

## دراسة فيزيائية لفراتيت الباريوم $BaFe_{12-x}Co_xO_{19}$ وتأثير الاستبدال بالكوبالت على خصائص الطور M

بدر الأعرج\*

سلامة ابو الشمالات\*\*

زينة جامع\*\*\*

(تاريخ الإيداع ٢٣/١٢/٢٠٢٥ - تاريخ النشر ١٧/٢/٢٠٢٦)

□ ملخص □

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم التأثيرات البنوية الناتجة عن الاستبدال التركيبي في مركب  $BaFe_{12-x}Co_xO_{19}$  ضمن المجال ( $x = 0.0-1.0$ ) باستخدام تقنية حيود الأشعة السينية (XRD). وقد أظهرت جميع العينات الانعكاس نفسه عند المستوى البلوري (114)، في حين لوحظت تغييرات واضحة في زاوية الحيود  $2\theta$  واتساع القمة مع تغير قيمة  $x$ . انخفضت زاوية  $2\theta$  تدريجياً مع زيادة محتوى الاستبدال، وهو ما يشير إلى حدوث توسع طفيف في المسافة البنوية؛ إذ ارتفعت من  $2.945 \text{ \AA}$  عند  $x = 0.0$  إلى  $2.965 \text{ \AA}$  عند  $x = 1.0$ . ويؤكد ذلك دخول أيونات  $Co^{2+}$  إلى البنية واستبدالها لأيونات  $Fe^{3+}$ ، مما يؤدي إلى تمدد في الشبكة البلورية وفقاً لقانون براغ. كما أظهرت الحسابات ثباتاً شبه كامل في ثابت الشبكة  $a$ ، يقابله انخفاض محدود في ثابت الشبكة  $c$ ، الأمر الذي نتج عنه تراجع بسيط في حجم الخلية البلورية. إضافة إلى ذلك، لوحظ ازدياد مستمر في قيمة FWHM ضمن المجال (0.195-0.275) مع ارتفاع  $x$ ، مما يشير إلى زيادة الإجهادات الميكروية وانخفاض درجة انتظام الشبكة. وبحسب معادلة شيرر، تبين أن الحجم البلوري  $D$  ينخفض بوضوح من حوالي 42 نانومتر عند  $x = 0.0$  إلى نحو 31 نانومتر عند  $x = 1.0$ .

**الكلمات المفتاحية:** فراتيت الباريوم السداسي، أكسيد الكوبالت، كربونات الباريوم، XRD، الاستبدال الأيوني

\* بدر الأعرج استاذ قسم الفيزياء كلية العلوم جامعة اللاذقية ،سوريا

\*\*سلامة ابو الشمالات استاذ قسم الفيزياء كلية العلوم جامعة اللاذقية، سوريا

\*\*\*زينة جامع ماجستير قسم الفيزياء كلية العلوم جامعة اللاذقية،سوريا

## Physical Study of Barium Ferrite $\text{BaFe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ and the Effect of Cobalt Substitution on the Properties of the M Phase

**Badr Al-Aaraj\***

**Sallamah Abou Alshamlat\*\***

**Zeina jamea\*\*\***

(Received 23/12/2025. Accepted 17/2/2026)

### □ABSTRACT □

This study aims to evaluate the structural effects resulting from the compositional substitution in the compound  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$  within the range ( $x = 0.0-1.0$ ) using X-ray diffraction (XRD) analysis. All samples exhibited the same reflection at the crystallographic plane (114), while noticeable changes were observed in the diffraction angle  $2\theta$  and the peak broadening as  $x$  varied.

The  $2\theta$  angle gradually decreased with increasing substitution content, indicating a slight expansion in the interplanar spacing, which increased from  $2.945 \text{ \AA}$  at  $x = 0.0$  to  $2.965 \text{ \AA}$  at  $x = 1.0$ . This confirms the incorporation of  $\text{Co}^{2+}$  ions into the structure and their substitution for  $\text{Fe}^{3+}$ , resulting in lattice expansion in accordance with Bragg's law.

Calculations also showed an almost constant value of the lattice parameter  $a$ , accompanied by a slight decrease in the parameter  $c$ , which led to a small reduction in the unit cell volume. Additionally, a continuous increase in the FWHM value was observed in the range (0.195–0.275) as  $x$  increased, indicating enhanced microstrain and reduced lattice order. According to Scherrer's equation, the crystallite size  $D$  showed a clear decrease from about 42 nm at  $x = 0.0$  to approximately 31 nm at  $x = 1.0$ . Overall, these

**Key words:** Barium hexferrite, Barium Carbonate ,Cobalt oxide,XRD,ionic substitution.

---

\* Prof, Department of Physics, Faculty of Science, Lattakia University, Syria.

