



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



## پایش سازه‌های عمرانی با استفاده از حسگر فیبر نوری

مه‌دی صباحی، رحمان نوروزی

دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، زنجان، ایران

چکیده - در این مقاله یک حسگر فیبر نوری شبه توزیع شده برای سنجش میزان کرنش اعمال شده بر میلگرد آجدار به قطر ۸ میلی‌متر به صورت تئوری و آزمایشگاهی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. حسگر فیبر نوری مورد استفاده در این مقاله بر پایه تداخل سنجی ماخ-زندر بنا شده است. نتایج حاصل از آزمایش نشان دهنده تطبیق بسیار بالا با نتایج تئوری است. در این مقاله اندازه‌گیری کرنش اعمال شده تا ۹۸/۵٪ تطابق گزارش شده است.

کلید واژه- پایش پل، تداخل سنج ماخ-زندر، حسگر کرنش

## Monitoring of civil structures using Fiber Optic Sensor

Mahdi Sabahi, Rahman Nouroozi

Department Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran

Mehdisabahi1372@gmail.com, Rahman.nouroozi@iasbs.ac.ir

**Abstract-** In this paper, a quasi-distributed optical fiber sensor has been studied theoretically and experimentally to measure the strain rate applied to ribbed rebar with 8-millimeter diameter. The fiber optic sensor used in this paper is based on the Mach-Zehnder interferometry. The results of the experiment indicate a very high matching with theoretical results which demonstrate %98.5 compliance in strain measurement.

**Keywords:** Mach-Zehnder interferometry, Monitoring of Bridge, Strain sensor

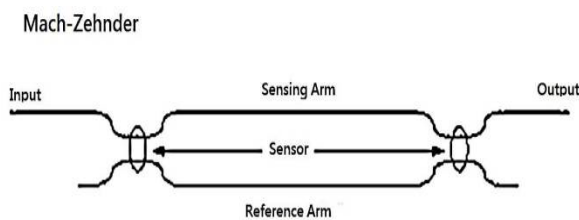
## مقدمه

با پیشرفت علم در قرون اخیر تصور زندگی بدون ماشین، هواپیما، کشتی، راه‌آهن، جاده، پل، تونل، سد و ارتباطات غیر ممکن است. این ساختارها محیط زندگی امروزی ما را تشکیل می‌دهند و جنبه‌های اجتماعی، زیست محیطی، اقتصادی و فرهنگی آن را دربر می‌گیرند. بنابراین طراحی مناسب و بهره‌برداری امن و با دوام سازه جزء اهداف مهندسی سازه است. با این حال این سازه‌ها در طول عمر خود تحت تأثیر تغییرات نامطلوب در شرایط ساختاری قرار می‌گیرند [۱]. وجود این خسارات موجب فرسایش سازه می‌شوند. تشخیص زود هنگام خسارات باعث افزایش طول عمر خدمات ساختار در یک دوره و همچنین کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود [۲]. روش‌های مختلفی برای تشخیص زود هنگام خسارات در سازه وجود دارد. حسگرهای فیبر نوری یکی از انواع روش‌هایی است که قابلیت اندازه‌گیری خسارات در سازه را دارند. این حسگرها شامل حسگرهای کوچک مقیاس، حسگرهای بزرگ مقیاس و حسگرهای توزیع شده می‌باشند. اندازه حسگرهای کوچک مقیاس از مرتبه میلی‌متر می‌باشند که قابلیت اندازه‌گیری محلی کرنش و دما را دارند. همچنین اندازه حسگرهای بزرگ مقیاس از مرتبه چند سانتی‌متر تا چندین متر می‌باشند. حسگرهای توزیع شده یک حسگر یک بعدی می‌باشند که قابلیت اندازه‌گیری پیوسته خسارات در طول سازه را دارند. اصول کاری این حسگرها پراکندگی‌های غیرخطی موجود در فیبر می‌باشد. با استفاده از این حسگرها می‌توان در طول چند صد کیلومتر از سازه خسارات موجود را آشکار کرد [۳]. حسگر تداخل‌سنجی ماخ-زندر یک حسگر بزرگ مقیاس می‌باشد که گاهی به عنوان حسگر شبه توزیع شده بیان می‌شود. این حسگر قابلیت اندازه‌گیری کرنش را دارد. در این مقاله شیاری طولی بر روی سطح میلگرد آجدار ایجاد شده و فیبر نوری در این شیار قرار گرفته است. فیبر

