



**T.C.  
RECEP TAYYIP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI**

**HİPERBOLİK PÖSCHL-TELLER POTANSİYEL ÜÇLÜ  
KUANTUM BARIYERLERİNİN REZONANT  
TÜNELLEME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**(Yüksek Lisans Tezi)**

**Abdurrahman UKAN**

**Danışman  
Doç. Dr. Mehmet BATI**

**RİZE  
2022**

## KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalında, Doç. Dr. Mehmet BATI danışmanlığında, Abdurrahman UKAN tarafından hazırlanan *Hiperbolik Pöschl-Teller Potansiyel Üçlü Kuantum Bariyerlerinin Rezonant Tünelleme Özelliklerinin İncelenmesi* adlı bu tez çalışması, 28/10/2022 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği/oy çokluğuyla başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

| Jüri Üyeleri | Unvanı, Adı Soyadı       | İmza |
|--------------|--------------------------|------|
| Başkan       | : Prof. Dr. Necati ÇELİK |      |
| Üye          | : Prof. Dr. Mehmet ŞAHİN |      |
| Üye          | : Doç. Dr. Mehmet BATI   |      |

## ETİK BEYAN

Fizik Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “Hiperbolik Pöschl-Teller Potansiyel Üçlü Kuantum Bariyerlerinin Rezonant Tünelleme Özelliklerinin İncelenmesi” adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılabilecek bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.

28 /10/2022

**Abdurrahman UKAN**

## ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasında hiperbolik Pöschl-Teller potansiyel üçlü kuantum bariyerlerinin rezonant tünelleme özellikleri incelenmiştir. Rezonans enerji seviyeleri hiperbolik Pöschl-Teller üçlü bariyer yapısı için tespit edilmiştir. Elektronların yapıdan geçme olasılıklarının yapı parametrelerine bağlı değişimleri transfer matris metodu kullanılarak incelenmiştir.

Yüksek lisans eğitimimde bu çalışmanın bu noktaya gelmesinde danışmanlığımı üstlenen çalışmalarım süresince kesintisiz her an ulaşabildiğim, her türlü yardım ve ilgisini gördüğüm, yapıcı eleştirileri ile beni sürekli yönlendiren, büyük bir sabır göstererek destekleyen yanında çalışmaktan büyük mutluluk duyduğum değerli hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet BATI'ya teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim. Maddi ve manevi destekleriyle bugünlere gelmemi sağlayan ailem annem Fatma UKAN'a ve babam Nesip UKAN'a çok teşekkür ederim. Özellikle desteklerini benden esirgemeyen sevgili eşim Betül'e teşekkür ederim.

Abdurrahman UKAN

2022/RİZE

## İÇİNDEKİLER

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| KABUL VE ONAY .....           | I    |
| ETİK BEYAN.....               | II   |
| ÖN SÖZ .....                  | III  |
| İÇİNDEKİLER .....             | IV   |
| ÖZET .....                    | V    |
| ABSTRACT.....                 | IV   |
| KISALTMALAR.....              | VII  |
| TABLolar LİSTESİ.....         | VIII |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....        | IX   |
| GİRİŞ .....                   | 1    |
| 1. LİTERATÜR ÖZETİ.....       | 4    |
| 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....    | 8    |
| 2.1. Model.....               | 8    |
| 2.2. Yöntem .....             | 9    |
| 3. BULGULAR.....              | 13   |
| 4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR ..... | 25   |
| 4.1. Öneriler .....           | 26   |
| KAYNAKÇA.....                 | 27   |

**Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Ana Bilim Dalı** : Fizik

**Tez Türü** : Yüksek Lisans

**Danışman** : Doç. Dr. Mehmet BATI

**Hazırlayan** : Abdurrahman UKAN

**Yıl** : 2022

**Sayfa Sayısı** : 44

## **ÖZET**

### **HİPERBOLİK PÖSCHL-TELLER POTANSİYEL ÜÇLÜ KUANTUM BARİYERLERİNİN REZONANT TÜNELLEME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Üçlü bariyerler çift kuantum kuyusu yapılarındaki enerji seviyelerinin yeri yapı parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Bu tip yapıya gönderilen elektronların enerjileri kuyudaki enerji seviyelerine denk ise, elektronların tamamının geçebildiği kanallar oluşmaktadır. Rezonant tünelleme olarak adlandırılan bu olayın bariyer potansiyelinin şekline (kuyu ve bariyer genişlikleri, bariyer yüksekliğine) bağlıdır. Pöschl-Teller potansiyeli, fizikte ve fiziksel kimyada geniş uygulama alanı bulan önemli bir potansiyeldir. Pöschl-Teller potansiyeli, tam çözülebilen potansiyellerden biridir. Bu çalışmada Hiperbolik Pöschl-Teller üçlü bariyer kuantum potansiyel yapılarında elektron iletimi ve rezonant tünelleme olayı incelenmiştir. Rezonant tünellemenin yapı parametrelerine bağlı değişimi araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Üçlü bariyerler çift kuantum kuyusu, Rezonant tünelleme, Hiperbolik Pöschl-Teller potansiyel

**Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies**

**Department** : Physics

**Thesis Type** : Master Thesis

**Supervisor** : Assoc. Prof. Dr. Mehmet BATI

**Author** : Abdurrahman UKAN

**Year** : 2022

**Pages** : 44

## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION OF RESONANT TUNNING PROPERTIES OF HYPERBOLIC PÖSCHL-TELLER POTENTIAL TRIPLE QUANTUM BARRIERS**

The location of energy levels in triple barrier double quantum well structures varies depending on the structure parameters. If the energies of the electrons sent to this type of structure are equivalent to the energy levels in the well, channels are formed through which all of the electrons can pass. This phenomenon, called resonance tunneling, depends on the shape of the barrier potential (well and barrier widths, barrier height). The Pöschl-Teller potential is an important potential that finds wide application in physics and chemical physics. The Pöschl-Teller potential is one of the fully solvable potentials. In this study, electron transmission and resonance tunneling phenomenon in Hyperbolic Pöschl Teller triple barrier quantum potential structures were investigated. The effect of structure parameters on resonance tunneling has been examined.

**Keywords:** Triple barrier double quantum well structures, Resonance tunneling, Hyperbolic Pöschl Teller potential

## KISALTMALAR

|                  |                                         |
|------------------|-----------------------------------------|
| $E_{\text{res}}$ | : Rezonans Enerjisi                     |
| HPTÜB            | : Hiperbolik Pöschl-Teller Üçlü Bariyer |
| $k$              | : Dalga Sayısı                          |
| $L_W$            | : Kuyu Genişliği                        |
| meV              | : Mili Elektron Volt                    |
| nm               | : Nanometre                             |
| PT               | : Pöschl-Teller                         |
| RTD              | : Rezonant Tünelleme Diyotu             |
| $\sigma$ (sigma) | : Genişlik Parametresi                  |
| $T$              | : İletim Olasılığı                      |
| TMM              | : Transfer Matris Metodu                |
| $V_L$            | : Sol Bariyer Potansiyel Yüksekliği     |
| $V_M$            | : Orta Bariyer Potansiyel Yüksekliği    |
| $V_R$            | : Sağ Bariyer Potansiyel Yüksekliği     |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 1.</b> Kuyu genişliğinin simetrik değişimi ile ilk altı rezonans enerji seviyeleri ve ilk üç rezonans enerjisinde geçiş olasılıkları. .... | 24 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|



## ŞEKİLLER LİSTESİ

- Şekil 1.** Pöchl-Teller üçlü bariyer potansiyel bariyer çift kuyu yapısının şematik gösterimi . 9
- Şekil 2.** Örnek bir çift bariyer rezonant tünelleme yapısının potansiyel dağılımı..... 10
- Şekil 3.** Potansiyel adım şeması..... 11
- Şekil 4.** Üç farklı simetrik potansiyel yüksekliği için, gelen elektronların enerjisine karşılık potansiyelden geçme olasılığı ve Rezonans enerjisinin eşit olarak değişen potansiyel yükseklikleri ile değişimi..... 14
- Şekil 5.** Üç farklı simetrik kuyu genişlikleri için, gelen elektronların enerjisine karşılık potansiyelden geçme olasılığı ve rezonans enerjisinin eşit olarak değişen kuyu genişlikleri ile değişimi. .... 15
- Şekil 6.** Sol kuyu genişliği sabit iken üç farklı sağ kuyu genişlikleri için, gelen elektronların enerjisine karşılık potansiyelden geçme olasılığı ve rezonans enerjisindeki geçme olasılığının sağ ve sol kuyu genişliği ile değişimi ..... 16
- Şekil 7.** Genişlik parametresinin üç farklı değeri için, gelen elektronların enerjisine karşılık potansiyelden geçme olasılığı ve rezonans enerjisinin genişlik parametresi ile değişimi ..... 19
- Şekil 8.** Farklı orta bariyer potansiyel yüksekliği için, gelen elektronların enerjisine karşılık potansiyelden geçme olasılığı ve rezonans enerjisinin orta bariyer potansiyel yüksekliği ile değişimi..... 20
- Şekil 9.** Orta bariyer yüksekliği sabit iken üç farklı simetrik sağ ve sol bariyer yükseklikleri için, gelen elektronların enerjisine karşılık potansiyelden geçme olasılığı ve rezonans enerjisindeki geçme olasılıkları ..... 21

## GİRİŞ

1950’li yıllardan itibaren transistörün icadı ile gelişmeye başlayan elektronik endüstrisi günümüzde en büyük endüstrilerinden biri olmuştur. Transistörlerin ana malzemesi yarıiletkenlerdir. Yarıiletken malzemeler, iletkenlik özelliği olarak iletken ve yalıtkanlar arasında bulunur. İlk transistör, Bell telefon laboratuvarında 1947 yılında William Shockley, Jhon Bardeen ve Walter Brattain tarafından test edilmiştir (Neamen, 2011).

Bugünün yarıiletken teknolojisinde çalışan bilim insanları bilinen teknik ve fiziksel sınırlara yaklaşmış durumdadır. Bilim insanları yalnızca birkaç atom ve birkaç elektron akımıyla çalışabilmektedirler. Bu boyutlardaki fiziksel olayları açıklayan teori kuantum fizikidir. Kuantum fizikinde karşılaşılan en önemli olaylardan biri tünellemedir. Tünel olayı, bir potansiyel bariyerini aşacak enerjisi olmayan bir parçacığın yine de o bariyerden geçebilmesidir. Birçok farklı tip bariyer engellerde kuantum tünelleme mevcuttur (Bransden, 2000; Liboff, 2002; Zettili, 2022). Örneğin; Kare ya da dikdörtgen potansiyel bariyer, doğrusal olarak değişen potansiyeller (Chamnan ve Krunavakarn, 2017; Arda, 2017; Iwamoto, Aquino, ve Aguilera-Navarro, 2003), üçgen potansiyel bariyer, dikdörtgen üzerine yerleştirilmiş üçgen potansiyel bariyer (yamuk), ve hiperbolik potansiyel bariyer. Bir metal-yalıtkan-yalıtkan-metal yapı (Tung, 2014) (referanstaki Şekil 47’ye bakınız) veya bir metal-yalıtkan-metal yapı için bir bariyer modeli olarak düşünülebilir (Abdolkader, Shaker, ve Alahmadi, 2018). Bu tip yapılar birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Nutku, 2014).

Yarıiletken heteroyapıları teorik ve pratik çerçeveler içinde incelemek, kuantum mekanik tünellemeye dayalı bazı optoelektronik ve iletişim cihazlarının geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Teknolojide tünellemenin önemli bir rol oynadığı birçok uygulama vardır. Bu uygulamalar arasında moleküler biyoloji (Arndt, Juffmann, ve Vedral, 2009), taramalı tünelleme mikroskobu (Magoga, Archambault, and Cerdá, 2012), kuyular (Levi, 2012), kuantum kademeli lazerler (Faist, 2018) ve modern elektronik cihazlar (Mendez, ve Domínguez-Adame, 1994; Grover, ve Moddel, 2011; Singh, 1995) bulunur.

Epitaksiyel kristal büyütme tekniklerinin gelişmesi ve yeni elektron cihazlarının önerisi ve üretimi elektronik cihazlarının potansiyel profilleri, üçgen bariyerler, yamuk bariyerler vb. gibi çeşitlilik kazanmaktadır. Bunların arasında, tek üçgen veya yamuk metal-oksid yarıiletken yapılarda (Dujardin vd., 2001; Khairurrijal, ve Sukirno, 2005) veya metal-yalıtkan-metal yapılarda (Shu, Jiang, ve Meng, 2002). görünen bariyer, mevcut yüksek teknolojik ilginin bir örneğidir. Diğer kuantum heteroyapıları arasında, üçgen kuantum kuyuları kullanıldığında elektroabsorpsiyonun deneysel ölçümünde absorpsiyon katsayısı değeri azaldığından, üçgen kuantum kuyuları da önemli sistemlerdir (Gerber, Droopad, ve Maracas, 1993). Ayrıca, üçgen kuantum profilinin akım absorpsiyon spektrumu daha düşük ön besleme voltajlarıyla çalışabilmektedir (Ishikawa, Tada, 1989).

İki veya daha fazla bariyerli yapılarda karşılaşılan diğer önemli kuantum mekaniksel olgulardan biride rezonant tünelleme olayıdır. Tünelleme olayında parçacıkların tamamının geçtiği enerji seviyeleri ile karşılaşmakta bu olaya rezonant tünelleme olayı denilmektedir. Bu etki sayesinde nano aygıtlarda anahtarlama yapılabilmektedir. Belirli enerjideki parçacıkların geçebildiği durumlar sayesinde parçacık enerjisinin artırılması veya azaltılması ile geçiş kontrol edilebilmektedir. Rezonant tünelleme aygıtları, doğası gereği hızlı bir süreç olan kuantum mekanik tünellemeyi kullanır ve bu nedenle oda sıcaklığında çalışan kompakt ve uyumlu terahertz yayıcılara olan ihtiyacı karşılamak için umut verici adaylar olarak kabul edilir. Rezonant tünelleme özelliği gösteren yapıların üretimi için bu yapıların hangi koşullarda rezonant tünelleme olayının gerçekleştirdiği önceden simülasyonlarla tahmini hem ekonomik hem zaman açısından önem arz etmektedir.

