

بررسی مقاومت مغناطیسی بزرگ در شبکه‌ای دو بعدی مربعی شامل دو ماده با مرز مورب

فاطمه طیبی و سید مهدی حسینی

دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شیراز، بلوار مدرس، شیراز

پست الکترونیکی: hosseini@sutech.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۳۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۰۷/۲۵)

چکیده:

مقاومت مغناطیسی بزرگ به دلیل کاربردهای فراوان آن در شاخه‌های مختلف از جمله ساخت حسگرهای مغناطیسی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. حالت مهمی از این نوع مقاومت، مقاومت مغناطیسی خطی ناشی از ناهمگنی توزیع بار است. مقاومت مغناطیسی رسانای ناهمگن به وسیله مدل شبکه ای مقاومت دو بعدی شبیه‌سازی می‌شود. در مدل شبکه‌ای، واحد مقاومت قرص دایره‌ای همگن با چهار پایانه جریان و اختلاف پتانسیل بین پایانه‌ها در نظر گرفته و جریان‌ها و اختلاف پتانسیل‌ها به وسیله ماتریس امپدانس به یکدیگر مرتبط می‌شوند و میدان مغناطیسی اعمالی عمود بر شبکه است. در این مقاله تغییرات مقاومت مغناطیسی برای شبکه‌ای شامل دو زیرسامانه با مقاومت‌های متفاوت با چینش مورب را مطالعه و بررسی می‌کنیم. نتایج نشان می‌دهد تغییرات مقاومت مغناطیسی سامانه ناهمگن به نسبت مقاومت دو ماده و همچنین مکان مرز بین آنها بستگی دارد. علاوه بر این مشاهده شد که برای مقادیر بزرگ نسبت مقاومت یا ناهمگنی بالا امکان وجود قله در تغییرات مقاومت وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: مقاومت مغناطیسی بزرگ، شبکه مقاومتی دو بعدی، ناهمگنی

۱. مقدمه

تغییر در مقاومت الکتریکی به دلیل اعمال میدان مغناطیسی خارجی، مقاومت مغناطیسی (MR) نامیده شده و در مغناطیس‌سنج‌های مقاومت مغناطیسی قابل استفاده است [۱]. این پدیده برای اولین بار در سال ۱۸۵۶ توسط ویلیام تامسون (مشهور به لرد کلونین) کشف شد [۲]. مقاومت مغناطیسی به تأثیر نظم اسپینی لایه مغناطیسی، بر روی حرکت الکترون‌ها مربوط بوده و زمانی که میدان مغناطیسی خارجی اعمال می‌شود، نظم اسپینی تغییر و در نتیجه آن حرکت الکترون‌ها

نیز تغییر کرده و همچنین تغییر تحرک^۲ الکترون‌ها باعث تغییر مقاومت الکتریکی سامانه می‌شود. در سال ۱۹۶۰ هرینگ، اثر ناهمگنی بر روی خواص گالوانومغناطیسی را بررسی کرد و به این نتیجه رسید که در میدان‌های به اندازه کافی بزرگ، رفتار مقاومت مغناطیسی، خطی است [۳] که در گرافن‌های چندلایه، شبه فلزات و عایق‌های توپولوژیکی قابل مشاهده است [۴].

پس از کشف مواد مغناطیسی مقاومتی چندلایه توسط بابیچ فرانسوی [۵] در سال ۱۹۸۸، آلبرت فرت و پیتر گرانبرگ با آزمایش بر روی چند لایه‌های جفت شده به صورت

در این کار با قرار دادن دو ساختار با مقاومت ویژه مختلف و چینش‌های خاص، هدف ایجاد تکینگی در تغییرات مقاومت مغناطیسی است. با توجه به حساسیت شدید سامانه‌ها به چینش اتم‌ها در شبکه، یکی از اهداف ما بررسی چینش‌های مختلف به منظور یافتن نمونه‌های با بیشترین مقاومت مغناطیسی است. ایجاد تکینگی در مقاومت ویژه امکان افزایش حساسیت در حسگرهای مغناطیسی را فراهم می‌کند و همچنین امکان استفاده در کاربردهای دیگر مقاومت مغناطیسی بزرگ را نیز بهبود می‌بخشد.

