

نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

تولید شتابهای غیر یکنواخت تکیه گاهی با استفاده از یک شتاب نگاشت ثبت شده بر روی ساختگاه

همگن

محسن ایثاری^۱، رضا تاری نژاد^{۲*}، عبدالله سهرابی بیدار^۳، سید امیر علوی^۴

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

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

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

۴-دانشجوی دکتری عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

چکیده

در این پژوهش، امکان تولید شتاب های غیر یکنواخت تکیه گاهی روی ساختگاه واقعی با استفاده از یک شتاب نگاشت ثبت شده مورد بررسی قرار گرفت. عوامل مختلفی روی تحریکهای غیر یکنواخت ایجاد شده روی یک ساختگاه موثر می باشند، از جمله این عوامل: تاخیر زمانی بین امواج رسیده به کف دره و نقاط در ترازهای بالاتر می باشد که موجب اختلاف فاز و اختلاف دامنه در امواج رسیده به سطح زمین می شود. یکی دیگر از عوامل مهم در تولید شتابهای غیر یکنواخت، توابع بزرگنمایی می باشند. تاکنون توابع بزرگنمایی مختلفی برای سطوح توپوگرافیک ارائه شده اند. در پژوهش حاضر ابتدا با استفاده از روش المان مرزی در حوزه زمان (کد هیبرید)، مدلهای دو بعدی از ساختگاه تهیه و تحت امواج ریکر در فرکانسهای غالب مختلف، سرعتهای موج برشی مختلف، نسبت شکلهای مختلف بررسی و خروجی های نقاط در ترازهای مختلف به دست آمد. سپس با استفاده از تحلیل های آماری بسیار، روابط آماری برای محاسبه تاخیر زمانی بین رکوردهای تکیه گاهی روی سطوح دره ای شکل به دست آمد. برای بررسی دقت این روابط از رکوردهای ثبت شده در طی زلزله های مختلف روی ساختگاه پاکویما استفاده شد. سپس در ادامه با استفاده از یک روش عددی در کنار یک تابع بزرگنمایی موجود، شتابهای غیر یکنواخت روی این ساختگاه واقعی تولید شد. نتایج به دست آمده نشان می دهد که روابط ارائه شده می تواند با دقت مناسبی برای محاسبه تاخیر زمانی بکار گرفته شود. علاوه بر این با داشتن یک تابع بزرگنمایی متناسب با ساختگاه، برای تولید شتابهای غیر یکنواخت بر روی یک ساختگاه از روی یک رکورد واقعی ثبت شده بکار گرفته شود و هر چه قدر این تابع بزرگنمایی دقیق تر باشد، نتایج به واقعیت نزدیک تر خواهد بود. از مقایسه خطای ایجاد شده در هر دو روش ارائه شده در این پژوهش می توان مشاهده کرد که استفاده از تابع تاخیر زمانی ارائه شده در این پژوهش نسبت به تاخیر زمانی ثابت برای تولید رکورد تکیه گاهی منجر به کاهش خطا شده است.

کلمات کلیدی: شتابهای غیر یکنواخت، اثرات ساختگاهی، تاخیر زمانی، تابع بزرگنمایی، المان مرزی

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:

شناسه دیجیتال:	سابقه مقاله:				
10.22065/jsce.2018.121279.1487	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
doi: 10.22065/jsce.2018.121279.1487	۱۳۹۶/۱۲/۱۲	۱۳۹۷/۰۶/۳۰	۱۳۹۷/۰۷/۲۰	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۳۹۹/۰۴/۰۱
			*نویسنده مسئول:		
			رضا تاری نژاد		
			پست الکترونیکی:		
			r_tarinejad@tabrizu.ac.ir		

Generation of Non-uniform Accelerations on topographic site Using one Recorded accelerogram

Mohsen Isari¹, Reza Tarinejad ^{*2}, Abdollah Sohrabi-Bidar ³, Seyed Amir Alavi ⁴

1- Ph.D. Student, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

3- Associate Professor, Schools of Geology, University College of Science, University of Tehran, Iran.

4- Ph.D. Student, Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University of Tehran, Iran.

ABSTRACT

This study investigates method of producing non-uniform support acceleration in actual site condition. Factors affecting the non-uniform excitation of topographic site include time delay between the arrival time of incident wave at the canyon floor and any particular point at higher elevation, causing phase difference. Another important factor in generating non-uniform accelerations is the topography amplification. Therefore, in the present study, two dimensional models of a canyon site subjected to Ricker wave with different predominant frequencies, shear wave velocities, shape ratios have been developed and the results of boundary element analyses in time domain (HYBRID code) were obtained in different elevations on the canyon surface. Then, by conducting a series of statistical analyses (Symbolic Regression and Genetic Programming) on the results from numerous presumed cases, the relationships for calculating the time delay between support responses of V-shaped canyons was obtained. To verify the accuracy of the proposed relationships, the results were compared with the records from Pacoima dam site during two different earthquakes and good agreement of the results was observed. Eventually, by implementing the presented relationships into random vibration method, non-uniform acceleration of the site was simulated. The results indicate that the proposed relationships have an appropriate level of accuracy to calculate time delay on the V-shaped canyons.

