

Research Paper

Effect of sintering atmosphere and temperature on mechanical properties of Ni-Cu-Zn ferrite nanoparticles

Ahmad Gholizadeh

Assistant Professor, School of Physics, Damghan University (DU), Damghan, Iran.

Citation: Gholizadeh A. Effect of sintering atmosphere and temperature on mechanical properties of Ni-Cu-Zn ferrite nanoparticles. Metallurgical Engineering 2018; 20(4): 304-310 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.57049.1118>

doi : <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.57049.1118>

ABSTRACT

Ferrites exhibits unique structural, electrical, magnetic and mechanical properties in extreme conditions that are of great research interest. In this work, the effects of sintering atmosphere and temperature on elastic moduli properties of $\text{Ni}_{0.3}\text{Cu}_{0.22}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles have been investigated. The elastic constants of the samples have been calculated by using the values of the structural parameters and also the vibration frequencies obtained from infrared spectra. The values of shear (V_s) and longitudinal (V_l) wave velocities obtained from force constants have been used to determine the values of Young's modulus (E), rigidity modulus (G), bulk modulus (B), Debye temperature (θ_D). By comparison of the elastic results of the studied samples, we can observe that the elastic moduli of the samples sintered under reducing atmosphere are higher than the other samples, whereas they have been improved with increase of sintering temperature under reducing atmosphere. In addition, using the values of the compliance s_{ij} obtained from elastic stiffness constants, the values of Young's modulus $E(hkl)$ and Poisson's ratio $\sigma(hkl, \theta)$ along the oriented direction $[hkl]$ have been calculated for the samples.

Keywords: Ni-Cu-Zn ferrite; Citrate-nitrate method; IR spectroscopy; Mechanical properties.

■ ■

* **Corresponding Author:**

Ahmad Gholizadeh, PhD

Address: School of Physics, Damghan University (DU), Damghan, Iran.

Tel: +98 (23) 35220090

E-mail: gholizadeh@du.ac.ir

اثر محیط و دمای گرمادهی بر ویژگی‌های مکانیکی نانوذرات فریت نیکل - مس - روی

احمد قلی‌زاده

استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه علوم پایه دامغان، دامغان، ایران.

چکیده

فریت‌ها به خاطر داشتن ویژگی‌های ساختاری، الکتریکی، مغناطیسی و مکانیکی منحصر به فرد در شرایط فرین موضوع تحقیقاتی بزرگی را در بردارد. در این کار، اثرات دمای و جو گرمادهی روی ویژگی‌های مدول کشسانی نانوذرات $Ni_{0.3}Cu_{0.2}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ مورد بررسی قرار می‌گیرد. مقادیر ثابت‌های کشسانی نمونه‌ها با استفاده از مقادیر پارامترهای ساختاری و همچنین فرکانس‌های به‌دست‌آمده از طیف فروسرخ نمونه‌ها محاسبه شدند. مقادیر سرعت‌های امواج طولی (V_L) و عرضی (V_T) به‌دست‌آمده از ثابت‌های نیرو، برای تعیین مقادیر مدول یانگ (E)، مدول سفتی (G)، مدول حجمی (B) و دمای دمای (θ_D) استفاده شده‌اند. با مقایسه نتایج کشسانی نمونه‌های مورد مطالعه می‌توان فهمید که ویژگی‌های کشسانی نمونه‌ها با گرمادهی در محیط کاهنده بیشترین مقدار را دارد که با افزایش دما این ویژگی‌ها در نمونه‌های گرمادهی شده در محیط اکسنده بهتر می‌شود. همچنین، مقادیر ثابت‌های نرمی σ به‌دست‌آمده از ثابت‌های کشسانی نمونه‌ها در محاسبه مدول یانگ $E(hkl)$ و نسبت پواسون $\sigma(hkl, \theta)$ در امتداد راستاهای بلوری $[hkl]$ استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: فریت نیکل-مس-روی، روش سیترا-نیترا، طیف‌سنجی فروسرخ، ویژگی‌های مکانیکی.

