



بررسی قابلیت تکنیک ماره در آشکارسازی اولین جابه‌جایی امواج لرزه‌ای

شمس‌الدین اسماعیلی^{۱*} و یاسر رجبی^۲

۱- استادیار، دانشکده علوم، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲- استادیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۸

* نویسنده مسئول مکاتبات: s.esmaeili@razi.ac.ir

چکیده

آشکارسازی و تعیین دقیق ابتدای امواج لرزه‌ای از اهمیت بسیار بالایی در مطالعات لرزه‌شناسی برخوردار است. کیفیت نتایج مطالعه امواج لرزه‌ای بستگی به قابلیت حسگر لرزه‌ای در تبدیل صحیح و دقیق امواج لرزه‌ای دریافتی به سیگنال الکتریکی دارد. به عبارتی دریافت پالس‌های لرزه‌ای و تبدیل آن به سیگنال لرزه‌ای به گونه‌ای که از نظر زمان دریافت و شکل موج تطبیق بالایی با واقعیت داشته باشد، بسیار مهم است. در این پژوهش برای آشکارسازی امواج لرزه‌ای از سیستم نوسانی متداول جرم و فنر، و برای تبدیل جابه‌جایی جرم نوسان کننده به سیگنال الکتریکی از یک سیستم ثابت بر پایه تکنیک ماره استفاده شده است. در این لرزه‌نگار به‌سادگی با تغییر زاویه مابین خطوط توری‌ها و یا تغییر گام آنها حساسیت لرزه‌نگار تغییر می‌کند. حسگر ماره‌ای ساخته شده در واقع یک نمونه ژئوفون در حوزه لرزه‌نگاری اکتشافی می‌باشد که مانند دیگر حسگرهای متداول، تک مؤلفه‌ای و از نوع قائم می‌باشد. البته با توجه به این‌که در این حسگر از برهم‌نهی توری‌های ماره در یک زاویه خاص استفاده شده است و جابجایی در جهت عمود بر خطوط توری‌ها سبب جابجایی فریزهای ماره می‌شود که به نوبه خود باعث آشکارسازی ارتعاشات می‌شود. این لرزه‌نگار به دلیل خاصیت بزرگ‌نمایی تکنیک ماره قابلیت آشکار کردن جابه‌جایی‌های بسیار کوچک از مرتبه چند میکرومتر را دارد. در این پژوهش پاسخ به‌دست آمده از لرزه‌سنج ماره‌ای و یک نمونه از لرزه‌سنج‌های متداول به لرزه‌های نوعی در شرایط یکسان بررسی شده است. نتایج نشان‌دهنده تطبیق بسیار خوب داده‌های هر دو نمونه حسگر می‌باشد. از طرفی ابتدای امواج لرزه‌ای رسیده به حسگر ماره‌ای به مراتب دقیق‌تر از نمونه متداول آن تعیین شد. نتایج به‌خوبی گویای کارایی و دقت بالای لرزه‌سنج ماره‌ای است.

واژگان کلیدی

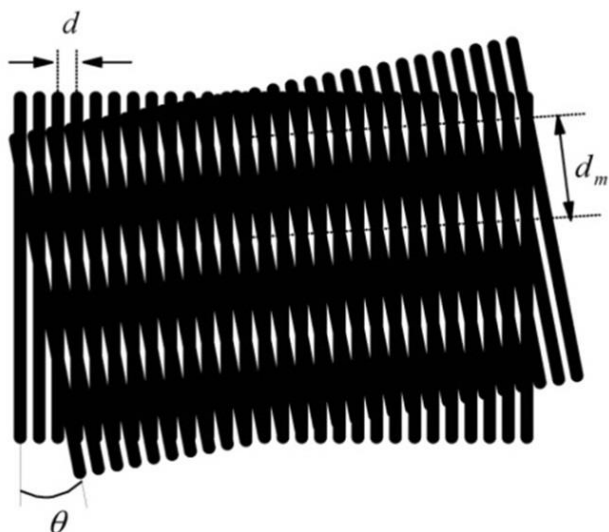
لرزه‌سنج
امواج لرزه‌ای
تکنیک ماره
توری

۱- مقدمه

های دارای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با نوفه‌ی بسیار همراه است. همچنین از جمله مسائل مهم در این روش عدم وضوح ابتدای شروع موج در سیگنال تولیدشده توسط حسگر است که معمولاً تعیین موقعیت زمانی دقیق آن که اهمیت آن پیش‌تر توضیح داده شد را با مشکل مواجه می‌کند. این مسئله به ماهیت روش تبدیل جابجایی مکانیکی به سیگنال در این دسته از حسگرها مرتبط می‌باشد. بر این اساس در این پژوهش قابلیت تکنیک اپتیکی ماره در تعیین زمان دقیق ابتدای موج‌های دریافتی به صورت کمی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور یک سیستم ثابت بر پایه تکنیک ماره به همراه سیستم متداول نوسانگر مورد استفاده در لرزه‌سنجی طراحی و ساخته شده است که در ادامه ارائه شده است.

