

## معرفی تنش‌های گسلی بر فیبر نوری FBG برای بررسی امکان‌سنجی به‌عنوان یک پیش‌نشانگر برای زمین‌لرزه

حسین امیری<sup>۱\*</sup>، محمدرضا توکلی چترودی<sup>۲</sup> و مجید نعمتی<sup>۳</sup>

۱. استادیار دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

۳. استادیار، دانشکده علوم و مرکز پژوهشی زلزله، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

(دریافت: ۹۳/۹/۲۴، پذیرش نهایی: ۹۴/۷/۱۴)

### چکیده

در این پژوهش با توجه به ویژگی فیبر نوری و حساسیتی که به تغییر پارامترهای فیزیکی نشان می‌دهد، امکان استفاده از آن به‌عنوان پیش‌نشانگر لرزه‌ای در ساختار گسلی در سطح زمین، به‌عنوان راهکاری جدید بررسی شد. با استفاده از نمودار گسیختگی کولمب، تنش‌های قبل از زمین‌لرزه با به‌کارگیری دایره موهر با روشی خاص تخمین زده شده است. با توجه به اینکه این تنش‌ها به کانون زمین‌لرزه در اعماق زمین مربوط است، ابتدا لازم بود چگونگی تغییرات تنش اطراف کانون به طرف سطح زمین (محل به‌کارگیری فیبر) بررسی شود. سپس با توجه به آستانه حساسیت فیبرهای نوری، فیبرنوری مبتنی بر توری براگ با تناوب کوتاه با پوشش حباب شیشه‌ای مناسب‌تر تشخیص داده شد. با اعمال تنش‌هایی که به تدریج و در نواحی سطحی گسل تجمع می‌یابد، تغییرات در طول موج نور خروجی محاسبه شده است. با توجه به فعالیت گسل کوهبنان واقع در شمال استان کرمان، تنش‌های کولمب ناشی از چند زلزله این منطقه از جمله زلزله ۲۰۰۵ این گسل در زردن تقریباً از سه سال قبل از زلزله تا دو روز مانده به زمان زلزله تخمین زده شد و استفاده گردید. مشاهده می‌شود که در این منطقه گسلی، از حدود دو ماه مانده به رخداد، جابه‌جایی در طول موج نور خروجی از فیبر نوری، از ۶/۱۶ نانومتر و از ۲۲ روز مانده به حادثه از ۶/۵۷ نانومتر عبور می‌کند که می‌تواند زمان شایان توجهی برای هشدار باشد.

واژه‌های کلیدی: تنش، دایره موهر، گسیختگی کولمب، فیبرنوری مبتنی بر توری براگ با تناوب کوتاه، اختلاف راه، پیش‌نشانگر لرزه‌ای.

### ۱. مقدمه

همکاران، ۲۰۱۴). در این پژوهش راهکاری جدید برای استفاده از فیبر نوری در ساختار گسلی و سازوکار زلزله به‌منظور پیش‌بینی ارائه شده است.

فیبرهای نوری به فشار و دما حساس‌اند و با اعمال تنش اطراف فیبر، متناسب با حساسیت آن، تغییراتی در طول موج یا فرکانس موج عبوری ایجاد می‌شود (کرسی و همکاران، ۱۹۷۷). از جمله کاربردهای آن می‌توان به بررسی کرنش ناشی از جزر و مد آب دریا در زمین نزدیک سواحل و پس لرزه‌هایی که سبب کرنش می‌شوند با استفاده از فیبر نوری FBG در حد نانو استرین اشاره کرد (لیو و همکاران، ۲۰۱۱).

با افزایش تغییرات در طول موج نور عبوری از فیبر،

روش‌های مختلفی در طول تاریخ برای یافتن راه پیش‌بینی زلزله به کار گرفته شده است. با این حال جز در موارد بسیار نادر و موردی، موفقیتی حاصل نشده است. در این میان استفاده از فیبر نوری ایده‌ای جدید است که در تئوری و عمل کمتر بررسی شده است. امروزه پس از سونامی‌های مخرب در ژاپن، فیبر نوری برای آشکارسازی رخداد زلزله و هشدار در ایجاد امواج سونامی در اقیانوس به کار گرفته شده است؛ به طوری که کابل در اعماق آب در کف اقیانوس فقط رخداد زلزله را خبر می‌دهد. همچنین ایده تلاش برای استفاده از فیبر نوری برای آشکارسازی گاز رادون در خاک به عنوان پیش‌نشانگر زلزله مطرح شده است (میرحبیبی و

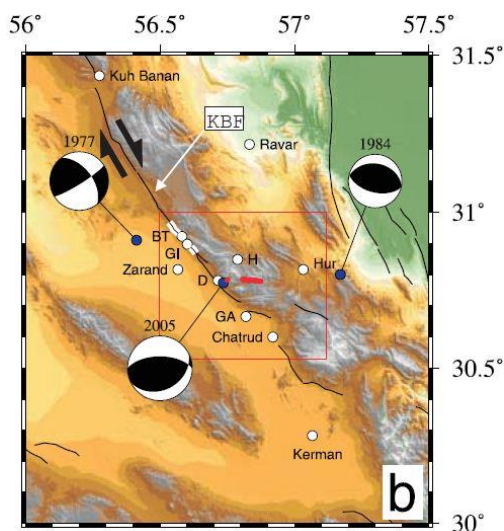
تنش‌های حین زمین‌لرزه در منطقه ال‌لاکوئیلای واقع در ایتالیا (تراکاو و همکاران، ۲۰۱۰) الگو گرفته‌ایم. در نهایت توانستیم تنش‌های قبل از هر زلزله را تخمین بزنیم. در مقایسه با منطقه ال‌لاکوئیلای، منطقه گسلی کوهبنان واقع در شمال استان کرمان (ایران) انتخاب شده است که گسلی بسیار فعال است (شکل ۱). این گسل در دهه‌های گذشته عامل زلزله‌های مخرب زیادی از جمله زلزله‌های با بزرگی بیشتر از ۵ ریشتر در ۲۰۰۲/۱۰/۱۶ و ۲۰۰۵/۰۲/۲۲ در زرنند بوده است. تنش آزادشده در آخرین زلزله کشنده (۲۰۰۵/۰۲/۲۲) در طول دو سال و چهار ماه بعد از آزادسازی تنش، در زلزله قبلی (۲۰۰۲/۱۰/۱۶) در این نقطه (شهر زرنند) شکل گرفته است.

