

# MOLECULAR STRUCTURES OF MONOMERIC AND DIMERIC GOLD TRIBROMIDE AT EQUILIBRIUM

Mustafa Çalışkan

Department of Physics, Trakya University, Prof. Dr. Cahit Araf Blv., 22130 İskender/Edirne, Turkey

E-mail of the corresponding author: caliskanmustafa@yahoo.com , mustafacaliskan@trakya.edu.tr

## Abstract

The molecular structures of gold tribromide ( $\text{AuBr}_3$  and  $\text{Au}_2\text{Br}_6$ ) in monomeric and dimeric forms have been determined using quantum chemical calculations and electron-scattering experiments. The ground state structure of monomeric gold tribromide has been shown to have  $C_{2v}$  symmetry rather than a T-shaped structure with one short and two longer Au-Br bonds, in accordance with the first rule of the Jahn-Teller effect. In this study, we calculated the equilibrium molecular structures of  $\text{AuBr}_3$  and  $\text{Au}_2\text{Br}_6$  using the interionic force model. The results we obtained for bond lengths and bond angles in the equilibrium structure were compared with quantum chemical calculation results and values measured in electron-scattering experiments. The results obtained can be considered appropriate. Interatomic pair interactions are defined by the parameters specified in the interionic force model we present. The molecular structure, bond length, and bond angle results we obtained using the Interionic Force Model parameters are in agreement with the theoretical B3LYP, MP2 and CCSD(T) results.

**Keywords:** Monomeric gold tribromide, dimeric gold tribromide, interionic force model, molecular structure. B3LYP: Becke's three-parameter hybrid method with the LYP (Lee, Yang, and Parr) correlation functional, MP: Correlated calculation at the Möller-Plesset level, MP2: MP Calculation truncated at second order, CCSD: Coupled cluster singles and doubles, CCSD(T): As above, including triple excitations configuration interaction.

DOI: 10.7176/JNSR/17-1-07

Publication date: June 28<sup>th</sup> 2025

## 1. Giriş

Altın halidlerin yapı ve bağ özelliklerini çalışmak hem deneysel, hem de teorik çalışmalar için enteresan ve çarpıcı bir örnektir [1-5]. Bütün altın monohalidleri, trihalidleri ve bunların dimerlerinin moleküler yapısı relativistik pseudo potansiyellerini kullanan teori ile araştırılmıştır [1,5]. Diğer taraftan altın trihalidleri Jahn-Teller etkisine konudur [6]. Altın trihalidleri yapısal kimyada da ilginç konulardan biridir. Bu göstermiştir ki molekülün titreşimsel hareketlerini ve elektronik birleşmesini içeren temel bir dinamik sistemdir. Aynı zamanda deneysel olarak gözlemlenebilen statik bir etkidir.

Altın tribromür ( $\text{AuBr}_3$ ) Jahn-Teller etkisini gözlemlemek için iyi bir örnektir.  $\text{AuBr}_3$  Hargittai ve çalışma grubu tarafından B3LYP, MP2 ve CCSD(T) çalışmalarında gözlenmiştir [1]. Hargittai ve çalışma grubu monomerik ve dimerik altın tribromürün ( $\text{AuBr}_3$ ,  $\text{Au}_2\text{Br}_6$ ) B3LYP, MP2 ve CCSD(T) çalışmalarında yayımlanmışlardır.  $\text{AuBr}_3$  Molekülünün şeklini hem  $D_{3h}$  ( $C_{3v}$ ) hem de değişmiş Jahn-Teller  $C_{2v}$  simetrisi ile karşılaştırmışlardır. B3LYP, MP2 ve CCSD(T) çalışmaları monomerik altın tribromürün ( $\text{AuBr}_3$ ) değişmiş Jahn-Teller  $C_{2v}$  simetrik bir molekül olduğunu göstermiştir [3]. Bir molekülde Jahn-Teller bozulması olsa bile temel durum simetrisi bozulmadan önceki ilk dejenere durumu ile aynı olacağını söyleyebiliriz. Altın tribromürün ( $\text{AuBr}_3$ ) B3LYP, MP2 ve CCSD(T) çalışmaları, hem doğada, hem de yüksek deneysel sıcaklıklarda molekülün biçiminin bozulmasının statik olduğunu kanıtlamıştır.