۲- تکنیک ماره

هنگامی که دو ساختار تناوبی مانند دو توری روی هم قرار گیرند و خطوط آن‌ها زاویه‌ی کوچکی باهم بسازند، نقش یا طرح تناوبی جدیدی ظاهر می‌شود که نقش ماره نامیده می‌شود (Rasouli et al., 2016, Esmaili et al., 2015). دوره‌ی تناوب فضایی یا گام نقش ماره به مراتب بزرگ‌تر از دوره‌ی تناوب فضایی یا گام توری‌ها d است (شکل ۱).



شکل ۱: نقش ماره حاصل از برهم‌نهی دو توری با گام یکسان که خطوط آن‌ها باهم زاویه کوچکی می‌سازند (Esmaili et al., 2015)

هنگامی که دو توری مشابه انتخاب شوند، نسبت گام نقش ماره به گام توری‌ها برابر خواهد بود (Rasouli et al., 2016)

$$\frac{d_m}{d} = \frac{1}{2 \sin(\theta/2)} = \frac{1}{\theta} \quad (1)$$

جابه‌جایی یکی از توری‌ها به اندازه‌ی d در امتداد عمود بر خطوطش موجب یک جابه‌جایی در نقش ماره به اندازه‌ی d_m می‌شود و بزرگ‌نمایی از مرتبه‌ی $\frac{1}{\theta}$ به دست می‌آید.

۳- سیستم ثابت ماره‌ای

در این پژوهش برای آشکارسازی امواج لرزه‌ای از سیستم نوسانی متداول

لرزه‌نگاری یکی از دقیق‌ترین و پرکاربردترین روش‌های ژئوفیزیکی برای مدل‌سازی زمین و اکتشاف منابع زیرزمینی اقتصادی به شمار می‌آید (Jousset et al., 2018, Harris et al., 2017, Elliot et al., 2017, Lackey., 2018, Dong&shan., 2013). در این روش با استفاده از حسگرهای گیرنده، امواج لرزه‌ای الاستیک منتشرشده در زمین که ناشی از منابع مصنوعی و یا طبیعی می‌باشند دریافت و به سیگنال‌های الکتریکی قابل ثبت تبدیل می‌شوند. با پردازش سیگنال‌های ثبت‌شده اطلاعات مفیدی برای بهره‌گیری دانشمندان و مهندسين به دست می‌آید؛ بنابراین آشکارسازی دقیق امواج لرزه‌ای دریافتی و کیفیت سیگنال‌های تولیدشده، اهمیت بسیار زیادی در صحت نتایج حاصل از پردازش داده‌ها دارد (Medeiros et al., 2015, Sabato et al., 2017). امروزه از لرزه‌سنج‌ها (ژئوفون‌ها) به‌عنوان گیرنده امواج لرزه‌ای در مطالعات لرزه‌نگاری استفاده می‌شود (xu et al., 2017, Tao et al., 2009, Wang et al., 2016). در واقع کیفیت نتایج یک مطالعه به قابلیت حسگر لرزه‌ای در تبدیل صحیح و دقیق امواج لرزه‌ای دریافتی به سیگنال الکتریکی دارد. به عبارتی دریافت پالس‌های لرزه‌ای و تبدیل آن به سیگنال لرزه‌ای به‌گونه‌ای که از نظر زمان دریافت و شکل موج تطبیق بالایی با واقعیت داشته باشد، بسیار مهم است. عمدتاً مطالعات بر روی پارامترهایی نظیر زمان دریافت پالس‌های لرزه‌ای، اطلاعات شکل موج و فرکانس امواج دریافتی انجام می‌شوند. در این میان تعیین دقیق لحظه دریافت موج لرزه‌ای یا اولین جابه‌جایی در یک موج لرزه‌ای برای انجام مطالعات حوزه زمان حائز اهمیت فراوان است. در واقع تعیین دقیق اولین رسید و اولین جابه‌جایی امواج لرزه‌ای در یک سیگنال لرزه‌ای صحت نتایج را افزایش می‌دهد. بر این اساس مطالعات بسیاری برای تعیین اولین جابه‌جایی در امواج لرزه‌ای با استفاده از روش‌های ریاضی پردازش داده‌ها به انجام رسیده است که هرکدام دارای مزایا و معایب خاصی می‌باشند. این در حالی است که برای افزایش دقت تعیین زمان شروع یک موج با توجه به ماهیت لرزه‌سنج‌های، نمی‌توان اقدام خاصی انجام داد. همان‌گونه که می‌دانیم امروزه حسگرهای لرزه‌ای متداول بر اساس سیستم ثابت الکترومغناطیسی کار می‌کنند (amorebeita et al., 2020, pisco.2018, zhang et al., 2015). بدین صورت که امواج لرزه‌ای توسط یک سیستم نوسانگر دریافت شده و جابه‌جایی در نوسانگر که شامل بخشی از سیستم الکترومغناطیسی (سیم‌پیچ یا آهنربا) است، سبب تغییر در شار مغناطیسی عبوری از سیم‌پیچ شده و یک سیگنال الکتریکی را تولید می‌کند.