\*\* Prof, Department of Physics, Faculty of Science, Lattakia University, Syria

\*\*\* Master's degree in Physics - faculty of sciences – Lattakia University –Syria.

## 1. المقدمة:

تحظى دراسة البنية البلورية للمواد السيراميكية باهتمام متزايد في مجالات العلوم التطبيقية، إذ تمثل الأساس لفهم السلوك الفيزيائي والميكانيكي والكهربائي للمواد. وقد أظهرت الدراسات الحديثة أن الخصائص البنيوية الدقيقة، مثل حجم البلورات، وانتظام الشبكة، والإجهادات الميكروية، تلعب دورًا حاسمًا في تحديد كفاءة المواد في التطبيقات الصناعية، مثل الخلايا الشمسية، المحفزات، المواد النانوية، والمواد السيراميكية الوظيفية. وتعد تقنية حيود الأشعة السينية X-ray Diffraction (XRD) أحد أكثر الأساليب العلمية موثوقة للكشف عن الترتيب الذري داخل الشبكة البلورية، لما توفره من قدرة على قياس ثوابت الشبكة، وتحديد الطور البلوري، ورصد الانزياحات الطيفية الناتجة عن عمليات الاستبدال أو التطعيم. [1,2]

وتشير نتائج الأدبيات الحديثة إلى أن الاستبدال الأيوني من أجل تراكيز منخفضة يؤدي غالبًا إلى تغيرات ملحوظة في شكل قمم الحيود، تشمل الانزياح الزاوي واتساع القمم (FWHM) Full Width at Half Maximum، وهو ما يرتبط مباشرة بتغير حجم البلورات ونشوء إجهادات داخلية ناتجة عن عدم تطابق الأحجام الذرية بين العناصر المستبدلة. كما أكدت العديد من الدراسات أن إدخال شوائب أو عناصر بديلة داخل الشبكة يمكن أن يؤثر في ثوابت المحاور البلورية، مما يؤدي إلى تمدد أو انكماش طفيف في الخلية البلورية تبعًا لطبيعة العنصر المضاف ونصف قطره الأيوني. ومع ذلك، فقد أظهر عدد كبير من المواد المدروسة حديثًا احتفاظًا واضحًا بالطور البلوري الأساسي رغم التغييرات التركيبية، مما يشير إلى قدرة الشبكة على استيعاب الاستبدال ضمن حدود معينة دون حدوث تحولات طورية. [3,5]

وتبرز أهمية هذه النتائج في تعزيز فهم العلاقة بين التركيب والبنية، وهو ما يمهد لتطوير مواد ذات خصائص محسنة من خلال التحكم الدقيق في نسب الاستبدال أو التطعيم. ومن هذا المنطلق، تأتي هذه الدراسة لتسليط الضوء على تأثير الاستبدال الأيوني على خصائص البنية البلورية من خلال تحليل لنتائج XRD، مع التركيز على ثوابت الشبكة، حجم البلورات، والانزياحات الزاوية. تُعد الفريتات السداسية من أهم المواد المغناطيسية ذات التطبيق الواسع في مجال الإلكترونيات الدقيقة، والاتصالات، والأنظمة الذكية، لما تتمتع به من خصائص مغناطيسية وكهربائية فريدة. من بين هذه الفريتات فرايت الباريوم السداسي في الطور M الذي يعد من المواد ذات الأهمية الكبيرة نظرًا لبنيته البلورية المستقرة وخصائصه الفيزيائية المتميزة، مثل المغناطيسية العالية، المقاومة الكهربائية المرتفعة، ودرجة حرارة كوري المرتفعة ( $450^{\circ}\text{C}$ )، ما يجعله مناسبًا في تطبيقات الترددات العالية، والهوائيات الذكية، والعوازل المغناطيسية. يتبلور فرايت الطور M في بنية سداسية من النظام البلوري الفراغي  $P6_3/mmc$ ، ويتكون من وحدات متكررة من رباعيات وسداسيات التناسق لأيونات الحديد، موزعة بطريقة معقدة في خمسة مواقع بلورية مختلفة، ما يمنح المادة خصائص مغناطيسية ناتجة عن تأثير التبادل بين مواقع الحديد المغناطيسية. إن توزيع الأيونات داخل هذه المواقع مسؤول عن العزم المغناطيسي الكلي العالي، وهي خاصية أساسية في تصميم مكونات التردد العالي مثل المرشحات، والمواد الممتصة للموجات الميكروية. [4,6]

