

ÇOKLU KUANTUM TEL KUYULARINDA ELEKTRİK ALAN VE MANYETİK ALAN'IN ELEKTRONİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Mustafa ULAŞ^{1*}, Abbas GÜMÜŞ²

^{1*}Kırklareli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 39100 KIRKLARELİ

²Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Öz

Çoklu (Dört, Beş) kare kuyu tel sistemine dışarıdan uygulanan elektrik ve manyetik alan etkisi altında elektronun bağlanma enerjisi hesaplandı. Bağlanma enerjisinin, dışarıdan uygulanan etkilere ve tel sayısına bağlılığı gösterildi. Çoklu kuantum kuyu yapısı GaAs ve $Al_xGa_{1-x}As$ yarıiletken malzemeden oluşturuldu. Tel yapıya elektrik alan pozitif x doğrultusunda ve manyetik alan ise eksi z yönünde olacak şekilde seçildi. Hesaplama sonlu farklar yöntemi kullanıldı. Bağlanma enerjisinin farklı alanlar altında tel sayısına bağlılığı gösterildi. Ayrıca dışarıdan uygulanan alanların, elektronun gördüğü potansiyele ve elektronun bulunma olasılığına etkisi gösterildi. Bu tür yapıların detaylı incelenmesi, hem yapının elektronik özelliklerinin teorik olarak anlaşılmasını sağlayacak, hem de teknolojik cihaz üretiminde daha ekonomik bir yol gösterecektir.

Anahtar Kelimeler: Çoklu kuantum teli, bağlanma enerjisi, elektrik alan, manyetik alan.

THE EFFECT OF ELECTRIC AND MAGNETIC FIELD ON THE ELECTRONIC FEATURES IN A MULTIPLE QUANTUM WIRE

Abstract

Electron Bonding energy was calculated under the influence of electrical and magnetic field applied externally to multiple (Four, Five) square well wire system. The binding energy was shown to be connected to external influences and number of wires. The multi-quantum well structure was made of GaAs and $Al_xGa_{1-x}As$ semiconductor material. The electrical area of the wire structure was selected in line with positive x and the magnetic area was selected to be minus z. Finite differences method was used in the calculation. The binding energy was shown to be connected to the number of wires under different areas. In addition, the effects of externally applied areas on the potential of the electron and the possibility of electron discovery were shown. A detailed examination of such structures will both provide a theoretical understanding of the electronic characteristics of the structure and show a more economical path in the production of technological devices.

Keywords: Multiple quantum well wire, binding energy, electric field, magnetic field

Sorumlu Yazar: Mustafa ULAŞ, mustafa.ulas@klu.edu.tr

1. GİRİŞ

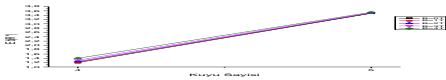
Kuantum yapılardaki teknolojik gelişmeler, ileri düzey çok katmanlı düşük boyutlu yapıların kolaylıkla yapılabilmesine imkân sağlamıştır. Günümüzün teknolojik cihazlarının üretilmesinde ve geliştirilmesinde düşük boyutlu yapı tekniği önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle düşük boyutlu yarıiletken yapıların fiziksel ve optik özelliklerinin anlaşılması son yıllarda birçok bilim insanı tarafından çalışılan popüler bir alan haline gelmiştir. Bu alanda yapılan önemli çalışmalardan bazılarında, hidrojenimsi yabancı atom durumları ve bağlanma enerjisi teorik olarak hesaplanmış, bağlanma enerjisinin tel kalınlığı ile değişimi gösterilmiştir [1,2]. Dışarıdan uygulanan alanların bağlanma enerjisi ve tel geometrisi üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir [3-12].

Son yılların popüler çalışmaları ise eşit potansiyel engelli simetrik ve asimetric kuantum yapılarda elektron geçişleri, lazer alan altında incelenmiş, potansiyel profilleri ve geçiş katsayısının lazer giydirme parametresine bağlılığı gösterilmiştir [13,14].

Bu çalışmada çoklu (dört, beş) kare kesitli kuantum tel kuyularda bulunan bir elektronun, sonradan bu yapıya katkılanmış yabancı bir atoma bağlanma enerjisi, kuyu sayısına, dışarıdan uygulanan elektrik ve manyetik alan şiddetine bağlılığı, sonlu farklar yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

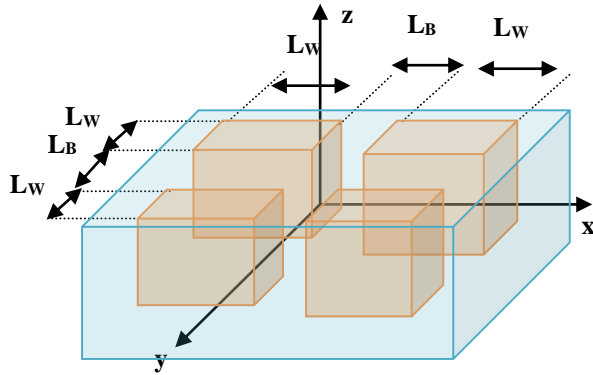
2. TEORİ

Kare kesitli GaAs/Al_xGa_{1-x}As kuantum kuyu teli içindeki bir elektronun, etkin kütle yaklaşımı altında Hamiltonyen'i



