

## İki Elektronlu Kuantum Nokta Yapılarda Elektrik Alan Etkisinin Pertürbasyon Yöntemiyle İncelenmesi

Ahmet TÜRKER<sup>1</sup>, Bekir ÇAKIR<sup>2</sup>, Ayhan ÖZMEN<sup>2</sup>, Yusuf YAKAR<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya-TÜRKİYE

<sup>2</sup> Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Konya-TÜRKİYE

<sup>3</sup> Aksaray Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Aksaray-TÜRKİYE

e-mail: ahmet\_turker\_42@hotmail.com

bcakir@selcuk.edu.tr

**Öz:** Bu çalışmada iki elektronlu kuantum nokta yapının dış elektrik alan etkisi altında elektronik özellikleri Pertürbasyon yöntemiyle incelendi. Hesaplamalarda helyum benzeri safsızlığa sahip olan iki elektronlu kuantum nokta yapı ele alındı ve sonsuz derinlikli küresel simetrik sınırlayıcı potansiyel göz önüne alındı. Sistemin dalga fonksiyonları tek elektron spin orbitallerinden oluşan Slater determinantı ile tanımlandı. Tek elektron spin orbitalleri ise Slater Tipi Orbitalerin (STO) lineer bileşimleri olarak kuruldu. Kuantum Genetik Algoritma (KGA) tekniği ile Schrödinger denkleminin olası çözümleri olan dalga fonksiyonları belirlendi ve bu dalga fonksiyonları kullanılarak iki elektronlu kuantum nokta yapının taban ve bazı uyarılmış durumların enerjilerinin beklenen değerleri Hartree-Fock-Roothaan Metodu (HFR) ile hesaplandı. İki elektronlu kuantum nokta yapının dış elektrik alan etkisinde iken bu enerji seviyelerine gelen katkı Pertürbasyon yöntemiyle hesaplandı.

**Anahtar kelimeler:** Hartree-Fock Roothaan Metod, Kuantum nokta yapı, Kuantum Genetik Algoritma Pertürbasyon Yöntemi, Slater Tipi Orbital

## Investigation of the Electric Field Effect by Perturbation Method in Two Electron Quantum Dot

**Abstract:** In this study electronic properties two-electron quantum dots under an external electric field were investigated by using Perturbation method. In calculation we used helium-like quantum dot with two electron confined with infinite spherically symmetric potential. The wave function of the system is defined by a Slater determinant constructed single-electron spin orbitals. The single electron spin orbitals were created as linear combinations of Slater type orbitals (STO). The wave functions which are the possible solutions of the Schrödinger equation were determined by using Quantum Genetic Algorithm (QGA). The energy eigenvalues of ground and excited states quantum dot with two electron were calculated using Hartree-Fock-Roothoon Method (HFR). The contributions came from the external electric field on these states of two electron quantum dot were calculated using Perturbation method.

**Keywords:** Hartree-Fock Roothaan Method, Quantum dot, Quantum Genetik Algorithm, Perturbation Method, Slater Type orbital.

### 1. Giriş

Mikroelektronik, üretimi kolay Silisyum temelli, yüksek mekanik ve ısısal iletkenliğe sahip bir malzeme bilimidir. Bu

malzemelerin çok küçük yasak enerji aralığına sahip olması pratik uygulamalara elverişli hale getirmiştir. Mikroelektronik malzemeler, farklı elektronik özelliklere

sahip amorf, polikristal ve tek-kristal gibi malzemeleri elementlerle alaşım ve katkı yapılarak üretilebilmektedir. Son yıllarda iletişim ve haberleşme alanlarındaki yoğun talepten dolayı bu alanlardaki deneysel ve teorik çalışmaları hız kazandırmıştır. Hafıza ve hesaplama sistemlerine olan ihtiyaç, sinyal iletim hızlarının yükseltilmesine yönelik araştırmaların yanı sıra yarı iletken malzeme bilimi ve teknolojisinde gelişmeler optoelektronik ve mikroelektronik aygıtların geliştirilmesine zemin hazırlamıştır.

Teknolojideki son gelişmeler yapay atom olarak da bilinen kuantum nokta yapılarının üretilmesi olanak sağlamaktadır. Bu yapıların elektronik özelliklerini anlaşılması pratik uygulamalar için önemlidir. Bir ve iki elektronlu küçük boyutlu yapıların elektronik yapısını inceleyen bazı çalışmalar yapılmıştır (Çakır ve ark., 2007-2008; Özmen ve ark., 2005a, b; Yakar ve ark., 2010a; Yakar ve ark., 2010c, 2013, 2015a). Kuantum nokta yapıların lineer ve lineer olmayan optiksel özelliklerini inceleyen bazı çalışmalar da yapılmıştır (Çakır ve ark., 2015; Karabulut ve Duque, 2011; Kırak ve ark., 2013; Sadeghi, 2011b; Yakar ve ark., 2010a; Yakar ve ark., 2010b; Yakar ve ark., 2015b; Yeşilgül ve ark., 2011). Kuantum nokta yapılar üzerine dışarıdan bir elektrik veya manyetik alan uygulanırsa, onların elektronik özellikleri etkilenmektedir. Bu yapıların dış elektrik alan etkisi altında iken

elektronik özelliklerini inceleyen bir kaç deneysel ve farklı hesaplama yöntemleri kullanarak teorik çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Dane, ve ark., 2008; Duque ve ark., 2011; He ve Xie, 2010; Huangfu ve Yan, 2008; Rezaei ve ark., 2011; Rezaei ve ark., 2011; Sadeghi, 2011a; Vázquez ve ark., 2004; Yeşilgül ve ark., 2011).