در واقع با ثابت نگه‌داشتن چارچوب حسگر لرزه‌ای به زمین، جرم آویزان (نوسانگر) در لحظه‌ی اولیه‌ی رسیدن پالس لرزه‌ای به علت اینرسی ماند جا می‌ماند؛ بنابراین جابه‌جایی جرم نسبت به بدنه‌ی حسگر توسط یک سیستم ثابت الکترومغناطیسی به سیگنال قابل ثبت تبدیل می‌شود. دامنه سیگنال تولیدشده متناسب با سرعت جابجایی نوسانگر است. این روش به تغییرات میدان‌های الکترومغناطیسی بسیار حساس است و ثبت داده‌ها در محیط-

به دست آمده، سیگنال خروجی توسط یک مبدل آنالوگ به دیجیتال ۱۶ بیتی رقومی شده و سپس توسط یک برنامه رایانه‌ای ثبت می‌شود. همچنین در سیستم ثبات ارائه شده از یک مدار الکترونیکی برای تنظیم شدت نور لیزر و حساسیت آشکارساز نوری استفاده شده است. شکل ۳ نمایی از لرزه-سنج ماره‌ای ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳: نمایی از لرزه‌سنج ماره‌ای.

۴- مبانی روش داده‌برداری با تکنیک ماره

در اثر اعمال یک لرزه نوعی بر روی سیستم نوسانگر یکی از توری‌ها نسبت به دیگری جابه‌جا می‌شود؛ بنابراین فریزهای ماره از مقابل نور لیزر عبور کرده و شدت نور آن که به آشکارساز نوری می‌رسد، دچار تغییر می‌شود. شدت نور دریافتی توسط آشکارساز نوری همیشه بین دو بیشینه و کمینه که حاصل عبور فریزهای تاریک و روشن است، تغییر می‌کند و در خروجی به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شود. در اثر نوسان، جهت حرکت و تعداد فریزهای عبور کرده از مقابل باریکه لیزر متناسب با جهت و دامنه جابجایی جرم نوسان کننده است؛ بنابراین در هر فاز از دوره تناوب نوسان، تغییرات در شدت نور دریافتی توسط آشکارساز بر پایه عبور فریزهای ماره از مقابل آشکارساز نوری در آن زمان است. در اثر تغییر فازهای ایجاد شده در نوسان، جهت حرکت جرم آویزان عکس شده و در نتیجه جهت حرکت فریزهای متحرک نیز عکس می‌شود که باعث ایجاد تغییر فاز در سری زمانی ایجاد شده توسط آشکارساز نوری می‌شود. در این حالت تغییر فاز در سری زمانی نشان دهنده تغییر فاز در نوسان است.

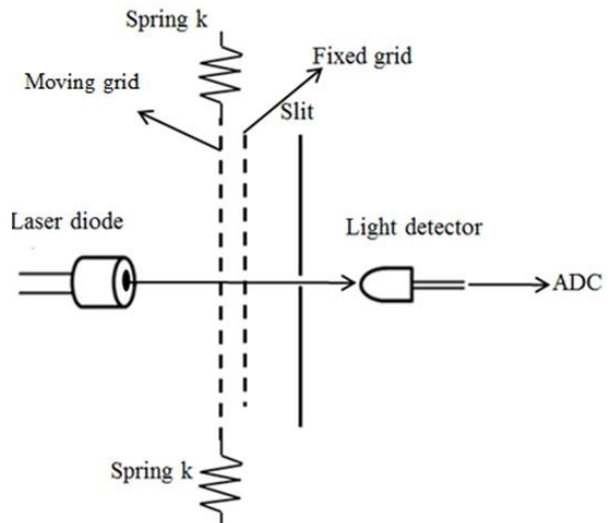
۵- شبیه‌سازی داده‌های بدست آمده

در این مرحله نحوه‌ی عملکرد سیستم ثبات ماره‌ای شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل برای تطبیق آن با تجربه ارائه می‌شود. در سیستم ثبات ماره برای ایجاد طرح ماره از برهم‌نهی دو توری رانکی استفاده شده است. برای یک توری رانکی ضریب عبور برای حالتی که خطوط آن عمود بر محور x است به وسیله‌ی رابطه‌ی زیر داده می‌شود (Esmaili et al., 2015)

$$i(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \exp\left(\frac{i2\pi nx}{d}\right) \quad (2)$$

در این رابطه d گام توری a_n ها ضرایب بسط فوریه ساختار تناوبی هستند.