ما با استفاده از نمودار گسیختگی کولمب، تنش‌هایی را که در این مدت به صورت تدریجی در پوسته زمین تجمع یافته است، محاسبه کرده‌ایم. این تنش‌ها، به کانون زمین‌لرزه مربوط است؛ جایی که امکان قراردادن فیبر نوری وجود ندارد. به همین منظور به بررسی چگونگی توزیع تنش از کانون زمین‌لرزه تا سطح زمین پرداختیم (کوکو و رایس، ۲۰۰۲، کوکو و همکاران، ۲۰۰۰). از طرفی با توجه به حساسیت فیبرهای نوری و برای اینکه بتوان تغییرات پارامترهای موج خروجی را محاسبه کرد، انتخاب نوع فیبر در محدوده تغییرات تدریجی تنش مهم است.

می‌توان تغییرات تنشی و افزایش خطر و احتمال زمین‌لرزه را هشدار داد و تحقق این مهم در صورتی است که بتوان تنش‌های تدریجی را که قبل از زلزله و شکست گسل تجمع می‌یابد، تخمین زد و از طرفی توزیع تنش اطراف کانون زمین‌لرزه به طرف سطح محلی را که امکان قراردادن فیبر وجود داشته باشد محاسبه کرد؛ البته اختلالاتی مانند تغییر دما در سطح زمین وجود دارد، ولی در این پژوهش فقط به بررسی چگونگی تغییرات طول موج نور نسبت به اعمال تنش پرداخته شده است.

مشکل میدانی این روش در بعضی گسل‌ها، امکان پیدا کردن خط یا خطوط گسل برای قراردادن فیبر نوری است که توسط صفحات دو طرف گسل تحت فشار و تنش قرار می‌گیرد؛ البته آن هم به ساختار گسل بستگی دارد و ممکن است مثل گسل سان‌آندرس در کالیفرنیا ساده‌تر و قابل مشاهده باشد یا مثل گسل کوهبنان ساختاری پیچیده‌تر داشته باشد. در این تحقیق ما با تأکید بر تئوری مسئله، توزیع تنش اطراف کانون زلزله به طرف سطح را بررسی کرده‌ایم. تجمع تدریجی تنش قبل از زمین‌لرزه را با روشی جدید تخمین زده‌ایم و با نگاهی به تئوری حاکم بر حساسیت فیبر نوری به اعمال فشار در اطراف آن، امکان به کارگیری این روش را در پیش‌بینی زمین‌لرزه بررسی کرده‌ایم.

برای محاسبه تنش‌های قبل از زلزله، از روش محاسبه



شکل ۱. منطقه کوهبنان با رسم دایره فوکال (طالبیان و همکاران، ۲۰۰۶).

$\tau_n$ ، تنش برشی،  $\sigma_n$ ، تنش نرمال و  $P$ ، فشار خخل و فرج است. فشار  $P$  تابعی از  $\sigma$  است (کوکو و رایس، ۲۰۰۲).

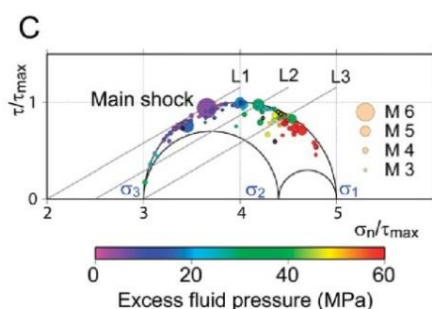
$$P = -B \sigma$$

$$CFF = \tau_n + \mu' \times \sigma_n \quad (2)$$

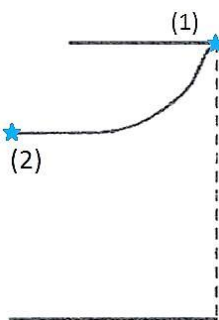
$$\mu' = \mu (1 - B)$$

اندازه  $\mu'$  بین ۰/۴ تا ۰/۸ است. اگر اندازه آن را طبق معمول ۰/۶ بگیریم، با اعمال تنش‌های برشی و نرمال حین زلزله، می‌توان تنش کولمب لحظه گسیختگی را به‌عنوان تنش کولمب نهایی به دست آورد.

برای تنش کولمب اولیه می‌توان تنش تکتونیکی را نادیده انگاشت و تنش نرمال را در حد فشار مایع در محیط گسل در نظر گرفت. برای محاسبه تنش‌های قبل از زلزله که روندی رو به افزایش دارند، از نمودار گسیختگی کولمب (شکل ۳) استفاده می‌کنیم (زارع، ۱۳۸۴).



شکل ۲. محل تنش اعمالی برای زلزله ۲۰۰۹ ال‌ا‌ا کوئینا همراه با تنش‌های خرد لرزه‌ها. دایره‌ها نشان‌دهنده مقدار تنش وارد شده توسط پس‌لرزه‌ها و لوزی‌ها برای پیش‌لرزه‌هاست. بزرگ‌ترین دایره، نشان‌دهنده زلزله اصلی با عمق ۱۰ کیلومتر است. اندازه آن‌ها با بزرگی زمین‌لرزه متناسب است (تراکاوا و همکاران، ۲۰۱۰).



شکل ۳. نمودار گسیختگی کولمب؛ نقطه ۲ شروع تنش کولمب برای محور عمودی و زمان زلزله ۲۰۰۲ است. نقطه ۱ تنش نهایی و رخ‌دادن زلزله ۲۰۰۵ است (زارع، ۱۳۸۴).

## ۲. روش کار و محاسبات

### ۱. ۲. تنش‌های قبل از زلزله

تنش‌های وارد شده به کانون زمین‌لرزه حین رخداد در مناطقی از جمله منطقه ال‌ا‌ا کوئینا که در آن زمین‌لرزه‌ای به بزرگی ۶/۳ در عمق ۱۰ کیلومتری رخ داده، با استفاده از دایره موهر (شکل ۲) محاسبه شده است (تراکاوا و همکاران، ۲۰۱۰).