Bu çalışmada iyonlararası kuvvet modelini temel alarak teorik hesaplamalar yapmış bulunmaktayız, bu modeli daha önce erimiş tuzlarda iyonlararası etkileşimleri tanımlamada kullanmıştık [8-11]. Altın tribromürün potansiyel enerji fonksiyonu için iyonik bir model geliştirerek 500 parçacıkla moleküler dinamik yaparak bu molekülün sabit temel durum yapısını buluyoruz. Bulunan sonuçlar Hargittai ve grubunun çalışmasında bulunan spektral verilerdeki  $\text{AuBr}_3$  monomeri ve  $\text{Au}_2\text{Br}_6$  dimerinin moleküler şekilleri ile test edilmiştir [1]. İyonlararası kuvvet modelini temel alarak, denge yapısında  $\text{AuBr}_3$  molekülündeki çiftler etkileşimleri tanımlıyoruz.  $\text{AuBr}_3$  ün çiftler dağılım fonksiyonlarını elde etmek için ise HNC integral denklem teorisi kullanılabilir.

## 2. Teori

### 2.1 İyonlararası Kuvvet Modeli

Alüminyum [9] ve bromürlerin [10,11] önceki çalışmalarını takip ederek, altın bromür kümeleri içinde iyonlararası kuvvet modelini kullanıyoruz. Bunun için; (i) kristal durumunda denge durumunu tanımlayan ve iyonları arasındaki elektrostatik etkileşimlerle bağ oluşturan Born modeli, (ii) titreşimsel hareketler ve kristal

kusurlar için shell modeli kullanılır. Elektron-shell deformasyonu  $Z_i$  efektif valansları ile tanımlanır ve halojenlerin elektrik ve örtüşme polarizibiliteleri sırasıyla  $\alpha_x$  ve  $\alpha_s$  ile ve altın iyonlarının elektrik polarizibilitesi  $\alpha_M$  ile tanımlanmıştır. Örtücü itici güçler iyonik yarıçap  $R_i$  leri ve sabit parametreler  $\rho_i$  lerinde bulundurmaktadırlar. Van der Waals, dipol-dipol etkileşimleri sadece halojenler için vardır. Bu modelde sistemin toplam potansiyel enerjisi  $U(\{r_{ij}\}, \{p_i\})$ , iyonlararası bağlar  $r_{ij}$  ve elektrik dipol momentleri  $p_i$  nin fonksiyonu olarak :

$$U(\{r_{ij}\}, \{p_i\}) = \sum_{i>j} V_{ij}(r_{ij}) + U_{pol}^{cl} + \frac{\alpha_s}{\alpha_{cl}} \sum_{i_m, j_h} p_j \cdot \hat{r}_{ij} \left| \frac{d\phi_{ij}(r_{ij})}{dr_{ij}} \right| \quad (1)$$

şeklindedir. Burada  $V_{ij}(r_{ij})$  :

$$V_{ij}(r_{ij}) = \frac{Z_i Z_j e^2}{r_{ij}} + \phi_{ij}(r_{ij}) - \frac{C_i C_j}{r_{ij}^6} \quad (2)$$

$\phi_{ij}(r_{ij})$  İtici etkileşimleri tanımlayan merkezi potansiyel, Busing formunda [12] :

$$\phi_{ij}(r_{ij}) = f(\rho_i + \rho_j) \exp \left[ \frac{R_i + R_j - r_{ij}}{\rho_i + \rho_j} \right] \quad (3)$$

burada  $f = 0.05 e^2 / \text{Å}^2$  enerji ölçeğinde değişmez bir sabittir. (3) Bağıntısı her iyonun transfer edilebilir etkileşim kuvvetlerine sahip olduğunu gösterir, böylece her bileşik ailesi için gereken parametre sayıları azalır. İyonik kümeler için iyonlararası kuvvet modeli hakkında daha fazla bilgi için Ref.[8-11]'e bakılabilir. Bununla birlikte bu çalışmada AuBr<sub>3</sub> moleküler iyonunda iyonik etkileşimlerin artırılmış klasik bir modelini anlatmaktayız. Biz bu modeli seçerek AuBr<sub>3</sub> molekülünün moleküler yapısını tanımlamak için kullandık. Ayrıca  $V_{ij}(r_{ij})$  Potansiyelini kullanarak AuBr<sub>3</sub> molekülünde etkili çiftler etkileşimleri de hesapladık, buda daha önceki çalışmalarımızda rijid iyon potansiyeli olarak tanımlanmıştı [13].

