

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

Mustafa ULAŞ<sup>1\*</sup>, Irmak DÖNMEZER<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Kırklareli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 39100 KIRKLARELİ

<sup>2</sup>Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

### ÖZET

Üçlü kare kuyu tel sistemine dışarıdan uygulanan manyetik ve lazer alan etkisi altında yapının içinde bulunan bir elektronun hidrojenimsi yabancı atoma bağlanma enerjisi hesaplandı. Bağlanma enerjisinin, dışarıdan uygulanan etkilere duyarlılığı, farklı tel boyutları dikkate alınarak gösterildi. Üçlü kuantum tel yapısı olarak GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As yarıiletkenlerinin kullanıldığı kuantum tel kuyusu düşünüldü. Uygulanan manyetik alan tel eksenine paralel negatif z yönünde ve aynı şekilde, lazer alan tel eksenine paralel negatif z doğrultusunda olacak şekilde seçildi. Hesaplamalarda sonlu farklar nümerik diferansiyel denklem çözme yöntemi kullanıldı. Elektron bant enerjilerinin, uygulanan alanlara ve tel kalınlığına nasıl bağlı olduğu gösterildi. Bu tür yapıların elektronik özelliklerinin anlaşılması için deneysel çalışmalara göre daha ekonomik ve daha hızlı sonuç elde edileceği gösterildi.

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

### THE EFFECT OF MAGNETIC FIELD AND LASER FIELD ON THE ELECTRONIC FEATURES OF THE TRIPLE QUANTUM WIRE

#### ABSTRACT

The binding energy of an electron in the structure under the influence of magnetic and laser field applied externally to the triple square well wire system was calculated. The sensitivity of the binding energy to externally applied effects was demonstrated by considering different wire sizes. Quantum wire well was considered, using the GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As semiconductors as a triple quantum wire structure. The applied magnetic field was chosen to be in the negative z direction parallel to the wire axis and likewise, the laser field to be in the negative z direction parallel to the wire axis. In calculations, finite difference numerical differential equation solving method was used. How electron band energies depend on applied areas and wire thickness was shown. In order to understand the electronic properties of such structures, it has been shown that more economical and faster results will be obtained than experimental studies.

**Keywords:** Triple quantum wire, binding energy, magnetic field, laser field

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

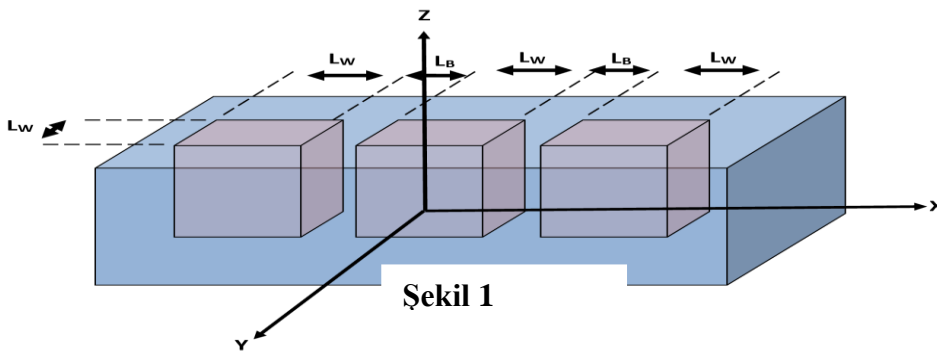
## 1.GİRİŞ

Son yılların teknolojik gelişmeleri çok katmanlı yapıların kolaylıkla yapılabilmesine imkân sağlamıştır. Bu teknolojik gelişmeler sonucunda birçok bilimsel çalışmalar düşük boyutlu yapılar üzerine yoğunlaşmıştır. 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 olmuştur. Yarı iletken kuantum kuyuları ve tellerinde eksitonik bağlanma enerjisi hesaplanmış [1], çift engelli asimetrik çoklu kuyularda tel geçiş katsayısı çalışılmıştır [2]. Silindirik kuantum tel kuyusunun merkezindeki bir yabancı atomun bağlanma enerjisi varyasyon yöntemi kullanılarak hesaplanmış, bağlanma enerjisinin tel kalınlığı ile değişimi gösterilmiştir [3-5].

