

بررسی خواص ساختاری، مغناطیسی و فروالکتریکی نانوپودرهای چندفروئی $[BiFeO_3]_{1-x}[BaTiO_3]_x$ تولیدشده به روش آلیاژسازی مکانیکی

محمد وظیفه‌شناس¹، محمد بهدانی²، محمود رضایی رکن‌آبادی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

2- دانشیار دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، mbehdani@um.ac.ir

3- استاد دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

مواد چندفروئی موادی هستند که در یک فاز بیش از یک پارامتر نظم فریک، از خود نشان می‌دهند. پارامترهای نظم فریک شامل فروالکتریک، فرومغناطیس و فروالاستیک هستند. از نظر فیزیکی، همزیستی نظم فروالکتریکی و فرومغناطیسی ضد هم می‌باشند. به عنوان مثال نظم فروالکتریکی به اربیتال های d خالی کاتیون ها وابسته است، در حالی که رفتار فرومغناطیس به اربیتال های d نیمه پر آنها وابسته است. در این گونه مواد با استفاده از میدان الکتریکی می توان نظم فرو مغناطیسی را و با استفاده از میدان مغناطیسی می توان نظم فروالکتریک را تغییر داد. مواد چند فروئی در قطعات حافظه های جدید، اسپینترونیک، حسگرهای میدان مغناطیسی مستقیم کاربرد فراوانی دارند. در این تحقیق، به منظور بهبود خواص مغناطیسی و دی الکتریکی چندفروئی $BiFeO_3$ از ماده فروالکتریک بسیار خوب $BaTiO_3$ استفاده نمودیم و تغییرات در خواص ساختاری، مغناطیسی و فرو الکتریکی ترکیب $[BiFeO_3]_{1-x}[BaTiO_3]_x$ را بررسی کردیم. نتایج اندازه گیری ها نشان داد که با افزودن $BaTiO_3$ ثابت شبکه کاهش و خواص فروالکتریکی ترکیب بهبود می یابد. اندازه گیری VSM نشان داد خواص فرو مغناطیسی با افزایش x تا 0.2 بهبود و با افزایش بیشتر کاهش می یابد.

کلمات کلیدی: فریت بیسموت، پروسکایت، فروالکتریک، فرومغناطیس، چندفروئی، مغناطوالکتریک، پادفرومغناطیس،

مقدمه

چندفروئی مدت برای اولین بار توسط اسمیت¹ در سال 1994 مورد استفاده قرار گرفت. چندفروئی ها به عنوان موادی، تعریف می شوند که بیش از یک مولفه اولیهی نظم فریک را در یک فاز از خود نشان می دهند [1]. با این حال امروزه تعریف چندفروئی ها به نظم یافتگی بلند برد دیگر، مانند پادفرومغناطیس گسترش یافته است. بنابراین هر ماده ای که بیش از یکی از این ویژگی ها را با هم داشته باشد چندفروئی نامیده می شود. امروزه چند فروئی بودن بیشتر به ترکیب فروالکتریسته و مغناطیس (فرومغناطیس، پادفرومغناطیس) اشاره دارد [2].

به طور عمده دو گروه از چندفروئی ها مهم هستند. گروه اول که نوع I چندفروئی ها گفته می شود، شامل آن مواردی است که فروالکتریسته و مغناطیس در آنها منابع متفاوتی دارند و مستقل از یکدیگرند، هر چند کمی جفت شدگی بین آنها وجود دارد. در این نمونه ها فروالکتریسته نسبت به مغناطیس در دماهای بالاتری ظاهر می شود و قطبش خودبخودی اغلب نسبتاً بزرگ است (از مرتبه $10 \mu C/cm^2$ تا $100 \mu C/cm^2$). گروه دوم که می توان به آنها نوع II چندفروئی ها گفت، موادی هستند که نسبتاً تازه کشف شده اند (در سال های 2003-2004) و در آنها مغناطیس باعث فروالکتریسته می شود که نشانهی جفت شدگی قوی بین مغناطیس و فروالکتریسته است. با این حال قطبش در این مواد معمولاً خیلی کوچک است (از مرتبه $10^{-2} \mu C/cm^2$) [2].

در مقابل مواد با یک نظم فریک واحد، حوزه ها در چندفروئی ها، خواص و ویژگی های اضافی ای دارند. به عنوان مثال، آنها توسط اتصال و ارتباط دو پارامتر نظم مشخص می شوند [3].

