

توسعه تابع ارتباط روی ساختگاه برای تولید شتاب های غیر یکنواخت تکیه گاهی با استفاده از روش ارتعاش تصافی

محسن ایثاری^{۱*}، رضا تازی نژاد^۲، عبدالله سهرابی بیدار^۳

۱- دکتری مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- دانشیار، دانشکده علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

یکی از روش های تولید شتابهای غیر یکنواخت روی ساختگاه استفاده از روش ارتعاش تصادفی می باشد. در این روش از ماتریس چگالی طیف توان متقاطع برای تولید شتابهای غیر یکنواخت استفاده می شود. به منظور برقراری ارتباط بین چگالی طیف توان متقاطع و خود ارتباطی، بین زوج نقاط روی یک توپوگرافی از تابع ارتباط استفاده می شود. تا کنون مدل های مختلف تابع ارتباط برای این منظور ارائه شده است. بیشتر توابع ارتباط ارائه شده، به دلیل اینکه با استفاده از تحلیل های آماری روی رکوردهای زلزله ثبت شده بر روی سطوح مسطح حاصل شده اند، چندان برای سطوح دارای نامنظمی همچون دره مناسب نمی باشند. بنابراین در پژوهش حاضر ابتدا با استفاده از روش المان مرزی در حوزه زمان، مدل های دو بعدی از ساختگاه تهیه و تحت امواج ریکر در فرکانسهای غالب مختلف، سرعت های موج برشی مختلف، نسبت شکل های مختلف بررسی و خروجی های نقاط در ترازهای مختلف به دست آمد. سپس بین زوج نقاط مختلف روی ساختگاه طیف ارتباط محاسبه شد. در ادامه با استفاده از نرم افزارهای آماری قدرتمند، روابط آماری برای طیف ارتباط روی سطوح دارای نامنظمی به شکل دره ارائه شد. با استفاده از این توابع آماری در روش ارتعاش تصادفی، شتابهای غیر یکنواخت روی ساختگاه سد پاکویما تولید شد. علاوه بر این، برای تولید شتابهای غیر یکنواخت، از توابع انتقال به منظور اعمال اثرات بزرگنمایی به عنوان یکی از پارامترهای مهم در تغییر مکانی زمین لرزه در روش ارتعاش تصادفی استفاده شد. نتایج حاصل شده نشان دهنده انطباق مناسب طیف ارتباط حاصل شده از روابط ریاضی ارائه شده در این پژوهش با طیف ارتباط حاصل شده از روی رکوردهای واقعی ثبت شده روی ساختگاه سد پاکویما می باشد.

کلمات کلیدی: تابع ارتباط، اثرات ساختگاه، شتاب غیر یکنواخت، ارتعاش تصادفی، المان مرزی.

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:

10.22065/JSCE.2019.152507.1686	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2019.152507.1686	۱۳۹۹/۱۰/۰۱	۱۳۹۹/۱۰/۰۱	۱۳۹۷/۱۰/۲۹	۱۳۹۷/۱۰/۱۸	۱۳۹۷/۰۷/۲۴

*نویسنده مسئول: رضا تازی نژاد

پست الکترونیکی: r_tarinejad@tabrizu.ac.ir

Extended Coherence Function on The Topography for Generated Non-Uniform Record By Using Stochastic Method

mohsen isari¹, Reza Tarinejad^{*2}, Abdullah Sohrabi-Bidar³

1 University of tabriz

2 Faculty of Civil engineering

3 Department of Geology

ABSTRACT

This study focuses on modeling spatial variation of earthquake ground motion using numerical methods. wave passage effect, incoherence effect and local site conditions effect are the effective parameters on this phenomenon which its investigated in simple 2D topography and 3D models near to real topography. Among the numerical methods, the BEM is a very effective tool for dynamic analysis of linear elastic bounded and unbounded media. The method is very attractive for wave propagation problems, because the discretization is done only on the boundary, requiring smaller meshes and systems of equations. Seismic behavior of the site under the S wave at different frequencies are presented. For the different points on this topography, the pattern of displacement in time domain, pattern of amplification is presented. The effective parameters on topographic amplification are time lag and amplification. To determine the coherence function after too much analysis, statistical relationships for wave frequency content and site geometry are presented. Comparing results of this relationships with real recorded samples shows good accuracy and efficiency for calculating coherence support recorded data at canyon bed and the points above that. Using this statistical relationships and amplification functions due to existing records, the possibility of generating non-uniform accelerations using one record in canyon bed is investigated.

ARTICLE INFO

Receive Date: 16 October 2018

Revise Date: 08 January 2019

Accept Date: 19 January 2019

Keywords:

Non-uniform excitation, Site Effect, Coherence function, Stochastic Method, Boundary element

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

10.22065/JSCE.2019.152507.1686

*Corresponding author: Reza Tarinejad
Email address: r_tarinejad@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

سازه‌های با عظمتی همچون سدها را به دلیل اینکه نقش اساسی در تامین آب شرب، کشاورزی، صنعت و انرژی برقایی ایفا می‌کنند می‌توان در زمره سازه های حساسی قرار داد که حساسیت طراحی و اطمینان از اثرات تمام عوامل موثر روی تحلیلهای لرزه‌ای آنها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. این قبیل از سازه‌ها زمانی اهمیت دوچندان پیدا میکنند که بدانیم عواقب شکست و تخریب آنها فقط منحصر به خود سازه نبوده و می‌تواند اثرات تخریبی فراوانی به خاطر حجم بسیار زیاد آب ذخیره شده در پشت آن، روی نقاط پایین دست خود ایجاد کند. نیروی زلزله به دلیل ماهیت غیر قابل پیش بینی بودن و شدت و پیچیدگی زیاد، دارای اهمیت فراوانی در طراحی این قبیل سازه‌ها می‌باشد. در نتیجه لازم است با شناخت ماهیت آن برآورد مناسبی از میزان و نحوه عملکرد زلزله روی پاسخ دینامیکی سازه‌ها انجام شود. در تحلیل‌هایی که به منظور طراحی روی این سازه‌ها انجام میشود معمولاً حرکت زمین در نقاط مختلف تکیه‌گاه به صورت یکنواخت روی سطح تماس سازه با زمین در نظر گرفته می‌شود. این درحالی است که مطالعات بسیاری تاکنون ثابت کرده است که در سازه‌های بزرگ و طویل مانند پلها و سدها که دارای گستردگی تماسی زیادی با سطح زمین هستند ممکن است تغییرات عمده در دامنه و فاز تحریک در تکیه گاههای مختلف تجربه شود. مطالعات محققین نشان داده است که یکی از دلایل این تغییرات و بعضاً تشدید جابجایی ها ساختگاه و توپوگرافی محل قرارگیری سازه می باشد. تفرق امواج لرزه ای و تشدید آنها توسط نامنظمی‌های عوارض توپوگرافی نقش مهمی در تشدید این جابجایی‌ها دارد. تغییرات در نقاط مختلف تکیه‌گاهی می‌تواند منجر به ایجاد تنش‌های بیشتر و تغییر در الگوی پاسخ سازه در مقایسه با تحلیل‌های حالت یکنواخت شود. به دلیل عدم دسترسی به داده‌های ثبت شده روی ساختگاه در تکیه‌گاه‌های مختلف و عدم شناخت دقیق از نحوه تغییرات جابجایی در نقاط مختلف، در نظر گرفتن حالت‌های تحریک غیر یکنواخت را با سختی‌هایی مواجه کرده است. بنابراین لازم است با شناخت هرچه دقیق تر عوامل موثر در ایجاد تغییرات مکانی زمین لرزه و ارتباط بین جابجایی‌های تکیه‌گاه‌های مختلف، اثرات تحریک غیر یکنواخت تکیه‌گاهی روی سازه‌های ساخته شده در آن ساختگاهها را مورد بررسی قرار داد [1-2].

در بین روشهای عددی روش المان مرزی (BEM) به دلیل اینکه از یک سو تعداد درجات آزادی مساله و ابعاد دستگاه معادلات را کاهش داده و از سوی دیگر برخلاف روشهای رایجی چون اجزاء محدود (FE) و تفاضل محدود (FD) با تامین ذاتی شرط مرزی تشعشع در بی نهایت، نیاز به مش بندی حوزه دور را به حداقل ممکن کاهش می‌دهد کارایی فراوانی دارد. اولین کسانی که از روش المان مرزی در حوزه زمان برای حل مساله انتشار امواج استفاده نمودند، فریدمن و شا [۳] می باشند. آنها از این تکنیک برای انتشار امواج در مسائل اکوستیک استفاده کردند. در ادامه نیوا و همکاران [۴] روش المان مرزی در حوزه زمان را به مسائل الاستودینامیک گسترش دادند. منصور [۵]، آنتس [۶] بریا [۷] نیز الگوریتم کاملی از انتگرال مرزی در حوزه زمان برای مسائل الاستودینامیک ارائه کردند. مانولیس و همکاران [۸] کرابلیس و بسکس [۹] [۱۰] [۱۱] روش المان مرزی سه بعدی را برای مسائل الاستودینامیک بکار بردند و در ادامه برای بررسی رفتار دینامیکی پی مدفون و مسئله اندرکنش خاک و سازه از این روش استفاده کردند. از جمله محققینی که برای بررسی مسئله اندرکنش خاک و سازه و همچنین رفتار تیر ساده از این روش استفاده کردند می توان به بانرجی و همکاران [۱۲] احمد و بانرجی [۱۳] کدا و ونتورینی [۱۴] ریزوس و کرابلیس [۱۵] دومینگوئز [۱۶] [۱۷] اشاره کرد. در سالهای اخیر کمالیان و همکاران [۱۸] [۱۹] با استفاده از روش المان مرزی در حوزه زمان و همچنین ترکیب این روش با روش المان محدود به مطالعه گسترده رفتار دینامیکی عارضه های دو بعدی همگن و ناهمگن پرداختند. سهرابی بیدار و همکاران [۲۰] از طریق توسعه کد المان مرزی دو بعدی به سه بعدی امکان مدل سازی سه بعدی و بررسی هر چه دقیق تر عارضه های سطحی شامل دره و تپه را میسر ساختند.

تاری نژاد و همکاران [۲۱-۲۲] در تحقیقات خود، به بررسی اثرات بزرگنمایی توپوگرافی بر ساختگاه دره‌ای با استفاده از روش المان مرزی سه بعدی در حوزه فرکانس پرداخته‌اند. ایشان اثرات برخی از پارامترهای تاثیر گذار بر بزرگنمایی حاصل از زلزله مانند فرکانس و زاویه انتشار امواج، خصوصیات مصالح و همچنین شکل دره را بررسی نمودند. برای بررسی اثرات تحریک غیر یکنواخت تکیه گاهی تا کنون محققین بسیاری با استفاده از روشهای مختلف عددی اقدام کرده‌اند. ایثاری و همکاران [۲۳-۲۴] در تحقیقات خود، با استفاده از روش المان مرزی در حوزه زمان، امکان تولید شتابهای غیر یکنواخت تکیه گاهی را با استفاده از یک شتاب نگاشت ثبت شده در کف دره مورد مطالعه قرار دارند. یکی دیگر از روش‌های رایج برای بررسی این مسائل، استفاده از روش ارتعاش تصادفی است. این روشها بر اساس تئوری احتمالات استوار بوده و با طبیعت زلزله سازگاری دارند. ویژگی اصلی تحلیل ارتعاش تصادفی در این است که مقادیر آماری پاسخ را به دست می‌دهد که به انتخاب شتاب ورودی وابستگی ندارد. تکنیک‌های پردازش سیگنال برای تغییرات تکیه گاهی داده‌های لرزه‌ای بر اساس تابع ارتباط به صورت پارامتریک انجام شد. تحقیقات زیادی برای پیش بینی تغییرات مکانی زمین لرزه و بررسی رفتار لرزه‌ای ساختگاه تحت تحریک غیر یکنواخت بر اساس روش ارتعاش تصادفی انجام شده است. در این روش ارتباط بین جابجایی‌های تکیه گاههای مختلف به صورت تابع ارتباطی بیان می‌شود. بیشتر مدل‌های ارتباطی ارائه شده، به دلیل اینکه از روی رکوردهای ثبت شده روی سطوح مسطح به دست آمده‌اند برای سطوح دارای نامنظمی چندان مناسب نمی‌باشند [۲۳-۲۴].

