

# تأثیر مقدار آلومینیوم و مواد افزودنی بر خواص مغناطیسی، الکتریکی و ساختاری فریت نیکل آلومینیوم

ایمان مقصودی\*<sup>۱</sup> و علیرضا گلعدار<sup>۱</sup>

۱- مدرس، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی

\*Iman.lifeg@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۸۹/۰۳/۲۸، تاریخ پذیرش: ۸۹/۰۶/۲۶)

## چکیده

در این تحقیق، اثر مقدار آلومینیوم، اندازه دانه و مواد افزودنی  $\text{CaO}$  و  $\text{SiO}_2$  بر خواص مغناطیسی و الکتریکی فریت نیکل آلومینیوم که به روش متالورژی پودر ساخته شده است، مورد بررسی قرار گرفته است. خواص مغناطیسی و الکتریکی نمونه‌ها توسط دستگاه اندازه‌گیر RLC و خواص ساختاری نمونه‌ها به وسیله SEM و XRD مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که نفوذپذیری مغناطیسی، دمای کوری، مقاومت سری هسته، پارامتر شبکه کریستالی و اندازه متوسط دانه‌ها با افزایش میزان آلومینیوم کاهش می‌یابد. همچنین با افزودن مواد افزودنی  $\text{CaO}$ ،  $\text{SiO}_2$  متوسط اندازه دانه و نفوذپذیری مغناطیسی افزایش و مقاومت سری هسته کاهش می‌یابد.

## واژه‌های کلیدی:

فریت، دمای کوری، نفوذپذیری مغناطیسی، مقاومت سری هسته.

## ۱- مقدمه

ساخته شده و اثر مقدار آلومینیوم و مواد افزودنی  $\text{CaO}$  و  $\text{SiO}_2$  بر خواص ساختاری و مغناطیسی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. فاز یوتکتیک ( $\text{SiO}_2$  و  $\text{CaO}$ ) در مرز دانه‌ها قرار گرفته و باعث افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش تلفات ناشی از جریان‌های گردابی نمونه‌ها می‌گردد. پارامترهای اندوکتانس، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی و مقاومت سری هسته، توسط دستگاه اندازه‌گیر RLC، دمای کوری با استفاده از ترازوی مغناطیسی و تغییرات پارامتر شبکه کریستالی با استفاده از نمودار XRD و جابجایی پیک‌ها، با افزایش مقدار آلومینیوم اندازه‌گیری شدند.

فریت نیکل آلومینیوم به دلیل دارا بودن تلفات مغناطیسی و الکتریکی پایین، دارای کاربردهای وسیعی در طول موج‌های رادیویی و مایکروویو می‌باشد [۱]. افزودن  $\text{Al}^{3+}$  به فریت نیکل باعث افزایش مقاومت الکتریکی و در نتیجه کاهش اتلاف دی‌الکتریکی و همچنین کاهش میزان اشباع مغناطیسی آن می‌شود [۲، ۳ و ۴].

به علاوه افزودن  $\text{Al}^{3+}$  سبب جلوگیری از رشد دانه شده و خواص مکانیکی این فریت را بهبود می‌بخشد [۵]. در این تحقیق فریت نیکل آلومینیوم ( $\text{NiAl}_x\text{Fe}_{2-x}$ ) به روش متالورژی پودر

## ۲- روش تحقیق

نمونه‌ها داخل سیم پیچ قرار گرفته و اندوکتانس و مقاومت سری هسته آنها در بازه فرکانسی ۱ KHz تا ۵ MHz اندازه گیری شد. از تقسیم اندوکتانس هر نمونه به اندوکتانس سیم پیچ بدون هسته در هر فرکانس ( $\frac{L}{L_0}$ )، نفوذپذیری مغناطیسی مؤثر نمونه در آن فرکانس تعیین شد [۶].

اندازه گیری دمای کوری نمونه‌ها با استفاده از ترازوی مغناطیسی انجام شد. نمونه مورد نظر توسط یک آهنربای الکتریکی در داخل کوره جذب شده، با افزایش دما در دمایی موسوم به دمای کوری، ماده فری مغناطیس به ماده پارامغناطیس تبدیل شده و رها می‌شود.