Dış manyetik ve elektrik alan etkisindeki kuantum nokta yapının taban bağlanma enerjisine etkisini nokta yapı yarıçapına bağlı olarak incelediler (Ribeiro ve ark., 1997). Yarıiletken kuantum nokta yapılarının elektronik yapıları üzerine elektrik alanın etkilerini etkin kütle yaklaşımı içinde kuantum nokta yapının boyutlarına bağlı olarak incelediler (Chang ve Xia, 1998). Karabulut ve Baskoutas bir elektrik alana maruz kalan safsızlığın varlığında parabolik potansiyelle sınırlandırılmış nokta yapının nanolineer optiksel saçırma katsayılarını ve kırılma indislerini hesaplamışlardır (Karabulut ve Baskoutas, 2008). Hakanson ve ark. (2003), bireysel yerleşen InP kuantum nokta yapılarda emisyon spektrumları ile topografileri kolere etmek için taramalı tünelleme mikroskopu (STM) ve taramalı tünelleme lüminesans'ını kullandılar ve STM ile indüklenen elektrik alanın kuantum nokta yapılarda emisyonunun nasıl etkilediğini incelediler. Jiang ve ark. GaN/AlGaN silindirik kuantum nokta

yapısında hidrojenik donör safsızlığın bağlanma enerjisini etkin kütle yaklaşımı altında geliştirilmiş fonksiyon teorisi yaklaşımında yüzey dalga fonksiyonlarını kullanarak hesapladılar (Jiang ve ark., 2009). Lin ve ark. (2010), düşük sıcaklık bölgesinde (30-100 K) InAs/GaAs kuantum nokta yapısında elektron emisyonunun elektrik alanına bağlılığını incelediler. Xia ve ark. (2010b), InGaN/GaN asimetrik çiftlenmiş kuantum nokta yapısında sığ donör safsızlığın enerji seviyelerini teorik olarak hesaplanmasını dış elektrik alanının varlığında hesapladılar. Xia ve ark. etkin kütle yaklaşımı altında GaN/AlGaN simetrik çiftlenmiş kuantum nokta yapısının yüzeyine yerleştirilmiş safsızlığın taban durum bağlanma enerjisini dış elektrik alanının etkisi ile hidrostatik basıncın birleşmesini göz önüne alarak incelediler (Xia ve ark., 2010a). Kırak ve ark. (2011), kuantum nokta yapısının taban ve bazı uyarılmış durumların elektronik özellikleri üzerine dış elektrik alanın etkisini ve nanlineer optiksel özelliklerini incelediler. Dujardin ve ark. (2012), ince kuantum diskinde sınırlandırılmasında üzerine dış elektrik alanın etkilerini etkin kütle yaklaşımında ve varyasyonel metodla hesapladılar.

Kırak ve ark. (2013), dış elektrik alan içindeki küresel kuantum nokta yapıdaki donör safsızlığın bağlanma enerjisi ve optiksel enerjileri üzerine hidrostatik basınç ve sıcaklığın etkisini varyasyonel yöntemle

incediler. Çakır ve ark. (2013), sonsuz küresel kuyuda sınırlandırılmış hidrojen atomunun enerji seviyelerini, statik ve dinamik kutuplanabilirliği üzerine osilatör strength ve elektrik alan etkisini kuantum genetik algoritma yöntemiyle incelediler. İki elektronlu kuantum nokta yapının taban ve bazı uyarılmış enerjileri kuantum genetik algoritma yöntemiyle hesaplanmıştır (Yakar ve ark., 2011). Fry ve ark. (2000), fotoluminesans ve tamamlayıcı fotoakım spektroskopisiyle kullanarak InAs/GaAs kuantum nokta yapının elektrik alan etkisinde iken GaAs kuantum noktasının yüksek akımlarda taşıyıcı yakalamaya duyarlı olduğunu incelediler. Vinolin ve Peter (2014), silindirik GaAsP/GaAsP sınırlandırılmış kuantum yapısında dot yarıçapının bir fonksiyonu olarak extion bağlanma enerjilerine elektrik ve manyetik alan etkisini incelediler.

