T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

REZONANS TÜNELLEME CİHAZLARINDA HIZLANDIRICI KUANTUM KUYUSU ETKİSİ

MUKADDES YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: DOÇ. DR. ŞABAN AKTAŞ

EDİRNE-2016

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof.Dr. Murat YURTCAN
Fen Bilimleri Enstitüsü
Müdürü

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Ş. Erol OKAN
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tez tarafımca okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Şaban AKTAŞ
Tez Danışmanı

Bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Fizik Anabilim Dalında bir Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği/ oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	İmza
Prof. Dr. Ş. Erol OKAN	
Doç. Dr. Şaban AKTAŞ	
Yrd. Doç. Dr. Mustafa ULAŞ	

Tarih: **21/09/2016**

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

İlgili tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını beyan ederim.

21/092016

Mukaddes YILMAZ

Yüksek Lisans Tezi

Rezonans Tünelleme Cihazlarında Hızlandırıcı Kuantum Kuyusu Etkisi

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

ÖZET

Tek bir elektronun kuantum kuyu ve kuantum engellerinden oluşan bir yapıdaki davranışı incelenmiştir. Göz önüne alınan sistem iki asimetrik engelle kombine edilmiş iki asimetrik kuantum kuyusudur. Bu çalışmada odaklanılan nokta elektronun engellerde tünelleme yaptığı koşulların araştırılmasıdır. Sayısal yöntemler kullanarak, rezonans enerjisi, geçiş katsayısı ve geçiş zamanı yapı parametrelerinin bir fonksiyonu olarak hesaplanmış ve incelenen yapı için rezonans koşulları bulunmuştur. Daha önceki çalışmalarda hızlandırıcı kuantum kuyusu olarak anılan yapı biriminin tünellemede geçişi yavaşlatıcı özelliği de gösterdiği belirlenmiştir.

Yıl : 2016

Sayfa Sayısı : 51

Anahtar Kelimeler: Hızlandırıcı kuantum kuyusu, Rezonans tünelleme.

Master Thesis
The Accelerating Quantum Well Effect in Resonance Tunneling Device
Trakya University Institute of Natural Sciences
Department of Physics

ABSTRACT

The behavior of a single electron in a structure , which consists of quantum wells and quantum barriers, is investigated. The system considered is the combination of two asymmetrical wells with two asymmetrical barriers. The focusing point in this study is the investigation of the tunneling conditions of an electron through the system. We have used numerical methods to obtain the resonance energy, the transition coefficient and the dwell time as functions of structural parameters and the resonant tunneling conditions have been determined for the structure under consideration. It has been determined that the structure unit called the accelerating well in previous studies can also slow down the transition.

Year : 2016
Number of Pages : 51
Keywords : Accelerating quantum well, Resonance tunneling.

TEŞEKKÜR

Tez yöneticiliğimi üstlenerek çalışmalarımda yol gösteren, değerli hocam sayın Doç. Dr. Şaban AKTAŞ'a, bana çalışma ortamı sağlayan ve çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım, sayın Prof. Dr. Ş. Erol OKAN ve Doç. Dr. Figen KARACA BOZ'a teşekkür ederim. Ayrıca tezimin savunulma sürecinde adaletin yerine gelmesinde büyük katkıları olan avukatım Şerif Acar İMER'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i

SUMMARY ii

TEŞEKKÜR iii

İÇİNDEKİLER iv

SİMGELER VE KISALTMALAR vi

TABLOLAR LİSTESİ vii

ŞEKİLLER LİSTESİ viii

BÖLÜM 1 GİRİŞ 1

BÖLÜM 2 TEORİ ve YÖNTEM 3

2.1 Geçiş Katsayısının Sayısal Olarak Hesaplanması ……..……..... 3

2.2 Analitik Çözüm ile Nümerik Çözümün Karşılaştırılması ve Hata Analizi..... 7

2.3 Elektronun Geçiş Zamanı..... 9

BÖLÜM 3 SAYISAL YÖNTEMİN POTANSİYEL ÖRNEKLERİ ÜZERİNDE SINANMASI 11

3.1 Ön ve Arka Hızlandırıcılı Kuantum Kuyulu Asimetrik Üçlü Bariyer Sistemi 11

3.2 Elektrik Alan Altında Çift Bariyer Sistemi …….. 13

BÖLÜM 4 HIZLANDIRICILI KUANTUM KUYUSU İÇEREN ÇİFT BARİYER SİSTEMİ 16

4.1 Yinelenen Hesaplamalar 17

4.2 Yeni Hesaplamalar 21

4.2.1 İkinci Bariyer Kalınlığının Etkisi ……..... 22

4.2.2 Birinci Bariyer Kalınlığının Etkisi 22

4.2.3 Merkez Kuyu Kalınlığının Etkisi 23

4.2.4 Hızlandırıcı Kuyu Kalınlığının Etkisi 24

4.2.5 Kuyu Derinliklerinin Etkisi 26

4.2.6 Malzeme Etkisi 27

BÖLÜM 5 SONUÇLAR ve TARTIŞMA 30

KAYNAKLAR 32

ÖZGEÇMİŞ…… 36

TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER…….. 37

SİMGELER VE KISALTMALAR

m^*: Elektronun etkin kütlesi

m_0: Elektronun kütlesi

a^*: Etkin Bohr yarıçapı

R*: Etkin Rydberg enerjisi

Ψ: Dalga fonksiyonu

E: Enerji

V: Bariyer yüksekliği

T: Parçacığın geçiş katsayısı

R: Parçacığın yansıma katsayısı

L_{aw}: Hızlandırıcı kuyu kalınlığı

L_{lb}: Sol bariyer kalınlığı

L_{rb}: Sağ bariyer kalınlığı

L_{cw}: Merkez kuyu kalınlığı

Δt: Geçiş zamanı

k: Dalga sayısı

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1	Sayısal yöntemdeki N sayısına bağlı % HATA değerleri.....	9
Tablo 3.1	Üçlü bariyer sisteminde elektronun geçiş zamanı. (Parantez içi değerler Takura ve Yamamoto'nun sonuçları [34])	13
Tablo 4.1	Çift bariyerli hızlandırıcılı kuantum kuyusunun geometrik parametreleri[35]	18
Tablo 4.2	Çift bariyerli hızlandırıcılı kuyuda yapı sabitleri[35]	18
Tablo 4.3	Potansiyel kalınlık değerleri	28
Tablo 4.4	Potansiyel parametre değerleri	28

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1a	Matematiksel denklemlerle tanımlanamayan potansiyel engeli	4
Şekil 2.1b	Şekil 2.1.a'nın N=20 adet dikdörtgen potansiyele bölünerek elde edilen yaklaşık potansiyel model…….....	4
Şekil 2.2	N=5 için yaklaşık basamak potansiyel modeli.....	4
Şekil 2.3	*E* enerjili gelen parçacığın dalga fonksiyonunun model potansiyeldeki bölgelere göre dağılımı…….....	5
Şekil 2.4	Çift bariyer potansiyeli ve elektronun giriş ve çıkış bölgeleri. Her bir bölgede ki elektronun kütlesi eşit ve m^* =0.067x9.31 10^{-31} kg alınmıştır. (1a*=100 $\dot{A}$ ve 1R*= 5.83 meV)	7
Şekil 2.5a	Çift bariyer sisteminde, teorik ve sayısal yöntemle hesaplanmış geçiş katsayısının elektron enerjisine bağlı değişimi…….....	8
Şekil 2.5b	Şekil 2.5a'daki işaretli bölge için teorik ve sayısal yöntemle hesaplanmış geçiş katsayısının elektron enerjisine bağlı değişimi.....	8
Şekil 3.1	Dış kuyulu anti simetrik üçlü bariyer sistemi [34]….....	11
Şekil 3.2a	Dış kuyusuz üçlü bariyer yapıda geçiş katsayısının elektron enerjisinin fonksiyonu olarak elde edilen analitik hesaplama sonuçları (Referans [34]' ten taranarak alınmıştır).	12
Şekil 3.2b	Referans [34]' te Şekil 3.2a ile verilen sonuçların, sayısal yöntemle elde edilmiş hali.....	12

Şekil 3.3a	Dış kuyulu (ön ve arka) üçlü bariyer sisteminde geçiş katsayısının elektron enerjisinin fonksiyonu olarak elde edilen analitik hesaplama sonuçları (Referans [34]' ten taranarak alınmıştır).....	13
Şekil 3.3b	Referans [34]' te Şekil 3.3a ile verilen sonuçların, sayısal yöntemle elde edilmiş hali…….....	13
Şekil 3.4	Elektrik ve lazer alan altında çift bariyer potansiyel profili (Referans [22]' den taranarak alınmıştır).…….....	14
Şekil 3.5a	Geçiş katsayısının enerjinin fonksiyonu olarak hesaplandığı sonuçlar (Referans [22]' den taranarak alınmıştır).....	14
Şekil 3.5b	Referans [22]' de Şekil 3.5a' da gösterilen sonuçların bu çalışmada tanımlanan sayısal yöntemiyle elde edilmiş sonuçları..	14
Şekil 4.1	Çift bariyerli hızlandırıcılı kuantum kuyusu	16
Şekil 4.2	Tablo 4.1' deki Sistem 1 için sayısal yöntemle hesaplanmış geçiş katsayısının elektron enerjisine bağlı değişimi.....	18
Şekil 4.3	Tablo 4.1' deki Sistem 2 için sayısal yöntemle hesaplanmış geçiş katsayısının elektron enerjisine bağlı değişimi.....	19
Şekil 4.4a	Tablo 4.1' deki Sistem 3 için sayısal yöntemle hesaplanmış geçiş katsayısının elektron enerjisine bağlı değişimi.....	19
Şekil 4.4b	Sistem 3' ün potansiyel profili ve rezonans enerjisindeki bulunma olasılık yoğunluğunun konuma bağlı değişimi.....	19
Şekil 4.5a	Tablo 4.1' deki Sistem 4 için sayısal yöntemle hesaplanmış geçiş katsayısının elektron enerjisine bağlı değişimi.....	20
Şekil 4.5b	Sistem 4' ün potansiyel profili ve rezonans enerjisindeki bulunma olasılık yoğunluğunun konuma bağlı değişimi.....	20

Şekil 4.6a Tablo 4.1' deki Sistem 5 için sayısal yöntemle hesaplanmış geçiş katsayısının elektron enerjisine bağlı değişimi..... 20

Şekil 4.6b Sistem 5' in potansiyel profili ve rezonans enerjisindeki bulunma olasılık yoğunluğunun konuma bağlı değişimi..... 20

Şekil 4.7a Tablo 4.1' deki Sistem 6 için sayısal yöntemle hesaplanmış geçiş katsayısının elektron enerjisine bağlı değişimi..... 20

Şekil 4.7b Sistem 6' nın potansiyel profili ve rezonans enerjisindeki bulunma olasılık yoğunluğunun konuma bağlı değişimi..... 20

Şekil 4.8a Tablo 4.1' deki Sistem 7 için sayısal yöntemle hesaplanmış geçiş katsayısının elektron enerjisine bağlı değişimi..... 21

Şekil 4.8b Sistem 7' nin potansiyel profili ve rezonans enerjisindeki bulunma olasılık yoğunluğunun konuma bağlı değişimi..... 21

Şekil 4.9 Elektron rezonans enerjisi, geçiş katsayısı ve geçiş zamanının ikinci bariyer kalınlığına göre değişimi 22

Şekil 4.10 Elektron rezonans enerjisi, geçiş katsayısı ve geçiş zamanının sol bariyer kalınlığına göre değişimi 23

Şekil 4.11 Elektron rezonans enerjisi, geçiş katsayısı ve geçiş zamanının merkez kuyu kalınlığına göre değişimi 24

Şekil 4.12 Düz çizgi ile sunulan ve L_{rb}=1.32nm, L_{lb}=4 nm, L_{cw}=3.69 nm sabit değerleri için elektron rezonans enerjisinin, geçiş katsayısının ve geçiş zamanının hızlandırıcılı kuyunun kalınlığına göre değişimi verilmiştir (Şekillerdeki kesikli çizgi ile gösterilen sonuçlar ise Referans [35]' teki analitik sonuçlardır)..... 25

Şekil 4.13 Elektron rezonans enerjisi, geçiş katsayısı ve geçiş zamanının hızlandırıcı kuyunun derinliğine göre değişimi 26

Şekil 4.14 Elektron rezonans enerjisi, geçiş katsayısı ve geçiş zamanının merkez kuyunun derinliğine göre değişimi 27

Şekil 4.15a Sistem 8 için elektron enerjisine bağlı geçiş katsayısı değişimi 28

Şekil 4.15b Sistem 8 için elektron enerjisinin 0.2675 eV olduğu değerdeki olasılık dağılımları 28

Şekil 4.16a Sistem 9 için elektron enerjisine bağlı geçiş katsayısı değişimi 29

Şekil 4.16b Sistem 9 için elektron enerjisinin 0.2676 eV olduğu değerdeki olasılık dağılımları 29

Şekil 4.17a Sistem 10 için elektron enerjisine bağlı geçiş katsayısı değişimi 29

Şekil 4.17b Sistem 10 için elektron enerjisinin 0.2673 eV olduğu değerdeki olasılık dağılımları 29

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Son yıllarda elektronik aygıtların tasarımındaki gelişmelere bağlı olarak, nanoteknolojik uygulamalarda kullanılan düşük boyutlu kuantum yapıları üzerindeki çalışmalar artarak devam etmektedir. Geçmişteki bir takım çalışmalarda kuantum kuyu ve bariyerlerinden oluşmuş sistemler için diyot [1-3], transistor [4-6] gibi elektronik aygıtların karakteristik özelliklerini geliştirmek üzere elektron geçişi ve rezonans tünelleme olayı incelenmiştir. Rezonans tünelleme olayı; ilerleyen elektronun karşılaştığı engel potansiyelinden çok daha küçük enerjiye sahip olmasına rağmen, elektronun engel potansiyeli geçmesi olarak ifade edilir. Rezonans tünellemesi ile ilgili çalışmaları incelediğimizde genellikle simetrik dikdörtgen bariyer yapılardan oluşan sistemlerde gerçekleştirildiği gözlenmektedir [7-16]. Yamamoto ve arkadaşları bu tür yapılarda geçiş katsayısını analitik olarak hesaplamış ve rezonans enerjisinin, yapının geometrik parametrelerine bağlı olduğunu vurgulamışlardır [9-14].