اثر مغناطوالکتریک پدیده ای است که در آن مغناطش (قطبش) با میدان الکتریکی (مغناطیسی) جفت می شود و اگر انرژی آزاد برحسب میدان های الکتریکی ϵ و مغناطیسی H بسط داده شود به این صورت تعریف می شود:

$$F(\epsilon, H) = - \sum_i P_i^s \epsilon_i - \sum_j M_j^s H_j + \frac{1}{2} \sum_{ii'} \chi_{ii'}^d \epsilon_i \epsilon_{i'} + \frac{1}{2} \sum_{jj'} \chi_{jj'}^m H_j H_{j'} + \sum_{ij} \alpha_{ij} \epsilon_i H_j + \sum_{ijj'} \frac{\beta_{ijj'}}{2} \epsilon_i H_j H_{j'} + \sum_{ij'j} \frac{\gamma_{ij'j}}{2} \epsilon_i \epsilon_{i'} H_j + \dots \quad (1)$$

که P_i^s و M_j^s قطبش و مغناطش خودبخودی به ترتیب در جهت i و j هستند. تانسور های $\chi_{ii'}^d$ و $\chi_{jj'}^m$ پذیرفتاری دی الکتریکی و مغناطیسی محیط هستند. α عبارت مرتبه اول، β و γ عبارات مراتب بالاتر جفت شدگی مغناطوالکتریک هستند. [4]

ترکیبات طبیعی تک فاز چندفروئی، بسیار نادرند و پاسخ مغناطوالکتریکی-شان یا نسبتاً ضعیف است و یا در درجه حرارت بیش از حد پایین رخ می دهد. در مقابل، کامپوزیت چندفروئی، که ترکیب هر دو فاز فروالکتریک و فری/فرومغناطیس است، به طور معمول پاسخ جفت شدگی مغناطوالکتریک بزرگی در بالاتر از دمای اتاق دارد، که برای برنامه های کاربردی تکنولوژیکی مناسبند. ون ساچتلن² مفهوم مشخصی تولید³ را در مواد کامپوزیت دو فاز در سال 1972 پیشنهاد کرد، که ناشی از جفت شدگی الاستیک بین دو فاز با ویژگی های متفاوت است.

در چنین مواد مرکبی اثر مغناطوالکتریک محصول ویژگی های یک ماده مغناطوتنگش و یک ماده پیزوالکتریک است. قطبش الکتریکی توسط نوسان یک میدان مغناطیسی متناوب ضعیف در حضور یک میدان بایاس DC القاء می شود، و ϵ یا قطبش مغناطیسی پس از اعمال یک میدان الکتریکی ظاهر می شود. اندرکنش جفت شدگی الاستیک بین فازمغناطوتنگش و

² van Suchtelen

³ product property

¹ H. Schmid

مقدار کاهش می‌یابد که ت. ج. پارک⁶ و همکارانش [9] نتایج ماراتایید می‌کنند. همچنین نتایج دیگر پژوهش‌ها در مورد اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک و اتلاف دی‌الکتریک برحسب فرکانس [10] و تغییرات منحنی پسماند الکتریکی با افزایش X [11] را بررسی کردیم. کاربردهای ترکیب‌های مغناطو الکتریکی شامل سنسورهای میدان مغناطیسی، سنسور هال و پروب اندازه‌گیری جریان، میدل، فیلتر، اسیلاتورها، شیفتهنده‌های فازی و قطعات حافظه، می‌باشد. کامپوزیت مغناطو الکتریکی را می‌توان به عنوان یک پروب مغناطیسی برای تشخیص میدان‌های AC یا DC استفاده کرد. مواد کامپوزیت در برنامه‌های کاربردی ماکروویو موزون الکتریکی مانند فیلترها، اسیلاتورها، و شیفتهنده‌های فازی استفاده می‌شوند. با توجه به ماهیت پسماندی اثر مغناطو الکتریکی، مواد کامپوزیت در قطعات حافظه کاربرد دارند. اثر مغناطو الکتریکی خطی، علامت مثبت و یا منفی دارد، که به شرایط باز پخت بستگی دارد (میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی موازی یا پاد موازی). بنابراین جهت‌شدگی می‌تواند، اجازه دهد که داده در فن آوری‌های حافظه به طور الکتریکی نوشته شود و به طور مغناطیسی خوانده شود. [5]

