

## ÜÇLÜ KUANTUM TELİNDE ELEKTRİK ALAN VE LAZER ALAN'NIN ELEKTRONİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Mustafa ULAŞ<sup>1\*</sup>, Havva UYAR<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Kırklareli Üniversitesi Fen Edebiyatı Fakültesi, Fizik Bölümü, 39030 KIRKLARELİ

<sup>2</sup>Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 39030 KIRKLARELİ

### ÖZET

Üçlü kare kuyu tel sistemine dışarıdan uygulanan elektrik ve lazer alan etkisi altında hidrojenimsi yabancı atom bağlanma enerjisi hesaplandı. Bağlanma enerjisinin dışarıdan uygulanan etkilere duyarlılığı, farklı tel boyutları dikkate alınarak gösterildi. Üçlü kuantum kuyu yapısı GaAs ve  $Al_xGa_{1-x}As$  yarıiletken malzemeden oluşturuldu. Uygulanan elektrik alan tel eksenine dik ve lazer alan tel eksenine paralel olacak şekilde seçildi. Hesaplamalarda sonlu farklar nümerik yöntemi kullanıldı. Hesaplamalar sonucu elektron bant enerjilerinin uygulanan alanlar ve tel boyutlarına nasıl bağlı olduğu gösterildi. Bu tür yapıların elektronik özelliklerinin teorik olarak anlaşılması, teknolojik yeni cihazların geliştirilmesi için ekonomik bir yöntemdir.

**Anahtar Kelimeler:** Üçlü kuantum teli, bağlanma enerjisi, elektrik alan, lazer alan.

## THE EFFECT OF ELECTRIC FIELD AND LASER FIELD ON ELECTRONIC FEATURESIN A TRIPLE QUANTUM WIRE

**Abstract:** Hydrogenic foreign atom binding energy was calculatedun dertheeffect of electric and laser field applied externally to the triple square well wire system. The sensitivity of binding energy to externally applied effects was demonstrated by considering different wire sizes. The triple quantum well structure was created from GaAsand  $Al_xGa_{1-x}As$  semiconductor material. The applied electric field was chosen to be perpendicular to the wire axis and the laser field to be parallel to the wire axis. In calculations, finite difference numerical method was used. As a result of the calculations, it was shown how the electron band energies depend on the applied fields and wire sizes. Theoretical understanding of the electronic properties of such structures is an economical method for developing new technological devices.

**Keywords:** Triple quantum well wire, binding energy, electricfield, laser field

Corresponding author: mustafa.ulas@klu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-4498-588X>

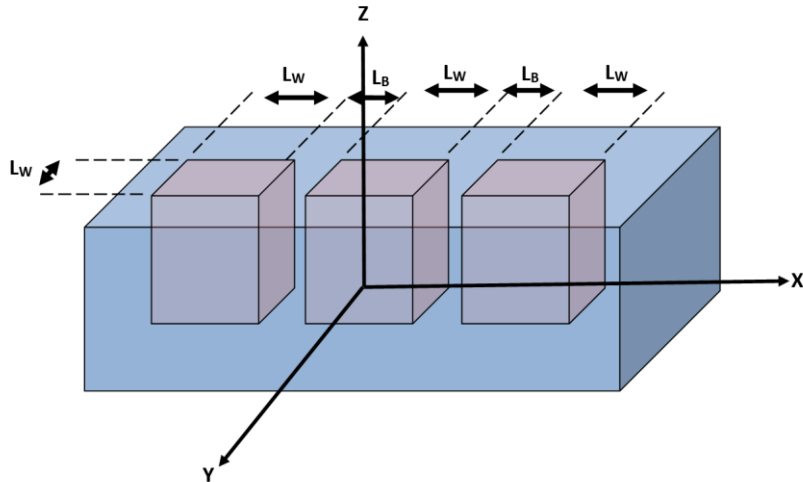
## 1.GİRİŞ

Yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler, ileri düzey çok katmanlı düşük boyutlu yapıların kolaylıkla yapılabilmesine imkân sağlamıştır. Son nesil teknolojik cihazların önemli parçalarından olan düşük boyutlu yarıiletken yapıların fiziksel ve optik özellikleri son yıllarda birçok bilim insanı tarafından çalışılan popüler bir alan haline gelmiştir. Yarı iletken kuantum noktaları ve tellerinde hidrojenimsi yabancı atom durumları ve bağlanma enerjisi teorik olarak hesaplanmış, bağlanma enerjisinin tel kalınlığı ile değişimi gösterilmiştir [1,2]. Dışarıdan uygulanan elektrik alanın bağlama enerjisi ve tel geometrisi üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir [3-9].