Elektronik aygıtların sürekli küçülmesi ile kuantum tünelleme gibi kuantum mekanik etkiler birçok cihaz uygulamasında daha etkili hale gelmektedir. Bu boyutlarda kuantum etkilerin incelenebilmesi için kuantum mekaniksel hesaplama teknikleri kullanılmalıdır. Denge dışı Green fonksiyonu tekniği, Wigner fonksiyonu tekniği, Yoğunluk matrisi yöntemi, Transfer matris yöntemi gibi yöntemler mevcuttur (Pourfath, 2007). Bu yöntemler kullanılarak rezonant tünelleme yapıları incelenmiştir. Genel olarak çift bariyer yapılarından dikdörtgen, trapezoidal, parabolik ve üçgen yapılar üzerinde çalışılmıştır. Daha karmaşık ve daha az çalışılmış üçlü bariyer yapı tasarımlarını kullanan rezonant tünelleme cihazları, geleneksel çift bariyer

yapılarından daha yüksek frekanslarda ve daha fazla çıkış gücü ile çalışma potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte, bu yapıların artan karmaşıklık derecesi nedeniyle, üçlü bariyer yapılarının davranışının tam olarak anlaşılması gerekmektedir. Bu tür yapıların analiz edilmesi, cihazlarda meydana gelen temel süreçlerin anlaşılmasını sağlarken, oda sıcaklığında yapılan çalışmalar pratik uygulamalar için verimli yapıların tasarımını kolaylaştıracaktır.

Üç ve daha fazla bariyer içeren çalışmalarda farklı yöntemlerle çalışılmış olup bilginiz dahilinde Hiperbolik Pöschl-Teller üçlü bariyer (HPTÜB) kuantum potansiyel yapısında rezonant tünelleme olayı incelenmemiştir. Bu tez çalışmasında transfer matris metodu kullanılarak HPTÜB çift kuyu yapısında rezonant tünelleme olayı incelenecektir. Rezonant tünellemenin olduğu enerji seviyeleri, iletim olasılığının gelen elektron enerjisine bağlı olarak değişimi incelenerek tespit edilecektir.

## 1. LİTERATÜR ÖZETİ

Düşük boyutlu yarıiletken kuantum sistemleri olarak sınıflandırılan kuantum kuyusu, kuantum nokta ve kuantum teli heteroyapıları yarıiletken çalışmalarının önemli bir parçası haline gelmiştir. (Fejer, vd. 1989; Guo, ve Chen, 1995; Wang, ve Guo, 2001; Li, vd. 2007; Yu, Guo, ve Zhu, 2005; Yu, ve Guo, 2003; Ferry, Goodnick, ve Bird, 2009; Sarikurt, 2013; Harrison, ve Valavanis, 2016). Teorik ve pratik araştırmalar yüksek kaliteli kuantum heteroyapıları üretmek için bazı olanaklar sunmaktadır. GaAs/AlAs'tan oluşan malzemeler, heteroyapıların araştırılmasında yaygın olarak kullanılmıştır. Bu yapılar nanometre mertebesinde üretilebilmekte ve kullanışlı aygıtlar tasarlanmaktadır. Bu mertebede kuantum mekaniksel olaylar gözlemlenmektedir.

1958'de, kuantum mekanik tünellemenin etkisini kullanan Leo Esaki (Esaki, 1958) tarafından negatif direnç sergileyen yeni bir diyot rapor edildi. Esaki'nin yarıiletken malzemelerde elektron tünelleme konusundaki öncü çalışması, Giaever ile birlikte 1973 Nobel Fizik Ödülü'nü kazanmasını sağlamıştır (Esaki, 1974). 1970'de Esaki ve Tsu, süper örgülerde "rezonant tünelleme" olarak adlandırılan yeni bir tünelleme olgusunun ilk gözlemlerini bildirdiler (Esaki, ve Tsu, 1970; Tsu, ve Esaki, 1973) ve 1974 yılında GaAs/AlGaAs yarıiletken çift bariyer yapılarındaki ilk rezonant tünelleme (RT) gözlemleri Chang ve arkadaşları tarafından yapıldı (Chang, Esaki, ve Tsu, 1974).

Aradan geçen dönemde, çalışmaların çoğu geleneksel çift bariyer yapılarına odaklanarak, rezonant tünelleme aygıtları (RTA) üzerine önemli miktarda araştırma yapılmıştır. Hem temel tünelleme süreçleri (Guéret, vd. 1989; Ricco, ve Azbel, 1984; Skolnick, 1990; Leo, ve MacDonald, 1991; Saurabh, ve Kumar, 2016; Nicholls, vd. 2019) hem de elektronik ve optoelektronik uygulamalar (Malik, Godfrey, ve Dawson, 1999; Tanoue, Mizuta, ve Takahashi, 1988; Ferry, 2020) üzerinde araştırmalar yürütülmüştür, en dikkate değer cihaz geliştirmesi kuantum kademeli lazerdir (Faist, 2018; Faist vd., 1993; Faist vd., 1994; Faist vd., 1996). 1990'ların başı birleştirilmiş kuantum kuyu sistemleri, kuantum girişimi ve tutarlı elektron salınımları ile ilişkili fiziksel olayların incelenmesi için de çok zengin bir alan olduğu kanıtlanmıştır (Faist vd., 1993; Roskos vd., 1992; Strutz ve Shiraki, 1996). Rezonant tünelleme anahtarlarındaki üçgen bariyer yapıları (Guo, 1996; Guo, 1998) cihaz tasarımına geniş

çapta uygulanabilir; rezonant tünelleme doğrultucularındaki girintili bariyer yapıları (Schulz, Goncalves da Silva, 1988; Papp, Ventra, ve Coluzza, 1995; di Ventra, Papp, ve Coluzza, 1996) yüksek hızlı elektronikte uygulama bulmaktadır.

Elektronik cihazların sürekli küçülmesi ile kuantum tünelleme gibi kuantum mekanik etkiler birçok cihaz uygulamasında daha etkili hale gelmektedir. Bu boyutlarda kuantum etkilerin incelenebilmesi için kuantum mekaniksel hesaplama teknikleri kullanılmalıdır. Basit engeller için literatürde analitik ifadeler bulunabilir. Örneğin, dikdörtgen bir bariyerin tünelleme olasılığı ders kitaplarında mevcuttur (Bransden, 2000; Liboff, 2002; Zettili, 2022). Üçgen bariyer ve kuyu potansiyeli çözümleri Airy fonksiyonları cinsinden tam olarak çözülebilir (Ghatak, Sauter, ve Goyal, 1997).

İkili ve üçlü dikdörtgen bariyerler kapsamlı bir çalışmanın konusu olmuştur (Zhao vd., 1996). Ancak birden fazla engeli olan daha karmaşık yapılar için analitik çözümler elde etmek çok zorlaşır. Bu tür yapılara çözüm bulmak için sonlu farklar yöntemi (SFY), (Van der Maelen J. F, Granda ve Velázquez, 1996; Boykin ve Klimeck, 2005). transfer matrisi metodu (TMM) (Abdolkader, 2007; Ando ve Itoh, 1987). ve iletim hattı yöntemi (Anwar ve Jahan, 1995) gibi sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Çoğu optoelektronik cihazdaki heteroeklem ve yarıiletken malzeme katman yapısı göz önüne alındığında, transfer matrisi yöntemi kuantum olaylarını araştırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca transfer matrisi yöntemi sayısal olarak verimlidir, uygulanması daha kolaydır ve en önemlisi diğer yaklaşımlara kıyasla daha fazla fizik bilgisi sağlar.

Üçlü bariyerli heteroyapılarda rezonant tünellemenin ilk raporu 1986'da Nakagawa ve diğerleri tarafından yapılmıştır (Nakagawa vd., 1986). 1983 yılında Sollner ve ark. (Sollner vd., 1983), çift bariyerli yapılarda oda sıcaklığında rezonant tünellemenin ilk gözlemini bildirdiler ve dc  $I(V)$  eğrilerini karşılaştırarak rezonant tünelleme yapılarında yük aktarımının çok hızlı olabileceğini gösterdiler. Bu durum rezonant tünel yapılarının yüksek hızlı osilatör uygulamaları için uygun olduğunu göstermiştir. Çift bariyer yapılarında rezonant tünelleme üzerine birçok çalışma yapılmış (Abdalla, 2018; Batı, 2018; Batı, 2019) ve yapılmaktadır. Schulz (1988) ve Papp (1995) ön yargılı iki girintili bariyer oluşturduğunda ve aralarında yarı bağlı bir seviye görüldüğünde elektronların rezonant tünelleme özelliği gösterdiği iki aşamalı

bariyer yapısının iletim katsayısını ve akım yoğunluklarını hesaplamışlardır. Dikdörtgen çift bariyer yapısında rezonant tünelleme olayı üzerine kapsamlı araştırmalar yapılmıştır (Encomendero vd., 2019). Batı çift ters parabolik bariyer yapısının rezonant tünelleme özelliklerini denge dışı Green fonksiyonu yöntemini kullanarak incelemiştir (Batı, Sakiroglu ve Sökmen, 2016; Batı, 2017). Ohmukai üçgen çift bariyer yapısında rezonant tünelleme olayının yapı parametresine bağlılığını transfer matrisi yöntemi ile incelemiştir (Ohmukai, 2005). Ayrıca Wang ve arkadaşları üçgen çift bariyer yapısını elektrik alan altında yine transfer matrisi yöntemiyle incelemiştir (Wang, Xu, ve Zhang, 2006) Bu yapıda iletkenlik hesabı Luo tarafından hesaplanmıştır (Luo vd., 2015). Testere dişli ikili üçgen bariyer yapısında rezonant tünelleme olayı Batı tarafından incelenmiştir (Batı, 2017). Hiperbolik Pöschl-Teller çift bariyer yapılarında rezonant tünelleme özellikleri incelenmiştir (Batı, 2019). Cihaz özelliklerini geliştirmek için birkaç araştırma grubu dikdörtgen, parabolik, üçgen ve asimetric üçgen çift kuantum kuyuları gibi kuantum kuyu konfigürasyonlarını da incelemiştir (Wang vd., 1993; Droopad vd., 1993; Santiago, ve Guimaraes, 2002; Tsang, 1982; Tsang 1990; Martinz, ve Ramos, 2016; Tao vd., 2019; Ferrer-Galindo vd., 2018; Singh, ve Siddiqui, 2017).

Rezonant tünelleme aygıtlarının performansı kullanılan malzemeye ve geometrisine bağlıdır (Shahjahan vd., 2010). Clochiatti ve çalışma arkadaşları üç bariyerli Rezonant Tünelleme Diyodundan (RTD) oluşan bir geniş bant THz dedektörü tasarlamış ve deneysel ölçümlerini yapmıştır (Clochiatti vd., 2021). Rezonant tünelleme diyotları (RTD'ler), terahertz salınımı ve/veya algılama özellikleri için InP tabanlı bileşik yarıiletken heteroyapıları temelinde araştırılmıştır (Aikawa vd., 2019). AlGaIn/GaN heteroyapılarına dayalı asimetric üçlü bariyerli rezonant tünelleme diyotlarının (TBRTD'ler performansı sayısal simülasyonlar kullanılarak incelenmiştir (Rong vd., 2019; Almansour, 2020).

Pöschl-Teller (PT) potansiyeli, kuantum mekaniğinde tam olarak çözülebilen birkaç potansiyelden biridir. PT potansiyeli ilk olarak 1933 yılında çok atomlu moleküllerin titreşim spektrumlarını incelemek için Pöschl ve Teller tarafından tanıtıldı (Pöschl ve Teller, 1933). Geçtiğimiz on yıllar boyunca, birçok araştırmacı PT potansiyeli üzerinde çalışmıştır (Barut, Inomata ve Wilson 1987; Visser, 1999; Miranda, Sun, ve Dong, 2010; Hayrapetyan, Kazaryan, ve Tevosyan, 2013; Shizgal,

2016; Tong, 1997.) Tong tarafından yarıiletken cihazlarda PT potansiyelinin çeşitli uygulamaları önerilmiştir (Tong, 1997). Tong, cihazlarda gürültünün azaltılmasında kullanılabileceğini göstermiştir. Radovanoviç ve ark. PT potansiyelinin çeşitli alt-bantlar arası absorpsiyon özelliklerini araştırmıştır (Radovanovic vd., 2000). PT potansiyel kuyusu veya potansiyel parametrelerin çok özel değerlerine sahip bariyer, tüm enerjilerde tam elektron geçişi sergiler. (bu, yansımaz veya şeffaf potansiyellere bir örnektir; (Cordero, ve Garcia-Calderon 2009; Cordero, ve Garcia-Calderon 2014). Pöschl-Teller çift bariyer yapısında rezonant tünelleme olayı ikili bariyer yapısı için incelenmiş olmasına rağmen (Batı, 2019) bildiğimiz kadarıyla, HPTÜB yapılarının rezonant tünelleme özellikleri üzerine çalışma yapılmamıştır. Bu tez çalışmasında, HPTÜB yapısında rezonant tünelleme özelliklerini ve elektron taşınımı incelenecektir.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Rezonant tünelleme, elektronik cihazlarda kapsamlı bir şekilde incelenen ve uygulanan kuantum mekaniksel bir olgudur. Bu çalışmada Hiperbolik Pöchl-Teller üçlü bariyer (HPTÜB) çift kuyu yapısında rezonant tünelleme incelenmiştir. Rezonans enerjilerinin değerleri iletim olasılıklarının gelen elektronun enerjisine göre değişim grafiklerinden elde edilmiştir. Aşağıdaki alt bölümlerde model ve kullanılan yöntem detaylı olarak verilmiştir.

