بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

بررسی اثر مغناطونوری فروسیال اکسیدآهن با غلظت‌های مختلف

حانیه دهرویه[۱]، آسیه سهیلیان[۱]، محمد مهدی طهرانچی[۱و۲]

[۱]پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، ولنجک، تهران

[۲] دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، ولنجک، تهران

چکیده – روش مغناطونوری فارادی یکی از روش‌های متداول برای تعیین خواص مغناطیسی مواد است. در این پژوهش به بررسی رفتار فروسیال اکسید آهن در غلظت‌های مختلف با روش مشخصه‌یابی مغناطونوری فارادی پرداخته شد. نانوذرات به روش هم-رسوبی سنتز شده و با افزودن سیتریک اسید به پایداری رسیدند. در بررسی فارادی، مشخص شد که با افزایش غلظت نانوذرات فروسیال، میزان چرخش فارادی و به دنبال آن مغناطش اشباع افزایش می‌یابد. به‌علاوه، زمان واهلش براونی فروسیال مورد ارزیابی قرار گرفت که نتیجه نشان دهنده افزایش زمان واهلش براونی با افزایش غلظت فروسیال بود.

کلید واژه- چرخش فارادی، فروسیال، واهلش براونی

Investigation of The Magneto-Optical Effect of The Iron Oxide Ferrofluid with Different Concentration

H. Dehrouyeh[1], A. Soheilian[1], M.M. Tehranchi[1&2]

hanieh.Dehrouyeh@gmail.com, a-Soheilian@sbu.ac.ir, Teranchi@sbu.ac.ir.

[1]Laser and Plasma Institute, Shahid Beheshti University, Tehran

[2]Physics Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract- Magneto-optical Faraday effect is a common method for investigating of the magnetic property of materials. In this study, effects of different concentration of iron oxide ferrofluids were investigated with magneto-optical Faraday method. Nanoparticles were synthesized by co-precipitation method and stabilized by adding citric acid. Faraday measurement demonstrated that by increasing the concentration of the ferrofluid, the Faraday rotation and saturation magnetization increased. In the second study, the ferrofluid Brownian's relaxation time was also evaluated. Results showed that the relaxation time increased by increasing ferrofluid concentration.

Keywords: Brownian's relaxation, ferrofluid, Faraday rotation

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-19]

مقدمه

فروسیال‌ها[1]، یکی از انواع مهم مواد مغناطیسی هستند که به دلیل کاربردهای فراوان و متنوع در حوزه‌های مختلفی چون پزشکی، مهندسی، علم مواد و محیط‌زیست دارای اهمیت بسیاری هستند. به تعلیقات کلوییدی بسیار ریزی از نانوذرات مغناطیسی که در سیال حامل آبی یا غیرآبی پراکنده شده‌اند و با افزودن تثبیت کننده به پایداری می‌رسند فروسیال گفته می‌شود. از میان موادی که می‌توانند به‌عنوان فروسیال انتخاب شوند، نانوذرات اکسید آهن (Fe3O4) دارای خواص مغناطیسی بیشتری هستند. کاهش اندازه ذرات در محدوده‌ی نانومتری منجر به تولید ذرات تک حوزه و ایجاد پدیده سوپرپارامغناطیس می‌گردد. این مواد در معرض میدان مغناطیسی، پسماندی نداشته و پذیرفتاری نسبتا بزرگی دارند [۱]. ذرات سوپرپارامغناطیس برای جهت‌گیری در راستای میدان مغناطیسی اعمالی از دو مکانیزم چرخش براونی[2] و چرخش نیل[3] استفاده می‌کنند. چرخش براونی در سیال رخ می‌دهد و زمان چرخش فیزیکی ذرات به سمت میدان اعمالی می‌باشد. چرخش نیل، زمان جهت‌گیری ممان‌های مغناطیسی درون ذرات ثابت در راستای میدان است [۲].

یکی از روش‌های مشخصه‌یابی فروسیال اکسید آهن که اخیرا مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش مغناطونوری فارادی است. در این روش، صفحه‌ی قطبش نور در برهمکنش با ماده‌ی مغناطیسی دچار چرخش می‌شود که به آن چرخش فارادی گفته می‌شود. در سال ۱۹۸۸ پژوهشی در ارتباط با غلظت فروسیال و میزان چرخش فارادی انجام شد که نتیجه نشان‌دهنده‌ی افزایش چرخش فارادی با افزایش غلظت فروسیال بود [۳ و ۴].