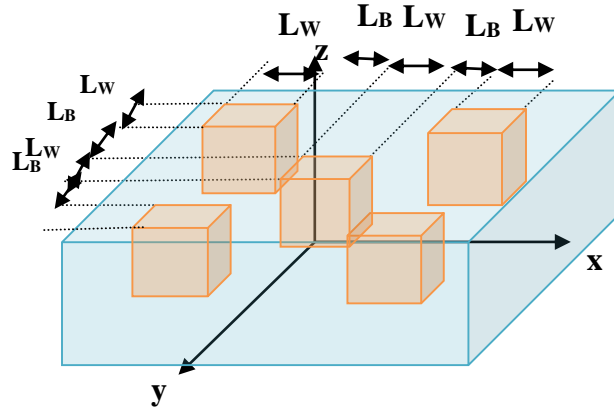
(1)

ile verilir. Burada $V(x,y)$, elektronun yapı içerisinde (x ve y yönünde) hareket ederken gördüğü potansiyeldir ve sırasıyla 4 kuantum kuyu teli ve 5 kuantum kuyu teli için



Şekil 1.a: Çok katmanlı kuantum kuyu teli (4 kuyu) şematik gösterimi.

$$V(x,y) = \begin{cases} 0 & \frac{L_B}{2} \leq |x| \leq \frac{L_B}{2} + L_W \text{ ve } \frac{L_B}{2} \leq |y| \leq \frac{L_B}{2} + L_W \\ V_0 & \text{Diğer yerlerde} \end{cases} \quad (2)$$



Şekil 1.b: Çok katmanlı kuantum kuyu teli (5 kuyu) şematik gösterimi.

$$V(x,y) = \begin{cases} 0 & |x| \leq \frac{L_W}{2} \text{ ve } |y| \leq \frac{L_W}{2} \\ V_0 & \frac{L_W}{2} + L_B \leq |x| \leq \frac{3L_W}{2} + L_B \text{ ve } \frac{L_W}{2} + L_B \leq |y| \leq \frac{3L_W}{2} + L_B \\ & \text{Diğeryerlerde} \end{cases} \quad (3)$$

ile verilir. Kuantum tel yapısına artı x yönünde elektrik alanı ve eksi z doğrultusunda düzgün manyetik alan uygulandığında Hamiltonyen denklemi, etkin Rydberg $R^* = (m^* e^4 / 2\epsilon_0^2 \hbar^2)$ ve etkin Bohryarıçapı $a^* = (\epsilon_0 \hbar^2 / m^* e^2)$ boyutlarında alınır

$$H = - \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] + \frac{\gamma^2}{4} (x^2 + y^2) + \eta x \quad (4)$$

şeklinde yazılır. Burada $\eta = |e| a^* F \left(\frac{kV}{cm} \right) R^*$ ve manyetik alan şiddetini betimleyen

$$\gamma = (e \hbar B(\text{Tesla})) / (2m^* c R^*) \text{ ile verilir.}$$

Elektronun taban durum enerjisi $[E]$ değerini ve dalga fonksiyonunu $[\psi(x, y)]$ bulmak için aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$H\psi(x, y) = E\psi(x, y) \quad (5)$$

Bu iki boyutlu diferansiyel denklemde, sonlu farklar nümerik yöntemi kullanılarak, taban durum enerji özdeğeri ve öz vektörü hesaplanır.

Bu yapıya yabancı atom katıldığında, elektron ile yabancı atom etkileşmesini içeren Hamiltonyen denklemi aşağıdaki gibidir.

$$H_{\text{imp}} = H - \frac{2}{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + z^2}} \quad (6)$$

Buradaki x_i ve y_i hidrojenimsi yabancı atomun sistemdeki koordinatıdır. Bu çalışmada x_i ve y_i sistemin merkezinde ($x_i = 0$ ve $y_i = 0$). Bu diferansiyel denklemin çözümü için aşağıdaki gibi varyasyonel deneme dalga fonksiyonu.

$$\psi_{\text{imp}}(x, y, z) = N_{\text{imp}} \psi(x, y) e^{-\frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + z^2}}{\lambda}} \quad (7)$$

kullanılmıştır. Buradaki N_{imp} deneme dalga fonksiyonunun normalizasyon sabiti, λ deneme dalga fonksiyonunun varyasyonel parametresidir. Yapının içinde bulunan elektronun yabancı atom enerjisi

$$E_{imp} = \left\{ \frac{\langle \Psi_{imp}(x,y,z) | H_{imp} | \Psi_{imp}(x,y,z) \rangle}{\langle \Psi_{imp}(x,y,z) | \Psi_{imp}(x,y,z) \rangle} \right\}_{\lambda_{minumum}} \quad (8)$$

ile verilir. Sistem içinde deki bir elektronun yabancı atoma bağlanma enerjisi ise

$$E_b = E - E_{imp}$$

$$\cong -\frac{1}{\lambda^2} + \frac{2A}{B}$$

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (\Psi^2(x,y) K_0(2\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}/\lambda)) dx dy$$

$$B = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (\Psi^2(x,y) \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} K_1(2\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}/\lambda)) dx dy \quad (9)$$

ile hesaplanır. Burada sırası ile K_0 ve K_1 sıfırıncı ve birinci dereceden düzeltilmiş Bessel fonksiyonlarıdır.