با استفاده از همین روش تنش‌های قبل از زلزله را می‌توان تخمین زد. رابطه بین تنش‌های اصلی را می‌توان  $R = \sigma_1 - \sigma_2 / \sigma_1 - \sigma_3$  در نظر گرفت.  $\sigma_1$  فشار لیتوستاتیکی در عمق کانون زمین‌لرزه در نظر گرفته می‌شود؛ به طوری که  $\sigma_3 = \mu \sigma_1$  که در آن  $\mu$  ضریب اصطکاک استاندارد و در حد ۰/۶ است (صالح زاده، ۱۳۸۷).

شتاب گرانشی  $g \cong 10 \text{ m/s}^2$  و چگالی پوسته زمین برابر با  $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$  به کار برده می‌شود. با بهینه مقدار  $R$  به اندازه ۰/۳، می‌توان مقادیر تنش‌های اصلی را در هنگام شکست گسل و آزادسازی تنش تکتونیکی هنگام زلزله به دست آورد و دایره موهر را رسم کرد. در دایره موهر شیب خط معروف به فشار گسیختگی برابر با ضریب اصطکاک ( $\tan \phi = \mu$ ) است. در شرایط  $\mu = 0.6$  این خط با محور افقی (تنش) زاویه تقریباً ۳۰ درجه دارد که اگر بر دایره موهر رسم شده، مماس شود، فشار مایع در محیط گسل، محاسبه پذیر و با استفاده از آن، تنش در حین زلزله قابل تخمین است (تراکاوا و همکاران، ۲۰۱۰). ما با استفاده از برنامه تعیین نقاط (Plot Digitizer) برای چند زلزله در منطقه گسلی کوهبنان از جمله زلزله ۲۰۰۵ با عمق کانونی ۱۳ کیلومتر و شیب گسل ۶۰ درجه، تنش نرمال (تقریباً ۱۹۷ مگاپاسکال) و تنش برشی (تقریباً ۵۱ مگاپاسکال) را به دست آوردیم. براین تنش‌ها حین شکست گسل در هر زلزله، تنش کولمب نام دارد.

$$CFF = \tau_n + \mu (\sigma_n - P) \quad (1)$$

جدول ۱. ویژگی‌های دو زلزله منطقه کوهستان با بزرگی بیش از ۵/۰ (مرکز لرزه‌نگاری بین‌المللی (ISC, www.isc.ac.uk)

فشار کولمب نهایی (MPa)	فشار کولمب اولیه (MPa)	فشار مایع (MPa)	تنش اصلی اولی (MPa)	عمق زلزله (km)	بزرگی (ریشتر)	تاریخ زلزله
۳۷۲	۲۰۴	۳۴۲	۸۹۰	۳۳	۵	۲۰۰۲، ۱۰، ۱۶
۲۰۷	۵۴	۱۳۵	۳۵۱	۱۳	۶/۴	۲۰۰۵، ۰۲، ۲۲

بیشترین تغییر تنش نرمال، ۰/۰۵ مگاپاسکال است که از این تغییرات تنش به طرف سطح نیز به راحتی می‌توان صرف‌نظر کرد. همین شبیه‌سازی روی گسل نرمال هم به نتیجه مشابه رسیده است. این توزیع تقریباً یکسان تنش اطراف کانون زمین‌لرزه در مطالعات دیگر هم در گسل امتدادلغز آمده است (کینگ و همکاران، ۱۹۹۴؛ خواجوبی و همکاران، ۱۳۸۲)؛ بنابراین با توجه به یافته‌ها هنگامی که تنش کولمب در بازه زمانی بین دو زلزله، روندی رو به افزایش را در اطراف کانون در گسل طی می‌کند، همان تنش با همان اختلاف جزئی به لایه‌های سطحی زمین در گسل اعمال می‌شود. یعنی بدنه سنگ در دو طرف گسل به صورت صلب عمل می‌کند و به صورت یکپارچه فشار یکسانی از کانون تارو مرکز بر سطح مقابل اعمال می‌کند. قطعاً در گسل‌های معکوس هم می‌توان از همین نتیجه استفاده کرد.

### ۳. طراحی حسگر فیبر نوری

طراحی فیبر نوری برای این منظور باید به روشی باشد که حساسیت را به فشار اعمال‌شده افزایش دهد و در محدوده این تنش‌ها ساخته شده باشد. در عین حال از فیبر در مقابل این نوع تنش‌ها محافظت کند. برای این منظور فیبر نوری FBG را معرفی می‌کنیم که چنین نحوه کارکرد دارد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، این فیبر بدون آنکه تحت تأثیر عوامل بیرونی باشد، نوری را با طول موج  $\lambda_B$  برگشت می‌دهد (به دلیل ضریب شکست ایجادشده  $n_3$ ) که این طول موج طبق رابطه (۴) متناسب با ویژگی توری براگ است.

$$\lambda_{Bragg} = 2 n_{eff} \Lambda \quad (4)$$

در رابطه (۴) طول موج براگ وابسته به فاصله شبکه‌ها،  $\Lambda$  و ضریب شکست به وجود آمده در اثر حرارت،  $n_{eff}$  است. هنگامی که فیبر تحت تأثیر اختلالات خارجی از قبیل فشار قرار می‌گیرد، به دلیل تغییر در فواصل شبکه‌ها، اندازه طول موج براگ هم طبق رابطه (۴) تغییر می‌کند.

در اینجا از دو زلزله ۲۰۰۲ و ۲۰۰۵ با بزرگی بیشتر از ۵ استفاده می‌کنیم که یکی پس از دیگری در منطقه کوچک زرنند اتفاق افتاده‌اند. اطلاعات این دو رخداد با استفاده از رابطه‌های (۱) و (۲) در جدول ۱ آورده شده است.

با توجه به اینکه این دو رخداد در یک منطقه محدود (زرنند) اتفاق افتاده‌اند، برای کاهش خطا و افزایش ضریب اطمینان، میانگین تنش‌های کولمب اولیه این دو زلزله را، تنش کولمب اولیه تعریف می‌کنیم.

در نمودار گسیختگی (شکل ۳)، نقطه ۱، تنش کولمب نهایی و نقطه ۲، تنش کولمب اولیه است. برای مقادیر این دو نقطه به ترتیب ۲۰۷ مگاپاسکال (تنش کولمب نهایی زلزله ۲۰۰۵ طبق جدول ۱) و ۱۲۹ مگاپاسکال (میانگین دو تنش کولمب اولیه دو رخداد) را قرار داده‌ایم. در نهایت با استفاده از برنامه تعیین نقاط، چگونگی روند افزایش تنش کولمب در حد فاصله دو رخداد را تقریباً از دو سال و چهار ماه قبل (زمان رخداد ۲۰۰۲) تا دو روز مانده به زلزله ۲۰۰۵، طبق جدول ۲ محاسبه کرده‌ایم.