در پژوهش حاضر سعی بر این است که ابتدا با استفاده از روش المان مرزی در حوزه زمان، مدل‌های مختلف (۸ مدل) از دره‌های دو بعدی را تحت امواج ریکر در فرکانسها و سرعت‌های مختلف تحت بررسی و مطالعه قرار داد. سپس طیف ارتباط بین زوج نقاط مشخص شده روی سطح دره را به دست آورد. در ادامه با استفاده از نرم افزارهای قدرتمند آماری موجود که برای استخراج روابط ریاضی از داده‌های آماری مناسب می‌باشند، روابط ریاضی را برای تابع ارتباط که مناسب برای سطوح دارای نامنظمی می‌باشد، ارائه کرد. همچنین در ادامه با استفاده از این توابع آماری در روش ارتعاش تصادفی، شتابهای غیر یکنواخت روی توپوگرافی ساختگاه سد پاکویما را تولید کرد. یکی دیگر از ویژگی‌های تحقیق انجام شده استفاده از تابع انتقال در تولید شتابهای غیر یکنواخت می‌باشد که منجر به اعمال اثرات بزرگنمایی به عنوان یکی از پارامترهای مهم در ایجاد تغییرات مکانی زمین لرزه روی ساختگاه شناخته می‌شود، شده است.

۲- متدولوژی

جهت تعیین میزان اطمینان به صحت نتایج حاصل از طیف توان متقاطع، از طیف ارتباط^۱ میان دو نگاشت استفاده می‌شود. در حین ارتعاش محیطی، تحریک سازه توسط منابع مختلف با فواصل متفاوت انجام می‌شود، که در نتیجه این فرایند مقادیر طیف ارتباط از مقدار واحد که نشان دهنده دو نگاشت کاملاً وابسته است، کاهش می‌یابد. طیف ارتباط بین دو نگاشت x و y یک عدد غیر مختلط بوده و همواره مقداری بین صفر و یک دارد. آنچه که در این بین مهم می‌باشد آن است که طیف مذکور در فرکانس‌های غالب سازه دچار تشدید می‌گردد و در منحنی تغییرات دامنه طیف در مقابل فرکانس مقداری به شکل پیک ظاهر می‌شود. مقدار طیف ارتباط بیشتر معرف کیفیت داده‌ها می‌باشد و همواره می‌توان ادعا نمود پیک‌هایی از طیف ارتباط که بر پیک‌های تابع چگالی طیفی توان و طیف توان متقاطع منطبق گردند، اطمینان بیشتری به فرکانس تشدید بودن پیک‌ها ایجاد می‌کنند [۲۳-۲۴].

مدلهای تجربی برای تابع ارتباطی توسط محققین مختلفی ارائه شده است. این مدلها که اکثراً بر اساس تحلیل‌های آماری روی سطوح مسطح بدست آمده‌اند، برای سطوح دارای نامنظمی‌های توپوگرافی مناسب نمی‌باشند.

¹ Coherence spectrum

چنانکه اشاره شد، برای بررسی اثرات ساختگاهی روی رفتار لرزه‌ای سازه‌های ساخته شده در ساختگاه همانند سد و پل، ابتدا به اطلاعات و رکوردهای جابجایی زمین لرزه در امتداد دیواره دره نیاز داریم. جهت بررسی پاسخ لرزه‌ای عارضه سطحی از کد کامپیوتری اجزای مرزی در قالب نرم افزار دوبعدی Hybrid [۲۳] که در حوزه زمان می‌باشد و برای تحلیل دینامیکی محیطهای خطی و غیر خطی خشک و اشباع با استفاده از ترکیب روشهای اجزای مرزی و اجزای محدود طراحی شده، استفاده شده است. نرم افزار مذکور قادر است برای هر مساله به فراخور شرایط، هریک از روشهای اجزای مرزی، اجزای محدود و ترکیب آنها را مورد استفاده قرار دهد. به منظور بررسی پاسخ لرزه‌ای ساختگاه مدل شده، از امواج مهاجم قائم ریکر SV که موج برشی با ارتعاش ذرات در راستای محور دره (x) می‌باشد، استفاده شد. رابطه (۱) معادله موج ریکر را بیان می‌کند.

$$f(t) = A_{\max} \times [1 - 2 \times (\pi \times f_p \times (t - t_0))^2] \times e^{-(\pi \times f_p \times (t - t_0))^2} \quad (1)$$

در این رابطه f_p ، t_0 و A_{\max} به ترتیب فرکانس غالب^۲، پارامتر شیفت زمانی^۳ و بیشینه دامنه^۴ را بیان می‌دارند. $f(t)$ دامنه حرکت ناشی از امواج مهاجم است که در همه گره‌های مرزی وارد می‌گردد. بدین منظور یک مدل دو بعدی از ساختگاه به طول ۵۰ برابر عرض دره آماده شده است. سرعت موج برشی در سنگهای در برگیرنده به ترتیب ۱۱۰۰ تا ۲۱۰۰ متر بر ثانیه و همچنین نسبت پواسون ۰/۳۳ در نظر گرفته شده است. شکل (۱-d) نقاطی از عرض دره ۷ شکل که نمودارهای تغییر مکان آنها ارائه خواهد شد، نشان می‌دهد. (نسبت شکل $h/b=SR$). برای ارائه یک رابطه ریاضی دقیق برای محاسبه تاخیر زمانی، باید داده‌های کافی از تاخیر زمانی بین زوج نقاط مختلف روی ساختگاه سازه در دسترس باشد. برای این منظور ۸ مدل مختلف از دره‌های دو بعدی تهیه و با استفاده از روش المان مرزی در حوزه زمان پاسخ لرزه‌ای آن‌ها تحت امواج مهاجم ریکر حاصل شد.

در تحلیل‌های آماری، تحلیل رگرسیون عبارت است از یک فرایند آماری برای تخمین روابط بین متغیرها که برای شناخت ارتباط میان متغیر مستقل و وابسته و شکل این روابط استفاده می‌شود. این روش شامل تکنیک‌های زیادی برای مدل سازی و تحلیل متغیرها با محوریت برقراری رابطه بین متغیر وابسته و یک یا چند متغیر مستقل، می‌باشد. تحلیل رگرسیون در فهم اینکه چگونه مقدار متغیر وابسته با تغییر هر کدام از متغیرهای مستقل و با ثابت بودن دیگر متغیرهای مستقل تغییر می‌کند، می‌تواند مفید باشد. از تحلیل‌های رگرسیون به صورت گسترده برای پیش بینی و ارائه توابع استفاده شده است. در مطالعه حاضر سعی شد با استفاده از تحلیل‌های آماری (بکارگیری سمبولیک رگرسیون) رابطه‌ای برای محاسبه تاخیرهای زمانی بین رکوردهای تکیه گاهی ثبت شده در کف دره و نقاط واقع در ارتفاع بالاتر روی ساختگاه ارائه شود. با استفاده از نرم افزارهای آماری محاسباتی مانند تکنیک‌های یادگیری ماشین با سطح قابل قبولی از دقت و اطمینان می‌توان یک راه حل جایگزین برای تخمین نحوه رفتار پاسخ‌ها (ارتباط بین داده‌ها) دست یافت. در مطالعه انجام شده، برای تخمین تاخیر زمانی و تابع ارتباطی بین سیگنالها در نقاط مختلف روی عارضه توپوگرافی به شکل دره از ادغام برنامه نویسی ژنتیک به عنوان یک تکنیک یادگیری ماشین از روش رگرسیون سمبولیک استفاده شد. رگرسیون سمبولیک برخلاف روشهای معمول خطی و غیرخطی رگرسیون، به طور همزمان برای هر دو پارامتر و فرم بیان جستجو می‌کند. به عنوان یک تعمیم جامع از کلاس مدل‌های خطی تعمیم یافته (GLM)، سمبولیک رگرسیون می‌تواند با استفاده از ترکیب خطی توابع پایه β_i ، $i = 1, 2, \dots, n$ به همراه یک متغیر وابسته y و یک متغیر مستقل x بیان شود [۲۵].

²Predominant Frequency

³ Time Shift Parameter

⁴Maximum Amplitude

مدل‌های رگرسیون شامل متغیرهای زیر است:

- پارامترهای ناشناخته β ، با مشخص می‌شود و یک مقیاس یا بردار نمایش می‌دهد.
- متغیرهای مستقل X
- متغیر وابسته Y

در زمینه‌های مختلفی از کاربرد، اصطلاحات مختلفی به جای متغیرهای مستقل و وابسته استفاده شده است. یک مدل رگرسیون Y را به یک تابع از X و β مرتبط می‌کند.

$$y(x) = c_0 + \sum_i^n c_i \beta_i(x) + \varepsilon \quad (2)$$

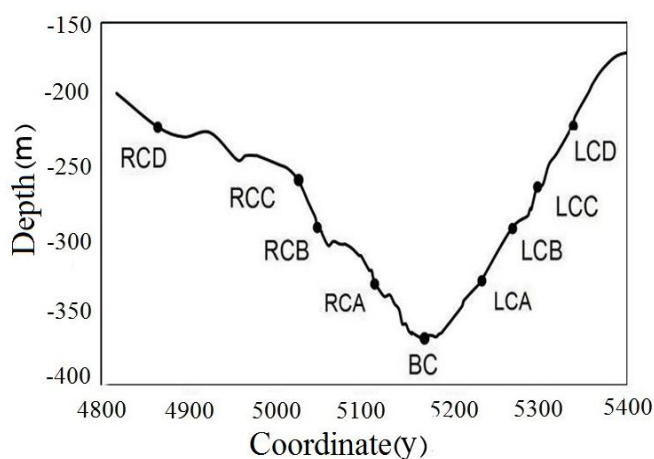
در این رابطه c_i ضرایب و ε آیتم خطا می‌باشند. در صورت ارائه X و Y ، روش سیمبولیک رگرسیون یک تابع پایه و ضرایب برای به حداقل رساندن خطا ارائه می‌دهد. به منظور دستیابی به مجموعه‌ای بهینه شده از توابع پایه و نتایج، کوزا (در سال ۱۹۹۲) پیشنهاد استفاده از تکنیک برنامه نویسی ژنتیک را پیشنهاد کرد. برای این منظور، توابع محاسبه شده باید با یک درخت دوتایی (باینری)، که در آن برگ‌ها به دو گروه، گره‌های انتهایی که توسط متغیرها و ثابت‌ها، و گره‌های میانی که به وسیله توابع نمایش داده می‌شوند نام‌گذاری ارائه می‌شود. تابع هدف با استفاده از یک متغیر بهینه سازی شده و اندازه گیری میزان انطباق (با استفاده از محاسبه قدرمطلق خطا و مجموع حداقل خطای مربعات (RMSE or R-squared) ارزیابی می‌شود. سپس، برنامه‌های ژنتیکی با روندی تکراری، مجموعه‌ای از برنامه‌های کامپیوتری را به یک نسل جدید از جمعیت با استفاده از آنالوگ‌های عملیات ژنتیکی طبیعی (به عنوان مثال، تقاطع، تولید مثل، جهش و عملیات تغییر ساختار معماری) مبدل می‌کند تا تناسب را بهبود بخشد. در پایان هر نسل، همگرایی بررسی می‌شود و روش تکرار می‌شود تا بهبود بیشتری برای نتایج حاصل نگردد. برای پیدا کردن راه حل‌های بهینه (به عنوان مثال، تاخیر زمان بهینه و توابع ارتباطی)، جبهه پارتو برای نشان دادن خطای پیش بینی در مقابل پیچیدگی به منظور انتخاب نزدیک‌ترین راه حل برای نقطه ایده آل و جلوگیری از مشکل بیش برآزش می‌بایست ترسیم گردد.