3. SONUÇ ve TARTIŞMA

GaAs/Al_xGa_{1-x}As çoklu kuantum kuyu tellerinde sabitleri, $a^* \cong 100$ Å ve $R^* \cong 5.7$ meV, Al konsantrasyonu $x=0.3$ olarak alındı. Bu değerler dikkate alındığında potansiyel bariyeri yaklaşık $V_0=224$ meV değerine karşılık gelir.

Şekil 2a'da farklı manyetik alan şiddetlerine göre tellerdeki elektronun yabancı atoma ($x_i=0, y_i=0$) bağlanma enerjisi gösterilmiştir. Bu grafikte sadece dışarıdan farklı manyetik alan ($B=0, 1, 2, 3, 4$ Tesla) uygulanmış ve bağlanma enerjisinin kuyu sayısına göre değişimi incelenmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi bağlanma enerjisi, beş telli yapıda artarken, dört telli yapıda azalmaktadır. Bunun nedeni aslında beş telli yapı her ne kadar farklı tel sayısı olsa da bir telli yapı gibi davranmaktadır. Çünkü dört tel ortasında beşinci telin olması elektron için tek tel gibi görülmektedir. Dört telli yapıda, teller simetrik olduklarından dört tel arasında kalan elektron daha zayıf bağlanma görmektedir. Şekil 2b de farklı elektrik alan şiddetlerine göre tellerdeki elektronun yabancı atoma ($x_i=0, y_i=0$) bağlanma enerjisi gösterilmiştir. Bu grafikte sadece dışarıdan farklı elektrik alan ($F=0, 10, 20, 30, 40$ kV/cm) uygulanmış ve bağlanma enerjisinin tel sayısına göre değişimi incelenmiştir. Görüldüğü üzere, dışarıdan uygulanan artı x doğrultusundaki elektrik alan, elektronun bağlanma

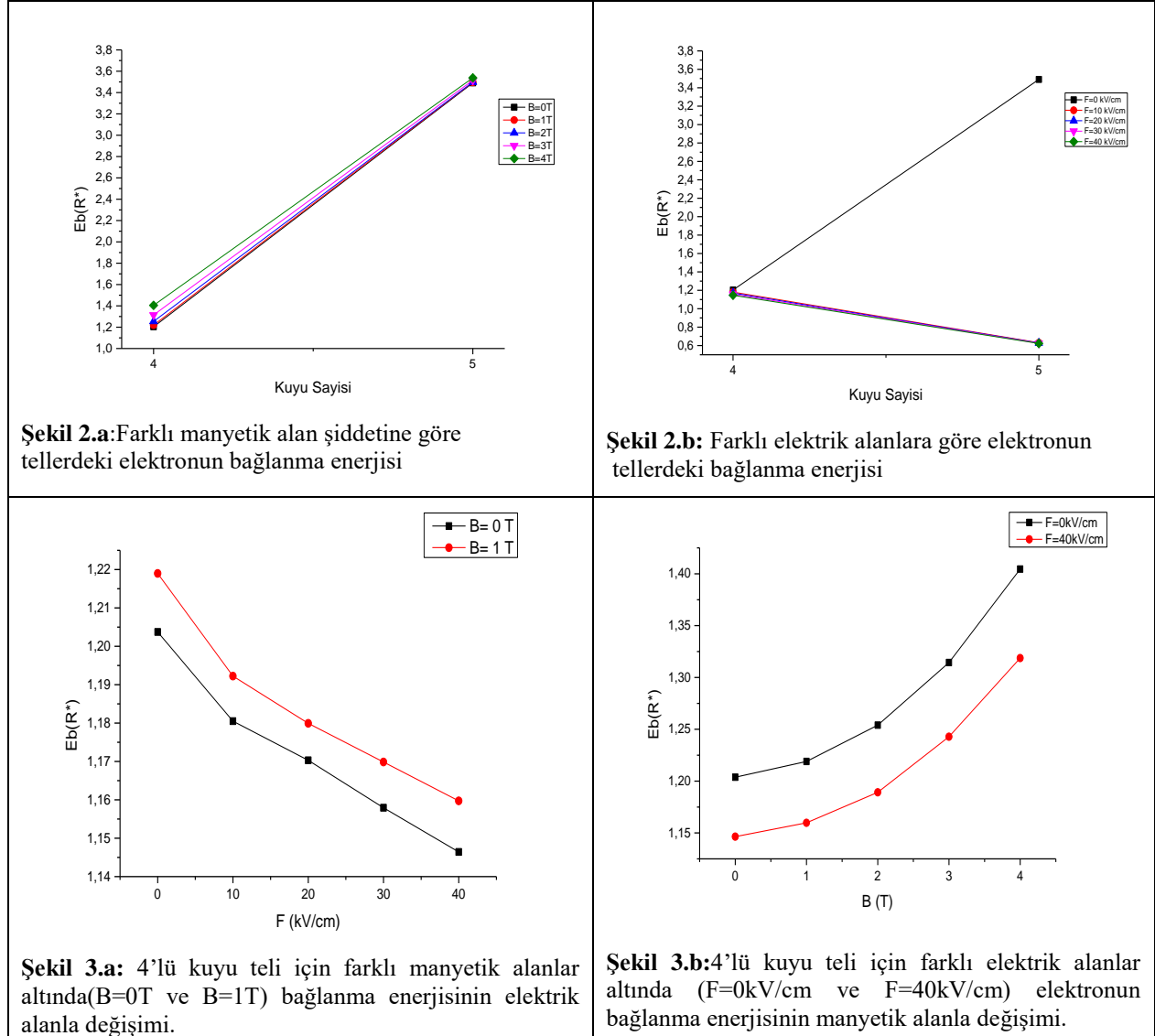
enerjisini beklediği gibi düşürmüştür. Çünkü elektrik alanın, elektronun gördüğü potansiyeli değiştirmesi ile elektronu merkezden (yabancı atomdan) uzaklaştırarak (uygulan alanın tersi yönde) bağlanma enerjisinin azalmasına neden olmuştur. Her iki şekil için manyetik alan bağlanma enerjisini artırırken, elektrik alanın bağlanma enerjisini azalttığı görülmüştür. Bu ise beklenen bir sonuçtur.

