki farkların büyükten küçüğe doğru sıralaması 1s-1p, 1p-1d, 1d-1f olarak sıralanırken kritik basamak kalınlığı 60 Å'dan büyük değerler için tam tersi sıralama olur. Bu sıralamalar toplam absorbsiyon katsayısını maksimum yapan foton enerjilerinde de görülür. Yapıda safsızlık atomunun olmasıyla geçiş enerji farkları birbirine yakın olur.



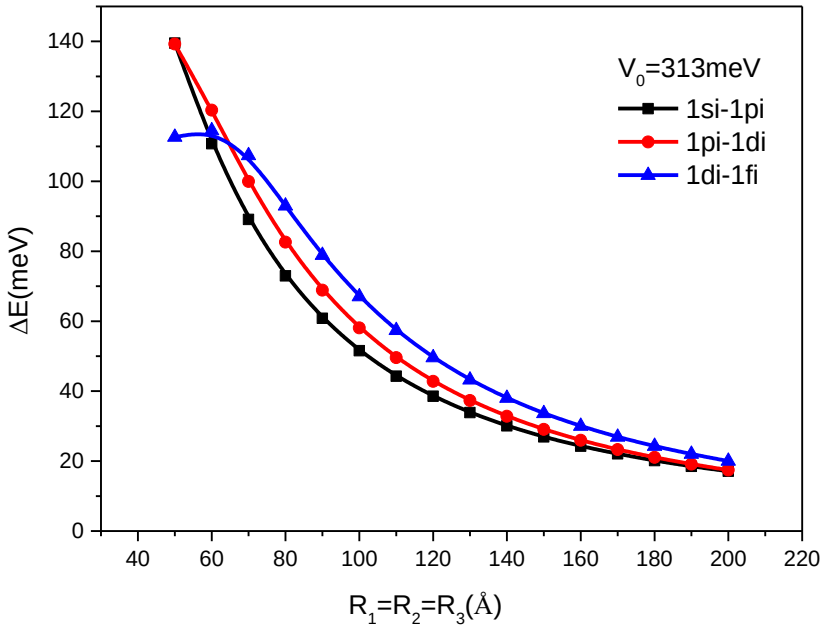
Şekil 5.36. V_0 =228 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri.



Şekil 5.37. V_0 =228 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri.



Şekil 5.38. V_0 =313 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu yokken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri.



Şekil 5.39. V_0 =313 meV potansiyel sınırlayıcı değeri için safsızlık atomu varken iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında tabaka kalınlıklarına bağlı geçiş enerji farkları değişimleri.

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmada safsızlık atomunun yokluğunda ve varlığında bir ve iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktalarındaki 1s, 1p, 1d, 1f, 2s, 2p, 2d, 2f durumlarının enerjileri ve bu durumların bağlanma enerjileri araştırıldı. Bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında basamak kalınlığının artmasıyla enerji durumları arasındaki farklar azalırken, iki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında bu farklar devam etmiştir. Potansiyel sınırlayıcı değerlerinin artması tüm enerjileri arttırır.

Bu yapıların optik özelliklerinde ise yapıda safsızlık atomunun olması maksimum değeri veren foton enerjilerini sağa doğru kaydırır. Bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasının tüm geçişlerinde absorbsiyon piklerinin tabaka kalınlığının artmasıyla daha küçük foton enerjilerinde soğurma maksimumları görülür. Bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında potansiyel sınırlayıcı değerinin artması tüm geçişler için soğurma maksimumlarını daha büyük foton enerjilerinde verir.

İki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktalarında ise kritik sınırlayıcı potansiyel değeri 148 meV'de farklı bir davranış sergiler. İki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktasında V_0=78 meV ve V_0=148 meV sınırlı potansiyellerde basamak kalınlığı 100 Å ve 150 Å değerleri için absorbsiyon katsayısının gelen foton enerjileri yakın çıkmış ve 148 meV sınırlayıcı potansiyelde 150 Å basamak kalınlığı için maksimum foton enerjisi değeri 100 Å'dan daha büyüktür. İki basamaklı sonsuz küresel kuantum noktalarında diğer geçişler için basamak kalınlığı artarken, absorblama maksimumları daha küçük enerjilerde görülür. Sınırlayıcı potansiyel değeri büyüdüğünde ise absorblama maksimumları daha büyük enerjilerde görülür.