در پژوهش حاضر سعی بر این است که بتوان با استفاده از روش المان مرزی در حوزه زمان، نمونه‌های زیادی از دره‌های V شکل و هم یک نمونه واقعی را مدلسازی و سپس تحت امواج برشی ریکر قرار داد. سپس خروجی‌های روی سطح دره‌ها را، پردازش و در نقاط با ترازهای ارتفاعی مختلف علاوه بر محاسبه طیف ارتباطی به عنوان پارامتر تاثیر گذار در تحریک غیر یکنواخت تکیه‌گاهی بتوان با استفاده از پردازش‌های آماری، روابط ریاضی که وابسته به پارامترهای مختلف باشد، برای محاسبه تحریک غیر یکنواخت تکیه‌گاهی که قابل استفاده روی توپوگرافی‌های مختلف باشد، ارائه کرد.

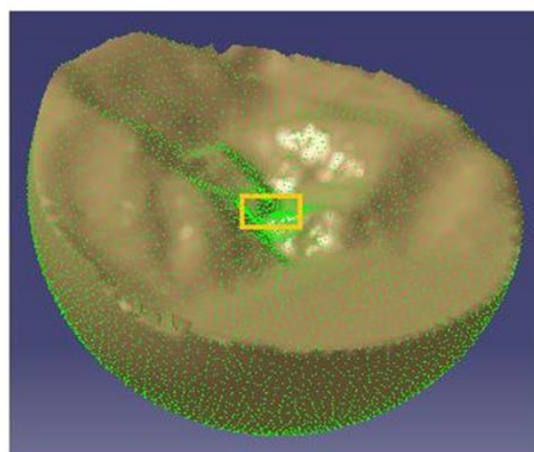
۳- تولید شتاب‌های غیر یکنواخت با استفاده از روش ارتعاش تصادفی

روش ارتعاش تصادفی بر اساس تعریف آماری مشخصات تحریک در تکیه‌گاه‌ها استوار است. تحریک تکیه‌گاهی به صورت ماتریسی از توابع چگالی طیفی توان متقاطع (Cross power spectral density function) یا خود ارتباطی (auto power spectral density function) که تعیین کننده مقادیر و محتوای فرکانس حرکت هستند، مشخص می‌شود. تابع چگالی طیفی توان متقاطع بین دو تکیه‌گاه معمولاً به صورت تابعی از چگالی طیفی توان خود ارتباطی متناظر و یک تابع ارتباطی بین تکیه‌گاه‌های مختلف تعریف می‌شود. همان

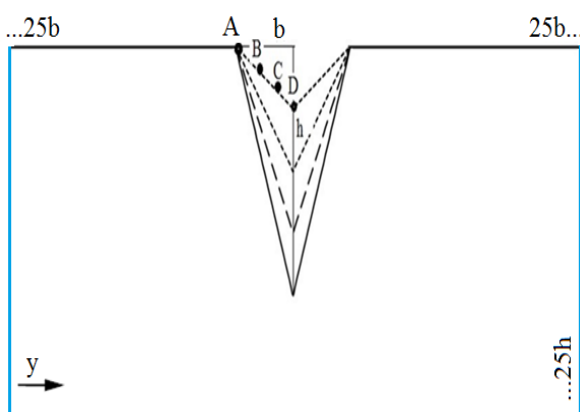
گونه که اشاره شد در سالهای اخیر مدل‌های مختلف تئوریک و تجربی تابع ارتباطی ارائه شده اند. کمبودی که در اکثر این رابطه‌ها احساس می‌شود این است که برای سطوح توپوگرافیک که دارای عارضه‌هایی همچون دره هستند، چندان مناسب نیستند بنابراین نیاز هست که برای سطوح مانند دره از روشهای بهتری استفاده شود. در پژوهش حاضر سعی بر این است که بتوان با استفاده از روش المان مرزی در حوزه زمان که از روشهای قدرتمند عددی در برآورد مسائل مربوط به انتشار امواج است، برای محاسبه رکوردهای تکیه گاهی روی سطوح توپوگرافی استفاده کرد. در ادامه این رکوردها را تحت پردازشهای عددی قرار داد. به این منظور مدل‌های مختلفی از دره V شکل (شکل ۱) در نسبت‌های مختلفی (SR=0 to SR=4) تهیه شد.



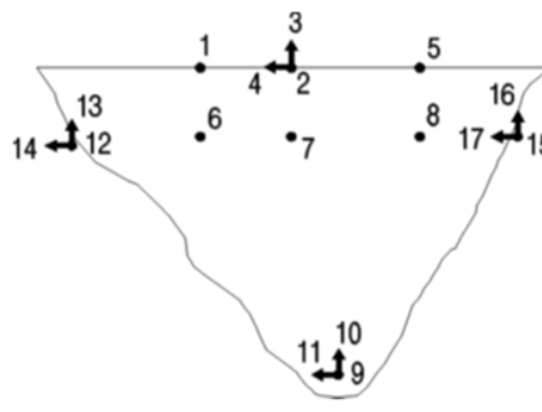
(b)



(a)



(d)



(c)

شکل ۱: (a) مدل سه بعدی از دره پاکویما، (b) پروفیل عرضی دره، (c) کانالهای ثبت شتاب مختلف روی دره، (d) دره‌های دوبعدی مدل شده.

۳-۱- ارائه یک رابطه ریاضی برای تابع طیف ارتباط

مدلهای آماده شده تحت امواج برشی با سرعت‌های مختلف، فرکانسهای غالب مختلف قرار گرفت. تاریخچه زمانی رکوردهای شتاب روی نقاط سطح ساختگاه به دست آمد. سپس تبدیل فوریه این رکوردهای تاریخچه زمانی تعیین شد. تابع ارتباطی از روی رکوردهای تاریخچه زمانی غیر یکنواخت تکیه گاهی بین زوج نقاط (j, k) از روی رابطه (۳) تعیین شد.

$$\gamma_{jk}(\omega) = \frac{S_{jk}(\omega)}{\sqrt{S_{jj}(\omega)S_{kk}(\omega)}} \quad (3)$$

در این رابطه $S_{jk}(\omega)$ تابع چگالی طیف توان متقاطع، $S_{jj}(\omega)$ تابع چگالی طیف خودارتباطی می باشد. سپس با استفاده از نرم افزارهای آماری، رابطه آماری برای توابع ارتباطی تعیین شد. این رابطه نشان می دهد که، تابع ارتباطی بین زوج نقاط روی سطوح توپوگرافی به عوامل مختلفی وابسته هست. علاوه بر سرعت موج برشی در محیط، فرکانس و فاصله افقی زوج نقاط از یکدیگر که در اکثر مدل‌های ارائه شده وجود دارد، به عواملی همچون فرکانس غالب موج ورودی، پارامتر هندسی همچون نسب شکل هر نقطه و اختلاف ارتفاع نقاط نیز وابسته می باشد.

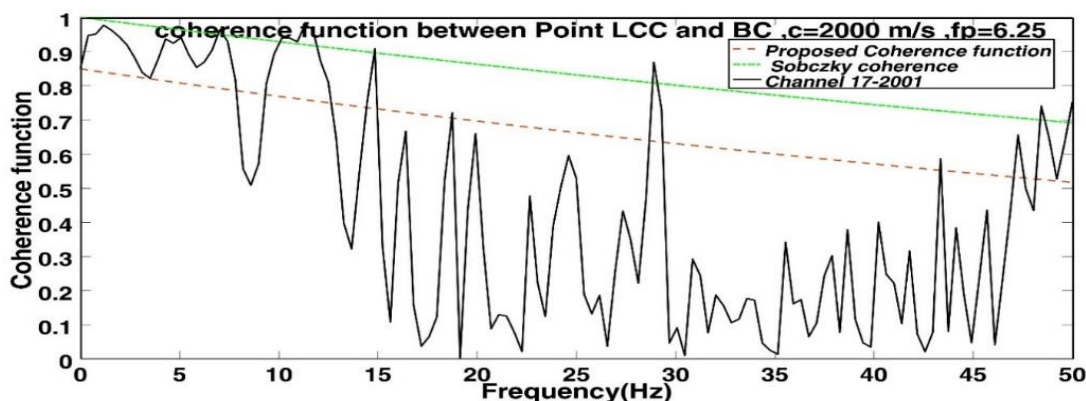
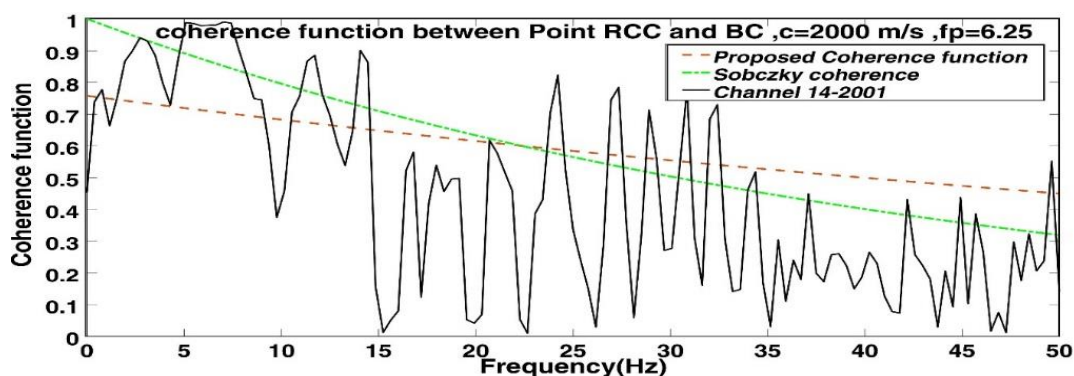
$$Coh_{n,m} = \exp\left(\frac{(\omega - f_p^2 - \omega \cdot SR \cdot f_p - 0.000845 \cdot \omega \cdot h_{n,m}^2 - 0.09178 \cdot h_{n,m} \cdot f_p^2)}{c}\right) \quad (4)$$