روش آزمایش

روش‌های متنوعی برای سنتز و آماده کردن $1-x$ -[BiFeO₃]x [BaTiO₃] وجود دارد از آن جمله محلول جامد، آلیاژ سازی مکانیکی، مسیر شیمیایی، سل-ژل، در این تحقیق از روش آلیاژسازی مکانیکی استفاده خواهیم کرد. هرکدام از ترکیب‌های BiFeO₃ و BaTiO₃ را با استفاده از اکسیدهای اولیه BaO، Fe₂O₃، Bi₂O₃ و TiO₂ با درصد وزنی و با ضرایب استوکیومتری معین، جداگانه به روش آلیاژسازی مکانیکی تهیه گردید. برای تهیه نانوپودر BiFeO₃ مواد اولیه به مدت 5 ساعت در دستگاه بال میل SPX8000 آسیاب شدند. پودر حاصل در دمای 700 درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت حرارت‌دهی شد تا ساختار BiFeO₃ شکل‌بگیرد. برای تولید نانوپودر BaTiO₃، مواد اولیه در دستگاه بال میل SPX8000 به مدت 12 ساعت آسیاب شدند. سپس نانو-پودرهای BiFeO₃ و BaTiO₃ برای تشکیل ترکیب $1-x$ -[BiFeO₃]x [BaTiO₃]x که در آن $x=0.1, 0.2, 0.3$ است، با ضرایب استوکیومتری مطابق با x، مخلوط و به مدت 5 ساعت آسیاب شدند. ترکیب پودری حاصل به مدت یک ساعت در دمای 700 درجه سانتی‌گراد حرارت‌دهی شد تا ساختار مورد نظر شکل بگیرد. طرح پراش پرتو ایکس پودرها با استفاده از دستگاه اشعه ایکس با لامپ مس با طول موج $\lambda=1.5418$ انگستروم (A⁰) گرفته شد و با نرم‌افزار MAUD ویرایش 2.33 تحلیل شد و میانگین اندازه نانوبلورک‌ها با استفاده از رابطه دبای شرر

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \alpha} \quad (4)$$

محاسبه شد که در آن λ طول موج پرتو تابشی، α زاویه ی قله‌ی براگ و β پهنا در نیم ارتفاع بر حسب رادیان است.

خواص مغناطیسی نانوپودرها با دستگاه VSM در دانشگاه بیرجند اندازه‌گیری شد.

به منظور اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریکی و فروالکتریکی ترکیب، قرص‌هایی با قطر 10/7 میلی‌متر و ضخامت 2/6 میلی‌متر با دستگاه پرس تهیه و قرص-

پیزوالکتریکی منجر به پاسخ مغناطو الکتریکی بزرگی در مواد مرکب مغناطو-الکتریکی می‌شود.

کامپوزیت‌های مغناطو الکتریکی چندفرونی که با ترکیب مواد پیزوالکتریکی و مغناطیسی تشکیل می‌شوند در سال‌های اخیر با توجه به، ویژگی تابعی چندگانه‌ی‌شان نظر زیادی را به خود جلب کرده‌اند. اثر مغناطو الکتریکی در ماد کامپوزیت به عنوان یک ویژگی تانسور تولید⁴ شناخته می‌شود که در نتیجه ی اندرکنش متقابل بین نظم‌های مختلف بین دو فاز کامپوزیت است. بنابراین اثر مغناطو الکتریکی نتیجه ای از ایجاد اثر مغناطوتنگش، (تغییر بعد نمونه در اثر میدان مغناطیسی) در فاز مغناطیسی و اثر پیزوالکتریکی، در فاز الکتریکی است.

$$ME_H \text{ effect} = \frac{\text{magnetic}}{\text{mechanical}} \times \frac{\text{mechanical}}{\text{electric}} \quad (2)$$

$$ME_E \text{ effect} = \frac{\text{electric}}{\text{mechanical}} \times \frac{\text{mechanical}}{\text{magnetic}} \quad (3)$$