Son yılların popüler çalışmaları ise eşit potansiyel engelli simetrik ve asimetric kuantum yapılarında elektron geçişleri, lazer alan altında incelenmiş, potansiyel profilleri ve geçiş katsayısının lazer giydirme parametresine bağıllığı gösterilmiştir [10,11].

Bu çalışmada üçlü kare kesitli kuantum tel kuyularında bulunan bir elektronun, sonradan bu yapıya katkılanmış yabancı bir atoma bağlanma enerjisi, kuyu genişliğine, dışarıdan uygulanan elektrik ve lazer alan şiddetine bağıllığı, sonlu farklar nümerik yöntemini kullanılarak teorik olarak hesaplanmıştır.

## 2.TEORİ



**Şekil 1.** Çok katmanlı kuantum tel kuyusunun şematik gösterimi. Mavi renkli kısımlar  $Al_x Ga_{1-x} As$ , kırmızı taraflı kısımlar GaAs yarı iletkenleridir. Buradaki x Al konsantrasyonudur.

Şekil 1 de şematik şekli verilen kare kesitli GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As üçlü kuantum teli içindeki bir elektronun, etkin kütle yaklaşımı altında Hamiltonyen'i

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] + V(x, y) + |e|Fx \quad (1)$$

ile verilir. Burada F dışarıdan uygulanan elektrik alan şiddeti, m\* elektronun indirgenmiş kütlesi, e ise elektronun yüküdür. Denklemdaki V(x,y) ise elektronun bu yapı içerisindeki x ve y yönünde hareket ederken ki gördüğü potansiyeldir.

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

Bu üçlü kuantum tel yapısına -z doğrultusunda ve x yönünde polarize olmuş dışarıdan yüksek frekanslı lazer alanı uygulandığında Hamiltonyen denklemi, etkin Rydberg  $R^* = (m^*e^4/2\varepsilon_0^2\hbar^2)$  ve etkin Bohryarıçapı  $a^* = (\varepsilon_0\hbar^2/m^*e^2)$  boyuntundaboyutunda aşağıdaki gibi olur.

$$H = -\left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] + V_{DC}(x, y, \alpha_0) + \eta x \quad (3)$$

Burada  $\eta = |e|a^*F\left(\frac{kV}{cm}\right)R^*$  ile verilir.  $V_{DC}$  ise dışarıdan uygulanan yüksek frekanslı lazerin potansiyel profili üzerindeki değişikliği betimleyen giydirilmiş potansiyel olarak isimlendirilir. Buradaki  $\alpha(t) = \alpha_0 \cos(\omega t)$  uygulanan lazerin zamana göre değişimini,  $\alpha_0 = \frac{eA_0}{m^*\omega}$  ise lazerin şiddetini betimleyen parametredir,  $A_0$  uygulanan lazerin genliği,  $\omega$  ise uygulanan lazerin frekansıdır. Yapıya dışarıdan uygulanan lazerin yüksek frekansları için  $V_{DC}$  giydirilmiş potansiyel yaklaşık olarak aşağıdaki gibi olur.

$$V_{DC}(x, y, \alpha_0) = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} V(x + \alpha(t), y) dt. \quad (4)$$

Elektronun taban durumu enerji [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 denklemi sonlu farklar nümerik yöntemi kullanılarak, taban durum enerji özdeğeri ve öz değervektörü bulunur. Bu yapıya katılanmış yabancı atom katıldığında, elektron ile yabancı atom etkileşmesini içeren Hamiltonyen denklemi aşağıdaki gibidir.