Yukarda bahsedilen çalışmalar tek veya iki elektronlu nokta yapıların genellikle taban ve bazı uyarılmış durumları elektronik enerjileri incelenmiştir. Kuantum nokta yapılarda sınırlandırılan yük sayısını ve safsızlık yükünü artırılması, yapının optoelektronik özelliklerini değiştirecektir. Bu yapıların elektronik enerjilerine dış elektrik alanın nasıl etkilediği, özellikle iki elektronlu nokta yapıların uyarılmış durumları ile ilgili çalışmalar çok az sayıdadır. Biz bu çalışmada, merkezinde helyum benzeri safsızlık bulunduran sonsuz

derinlikli küresel simetrik sınırlayıcı potansiyel ile sınırlandırılmış iki elektronlu kuantum nokta yapının taban ve bazı uyarılmış durumlarının enerjileri üzerine bir dış elektrik alanının etkisini inceledik.

$$H = \sum_{i=1}^2 \left( -\frac{\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 - \frac{Ze^2}{\epsilon r_i} + \sum_{i<j=1}^2 \frac{e^2}{\epsilon r_{ij}} \right) + V_c(r_1, r_2) + \sum_{j=1}^2 |e| F r_j \cos(\theta_j) \quad (1)$$

biçiminde yazabiliriz. Burada  $m^*$  elektronun etkin kütlesi,  $Z$  safsızlık yükü,  $\epsilon$  ortamın statik dielektrik sabiti  $e$  de elektronun yüküdür.  $F$  ise z-yönünde uygulanan elektrik alan büyüklüğü,  $r$  ise elektron ile safsızlık arasındaki uzaklık  $\theta$  ise yer vektörü ile elektrik alan arasındaki açı,  $V_c(r_1, r_2)$  ise sınırlayıcı potansiyel olup,

$$V_c(r_1, r_2) = \begin{cases} 0, & r < a \\ \infty, & r \geq a \end{cases} \quad (2)$$

biçiminde sonsuz küresel simetrik potansiyel alınmıştır. Denk.(1)'teki dördüncü terim diğer terimlerle karşılaştırıldığında küçük olacağından pertürbe hamiltoniyen olarak alınabilir ve pertürbasyon olarak hesaplanabilir. Bu durumda Denk.(1)'i

## 2. Materyal ve Metot

Etkin kütle yaklaşımı altında, z-yönünde dış elektrik alanının varlığında merkezinde Helyum tipi bir safsızlık bulunduran, sonsuz küresel kuyu içinde sınırlandırılmış iki elektronlu bir sistemin rölativistik olmayan elektronik Hamiltoniyenini,

$$H = H_0 + H' \quad (3)$$

yazılabilir. Burada  $H_0$  pertürbe olmamış hamiltoniyen,  $H'$  ise pertürbe hamiltoniyen olup,

$$H_0 = \sum_{i=1}^2 \left( -\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m^*} - \frac{Ze^2}{\epsilon r_i} + \sum_{i<j}^2 \frac{e^2}{\epsilon r_{ij}} \right) + V_c(r_1, r_2) \quad (4)$$

ve

$$H' = \sum_{j=1}^2 |e| F r_j \cos(\theta_j) \quad (5)$$

Biçiminde yazılabilir. Pertürbe olmamış Hamiltoniyen  $H_0$  için Shrödinger denklemi,

$$H_0 \psi_i^{(0)} = E_i^{(0)} \psi_i^{(0)} \quad (6)$$

ile verilir. Burada  $\psi_i^{(0)}$  ve  $E_i^{(0)}$  i. duruma karşılık gelen pertürbe olmamış hamiltoniyenin özfonksiyonu ve enerji özdeğeridir. Hartree-Fock-Roothaan yaklaşımında normalize özfonksiyonların uzaysal kısmı Slater tipi orbitallerinin lineer kombinasyonu şeklinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\psi_i^{(0)} = \sum_{k=1}^{\sigma} c_{ik} \chi_{q_k}(\zeta_k, \vec{r}) \quad (7)$$

Burada  $i$  ve  $q_k$  sırasıyla atomik orbitallerin ve baz setlerinin kuantum sayısıdır.  $\omega$  baz

seti sayısı,  $c_{ik}$  açılım katsayısı ve  $\zeta_k$  baz setlerinin perdeleme katsayısıdır.  $\chi_{q_k}$ 'nin baş yörünge ve manyetik kuantum sayıları sırasıyla  $n_k$ ,  $l_k$  ve  $m_k$  dir. Pertürbasyon teorisinde birinci derece enerji düzeltmesi için şödinger denklemi

$$H' \psi_i^{(0)} = E_S^{(1)}(i) \psi_i^{(0)} \quad (8)$$

ile verilir. Burada  $E_S^{(1)}(i)$ , i. durum için enerji düzeltmesidir ve bu Stark enerjisi olarak adlandırılır. Uyarılmış durumlar için birinci derece Stark enerji düzeltme terimi,

$$E_S^{(1)}(i) = eF \sqrt{\frac{4\pi}{3}} \sum_{n'l'm'}^{\sigma'} \sum_{nlm}^{\sigma} c_i^* c_j \int_0^a r^{n'+n+1} e^{-(\zeta'+\zeta)r} dr \sum_{L=L_{min}}^{L_{max}} \langle l'm'|l m|L, m' - m \rangle \delta_{L,1} \delta_{m' - m, 0} \\ \times \sum_{n'l'm'}^{\sigma'} \sum_{nlm}^{\sigma} c_k^* c_p \int_0^a r^{n'+n+1} e^{-(\zeta'+\zeta)r} dr \quad (9)$$

ile verilir. Burada  $L_{min} = \max\{|l - l'|, |m - m'|\}$ ,  $L_{max} = l + l'$ ,  $\langle lm|l'm'LM \rangle$