این پدیده‌های جفت‌شدگی الکتریکی و مغناطیسی به دلیل اندرکنش الاستیک است که برای اثر ME_H ، زمانی که یک میدان مغناطیسی به کامپوزیت اعمال شود، ابعاد فاز مغناطیسی به طور مغناطو الاستیک تغییر می‌کند. تنش به فاز پیزوالکتریکی می‌رسد، و یک قطبش الکتریکی ایجاد می‌شود. به این ترتیب، اثر ME در کامپوزیت به ریزساختار کامپوزیت و جفت‌شدگی در سراسر سطح مشترک مغناطیسی فیزوالکتریکی بستگی دارد. [5]

BiFeO₃ پروسکایت یک مثال از مواد مغناطو الکتریکی است و یک دمای انتقال فاز فروالکتریکی، T_c نزدیک 1023 کلوین، و یک نظم آنتی فرومغناطیس نوع G، با دمای گذار، T_N نزدیک 643 کلوین دارد. این ترکیب در ساختار پروسکایت کج شده رومبوهدرال با گروه فضایی R3c متبلور می‌شود. دارای متغییرهای شبکه $a=b=c=5.63$ انگستروم و $\alpha=\beta=\gamma=59.4$ درجه در دمای اتاق در حالت کپه-ای است. در آن الکترون‌های اربیتال 6S در Bi عهده دار نظم فروالکتریکی هستند و در این زمان اربیتال‌های نیمه پر d_{xy} باعث نظم مغناطیسی می‌شوند [6].

با وجود اینکه BiFeO₃ فروالکتریکی است. اما به دلیل پایین بودن مقاومت ویژه، افزایش میدان اعمالی به آن موجب ایجاد جریان نشستی می‌شود و بنابراین منحنی پسماند فروالکتریکی آن به اشباع نمی‌رسد [2]. ترکیب BaTiO₃ دارای ساختار تتراگونال با گروه فضایی P4mm و خاصیت فروالکتریکی خوب و دمای کوری 120 درجه سانتی‌گراد است [7].

هدف ما در این پژوهش ترکیب دو ماده BaTiO₃ با ساختار پروسکایت با ویژگی فروالکتریکی خوب و BiFeO₃ با روش آلیاژ سازی مکانیکی به منظور بهبود خواص مغناطو الکتریکی ترکیب نهایی و بدست آوردن ترکیب $1-x$ -[BiFeO₃]x [BaTiO₃]x که در آن $x=0.1, 0.2, 0.3$ می‌باشد.

نتایج الگوی پراش اشعه ایکس ترکیب نهایی نشان‌دهنده ساختار آن سه گوشه، با گروه فضایی R3c:H تشخیص داده شد که ساختار پروسکایت تغییر شکل یافته نام دارد، که مطابق نتایج ف. پ. قورفیو⁵ و همکارانش [8] نشان از بین رفتن برخی قله‌ها و کاهش ناخالصی Bi₂Fe₄O₉ با افزایش x هستیم. با افزایش x مغناطش ماده تا $x=0.2$ افزایش می‌یابد و بعد از این

⁴ product tensor

⁵ Felicia Prihor Gheorghiu

⁶ Tae-Jin Park,

$\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ را دیگران نیز گزارش کرده اند [1]. فاز ناخالصی $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ با افزایش BaTiO_3 ناپدید می شود که در ترکیب $x=0.3$ کاملا مشهود است [13].

تحلیل نتایج با نرم افزار Maud انجام و اندازه نانو بلورکها بر طبق رابطه‌ی (4) محاسبه شد و نتایج در جدول 1 آورده شده است.

جدول (1): نتایج تحلیل الگوی پراش یکس برای xهای مختلف

x	$a, (\text{Å})$	$c, (\text{Å})$	اندازه نانو-بلورکها	گروه فضایی
0	5.5832 ± 0.0055	13.8830 ± 0.0055	32	R3c:H
0.1	5.6254 ± 0.0038	13.7381 ± 0.0179	21	R3c:H
0.2	5.6303 ± 0.0055	13.7851 ± 0.0324	24	R3c:H
0.3	5.6258 ± 0.0008	13.7073 ± 0.0056	26	R3c:H

با توجه به این داده ها ملاحظه می شود با افزایش تیتانایت باریم ثابت شبکه افزایش یافته است که در جدول 1 ملاحظه می شود و شدت برخی پیک ها کاهش یافته است.

