

امکان‌سنجی طراحی دستگاه لرزه‌نگار با به‌کارگیری توری براگ فیبر نوری و فلز ارتجاعی

فائزه خواجه گوکی^۱، مجید تراز^۲، مجید نعمتی^{۳*} و علیرضا بهرام‌پور^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

۲. استادیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

۳. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم و مرکز پژوهشی زلزله دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

۴. استاد، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه صنعتی شریف تهران، ایران

(دریافت: ۹۴/۴/۱۴، پذیرش نهایی: ۹۵/۳/۲۵)

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی طراحی لرزه‌نگاری با به‌کارگیری توری براگ فیبر نوری و فلز ارتجاعی در یک دستگاه مکانیکی است. این لرزه‌نگار، با توجه به ویژگی و حساسیتی که حس گر فیبر نوری نسبت به پارامترهایی از قبیل اثرات تنش و کرنش دارد، زمین‌لرزه را ثبت می‌کند. برای ثبت امواج زمین‌لرزه باید بسامد طبیعی دستگاه نزدیک به بسامد ارتعاش زمین باشد؛ که در این مورد، بسامد طبیعی دستگاه بهبود بخشیده شده و حدود ۷/۸ هرتز تعیین شده است. این لرزه‌نگار، شتاب زمین‌لرزه را درحکم ورودی می‌گیرد و از راه دستگاه مکانیکی به کرنش در توری براگ فیبر نوری منتقل می‌کند. خروجی لرزه‌نگار، جابه‌جایی طول موج براگ است. برای نمونه، بسامدها و دامنه‌های شتاب زمین‌لرزه‌ها با به‌کارگیری طیف بسامدی شتاب زمین‌لرزه منطقه ریگان استان کرمان که در ۲۰۱۱ روی داده، محاسبه شده است. سپس، کرنش و جابه‌جایی دامنه طول موج براگ و جابه‌جایی فاز به‌ازای ضریب میرایی‌های متفاوت دستگاه و به‌ازای بسامدها و دامنه‌های گوناگون شتاب زمین‌لرزه‌ها بررسی و برحسب بسامدهای متفاوت شتاب زمین‌لرزه، رسم شده است. همچنین برای اثبات کارایی و قابلیت لرزه‌نگار توری براگ فیبر نوری، دو زمین‌لرزه دیگر یکی در منطقه ریگان در ۲۰۱۰ و دیگری زمین‌لرزه سراوان در ۲۰۱۳ به روش پیش بررسی شده است. همچنین هرکدام از رویدادهای لرزه‌ای در چند ایستگاه دیگر ثبت و پردازش شده و هم‌زمان با لرزه‌نگار توری براگ فیبر نوری مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: زمین‌لرزه، تنش، کرنش، لرزه‌نگار، توری براگ فیبر نوری، فلز ارتجاعی.

۱. مقدمه

استفاده آن درحکم لرزه‌نگار دراکتشافات میدان نفتی و گازی، اندازه‌گیری ارتعاشات زمین، نظارت بر ساختارهای مهندسی از قبیل ساختمان‌ها و سازه‌های باز نظیر سدها و پل‌ها و مانند آن‌ها اشاره کرد (آکیرا و ایساما، ۲۰۰۱).

در این پژوهش با توجه به حساسیت زیاد حس گر توری براگ به کرنش دینامیکی ناشی از تغییرات شتاب، از آن برای اندازه‌گیری ارتعاشات زمین ناشی از زمین‌لرزه استفاده شده است. بنابراین، امکان طراحی دستگاهی با به‌کارگیری توری براگ فیبر نوری بررسی شد که بتواند امواج زمین‌لرزه را ثبت کند. در این خصوص، زمین‌لرزه‌های ۲۰۱۰ ($M_w 6.4$) و ۲۰۱۱ ($M_w 6.0$) ریگان (جنوب خاوری استان کرمان) و زمین‌لرزه ۲۰۱۳ ($M_w 7.8$) سراوان (جنوب استان سیستان و بلوچستان) به‌صورت موردی بررسی شده است.

امروزه یکی از شاخه‌های دانش لرزه‌شناسی که توسعه بسیاری یافته، روش اندازه‌گیری ارتعاش‌های زمین یا لرزه‌سنجی است. ارتعاشات مکانیکی یک زمین‌لرزه از رفتار کشسان‌مانند نتیجه می‌شود که دربرگیرنده ایجاد و انتشار امواج کشسان در درون زمین است. این امواج حرکاتی فیزیکی هستند که می‌توان با ابزار ثبت‌کننده حرکت زمین به نام لرزه‌نگار آنها را ثبت کرد (لی و والاس، ۱۹۹۵).

حس‌گرهای توری براگ فیبر نوری به سبب قابلیت‌های فراوانشان برای اندازه‌گیری پارامترهای متنوع مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌این ترتیب که، توری براگ حس گر کرنش، دما و فشار است و تحت تغییر این پارامترها طول موج آن تغییر می‌کند و با اندازه‌گیری جابه‌جایی طول موج براگ، می‌توان پارامتر موردنظر را اندازه گرفت. از جمله کاربردهای این حس گر می‌توان از

۲. معرفی توری براگ فیبر نوری و عملکرد آن

توری براگ فیبر نوری از راه ایجاد تغییرات دائم و متناوب ضریب شکست در بخشی از هسته فیبر نوری در اثر تابش فرابنفش ساخته می شود (رامان، ۲۰۰۹). هنگامی که نور به درون فیبر نوری وارد می شود و به توری براگ برخورد می کند، بخش باریکی از طول موج های تشکیل دهنده طیف آن، بازتاب می یابد و دیگر طول موج ها از توری براگ عبور می کنند (شکل ۱).

بخش بازتاب یافته، دارای مرکزیت λ_{Bragg} است که از رابطه (۱) محاسبه می شود (گرتان و مگیت، ۲۰۰۰).

(۱) $\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda$
و تشدید توری براگ در طول موج λ_{Bragg} اتفاق می افتد. در این رابطه n_{eff} و Λ به ترتیب بیانگر ضریب شکست و تناوب توری براگ هستند این دو عامل تابع دما و کرنش محیط اند و تغییر دما و کرنش سبب تغییر طول موج براگ خواهد شد (ترنت، ۱۹۹۹).

(۲) $\Delta\lambda_{Bragg} = [2n_{eff}(\frac{\partial\Lambda}{\partial l}) + 2\Lambda(\frac{\partial n_{eff}}{\partial l})]\Delta l + [2n_{eff}(\frac{\partial\Lambda}{\partial T}) + 2\Lambda(\frac{\partial n_{eff}}{\partial T})]\Delta T$
با فرض اینکه تغییرات دما برابر با صفر $\Delta T = 0$ پس رابطه

(۲) به صورت؛

$$\Delta\lambda_{Bragg} = [2n_{eff}(\frac{\partial\Lambda}{\partial l}) + 2\Lambda(\frac{\partial n_{eff}}{\partial l})]\Delta l \quad (۳)$$

بازنویسی می شود.

کرنش در راستای محور به فیبر اعمال و باعث جابه جایی طول موج توری براگ به مقدار $\Delta\lambda_{Bragg}$ می شود.