Literatürde farklı yarıiletken kristaller kullanılarak oluşturulan kuantum sistemlerinde de rezonans tünelleme ve geçiş katsayıları ile ilgili çalışılmalar vardır [17-21]. Maheswari ve arkadaşları geçiş katsayının maksimum olduğu enerjilerin, iki boyutlu yapıda yer alan kuantum kuyu durum enerjileriyle aynı olduğunu belirtmişlerdir [19,20]. Dikdörtgen kuantum kuyularının spesifik özellikleriyle geçiş rezonanslarını inceleyen Niketić ve arkadaşları, yarıiletken kuantum kuyularının enerji spektrumlarının oluşturduğu rezonans durumlarını ayrıntılı olarak belirlemişlerdir [21].

Rezonans tünellemenin lazer alan ile kontrol edilebilmesinden dolayı, yukarıda bahsedilen kuantum sistemleri üzerine lazer alan etkisi önemli bir araştırma alanıdır. Bu bağlamda lazer alanın geçiş katsayı ve akım-voltaj karakteristikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir [22-24]. Chi ve arkadaşları, kuantum disklerinde elektrik alan altında elektron transportunu transfer matris tekniği kullanarak hesaplayıp, bariyer kalınlığının

artırılmasıyla akım yoğunluğu pikinin düşük voltaj bölgesine doğru kaydığını bulmuşlardır [25]. Asimetrik kuantum sistemlerinde ise ara yüzün kalınlığının dalga fonksiyonları, enerji durumları ve geçiş enerjileri üzerinde etkili olduğu görülmüştür [26]. Miyamoto ve Yamamoto, 1998 yılında yaptıkları çalışmada, asimetrik çift bariyer yapılarına elektrik alan uygulandığında geçiş katsayısının en büyük değerlerinin daha küçük enerji değerlerine doğru kaydığını bulmuşlardır [27]. Asimetrik dikdörtgen üçlü bariyer içeren yapıda rezonans tünellemenin her iki kuyudan gelen katkıyla aynı anda iki bağımsız enerji seviyesinde oluşması, bu alanda elde edilen önemli bir sonuç olarak görülmektedir [28,29].

Rezonans tünelleme aygıtlarında elektronun geçiş hızı cihaz performansı üzerindeki en etkili parametredir. Anwar ve arkadaşları 1989 yılında rezonans durumunda elektron geçiş süresini hesaplamışlardır [30]. Bunun yanı sıra çift bariyer yapılarında tünelleme zamanının kuyu genişliği, bariyer genişliği ve malzemenin mol konsantrasyonuna bağlı olduğu bulunmuştur [31,32]. Ayrıca tünelleme süresinin kısaltılmasına yönelik çift bariyer yapıları tanımlanmış ve bu yapılarda geçiş zamanı (*İng. dwell time)* hesaplanmıştır. Asimetrik çift bariyer sistemlerinde rezonans enerjisi sabit tutulurken, rezonans voltajı arttırıldığında geçiş zamanında azalmalar olduğu gözlenmiştir [33]. Takura ve arkadaşları ise, üçlü bariyer yapılarında ikinci bir dış kuyunun geçiş süresini azalttığını hesaplamışlardır [34]. Bir merkez kuyu ile ayrılan asimetrik çift bariyerli yapıda, sistemin girişinde yer alan bir kuantum kuyusunun geçiş süresini azalttığı gösterilmiş ve bu kuyu hızlandırıcılı kuyu olarak tanımlanmıştır [35].

Bu tezde referans [35]' te tanımlanan hızlandırıcılı kuyu yapısında geometrik parametrelerinin değişiminin, elektronun rezonans enerjisi, geçiş katsayısı ve geçiş zamanı üzerine etkileri incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu incelemeyi yapabilmek için, Bölüm 2' de çözümlerimiz için kullanılan yaklaşık bir modelleme ve sayısal çözümleme yöntemi verilmiş, Bölüm 3' te ise bu yöntemle elde edilen bazı sonuçlar literatürdeki çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bölüm 4' te daha önce analitik olarak çalışılmış bir potansiyel profili üzerinde gerekli doğrulamalar yapıldıktan sonra sayısal yöntemin avantajları kullanılarak yeni bilgiler üretilmiştir. Bölüm 5' te ise sonuçlar ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar özetlenmiştir.

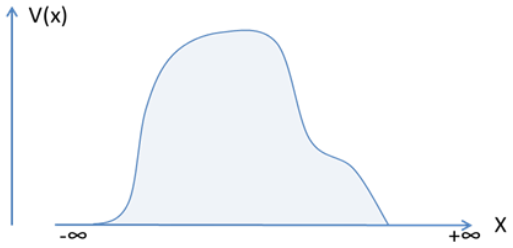
BÖLÜM 2

TEORİ ve YÖNTEM

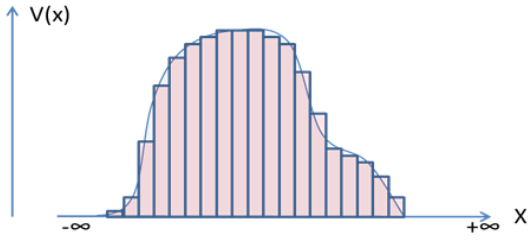
Kuantum mekaniğine göre bir parçacık bir potansiyel engelle karşılaştığında, parçacığın kinetik enerjisi engel potansiyelinden çok küçük olsa bile parçacık tünelleme yaparak engeli aşabilir. Bu parçacığın dalga özelliğinin bir sonucu olup modern elektroniğin temellerinden birini oluşturur. Tünelleme olayında, sınır koşulları göz önüne alınarak yansıma ve geçme olasılıklarının belirlenmesi analitik veya sayısal çözümleme yöntemleri kullanarak gerçekleştirilebilir. Hatasız olmalarına rağmen analitik çözümlerin bulunması her zaman mümkün değildir. Bu nedenle düşük boyutlu yapılarda analitik çözümlerin yanı sıra sayısal çözümleme teknikleri de kullanılmaktadır. Bu bölümde, genelleştirilmiş bir potansiyelden elektronların geçiş olasılığını ve elektronun engelde harcadığı zamanı hesaplamak için kullanılan sayısal yöntem tasvir edilmektedir.

2.1. Geçiş Katsayısının Sayısal Olarak Hesaplanması

Şekil 2.1a'deki gibi integrallenebilir matematiksel fonksiyonlarla tanımlanamayan ve bu nedenle analitik çözümü engelleyen bir potansiyelin verildiğini varsayalım. Bu potansiyel Şekil 2.1b' deki gibi N adet dikdörtgen potansiyele bölünerek, incelenen potansiyel yaklaşık olarak modellenebilir. Her bir potansiyel parçası için Schrödinger dalga denklemi yazıldığında ve ardışık iki potansiyel engel (veya kuyu) sınırlarında süreklilik koşulları kullanıldığında, 2N-2 tane denklem türetilir. Bu denklemler katsayılar matrisi formunda yazılır ve sayısal olarak çözümlere ulaşılır. Tezin bundan sonraki kısımlarında, yukarıda bahsedilen çözümleme adımlarının tümü "sayısal yöntem" olarak isimlendirilmiştir.

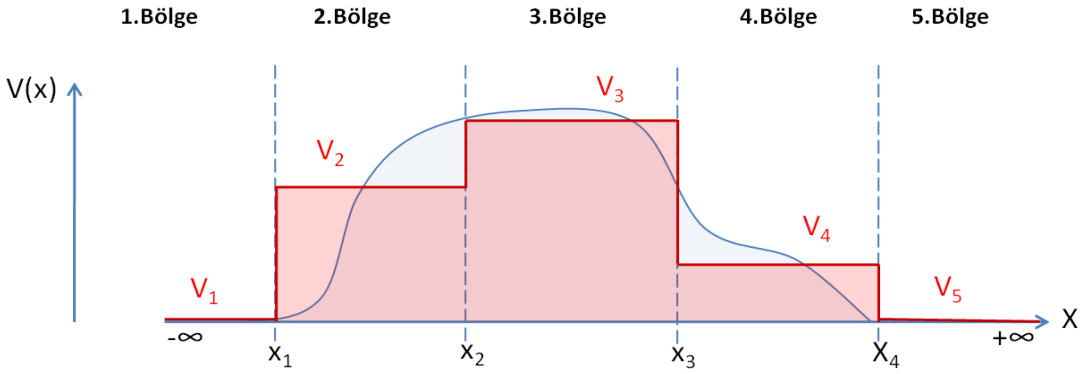


Şekil 2.1a Matematiksel denklemlerle tanımlanamayan potansiyel engeli.



Şekil 2.1b Şekil 2.1a' nın N=20 adet dikdörtgen potansiyele bölünerek elde edilen yaklaşık potansiyel model.

Sayısal yöntemi basitçe açıklayabilmek için Şekil 2.1' deki potansiyeli N=5 parçaya bölerek yaklaşık olarak modellenirse, Şekil 2.2' deki gibi kırmızı renkli dolgu ile betimlenen dikdörtgenlerden oluşan basamak potansiyel modeli oluşur.



Şekil 2.2. N=5 için yaklaşık basamak potansiyel modeli.

Böyle bir potansiyel engel ile karşılaşan parçacık için ilk iki bölge için Schrödinger denklemi

$$\text{1. Bölgede,} \quad -\frac{\hbar^2}{2m_1}\frac{d^2\Psi_1(x)}{dx^2} + V_1\,\Psi_1(x) = E\Psi_1(x) \tag{2.1}$$

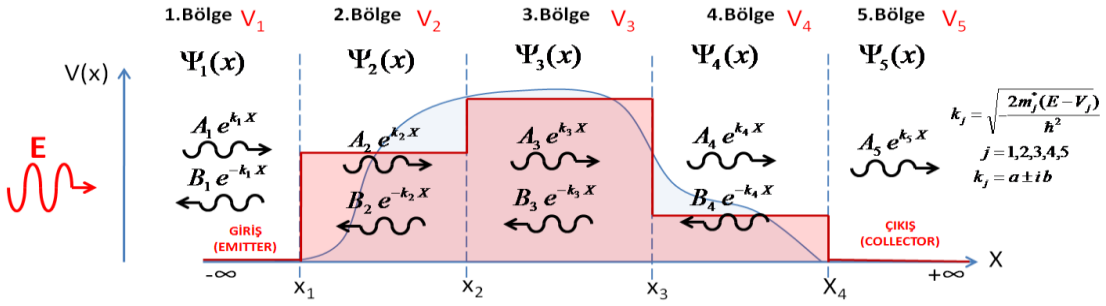
$$\text{2. Bölgede,} \quad -\frac{\hbar^2}{2m_2}\frac{d^2\Psi_2(x)}{dx^2} + V_2\,\Psi_2(x) = E\Psi_2(x) \tag{2.2}$$

olarak yazılır. Bu Schrödinger denklemlerinin çözümleri

$$\text{1. Bölge için,} \quad \Psi_1 = A_1 e^{k_1 x} + B_1 e^{-k_1 x} \tag{2.3}$$

2. Bölge için, $\Psi_2 = A_2 e^{k_2 x} + B_2 e^{-k_2 x}$ (2.4)

ile ifade edilir. Bu çözümlerdeki $k_1 = \sqrt{-\frac{2m_1(E-V_1)}{\hbar^2}}$ ve $k_2 = \sqrt{-\frac{2m_2(E-V_2)}{\hbar^2}}$ olarak tanımlanmıştır. k_1 ve k_2 değerleri; gelen elektronun enerjisinin o bölgedeki potansiyel değerden büyük veya küçük olmasına göre, reel veya imajiner değer alabilir. Bu çözümlerdeki ilk terim sağa doğru ilerleyen dalgayı, ikinci terim ise, potansiyel enerji basamağından yansıyan ve sola doğru yayılan dalgayı temsil eder. Elde edilen çözüm fonksiyonlarında, A gelen dalganın genliğini ve B ise yansıyan dalganın genliğini ifade etmektedir. Diğer bölgeler için Schrödinger denkleminin çözümleri Şekil 2.3 üzerinde temsili olarak gösterilmiştir. Yaklaşık potansiyel modelin son bölgesinde potansiyel sıfır olduğundan parçacık yansıma yapmaz. Bundan dolayı son bölgede B katsayısı sıfır olur.