تعبیه شده در میلگرد در بازوی حسگری تداخل‌سنج قرار گرفته و رفتار حسگر به تنش سینوسی اعمال شده به میلگرد بررسی شده است.

## مبانی نظری

در این مقاله اندازه‌گیری کرنش با استفاده از تداخل‌سنج ماخ-زندر انجام می‌شود. چیدمان تداخل‌سنج ماخ-زندر در شکل ۱ نشان داده شده است [۴].



شکل ۱: چیدمان تداخل‌سنج ماخ-زندر فیبر نوری [۴].

این تداخل‌سنج شامل دو عدد جفت کننده فیبر نوری در ورودی و خروجی و دو بازوی حسگر و مرجع می‌باشد. بازوی حسگر وظیفه حسگری را بر عهده دارد و اثرات خارجی تنها بر این بازو اعمال می‌شود، نتیجه‌ی این اثرات ایجاد جابجایی فاز بین دو بازوی حسگر و مرجع می‌باشد. این جابجایی فاز که ناشی از اختلاف راه نوری می‌باشد، در معادله ۱ بر حسب کرنش نشان داده شده است [۵].

$$\Delta\varphi = \varepsilon(\beta L - \beta L \frac{n^2}{2}((1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11})) \quad (1)$$

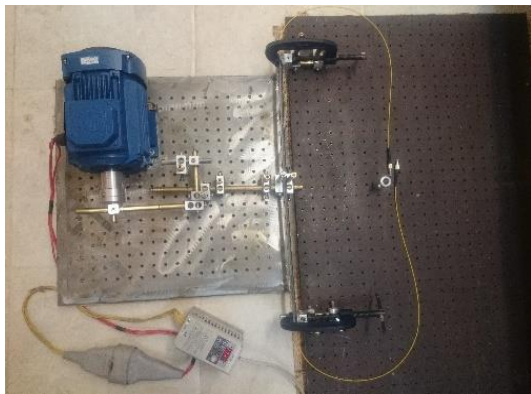
در این معادله  $\Delta\varphi$  جابجایی فاز،  $n$  ضریب شکست هسته فیبر،  $\beta$  ثابت انتشار فضای آزاد،  $L$  طول فیبر نوری،  $\nu$  نسبت پواسون،  $p_{11}$  و  $p_{12}$  ثابت‌های پوکلز و  $\varepsilon$  میانگین کرنش اعمال شده بر بازوی حسگر می‌باشند. وجود این جابجایی فاز بین دو بازوی تداخل‌سنج شدت نور خروجی را تغییر می‌دهد. این تغییر شدت به صورت معادله زیر بیان می‌شود.

$$I = 2I_0(1 + \cos\Delta\varphi) \quad (2)$$

در این معادله  $I_0$  شدت چشمه‌ی نور و  $I$  شدت نور خروجی تداخل‌سنج می‌باشد. برای رفتارسنجی حسگر به کرنش

در سازه به آن محل سوق داده شوند، از این رو میلگردهای استفاده شده در بتن آرمه را بکار می‌بریم. بازوی حسگر را به دو صورت می‌توان بر روی میلگرد نصب کرد، روش اول: با استفاده از چسب‌های مخصوص، فیبر را بر روی سطح طولی میلگرد چسباند. روش دوم: قرار دادن فیبر در شیار طولی که در ابعاد فیبر، بر روی سطح میلگرد ایجاد شده است. نتایج مقالات نشان می‌دهند که حساسیت حسگر در روش دوم بیشتر از روش اول است [۶]. بنابراین ما نیز بر روی میلگرد آجداری به قطر ۸ میلی‌متر و طول ۶۰/۶ سانتی‌متر شیاری به عرض و عمق ۲ میلی‌متر در راستای طول میلگرد ایجاد کردیم و فیبر تک مد که دارای یک هسته و یک پوسته می‌باشد را در آن قرار دادیم و برای پوشاندن شیار از چسب فولاد هل استفاده کردیم.