در این مقاله با استفاده از روش مغناطونوری فارادی به بررسی وابستگی میزان چرخش فارادی و مغناطش اشباع فروسیال به غلظت آن پرداخته شد. در مرحله‌ی بعد با اعمال یک میدان مغناطیسی مربعی، وابستگی زمان واهلش براونی فروسیال به غلظت آن بررسی شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور تهیه فروسیال اکسید آهن، نانوذرات اکسیدآهن به روش هم‌رسوبی سنتز شدند. در این روش از ۸ میلی‌مول نمک آهن ۳ با فرمول $FeCl_3.6H_2O$ و ۴ میلی‌مول نمک آهن ۲ با فرمول $FeCl_2.4H_2O$ با نسبت مولی ۲:۱ استفاده شد. مواد تحت گاز نیتروژن با هم ترکیب شدند. در ادامه ۸۰ سی‌سی آمونیاک (NH_3) ۱ مولار به صورت قطره قطره به محلول آهن ۲ و ۳ اضافه شد و محلول به رنگ سیاه درآمد. نانوذرات بدست آمده در این مرحله با آب مقطر و اسیدکلریدریک (HCL) ۰/۱ مولار شست‌وشو داده شدند. همچنین برای ایجاد ثبات و پایداری نانوذرات از محلول سیتریک اسید استفاده شد.

چیدمان فارادی مورد استفاده در این آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است که شامل لیزر با طول موج ۶۳۸ نانومتر، قطبشگر، عدسی، منشور ولستون، ظرف نگهدارنده فروسیال و آشکارساز است. میدان مغناطیسی ۳۰۰ میلی‌تسلا به وسیله هسته‌های آهنی با سیم‌پیچ‌هایی با ۲۵۰ دور تولید شد و نمونه بین دو هسته قرار داده شد. نور لیزر به‌وسیله دستگاه تقویت کننده فرکانس در فرکانس۸۱۱ هرتز قفل شد. سپس نور عبوری از نمونه روی آشکارساز نوری متمرکز گردید. با فرض اینکه قطبشگر در زاویه ۴۵ درجه نسبت به منشور ولستون قرار گرفته باشد شدت نور خروجی طبق رابطه‌ی مالوس به‌صورت

$$I = I_0 Cos^2\left(\theta_F - \frac{\pi}{4}\right) \qquad (1)$$

[1] Ferrofluids
[2] Brownian relaxation
[3] Neel relaxation

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-19]

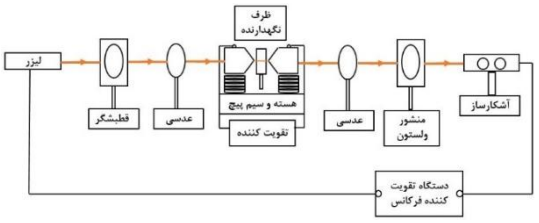
به‌دست می‌آید. در این رابطه، I_0شدت نور لیزر و θ_F زاویه‌ی چرخش فارادی نور پس از عبور از ماده است. به‌دلیل استفاده از منشور ولستون، اختلاف شدت دو نور ثبت شده با آشکارساز، برابر با ΔI است. بنابراین میزان چرخش فارادی با رابطه‌ی

$$\theta_F = \frac{\Delta I}{I_A + I_B} \qquad (۲)$$

به‌دست می‌آید. در این رابطه I_A و I_B شدت نور ثبت شده توسط آشکارساز است [۳]. در مرحله‌ی بعد، برای اندازه‌گیری زمان واهلش براونی، یک میدان مغناطیسی مربعی با استفاده از دو سیم‌پیچ ۵۰۰ دوری با هسته فریت تولید شد. در این چیدمان، برای ثبت پاسخ ماده از دستگاه نوسان سنج استفاده شد. زمان واهلش براونی طبق رابطه‌ی