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

Buradaki  $\varepsilon$  elektronun  $x$ ,  $y$  ekseninde hareket ettiği koordinattaki ortamın dielektrik (perdeleme esnasında gördüğü) sabitidir. Denklemden  $x_i$  ve  $y_i$  ise hidrojenimsi yabancı atomun sistemdeki koordinatıdır. Bu çalışmada  $x_i$  ve  $y_i$  sistemin merkezinde alınmıştır.

( $x_i = 0$  ve  $y_i = 0$ ). Bu diferansiyel denklemin çözümü için aşağıdaki gibi varyasyonel deneme dalga fonksiyonu kullanılmıştır. Bu dalga fonksiyonu

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

ile verilir. Buradaki  $N_{imp}$  deneme dalga fonksiyonunun normalizasyon sabiti,  $\lambda$  deneme dalga fonksiyonunun varyasyonel parametresidir. Yapının içinde bulunan elektronun yabancı atomlu ortamdaki enerjisi

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

ile verilir. Yabancı ortamdaki sistemin içinde bulunan bir elektronun yabancı atoma bağlanma enerjisi ise

$$\begin{aligned} E_b &= E - E_{imp} \\ &\cong -\frac{1}{\lambda^2} + \frac{2A}{B} \\ A &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (\psi^2(x, y) K_0(2\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}/\lambda)) dx dy \\ B &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (\psi^2(x, y) \sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2} K_1(2\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}/\lambda)) dx dy \end{aligned} \quad (9)$$

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

### 3.SONUÇ VE TARTIŞMA

GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As üçlü kuantum kuyu tellerinde yarı sabitler göz önüne alındığında,  $a^* \cong 100 \text{ \AA}$  ve  $R^* \cong 5.7 \text{ meV}$ , Al konsantrasyonu  $x=0.3$  alındı. Bu değer potansiyel bariyerin yaklaşık  $V_0=224 \text{ meV}$  değerlerine karşı gelir. Tüm hesaplamalarda bariyer genişliği  $0,5 a^*$  olarak ele alınmıştır.

Şekil 2a'da sistemin merkezine konulmuş ( $x_i=0$ ,  $y_i=0$ ) yabancı atoma elektronun bağlanma enerjisinin, tel kalınlığına göre değişimi incelenmiştir. Bu grafikte dışarıdan lazer

uygulanmayıp ( $\alpha=0$ ), üç farklı elektrik alan değeri uygulanmıştır. ( $F=0-20-40$  kV/cm). Bağlanma enerjisi, tel kalınlığı arttıkça hemen, hemen lineer olarak azalmaktadır. Bunun nedeni tel kalınlığı arttıkça elektron daha geniş alana yayılarak merkezdeki yabancı atomdan uzaklaşmasıdır. Uygulanan elektrik alanlar ise bu değişimin eğimini daha da artırmaktadır. Yani elektronun merkezdeki yabancı atoma bağlanma enerjisi elektrik alansız duruma göre daha düşüktür. Bunun nedeni ise, Şekil2 b-c-d-e de görüldüğü üzere, dışarıdan uygulanan artı x doğrultusundaki elektrik alan, elektronun gördüğü potansiyeli değiştirmesindedir. Bu durumda daha önceden merkezdeki telde yoğunlaşan elektronsal taraftaki tele (eksi x doğrultusunda) çekilerek yabancı atomdan uzaklaşmış ve bağlanma enerjisi azalmıştır.