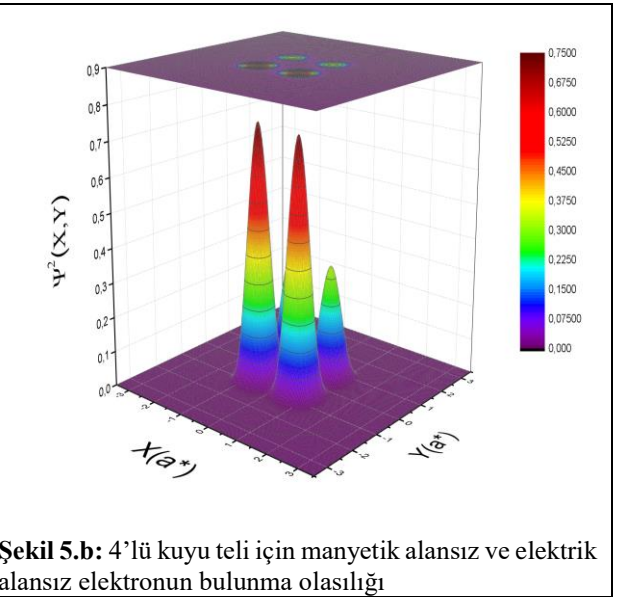
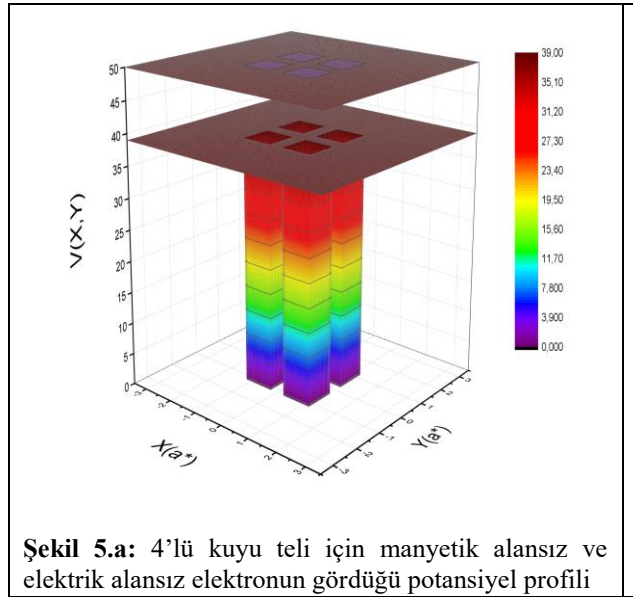
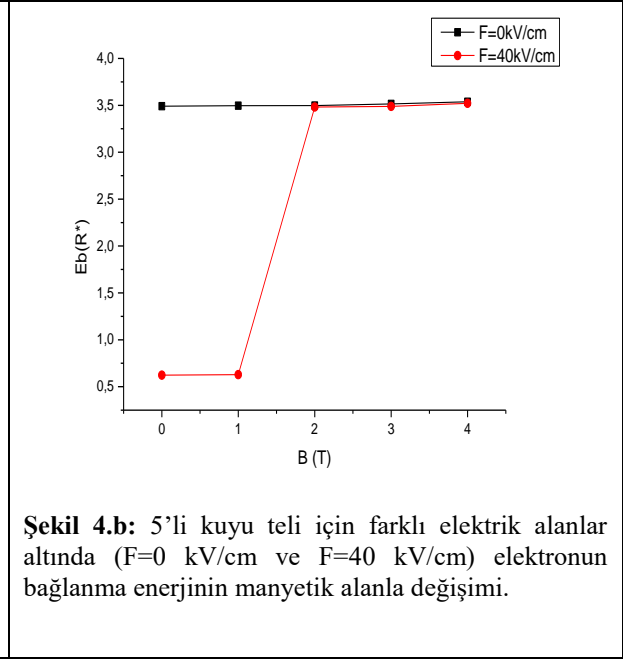
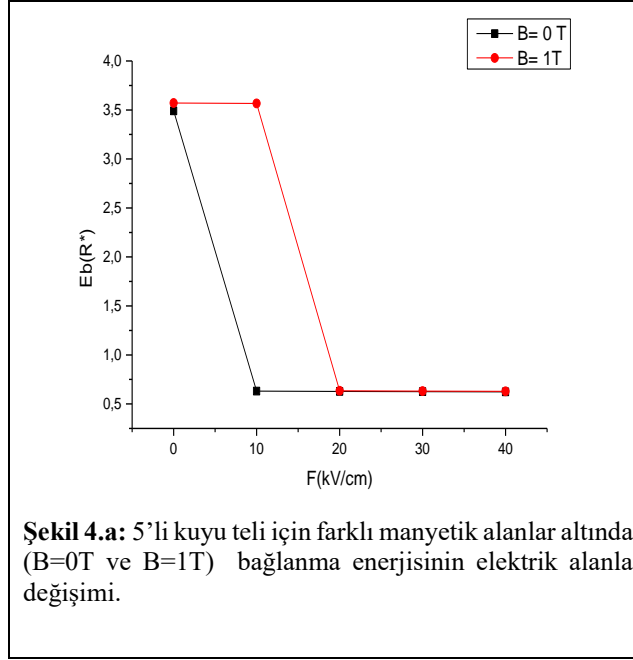
Şekil 3a'da dört telli sistem için farklı manyetik alan şiddetlerine ($B=0, 1T$) göre elektronun, yabancı atoma ($x_i=0, y_i=0$) bağlanma enerjisinin elektrik alanla değişimi gösterilmiştir. Bu grafikte sadece dışarıdan farklı manyetik alan ($B=0, 1T$) uygulanmış ve bağlanma enerjisinin elektrik alanla değişimi incelenmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi tel sayısını artırmak bağlanma enerjisini azaltmıştır. Aynı şekilde manyetik alan bağlanmayı artırırken, elektrik alan azaltıcı yönde etki etmektedir. Şekil 3b'de dört telli sistem için farklı elektrik alan şiddetlerine ($F=0, 40kV/cm$) göre teldeki elektronun, yabancı atoma ($x_i=0, y_i=0$) bağlanma enerjisinin manyetik alanla değişimi gösterilmiştir. Bu grafikte de sadece dışarıdan farklı elektrik alan ($F=0, 40kV/cm$) uygulanmış ve bağlanma enerjisinin manyetik alanla değişimi incelenmiştir. Burada da tel sayısının artırılması bağlanma enerjisinin azalmasına neden olurken, elektrik alanın bağlanma enerjisini beklediği gibi azalttığı ve manyetik alanın yine beklediği gibi artırdığı gözlenmiştir. Şekil 2 a ve b den de görüldüğü gibi dörtlü tel sisteminin benzer davranış gösterdiği gözlenmiş olup, beklenen sonuçtur. Şekil 4a'da beş telli sistem için farklı manyetik alan şiddetlerine ($B=0, 1$ Tesla) göre elektronun, yabancı atoma ($x_i=0, y_i=0$) bağlanma enerjisinin, elektrik alan ile değişimi gösterilmiştir. Bu grafikte sadece dışarıdan farklı manyetik alan ($B=0, 1$ Tesla) uygulanmış ve bağlanma enerjisinin elektrik alanla değişimi incelenmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi bağlanma enerjisi, manyetik alan sıfırken, düşük elektrik alanlarda ani bir azalma gösterirken, elektrik alan $10 kV/cm$ 'nin üzerindeki değerlerde bir değişiklik olmamıştır. Ancak manyetik alan sıfırdan farklı ($B=1 T$) olduğunda, bağlanma enerjisinin arttığını ve belli bir değerden ($20kV/cm$) sonra hızlı bir düşüş yaparak elektrik alanla benzer etki gösterdiği gözlenmiştir. Bunun sebebi ise elektrik alan elektronu merkezden uzaklaştırırken (elektronun gördüğü potansiyel profilini değiştirdiğinden.) manyetik alan ise tam tersi etki yapmasındandır. Şekil 4b'de beşli tel için farklı elektrik alan şiddetlerine ($F=0, 40kV/cm$) göre elektronun, yabancı atoma ($x_i=0, y_i=0$) bağlanma enerjisinin manyetik alanla değişimi gösterilmiştir. Bu grafikte sadece dışarıdan farklı elektrik alan ($F=0, 40kV/cm$)