Bir basamaklı sonsuz küresel kuantum noktaları için hesaplanan toplam absorbsiyon katsayılarının maksimum olduğu foton enerjileri, iki basamaklı sonsuz

küresel kuantum noktalarına göre kıyaslandığında daha büyük değerlere doğru kaydığı görülür.

Bu tezde elde edilen sonuçlar gösterir ki, kuantum noktalarının optik ve elektronik özellikleri, yapının geometrisine ve yapıda safsızlık atomu olup olmamasına bağlıdır. Bu özellikler de teknolojik açıdan daha gelişmiş cihaz yapılmasına olanak sağlayabilir. Bildiğimiz kadarıyla literatürde basamaklı olarak sonsuz kuantum noktaları üzerine çok fazla optik çalışmalar bulunmadığından, bu çalışmamızın bu eksikliği gidereceğini düşünüyoruz. Bu tezde verilen bilgilerin bu konuda çalışma yapacaklara yol gösterici olacağını ümit ediyoruz. Bu çalışmanın devamı olarak dışarıdan uygulanan elektrik, lazer ve manyetik alanlarla çok katmanlı sonsuz küresel kuantum noktalarının optik ve elektronik özellikleri incelenecektir.

KAYNAKÇALAR

Afkir, N. B., Feddi, E., Dujardin , F., Zazoui, M., & Meziane, J. (2018). Photovoltaic conversion efficiency of InN/$In_xGa_{1-x}N$ quantum dot intermediate band solar cells. *Physica B: Condensed Matter, 534*, 10-16.

Aktas, S., & Boz, F.K. (2008). The Binding Energy of hydrogenic impurtiy in multilayered spherical quantum dot. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 40*(4), 753-758. doi:10.1016/j.physe.2007.09.192

Aktas, S., Karaca Boz, F., & Sentürk Dalgic, S. (2005). Electric and magnetic field effects on the binding energy of a coaxial quantum well wire. *Physica E , 28*, 96-105. doi:10.1016/j.physe.2005.02.002

Al, E. B. (2020). *Manyetik Alan Altında Küresel Kuantum Noktalarının Elektronik ve Optik Özellikleri.* Sivas Cumhuriyet Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.

AL, E. B. (2021). Efect of magnetic feld, size and donor position on the absorption coefcients related a donor within the core/shell/shell quantum dot. *Springer, 53*(676). doi:10.1007/s11082-021-03340-w

Al, E. B., Kasapoglu, E., Sakiroglu, S., Sari, H., Sökmen, I., & Duque, C. A. (2020). Binding energies and optical absorption of donor impurities in spherical quantum dot under applied magnetic field. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 119*, 114011. doi:10.1016/j.physe.2020.114011

Arakawa, Y. (1994). Fabrication of quantum wires and dots by MOCVD selective growth. *Solid-State Electronics, 37*(4-6), 523-528. doi:10.1016/0038-1101(94)90238-0

Aydin, R., & Sahin, M. (2013). The electronic properties of a two-electron multi-shell quantum dot-quantum well heterostructure. *Journal of Applied Physics*. doi:10.1063/1.4816099

Bagher , A. M. (2016). Quantum Dots Applications. *Sensors & Transducers, 198*(3), 37-43.

Barseghyan, M. G., Restrepo, R. L., Mora-Ramos, M. E., & Kirakosyan, A. A. (2012, 7:538). Donor impurity-related linear and nonlinear intraband optical absorption coefficents in quantum ring: effect of applied electric field and hydrostatic

pressure. *Nanoscale Research Letters*. http://www.nanoscalereslett.com/content/7/1/538 adresinden alındı

Başar, B. (2000). *Kuantum Kimyası.* İstanbul: Birsen.