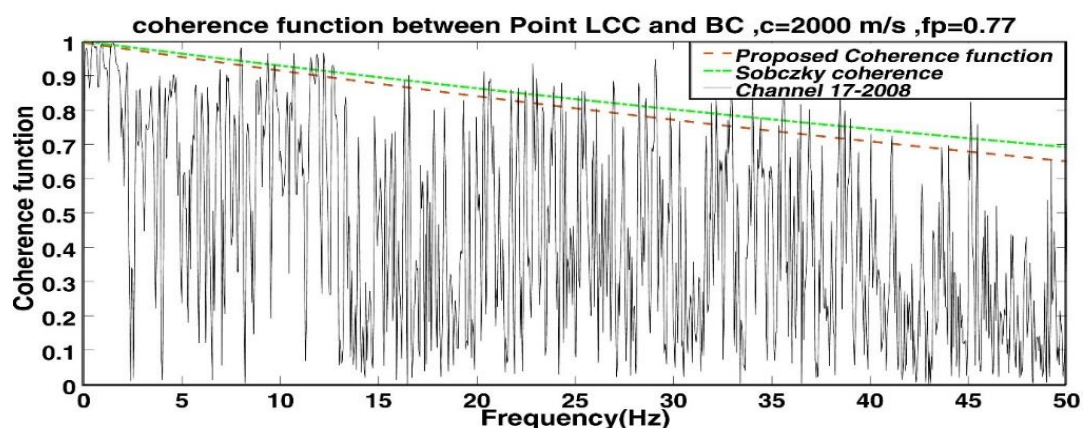
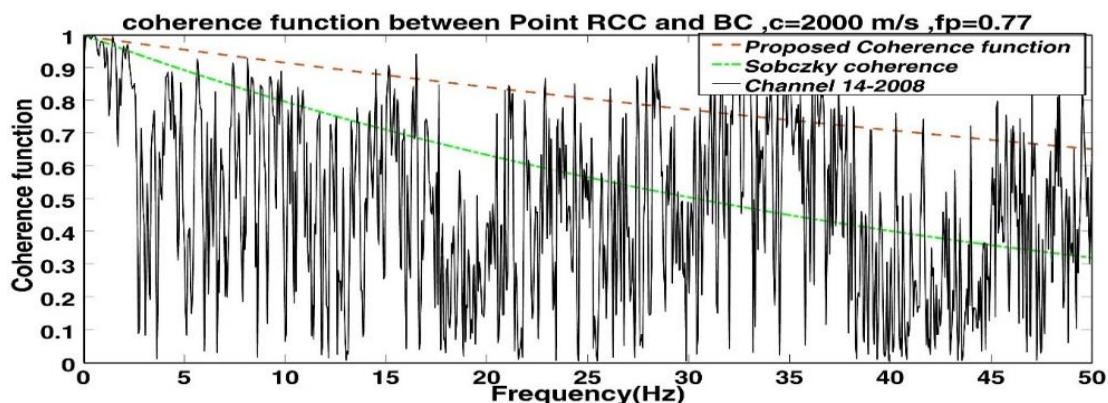
در این رابطه $Coh_{n,m}$ عبارت است از تابع ارتباطی بین دو زوج نقطه، $h_{n,m}$ ارتفاع از کف دره، C سرعت موج برشی، SR نسبت شکل، f_p فرکانس غالب. برای بررسی کارایی رابطه آماری ارائه شده، از رکوردهای ثبت شده روی ساختگاه سد پاکویما استفاده شده است. سد پاکویما یک سد بتنی قوسی به ارتفاع ۱۱۳ متر و طول تاج ۱۸۰ متر است که در کوه‌های سن گابریل و در ۵ مایلی شمال سن فرناندو و در نزدیکی لس آنجلس و جنوب کالیفرنیا، واقع شده است. تعدد شتاب سنج‌های نصب شده در نقاط مختلف بدنه این سد و تعدد وقایع زمین‌لرزه ثبت شده در ساختگاه آن در کنار ساختگاه نسبتاً همگن این سد بستری مناسب برای بررسی پدیده اثرات توپوگرافی و پاسخ واقعی سد به تحریک غیر یکنواخت تکیه گاهی در طول یک زمین‌لرزه را فراهم کرده است [۲۴]. ابتدا پروفیل توپوگرافی ساختگاه بر اساس مدل واقعی تهیه می شود (جدول ۱). مطابق شکل (۱-ب) چهار نقطه در دو سمت دره که دارای تراز ارتفاعی مساوی می باشند و یک نقطه در کف دره تعیین می شود. از نقاط در نظر گرفته شده روی سطح دره، سه زوج نقطه در ترازهای ارتفاعی همجوار با دیواره سد (A, B, C) و یک زوج نقطه (D) هم بالاتر از دیواره سد قرار دارد. برای انجام مقایسه از رکوردهای زلزله ۱۳ ژانویه سال ۲۰۰۱ بر روی کانال ۱۱ واقع در کف دره (BC) به عنوان ورودی، کانال سمت چپ (LCC) کانال ۱۷ و کانال سمت راست (RCC) کانال ۱۴ استفاده می شود.

جدول ۱- مشخصات نقاط تعیین شده در شکل ۱

زوج نقاط تعیین شده روی دره	ارتفاع نقاط نسبت به کف دره (m)	نسبت شکل (SR)
		(سمت چپ- راست)
BC	0	0
RCA-LCA	37	۰/۵۴ - ۰/۶۷
RCB-LCB	66	0/548 - 0/645
RCC-LCC	93	0/657 - 0/694
RCD-LCD	144	0/47 - 0/837

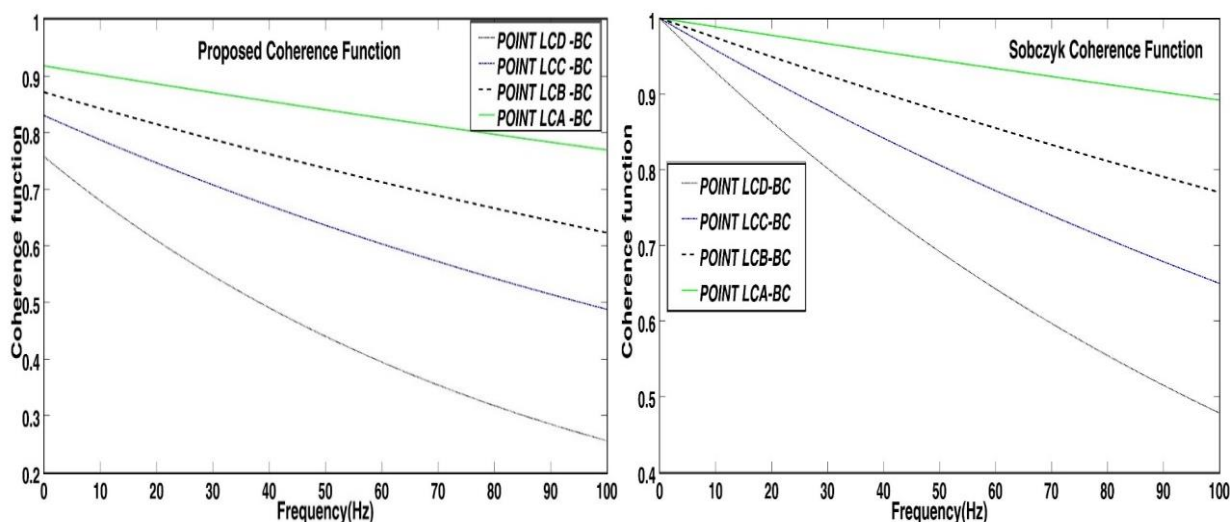
در شکل ۲، توابع ارتباطی بین رکوردهای واقعی ثبت شده روی ساختمان سد پاکویما در کانالهای ۱۴ و ۱۷ نسبت به کانال کف دره (کانال ۱۱) در طی زلزله های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۸ ارائه شد. نتایج حاصل شده از شکل ۲ نشان می دهد که برای یک کانال در طی دو زلزله متفاوت، توابع ارتباطی متفاوتی حاصل شده است. بنابراین می توان گفت که تابع ارتباطی به ویژگی های موج ورودی نیز وابسته است. علاوه بر این قابل مشاهده است که برای دو کانال ۱۴ و ۱۷ که درای ارتفاع برابر نسبت به کف دره می باشند، ولی در طی یک زلزله مشخص دارای تابع ارتباطی متفاوتی می باشند، این پدیده نشان می دهد که علاوه بر ویژگی های موج ورودی به خصوصیات هندسی نقطه مورد بررسی نیز وابسته می باشند. در همین شکل می توان دید که، توابع ارتباطی بین دو رکورد با افزایش فرکانس، پیکها و نوسانهای بیشتری پیدا می کنند. برای مقایسه تابع ارتباطی آماری ارائه شده در این پژوهش که متناسب برای سطوح توپوگرافیک دره است، از مدل ارتباطی سابزیک (Sobczyk 1991) که برای سطوح مسطح می باشد، روی ساختمان واقعی پاکویما و رکوردهای ثبت شده در روی آن استفاده می شود. نتایج حاصل شده از این مقایسه نشان می دهد که، بین تابع ارتباطی آماری ارائه شده در این مقاله و تابع ارتباطی بین دو رکورد ثبت شده در کانالهای ۱۴ و ۱۷ نسبت به کانال کف دره (کانال ۱۱) انطباق نسبتاً خوبی را دارا می باشد. همچنین قابل مشاهده است که مدل سابزیک برای این دو کانال در طی دو زلزله بررسی شده، تا حدودی تخمین بالاتری از طیف ارتباطی بین نقاط را نسبت به مدل آماری ارائه شده، نشان می دهد که می تواند به این دلیل باشد که این مدلها براساس سطوح مسطح می باشند. در حالت کلی می توان گفت که برای نقاط روی سطوح دره، تابع ارتباطی رفتار پیچیده تری را به نسبت سطوح مسطح از خود نشان می دهد.





شکل ۲: تابع ارتباطی بین زوج نقاط RCC/LCC بر روی سطح دره و کف دره .

نتایج حاصل از مقایسه دو مدل آماری و سازه‌ای در نقاط مختلف روی سطح دره پاکویما در شکل ۳، نشان می‌دهد که افزایش فاصله نقاط از کف دره همزمان با افزایش فرکانس موجب کاهش ارتباط بین نقاط مذکور با کف دره می‌شود. تفاوت در مدل آماری ارائه شده با مدل سازه‌ای نیز نشان دهنده این است که رفتار طیف ارتباطی روی سطوح دره با سطوح مسطح دارای پیچیدگی بیشتر و متفاوت خواهد بود. در هر صورت تا کنون اکثر مدل‌های ارتباطی که ارائه شده‌اند، برای سطوح مسطح مناسب می‌باشند و برای توپوگرافی دره‌ای شکل مدل ارتباطی مناسبی ارائه نشده و این کمبود برای سطوح دره‌ای شکل احساس می‌شود. سعی مولفین بر این بوده است که در پژوهش حاضر بتوانند با انجام تحلیل‌های آماری بسیار زیاد و زمان بر رابطه تابع ارتباطی نسبتاً مناسبی را برای این سطوح ارائه کنند.



شکل ۳: مقایسه تابع ارتباطی بین زوج نقاط مختلف بر روی سطح دره و کف دره (BC) با استفاده از مدل سبزیچ و مدل ارائه شده در این پژوهش.