### 2.1. Model

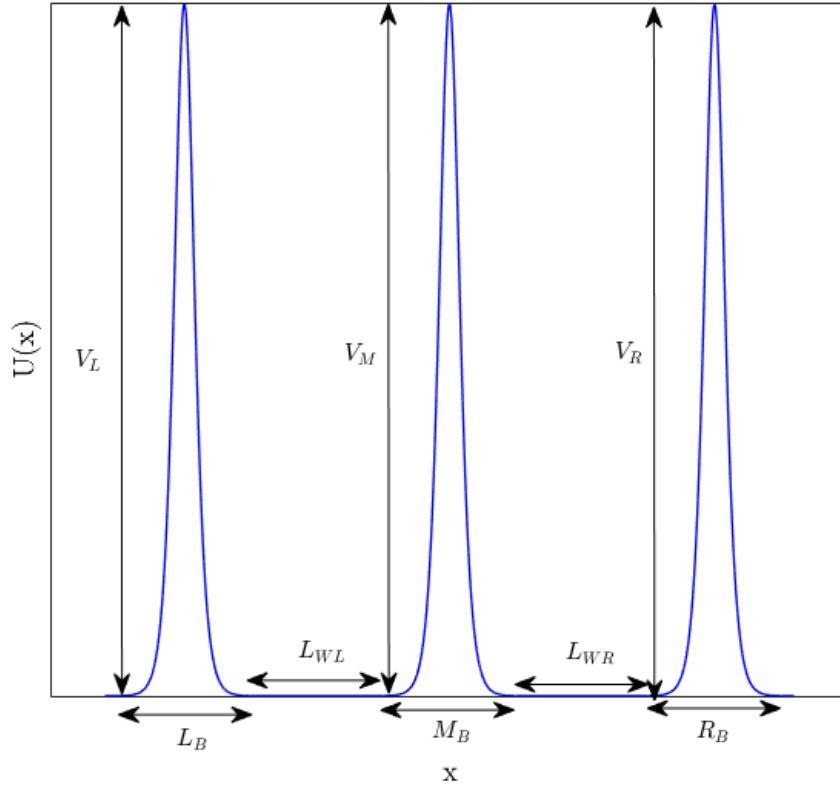
Çalışmamızda transfer matris yöntemi kullanılacaktır. Bir boyutta zamandan bağımsız Schrödinger dalga denklemi

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2\Psi}{dx^2} + U(x)\Psi = E\Psi \quad (1)$$

Şeklinde yazılır. Burada, E elektron enerjisi ve m\* elektronun etkin kütlesidir. Hiperbolik Pöchl-Teller üçlü bariyer çift kuyu yapısının potansiyel enerji profilinin fonksiyonel formu

$$U(x) = \begin{cases} \frac{V_L}{\cosh^2\left(\frac{x+(L_{WL})+\left((L_B+M_B)/2\right)}{\sigma}\right)} & L_1 < x < L_2 \\ \frac{V_M}{\cosh^2\left(\frac{x}{\sigma}\right)} & L_3 < x < L_4 \\ \frac{V_R}{\cosh^2\left(\frac{x-(L_{WR})-\left((R_B+M_B)/2\right)}{\sigma}\right)} & L_5 < x < L_6 \\ 0 & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad (2)$$

ifadesi ile verilir.



**Şekil 1.** Pöchl-Teller üçlü bariyer potansiyel bariyer çift kuyu yapısının şematik gösterimi

## 2.2. Yöntem

Bu çalışmada Transfer Matris Metodu kullanılacaktır. Zamandan bağımsız Schrödinger dalg denklemleri

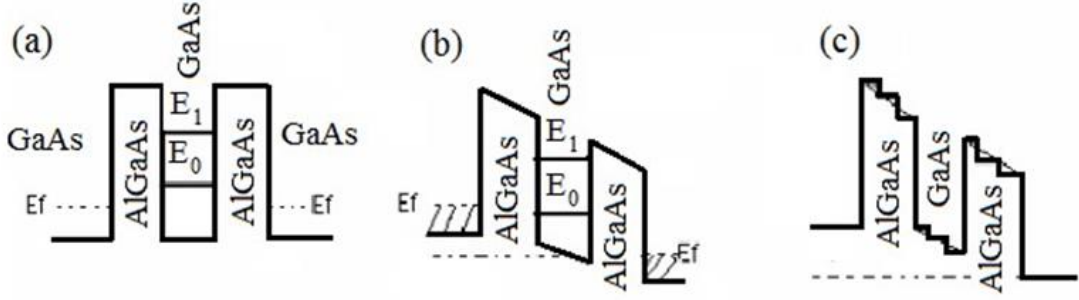
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{d^2\psi}{dx^2} \right) + V\psi = E\psi \quad (3)$$

ile verilir.

Denklemlerde uzunlukları etkin Bohr yarıçapı enerjileri etkin Hartree enerjisine göre ölçeklendirirsek,

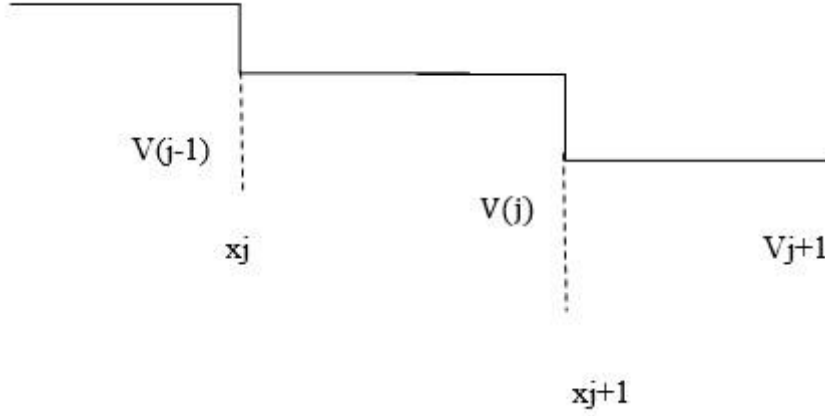
$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + 2(E - V)\psi = 0 \quad (4)$$

elde edilir.  $x$ ,  $V$  ve  $E$  boyutsuz hale gelmiş olur.



**Şekil 2.** Örnek bir çift bariyer rezonant tünelleme yapısının potansiyel dağılımı (a) Bias (Elektrik alan) yokluğunda potansiyel dağılımı;  $E_0$  ve  $E_1$  sırasıyla kuyu içindeki taban durum ve birinci uyarılmış enerji seviyesidir. (b) Bias uygulandığı durumdaki potansiyel dağılımı. (c) Bias altındaki çift potansiyel bariyerinin adımlarla benzetilen potansiyel değişimini göstermektedir.

Şekil-2’de çift bariyer rezonant yapısı görülmektedir. Örnek olarak dikdörtgen çift bariyer tekli kuyu seçilmiştir. Şekilde bias yokken (Şekil-2(a)), bias varken (Şekil-2(b)) ve adımlara benzetilen potansiyel şekli (Şekil-2(c)) görülmektedir. Sabit bir potansiyel varlığında parçacıkları temsil eden dalga fonksiyonu gelen parçacıkların enerjisi potansiyelden büyük ise ilerleyen düzlem dalga çözümleri elde edilir. Aksi durumda üstel olarak sönümlü çözümler elde edilir. Herhangi bir potansiyel bu şekilde adım şemasına benzetilebilir. Transfer matris metodu kullanılarak potansiyellerden geçme ve yansıma katsayıları elde edilebilir. Geçme olasılıklarından da rezonans enerji seviyeleri tespit edilir. Adımlara benzetilen herhangi bir potansiyel için bu hesapların nasıl yapıldığını açıklayacağız. Adımlara benzetilen herhangi bir potansiyel için bu hesaplamaların nasıl yapıldığı literatürde detaylıca anlatıldığından (Levi, 2012) burada kısaca açıklanacaktır. Adımlara benzetilen potansiyelin adım şeması Şekil 3 gösterilmektedir.



**Şekil 3.** Potansiyel adım şeması

$E > V$  durumu için  $j$ . Bölgede dalga sayısı  $k_j = \sqrt{2(E - V_j)}$ ,  $E < V$  durumunda ise  $k_j = i\sqrt{2|E - V_j|}$  olmak üzere, Schrödinger dalga denkleminin çözümü  $j$ . bölgede;

$$\psi_j = A_j e^{ik_j(x-x_j)} + B_j e^{-ik_j(x-x_j)} \quad (5)$$

$j+1$ . bölgede

$$\psi_{j+1} = A_{j+1} e^{ik_{j+1}(x-x_{j+1})} + B_{j+1} e^{-ik_{j+1}(x-x_{j+1})} \quad (6)$$

şeklinde yazılabilir. Sınır koşulları uygulayarak  $j$ . bölgeden  $j+1$ . Bölgeye geçiş matrisi hesaplanabilir,

$$\Psi_j|_{x=x_{j+1}} = \Psi_{j+1}|_{x=x_{j+1}} \quad (7)$$

$$\frac{d\Psi_j}{dx}|_{x=x_{j+1}} = \frac{d\Psi_{j+1}}{dx}|_{x=x_{j+1}} \quad (8)$$

Sınır koşulları uygulanırsa

$$A_j + B_j = A_{j+1} + B_{j+1} \quad (9)$$

$$A_j - B_j = \frac{k_{j+1}}{k_j} (A_{j+1} - B_{j+1}) \quad (10)$$

Bu iki ifade taraf tarafa toplanıp çıkarıldığında  $A_j$  ve  $B_j$  genlikleri  $A_{j+1}$  ve  $B_{j+1}$  genlikleri arasındaki ilişki

$$2A_j = A_{j+1} e^{-ik_j L_j} \left(1 + \frac{k_{j+1}}{k_j}\right) + B_{j+1} e^{-ik_j L_j} \left(1 - \frac{k_{j+1}}{k_j}\right) \quad (11)$$

$$2B_j = A_{j+1} e^{ik_j L_j} \left(1 - \frac{k_{j+1}}{k_j}\right) + B_{j+1} e^{ik_j L_j} \left(1 + \frac{k_{j+1}}{k_j}\right) \quad (12)$$

şeklinde bulunur.

$$p_j = \frac{1}{2} \left( \frac{e^{-ik_j L_j} \left(1 + \frac{k_{j+1}}{k_j}\right) e^{-ik_j L_j} \left(1 - \frac{k_{j+1}}{k_j}\right)}{e^{ik_j L_j} \left(1 - \frac{k_{j+1}}{k_j}\right) e^{ik_j L_j} \left(1 + \frac{k_{j+1}}{k_j}\right)} \right) \quad (13)$$

olmak üzere matris formda

$$\begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix} = p_j \begin{pmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{pmatrix} \quad (14)$$

Yazılabilir. Uzun N Bölgeye ayrılmış ise sistemin transfer matrisi

$$P = p_1 p_2 p_3 \dots p_N \quad (15)$$

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} A_N \\ B_N \end{pmatrix} \quad (16)$$

Parçacıkların soldan geldiği kabul edilirse  $B_N = 0$  olacağından

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} A_N \\ 0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_N \\ 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

Parçacıkların iletim olasılığı  $T = \frac{k_N |A_N|^2}{k_1 |A_1|^2}$  olduğundan parçacıkların iletim olasılığı transfer matrisi elde edildikten sonra

$$T = \frac{k_N}{k_1} \frac{1}{|p_{11}|^2} \quad (19)$$

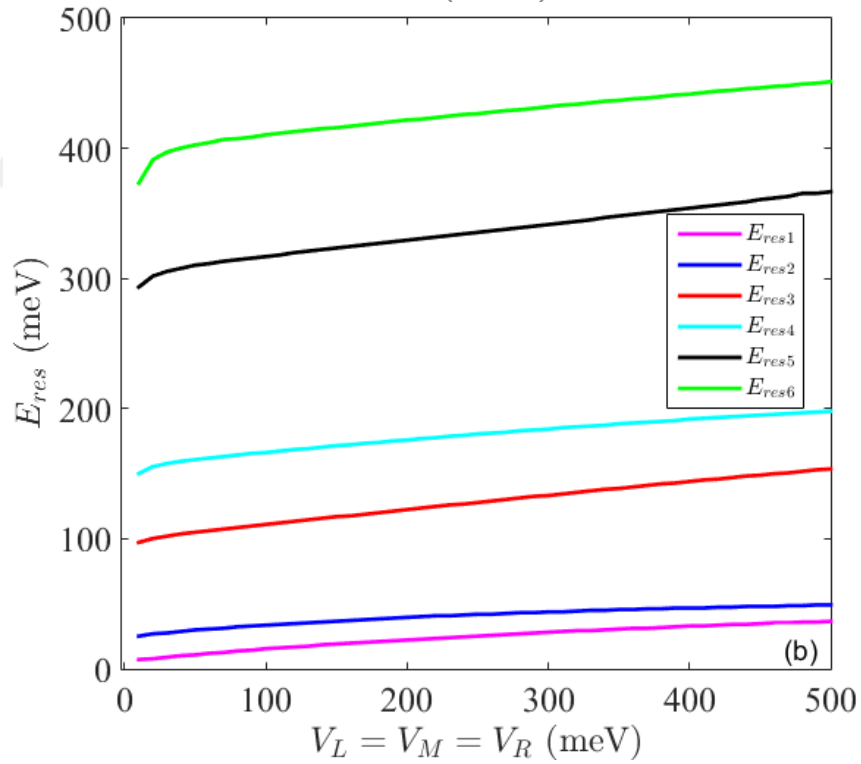
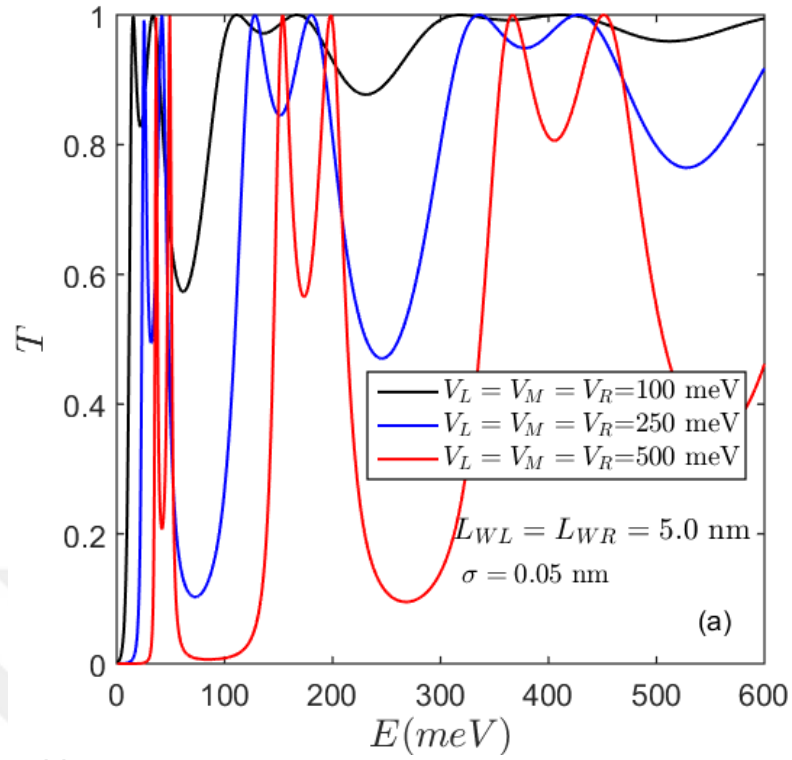
ifadesinden hesaplanır. Burada  $P_{11}$  P matrisinin 1. satır 1. sütun elemanıdır.