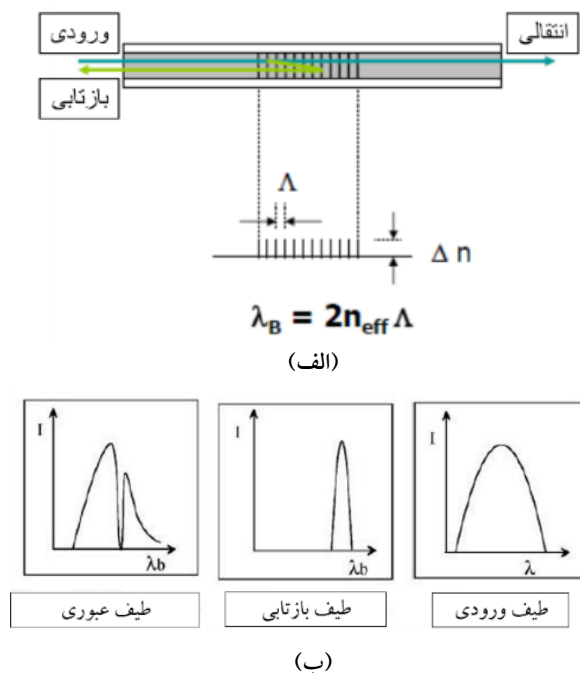
$$\Delta\lambda_{Bragg} = (1 - p_e)\epsilon\lambda_B \quad (۴)$$

در رابطه (۴) کرنش نسبت تغییر طول فیبر به طول کل آن تعریف می شود $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ ، هم چنین p_e به صورت رابطه (۵) است.

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2}(p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})) \quad (۵)$$

برای این نوع از فیبر نوری سیلیکایی با هسته ژرمانیم، p_{11} و p_{12} عنصرهای تانسور تنش، ν ضریب پواسون و n_{eff} ضریب شکست موثر هسته فیبر و مقادیر آنها به ترتیب ۰/۱۱۳ و ۰/۲۵۲ و ۰/۱۶ و ۱/۴۸۲ است (باتر و هوکر، ۱۹۷۸). در این پژوهش مقدار طول موج مرکزی (λ_{Bragg}) را ۱۵۵۰ نانومتر در نظر گرفته شده که در نهایت به رابطه (۶) رسیده است.

$$\Delta\lambda_{Bragg} = 0.78\epsilon\lambda_B \quad (۶)$$



شکل ۱. الف) نمایی از توری براگ فیبر نوری و (ب) طیف بازتابی و عبوری آن

۳. روش تحقیق

۳.۱. شرح طراحی دستگاه

دستگاه لرزه‌نگار شامل جرم، میله آلومینیمی L شکل، توری براگ و فلز ارتجاعی است. نمایی از دستگاه در شکل (۲) نشان داده شده است. عنصر اصلی حس‌گر در دستگاه، توری براگی است که در فیبر نوری تک‌مُد سیلیکانی با آلایش ژرمانیم نوشته شده است (آکیرا و ایساما، ۲۰۰۱).

نحوه عمل‌کرد لرزه‌نگار به این صورت است که وقتی در حین زمین‌لرزه در معرض شتاب زمین $\ddot{x}(t)$ قرار می‌گیرد، شتاب سبب فشردگی و کشیدگی فلز ارتجاعی می‌شود. با اتصالی که بین فلز ارتجاعی و جرم وجود دارد جرم جابه‌جا می‌شود و شتاب را از راه دو بازوی میله آلومینیمی L شکل به توری براگ منتقل می‌کند. بنابراین باعث ایجاد گرنش در توری براگ فیبر نوری می‌شود که در نتیجه آن طول موج براگ جابه‌جا خواهد شد.

۳.۱.۱. تعیین بسامد طبیعی دستگاه

برای ثبت امواج زمین‌لرزه باید بسامد طبیعی دستگاه به بسامد ارتعاش زمین نزدیک باشد. برای دستیابی به این هدف باید ضریب سختی کل دستگاه (K) را کاهش داد. طبق چیدمان دستگاه شکل (۲)، می‌توان ضریب سختی کل دستگاه را به صورت رابطه (۷) نوشت؛

$$K = k_1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2 k_2 \quad (7)$$

که در آن، k_1 ضریب سختی فلز ارتجاعی به صورت رابطه (۸) است (جدول ۱).

$$k_1 = \frac{0.78 E D_m h_0^3}{\left(\frac{t}{2}\right)^{0.5} n H^{2.5}} \frac{D_m}{2d} \quad (8)$$

که در آن، k_2 ضریب سختی فیبر سیلیکانی به صورت رابطه (۹) است (گکو و همکاران، ۲۰۰۹).

$$k_2 = \frac{EA}{L} = \frac{(7/3 \times 10^{10}) \times (\pi \times (\frac{125}{2} \times 10^{-6})^2)}{130 \times 10^{-3}} = 6890.08 \quad (9)$$

که در آن، همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود با چیدمان مناسب دستگاه و هم‌چنین با انتخاب مناسب

پارامترهای a و b از میله L شکل، سختی کل دستگاه کاهش پیدا می‌کند (رابطه (۷))؛ درحالی‌که این سختی به ضریب سختی فیبر و ضریب سختی فلز ارتجاعی نیز وابسته است. ضریب سختی فیبر با توجه به ویژگی‌های فیبر سیلیکانی، غیر قابل تغییر است (رابطه (۹)). اما ضریب سختی فلز ارتجاعی با توجه به رابطه (۸) به پارامترهای متعددی وابسته است که با انتخاب مناسب این پارامترها، درواقع با تغییر هندسی که در فلز ارتجاعی صورت می‌گیرد، می‌توان سختی موردنظر را بهبود داد و به سختی دست پیدا کرد که بسامد ارتعاش طبیعی دستگاه نزدیک به بسامد زمین‌لرزه باشد.

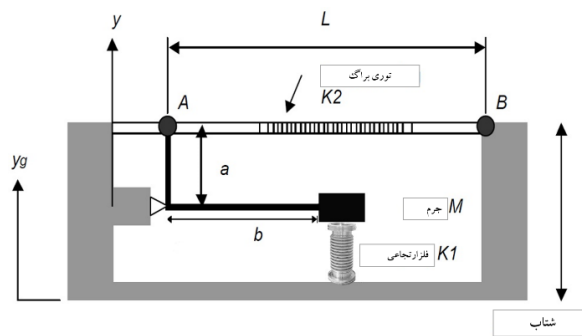
هر دستگاه نوسان‌گری دارای یک بسامد طبیعی (دوره طبیعی) یا آزاد نوسان است، که از ویژگی‌های آن محسوب می‌شود. بنابراین بسامد و بسامد طبیعی دستگاه لرزه‌نگار توری براگ وقتی دستگاه بدون میرایی است به صورت رابطه (۱۰) در می‌آید.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2 k_2}{m}} \quad f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (10)$$

مشخصات فلز ارتجاعی و مشخصات کلی دستگاه لرزه‌نگار به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است. بنابراین، بر طبق پارامترهای تعیین شده در جدول‌های ۱ و ۲ و رابطه (۱۰)، بسامد طبیعی دستگاه لرزه‌نگار ۷/۸ هرتر تعیین می‌شود.