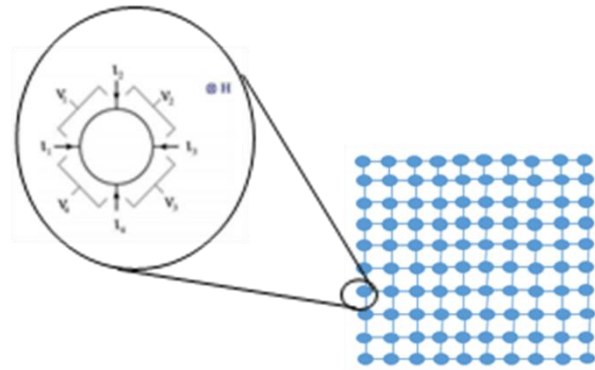
۲. جزئیات محاسبه

در این مقاله مقاومت مغناطیسی بزرگ در سامانه دو بعدی 10×10 با استفاده از مدل شبکه مقاومتی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور ساده‌ترین حالت یک شبکه مقاومتی دو بعدی متشکل از چهار پایانه جریان و متأثر از یک میدان مغناطیسی عمودی نسبت به شبکه در شکل ۱ آمده است.

با در نظر گرفتن ρ به عنوان مقاومت نرده‌ای و t به عنوان ضخامت قرص، می‌توان جریان‌ها و اختلاف پتانسیل‌ها را با استفاده از یک ماتریس امپدانس 4×4 به یکدیگر مرتبط دانست [۲۱].

$$v_i = z_{ij} I_j, \quad z = \frac{\rho}{\pi t} \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ d & a & b & c \\ c & d & a & b \\ b & c & d & a \end{pmatrix} \quad (1)$$

که در آن v_i اختلاف پتانسیل بین پایانه‌ها بر حسب ولت، z_{ij} ماتریس امپدانس و I_j جریان ورودی بر حسب آمپر است. ماتریس امپدانس z برای هر واحد مقاومت با دو پارامتر μ که تحرک حامل‌ها است و مقدار نرده‌ای $\rho/\pi t$ ، مشخص می‌شود. با در نظر گرفتن جریان‌ها به عنوان شرایط مرزی و حل معادله لاپلاس برای پتانسیل الکتریکی یک قرص همگن، ضرایب z_{ij} (ماتریس امپدانس) محاسبه می‌شوند [۲۱].



شکل ۱. شبکه مقاومتی 10×10 و واحد شبکه مقاومتی.

پارامغناطس Cr/Fe موفق به کشف مقاومت مغناطیسی بزرگ شدند و به دلیل تحقیق و آزمایش بر روی این مواد جایزه نوبل سال ۲۰۰۷ میلادی به آنها اهدا شد [۶]. تغییرات بزرگ مقاومت مغناطیسی قابل مشاهده در ساختارهای لایه‌های فلزات اثر مقاومت مغناطیسی بزرگ (GMR)^۱ نامیده می‌شود [۷-۹]. مقدار مقاومت مغناطیسی بزرگ به عوامل بسیاری از جمله ضخامت لایه میانی، تحرک ذرات و چگالی نوسانات وابسته است [۱۰]. دو مدل رایج برای توضیح مقاومت مغناطیسی خطی، مدل کوانتومی ابریکسوف [۱۱] و مدل کلاسیکی پاریش و لیتلوود [۴] است. مقاومت مغناطیسی خطی کوانتومی در صورتی اتفاق می‌افتد که حامل‌های بار چگالی پایین و جرم مؤثر کوچک داشته و همچنین در پایین‌ترین تراز لاندائو قرار گیرند [۱۱]. مقاومت مغناطیسی بزرگ کاربردهای فراوانی در ساخت حسگرهای میدان مغناطیسی و حسگرهای زیستی دارد و همچنین در ساخت قرص‌های ذخیره مغناطیسی نیز کاربرد داشته است [۱۲-۱۵]. در دهه گذشته تحقیقات بسیاری توسط محققان در سراسر جهان در رابطه با مقاومت مغناطیسی بزرگ و کاربرد آن به ویژه در تولید حسگرهای میدان مغناطیسی صورت گرفته است [۱۶-۲۰].

مدل کلاسیکی که توسط پاریش و لیتلوود توسعه یافت امکان توصیف مقاومت مغناطیسی برای سامانه‌های دو بعدی را دارد. این گروه شبکه‌های دو بعدی شامل قرص‌های همگن با مقاومت ویژه یکسان در نظر گرفتند [۴ و ۲۱].