Dışarıdan uygulanan manyetik alanın tel kuyuları üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak ele alınarak sonuçlar tartışılmıştır [6-9]. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda eşit potansiyel engelli simetrik ve asimetrik kuantum yapılarında elektron geçişleri, lazer alan altında incelenmiş, potansiyel görünüşleri ve geçiş katsayısının lazer giydirme parametresine bağlılığı gösterilmiştir [10,11].

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

## 2. TEORİ



**Şekil 1:** Çok katmanlı kuantum tel kuyusunun şematik gösterimidir. Mavi renkli kısımlar Al<sub>x</sub> Ga<sub>1-x</sub>As, kırmızı taraflı kısımlar GaAs yarı iletkenleridir. Buradaki x Al konsantrasyonudur.

Şekil 1 de şematik şekli verilen kare kesitli GaAs/Alx Ga1-x As üçlü kuantum teli içindeki bir elektronun, etkin kütle yaklaşımı altında harici alanlar içermeyen Hamilton denklemi

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

ile verilir. Burada  $m^*$  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.

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

Bu üçlü kuantum tel yapısına eksi  $z$  doğrultusunda ve  $x$  yönünde polarize olmuş dışarıdan yüksek frekanslı lazer alanı hem de eksi  $z$  doğrultusunda düzgün manyetik alan uygulandığında Hamiltonyen denklemi, etkin Rydberg  $R^* = (m^* e^4 / 2 \epsilon_0^2 \hbar^2)$  ve etkin Bohr yarıçapı  $a^* = (\epsilon_0 \hbar^2 / m^* e^2)$  boyutunda aşağıdaki gibi olur.

$$H = -\left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] + V_{DC}(x, y, \alpha(t)) + \frac{\gamma^2}{4} (x^2 + y^2) \quad (3)$$

Burada dışarıdan üniform şekilde uygulanan manyetik alandan dolayı potansiyele gelen katkı terimindeki ve manyetik alan şiddetini betimleyen  $\gamma = (e \hbar B(\text{Tesla})) / (2m^* c R^*)$  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,  $\alpha_0 = \frac{e A_0}{m^* \omega}$  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.

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

Elektronun taban durum 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 denkleme sonlu farklar nümerik yöntemi kullanılarak, taban durum enerji özdeğeri ve özdeğer vektörü bulunur. Bu yapıya katkılanmış yabancı atom için, elektron 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. Denklemdaki  $x_i$  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. Yabancı atomlu yapının içinde bulunan elektronun 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

$$E_{bağlanma} = E - E_{imp} \quad (9)$$

$$\cong -\frac{1}{\lambda^2} + \frac{2A}{B} \quad (10)$$

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (\psi^2(x, y) K_0(2\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}/\lambda)) dx dy \quad (11)$$

$$B = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (\psi^2(x, y) \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} K_1(2\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}/\lambda)) dx dy \quad (12)$$

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

### 3. SONUÇ VE TARTIŞMA

GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As üçlü kuantum tel kuyularında sabitler göz önüne alındığında,  $a^* \cong 100$  Å ve  $R^* \cong 5.7$  meV, Al konsantrasyonu  $x=0.3$  alındı. Bu değer potansiyel bariyerin yaklaşık  $V_0=224$  meV değerlerine karşı gelir. Tüm hesaplamalarda bariyer genişliği  $0.5 a^*$  olarak ele alınmıştır.