۴- شبیه سازی سری های زمانی تحریک غیر یکنواخت

تحریک متفاوت زمین لرزه بر روی یک بستر سنگی به صورت یک فرایند مانا با میانگین صفر که دارای تابع چگالی طیف توان مشابه می باشد، فرض می شود. این فرض با توجه به فاصله زیاد منبع تا ساختگاه که معمولا از ابعاد سازه بزرگتر است، منطقی به نظر میرسد. تابع چگالی طیف توان متقاطع برای تحریک زمین لرزه برای یک ساختگاه در n تکیه گاه به صورت زیر نوشته می شود [۲۶]:

$$S(i\omega) = \begin{bmatrix} s_{11}(\omega) & s_{12}(i\omega) & \dots & s_{1n}(i\omega) \\ s_{21}(i\omega) & s_{22}(\omega) & \dots & s_{2n}(i\omega) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{n1}(i\omega) & s_{n2}(i\omega) & \dots & s_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (5)$$

در این رابطه $S_{ij}(i\omega)$ و $S_{ii}(\omega)$ ، $i, j=1 \dots n$ ، به ترتیب تابع چگالی طیف توان متقاطع و تابع چگالی طیف توان خود ارتباطی می باشند، که از رابطه (۶) و (۷) تعیین می شوند.

$$S_{ii}(\omega) = |H_i(i\omega)|^2 S_g(\omega) \quad (6)$$

$$S_{ij}(i\omega) = H_i(i\omega)H_j^*(i\omega)S_g(\omega)\gamma_{ij}(d_{ij}, i\omega) \quad (7)$$

در این رابطه $H_i(i\omega)$ و $H_j(i\omega)$ عبارتند از تابع انتقال بین دو تکیه گاه، $S_g(\omega)$ تابع چگالی طیف توان تحریک زمین و γ_{ij} تابع طیف ارتباطی بر روی بستر سنگی در تحریک متفاوت تکیه گاهی می باشند. برای تعیین تابع انتقال روی یک سطح از رابطه (۸) که بر اساس تئوری انتشار امواج برشی نوشته شده، استفاده می شود.

$$H_i(i\omega) = \frac{(1+r_i - i\xi_i) \exp(-i\omega\tau_i(1-2i\xi_i))}{1+(r_i - i\xi_i) \exp(-2i\omega\tau_i(1-2i\xi_i))} \quad (8)$$

در این رابطه ξ_i نسبت میرایی، τ_i زمان عبور موج، r_i ضریب انعکاس موج می باشد. اختلاف فاز بین تحریک دو نقطه j, i با توجه به عبور موج در ساختگاه از رابطه (۹) تعیین می شود:

$$\theta_i(\omega) - \theta_j(\omega) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(H_i(i\omega)H_j^*(i\omega))}{\text{Re}(H_i(i\omega)H_j^*(i\omega))} \quad (9)$$

ماتریس چگالی طیف توان $S(i\omega)$ یک ماتریس هرمیتی می باشد، که به صورت حاصل ضرب دو ماتریس پایین مثلثی در ماتریس هرمیتی آن نوشته می شود:

$$S(i\omega) = L(i\omega)L^H(i\omega) \quad (10)$$

تجزیه این ماتریس با استفاده از روش چولسکی انجام و سپس درایه های ماتریس پایین مثلثی به صورت (۱۱) نوشته می شود.

$$L(i\omega) = \begin{bmatrix} L_{11}(\omega) & 0 & \dots & 0 \\ L_{21}(i\omega) & L_{22}(\omega) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{n1}(i\omega) & L_{n2}(i\omega) & \dots & L_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$L_{ii}(\omega) = \left[S_{ii}(\omega) - \sum_{k=1}^{i-1} S_{ik}(i\omega)S_{ik}^*(i\omega) \right]^{1/2}, i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$L_{ij}(i\omega) = \frac{S_{ij}(i\omega) - \sum_{k=1}^{i-1} S_{ik}(i\omega)S_{jk}^*(i\omega)}{L_{jj}(\omega)}, j = 1, 2, \dots, i \quad (13)$$

بعد از تعیین درایه های ماتریس مثلثی، سری های زمانی برای تکیه گاههای مختلف با استفاده از رابطه ۱۴ تعیین می شود.

$$u_i(t) = \sum_{m=1}^i \sum_{n=1}^N A_{im}(\omega_n) \cos[\omega_n t + \beta_{im}(\omega_n) + \varphi_{mn}(\omega_n)] \quad (14)$$

در این رابطه $A_{im}(\omega)$ برابر دامنه و $\beta_{im}(\omega)$ فاز سری زمانی تولید شده می باشند. $\varphi_{mn}(\omega_n)$ فاز تصادفی و n تعداد فرکانسهای گسسته شده می باشد [۲۶].

$$A_{im}(\omega) = \sqrt{4\Delta\omega} |L_{im}(i\omega)|, 0 \leq \omega \leq \omega_N \quad (15)$$

$$\beta_{im}(\omega) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[L_{im}(i\omega)]}{\text{Re}[L_{im}(i\omega)]} \right), 0 \leq \omega \leq \omega_N \quad (16)$$

سری زمانی تولید شده با استفاده از این روش یک فرایند مانا می باشد. به منظور دست یابی به سری های زمانی غیرمانا در نقاط مختلف ساختمانی از تابع پوش جنینگ (Jennings envelope function) با فرض $t_0=2s$, $t_n=10s$ به صورت (17) استفاده شده است.

$$f_i(t) = \zeta(t) u_i(t), \quad i=1, 2, \dots, n \quad (17)$$

$$\zeta(t) = \begin{cases} (t/t_0)^2 & 0 \leq t \leq t_0 \\ 1 & t_0 < t \leq t_n \\ \exp[-0.155(t-t_n)], & t_n < t \leq T \end{cases}$$

همانگونه که در بخش های قبلی اشاره شد، در روش های ارتعاش تصادفی برای محاسبه تحریک متفاوت تکیه گاهی به محاسبه تابع چگالی طیفی توان متقاطع بین نقاط تکیه گاهی نیاز داریم. ارتباط بین توابع چگالی طیف توان متقاطع و خود ارتباطی ما بین دو تکیه گاه n, m به صورت (18) توسط تابع ارتباط بیان می شود:

$$S_{mn}(d, \omega) = S_g(\omega) \gamma_{mn}(\omega) \quad (18)$$

برای تعریف $S(\omega)$ از طیف اصلاح شده کانای-تاجیمی استفاده می شود. کانای و تاجیمی رابطه (19) را برای محاسبه چگالی طیف توان ارائه کرده اند [26].

$$S_g(\omega) = \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + (2\omega_f \omega \xi_f)^2} \frac{1 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \Gamma \quad (19)$$

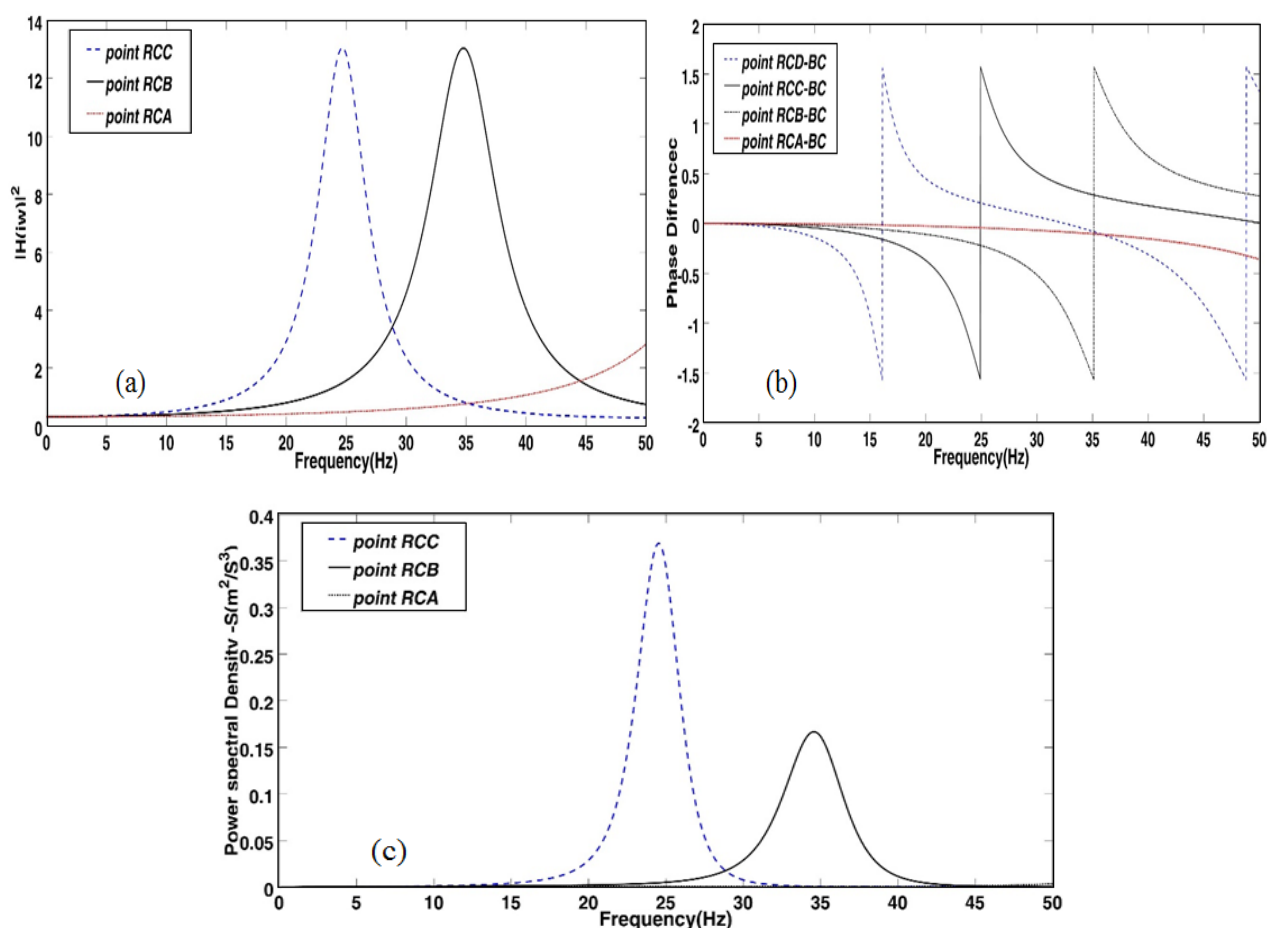
در رابطه بالا Γ بزرگی تحریک سنگ بستر، ω_g (فرکانس مرکزی)، ω_f ، ξ_g نسبت میرایی و ξ_f پارامترهای مربوط به خاک محیط می باشد، که برای بیان شرایط محیطی در انتشار امواج بکار می رود. تابع طیف ارتباطی بین دو ایستگاه با فرض سرعت انتشار موج C از رابطه (20) تعیین می شود. در پژوهش حاضر، $\omega_g = 10\pi \text{ rad/s}$ ، $\xi_g = 0.6$ ، $\xi_f = 0.6$ ، $\omega_g = 0.5\pi$ و همچنین مقدار $\Gamma = 0.022 m^2 / s^3$ با توجه به مقدار $\text{PGA} = 0.5g$ در نظر گرفته شده اند [26].

$$\gamma_{mn}(d, \omega) = |\gamma(d, \omega)| e^{-i\omega d/c} \quad (20)$$

بخش نمایی رابطه (20) نشان دهنده اثرات عبور موج یا تاخیر زمانی می باشد. $|\gamma(d, \omega)|$ مدل تابع کاهش ارتباطی.