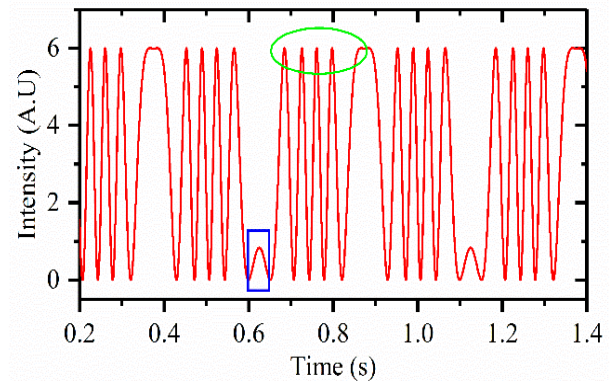
برای اعمال تنش به میلگرد نیاز به وسیله‌ای داریم که تنشی با دامنه جابجایی مشخص به میلگرد وارد کند. برای این منظور وسیله‌ای طراحی کردیم که قابلیت اعمال تنش سینوسی با دامنه و فرکانس مشخص را دارد (شکل ۳).



شکل ۳: ابزار ساخته شده با استفاده از الکتروموتور با قابلیت تبدیل نیروی چرخان الکتروموتور به نیروی سینوسی تک محوره با دامنه و فرکانس مشخص

فیبر تعبیه شده در میلگرد را در بازوی حسگر قرار دادیم و با استفاده از این وسیله تنشی با دامنه مشخص به مرکز میلگرد وارد کردیم. با استفاده از فوتودیود خروجی حسگر را بر روی اسیلوسکوپ ثبت کردیم (شکل ۴).

سینوسی با دامنه جابجایی  $\varepsilon = 11.058 \mu$  از معادلات ۱ و ۲ استفاده می‌کنیم. در این معادلات طول فیبر برابر ۵۶ سانتی‌متر، ضریب شکست فیبر ۱/۴۵، نسبت پواسون  $\nu = 0.17$  و مقادیر ثابت‌های پوکلز  $p_{11}$  و  $p_{12}$  برای فیبر به ترتیب برابر ۰/۱۲۱ و ۰/۲۷۰ می‌باشند [۴]. نتیجه حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: نتیجه حاصل از شبیه‌سازی حسگر. بخش سبز: تعداد نوسانات با جابجایی فاز  $\pi$ . بخش آبی: ناحیه‌ای با اختلاف فاز کمتر از  $\pi$ .

میزان کرنشی که در این معادله استفاده شده است جابجایی فازی بیشتر از  $\pi$  ایجاد می‌کند. بنابراین طبق معادله ۲ مرتبه‌ی تداخل را نمی‌توان بدست آورد، اما نمودار نشان دهنده‌ی این واقعیت است که حسگر برای هر جابجایی فاز  $\pi$  یک نوسان در شدت نور خروجی دارد (بخش سبز). همچنین این نمودار، دارای بخش دیگری است که جابجایی فاز کمتر از  $\pi$  دارد (بخش آبی). برای بدست آوردن جابجایی فاز این بخش از معادله ۲ استفاده می‌کنیم. بنابراین جابجایی فاز کلی را می‌توان از جمع جابجایی فاز دو بخش بدست آورد.