Gaunt katsayısı,  $L \geq M$  ve  $M = |m - m'|$  dir. Ayrıca burada,

$$A_k = \int_0^a r^k e^{-(\zeta'+\zeta)r} dr = \frac{k!}{(\zeta' + \zeta)^{k+1}} \left\{ 1 - e^{a(\zeta'+\zeta)} \sum_{p=0}^k \left[ \frac{[a(\zeta' + \zeta)]^p}{p!} \right] \right\} \quad (10)$$

olup, incomplete gama integralidir (Arfken1985). Paritenin korunumundan

dolayı dejenere olmayan taban durum için birinci derece enerji düzeltmesi sıfırdır.

$$E_S^{(1)}(1s) = |e|F \left\langle \psi_{100} \left| \sum_{j=1}^2 |e|Fr_j \cos(\theta_j) \right| \psi_{100} \right\rangle = 0 \quad (11)$$

Diğer taraftan  $1s^2$  taban durumunu ikinci dereceden gelen Stark enerji düzeltmesi

$$E_S^{(2)}(1s) = |e|^2 F^2 \sum_{n>1} \frac{\left| \left\langle \psi_{n'l'm'}(\vec{r}) \left| \sum_{j=1}^2 |e|Fr_j \cos(\theta_j) \right| \psi_{100}(\vec{r}) \right\rangle \right|^2}{E_{np}^{(0)} - E_{100}^{(0)}} \quad (12)$$

ifadesi ile hesaplanır.

### 3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

Bu çalışmada merkezinde helyum tipi bir safsızlık bulunan sonsuz küresel simetrik potansiyelle sınırlandırılmış iki elektronlu GaAs kuantum nokta yapısının dış elektrik alan içinde iken elektronik özellikleri pertürbasyon yöntemiyle incelendi. Sistemi temsil eden dalga fonksiyonu tek elektron spin orbitallerinden oluşan bir Slater determinantı ile tanımlandı. Tek elektron spin orbitalleri ise Slater Tipi Orbitallerin (STO) lineer bileşimlerinden seçildi. Kuantum Genetik Algoritma (KGA) tekniği ile Schrödinger denkleminin olası çözümleri olan sistemin dalga fonksiyonları belirlendi ve bu dalga fonksiyonlarını kullanarak iki elektronlu kuantum nokta yapıların taban ve uyarılmış durumların enerjilerinin beklenen

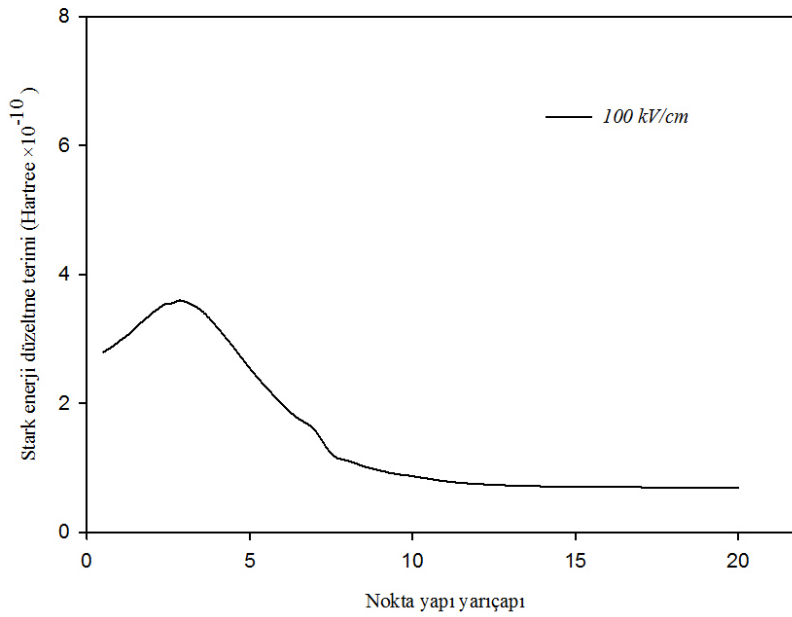
değerlerini Hartree-Fock Roothaan Metodu (HFR) ile hesapladık. Taban ve uyarılmış seviyelerin enerjilerini ve dalga fonksiyonlarını kullanarak iki elektronlu kuantum nokta yapının dış elektrik alan etkisinde iken bu enerji seviyelerine gelen katkıyı pertürbasyon yöntemiyle hesaplandı. Hesaplamalarda atomik birimleri kullanıldı. Atomik birimlerde etkin 1 Bohr yarıçapı  $a^* = 100 \text{ \AA}$  ve etkin Rydberg enerjisi  $R_y = 5.72 \text{ meV}$  alındı. Meteryal parametreleri olan etkin kütle  $m^* = 0,067m_0$  ve  $\epsilon = 13.18$  olarak alındı. Burada  $m_0$  serbest elektron kütesidir.