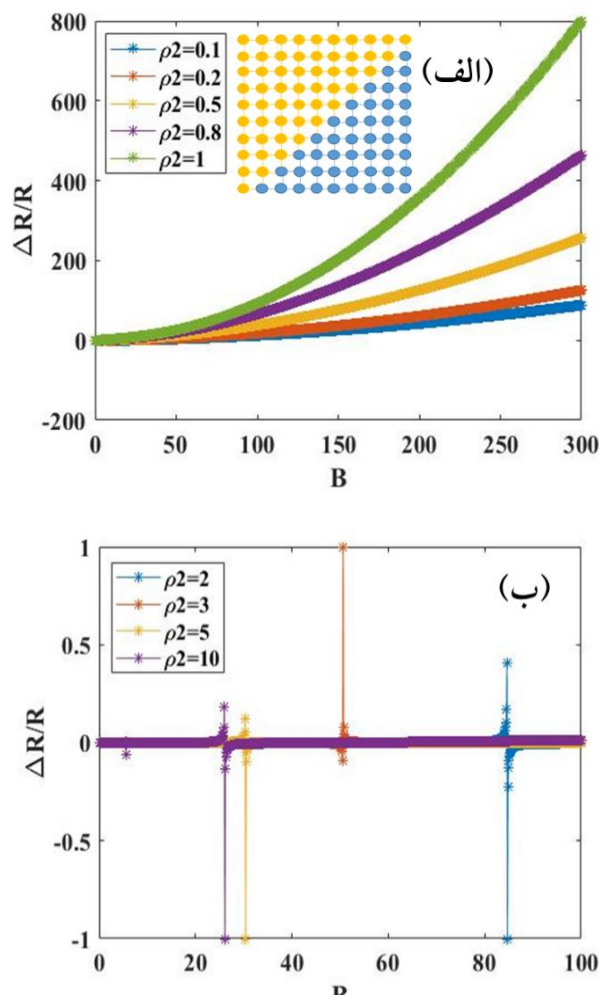
۳. نتایج

در این مقاله به کمک مدل مقاومت مغناطیسی خطی کلاسیکی، تغییرات مقاومت مغناطیسی ($\Delta R/R$) بر حسب میدان مغناطیسی برای شبکه مربعی 10×10 و متشکل از دو زیرسامانه با مقاومت‌های متفاوت و با چینش مورب (اصلی و فرعی) بررسی شده‌اند. قابل به ذکر است که چینش در موازات قطر اصلی، چینش مورب اصلی و چینش در موازات قطر فرعی، چینش مورب فرعی تعریف شده‌اند.

میدان مغناطیسی بدون بعد به صورت $B = \mu H$ تعریف می‌شود که μ تحرک حامل‌ها و H شدت میدان است [۴ و ۲۱]. شبکه از سمت راست به یک ولتاژ ثابت ($U = -1$) و از سمت چپ به زمین ($U = 0$) وصل شده است. جریان از پایانه مثبت (سمت چپ شبکه) به سمت پایانه منفی (سمت راست شبکه) برقرار است. در این محاسبه به دلیل تقارن موجود تنها نسبت دو مقاومت ویژه مهم است بنابراین برای سادگی ρl برابر با واحد انتخاب شده است.

الف- چینش دو ماده با مرز در راستای قطر اصلی

نمودار تغییرات مقاومت مغناطیسی برای شبکه‌ای شامل صد ذره که که بالای قطر اصلی ماده با مقاومت $\rho 2$ (زرد رنگ) و مابقی شبکه زیرسامانه با مقاومت ρl (آبی رنگ) قرار دارد در شکل ۲ آورده شده است. به منظور مشاهده بهتر شکل‌ها حالت‌های $\rho 2$ کمتر از ۱ در شکل ۲. الف و بزرگ‌تر از ۱ در شکل ۲. ب آورده شده است. برای وضوح بهتر مکان تکنیکی نمودار قسمت ب که در آن قله مشاهده شده است بازه میدان صفر تا صد در نظر گرفته شده و همچنین نمودار برای هر مورد به بیشینه مقدار تکنیکی بهنجار شده است. قابل ذکر است که مقدار $\Delta R/R$ برای تکنیکی‌ها از مرتبه 10^4 است و تغییرات در میدان 300 در حد نمودار تغییرات مقاومت برای قسمت الف است. این تکنیکی‌ها احتمالاً به دلیل ایجاد نظم بلند برد به واسطه چینش خاص و میدان مغناطیسی منحصر به فرد ایجاد می‌شود. این شبکه‌ها همان گونه که در مراجع [۴ و ۲۱] آمده است به شدت نسبت به چینش شبکه حساس هستند بنابراین برای چینش مختلف شبکه تفاوت‌های قابل توجهی مشاهده می‌شود.



