

## طراحی و ساخت حسگر میدان مغناطیسی بر پایه فیبر نوری نازک شده با استفاده از نانو فروسیال

محمد رضا کازرانی وحدانی\*

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع هوادریا، شیراز، ایران

دریافت: 1396/06/26 ویرایش نهایی: 1397/03/10 پذیرش: 1397/04/11

### چکیده

در این تحقیق حسگر میدان مغناطیسی به صورت مرقون به صرفه و با حساسیت بالا بر پایه فیبر نوری نازک شده با استفاده از سیال مغناطیسی طراحی شده است. نانوفروسیال توسط آنالیزهای پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی مشخصه‌یابی شد. حسگر میدان مغناطیسی با قرار دادن فروسیال حول فیبرهای نوری با طول یکسان و قطرهای مختلف تهیه شدند. اثر قطر فیبر نوری بر خواص حسگر به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. فیبر نوری با قطر 0.4 میلی‌متر بیشترین حساسیت 0.0189 mT/dbm و بیشترین گستره آشکار سازی میدان از 2.5 mT تا 122.5mT را نسبت به سایر نمونه‌ها از خود نشان داد. حسگر در حالت بهینه عملکرد پاسخی خطی و در حدود 99% را نشان داد.

**کلیدواژگان:** حسگر فیبر نوری، نانوفروسیال، حسگر میدان مغناطیسی، پاسخ خطی

### مقدمه

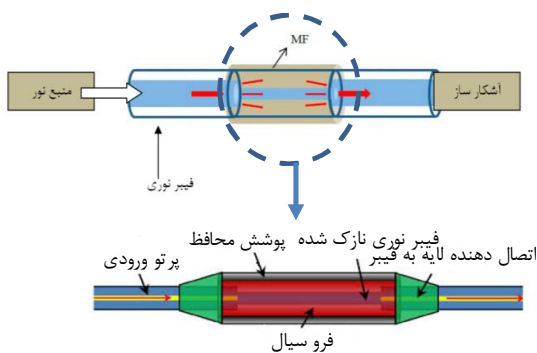
ترکیب شود علاوه بر مزایای پیشین می‌توان از خواص نانو ساختارها و برهم‌نکش آنها با آنالیت‌های مختلف در کاربردهای حسگری استفاده فراوان نمود [4-2]. با قرار دادن نانو ساختارهای مناسب روی فیبر نوری نازک شده امکان برهم‌نکش نور با محیط بیرون به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد و باعث افزایش چشمگیر عملکرد حسگر خواهد شد. یکی از این نوع حسگرهای ترکیبی حسگرهای میدان مغناطیسی فیبر نوری با استفاده از فروسیال‌ها می‌باشند.

فروسیال یک محلول کلوئیدی حاوی نانوذرات مغناطیسی به صورت معلق درون مایع حامل است که به منظور جلوگیری از کلوخه شدن نانوذرات از پایدارکننده استفاده شده است [5]. زمانی که این مایع در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، بسته به شدت میدان مغناطیسی خواص اپتیکی جالبی همچون تغییر ضریب شکست، میزان عبور متغیر و جابه‌جایی طول موج را از

حسگرهای میدان مغناطیسی عناصر کلیدی در کاربردهای نظامی و امنیتی می‌باشند. ویژگی‌های اصلی این نوع حسگرها عبارت است از: حساسیت بالا، انتخاب پذیری، مقاومت در شرایط سخت محیطی، مصرف پایین انرژی و اندازه کوچک. یکی از انواع حسگرهای میدان مغناطیسی که اخیراً توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده حسگرهای فیبر نوری می‌باشد. از آنجایی که فیبر نوری یک موجبر دی الکتریک بوده و امکان انتقال داده با سرعت بالا در محیط‌های متنوع و دور از دسترس (در دریا، اعماق زمین، محیط‌های با دمای بالا و...) را ممکن می‌سازد و از سوی دیگر کوچک و سبک بوده و برهم‌کنشی با امواج الکترومغناطیسی محیط اطراف انجام نمی‌دهد، لذا بستری ایده‌آل در کاربردهای حسگری ایجاد کرده است [1,2]. هنگامی که فیبر نوری با نانوساختارها