Denk. (1)'de verilen pertürbe olmamış Schrödinger denkleminin olası çözümlerini kuantum genetik algoritma yöntemi ile belirlendi. Belirlenen bu dalga fonksiyonları sınır şartı sağladıktan sonra Gram-Smith yöntemiyle ortanormalize edildi. Bu dalga fonksiyonları kullanarak

pertürbe olmamış enerji seviyeleri belirlendi. Bu pertürbe olmamış dalga fonksiyonları ve enerji seviyeleri kullanılarak iki elektronlu kuantum nokta yapının dış elektrik alan etkisinde iken bu enerji seviyelerine gelen katkı kuantum nokta yapılarının taban ve uyarılmış durum enerjilerinin nokta yarıçapına bağlı olarak değişimi zamandan bağımsız pertürbasyon yöntemiyle hesaplandı.

Paritenin korunumundan dolayı taban enerji seviyesine gelen 1. derece stark enerji düzeltme terimi sıfır olduğu için sadece taban duruma 2. dereceden bir stark enerji düzeltmesi gelmektedir. Şekil 1’de taban enerji seviyesine gelen 2. derece Stark

enerji düzeltme terimi  $100 \text{ kV/cm}$  elektrik alan değerleri için nokta yapının yarıçapına göre değişim grafiği gösterilmiştir. Tablo 1’de ise bu terimlerin değeri verilmiştir. Şekil 1 ve Tablo 1’deki değerlerden de görüleceği gibi taban durumuna gelen 2. derece Stark enerji düzeltmesi çok küçük olup, dot yarıçapı arttıkça artmakta ve belirli bir değerden sonra azalmaktadır. Taban durum için nokta yapı  $R=8a^*$  değerinden sonra sabit kalmaktadır. Güçlü sınırlandırma bölgesinde elektrik alanının etkisi çok küçükte olsa görülmektedir. Stark enerji düzeltme değeri elektrik alanının değerine göre,  $\sim 10^{-10} H$  mertebesinde.



Şekil 1: Taban durum ( $1s^2$ ) gelen stark enerji düzeltmesinin nokta yapı yarıçapına göre değişimi.

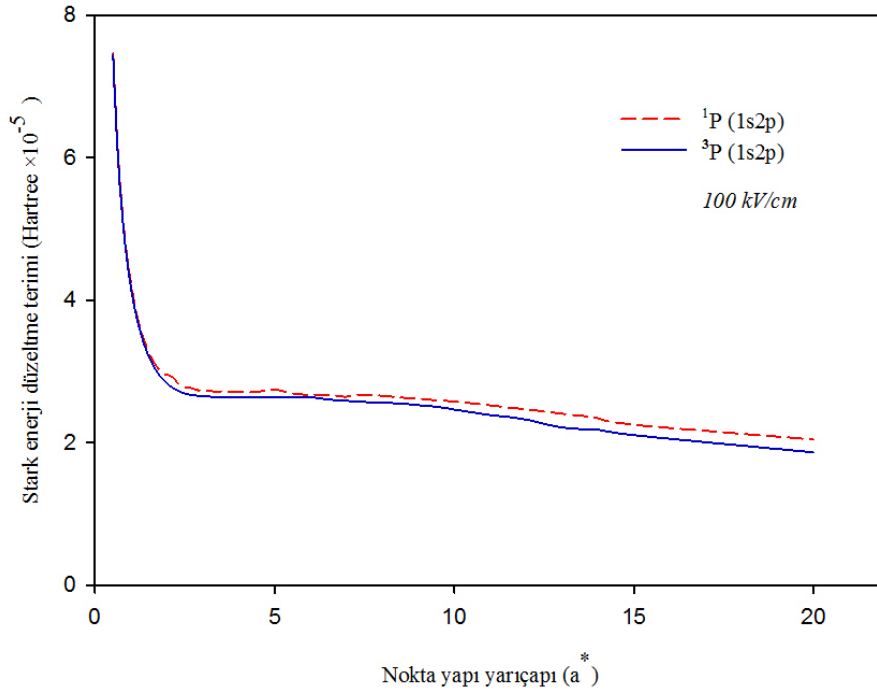
**Tablo 1:** Taban durum ( $1s^2$ ) enerjileri ve bu seviyeyenin enerjilerine gelen 2. derece Stark enerji düzeltme teriminin taban enerji seviyelerine eklenecek nokta yapı yarıçapına göre değişim değerleri. Tüm değerler atomik birimde verilmiştir.