شکل ۲. تغییرات مقاومت مغناطیسی بر حسب میدان مغناطیسی برای شبکه مربعی 10×10 که ۵۵ درصد آن ماده $\rho 2$ (زرد) و ۴۵ درصد آن ماده $\rho 1$ (آبی) است (الف) $\rho 2 < 1$ و (ب) $\rho 2 > 1$.

برای ساختن شبکه مقاومتی $M \times N$ قرص‌ها با استفاده از سیم‌های کاملاً رسانا به یکدیگر متصل می‌شوند [۲۱]. برای تعیین مقاومت مغناطیسی شبکه $N \times M$ سمت راست شبکه به پتانسیل ثابت U وصل شده و سمت چپ به زمین وصل شده است [۲۲] و در نتیجه تقارن چپ و راست می‌شکند. مقاومت الکتریکی وابسته به میدان به شکل زیر توضیح داده می‌شود [۲۱-۲۳].

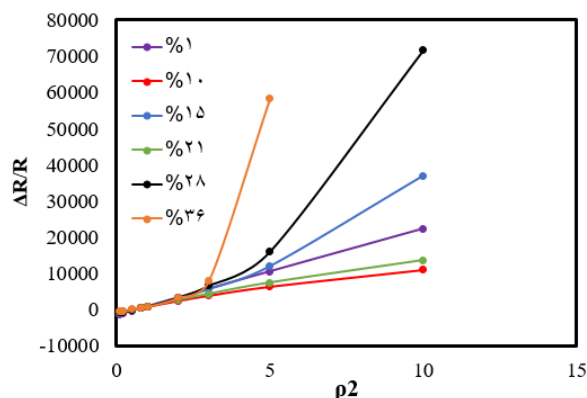
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R(H) - R(0)}{R(0)}$$

که در آن $R(H)$ مقاومت الکتریکی وابسته به میدان مغناطیسی و $R(0)$ مقاومت الکتریکی در میدان صفر است.

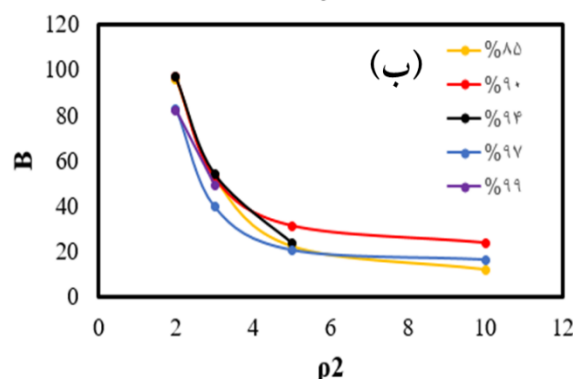
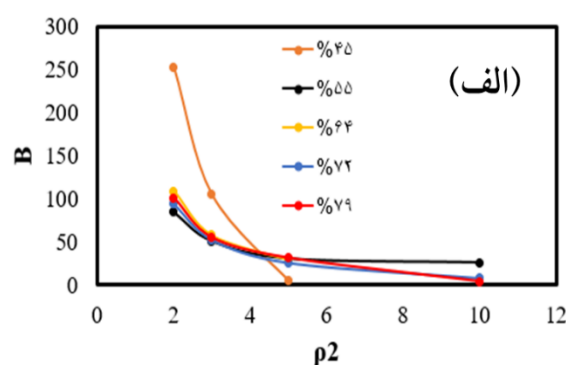
همچنین دیده می‌شود با افزایش مقدار ρ_2 مقاومت مغناطیسی ساختار افزایش می‌یابد. دلیل این امر می‌تواند این باشد که با افزایش مقاومت ویژه ماده ۲ مقاومت کل ماده افزایش می‌یابد که این امر باعث افزایش تأثیر میدان مغناطیسی بر مقاومت می‌شود. در شکل ۲. ب پدیده قابل توجهی دیده می‌شود که در آن برای حالت های $\rho_2 > \rho_1$ مقاومت مغناطیسی قله دارد. وجود قله در مقاومت مغناطیسی به معنی افزایش شدید مقاومت مغناطیسی با تغییرات اندک میدان مغناطیسی است که می‌تواند کاربردهای بسیاری داشته باشد. علاوه بر این، این شکل نشان می‌دهد با افزایش نسبت ρ_2 به $R(0)$ قله مقاومت مغناطیسی در میدان های کمتری نمایان می‌شود. برای وضوح بهتر نمودار قسمت ب که در آن قله مشاهده شده است بازه میدان صفر تا صد در نظر گرفته شده و همچنین نمودار برای هر مورد بهنجار شده است.