ARTICLE INFO

Receive Date: 03 March 2018

Revise Date: 21 September 2018

Accept Date: 12 October 2018

Keywords:

Non-uniform excitation

Site Effect

Time Delay

Amplification

Boundary element

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.121279.1487

*Corresponding author: Reza Tarinejad

Email address: r_tarinejad@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

وجود عوارض و نامنظمی های توپوگرافی در سطح زمین منجر به تفرق، انکسار و انعکاس امواج لرزه ای رسیده به سطح زمین می شود. در نتیجه اختلالاتی در انتشار امواج زلزله به وجود آمده که باعث می شود، در سازه های بزرگ و طویل مانند پلها و سد های بزرگ که سطح تماس گسترده ای با سطح زمین دارند، تغییرات عمده در دامنه و فاز تحریک در تکیه گاه های مختلف ایجاد شود. شاید بتوان اولین مطالعات تئوریک راجع به موضوع تاثیر انتشار امواج در هنگام حرکات شدید زمین را مربوط به سال ۱۹۶۰ دانست [۱]. تریفوناک [۲] مسئله تفرق امواج SH را برای دره های با هندسه نیم دایره ای و نیم بیضی، با روش تحلیلی حل کرد. جلی و همکاران [۳] در سال ۱۹۸۸ به بررسی اثرات ساختگاهی از نظر تئوری پرداختند و نشان دادند که اکثر روشهای شبیه سازی عددی ضرایب تشدید کمتری را نسبت به مقادیر ثبت شده، نتیجه می دهند. یکی از روشهای قدرتمند عددی برای بررسی مساله انتشار امواج، روش المان مرزی می باشد. محققین بسیاری از این روش برای بررسی اثرات بزرگنمایی توپوگرافی استفاده کردند، که در ادامه به مواردی از آنها اشاره می شود. کمالیان و همکاران [۴ و ۵] از جمله محققینی بودند که از روش المان مرزی در حوزه زمان برای بررسی اثرات ساختگاهی استفاده کردند. ایشان در تحلیل های خود به این نتیجه مهم رسیدند که برای رسیدن به دقت همسان گام زمانی در روش هیبرید بایستی به اندازه حداقل نصف گام زمانی مورد استفاده در روش المان مرزی باشد. علاوه بر این، کمالیان و همکاران [۶] مطالعات پارامتریکی را به منظور بررسی رفتار لرزه ای تپه های نیم سینوسی، نیم بیضی و دوزنقه ای شکل در برابر امواج قائم SV و P انجام دادند. در این بررسی ها که با استفاده از روش المان مرزی انجام گردید تاثیرات نسبت شکل، نسبت طول موج برخوردی به ابعاد عارضه و ضریب پواسون به طور جداگانه در رفتار دینامیکی تپه های یاد شده مورد بررسی قرار گرفتند. سهرابی بیدار و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۹ به ارائه فرمولاسیون روش المان مرزی سه بعدی در حوزه زمان برای تحلیل مسئله تفرق امواج لرزه ای از ساختگاههای توپوگرافی پرداختند. ایشان به منظور نشان دادن دقت فرمولاسیون ارائه شده تحلیل های متعددی روی انواع ساختگاهها شامل دره و تپه انجام دادند. در ادامه سهرابی بیدار و همکاران [۸] با استفاده از روش المان مرزی سه بعدی مستقیم در حوزه زمان پاسخ دره سه بعدی گوسی شکل را به صورت پارامتریک مورد مطالعه قرار دادند. طول موج و هندسه ساختگاه و تا حدودی نوع موج مهاجم پارامترهای موثر بر بزرگنمایی این نوع تپه ها شناسایی شدند. دره های دو بعدی بزرگنمایی و کوچکنمایی کوچکتری را نسبت به دره های سه بعدی با هندسه و ابعاد مشابه نشان می دهند. تازی نژاد و همکاران [۹ و ۱۰] در تحقیقات خود، به بررسی اثرات بزرگنمایی توپوگرافی بر ساختگاه دره ای با استفاده از روش المان مرزی سه بعدی در حوزه فرکانس پرداخته اند. 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 کرده اند.