Şekil 2. 3. *E* enerjili gelen parçacığın dalga fonksiyonunun model potansiyeldeki bölgelere göre dağılımı.

Gelen parçacığın bu potansiyel engelden geçme ihtimalini hesaplamak için kuantum mekanik teorisinin 1. postülasından süreklilik koşulları uygulanmalıdır. X_1, X_2, X_3 ve X_4 sınırlarında dalga fonksiyonunun ve türevinin sürekliliğinden, sırasıyla

X=X_1 sınırında,

$$\left(\begin{array}{c}\Psi_1(x)\big|_{X=X_1} = \Psi_2(x)\big|_{X=X_1} \\ \dfrac{d\Psi_1(x)}{dx}\bigg|_{X=X_1} = \dfrac{d\Psi_2(x)}{dx}\bigg|_{X=X_1}\end{array}\right) \Rightarrow \left(\begin{array}{l} A_1 e^{k_1 X_1} + B_1 e^{-k_1 X_1} = A_2 e^{k_2 X_1} + B_2 e^{-k_2 X_1} \\ A_1 k_1 e^{k_1 X_1} - B_1 k_1 e^{-k_1 X_1} = A_2 k_2 e^{k_2 X_1} - B_2 k_2 e^{-k_2 X_1}\end{array}\right) \Rightarrow \quad (2.5)$$

$$(A_1 = 1) \Rightarrow \left(\begin{array}{l} B_1 e^{-k_1 X_1} - A_2 e^{k_2 X_1} - B_2 e^{-k_2 X_1} = -e^{k_1 X_1} \\ -B_1 k_1 e^{-k_1 X_1} - A_2 k_2 e^{k_2 X_1} + B_2 k_2 e^{-k_2 X_1} = -k_1 e^{k_1 X_1}\end{array}\right)$$

X=X_2 sınırında,

$$\left.\begin{array}{c} \Psi_2(x)\big|_{X=X_2} = \Psi_3(x)\big|_{X=X_2} \\ \left.\dfrac{d\,\Psi_2(x)}{dx}\right|_{X=X_2} = \left.\dfrac{d\,\Psi_3(x)}{dx}\right|_{X=X_2} \end{array}\right) \Rightarrow \left(\begin{array}{c} A_2\,e^{k_2 X_2} + B_2\,e^{-k_2 X_2} = A_3\,e^{k_3 X_2} + B_3\,e^{-k_3 X_2} \\ A_2\,k_2\,e^{k_2 X_2} - B_2\,k_1\,e^{-k_2 X_2} = A_3\,k_3 e^{k_3 X_2} - B_3\,k_3\,e^{-k_3 X_2} \end{array}\right) \Rightarrow$$

$$\left(\begin{array}{c} A_2 e^{k_2 X_2} + B_2\,e^{-k_2 X_2} - A_3\,e^{k_3 X_2} - B_3\,e^{-k_3 X_2} = 0 \\ A_2 k_2\,e^{k_2 X_2} - B_2\,k_2\,e^{-k_2 X_2} - A_3\,k_3 e^{k_3 X_2} + B_3\,k_3\,e^{-k_3 X_2} = 0 \end{array}\right) \quad (2.6)$$

X=X3 sınırında,

$$\left.\begin{array}{c} \Psi_3(x)\big|_{X=X_3} = \Psi_4(x)\big|_{X=X_3} \\ \left.\dfrac{d\,\Psi_3(x)}{dx}\right|_{X=X_3} = \left.\dfrac{d\,\Psi_4(x)}{dx}\right|_{X=X_3} \end{array}\right) \Rightarrow \left(\begin{array}{c} A_3\,e^{k_3 X_3} + B_3\,e^{-k_3 X_3} = A_4\,e^{k_4 X_3} + B_4\,e^{-k_4 X_3} \\ A_3\,k_3\,e^{k_3 X_3} - B_3\,k_3\,e^{-k_3 X_2} = A_4\,k_4 e^{k_4 X_3} - B_4\,k_4\,e^{-k_4 X_3} \end{array}\right) \Rightarrow$$

$$\left(\begin{array}{c} A_3 e^{k_3 X_3} + B_3\,e^{-k_3 X_3} - A_4\,e^{k_4 X_3} - B_4\,e^{-k_4 X_3} = 0 \\ A_3 k_3\,e^{k_3 X_3} - B_3\,k_3\,e^{-k_3 X_3} - A_4\,k_4 e^{k_4 X_3} + B_4\,k_4\,e^{-k_4 X_3} = 0 \end{array}\right) \quad (2.7)$$

X=X4 sınırında,

$$\left.\begin{array}{c} \Psi_4(x)\big|_{X=X_4} = \Psi_5(x)\big|_{X=X_4} \\ \left.\dfrac{d\,\Psi_4(x)}{dx}\right|_{X=X_4} = \left.\dfrac{d\,\Psi_5(x)}{dx}\right|_{X=X_4} \end{array}\right) \Rightarrow \left(\begin{array}{c} A_4\,e^{k_4 X_4} + B_4\,e^{-k_4 X_4} = A_5\,e^{k_5 X_4} \\ A_4\,k_4\,e^{k_4 X_4} - B_4\,k_4\,e^{-k_4 X_4} = A_5\,k_5 e^{k_5 X_4} \end{array}\right) \Rightarrow$$

$$\left(\begin{array}{c} A_4 e^{k_4 X_4} + B_4\,e^{-k_4 X_4} - A_5\,e^{k_5 X_4} = 0 \\ A_4 k_4\,e^{k_4 X_4} - B_4\,k_4\,e^{-k_4 X_4} - A_5\,k_5 e^{k_4 X_4} = 0 \end{array}\right) \quad (2.8)$$

denklemleri elde edilir. Bu dört denklem katsayılar matrisine dönüştürülürse;

$$\begin{pmatrix} e^{-k_1 X_1} & -e^{k_2 X_1} & -e^{-k_2 X_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_1 e^{-k_1 X_1} & -k_2 e^{k_2 X_1} & k_2\,e^{-k_2 X_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{k_2 X_2} & e^{-k_2 X_2} & -e^{k_3 X_2} & -e^{-k_3 X_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 e^{k_2 X_2} & -k_2\,e^{-k_2 X_2} & -k_3 e^{k_3 X_2} & k_2\,e^{-k_3 X_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{k_3 X_3} & e^{-k_3 X_3} & -e^{k_4 X_3} & -e^{-k_4 X_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_3 e^{k_3 X_3} & -k_3\,e^{-k_3 X_3} & -k_4 e^{k_4 X_3} & k_4\,e^{-k_4 X_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{k_4 X_4} & e^{-k_4 X_4} & -e^{k_5 X_4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_4 e^{k_4 X_4} & -k_4\,e^{-k_4 X_4} & -k_5 e^{k_5 X_4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_1 \\ A_2 \\ B_2 \\ A_3 \\ B_3 \\ A_4 \\ B_4 \\ A_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -e^{k_1 X_1} \\ -k_1 e^{k_1 X_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

A X B

$$\mathbf{A\,X = B} \quad (2.9)$$

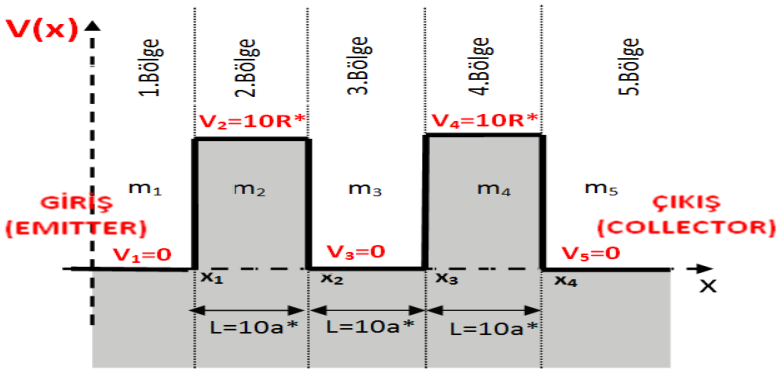
matris denklemi bulunur. Bu eşitlikte **A** ve **B** matrislerinin elemanları, parçacığın enerjisi E ve modelin bölgelerindeki potansiyel değerleri V_j'nin fonksiyonları olarak

bilinmektedir. Böylelikle, eşitlikteki bilinmeyen katsayılar matrisi **X** bilgisayar yardımıyla, FORTRAN programlama dili kullanılarak sayısal olarak hesaplandı. **X** matrisinin ilk elemanı B_1' in karesinin A_1' in karesine oranı; parçacığın yansıma olasılığı ve yansıma katsayısı R olarak ifade edildi. **X** matrisinin son elemanı A_5' in karesinin A_1' in karesine oranı ise geçiş olasılığıdır ve geçiş katsayısı T' yi verir. Ayrıca tüm katsayılar belirlendiği için elektronun dalga fonksiyonu ve olasılık dağılımı kolaylıkla elde edildi.

2.2. Analitik Çözüm ile Sayısal Çözümün Karşılaştırılması ve Hata Analizi

Bu kısımda, Bölüm 2.1' de anlatılan sayısal yöntem ile elde dilen sonuçlar ile analitik çözüm kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılarak, hata analizi sonuçları verilmektedir.

Şekil 2.4' te, Şekil 2.3' teki potansiyellerin $V_1=V_3=V_5=0$ ve $V_2=V_4=V_0=10R^*$ ve $X_1=0$, $X_2=10a^*$, $X_3=20a^*$ $X_4=30a^*$ keyfi değerlerin alınmasıyla elde edilen çift bariyer sistemini gösterilmektedir. Bu çift bariyer sisteminde denklem 2.5'ten 2.8'e kadar verilen



Şekil 2.4. Çift bariyer potansiyeli ve elektronun giriş ve çıkış bölgeleri. Her bir bölgedeki elektronun kütlesi eşit ve m^* =0.067x9.31 10^{-31} kg alınmıştır (1a*=100 $\dot{A}$ ve 1R*=5.83 meV).

dalga fonksiyonlarının ve türevlerinin süreklilik şartlarını kullanarak A_5 katsayısı analitik olarak

$$A_5 = -\frac{16\,k_b^2\,k^2\,\bar{A}}{e^{2k_b x_1}(k_b+k)^2\bar{B}-e^{2k_b x_2}(k_b-k)^2\bar{C}}A_1 \qquad (2.10)$$

elde edilir. Bu denklemde $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ katsayıları

$$\overline{\boldsymbol{A}} = e^{k_b(x_1+x_2+x_3+x_4)}\, e^{k(x_1+x_2+x_3-x_4)}$$

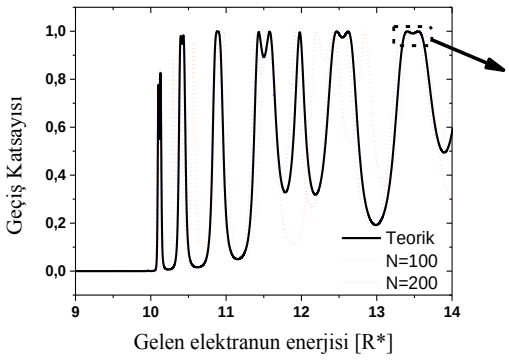
$$\overline{\boldsymbol{B}} = \{e^{2k_b x_3}[e^{2kx_2}(k_b+k)^2 - e^{2kx_3}(k_b-k)^2] + [e^{2k_b x_4}(k_b-k)^2(e^{2kx_3} - e^{2kx_2})]\}$$

$$\overline{\boldsymbol{C}} = \{e^{2k_b x_4}[e^{2kx_3}(k_b+k)^2 - e^{2kx_2}(k_b-k)^2] + [e^{2k_b x_3}(k_b+k)^2(e^{2kx_2} - e^{2kx_3})]\} \quad (2.11)$$

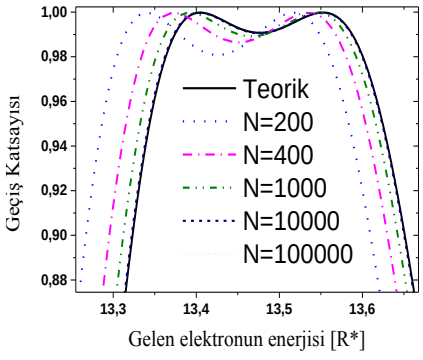
olarak tanımlanır. Burada *k* birinci, üçüncü ve beşinci bölgelerdeki dalga vektörüdür. $k = i\sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}\,E}$ daima imajiner değer alır. İkinci ve dördüncü bölgedeki k_b dalga vektörü ise iki farklı değer alabilir. Gelen elektronun enerjisi *E*, V_O dan küçükse $k_b = \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}(V_O - E)}$ biçiminde reel, V_O dan büyük ise $k_b = i\sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}(E - V_O)}$ biçiminde imajiner formdadır. Bu sistem için analitik olarak geçiş katsayısı

$$T = \frac{|A_5|^2}{|A_1|^2} \quad (2.12)$$

olarak bulunur. Bu teorik çözüm kullanılarak çift bariyer sistemi için geçiş katsayısının gelen elektronun enerjisine bağlı olarak değişimi, sayısal yöntemle karşılaştırmalı olarak şekil 2. 5.a 'da gösterilmiştir.