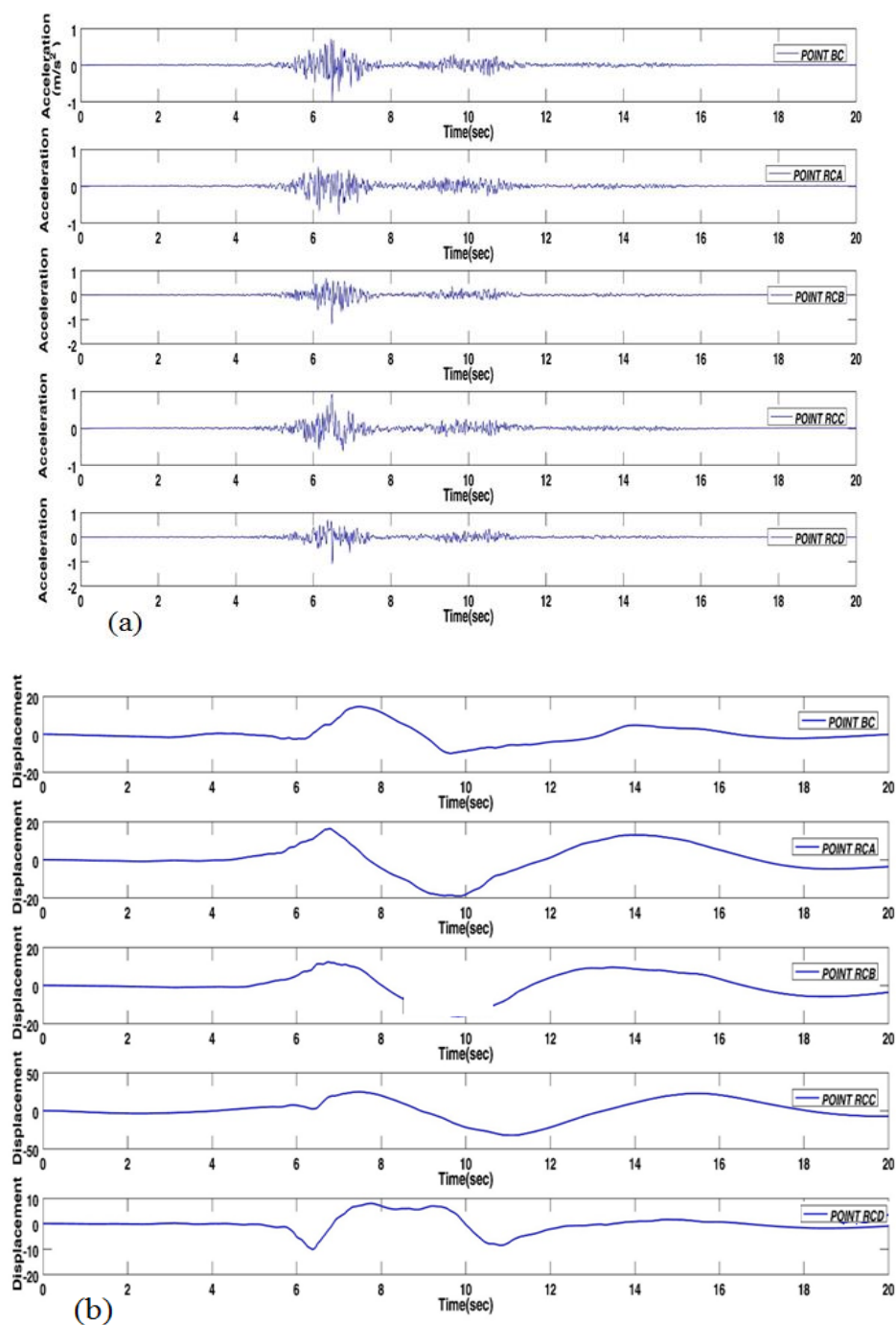
۵- تولید شتاب با استفاده از مدل تابع ارتباطی سازه

چنانکه در شکل ۴ نشان داده شده است، ۳ فاکتور مهم در تولید شتابهای غیر یکنواخت روی سطح دره مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده در این قسمت نشان می دهد که با تغییر ارتفاع نقاط نسبت به کف دره، تابع انتقال دچار تغییر می شود. در واقع پیکهای تابع انتقال در فرکانسهای مختلفی ایجاد شده است. با افزایش ارتفاع نقاط، پیک مشاهده شده در تابع انتقال در فرکانسهای کمتری مشاهده می شود. در ساختگاه مورد بررسی پیک ایجاد شده برای نقطه RCC در فرکانس ۲۵ هرتز، و برای نقطه RCB در فرکانس ۳۵ هرتز ثبت شده است. تابع انتقال منجر به تغییر در تابع چگالی طیف توان روی سطح دره نسبت به نقطه کف دره می شود. همانگونه که در ادامه تحلیل های انجام شده در همین شکل می توان دید، افزایش اختلاف ارتفاع نقاط نسبت به کف دره، موجب افزایش تاخیر زمانی بین زوج نقاط می شود که این موضوع موجب تغییر در اختلاف فاز بین نقاط می شود. علاوه بر این، افزایش ارتفاع نقاط موجب تغییر بزرگنمایی نقاط نسبت به کف دره شده، بنابراین موجب تغییر در تابع چگالی طیف توان نیز شده است. در شکل ۵، رکوردهای تاریخچه زمانی شتاب و جابجایی غیر یکنواخت و تولید شده روی ساختگاه سد پاکوپما به روش ارتعاش تصادفی و با استفاده از مدل تابع ارتباطی سازه روی نقاط سمت راست ارائه شده است.

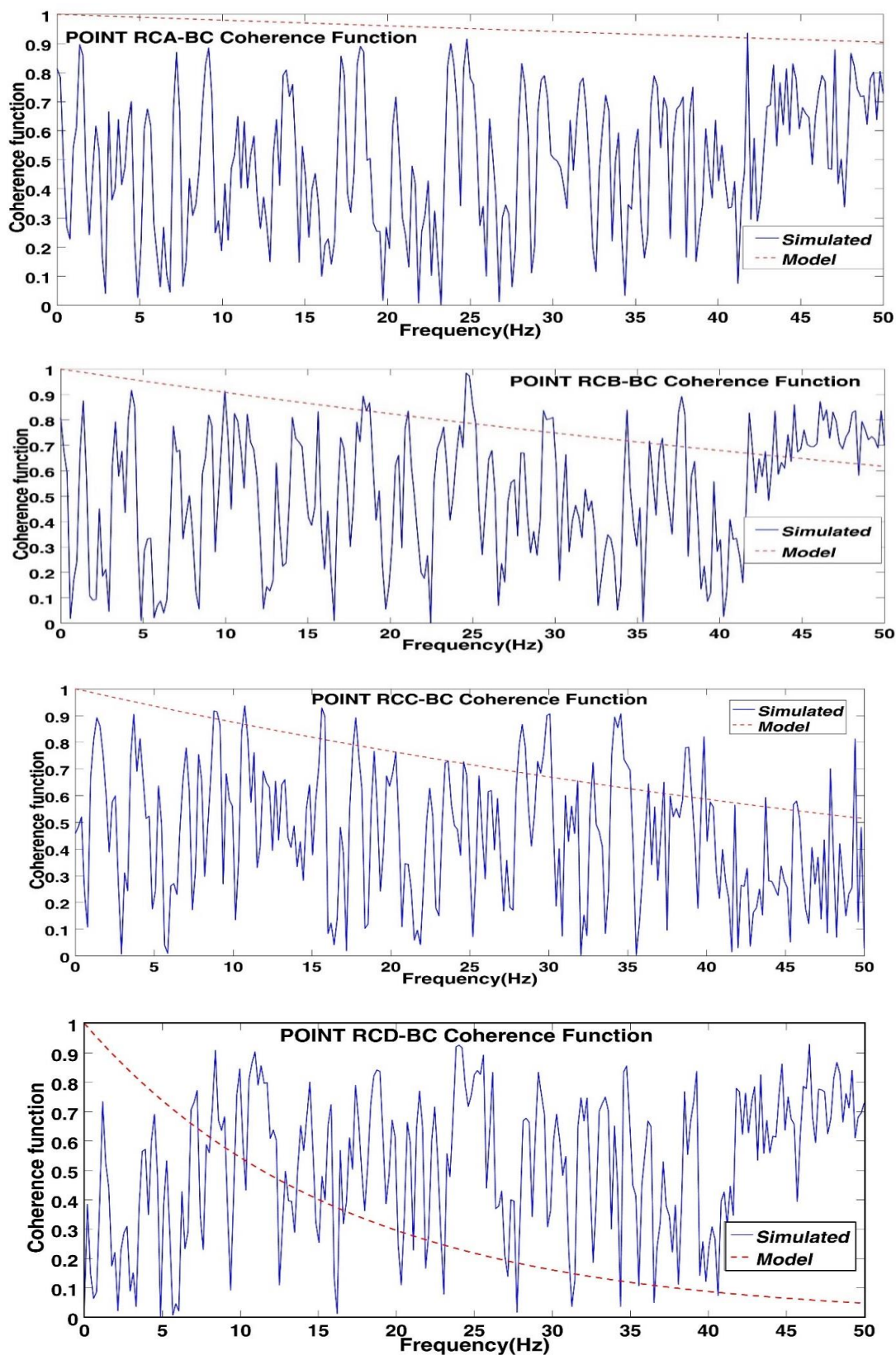


شکل ۴: پارامترهای (a) بزرگنمایی، (b) اختلاف فاز (c) چگالی طیف توان.

چنانکه در شکل ۵ دیده می شود، در نقاط مختلف به دلیل اثرات تفرق امواج لرزه‌ای و اثرات عبور موج شاهد تفاوت در رکوردهای نقاط مختلف نسبت به کف دره هستیم.

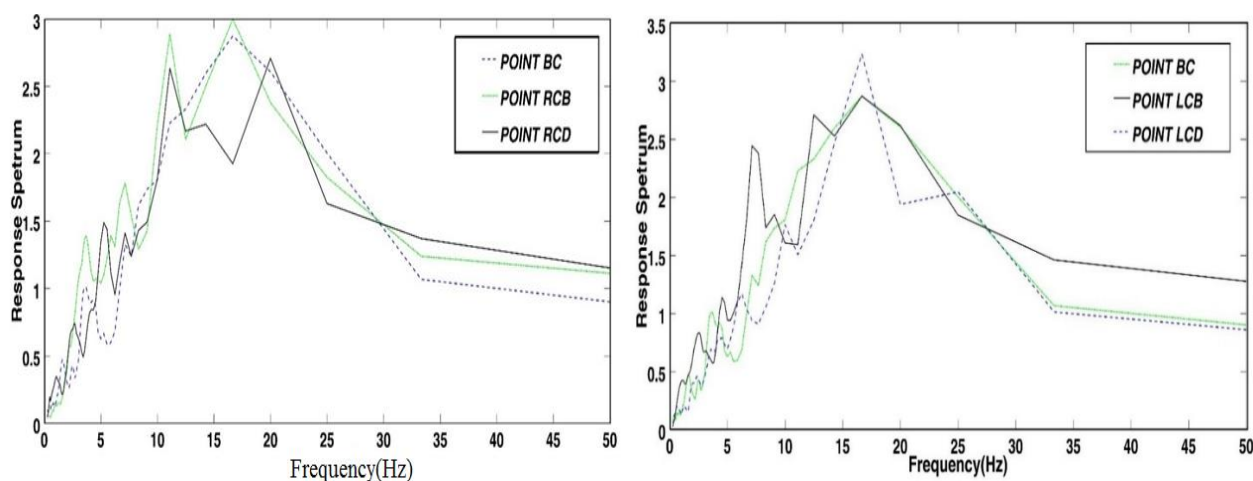


شکل ۵: کمیت های (a) شتاب و (b) جابجایی های غیر یکنواخت در سمت راست دره با استفاده از روش ارتعاش تصادفی و مدل تابع ارتباطی سازه‌ای.