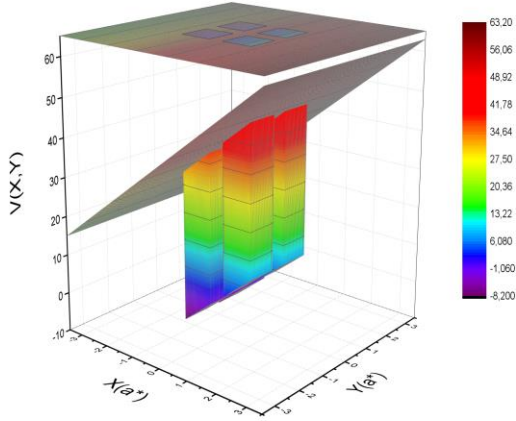
uygulanmış ve bağlanma enerjisinin manyetik alanla değişimi incelenmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi elektrik alanın sıfır olduğu durumlarda, manyetik alan bağlanma enerjisini değiştirmemiştir. Çünkü beşinci telin merkezinde olan elektronu daha fazla merkeze itmemiştir. Elektrik alanın 40kV/cm olduğu durumda, manyetik alanın düşük olduğu ($B=0,1T$) elektrik alanın, elektronu merkez dışına iterek bağlanma enerjisinin düşmesine neden olmuştur. Şekil 2 a ve b den de görüldüğü gibi beşli tel sisteminin benzer davranış gösterdiği gözlenmiştir. Buda beklenen sonuçtur.

