

دراسة الخصائص البنيوية والميكانيكية وسرعة وتردد الأمواج فوق الصوتية المتولدة من مركب الانضغاط المغناطيسي $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ عند النسب $x = (0.0, 1.0)$

د. كمال محمود عفيصه*

د. محمد ياسين صبيح**

شوكت شاهين شاهين***

(تاريخ الإيداع 9 / 3 / 2020. قُبِلَ للنشر في 7 / 9 / 2020)

□ ملخص □

ينضمّن هذا البحث تحضير مُركب الانضغاط المغناطيسي $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ عند النسب $x = (0.0, 1.0)$ بالطريقة السيراميكية عند درجة حرارة تليد 1200°C . دُرست بعض خصائصه البنيوية بتقنية انعراج الأشعة السينية XRD، والميكانيكية بتقنية تحويل فورييه للأشعة تحت الحمراء FT-IR. وذلك بهدف تحديد سرعة وتردد الأمواج التي يمكن توليدها باستخدام المُركب المُحضّر.

تُظهر النتائج تشكّل بنية السبينيل المكعب المميز للفرابت، وأن متوسط أبعاد الحبيبة من مرتبة الـ nm. كما لاحظنا عند النسبة $x=1.0$ زيادة في قيم كل من متوسط أبعاد الحبيبة وثابت الشبكة البلورية، وبالمقابل نقصان قيم كل من الكثافة، ومعامل يونغ للمُركب.

تُبين النتائج أيضاً أن تردد الأمواج فوق الصوتية التي يمكن توليدها يقع ضمن المجالين kHz والـ MHz، أما الأمواج فوق الصوتية المتولدة من فرابت النيكل NiFe_2O_4 لها سرعة وتردد أعلى مقارنة مع الأمواج فوق الصوتية المتولدة من فرابت الكوبالت CoFe_2O_4 .

الكلمات المفتاحية: الأمواج فوق الصوتية، محول الانضغاط المغناطيسي، خصائص بنيوية وميكانيكية، فرابت CoNi، مواد الانضغاط المغناطيسي.

*أستاذ مساعد - قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

**أستاذ مساعد - قسم النظم والشبكات الحاسوبية، كلية الهندسة المعلوماتية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

***طالب دراسات عليا (دكتوراه) - قسم الفيزياء - اختصاص إلكترونيات - كلية العلوم، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

A Study on Structural, Mechanical, Speed and Frequency Properties of the Ultrasonic Generated by the Compression Component $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ at ratios $x = (0.0, 1.0)$

Dr. Kamal Mahmoud Ofeisa^{*}

Dr. Mohammad Yassin sobeih^{**}

Schauket Schahin Schahin^{***}

(Received 9 / 3 / 2020. Accepted 7 / 9 / 2020)

□ ABSTRACT □

This research includes prepare magnetostrictive compound $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ at ratio $x = (0.0, 1.0)$ by ceramic method at 1200 °C sintering temperature. studied some of structural properties by X-ray diffraction technique, and mechanical properties by Fourier-transform infrared FT-IR technique. This is to determine the speed and frequency of ultrasonic waves that's can be generated using the prepared compound.

The results show formation the cubic spinel structure of ferrite, and values of Average crystallite size at nm. We observed at ratio $x = 1.0$ increase in values of Average crystallite size, lattice parameter, and decrease in values of density, and Young's coefficient.

The results also showed the frequency of ultrasonic generated at the kHz and MHz ranges, the speed and frequency of the ultrasonic waves generated by NiFe_2O_4 are higher than the speed and frequency of the cobalt Ferrite CoFe_2O_4 .

Keywords: Ultrasonic Waves, Magnetostrictive Transducer, Structural and Mechanical Properties of CoNi-Ferrite, Magnetostrictive Materials.

* Associate Professor - Department of Physics, Faculty of Science, Tishreen University, Lattakia, Syria.

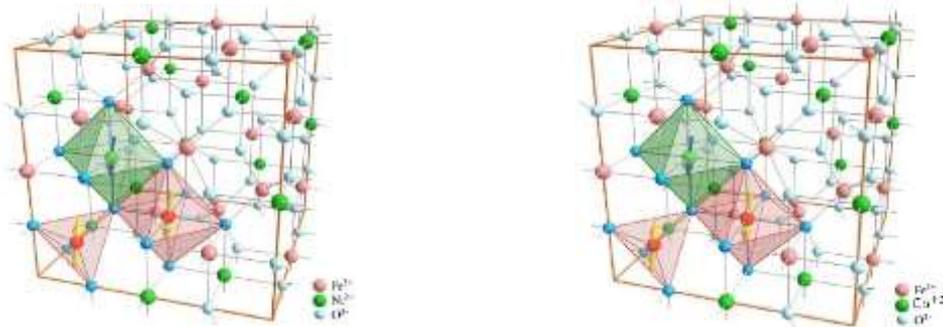
** Associate Professor - Department of computer Systems and Networks, Faculty of Informatics Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