Beiser, A. (1997). *Modern Fiziğin Kavramları.* (G. Önengüt, Çev.) İstanbul.

Bekâr, B. (2018). Lazer Alan Etkisinde Farklı Geometrilere Sahip GAAS/AL(GAAS) ve GAN/AL(GAN) Kuantum Yapılarının Elektronik ve Optik Özellikleri.Trakya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

Bekar, B., Boz, F. K., Aktas, S., & Okan, S. E. (2019). The Effect on the Optical Absorption Coefficients due to the Positions in the Plane of Square GaAs / Al(GaAs) Quantum Well Wire under the Laser Field. *ACTA PHYSICA POLONICA A, 136*(6). doi:10.12693/APhysPolA.136.882

Bera, D., Qian, L., Tseng, T.-K., & Holloway, P. (2010). Quantum Dots and Their Multimodal Applications: A Review. *Materials, 3*, 2260-2345. doi:10.3390/ma3042260

Bose, C., & Sarkar, C. K. (1998). Perturbation Calculation Of Donor States in a Spherical Qunatum Dot. *Pergamon, 42*(9), 1661-1663. doi:S0038-1101(98)00126-9

Boz, F. K., Aktas, S., Bilekkaya, A., & Okan, S. E. (2010). The multilayered spherical quantum dot under a magnetic field. *Applied Surface Science, 256*, 3832-3836. doi:10.16/j.apsusc.2010.01.036

Boz, F.K., Nisanci, B., Aktas, S., & Okan, S. E. (2016). Energy levels of GaAs/AlxGa1-xAs/AlAs spherical quantum dot with an impurity. *Applied Surface Science, 387*, 76-81. doi:10.1016/j.apsusc.2016.06.035

Çakır, B., Sezer, M. Ö., Yakar, Y., Özmen, A., & Yüksel, H. (2009). Hidrojen Tipi Kuantum Nokta Yapının Taban Durumunun Kuantum Genetik Algoritma Yöntemiyle İncelenmesi. *Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi*(33), 45-49.

Çakır, B., Yakar, Y., & Özmen, A. (2017). Linear and nonlinear absorption coefficients of spherical quantum dot inside external magnetic field. *Physica B*(510), 86-91. doi:10.1016/j.physb.2017.01.018

Çakır, B., Yakar, Y., Özmen, A., & Sezer, M. Ö. (2010). Linear and nonlinear optical absorption coefficients and binding energy of a spherical quantum dot. *Superlattices and Microstructures 47*, 556–566.

De Souza, G. V., & Bruno-Alfonso, A. (2015). Finite-difference calculation of donor energy levels in a spherical quantum dot subject to a magnetic field. *Physica E, 66*, 128-132. doi:10.1016/j.physe.2014.10.011

Demirtaş, B. (2015). *Yabancı atomlu ve yabancı atomsuz çok katmanlı küresel kuantum noktalarında enerji durumlarının ve radyal olasılık yoğunluğunun incelenmesi*. Trakya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

Durmuşoğlu, E. G. Kuantum Nokta/Teknik Yazı. metalurji.org.tr/dergi160/d160_3134.pdf adresinden ulaşıldı.

Fox, M. (2014). *Katıların Optik Özellikleri.* (Ş. Aydoğan, Çev.) Nobel.

Gambhir, M., Kumar, M., Jha, P. K., & Mohan, M. (2013). Linear and nonlinear optical absorption coefficients and refractive index changes associated with intersubband transitions in a quantum disk with flat cylindrical geometry. *Journal of Luminescence*(143), 361-367. doi:10.1016/j.jlumin.2013.04.018

Gül, D. (2014). *Nonlınear Optıcal Propertıes of a Two-Dımensıonal Quantum Pseudo-Dot System Under İntense Laser Field*. Dokuz Eylül Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Harrison, P. (2009). *Quantum Wells, Wires and Dots* (3. b.). England: WILEY.

Hasanirokh, K., Asgari, A., & Rokhi, M. M. (2019). Theoretical study on nonlinear optical properties of CdS/ZnS spherical quantum dots. *International Journal for Light and Electron Optics 188* , 99-103.