Şekil 5a'da dört kuyulu tel yapıya dışarıdan bir etki olmadığında elektronun gördüğü potansiyel profili. Şekil 5b'de ise aynı şartlarda elektronun bulunma olasılığı. Şekil 5c' de dört kuyulu tel yapıya dışarıdan uygulanan artı x doğrultusundaki elektrik alan, elektronun gördüğü potansiyeli değiştirmiştir. Bu ise merkez de yoğunlaşan elektronu sol tarafa doğru (eksi x doğrultusunda) çekerek yabancı atomdan uzaklaştırmış ve potansiyel profilinin değişmesine neden olmuştur. Şekil 5d'de dörtlü kuyu tel için $F=40$ kV/cm altında elektronun bulunma olasılığıdır. Şekil 5e'de dışarıdan uygulanan eksi z doğrultusunda 1 T değerindeki manyetik alan, elektronun gördüğü potansiyeli değiştirerek daha önce merkezden uzaklaşan elektronu, merkeze doğru iterek yabancı atoma yaklaştırmış ve bağlanma enerjisinin artmasını sağlamıştır. Bu da Şekil 3 ve Şekil 4'ten görülebilir.

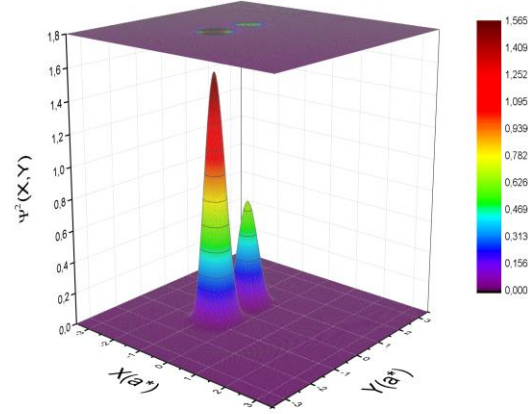
Şekil 6a'da beş kuyulu tel yapıya dışarıdan bir etki olmadığında elektronun gördüğü potansiyel profili. Şekil 6b'de ise aynı şartlarda elektronun bulunma olasılığı. Şekil 6c'de beş kuyulu tel yapıya dışarıdan uygulanan artı x doğrultusundaki elektrik alan, elektronun gördüğü potansiyel profilini Şekil 5c'de olduğu gibi değiştirmiştir. Şekil 6d'de beşli kuyu teli için $F=40$ kV/cm altında elektronun bulunma olasılığıdır. Şekil 6e'de dışarıdan uygulanan eksi z doğrultusunda 1 T değerindeki manyetik alan, elektronun gördüğü potansiyel profilini Şekil 5e'de olduğu gibi değiştirerek bağlanma enerjisinin artmasını sağlamıştır.



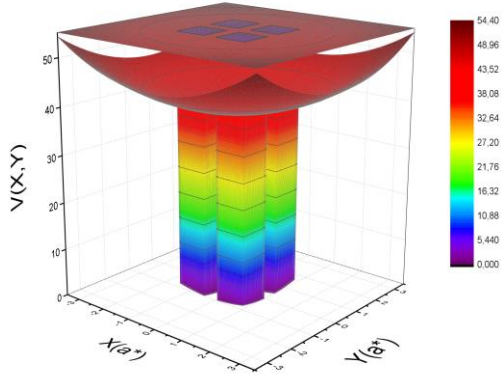




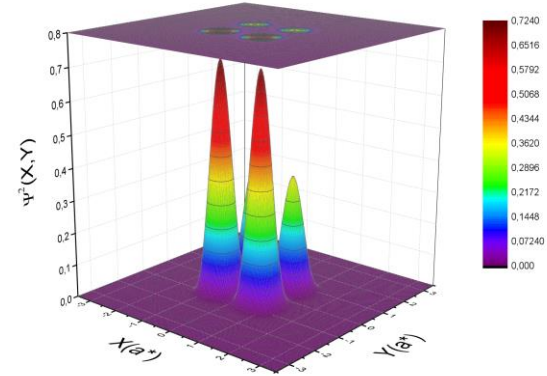
Şekil 5.c: 4'lü kuyu teli için ve $F=40\text{kV/cm}$ elektrik alanında manyetik alansız elektronun gördüğü potansiyel profili.