ب: خواص مغناطیسی

در شکل 2 نتایج اندازه گیری VSM برای $x=0, 0.2, 0.3$ ترسیم شده است، که بیانگر تغییرات در خواص مغناطیسی است. در $x=0$ (فریت بیسموت) پسماند مغناطیسی ای ملاحظه نمی شود که نشانگر یاد فرومغناطیس بودن این ترکیب است اما با افزودن تیتانایت باریم شاهد ایجاد پسماند هستیم. در جدول 2 نتایج مغناطش باقی مانده، میدان بازدارنده و میدان اشباع برای xهای مختلف آورده شده است. شکسته شدن آرایش مارپیچی اسپین ها با ریز شدن اندازه نانو بلورک ها تا کمتر از 62 نانومتر (طول دوره تناوب ساختار مارپیچی اسپین ها) و همچنین افزایش اسپین های جبران نشده روی سطح نانو بلورک ها به دلیل افزایش نسبت سطح به حجم در نانو بلورک ها و همچنین افزایش ثابت شبکه توجیهی برای افزایش خواص مغناطیسی نانو بلورکها است [14] که در اندازه گیری VSM مشهود است. البته این افزایش تا $x=0.2$ ادامه دارد و برای $x=0.3$ مقدار مغناطش باقی مانده کاهش می یابد که به دلیل افزایش در صد تیتانایت باریم که یک ترکیب غیر مغناطیسی است و کاهش ثابت شبکه ایجاد شده است.

جدول (2) نتایج اندازه گیری مغناطیسی

x	مغناطش باقی مانده (emu/gr)	میدان وادارنده (G)	مغناطش اشباع (emu/gr)
0.0	0.001	138	0.135
0.1	0.133	2228	0.388
0.2	0.391	2645	0.989
0.3	0.341	3258	0.831

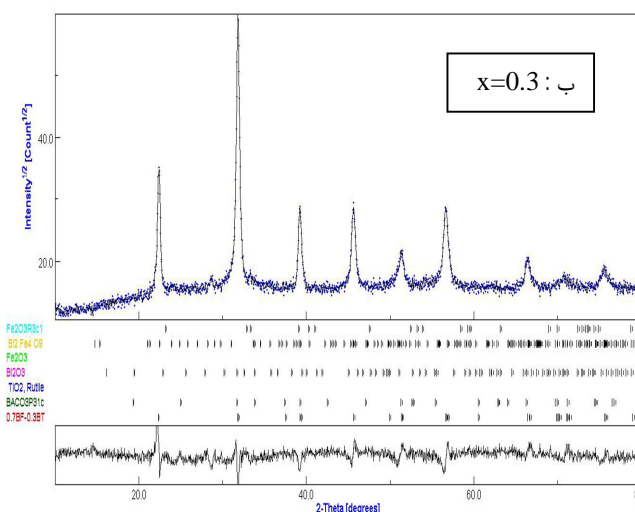
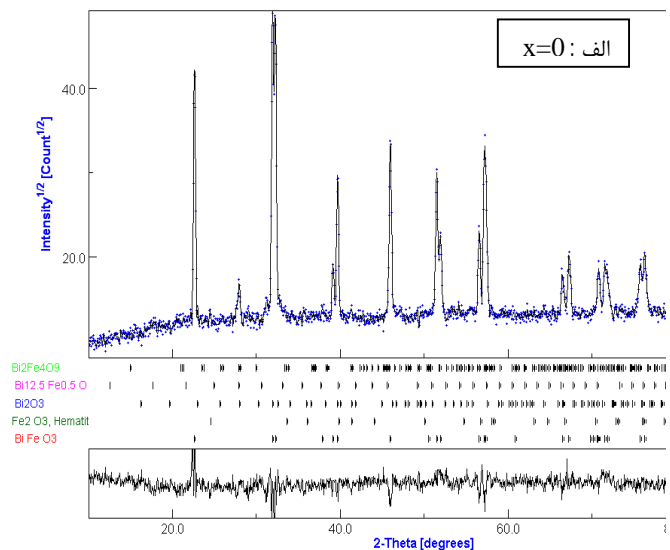
های تولید شده در دمای 800 درجه سانتی گراد به مدت 20 دقیقه بازیخت شدند. و ثابت دی الکتریک ϵ و اتلاف دی الکتریک $\tan(\delta)$ اندازه گیری شدند..

منحنی فروالکتریکی نمونه های سرامیکی با استفاده از روش ساویر تاویر⁷ رسم شدند [12].