تغییرات پارامتر شبکه کریستالی فریت نیکل آلومینیوم با استفاده از نمودار XRD نمونه‌ها و جابجایی پیک‌های نمودار با افزایش مقدار آلومینیوم محاسبه شده‌اند.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- مطالعات ساختاری

در شکل (۱) نتیجه آزمایش XRD نمونه‌ها که نشانگر ساختار اسپینلی است، نشان داده شده است. در این شکل مقداری فاز غیر مشخص مشاهده می‌شود که می‌توان به انحراف از ترکیب استوکیومتری نمونه‌ها باشد.

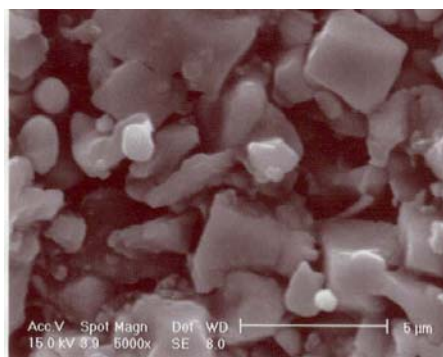
با توجه به شکل (۲)، با افزایش مقدار آلومینیوم پارامتر شبکه کریستالی فریت نیکل آلومینیوم کاهش می‌یابد. علت کاهش پارامتر شبکه کریستالی با افزایش مقدار آلومینیوم، کوچکتر بودن شعاع یونی یون‌های آلومینیوم (۰/۵۶ آنگسترم) نسبت به یون‌های آهن (۰/۶۷ آنگسترم) می‌باشد. جایگزینی یون‌های آلومینیوم به جای یون‌های آهن، باعث انقباض در شبکه شده و پارامتر شبکه کریستالی را کاهش می‌دهد.

شکل (۳) نشان می‌دهد، اضافه نمودن مواد افزودنی موجب افزایش و آلومینیوم موجب کاهش اندازه دانه فریت نیکل آلومینیوم می‌شود. به طور معمول افزایش دانسیته موجب بهبود

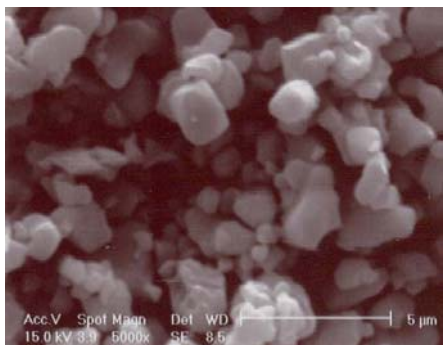
مواد اولیه برای ساخت فریت نیکل آلومینیوم شامل اکسیدهای آهن ( $Fe_2O_3$ )، نیکل (NiO) و آلومینیوم ( $Al_2O_3$ ) می‌باشد. این مواد باید از خلوص کافی (۹۹٪) برخوردار باشند زیرا ناخالصی‌های فلزی و غیر فلزی اثرات نامطلوبی بر خواص مغناطیسی خواهند داشت. در این تحقیق با توجه به فرمول مولکولی فریت نیکل آلومینیوم  $NiAl_xFe_{2-x}O_4$ ، نمونه‌هایی با ترکیب‌های ۰/۵، ۰/۴، ۰/۳، ۰/۲، ۰/۱، صفر  $x$  به روش متالورژی پودر ساخته شده و اثر ترکیب مولکولی بر روی اندوکتانس، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مؤثر و تلفات هسته، در بازه فرکانسی ۱ KHz تا ۵ MHz مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین دمای کوری فریت نیکل آلومینیوم در ترکیبات مختلف اندازه گیری شد.  $x$  های بیشتر از ۰/۵ از نظر خواص مغناطیسی اهمیت کمتری داشته به همین دلیل از ترکیباتی با درصد بیشتری از آلومینیوم صرف نظر شده است. برای بررسی اثر مواد افزودنی، همه نمونه‌ها یک بار با مواد افزودنی  $CaO$  و  $SiO_2$  به نسبت‌های ۰/۸ و ۰/۴ درصد وزنی و یک بار بدون این مواد ساخته شده و پارامترهای ذکر شده اندازه گیری شدند. در فرآیند ساخت، دمای تف‌جوشی مقدماتی و نهایی به ترتیب، ۱۱۵۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. همچنین زمان آسیاب ۶ ساعت در نظر گرفته شد.