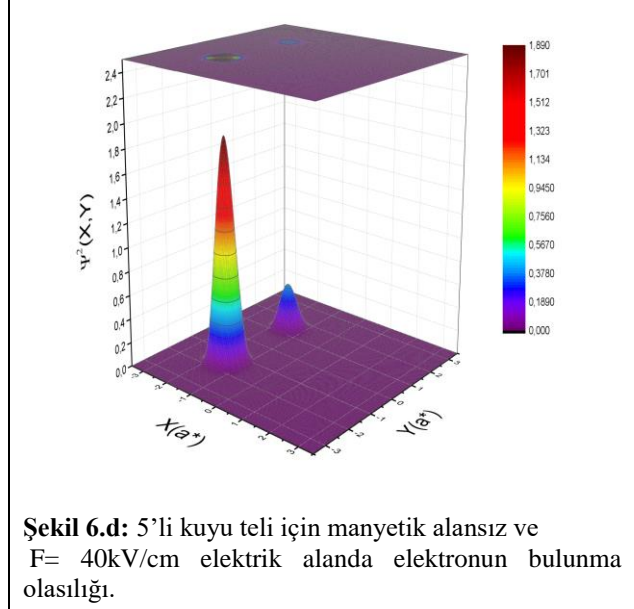
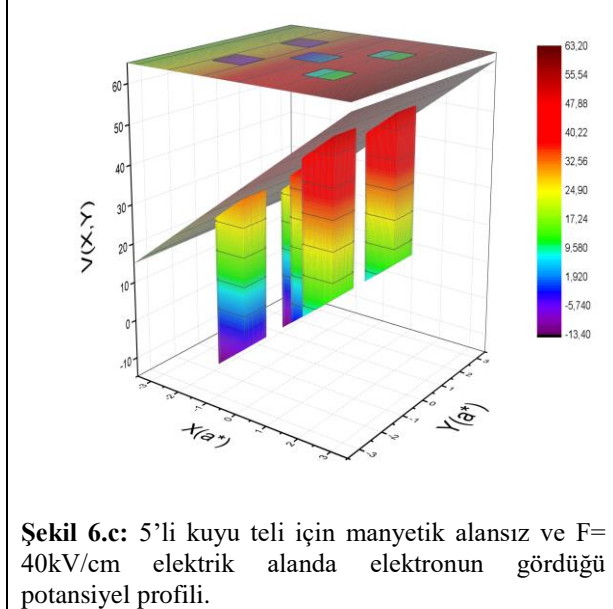
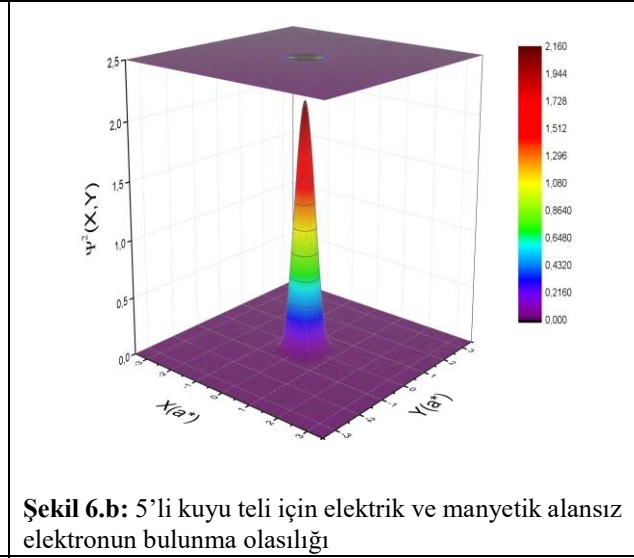
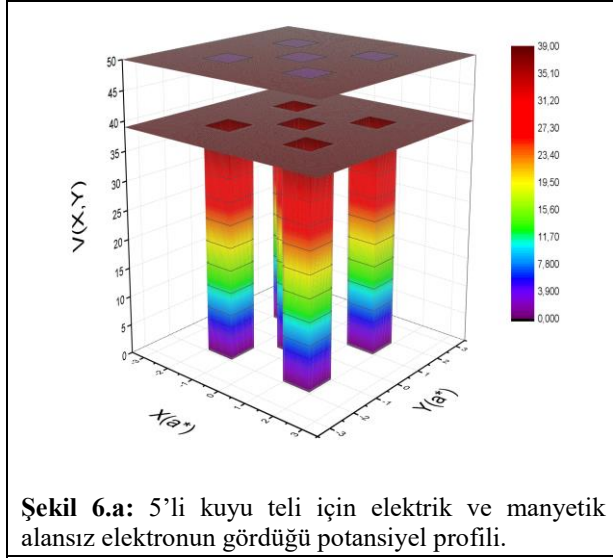
Şekil 5.d: 4'lü kuyu teli için manyetik alansız ve $F=40\text{kV/cm}$ elektrik alanında elektronun bulunma olasılığı.