نتایج

الف: خواص ساختاری

شکل 1 طرح پراش پرتو اشعه ایکس برای پودرهای $x=0.3$ و $x=0$ را نشان می دهد.

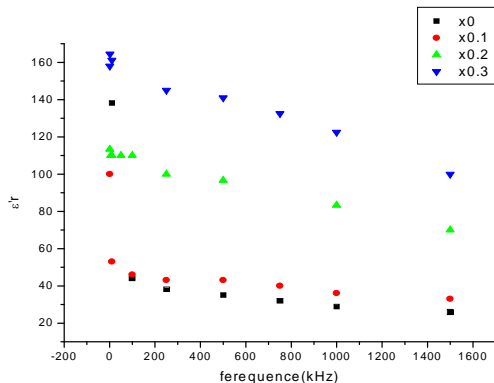


شکل 1: طرح پراش پرتو ایکس. الف: $x=0$ و ب: $x=0.3$

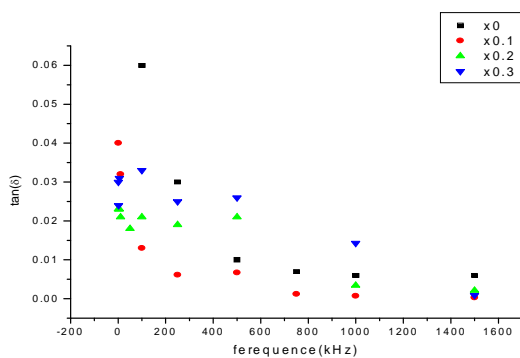
با تحلیل طرح پراش پرتو ایکس ترکیب BiFeO_3 ساختار آن سه گوشه، با گروه فضایی R3c:H تشخیص داده شد که ساختار پروسکایت تغییر شکل یافته نام دارد. با افزایش مقدار تیتانایت باریم به BiFeO_3 همه ترکیبات دارای پیکهای مربوط به BiFeO_3 هستند. به هنگام سنتز BiFeO_3 ، برخی فازهای ناخالصی نیز شکل می گیرد [7]. وجود فاز ناخالصی

⁷ Sawyer-Tower circuit

مهم در اتلاف دی‌الکتریک، حرکت دیواره‌ی حوزه‌ها و هدایت الکتریکی می-
باشند [14].