شکل نمونه‌ها به صورت مکعب مستطیل بوده و ابعاد آنها پس از تف‌جوشی نهایی به صورت  $۴/۲۳ \times ۱/۲۷ \times ۰/۵۲$  می‌باشد. لازم به توضیح است پس از تف‌جوشی نهایی، چگالی نمونه‌ها در حدود ۸۵ درصد چگالی تئوری اندازه گیری شد.

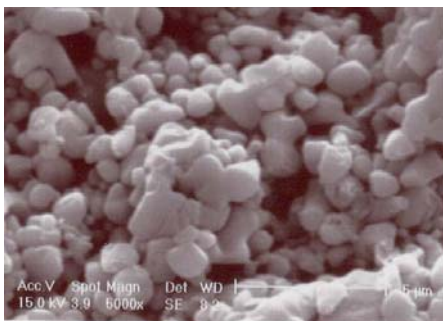
پارامترهای اندوکتانس، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی و مقاومت سری هسته که معیاری برای تعیین تلفات هسته می‌باشد، توسط دستگاه اندازه گیر RLC مدل HIOKI 3532 LCR HITESTER اندازه گیری شدند. برای این منظور سیم پیچی با ۹۰ دور از سیمی به قطر ۰/۱ mm با روکش عایق نازک تهیه شد و هر کدام از



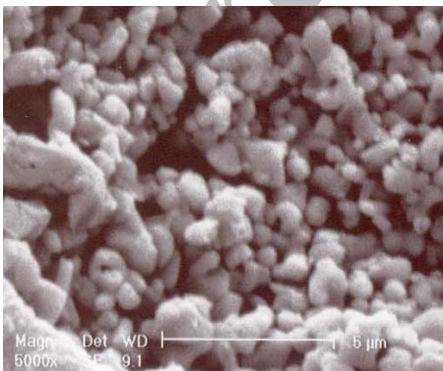
الف



ب

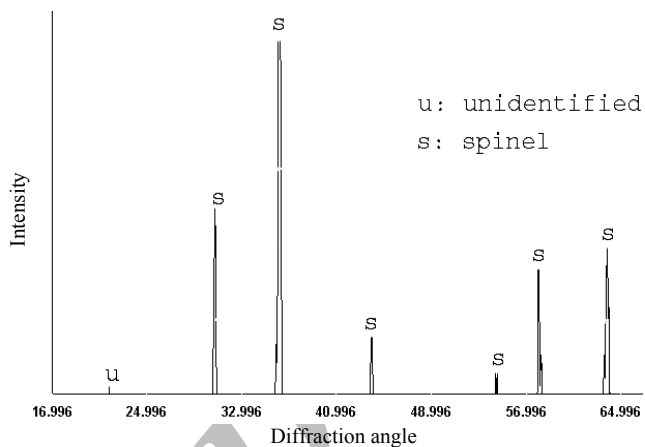


ج

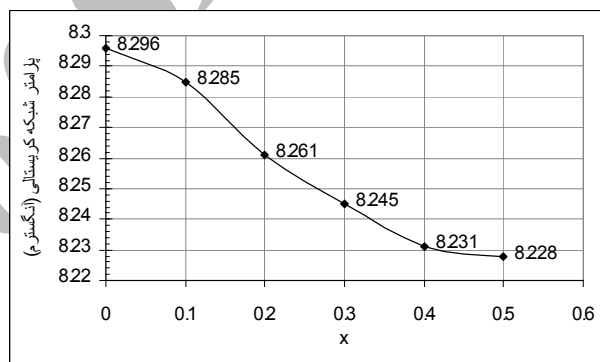


د

شکل (۳): ریزساختار فریت نیکل آلومینیوم تف‌جوشی شده در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، الف و ج) نمونه‌ها دارای مواد افزودنی و x به ترتیب برابر صفر و ۰/۵، ب و د) نمونه‌ها فاقد افزودنی و x به ترتیب برابر صفر و ۰/۵.