یکی از روش های 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 می دهد که به انتخاب شتاب ورودی وابستگی ندارد. تکنیک های پردازش سیگنال برای تغییرات تکیه گاهی داده های لرزه ای بر اساس تابع ارتباط به صورت پارامتریک انجام شد. تحقیقات زیادی برای پیش بینی تغییرات مکانی زمین لرزه و بررسی رفتار لرزه ای ساختگاه تحت تحریک غیر یکنواخت براساس روش ارتعاش تصادفی انجام شده است. در این روش ارتباط بین جابجایی های تکیه گاههای مختلف به صورت تابع ارتباطی بیان می شود. محققین زیادی مدلهای مختلف تابع ارتباطی را تاکنون ارائه کرده اند. که از جمله آنها می توان به هاریچاندان و ونمارک [۱۱]، لوکو و وانگ [۱۲]، آبراهامسون [۱۳] و درکریقیان و همکاران [۱۴] اشاره کرد. در ادامه درکریقیان [۱۵] در سال ۱۹۹۲ از روش

طیفی برای بررسی تحریک غیر یکنواخت استفاده کردند. ایشان در روش خود اثرات عبور امواج، شرایط محیطی و کاهش همبستگی را اعمال کردند. هاریچاندران و همکاران [۱۶] به بررسی اثرات تحریک متفاوت تکیه گاهی روی پلها با دهانه های بلند پرداختند. ژانگ و همکاران [۱۷] با استفاده از روش ارتعاش تصادفی، الگوریتمی را برای پاسخ لرزه ای سازه ها شامل اثرات انتشار موج، تفرق امواج و اثرات ساختگاهی ارائه کردند.

در پژوهش حاضر سعی بر این است که پاسخ لرزه ای مدلهایی از دره های ۷ شکل را با استفاده از روش المان مرزی در حوزه زمان تحت امواج برشی ریکر مورد مطالعه قرار داد. سپس خروجی های روی سطح دره ها را، پردازش و در نقاط با ترازهای ارتفاعی مختلف علاوه بر محاسبه تاخیر زمانی و تابع بزرگنمایی به عنوان دو پارامتر تاثیرگذار در تحریک غیر یکنواخت تکیه گاهی بتوان با استفاده از پردازش های آماری، روابط ریاضی برای محاسبه تحریک غیر یکنواخت تکیه گاهی که قابل استفاده روی توپوگرافی های مختلف باشد، ارائه کرد. در ادامه با استفاده از این توابع و از روی یک شتاب نگاشت ثبت شده روی ساختگاه ۷ شکل، امکان تولید شتابهای غیر یکنواخت در سایر نقاط را بررسی کرد.

۲- متدولوژی

برای بررسی اثرات جابجایی های غیر یکنواخت روی پاسخ لرزه ای یک سد اطلاعات جابجایی زمین لرزه در امتداد دیواره دره مورد نیاز خواهد بود. چنین اطلاعاتی در طول یک زمین لرزه در ساختگاه یک سد به ندرت به ثبت رسیده است و عموماً تعداد داده های ثبت شده نیز به کفایت انجام تحلیل غیر یکنواخت را نمی نماید. ضمن آنکه روش درون یابی چند جمله ای بین نقاط ثبت شده، برای دستیابی به اطلاعات نقاط مابین، به علت پیچیدگی های نحوه عملکرد امواج در برخورد با توپوگرافی دره و الگوی تغییرات جابجایی های زمین مناسب نیست [۹]. آلوز [۱۸] در سال ۲۰۰۵ مساله تحریک غیر یکنواخت تکیه گاهی را با دیدگاه متفاوتی بررسی کرد. ایشان در پژوهش خود با استفاده از توابع انتقال که در برگیرنده دو کمیت بزرگنمایی و تاخیر زمانی می باشند، و با فرض انتشار عمودی امواج به ارائه روشی برای تولید شتابهای غیر یکنواخت تکیه گاهی از روی یک رکوردهای واقع در پایین ترین نقطه دره ساختگاه سد پاکویما (شکل ۱) و دو رکورد در دوسمت دیواره دیواره دره آن ارائه شده است. در نتیجه در این روش برای برآورد شتاب در طول دیواره دره حداقل نیاز به سه رکورد میدان آزاد ثبت شده در ساختگاه می باشد. آلوز نتیجه گرفت پاسخ های حاصل از تحریک غیر یکنواخت با پاسخ های به دست آمده از تحریک یکنواخت متفاوت میباشد [۹]. در سال ۱۹۷۷، روی بدنه این سد نزدیک به ۱۷ شتاب نگار در موقعیت های مختلف نصب شد (شکل ۳-۳) [۹].