جدول ۱. مشخصات فلز ارتجاعی

۳۴ (mm)	قطر داخلی (d)
۵۰ (mm)	قطر خارجی (D)
۴۲ (mm)	قطر میانگین (D_m)
۰/۱۵ (mm)	ضخامت دیواره (h_0)
۸ (mm)	ارتفاع شیارها (H)
۴/۳ (mm)	فاصله بین شیارها (t)
۷۴	تعداد شیارها (n)
۱۳۱×۱۰ ^۹ (Nm ^{-۲})	مدول یانگ از مواد (E)



شکل ۲. دستگاه لرزه‌نگار توری براگ فیبر نوری

جدول ۲. مشخصات دستگاه لرزه‌نگار

طول فیبر (L)	۱۳۰ (mm)
طول میله بزرگی (b)	۹۰ (mm)
طول میله کوچکی (a)	۱۰ (mm)
جرم (m)	۲۰۰ (gr)
ضریب سختی کل دستگاه	۲۷/۵۹۷ (Nm ⁻¹)
ضریب سختی فلز ارتجاعی (k ₁)	۲۱/۵۱۲ (Nm ⁻¹)

۳.۲. نظریه دستگاه

دستگاه لرزه‌نگار هنگامی که در معرض شتاب زمین قرار می‌گیرد، در مولفه قائم حرکت جرم در جهت عمودی تغییر طولی را به کمک میله آلومینیومی L شکل، در توری براگ فیبر نوری تحمیل می‌کند.

معادلات حرکت جرم به صورت رابطه (۱۱) خواهد بود که همانند نوسانگر میرا عمل می‌کند.

$$\ddot{y}(t) + 2\gamma\dot{y}(t) + \omega_0^2 y(t) = -\ddot{x}(t) \quad (11)$$

و در آن $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}}$ ، $c = 2m\gamma$ ضریب میرایی، $\xi = \frac{\gamma}{\omega_0}$ عامل میرایی است.

با توجه به شکل ۲، جابه‌جایی نقطه A (x') بر حسب جابه‌جایی m (y) برابر است با:

$$x' = \frac{a}{b} y \quad (12)$$

و با استفاده از تعریف کرنش $\epsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{x'}{l}$ و رابطه (۱۲) به

رابطه (۱۳) می‌رسیم؛

$$y = l \epsilon \left(\frac{a}{b} \right) \quad (13)$$

و رابطه (۱۳) را در رابطه (۱۱) جانشین می‌کنیم؛

$$\ddot{\epsilon} + 2\gamma\dot{\epsilon} + \omega_0^2 \epsilon = -\frac{1}{l} \left(\frac{a}{b} \right) \ddot{x}(t) \quad (14)$$

و جواب‌های معادله برای شکل‌های توصیف شده تابع x(t)

می‌تواند پاسخ لرزه‌نگار را مشخص کند.

فرض کنید $\ddot{x}(t)$ که در واقع همان شتاب زمین است، به صورت رابطه (۱۵) در نظر گرفته شود.

$$\ddot{x}(t) = A_y e^{i\omega t} \quad (15)$$

پس جواب به شکل $\epsilon(t) = \epsilon(\omega) e^{i(\omega t - \Phi)}$ حدس زده می‌شود.

$$\epsilon(\omega) = \frac{\frac{a}{b}}{l} \frac{A_y}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2 \omega_0^2 \omega^2}} \quad (16)$$

$$\tan \phi = \frac{2\xi\omega_0\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (17)$$

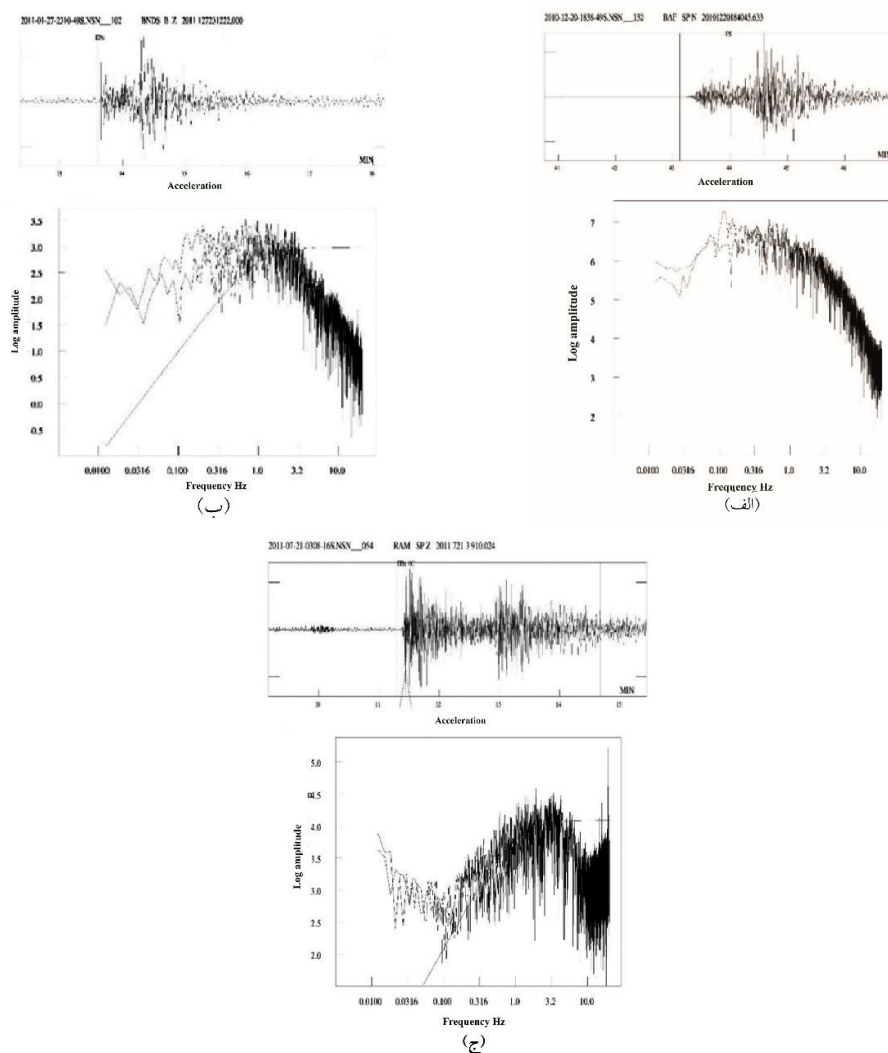
طبق رابطه (۶) تغییرات طول موج براگ نسبت مستقیم با کرنش دارد، بنابراین رابطه تغییرات طول موج براگ را می‌توان به صورت رابطه (۱۸) نوشت.

$$\Delta\lambda_{\text{Bragg}} = 1209 \frac{b}{l} \frac{A_y}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2 \omega_0^2 \omega^2}} e^{i(\omega t - \Phi)} \quad (18)$$

۴. مشاهدات

در اینجا به صورت نظری پاسخ لرزه‌نگار توری براگ بررسی شده است. برای بررسی موردی، زمین‌لرزه‌های ۲۰۱۰ با بزرگای ۶/۴ و ۲۰۱۱ با بزرگای ۶/۰ در منطقه ریگان واقع در جنوب شرقی استان کرمان و زمین‌لرزه ۲۰۱۳ با بزرگای ۷/۸ در منطقه سراوان واقع در سیستان و بلوچستان در نظر گرفته شد. هر کدام از این زمین‌لرزه‌ها به ترتیب در زمان‌های ۱۸:۴۲:۰۲ و ۰۸:۳۸:۳۲ و ۱۵:۱۴:۱۷ به وقت تهران روی داده است.