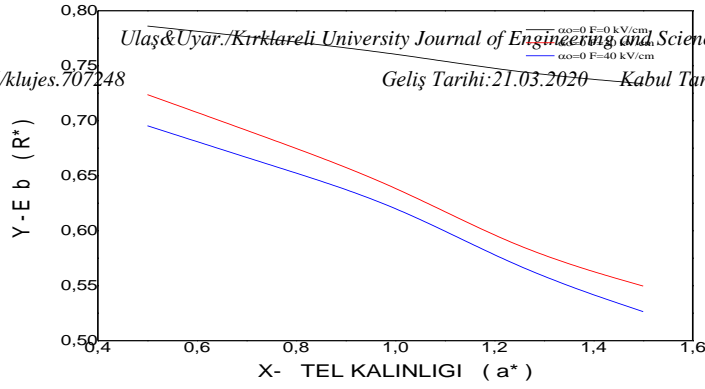
Şekil 3a'da sistemin merkezine konulmuş ( $x_i=0, y_i=0$ ) yabancı atoma elektronun bağlanma enerjisinin, tel kalınlığına göre değişimi incelenmiştir. Bu grafikte dışarıdan elektrik alan uygulanmayıp ( $F=0$ ), beş farklı lazer alan değeri uygulanmıştır ( $\alpha=0-0.25-0.50-0.75-1.00$  a\*). Bağlanma enerjisi, tel kalınlığı arttıkça lineer olarak azalmaktadır. Bunun nedeni dar tellerde elektron merkezdeki yabancı atoma daha yakinken geniş kuyularda daha geniş bölgeye yayılarak yabancı atomdan uzaklaşmasıdır. Uygulanan lazer alanlar ise bağlanma enerjisini, elektrik alanın tersine artırmaktadır. Yani elektronun merkezdeki yabancı atoma bağlanma enerjisini lazer alansız duruma göre daha büyük değerlere getirmektedir. Bunun nedeni ise, Şekil3 b-c-d-e de görüldüğü üzere, dışarıdan eksi z doğrultusunda uygulanan ve artı x doğrultusunda polarize olmuş lazer alan, elektronun gördüğü potansiyeli değiştirmesindedir. Bu durumda daha önceden merkezdeki telde yoğunlaşan elektron, merkez civarına yoğunlaşarak, yabancı atoma daha yaklaşması ile bağlanma enerjisini artmıştır. Şekil3a da görüldüğü gibi değişimler iki farklı guruba ayrılmıştır. Lazerin ilk iki değeri için elektronun gördüğü potansiyel üç ayrı tel potansiyelinden oluşurken, lazerin son üç değeri için ikili tel potansiyeline dönüşmektedir.

Şekil 4a'da sistemin merkezine konulmuş ( $x_i=0, y_i=0$ ) yabancı atoma elektronun bağlanma enerjisinin, elektrik alan şiddetine göre değişimi incelenmiştir. Bu grafikte dışarıdan lazer uygulanmayıp ( $\alpha=0$ ), beş farklı tel kalınlığı ( $0.50-0.75-1.00-1.25-1.50$  a\*) seçilmiştir. Tel kalınlığı arttıkça bağlanma enerjisi Şekil4a'da görüldüğü gibi azalmaktadır. Artı x doğrultusunda dışarıdan uygulanan elektrik alan şiddeti arttıkça, bağlanma enerjisi azalmaktadır. Burada elektrik alanın küçük değerleri için ( $0-7$  kV/cm) bağlanma enerjisindeki azalma daha keskin iken, diğer elektrik alan şiddetlerinde bağlanma enerjisindeki azalma daha yavaştır. Bağlanma enerjisindeki

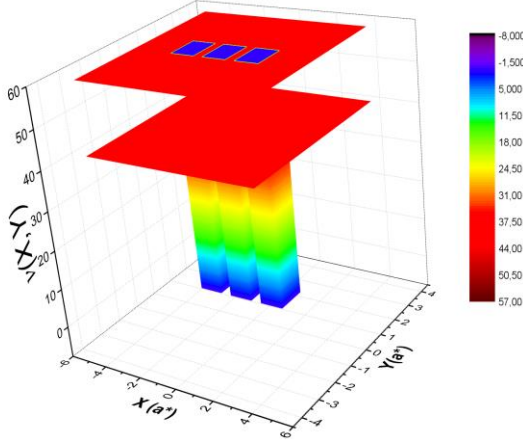


bu azalmanın nedeni ise, Şekil4 b-c-d-e de görüldüğü üzere, dışarıdan uygulanan artı x doğrultusundaki elektrik alan, elektronun gördüğü potansiyeli değiştirmesindedir. Bu durumda daha önceden merkezdeki telde yoğunlaşan elektron, sol taraftaki tele (eksi x doğrultusunda) çekilerek yabancı atomdan uzaklaşmış ve bağlanma enerjisi azalmıştır.