$$\tau = \frac{3\eta\upsilon}{KT} \qquad (۳)$$

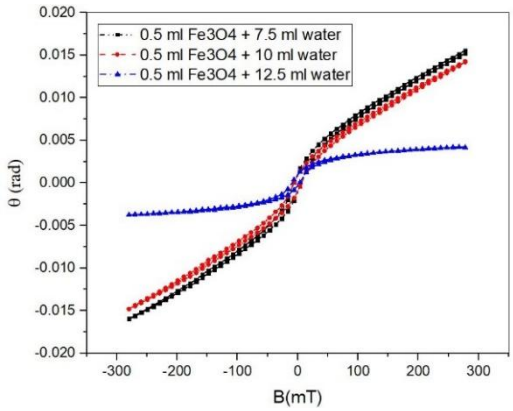
متناسب با حجم υ و گرانروی η فروسیال است [۲].



شکل ۱: طرحواره‌ای از چیدمان فارادی.

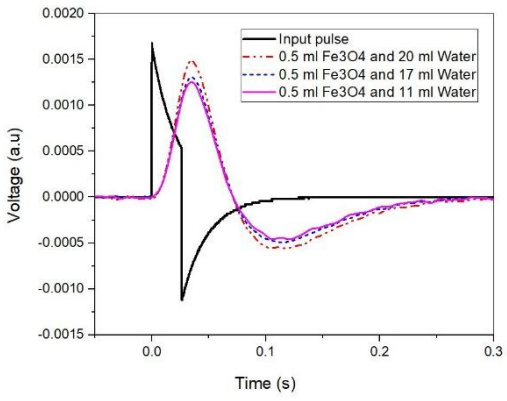
نتایج

در ابتدا سه غلظت مختلف از فروسیال به‌دست آمد. به این ترتیب که ۰/۵ میلی‌لیتر از کسر حجمی فروسیال غلیظ با ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ میلی‌لیتر آب مقطر، رقیق شد. سپس مقدار مشخصی از هر ماده در ظرف نگهدارنده ماده ریخته شد و چرخش فارادی آن به‌دست آمد. در هر مرحله میزان چرخش فارادی شیشه از پاسخ فارادی ماده کسر گردید. شکل ۲، منحنی چرخش فارادی هر سه ماده را برحسب میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشخص است با افزایش غلظت فروسیال، چرخش صفحه‌ی قطبش و مغناطش نمونه افزایش می‌یابد.



شکل ۲ : منحنی‌های چرخش فارادی غلظت‌های مختلف فروسیال.

با توجه به شکل ۲ پسماند هر سه نمودار مخالف صفر است که می‌تواند به‌علت استفاده از هسته‌های آهنی که دارای مقداری پسماند است، باشد. به‌علاوه، از آن‌جایی که روش هم‌رسوبی، روش دقیقی برای سنتز نانوذرات نیست، در این سنتز، توزیعی از اندازه ذرات بدست می‌آید. هرچه اندازه نانوذرات تولید شده بزرگتر باشد، از حالت تک حوزه خارج شده و خاصیت سوپرپارامغناطیس از بین می‌رود.



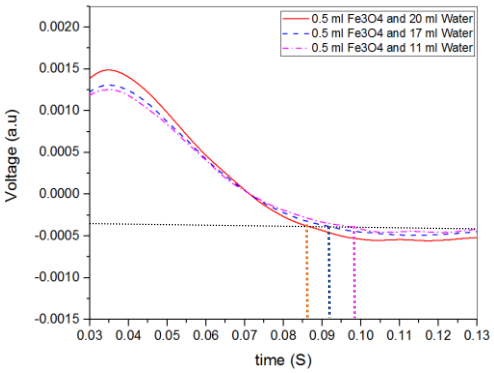
شکل ۳ : منحنی ولتاژ میدان اعمالی برحسب زمان و پاسخ ماده در غلظت‌های مختلف.