شکل ۶: مقایسه بین تابع ارتباطی بین رکوردهای شبیه سازی شده و مدل سابزیک برای نقاط مختلف روی سمت راست دره.

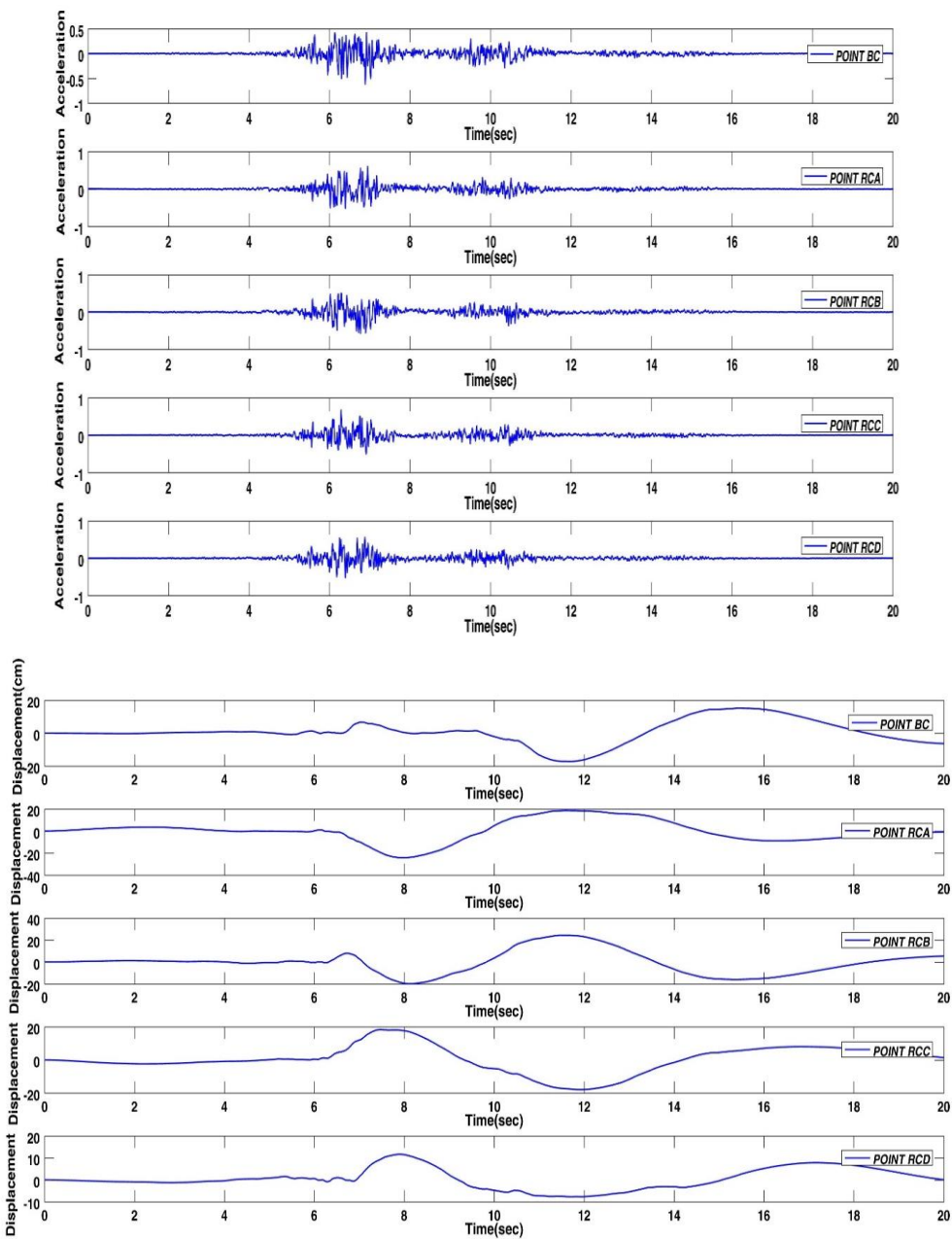
در شکل ۶، طیف توابع ارتباطی بین رکوردهای شبیه سازی شده با استفاده از روش ارتعاش تصادفی روی ساختگاه سد در سمت راست دره به همراه مدل تابع ارتباطی سبزیکی ارائه شده است. چنانکه دیده می شود، با افزایش فرکانس، نوسان و پیک های تابع طیف ارتباطی نیز افزایش پیدا کرده، همچنین قابل مشاهده است که طیف ارتباطی بین زوج نقاط با خصوصیات هندسی مختلف منجر به پیچیده تر شدن رفتار طیف ارتباطی و تفاوت در آن شده، که می تواند به دلیل شرایط ساختگاهی و همچنین بزرگنمایی ایجاد شده در نقاط مختلف نسبت به کف دره باشد. علاوه بر این در مدل تابع ارتباطی سبزیکی نیز برای نقاط مختلف به دلیل افزایش فاصله نقاط از مرکز دره، کاهش در طیف ارتباطی مشهود است. همچنین می توان دید که، مدل سبزیکی برای نقاط با ارتفاع کم تخمین ارتباطی نسبتا بالا را دارا می باشد، و برای نقاط در ارتفاع بالا نیز در محدوده فرکانسی بالا، تخمین پایینی از میزان طیف ارتباط را نشان می دهد. چنانکه در بخش های قبلی نیز اشاره شد، مدل سبزیکی برای سطوح مسطح میباشد و برای سطوح دره ای به دلیل افزایش پیچیدگی الگوی رفتاری، چندان مناسب نمی باشد. در شکل ۷، طیف پاسخ شتاب برای سه نقطه مشخص شده در سمت چپ و راست دره ارائه شده است. چنانکه دیده میشود، برای نقاط سمت چپ به دلیل ساختار هندسی تقریبا منظم دره الگوی رفتاری تقریبا منظمی مشاهده می شود. بدین گونه که با افزایش ارتفاع نقاط طیف پاسخ نیز تا حدودی افزایش پیدا کرده است. ولی برای نقاط سمت راست دره به دلیل پیچیدگی هندسی بیشتر سطح دره، رفتار طیف پاسخ نیز برای نقاط مختلف الگوی پیچیده ای را نشان می دهد.



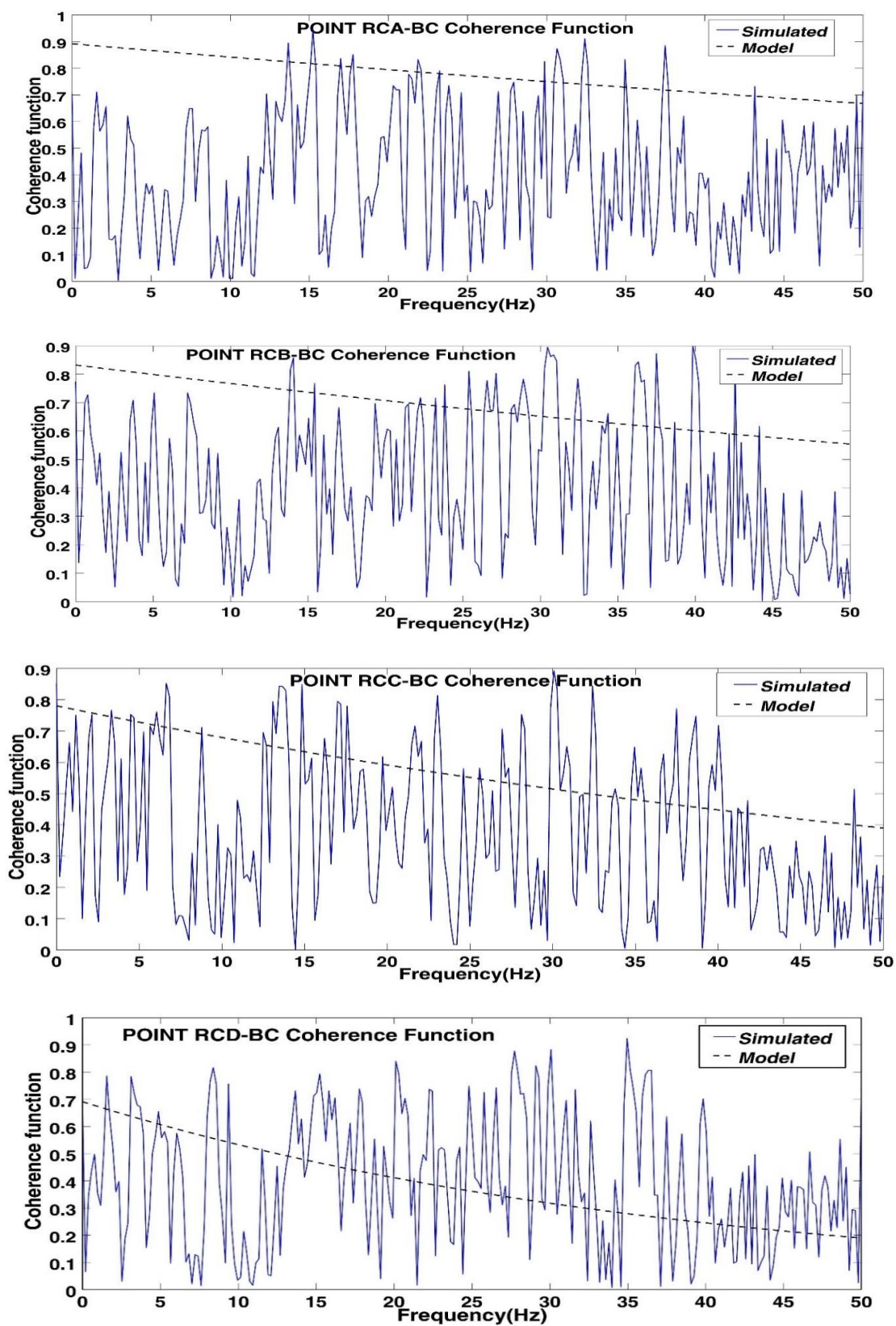
شکل ۷: طیف پاسخ شتاب شبیه سازی شده با استفاده از روش ارتعاش تصادفی برای نقاط سمت چپ و سمت راست دره پاکویما.