Şekil 2.5a Çift bariyer sisteminde, teorik ve sayısal yöntemle hesaplanmış geçiş katsayısının elektron enerjisine bağlı değişimi.



Şekil 2.5b Şekil 2.5a' daki işaretli bölge için teorik ve sayısal yöntemle hesaplanmış geçiş katsayısının elektron enerjisine bağlı değişimi.

Sayısal yöntemde bölme sayısının etkisini görmek için çift bariyer sistemi N=100, 200, 400, 1000, 10.000, 100.000 parçalara bölünerek hesap yapılmıştır. Şekil 2.5b' de, Şekil 2.5a' daki işaretli bölge için ayrıntılı olarak karşılaştırmalar gösterilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı gibi, N sayısı artıkça sayısal sonuçlar ile teorik sonuçlar arasındaki fark azalmaktadır. Sayısal yöntemdeki yapılan yüzde bağıl hata

$$\%HATA = \frac{|Gerçek\ Sonuç - Hesaplanan\ Sonuç|}{Gerçek\ Sonuç} x100 = \frac{\sum_i \left| T_{E_i}^{Teorik} - T_{E_i}^{Sayısal} \right|}{\sum_i T_{E_i}^{Teorik}} x100 \qquad (2.13)$$

denklemi ile belirlenebilir [36]. N=100, 200, 400, 1000, 10.000, 100.000 değerleri için oluşan hatalar Tablo 2.1' de verilmektedir.

Tablo 2.1 Sayısal yöntemdeki N sayısına bağlı % HATA değerleri.

N	%HATA
100	27
200	11
400	5
1000	2
10.000	0.2
100.000	0.02

Ayrıca sonuçlarımız, değişik yapıdaki benzer potansiyellerin yer aldığı literatür sonuçları ile uyum içindedir [37, 38].

2.3 Elektronun Geçiş Zamanı

Geçiş zamanı, elektronun uzayın belirli bir bölgesinde alıkoyulma süresi olarak tanımlanır. Bu parametre rezonans tünelleme aygıtlarının işlem hızının betimlenmesinde yol gösterici olmaktadır [35]. Şekil 2.3' te verilen potansiyele uygun olarak elektronun giriş bölgesinden çıkış bölgesine varana kadar geçen süre, yada uzayın $[x_1,x_4]$ bölgesindeki geçiş (oyalanma) zamanı

$$\Delta t = \frac{m_{giriş}}{\hbar\, k_{giriş}} \int_{x_1}^{x_4} |\Psi(x)|^2 dx \qquad (2.14)$$

denklemi ile ifade edilir [34,35]. Önceki kısımlarda açıklandığı gibi dalga fonksiyonlarının katsayıları belirlendiğinde, geçiş zamanı sayısal yöntemle kolaylıkla hesaplanır.

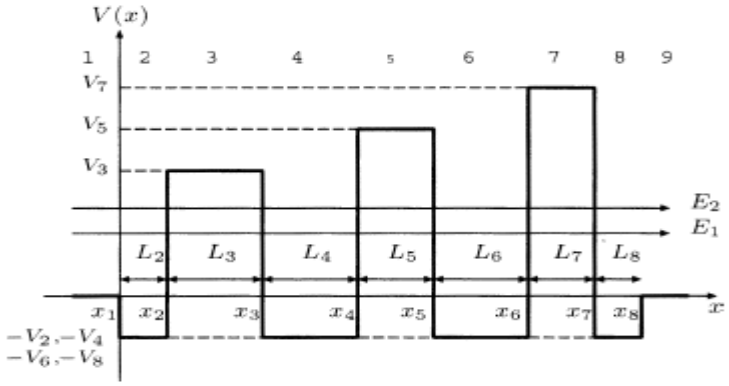
BÖLÜM 3

SAYISAL YÖNTEMİN POTANSİYEL ÖRNEKLERİ ÜZERİNDE SINANMASI

Bu tezde bariyer sistemlerde geçiş katsayısı, rezonans enerjisi ve geçiş zamanı hesapları incelendiği için bu bölümde, literatürde analitik hesaplamalarla ulaşılan bazı sonuçlar ve Bölüm 2' de tanımlanan yaklaşık modelin sayısal çözümleme yöntemi ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. İlk olarak ön ve arka hızlandırıcı kuantum kuyulu asimetrik üçlü bariyer sistemi üzerine çalışan Takura ve Yamamoto'nun makalesindeki geçiş katsayısı ve geçiş zamanı sonuçlarının bazıları karşılaştırmak için ele alınmıştır[34]. İkinci olarak ise, Valadares'in elektrik alan altında çift bariyer sistemi içeren çalışmasındaki geçiş katsayısı sonuçları ele alınmıştır[22].

3.1 Ön ve Arka Hızlandırıcılı Kuantum Kuyulu Anti Simetrik Üçlü Bariyer Sistemi

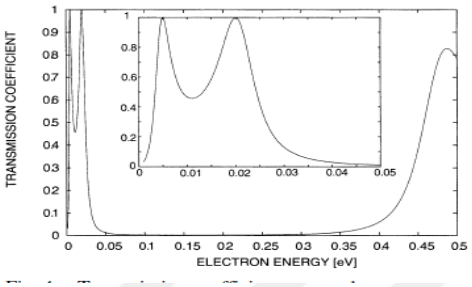
2007 yılında Takura ve Yamamoto tarafından yayınlanmış çalışmada Şekil 3.1' deki gibi aralarında kuyu bulunan üçlü bariyer engel sisteminin giriş ve çıkışına kuantum kuyuları koyarak, geçiş katsayıları ve geçiş zamanları analitik olarak hesaplanmıştır [34].



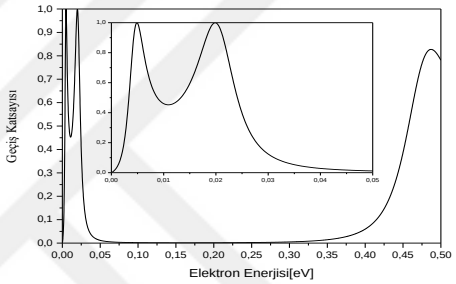
Şekil 3.1. Dış kuyulu anti simetrik üçlü bariyer sistemi [34].

Takura ve Yamamoto söz konusu sistemde geçiş katsayısını dış kuyuların yokluğunda ve varlığında hesaplayarak dış kuyuların etkisini araştırmışlardır.

Şekil 3.2a' da ilgili çalışmada dış kuyuların olmadığı durumda geçiş katsayısının elektron enerjisinin fonksiyonu olarak elde edilen hesaplama sonuçları taranarak verilmiştir. Şekil 3.2b' de ise makaledeki yapı parametreleri kullanılarak, tanımlanan bariyer sistemi N=10.000 parçaya bölünerek modellenmiş ve sayısal olarak katsayılar matrisi çözülerek elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. İki sonuç aynı olup yöntemin doğru olarak uygulanabildiğini kanıtlamaktadır. Hesaplamada E_1=0.005 eV ve E_2=0.02 eV enerjilerinde iki rezonans tünelleme enerjisi gözlenmektedir.

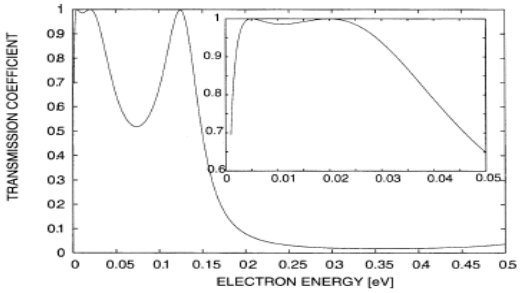


Şekil 3.2a Dış kuyusuz üçlü bariyer yapıda geçiş katsayısının elektron enerjisinin fonksiyonu olarak elde edilen analitik hesaplama sonuçları (Referans [34]' ten taranarak alınmıştır).

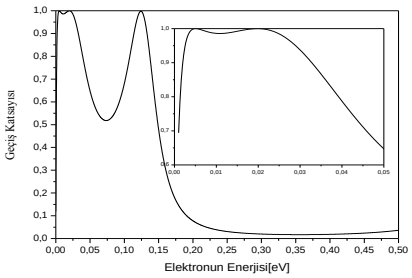


Şekil 3.2b Referans [34]' te Şekil 3.2a ile verilen sonuçların, sayısal yöntemle elde edilmiş hali.

Şekil 3.3a' da bu defa dış kuyuların varlığında geçiş katsayısının elektron enerjisinin fonksiyonu olarak elde edilen hesaplama sonuçları verilmiştir. Şekil 3.3b' de ise tanımlanan bariyer sistemi N=10.000 parçaya bölünerek modellenmiş ve sayısal olarak katsayılar matrisi çözülerek elde edilen sonuçlar karşılaştırma yapabilmek amacıyla gösterilmiştir. Kullanılan yaklaşık modelin sonuçları teorik hesaplama ile tutarlı sonuçlar vermektedir. Hesaplamada E_1 ve E_2 enerjilerindeki rezonans tünellemeleri keskinliklerini kaybetmekle birlikte yerlerini korumakta, ancak geçiş zamanında büyük değişiklikler meydana gelmektedir.



Şekil 3.3a Dış kuyulu (ön ve arka) üçlü bariyer sisteminde geçiş katsayısının elektron enerjisinin fonksiyonu olarak elde edilen analitik hesaplama sonuçları (Referans [34]' ten taranarak alınmıştır).



Şekil 3.3b Referans [34]' te Şekil 3.3a ile verilen sonuçların, sayısal yöntemle elde edilmiş hali.

Tezimizde geçiş zamanı hesaplamaları yapacağımız için Takura ve Yamamoto' nun dış kuyulu ve dış kuyusuz geçiş zamanları yaklaşık modelle hesaplanarak karşılaştırmalı olarak Tablo 3.1' de verilmiştir. Parantez içindeki değerler Takura ve Yamamoto'nın çalışmasından alınan değerleri göstermektedir. Yaklaşık model kullanarak hesaplanan değerler analitik sonuçlarla karşılaştırıldığında, sonuçlardaki en büyük hata % 0,5 olarak görülmektedir ki bu farkın adım sayısı (N) arttırıldığında daha da azalacağı ön görülebilir.

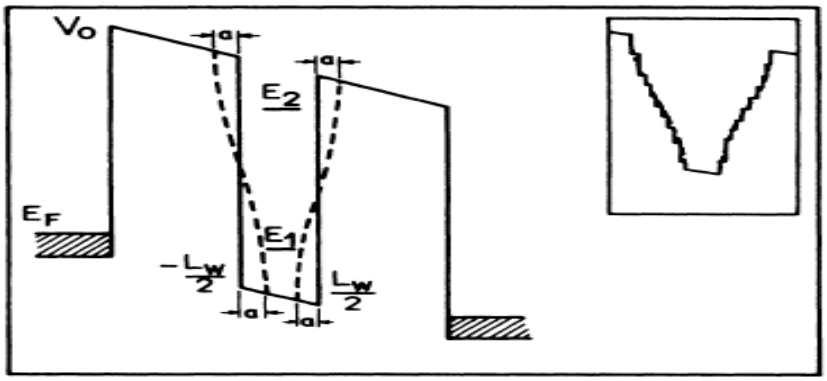
Tablo 3.1. Üçlü bariyer sisteminde elektronun geçiş zamanı (Parantez içindeki değerler Takura ve Yamamoto'nun sonuçlarıdır [34]).

	Dış kuyulu	**Dış kuyusuz**
Δt **(E_1, $T=1$) [fs]**	50.74 (50.49)	361.72 (360.08)
Δt **(E_2, $T=1$) [fs]**	38.12 (38.65)	156.28 (156.30)

Ayrıca bu çalışmada dış kuyuların eklenmesi E_1 rezonans enerjisinde geçiş süresini yaklaşık yedi kat, E_2 rezonans enerjisinde ise yaklaşık dört kat azaltmaktadır. Geçiş süresindeki bu iyileştirme hızlandırıcı kuyunun önemini belirtir.

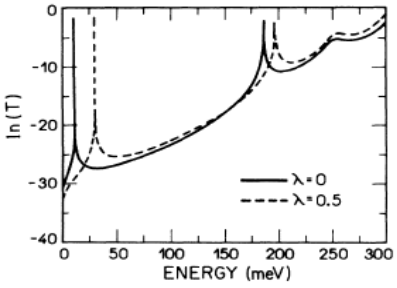
3.2 Elektrik Alan Altında Çift Bariyer Sistemi

Bu bölümde Valadares tarafından çalışılan ikili bariyer sisteminde bir elektronun elektrik ve uzun dalga boylu radyasyon alan altındaki geçiş katsayısı hesaplarının bir kısmı tekrarlanmıştır [22].