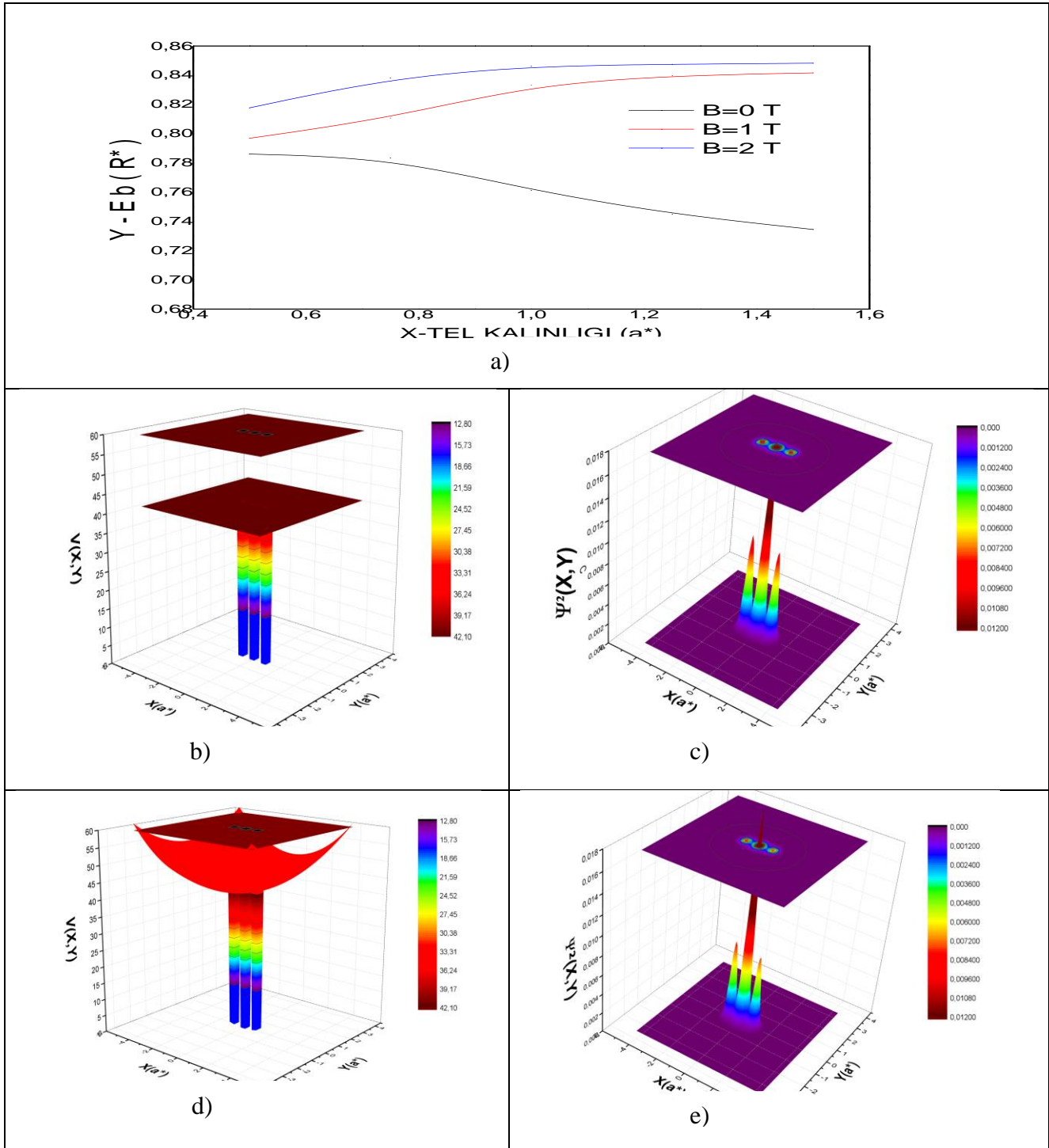
Şekil 2a' da sistemin merkezine konulmuş ( $x_i=0, y_i=0$ ) yabancı atoma elektronun bağlanma enerjisinin, tel kalınlığına göre değişimi incelenmiştir. Bu grafikte dışarıdan lazer uygulanmayıp ( $\alpha=0$ ), üç farklı manyetik alan değeri uygulanmıştır. ( $B=0-1-2$  Tesla). Bağlanma enerjisi, tel kalınlığı arttıkça azalmaktadır. Bunun nedeni tel kalınlığı arttıkça elektron daha geniş alana yayılarak merkezdeki yabancı atomdan uzaklaşmasıdır. Uygulanan manyetik alanlar ise bağlanma enerjisini artırmaktadır. Yani elektronun merkezdeki yabancı atoma bağlanma enerjisi manyetik alansız duruma göre daha artmıştır. Bunun nedeni ise, Şekil 2 b-c-d-e de görüldüğü üzere, dışarıdan uygulanan artı z doğrultusundaki manyetik alan, elektronun gördüğü potansiyeli değiştirmesindedir. Bu durumda daha önceden merkezdeki telden uzaklaşan elektron, merkeze doğru çekilerek yabancı atoma yaklaşmış ve bağlanma enerjisi artmıştır.