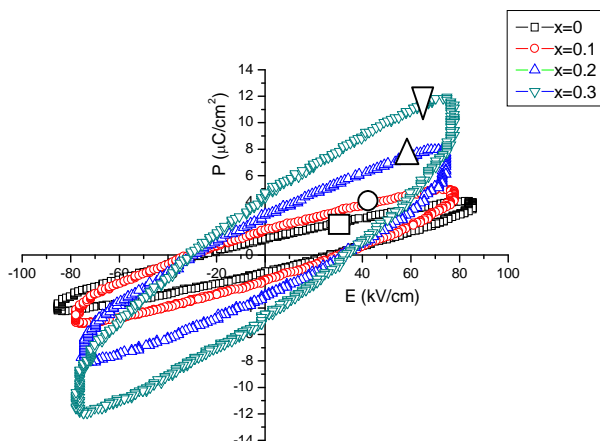


شکل (3) مقدار ثابت دی‌الکتریک در فرکانس‌های مختلف برای Xهای متفاوت

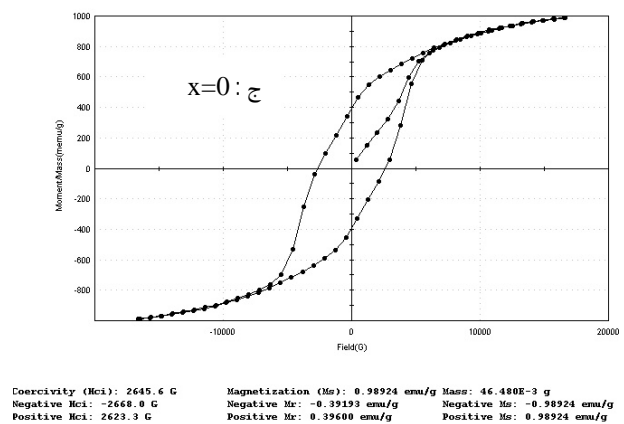
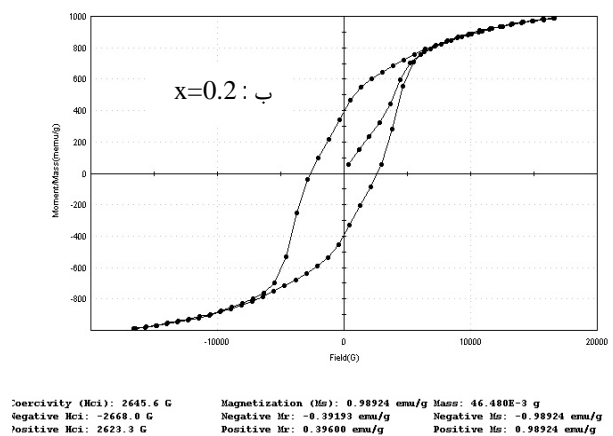
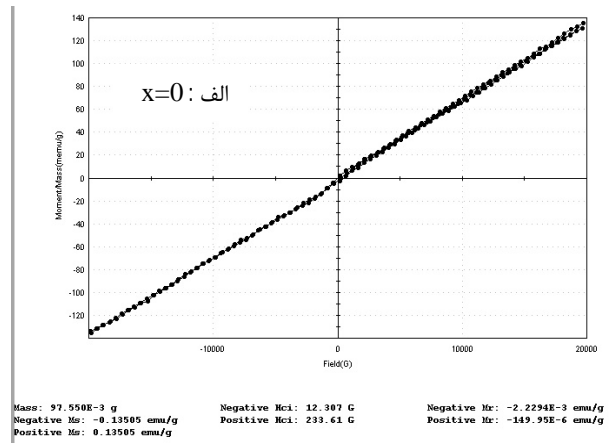


شکل (4) اتلاف دی‌الکتریک بر حسب فرکانس

به منظور اطلاع از رفتار فروالکتریکی نمونه‌ها حلقه‌ی پسماند آنها ترسیم
شد. شکل 5 منحنی پسماند فروالکتریکی را برای چهار ترکیب
 $x=0, 0.1, 0.2, 0.3$ در فرکانس 50 هرتز نشان می‌دهد که مشاهده می‌کنیم
با افزایش X، پسماند، قطبش باقی‌مانده و میدان وادارنده زیاد می‌شوند.



شکل (5) منحنی پسماند فروالکتریکی



شکل (2) : نمودار تغییرات مغناطش بر واحد جرم الف : $x=0$ ب :
 $x=0.2$ ج : $x=0.3$

ج: خواص دی‌الکتریکی و فروالکتریکی

مقدار ثابت دی‌الکتریک و اتلاف دی‌الکتریک در فرکانس‌های مختلف
اندازه‌گیری و نتایج در شکل 3 و 4 رسم شده است.
آنچنان که ملاحظه می‌شود با افزایش فرکانس، ثابت دی‌الکتریک ترکیب
کاهش می‌یابد که مربوط به پدیده‌ی واهلش دوقطبی‌هاست. دوقطبی‌های
الکتریکی توانایی هم‌جهت شدن بامیدان الکتریکی اعمالی در فرکانس بالا را
ندارند. با توجه به شکل (4) اتلاف دی‌الکتریک با افزایش در غلظت
 $BaTiO_3$ افزایش یافته‌است [13]. به‌طور کلی ثابت دی‌الکتریک به نحوی
ساخت در صدخلوص، اندازه‌ی دانه و چگالی سرامیک بستگی دارد و منابع

[2] حسین‌زاده، م.، "ساخت و بررسی ویژگی‌های ساختاری، مغناطیسی و فروالکتریکی نانوبلورک‌های چندفروئی $BiFe_{1-x}Co_xO_3$ "، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد 1391

[3] D.Litvin., "Ferroc classifications extended to ferrotoroidic crystal", *Acta Crystallographica Section A* Foundations of Crystallography, 2008. 64(2): p. 316-320

[4] J.Íñiguez González., "First-principles investigation of BiFeO₃ and related multiferroic materials", Ph.D. Thesis, Universitat Autònoma de Barcelona. Departament de Física, . 2012

[5] C.-W.Nan, , et al., "Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directio" , *Journal of Applied Physics*, 2008. 103(3): p. 031101-031101-35

[6] A. Singh , et al;"Direct Evidence for Multiferroic Magnetoelectric Coupling in 0.9BiFeO₃-0.1BaTiO₃" *Arxiv preprint arXiv*, 2008. p. 0810.5418,

[7] R.A.M. Gotardo and et al;"Improved ferroelectric and magnetic properties of monoclinic structured 0.8 BiFeO₃-0.2 BaTiO₃ magnetoelectric ceramics" , *Scripta Materialia*,61(5) . 2009. P.508-511

[8] F.P. Gheorghiu, , et al., "Preparation and properties of (1- x)BiFeO₃xBaTiO₃ multiferroic ceramics". *Journal of Alloys and Compounds*, 2010. 506(2): p. 862-867.