### 3. BULGULAR

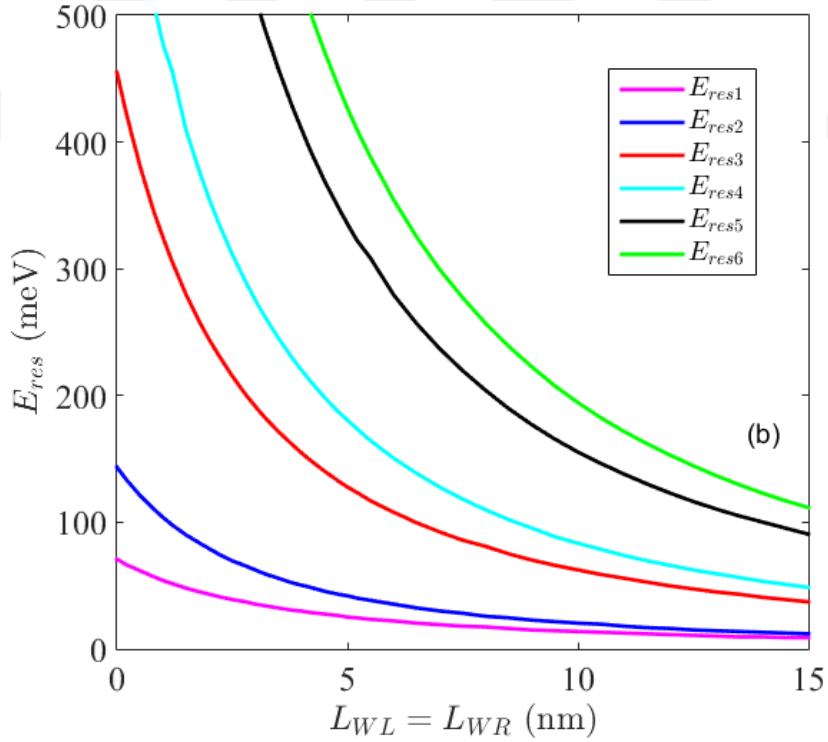
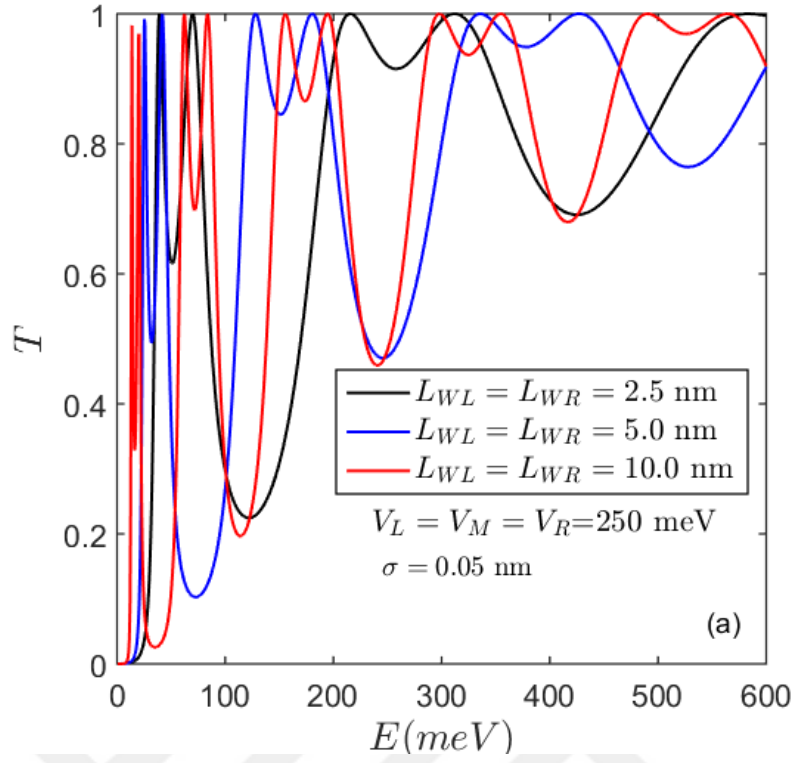
Bu bölümde, iletim katsayısının ( $T$ ) sayısal hesabı, transfer matris yöntemi kullanılarak yapılmış, elde edilen iletim katsayılarından rezonans enerjileri ( $E_{res}$ ) tespit edilmiştir.

Sistemimizin GaAs/AlGaAs malzemeleri ile inşa edildiğini varsayılmıştır. Dolayısıyla her durumda, etkin bir elektron kütlelerinin ( $0.067 \times$  serbest elektron kütlesi) sistem boyunca sabit olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca bağıl dielektrik sabiti 12.7 (Sze, Li, ve Ng, 2021) etkin Bohr yarıçapı ve etkin Hartree enerjisi = 11,2193 meV dir.

Çalışmada sayısal kolaylık açısından enerji ve uzunluklar boyutsuz formda kullanılmıştır. Ancak sayısal hesaplamalardan sonra sonuçlar boyutsal form ile verilmiştir. Şekil 4 (a) da üç farklı simetrik potansiyel yüksekliği (100, 250 ve 500 meV) için, iletim olasılıkları verilmiştir. Sistem çift kuyudan oluştuğundan rezonans enerji pikleri ikili yapıya sahiptir. Bariyer yükseklikleri arttıkça kuyulardaki kuşatma artmakta dolayısıyla rezonans enerji seviyeleri yüksek enerjilere doğru kaymaktadır. Benzer gözlemler farklı potansiyel şekilleri üzerinde yapılan çeşitli çalışmalarda da rapor edilmiştir (Batı, 2019; Batı 2018; Encomendero vd., 2019; Batı, Sakiroglu ve Sökmen, 2016; Batı, 2017; Batı, 2019; Ohmukai, 2005). Şekil 4 (b) de rezonans enerji seviyelerinin bariyer yüksekliklerine göre değişimi verilmiştir. Potansiyel bariyer yüksekliği arttıkça daha yüksek enerjide resonant tünelleme olmaktadır. İlk iki rezonans enerjisi kuyulardaki taban durum enerjilerine karşılık gelmektedir. Sonraki ikili kuyulardaki birinci uyarılmış durumlara karşılık gelmektedir. Bu şekilde devam etmektedir. Yüksek enerjilerde bu ikili seviyeler arasındaki aralık artmaktadır.

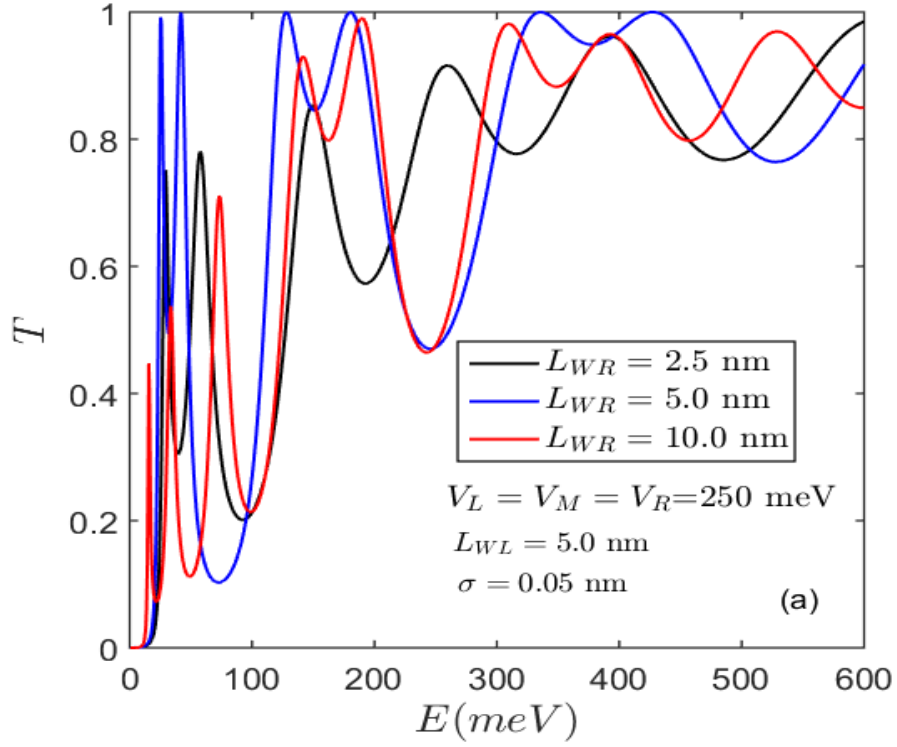


**Şekil 4.** (a) Üç farklı simetrik potansiyel yüksekliği (100, 250 ve 500 meV) için, gelen elektronların enerjisine karşılık potansiyelden geçme olasılığı. (b) Rezonans enerjisinin eşit olarak değişen potansiyel yükseklikleri ile değişimi.

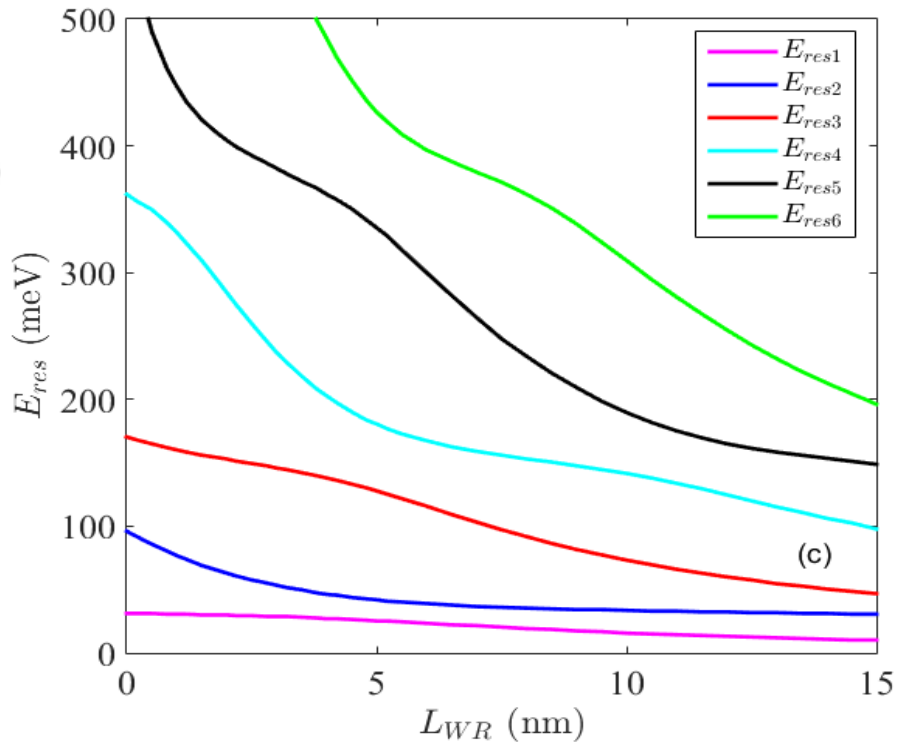
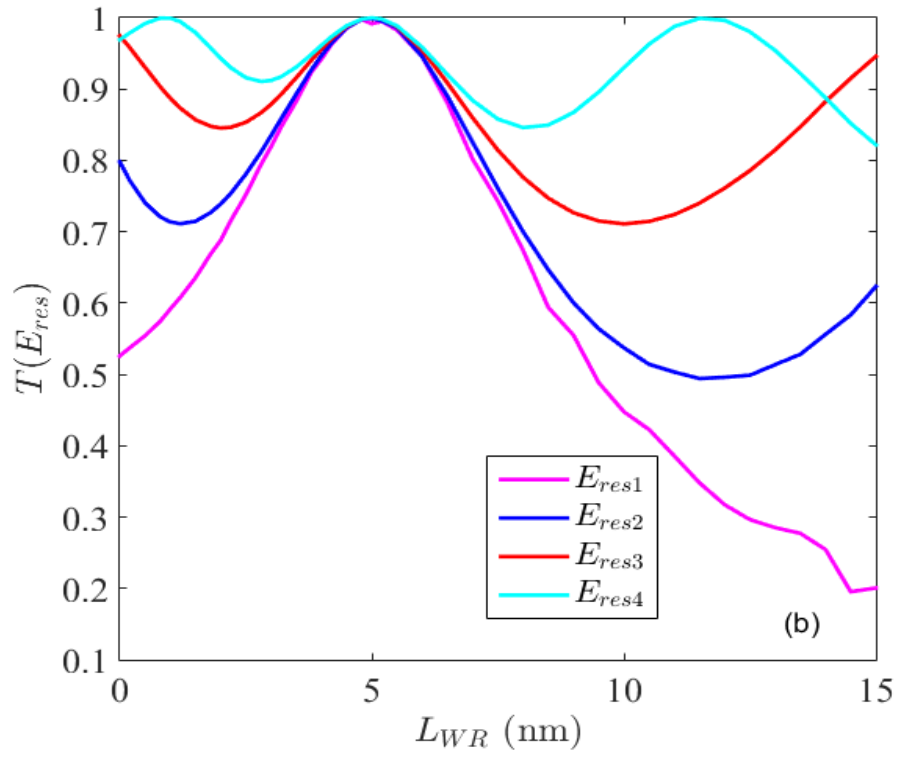


**Şekil 5.** (a) Üç farklı simetrik kuyu genişlikleri (2.5, 5.0 ve 10.0 nm) için, gelen elektronların enerjisine karşılık potansiyelden geçme olasılığı. (b) Rezonans enerjisinin eşit olarak değişen kuyu genişlikleri ile değişimi. Burada  $V_L = V_M = V_R = 250$  meV ve genişlik parametresi  $\sigma = 0.05$  nm olarak alınmıştır.