در اندازه‌گیری بعدی، قصد ما بر این بود تا زمان واهلش براونی نانوذرات را مورد بررسی قرار دهیم. در این اندازه - گیری نیز از سه غلظت متفاوت استفاده شد. با توجه به شکل ۳ یک میدان مغناطیسی مربعی با طول ۰/۰۲۵ ثانیه

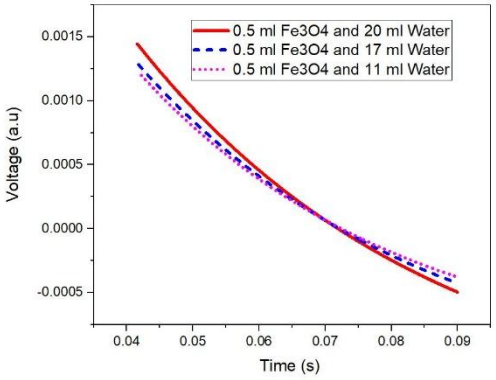
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-19]

به نمونه‌ها با غلظت‌های مختلف اعمال شد و پاسخ زمانی ماده بدست آمد. در شکل ۴، پاسخ فروسیال به پالس مربعی، به‌صورت دقیق‌تر و در بازه‌ی زمانی کوتاه‌تری نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که برای غلظت‌های مختلف، زمان واهلش براونی برابر با ۸۵/۶ $\tau_1 =$ ۹۰/۶، $\tau_2 =$ و $\tau_3 =$ ۹۵/۸ میلی‌ثانیه است. بنابراین با افزایش غلظت، زمان واهلش براونی افزایش می‌یابد.



شکل ۴ : پاسخ ماده در غلظت‌های مختلف.



شکل ۵ : منحنی‌های برازش شده پاسخ ماده با دو تابع نمایی بر حسب زمان در غلظت‌های متفاوت.

برای بررسی بیشتر، منحنی‌های بدست آمده با یک تابع نمایی برازش گردید. با توجه به وجود تابع توزیعی از اندازه‌ی ذرات، استفاده از یک تابع نمایی پاسخ خوبی را برای برازش منحنی به‌دست نمی‌دهد و چون تابع مشخصی برای برازش منحنی زمان واهلش براونی در مقالات علمی یافت نشد، پس از دو تابع استفاده شد (شکل ۵) که اطلاعات مربوط به آن در جدول ۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش غلظت، ضرایب نمایی b_1 و b_2 کاهش می‌یابد که می‌تواند معیاری از افزایش زمان واهلش ماده باشد.

جدول ۱: معادله برازش و ضرایب تابع نمایی در غلظت‌های مختلف.

$y = A_1 * \exp(-x/b_1) + A_2 * \exp(-x/b_2) + y_0$	b_1	b_2	$k = 1/b$
0.5 ml Fe3O4+20ml water	0.0450	0.0450	22.20
0.5 ml Fe3O4+17ml water	0.0436	0.0436	22.90
0.5 ml Fe3O4+11ml water	0.0402	0.0402	24.88

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با روش مغناطونوری فارادی دو پدیده‌ی چرخش فارادی و زمان واهلش براونی فروسیال اکسیدآهن در غلظت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، افزایش غلظت فروسیال باعث افزایش میزان چرخش فارادی و زمان واهلش براونی می‌گردد و وجود توزیعی از اندازه نانوذرات بر خواص مغناطونوری فروسیال‌ها موثر است.

مرجع‌ها

[1] D. Jamon, F. Donatini, A. Siblini, F. Royer, R. Perzynski, V. Cabuil, S. Neveu, "Experimental investigation on the magneto-optic effects of ferrofluids via dynamic measurements", Journal of magnetism and magnetic materials,Vol. 321, No. 9, pp.1148-1154, 2009.

[2] L. Delaunay, S. Neveu, G. Noyel, J. Monin, "A new spectrometric method, using a magneto-optical effect, to study magnetic liquids", Journal of magnetism and magnetic materials, Vol. 149, No. 3, pp. 239-245, 1995.

[3] K. L. Chen, Y. S. Lin, J. M. Chen, C. H. Wu, C. C. Jeng, L. M. Wang, "A sensitive platform for in vitro immunoassay based on biofunctionalized magnetic nanoparticles and magneto-optical Faraday effect ", Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 258, pp. 947-951, 2018.

[4] A. A. Velásquez, J. P. Urquijo, "Implementation and automation of a Faraday experiment for the magneto-optical characterization of ferrofluids", Measurement Science and Technology, Vol. 27, No. 1, p. 015303, 2015.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-19]