يتميز الطور M بسهولة تحضيره واستقراره البنيوي في مدى واسع من درجات الحرارة، إضافة إلى خصائصه المغناطيسية التي يمكن تحسينها بشكل إضافي عبر عمليات الاستبدال بأكاسيد معدنية مثل  $\text{CoO}$  و  $\text{ZnO}$ . ونظرًا لخصوصية تطبيقات هذا الطور في عدة مجالات، بات من الضروري إجراء دراسات تحليلية موسعة حول آلية تشكله، بنيته البلورية، خصائصه المغناطيسية وسلوكه الكهربائي... [7]

سيتم التركيز على الإشابة بأيونات الكوبالت  $Co^{2+}$  لأن ذلك يساهم في تحسين العزم المغناطيسي ، و درجة التبلور ، والمغناطيسية المتبقية، ومعامل التثبيت المغناطيسي للمادة المدروسة. تهدف هذه الدراسة إلى تحضير طور M من فرايت الباريوم باستخدام تقنية التفاعل الصلب، مع دراسة تأثير الاستبدال بأكسيد الكوبالت على الخواص البنوية للمادة.

## 2. الجزء النظري :

### 1.2 الفرايتات السداسية (Hexaferrites):

الفرايتات السداسية هي مواد مغناطيسية خزفية تحتوي على أكاسيد معدنية، وتتميز بوجود وحدات متكررة من أكسيد الحديد وأكاسيد معدنية كالباريوم أو السترونتيوم. تتنوع الفرايتات السداسية حسب بنيتها إلى عدة أطوار بلورية منها M, Y, W, X, Z، ولكل طور خصائص مغناطيسية وكهربائية متميزة. تمتاز فرايتات الطور M بثباتها البنوي ومغناطيسيتها العالية مقارنة بالأطوار الأخرى، حيث تتكون من 64 أيوناً في الخلية البلورية، تتوزع على مواقع رباعية وسداسية. يتكوّن الطور M من تعاقب لطبقات S-R-S\*، حيث تشير S إلى طبقة شبيهة بـ Spinel، و R إلى طبقة مكونة من  $Ba^{2+}$  وأيونات  $Fe^{3+}$  في مواقع معينة. هذا الترتيب الطبقي يُساهم في توليد العزم المغناطيسي العالي. [8,9]

### 2.2 الخصائص المغناطيسية لفرايت M:

يعتبر الطور M مادة مغناطيسية من النوع القاسي (hard magnetic material)، ويتميز بخصائص مثل:

تشبع مغناطيسي (Ms) عالٍ يصل حتى 70 emu/g. مقاومة مغناطيسية (Hc) كبيرة، ما يجعله مناسباً للذاكرة المغناطيسية الدائمة. درجة حرارة كوري مرتفعة ( $T_c > 450^\circ C$ )، ما يدل على استقراره المغناطيسي في البيئات عالية الحرارة.

عزم مغناطيسي نوعي كبير ناتج عن ترتيب أيونات الحديد في البنية السداسية. [5,10,11,12]

### 3.2 الخواص الكهربائية والسلوك شبه الموصل:

على الرغم من كون فرايت M مادة خزفية، إلا أنها تُظهر سلوكاً شبه موصل في درجات حرارة معينة، حيث تُعزى التوصيلية إلى قفز الإلكترونات بين أيونات الحديد الثلاثي ( $Fe^{3+}$ ) والثنائي ( $Fe^{2+}$ ) ضمن الشبكة البلورية. حيث الناقلية الكهربائية تعتمد على درجة الحرارة والتردد، وتتبع غالباً نموذج قفز الإلكترونات (Polaron hopping) أو نموذج الحواجز الحبيبية (Grain Boundary Model) في درجات حرارة منخفضة. [13,14,15]

### 4.2 طرق التحضير:

تتعدد طرق تحضير فرايت M، منها:

• التفاعل الصلب (Solid State Reaction): وهي الطريقة الأبسط والأكثر استخداماً

صناعياً.