\* نویسنده مسئول: Rezavahdani@maui.ac.ir

1/492 و غلاف 1/402 می‌باشد. از آنجایی که فیبر نوری پلیمری سطح مقطع بزرگتر و مقاومت خمشی بالاتری نسبت به فیبر نوری مخابراتی دارد کوپلینگ نور آسانتر و بیشتری خواهد داشت. لذا امکان طراحی حسگر مرقون به صرفه‌تری را فراهم می‌سازد. ناحیه وسط فیبر نوری به طول 1/5 سانتی‌متر به صورت مکانیکی توسط سمباده با زبری بسیار کم و به آرامی نازک گردید. فیبر نوری در ناحیه حسگری توسط فروسیالی از نانوذرات  $Fe_3O_4$  احاطه گردید. از منبع نور سفید و توان سنچ نوری (thorlab 400-1100nm) به عنوان آشکار ساز با دقت 1nW استفاده شد. چیدمان آزمایش در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل 1. چیدمان آزمایش.

همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است نور از یک طرف فیبر نوری وارد شده و بعد از برهم‌کنش با فروسیال از انتهای دیگر فیبر خارج می‌شود و تغییرات شدت نور خروجی توسط آشکارساز نوری ثبت می‌شود.

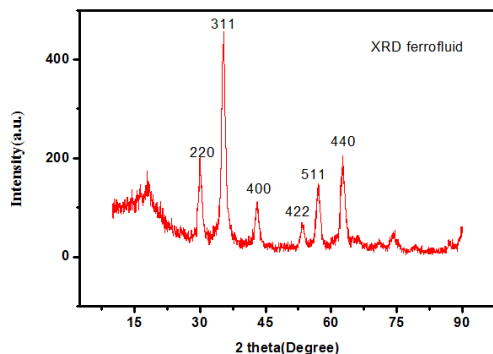
### عملکرد حسگر

فیبر نوری بر مبنای بازتاب کلی که درون آن روی می‌دهد نور ورودی را انتقال می‌دهد. البته تمام نوری که وارد فیبر شده به انتهای دیگر آن منتقل نمی‌شود و مقداری از نور در قسمت غلاف فیبر نفوذ کرده که به نام پرتوهای محو شونده از آنها یاد می‌شود. به دلیل اینکه

خود نشان می‌دهد [10-6]. بر این اساس تجهیزات اپتیکی متنوعی بر مبنای سیال مغناطیسی گسترش یافته‌اند، مثال‌هایی از این قبیل شامل سیال مغناطیسی مدولاتور نور [11]، توری نوری سیال مغناطیسی [12]، سویچ‌های نوری [13] و حسگرهای میدان مغناطیسی [14] و ... می‌باشند. در سال 2014 یک سنسور میدان مغناطیسی جدیدی گزارش شد که متشکل از یک فیبر تداخل سنچ فاری پرو و سیال مغناطیسی بود. آزمایشات مقدماتی نشان داد که حساسیت اندازه‌گیری میدان مغناطیسی 0.0431nm/Gs و دقت اندازه‌گیری بیش از 0.5Gs در محدوده بین 0 تا 400Gs را داشت [15]. اگر چه تحقیقات آنها اثر دما روی سیال مغناطیسی را در نظر نگرفت. ضریب شکست سیال مغناطیسی بگونه‌ای متفاوت تحت تأثیر میدان و دما عمل می‌کند. در سال 2016 حسگر میدان مغناطیسی با استفاده از فیبر توری براگ و سیال مغناطیسی گزارش شده است [16]. در این تحقیق نتایج تجربی نشان داد که حساسیت میدان مغناطیسی از 0.23 nm/mT به 0.5 nm/mT بهبود یافته است. که نشان دهنده دورنمای مناسبی برای کاربردهای صنایع قدرت و تکنولوژی صنایع دفاعی می‌باشد. در کار تحقیقاتی دیگری که در سال 2015 منتشر شد [17]، بیان گردید که با استفاده از یک تار نوری متناوب با دوره بلند که توسط سیال مغناطیسی احاطه شده می‌توان میدان‌های مغناطیسی کوچکی به اندازه 7.4 Gs را با حساسیت 0.154 dB/Gs ثبت نمود. در این مقاله حسگر میدان مغناطیسی به صورت مرقون به صرفه توسط فیبر نوری پلیمری طراحی گردید. ناحیه حسگری با سه قطر مختلف آماده شد و در کپسولی از سیال مغناطیسی قرار گرفت و اثر قطر فیبر نوری بر عملکرد حسگر مورد مطالعه قرار گرفت.