Yapısal hesaplamalarımız için bir integral denklem teorisi (VMHNC sıvılar için çok geçerli bir teoridir) [14,15] de verilmiştir. Bununla birlikte şimdiki çalışmamızda HNC çözümünü statik yapı hesaplamalarımız için kullanmış bulunmaktayız. Birçok sıvı hal teorisindeki gibi homojenler, izotropikler ve ikili sistemler (i, j =1, 2) için VMHNC çözümünde Ornstein-Zernike (OZ) denklemi çözülür

$$h_{ij}(r) = c_{ij}(r) + \sum_{l=1}^2 \rho_l h_{il}(r) * c_{lj}(r) \quad (4)$$

burada  $c_{ij}(r)$  kısmi direkt korelasyon fonksiyonlarını,  $h_{ij}(r) = g_{ij}(r) - 1$  toplam korelasyon fonksiyonlarını tanımlar,  $g_{ij}(r)$  çiftler dağılım fonksiyonlarını,  $\rho_l$  kısmi iyonik sayısal yoğunluklarını gösterir. Böylece (4) denklemi

$$c_{ij}(r) = h_{ij}(r) - \ln \left[ g_{ij}(r) e^{\beta \phi_{ij}(r) + B_{ij}(r)} \right] \quad (5)$$

ile çözülür.

$\phi_{ij}(r)$  Atomlar arası çiftler potansiyelleri ve  $B_{ij}(r)$  lerin HNC çözümleri için sıfır olduğu kabul edilir. Monatomikten ikili sıvılara geçişteki sıvıhal genellemesi için  $g_{ij}(r)$  kısmi çiftler dağılım fonksiyonlarını  $\phi_{ij}(r)$  kısmi çiftler potansiyellerine bağlayan üç tane integral denklem setine sahibiz. İkili sıvı alaşımları için VMHNC integral denklem teorisi kullanılır, bu Gonzalez [14] de verilmiştir, böylece konfigürasyon  $f^{VMHNC}(\beta, \rho, x_l)$  Helmholtz serbest enerji fonksiyonu değişik durumlarda  $B_{ij}(r) = 0$  alınmasıyla minimize edilir. Bu çok kısa HNC çözümüdür.

### 3. Sonuçlar ve Tartışma

Sonuçların sunumu üç kısma ayrılır: ilki deneysel verilerinde elde edilebildiği moleküler yapı ile ilgilidir. İkincisi altın tribromür için atomlar arası çiftler etkileşimleri ile ilgilidir. Son kısım AuBr<sub>3</sub> ün statik sıvı yapısı ile ilgilidir.

İlk önce, şimdiki çalışmamız olan iyonlararası kuvvet modelinden elde edilmiş altın triklorürün moleküler yapısı ile ilgili sonuçları veriyoruz. AuBr<sub>3</sub> Molekülünün denge yapısı şu şekilde tanımlanır: Molekülün potansiyel enerji fonksiyonu iki durumun hesaba katılmasıyla hesaplanır, (i) statik eşitlik durumuna doğru molekülün enerjisinin minimize edilmesiyle verilen konfigürasyonun optimizasyonu içindir, (ii) sabit enerjide dinamiksel değerlendirmeleri ve titreşimsel frekansların değerlendirilmesi içindir.

Moleküler yapı hesaplamalarımızdaki model parametreleri Tablo 1 'de verilmiştir. Br İyonu kısa-mesafe örtüşme etkileşimlerini içeren parametreler daha önceki alkali halid çalışmalarından [11] alınabilir, metal iyonları için R<sub>i</sub> ve ρ<sub>i</sub> arasındaki ilişki R<sub>M</sub> / ρ<sub>M</sub> =18.6 (Wang Li – Tosi) tutarlılığının olması sağlanmıştır. Sunulan model Au için üç adet uygulanabilen parametre içerir. Bunlar, (i) Au iyonunun iyonik yarıçapı R<sub>M</sub>, (ii) Au iyonunun efektif valansı Z<sub>M</sub>, (iii) Au iyonunun elektriksel polarizibilitesi α<sub>M</sub> dir, α<sub>s</sub> = 0.76 Å<sup>3</sup>/e, α<sub>x</sub> = 1.70 Å<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir [16].