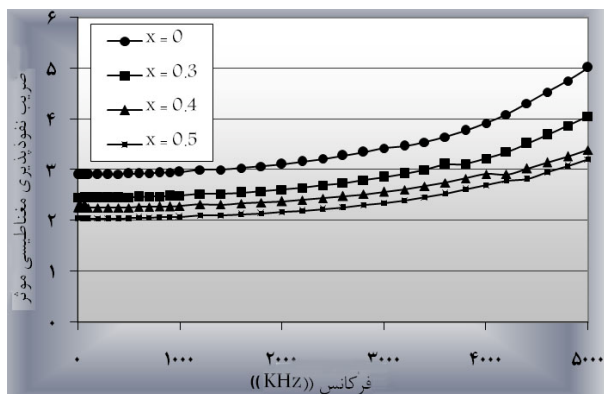


شکل (۱): الگوی پراش پرتو X فریت نیکل آلومینیوم با ترکیب  $x = 0.5$  در  $NiAl_xFe_{2-x}O_4$  و زمان آسیاب ۶ ساعت.

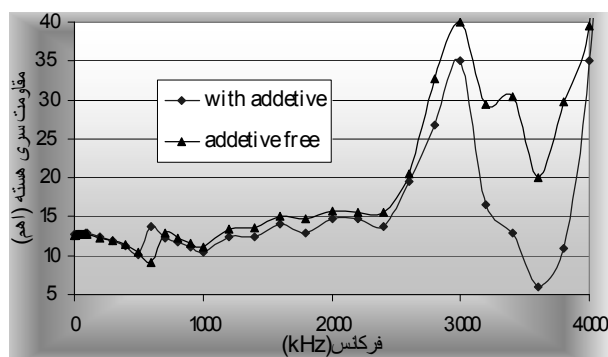


شکل (۲): پارامتر شبکه کریستالی فریت نیکل آلومینیوم به عنوان تابعی از x در  $NiAl_xFe_{2-x}O_4$ .

خصوصیات مغناطیسی و کاهش میزان اتلاف می‌شود. رشد دانه می‌تواند موجب افزایش دانسیته شود. افزایش دانسیته نمونه‌ها به خاطر اضافه نمودن مواد افزودنی  $CaO$  و  $SiO_2$  به دلیل قرارگیری این مواد به صورت مایع در مرز دانه‌ها در مرحله تف‌جوشی و تسهیل نفوذ می‌باشد. همچنین کاهش اندازه دانه در اثر اضافه نمودن آلومینیوم به نمونه‌ها، به دلیل قرارگیری مقدار کمی  $Al_2O_3$  در مرز دانه‌ها و قفل نمودن آنها، از رشد دانه جلوگیری می‌کند.



شکل (۴): تغییرات ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مؤثر فریت نیکل آلومینیوم با فرکانس و مقدار آلومینیوم.



شکل (۵): اثر مواد افزودنی  $\text{CaO}$  و  $\text{SiO}_2$  بر مقاومت سری هسته فریت نیکل آلومینیوم در بازه فرکانسی ۱ kHz تا ۴ MHz  $x = 0.4$  در  $\text{NiAl}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$  و زمان آسیاب ۶ ساعت).

آهن مغناطیسی قرار می‌گیرند و گشتاور مغناطیسی شبکه و در نتیجه، نفوذپذیری مغناطیسی را کاهش می‌دهند. همانطور که از روابط (۱) تا (۳) مشخص است، دو منشأ برای نفوذپذیری مغناطیسی وجود دارد. یکی چرخش اسپینی در حوزه‌های مغناطیسی و دیگری جابجایی دیواره‌ها، در هر دو منشاء نفوذپذیری مغناطیسی به مغناطش وابسته می‌باشد. پس با افزودن مقدار آلومینیوم نفوذپذیری مغناطیسی فریت نیکل آلومینیوم کاهش می‌یابد [۳ و ۴].