با توجه به شکل موج این زمین‌لرزه‌ها که از پایگاه ژئوفیزیک دانشگاه تهران گرفته شده است، می‌توان با کمک نرم‌افزار ساینز (هسکو و اوتمولر، ۲۰۰۵) طیف بسامدی شتاب سه زمین‌لرزه را به دست آورد (شکل ۳).



شکل ۳. طیف بسامدی زمین‌لرزه‌های الف) ۲۰۱۰ (Mw 6.4)، ب) ۲۰۱۱ (Mw 6.0) ریگان و ج) ۲۰۱۳ (Mw 7.8) سراوان که به‌ترتیب در ایستگاه‌های BAF، BNDS و RAM موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران ثبت شده‌است.

۱.۴. رسم خم‌گرنش، دامنهٔ جابه‌جایی براگ و تغییرات فاز با توجه به طیف شتاب در شکل ۳، به‌ازای ۴۸ نقطه بسامدها و دامنه‌های شتاب سه زمین‌لرزه به‌دست آمد سپس درحکم ورودی دستگاه لرزه‌نگار در معادله (۱۴) جانشین شد و خروجی دستگاه لرزه‌نگار شامل گرنش (رابطه ۱۶)، جابه‌جایی دامنه طول موج براگ (رابطه ۱۸) و تغییرات فاز (رابطه ۱۷) برحسب بسامدهای متفاوت شتاب زمین‌لرزه رسم شد.

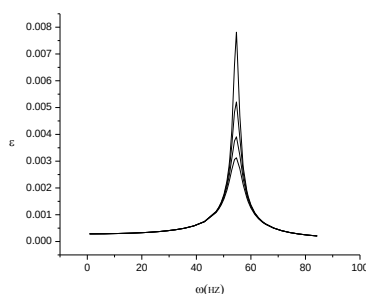
۱.۱.۴. تعیین ضریب میرایی دستگاه لرزه‌نگار

علاوه بر بسامد طبیعی، پارامتر دیگری که در یک دستگاه لرزه‌نگاری اهمیت دارد، ضریب میرایی آن است. بنابراین پاسخ لرزه‌نگار به‌ازای ضریب میرایی‌های گوناگون بررسی و

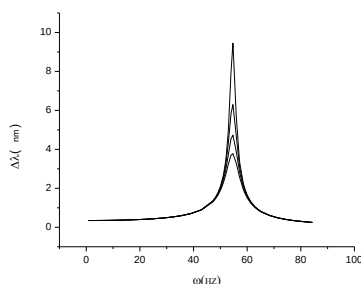
خم‌های مربوط رسم می‌شود. خم‌گرنش برحسب بسامدهای متفاوت زمین‌لرزه ریگان در ۲۰۱۱، به‌ازای میرایی‌های گوناگون دستگاه لرزه‌نگار به‌ترتیب از بالا به پایین ضریب میرایی، ۰/۴ و ۰/۶ و ۰/۸ و ۱ است.

شکل ۵، خم تغییرات دامنه طول موج براگ برحسب بسامدهای متفاوت زمین‌لرزه ریگان در ۲۰۱۱ به‌ازای میرایی‌های گوناگون دستگاه لرزه‌نگار نشان می‌دهد. ضریب میرایی به‌ترتیب از بالا به پایین ۰/۴ و ۰/۶ و ۰/۸ و ۱ است.

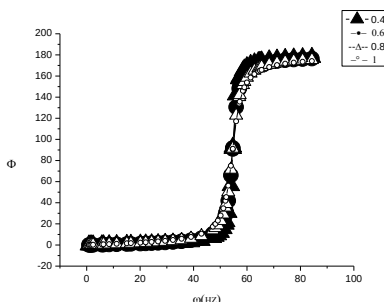
طبق رابطه (۱۷) نمودار تغییرات فاز برحسب بسامدهای متفاوت سه زمین‌لرزه به‌صورت شکل ۶ است:



شکل ۴. خم‌گرنش برحسب بسامدهای متفاوت زمین‌لرزه ریگان در ۲۰۱۱، به‌ازای میرایی‌های گوناگون دستگاه لرزه‌نگار



شکل ۵. تغییرات دامنه طول موج براگ برحسب بسامدهای متفاوت زمین‌لرزه ریگان در ۲۰۱۱ به‌ازای میرایی‌های گوناگون دستگاه لرزه‌نگار



شکل ۶. نمودار تغییرات فاز برحسب بسامدهای متفاوت زمین‌لرزه ریگان در ۲۰۱۱، به‌ازای میرایی‌های گوناگون دستگاه لرزه‌نگار

مقدار ω_r رخ می‌دهد که می‌توان آن را به‌صورت رابطه (۱۹) نوشت.

$$\omega_r^2 = \omega_0^2 - 2\gamma^2 \quad (19)$$

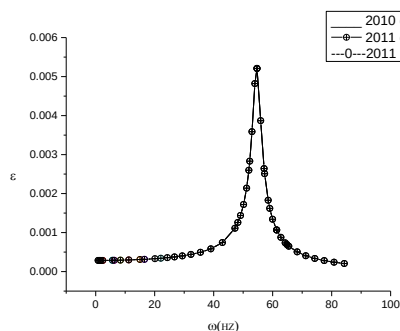
برای $\xi=1$ موج بحرانی میرا می‌شود، نوسان به حداقل می‌رسد و جرم به سرعت با توقف حرکت زمین به حالت سکون برمی‌گردد.

برای $\xi \gg 1$ (ابر میرا) نوسانی اتفاق نمی‌افتد، اما جرم آهسته‌تر به حالت سکون برمی‌گردد.

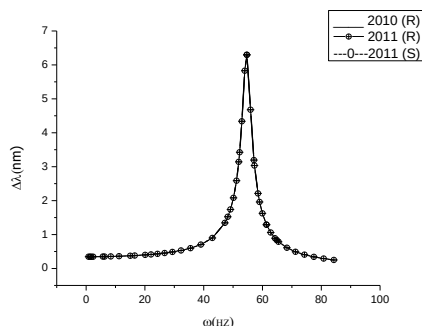
لرزه‌نگار در حالت نزدیک به میرایی بحرانی عمل می‌کند، مقدار این ضریب میرایی معمولاً حدود ۰/۶ تا ۰/۷ برای بیشتر لرزه‌نگارها مطلوب است (توکلی، ۱۳۸۳). طبق

همان‌گونه که در شکل‌های ۴ و ۵، دیده می‌شود، به‌ازای ضریب میرایی ۰/۴ و ۰/۶ و ۰/۸ و ۱ درواقع به‌ازای عامل میرایی خیلی کوچک‌تر از یک $\xi \ll 1$ (حالت فرومیرا) جرم به بسامدهای نزدیک به بسامد طبیعی لرزه‌نگار پاسخ داده است و سیگنال تحت آن بسامد می‌لرزد. هرچه ضریب میرایی بیشتر شده نوسان کاهش یافته است و پاسخ لرزه‌نگار به‌ازای همه ضریب‌های میرایی، در نزدیکی بسامد طبیعی دستگاه بیشترین دامنه را دارد. هم‌چنین در این شکل‌ها، دامنه بسامد تشدید در صورت وجود میرایی ω_0 نیست، اگرچه جابه‌جایی فاز همواره از $\frac{\pi}{2}$ در ω_0 می‌گذرد (شکل ۶). دامنه تشدید در

یک بازه زمانی خاص مقایسه می‌شود. در جدول ۳ نام ایستگاه‌ها و مختصات جغرافیایی آنها آورده شده است. داده‌های تمامی ایستگاه‌ها با لرزه‌نگار الکترومغناطیسی با دوره تناوب کوتاه حدود یک ثانیه ثبت شده است.