• الترسيب المشترك (Co-precipitation).

• طريقة السول-جيل (Sol-Gel).

### • طريقة الاحتراق الذاتي (Auto-combustion).

تم اختيار طريقة التفاعل الصلب في هذا البحث نظرًا لفعاليتها في الحصول على أطوار نقية وخصائص قابلة للتكرار، مع قابلية للتحكم بدرجة حرارة التكلس لتحسين الخصائص النهائية. [1]

#### هدف البحث:

يهدف هذا البحث إلى تحضير فرايت الباريوم السداسي في طور M و الاستبدال بأكسيد الكوبالت (CoO) باستخدام طريقة التفاعل الصلب، وذلك بهدف دراسة تأثير الاستبدال على البنية البلورية بغرض تحسين أداء المادة في التطبيقات التقنية مثل الهوائيات الذكية والمواد الممتصة للموجات الكهرومغناطيسية.

#### أهمية البحث:

تتبع أهمية هذا البحث من التزايد المستمر في الطلب على المواد المغناطيسية المتقدمة ذات الأداء العالي في تطبيقات الهوائيات الذكية، وأنظمة الاتصالات، والمجالات الكهرومغناطيسية. يُعد فرايت الباريوم في طور السداسي M من المواد الواعدة بفضل استقراره الحراري، ومغناطيسيته العالية، ودرجة حرارة كوري المرتفعة. إلا أن تحسين خصائصه الفيزيائية، خصوصًا المغناطيسية والكهربائية، يتطلب إجراء تعديلات تركيبية دقيقة.

إن إشابة فرايت طور M بأكسيد الكوبالت (CoO) يفتح المجال لضبط الخواص المغناطيسية مثل التشبع والعزم المغناطيسي، بالإضافة إلى تحسين التوصيلية الكهربائية والسلوك شبه الموصل، ما يعزز من كفاءة المادة في التطبيقات العملية.

يساهم هذا البحث في تقديم فهم أعمق للعلاقة بين البنية البلورية والإشابة وبين الخصائص الفيزيائية النهائية، مما يساعد في تصميم مواد مغناطيسية موجهة ذات خصائص محسنة، قابلة للتوظيف في مجالات التقنية الحديثة والطيف الميكروني.

### 3. طرائق البحث ومواده:

#### 1.3 المواد الأولية:

تم استخدام مواد كيميائية أولية عالية النقاوة ( $\geq 99\%$ ) على النحو التالي:

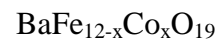
كربونات الباريوم ( $BaCO_3$ ) - كمصدر لأيونات الباريوم.

أكسيد الحديد الثلاثي ( $Fe_2O_3$ ) - كمصدر لأيونات الحديد.

أكسيد الكوبالت الثنائي (CoO) - لإشابة الفرايت وتعويض جزء من  $Fe^{3+}$  بأيونات  $Co^{2+}$ .

#### 2.3 النسبة المولية:

تم اعتماد الصيغة النظرية لفرايت الباريوم المشاب على الشكل:



#### 3.3 طريقة التحضير: السيراميكية الصلبة:

تم تحضير العينات باستخدام الطريقة السيراميكية التقليدية (Solid State Reaction Method) كما يلي:

1. الوزن والتحضير: تم وزن المركبات الأولية حسب النسب المولية المحددة، ثم خلطها ميكانيكيًا باستخدام

هاون خزفي لمدة 6 ساعات لضمان تجانس الخليط.

2. إضافة وسط ناقل: أضيفت كمية قليلة من كحول الإيثانول كمذيب مساعد لتحسين التجانس وتسهيل الطحن

3. **التجفيف:** تم تجفيف الخليط الناتج في فرن بدرجة حرارة 100 °C لمدة 10-12 ساعة لإزالة المذيب العضوي بالكامل.

4. **التكلس الأولي:** أُجري تكلس أولي عند درجة حرارة 900°C لمدة ساعتين لتحفيز التفاعل بين الأكاسيد وتشكيل الطور الأولي.