در شکل (۵) تغییرات مقاومت سری هسته دو نمونه فریت نیکل آلومینیوم (یکی دارای مواد افزودنی و دیگری بدون این مواد) با فرکانس آورده شده است. مشاهده می‌شود، استفاده از مواد افزودنی  $\text{CaO}$  و  $\text{SiO}_2$  باعث کاهش مقاومت سری هسته و در

جدول (۱): تغییرات دمای کوری و مقاومت سری هسته فریت نیکل آلومینیوم با ترکیب شیمیایی.

X در $\text{NiAl}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$	دمای کوری $T_c$ (K)	مقاومت سری هسته ( $\Omega$ ) (فرکانس ۵ MHz)
صفر	۸۸۳	۱۴۵۰
۰/۱	۸۴۸	۱۱۵۰
۰/۲	۸۱۳	۱۰۰۰
۰/۳	۷۷۳	۹۰۰
۰/۴	۷۶۳	۸۶۰
۰/۵	۷۵۳	۸۰۰

### ۲-۳- خصوصیات مغناطیسی

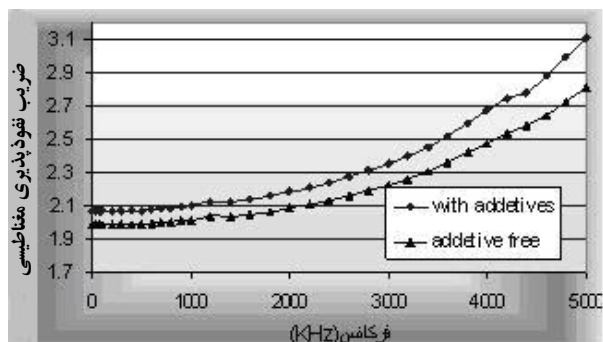
جدول (۱) تغییرات دمای کوری بر اثر تغییر ترکیب شیمیایی را نشان می‌دهد. دمای کوری دمایی است که ماده فری مغناطیس به ماده پارامغناطیس تبدیل می‌شود. این دما به تعداد و نوع یون‌های پارامغناطیس موجود در فضاها چهار و هشت وجهی شبکه اسپینلی بستگی دارد. از جدول (۱) مشخص است که با افزایش میزان آلومینیوم دمای کوری کاهش می‌یابد. با افزایش تعداد یون‌های  $\text{Al}^{3+}$  تعداد یون‌های  $\text{Fe}^{3+}$  در شبکه کاهش یافته و در نتیجه برهمکنش A-B تضعیف می‌شود همچنین انرژی گرمایی لازم برای تخریب نظم مغناطیسی کاهش یافته و در نتیجه دمای کوری کاهش می‌یابد.

جدول (۱) بیانگر تغییرات مقاومت سری هسته با میزان آلومینیوم است. در اثر افزایش آلومینیوم مقاومت الکتریکی ماده افزایش یافته و مقاومت سری هسته کاهش می‌یابد. این موضوع قابل انتظار است، زیرا امکان جهش الکترون از کاتیون‌های آهن یا نیکل به کاتیون‌های آلومینیوم و بالعکس بسیار ناچیز است. در حالی که فریت نیکل آلومینیوم امکان مبادله الکترون بین کاتیون‌های نیکل و آهن وجود دارد، لذا مقاومت معادل اتلاف هسته فریت نیکل بزرگتر از فریت نیکل آلومینیوم می‌باشد [۳].

با توجه به شکل (۴)، مشاهده می‌شود با افزایش  $x$  در  $\text{NiAl}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$  نفوذپذیری مغناطیسی فریت نیکل آلومینیوم کاهش می‌یابد. این موضع قابل انتظار است، زیرا یون‌های  $\text{Al}^{3+}$  غیر مغناطیسی می‌باشند و در شبکه کریستالی به جای یون‌های