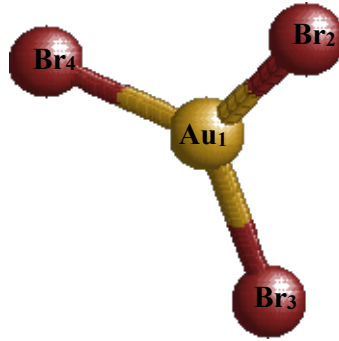
	Z <sub>M</sub>	Z <sub>X</sub>	R <sub>M</sub> (Å)	ρ <sub>M</sub> (Å)	R <sub>X</sub> (Å)	ρ <sub>X</sub> (Å)	C <sub>X</sub> ( eÅ <sup>5/2</sup> )
AuBr <sub>3</sub>	2.847	-0.949	1.16	0.054	1.84	0.258	7.17
Au <sub>2</sub> Br <sub>6</sub>	2.811	-0.937	1.16	0.054	1.84	0.258	7.17

**Tablo1.** Altın bromürler için iyonlararası kuvvet modeli parametreleri [M metal (Au) ve X (Br) halojen iyonunu temsil etmektedir].

İyonlararası kuvvet modeli ile hesaplanmış AuBr<sub>3</sub> 'ün moleküler yapısı Şekil 1 'de görülmektedir. Hargittai ve çalışma grubu Y-şeklindeki yapının AuBr<sub>3</sub> için geçiş durumuna uygun olduğunu göstermişlerdir. Bununla birlikte AuBr<sub>3</sub>, C<sub>2v</sub> düzeni içinde D<sub>3h</sub> trigonal düzlem yapısının bozulması ile Jahn-Teller simetrisinin ilk kuralının sonucu olarak T-şekli yapısına sahiptir. Tablo 2 taban durumu denge yapısında monomer AuBr<sub>3</sub> için bağ uzunlukları ve bağ açıları sonuçları verilmektedir, aynı zamanda bu sonuçlar B3LYP, MP2 ve CCSD(T) metotları ile karşılaştırılmaktadır [1].

Metot	r ( Au <sub>1</sub> -Br <sub>2</sub> )	r ( Au <sub>1</sub> -Br <sub>3</sub> )	r ( Au <sub>1</sub> -Br <sub>4</sub> )	∠Br <sub>2</sub> -Au <sub>1</sub> -Br <sub>3</sub>	∠Br <sub>2</sub> -Au <sub>1</sub> -Br <sub>4</sub>	∠Br <sub>3</sub> -Au <sub>1</sub> -Br <sub>4</sub>
Bu çalışma	2.401	2.431	2.431	120.73	119.59	119.67
B3LYP	2.434	2.432	-	97.20	-	-
MP2	2.413	2.408	-	96.20	-	-
CCSD(T)	2.428	2.426	-	96.20	-	-

**Tablo 2.** Monomerik AuBr<sub>3</sub> için geometriksel parametreler, bağ uzunlukları Å° biriminde, açılar derecedir.



**Şekil 1.** Monomerik altın tribromür  $AuBr_3$  molekülünün moleküler yapısı.

Tablo 2’de görüldüğü gibi iyonlararası kuvvet modeli kullanılarak elde edilen  $AuBr_3$  molekülünün bağ uzunlukları, MP2 metodu sonucundan daha uzundur ( $0.012 \text{ \AA}$  civarında). Sonuçlarımız aynı zamanda Ref.[1]’de verilen B3LYP hesaplama sonuçlarına ve CCSD(T) metotları sonuçlarına da yakındır. Bağ açılarımızda hesaplama metotlarından B3LYP sonucu ile daha iyi uygunluk göstermektedir. Modelimizin  $\angle Br_2-Au_1-Br_3$  açısının, B3LYP metodu sonucundan ortalama  $23^\circ$  daha büyük olduğu, ayrıca  $\angle Br_2-Au_1-Br_3$  açısının MP2 ve CCSD(T) metodu sonuçlarından yaklaşık  $24^\circ$  daha büyük olduğu görülmektedir. Böylece, hesapladığımız bağ uzunlukları ve bağ açıları B3LYP, MP2 ve CCSD(T) sonuçlarıyla uygun olarak değerlendirilebileceği sonucuna varılabilir.