### ۲.۲. توزیع تنش اطراف کانون به طرف سطح زمین

برای تعیین تغییرات تنش کولمب از کانون زلزله تا سطح زمین، جایی که امکان به کارگیری فیبر نوری باشد، از مطالعات توزیع تنش که ماسیمو کوکو و جیمز رایس اجرا کرده‌اند، استفاده می‌شود (کوکو و همکاران، ۲۰۰۰). مبنای این تغییرات براساس رابطه (۱) است؛ به طوری که:

$$\Delta CFF = \Delta \tau + \mu' \Delta \sigma \quad (3)$$

براساس مطالعات کوکو و همکاران ایشان در ساختار یک گسل راستالغز، تغییرات برابند تنش‌های نرمال و تنش‌های برشی در جهت افق به حداکثر ۰/۲ مگاپاسکال می‌رسد که در مقایسه با تغییرات تنش‌های اولیه و نهایی، می‌توان از آن صرف‌نظر کرد.

براساس همین مطالعات در یک شبیه‌سازی در گسل امتدادلغزی از عمق تقریباً ۲۵ کیلومتر (کانون) تا سطح زمین

جدول ۲. محاسبه تنش‌های کولمب قبل از زلزله ۲۰۰۵ زرنند

نقطه زمانی بین دو رخداد	تاریخ	میزان تنش اعمال شده ( $Pa$ ) میزان این تنش‌ها
۱	۲۰۰۲,۱۰,۱۴	۱,۲۹E+۰۸
۲	۲۰۰۲,۱۱,۱۳	۱,۲۹E+۰۸
۳	۲۰۰۲,۱۲,۱۴	۱,۳۰E+۰۸
۴	۲۰۰۳,۰۱,۰۳	۱,۳۰E+۰۸
۵	۲۰۰۳,۰۲,۱۱	۱,۳۰E+۰۸
۶	۲۰۰۳,۰۳,۰۹	۱,۳۰E+۰۸
۷	۲۰۰۳,۰۴,۰۸	۱,۳۰E+۰۸
۸	۲۰۰۳,۰۵,۰۷	۱,۳۱E+۰۸
۹	۲۰۰۳,۰۶,۰۹	۱,۳۲E+۰۸
۱۰	۲۰۰۳,۰۷,۰۹	۱,۳۲E+۰۸
۱۱	۲۰۰۳,۰۸,۰۷	۱,۳۲E+۰۸
۱۲	۲۰۰۳,۰۹,۰۶	۱,۳۳E+۰۸
۱۳	۲۰۰۳,۱۰,۰۶	۱,۳۳E+۰۸
۱۴	۲۰۰۳,۱۱,۰۵	۱,۳۴E+۰۸
۱۵	۲۰۰۳,۱۲,۰۵	۱,۳۴E+۰۸
۱۶	۲۰۰۴,۰۱,۰۴	۱,۳۴E+۰۸
۱۷	۲۰۰۴,۰۲,۰۲	۱,۳۵E+۰۸
۱۸	۲۰۰۴,۰۳,۰۲	۱,۳۶E+۰۸
۱۹	۲۰۰۴,۰۳,۳۱	۱,۳۸E+۰۸
۲۰	۲۰۰۴,۰۴,۲۹	۱,۳۸E+۰۸
۲۱	۲۰۰۴,۰۵,۲۷	۱,۴۰E+۰۸
۲۲	۲۰۰۴,۰۶,۲۴	۱,۴۴E+۰۸
۲۳	۲۰۰۴,۰۷,۲۲	۱,۴۶E+۰۸
۲۴	۲۰۰۴,۰۸,۱۹	۱,۵۱E+۰۸
۲۵	۲۰۰۴,۰۹,۱۴	۱,۵۵E+۰۸
۲۶	۲۰۰۴,۱۰,۰۹	۱,۵۹E+۰۸
۲۷	۲۰۰۴,۱۱,۰۴	۱,۶۵E+۰۸
۲۸	۲۰۰۴,۱۱,۲۸	۱,۷۷E+۰۸
۲۹	۲۰۰۴,۱۲,۱۸	۱,۸۷E+۰۸
۳۰	۲۰۰۴,۱۲,۲۷	۱,۸۹E+۰۸
۳۱	۲۰۰۵,۰۱,۰۳	۱,۹۲E+۰۸
۳۲	۲۰۰۵,۰۱,۰۹	۱,۹۴E+۰۸
۳۳	۲۰۰۵,۰۱,۱۶	۱,۹۶E+۰۸
۳۴	۲۰۰۵,۰۱,۲۳	۱,۹۸E+۰۸
۳۵	۲۰۰۵,۰۱,۳۱	۲,۰۰E+۰۸
۳۶	۲۰۰۵,۰۲,۰۷	۲,۰۲E+۰۸
۳۷	۲۰۰۵,۰۲,۱۳	۲,۰۴E+۰۸
۳۸	۲۰۰۵,۰۲,۲۰	۲,۰۶E+۰۸
۳۹	۲۰۰۵,۰۲,۲۲	۲,۰۷E+۰۸

برای تغییر طول موج با فشار اعمال شده رابطه (۵) را مدنظر قرار می دهند:

$$\frac{\Delta d}{d} = -\frac{d(1-\mu)}{4Et} \Delta P \quad (5)$$

که در آن،  $E$ ، مدول یانگ؛  $\mu$ ، نسبت پواسون حباب شیشه‌ای؛  $t$ ، ضخامت حباب و  $d$ ، قطر حباب است. اگر حباب با فیبر نوری کاملاً به هم متصل شده باشند (که این گونه است)، می توان کرنشی را که در طول فیبر متناسب با کرنش قطر حباب شیشه‌ای ( $\frac{\Delta d}{d}$ ) ایجاد می شود، پیدا کرد. تغییر قطر حباب بر اثر فشار دو طرف گسل و در نتیجه تغییر طول فیبر نوری موجب تغییرات جزئی در طول موج براگ ( $\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B}$ ) می شود که می توان روابط (۶) و (۷) را در نظر گرفت (گاسفی و ال شریف، ۲۰۰۰).