Nokta Yarıçapı R	Pertürbe Olmamış Enerji ( $1s^2$ )	Düzeltilme Terimi ( $1s^2$ )	Pertürbe Enerji ( $1s^2$ ) ( $100 \text{ kV/cm}$ )
0.5	22.8017	0.000000000279	22.801700000279
0.7	7.9733	0.000000000286	7.973300000286
1.0	1.0612	0.000000000298	1.061200000298
1.2	-0.6646	0.0000000003046	-0.664599999695
1.3	-1.1874	0.0000000003079	-1.187399999692
1.5	-1.8642	0.0000000003180	-1.864199999682
2.0	-2.5626	0.0000000003401	-2.562599999660
3.0	-2.8310	0.0000000003583	-2.830999999642
4.0	-2.8586	0.0000000003177	-2.858599999682
5.0	-2.8614	0.0000000002543	-2.861399999746
7.0	-2.8617	0.0000000001581	-2.861699999842
8.0	-2.8617	0.0000000001112	-2.861699999889
9.0	-2.8617	0.0000000000959	-2.861699999904
10.0	-2.8617	0.0000000000872	-2.861699999913
15.0	-2.8617	0.0000000000704	-2.861699999930
20.0	-2.8617	0.0000000000695	-2.861699999930

Şekil 2’de birinci uyarılmış singlet  $^1P(1s2p)$  ve triplet  $^3P(1s2p)$  seviyelerine 1. dereceden gelen Stark enerji düzeltme teriminin  $100 \text{ kV/cm}$  elektrik alan değerlerinde nokta yarıçapına göre değişimi gösterilmiştir. Şekil 2’den görüleceği gibi nokta yarıçapı artarken dış elektrik alandan dolayı bu seviyelere gelen katkı hızlı bir şekilde azalmaktadır ve  $R=2a^*$ ’dan sonra azalarak neredeyse sabit kalmaktadır. Başka bir deyişle güçlü sınırlandırma bölgesinde elektrik alan etkisi etkin bir şekilde

görülmürken, zayıf sınırlandırma bölgesinde az etki göstermektedir. Uyarılmış singlet  $^1P(1s2p)$  ve triplet  $^3P(1s2p)$  seviyelerine Şekil 2 ve Tablo 2 ve 3’deki değerlere bakılacak olursa singlet seviyesine Stark teriminden gelen enerji düzeltme terimi triplet seviyesine gelen terimlerden fazla olduğu görülmektedir. Tablo 2 ve 3’e bakıldığında singlet ve triplet seviyeye gelen katkı yaklaşık  $\sim 10^{-5}H$  mertebesindedir. Bu da kızılötesi bölgeye karşılık gelmektedir.





Şekil 2: Uyarılmış (1s2p) seviyesine gelen stark enerji düzeltmesinin nokta yapı yarıçapına göre değişimi.

**Tablo 2:**  $^1P(1s2p)$  singlet enerji seviyesi ve bu enerji seviyesine gelen 1. dereceden Stark enerji düzeltme teriminin,  $^1P(1s2p)$  singlet seviyesine eklenerek nokta yapı yarıçapına göre değişim değerleri. Tüm değerler atomik birimde verilmiştir.

Nokta Yarıçapı	Pertürbe Olmamış Eneji $^1P(1s2p)$	Düzeltilme Terimi	Pertürbe Enerji $^1P(1s2p)$ (100 kV/cm)
0.5	45.7702	0.0000747	45.7702747
0.7	20.2333	0.0000559	20.2333559
0.8	14.2831	0.0000501	14.2831501
1	7.5302	0.0000423	7.5302423
1.5	1.4265	0.0000325	1.4265325
2	-0.4236	0.0000296	-0.4235704
3	-1.5406	0.0000273	-1.5405727
4	-1.8670	0.0000271	-1.8669729
5	-1.9980	0.0000275	-1.9979725
6	-2.0590	0.0000267	-2.0589733
7	-2.0899	0.0000265	-2.0898735
8.5	-2.1054	0.0000263	-2.1053737
9.	-2.1101	0.0000262	-2.1100738
10	-2.1156	0.0000258	-2.1155742
15	-2.1222	0.0000225	-2.1221775
20	-2.1224	0.0000204	-2.1223796

**Tablo 3:**  $^3P(1s2p)$  triplet enerji seviyesi ve bu enerji seviyesine gelen 1. Derece Stark enerji düzeltme teriminin  $^3P(1s2p)$  triplet seviyesine eklenerek nokta yapı yarıçapına göre değişim değerleri. Tüm değerler atomik birimde verilmiştir.