۱. مقدمه

به‌دلیل مقاومت ویژه الکتریکی بالا، اتلاف‌های جریان گردابی و اتلاف دی‌الکتریک پایین فریت‌ها می‌توان از آن‌ها به‌طور گسترده‌ای در انواع مختلفی از قطعات الکترونیک نظیر القاگرها، مبدل‌ها و هدهای مغناطیسی استفاده کرد [۱]. ثابت‌های کشسانی در فهم رفتار مهندسی مواد بسیار مهم است. ثابت‌های کشسانی در ارتباط نزدیک با بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی مواد نظیر بسامدهای صوتی فونون، تنش‌های داخلی، دمای دمای و غیره هستند که طبیعت نیروهای بین‌اتمی و بین یونی را در ساختار ارائه می‌دهند [۲ و ۳].

روش امواج پالسی عبوری التراسونیک^۱ (UPTT)، معمول‌ترین روش برای تعیین دمای دمای و ثابت‌های کشسانی است [۴]. برای مطالعه ویژگی‌های کشسانی فریت‌ها و گارنت‌ها، روشی بر پایه طیف‌سنجی فروسرخ توسط مودی^۲ و همکاران توسعه داده شد [۳]. دو روش برای بیان ویژگی‌های کشسانی بلورها وجود دارد: یکی بر حسب ثابت‌های سختی کشسانی (Cij) که در آن i و j مقادیر ۱ تا ۶ را دارند) و دیگری

1. Ultrasonic Pulse Transmission Technique
2. Modi

بر حسب ثابت‌های نرمی کشسانی (Sij). در حالت کلی ۳۶ ثابت کشسانی وجود دارند که در مورد مواد همگون شبیه به فریت و گارنت، به سه ثابت (C_{11} ، C_{12} و C_{44}) کاهش‌ناپذیر کاهش می‌یابند. معکوس تانسور ثابت‌های سختی کشسانی، تانسور ثابت‌های نرمی کشسانی را نتیجه می‌دهد. رفتار کشسانی فریت NiCuZn در بازه دمایی ۳۰۰-۴۰۰ K یک وابستگی وابسته به ترکیب را نشان می‌دهد و با افزایش دما کاهش می‌یابد و در نزدیک دمای کوریپیک نابهنجاری کوچکی مشاهده می‌شود که بر حسب تغییر ثابت ناهمسانگردی مغناطوبلورب توضیح داده می‌شود [۵]. در کارهای قبلی مان نشان دادیم که دما و جو گرمادهی می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی فریت‌ها را تحت تأثیر قرار دهد و یک تنش‌هایی در فریت ایجاد کند [۶ و ۷]. در این کار سعی شده است ویژگی‌های کشسانی فریت نیکل - مس - روی تهیه شده تحت شرایط مختلف گرمادهی نظیر دما و محیط گرمادهی مورد بررسی قرار گیرد. مقادیر ثابت‌های کشسانی فریت نیکل - مس - روی تهیه شده به روش سیترا به ازای دماهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ °C و تحت محیط گرمادهی متفاوت اکسنده (هوا)، خنثی (آرگون) و کاهنده (مونواکسید کربن) با استفاده از مقادیر پارامترهای ساختاری

* نویسنده مسئول:
دکتر احمد قلی‌زاده

نشانی: دامغان، دانشگاه علوم پایه دامغان، گروه فیزیک.

تلفن: ۰۹۸ (۲۳) ۳۵۲۲۰۰۹۰

پست الکترونیکی: gholizadeh@du.ac.ir

والدرون^۳ پیشنهاد شده بود به دست آمدند [۹ و ۱].