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \frac{\Delta d}{d} = 0.19 \frac{d(1-\mu)}{Et} \Delta P \quad (6)$$

$$P_e = n_{eff}^2 [P_{12} - \epsilon(P_{11} + P_{12})] / 2 \quad (7)$$

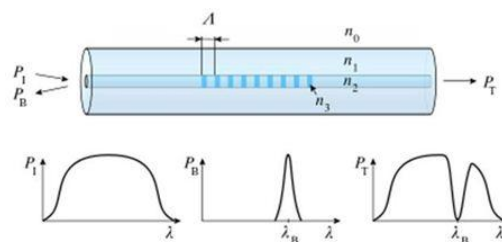
که در آن،  $n_{eff} = n_3 = 1.46$  است.  $P_{11}$  و  $P_{12}$  ضرایبی برای فیبر نوری شیشه‌ای هستند و به ترتیب مقادیر ۰/۲۷ و ۰/۱۲ را دارند.  $P_e$  در مورد ماده سیلیکا، ضریب اثر فتوالاستیک محسوب می شود که با در نظر گرفتن ۰/۱۷ برای نسبت پواسون فیبر ( $\epsilon$ ) مقدار عددی ۰/۲۲ را می توان در نظر گرفت (ژو و همکاران، ۱۹۹۶).

طبق رابطه (۶) می توان پی برد که هرچه قطر حباب بزرگ تر باشد، حساسیت فیبر نوری به فشار اعمال شده بیشتر است و به همین ترتیب هرچه ضخامت این حباب بیشتر باشد، به همان اندازه (به صورت خطی) حساسیت به فشار برای فیبر نوری کمتر است.

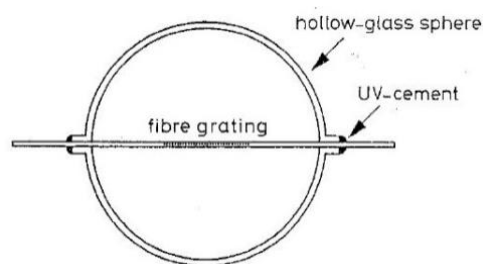
با توجه به مطالب گفته شده و رابطه (۶) بهتر است طراحی به گونه ای باشد که حباب توخالی اطراف فیبر نوری قرار بگیرد تا تغییر قطر حباب باعث تغییر طول فیبر نوری شود. برای آزمایش فیبر نوری طراحی شده، نوری با طول موج ۱۳۰۰ نانومتر فرستاده شده و روی فیبر تنش هایی اعمال شده است که موجب تغییر طول موج براگ در فیبر نوری می شود؛ تغییرات نسبت به تنش اعمال شده در نمودار شکل ۷ آمده است (ژو و همکاران، ۱۹۹۶).

تنش ها به دو صورت روی فیبر نوری اعمال می شوند: در راستای طول فیبر و در راستای قطر فیبر. اگر تنش را در راستای طول فیبر اعمال کنیم، جابه جایی طول موج نور عبوری از ۱۰ تا ۳۰ نانومتر است. در این حالت حساسیت فیبر بیشتر از آن است که تنش در راستای قطر (بدنه فیبر) وارد شود که بیشترین جابه جایی برای طول موج را ۳۰۰ پیکومتر (۰/۳ نانومتر) نشان می دهد (یوربان و همکاران، ۲۰۱۰). چون تنش اعمال شده روی فیبر نوری مبتنی بر توری براگ با تناوب کوتاه با پوشش حباب شیشه‌ای (شکل ۶) فقط طول فیبر را تغییر می دهد؛ بنابراین در این زمینه این نوع، حساسیت بیشتر و استفاده بهتری خواهد داشت. اگرچه دیگر فیبرهای نوری از جمله فیبر نوری با پوشش پلیمر حساسیت بیشتری به تنش اعمالی دارند، ولی از آنجا که تنش فقط در راستای قطر فیبر اعمال می شود و تغییری در طول فیبر ایجاد نمی شود، برآیند حساسیت کمتر خواهد بود.

در این طراحی فیبر نوری شبکه براگ با پوشش حباب شیشه‌ای از داخل یک حباب شیشه با ضخامت  $t$  و قطر  $d$  عبور کرده و محفظه خالی هم با سیمان UV پر شده است.



شکل ۵. نحوه کامل کارکرد FBG (www.wikipedia.org)



شکل ۶. طراحی فیبر نوری مبتنی بر توری براگ با تناوب کوتاه با پوشش حباب شیشه‌ای؛ در این طراحی در هر جهتی که تنش اعمال شود. فیبر فقط در راستای طول تغییر می کند (ژو و همکاران، ۱۹۹۶).

به راحتی می‌توان جابه‌جایی طول موج نور را با استفاده از رابطه (۹) به دست آورد.

$$\Delta\lambda_B = -2.12 \times 10^{-5} \Delta P \times \lambda_B \quad (9)$$

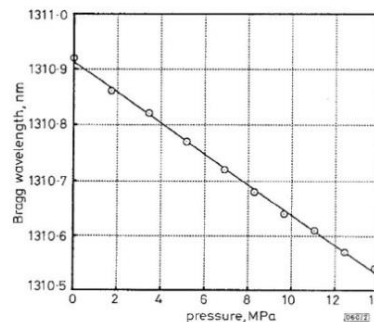
در نهایت با توجه به حساسیت فیبر نوری به فشار، تنش‌هایی را که تقریباً طی دو سال و پنج ماه به پوسته زمین وارد شده است (جدول ۲) روی فیبر نوری اعمال کردیم. در حسگرهای فیبر نوری از دو طول موج مخبراتی ۱۵۵۰ و ۱۳۳۰ نانومتر به دلیل پراکندگی کمتر نور استفاده می‌شود. از طرفی ساخت توری‌های براگ در این طول موج رایج‌تر است. تمام محاسبات در طول موج مخبراتی ۱۵۵۰ نانومتر انجام گرفته است. در نهایت اندازه طول موج براگ برابر با ۱۵۵۰ نانومتر در نظر گرفته شده است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در جدول ۳ با استفاده از برنامه‌های اکسل و تعیین نقاط، مقدار کرنش برای طول موج نور را بر اثر فشار گسلی اعمال شده بر فیبر نوری نشان داده‌ایم. همچنین با استفاده از رابطه (۹) اندازه جابه‌جایی طول موج نور در فواصل زمانی قبل از زلزله ۲۰۰۵ به وضوح نشان داده شده است.