شکل ۷. خم‌گرنش برحسب بسامدهای متفاوت سه زمین‌لرزه



شکل ۸. خم‌دامنه طول موج براگ برحسب بسامدهای متفاوت سه زمین‌لرزه

نتایج به‌دست آمده، ضریب میرایی ۰/۶ برای این دستگاه لرزه‌نگار در نظر گرفته شده است.

۲.۱.۴. مقایسه پاسخ لرزه‌نگار توری براگ به‌ازای سه زمین‌لرزه متفاوت

اکنون به‌منظور مقایسه پاسخ لرزه‌نگار، خم‌های هر سه زمین‌لرزه به‌صورت مقایسه‌ای فقط به‌ازای ضریب میرایی ۰/۶ رسم شده است.

رسم خم‌گرنش و جابه‌جایی دامنه طول موج براگ:

طبق شکل‌های ۷ و ۸ که سه زمین‌لرزه متفاوت به‌صورت مقایسه‌ای آورده شده است. می‌توان نتیجه گرفت که هر سه زمین‌لرزه تغییراتشان شبیه به یکدیگر است. در نتیجه دستگاه به‌ازای همه زمین‌لرزه‌ها در بسامدهای ۰ تا ۸۵ هرتز، دارای پاسخ است و قسمتی از امواج زمین‌لرزه را که دارای بسامدی نزدیک به بسامد طبیعی هستند با بیشترین دامنه و بدون اعمال تاخیر فازی به‌خوبی ثبت می‌کند.

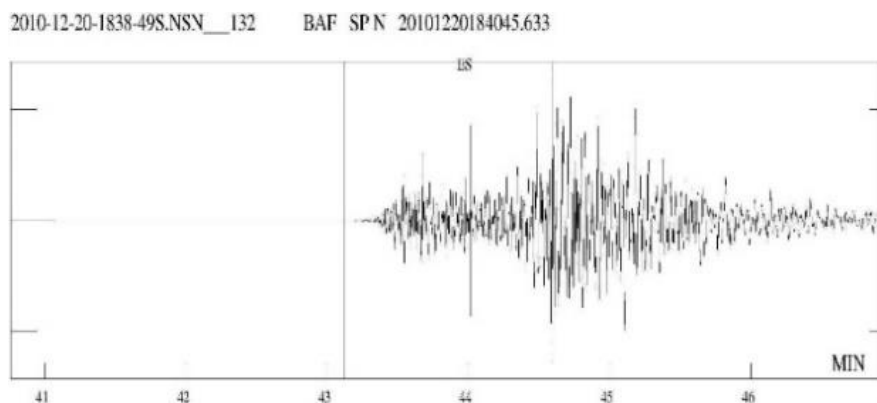
۲.۴. مقایسه شکل موج ثبت شده زمین‌لرزه‌های ریگان و سراوان در ایستگاه‌های متفاوت با شکل موج دستگاه لرزه‌نگار توری براگ

در این بخش شکل موج هر ایستگاه با پاسخ لرزه‌نگار در

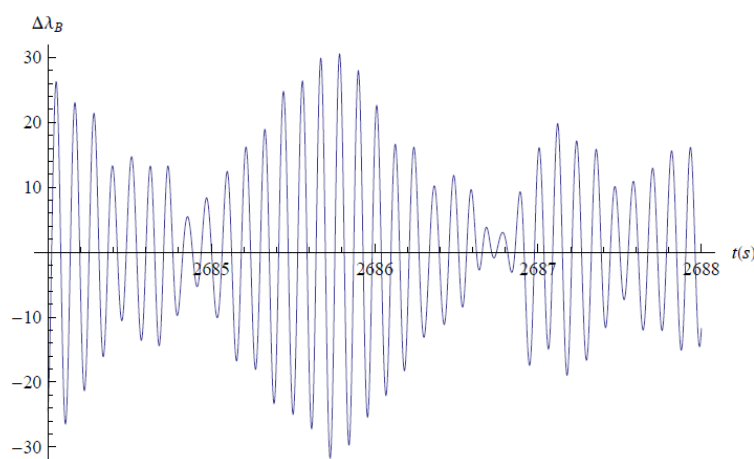
جدول ۲. مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های شبکه ملی لرزه‌نگاری^۱

نام ایستگاه - استان	کد ایستگاه	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	ارتفاع (متر)
مهریز - یزد	MEH	۳۱/۳۹۰	۵۴/۶۱۳	۱۹۸۹
چیک چیک - یزد	CHK	۳۲/۲۴۴	۵۴/۴۰۸	۱۵۳۷
بافق - یزد	BAF	۳۱/۵۹۰	۵۵/۵۶۷	۱۴۱۵
رامشه-اصفهان	RAM	۳۱/۸۰۹	۵۲/۳۸۲	۲۰۰۰
زفره-اصفهان	ZEF	۳۲/۸۹۶	۵۲/۳۲۹	۲۳۲۰
سراوان-سیستان و بلوچستان	SRV	۲۹/۳۸۱	۵۳/۱۰۴	۲۶۸۸
بندرعباس	BNDS	۲۷/۴۴۹	۵۶/۵۴۰	۴۴۹/۲۷

زمین‌لرزه ۲۰۱۰ منطقه ریگان با بزرگای ۶/۴:



(الف)



(ب)

شکل ۹. (الف) شکل موج زمین لرزه ثبت شده در ایستگاه BAF و (ب) جابه‌جایی براگ برحسب زمان زمین لرزه در بازه زمانی ۲۶۸۴ تا ۲۶۸۸ ثانیه ثبت شده است.

لحظه پاسخ لرزه‌نگار دارای بیش‌ترین جابه‌جایی براگ؛ حدود ۲۹/۲۹ نانومتر، است.

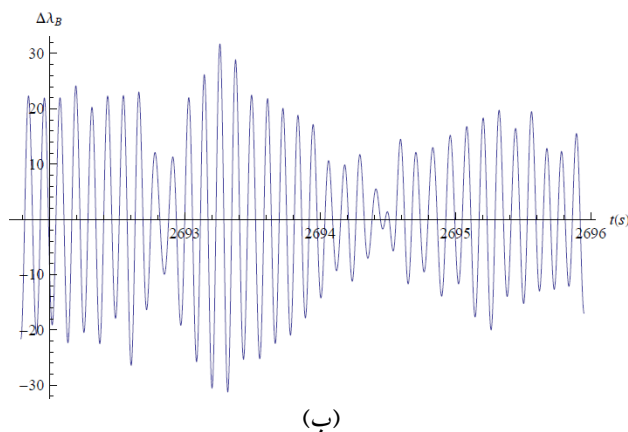
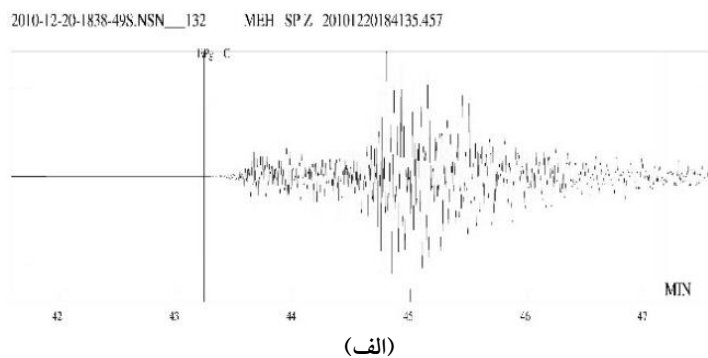
با توجه به شکل‌های ۹ تا ۱۱ بیش‌ترین جابه‌جایی براگ زمین لرزه ریگان با بزرگای ۶/۴ حدود ۲۹/۲۹ تا ۳۱/۰۴ نانومتر است. بنابراین پاسخ لرزه‌نگار به‌ازای ایستگاه‌های متفاوت نزدیک به یکدیگر بوده است. زمین لرزه منطقه سراوان در سال ۲۰۱۳ با بزرگای ۷/۸ (شکل ۱۲).