معادله ۲.

$$K_t = 7.62 \times 10^{-7} v_1^2 M_A \left(\frac{N}{m}\right)$$

معادله ۳.

$$K_o = 10.62 \times 10^{-7} v_2^2 (M_B / 2) \left(\frac{N}{m}\right)$$

که در آن M_A و M_B به ترتیب وزن‌های مولکولی کاتیون‌های جایگ. ا‌های A و B بر طبق فرمول توزیع کاتیونی $(Ni_{0.3}^{2+} Cu_{0.2}^{2+} Fe_{1.5}^{3+}) O_4$ هستند. مقادیر K_t بزرگ‌تر از K_o هستند که به رابطه تناسب معکوس بین ثابت‌های نیرو و طول باندها اشاره دارد. مقادیر K_t و مقادیر K_o مقادیر بین گرمادهی شده در جو کاهنده بزرگ‌تر از نمونه‌های دیگر است که نشان‌دهنده قدرت بیشتر پیوند یونی این نمونه‌هاست. برای سیستم فریت اسپینل، ثابت‌های کشسانی و دمای دمای را می‌توان با استفاده از ثابت‌های نیرو که در گزارش‌های مختلف یافت می‌شود محاسبه کرد [۱۰]. در این روش، ثابت نیروی متوسط $(K = (K_t + K_o)/2)$ به ثابت سختی C_{11} بر سختی $CK = a_{11} [4-1]$ وابسته است که در آن a ثابت شبکه است. دیگر ثابت‌های سختی کشسانی نمونه‌ها با استفاده از روش معرفی شده در زیر محاسبه می‌شوند.

در بلورهای مکعبی، سرعت امواج طولی (V_L) و عرضی (V_S) با استفاده از معادلات زیر به دست می‌آیند [۱۱]:

معادله ۴.

$$V_L = (C_{11} / \rho)^{1/2}$$

معادله ۵.

$$V_S = (C_{44} / \rho)^{1/2} = V_L / \sqrt{3}$$

همچنین مقادیر (V_L) و (V_S) در محاسبه ثابت سختی کشسانی (C_{44}) در فرمول (۵) استفاده می‌شود. مقادیر ثابت‌های سختی کشسانی در حدود مقادیر به دست آمده برای دیگر فریت‌ها است [۱-۳]. از جدول ۱ می‌توان مشاهده کرد که ثابت‌های نیروی نمونه‌های گرمادهی شده در جو اکسند با افزایش دما افزایش می‌یابند در حالی که ثابت‌های نیروی نمونه‌های گرمادهی شده در جو خنثی و کاهنده کاهش می‌یابند که آن را می‌توان به حضور دو نوع ناخالصی متفاوت در نمونه‌های کاهنده و اکسند مرتبط دانست [۸]. همچنین تغییرات ثابت‌های نیرو را می‌توان به تغییر در طول باند کاتیون - اکسیژن نسبت داد. این موضوع بدان جهت است که با افزایش طول باند نمونه‌ها، انرژی مورد نیاز برای شکستن پیوندها کاهش می‌یابد که کاهش ثابت‌های نیرو را توجیه می‌کند.

با مشاهده مقادیر داده شده در جدول ۲ می‌توان فهمید

3. Waldron

و فرکانس‌های به دست آمده از طیف فروسرخ نمونه‌ها محاسبه شدند. روش محاسبه مقادیر مدول یانگ و نسبت پواسون به ازای راستاهای بلوری مختلف فریت نیکل - مس - روی با استفاده از فرمول‌های ارائه شده کار جدیدی است که تا بحال انجام نشده است.

۲. مواد و روش تحقیق

تعداد نه نمونه تک‌فاز از فریت نیکل - مس - روی، تحت دماهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ °C و محیط گرمادهی متفاوت اکسند (هوا)، خنثی (آرگون) و کاهنده (مونواکسید کربن) به روش سیترا تهیه شدند. اسامی نه نمونه از فریت نیکل - مس - روی مورد مطالعه به اختصار در جدول ۱ آورده شده است. مشخصه‌یابی‌های ساختاری و مغناطیسی نمونه‌ها در کار قبلی نویسندگان گزارش شده است [۴].

طیف IR نمونه‌ها با استفاده از طیف سنج Perkin-Elmer FT-IR در گستره عدد موج $1500-350 \text{ cm}^{-1}$ به منظور مشخصه‌یابی‌های کشسانی نه نمونه از فریت نیکل - مس - روی ثبت و جداگانه توسط نویسندگان گزارش شده است [۸].