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 uygulanan farklı manyetik alan değerlerinde ( $B=0, 1, 2$  Tesla), lazer alanın sabit değeri ( $\alpha=0.75a^*$ ) için bağlanma enerjisinin arttığı gözlenmiştir. Tel kalınlığı artarken bağlanma enerjisinin artması, dışarıdan uygulanan lazer ve manyetik alanın, her ikisinin de artma yönünde katkı verdiğini görmekteyiz. Bunun nedeni dışarıdan uygulanan bu iki alanın, geniş kuyularda, elektronun bölgeye yayılarak yabancı atomdan uzaklaşmasına engel olmasındandır. Uygulanan lazer alan, bağlanma enerjisini,

geniş kuyularda manyetik alandan daha fazla artırmaktadır. Yani elektronun merkezdeki yabancı atoma bağlanma enerjisini, lazer alan daha büyük değerlere getirmektedir. Bunun nedeni ise, Şekil 3 b-c-d-e’de görüldüğü üzere, dışarıdan eksi z doğrultusunda uygulanan polarize olmuş lazer alan, elektronun gördüğü potansiyeli değiştirmesindedir. Bu durumda daha önceden merkezdeki telde yoğunlaşan elektron, merkez civarına yoğunlaşarak, yabancı atoma daha da yaklaşması ile bağlanma enerjisini arttırmıştır.

Şekil 4a’da sistemin merkezine konulmuş ( $x_i=0, y_i=0$ ) yabancı atoma elektronun bağlanma enerjisinin, manyetik 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 Şekil 4a’da görüldüğü gibi artmaktadır. Eksi z doğrultusunda dışarıdan uygulanan manyetik alan şiddeti arttıkça, küçük tel kalınlıklarında bağlanma enerjisinin yavaş arttığı, tel kalınlığının artması ile bağlanma enerjisindeki artışın hızlandığı görülmektedir. Şekilden, manyetik alanın 0.45 Tesla olduğu kesişme tel kalınlığı 0.5a\* ile 0.75a\* iken ikinci kesişme noktası yaklaşık 0.9 Tesla değerinde ve tel kalınlığı 1a\*-1,5a\* dır. Manyetik alan etkisi tel kalınlığının düşük olduğu bölgede az, tel kalınlığının fazla olduğu bölgede daha etkin olduğunu görebiliriz. Bağlanma enerjisindeki bu artışın nedeni ise, Şekil 4 b-c-d-e’de görüldüğü üzere, dışarıdan uygulanan eksi z doğrultusundaki manyetik alan, elektronun gördüğü potansiyeli değiştirmesindedir. Bu durumda daha önce kenarlarda yoğunlaşan elektron, artık merkeze doğru çekilerek yabancı atoma doğru itilmiş ve bağlanma enerjisi artmıştır.