*** Postgraduate Student (PhD) – Department of Physics - Electronics Specialization - Faculty of Science, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تطورت مواد الانضغاط المغناطيسي *magnetostrictive materials* في السنوات الأخيرة بشكل ملحوظ، ولاقت اهتمام العديد من الباحثين، مثل العناصر الأرضية النادرة *rare earth materials* [1]، والمواد حديدية المغنطة *ferromagnetic* [2]، والمواد الفريمغناطيسية *ferrimagnetic* كفرايت الكوبالت-النيكل *Co-Ni ferrite*. تتغير أبعاد هذه المواد تحت تأثير حقل مغناطيسي خارجي، حيث تُعرف هذه الظاهرة بـ *magnetostriction* [3]، وتمتاز بقدرتها على تحويل الطاقة المغناطيسية إلى طاقة ميكانيكية "تأثير جول *Joule effect*"، وبالعكس الطاقة الميكانيكية إلى طاقة مغناطيسية "تأثير فيلاري *Villari effect*" [4]، واستخدمت في العديد من التطبيقات وبشكل واسع في محول الانضغاط المغناطيسي الفوق صوتي *magnetostrictive ultrasonic transducers* لتوليد الأمواج فوق الصوتية [5]. تطورت تقنيات توليد الأمواج فوق الصوتية، والمواد المستخدمة لتوليدها، وطرق تحديد سرعة وتردد هذه الأمواج على عدة مراحل. الأمواج المتولدة بسبب تأثير جول هي أمواج عرضية *transverse*، والأمواج المتولدة بسبب تأثير فيدمان *Wiedemann effects* هي أمواج طولية *longitudinal*، أما الآلية الرئيسية لتوليد موجة مرنة *elastic wave* في الفرايت هو تأثير فيدمان [6]، عند زيادة تركيز فرايت *Co-Zn* في البوليمر *polymer* المركب *composite* ينخفض تردد الرنين *resonance frequency*، وتزداد قيمة كل من معامل يونغ *Young's modulus*، وسرعة الامواج فوق الصوتية المتولدة [7]. يمتاز محول الانضغاط المغناطيسي الفوق صوتي المركب من مزيج فرايت *Mn-Zn* ذي بنية السبينيل *spinel structure*، ومسحوق بلورات غرانيت الحديد والإيتريوم *yttrium*، بأن الطاقة الضائعة بسبب تيارات فوكو *Foucault currents* منخفضة، أما الوسائط الديناميكية للانضغاط المغناطيسي تكون عالية، والقوة القسرية *coercitive* منخفضة [8]، عند استخدام مواد حديدية المغنطة يمكن توليد الأمواج فوق الصوتية بترددات تتراوح من 20kHz إلى 2MHz، وتم توضيح المبادئ الفيزيائية لتوليد وكشف الأمواج فوق الصوتية باستخدام محولات الطاقة المغناطيسية إلى الطاقة الميكانيكية [9]. تم تطوير نهج جديد من محولات الانضغاط المغناطيسي الفوق صوتي لتوليد الأمواج فوق الصوتية باستخدام *Terfenol-D* بتردد 20KHz، تم استنتاج معادلات التردد بطريقة مصفوفة الإرسال *transmission matrix*، في حين تم التحقق من صحة المطابقة من خلال الاستجابة المشروطة والتوافقية *modal and harmonic response* بطريقة العناصر المحددة *finite element method (FEM)* باستخدام برنامج *ANSYS* [10]. تم وضع مبادئ حساب كل من معاملات المرونة المغناطيسية *magnetoelastic coefficients*، ومعامل الانضغاط المغناطيسي لفرايت الكوبالت *CoFe2O4*، وفرايت النيكل *NiFe2O4*، باستخدام نظرية الكفاءة الوظيفية *density functional theory* [11]. بدراسة ديناميكية تغير أبعاد فرايت الكوبالت المُحضّر بالطريقة السيراميكية، عند درجة حرارة تليد 900°C، تبين أن للمركب أهمية في العديد من التطبيقات مثل الحساسات *sensors*، والسونار *sonar* [12]. تُبين دراسة الخصائص الكهربائية وخصائص الانضغاط المغناطيسي للمركب *CoFe2O4* المُحضّر بالطريقة السيراميكية، عند درجة حرارة تليد 1623K لمدة 6h، أن المقاومة الكهربائية ومعامل الانضغاط المغناطيسي عالية نسبياً، وله أهمية في العديد من التطبيقات مثل محولات الطاقة *transducers*، وأنها مادة مثالية لمكونات الاهتزاز في محولات الأمواج فوق الصوتية عالية التردد [13]. تُظهر دراسة الخصائص البنيوية والمغناطيسية للمركب *Ni-Co ferrite* المُحضّر بالطريقة السيراميكية عند درجة حرارة تليد 1350°C، أن منحنى البطاء المغناطيسي *Hysteresis curve*

ضيق، أي الطاقة الضائعة منخفضة، ويمكن استخدام هذا المركب في تطبيقات الترددات العالية، وكمحولات طاقة مغناطيسية إلى ميكانيكية وبالعكس [14].
 إذا يُعتبر فرايت Co-Ni من أهم مواد الانضغاط المغناطيسي، ويمتاز بخصائص بنيوية، مغناطيسية [15]، كهربائية، وميكانيكية جيدة، وهذه الخصائص تتعلق بطريقة التحضير، ودرجة حرارة التليد [16].
 تعد بنية السبنييل المكعب أبسط بنية للفرايت، فيها نوعان من المواقع المتداخلة هي المواقع الرباعية tetrahedral A sites، والمواقع الثمانية octahedral sites B، حيث تنتوزع أيونات الحديد ثلاثية التكافؤ divalent ions والأيونات ثنائية التكافؤ trivalent ions بين الموقعين [17].
 عند النسب $x = (0.0, 1.0)$ فإن فرايت Co-Ni هو من نوع الفرايت المعكوس inverse ferrite [18]، عندئذ الأيونات ثنائية التكافؤ Co^{+2} ، Ni^{+2} تشغل الموقع B، أما الأيونات ثلاثية التكافؤ Fe^{+3} تنتوزع بالتساوي بين الموقعين A، B كما هو مبين في الشكل (1) [19]، ويأخذ توزع الأيونات الصيغة $B(AB)O_4$ [11].



(a): يمثل خلية الوحدة لفرايت الكوبالت حيث $x=1.0$ (b): يمثل خلية الوحدة لفرايت النيكل حيث $x=0.0$
 الشكل (1): يبين خلية الوحدة unit cell لفرايت CoNi ذي بنية السبنييل المكعب، والمواقع الرباعية والثمانية السطوح.

يبين الجدول (1) توزع الأيونات على المواقع الرباعية والثمانية.

الجدول (1): توزع الأيونات بين المواقع الرباعية والثمانية.

x	composition	A-site	B-site
0.0	$NiFe_2O_4$	$[Fe^{+3}]$	$[Ni^{+2}Fe^{+3}]$
1.0	$CoFe_2O_4$	$[Fe^{+3}]$	$[Co^{+2}Fe^{+3}]$

مشكلة البحث:

من أكثر الصعوبات التي تواجه الباحثين في مجال توليد الأمواج فوق الصوتية بطريقة محول الانضغاط المغناطيسي والتي تتعكس سلباً على أداء المحول هي تشكل التيارات الدوامة، وضياع الطاقة بسبب عرض مساحة دورة البطء المغناطيسي، واستخدام تيارات عالية لتوليد الحقول المغناطيسية اللازمة لتحقيق أفضل انتظام للعزوم المغناطيسية الجزيئية بجهة الحقل، والذي يصاحبه ارتفاع في درجة حرارة المادة المستخدمة في قلب المحول. لذلك توجه الباحثون لتطوير مواد وطرق جديدة تساهم في التخلص أو التقليل من الصعوبات السابقة.
 للمساهمة في حل بعض هذه المشكلات قمنا بتسليط الضوء على سرعة وتردد الأمواج فوق الصوتية التي يمكن توليدها باستخدام المركب $Co_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ لان المقاومة الكهربائية النوعية للمركب المستخدم عالية تقدر بحدود $10^6 \Omega.m$

مما يمنع تشكل التيارات الدوامة فيها، نفاذيته المغناطيسية Permeability عالية، ومنحني البطاء المغناطيسي hysteresis loop ضيق أي الطاقة الضائعة منخفضة، ويحافظ على هذه المواصفات لدرجات حرارة عالية نظراً لامتلاكه درجة حرارة كوري T_c مرتفعة [12-20]. لذلك طرحنا السؤال التالي: عند استخدام المُركب $Co_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ في توليد الأمواج فوق الصوتية ماهي سرعة وتردد الأمواج التي يمكن الحصول عليها؟ وكيف يمكن تحديدها؟