۳. نتایج و بحث

چگالی نانوذرات با استفاده پراش پرتو X از فرمول زیر محاسبه شد.

معادله ۱.

$$\rho_{XRD} = 8M / Na^3$$

که در آن M جرم مولکولی نمونه و N عدد آووگادرو است. مقادیر پارامتر شبکه‌ای (a) به همراه چگالی ρ_{XRD} در جدول ۱ داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که نمونه‌های گرمادهی شده در جو کاهنده (مونواکسید کربن) دارای چگالی بیشتری نسبت به نمونه‌های دیگر هستند که به دلیل ثابت شبکه کوچک‌تر این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های دیگر است. از بین این نمونه‌ها، نمونه FY چگالی بیشتری دارد.

مکان‌های دو باند قوی U_1 و U_2 مربوط به ساختار اسپینل مکعبی در جدول ۱ آورده شده‌اند [۸]. U_1 به باند ارتعاشی بین یون‌های فلزی چهاروجهی جایگاه A و یون اکسیژن یعنی O-tetra-M نسبت داده می‌شود. در حالی که U_2 مربوط به باند ارتعاشی بین یون‌های فلزی هشت‌وجهی جایگاه B و یون اکسیژن یعنی O-octa-M است. حضور تنها این دو باند فرکانسی در گستره فرکانسی زیر 1000 cm^{-1} تشکیل ساختار اسپینلی را تأیید می‌کند. مقادیر U_1 و U_2 داده شده در جدول ۱ نشان می‌دهد که باندهای فرکانسی به شدت به دما و جو گرمادهی وابسته هستند.

ثابت‌های نیروی جایگاه‌های چهاروجهی (K_t) و هشت‌وجهی (K_o) با استفاده از معادلات زیر که توسط

جدول ۲. مقادیر ثابت نیروی میانگین، سرعت امواج برشی و طولی، ثابت سختی کشسانی، سرعت میانگین موج و دمای دمای نمونه‌ها.

نمونه	K(N/m)	C ₁₁ (GPa)	V _L (m/s)	V _S (m/s)	C ₄₄ (GPa)	V _m (m/s)	θ ₀ (K)
F1	120.42	143.427	5173.85	3043.44	47.809	3373.12	478.29
F2	122.43	145.800	5217.45	3069.09	48.600	3401.54	481.70
F3	122.67	146.003	5225.47	3073.81	48.668	3406.77	481.51
F4	121.96	145.367	5202.91	3060.54	48.456	3392.06	480.93
F5	119.68	142.513	5159.27	3034.86	47.504	3363.61	477.18
F6	119.89	142.705	5165.64	3038.61	47.569	3367.77	477.53
F7	122.99	147.308	5199.42	3058.49	49.103	3389.79	480.65
F8	122.99	146.802	5217.37	3069.04	48.934	3401.49	482.31
F9	122.03	145.602	5198.88	3058.17	48.534	3389.44	480.60

در نمونه‌های گرمادهی شده در جو اکسندۀ افزایش آرامی را با دما نشان می‌دهند که در نمونه‌های گرمادهی شده در جو خنثی و کاهنده تغییرات غیریکنواخت است. این تغییرات می‌تواند ناشی از تغییرات در اعداد موج باند‌های IR آشد و این نتایج با استفاده از مقادیر مدول‌های کشسانی که در زیر به‌دست می‌آیند قابل توجیه هستند. مقادیر گزارش شده در جدول ۲ حدود مقادیر محاسبه شده برای نمونه‌های فریت مس - روی در مرجع [۴] هستند.