به‌عنوان مثال طبق جدول ۲ در تاریخ ۲۰۰۵/۰۱/۱۶، ۳۷ روز قبل از رخداد زلزله ۲۰۰۵ (که دارای تنش کولمب ۲۰۷ مگاپاسکال است) مقدار فشار اعمالی یا فشار کولمب ۱۹۶ مگاپاسکال است. حال اگر این فشار را روی فیبر نوری مبتنی بر توری براگ با تناوب کوتاه با پوشش حباب شیشه‌ای اعمال کنیم، کرنشی که برای طول موج ایجاد می‌شود (طول موج ۱۵۵۰ نانومتر) ۰/۰۰۴۱۵ است. جابه‌جایی خالص برای طول موج نور ۶/۴۴ نانومتر است. مطابق جدول ۳ جابه‌جایی طول موج نور تا ۶/۸۰ نانومتر به دست آمده است.

۶/۸ نانومتر جابه‌جایی طول موج در زمان وقوع زلزله بوده است. از ۱۰ روز مانده به زلزله،  $\Delta\lambda$  به اندازه ۰/۱ نانومتر تغییر کرده است. با توجه به پیچیدگی ساختار گسلی شاید برای این رخداد خاص، جابه‌جایی طول موج با تغییرات بیشتر از ۰/۱ تا ۰/۲ نانومتر برای زمان هشدار مناسب‌تر باشد.



شکل ۷. فشار اعمالی روی فیبر نوری، (ژو و همکاران، ۱۹۹۶)

با توجه به این نمودار و با برازش داده‌ها، مناسب‌ترین خط با شیبی که حساسیت فیبر را به فشار مقدار  $-2/12 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$  نشان می‌دهد، به دست می‌آید. فیبری که برای آزمایش و رسم این نمودار در نظر گرفتند، در پوششی دارای قطر ۵/۵ میلی‌متر و دارای ضخامت ۵۰۰ میکرومتر است و برای مدول یانگ عدد  $7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$  و برای نسبت پواسون حباب شیشه‌ای ۰/۲ در نظر گرفته شده است.

در نتیجه با توجه به رابطه (۶)، حساسیت فیبر نوری را می‌توان با عدد  $-2/4 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$  نشان داد. در صورتی که قبلاً این حساسیت به فشار  $-2/12 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$  به دست آمده بود. این عدد نشان می‌دهد که می‌توان حساسیت فیبر نوری را به فشار افزایش داد. این در حالی است که حساسیت به فشار اعمالی برای یک فیبر نوری معمولی (بدون پوشش حباب) برابر با  $-5/1 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$  به دست آمده است (ژو و همکاران، ۱۹۹۳).

پس می‌توان گفت که حساسیت فشار با استفاده از حباب شیشه‌ای طبق رابطه (۸) بیش از ۴ برابر شده است (ژو و همکاران، ۱۹۹۶).

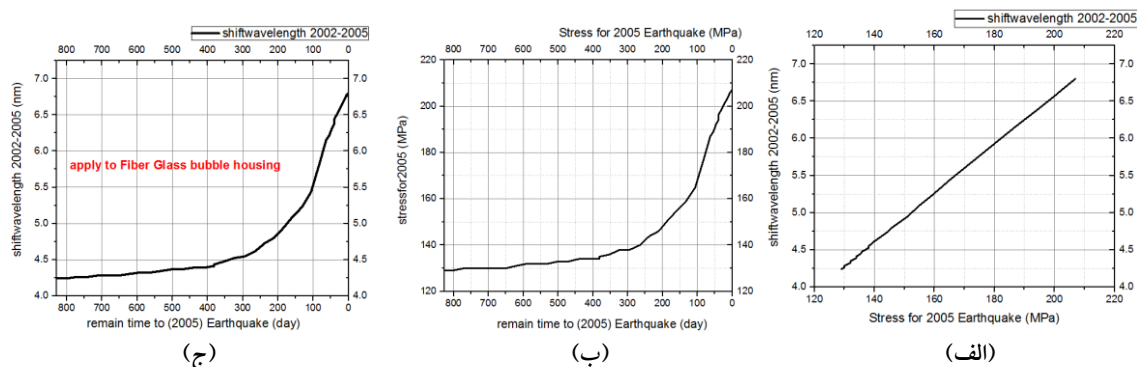
$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \frac{\Delta d}{d} = 0.19 \frac{d(1-\mu)}{Et} \Delta P = -2.4 \times 10^{-5} \Delta P \quad (8)$$

که در آن،  $\Delta P$  همان تنش‌های کولمب است؛ بنابراین برای آشکارسازی تغییرات جزئی تنش در گسل که قبل از زلزله ایجاد می‌شود، بهترین طراحی فیبر نوری، استفاده از فیبر نوری مبتنی بر توری براگ با تناوب کوتاه با پوشش حباب شیشه‌ای است. با استفاده از رابطه (۸) که معرف مقدار کرنش در طول موج نور عبور کرده است،

جدول ۳. نتایج اعمال تنش‌های کولمب قبل از زلزله ۲۰۰۵ زرنند روی فیبر نوری مبتنی بر توری براگ با تناوب کوتاه با پوشش حباب شیشه‌ای.