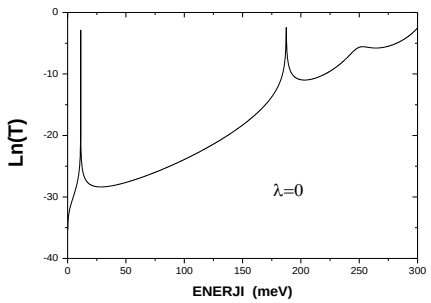


Şekil 3.4. Elektrik ve lazer alan altında çift bariyer potansiyel profili (Referans [22]' den taranarak alınmıştır).

Şekil 3.5a' da geçiş katsayısının, F=40 kV/cm elektrik alan altında, lazer alan varken ve yokken ki durumlar için enerjinin fonksiyonu olarak elde edilen sonuçlar sergilenmektedir. Sisteme dışarıdan elektrik alan uygulandığında e elektronun yükü, F ise elektrik alanın şiddeti olmak üzere Schrödinger denklemine $V_F(x) = +e\,F\,x$ potansiyel terimi ek olarak gelir. Grafiklerde geçiş katsayısının davranışını keskinleştirmek için logaritmik değeri kullanılmıştır. Şekil 3.4' te iç şekil olarak gözlenen ve Valaderes' in lazer potansiyelini hesaplamaya katmak için kullandığı adım potansiyel modeli, bu tezde hesaplamalarda kullanılan yaklaşık modelleme yöntemi ile benzerlikler taşımaktadır.



Şekil 3.5a Geçiş katsayısının enerjinin fonksiyonu olarak hesaplandığı sonuçlar (Referans [22]' den taranarak alınmıştır).



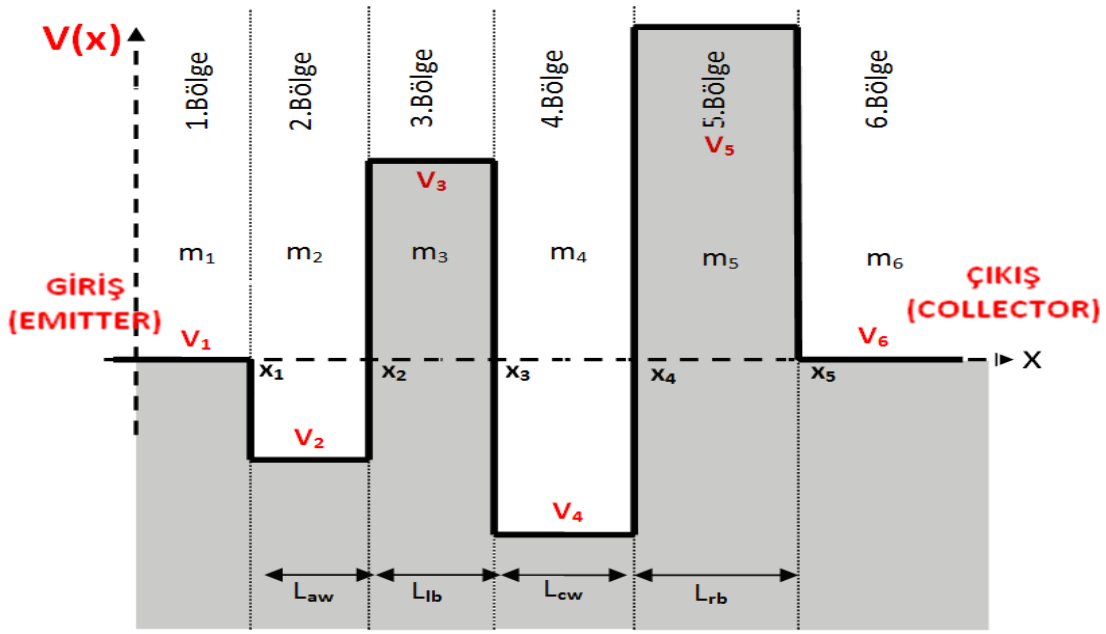
Şekil 3.5b Referans [22]' de Şekil 3.5a' da gösterilen sonuçların bu çalışmada tanımlanan sayısal yöntemi ile elde edilmiş sonuçları.

Şekil 3.5b' de Valaderes' in elde ettiği sonuçların, bu çalışmada betimlenen yaklaşık modelleme yöntemi ile lazer alan yokken ki durumda elde edilmiş sonuçlar sergilenmektedir. Sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir [22].

BÖLÜM 4

HIZLANDIRICILI KUANTUM KUYUSU İÇEREN ÇİFT BARİYER SİSTEMİ

Bu bölümde Şekil 4.1' de gösterilen çift bariyer hızlandırıcılı kuantum kuyusunun tüm parametrelerinin rezonans enerjisi, geçiş katsayısı ve geçiş süresi üzerine etkileri incelenmektedir. Bu parametrik etkilerin incelenmesi iki kısma ayrılmıştır.



Şekil 4.1. Çift bariyerli hızlandırıcılı kuantum kuyusu.

İlk kısımda Şekil 4.1’ de gösterilen çift bariyerli hızlandırıcılı kuantum kuyusunda Hamaguchi ve arkadaşlarının çalışması tekrarlanmıştır. Hamaguchi ve arkadaşları rezonans geçişlerin sabit bir rezonans enerjisinde olması için hızlandırıcılı ve hızlandırıcısız kuyulu yapıların geometrik parametrelerini farklı almıştır. Hamaguchi bu çalışmasında sadece hızlandırıcılı kuyunun genişliği ve derinliğinin etkisini araştırmıştır [35.]

Birden fazla kuantum bariyeri içeren bir sistemde elektronun geçiş zamanı sistemin başlangıcına, sonuna veya bariyerlerin arasına yerleştirilen kuantum kuyuları ile kontrol edilebileceği görülmektedir. Kuantum kuyu ve kuyularının sistemdeki yerlerinin yanı sıra kuyu genişlikleri, bariyer yükseklikleri ve farklı malzemeler kontrol mekanizmasının sağlandığı ek parametrelerdir. Bundan dolayı ikinci kısımda ise; yukarıda bahsedilen kontrol mekanizma parametrelerinin, hızlandırıcılı kuantum kuyusu içeren çift bariyer yapısında rezonans enerjisi, geçiş katsayısı ve geçiş süresi üzerine etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

4.1. Yinelenen Hesaplamalar

Hamaguchi ve arkadaşları Şekil 4.1’ de çift bariyerli hızlandırıcılı kuantum kuyusu 1. ve 6. bölgelerde GaAs, 2. ve 4. bölgelerde $In_{0.1}Ga_{0.9}As$, 3.bölgede $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ ve 5. Bölgede AlAs malzemelerinden kullanarak tanımlamışlardır [35]. Bu tanımlanan yapıda analitik hesaplamalar gerçekleştirdikleri geometrik parametreler Tablo 4.1’ de ve sistemin inşasında kullanılan yarı iletken kristallerin parametrik özellikleri Tablo 4.2’ de verilmektedir [35]. Bu bölümde aşağıda geometrik parametrelerinin verildiği yedi sistemin elektronun enerjisine bağlı geçiş katsayıları, Bölüm 2’ de anlatılan çözüm yöntemiyle hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda Hamuguchi ve arkadaşlarının kullandığı geometrik parametreler kullanılmıştır.

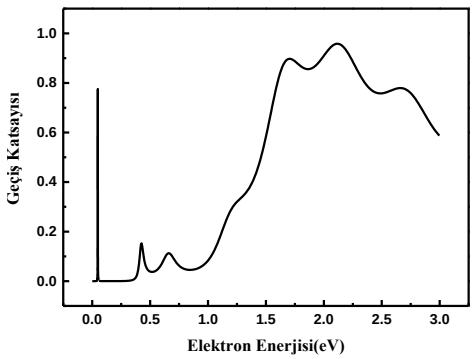
Tablo 4. 1’ de tanımlanan ilk iki sistem için elektron enerjisine bağlı olarak geçiş katsayısı değişimi Sistem 1 için Şekil 4.2’ de ve Sistem 2 için Şekil 4. 3’ te gösterilmiştir. Bölüm 3’ de doğruluğu gösterilen sayısal yöntem kullanılarak, elektron enerjisine bağlı geçiş katsayısı değişimi hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, ilgili çalışmada elde edilen sonuçlarla uyumludur. Elektronun 0.05 eV gibi çok küçük bir enerji değerinde rezonans geçişini gerçekleştirdiği görülür.

Tablo 4.1. Çift bariyerli hızlandırıcılı kuantum kuyusunun geometrik parametreleri[35].

	L_{aw}(nm)	L_{lb}(nm)	L_{cw}(nm)	L_{rb}(nm)
Sistem 1	2.0	4.0	3.69	1.5
Sistem 2	2.0	4.0	3.69	1.32
Sistem 3	0.0	4.0	3.69	1.50
Sistem 4	1.58	4.0	3.68	1.30
Sistem 5	3.15	4.0	3.69	1.48
Sistem 6	4.73	4.0	3.69	1.60
Sistem 7	6.31	4.0	3.69	1.50

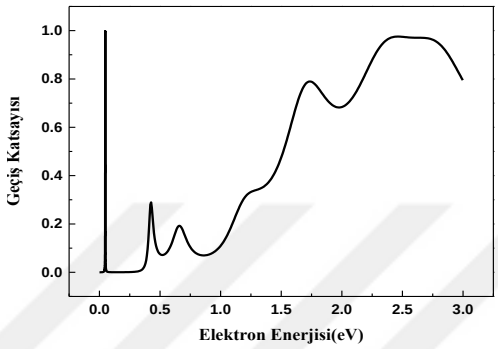
Tablo 4.2. Çift bariyerli hızlandırıcılı kuyuda yapı sabitleri [35].

Bölgeler	Malzeme	Etkin Kütle(kg)	Potansiyel(eV)
1. Bölge	GaAs	$0.067m_0$	0.0
2. Bölge	$In_{0.1}Ga_{0.9}As$	$0.063m_0$	-0.1
3. Bölge	$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$	$0.0919m_0$	0.3
4. Bölge	$In_{0.1}Ga_{0.9}As$	$0.063m_0$	-0.1
5. Bölge	AlAs	$0.15m_0$	1.0
6. Bölge	GaAs	$0.067m_0$	0.0



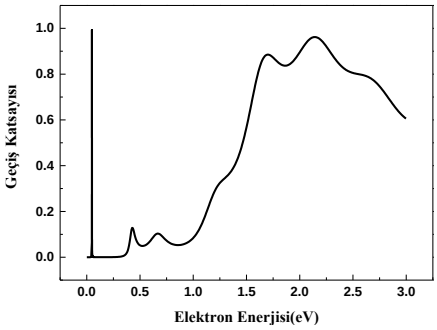
Şekil 4.2. Tablo 4.1' deki Sistem 1 için sayısal yöntemle hesaplanmış geçiş katsayısının elektron enerjisine bağlı değişimi.

Şekil 4.3’ te incelenen Sistem 2’ nin Sistem 1’ den farkı, ikinci bariyerin genişliğinin daha küçük alınmasıdır. Burada elektronun yine 0,05 eV değerinde geçiş yaptığı gözlenir. Ancak ikinci bariyerin kalınlığının azalması ile Sistem 1 için % 80 olan rezonans tünellemenin Sistem 2’ de yaklaşık olarak % 100 olduğu görülür.

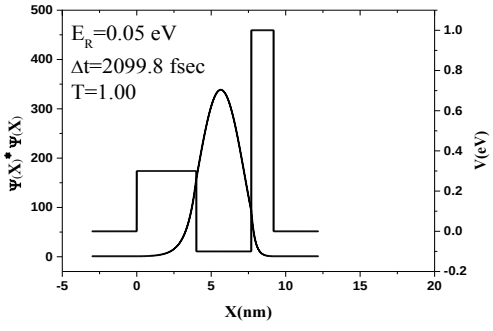


Şekil 4.3. Tablo 4.1’ deki Sistem 2 için sayısal yöntemle hesaplanmış geçiş katsayısının elektron enerjisine bağlı değişimi.

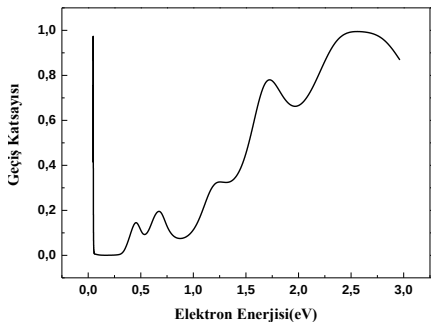
Bu hesaplamalar Hamaguchi ve arkadaşlarının analitik çözümleriyle birebir aynıdır [35]. Benzer hesaplamalar Tablo 4.1'de parametreleri verilen sistem 3, 4, 5, 6 ve 7 için sırasıyla şekil 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8’ de sonuçları gösterildiği biçimde tekrarlanmıştır. Buradaki amaç; kuyu genişlikleri ve bariyer genişlikleri değiştirildiğinde, bu yapının geçiş katsayısının, geçiş zamanının ve olasılık dağılımının nasıl etkilendiğini incelemektir.