Şekil 5 (a) bariyerler arası kuyu genişliklerinin değişimi nedeniyle iletim katsayısının nasıl değiştiğini göstermektedir. Kuyu genişliği arttıkça rezonans enerjileri daha düşük enerjilerde oluşmaktadır. Şekil 5(b) de rezonans enerji seviyelerinin kuyu genişliğine göre değişimi görülmektedir. Kuyu genişliği arttıkça rezonans enerji seviyelerinin monoton olarak daha düşük enerjilerde olduğu görülmektedir.



**Şekil 6.** (a) Sol kuyu genişliği sabit (5.0 nm) iken üç farklı sağ kuyu genişlikleri (2.5, 5.0 ve 10.0 nm) için, gelen elektronların enerjisine karşılık potansiyelden geçme olasılığı.

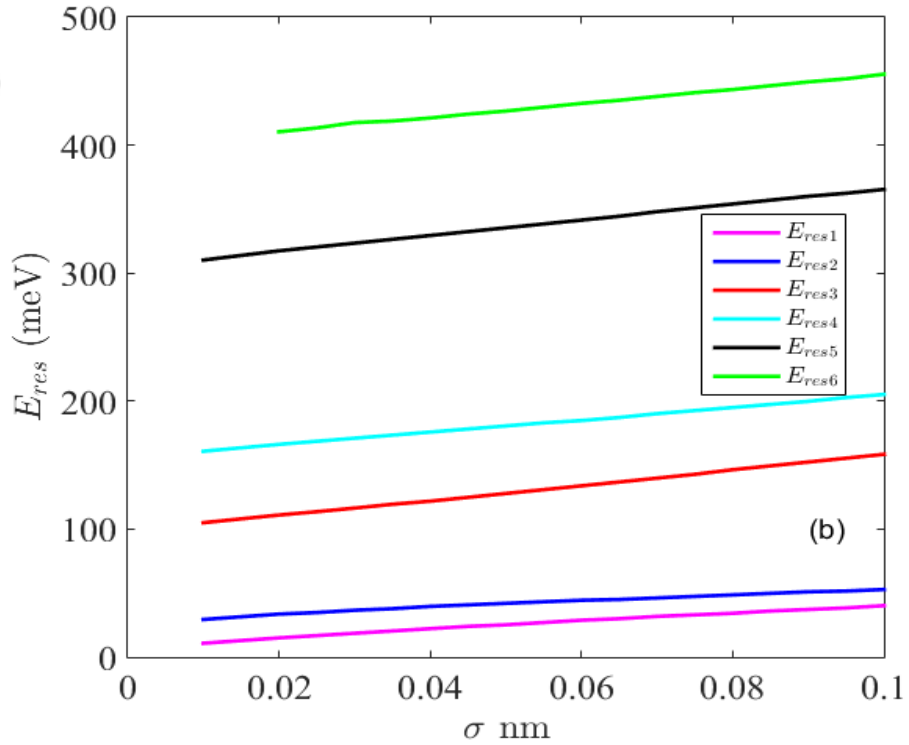
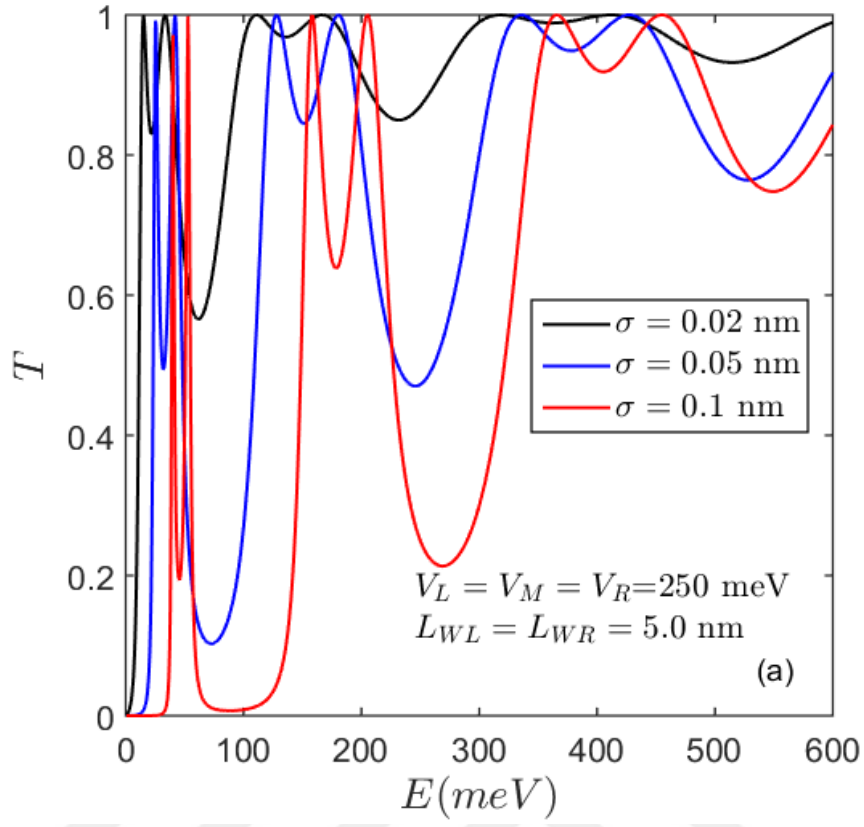


**Şekil 6 (Devam).** (b) Sol kuyu genişliği sabit iken rezonans enerjisindeki geçme olasılığının sağ kuyu genişliği ile değişimi (c) Rezonans enerjisinin sol kuyu genişliği sabit iken farklı sağ kuyu genişlikleri ile değişimi.

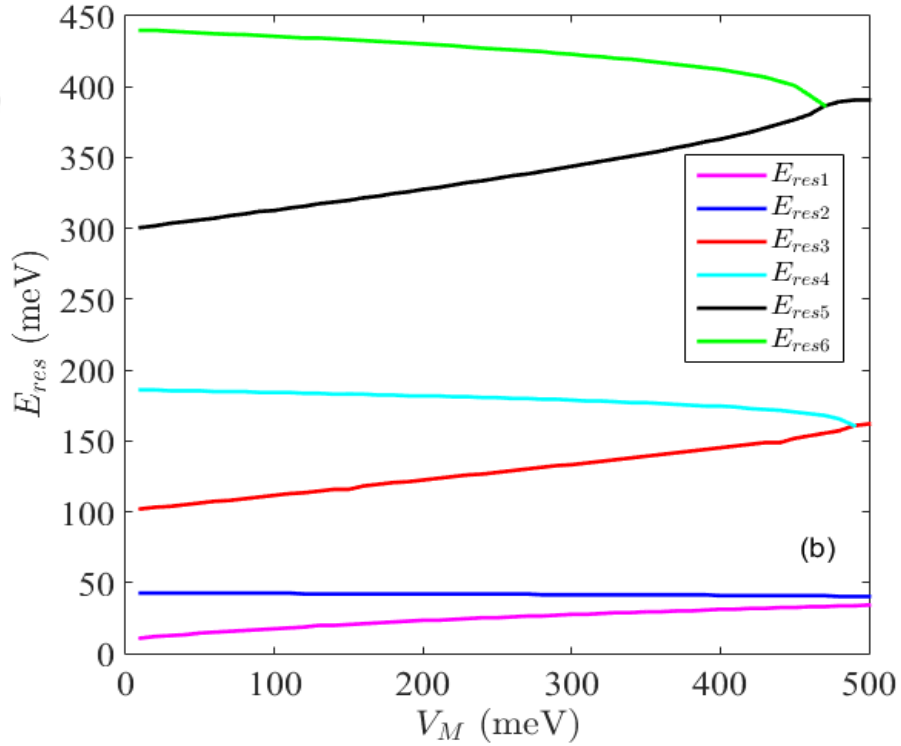
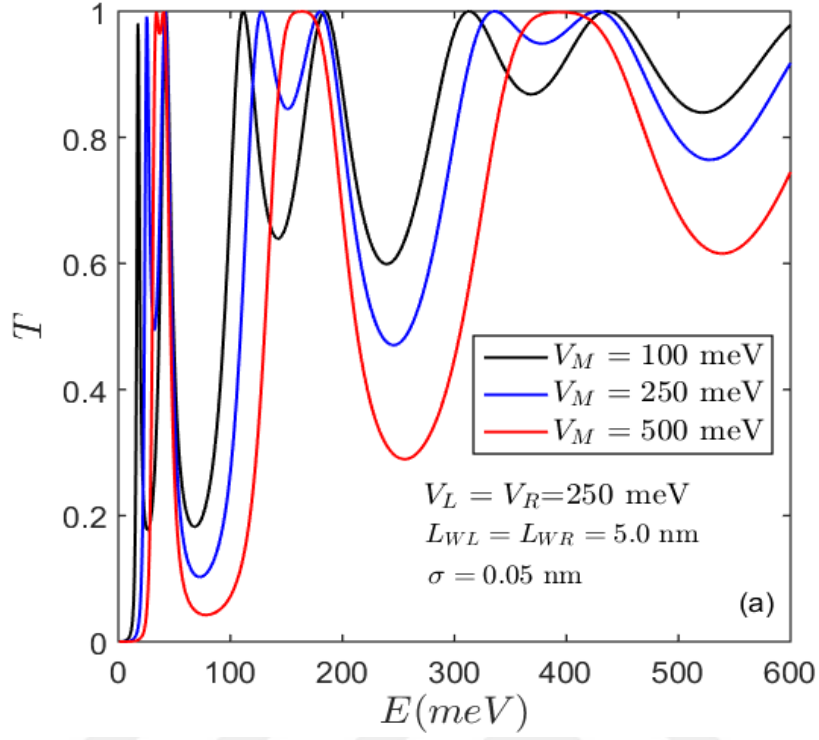
Şekil 6 (a) da sol kuyu genişliği sabitken üç farklı sağ kuyu genişlikleri için, gelen elektronların enerjisine karşılık potansiyelden geçme olasılığı görülmektedir.

Sağ kuyu genişliği arttıkça rezonans enerjisi daha düşük enerjilerde oluştuğu görülmektedir. Kuyu genişlikleri de asimetri rezonant pik yüksekliklerinde değişime neden olmuştur. Simetrik kuyu genişliklerinde rezonans enerjisinde iletim olasılığı bir iken şekil 6 (b) de görüldüğü gibi asimetrik kuyu genişliklerinde rezonans enerjisinde iletim olasılığı birden düşüktür yani tam geçiş olmamaktadır. Simetrik durumda  $L_{WL} = L_{WR} = 5$  nm olduğunda tam geçiş gözlemlenmektedir. Şekil 6 (c) de rezonans enerjisinin sol kuyu genişliği sabitken farklı sağ kuyu genişlikleri ile değişim grafiği çizilmiştir. Sağ kuyu genişledikçe rezonans enerjisinin daha düşük enerjilere doğru kaydığı görülmektedir.

Üç farklı genişlik parametresi simetrik potansiyel yüksekliği ( $\sigma = 0.02, 0.05$  ve  $0.1$  nm) için, gelen elektronların enerjisine karşılık potansiyelden geçme olasılığı Şekil 7. (a) da verilmiştir. Rezonans enerjisinin genişlik parametresi ile değişimi ise Şekil 7. (b) de verilmiştir. Yapı parametreleri  $V_L = V_M = V_R = 250$  meV ve  $L_{WL} = L_{WR} = 5$  nm olarak alınmıştır.  $\sigma'$ 'nin artmasının daha keskin birlik rezonant tünelleme tepe noktalarına ve daha yüksek enerji bölgesine kaymaya neden olduğu görülmektedir. Bariyerin menzili, rezonant tünelleme özelliğini güçlü bir şekilde etkiler. Elde edilen sonuçlar dikdörtgen tip potansiyeller ve daha düzgün değişen potansiyellere benzemektedir. Daha keskin bir rezonanta sahip olmak için daha geniş bir bariyere sahip olmak gerekir. Bu sonuç, farklı engeller için daha önce yapılan çalışmalarla çok iyi bir uyum içindedir (Batı, Sakiroglu ve Sökmen, 2016; Do, Dollfus, Lien Nguyen, 2006). Genişlik parametresinin artması ile rezonans enerjileri yüksek enerjilere doğru kaymaktadır.

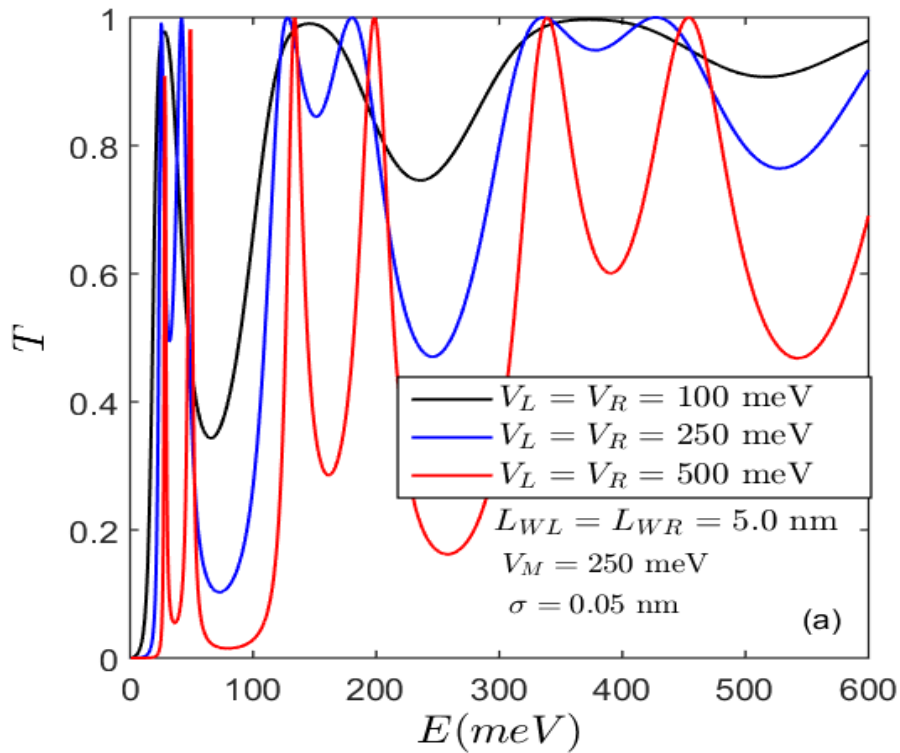


**Şekil 7.** (a) Üç farklı genişlik parametresi simetrik potansiyel yüksekliği ( $\sigma = 0.02, 0.05$  ve  $0.1$  nm) için, gelen elektronların enerjisine karşılık potansiyelden geçme olasılığı. (b) Rezonans enerjisinin genişlik parametresi ile değişimi, burada  $V_L = V_M = V_R = 250$  meV ve  $L_{WL} = L_{WR} = 5$  nm olarak alınmıştır.