جرم و فنر که در لرزه‌سنجی مورد استفاده است، و برای تبدیل جابجایی جرم نوسان کننده به سیگنال الکتریکی از یک سیستم ثبات بر پایه تکنیک ماره استفاده شده است. سیستم نوسانگر متشکل از دو فنر پروانه‌ای است که از قسمت بالا و پایین یک جرم نوسان کننده را به صورت قائم نگه‌داشته‌اند. جرم نوسان کننده که در واقع یک قاب نگه‌دارنده توری ماره (متحرک) است. قاب دومی که توری ثابت بر روی آن سوار شده است به بدنه اصلی متصل شده است. آرایش هر دو قاب ثابت و متحرک طوری به شکلی است که دو توری مشابه (رانکی با تعداد ۲۰ خط بر میلی‌متر) بدون تماس فیزیکی در مقابل هم قرار دارند به صورتی که خطوط آن‌ها زاویه حدود ۶ درجه نسبت به هم دارند. بنابراین این دو توری در اثر اعمال نیرو بدون اصطکاک نسبت به هم جابجا می‌شوند. در اثر جابجایی زمین، قاب متصل به بدنه‌ی دستگاه جابه‌جا می‌شود اما قاب متصل به فنرها با توجه به اینرسی ماند، جا می‌ماند، در نتیجه توری اول نسبت به توری دوم جابه‌جا شده و فریزهای ماره ناشی از برهم‌نهی دو توری نیز جابه‌جا می‌شوند. جابجایی فریزهای ماره به مراتب بزرگ‌تر از جابجایی جرم متصل به فنر است. لذا با اندازه‌گیری جابجایی فریزهای ماره، جابجایی جرم متصل به فنر و جابه‌جایی زمین با دقت بالایی تعیین می‌شود. برای ثبت جابجایی فریزها، در دو سوی توری‌ها به ترتیب یک دیود لیزری و یک فوتودیود در مقابل هم قرار داده شدند. یک شکاف با پهنای کم برای باریکه کردن نور قبل از آشکارساز تعبیه شد. شکل ۲ نمایی از چیدمان اپتیکی روش ارائه شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲: نمایی از چیدمان سیستم ثبات نوری.

نور دیود نوری از نقش ماره عبور می‌کند و قبل از رسیدن به آشکارساز توسط یک شکاف با پهنای کم باریکه می‌شود. با عبور فریزهای ماره از مقابل باریکه، شدت نور فرودی بر آشکارساز تغییر می‌کند و به صورت سری زمانی افت‌وخیزهای توان مشاهده می‌شود. در واقع تغییرات شدت نور حاصل از عبور فریزهای ماره در خروجی به صورت تغییر در ولتاژ خروجی آشکارساز نوری بدست می‌آید. لازم به ذکر است که برای ثبت داده‌های

$$\varphi(y) = I_0 l \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n a_{-n} \exp\left(\frac{i2\pi ny}{d_m}\right) \quad (7)$$

چون تابع ساختار توری رانکی یک تابع زوج است بنابراین داریم:

$$a_n = a_{-n}$$

در نتیجه

$$\varphi(y) = I_0 l \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n^2 \exp\left(\frac{i2\pi ny}{d_m}\right) \quad (8)$$

حال با در نظر گرفتن قسمت حقیقی تابع \exp داریم:

$$\varphi(y) = I_0 l \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n^2 \cos\left(\frac{2\pi ny}{d_m}\right) \quad (9)$$

برای توری رانکی داریم:

$$a_0 = \frac{1}{2}$$

بنابراین

$$\varphi(y) = I_0 l \left[\frac{1}{4} + 2 \sum_{n=1}^{+\infty} a_n^2 \cos\left(\frac{2\pi ny}{d_m}\right) \right] \quad (10)$$

ماکزیمم و مینیمم تابع بالا در دو حالت زیر اتفاق می‌افتد.

$$y = md_m, y = \left(m + \frac{1}{2}\right)d_m,$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

این رابطه مقدار میانگین شدت نور عبوری را در مکان y در امتداد موازی

با فریزهای ماره را به دست می‌دهد:

$$I_a(y) = \frac{1}{4} + 2 \sum_{n=1}^{+\infty} a_n^2 \cos\left(\frac{2\pi ny}{d_m}\right) \quad (11)$$

شدت متوسط عبوری در مکان y است.