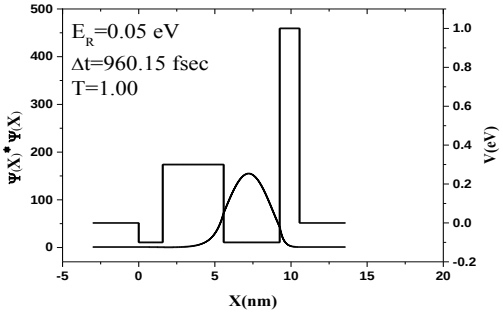
Şekil 4.4a Tablo 4.1’ deki Sistem 3 için sayısal yöntemle hesaplanmış geçiş katsayısının elektron enerjisine bağlı değişimi.



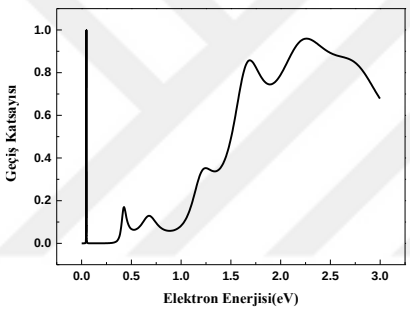
Şekil 4.4b Sistem 3’ ün potansiyel profili ve rezonans enerjisindeki bulunma olasılık yoğunluğunun konuma bağlı değişimi.



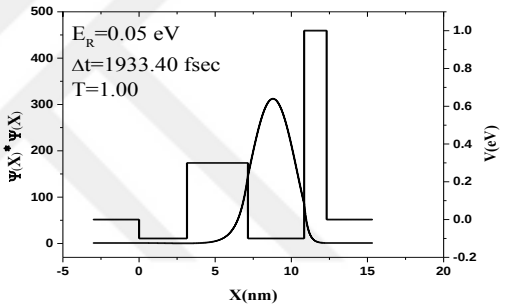
Şekil 4.5a Tablo 4.1' deki Sistem 4 için sayısal yöntemle hesaplanmış geçiş katsayısının elektron enerjisine bağlı değişimi.



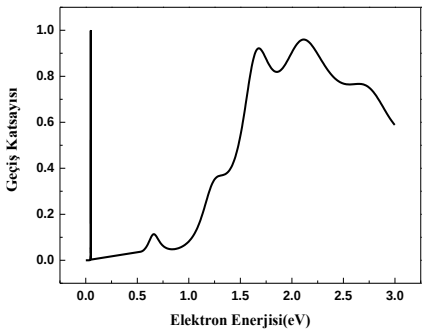
Şekil 4.5b Sistem 4' ün potansiyel profili ve rezonans enerjisindeki bulunma olasılık yoğunluğunun konuma bağlı değişimi.



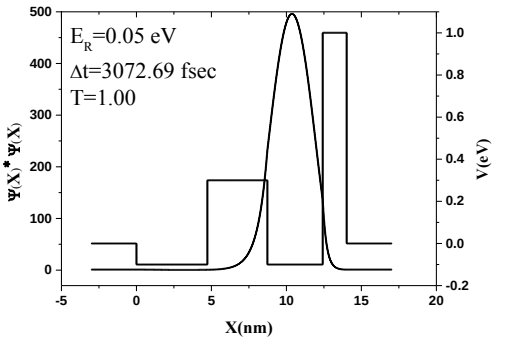
Şekil 4.6a Tablo 4.1' deki Sistem 5 için sayısal yöntemle hesaplanmış geçiş katsayısının elektron enerjisine bağlı değişimi.



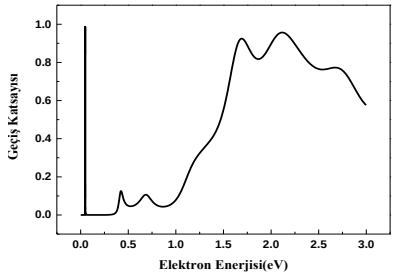
Şekil 4.6b Sistem 5' in potansiyel profili ve rezonans enerjisindeki bulunma olasılık yoğunluğunun konuma bağlı değişimi.



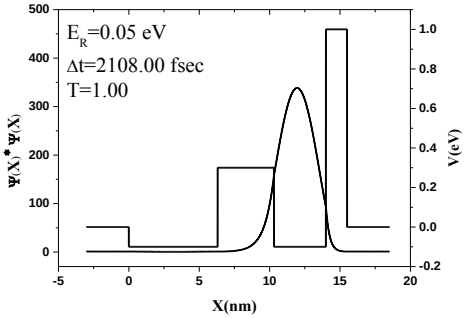
Şekil 4.7a Tablo 4.1' deki Sistem 6 için sayısal yöntemle hesaplanmış geçiş katsayısının elektron enerjisine bağlı değişimi.



Şekil 4.7b Sistem 6' nın potansiyel profili ve rezonans enerjisindeki bulunma olasılık yoğunluğunun konuma bağlı değişimi.



Şekil 4.8a Tablo 4.1' deki Sistem 7 için sayısal yöntemle hesaplanmış geçiş katsayısının elektron enerjisine bağlı değişimi.



Şekil 4.8b Sistem 7' nin potansiyel profili ve rezonans enerjisindeki bulunma olasılık yoğunluğunun konuma bağlı değişimi.

Hesaplamalarda kullanılan geometrik parametreler Hamaguchi ve arkadaşlarının çalışmasında kullanılan değerlerdir, ancak söz konusu çalışmada sadece potansiyel profili ve olasılık dağılımı sergilenmekte olup Δt geçiş zamanı ve Şekil 4.4a-4.8a' da gösterilen geçiş katsayılarının enerjiye bağlılığı bu çalışmada üretilmiştir.

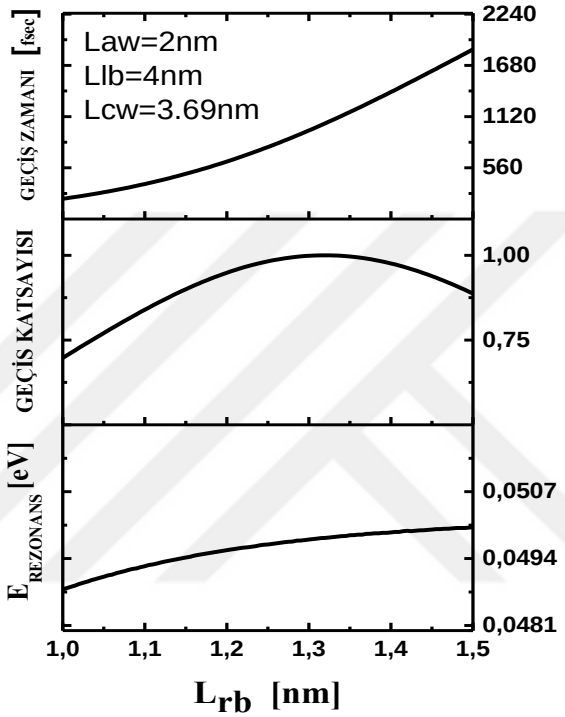
İncelenen geometrik sistemlerde genel olarak elektronun ikinci kuyuda lokalize olduğu gözlenmektedir. Şekil 4.5b' de görüldüğü üzere sistemin önüne eklenen hızlandırıcı kuantum kuyusu geçiş zamanını azaltmaktadır. Bununla birlikte hızlandırıcı kuyu genişliği arttıkça bu özellik kaybolmaktadır.

4.2. Yeni Hesaplamalar

Tablo 4.1' de verilen yapılar, Referans [35]' de incelenen yapılardır. Bu yapılarda, geometrik parametreler (Law, Lrb) 50 meV sabit bir rezonans enerjisinde T=1 olacak şekilde değiştirilmiştir. Bu seçim, hızlandırıcı kuyunun etkisini incelemek için elverişli değildir. Çünkü L_{aw} değiştirilirken, L_{rb}' de değiştirilmektedir. Elektronik aygıt tasarımlarındaki ön teorik çalışmalarda, tek bir geometrik parametre değiştirilerek ve diğer parametreler sabit kalarak en iyi çalışma koşullarına sahip elektronik yapı parametreleri belirlenebilir. Aygıt tasarımcılarına yol gösterici olması için, bu bölümde sadece bir geometrik parametre değiştirilerek (diğer parametreler sabit tutularak), rezonans enerjisinde, geçiş katsayısında ve geçiş zamanında ki değişimler incelenmiştir. Yapının daha detaylı bir analizini yapabilmek için, değişken rezonans enerjisinin geometrik parametrelere bağlılığı göz önüne alınmalıdır **[39]**.

4.2.1. İkinci Bariyer Kalınlığının Etkisi

Şekil 4.9' da rezonans enerjisi, geçiş katsayısı ve geçiş zamanının çıkış (collector) tarafındaki bariyer kalınlığına bağlı olarak değişimi verilmektedir. Bariyer kalınlığının değişim menzili, diğer kuyular ve bariyer ile karşılaştırılabilir kalması için geçiş katsayısı maksimumunun gözlendiği 1-1.5 nm aralığı seçilmiştir.



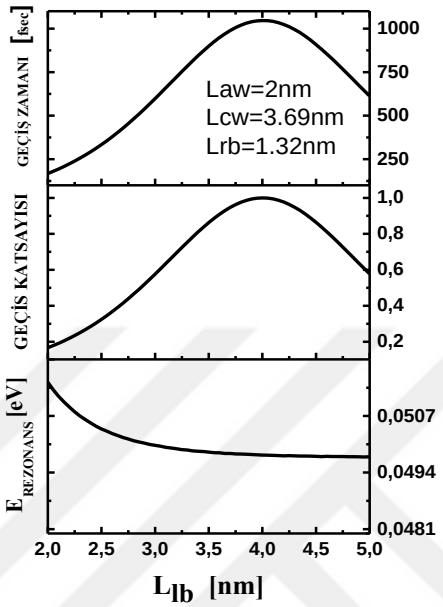
Şekil 4.9. Elektron rezonans enerjisi, geçiş katsayısı ve geçiş zamanının ikinci bariyer kalınlığına göre değişimi.

Rezonans enerjisi $E_R \cong 0.05 - 0.07\exp(-3.9\,L_{rb})$ denklemi ile fit edilebilmektedir. Buna göre rezonans enerjisi E_R, engel genişliği L_{rb} arttıkça 50 meV seviyesinde sabit kalma eğilimindedir. Geçiş katsayısı T, L_{rb}=1.32 nm değerinde maksimum değerini almaktadır. Geçiş zamanı ise, artan bariyer genişliği ile üstel olarak artmaktadır.

4.2.2. Birinci Bariyer Kalınlığının Etkisi

Şekil 4.10' da, kısım 4.2.1' de yapılan hesaplamalar bu defa sağ engel bariyerini geçiş katsayısını maksimum olduğu değerinde sabit tutup, giriş (emitter) tarafındaki

engelin genişliğini değiştirerek tekrarlanmıştır. Bariyer kalınlığının değişim menzili geçiş katsayısı ve geçiş zamanı maksimumlarının gözlendiği 2-5 nm aralığı ile sınırlandırılmıştır.

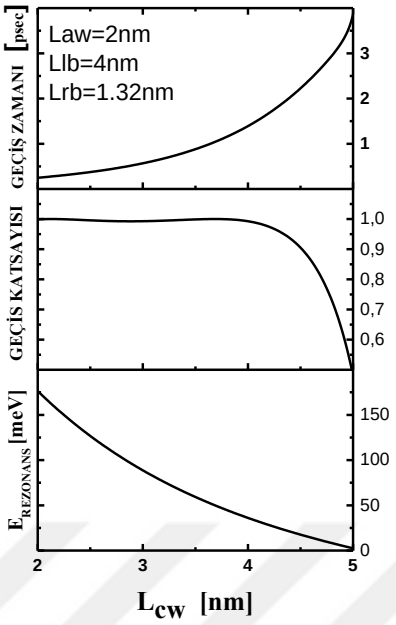


Şekil 4.10. Elektron rezonans enerjisi, geçiş katsayısı ve geçiş zamanının sol bariyer kalınlığına göre değişimi.

Rezonans enerjisi $E_R \cong 0.05 - 0.08\exp(-1.9\,L_{lb})$ denklemi ile fit edilebilmektedir. Buna göre rezonans enerjisi $E_{R,}$, engel genişliği L_{lb} arttıkça azalmakta ve yine daha önce olduğu gibi 50 meV seviyesinde sabitlenmektedir. Geçiş zamanı ve geçiş katsayısı sol bariyer kalınlığına göre eş zamanlı değişmektedir ve her ikisi de L_{lb}=4nm' de maksimum değere ulaşır.

4.2.3. Merkez Kuyu Kalınlığının Etkisi

Şekil 4.11' de rezonans enerjisi, geçiş katsayısı ve geçiş zamanının, iki bariyer arasındaki merkez kuyu kalınlığına bağlı olarak değişimi verilmektedir. Kuyu kalınlığının değişim menzili, geçiş katsayısının sabit kalıp daha sonra hızlıca azaldığının gözlendiği 2-5 nm aralığı seçilmiştir.