Jafari, A. R. (2015). Optical properties of hydrogenic impurity in an inhomogeneous infinite spherical quantum dot. *Physica B*(456), 72-77.

Karaca Boz, F. (2005). *Düşük Boyutlu Yapılarda Yabancı Atom Problemi ve Eksitonlar*. Trakya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

Karaoğlu, B. (1998). *Kuantum Mekaniğine Giriş.* İstanbul.

Karimi, M. J., Rezaei, G., & Nazari, M. (2014). Linear and nonlinear optical properties of multilayered spherical quantum dots: Effects of geometrical size, hydrogenic impurity,hydrostatic pressure and temperature. *Journal of Luminescence*(145), 55-60. doi:10.1016/j.jlumin.2013.07.046

Kavruk, A. E., Sahin , M., & Koc, F. (2013). Linear and nonlinear optical properties ofGaAs/AlxGa1−xAs/GaAs/AlyGa1−yAs multi-shell spherical quantum dot. *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 114*. doi:10.1063/1.4829703

Kavruk, A. E., Sahin, M., & Atav, U. (2014). A detailed investigation of electronic and intersubband optical properties of AlxGa1−xAs/Al0.3Ga0.7As/AlyGa1−yAs/ Al0.3Ga0.7As multi-shell quantum dots. *Journal of Physics D Applied Physics 47(29):295302*. doi:10.1088/0022-3727/47/29/295302

Khordad, R., & Bahramiyan, H. (2015). Impurity position effect on optical properties of various quantum dots. *Pyhsica E, 66*, 107-115. doi:10.1016/j.physe.2014.09.021

Khou, M. E., Ibnouelghazı, E. A., & Abouelaoualım, D. (2022). Electronic and optical properties of an off-centre donor impurity in a WZ ZnS/ZnO/ZnS multishell spherical quantum dot. *Pramana – J. Phys.* doi:10.1007/12043-022-02325-y

Kirak, M., Altinok, Y., & Yilmaz, S. (2013). The effects of the hydrostatic pressure and temperature on binding energy and optical properties of a donor impurity in a spherical quantum dot under external electric field. *Journal of Luminescence*(136), 415-421. doi:10.1610.1016/j.jlumin.2012.12.026

Ledentsov, N. N., Ustinov, V. M., Shchukin, V. A., Kop'ev, P. S., & Alferov, Z. I. (1998). Quantum dot heterostructures: fabrication, properties, lasers. *SEMICONDUCTORS, 32*(4), 385–410.

Liang, S., & Xie, W. (2011). Effects of the hydrostatic pressure and temperature on optical properties of a hydrogenic impurity in the disc-shaped quantum dot. *Physica B, 406*, 2224-2230. doi:10.1016/j.physb.2011.03.035

Liu, W. H., Qu, Y., & Ban, S. L. (2017). Intersubband optical absorption between multi energy levels of electrons in InGaN/GaN spherical core-shell quantum dots. *Superlattices and Microstructures 102*, 373-381.

Lu, L., Xie, W., & Hassanabadi, H. (2011). Laser field effect on the nonlinear optical properties of donor impurities in quantum dots with Gaussian potential. *Physica B*(406), 4129-4134. doi:10.1016/j.physb.2011.07.063

Minkov, G.M., Aleshkin, V.Y., Rut, O.E., Shertobitov, A.A., Germanenko, A.V. (2020). Electron mass in a HgTe quantum well: Experiment versus theory. *Physica E: Low-dimensional System and Nanostructures, 116*,(113742).

Özmen, A., Yakar, Y., Çakır, B., & Atav, Ü. (2009). Computation of the oscillator strength and absorption coefficients for the intersubband transitions of the spherical quantum dot. *Optics Communications 282*, 3999-4004.

Rabanian, A., Neghabi, M., Zadsar, M., & Jafari, M. (2021). Theoretical studies of energy states of CdSe/ZnS/CdSe and ZnS/CdSe/ZnS quantum dots with an impurity. *Materials Science & Engineering B* .