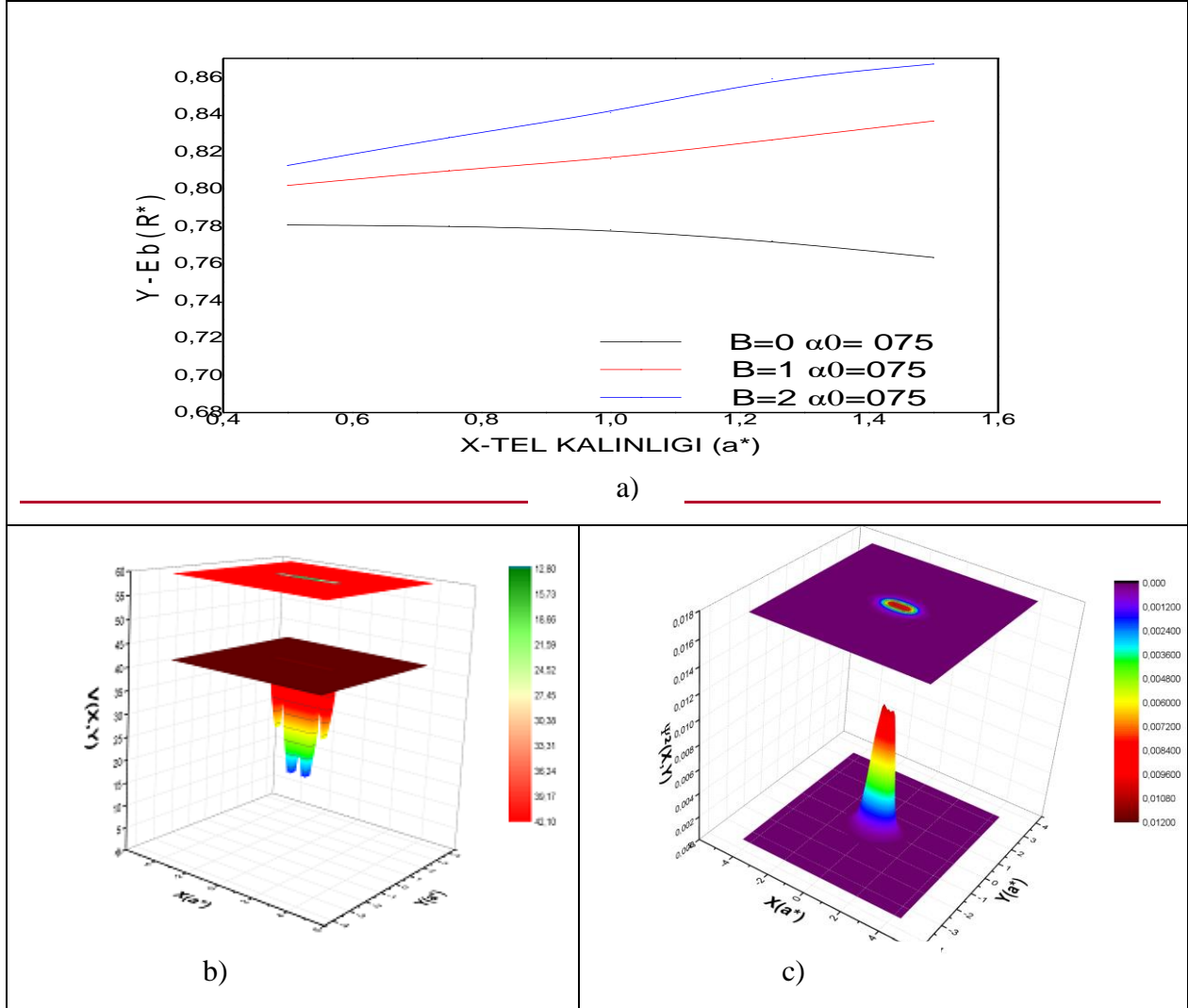
Hesaplamalar sonucunda sabit bir yapının elektronik özellikleri dışarıdan uygulanan lazer ve manyetik alanları ile önemli ölçüde değiştiği gösterilmiştir. Bulunan bu değerler literatürle karşılaştırılarak uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir. Dışarıdan uygulanan bu alanlar kaldırıldığında, yapının elektronik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