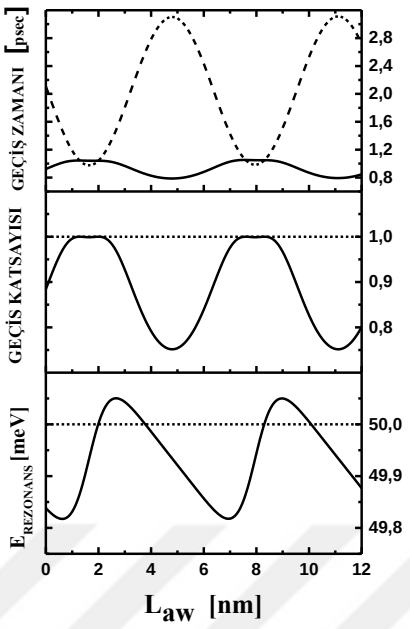
Şekil 4.11. Elektron rezonans enerjisi, geçiş katsayısı ve geçiş zamanının merkez kuyu kalınlığına göre değişimi.

Rezonans enerjisi değeri $E_R \cong \exp(-0.83\, L_{CW})$ denklemi ile ifade edilebilir. Seçilen L_{CW} aralığı için, rezonans enerji E_R değerleri $\Delta E_R \approx 175$ meV bandında değişmektedir. Ayrıca kısım 4.2.1 ve 4.2.2' de alınan L_{CW}=3.69 nm değeri, Şekil 4.11' de E_R=0.05 eV (=50 meV) değerine karşılık gelmektedir.

Bu hesaplamalara göre merkez kuyu genişliğine bağlı olarak rezonans enerjisi kuyu genişliği artarken hemen hemen lineer olarak azalır. Buna karşı geçiş zamanı üstel olarak artmaktadır. Kuyu genişledikçe elektronun yapıda daha fazla süre oyalanması beklenen bir davranıştır. Geçiş katsayısı ise 4 nm limitine kadar T=1 durumunu korurken bu değerden daha geniş kuyular için üstel olarak azalır.

4.2.4. Hızlandırıcı Kuyu Kalınlığının Etkisi

Şekil 4.12 a, b, c' de sırasıyla rezonans enerjisi, geçiş katsayısı ve geçiş zamanının giriş (emitter) tarafındaki hızlandırıcılı kuyu kalınlığına bağlı olarak değişimi verilmektedir. Kuyu kalınlığının değişim menzili periyodik davranışların kolayca gözlemleneceği 0-12 nm aralığı seçilmiştir.



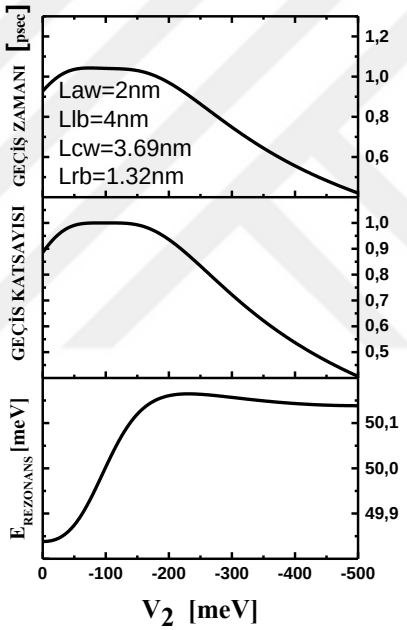
Şekil 4.12. Düz çizgi ile sunulan ve L_{rb}=1.32nm, L_{lb}=4 nm, L_{cw}=3.69 nm sabit değerleri için elektron rezonans enerjisinin, geçiş katsayısının ve geçiş zamanının hızlandırıcılı kuyunun kalınlığına göre değişimi verilmiştir (Şekillerdeki kesikli çizgi ile gösterilen sonuçlar ise Referans [35]' teki analitik sonuçlardır).

Bu şekilde kesikli çizgi ile sunulan Referans [35]' teki analitik hesaplamalarda, rezonans enerjisi sabit tutularak (50 meV) geçiş katsayısının maksimum olduğu (T=1) şartında, her bir hızlandırıcı kuyu kalınlığı L_{aw} için farklı L_{rb} ve L_{cw} değerleri hesaplanarak sonuçlar bulunmuştur. Oysa düz çizgi ile gösterilen bu çalışmada anlatılan sayısal yöntem kullanılarak yaptığımız hesaplamalarımızda L_{rb}=1.32 nm ve L_{cw}=3.69 nm sabit alınarak, sadece L_{aw} değiştirilerek sonuçlar hesaplanmıştır. Bu sonuçlarda rezonans enerjisi, geçiş katsayısı ve geçiş zamanı hızlandırıcı kuyunun kalınlığına periyodik bir fonksiyonla bağlıdır. Geçiş katsayısı ve geçiş zamanı aynı fazda ve aynı biçimde, rezonans enerjisi ise farklı bir fazda ve biçimde hareket etmektedir. Şekil 4.12.a'daki rezonans enerjisi $\Delta E_R \approx 0.23$meV genliği ile periyodik salınımının yapmaktadır. Bu rezonans enerjisinin salınım genliği oldukça küçük olmasına rağmen, geçiş katsayısının 0.7'den 1'e kadar olan aralıkta çarpıcı değişimler yapmasına sebep olmaktadır. Ayrıca rezonans enerjisi sinüzoidal davranış gösterirken, Şekil 4.12.b' de geçiş katsayısının bazı L_{aw} aralıklarında 1 civarında düzlükler oluşturduğu görülmüştür. Şekil 4.12.c' de geçiş zamanı her iki rezonans enerjisi sonuçları için periyodik davranış gösterir. Fakat rezonans enerjisinin sabit olmadığı durumda geçiş zamanı, rezonans enerjisinin sabit olan duruma

göre daha küçük genlikte ve zamanda gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca değişken rezonans enerjisi için, geçiş zamanı geçiş katsayısının davranışına benzer davranış göstermektedir.

4.2.5 Kuyu Derinliklerinin Etkisi

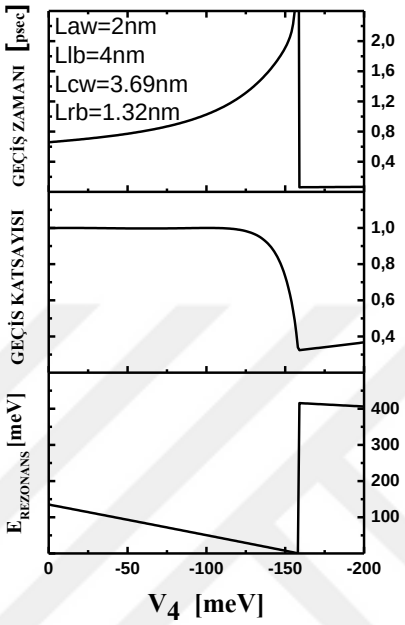
Şekil 4.13' te rezonans enerjisi, geçiş katsayısı ve geçiş zamanının giriş (emitter) tarafındaki hızlandırıcılı kuyu derinliğine bağlı olarak değişimi verilmektedir. Kuyu derinliğinin değişim menzili maksimumları gözlemleneceği 0 ile -500 meV aralığı seçilmiştir.



Şekil 4.13. Elektron rezonans enerjisi, geçiş katsayısı ve geçiş zamanının hızlandırıcı kuyunun derinliğine göre değişimi.

Rezonans enerjisi değeri $V_2 \cong$-200 meV civarında maksimum değerine ulaşmaktadır. Geçiş zamanı ve geçiş katsayısı ise $V_2 \cong$-70 meV' da maksimum değerine ulaşmakta ve bu değerden sonra $V_2 \cong$-150 meV değerine kadar neredeyse bir plato davranışı göstermektedirler. Bu değerden sonra da hızlandırıcı kuyunun derinliğini artırdıkça geçiş zamanı hızla azalmakla birlikte geçiş katsayısı da düşmektedir. Buradan en uygun hızlandırıcı kuyunun derinliği için $V_2 \cong$-50-150 meV aralığı belirlenir.

Şekil 4.14’ te rezonans enerjisi, geçiş katsayısı ve geçiş zamanının iki bariyer arasında bulunan merkez kuyu derinliğine bağlı olarak değişimi verilmektedir. Kuyu derinliğinin değişim menzili karakteristik davranışın değişimini rahatça görebilmek için 0 ile -200 meV aralığı seçilmiştir.



Şekil 4.14. Elektron rezonans enerjisi, geçiş katsayısı ve geçiş zamanının merkez kuyunun derinliğine göre değişimi.

Merkez kuyunun derinliği V_4 artarken $V_4 \cong$-150 meV değerine kadar rezonans enerjisi azalmakta, geçiş sayısı sabit kalmaktadır. Buna karşın geçiş zamanı da artmaktadır. Kritik değerden sonra artık ikinci ve sonrası rezonans geçişlerine yol açıldığından söz konusu parametrelerin tümünde keskin bir değişim gözlenir. V_4 'ün bu davranışı, devre elemanın optimize çalışma koşullarının belirlenmesinde ön bilgi sağlamasında kullanılabilir.

4.2.6. Malzeme Etkisi

Bu kısımda Şekil 4.1’ de betimlenen yapıda ikinci ve dördüncü bölgelerde bulunan $In_{0.1}Ga_{0.9}As$ yerine $In_{0.1}Al_{0.9}As$ kullanarak, Tablo 4.3’ de belirtilen kalınlıklarda üç farklı sistem çalışılmıştır. Bu sistemler için yapı parametreleri Tablo 4.4’ de verilmiştir.

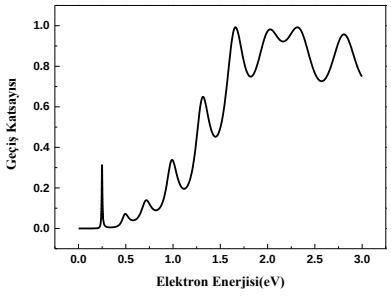
Tablo 4.3. Potansiyel kalınlık değerleri.

	L_{aw}(nm)	L_{lb}(nm)	L_{cw}(nm)	L_{rb}(nm)
Sistem 8	2.0	4.0	3.69	1.5
Sistem 9	2.0	4.0	3.69	1.32
Sistem 10	0.0	4.0	3.69	1.5

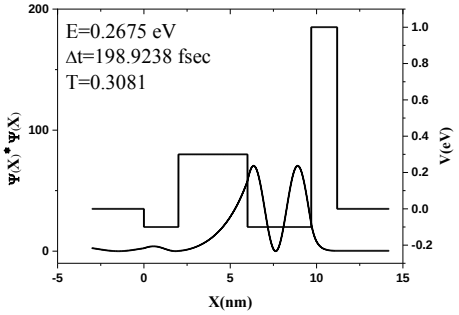
Tablo 4.4. Potansiyel parametre değerleri.

Bölgeler	Malzeme	Kütle(kg)	Potansiyel(eV)
1. Bölge	GaAs	$0.067m_0$	0.0
2. Bölge	$In_{0.1}Al_{0.9}As$	$0.157m_0$	- 0.1
3. Bölge	$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$	$0.0919m_0$	0.3
4. Bölge	$In_{0.1}Al_{0.9}As$	$0.157m_0$	- 0.1
5. Bölge	AlAs	$0.15m_0$	1.0
6.Bölge	GaAs	$0.067m_0$	0.0

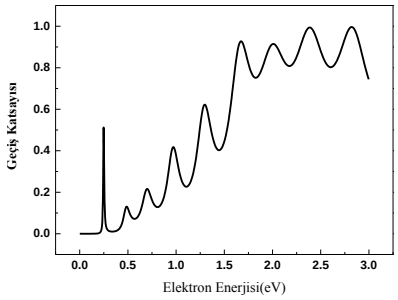
Sistemler 8, 9 ve 10 için geçiş katsayısının elektron enerjisine bağlılığı ve ilk geçiş olduğu durumda potansiyel profili ile birlikte olasılık yoğunluğu dağılımı sırasıyla Şekiller 4.15, 4.16 ve 4.17' de gösterilmektedir.



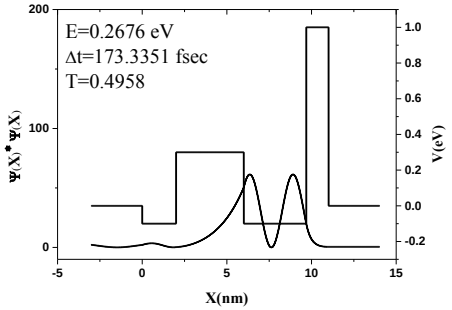
Şekil 4.15a Sistem 8 için elektron enerjisine bağlı geçiş katsayısı değişimi.



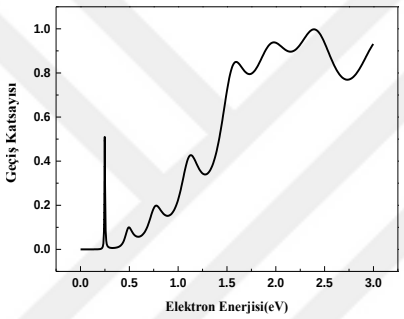
Şekil 4.15b Sistem 8 için elektron enerjisinin 0.2675 eV olduğu değerdeki olasılık dağılımları.



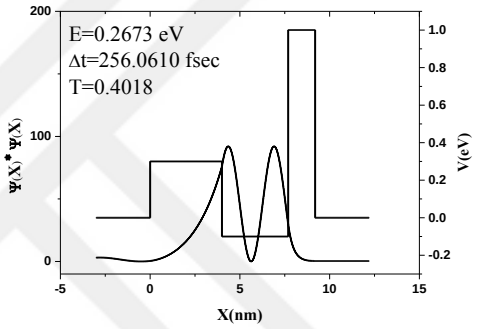
Şekil 4.16a Sistem 9 için elektron enerjisine bağlı geçiş katsayısı değişimi.