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث إلى تحضير مُركب الانضغاط المغناطيسي $Co_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ عند النسب $x = (0.0, 1.0)$ بالطريقة السيراميكية عند درجة حرارة تليد $1200^\circ C$ ، ودراسة بعض خصائصه البنيوية والميكانيكية بتقنية انعراج الأشعة السينية XRD وتحويل فورييه للأشعة تحت الحمراء FT-IR، لنتمكن بذلك من تحديد سرعة وتردد الأمواج التي يمكن توليدها والتحقق من أنها تقع ضمن مجال الأمواج فوق الصوتية. تكمن أهمية البحث بأنه يسلط الضوء على سرعة وتردد الأمواج فوق الصوتية المتولدة باستخدام المُركب $Co_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ ، وبالطريقة الفيزيائية المتبعة في تحديدها، وباعتبار المركب المُحضّر مادة مغناطيسية ذكية بإمكانه تبادل التأثيرات المغناطيسية والميكانيكية مع الوسط المحيط من خلال التأثير عليه بمؤثر مغناطيسي أو ميكانيكي، مع إمكانية التحكم بخصائصه من خلال ضبط شروط التحضير، ويمكن استخدامه في تحسين مولدات الأمواج فوق الصوتية المغناطيسية. يُعد إجراء مثل هذه البحوث ذو أهمية في العديد من المجالات العلمية والبحثية والصناعية، وخاصة في المجال الطبي لان مجال الترددات المتولدة تستخدم في التشخيص، المعالجة، والجراحة [21].

طرائق البحث ومواده:

دراستنا هذه اعتمدت على عدد من المراحل وهي تحضير العينات بالطريقة السيراميكية، ودراسة الخصائص البنيوية بتقنية انعراج الأشعة السينية XRD لتأكد من تشكل البنية البلورية المطلوبة وتعيين قيم الكثافة، ثم دراسة الخصائص الميكانيكية بتقنية تحويل فورييه للأشعة تحت الحمراء FT-IR لتعيين قيم معامل يونغ. بالاعتماد على قيم الكثافة ومعامل يونغ تم تحديد سرعة وتردد الأمواج فوق الصوتية التي يمكن توليدها.

1- تحضير العينات:

تم تحضير العينات بالطريقة السيراميكية باستخدام مواد أولية عالية النقاء من Co_3O_4 ، NiO ، Fe_2O_3 وفق الصيغة $Co_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ من خلال وزن الكميات المطلوبة من المواد الأولية بالاعتماد على أوزانها الجزيئية وفق النسب $x = (0.0, 1.0)$ ، وذلك باستخدام ميزان عالي الحساسية دقته $0.0001g$. تم خلط وطحن العينات في هاون من العقيق إلى درجة عالية من النعومة، ثم خلطت مع الماء المقطر في خلاط مغناطيسي Magnetic Stirrer لمدة أربع ساعات، جففت العينات وطحنت للمرة الثانية في مخبر البحث العلمي بقسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين. كبرت العينات في قالب من الكروم باستخدام مكبس هيدروليكي موجود في مخبر اختبار المواد بكلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين تحت ضغط $8\ ton/cm^2$ لمدة $7\ sec$ ، ثم وضعت العينات في فرن كهربائي بقسم الكيمياء - جامعة تشرين، وسخنت بمعدل $5^\circ C/min$ إلى الدرجة $800^\circ C$ وثبتت لمدة $4\ h$ ، وبعد ذلك خفضت درجة الحرارة إلى درجة حرارة الغرفة بمعدل $5^\circ C/min$ ليتم في هذه العملية التفاعل بين المواد الأولية. طحنت العينات إلى درجة عالية من

النعومة مرة أخرى، تم إعادة كبسها، وأدخلت إلى الفرن الكهربائي الموجود في المعهد العالي لبحوث البيئة وسخنت بمعدل 5°C/min إلى الدرجة 1200°C وثبتت لمدة 8h، ثم خفضت درجة الحرارة إلى درجة حرارة الغرفة بمعدل 5°C/min، ينتج عن هذه العملية تكاثف الذرات وتشكل الحبيبات السيراميكية وتلاصقها، وتشكل البنية البلورية المطلوبة. تم إجراء تحليل XRD للعينات في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا بدمشق، أما تحليل FT-IR تم باستخدام مقياس Jasco نوع FT-IR-460 PLUS، الذي يعمل ضمن المجال $(400 - 4000)cm^{-1}$ الموجود في المخبر المركزي بكلية العلوم - جامعة تشرين، تم تحليل النتائج باستخدام البرامج التالية: Match!3، Xpovder، origin8، والعمليات الحسابية باستخدام برنامج Excel 2016 في مخبر البحث العلمي في الإلكترونيات - قسم الفيزياء - جامعة تشرين. يبين الشكل (2) الأجهزة والأدوات المستخدمة في البحث.



(c) ميزان عالي الحساسية



(b) هاون من العقيق



(a) مكبس هيدروليكي



(f) قوالب من الكروم



(e) فرن حراري



(d) FT-IR-460 PLUS مزود بحاسب

الشكل (2): الأجهزة والأدوات المستخدمة في البحث.

2- دراسة الخصائص البنيوية للمركب $Co_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ بتقنية انعراج الأشعة السينية XRD.

تُعتبر تقنية انعراج الأشعة السينية أحد الأساليب الأكثر استخداماً لدراسة الخصائص البنيوية للمواد، تم تحليل أنماط حيود الأشعة السينية للعينات باستخدام Match!3، XPowder12. تُمكننا هذه البرامج من رسم تغيرات الشدة Intensity بتابعية الزاوية 2θ ، وتعطي معلومات دقيقة عن عرض القمة عند منتصف الشدة من أجل كل قمة width at half maximum (FWHM)، والمسافة بين المستويات البلورية (البعد البلوري) d ، والزاوية 2θ لكل قمة [22].

• تم حساب متوسط أبعاد الحبيبة البلورية Average crystallite size D من علاقة شير Scherrer التالية [15]:

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

تمثل λ طول موجة الأشعة السينية المستخدم $\lambda = 1.540598\text{\AA}$ ، وتمثل β عرض القمة عند منتصف الشدة،

أما k تمثل عامل الشكل الهندسي shape factor، حيث أن $k = 0.9$.

- تم حساب ثابت الشبكة البلورية lattice parameter a للمركب باستخدام العلاقة [16]:

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad (2)$$

حيث أن d تمثل البعد البلوري.

- تم حساب الكثافة ρ باستخدام العلاقة [18,22]:

$$\rho = \frac{z.M}{V_{cell}.N_A} \quad (3)$$

حيث أن عدد الذرات في وحدة الخلية $z = 8$ ، وتمثل M الوزن المولي للمركب molecular weight، أما N_A تمثل عدد أفوكادرو من الذرات $N_A = 6.0225 \times 10^{23}$ atom/mole، وتمثل a^3 حجم الخلية.

3- دراسة الخصائص الميكانيكية للمركب $Co_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ باستخدام تقنية FT-IR.