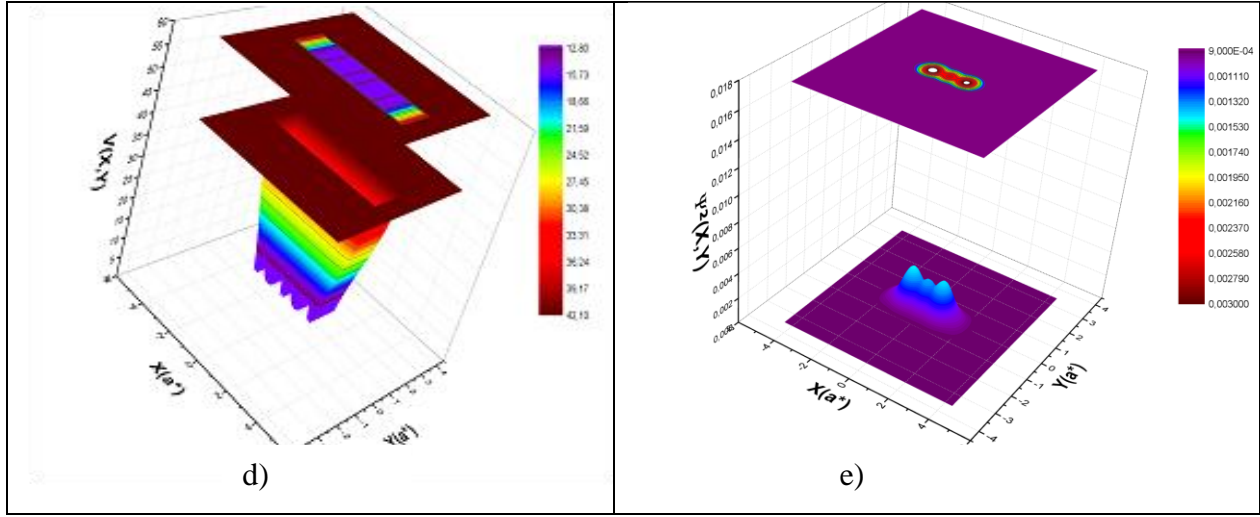
Şekil 2

Şekil 2: a) Bağlanma enerjisinin, farklı manyetik alan değerlerinde ve lazer alansız, tel genişliğine göre değişimi. b) Tel kalınlığının  $0.50a^*$  değerinde manyetik ve lazer alansız elektronun gördüğü potansiyel profili. c) Tel kalınlığının  $0.50a^*$  değerinde manyetik ve lazer alansız elektronun

bulunma olasılığı. **d)** Tel kalınlığının  $0.50a^*$  olduğu durumda, manyetik alan 1 Tesla değerinde ve lazer alansız elektronun gördüğü potansiyel profili. **e)** Tel kalınlığının  $0.50a^*$  olduğu durumda, manyetik alan 1 Tesla değerinde ve lazer alansız elektronun bulunma olasılığı.