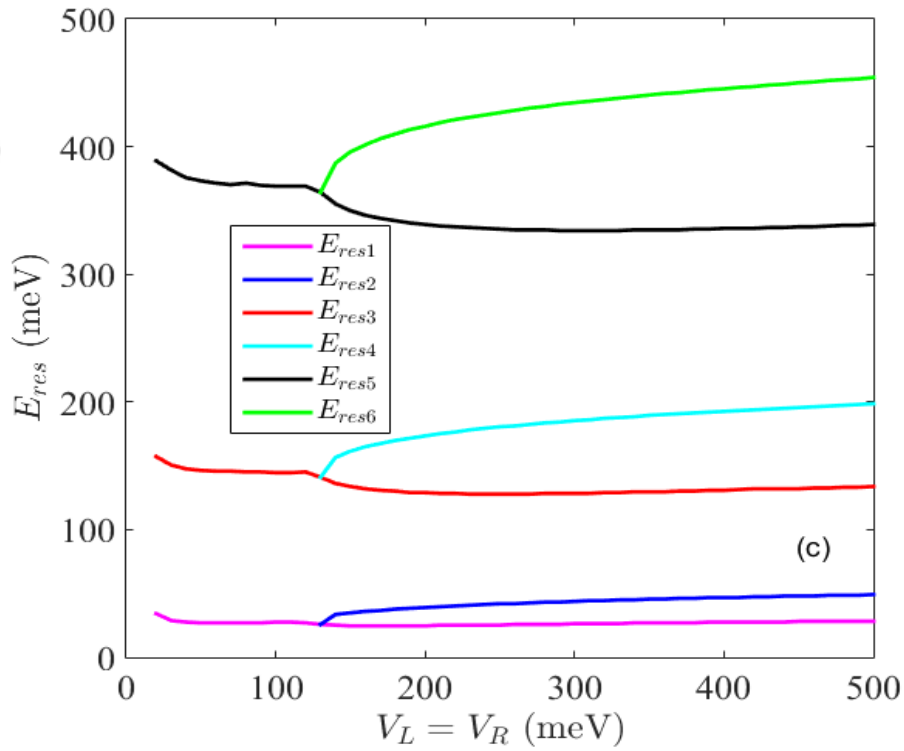
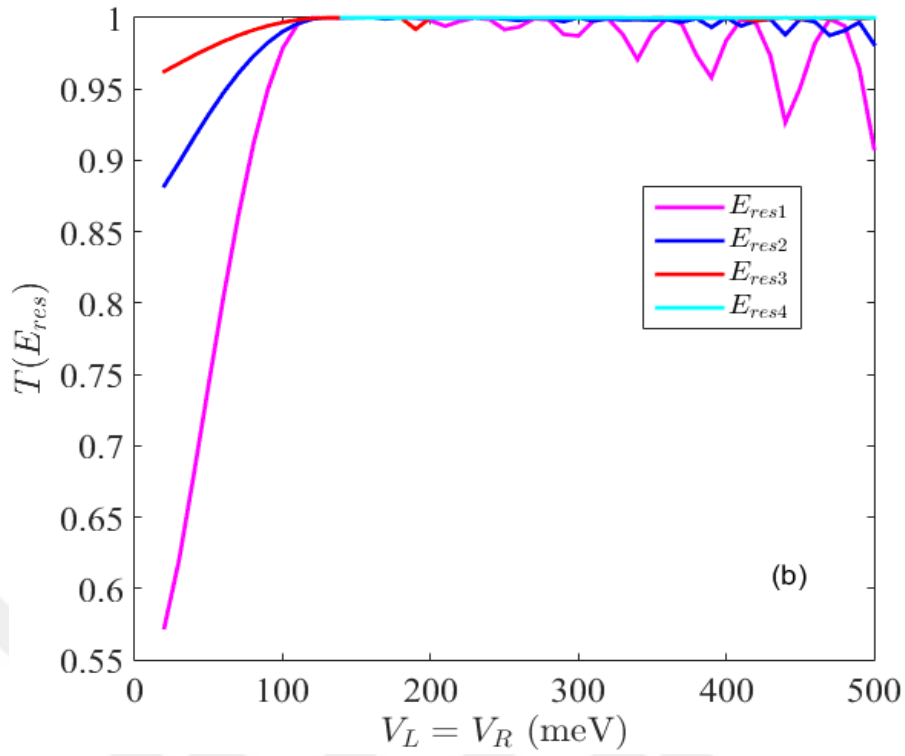


**Şekil 8.** (a) Farklı orta bariyer potansiyel yüksekliği (100, 250 ve 500 meV) için, gelen elektronların enerjisine karşılık potansiyelden geçme olasılığı. (b) Rezonans enerjisinin orta bariyer potansiyel yüksekliği ile değişimi  $V_L = V_R = 250$  meV,  $L_{WL} = L_{WR} = 5$  nm, ve  $\sigma = 0.05$  nm olarak alınmıştır.

Sağ ve sol bariyer 250 meV yüksekliğinde iken orta bariyer yüksekliği değişiminin rezonant tünellemeye etkisi Şekil 8 de verilmiştir. Şekil 8,  $V_L = V_R = 250$  meV,  $L_{WL} = L_{WR} = 5$  nm, ve  $\sigma = 0.05$  nm değerleri için çizilmiştir. Şekil 8 (a) da üç farklı orta bariyer yüksekliği için ( $V_M = 100, 250$  ve  $500$  meV) iletim olasılığının gelen elektronun enerjisine göre değişimi görülmektedir. Orta bariyer yüksekliği artıkça rezonant pikleri arasındaki mesafe daralmaktadır. Şekil 8 (b) bu daralmaya ek olarak yüksek enerjili elektronlar için enerji seviyelerinde katlılık oluşmaktadır.



**Şekil 9.** (a) Orta bariyer yüksekliği sabit (250 meV) iken üç farklı simetrik sağ ve sol bariyer yükseklikleri (100, 250 ve 500 meV) için, gelen elektronların enerjisine karşılık potansiyelden geçme olasılığı.



**Şekil 9 (Devam).** (b) Orta bariyer yüksekliği sabit (250 meV) iken rezonans enerjisindeki geçme olasılığının simetrik sağ ve sol bariyer yükseklikleri ile değişimi (c) Rezonans enerjisinin orta bariyer yüksekliği sabit iken farklı simetrik sağ ve sol bariyer yükseklikleri ile değişimi. Burada  $V_M = 250$  meV,  $L_{WL} = L_{WR} = 5$  nm, ve  $\sigma = 0.05$  nm olarak alınmıştır.

Şekil 9 da orta bariyer yüksekliği sabit (250 meV) iken farklı simetrik sağ ve sol bariyer yükseklikleri için, (a) gelen elektronların enerjisine karşılık potansiyelden geçme olasılığı. (b) Orta bariyer yüksekliği sabit (250 meV) iken rezonans enerjisindeki geçme olasılığının simetrik sağ ve sol bariyer yükseklikleri ile değişimi verilmiştir. (c) Rezonans enerjilerinin orta bariyer yüksekliği sabit iken farklı simetrik sağ ve sol bariyer yükseklikleri ile değişimi görülmektedir. Yapı parametreleri  $V_M = 250 \text{ meV}$ ,  $L_{WL} = L_{WR} = 5 \text{ nm}$ , ve  $\sigma = 0.05 \text{ nm}$  olarak seçilmiştir. Şekil 9 (a) ve (c) den kenar bariyer yükseklikleri arttıkça enerji seviyeleri sayısının arttığı ve ikili kuyular içindeki seviyeler arası mesafenin genişlediği görülmektedir. Rezonans enerjisindeki iletim olasılıkları da 100 meV den sonra ilk iki rezonans enerjinde azda olsa dalgalanmalar olur iken diğer rezonans enerjilerinde tam geçiş söz konusudur.

Son olarak şekil 5 (b) çizilirken elde edilen datalardan bir kısmı olan ilk altı rezonans enerjisi seviyeleri ile ilk üç rezonans enerjisinde iletim olasılıkları Tablo 1 de verilmiştir. Sistem parametreleri  $L_B = M_B = R_B = 5 \text{ nm}$ ,  $V_L = V_M = V_R = 250 \text{ meV}$  ve  $\sigma = 0.05 \text{ nm}$  olarak alınmıştır. Diğer rezonans enerjilerinde iletim olasılıkları 1 olduğundan tabloda gösterilmemiştir. Tabloda 600 meV üzerindeki rezonans enerji seviyeleri gösterilmemiştir. Kuyu genişlikleri arttıkça rezonans enerji seviyeleri düşük enerjilere doğru kaymaktadır.

**Tablo 1.** Kuyu genişliğinin simetrik değişimi ile ilk altı rezonans enerji seviyeleri ve ilk üç rezonans enerjisinde geçiş olasılıkları.

| $L_{WL} =$<br>$L_{WR}$<br>(nm) | Eres1<br>(meV) | Eres2 (meV) | Eres3<br>(meV) | Eres4<br>(meV) | Eres5<br>(meV) | Eres6<br>(meV) | T(Eres1) | T(Eres2) | T(Eres3) |
|--------------------------------|----------------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------|----------|----------|
| 0.0                            | 70.8           | 143.4       | 454.8          | -              | -              | -              | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| 0.2                            | 66.6           | 133.8       | 423.0          | -              | -              | -              | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| 0.5                            | 61.8           | 121.2       | 381.0          | 563.4          | -              | -              | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| 0.8                            | 57.0           | 110.4       | 345.0          | 508.8          | -              | -              | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| 1.0                            | 54.0           | 103.8       | 324.6          | 477.0          | -              | -              | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| 1.2                            | 51.6           | 97.8        | 305.4          | 456.0          | -              | -              | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| 1.5                            | 48.0           | 90.0        | 279.6          | 409.2          | -              | -              | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| 1.8                            | 45.0           | 83.4        | 257.4          | 375.6          | -              | -              | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| 2.0                            | 43.2           | 79.2        | 244.2          | 355.2          | -              | -              | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| 2.2                            | 41.4           | 75.0        | 232.2          | 336.6          | -              | -              | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| 2.5                            | 39.0           | 69.6        | 215.4          | 311.4          | 582.0          | -              | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| 2.8                            | 37.2           | 65.4        | 200.4          | 289.2          | 540.0          | -              | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| 3.0                            | 35.4           | 62.4        | 191.4          | 275.4          | 514.0          | -              | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| 3.2                            | 34.2           | 59.4        | 183.0          | 262.8          | 490.2          | -              | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| 3.5                            | 32.4           | 55.8        | 171.6          | 245.4          | 457.8          | 585.6          | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| 3.8                            | 30.6           | 52.2        | 161.4          | 229.8          | 428.4          | 547.2          | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| 4.0                            | 30.0           | 50.4        | 154.8          | 220.2          | 410.4          | 523.8          | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| 4.2                            | 28.8           | 48.6        | 148.8          | 211.2          | 393.0          | 501.6          | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| 4.5                            | 27.6           | 45.6        | 140.4          | 198.6          | 369.6          | 471.6          | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| 4.8                            | 26.4           | 43.2        | 132.6          | 187.2          | 348.6          | 444.0          | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| 5.0                            | 25.2           | 42.0        | 127.8          | 180.6          | 335.4          | 426.6          | 0.99     | 0.99     | 1.00     |
| 5.5                            | 23.4           | 38.4        | 117.0          | 164.4          | 308.4          | 388.2          | 0.99     | 1.00     | 1.00     |
| 6.0                            | 22.2           | 35.4        | 108.0          | 150.6          | 279.6          | 354.6          | 0.99     | 0.99     | 1.00     |
| 6.5                            | 20.4           | 32.4        | 99.6           | 138.6          | 256.8          | 325.2          | 0.98     | 0.99     | 1.00     |
| 7.0                            | 19.2           | 30.0        | 92.4           | 127.8          | 237.0          | 299.4          | 0.99     | 0.99     | 1.00     |
| 7.5                            | 18.0           | 28.2        | 85.8           | 118.2          | 219.6          | 277.2          | 0.99     | 0.99     | 1.00     |
| 8.0                            | 17.4           | 25.8        | 81.0           | 109.8          | 204.0          | 256.8          | 0.95     | 0.99     | 0.99     |
| 8.5                            | 16.2           | 24.6        | 75.0           | 102.0          | 189.6          | 238.8          | 0.99     | 0.99     | 1.00     |
| 9.0                            | 15.0           | 22.8        | 70.2           | 95.4           | 177.0          | 222.6          | 0.94     | 1.00     | 1.00     |
| 9.5                            | 14.4           | 21.6        | 66.0           | 88.6           | 165.6          | 207.6          | 0.99     | 0.99     | 1.00     |
| 10.0                           | 13.8           | 20.4        | 62.4           | 83.4           | 155.4          | 194.4          | 0.99     | 0.97     | 1.00     |
| 10.5                           | 13.2           | 19.6        | 58.8           | 78.6           | 146.4          | 182.4          | 0.94     | 0.98     | 1.00     |
| 11.0                           | 12.6           | 18.0        | 55.8           | 73.8           | 138.0          | 171.6          | 0.91     | 0.99     | 1.00     |
| 11.5                           | 12.0           | 16.8        | 52.8           | 69.6           | 130.2          | 162.0          | 0.90     | 0.99     | 0.99     |
| 12.0                           | 11.4           | 16.2        | 49.8           | 66.0           | 123.0          | 153.0          | 0.93     | 0.96     | 1.00     |
| 12.5                           | 10.8           | 15.0        | 47.4           | 62.4           | 116.4          | 144.6          | 0.98     | 0.97     | 1.00     |
| 13.0                           | 10.2           | 14.4        | 45.0           | 59.4           | 110.4          | 136.8          | 0.98     | 0.99     | 1.00     |
| 13.5                           | 9.6            | 13.8        | 43.2           | 56.4           | 105.0          | 129.6          | 0.75     | 0.98     | 1.00     |
| 14.0                           | 9.6            | 13.2        | 40.8           | 53.4           | 100.2          | 123.0          | 0.84     | 0.95     | 1.00     |
| 14.5                           | 9.0            | 12.6        | 39.0           | 51.0           | 95.4           | 117.0          | 0.99     | 0.93     | 0.99     |
| 15.0                           | 9.0            | 12.0        | 37.2           | 48.6           | 90.6           | 111.6          | 0.58     | 0.95     | 0.99     |