تم تحليل المركب بتقنية الأشعة تحت الحمراء FT-IR عند درجة حرارة الغرفة، باستخدام مقياس Jasco من النوع FT-IR-460 PLUS ضمن المجال $(400 - 1000)cm^{-1}$ ، والذي يعطي البيانات اللازمة لرسم المنحني البياني المعبر عن تغيرات الامتصاصية Transmittance T(%) بتأبعية العدد الموجي Wave number، وبالتالي الحصول على معلومات دقيقة عن العدد الموجي لاهتزاز المواقع رباعية السطوح $\nu_{tet}(cm^{-1})$ وثمانية السطوح $\nu_{oct}(cm^{-1})$. درست الخصائص الميكانيكية كما يلي [16,22]:

- تم حساب ثابت القوة Force constant للموقع رباعي السطوح $K_{tet}(N.m^{-1})$ ، وثمانية السطوح $K_{ota}(N.m^{-1})$ ، والقيمة الوسطية لثابت قوة الشبكة $K_{av}(N.m^{-1})$ ، باستخدام العلاقات التالية:

$$K_{tet} = 7.62 \times M_A \times \nu_{tet} \times 10^{-7} \quad (4)$$

$$K_{oct} = 7.62 \times (M_B/2) \times \nu_{oct} \times 10^{-7} \quad (5)$$

$$K_{av} = \frac{K_{tet}+K_{oct}}{2} \quad (6)$$

حيث أن:

M_A : الوزن الجزيئي للأيونات في المواقع رباعية السطوح واحدها $g.mol^{-1}$.

M_B : الوزن الجزيئي للأيونات في المواقع ثمانية السطوح واحدها $g.mol^{-1}$.

- تم حساب ثابت الصلابة stiffness constant $C_{11}(pa)$ باستخدام العلاقة:

$$C_{11} = \frac{K_{av}}{a} \quad (7)$$

حيث أن a تمثل ثابت الشبكة البلورية واحدها Å .

- تم حساب معامل الانضغاط الحجمي bulk modulus $B(Pa)$ باستخدام العلاقة:

$$B = \frac{1}{3}(C_{11} + 2C_{12}) \quad (8)$$

وفقاً لما ذكره Waldron، في فرايت Co-Ni ذي بنية السبيل فإن $C_{11} \approx C_{12}$ وبالتالي $B = C_{11}$.

- تم تحديد سرعة الموجة المرنة الطولية $V_l(m.s^{-1})$ ، وسرعة الموجة المرنة العرضية $V_t(m.s^{-1})$ ، باستخدام العلاقات التالية:

$$V_l = \left[\frac{C_{11}}{\rho} \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$V_t = \frac{V_l}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

حيث أن ρ تمثل الكثافة واحدها $g.cm^{-3}$.

- تم حساب سرعة الموجة المرنة elastic wave velocity $V_m(m.s^{-1})$ باستخدام العلاقة التالية:

$$V_m = \left[\frac{V_t^3 V_l^3}{V_t^3 + 2V_l^3} \right]^{1/3} \quad (11)$$

- تم حساب معامل الصلابة Rigidity modulus $G(Pa)$ باستخدام العلاقة التالية:

$$G = \rho \times V_t^2 \quad (12)$$

- تم حساب نسبة بواسون Poisson's ratio P باستخدام العلاقة:

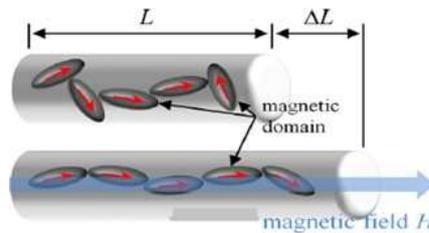
$$P = \frac{(3B-2G)}{(6B+2G)} \quad (13)$$

- تم حساب معامل يونغ Young's modulus $E(Pa)$ باستخدام العلاقة:

$$E = (1 + P)2G \quad (14)$$

4- توليد الأمواج فوق الصوتية بطريقة محول الانضغاط المغناطيسي الفوق صوتي:

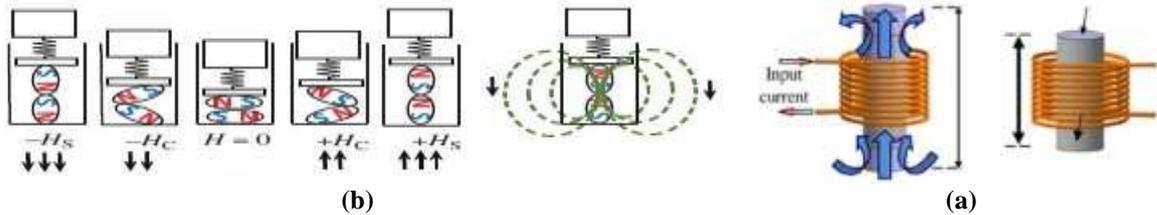
اكتشفت ظاهرة تغير ابعاد مواد الانضغاط المغناطيسي من قبل James Prescott Joule، حيث لاحظ أن حبيبات grains هذه المواد والتي تحتوي العديد من المجالات المغناطيسية magnetic domains الصغيرة الموجهة عشوائياً، تدور وتتنظم بجهة الحقل، مُحدثاً إجهاداً داخلياً internal strain، يرافقه تشوه ميكانيكي mechanical deformation، وتغير طفيف في طولها بالمقدار ΔL [23] كما هو مبين في الشكل (3) [9].



الشكل (3): تأثير انتظام العزوم المغناطيسية الجزيئية على أبعاد المادة.

أما عند تطبيق حقل مغناطيسي متغير ناتج عن تيار متناوب AC كما هو مبين في الشكل (a-4) [9]، فإنها تهتز كما هو مبين في الشكل (b-4) [24]، ولكن بشروط وهي أن تكون شدة الحقل المطبق تتناسب مع بارامترات دورة البطء المغناطيسي لتحقيق أفضل انتظام للعزوم المغناطيسية الجزيئية بجهة الحقل، وأن يكون تردد الحقل المطبق من دارة الهزاز الإلكترونية f مساوٍ لتردد التجاوب f_n للمركب ذي خصائص الانضغاط المغناطيسي [25].

$$f = f_n \quad (15)$$



الشكل (4): إحدى طرق تطبيق الحقل المغناطيسي، وحركة العزوم المغناطيسية الجزيئية تحت تأثير حقل مغناطيسي خارجي متغير.

إذا كان تردد التجاوب للمركب المحضر أكبر من $20kHz$ ، يمكن عندئذ استخدامه كمحول انضغاط مغناطيسي فوق صوتي لتوليد الأمواج فوق الصوتية. تم تحديد سرعة وتردد الأمواج كما يلي [26-28]:

تتولد الأمواج فوق الصوتية بسرعة تتعلق بالخصائص الفيزيائية للمركب المحضر، وتحسب من العلاقة:

$$v = \sqrt{(E/\rho)} \quad (16)$$

حيث أن ρ تمثل كثافة العينة واحدها $kg.m^{-3}$ ، أما E تمثل معامل يونغ للمرونة واحدها Pa.