Şekil 4.16b Sistem 9 için elektron enerjisinin 0.2676 eV olduğu değerdeki olasılık dağılımları.



Şekil 4.17a Sistem 10 için elektron enerjisine bağlı geçiş katsayısı değişimi.



Şekil 4.17b Sistem 10 için elektron enerjisinin 0.2673 eV olduğu değerdeki olasılık dağılımları.

Yapılan yarıiletken kristal değişimiyle, geçiş katsayısının ilk maksimum değeri elektron enerji değerinin 0.27 eV civarında olduğunda gözlenir. Bu grafiklerden anlaşılacağı gibi seçilen hızlandırıcılı kuyu malzemesinin etkin kütlesi küçük olan yarı iletkenlerden seçilmesi daha uygundur.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada önerilen sayısal çözümleme yöntemi, literatürde analitik veya sayısal olarak çözülmüş yarıiletken potansiyel sistemlerine uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürde verilen sonuçlar ile uyum içindedir. Bunun yanı sıra analitik olarak hesaplanması güç olan bazı fonksiyonel davranışları incelenerek cihaz optimizasyonu için elverişli yeni bilgiler elde edilmiştir.

Daha önce analitik olarak çalışılan, girişine hızlandırıcılı kuyu yerleştirilmiş çift kuantum bariyere sahip sistem [35] söz konusu bilgileri sergilemek için hedef alınmıştır. Sistemde geometrik yapının, geçiş katsayısını ve olasılık dağılımını nasıl etkilediği; kuyu genişlikleri, bariyer genişlikleri ve potansiyel engel yükseklikleri değiştirilerek incelenmiştir. Engel kalınlıkları değiştirildiğinde, engel kalınlığının artışıyla rezonans enerjisi sabit bir değer limitine yaklaşmaktadır ki bu değer merkez kuyu genişliği ve potansiyeli tarafından belirlenir. Öte yandan sol bariyerin (L_{lb}) spesifik bir değeri için geçiş katsayısı ve geçiş zamanında bir maksimum gösterirken, sağ bariyer(L_{rb}) aynı maksimumu sadece geçiş katsayısında gerçekleştirir.

Rezonans enerjisi hızlandırıcı kuyu genişliğine bağlı olarak sabit değer etrafında küçükte olsa bir harmonik salınım yapmaktadır. Bu salınımın, geçiş zamanı ve geçiş katsayısında nitelik ve nicelik olarak önemli değişimlere yol açtığı görülmektedir. Böylece hızlandırıcı kuyu genişliğinin dikkat edilmezse hızlandırıcı olmak yerine yavaşlatıcı olabileceği ortaya çıkmaktadır.

Hızlandırıcı kuyu ve merkez kuyu derinliklerinin de potansiyel bir cihaz uygulamasında önem kazanacağı sergilenmiştir. Hızlandırıcı kuyu derinliği belirli bir aralıkta geçiş zamanı ve geçiş katsayısının sabit olduğu bir plato oluşumuna neden olmakta, bu aralık dışında ise azaltıcı bir karakter göstermektedir. Merkez kuyu derinliği

ise tünelleme rezonans ile diğer rezonansları ayırt edici ve belirleyici kritik bir değere sahiptir. Bu da aygıtın optimizasyonunda önemli bir parametredir.

Gelecek çalışmalarda geçiş katsayısı ve geçiş zamanının yanı sıra akım-gerilim karakteristiklerinin de hesaplanması ve başka yapılar üzerinde uygulamalar yapılması ve deneysel sonuçların yorumlanması hedeflenmektedir. Ayrıca, betimlenen sayısal yöntemin geliştirilerek tüm etkili parametrelerin aynı anda optimize edilmesi, istenen rezonans enerjisi için en uygun yapının bulunması teorik hesaplamalarda önemli bir aşama olacaktır.

KAYNAKLAR

[1] T. Nakagawa, H. Imamoto, T. Kojima, J. Yoshino, ***Observation of resonant tunneling in AlGaAs/GaAs triple barrier diodes***, Appl. Phys. Lett. ,49,73, (1986).

[2] N. C. Kluksdahl, A.M. Kriman, D. K. Ferry, ***Role of structure sizes in determining the characteristics of the resonant tunneling diode,*** Solid-State Electronics, 32,1273, (1989).

[3] S. Ohki, H. Funato, M. Suhara, T. Okumura, L._E. Wernersson, W. Seifert, ***A study of estimation method for conduction band offset in semiconductor heterostructure by using triple-barrier resonant tunneling diodes***, Appl. Surf. Sci. ,190,288, (2002).

[4] N. Yokoyama, K. Inamura, S. Muto, S. Hiyamizu, H. Nishi, ***A new functional, resonant-tuneling hor electron transistor,*** Jpn. J. Appl. Phys.,24,853, (1985).

[5] C. H. Yang, R. A. Wilson, ***Realization of a novel resonant-tunneling hot-electron transistor: Competition of ultrafast resonant-tunneling and energy relaxation***, Solid-State Electronics, 37, 805, (1994).

[6] J. –H. Tsai, ***A novel resonant tunneling base transistor with bi-directional negative-diferential-resistance phenomena***, Solid-State Electronics, 37, 1049, (2000).

[7] E. O. Kane, ***Basic concepts of tunneling In: Tunneling phenomena in solids.***, Plenum Pres, 1, (1969).

[8] L. L. Chang, L Esaki, R Tsu, ***Resonant tunneling in semiconductor double barriers,*** Apll. Phys. Lett., 22, 562, (1973).

[9] H. Yamamoto, X. B. Zhao, ***Resonance conditions and independent resonance enegy selection in asymmetrical rectangular triple-barrier structures***, Phys. Stat. Sol. (B), 217, 793, (2000).

[10] X.B. Zhao, H. Yamamoto***, Two independent resonance conditions in asymmetrical rectangular triple-barrier structures***, Phys. Stat. Sol. (B), 214, 35, (1999).

[11] H. Yamamoto, ***Resonance tunneling condition and transmission coefficient in a symmetrical one –dimensional rectangular double-barrier system,*** Appl. Phys.A, 42, 245, (1987).

[12] H. Yamamoto, K. Miyamoto, T. Hayashi, ***Analytical Expression fort he tunneling time in symmetrical rectangular double –barrier structures,*** , Phys. Stat. Sol. (B), 209, 305, (1998).

[13] H. Yamamoto, H. Sano, Y. Kanie, K. Taniguchi, ***Resonant tunneling and confining phenomena in symmetrical rectangular quadruple-barrier structures,*** Superlatt. Microstruc., 13, 29, (1993).

[14] H. Yamamoto, K. Tsuji, Y. Ikeda, K. Taniguchi, ***Theoretical study of resonant tunneling in symmetrical rectangular triple-barrier structures with deep wells,*** Materials Science and Engineering B, 35, 421,(1995).

[15] C-N. Chen, ***General expressions for quantum transport in arbitrary potential profile:L-electron effect on AlAs-GaAs-AlAs double-barrier structure,*** J. Appl. Phys. 97, 113704, (2005).

[16] Zh. Ebrahiminejad, S. F. Masoudi, G. R. Jafari, R. S. Dariani, ***Effects of self-affine roughness characteristics on electron transmission through tunneling structures***, Thin Solid Films, 522, 233, (2012).

[17] L. B. Zhang, F. Zhai, K. Chang, ***Electron tunneling through a planar single barrier in HgTe quantum wells with inverted band structures***, Phys. Rev. B, 81, 235325, (2010).

[18] J. D. Cox, M. R. Singh, ***Resonant tunneling in photonic double quantum well heterostructures,*** Nanoscale Res. Lett. ,5, 484, (2010).

[19] A. U. Maheswari, P. Prema, C.S: Shastry, ***Resonant states and transmission coefficient ascillations for potential wells and barriers***, Am. J. Phys., 78(4), 412, (2010).

[20] A. U. Maheswari, P. Prema, S. Mahadevan, C. S. Shastry, ***Quasi-bound states, resonance tunnelling, and tunneling times generated by twin symmetric barriers*** , Pramana-J. Phys., 73, 970, (2009).

[21] N. Niketić, V. Milanović, J. Radovanović, ***Investigationof transmission resonances with spesific properties in rectangular seiconductor quantum wells***, Eur. J. Phys. 33, 583, (2012).

[22] E. C. Valadares, ***Resonant tunneling in double-barrier heterostructures tunable by long-wavelength radiation***, Phys. Rev. B, 41, 1282, (1990).

[23] Z. H. Dai, J. Ni, Y. M. Sun, W. T. Wang, ***Dynamical behavior of electron transport in AlGaAs/GaAs double-barrier structures under a high-frequency radiation field***, Eur. Phys. J. B, 60, 439, (2007).

[24] Y. H. Zhang , J. C. Cao, S. L. Feng, H. C. Liu, ***Dynamical instability and switching of resonant tunneling device under terahertz radiation***, J. Appl. Phys., 98, 033718, (2005).

[25] F. Chi, J-L. Xiao, S-S. Li, ***Electronic transport though self-assembled quantum disks***, Superlatt. Microstruc., 35, 59, (2004).

[26] V. Gavryushin, ***Asymmetric double quantum wells with smooted interfaces*** , Cent. Eur. J. Phys. , 10(2), 459, (2012).

[27] K. Miyamoto, H. Yamamoto, ***Resonant tunneling in asymmetrical double-barrier structure under an applied electric field,*** J. Appl. Phys. ,84, 311, (1998).

[28] X. B. Zhao, H. Yamamoto, ***Two independent resonance conditions in asymmetrical rectangular triple-barrier structures***, Phys. Stat. Sol. (B), 214, 35, (1999).

[29] H. Yamamoto, X. B. Zhao, ***Resonance conditions and indepent resonance energy selection in asymmetrical rectangular triple-barrier structures***, Phys. Stat. Sol. (B), 217, 793, (2000).

[30] A. F. M. Anwar, A. N. Khondker, M. R. Khan, ***Calculation of the traversal time in resonant tunneling devices***, J. Appl. Phys., 65(7), 2761, (1989).

[31] H. Wang, Y. Zhang, ***Structure dependence of tunneling lifetimes in double-barrier structures,*** Eur. Phys. J. Appl. Phys. 37, 11, (2007).

[32] H. Li, J. Gong, x. Hu, R. Zhang, ***Barrier dependent electron tunneling lifetime in one-dimensional device structure,*** J. Appl. Phys. 108, 104514, (2010).

[33] M. Abe, H. Hamaguchi, H. Yamamoto, N. Yamada, ***Dwell time in asymmetrical double-barrier structures under DC bias voltage,*** Elec. Comm. In Japan, 88, 1, (2005).

[34] H. Takura, H. Yamamoto, ***Theoretical analysis of tunneling phenomenon in asymmetrical triple-barrier structures with outer wells,*** Elec. Comm. In Japan, 90, 20, (2007).

[35] H. Hamaguchi, H. Yamamoto, N. Yamada, ***Theoretical study on tunneling phenomena in asymmetrical rectangular double-barrier structures with acceleration well***, Elec. Comm. In Japan, 87, 1, (2004).

[36]J. D. Hoffman, Numerical Methods for Engineers and Scientists (Marcel Dekker Inc., New York Basel, 2001)

[37] B. Hüseyin, P***otansiyel engellerle karşılaşan bir parçacığın geçiş katsayısının hesaplanması,*** Yüksek Lisans Tezi. Trakya Üniversitesi, Edirne (2012).

[38] B. Karaoğlu***, Kuantum mekaniğine giriş***, (Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2008).

[39] S. Aktas, M. Yılmaz, ***Electronic transmission and dwell time on a double barrier system with an accelerating quantum well***, Physica E, 75, 47, (2016).

ÖZGEÇMİŞ

Mukaddes YILMAZ 1964 yılında Edirne'de doğdu. İlkokulu Gazi İlkokulu'nda, ortaokulu Mimar Sinan Ortaokulu'nda okudu. 1981 yılında Edirne Lisesi'nden mezun oldu. 1983'te Trakya Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünde başladığı lisans öğrenimini 1987 yılında tamamladı. 1990 yılında Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik bölümünde tezli yüksek lisans öğrenimine başladı. 1992 yılında Adıyaman'ın Kahta ilçesi İmam Hatip Lisesine Fizik Öğretmeni olarak atanması nedeniyle yüksek lisans öğrenimini bırak zorunda kaldı. 2009 yılında öğrenim affından yararlanarak tekrar yüksek lisans öğrenimine başladı. Serhat İMKB Meslek Lisesinde 10 yıl idarecilik görevinde bulundu. Halen Süloğlu Ali Ayağ Çok Programlı Anadolu Lisesinde Fizik öğretmeni olarak görev yapmaktadır. Evli ve 2 çocuk annesidir.

TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER

1. S. Aktas, M. Yılmaz, ***Electronic transmission and dwell time on a double barrier system with an accelerating quantum well***, Physica E, 75, 47, (2016).