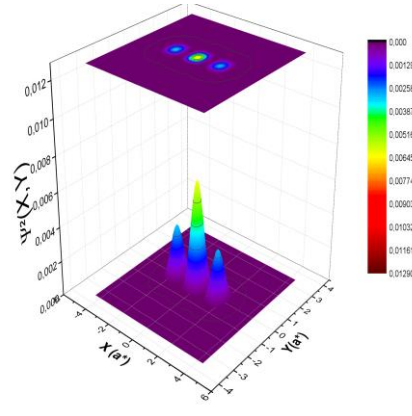
Hesaplamalar sonucunda sabit bir yapının elektronik özellikleri dışarıdan uygulanan lazer ve elektrik alanları ile önemli ölçüde değiştiği gösterilmiştir. Bulunan bu değerler literatürle karşılaştırılarak uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir. Dışarıdan uygulanan bu alanlar kaldırıldığında, yapının elektronik özellikleri eski halindeki özelliklerine geri dönmektedir. Böylece dışarıdan uygulanan alanlar ile istenilen elektronik özellikler ayarlanabilen düşük boyutlu yapılar oluşturulabilir.



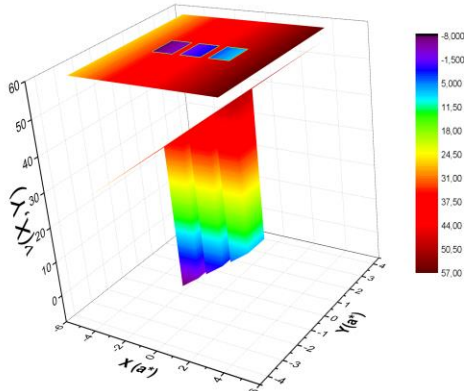
(a)



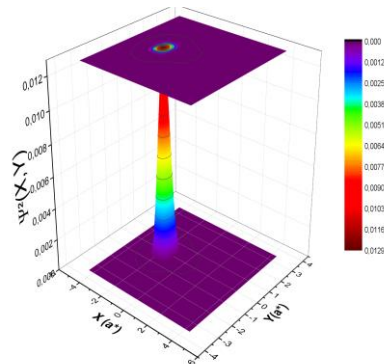
(b)



(c)



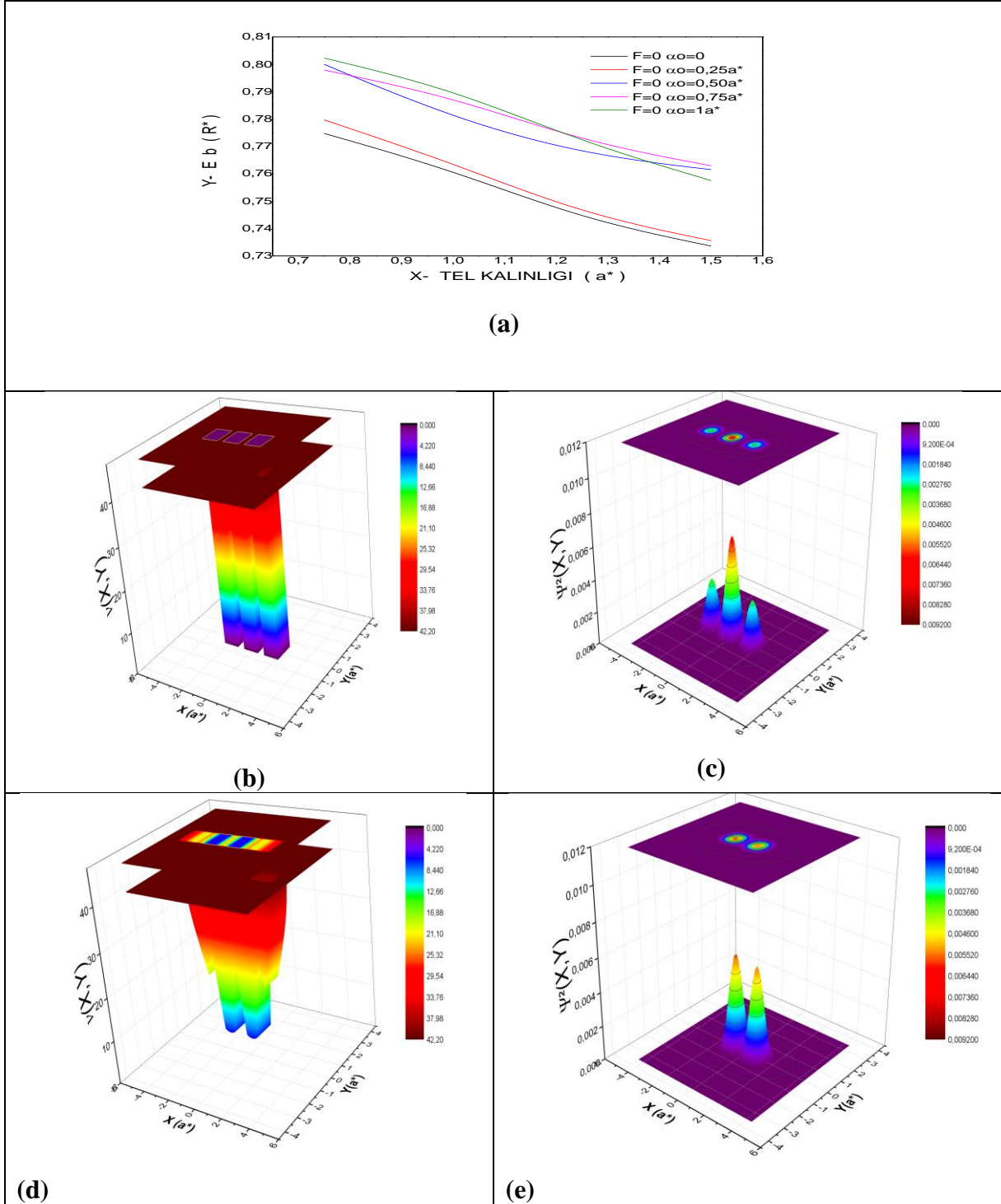
(d)