## ۵- مراجع

- [1] W. H. Von Aulock, "Handbook of Microwave Ferrite Materials", Academic Press New York and London, 1965.
- [2] L. L. Zahang, "Magnetic Ceramics for UHF Applications", The Ohio State University Group Inorganic Materials Science, 2005.
- [3] A. G. Bhosale and B. K. Chougule, "X-ray, Infrared and Magnetic Studies of Al-Substituted Ni Ferrites", Materials Chemistry and Physics, Vol. 20, pp. 1681-1688, 2005.
- [4] M. Mozaffari and J. Amighian, "Preparation of Al-Substituted Ni Ferrite Powders Via Mechanochemical Processing", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 260, pp. 244-249, 2003.
- [5] A. Hosseinpour and A. Zakery, "Investigation of Magnetic Force For Barium and Strontium Ferrites", J. Am. Ceram. Soc. Vol. 84, No. 5, pp. 1184-1189, 2001.
- [۶] م. خیام روحانی، "مهندسی مایکروویو"، مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۴.
- [7] T. Yao and O. Imafuji, "Exafs Study of Cation Distribution in Nickel Aluminate Ferrites", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 74, pp. 17-314, 1999.
- [۸] ا. مقصودی، "بررسی خواص الکترومغناطیسی فریت نیکل آلومینیوم در بازه فرکانسی (۱ KHz تا ۵ MHz)"، ششمین کنگره سرامیک ایران، کرج، پژوهشکده مواد و انرژی، ۱۳۸۶.
- [9] A. J. Moulson and J. M. Herbert, "Electroceramics Materials Properties Applications", Chapman and Hall London, New Yourk, Tokyo, Melbourne, Madras, 1990.
- [10] E. P. Wohlfarth (Ed.), "Ferromagnetic Materials", North-Holland Pub. Co., Amsterdam, Vol. 3, Chap. 3, 1990.
- [11] J. S. Ghodake, "Complex Permeability Studies of Ni-Co-Zn Ferrites Synthesized by an Oxalate Precursor Method", Journal of Smart Materials and Structures, Vol. 18, Chp. 12, 2009.
- [12] R. L. Dhiman, "Preparation and Characterization of Manganese Ferrite Aluminates", Journal of Advances in Condensed Matter Physics, Vol. 2008, p. 7, 2008.



شکل (۶): اثر مواد افزودنی بر روی ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مؤثر فریت نیکل آلومینیوم ( $x = 0.4$ ) در  $(\text{NiAl}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4)$ .

نتیجه کاهش تلفات ناشی از جریان‌های گردابی می‌گردد که علت آن تشکیل لایه‌ای از مواد شیشه‌ای بر روی مرز دانه‌ها و عایق نمودن آنها است [۲، ۳ و ۴].

همانطور که از شکل (۶) مشخص است، مواد افزودنی  $\text{SiO}_2$  و  $\text{CaO}$  باعث افزایش ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مؤثر فریت نیکل آلومینیوم می‌گردد این موضوع به دلیل افزایش چگالی نمونه‌ها دارای مواد افزودنی و همچنین تسریع در رشد دانه‌ها و در نتیجه داشتن فریت با دانه‌های بزرگتر قابل انتظار است. با افزایش چگالی تعداد یون‌های مغناطیسی در واحد حجم افزایش می‌یابد [۴ و ۶-۱۲].

$$\mu = \mu^R + \mu^W \quad (1)$$

$$\mu^W = 1 + \frac{\gamma}{4} \pi M_s^2 \frac{D}{\gamma} \quad (2)$$

$$\mu^R = 1 + \gamma \pi \frac{M_s}{k} \quad (3)$$

## ۴- نتیجه‌گیری

مواد افزودنی  $\text{SiO}_2$  و  $\text{CaO}$  سبب افزایش ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مؤثر و کاهش اتلاف فریت نیکل آلومینیوم می‌گردد. همچنین مواد اضافی مذکور باعث کاهش دمای تف‌جوشی می‌گردد. با افزایش زمان آسیاب، چگالی نمونه‌ها و در پی آن ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مؤثر افزایش می‌یابد. با افزایش درصد آلومینیوم در فرمول مولکولی فریت نیکل آلومینیوم، علاوه بر کاهش ضریب نفوذپذیری مؤثر و اتلاف، ثابت شبکه و دمای کوری کاهش می‌یابند.