Nokta Yarıçapı R	Pertürbe Olmamış Eneji $^3P(1s2p)$	Düzeltilme Terimi $^3P(1s2p)$	Pertürbe Enerji $^3P(1s2p)$ (100 kV/cm)
0.5	45.0632	0.0000744	45.0632744
0.7	19.7509	0.0000554	19.7509554
1.0	7.1965	0.0000416	7.1965416
1.2	3.7952	0.0000367	3.7952367
1.5	1.2138	0.0000320	1.2138320
2.0	-0.5675	0.0000283	-0.5674717
3.0	-1.6117	0.0000265	-1.6116735
4.0	-1.9038	0.0000264	-1.9037736
5.0	-2.0193	0.0000264	-2.0192736
6.0	-2.0733	0.0000264	-2.0732736
7.0	-2.1004	0.0000259	-2.1003742
8.0	-2.1147	0.0000255	-2.1146745
9.0	-2.1224	0.0000250	-2.1223750
10.0	-2.1266	0.0000246	-2.1265754
15.0	-2.1312	0.0000211	-2.1311789
20.0	-2.1314	0.0000186	-2.1313814

### Teşekkür

Bu çalışma Selçuk Üniversitesi Fizik bölümünde Ahmet TÜRKER tarafından hazırlanan Yüksek lisans tez çalışmasının bir bölümüdür.

## Kaynaklar

- Arfken G (1985). *Mathematical Methods for Physics*, Third Edition, *Academic Press Inc*, Orlando.
- Chang K, Xia JB (1998). The effects of electric field on the electronic structure of a semiconductor quantum dot, *Journal of Applied Physics* 84(3), 1454.
- Çakır B, Özmen A, Atav U, Yüksel H, Yakar Y (2007). Investigation of electronic structure of a Quantum Dot using Slater-Type Orbitals and Quantum Genetic Algorithm, *International Journal of Modern Physics C* 18(1), 61–72.
- Çakır B, Özmen A, Atav U, Yüksel H, Yakar Y (2008). Calculation of electronic structure of a spherical quantum dot using a combination of quantum genetic algorithm and Hartree-Fock-Roothaan method, *International Journal of Modern Physics C* 19(4), 599–609.
- Çakır B, Yakar Y, Özmen A (2013). Calculation of oscillator strength and the effects of electric field on energy states, static and dynamic polarizabilities of the confined hydrogen atom, *Optics Communications* 311, 222–228.
- Çakır B, Yakar Y, Özmen A (2015). Linear and nonlinear optical absorption coefficients of two-electron spherical quantum dot with parabolic potential, *Physica B: Condensed Matter* 458, 138–143.
- Dane C, Akbas H, Minez S, Guleroglu A (2008). Electric field effect in a GaAs/AlAs spherical quantum dot, *Physica E-Low-Dimensional Systems & Nanostructures* 41(2), 278–281.
- Dujardin FA, Oukerroum E, Feddi JBB, J. Martínez-Pastor, Zazi M (2012). Effect of a lateral electric field on an off-center single dopant confined in a thin quantum disk, *Journal of Applied Physics* 111(3), 034317.
- Duque CA, Kasapoglu E, Sakiroglu S, Sari H, Sokmen I (2011). Intense laser effects on nonlinear optical absorption and optical rectification in single quantum wells under applied electric and magnetic field, *Applied Surface Science* 257(6), 2313–2319.
- Fry PW, Finley JJ, Wilson LR, Lemaître A, Mowbray DJS, MS, Hopkinson M, Hill G, Clark JC (2000). Electric-field-dependent carrier capture and escape in self-assembled InAs/GaAs quantum dots, *Applied Physics Letters* 77(26), 43–44.
- Håkanson U, Håkanson H, Johansson MKJ, Samuelson L, Pistol ME (2003). Electric field effects in single semiconductor quantum dots observed by scanning tunneling luminescence, *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures* 21(6), 23–44.
- He L, Xie W (2010). Effects of an electric field on the confined hydrogen impurity states in a spherical parabolic quantum dot, *Superlattices and Microstructures* 47(2), 266–273.
- Huangfu YF, Yan ZW (2008). Bound polaron in a spherical quantum dot under an electric field, *Physica E-Low-Dimensional Systems & Nanostructures* 40(9), 2982–2987.
- Jiang L, Wang H, Wu H, Gong Q, Feng S (2009). External electric field effect on the hydrogenic donor impurity in zinc-blende GaN/AlGaIn cylindrical quantum dot, *Journal of Applied Physics* 105(5), 053710.
- Karabulut I, Duque CA (2011). Nonlinear optical rectification and optical absorption in GaAs-Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As double quantum wells under applied electric and magnetic fields, *Physica E-Low-Dimensional Systems & Nanostructures* 43(7), 1405–1410.
- Karabulut I, Baskoutas S (2008). Linear and nonlinear optical absorption coefficients and refractive index changes in spherical quantum dots: Effects of impurities, electric field, size, and optical intensity, *Journal of Applied Physics* 103(7), 073512.
- Kırak M, Altınok Y, Yılmaz S (2013). The effects of the hydrostatic pressure and temperature on binding energy and optical properties of a donor impurity in a spherical quantum dot under external electric field, *Journal of Luminescence* 136, 415–421.