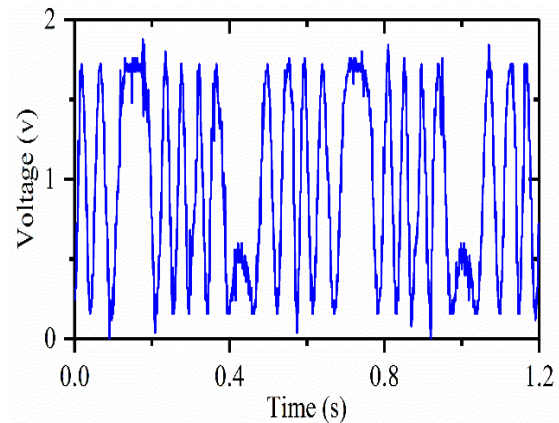
### نحوه انجام آزمایش

برای سنجش رفتار حسگر نسبت به کرنش باید آن را در سازه نصب کنیم و موقعیت آن باید به گونه‌ای باشد که به حسگر آسیبی وارد نشود و همچنین تنش‌های ایجاد شده

حاصل کرد و در صدد رفع آن برآمد. همچنین با استفاده از این حسگر می‌توان از میزان بار اعمال شده به سازه آگاه شد و از اعمال بارهای غیر مجاز جلوگیری کرد. میزان خطای حاصل از این آزمایش برابر ۵/۱٪ می‌باشد که این خطا بخاطر دقت ابزار اندازه‌گیری در آزمایش می‌باشد.

### مرجع‌ها

- [1] López-Higuera, José Miguel, et al. "Fiber optic sensors in structural health monitoring." *Journal of lightwave technology* 29.4 (2011): 587-608.
- [2] Barrias, António, Joan R. Casas, and Sergi Villalba. "A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications." *Sensors* 16.5 (2016): 748.
- [3] Glisic, Branko, Jeremy Chen, and David Hubbell. "Streicker Bridge: A comparison between Bragg-grating long-gauge strain and temperature sensors and Brillouin scattering-based distributed strain and temperature sensors." *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2011*. Vol. 7981. International Society for Optics and Photonics, 2011.
- [4] Her, Shih-Chuan, and Chih-Min Yang. "Dynamic strain measured by Mach-Zehnder interferometric optical fiber sensors." *Sensors* 12.3 (2012): 3314-3326.
- [5] Wild, Graham, and Steven Hinckley. "Acousto-ultrasonic optical fiber sensors: overview and state-of-the-art." *IEEE Sensors Journal* 8.7 (2008): 1184-1193.
- [6] Quiertant, Marc, et al. "Deformation monitoring of reinforcement bars with a distributed fiber optic sensor for the SHM of reinforced concrete structures." *NDE*. 2012.



شکل ۴: پاسخ حسگر به نیرویی با دامنه جابجایی ۱/۱۲mm به مرکز میلگرد

دامنه جابجایی نیروی اعمالی به مرکز میلگرد برابر ۱/۱۲ میلی‌متر می‌باشد که این جابجایی کرنشی برابر  $\varepsilon = 11.058 \mu$  به میلگرد وارد می‌کند. کرنشی که از آزمایش‌ها بدست آمده برابر  $\varepsilon = (11.234 \pm 0.1530) \mu$  است. نتایج این آزمایش برای دفعات مختلف در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: نتایج حاصل از آزمایش برای دامنه جابجایی ۱/۱۲ mm

مرتبہ	جابجایی فاز (رادیان)	کرنش
۱	$9\pi + 0.1657$	$11.113 \mu$
۲	$9\pi + 0.0241$	$11.068 \mu$
۳	$9\pi + 0.2815$	$11.169 \mu$
۴	$9\pi + 0.7741$	$11.361 \mu$
۵	$9\pi + 0.7370$	$11.347 \mu$
۶	$9\pi + 1.0310$	$11.462 \mu$
۷	$9\pi + 0.1548$	$11.119 \mu$

### جمع‌بندی

با توجه به نتایج حاصل از این آزمایش، حسگر تداخل‌سنجی ماخ-زندر حساسیت بالایی نسبت به تنش اعمال شده دارد و با استفاده از این حسگر می‌توان میزان تنش اعمال شده به ساختار میزبان را محاسبه کرد. بنابراین با نصب حسگر بر روی سازه می‌توان از تغییرات سازه به صورت مستمر اطلاع