نقطه زمانی بین دو رخداد	تاریخ	میزان تنش اعمال شده ( $MPa$ )	تغییرات کرنش طول موج براگ $\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}$	تغییرات طول موج براک $\Delta\lambda_B (nm)$
۱	۲۰۰۲،۱۰،۱۴	۱،۲۹E+۰۸	-۲،۷۳E-۰۳	-۴،۲۴E+۰۰
۲	۲۰۰۲،۱۱،۱۳	۱،۲۹E+۰۸	-۲،۷۳E-۰۳	-۴،۲۴E+۰۰
۳	۲۰۰۲،۱۲،۱۴	۱،۳۰E+۰۸	-۲،۷۵E-۰۳	-۴،۲۶E+۰۰
۴	۲۰۰۳،۰۱،۰۳	۱،۳۰E+۰۸	-۲،۷۵E-۰۳	-۴،۲۶E+۰۰
۵	۲۰۰۳،۰۲،۱۱	۱،۳۰E+۰۸	-۲،۷۶E-۰۳	-۴،۲۸E+۰۰
۶	۲۰۰۳،۰۳،۰۹	۱،۳۰E+۰۸	-۲،۷۶E-۰۳	-۴،۲۸E+۰۰
۷	۲۰۰۳،۰۴،۰۸	۱،۳۰E+۰۸	-۲،۷۶E-۰۳	-۴،۲۸E+۰۰
۸	۲۰۰۳،۰۵،۰۷	۱،۳۱E+۰۸	-۲،۷۸E-۰۳	-۴،۳۰E+۰۰
۹	۲۰۰۳،۰۶،۰۹	۱،۳۲E+۰۸	-۲،۷۹E-۰۳	-۴،۳۲E+۰۰
۱۰	۲۰۰۳،۰۷،۰۹	۱،۳۲E+۰۸	-۲،۷۹E-۰۳	-۴،۳۲E+۰۰
۱۱	۲۰۰۳،۰۸،۰۷	۱،۳۲E+۰۸	-۲،۸۰E-۰۳	-۴،۳۵E+۰۰
۱۲	۲۰۰۳،۰۹،۰۶	۱،۳۳E+۰۸	-۲،۸۲E-۰۳	-۴،۳۷E+۰۰
۱۳	۲۰۰۳،۱۰،۰۶	۱،۳۳E+۰۸	-۲،۸۲E-۰۳	-۴،۳۷E+۰۰
۱۴	۲۰۰۳،۱۱،۰۵	۱،۳۴E+۰۸	-۲،۸۳E-۰۳	-۴،۳۹E+۰۰
۱۵	۲۰۰۳،۱۲،۰۵	۱،۳۴E+۰۸	-۲،۸۳E-۰۳	-۴،۳۹E+۰۰
۱۶	۲۰۰۴،۰۱،۰۴	۱،۳۴E+۰۸	-۲،۸۵E-۰۳	-۴،۴۱E+۰۰
۱۷	۲۰۰۴،۰۲،۰۲	۱،۳۵E+۰۸	-۲،۸۶E-۰۳	-۴،۴۳E+۰۰
۱۸	۲۰۰۴،۰۳،۰۲	۱،۳۶E+۰۸	-۲،۸۹E-۰۳	-۴،۴۸E+۰۰
۱۹	۲۰۰۴،۰۳،۳۱	۱،۳۸E+۰۸	-۲،۹۲E-۰۳	-۴،۵۲E+۰۰
۲۰	۲۰۰۴،۰۴،۲۹	۱،۳۸E+۰۸	-۲،۹۳E-۰۳	-۴،۵۴E+۰۰
۲۱	۲۰۰۴،۰۵،۲۷	۱،۴۰E+۰۸	-۲،۹۸E-۰۳	-۴،۶۱E+۰۰
۲۲	۲۰۰۴،۰۶،۲۴	۱،۴۴E+۰۸	-۳،۰۵E-۰۳	-۴،۷۳E+۰۰
۲۳	۲۰۰۴،۰۷،۲۲	۱،۴۶E+۰۸	-۳،۱۰E-۰۳	-۴،۸۰E+۰۰
۲۴	۲۰۰۴،۰۸،۱۹	۱،۵۱E+۰۸	-۳،۱۹E-۰۳	-۴،۹۵E+۰۰
۲۵	۲۰۰۴،۰۹،۱۴	۱،۵۵E+۰۸	-۳،۲۹E-۰۳	-۵،۱۰E+۰۰
۲۶	۲۰۰۴،۱۰،۰۹	۱،۵۹E+۰۸	-۳،۳۷E-۰۳	-۵،۲۲E+۰۰
۲۷	۲۰۰۴،۱۱،۰۴	۱،۶۵E+۰۸	-۳،۵۱E-۰۳	-۵،۴۴E+۰۰
۲۸	۲۰۰۴،۱۱،۲۸	۱،۷۷E+۰۸	-۳،۷۶E-۰۳	-۵،۸۳E+۰۰
۲۹	۲۰۰۴،۱۲،۱۸	۱،۸۷E+۰۸	-۳،۹۷E-۰۳	-۶،۱۶E+۰۰
۳۰	۲۰۰۴،۱۲،۲۷	۱،۸۹E+۰۸	-۴،۰۱E-۰۳	-۶،۲۲E+۰۰
۳۱	۲۰۰۵،۰۱،۰۳	۱،۹۲E+۰۸	-۴،۰۷E-۰۳	-۶،۳۱E+۰۰
۳۲	۲۰۰۵،۰۱،۰۹	۱،۹۴E+۰۸	-۴،۱۱E-۰۳	-۶،۳۸E+۰۰
۳۳	۲۰۰۵،۰۱،۱۶	۱،۹۶E+۰۸	-۴،۱۵E-۰۳	-۶،۴۴E+۰۰
۳۴	۲۰۰۵،۰۱،۲۳	۱،۹۸E+۰۸	-۴،۲۰E-۰۳	-۶،۵۰E+۰۰
۳۵	۲۰۰۵،۰۱،۳۱	۲،۰۰E+۰۸	-۴،۲۴E-۰۳	-۶،۵۷E+۰۰
۳۶	۲۰۰۵،۰۲،۰۷	۲،۰۲E+۰۸	-۴،۲۸E-۰۳	-۶،۶۴E+۰۰
۳۷	۲۰۰۵،۰۲،۱۳	۲،۰۴E+۰۸	-۴،۳۲E-۰۳	-۶،۷۰E+۰۰
۳۸	۲۰۰۵،۰۲،۲۰	۲،۰۶E+۰۸	-۴،۳۷E-۰۳	-۶،۷۷E+۰۰
۳۹	۲۰۰۵،۰۲،۲۲	۲،۰۷E+۰۸	-۴،۳۹E-۰۳	-۶،۸۰E+۰۰





شکل ۸. نمودارهای رسم شده بر طبق جدول ۳، (الف) فشار - جابجایی طول موج، (ب) فشار - مدت زمان مانده به زلزله ۲۰۰۵ از زلزله ۲۰۰۲ و (ج) جابه‌جایی طول موج - مدت زمان مانده به زلزله ۲۰۰۵ از زلزله ۲۰۰۲

گسل‌های مختلف به مطالعه میدانی نیاز است، استفاده از آن در گسل‌های فشاری تراکمی (معکوس) از جمله گسل کوهبنان از نظر تئوری امکان پذیر است.