سرعت‌های V_L و V_S را همچنین می‌توان برای محاسبه مدول طولی (L) و مدول سفتی (G) استفاده کرد. در ادامه، نسبت پواسون که در محاسبه ثابت سختی کشسان (C₁₂) به‌صورت زیر استفاده می‌شود با روابط L و G به‌دست می‌آید [۱-۳ و ۱۰]:

معادله ۸.

$$L = \rho(V_L)^2$$

معادله ۹.

$$G = \rho(V_S)^2$$

معادله ۱۰.

$$\sigma = (L - 2G) / (2(L - G))$$

معادله ۱۱.

$$C_{12} = \sigma C_{11} / (1 - \sigma)$$

مقادیر محاسبه شده در جدول ۳ آورده شده‌اند. مقادیر نسبت پواسون به‌دست‌آمده (σ = ۰٫۲۳۵۴) برای نمونه‌ها در گستره ۰٫۹- تا ۰٫۵ است که در توافق با نظریه کشسان همسانگرد است [۳]. مدول یانگ (E) و مدول حجمی (B) نیز با استفاده از ثابت‌های سختی C₁₁ و C₁₂ با روابط زیر داده می‌شوند [۱-۳]:

معادله ۱۲.

$$E = (C_{11} - C_{12})(C_{11} + 2C_{12}) / (C_{11} + C_{12})$$

که سرعت امواج طولی بزرگ‌تر از امواج عرضی است. این ویژگی می‌تواند به این دلیل باشد که وقتی یک موج سرتاسر یک ماده را طی می‌کند ذرات ماده را برای انتقال انرژی به ارتعاش وامی‌دارد. ذرات ارتعاشی به ذرات دیگر برخورد می‌کنند که ارتعاش ذرات دیگر را نتیجه می‌دهد. در مورد امواج عرضی، ذره‌ای که در محیط، عمود بر راستای انتشار موج حرکت می‌کند نیاز به انرژی بیشتری برای ارتعاش ذرات همسایه دارد [۱ و ۲]. این نتایج کاهش انرژی امواج را نتیجه می‌دهد که می‌توان فهمید چرا سرعت امواج عرضی کمتر از امواج طولی هستند. همچنین سرعت امواج طولی و عرضی در نمونه‌های گرمادهی شده در جو اکسندۀ افزایش آرامی را با دما نشان می‌دهند در حالی که در نمونه‌های گرمادهی شده در جو خنثی و کاهنده، تغییرات غیریکنواخت دارد.

با استفاده از مقادیر V_S و V_L محاسبه شده می‌توان بر طبق فرمول زیر مقدار سرعت میانگین موج (V_m) را به‌دست آورد [۱ و ۲]:

معادله ۶.

$$\frac{3}{V_m^3} = \frac{1}{V_L^3} + \frac{2}{V_S^3}$$

و در ادامه از مقدار V_m برای محاسبه دمای دمای (θ₀) استفاده کرد [۳]:

معادله ۷.

$$\theta_0 = \frac{h}{k_B} \left[\frac{3\rho q N_A}{4\pi M} \right]^{1/3} V_m$$

که در آن h ثابت پلانک، k_B ثابت بولتزمن، M وزن مولکولی، q تعداد اتم‌ها در یک واحد فرمولی و ρ چگالی نمونه‌ها هستند. مقادیر V_m و θ₀ در جدول ۲ داده شده‌اند. کاهش در دمای دمای، یک کاهش در مدول سفتی (G) را ایجاد می‌کند. از جدول ۲ می‌توان مشاهده کرد که دمای دمای تمامی نمونه‌ها در یک حدود هستند ولی مقادیر آن‌ها

معادله ۱۳.

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

مقادیر مدول یانگ و مدولجمی در جدول ۳ ارائه شده‌اند. می‌توان مشاهده کرد که مقادیر مدول یانگ و مدول حجمی نمونه‌های گرمادهی شده دجو کاهنده نسبت به دو جو دیگر بیشتر است. ولی این مقادیر برای نمونه‌های گرمادهی شده در جو اکسند افزایش آرامی را با دما نشان می‌دهند که در نمونه‌های گرمادهی شده در جو خنثی و کاهنده تغییرات غیریکنواخت است.