۶- شبیه سازی تحریک غیر یکنواخت تکیه گاهی با استفاده از تابع ارائه شده

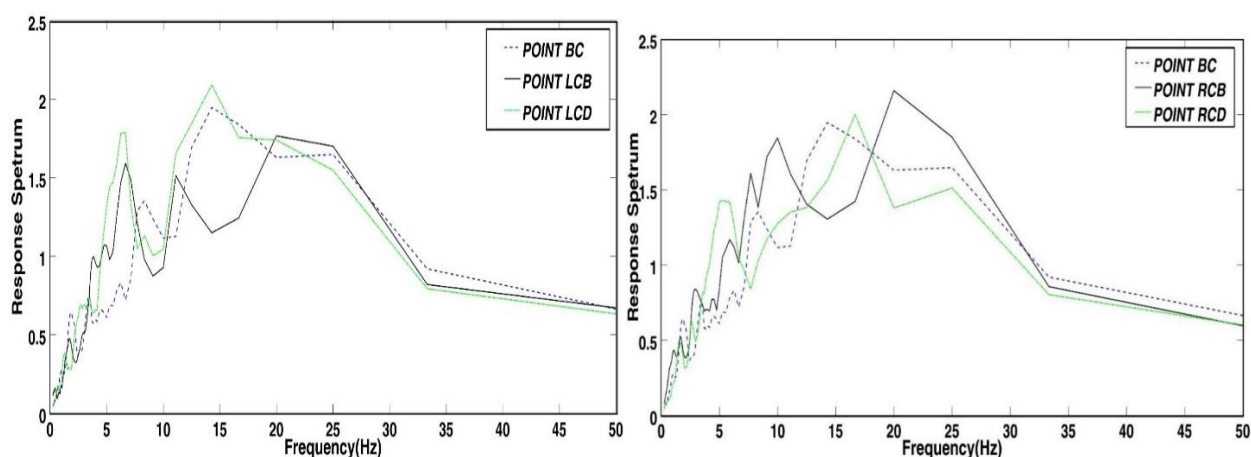
در شکل ۸ رکوردهای تاریخچه زمانی تحریک روی نقاط مشخص شده در سمت راست سطح ساختگاه سد پاکویما ارائه شده است. برای تولید رکوردهای تاریخچه زمانی در این حالت از تابع آماری که برای سطوح توپوگرافی دره در پژوهش حاضر ارائه شده استفاده شده است. در شکل ۹، طیف ارتباطی بین رکوردهای تاریخچه زمانی نقاط مختلف روی سطح دره به همراه طیف ارتباطی آماری، ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که طیف ارتباطی ارائه شده، تخمین نسبتا خوبی از طیف ارتباطی روی دره را ارائه می دهد و می تواند برای سطوح دره ای شکل مناسب باشد. در ادامه تحلیل های انجام شده در شکل ۱۰ مقایسه طیف پاسخ رکوردهای ساختگاهی در نقاط مختلف در دو سوی دره ارائه شده است. چنانکه در قسمتهای قبل نیز اشاره شد، پاسخ مشاهده شده برای نقاط با ارتفاع برابر در دو سوی دره متفاوت است که این رفتار به دلیل نسبت شکل متفاوت در دو طرف می باشد.



شکل ۸: تاریخچه زمانی رکوردهای تولید شده در ترم های شتاب و جابجایی روی نقاط قرار داده شده روی سمت راست دره.



شکل ۹: مقایسه بین تابع ارتباطی ارائه شده در این پژوهش و شتاب های تولید شده با استفاده از روش ارتعاش تصادفی روی ساختمان سد پاکویما.



شکل ۱۰: طیف پاسخ شتاب شبیه سازی شده با استفاده از روش ارتعاش تصادفی و مدل ارائه شده برای نقاط سمت چپ و سمت راست دره پاکویما.

در ادامه تحلیل های انجام شده، برای نشان دادن دقت تابع آماری ارائه شده در این پژوهش، مقایسه بین اختلاف تابع ارتباطی آماری و تابع ارتباطی سبزیک با تابع ارتباطی تحلیلی به صورت جداول ۲ و ۳ ارائه شد. برای این مقایسه، دو نقطه ابتدا و انتها روی دو نمودار در نظر گرفته شد. خطای کمتر در این دو نقطه روی دو نمودار تابع ارتباطی (نمودار تحلیلی و عددی) نشان دهنده انطباق بیشتر تابع ارتباطی آماری ارائه شده در این مقاله، برای سطوح دره ای شکل دارد.

جدول ۲- مقایسه اختلاف مشاهده شده، بین تابع ارتباطی رکوردهای شبیه سازی شده و مدل سبزیک برای نقاط مختلف.

نقطه انتها	نقطه شروع	نقاط تعیین شده روی دره
۲۰٪	۲۵٪	RCA
۱۴/۲۰٪	۲۵٪	RCB
۴٪	۵۰٪	RCC
۷۵٪	۶۰٪	RCD

جدول ۳- مقایسه اختلاف مشاهده شده، بین تابع ارتباطی رکوردهای شبیه سازی شده و مدل ارائه شده در این مقاله، برای نقاط مختلف.

نقطه انتها	نقطه شروع	نقاط تعیین شده روی دره
۱٪	۲۵٪	RCA
۴۲٪	۴٪	RCB
۹٪	۱٪	RCC
۱٪	۲٪	RCD

۷- نتیجه گیری

یکی از روش های پرکاربرد در تولید شتابهای غیر یکنواخت ساختگاهی، روش ارتعاش تصادفی بر مبنای توابع چگالی طیف توان می باشند. چنانکه اشاره شد، در این روش برای ارتباط بین تکیه گاههای مختلف از مدل های ارتباط استفاده می شود. بیشتر مدل های تجربی موجود از روی رکوردهای مسطح به دست آمده اند. در این پژوهش با استفاده از روش المان مرزی در حوزه زمان و تهیه مدل های مختلف از دره های مثلثی شکل، طیف های ارتباط در شرایط مختلف روی ساختگاه تعیین شد. از جمله مهمترین نتایج حاصل شده در این پژوهش عبارتند از:

- ۱- ارائه یک رابطه آماری برای محاسبه طیف ارتباط مناسب برای توپوگرافی دارای نامنظمی به شکل دره.
- ۲- برای تولید شتابهای غیر یکنواخت از یک تابع انتقال برای اعمال اثرات بزرگنمایی ساختگاهی استفاده شد. در اکثر تحقیقات انجام شده این پارامتر که از عوامل مهم در تولید شتابهای غیر یکنواخت می باشد، برابر یک در نظر گرفته شده است.
- ۳- تولید شتابهای غیر یکنواخت با استفاده از روش ارتعاش تصادفی با اعمال یک تابع ارتباطی موجود (مدل ساینیک) که برای سطوح مسطح مناسب می باشد و مقایسه با شتابهای غیر یکنواخت تولید شده با اعمال تابع ریاضی ارائه شده در این پژوهش که مناسب برای سطوح دارای عارضه می باشد.

مراجع

- [1] Tarinejad, R., NouriNavroud, H., Sobhkhiz, R., Isari, M., Mahjoub, H. (2018). 'Evaluation of seismic responses of an arch dam under non-uniform ground motion using random vibration', *Journal of Structural and Construction Engineering*, (), pp. -. doi: 10.22065/jsce.2018.114662.1435.
- [2] Tarinejad, R., Isari, M., TaghaviGhalesari, A. (In press-2017) A new boundary element solution to evaluate the geometric effects of the canyon site on the displacement response spectrum. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*.
- [3] Friedman M.B. and Shaw R.P. (1962) Diffraction of pulses by cylindrical obstacles of arbitrary cross section, *Journal of Applied Mechanics*, 29, 40-46.
- [4] Niwa Y., Fukui T., Kato S., Fujiki K. (1980) An application of the integral equation method to two-dimensional electrostatics, *Theory of Applied Mechanics*; 28,281-290.
- [5] Mansur W.J. (1983) A time-stepping technique to solve wave propagation problems using the boundary element method, PhD dissertation, Southampton University.
- [6] Antes H. (1985) A boundary element procedure for transient wave propagation in two-dimensional isotropic elastic media. *Finite Elements in Analysis and Design*, 1,313-322.

- [7] Mansur W.J. and Brebbia C.A. (1985) Transient electrostatics. Topics in Boundary Element Research. CA Brebbia, ed., Vol. 2: Time-dependent and Vibration Problems, chap 5, pp. 124-155.
- [8] Manolis G.D., Ahmad S., Banerjee P.K. (1985) Boundary element method implementation for three-dimensional elastodynamics. Elsevier Applied Science Publishers: London, 29-63.
- [9] Karabalis D.L. and Beskos D.E. (1984) Dynamic response of 3-D rigid surface foundations by time domain boundary element method, Earth. Eng. and Struc. Dyn., 12: 73-93.
- [10] Karabalis D.L. and Beskos D.E. (1986) Dynamic response of 3-D embedded foundations by the boundary element method. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 56(1), 91-119.
- [11] Karabalis D.L. and Beskos D.E. (1987) Three-dimensional soil-structure interaction by boundary element method. Topics in Boundary Element Research. CA Brebbia, ed., Vol. 4: Application in Geomechanics, chap 1, pp. 1-26.
- [12] Banerjee P.K., Ahmad S., Manolis G.D. (1986) Transient elastodynamic analysis of 3-D problems by boundary element method, Earth. Eng. and Struc. Dyn., 14: 933.
- [13] Ahmad S. and Banerjee P.K. (1987) Time-domain transient electrodynamic analysis of 3-D solids by BEM, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 26(8), 1709- 1728.
- [14] Coda H.B. and Venturini W.S. (1995) Three-dimensional transient BEM analysis. Computational Structures, 56: 751-
- [15] Rizos D.C. and Karabalis D.L. (1998) A time domain BEM for 3-D electrodynamic analysis using the B-spline fundamental solutions, Computational Mechanics, 22(1):108 - 115.
- [16] Marrero M. and Dominguez J. (2003) Numerical behavior of time domain BEM for three-dimensional transient electrodynamic problems. Engineering Analysis with Boundary Elements, 27, 39-48.
- [17] Marrero M. and Domínguez J. (2004) Time-domain BEM for three-dimensional fracture mechanics, Engineering Fracture Mechanics, 71(11), 1557-1575.
- [18] Kamalian M., Jafari M.K., Sohrabi-bidar A. (2006) Transient Site Response Analysis of Nonhomogeneous Two-Dimensional Topographic Features by BEM, Esteghlal Journal of Engineering, 24(2), 51-68, [In Persian].
- [19] Kamalian M., Jafari M.K., Sohrabi-Bidar A., Razmkhah A., Gatzmiri B. (2006) Time- Domain Two-Dimensional Site Response Analysis of Non-Homogeneous Topographic Structures by a Hybrid FE / BE Method, Soil Dyn. Earthq.
- [20] Sohrabi-Bidar ,A., Isari, M., Tarinejad, R., (In press-2017) Evaluation Topography Effect on the Pacoima Dam Site Using Boundary Element Method. Bulletin of Earthquake Science and Engineering. (In Persian).
- [21] Tarinejad, R., Isari, M., Alavi, S. (2017). 'The effects of the Widening Ratio of a Canyon on the Scattering of Seismic Waves', *Sharif Journal of Civil Engineering*, 33.2(2.1), pp. 93-105. doi: 10.24200/j30.2017.4547.
- [22] Tarinejad, R., Isari, M., Sohrabi-Bidar ,A. (In press-2018) A New Solution to Estimate the Time Delay on the Topographic Site Using Time Domain 3D Boundary Element Method. Earthquake Engineering and Engineering Vibration.

[23] Isari, M., Tarinejad, R., Sohrabi-Bidar, A., Alavi, S. (2018). 'Generation of Non-uniform support accelerations of topographic site using one recorded accelerogram', *Journal of Structural and Construction Engineering*, (), pp. -. doi: 10.22065/jsce.2018.121279.1487. (In Persian).

[24] Isari, M., Tarinejad, R., Sohrabi-Bidar, A. (In press-2018). ' Extension of Algorithm for Support Non-Uniform Record Using Time Domain 3D Boundary Elements Method', *Journal of Civil and Environmental Engineering*, (In Persian).

[25] K. Sobczyk. (1991) "Stochastic Wave Propagation, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.

[26] Bi, K. and Hao, H. (2011) "Influence of irregular topography and random soil properties on coherency loss of spatial seismic ground motions", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **40**,1045–1061.