يتعلق تردد الأمواج فوق الصوتية f_n بالإضافة إلى الخصائص الفيزيائية للمركب، بطول الموجة λ ، وتحسب من العلاقة:

$$f_n = \frac{v}{\lambda} \quad (17)$$

حيث أن v تمثل سرعة الأمواج فوق الصوتية واحدتها $m \cdot s^{-1}$ ، أما λ تمثل طول الموجة واحدتها m . يرتبط طول الموجة λ بطول العينة L ، وبطريقة تثبيتها، فعند تثبيت العينة من منتصفها عندئذ:

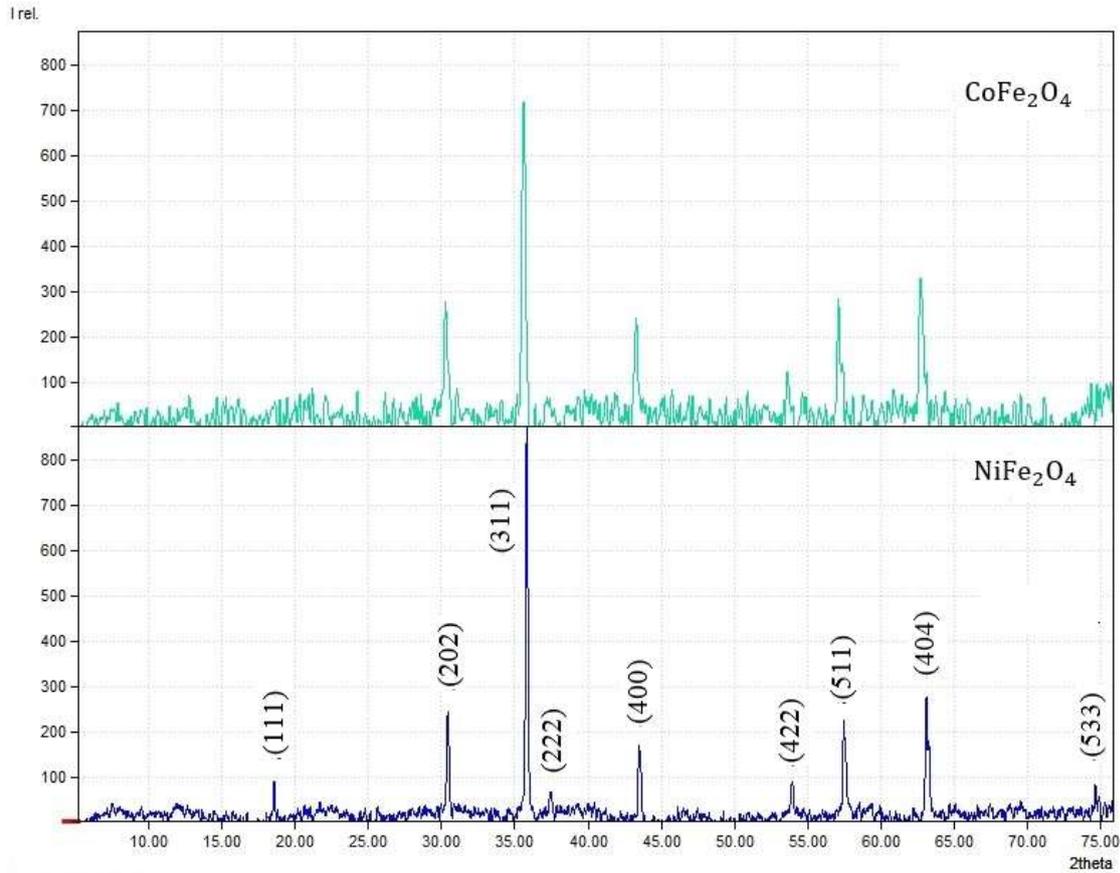
$$L = \frac{\lambda}{2} \quad (18)$$

تصبح علاقة التردد كما يلي:

$$f_n = \frac{v}{2L} \quad (19)$$

النتائج والمناقشة:

يبين الشكل (5) طيف انعراج الاشعة السينية للمركب $Co_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ عند النسب $x = (0.0, 1.0)$ والذي يُظهر عند قيم 2θ مجموعة من القمم peaks بشدات مختلفة، والتي تعطي معلومات دقيقة عن قرائن ميلر (hkl) للمستويات البلورية المتشكلة.



الشكل (5): طيف انعراج الاشعة السينية للمركب $Co_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ عند النسب $(x = 0.0, 1.0)$.

بالمطابقة مع البطاقة JCCD ذات الأرقام 22-1086، 89-4927 [17]، والبطاقتين 96-591-0065، 96-153-3164، من بيانات برنامج Match!3، نلاحظ أن هذه القمم تشير إلى المستويات البلورية (111)، (202)، (311)، (222)،

(400)، (422)، (511)، (404)، (533)، وهي المستويات المميزة للفرايت. ظهور المستوي البلوري (311) دليل على تشكل بنية السبيل المكعب [18،15]، ويمتاز هذا المستوي بالبيانات المبينة في الجدول (2)، الذي يبين تغيرات كل من الزاوية 2θ ، وعرض القمة عند منتصف الشدة FWHM، والبعد البلوري d للمركب $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ بتغير قيم x وفق النسب $x = (0.0, 1.0)$.

الجدول (2): يبين تغيرات الزاوية 2θ ، عرض القمة FWHM، $d_{(311)}$ ، عند المستوي (311) للمركب بتغير النسب $x = (0.0, 1.0)$.

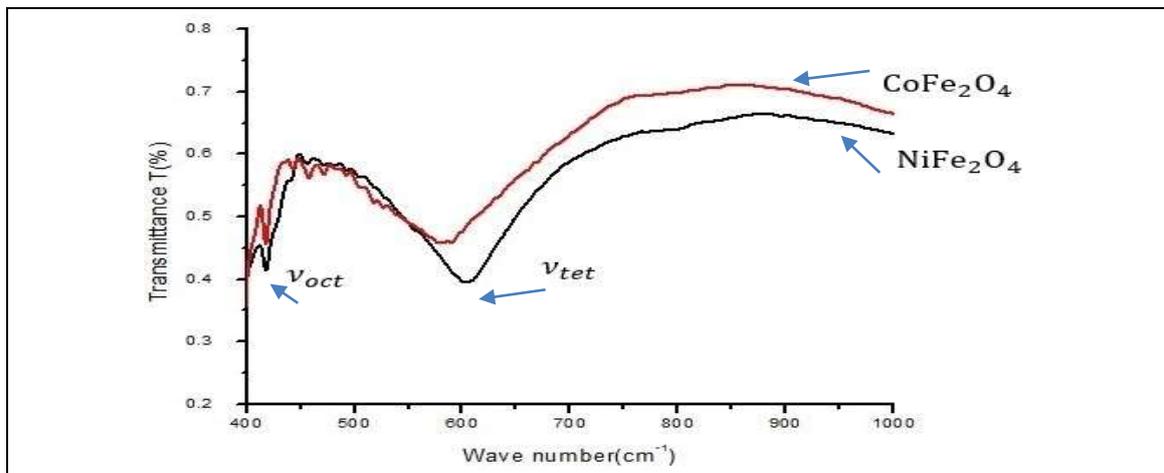
x	composition	2θ (deg)	FWHM	$d_{(311)}$ (Å)	(hkl)
0.0	NiFe ₂ O ₄	35.71	0.201	2.5122	(311)
1.0	CoFe ₂ O ₄	35.37	0.200	2.5378	(311)