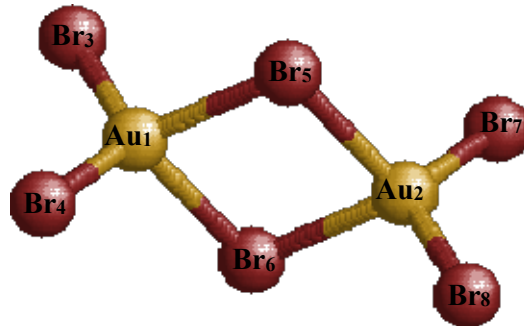
İkinci olarak iyonlararası kuvvet modelini kullanarak elde ettiğimiz dimerik altın tribromürün denge yapısını sunuyoruz, dimerik altın tribromürün denge yapısını, monomer için uygulanan teorinin bütün aşamalarını takip ederek hesaplamış bulunmaktayız. Ayrıca, iyonlararası kuvvet modeli parametrelerinin kullanılması ile hesaplanan titreşim frekansları, Magdolna Hargittai ve çalışma grubundan [1] aldığımız değerlere fit edilmiştir. Böylece, Magdolna Hargittai ve çalışma grubundan [1] aldığımız değerlerin,  $AuBr_3$  ve  $Au_2Br_6$  taban durumu molekülleri için hesapladığımız titreşim frekanslarıyla uygunluk gösterdiğini görmekteyiz. Frekanslar,  $AuBr_3$  için  $A_1$  simetrisinde  $283 \text{ cm}^{-1}$  ve  $Au_2Br_6$  için  $A_g$  simetrisinde  $276 \text{ cm}^{-1}$  hesaplanmıştır.  $Au_2Br_6$  için atomların numaralandırılmaları ve moleküler modeli Şekil 2’de verilmektedir. Ayrıca,  $Au_2Br_6$  için sonuçlarımızı  $D_{2h}$  simetrisindeki sonuçlar ile Tablo 3 ’de karşılaştırmaktayız .

Metot	$r (Au_1-Br_5)$	$r (Au_1-Br_3)$	$Au_1...Au_2$	$\angle Br_3-Au_1-Br_4$	$\angle Br_5-Au_1-Br_6$
Bu çalışma	2.445	2.648	3.872	77.93	102.06
B3LYP	2.452	2.566	3.747	86.2	91.1
MP2	2.433	2.526	3.649	87.5	90.7
CCSD(T)	2.445	2.550	3.844	87.4	90.5

**Tablo 3.** Dimerik  $Au_2Br_6$  için geometriksel Parametreler, bağ uzunlukları  $\text{\AA}$  biriminde, açılar derecedir.

Tablo 3’de görüldüğü gibi  $Au_2Br_6$  molekülünün iyonlararası kuvvet modeli ile bulduğumuz hem bağ uzunlukları hem de bağ açıları için elde ettiğimiz sonuçların Ref.[1]’de B3LYP, MP2 ve CCSD(T) metotları ile bulunan sonuçlara yakın olduğu görülmektedir. Bu çalışmada bulunan  $r (Au_1-Br_3) = 2.648 \text{ \AA}$  bağ uzunluğu, B3LYP metodu sonucu olan  $2.566 \text{ \AA}$  sonucundan  $0.082 \text{ \AA}$  daha büyüktür. Yine bu çalışmada, iyonlar arası kuvvet modeli ile bulunan  $r (Au_1-Br_5) = 2.445 \text{ \AA}$  bağ uzunluğu, CCSD(T) sonucu olan  $2.445 \text{ \AA}$  bağ uzunluğu sonucu ile aynıdır. Bu çalışmada bulduğumuz bağ açıları sonuçları B3LYP sonuçları ile uygunluk göstermektedir. Bu çalışmada bulunan  $\angle Br_3-Au_1-Br_4 = 77.93$  bağ açısı, B3LYP sonucu olan  $86.2$  dereceden yaklaşık  $8$  derece daha küçüktür. Yine bu çalışmada bulunan  $\angle Br_5-Au_1-Br_6 = 102.06$  derece bağ açısı B3LYP

sonucu olan 91.1 dereceden yaklaşık olarak 10 derece daha büyüktür. Böylece, iyonlararası kuvvet modelinin altın halojenürlerinin moleküler yapılarını çalışmak için uygun bir model olduğu sonucuna varabiliriz.



Şekil 2. Dimerik altın tribromür  $Au_2Br_6$  molekülünün moleküler yapısı.

TAPT tipi potansiyel katı iyon modeli, moleküler hesaplamalarda kullanılan parametreler ile hesaplanır. Bu hesaplamalarda (moleküler ve iyonlararası), katyon polarizibilitesine karşı gelen anyona göre çok küçük olduğu durumlarda katyon polarizibilitesinin değerini ihmal edilebilir.