در شکل ۳ تغییرات مقاومت مغناطیسی به ازای تغییر مقاومت هر زیرسامانه و مکان مرز بین آنها در میدان بدون بعد 30° برای شبکه 10×10 و درصد های متفاوت از ۱ تا ۳۶ (با تغییر ردیف ها) از ماده با مقاومت ρ_2 بررسی شده است. برای درصد های بیشتر از ۳۶ نمودار، مقاومت مغناطیسی برای اکثر مقادیر ρ_2 قله دارد که نتایج آن در شکل بعد آورده شده است. طبق نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش ρ_2 تغییرات مقاومت مغناطیسی نیز افزایش می‌یابد. این تغییر برای درصد های کمتر خطی و با افزایش میزان ماده دوم به صورت غیر خطی است.

برای درصد های بیشتر از ماده ۲ که نمودار قله دارد، نمودار میدانی که در آن قله ایجاد شده بر حسب مقاومت ماده دوم در شکل ۴ آورده شده است. برای مشاهده بهتر نمودار، برخی درصد ها در نمودار ۴. الف و مابقی در نمودار ۴. ب آورده شده است. در شکل ۴ دیده می‌شود که با افزایش مقدار ρ_2 میدانی که قله در آن مشاهده می‌شود، کاهش می‌یابد. دلیل این امر می‌تواند افزایش ناهمسانگردی سامانه با افزایش ρ_2 باشد که باعث ایجاد قله میدان در میدان کمتر می‌شود.



شکل ۳. نمودار تغییرات مقاومت مغناطیسی در میدان 30° بر حسب مقاومت ماده دوم برای درصد های متفاوت ماده دوم.

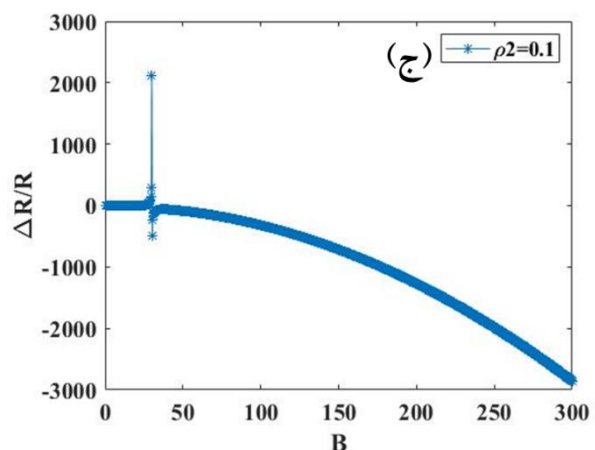
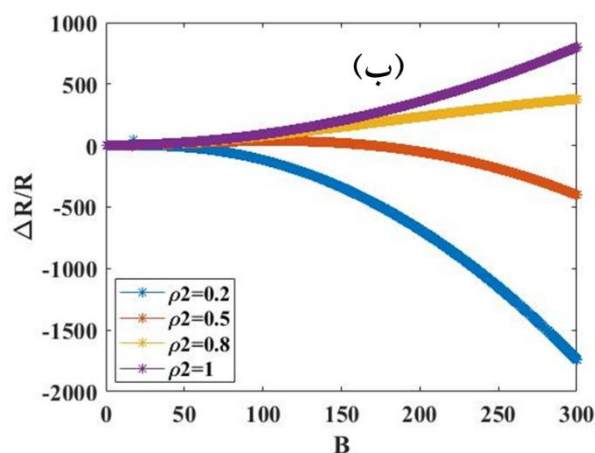
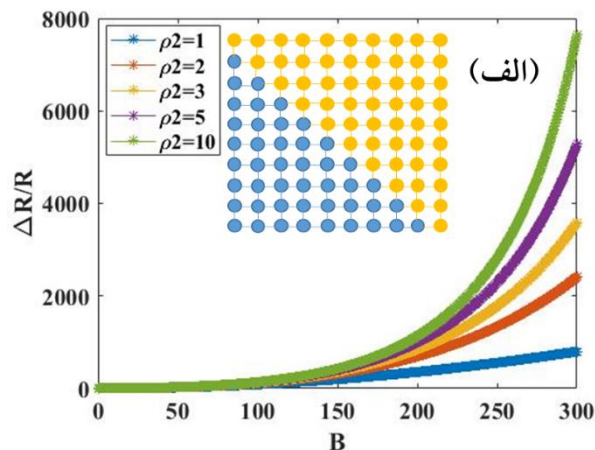