حال می‌خواهیم شدت متوسط عبوری برای شکافی با پهنای e که با سرعت زاویه‌ای ω از مقابل طرح ماره بگذرد، در حالت تئوری را به دست آورده و با نتیجه‌ی تجربی حاصل جابجایی فریزها از مقابل شکاف با همان پهنای لرزه‌نگار مقایسه کنیم.

شدت متوسط عبوری از این شکاف در حالت تئوری از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$\bar{I} = \int_{Ae^{-\gamma t} \sin(\omega t) - \frac{e}{2}}^{Ae^{-\gamma t} \sin(\omega t + \Delta t) + \frac{e}{2}} I_a(y) dy \quad (12)$$

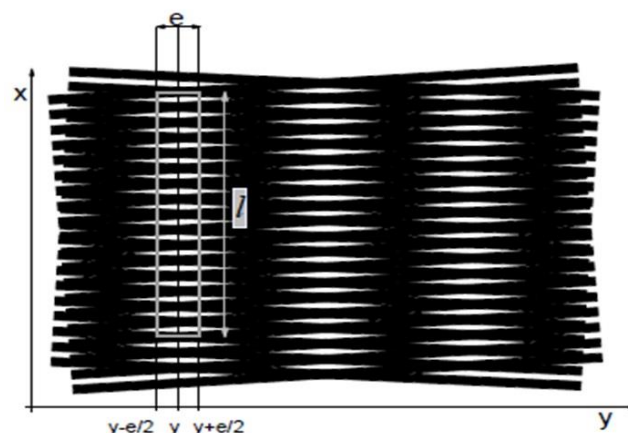
در رابطه (۱۲) دامنه‌ی نوسان شکاف است و γ ثابت میرایی ذاتی نوسانگر در حالت بدون اعمال میرایی خارجی است. حال با حل رابطه‌ی (۱۲) به جواب زیر می‌رسیم.

$$\bar{I} = \frac{1}{4} (Ae^{-\gamma t + \Delta t} \sin(\omega t + \Delta t) - Ae^{-\gamma t} \sin(\omega t) + e) +$$

$$2 \sum_{n=1}^{+\infty} a_n^2 \left(\frac{d_m}{2\pi n} \right) \times \left[\sin\left(\frac{2\pi n}{d_m} \left(Ae^{-\gamma t + \Delta t} \sin(\omega t + \Delta t) + \frac{e}{2} \right)\right) - \sin\left(\frac{2\pi n}{d_m} \left(Ae^{-\gamma t} \sin(\omega t) - \frac{e}{2} \right)\right) \right]$$

\bar{I} شدت متوسط عبوری برای شکاف با پهنای e است. در این مرحله ما پاسخ آشکارساز نوری را شبیه‌سازی می‌کنیم. شکل ۵ نمودار میانگین شدت نور عبور کرده از دو توری رانکی را نشان می‌دهد (معادله‌ی ۱۱). این نقش ماره در مقابل شکاف باریک نوسان می‌کند و آشکارساز یک سرس زمانی تغییرات شدت متوسط نور را ثبت می‌کند. شکل ۶ این سری زمانی را نشان

د شدت نور عبوری از نقش ماره حاصل از برهم‌نهی دو توری که به ترتیب به زاویه‌ی $\theta/2$ و $-\theta/2$ در راستای عمود بر محور x قرار گیرند (شکل ۴)، توسط رابطه‌ی (۲) داده می‌شود.



شکل ۴: فریزهای حاصل از برهم‌نهی دو توری رانکی (Esmaili et al., 2015)

$$I(x, y) = \quad (3)$$

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} a_n a_m \exp\left(\frac{i2\pi}{d} [(n+m)x \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + (n-m)y \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)]\right)$$

در ساختار تناوبی یک سری فریز با گام بزرگ‌تر از گام توری‌ها دیده می‌شود که برای حالت $n=-m$ بدست می‌آیند و دوره‌ی تناوب آن با رابطه‌ی (۳) داده می‌شود.

$$d_m = \frac{d}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (4)$$

که گام فریزهای ماره است.