مدول یانگ $E(hkl)$ و نسبت پواسون $\sigma(hkl, \theta)$ ، دو پارامتر ناهمسانگرد فیزیکی مهمی از مواد هستند که به یک راستای خاص بلوری وابسته‌اند. عبارتهای عمومی برای مدول یانگ و نسبت پواسون در امتداد راستای دلخواه $[hkl]$ با استفاده از معادلات زیر برای بلورهای مکعبی داده می‌شود [۱۲]:

معادله ۱۴.

$$\frac{1}{E(hkl)} = s_{11} - 2s_0 \frac{(hk)^2 + (hl)^2 + (kl)^2}{(h^2 + k^2 + l^2)^2}$$

معادله ۱۵.

$$\nu(hkl, \theta) = \left\{ \left[s_{12} + \frac{s_0}{h^2 + k^2 + l^2} \times \left(\left(\frac{h^2 l}{\sqrt{h^2 + k^2} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \cos \theta - \frac{hk}{\sqrt{h^2 + k^2}} \sin \theta \right)^2 + \left(\frac{k^2 l}{\sqrt{h^2 + k^2} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \cos \theta - \frac{hk}{\sqrt{h^2 + k^2}} \sin \theta \right)^2 + \left(\frac{l \sqrt{h^2 + k^2}}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \cos \theta \right)^2 \right] \right\} / \left[-s_{11} + 2s_0 \frac{(hk)^2 + (hl)^2 + (kl)^2}{(h^2 + k^2 + l^2)^2} \right]$$

جدول ۳. مقادیر ول طولی، مدول سفتی، ثابت سختی کشسانی، مدول یانگ و مدول حجمی نمونه‌ها.

نمونه	L(GPa)	G(GPa)	σ (Dimensionless)	C_{12} (GPa)	E(GPa)	B(GPa)
F1	143.43	49.63	0.23545	44.170	122.63	77.26
F2	145.80	50.45	0.23545	44.900	124.66	78.53
F3	146.00	50.52	0.23545	44.963	124.83	78.64
F4	145.37	50.30	0.23545	44.767	124.29	78.30
F5	142.51	49.31	0.23545	43.888	121.85	76.76
F6	142.71	49.38	0.23545	43.947	122.01	76.87
F7	147.31	50.97	0.23545	45.365	125.95	79.35
F8	146.80	50.80	0.23545	45.209	125.51	79.07
F9	145.60	50.38	0.23545	44.839	124.49	78.43

جدول ۴. مقادیر ثابت‌های نرمی s_{11} ، s_{12} و s_{44} و همچنین s_0 نمونه‌ها.

نمونه	$s_{11}(\text{GPa})^{-1}$	$-s_{12}(\text{GPa})^{-1}$	$s_{44}(\text{GPa})^{-1}$	$-s_0 \times 10^{-4} (\text{GPa})^{-1}$
F1	0.0082	0.0019	0.0209	3.500
F2	0.0080	0.0019	0.0206	4.000
F3	0.0080	0.0019	0.0205	3.500
F4	0.0080	0.0019	0.0206	4.000
F5	0.0082	0.0019	0.0211	4.500
F6	0.0082	0.0019	0.0210	4.000
F7	0.0079	0.0019	0.0204	4.000
F8	0.0080	0.0019	0.0204	3.000
F9	0.0080	0.0019	0.0206	4.000

جدول ۵. مقادیر مدول یانگ (برحسب گیگا پاسکال) [و نسبت پواسون] در امتداد راستاهای بلوری مختلف برای نمونه‌ها.