### النتائج والمناقشة:

#### الخواص البلورية:

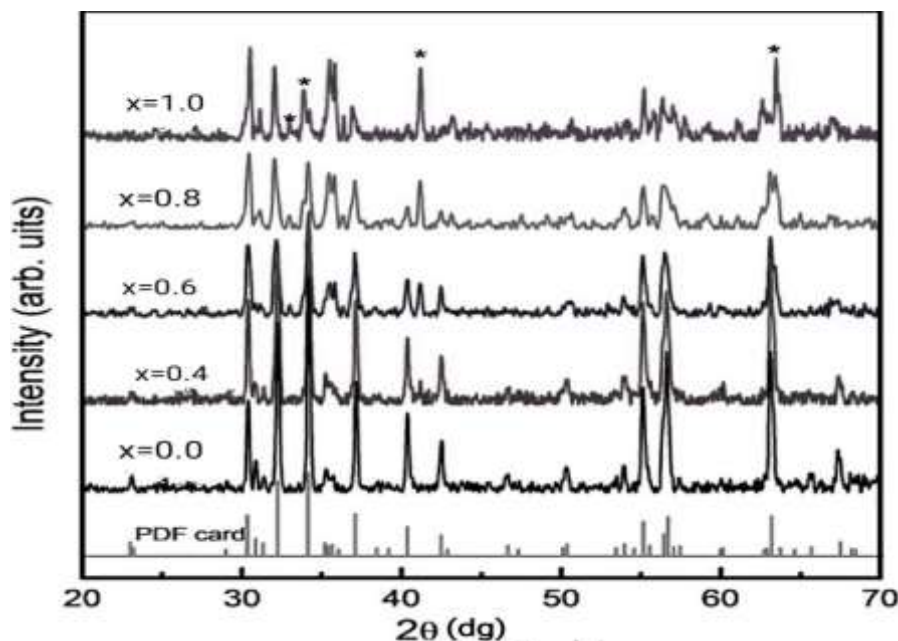
تم استخدام جهاز قياس انعراج الأشعة X- من نوع Philips-1840 الموجود في قسم الفيزياء كلية العلوم-جامعة حمص، الذي يعمل بمصعد من الكوبالت  $\text{CoK}_\alpha$  وبطول موجة  $\lambda=1.7889 \text{ \AA}$  للتأكد من البنية البلورية للعينات، ودراسة الأبعاد البلورية للفرايت السداسي النقي، و المشاب بأكسيد الكوبالت والمحضر بالطريقة السيراميكية، حيث تمكنا هذه التقنية من تحديد نمط تبلور المركب المدروس، وحساب قرائن ميلر له، وإيجاد ثوابت الشبكة البلورية وحساب حجم الحبيبة، بالإضافة لإعطاء معلومات عن نقاوة المادة ووجود شوائب في الشبكة البلورية.

يعتمد الجهاز على هندسة Bragg\_Brentano، حيث تم تحليل مخطط XRD بطريقة Rietveld

بمساعدة برنامج High Score Plus لتحديد بارامترات الشبكة البلورية.

يوضح الشكل (1) مخطط انعراج الأشعة السينية ضمن المجال  $2\theta = 20^\circ - 70^\circ$  وبخطوات  $0.02^\circ$  وزمن خطوة 2\_4

sec للمركب  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ .



الشكل (1) مخطط الانعراج XRD لـ  $BaFe_{12-x}Co_xO_{19}$  ( $x=0.0, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ )

يظهر مخطط XRD أن النمط الأساسي في جميع العينات يتوافق تماما" مع طور  $BaFe_{12}O_{19}$ . من أجل  $x=1.0$  تظهر قمم موسومة بنجمة (\*) تظهر خاصة قرب  $63^\circ, 36^\circ$  تشير إلى الطور الثانوي المرتبط بالكوبالت غالبا"  $Co_3O_4$  أو  $CoFe_2O_4$  (تراكم لأكسيد الكوبالت/سبينل غير مدمج في شبكة BaM). القمم الرئيسية (60-64), (29-35) هي قمم BaM الأساسية. تظهر في كل العينات مع اختلاف طفيف في الشدة والأتساع عند تغير نسبة الكوبالت.