با توجه به شکل موج که در ایستگاه RAM گرفته شده است، بیش‌ترین جابه‌جایی دامنه در بازه ۱۳ تا ۱۴ و تقریباً در دقیقه ۱۳/۲۶ مشاهده می‌شود که در نزدیکی همین لحظه پاسخ لرزه‌نگار دارای بیش‌ترین جابه‌جایی براگ؛ حدود ۲/۳۸ نانومتر، است.

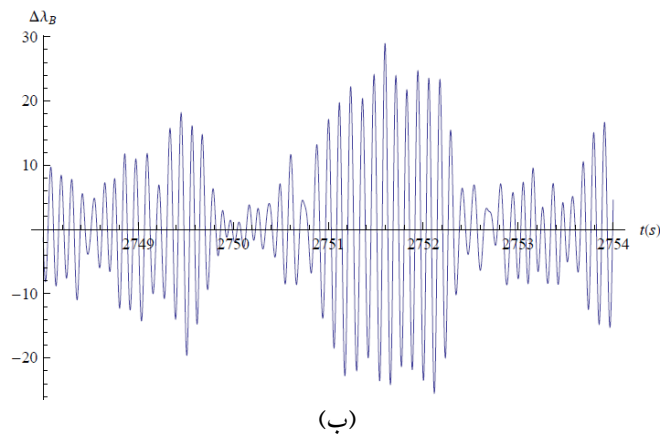
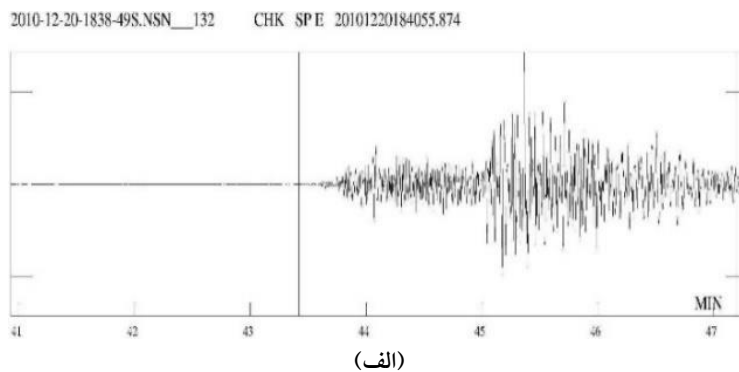
با توجه به شکل موج که در ایستگاه BAF گرفته شده است، بیش‌ترین جابه‌جایی دامنه در بازه ۴۴ تا ۴۵ و در دقیقه ۴۴/۷ مشاهده می‌شود که در نزدیکی همین لحظه پاسخ لرزه‌نگار دارای بیش‌ترین جابه‌جایی براگ؛ حدود ۳۰/۶۸ نانومتر، است.

با توجه به شکل موج که در ایستگاه MEH گرفته شده است، بیش‌ترین جابه‌جایی دامنه در بازه ۴۴ تا ۴۵ و به‌ترتیب تقریباً در دقیقه ۴۴/۶۷ مشاهده می‌شود که در نزدیکی همین لحظه پاسخ لرزه‌نگار دارای بیش‌ترین جابه‌جایی براگ؛ حدود ۳۱/۰۴ نانومتر، است.

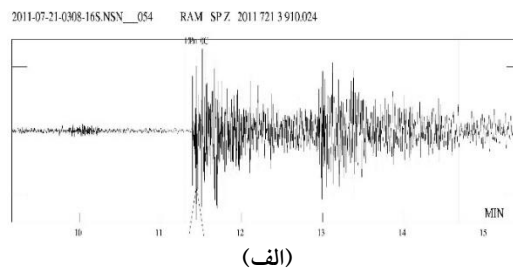
با توجه به شکل موج که در ایستگاه CHK گرفته شده است، بیش‌ترین جابه‌جایی دامنه در بازه ۴۵ تا ۴۶ و تقریباً در دقیقه ۴۵/۲۰ مشاهده می‌شود که در نزدیکی همین



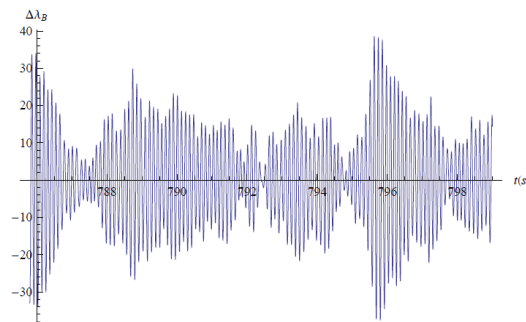
شکل ۱۰. (الف) شکل موج زمین‌لرزه ثبت شده در ایستگاه MEH و (ب) جابه‌جایی براگ برحسب زمان زمین‌لرزه در بازه زمانی ۷۹/۲۶۹۱ تا ۹۵/۲۶۹۵ ثانیه ثبت شده است.



شکل ۱۱. (الف) شکل موج زمین‌لرزه ثبت شده در ایستگاه CHK و (ب) جابه‌جایی براگ برحسب زمان زمین‌لرزه در بازه زمانی ۲۷۴۸ تا ۲۷۵۴ ثانیه ثبت شده است.

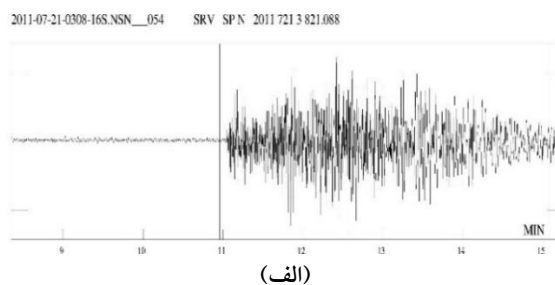


(الف)

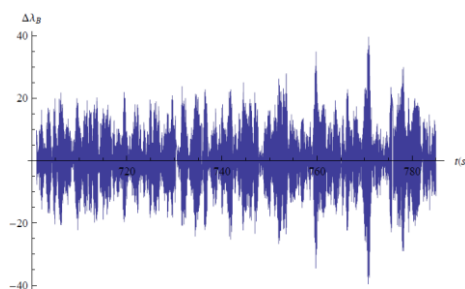


(ب)

شکل ۱۲. (الف) شکل موج زمین‌لرزه که در ایستگاه RAM ثبت شده و (ب) جابه‌جایی براگ برحسب زمان زمین‌لرزه در بازه زمانی ۸/۷۸۵ تا ۷۹۹ ثانیه ثبت شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۳. (الف) شکل موج زمین‌لرزه ثبت شده در ایستگاه SRV و (ب) جابه‌جایی براگ برحسب زمان زمین‌لرزه در بازه زمانی ۷۰۱ تا ۷۸۵ ثانیه ثبت شده است.