مطابق شکل ۵ مقدار متوسط نور عبوری از یک شکاف بسیار باریک e خیلی کوچک) و طول l از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

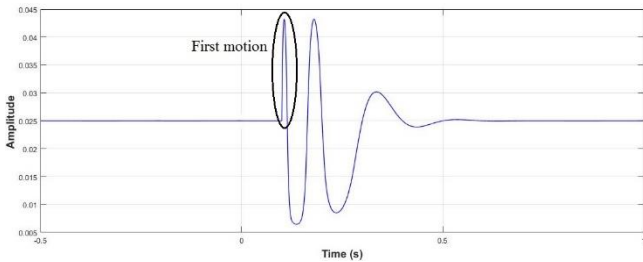
$$\varphi(y) = I_0 \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} I(x, y) dx \quad (5)$$

در این رابطه I_0 شدت تابش فرودی است و $\phi(y)$ شدت میانگین نور در امتداد خطوط نقش ماره است. حال با قرار دادن رابطه‌ی (۲) در رابطه‌ی (۴) داریم:

$$\varphi(y) = I_0 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} a_n a_m \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \exp\left(\frac{i2\pi}{d} \left[(n+m)x \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + (n-m)y \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \right) dx \quad (6)$$

$$\varphi(y) = I_0 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} a_n a_m \exp\left(\frac{i2\pi}{d} (n-m)y \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) \times \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \exp\left(\frac{i2\pi}{d} (n+m)x \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) dx$$

برای طول به‌اندازه‌ی کافی بزرگ l ، در حالت $n=-m$ انتگرال ناچیز و برای حالت‌های دیگر برابر l است. بنابراین داریم:

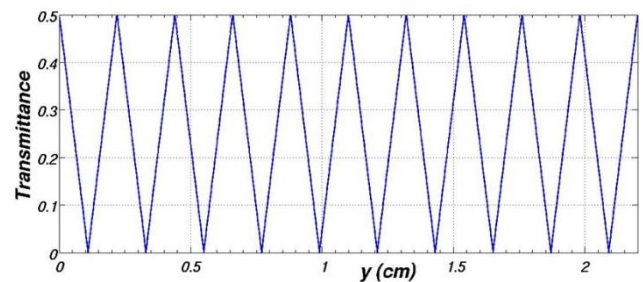


شکل ۶: شبیه‌سازی خروجی فوتودیود برای حرکت نوسانی با فرکانس ۱۰ Hz و دامنه ۰/۰۷۵ میلی‌متر.

۶- نتایج به‌دست آمده

در این مرحله پاسخ لرزه‌سنج ماره‌ای و یک نمونه از لرزه‌سنج‌های متداول (*SE-10*) به لرزه‌های نوعی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. برای این منظور پاسخ به‌دست‌آمده از هر دو لرزه‌سنج که در شرایط یکسان، هم‌زمان و با منابع تولید موج یکسان مورد آزمایش قرار گرفتند، بررسی شده است. در این آزمایش هر دو حسگر در شرایط واقعی بر روی زمین قرار گرفته و پاسخ آن‌ها به چندین ضربه با نیروهای متفاوت که توسط یک چکش در فاصله ۱ متری ایجاد شد، بدست آمد (شکل ۷). لازم به ذکر است در آزمایش‌های مختلف در فواصل مختلف نتیجه یکسانی حاصل شد که بر این اساس یک نمونه از این آزمایش‌ها در اینجا ارائه شده است. در شکل ۹ پاسخ به‌دست آمده از هر دو نمونه حسگر ارائه شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود تطبیق خوبی در داده‌های به‌دست‌آمده از هر دو نمونه لرزه‌سنج ماره‌ای و الکترومغناطیسی وجود دارد. از طرفی در سیگنال به‌دست‌آمده از لرزه‌سنج ماره‌ای، همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، ابتدای موج لرزه‌ای با دقت بالایی قابل‌تعیین است، این در حالی است که در پالس‌های مختلف حاصل از حسگر الکترومغناطیسی امکان تعیین دقیق ابتدای فازهای لرزه‌ای میسر نمی‌باشد. در واقع این ویژگی سیستم ثبات ماره‌ای ارائه شده در این پژوهش به‌عنوان یک مزیت قابل‌توجه در کنار قابلیت بالای آن در داده‌برداری لرزه‌ای به شمار می‌رود. میرایی نمونه ساخته شده ۰/۵ بوده که شامل میرایی طبیعی نوسانگر و اعمال میرایی از طریق بهره‌گیری از جریان‌های ادی است. بدین ترتیب با استفاده از یک آهنربای دائمی کوچک که به‌عنوان بخشی از جرم به نوسانگر متصل شده است و یک صفحه آلومینیومی که به بدنه حسگر ثابت شده است، میرایی اعمال شده است. در واقع با جابجایی آهنربا در اثر نوسان از مقابل صفحه آلومینیومی جریان‌های ادی ایجاد شده که با عامل به وجود آورنده خود مخالفت می‌کنند که این موضوع سبب ایجاد میرایی در نوسانگر می‌شود. حساسیت در این حسگر با توجه به به‌کارگیری تکنیک ماره بر اساس تعداد فریزهای ماره عبوری از مقابل آشکارساز نوری تعیین می‌شود. از طرفی در این حسگر با جابجایی به‌اندازه ۰/۱۲۵ میلی‌متر (یک‌چهارم گام توری)، تغییر ولتاژ خروجی ۰/۰۴۵ ولت می‌باشد. بنابراین می‌توان حساسیت را به‌صورت ۲۰,۰۰۰ فریز بر متر یا ۳۶۰۰ ولت بر متر بر ثانیه بیان کرد.