نلاحظ أن موقع القمة المميزة للمستوي البلوري (311) في المركب $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ عند النسبة $x=1.0$ ينحرف باتجاه اليسار، ويرافقه تناقص في قيمة كل من 2θ ، وعرض القمة عند منتصف الشدة FWHM، وزيادة قيمة $d_{(311)}$. باستخدام العلاقات (1)، (2)، (3)، وبيانات الجدول (2)، تم حساب كل من متوسط ابعاد الحبيبة D ، ثابت الشبكة البلورية a ، حجم الخلية V_{cell} ، والكثافة ρ للمركب $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ عند النسب $x = (0.0, 1.0)$ وحصلنا على النتائج المبينة في الجدول (3).

الجدول (3): يبين نتائج متوسط ابعاد الحبيبة، ثابت الشبكة البلورية، حجم الخلية، والكثافة للمركب عند النسب $x = (0.0, 1.0)$.

x	composition	D (nm)	a (Å)	V_{cell} (Å ³)	ρ (g.cm ⁻³)
0.0	NiFe ₂ O ₄	41.52	8.332	578.42	5.3822
1.0	CoFe ₂ O ₄	41.69	8.416	596.28	5.2257

نلاحظ من الجدول (3) أن متوسط ابعاد الحبيبة البلورية D للمركب $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ عند النسب $x = (0.0, 1.0)$ من مرتبة nm. عند النسبة $x=1.0$ نلاحظ زيادة قيم كل من متوسط حجم الحبيبة D ، ثابت الشبكة البلورية a ، حجم الخلية V_{cell} ، ونقصان الكثافة ρ . النتائج مطابقة بشكل جيد لنتائج العديد من الدراسات لعينات $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ حُضرت بطرق مختلفة [15-17]. يبين الشكل (6) طيف الاشعة تحت الحمراء FT-IR للمركب $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ عند النسب $x = (0.0, 1.0)$ والذي يمثل تغيرات الامتصاصية Transmittance T(%) بتابعة العدد الموجي Wave number، والذي يعطي معلومات دقيقة عن العدد الموجي لاهتزاز المواقع رباعية السطوح ν_{tet} (cm⁻¹) وثمانية السطوح ν_{oct} (cm⁻¹).



الشكل (6): طيف تحليل FT-IR للمركب $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ عند النسب $x = (0.0, 1.0)$.

يظهر طيف الأشعة تحت الحمراء FT-IR للفرايت ذو بنية السنبيل حزمي امتصاص في المجال $(400-1000)cm^{-1}$ ، تشير إلى العدد الموجي لاهتزاز المواقع A رباعية السطوح، والمواقع B ثمانية السطوح [15].
يبين الجدول (4) العدد الموجي لاهتزاز المواقع A رباعية السطوح ν_{tet} ، والمواقع B ثمانية السطوح ν_{oct} للمركب المُحضر $Co_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ عند النسب $x = (0.0, 1.0)$.

الجدول (4): يبين العدد الموجي لاهتزاز المواقع الرباعية والثمانية السطوح للمركب عند النسب $x = (0.0, 1.0)$.

x	composition	$\nu_{tet}(cm^{-1})$	$\nu_{oct}(cm^{-1})$
0.0	NiFe ₂ O ₄	601.682	418.477
1.0	CoFe ₂ O ₄	590.111	418.477

نلاحظ أن العدد الموجي لاهتزاز المواقع الرباعية ν_{tet} هي أعلى من العدد الموجي لاهتزاز المواقع الثمانية ν_{oct} في المركب $Co_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ عند النسب $x = (0.0, 1.0)$ ، بسبب قصر طول الرابطة في المواقع رباعية السطوح مقارنة بطول الرابطة في المواقع ثمانية السطوح [16-18].

نلاحظ أيضاً أن قيم العدد الموجي لاهتزاز المواقع رباعية السطوح ν_{tet} عند النسبة $x=1.0$ ، هي أقل من قيم العدد الموجي لاهتزاز المواقع رباعية السطوح عند النسبة $x=0.0$. يُعزى ν_{tet} إلى استطالة stretching الرابطة bond أيون معدن - أيون أوكسجين $(Fe^{3+} - O^{2-})_{tet}$ ، بينما ν_{oct} إلى اهتزاز الرابطة $(Fe^{3+} - O^{2-})_{oct}$ في اتجاه عمودي على المحور الواصل بين أيون معدن وأيون الأوكسجين في المواقع الرباعية [16-18]. باستخدام العلاقات (4)، (5)، (6)، وبيانات الجدولين (1)، (4)، تم حساب كل من ثابت القوة للموقع رباعي السطوح K_{tet} ، وثمانية السطوح K_{oct} ، والقيمة الوسطية لثابت قوة الشبكة K_{av} ، وحصلنا على النتائج المبينة في الجدول (5).

الجدول (5): ثابت قوة الشبكة للمواقع رباعية السطوح وثمانية السطوح، والقيمة الوسطية لثابت قوة الشبكة.

x	composition	$K_{tet}(N.m^{-1})$	$K_{oct}(N.m^{-1})$	$K_{av}(N.m^{-1})$
0.0	NiFe ₂ O ₄	154.054	106.509	130.2815
1.0	CoFe ₂ O ₄	148.185	106.701	127.4435

نلاحظ من الجدول (5) أن ثابت القوة للموقع رباعي السطوح K_{tet} هي أعلى من ثابت القوة للموقع ثمانية السطوح K_{oct} ، للمركب $Co_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ عند النسب $x = (0.0, 1.0)$. نلاحظ أيضاً أن ثابت القوة للمواقع رباعية السطوح K_{tet} والقيمة الوسطية لثابت قوة الشبكة K_{av} عند النسبة $x=1.0$ ، هي أقل من ثابت القوة للمواقع رباعية السطوح K_{tet} والقيمة الوسطية لثابت قوة الشبكة K_{av} عند النسبة $x=0.0$ ، وهذا ما توضحه العلاقات (4)، (5)، حيث يتناسب ثابت القوة طردياً مع العدد الموجي لاهتزاز الموقع من ناحية أخرى بسبب توزع الكاتيونات وأيضاً لأن $M_{Co^{2+}}$ ونصف قطر أيون الكوبالت $r_{Co^{2+}} = 0.74\text{Å}$ أكبر من كلٍ من $M_{Ni^{2+}}$ ونصف قطر أيون النيكل $r_{Ni^{2+}} = 0.69\text{Å}$ [16-19].
باستخدام العلاقات من (7)، إلى (14)، ونتائج الجدول (5)، ونتائج الدراسة البنيوية تمكنا من تحديد قيم معامل يونغ للمركب $Co_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ المُحضر عند النسب $x = (0.0, 1.0)$ ، وحصلنا على النتائج المبينة في الجدول (6).