نمونه	E(220) [σ(220)]	E(311) [σ(311)]	E(222) [σ(222)]	E(400) [σ(400)]	E(422) [σ(422)]	E(511) [σ(511)]	E(440) [σ(440)]	E(533) [σ(533)]
F1	119.40 [0.2254]	120.34 [0.2346]	118.57 [0.2375]	121.95 [0.2317]	119.40 [0.2321]	121.23 [0.2321]	119.40 [0.2212]	119.03 [0.2280]
F2	121.95 [0.2306]	123.06 [0.2408]	120.96 [0.2438]	125.00 [0.2375]	121.95 [0.2378]	124.13 [0.2380]	121.95 [0.2251]	121.51 [0.2330]
F3	122.32 [0.2310]	123.30 [0.2405]	121.45 [0.2435]	125 [0.2375]	122.32 [0.2390]	124.24 [0.2379]	122.32 [0.2266]	121.93 [0.2335]
F4	121.95 [0.2300]	123.06 [0.2410]	120.96 [0.2444]	125 [0.2375]	121.95 [0.2379]	124.13 [0.2380]	121.95 [0.2251]	121.51 [0.2330]
F5	118.69 [0.2237]	119.88 [0.2354]	117.64 [0.2393]	121.95 [0.2317]	118.69 [0.2326]	121.02 [0.2323]	118.69 [0.2183]	118.22 [0.2269]
F6	119.05 [0.2245]	120.11 [0.2350]	118.11 [0.2383]	121.95 [0.2317]	119.04 [0.2321]	121.12 [0.2322]	119.04 [0.2197]	118.63 [0.2275]
F7	123.46 [0.2329]	124.60 [0.2438]	122.44 [0.2471]	126.58 [0.2405]	123.45 [0.2407]	125.69 [0.2409]	123.45 [0.2279]	123.00 [0.2358]
F8	122.70 [0.2319]	123.54 [0.2400]	121.95 [0.2425]	125 [0.2375]	122.70 [0.2377]	124.34 [0.2379]	122.69 [0.2282]	122.36 [0.2341]
F9	121.95 [0.2300]	123.06 [0.2408]	120.96 [0.2441]	125 [0.2375]	121.95 [0.2378]	124.13 [0.238]	121.95 [0.2251]	121.51 [0.233]

۴. نتیجه گیری

در این کار سعی شده است تا ویژگی‌های کشسانی فریت نیکل - مس - روی را تحت شرایط مختلف نظیر دما و جو گرمادهی مورد بررسی قرار دهیم. مقادیر ثابت‌های کشسانی فریت نیکل - مس - روی تهیه شده به روش سیترا به ازای دماهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ °C و تحت محیط گرمادهی متفاوت اکسند (هوا)، خنثی (آرگون) و کاهنده (مونواکسید کربن) با استفاده از مقادیر پارامترهای ساختاری و فرکانس‌های به‌دست‌آمده از طیف فرسرخ نمونه‌ها محاسبه شدند.

- ۱- مقادیر ثابت‌های کشسانی نمونه‌های گرمادهی شده در جو اکسند برخلاف نمونه‌های گرمادهی شده در دو جو دیگر با افزایش دما کاهش می‌یابد که آن را می‌توان به حضور دو نوع ناخالصی متفاوت در نمونه‌ها مرتبط دانست.
- ۲- همچنین مقادیر ثابت‌های کشسانی نمونه‌های گرمادهی در جو کاهنده بیشتر از نمونه‌های دیگر است.
- ۳- مقادیر نسبت پواسون در راستای بلوری [۱۱۱] بیشترین مقدار و در راستای بلوری [۱۱۰] دارای کمترین مقدار خود هستند ولی مقادیر مدول یانگ تغییرات غیریکنواخت را برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهند.

که در آن $s_0 = s_{11} - s_{12} - \frac{1}{2}s_{44}$ به‌عنوان ضریب ناهمسانگردی نرمی بیان می‌شود و $s_0 = 0$ شرط همسانگردی کشسان است. ثابت‌های نرمی کشسان مستقل s_{11} ، s_{12} و s_{44} برای یک بلور مکعبی با استفاده از ثابت‌های سختی کشسانی (C_{ij}) و معادلات زیر محاسبه می‌شود [۱۳]:

معادله ۱۶.

$$s_{11} + 2s_{12} = (C_{11} + 2C_{12})^{-1}, s_{11} - s_{12} = (C_{11} - C_{12})^{-1}, s_{44} = 1/C_{44}$$

مقادیر s_{ij} و s برای نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۴ داده شده‌اند. با جایگذاری شاخص‌های میلر صفحه (hkl) و مقادیر ثابت‌های نرمی s_{11} ، s_{12} و s_{44} تمامی نمونه‌ها درون معادلات (۱۳) و (۱۴)، می‌توان مدول یانگ $E(hkl)$ و نسبت پواسون $\sigma(hkl, \theta)$ در امتداد هر راستای بلوری $[hkl]$ صفحه مشاهده (hkl) را به‌دست آورد.