#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Rezonant tünelleme, önceki bölümlerde açıklandığı gibi çift veya daha fazla bariyerli yapının bir tarafından gelen taşıyıcının, kuantum kuyusundaki yarı bağlı veya yarı kararlı seviyelerden birine karşılık gelen bir enerjide veya yakınında yapıyı geçtiği süreçtir. Belirli enerjiler etrafındaki tünelleme olasılığındaki keskin rezonant zirveleri nedeniyle yük taşıyıcılarının (en yaygın olarak elektronların) tamamı veya tamamına yakını tüneller. Rezonans enerji seviyelerinin tespiti nano cihazlarda hızlı anahtarlama uygulamaları için önem arz etmektedir. Hiperbolik Pöschl Teller yapıları tezin giriş kısmında belirtildiği gibi çok atomlu moleküllerin titreşim spektrumlarını incelemede kullanılmış, cihazlarda gürültüyü azalttığı ve bazı koşullar altında yansımatsız bariyer özellikleri sergilediği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada Hiperbolik Pöschl Teller üçlü kuantum bariyer çift kuyu rezonant tünelleme yapısındaki rezonans enerjilerinin kuyu genişliği, bariyer genişlikleri ve yüksekliklerine bağlılığı transfer matrisi metodu kullanılarak analiz edilmiştir. Belirli yapı parametreleri değerlerinde rezonant tünelleme enerjisinde gelen tüm parçacıklar tüneller yani iletim katsayısı bir (1) değerindedir. Simetri bozulduğunda iletim olasılığı azalır yani rezonant tünelleme pik şiddeti düşer. Rezonant tünelleme enerjisi kuyu genişliği arttıkça daha düşük enerji değerlerine kayarken, bariyer yüksekliklerinin artmasıyla daha yüksek enerjilere kaymaktadır. Bariyer yüksekliklerinin değişiminin rezonant pik şiddetine etkisi yok denecek kadar azdır. Hesaplanan sonuçlar, sistemlerin yapı parametrelerinin rezonant tünelleme özelliklerini güçlü bir şekilde etkilediğini ve bu nedenle rezonans enerji seviyelerinin ve tünellemenin bu parametreler tarafından kontrol edilebileceğini göstermiştir.

#### 4.1. Öneriler

Çalışmamızın sonuçları, yüksek hızlı elektronik cihaz uygulamalarının geliştirilmesi için faydalı olabilir. Hassas bir şekilde bu yapı parametrelerinin; kuyu genişliğine, yüksekliğine ve genişlik parametresine bağlı olduğu ve bu parametreler değiştirilerek yapıdaki iletim özelliklerinin değiştirebileceği, iletimin hangi koşullarda ne oranda gerçekleştiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak üçlü bariyer yapılarında rezonant tünelleme karakteristiği bu parametreler ile kontrol edilerek kullanışlı aygıt uygulamaları geliştirilebilir.

Çoklu bariyer yapılarında (veya kuyularında) rezonant piklerinin sayısı artar ve süperörgü durumlarında bantlar oluştururlar. Bu tip yapılar dikdörge bariyerler için çalışılmış olup farklı tip gerçekçi bariyerler için de çalışılabilir. Kristal yapılarında karşılaşılabilecek potansiyeller modellenerek bu yapıların elektronik iletim özellikleri araştırılabilir. Ayrıca elektronik taşıyım için kullanılacak farklı yöntemlerle de bu yapıların rezonant tünelleme özellikleri çalışılabilir.

## KAYNAKÇA

- Abdalla, A., Eisa, M., Alhathloul, R., ve Aldaghri, O. (2018). Quantum resonant tunneling in semiconductor double-barrier structure. *Optik*, 170, 314–320. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.05.095>
- Abdolkader, T. M. (2007). A new approach for numerical simulation of quantum transport in double-gate SOI. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 20(6), 299–309. <https://doi.org/10.1002/jnm.647>
- Abdolkader, T. M., Shaker, A., ve Alahmadi, A. N. M. (2018). Numerical simulation of tunneling through arbitrary potential barriers applied on MIM and MIIM rectenna diodes. *European Journal of Physics*, 39(4), 045402. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aab5cf>
- Almansour, S. (2020). Theoretical study of electronic properties of resonant tunneling diodes based on double and triple AlGaAs barriers. *Results in Physics*, 17, 103089. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103089>
- Ando, Y., ve Itoh, T. (1987). Calculation of transmission tunneling current across arbitrary potential barriers. *Journal of Applied Physics*, 61(4), 1497–1502. <https://doi.org/10.1063/1.338082>
- Anwar, A., ve Jahan, M. (1995). Traversal time in an asymmetric double-barrier quantum-well structure. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 31(1), 3–7. <https://doi.org/10.1109/3.341701>
- Arda, A. (2017). Triangular quantum profiles: transmission probability and energy spectrum. *TURKISH JOURNAL OF PHYSICS*, 41, 72–80. <https://doi.org/10.3906/fiz-1607-8>
- Arndt, M., Juffmann, T., ve Vedral, V. (2009). Quantum physics meets biology. *HFSP Journal*, 3(6), 386–400. <https://doi.org/10.2976/1.3244985>
- Barut, A. O., Inomata, A., ve Wilson, R. (1987). Algebraic treatment of second Poschl-Teller, Morse-Rosen and Eckart equations. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 20(13), 4083–4096. <https://doi.org/10.1088/0305-4470/20/13/017>
- Batı, M. (2017). Testere Dişi Çift Bariyer Yapısında Rezonant Tünelleme Olayının İncelenmesi. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 91–96. <https://doi.org/10.21541/apjes.319961>
- Batı, M. (2018). Resonant tunneling properties of inverted Morse double quantum barrier. *Chinese Journal of Physics*, 56(2), 593–597. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2018.01.013>

- Batı, M. (2019). Electronic Transport and Resonant Tunneling Properties of Hyperbolic Pöschl-Teller Double-Barrier Structures. *Journal of Computational and Theoretical Transport*, 48(2), 66–76. <https://doi.org/10.1080/23324309.2019.1608563>
- Batı, M., Sakiroglu, S., ve Sokmen, I. (2016). Electron transport in electrically biased inverse parabolic double-barrier structure. *Chinese Physics B*, 25(5), 057307. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/25/5/057307>
- Boykin, T. B., ve Klimeck, G. (2005). The discretized Schrödinger equation for the finite square well and its relationship to solid-state physics. *European Journal of Physics*, 26(5), 865–881. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/26/5/020>
- Bransden, B. H. (2022). *Quantum Mechanics* (2nd ed.). PEARSON INDIA.
- Chamnan, N., ve Krunavakarn, B. (2017). Quantum reflection in the linearly downward potential. *Journal of Physics: Conference Series*, 901, 012113. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/901/1/012113>
- Chang, L. L., Esaki, L., ve Tsu, R. (1974). Resonant tunneling in semiconductor double barriers. *Applied Physics Letters*, 24(12), 593-595. <https://doi.org/10.1063/1.1655067>
- Clochiatti, S., Mutlu, E., Preuss, C., Kress, R., Prost, W. and Weimann, N. (2021). Broadband THz Detection Using InP Triple-Barrier Resonant Tunneling Diode With Integrated Antenna," 2021 Fourth International Workshop on Mobile Terahertz Systems (IWMTS), pp. 1-5, <https://doi:10.1109/IWMTS51331.2021.9486794>
- Cordero, S., ve García-Calderón, G. (2009). Invisibility of quantum systems to tunneling of matter waves. *Physical Review A*, 79(5). <https://doi.org/10.1103/physreva.79.052103>
- Cordero, S., ve García-Calderón, G. (2014). Multibarrier-tunneling invisible systems. *Physical Review A*, 90(6). <https://doi.org/10.1103/physreva.90.062101>
- di Ventra, M., Papp, G., Coluzza, C., Baldereschi, A., ve Schulz, P. A. (1996). Indented barrier resonant tunneling rectifiers. *Journal of Applied Physics*, 80(7), 4174–4176. <https://doi.org/10.1063/1.363290>
- Do, V. N., Dollfus, P., ve Lien Nguyen, V. (2006). Transport and noise in resonant tunneling diode using self-consistent Green's function calculation. *Journal of Applied Physics*, 100(9), 093705. <https://doi.org/10.1063/1.2364035>
- Droopad, R., Gerber, D. S., Choi, C., ve Maracas, G. N. (1993). Pseudomorphic InGaAs/GaAs and GaAs/AlGaAs asymmetric triangular quantum wells grown by MBE for optoelectronic device applications. *Journal of Crystal Growth*, 127(1–4), 606–610. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(93\)90693-q](https://doi.org/10.1016/0022-0248(93)90693-q)

- Dujardin, E., Thio, T., Lezec, H., ve Ebbesen, T. W. (2001). Fabrication of mesoscopic devices from graphite microdisks. *Applied Physics Letters*, 79(15), 2474–2476. <https://doi.org/10.1063/1.1407306>
- Encomendero, J., Protasenko, V., Sensale-Rodriguez, B., Fay, P., Rana, F., Jena, D., ve Xing, H. G. (2019). Broken Symmetry Effects due to Polarization on Resonant Tunneling Transport in Double-Barrier Nitride Heterostructures. *Physical Review Applied*, 11(3). <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.11.034032>
- Esaki, L. (1958). New Phenomenon in Narrow Germanium  $p$ - $n$  Junctions. *Physical Review*, 109(2), 603–604. <https://doi.org/10.1103/physrev.109.603>
- Esaki, L. (1974). Long Journey into Tunneling. *Science*, 183(4130), 1149–1155. <https://doi.org/10.1126/science.183.4130.1149>
- Esaki, L., ve Tsu, R. (1970). Superlattice and Negative Differential Conductivity in Semiconductors. *IBM Journal of Research and Development*, 14(1), 61–65. <https://doi.org/10.1147/rd.141.0061>
- Faist, J. (2018). *Quantum Cascade Lasers* (Reprint ed.). Oxford University Press.
- Faist, J., Capasso, F., Hutchinson, A. L., Pfeiffer, L., ve West, K. W. (1993). Suppression of optical absorption by electric-field-induced quantum interference in coupled potential wells. *Physical Review Letters*, 71(21), 3573–3576. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.71.3573>
- Faist, J., Capasso, F., Sirtori, C., Sivco, D., Hutchinson, A., Chu, S., ve Cho, A. (1993). Quantum-well intersub-band electroluminescent diode at  $\lambda = 5\mu\text{m}$ . *Electronics Letters*, 29(25), 2230. <https://doi.org/10.1049/el:19931497>
- Faist, J., Capasso, F., Sirtori, C., Sivco, D. L., Hutchinson, A. L., Hybertsen, M. S., ve Cho, A. Y. (1996). Quantum Cascade Lasers without Intersubband Population Inversion. *Physical Review Letters*, 76(3), 411–414. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.76.411>
- Fejer, M. M., Yoo, S. J. B., Byer, R. L., Harwit, A., ve Harris Jr., J. S. (1989). Observation of extremely large quadratic susceptibility at  $9.6\text{--}10.8\mu\text{m}$  in electric-field-biased AlGaAs quantum wells. *Physical Review Letters*, 62(9), 1041–1044. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.62.1041>
- Ferrer-Galindo, L., Betancourt-Riera, R., Betancourt-Riera, R., ve Riera, R. (2018). Electron states and electron Raman scattering in an asymmetrical double quantum well: External electric field. *Physica B: Condensed Matter*, 545, 215–221. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.06.017>
- Ferry, D. (2020). *Quantum Mechanics*. Amsterdam University Press.