- Kırak M, Yılmaz S, Şahin M, Gençaslan M (2011). The electric field effects on the binding energies and the nonlinear optical properties of a donor impurity in a spherical quantum dot, *Journal of Applied Physics* 109(9), 094309.
- Kırak M, Yılmaz S, Temizer U (2013). Nonlinear optical rectification and oscillator strength in a spherical quantum dot with parabolic confinement in the presence of the electric field, *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics* 8(2), 165–169.
- Lin SW, Song AM, Peaker AR, Caldas MI, Studart N (2010). Electric-field dependence of electron emission from InAs/GaAs quantum dots, 291–292.
- Özmen A, Çakır B, Yakar Y (2013). Electronic structure and relativistic terms of one-electron spherical quantum dot, *Journal of Luminescence* 137, 259–268.
- Rezaei G, Vaseghi B, Ebrahimi J (2011). External electric field effects on the electronic and hydrogenic impurity states in ellipsoidal and semi-ellipsoidal quantum dots, *Superlattices and Microstructures* 49(6), 591–598.
- Rezaei G, Vaseghi B, Sadri M (2011). External electric field effect on the optical rectification coefficient of an exciton in a spherical parabolic quantum dot, *Physica B-Condensed Matter* 406(24), 4596–4599.
- Ribeiro FJ, Latgé A, Pacheco M, Barticevic Z (1997). Quantum dots under electric and magnetic fields: Impurity-related electronic properties, *Journal of Applied Physics* 82(1), 270.
- Sadeghi E (2011a). Electric field and impurity effects on optical property of a three-dimensional quantum dot: A combinational potential scheme, *Superlattices and Microstructures* 50(4), 331–339.
- Sadeghi E (2011b). Linear and nonlinear optical absorption coefficients in an asymmetric graded ridge quantum wire, *Superlattices and Microstructures* 49(1), 91–98.
- Sahin M, Tomak M (2005a). Electronic structure of a many-electron spherical quantum dot with an impurity, *Physical Review B* 72(12).
- Sahin M, Tomak M (2005b). The self-consistent calculation of a spherical quantum dot: A quantum genetic algorithm study, *Physica E-Low-Dimensional Systems & Nanostructures* 28(3), 247–256.
- Vázquez GJ, del Castillo-Mussot M, Mendoza CI, Spector HN (2004). Spherical quantum dot under an electric field, *Physica Status Solidi (C)* 1(S1), S54–S57.
- Vinolin A, Peter AJ (2014). Optical rectification in a strained GaAs<sub>0.9</sub>P<sub>0.1</sub>/GaAs<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub> quantum dot: Simultaneous effects of electric and magnetic fields, *AIP Conference Proceedings*, 1496–1497.
- Xia C, Zeng Z, Wei S (2010a). Electron and impurity states in GaN/AlGaN coupled quantum dots: Effects of electric field and hydrostatic pressure, *Journal of Applied Physics* 108(5), 054307.
- Xia C, Zeng Z, Wei S (2010b). Shallow-donor impurity in zinc-blende InGaN/GaN asymmetric coupled quantum dots: Effect of electric field, *Journal of Applied Physics* 107(5), 054305.
- Yakar Y, Cakir B, Ozmen A (2010a). Calculation of linear and nonlinear optical absorption coefficients of a spherical quantum dot with parabolic potential, *Optics Communications* 283(9), 1795–1800.
- Yakar Y, Cakir B, Ozmen A (2010b). Linear and nonlinear optical properties in spherical quantum dots, *Communications in Theoretical Physics* 53(6), 1185–1189.
- Yakar Y, Çakır B, Özmen A (2010c). Calculation of linear and nonlinear optical absorption coefficients of a spherical quantum dot with parabolic potential, *Optics Communications* 283(9), 1795–1800.

- Yakar Y, Çakır B, Özmen A (2011). Computation of ionization and various excited state energies of helium and helium-like quantum dots, *International Journal of Quantum Chemistry* 111(15), 4139–4149.
- Yakar Y, Çakır B, Özmen A (2013). Computation of relativistic terms in a spherical quantum dot, *Journal of Luminescence* 134, 778–783.
- Yakar Y, Çakır B, Özmen A (2015a). Electronic structure of two-electron quantum dot with parabolic potential, *Philosophical Magazine* 95(3), 311–325.
- Yakar Y, Çakır B, Özmen A (2015b). Linear and nonlinear absorption coefficients of spherical two-electron quantum dot, *Computer Physics Communications* 188, 88–93.
- Yeşilgül U, Ungan F, Kasapoğlu E, Sarı H, Sökmen I (2011). The linear and nonlinear intersubband optical absorption coefficients and refractive index changes in a V-shaped quantum well under the applied electric and magnetic fields, *Superlattices and Microstructures* 50(4), 400–410.