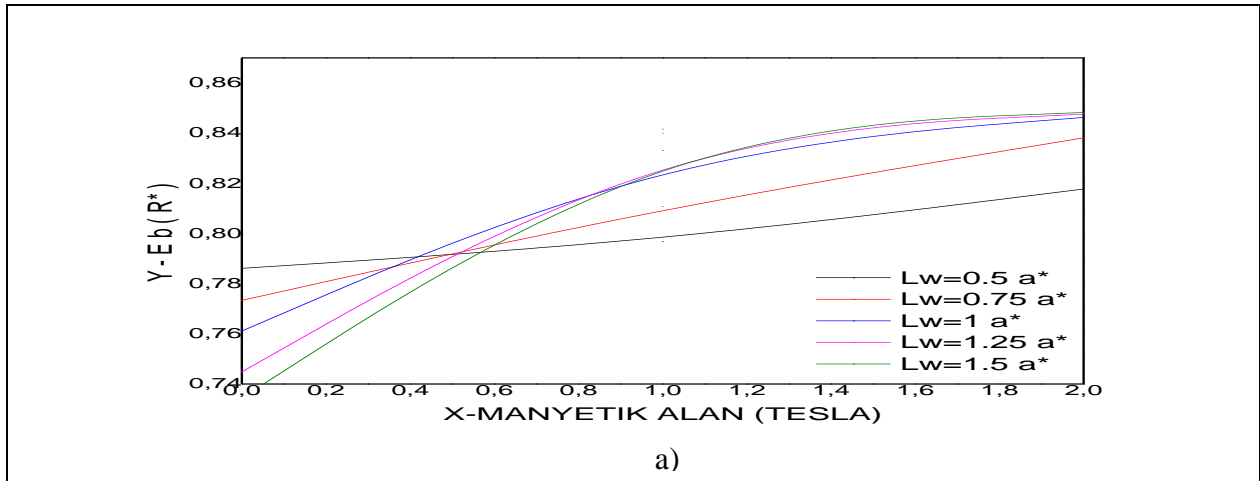


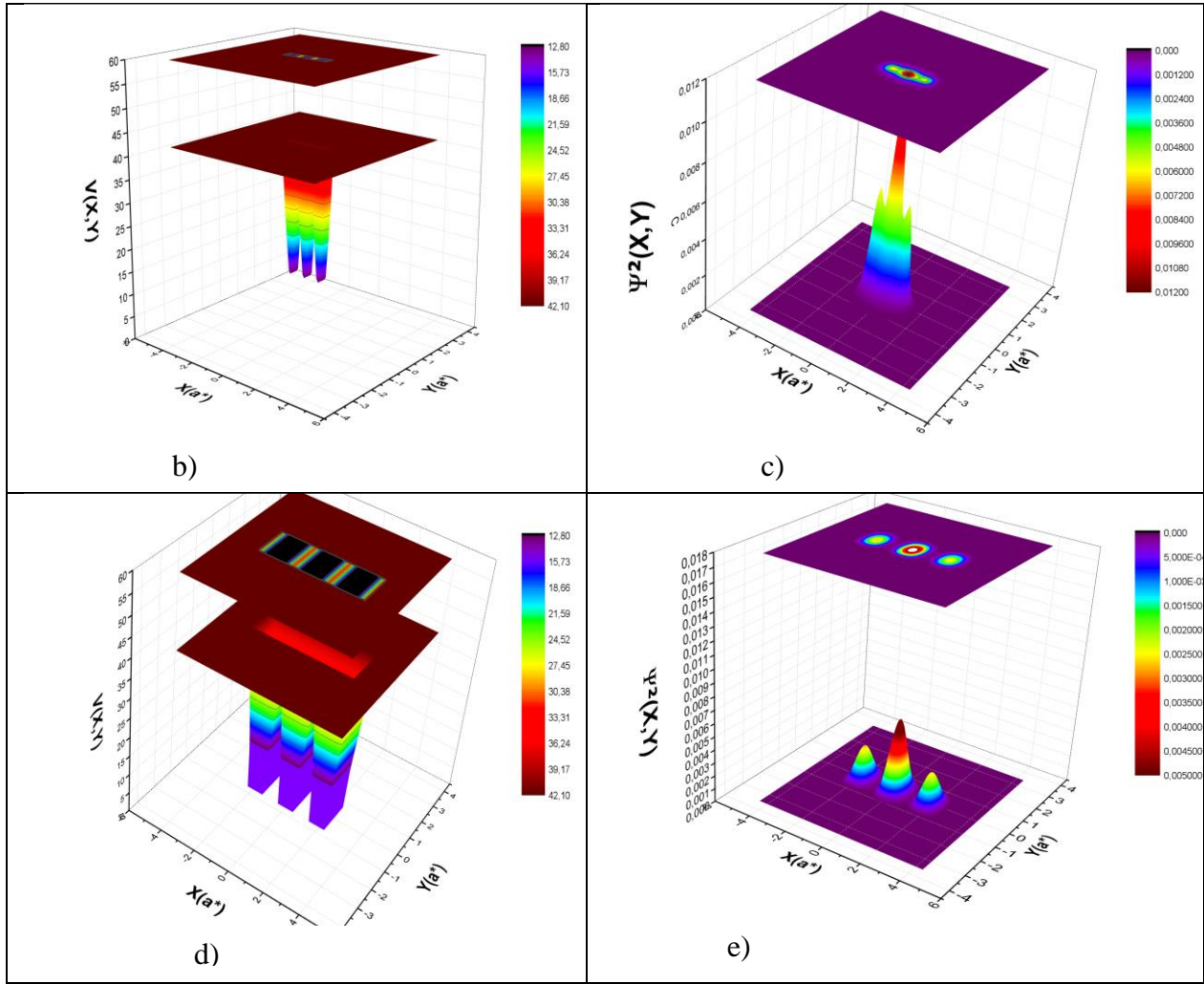




Şekil 3

**Şekil 3:** a) Bağlanma enerjisinin, lazer alanın  $0.75a^*$  şiddetinde ve farklı manyetik alan değerlerinde, tel kalınlığına göre değişimi. b) Tel kalınlığının  $0.50a^*$  değerinde manyetik alansız ve lazer alanın  $0.75a^*$  değerinde elektronun gördüğü potansiyel profili. c) Tel kalınlığının  $0.50a^*$  değerinde lazer alan  $0.75a^*$  şiddetinde, manyetik alansız elektronun bulunma olasılığı. d) Tel kalınlığının  $1.50a^*$  olduğu durumda, lazer alanın  $0.75a^*$  şiddetinde ve manyetik alansız elektronun gördüğü potansiyel profili. e) Tel kalınlığının  $1.50a^*$  olduğu durumda, lazer alanın  $0.75a^*$  şiddetinde ve manyetik alansız elektronun bulunma olasılığı.





Şekil 4

Şekil 4: a) Bağlanma enerjisinin, farklı tel kalınlık değerlerinde ve lazer alansız, manyetik alana göre değişimi. b) tel kalınlığının  $0.50a^*$  değerinde manyetik alansız ve lazer alanı  $0.25a^*$  olduğu durumda elektronun gördüğü potansiyel görünüşü. c) tel kalınlığının  $0.50a^*$  değerinde manyetik alansız ve lazer alanı  $0.25a^*$  olduğu durumda elektronun bulunma olasılığı. d) tel kalınlığının  $1.50a^*$  olduğu durumda, manyetik alansız lazer alanı  $0.25a^*$  olduğu durumda elektronun gördüğü potansiyel profili. e) tel kalınlığının  $1.50a^*$  olduğu durumda, manyetik alansız ve lazer alanı  $0.25a^*$  olduğu durumda elektronun bulunma olasılığı.