(e)

**Şekil 2.a)** Bağlanma enerjisinin, farklı elektrik alan değerlerinde ve lazer alansız, tel genişliğine göre değişimi. **b)** Tel kalınlığının  $1.25a^*$  değerinde elektrik ve lazer alansız elektronun gördüğü potansiyel profili. **c)** Tel kalınlığının  $1.25a^*$  değerinde elektrik ve lazer alansız elektronun bulunma olasılığı. **d)** Tel kalınlığının  $1.25a^*$  olduğu durumda, elektrik alan  $40 \text{ kV/cm}$  değerinde ve lazer alansız elektronun gördüğü potansiyel profili. **e)** Tel kalınlığının  $1.25a^*$  olduğu durumda, elektrik alan  $40 \text{ kV/cm}$  değerinde ve lazer alansız elektronun bulunma olasılığı.

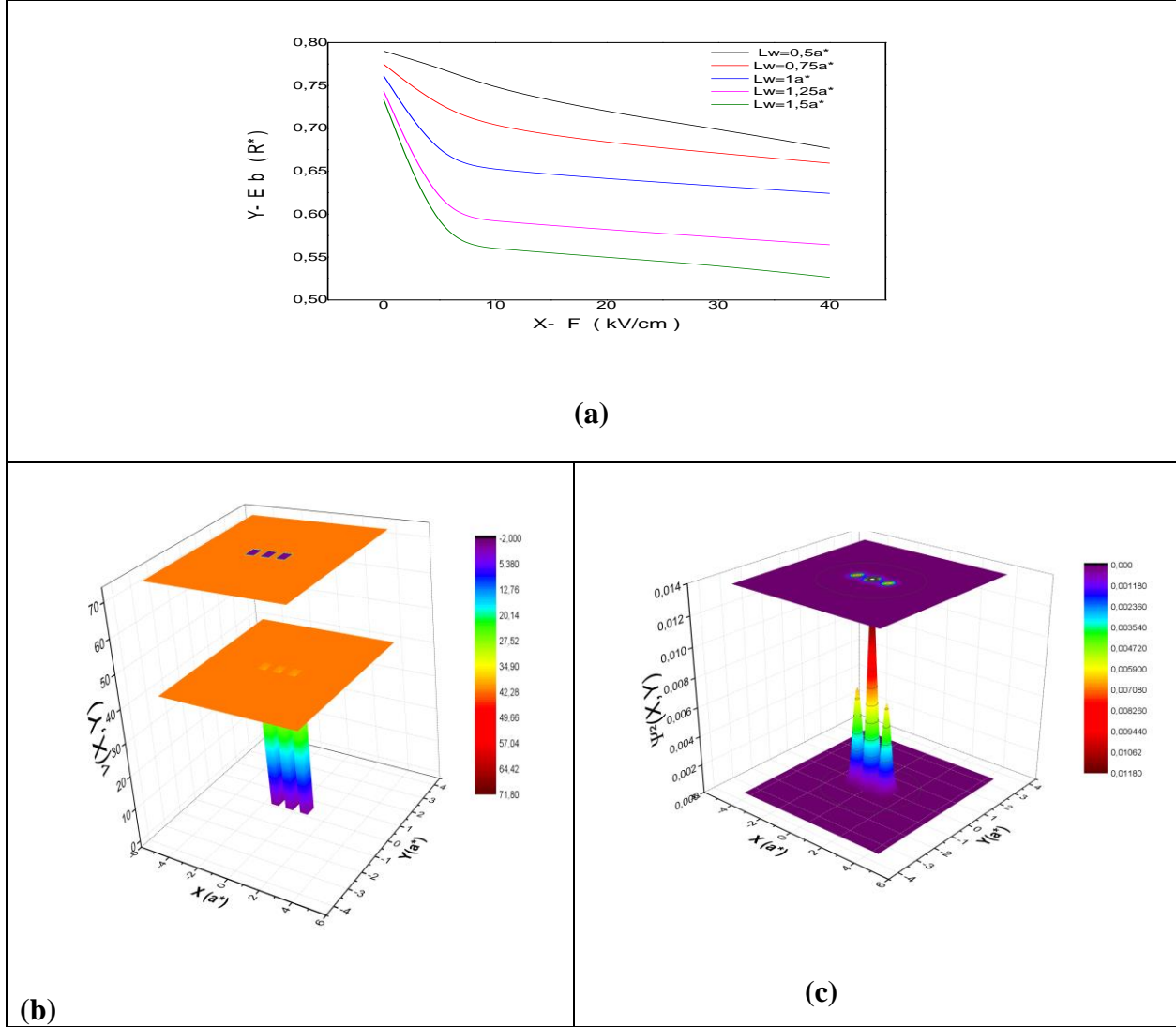


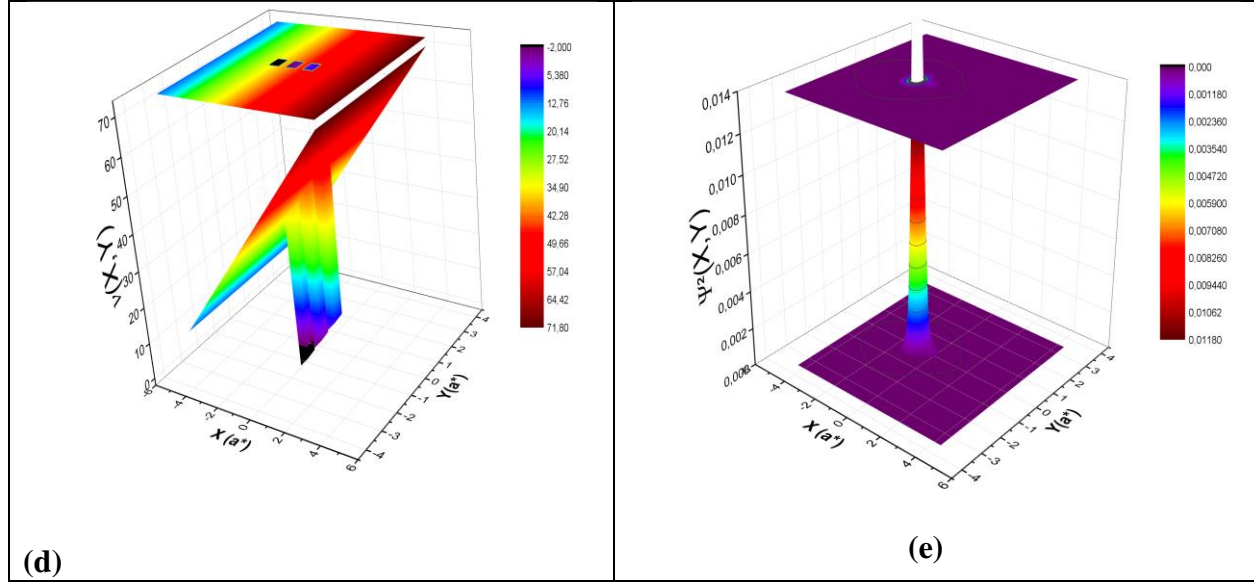


**Şekil 3.a)** Bağlanma enerjisinin, farklı lazer alan değerlerinde ve elektrik alansız, tel genişliğine göre değişimi. **b)** Tel kalınlığının  $1.25a^*$  değerinde elektrik ve lazer alansız elektronun gördüğü potansiyel profili. **c)** Tel kalınlığının  $1.25a^*$  değerinde elektrik ve lazer alansız elektronun bulunma olasılığı. **d)** Tel kalınlığının  $1.25a^*$  olduğu durumda, lazer alanının  $1 a^*$  değerinde ve elektrik alansız



elektronun gördüğü potansiyel profili. e) Tel kalınlığının  $1.25a^*$  olduğu durumda, lazer alanının  $1a^*$  değerinde ve elektrik alansız elektronun bulunma olasılığı.