مقادیر مدول یانگ $E(hkl)$ و نسبت پواسون $\sigma(hkl, \theta)$ برای تمامی نمونه‌ها در جدول ۵ آورده شده‌اند. هر دو مقادیر مدول یانگ و نسبت پواسون برای تمامی راستاهای بلوری تحت تأثیر دما و جو گرمادهی هستند. مقادیر نسبت پواسون به‌دست‌آمده برای نمونه‌ها در گستره ۰/۹- تا ۰/۵ است که در توافق با نظریه کشسان همسانگرد است [۲-۱]. بیشینه و کمینه مقادیر نسبت پواسون در امتداد دو راستای [۱۱۱] و [۱۱۰] است ولی مقادیر مدول یانگ تغییرات غیریکنواخت را برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهند.

References

- [1] A. Gholizadeh, "A comparative study of physical properties in Fe_3O_4 nanoparticles prepared by coprecipitation and citrate methods" *Journal of the American Ceramic Society*, 2017, vol. 100, pp. 3577-3588.
- [2] S. G. Algude, S. M. Patange, Sagar E. Shirsath, D. R. Mane, K. M. Jadhav "Elastic behaviour of Cr^{3+} substituted Co-Zn ferrites" *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2014, vol.350, pp. 39-41.
- [3] S. M. Patange, Sagar E. Shirsath, K.S. Lohar, S. G. Algude, S. R. Kamble, N. Kulkarni, D. R. Mane, K. M. Jadhav "Infrared spectral and elastic moduli study of $\text{NiFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ nanocrystalline ferrites" *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2013, vol. 325, pp. 107-111.
- [4] K. B. Modi, "Elastic moduli determination through IR spectroscopy for zinc substituted copper ferri chromates" *Journal of Materials Science*, 2004, vol.39, pp. 2887-2890.
- [5] S. R. Murthy, "Thermal Variation of Elastic Modulus on Nano-crystalline NiCuZn Ferrites" *Journal of Ceramics*, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/451863>.
- [6] K. H. Khedri, A. Gholizadeh, A. Malekzadeh, "Effect of annealing temperature on structural, optical and catalytic properties of Cu-Zn ferrite nanoparticles", *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 2016, vol.24 [2], pp. 297-308.
- [7] A. Gholizadeh, "A comparative study of the physical properties of Cu-Zn ferrites annealed under different atmospheres and temperatures: Magnetic enhancement of $\text{Cu}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles by a reducing atmosphere", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 452, pp. 389-397.
- [8] A. Gholizadeh, E. Jafari, "Effects of sintering atmosphere and temperature on structural and magnetic properties of Ni-Cu-Zn ferrite nano-particles: Magnetic enhancement by a reducing atmosphere", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol.422, pp. 328-336.
- [9] R. D. Waldron, "Infrared Spectra of Ferrites", *Physical Review*, 1955, vol.99, pp. 1727-1735.
- [10] H. M. Zaki, H. A. Dawoud, "Far-infrared spectra for copper-zinc mixed ferrites", *Physica B*, 2010, vol.405, pp. 4476-4479.
- [11] D. Ravinder, T. Alivelumanga, "Composition dependence of elastic behaviour of mixed manganese-zinc ferrites", *Materials Letters*, 1998, vol.37, pp. 51-56.
- [12] J.M. Zhanga, Y. Zhang, K.-W. Xu, V. Ji, "Young's modulus surface and Poisson's ratio curve for cubic metals", *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2007, vol. 68, pp. 503-510.
- [13] Ch. Kittel "Introduction to solid state physics" John Wiley & sons, Inc. 8th edition, pp. 81-82.