با توجه به داده‌های جدول ۳ می‌توان نمودارهای آن را بر حسب فشار - جابه‌جایی طول موج، فشار - مدت زمان مانده به زلزله ۲۰۰۵ از زلزله ۲۰۰۲ و جابه‌جایی طول موج - مدت زمان مانده به زلزله ۲۰۰۵ از زلزله ۲۰۰۲، به ترتیب طبق تصویر (الف)، (ب) و (ج) شکل ۸ رسم کرد.

#### مراجع

خواجوی، ر.، منوچهری، م. ف. و ریاحی، ع، ۱۳۸۲، الگوسازی توزیع تنش در گسل مسبب زمین‌لرزه ۱۳۸۲ بم با روش اجزای محدود، مرکز تحقیقات زمین‌لرزه‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد.  
زارع، م، ۱۳۸۴، مقدمه‌ای بر زلزله‌شناسی کاربردی، مرکز چاپ و انتشارات وزارت امور خارجه، ۷۵-۸۵.  
صالح‌زاده، ح، ۱۳۸۷، دایره موهرو مسیر تنش در ژئوتکنیک، انتشارات دانشگاه علم صنعت ایران، ۲۲-۸۰.

Cocco, M and James R. Rice, "Pore pressure and poroelasticity effects in Coulomb stress analysis of earthquake interactions", JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, Vol. 107, pp. ESE.2.1-ESE.2.17, 2002.

Cocco, M, Nostro, C and Ekström, G, "Static stress changes and fault interaction during the 1997 Umbria-Marche earthquake sequence", Journal of Seismology, Vol. 4, pp. 501-516, Oct 2000.

یعنی بهترین زمان هشدار شاید قبل از ۲۰۰۵/۰۱/۳۱ بوده است؛ زمانی که تغییر طول موج ۶/۵۷ نانومتر بوده است؛ به عبارتی دیگر از زمانی که جابه‌جایی طول موج از ۶/۵۷ عبور می‌کند، باید به وقوع زلزله حساس بود.

فیبرهای نوری دیگر از جمله فیبر نوری مبتنی بر توری براگ با تناوب کوتاه با پوشش پلیمر (زنگ و همکاران، ۲۰۰۱)، گرچه ضریب حساسیتی بیشتری دارند، ولی چون فقط در راستای قطر فیبر می‌توان تنش را وارد کرد و در راستای طول فیبر تغییری اعمال نمی‌شود، در این محدوده تنشی قابل استفاده نیست. همچنین فیبر نوری بدون پوشش دارای حساسیت کمتری است که باز هم دقت کافی را ندارد.

در نهایت با توجه به جدول ۳ و اعداد به دست آمده، تغییرات طول موج نور عبوری از فیبر نوری مبتنی بر توری براگ با تناوب کوتاه با پوشش حباب شیشه‌ای در حدی است که قابل قرائت است و از نظر تئوری استفاده از آن به عنوان پیش‌نشانگر زلزله امکان‌پذیر است. اگرچه برای کاربرد عملی این روش با توجه به ساختار متفاوت سطحی

Gafsi, R, and El-Sherif, M. A, "Analysis of Induced-Birefringence effects on Fiber Bragg Gratings", Optical Fiber Technology, Vol. 6 ,pp. 299-323, July 2000.

<https://fa.wikipedia.org/wiki>.

<http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin>.

Kersey, A. D, Davis, M. A, Patrick, H. J, LeBlanc, M, Koo, K. P, Askins, C. G, Putnam, M. A, Joseph Friebele, E, "Fiber Grating Sensors", JOURNAL OF

- LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. 15, pp. 1442-1463, Aug 1977.
- King. C. P , Stein. Ross S , Lin. J , “ Static stress changes and the triggering of earthquakes “ , Revised for Bull. Seismol. Soc. Am , Vol. 84, pp. 935-953, June 1994.
- Liu. Q, Tokunaga. T and He. Z, “ Realization of nano static strain sensing with fiber Bragg gratings interrogated by narrow linewidth tunable lasers ” , Opt. Express, Vol. 19, pp. 20214-20223, Oct 2011.
- M. Mirhabibi, A. Negarestani, M. A. Bolorizadeh, M. R. Rezaei, A. Akhound, “A new approach for radon monitoring in soil as an earthquake precursor using optical fiber” , Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 301, pp. 207-211, July 2014.
- M. Talebian, J. Biggs, M. Bolourchi, A. Copley, A. Ghassemi, M. Ghorashi, J. Hollingsworth, J. Jackson, E. Nissen, B. Oveisi, B. Parsons, K. Priestley and A. Saiidi , “The Dahuiyeh (Zarand) earthquake of 2005 February 22 in central Iran: reactivation of an intramountain reverse fault “ , Geophys. J. Int, Vol. 164, pp. 137-148, 2006.
- Terakawa. T , Zoporowski. A , Galvan.B , Miller. S. A, “ High-pressure fluid at hypocentral depths In The L'Aquila region inferred from earthquake focal mechanisms “ , Geology. Gsapubs. Org , Vol. 38, pp. 995-998, Nov 2010.
- Urban. F , Kadlec. J , Vlach. R , Kuchta. R , “ Design of a pressure sensor based on Optical Fiber Bragg Grating Lateral Deformation “ , ISSN, Vol. 10, pp. 11212-11225, Dec 2010.
- Xu. M. G, Reekie. L, Chow. Y. T, and Dakin. J. P, “Optical in-fiber grating high pressure sensor” , Electron. Lett, vol. 29, pp. 398-399, Feb 1993.
- Xu. M. G , Geiger. H , Dakin. J. P , “ Fiber grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass-bubble housing ” , Electron. Lett. vol. 32 , pp. 128-129 , Jan 1996.
- Zhang. Y , Feng. D , Liu. Z , Guo. Z , Dong. X , Chiang. K. S , Chu. B. C. B , “ High-sensitivity pressure sensor using a shielded polymer-coated fiber grating ” , IEEE Photon. Technol. Lett , vol. 13 , pp. 618-619 , June 2001.