شکل ۴. نمودار میدان قله بر حسب ρ_2 برای درصد های مختلف از ماده دوم (الف) درصد ماده دوم کمتر از ۷۹ و (ب) درصد ماده دوم بیشتر از ۷۹.

نمودار $\rho_2 = \rho_1$ نیز جهت مقایسه نتایج با مرجع [۲۱] و همچنین مقایسه با بقیه حالت ها آورده شده است. قابل ذکر است که میدان بدون بعد 30° برای گرافن با تحرک نوعی $1/5 \times 10^4 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-2}$ معادل میدان ۲ تسلا است. همانطور که از شکل ۲. الف مشاهده می‌شود به دلیل این که شبکه مورد مطالعه شبکه ای با N زوج است، تغییرات نمودار $\Delta R/R$ به صورت غیراشباع است [۲۲].

شده و به طور منظم مقدار ماده با مقاومت ρ_2 را افزایش داده و تغییرات مقاومت مغناطیسی آن مطالعه و بررسی شد. در شکل ۵ نمودار تغییرات مقاومت مغناطیسی بر حسب میدان برای شبکه با صد ذره که ۵۵ درصد آن ماده با مقاومت ρ_2 و بقیه شبکه ماده با مقاومت $\rho_2 < 1$ است به عنوان نمونه رسم شده است. از شکل ۵ الف دیده می‌شود که برخلاف حالت قبل برای $\rho_2 > \rho_1$ نمودار بدون قله بوده و با افزایش نسبت ρ_2 به ρ_1 ، تغییرات مقاومت مغناطیسی نیز افزایش می‌یابد. از شکل ۵ ب نیز دیده می‌شود که برای $\rho_2 < \rho_1$ تغییرات مقاومت مغناطیسی منفی قابل مشاهده است و با کاهش مقدار مقاومت ماده دوم تغییرات مقاومت مغناطیسی منفی افزایش می‌یابد. تنها برای $\rho_2 = 0/1$ نمودار قله دارد که در شکل ۵ ج آورده شده است.

در ادامه تغییرات مقاومت مغناطیسی به ازای تغییر مقاومت هر زیرسامانه و مکان مرز بین آنها در میدان بدون بعد 300° برای درصدهای متفاوت ماده با مقاومت ρ_2 بررسی شده است. در شکل ۶ نمودار تغییر مقاومت مغناطیسی بر حسب مقاومت ویژه آورده شده است. البته برای وضوح بهتر درصدهای مختلف در دوشکل جداگانه آورده شده و همچنین محور به صورت لگاریتمی است. در شکل‌های ۶ الف و ب دیده می‌شود برای مقاومت ویژه بزرگ‌تر از ۱ مقاومت مغناطیسی مثبت و با افزایش مقدار مقاومت ویژه، افزایش می‌یابد. از طرف دیگر دیده می‌شود که برای مقاومت ویژه کمتر از ۱ برای درصدهای کمتر از 50° ، تغییر مقاومت مغناطیسی با کاهش مقاومت ویژه مطابق انتظار ابتدا افزایش می‌یابد و با کمتر شدن آن برای برخی حالت‌ها مقدار منفی اتخاذ می‌کند (شکل ۶ الف). دلیل منفی شدن مقاومت مغناطیسی و ایجاد حالت‌های شبه نوسانی را می‌توان به ناهمگنی شدید شبکه به خصوص برای مقاومت ویژه کمتر از 50° نسبت داد. اما برای درصدهای بیشتر از 50° ، با کاهش مقاومت ویژه ماده دوم مقاومت مغناطیسی سیستم به صورت تقریباً یکنواخت کاهش می‌یابد و برای همه حالات مقدار منفی به خود می‌گیرد.