در دقیقه ۱۴/۵۰ مشاهده می‌شود که در نزدیکی همین لحظه پاسخ لرزه‌نگار دارای بیشترین جابه‌جایی براگ؛ حدود ۲۲/۳۹ نانومتر، است.

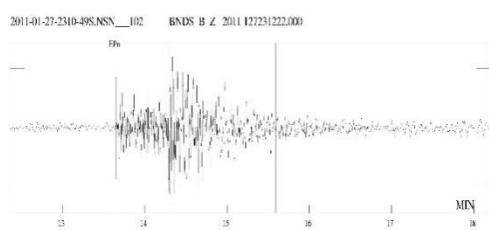
با توجه به شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) بیشترین جابه‌جایی براگ زمین‌لرزه سراوان با بزرگای ۷/۸ حدود ۳۸/۲ تا ۳۹/۲۴ نانومتر است. بنابراین پاسخ لرزه‌نگار به‌ازای ایستگاه‌های متفاوت نزدیک به یکدیگر بوده است.

با توجه به شکل موج که در ایستگاه SRV گرفته شده است، بیشترین جابه‌جایی دامنه در بازه ۱۲ تا ۱۳ و تقریباً در دقیقه ۱۲/۶ مشاهده می‌شود که در نزدیکی همین لحظه پاسخ لرزه‌نگار دارای بیشترین جابه‌جایی براگ؛ حدود ۲۴/۳۹ نانومتر، است.

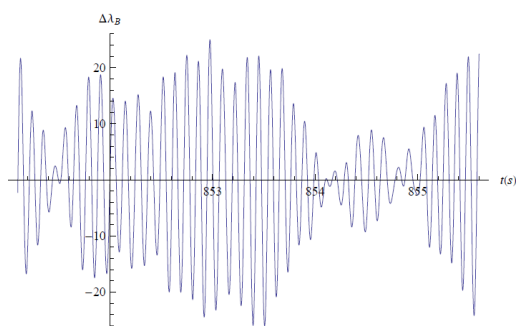
با توجه به شکل موج که در ایستگاه ZEF گرفته شده است، بیشترین جابه‌جایی دامنه در بازه ۱۴ تا ۱۵ و تقریباً

شده است، بیشترین جابه‌جایی دامنه در بازه ۱۴ تا ۱۵ و تقریباً در دقیقه ۱۴/۲۱ مشاهده می‌شود که در نزدیکی همین لحظه پاسخ لرزه‌نگار دارای بیش‌ترین جابه‌جایی براگ؛ حدود ۲/۲۵ نانومتر، است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود هر سه زمین‌لرزه در یک لحظه دارای بیشترین جابه‌جایی براگ هستند و هرچه بزرگای زمین‌لرزه‌ها بیشتر می‌شود جابه‌جایی براگ نیز افزایش می‌یابد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۵. (الف) شکل موج زمین‌لرزه ثبت شده در ایستگاه BNDS و (ب) جابه‌جایی براگ برحسب زمان زمین‌لرزه در بازه زمانی ۸۵۱/۱ تا ۸۵۵/۶ ثانیه ثبت شده است.

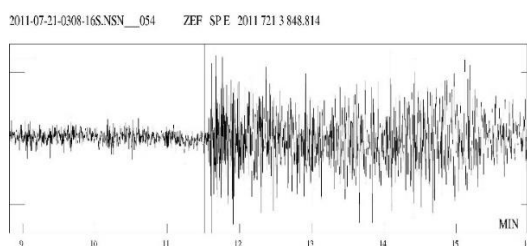
لرزه‌نگار اهمیت دارد، عامل میرایی است. هرچه عامل میرایی به صفر نزدیک‌تر باشد، جواب (جابه‌جایی دامنه طول موج براگ، گرنش) افزایش دامنه می‌یابد و در نزدیکی یک، نوسان به حداقل می‌رسد. بهترین حالت، حالتی است که ثبت لرزه‌ای، نوسان زیادی نداشته باشد. براساس نتایج به‌دست آمده، ضریب میرایی ۰/۶ برای این دستگاه لرزه‌نگار در نظر گرفته شده است.

هم‌چنین، این لرزه‌نگار قسمتی از امواج زمین‌لرزه را که دارای بسامدی نزدیک به بسامد طبیعی هستند با

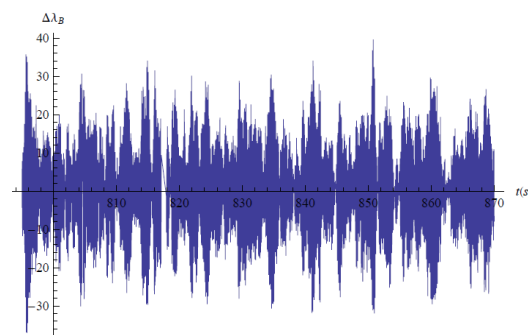
طبق شکل‌های ۹ تا ۱۴ می‌توان نتیجه گرفت، هر زمین‌لرزه تقریباً در همان لحظه بیشترین دامنه را داشته که لرزه‌نگار توری براگ بیشترین جابه‌جایی براگ را آشکار ساخته ؛ و پاسخ ایستگاه‌های متفاوت نزدیک به یکدیگر بوده است.

زمین‌لرزه منطقه ریگان در ۲۰۱۱ با بزرگای ۶/۰ (شکل ۱۵).

با توجه به شکل موج که در ایستگاه BNDS گرفته



(الف)



(ب)

شکل ۱۴. (الف) شکل موج زمین‌لرزه که در ایستگاه ZEF ثبت شده و (ب) جابه‌جایی براگ برحسب زمان زمین‌لرزه در بازه زمانی ۷۹۵ تا ۸۷۰ ثانیه ثبت شده است.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش با کمک توری براگ فیبر نوری و با استفاده از فلز ارتجاعی، امکان‌سنجی طراحی دستگاهی بررسی شد که بتواند زمین‌لرزه را ثبت کند. برای آنکه دستگاه بتواند امواج زمین‌لرزه را ثبت کند، باید بسامد ارتعاش طبیعی آن به بسامد امواج زمین‌لرزه نزدیک باشد که در این پژوهش، بسامد طبیعی دستگاه به مقدار ۷/۸ هرتر بهبود یافت.

علاوه بر بسامد طبیعی، پارامتر دیگری که در دستگاه

بیشترین دامنه و بدون اعمال تاخیر فازی، به خوبی ثبت می‌کند.

مطابق خم‌های کرنش و جابه‌جایی دامنه طول موج براگ برحسب بسامد سه زمین‌لرزه متفاوت که به صورت مقایسه‌ای آورده شد، می‌توان نتیجه گرفت که در دو نمودار از سه زمین‌لرزه متفاوت، تغییرات شبیه به یکدیگر است. درواقع دستگاه لرزه‌نگار توری براگ فیبر نوری به‌ازای همه زمین‌لرزه‌ها در بسامدهای ۰ تا ۸۵ هرتز، دارای پاسخ است. درواقع دستگاه در هنگام رسیدن امواج زمین‌لرزه، بسامد معینی از باند عبوری را تقویت و ثبت می‌کند.