[9] T.-J.Park, , et al., "Composition-dependent magnetic properties of (1-x)BiFeO₃xBaTiO₃ solid solution nanostructures". *Physical Review B*, 2010. 82(2): p. 024431.

[10] H. Singh, , A. Kumar, and K. Yadav, "Structural, dielectric, magnetic, magnetodielectric and impedance spectroscopic studies of multiferroic (1-x)BiFeO₃xBaTiO₃ ceramics." *Materials Science and Engineering: B*, 2011. 176(7): p. 540-547

[11] R.A. Gotardo, , et al., "Improved ferroelectric and magnetic properties of monoclinic structured 0.8 BiFeO₃0.2BaTiO₃ magnetoelectric ceramics". *Scripta Materialia*, 2009:(5)61 .p. 508-511.

[12] م. بهدانی، "اندازه‌گیری پارامترهای سرامیک پیزوالکتریک" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۶۹.

[13] م. وظیفه‌شناس، م. بهدانی، م. رضایی‌رکن‌آبادی، "خواص دی-الکتریکی نانوبودرهای چندفروئی ترکیب $[BiFeO_3]_{1-x}[BaTiO_3]_x$ تهیه شده به روش آلیاژسازی مکانیکی." کنفرانس فیزیک ایران، 1392.

[14] B.D. Cullity, and C.D. Graham, "Introduction to magnetic materials" Wiley. Com 2011

[15] م. زابلی، "ساخت نانوبلورک‌های BaTiO₃ به روش فعال‌سازی مکانیکی و بررسی خواص ساختاری و فروالکتریکی آنها" ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، 1390 صفحه 48

مقادیر قطبش باقی‌مانده و میدان واگردانی برای ترکیبات مختلف در جدول 3 داده شده است.

جدول (3) نتایج حاصل از اندازه‌گیری فروالکتریکی

x	قطبش باقی مانده ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	میدان واگردانی ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)
0.0	1.21	25.5
0.1	1.91	29.5
0.2	3.0	31
0.3	4.46	32

نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته مشخص شد که با آلییدن BiFeO₃ با BaTiO₃ علاوه بر حذف فاز ناخالصی آن به ویژه در ترکیب x=0.3 که خود، یک چالش در تولید BiFeO₃ خالص است، موجب بهبود در خواص دی‌الکتریکی این ماده در فرکانس‌های مختلف شد. همچنین ثابت شبکه، پسماند مغناطیسی، پسماند فروالکتریکی، میدان واگردانی و قطبش باقی-مانده را افزایش داد.

تشکر و قدردانی

با تشکر از پرسنل آزمایشگاه حالت جامد دامغان و آزمایشگاه مغناطیس و ابرسانایی دانشگاه بیرجند.

فهرست علائم

P_r	قطبش خودبخودی C/m^2
E	میدان الکتریکی C/m
H	میدان مغناطیسی T
M	مغناطش خودبخودی emu/gr
ME_H	اثر مغناطو الکتریک در میدان مغناطیسی اعمالی
A^0	انگستروم
D	اندازه نانو بلورک ها
VSM	دستگاه مغناطیس سنج نمونه نوسانی
	فهرست حروف یونانی
$\chi_{ii}'^d$	تانسور پذیرفتاری دی الکتریکی
$\chi_{jj}'^m$	تانسور پذیرفتاری مغناطیسی
λ	طول موج پرتو
α	زاویه قله براگ
β	پهنای در نیم ارتفاع بر حسب رادیان
ϵ	ثابت دی الکتریک
$\tan(\delta)$	اتلاف دی الکتریک

مراجع

[1]H.Schmid., "Multi-ferroic magnetoelectrics". *Ferroelectrics* , 1994. 162(1): p. 317-338