الجدول (6): يبين قيم كل من ثابت الصلابة، معامل يونغ الحجمي، سرعة الموجة المرنة الطولية والعرضية، معامل الصلابة، نسبة

بواسون، ومعامل يونغ للمركب $Co_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ المُحضر عند النسب $x = (0.0, 1.0)$.

x	$B(GPa) = C_{11}(GPa)$	$V_l(m.s^{-1})$	$V_t(m.s^{-1})$	$V_m(m.s^{-1})$	$G(GPa)$	P	$E(GPa)$
0.0	156.362	5389.9759	3111.9040	2395.4271	52.1209	0.350	140.726
1.0	151.413	5382.8289	3107.7777	2392.2508	50.4712	0.350	136.272

نلاحظ من الجدول (6) أن قيمة كل من ثابت الصلابة C_{11} ، معامل الانضغاط الحجمي B ، سرعة الموجة المرنة الطولية V_l والعرضية V_t ، معامل الصلابة G ، ومعامل يونغ E للمركب $Co_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ عند النسبة $x=1.0$ هي

أقل منها عند النسبة $x=0.0$ ، وهذه النتائج مطابقة بشكل جيد لنتائج العديد من الدراسات لعينات حُضرت بطرق مختلفة [18-16]. نلاحظ أيضاً أن انخفاض قيمة معامل يونغ يؤدي إلى انخفاض سرعة وتردد الأمواج فوق الصوتية المتولدة وهذا ما توضحه العلاقتين (16) و(19).

باستخدام العلاقتين (16) و(19) وبالاعتماد على نتائج الكثافة ρ ، ومعامل يونغ E ، تم تحديد سرعة وتردد الأمواج فوق الصوتية المتولدة من مركب الانضغاط المغناطيسي $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ المحضر بدرجة حرارة تلييد 1200°C بالطريقة السيراميكية عند النسب $x = (0.0, 1.0)$ ، وذلك من أجل أطوال مختلفة للعينات المحضرة $L = (10, 0.1) \text{ cm}$ وحصلنا على النتائج المبينة في الجدول (7).

الجدول (7): سرعة وتردد الأمواج فوق الصوتية المتولدة من مركب الانضغاط المغناطيسي $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ المحضر بدرجة حرارة تلييد 1200°C عند النسب $x = (0.0, 1.0)$ من أجل أطوال مختلفة.

طول العينة L			L=10cm	L=1mm
x	composition	$v = \sqrt{(E/\rho)} (m.s^{-1})$	F(KHz)	F(MHz)
0.0	NiFe ₂ O ₄	5113.370	25.566	2.556
1.0	CoFe ₂ O ₄	5106.591	25.532	2.553

نلاحظ من الجدول (7) أن سرعة وتردد الأمواج فوق الصوتية المتولدة من مركب الانضغاط المغناطيسي $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ المحضر عند النسبة $x=1.0$ هي أقل من سرعة وتردد الأمواج فوق الصوتية المتولدة من مركب الانضغاط المغناطيسي $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ المحضر عند النسبة $x=0.0$. تردد الأمواج فوق الصوتية المتولدة من أجل $L=10\text{cm}$ تقع في مجال الـ KHz، أما من أجل $L=1\text{mm}$ تقع في مجال الـ MHz. تجدر الإشارة إلى أنه يمكن اختيار أطوال مختلفة أخرى وذلك حسب الترددات المطلوب تحقيقها بما يتناسب مع التطبيق المطلوب.

الاستنتاجات والتوصيات:

- 1- يمكن توليد أمواج فوق صوتية باستخدام مركب الانضغاط المغناطيسي $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ المحضر عند النسب $x = (0.0, 1.0)$ بالطريقة السيراميكية عند درجة حرارة تلييد 1200°C ، وبترددات (25.532, 25.566) KHz، و(2.553, 2.556) MHz والتي تتعلق بكل من الكثافة، معامل يونغ، وطول العينة.
- 2- تعتمد سرعة الأمواج فوق الصوتية المتولدة على كثافة المركب المحضر ومعامل يونغ، والتي قد تتغير بتغير طريقة وشروط التحضير ودرجة حرارة التلييد.
- 3- سرعة الأمواج فوق الصوتية المتولدة من فرايت النيكل $v_{\text{NiFe}_2\text{O}_4} = 5113.370 m.s^{-1}$ أعلى من سرعة الأمواج فوق الصوتية المتولدة من فرايت الكوبالت $v_{\text{CoFe}_2\text{O}_4} = 5106.591 m.s^{-1}$ ، ويعود ذلك إلى أن قيمة معامل يونغ وكثافة فرايت النيكل NiFe_2O_4 أكبر من قيمة معامل يونغ وكثافة فرايت الكوبالت CoFe_2O_4 .
- 4- أظهرت نتائج الدراسة البنيوية تشكل بنية السبينيل المكعب، وأن قيمة كل من متوسط حجم حبيبة $D = 41.52 \text{ nm}$ وثابت الشبكة البلورية $a = 8.332 \text{ \AA}$ لفرايت النيكل أصغر منها في فرايت الكوبالت $a = 8.416 \text{ \AA}$ ، $D = 41.69 \text{ nm}$.
- 5- أظهرت نتائج الدراسة الميكانيكية وجود حزمي امتصاص مميزين للأماكن الرباعية والثمانية. العدد الموجي v_{tet} وثابت قوة اهتزاز المواقع الرباعية K_{tet} أعلى من v_{oct} و K_{oct} .

6- يؤثر توزيع الأيونات ثنائية التكافؤ وثلاثية التكافؤ بين المواقع الرباعية والثمانية السطوح على كل من الخصائص البنيوية والميكانيكية للمركب المُحضر [17-18]، لذلك نوصي بتحضير مركب الانضغاط المغناطيسي $Co_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ عند نسب جديدة لـ x ، ومن ثم دراسة تأثير تغير قيم x على كل من الخصائص البنيوية، والميكانيكية، وسرعة وتردد الأمواج فوق الصوتية المتولدة، ومن ثم تلييد العينات عند درجات حرارة مختلفة ودراسة تأثير درجة حرارة التلييد على الخصائص الكهربائية والبنيوية والميكانيكية للمركب.