می‌دهد (معادله ۱۳). در این شبیه‌سازی ما $d_m = 2.22\text{mm}$ و $e = 20\mu\text{m}$ و $\omega = 20\pi(f = 10\text{Hz})$ و $\gamma = 0.5$ در نظر گرفتیم. مقدار γ برابر با میرایی ذاتی فنر ژئوفون انتخاب شده است.



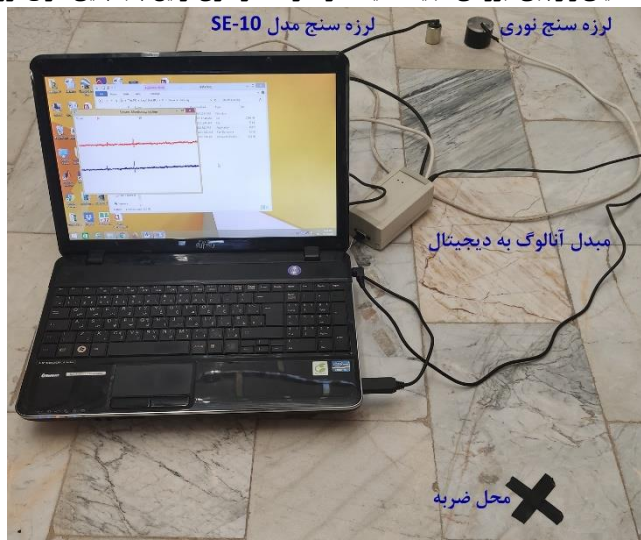
شکل ۵: شدت نور عبوری از فریزهای ماره حاصل از دو توری رانکی.

همان‌گونه که در داده‌های شبیه‌سازی شده، دیده می‌شود و با توجه به شبیه‌تند تغییرات شدت نور در حرکت بین فریزهای تاریک و روشن (شکل ۵) در اثر اعمال لرزه نوعی و در لحظه ابتدایی جابه‌جایی جرم نوسان کننده تغییر شدت نور به‌سرعت بر روی آشکارساز نوری به سمت کمینه یا بیشینه اتفاق می‌افتد. همچنین با توجه به‌سرعت بالای پاسخ فوتودیود به تغییرات که از مرتبه میکروثانیه می‌باشد، تبدیل تغییر شدت نور ایجاد شده به سیگنال الکتریکی در زمان بسیار کوتاهی نسبت به زمان تناوب امواج الاستیک منتشر شده در زمین انجام می‌شود. در واقع در لحظه تغییر شدت نور در اثر عبور فریزهای ماره از مقابل فوتودیود، تغییر در سیگنال خروجی نیز ایجاد شده که این موضوع سبب می‌شود، ابتدای موج در سیگنال لرزه‌ای به‌وضوح دیده شود.

به بیانی دیگر با توجه به اینکه تکنیک ماره قابلیت بزرگنمایی جابجایی‌های ریزمقیاس از مرتبه میکرومتر را دارد و در نظر داشتن این موضوع که جابجایی اولیه جرم نوسان کننده در ابتدای دریافت موج لرزه‌ای می‌تواند باعث جابجایی بزرگی در فریزهای ماره شود (به سمت قله تاریک یا روشن که بستگی به پلاریته فاز نوسان دارد)، آشکارسازی ابتدای فاز در این روش بسیار بالاست. در واقع با توجه به تغییر شدت نور زیاد در جابجایی کوچک و در زمان کم از سویی و پاسخ سریع فوتودیود به این تغییرات از سوی دیگر، تعیین دقیق ابتدای موج در این روش را میسر می‌سازد. به‌عنوان مثال هنگامی که جرم نوسان کننده با فرکانس ۱۰ هرتز به‌اندازه ۱۲/۵ میکرومتر جابجا می‌شود، تغییر شدت از متوسط شدت به قله آن و در زمان ۰/۰۲۵ ثانیه اتفاق می‌افتد و با توجه به‌سرعت پاسخ فوتودیود یک قله در سیگنال خروجی را در بر خواهد داشت. این در حالی است که جابجایی‌های به‌مراتب کمتر از این مقدار نیز سبب تغییرات واضحی در سیگنال خروجی شده که تشخیص آن را به راحتی امکان‌پذیر می‌کند. همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، تعیین دقیق ابتدای فازهای لرزه‌ای از اهمیت بسیار بالایی در مطالعات لرزه‌شناسی برخوردار است.