با مقایسه شکل موج زمین‌لرزه‌ها در ایستگاه‌های متفاوت با شکل موج توری براگ به این نتیجه می‌رسیم که هر زمین‌لرزه در هر ایستگاه در یک لحظه دارای بیشترین دامنه است. لرزه‌نگار توری براگ نیز در همان

لحظه بیشترین جابه‌جایی براگ را نمایش می‌دهد که مقدار آن در ایستگاه‌های متفاوت، نزدیک به یکدیگر است.

طبق نتایج به‌دست‌آمده هرچه بزرگای زمین‌لرزه افزایش یابد، بیشترین جابه‌جایی براگ نیز افزایش می‌یابد. پس دستگاه را می‌توان با داشتن چند زمین‌لرزه از مناطق گوناگون و با بزرگای متفاوت واسنجی (کالیبره) کرد. با توجه به نتایج قابل قبول پردازش‌های صورت گرفته در این پژوهش و وجود مواد اولیه (توری براگ فیبر نوری، فلز ارتجاعی) پیشنهاد می‌شود در طرح‌های پژوهشی آینده، نسبت به ساخت عملی این دستگاه اقدام شود.

مراجع

توکلی، ش.، ۱۳۸۳، ژئوفیزیک، انتشارات دانشگاه پیام نور، صفحه ۱۵ - ۸۰

- Akira, M. and Isamu, Y., 2001, Fiber Bragg Grating accelerometer for buildings and civil infrastructures, smart structures and materials: smart systems for Bridges, Structures, and Highways, 4330, 479-486.
- Butter, C. D. and Hocker, G.P., 1978, Fiberoptics strain gauge, Appl. Opt., 17, 2867-2869.
- Guo, T., Xianglin, Z., Xinru, L., Shaohua, C. and Tongyu, L., 2009, A new type of fiber Bragg grating based seismic geophone, Applied Geophysics, 6(1), 84-92.
- Havskov, J. and Ottemoller, L., 2005, SEISAN: The earthquake analysis software, version 8.1.

- Lay, T. and Wallace, T. C., 1995, Modern global seismology, Academic Press, San Diego. PP 561.
- Raman, K., 2009, Fiber Bragg grating, Academic Press, pp 614.
- Trent, C., 1999, Wavelength Measurement Systems for Bragg fiber optic sensor based on Quantum well electro absorption photodetector, A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy at the University of Toronto Institute for Aerospace Studies; pp 194.

Designing possibility of a seismometer using Fiber Bragg Grating and metal bellows

Khaje Gowki, F.¹, Taraz, M.², Nemati, M.³ and Bahrampor, A. R.⁴

1. M.Sc. Student, Department of Physics, Faculty of Science, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

2. Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

3. Associate Professor, Department of Geology, Faculty of science and Earthquake Research Center of Shahid Bahonar University of, Kerman, Iran

4. Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 05 Jul 2015, Accepted: 14 Jun 2016)

Summary

In this study, we have theoretically investigated designing possibility of a seismometer using Fiber Bragg Grating (FBG) and Metal Bellows pairs attached on a mechanical system. This new seismometer can record earthquakes according to sensitivity of fiber optic to changes in physical parameters such as stress and strain. Firstly, in order to understand the quantity and quality of sensor performance, with a mathematically brief description, the effect of stress and strain on the FBG reflection spectrum is examined. FBG is an intrinsic sensing element which can be photo-inscribed into a silica fiber. The basic principle of this operation commonly uses FBG based sensor system. The operation is monitoring of the shift in wavelength of the Bragg signal following changing in stress, strain and also temperature. The Bragg wavelength, or resonance condition of a Grating, is

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

The wavelength of the optical signal reflected by the Bragg Grating depends on the FBG physical parameters (n_{eff} the fiber's effective refractive index, and Λ is the wave length of the FBG). These parameters are changed if the Grating is subjected to mechanical deformation or temperature variation. The measured strain response at constant temperature is

$$\Delta\lambda_{\text{Bragg}} = [2n_{\text{eff}}(\frac{\partial\Lambda}{\partial l}) + 2\Lambda(\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial l})]\Delta l \quad (2)$$

$$\Delta\lambda_{\text{Bragg}} = 0.78\varepsilon\lambda_B \quad (3)$$

The structure of the seismometer consists of an inertial mass, supported by a L-shaped aluminum cantilever beam, connected to the structure base by metal bellows and an FBG element. In case of ground acceleration, the inertial mass moves in the vertical direction, imposing a compressed or stretch of the optical fiber. This deformation induces variation on the FBG Bragg wavelength. From the system work-energy concept analysis, the seismometer undamped natural frequency can be written as:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{\text{bellows}} + (\frac{a}{b})^2 k_{\text{fiber}}}{m}} \quad (4)$$

with natural frequency about 7.8 Hz. Ideally, we can consider a seismometer as a black box whose input is ground motion (represented by a kinematic variable: displacement, velocity or acceleration) and its output is displacement Bragg wavelength. Assuming a ground acceleration, $\ddot{x}(t) = A_g e^{i\omega t}$, by using the frequency range of 2011 (M_w 6.0) Rigan earthquake waveform, strain (5) and displacement of amplitudes Bragg wavelength (6) and phase change (7) for different angular frequencies and amplitudes of the ground acceleration (for different damping coefficient 0.4, 0.6, 0.8, 1) are obtained. The relationships between them are investigated and for different angular frequencies, they are plotted and compared.

$$\varepsilon(\omega) = \frac{\frac{a}{b}}{l} \frac{A_g}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2 \omega_0^2 \omega^2}} \quad (5)$$

$$\Delta\lambda_{\text{Bragg}} = 1209 \frac{\frac{a}{b}}{l} \frac{A_g}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2 \omega_0^2 \omega^2}} \quad (6)$$

$$\tan\phi = \frac{2\xi\omega_0\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (7)$$

As $\xi \rightarrow 0$ (undamped), the solution has an increasing amplitude as $\omega \rightarrow \omega_0$, which is called resonance. If $\xi < 1$ (under damped), the signal tend to ring at near seismometer period. For $\xi = 1$ the signal is critically damped and oscillation is minimized. For $\xi > 1$ (overdamped), no oscillations occur, but the mass returns to rest more slowly. The possibility of designing a seismometer is investigated which works in near critical damping (0.6, optimal damping coefficient) which records a part of earthquake waves with frequency close to the natural frequency of the seismometer with the maximum amplitude and without phase-shift. Also, to prove performance and ability of seismometer with the mentioned method two other earthquakes, 2010 (M_w 6.4) Rigan earthquake and 2011 (M_w 7.8) Saravan earthquakes were investigated. Also each of the above events recorded and processed at the same time by several seismic stations and compared with seismometer Fiber Bragg Grating. A seismometer which uses Fiber Bragg Grating has a few number of advantages such as immunity to electromagnetic interference, their capability to transmit signal over long distance without any additional amplifiers, highly accurate and digital output, lighter weight, high sensitivity, low power consumption, lower cost and a wide range of dynamics.

Keywords: Earthquake, Stress, strain, Seismometer, Fiber Bragg Grating, Metal Bellows.