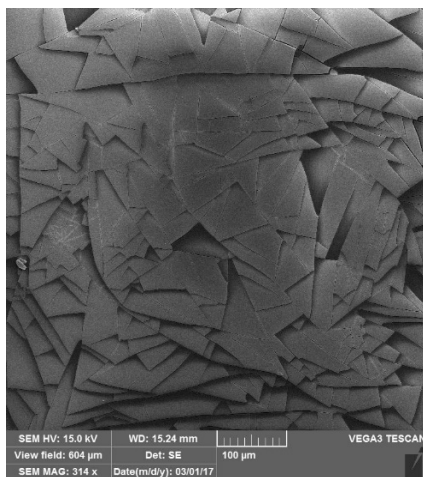
### مواد و روش آزمایش

فیبر نوری به کار برده شده در این مقاله فیبر نوری پلیمری با قطر یک میلی‌متر و ضریب شکست هسته



شکل 2 الگوی پراش اشعه ایکس فروسیال.

به منظور مشاهده مرفولوژی فروسیال از آنالیز میکروسکوپ الکترونی بهره گرفته شد. در شکل 3 نحوه قرار گیری لایه‌های فروسیال دیده می‌شود که به صورت ورقه مانند روی هم قرار گرفته‌اند. علی‌رغم اینکه زمان کافی برای خشک شدن فروسیال چکانده شده روی لام داده شد، عملاً هیچ نانوذره‌ای در تصویر دیده نمی‌شود که نشان دهنده توانایی آب پوشی بالای نانوذرات مغناطیسی توسط مایع پایدار کننده است.



شکل 3. تصویر میکروسکوپ الکترونی از فروسیال مغناطیسی.

### اثر ضخامت فیبر نوری بر عملکرد حسگر

همان‌طور که پیش از این اشاره گردید حسگر پیشنهادی بر اساس مدولاسیون شدت نور عمل می‌کند. با تغییر میدان مغناطیسی ضریب شکست مایع اطراف ناحیه حسگری تغییر می‌کند که این منجر به تغییر شدت

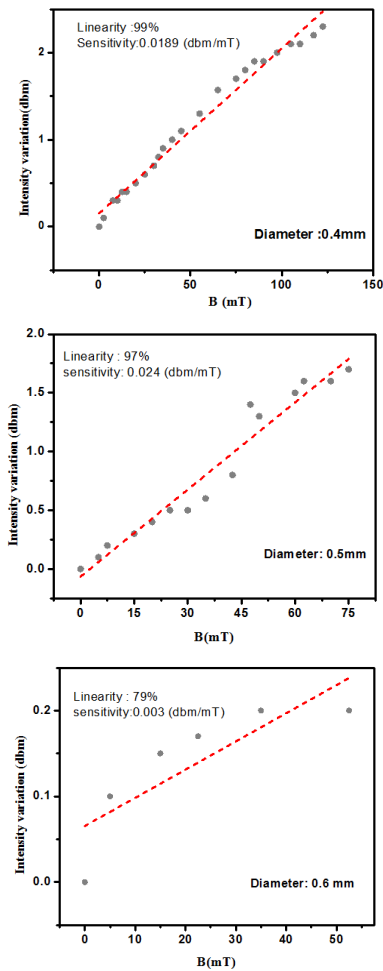
ضریب شکست فروسیال بیش از ضریب شکست فیبر نوری می‌باشد، امکان نفوذ نور در محیط بیرون از غلاف فیبر نوری و برهم‌کنش با محیط فروسیال غلاف ایجاد می‌شود. در اثر برهم‌کنش نور با فروسیال و تغییر ضریب شکست محیط اطراف فیبر در هنگام اعمال میدان مغناطیسی، شدت نور خروجی تغییر کرده و بسته اندازه میدان مقدار آن ممکن است کم و یا زیاد شود. در نهایت این تغییرات شدت توسط آشکار ساز نوری ثبت می‌شود.