References:

- [1] ZHOUA, H. ZHANG, J. FENGA, P. YU, D. and WU, Z. *Design on amplitude prediction model for a giant magnetostrictive ultrasonic transducer*. Elsevier, Ultrasonic, In press, pre-proof, China, 2019, Article 106017.
- [2] QINGLI, Q. JIHENG, L. DING, Z. TANG, Z. BAO, X. ZHU, J. and GAO, X. *Magnetostriction of Fe-Ga coatings and their application in ultrasonic guided wave sensing*. AIP Publishing, Journal of Applied Physics, China, Vol. 125, 2019,043901-7.
- [3] INDLA, S. CHELVANE, A. LODH, A. and DAS, D. *Enhancement in magnetostrictive Properties of cobalt ferrite by magnetic field assisted compaction technique*, Elsevier, journal of alloys and compounds, India. 2019, 886-891.
- [4] XUEA, G. ZHANGA, P. LIB, X. HE, Z. WANG, H. LI, Y. RONG, C. ZENG, W. and LI, B. *A review of giant magnetostrictive injector (GMI)*. Elsevier, Sensors and Actuators A, China, Vol. 273, 2018. 159-181.
- [5] YAO, Y. PAN, Y. and LIU, S. *Power Ultrasound and Its Applications: A State of the art Review*. Elsevier, Ultrasonic Sonochemistry, In press, corrected proof, China, 2019, Article 104722.
- [6] KOMAROV, V. A. *Generation of Ultrasound in the Bulk of Ferrites by Nonuniform Electromagnetic Field*. Russian Journal of Nondestructive Testing, Russia, Vol. 36, 2000, 51-60.
- [7] TAWFIK, A. HEMEDA, O. M. and EL-BIALY, T. H. *Composite Polymers Transducers for Ultrasonic and Biological Applications*. Taylor & Francis, Ferroelectric Letters, Egypt, Vol. 30, 2003, 1-12.
- [8] SARNATSKI, V. *Ultrasonic transducers on base of thin plates and powder of ferrites*. Elsevier, Sensors and Actuators A: physics, Russia, Vol. 116, 2004, 272-276.
- [9] KIM, Y. Y. and KWON, Y. E. *Review of magnetostrictive patch transducers and applications in ultrasonic nondestructive testing of waveguides*. Elsevier, Ultrasonic, Korea, Vol. 62, 2015, 3-19.
- [10] LI, P. LIU, Q. LI, S. WANG, Q. ZHANG, D. LI, Y. *Design and Numerical Simulation of Novel Giant Magnetostrictive Ultrasonic Transducer*. Elsevier, Results in Physics, China, Vol. 7, 2017, 3946-3954.
- [11] Fritsch, D. *First-principles calculation of magnetoelastic coefficients and magnetostriction in the spinel Ferrites $CoFe_2O_4$ and $NiFe_2O_4$* . Physical Review B, UK, Vol. 86, 2012, 0144061-10.
- [12] AUBERT, A. LOYAU, V. PASCAL, Y. MAZALEYRAT, F. and LOBUE, M. *Dynamic Magnetostriction of $CoFe_2O_4$ and Its Role in Magnetoelectric Composites*. physical review applied, France, Vol. 9, 2018, 0440351-12.

- [13] WANG, J. GAO, X. YUAN, C. LI, J. and BAO, X. *Magnetostriction Properties of Oriented Polycrystalline CoFe₂O₄*. Elsevier, Journal of Magnetism and Magnetic Material, China, Vol. 401, 2016, 662-666.
- [14] BRITO, V. CUNHA, A. ARAUJO, F. MACHADO, P. SILVA, R. and NUNES, B. *Processing and characterization of a Ni-Co ferrite for sensor applications*. Scientific Electronic Library Online (SCIELO), Ceramic, Brazil, Vol. 61, 2015, 341-349.
- [15] DAS, S. MANOHARAN, C. VENKATESHWARLU, and M. DHAMODHARAN, P. *Structural, optical, morphological and magnetic properties of nickel doped cobalt ferrite Nanoparticles synthesized by hydrothermal method*. Springer, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, India, Vol. 30, 2019, 19880-19893.
- [16] YATTINAHALLI, S. S. KAPATKAR, S. B. and MATHAD, S. N. *Structural and Mechanical Properties of a Nano Ferrite*. Advanced Science Focus, India, Vol. 2, 2014, 42-46.
- [17] NANDAN, B. BHATNAGAR, C. and KASHYAP, C. *Cation distribution in nanocrystalline cobalt substituted nickel ferrites: X-ray diffraction and Raman spectroscopic investigations*. Elsevier, Journal of Physics and Chemistry of Solids, India, Vol. 129, 2019, 298-306.
- [18] TORKIAN, S. GHASEMI, A. and RAZAVI, R. S. *Cation distribution and magnetic analysis of wideband microwave absorptive Co_xNi_{1-x}Fe₂O₄ ferrites*. Elsevier, Ceramics International, Iran, Vol. 43, 2017, 6987-6995.
- [19] HOPPE, M. DORING, S. GORGOI, M. CRAMM, S. AND MULLER, M. *Enhanced ferrimagnetism in auxetic NiFe₂O₄ in the crossover to the ultrathin film limit*. Physical Review B, Germany, Vol. 91, 2014, 1-8.
- [20] MATTIAT, O. E. BELINCOURT, D. KIKUCHI, Y. and MEITZLER, A. H. *Ultrasonic Transducer Materials*. 1st edition, springer, Japan, 1971, 185.
- [21] UDROIU, I. *Ultrasonic drug delivery in Oncology*, JBUON, Italy, Vol. 2, 2015, 381-390. 2015.
- [22] KITTEL, C. *Introduction to solid state physics*, 8th edition, John Wiley & Sons, USA, 2005, 703.
- [23] KASAP, S. O. *Principles of Electronic Materials and Devices*, Fourth Edition, McGraw-Hill Education, Canada, 2018, 978.
- [24] DAPINO, M. J. DENG, Z. CALKINS, F. T. *Magnetostrictive Devices*. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, Wiley & Sons, USA, 2016, 35.
- [25] SUN, W. SUN, J. and XU, K. *Development of Tb-Dy-Fe Detection Transducer*, IOP Publishing, Earth and Environmental Science, China, Vol. 300, 2019, 022001-5.
- [26] BHUGRA, H. and PIAZZA, G. *Piezoelectric MEMS Resonators*, Springer International Publishing, Switzerland, 2017, 423.
- [27] KOHLHAUSER, C. and HELLMICH, C. *Ultrasonic contact pulse transmission for elastic wave velocity and stiffness determination: Influence of specimen geometry and porosity*, Elsevier, Engineering Structures, Austria, Vol. 47, 2013, 115-133.
- [28] PARK, J. LEE, S. YU, I. and SEO, Y. *Inductive detection of magnetostrictive resonance*, Elsevier, Sensors and Actuators A, South Korea, Vol. 140, 2007, 84-88.