شکل ۵. تغییرات مقاومت مغناطیسی بر حسب میدان مغناطیسی برای شبکه مربعی 10×10 که ۵۵ درصد آن ماده ρ_2 و ۴۵ درصد آن ماده ρ_1 است (الف) $\rho_2 > 1$ ، (ب) $\rho_2 < 1$ و (ج) $\rho_2 = 0/1$.

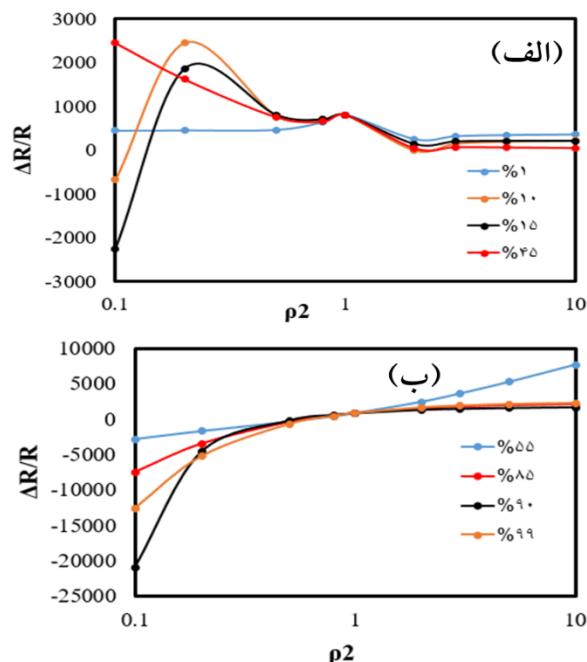
ب-چینش دو ماده با مرز در راستای قطر فرعی

در این بخش دو زیر سامانه با همان شرایطی که در چینش مورب اصلی گفته شد به صورت مورب فرعی کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و درصد ماده با مقاومت ρ_2 از ۱ درصد شروع

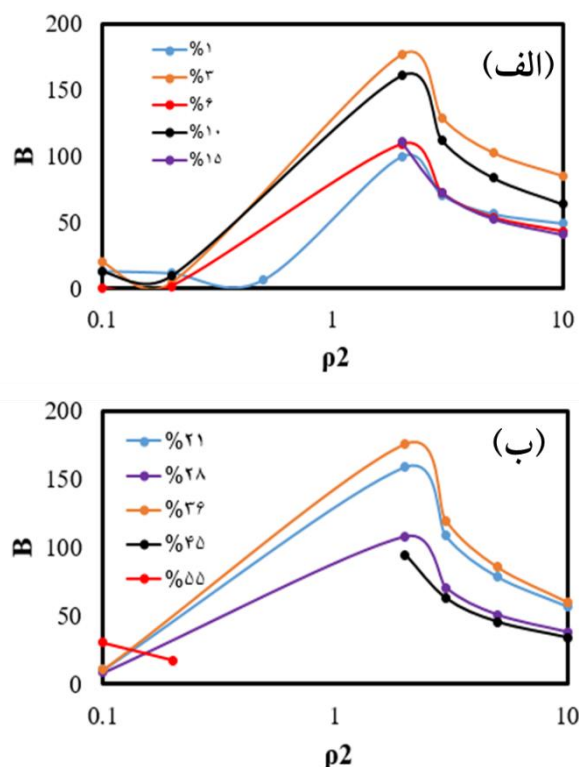
در نهایت در شکل ۷ نمودار میدانی که در آن قله ایجاد شده بر حسب مقاومت ماده دوم رسم شده است. در اینجا نیز برای وضوح بهتر درصد‌های مختلف در دو شکل جداگانه آورده شده و همچنین محور به صورت لگاریتمی است. برای درصد‌های بزرگ‌تر از ۵۵ درصد قله مشاهده نشده است. در تمام این شکل‌ها دیده می‌شود که بیشینه قله در $\rho_2 = 2$ و کمینه آن در $\rho_2 = 0.2$ رخ می‌دهد. قابل ذکر است که هیچ کدام از نمودارها در حالت کاملاً همگن یا $\rho_2 = 1$ قله‌ای ندارند که مطابق انتظار و مرجع [۲۲] است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فاصله، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش اختلاف مقاومت ویژه دو ماده، قله نمودار مقاومت مغناطیسی در میدان‌های کمتری رخ می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله تغییرات مقاومت مغناطیسی برای شبکه مربعی 10×10 متشکل از دو ماده با مقاومت‌های متفاوت مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بیانگر آن است که در این شبکه انتخابی به دلیل زوج بودن تعداد سطرهای شبکه، تغییرات نمودار مقاومت به صورت غیر اشباع است. در چینش مورب قطر اصلی امکان ایجاد قله در نمودار مقاومت مغناطیسی برای $\rho_2 > 1$ بیشتر است در حالی که برای چینش مورب قطر فرعی برعکس بوده و امکان ایجاد قله در نمودار مقاومت مغناطیسی برای $\rho_2 < 1$ بیشتر است. علاوه بر این در چینش قطر فرعی مقاومت مغناطیسی منفی نیز در میدان‌های بالا برای برخی حالت‌ها مشاهده شد. همچنین برای هر دو نوع چینش برای نمودارهای دارای قله مشاهده شد که با افزایش ناهمسانگردی قله در میدان کمتری رخ خواهد داد.