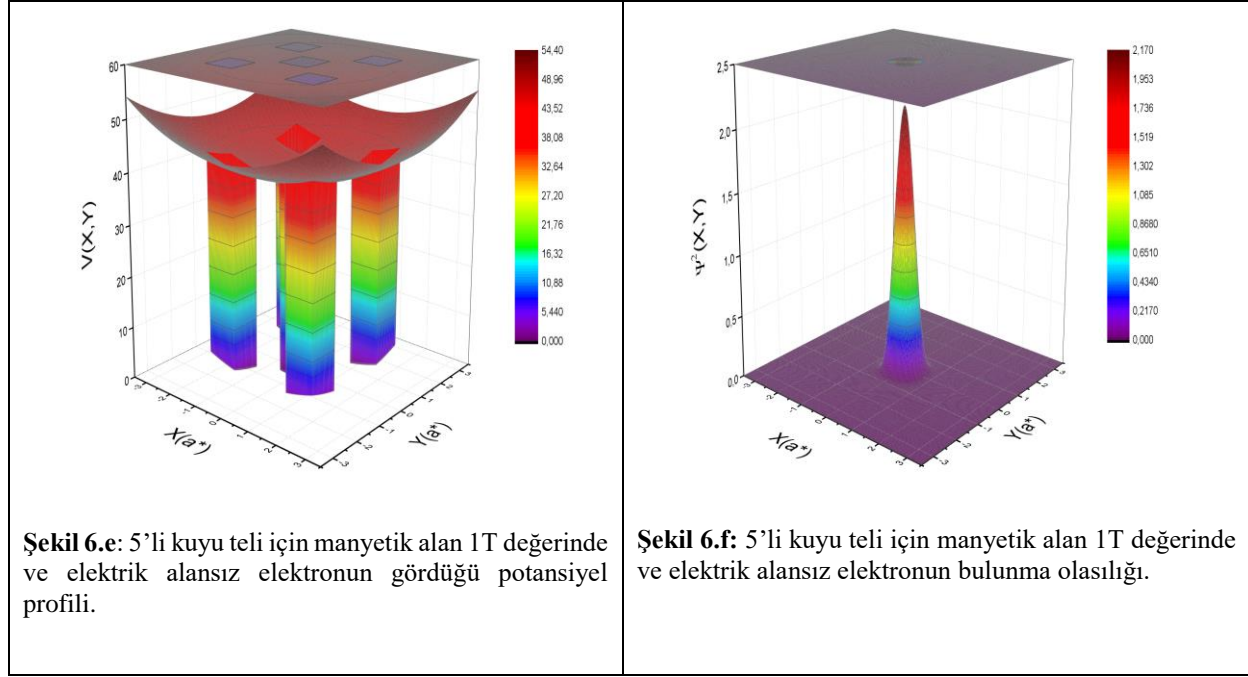


Şekil 5.e: 4'lü kuyu teli için manyetik alan 1T değerinde ve elektrik alansız elektronun gördüğü potansiyel profili.



Şekil 5.f: 4'lü kuyu teli için manyetik alan 1T değerinde ve elektrik alansız elektronun bulunma olasılığı.





SEMBOLLER

- E:** Elektronun enerjisi
F: Elektrik alan şiddeti
B: Manyetik alan şiddeti
H: Hamiltonien
K: Düzeltilmiş Bessel fonksiyonu
L_B: Engel genişliği
L_w: Kuyu genişliği
V: Elektronun gördüğü potansiyel
λ : Varyasyon parametresi
Ψ : Dalga fonksiyonu

KAYNAKÇA

- [1] CHUU, D.S., HSIAO, C. M., MEI, W.N., Hydrogenic Impurity States Inquantum Dots Andquanyum Wires, Physical Review B, 46, 3898-3905, 1992.
- [2] BOUHASSOUNE, M., CHARROUR, R., FLİYOU, M., BRİA, D., NOUGAOUI, A., Binding energy of shallow impurities in polar quanyum well wire. Physica B, 304, 389-397, 2001.
- [3] M. ULAŞ (a), H. AKBAŞ (a), and M. TOMAK (b) ShallowDonors in a QuantumWellWire: ElectricFieldandGeometricalEffects, Tr. J. of Physics 22, 369 (1998).

- [4] CHAO, H.T., TRANTHOAI, D.B., Effect of the Electric Field On a Hydrogenic Impurity in a Quantum Wires. *Physica B*, 205, 273-278, 1995.
- [5] ULAS, M., AKBAS, H., TOMAK, M., Shallow donors in a quantum well wire: Electric field and geometrical affects. *Phys. Stat. Sol.*, 200, 67-73, 1997.
- [6] MONTES, A., DUQUE, C. A, PORRAS-MONTENEGRO, N. Density of Shallow Donor Impurity States In Rectangular Cross Section GaAs Quantum Well Wires Under Applied Electric Field, *J. Physc. Condens. Matter*, 11, 5351-5358, 1998.
- [7] OKAN, S. E., AKBAS, H., TOMAK, M., Binding energies of Helium-Like Impurities in Parabolik Quantum Wells Under an Applied Electric Field. *Superlattice and Microstructures*, 28, 171-176, 2000.
- [8] AKTAS, S., OKAN, S. E., AKBAS, H., Electric Field Effect On the Binding Energy of a Hydrogenic Impurity in A Coaxial GaAs/Al_xGa_{1-x} as Quantum Well Wires. *Superlattice and Microstructures*, 30, 129-134, 2001.
- [9] AKTAS, S., Boz, F., The Binding Energy of a Hidrogenic Impurity in Triple GaAl/Al_xGa_{1-x} Quantum Well Wires Under Applied Electric Field. *Trakya Univ. J.Sci.*, 5(2), 159-165, 2004.
- [10] Ulas, M., ERDOĞAN, I., ÇİÇEK, E., SENTURK DALGIC, S. Self polarization in GaAs-(Ga, Al)As quantum well wires: electric field and geometrical effects. *Physica E*, 25, 515-520, 2005
- [11] ULAŞ, M. ve UYAR, H. Üçlü Kuantum Telinde Elektrik Alan Ve Lazer Alan'ın Elektronik Özelliklere Etkisi, *Kırklareli Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6 (1), 2020
- [12] ULAŞ M. ve DÖNMEZER, I. Üçlü Kuantum Telinde Manyetik Alan Ve Lazer Alan'ın Elektronik Özelliklere Etkisi, *Kırklareli Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6 (1), 2020
- [13] AKTAS, S., BİLEKKAYA, A., BOZ, F. K. OKAN, S. E., Electron Transmission in Symmetric and Asymmetric Double-Barrier Structure Controlled by Laser Field, *Superlattices and Microstructures*, 85, 266-273, 2015.
- [14] AKTAS, S., KES, H., BOZ, F.K., OKAN, S. E., Control of a resonant tunneling structure by intense laser field. *Superlattices and Microstructures*, 98, 220-227, 2016.