Rani, P., Dalal, R., & Srivastava, S. (2022). Study of electronic and optical properties of quantum dots. *Applied Nanoscience, 12*, 2127–2138. doi:10.1007/s13204-022-02485-8

Restrepo, R. L., Barseghyan, M. G., Mora-Ramos, M. E., & Duque, C. A. (2013). Effects of hydrostatic pressure on the nonlinear optical properties of a donor impurity in a GaAs quantum ring. *Physica E, 51*, 48-54. doi:10.1016/j.physe.2012.09.030

Rodríguez-Magdaleno, K. A., Pérez-Álvarez, R., Martínez-Orozco, J. C., & Pernas-Salomón, R. (2017). Multi-shell spherical GaAs/Alx Ga1-x As quantum dot shells-size distribution as a mechanism to generate intermediate band enegy levels. *Physica E, 88*, 142-148. doi:10.1016/j.physe.2017.01.007

Sadeghi, E. (2009). Impurity binding energy of excited states in spherical quantum dot. *Physica E 41*, 1319-1322.

Taş, H., & Şahin, M. (2012). The inter-sublevel optical properties of a spherical quantum dot- quantum well with and without a donor impurity. *Journal of Applied Physics, 112*(5). doi: 10.1063/1.4751483

Wilson, J., & Hawkes, J. F. (2000). *Optoelektronics.* (İ. Okur, Çev.) Adapazarı: Değişim.

Yakar, Y., Çakır, B., & Özmen, A. (2010). Calculation of linear and nonlinear optical absorption coefficients of a spherical quantum dot with parabolic potential. *Optics Communications*, 1795–1800.

Yakar, Y., Çakır, B., Demir, C., & Özmen, A. (2021). Energy states, oscillator strengths and polarizabilities of many electron atoms confined by an impenetrable spherical cavity. *Int J Quantum Chem.* doi:10.1002/qua.26658

Yılmazer, F., Yakar, Y., Çakır , B., & Özmen, A. (2017). Küresel Kuantum Nokta Yapının Elektronik Yapısı ve Bağlanma Enerjisi. *Aksaray University Journal of Science and Engineering, 1*(1), 41-52. doi:10.29002/asujse.302748

Woodford,Chris.(2012/2020)Quantum dots. https://www.explainthatstuff.com/quantum-dots.html adresinden alındı.

Zhou, W., & Coleman, J. J. (2016). Semiconductor quantum dots. *Current Opinion in Solid State and Materials Science, 20*, 352-360. doi:10.1016/j.cossms.2016.06.006

Zhu, J., Xiong, J., & Gu, B. (1990). Confined Electron and Hydrogenic Donor States in a Spherical Quantum Dot of GaAs-Ga1-xAlxAs. *PYHSICAL REVİEW B, 41*(9), 6001-6007. doi:10.1103/PhysRevB.41.6001

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:** Hande Temel
Doğum Yeri ve Tarihi	**:** İstanbul / 1989
Sertifika	**:** C Sınıfı İş Güvenliği Uzmanlığı

EĞİTİM

- Otakçılar Lisesi (2007)
- Trakya Üniversitesi Fizik Bölümü (2015)
- Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü'nde Yüksek Lisans (2022)

KONGRELER ve BİLDİRİLER

1) Energy States and Binding Energies of Multilayer Infinite Spherical Quantum Dots**,** Figen Karaca Boz, Hande Temel, ICASEM 4th INTERNATİONAL CONGRESS ON APPLIED SCIENCES, ENGINEERING AND MATHEMATICS, October 20-23, 2022, Tekirdağ/Türkiye.

2) The Optical Absorption Changes in Two-Step Infinite Spherical Quantum Dot**,** Sevket Erol Okan, Hande Temel, Abdullah Bilekkaya, Figen Karaca Boz, INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFRENCE,PROCEDINGS VOL.2 ISN:1313-230X, 321-326PP., 18-19 November 2022, Gabrovo/Bulgaria**.**