جدول (١) قيم ثوابت الشبكة البلورية للمركب  $BaFe_{12-x}Co_xO_{19}$  عند المستوي البلوري (114) للعينات المدروسة:

x	2θ لأبرز قمة (deg)	المستوي البلوري (hkl)	θ(deg)	sin θ	a (Å) ثابت الشبكة	c (Å) ثابت الشبكة	FWHM (deg) العرض النصف الكامل	V (Å) <sup>3</sup>	d (Å)	D (nm) الحجم البلوري	c/a
o.o	30.30	(114)	15.500	0.2616	5.886	23.168	0.195	693.5	2.945	42.1	3.936
0.4	30.20	(114)	15.100	0.2607	5.891	23.157	0.225	692.9	2.956	36.8	3.930
0.6	30.18	(114)	15.090	0.2606	5.893	23.149	0.240	692.5	2.958	34.5	3.928
0.8	30.15	(114)	15.075	0.2604	5.896	23.140	0.258	692.1	2.961	33.0	3.926
1.0	30.10	(114)	15.000	0.2601	5.899	23.132	0.275	691.6	2.965	31.4	3.922

تم الحصول على بارامترات الشبكة a, c، وحسبت النسبة c/a للمركب كنسبة محورية وتم حساب حجم وحدة الخلية V و  $d_{hkl}$  باستخدام العلاقتين الآتيتين:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left( \frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (1)$$

حيث d التباعد البلوري (المسافة بين مستويين بلوريين متتاليين).  
a, c ثوابت الشبكة البلورية، h, k, l قرائن ميللر.

$$V = \frac{\sqrt{3}}{2} a^2 c \quad (2)$$

ويحدد حجم الحبيبة من المستوي البلوري (114) باستخدام علاقة Debye-Scherre الآتية:

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (3)$$

حيث:  $\theta$ : زاوية الانعراج،  $\lambda$ : طول موجة الأشعة السينية،  $\beta$  تمثل عرض قمة الحيود عند منتصف الشدة

العظمى وتقدر بالراديان ،  $k=0.94$

تم حساب d من معادلة براغ:

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (4)$$

### تفسير النتائج:

المسافة البينية d: ترتفع بشكل تدريجي من 2.945 Å عند  $x=0.0$  إلى 2.965 Å عند  $x=1.0$  يؤكد دخول  $Co^{2+}$  إلى البنية واستبدال  $Fe^{3+}$  بالتالي تمدد الشبكة البلورية.

الحجم البلوري D: يتناقص بوضوح مع زيادة x من أجل

$x=0.0$  تكون 42.1nm ومن أجل  $x=1.0$  تصبح 31.4nm

يعني هذا الانخفاض التدريجي أن البلورات تصبح أصغر حجماً عند زيادة CoO ويعزى ذلك إلى أن زيادة تركيز الشوائب أو العناصر المضافة يجعل نمو الحبيبات أصعب بالتالي يقل الحجم البلوري.

تغير عرض القمة FWHM: يرتفع بشكل واضح بين  $x=0.0$  و  $x=1.0$  وهذه الزيادة تدل على

صغر الحجم البلوري أو زيادة الإجهادات البلورية (microstrain).

حجم الخلية V: قيم حجم الخلية ثابتة مع تغير طفيف وهذا يدل أن التغيرات في ثابتي الشبكة a,c

متوازنة لذلك حجم الخلية لا يتغير بشكل كبير.

### الاستنتاجات:

تم تحضير الفرابت السداسي  $BaFe_{12-x}Co_xO_{19}$  المشاب بالنسب (1,0.8,0.6,0.4,0.2,0.0) وتم التحقق من أن العينات المحضرة حافظت على البنية السداسية M-type Hexaferrite مع وجود انزياح طفيف في زوايا الحيود مما أدى إلى تغير ملحوظ في قيم ثوابت الشبكة البلورية a,c وفي حجم خلية الوحدة V حيث يرتبط هذا التغير مباشرة بالانزياح في الزوايا ويؤثر بشكل مباشر على المسافات بين الأيونات المغناطيسية

(Co-O-Co) و (Fe-O-Fe) وبالتالي يؤثر على التبادل المغناطيسي (Super exchange

(Interaction).

كما أن ثوابت الشبكة تتغير خطياً مع زيادة نسبة الاشابة، وعرض القمة عند المنتصف FWHM

ازداد بزيادة نسبة الاشابة حيث أنها تؤثر على نمو الحبيبات وهذا مؤشر على نقصان الحجم الحبيبي للمادة.