## 5. KAYNAKLAR

- [1] ZHANG, Y., MASCARENHAS, A., Scaling of exciton binding energy and virial theorem in semiconductor quantum wells and wires. *Physical Review B*, 59, 2044-2044, 1999.
- [2] HAMAGUCHI, H., YAMAMOTO, H., YAMADA, N., Resonant tunneling transmission characteristics and tunneling time in asymmetrical double-barrier structures with multiple prewells. *Jpn. J. Appl. Phys*, 43, 5157-5165, 2004.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] KOREPOW, SV., LİBERMAN, MA., Transport properties of double quantum wires in magnetic field. *Physica B*, 259-261, 1028-1029, 1999.
- [6] EL-SAİD, M., TOMAK, M., Magnetic-field dependence of hydrogenic impurity states in a quantum well wire. *Nuovo Cimento*, 13, 165-168, 1991.
- [7] VİLLAMİL, P., PORRAS-MONTENEGRO, N., Binding and transition energies of shallow impurities in cylindrical GaAs quantum-well wires under a uniform magnetic field. *J. Phys. Condens. Matter*, 10, 10599-10612, 1998.
- [8] XIAO, Z., ZHU, J., HE, F., Impurity binding energy of a cylindrical quantum wire in a magnetic field. *Phys. Stat.Sol.(b)*, 191, 401-408.
- [9] NICULESCU, E., GEARBA, A., CONE, G., NEGUTU, C., Magnetic field dependence of the binding energy of shallow donor in GaAs quantum-well wires. *Superlattices and Microstructures*, 29, 319-328, 2001.
- [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