Model potansiyellerimizin katı moleküler yapıda olduğu söylenebilir. Etketif valansın sıvı yapıyı etkilediği bilinir. Bu nedenle iyonlararası kuvvet modelini kullanarak  $AuBr_3$  için gösterilen ilk moleküler yapı olduğu sonucuna varabiliriz.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, altın tribromür için basit bir iyonik model (İyonlararası Kuvvet Modeli) sunuyoruz. Sonuçlarımız,  $AuBr_3$  için bir iyonik modelin faydalı bir düşünce olduğunu göstermektedir.  $AuBr_3$  'ün bu moleküler ve sıvı yapısının RIM potansiyellerinden elde edilebildiği görülebilir. Bununla birlikte iyonlararası kuvvet modeli Jahn-Teller biçimi bozulmuş molekülleri için de elde edilebilir. Sıvı yapı, efektif valansın etkileri hesaba katıldığında efektif potansiyellerden elde edilebilir. İyonlararası Kuvvet Modeli ile bulduğumuz bağ uzunluğu ve bağ açıları sonuçları B3LYP, MP2 ve CCSD(T) metotları sonuçları ile uyum içinde olduğu görülmektedir.

İyonlar arası Kuvvet Modeli kullanılarak yakın zamanda yapılmış ve yayınlanmış çalışmalar, altın triflorürün monomerik ve dimerik denge durumu moleküler yapıları (  $AuF_3$  ,  $Au_2F_6$  ) [17] ve monomerik kadmiyum-dihalidlerin moleküler yapıları (  $CdCl_2$  ,  $CdBr_2$  ,  $CdF_2$  ,  $CdI_2$  ) [18] çalışmaları da bu çalışmadaki gibi uyumlu sonuçlar vermiştir. Mayıs 2026 da "Journal of Natural Sciences Research" dergisine gönderilmiş inceleme aşamasında bir çalışma da "monomerik ve dimerik altın triklorürün moleküler yapıları" adında bir çalışma bulunmaktadır [19].

#### References

- [1] Axel Schulz and Magdolna Hargittai, Chem. Eur. J., 7, No. 17, 3657-3670 (2001)
- [2] M. Hargittai, A. Schulz, B. Reffy, M. Kolonits, . A. Jahn, J. Am. Chem. Soc. **123**, 1449 (2001)
- [3] P.Schwerdtfeger,J.S. McFeaters,M.J.Liddell,J.Hrusak, H.Schwarz, J.Chem. Phys. **103**, 245 (1995).
- [4] P. Schwerdtfeger, H. Schmidbaur, Z. Anorg. Chem. **626**, 374 (2000)
- [5] A. Schulz, M. Hargittai, Chem. Eur. J. 7, 3657 (2001)
- [6] H. A. Jahn, E. Teller, Proc. R. Soc. London, Sect. A. **161**, 220 (1937).
- [7] S. Komiya, T. A. Albright, R. Hoffmann, J. K. Kochi, J. Am. Chem. Soc. **98**, 7255 (1976).

- [8] Z. Akdeniz, Z. Çiçek, M. P. Tosi, Chem. Phys. Lett. **308**, 479 (1999).
- [9] Z. Akdeniz, M. Çalışkan, Z. Çiçek, M. P. Tosi, Z. Naturforsch. **55a**, 575 (2000).
- [10] Z. Akdeniz, M. Gaune-Escard, M. P. Tosi, Z. Naturforsch. **56a**, 381 (2001).
- [11] Z. Akdeniz, A. Karaman, M. P. Tosi, Z. Naturforsch. **56a**, 376 (2001).
- [12] W. R. Busing, Trans. Amer. Crystallogr. Ass. **6**, 57 (1970).
- [13] H.Gurbuz, M.Çalışkan,S.S.Dalgıç, Proceed. of TFD-22, 14-17 Sept. Bodrum-Turkey, 01-SB-26
- [14] L.E. Gonzalez, A.Meyer, M.P Iniguez, D.J.Gonzalez,M.Silbert, Phys. Rev. **E47**, 4120 (1993).
- [15] S. S. Dalgic, H. Gurbüz, M. Caliskan, O. Ozgec, J. Opto. Electron. Adv. Mater. **7**, 2075 (2005).
- [16] Z. Akdeniz, Z. Çiçek, M. P. Tosi, Z. Naturforsch. **55a**, 861 (2000).
- [17] Mustafa Çalışkan, Journal of Natural Sciences Research, Vol.14, No.13, 21-25 (2023).
- [18] Mustafa Çalışkan, International Journal of Scientific and Technological Research, Vo.5, No.8, 90-95 (2019).
- [19] Mustafa Çalışkan, Journal of Natural Sciences Research, under reviewing (May 2026).