## التوصيات:

- دراسة الخواص المغناطيسية التفصيلية (VSM): إجراء قياسات لبيانات دورة البطء المغناطيسي (Hysteresis Loop) لتحديد تأثير الاشابة بالكوبالت على كل من مغناطيسية التشبع والقوة القسرية.
- فحص المورفولوجيا وحجم الحبيبات بشكل مباشر باستخدام مجهر المسح الإلكتروني SEM أو مجهر النفاذية الإلكتروني TEM، حيث أن التحكم في الحجم الحبيبي الذي حسب من XRD يعد أساساً لتحسين الخواص المغناطيسية للمواد ذات البنية السداسية.
- دراسة الخواص الكهرومغناطيسية: بما أن فرايت الباريوم مادة مغناطيسية بالتالي من المهم دراسة خصائصه العازلة عند ترددات عالية حيث أن دراسة ثابت العزل الكهربائي ومعامل الفقد لتساعد في تقييم امكانية استخدام المادة في تطبيقات الامتصاص الكهرومغناطيسي.
- استخدام طرق تحضير أخرى لدراسة المركبات المحضرة.

## المراجع:

- [1] Crawled. *A comparative approach for estimating microstructural characteristics of BaTi<sub>1-x</sub>Zr<sub>x</sub>O<sub>3</sub> (0.0 ≤ x ≤ 0.3) nanoparticles via X-ray diffraction patterns*. Journal of Sol-Gel Science and Technology. 2024;110:887–899
- [2] Tran T.A., Tran H.C., Nghiem N.T., et al. *Effect of doping Mn ion on the crystal structure and cation distribution in Co<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> compounds*. Journal of Materials Science: Materials Engineering. 2025
- [3] Ramadan R. *Zinc-doped hexaferrite exhibits altered physical properties in the presence of both Dy and Zn ions*. Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2024;35:1402
- [4] *Size-strain distribution analysis from XRD peak profile of (Mg, Fe) co-doped SnO<sub>2</sub> nanoparticles fabricated using chemical co-precipitation route*. Ceramics (International). 2024;50(21)
- [5] Amrit P. Kafle, Winnie Wong-Ng, Vladimir Oleshko, et al. *Crystal chemistry and ionic conductivity of garnet-type solid-state electrolyte*. Powder Diffraction. 2024
- [6] Liu Jin, Wang Qiannan, Li Jiangtao. *Improvement of Lattice Parameter Accuracy in Single Crystal XRD Based on a Laser-Induced X-Ray Source*. Chinese Journal of High Pressure Physics. 2025
- [7] *Coupling Rietveld refinement of X-ray diffraction data and reverse Monte Carlo analysis of extended X-ray absorption fine structure spectra*. Journal of Materials Research. 2025
- [8] *Interpretable X-ray diffraction spectra analysis using confidence-evaluated deep learning enhanced by template element replacement*. NPJ Computational Materials. 2025
- [9] H. G. MOHAMMED, Th. M. B. ALBARADY, H. K.M. ALJOTHERY, M. MUSTAPH, N.M. SUTAN, *A study of Crystalline texture and anisotropic properties of hexagonal BaFe<sub>12</sub> O<sub>19</sub> Sintered by in-situ magnetic-anisotropy spark plasma Sintering (MASPS)*, 2022, 553
- [10] S.H.MAHMOOD, M.D.ZAQSAW, O.E.MOHSEN, A.AWADALLAH, IBSOUL, M.AW AWDEH, Q.I MOHAIDAT. *Modification of the Magnetic Properties of CO<sub>2</sub> Hexaferrites by Divalent and Trivalent Metal Substitutions*, Solid State Phenomena, 241, 2016, P93\_125.

- [11] S.A MATHEWS, D.R. BABU, *Analysis of role of M.type hexaferrite-based materials in electromagnetic interference sheilding*, Current Applied physics, 2021,29,. 39-53.
- [12] D.LISJAK,A.MERTELJ,*Anisotropic Magnetic nanoparticles:Areview of their properties,Syntheses and potential applications*,95,2018,P286\_328.
- [13] B.M.ALAARAJ,L.M.ISMAEEL,*Study Of The Reaction Kinetics Of Barium Titanate By Heat Treatment*,Tishreen University Journal,44(3),2022,29\_39.
- [14] G.R. GORDANI,A.GHASEMI,A.SAIDI., *2014-Enhanced magnetic properties of sub-stituted Sr-hexa ferrite nanoparticles synthe sized by co-precipitation method*,Ceram.Int.40:4945–4952.
- [15] PING XU,XIJIANG HAN, MAOJU WANG,J. Phys. Chem. C. *Synthesis and Characterization of Novel Coralloid Polyaniline/BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> Nanocomposites*, - 2007 , 111 ;16,5866-5870.