**Şekil 4.a)** Bağlanma enerjisinin, farklı tel kalınlık değerlerinde ve lazer alansız, elektrik alana göre değişimi. **b)** Tel kalınlığının  $0.50a^*$  değerinde elektrik ve lazer alansız elektronun gördüğü potansiyel profili. **c)** Tel kalınlığının  $0.50a^*$  değerinde elektrik ve lazer alansız elektronun bulunma olasılığı. **d)** Tel kalınlığının  $0.50a^*$  olduğu durumda, lazer alansız ve elektrik alanı  $40 \text{ kV/cm}$  değerinde elektronun gördüğü potansiyel profili. **e)** Tel kalınlığının  $0.50a^*$  olduğu durumda, lazer alansız ve elektrik alanı  $40 \text{ kV/cm}$  değerinde elektronun bulunma olasılığı.

## KAYNAKLAR

- [1] CHUU, D.S., HSIAO, C.M., MEI, W.N., Hydrogenic impurity states in quantum dots and quantum wires. Physical Review B, 46, 3898-3905, 1992.
- [2] BOUHASSOUNE, M., CHARROUR, R., FLIYOU, M., BRÍA, D., NOUGAOUI, A., Binding energy of shallow impurities in polar quantum well wire. Physica B, 304, 389-397, 2001.
- [3] CHAO, H.T., TRAN THOAI, D.B., Effect of the electric field on a hydrogenic impurity in a quantum wires. Physica B, 205, 273-278, 1995.
- [4] ULAS, M., AKBAS, H., TOMAK, M., Shallow donors in a quantum well wire: Electric field and geometrical effects. Phys. Stat. Sol., 200, 67-73, 1997.
- [5] 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. Phys. Condens. Matter, 11, 5351-5358, 1998.
- [6] OKAN, S. E., AKBAS, H., TOMAK, M., Binding energies of helium-like impurities in parabolic quantum wells under an applied electric field. Superlattice and Microstructures, 28, 171-176, 2000.



- [7] AKTAS, S., OKAN, S. E., AKBAS, H., Electric field effect on the binding energy of a hydrogenic impurity in a coaxial GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub> As quantum well wires. *Superlattice and Microstructures*, 30, 129-134, 2001.
- [8] AKTAS, S., Boz, F., The binding energy of a hydrogenic impurity in triple GaAl/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub> quantum well wire under applied electric field. *Trakya Univ. J.Sci.*, 5(2), 159-165, 2004.
- [9] Ulaş, 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
- [10] 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.
- [11] 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.