### مشخصه یابی

الگوی پراش اشعه ایکس فروسیال توسط دستگاه XRD مدل (X' Pert Pro PANalytical) با آند مس و طول موج 1/54 Å مورد مطالعه قرار گرفت (شکل 2). نحوه احاطه شدن نانوذرات مغناطیسی توسط سیال با میکروسکوپ الکترونی (SEM) مدل WEGA3 TESCAN بررسی گردید (شکل 3). عملکرد حسگر توسط منبع نور سفید رنگ برای سه قطر مختلف 0/6، 0/5 و 0/4 میلی‌متر فیبر نوری ثبت شد و با هم مقایسه گردید.

### بحث و نتیجه گیری

همان‌طور که در شکل 2 مشاهده می‌شود الگوی پراش اشعه ایکس نشان دهنده تشکیل فاز مگنتیت ( $Fe_3O_4$ ) می‌باشد که در جهت (311) رشد ترجیحی داشته است. اندازه بلورک‌ها از رابطه دبای شرر  $D = k\lambda / \beta \cos\theta$  محاسبه گردید، که در آن D اندازه بلورک، K ثابت مربوط به شکل (0/9)،  $\lambda$  طول موج تابش فرودی،  $\beta$  پهنای پیک در نصف بیشینه و  $\theta$  زاویه بازتاب براگ می‌باشد. بر این اساس اندازه بلورک‌ها تقریباً 7/5 نانومتر محاسبه گردید. اندازه بسیار کوچک این ذرات اثر پذیری مطلوبی در خواص اپتیکی فروسیال هنگام اعمال میدان را به دنبال خواهد داشت که آن را مناسب کاربردهای حسگری می‌سازد.



شکل 4. عملکرد حسگر در ضخامت‌های مختلف فیبر نوری.

## نتایج

حسگر فیبر نوری میدان مغناطیسی توسط فیبر نوری پلیمری به صورت مقرون به صرفه و با حساسیت بالا طراحی و ساخته شد. سایز بلورک‌های به کار برده شده در فروسیال 7/5 نامتر تخمین زده شد و تصاویر نشان دادند که سیال به صورت لایه‌های متوالی روی هم قرار گرفته و مانع از کلوخه شدن ذرات می‌گردند. فیبر نوری با ضخامت 0/4 میلیمتر عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های دیگر نشان داد به گونه‌ای که توان آشکار سازی میدان‌هایی به کوچکی 2/5 میلی تسلا با حساسیت 0/0189 mT/dbm و 99٪ پاسخ خطی را داشت. حسگر پیشنهادی نشان از توانایی به کار گیری در صنایع قدرت و دفاعی را دارد که به دلیل عدم وجود جریان

نور خروجی می‌شود. در این راستا نخست چندین تار نوری با ضخامت‌های مختلف آماده و توسط فروسیال احاطه شد. پاسخ حسگر برای فیبرهایی با طول یکسان (15 میلی‌متر) و قطرهای مختلف 0/4 و 0/5 و 0/6 میلی‌متر در شکل 4 نشان داده شده است. با افزایش قطر فیبر حساسیت حسگر و گستره عملکرد آن کاهش یافته به گونه‌ای که در فیبر با قطر 0/6 میلی‌متر کمترین میزان حساسیت 0/003dbm/mT و میزان خطی بودن 79٪ مشاهده گردید. دلیل این امر می‌تواند ناشی از برهم‌کنش کمتر پرتوهای محو شونده با محیط بیرون فیبر (فروسیال) در ناحیه حسگری باشد. به گونه‌ای که در فیبر با ضخامت 0/5 میلی‌متر با افزایش نشر نور به بیرون فیبر زمینه برهم‌کنش بیشتر نور با فروسیال افزایش یافت بهبود چشمگیر حساسیت (0/24dbm/mT) و خطی بودن پاسخ 97٪ مشاهده شد. در فیبر با کمترین ضخامت (0/4 میلیمتر) از میزان حساسیت کاسته شد (0/0189 dbm/mT) که نشان از عدم برهم‌کنش مؤثر تمام نور نشر یافته به بیرون با فروسیال می‌باشد. اگرچه با کاهش قطر فیبر میزان پرتوهای محو شونده افزایش می‌یابد اما لزوماً متناسب با آن برهم‌کنش مؤثر نور با محیط بیرون به گونه‌ای که مناسب کاربرد حسگر باشد فراهم نمی‌گردد. لازم به ذکر است در قطر 0/4 میلی‌متر میزان خطی بودن پاسخ (99٪) به ماکزیمم مقدار در مقایسه با نمونه‌های دیگر رسید و البته توانایی اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در گستره بیشتری 2/5 mT تا 122/5 mT را نشان داد.