دلیل قابلیت بزرگنمایی تغییرات در روش ماره می‌باشد. از سویی با توجه به میرایی کمتر حسگر نوری افت دامنه نسبت به نمونه متداول آن کمتر می‌باشد که در این موارد در شکل ۸ مشهود است. در ادامه نیز به‌منظور بررسی هر چه بهتر پاسخ‌ها، پاسخ فرکانسی آن‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

شکل ۱۰: طیف توان خروجی لرزه‌سنج ماره‌ای و الکترومغناطیسی برای امواج لرزه‌ای دریافتی در شرایط یکسان.



شکل ۷: چیدمان آزمایش انجام شده بر روی لرزه‌سنج ماره‌ای و الکترومغناطیسی.

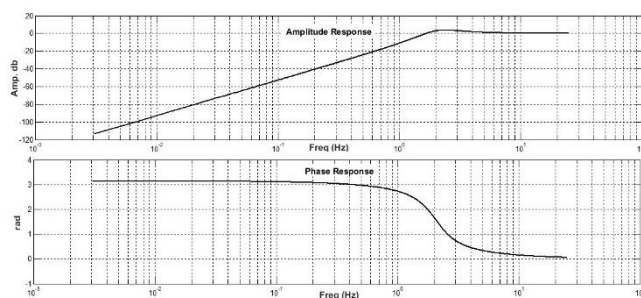
۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش قابلیت تکنیک ماره در تعیین دقیق ابتدای امواج لرزه‌ای دریافت شده توسط لرزه‌سنج مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس از تکنیک ماره در طراحی و ساخت یک سیستم ثابت به همراه یک سیستم نوسانگر متداول در لرزه‌سنجی استفاده شد. در واقع امواج لرزه‌ای رسیده به حسگر پس از آشکارسازی مکانیکی توسط سیستم نوسانگر جرم و فنر، توسط سیستم ثابت ماره‌ای به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شوند. شبیه‌سازی عملکرد سیستم ثابت انجام شد تا قابلیت آن در آشکارسازی ابتدای امواج لرزه‌ای مورد بررسی قرار گیرد. همچنین جهت آزمایش حسگر در شرایط واقعی، پاسخ‌های لرزه‌سنج ماره‌ای به همراه یک نمونه لرزه‌سنج متداول (مدل SE-10) در شرایط یکسان مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان‌دهنده تطبیق بسیار خوب داده‌های هر دو نمونه حسگر می‌باشد. از طرفی تعیین ابتدای امواج لرزه‌ای رسیده به حسگر ماره‌ای به مراتب دقیق‌تر از نمونه متداول آن می‌باشد که این ویژگی به‌عنوان یک امتیاز خیلی خوب برای این رویکرد در لرزه‌سنجی محسوب شده که حائز اهمیت فراوان است. بر این اساس سیستم ثابت نوری ارائه‌شده بر پایه تکنیک ماره بسیار قابل اعتماد بوده و از کارایی بالایی برخوردار است.

مراجع

- Jousset, P., Reinsch, T., Ryberg, T. et al. Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features. *Nat Commun* 9, 2509 (2018).
- Harris, R. H. Large earthquakes and creeping faults. *Rev. Geophys.* 55, 169–198 (2017).
- Elliott, J. R., Walters, R. J. & Wright, T. J. The role of space-based observation in understanding and responding to active tectonics and earthquakes. *Nat. Commun.* 7, 13844 (2017).
- Lackey, K. The world's deadliest earthquakes in past decade,

فرکانس طبیعی حسگر ساخته‌شده با توجه به مشخصه‌های نوسانگر ۴ هرتز و میرایی آن نیز ۰/۵ می‌باشد. همچنین در شکل ۸ پاسخ فرکانسی و فاز حسگر نشان داده شده است.



شکل ۸: پاسخ فرکانسی و فاز لرزه‌سنج ماره‌ای.

شکل ۹: پاسخ لرزه‌سنج ماره‌ای و الکترومغناطیسی به امواج لرزه‌ای دریافتی در شرایط یکسان.

با توجه به بررسی انجام‌شده بر روی خروجی‌های هر دو نمونه حسگر در آزمایش انجام‌شده مشخص شد که هر دو نمونه تطبیق بسیار بالایی از نظر زمان رسید دریافت پالس‌های لرزه‌ای داشته که با توجه به تکرار چندین پالس لرزه‌ای و بررسی زمان توالی قله‌های این پالس‌ها به دست آمد. همچنین با وجود شباهت کلی شکل موج دامنه قله تا قله برای حسگر نوری نسبت به نمونه متداول آن با در نظر داشتن سطح نویز بیشتر بوده که به