- Ferry, D. K., Goodnick, S. M., ve Bird, J. (2009). *Transport in Nanostructures* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Gerber, D. S., Droopad, R., ve Maracas, G. N. (1993). Comparison of electroabsorption in asymmetric triangular and rectangular GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As multiple quantum wells. *Applied Physics Letters*, 62(5), 525–527. <https://doi.org/10.1063/1.108900>
- Ghatak, A. K., Sauter, E. G., ve Goyal, I. C. (1997). Validity of the JWKB formula for a triangular potential barrier. *European Journal of Physics*, 18(3), 199–204. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/18/3/013>
- Grover, S., ve Moddel, G. (2011). Applicability of Metal/Insulator/Metal (MIM) Diodes to Solar Rectennas. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 1(1), 78–83. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2011.2160489>
- Guéret, P., Rossel, C., Schlup, W., ve Meier, H. P. (1989). Investigations on resonant tunneling in III-V heterostructures: Comparison between experimental data and model calculations. *Journal of Applied Physics*, 66(9), 4312–4316. <https://doi.org/10.1063/1.343977>
- Guo, D. F. (1996). Resonant tunneling characteristics of a delta-doped strained-layer quantum-well switching device ( $\delta$ -SQSD). *Solid-State Electronics*, 39(11), 1637–1641. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(96\)00074-3](https://doi.org/10.1016/0038-1101(96)00074-3)
- Guo, D. F. (1998). Negative-differential-resistance characteristics in a triangular-barrier resonant tunnelling switch. *Semiconductor Science and Technology*, 13(2), 231–235. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/13/2/013>
- Guo, K. X., ve Chen, C. Y. (1995). Polaron effects on the optical rectification in electric-field-biased parabolic quantum wells. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 7(32), 6583–6589. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/7/32/023>
- Harrison, P., ve Valavanis, A. (2016). *Quantum Wells, Wires and Dots: Theoretical and Computational Physics of Semiconductor Nanostructures* (4th ed.). Wiley.
- Hayrapetyan, D., Kazaryan, E., ve Tevosyan, H. (2013). Optical properties of spherical quantum dot with modified Pöschl–Teller potential. *Superlattices and Microstructures*, 64, 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2013.09.002>
- Ishikawa, T., ve Tada, K. (1989). Observation of Quantum-Confined Stark Effect in a Graded-Gap Quantum Well. *Japanese Journal of Applied Physics*, 28(Part 2, No. 11), L1982–L1984. <https://doi.org/10.1143/jjap.28.l1982>
- Iwamoto, H., Aquino, V. M., ve Aguilera-Navarro, V. C. (2003). Scattering Coefficients for a Trapezoidal Potential. *International Journal of Theoretical Physics*, 42(8), 1795–1807. <https://doi.org/10.1023/a:1026191507292>

- Khairurrijal, Noor, F. A., ve Sukirno. (2005). Electron direct tunneling time in heterostructures with nanometer-thick trapezoidal barriers. *Solid-State Electronics*, 49(6), 923–927. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2005.03.016>
- Leo, J., ve MacDonald, A. H. (1991). Disorder-assisted tunneling through a double-barrier resonant-tunneling structure. *Physical Review B*, 43(12), 9763–9771. <https://doi.org/10.1103/physrevb.43.9763>
- Levi, A. F. J. (2012). *Applied Quantum Mechanics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Li, B., Guo, K. X., Zhang, C. J., ve Zheng, Y. B. (2007). The second-harmonic generation in parabolic quantum dots in the presence of electric and magnetic fields. *Physics Letters A*, 367(6), 493–497. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2007.03.046>
- Liboff, R. (2022). *Introductory Quantum Mechanics (4th Edition)* (4th ed.). PEARSON INDIA.
- Luo, M., Yu, G., ve Xia, L. (2015). Calculation of conductance for triangular multi-barrier structure in a constant electric field. *Superlattices and Microstructures*, 83, 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2015.02.015>
- Magoga, M., Archambault, F., ve Cerdá, J. I. (2012). Nt\_STM: A step forward in Scanning Tunneling Microscopy (STM) simulations. *Computer Physics Communications*, 183(6), 1246–1249. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2012.02.003>
- Malik, A. M., Godfrey, M. J., ve Dawson, P. (1999). Tunneling of heavy holes in semiconductor microstructures. *Physical Review B*, 59(4), 2861–2866. <https://doi.org/10.1103/physrevb.59.2861>
- Martinz, S., ve Ramos, R. (2016). Double quantum well triple barrier structures: analytical and numerical results. *Canadian Journal of Physics*, 94(11), 1180–1188. <https://doi.org/10.1139/cjp-2016-0037>
- Méndez, B., ve Domínguez-Adame, F. (1994). Numerical study of electron tunneling through heterostructures. *American Journal of Physics*, 62(2), 143–147. <https://doi.org/10.1119/1.17633>
- Miranda, M. G., Sun, G. H., ve Dong, S. H. (2010). The Solution Of The Second Pöschl-Teller Like Potential By Nikiforov-Uvarov Method. *International Journal of Modern Physics E*, 19(01), 123–129. <https://doi.org/10.1142/s0218301310014704>
- Nakagawa, T., Imamoto, H., Kojima, T., ve Ohta, K. (1986). Observation of resonant tunneling in AlGaAs/GaAs triple barrier diodes. *Applied Physics Letters*, 49(2), 73–75. <https://doi.org/10.1063/1.97356>

- Neamen, D. A. (2011). *Semiconductor Physics And Devices: Basic Principles* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Nicholls, J., Dimitrijević, S., Tanner, P., ve Han, J. (2019). Description and Verification of the Fundamental Current Mechanisms in Silicon Carbide Schottky Barrier Diodes. *Scientific Reports*, 9(1).  
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-40287-1>
- Nutku, F. (2014). Quasi-bound levels, transmission and resonant tunneling in heterostructures with double and multi rectangular, trapezoidal, triangular barriers. *Journal of Computational Electronics*, 13(2), 456–465.  
<https://doi.org/10.1007/s10825-014-0556-1>
- Ohmukai, M. (2005). Triangular double barrier resonant tunneling. *Materials Science and Engineering: B*, 116(1), 87–90.  
<https://doi.org/10.1016/j.mseb.2004.09.021>
- Papp, G., di Ventra, M., Coluzza, C., Baldereschi, A., ve Margaritondo, G. (1995). Current rectification through a single-barrier resonant tunneling quantum structure. *Superlattices and Microstructures*, 17(3), 273.  
<https://doi.org/10.1006/spmi.1995.1049>
- Pourfath, M. (2007). Numerical Study of Quantum Transport in Carbon Nanotube Based Transistors, Doktora Tezi, Eingereicht an der Technischen Universität Wien Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik von, Wien, Österreich.
- Pöschl, G., ve Teller, E. (1933). Bemerkungen zur Quantenmechanik des anharmonischen Oszillators. *Zeitschrift Für Physik*, 83(3–4), 143–151.  
<https://doi.org/10.1007/bf01331132>
- Radovanović, J., Milanović, V., Ikonić, Z., ve Indjin, D. (2000). Intersubband absorption in Pöschl–Teller-like semiconductor quantum wells. *Physics Letters A*, 269(2–3), 179–185. [https://doi.org/10.1016/s0375-9601\(00\)00238-3](https://doi.org/10.1016/s0375-9601(00)00238-3)
- Ricco, B., ve Azbel, M. Y. (1984). Physics of resonant tunneling. The one-dimensional double-barrier case. *Physical Review B*, 29(4), 1970–1981.  
<https://doi.org/10.1103/physrevb.29.1970>
- Rong, K., Suhara, M., Asakawa, K., Arzi, K., Weimann, N. and Prost, W. (2019). Characterization of the Effective Tunneling Time and Phase Relaxation Time in Triple-Barrier Resonant Tunneling Diodes, 2019 Compound Semiconductor Week (CSW), 2019, pp. 1-2,  
<https://doi.org/10.1109/ICIPRM.2019.8819043>
- Rong, T., Yang, L. A., Zhao, Z., Zhang, K., ve Hao, Y. (2019). Theoretical Modeling of Triple-Barrier Resonant-Tunneling Diodes Based on AlGaIn/GaN

- Heterostructures. *Physica Status Solidi (a)*, 216(23), 1900471. <https://doi.org/10.1002/pssa.201900471>
- Roskos, H. G., Nuss, M. C., Shah, J., Leo, K., Miller, D. A. B., Fox, A. M., Schmitt-Rink, S., ve Köhler, K. (1992). Coherent submillimeter-wave emission from charge oscillations in a double-well potential. *Physical Review Letters*, 68(14), 2216–2219. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.68.2216>
- Sarikurt, S. (2013). Electronic Structure of Parabolic Confining Quantum Wires with Rashba and Dresselhaus Spin-Orbit Coupling in a Perpendicular Magnetic Field. Ph.D. thesis, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Santiago, R. B., ve Guimarães, L. (2002). Extended eigenfunctions in asymmetric double triangular quantum wells in weak electric fields. *Solid-State Electronics*, 46(1), 89–96. [https://doi.org/10.1016/s0038-1101\(01\)00267-2](https://doi.org/10.1016/s0038-1101(01)00267-2)
- Saurabh, S., ve Kumar, M. J. (2016). *Fundamentals of Tunnel Field-Effect Transistors*. Amsterdam University Press.
- Schulz, P. A., ve Gonçalves Da Silva, C. E. T. (1988). Two-step barrier diodes. *Applied Physics Letters*, 52(12), 960–962. <https://doi.org/10.1063/1.99241>
- Shahjahan, M., Khatun, M. H., Sawada, K., ve Ishida, M. (2010). TEM study of RTD structure fabricated with epi-Si/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterostructure. *Thin Solid Films*, 518(8), 2295–2298. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.08.151>
- Shizgal, B. D. (2016). Pseudospectral method of solution of the Schrödinger equation with non classical polynomials; the Morse and Pöschl–Teller (SUSY) potentials. *Computational and Theoretical Chemistry*, 1084, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.comptc.2016.03.002>
- Shu, Q., Jiang, Y., Meng, S., Lin, G., ve Ma, W. (2002). Exactly solvable model for metal–insulator–metal stepped boundary tunnel junctions. *Thin Solid Films*, 414(1), 136–142. [https://doi.org/10.1016/s0040-6090\(02\)00455-8](https://doi.org/10.1016/s0040-6090(02)00455-8)
- Singh, J. (1995). *Semiconductor Optoelectronics: Physics and Technology*. McGraw-Hill Education (ISE Editions).
- Singh, M. M., ve Siddiqui, M. (2017). Electrical characterization of triple barrier GaAs/AlGaAs RTD with dependence of operating temperature and barrier lengths. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 58, 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2016.10.014>
- Skolnick, M. S., Hayes, D. G., Simmonds, P. E., Higgs, A. W., Smith, G. W., Hutchinson, H. J., Whitehouse, C. R., Eaves, L., Henini, M., Hughes, O. H., Leadbeater, M. L., ve Halliday, D. P. (1990). Electronic processes in double-barrier resonant-tunneling structures studied by photoluminescence spectroscopy in zero and finite magnetic fields. *Physical Review B*, 41(15), 10754–10766. <https://doi.org/10.1103/physrevb.41.10754>

- Sollner, T. C. L. G., Goodhue, W. D., Tannenwald, P. E., Parker, C. D., ve Peck, D. D. (1983). Resonant tunneling through quantum wells at frequencies up to 2.5 THz. *Applied Physics Letters*, 43(6), 588–590. <https://doi.org/10.1063/1.94434>
- Strutz, T., ve Shiraki, Y. (1996). Room-temperature quantum interference in an asymmetric triple-barrier resonant-tunnelling diode. *Semiconductor Science and Technology*, 11(1), 103–106. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/11/1/022>
- Sze, S. M., Li, Y., ve Ng, K. K. (2021). *Physics of Semiconductor Devices* (4th ed.). Wiley.
- Tanoue, T., Mizuta, H., ve Takahashi, S. (1988). A triple-well resonant tunneling diode for multiple-valued logic application. *IEEE Electron Device Letters*, 9(8), 365–367. <https://doi.org/10.1109/55.745>
- Tao, B., Wan, C., Tang, P., Feng, J., Wei, H., Wang, X., Andrieu, S., Yang, H., Chshiev, M., Devaux, X., Hauet, T., Montaigne, F., Mangin, S., Hehn, M.,
- Lacour, D., Han, X., ve Lu, Y. (2019). Coherent Resonant Tunneling through Double Metallic Quantum Well States. *Nano Letters*, 19(5), 3019–3026. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b00205>
- Tong, B. (1997). Scattering states of the Sech-squared potential. *Solid State Communications*, 104(11), 679–682. [https://doi.org/10.1016/s0038-1098\(97\)10009-6](https://doi.org/10.1016/s0038-1098(97)10009-6)
- Tsang, W. T. (1982). Extremely low threshold (AlGa)As graded-index waveguide separate-confinement heterostructure lasers grown by molecular beam epitaxy. *Applied Physics Letters*, 40(3), 217–219. <https://doi.org/10.1063/1.93046>
- Tsang, W. T., Wu, M. C., Tanbun-Ek, T., Logan, R. A., Chu, S. N. G., ve Sergent, A. M. (1990). Low threshold and high power output 1.5  $\mu\text{m}$  InGaAs/InGaAsP separate confinement multiple quantum well laser grown by chemical beam epitaxy. *Applied Physics Letters*, 57(20), 2065–2067. <https://doi.org/10.1063/1.103942>
- Tsu, R., ve Esaki, L. (1973). Tunneling in a finite superlattice. *Applied Physics Letters*, 22(11), 562–564. <https://doi.org/10.1063/1.1654509>
- Tung, R. T. (2014). The physics and chemistry of the Schottky barrier height. *Applied Physics Reviews*, 1(1), 011304. <https://doi.org/10.1063/1.4858400>
- Van der Maelen Uría, J. F., García-Granda, S., ve Menéndez-Velázquez, A. (1996). Solving one-dimensional Schrödinger-like equations using a numerical matrix method. *American Journal of Physics*, 64(3), 327–332. <https://doi.org/10.1119/1.18242>

- Visser, M. (1999). Some general bounds for one-dimensional scattering. *Physical Review A*, 59(1), 427–438. <https://doi.org/10.1103/physreva.59.427>
- Wang, G., ve Guo, K. (2001). Excitonic effects on the third-harmonic generation in parabolic quantum dots. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 13(35), 8197–8206. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/13/35/324>
- Wang, H., Xu, H., ve Zhang, Y. (2006). A theoretical study of resonant tunneling characteristics in triangular double-barrier diodes. *Physics Letters A*, 355(6), 481–488. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2006.04.007>
- Wang, S. M., Treideris, G., Chen, W. Q., ve Andersson, T. G. (1993). Growth of analog  $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}/\text{GaAs}$  parabolic quantum wells by molecular beam epitaxy. *Applied Physics Letters*, 62(1), 61–62. <https://doi.org/10.1063/1.108819>
- Yu, Y. B., ve Guo, K. X. (2003). Exciton effects on nonlinear electro-optic effects in semi-parabolic quantum wires. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 18(4), 492–497. [https://doi.org/10.1016/s1386-9477\(03\)00190-5](https://doi.org/10.1016/s1386-9477(03)00190-5)
- Yu, Y. B., Guo, K. X., ve Zhu, S. N. (2005). Polaron influence on the third-order nonlinear optical susceptibility in cylindrical quantum wires. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 27(1–2), 62–66. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2004.10.004>
- Zettili, N. (2022). *Quantum Mechanics: Concepts and Applications* (3rd ed.). Wiley.
- Zhao, X. D., Yamamoto, H., Chen, Z. M., ve Taniguchi, K. (1996). Comparison of resonance conditions in double-barrier structures and triple-barrier structures. *Journal of Applied Physics*, 79(9), 6966–6974. <https://doi.org/10.1063/1.361461>