[9] Z.L. Poole, P. Ohodnicki, R. Chen, Y. Lin, K.P. Chen, Engineering metal oxide nanostructures for the fiber optic sensor platform, *Optics express* **22** (2014) 2665-2674.

[10] J. Lu, C. Xu, J. Dai, J. Li, Y. Wang, Y. Lin and P Li, Improved UV photoresponse of ZnO nanorod arrays by resonant coupling with surface plasmons of Al nanoparticles, *Nanoscale* **7** (2015) 3396-3403.

[11] H.E. Horng, J.J. Chieh, Y.H. Chao, S.Y. Yang, Chin-Yih Hong, and H. C. Yang, Designing optical-fiber modulators by using magnetic fluids, *Optics Letters* **30** (2005) 543-545.

[12] S. Pu, X. Chen, L. Chen, W. Liao, Y. Chen, Y. Xia, Tunable magnetic fluid grating by applying a magnetic field, *Applied Physics Letters* **87** (2005) 021901.

[13] S.H. Xia, J. Wang, Z.X. Lu, F. Zhang, Birefringence and magneto-optical properties in oleic acid coated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles: application for optical switch, *International Journal of Nanoscience* **10** (2011) 515-520

[14] H. Ji, S. Pu, X. Wang, G. Yu, Magnetic field sensing based on V-shaped groove filled with magnetic fluids, *Applied Optics* **51** (2012) 1010-1020.

[15] R.Q. Lv, Y. Zhao, D. Wang, Q. Wang, Magnetic fluid-filled optical fiber Fabry-Pérot sensor for magnetic field measurement, *IEEE Photonics Technology Letters* **26** (2014) 217-219.

[16] J. Xia, F. Wang, H. Luo, Q. Wang, S Xiong, A magnetic field sensor based on a magnetic fluid-filled FP-FBG structure, *Sensors* **16** (2016) 620.

[17] N.M.Y. Zhang, X. Dong, P.P. Shum, D.J.J. Hu, H. Su, W.S. Lew, L. Wei, Magnetic field sensor based on magnetic-fluid-coated long-period fiber grating, *Journal of Optics* **17** (2015) 065402.

الکتریکی می‌توان از آن در مکان‌های دور از دسترس مانند دریا و یا مکان‌های اشتعال‌زا با امنیت مناسبی از این نوع حسگرها بهره جست.

### سپاس‌گزاری

از دانشگاه مالک اشتر قدردانی می‌گردد.

### مرجع‌ها

[1] A Urrutia, J. Goicoechea, F.J. Arregui, Optical fiber sensors based on nanoparticle-embedded coatings, *Journal of Sensors* **2015** (2015) 805053.

[2] W. Jin, H.L. Ho, Y.C. Cao, J. Ju, L.F. Qi, Gas detection with micro-and nano-engineered optical fibers, *Optical Fiber Technology* **19** (2013) 741-759.

[3] J. Yuan, M.A. El-Sherif, Fiber-optic chemical sensor using polyaniline as modified cladding material, *Sensors Journal, IEEE* **3** (2003) 5-12.

[4] S. Tao, C.B. Winstead, R. Jindal, J.P. Singh, Optical-fiber sensor using tailored porous sol-gel fiber core, *IEEE Sensors Journal* **4** (2004) 322-328.

[5] K. Raj, B. Moskowitz, R. Casciari, Advances in ferrofluid technology, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **149** (1995) 174-180.

[6] P. Zu, C.C. Chan, L. W. Siang, Y. Jin, Y. Zhang, L.H. Fen, L. Chen, X. Dong, Magneto-optic fiber Sagnac modulator based on magnetic fluids, *Optics Letters* **36** (2011) 1425-1427.

[7] K. Schroeder, W. Ecke, R. Willsch, Optical fiber Bragg grating hydrogen sensor based on evanescent-field interaction with palladium thin-film transducer, *Optics and Lasers in Engineering* **47** (2007) 1018-1022.

[8] B. Renganathan, D. Sastikumar, Nanocrystalline cerium oxide coated fiber optic gas sensor, *Current Applied Physics* **14** (2014) 2014.