شکل ۶. نمودار تغییرات مقاومت مغناطیسی در میدان 30° بر حسب مقاومت ماده دوم (الف) مقدار ماده دوم کمتر از ۵۰ درصد و (ب) مقدار ماده دوم بیشتر از ۵۰ درصد.



شکل ۷. نمودار میدان قله بر حسب ρ_2 برای درصد‌های متفاوت از ماده دوم (الف) ماده دوم کمتر از ۲۰ درصد و (ب) ماده دوم بیشتر از ۲۰ درصد.

مراجع

1. P Dey and J. N. Roy, "Giant Magnetoresistance (GMR)", In Spintronics, Springer, Singapore, (2021) .
2. W Thomson, *Proceedings of the Royal Society of London* **8** (1857) 546.
3. C Herring, *Applied Physics* **31**, 11 (1960) 1939.
4. M M Parish and P B Littlewood, *Nature* **426**, 6963 (2003) 162.
5. Y F Tian and S S Yan, *Science China Physics Mechanics and Astronomy* **56**, 2 (2013) 2.
6. O Kazakova et al, *IEEE Transactions on Magnetics* **44**, 11 (2008) 4480.
7. E Y Tsymbal and D. G. Pettifor, *Solid State Physics* **56** (2001) 113.
8. M Kataoka, *Physics Review B* **103**, 13 (2021) 134441.
9. M Mao, J Shen, X Li, Y Wang, B Dai and Y Ren, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* **32**, 9 (2021) 11813.
10. L V Dekhtyaruk et al, In 2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP) IEEE (2020).
11. A A Abrikosov, *EPL (Europhysics Letters)* **49**, 6 (2000) 789.
12. C Reig, M Cubells-Beltrán, and D R Muñoz, *Sensors* **9**, 10 (2009) 7919.
13. F Meng, L Zhang, W Huo, J Lian, A Jesorka, X Shi, and Y Gao, *ACS omega* **6**, 19 (2021) 12923.
14. J R Childress and R E Fontana, *Comptes Rendus Physics* **6** (2005) 997.
15. K M Lenssen et al, *Sensors Actuator A Physical* **85** (2003) 1.
16. N Ramakrishnan, Y T Lai, S Lara, M M Parish, and S Adam, *Physical Review B* **96**, 22 (2017) 224203.
17. A A Patel, J McGreevy, D P Arovas, and S Sachdev, *Physical Review X* **8**, 2 (2018) 021049.
18. F Kisslinger et al, *Nature Physics* **11**, 8 (2015) 650.
19. F Kisslinger, C Ott, and H B Weber, *Physical Review B* **95**, 2 (2017) 024204.
20. Y Xu, J Wang, J F Liu and H Xu, *Applied Physics Letters* **118**, 22 (2021) 222401.
21. M M Parish and P B Littlewood, *Physical Review B* **72**, 9(2005) 094417.
22. Z Bagheri, M Hosseini, and O Daneshmandi, *The Annual Physics Conference of Iran* (1397) 1455. (Persian).
23. Z Bagheri, M Hosseini, and O Daneshmandi, *The Annual Physics Conference of Iran*, (1397) 1459. (Persian).