شکل ۱: موقعیت مکانی سد پاکویما [۲۳]

آلوز در ادامه پژوهش خود روشی برای میانه یابی شتابهای ثبت شده موجود در دیواره دره و کف آن، بین دو ایستگاه شتاب سنج ارائه کرده است. روش ارائه شده برای ساختگاه هایی با تعداد کافی شتاب سنج نصب شده می تواند کارائی داشته باشد. کارائی روش با مقایسه نتایج تحلیل های عددی پاسخ و داده های ثبت شده طی دو زلزله در سد پاکویما مورد بررسی قرار گرفته است. براساس روش آلوز برای بازسازی رکوردهای متناظر با کانالهای ۱۲ تا ۱۷ (این کانالها محل قرار گیری شتاب سنج ها می باشند که در شکل ۳ ارائه شده اند) می توان از دو پارامتر مهم بزرگنمایی و تاخیر زمانی استفاده کرد. این کار در حوزه فرکانس انجام می شود. منظور از بزرگنمایی دامنه تابع انتقال بین یک رکورد پایه و یک رکورد تکیه گاهی می باشد. بنابراین می توان رکوردهای تکیه گاهی را با داشتن این دو پارامتر از طریق رابطه ۱ باسازی کرد [۱۸].

$$A_n(\omega) = Amp_{n,m}(\omega) e^{-i\omega\tau_{n,m}(\omega)} A_m(\omega) \quad (1)$$

در این رابطه $A_n(\omega)$ و $A_m(\omega)$ به ترتیب تبدیل فوریه شتابهای تکیه گاهی و پایه می باشند. $Amp_{n,m}(\omega)$ تابع بزرگنمایی و $\tau_{n,m}$ تاخیر زمانی بین دو رکورد می باشد. مقدار تاخیر زمانی ثابت بین شتاب $(a_n(t))$ در ایستگاه n (ارتفاع بالاتر) و شتاب $(a_m(t))$ در ایستگاه m (ارتفاع پایین تر) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$c_{n,m}(\tau) = \int_0^d a_n(t+\tau) a_m(t) dt \quad -d \leq \tau \leq d \quad (2)$$

$$\tau_{n,m} = \{ \tau : c_{n,m}(\tau) \rightarrow \max \}$$

در این رابطه، $c_{n,m}(\tau)$ همبستگی متقاطع دو رکورد n، m و d طول مدت رکورد شتاب می باشد. بنابراین تاخیر زمانی بین دو رکورد m و n معادل است با time lag که در آن تابع دیگر همبستگی ماکزیمم می شود. مقدار تاخیر زمانی مثبت نشان دهنده عقب افتادگی زمانی حرکت در ایستگاه بالاتر نسبت به ایستگاه پایین تر است.

در ادامه رابطه آلود برای محاسبه شتاب میانه یابی شده در ایستگاه های میانی با ارتفاع y ارائه می شود.

$$A_{node}(\omega) = \left[\frac{y - y_n}{y_n - y_m} A_n(\omega) e^{i\omega\tau_{n,m}(\omega)} + \frac{y_n - y}{y_n - y_m} A_m(\omega) \right] e^{-i \frac{y - y_m}{y_n - y_m} \omega\tau_{n,m}(\omega)} \quad (3)$$

در این رابطه $A_{node}(\omega)$ تبدیل فوریه شتاب میانه یابی شده در ایستگاه مورد نظر، y_n و y_m ارتفاع نقاطی است که شتاب را ثبت کرده اند. همانطور که مشاهده می شود مقادیر شتابها بر اساس اختلاف ارتفاع میانه یابی شده اند. رابطه میانه یابی ارائه شده در مواردی دارای پاسخ های مناسب و در مواردی نیز پاسخ های چندان دقیقی نمی دهد. در پژوهش حاضر سعی بر این است که بتوان با استفاده از تحلیل های رگرسیونی (برای استخراج روابط ریاضی از تحلیل های سیمبولیک رگرسیون در نرم افزار SPSS بهره گرفته شد)، روابط آماری برای محاسبه تاخیر زمانی بین نقاط تکیه گاهی مختلف ارائه کرد.

چنانکه اشاره شد، برای بررسی اثرات ساختمانی روی رفتار لرزه ای سازه های 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 لرزه ای عارضه سطحی از کد کامپیوتری اجزای مرزی در قالب نرم افزار دوبعدی Hybrid [۷و۸] که در حوزه زمان می باشد 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، هر یک از روشهای اجزای مرزی، اجزای محدود و ترکیب آنها را مورد استفاده قرار دهد. به منظور بررسی پاسخ لرزه ای ساختگاه مدل شده، از امواج مهاجم قائم ریکر SV که موج برشی با ارتعاش ذرات در راستای محور دره (x) می باشد، استفاده شد. رابطه (۴) معادله موج ریکر را بیان می کند.

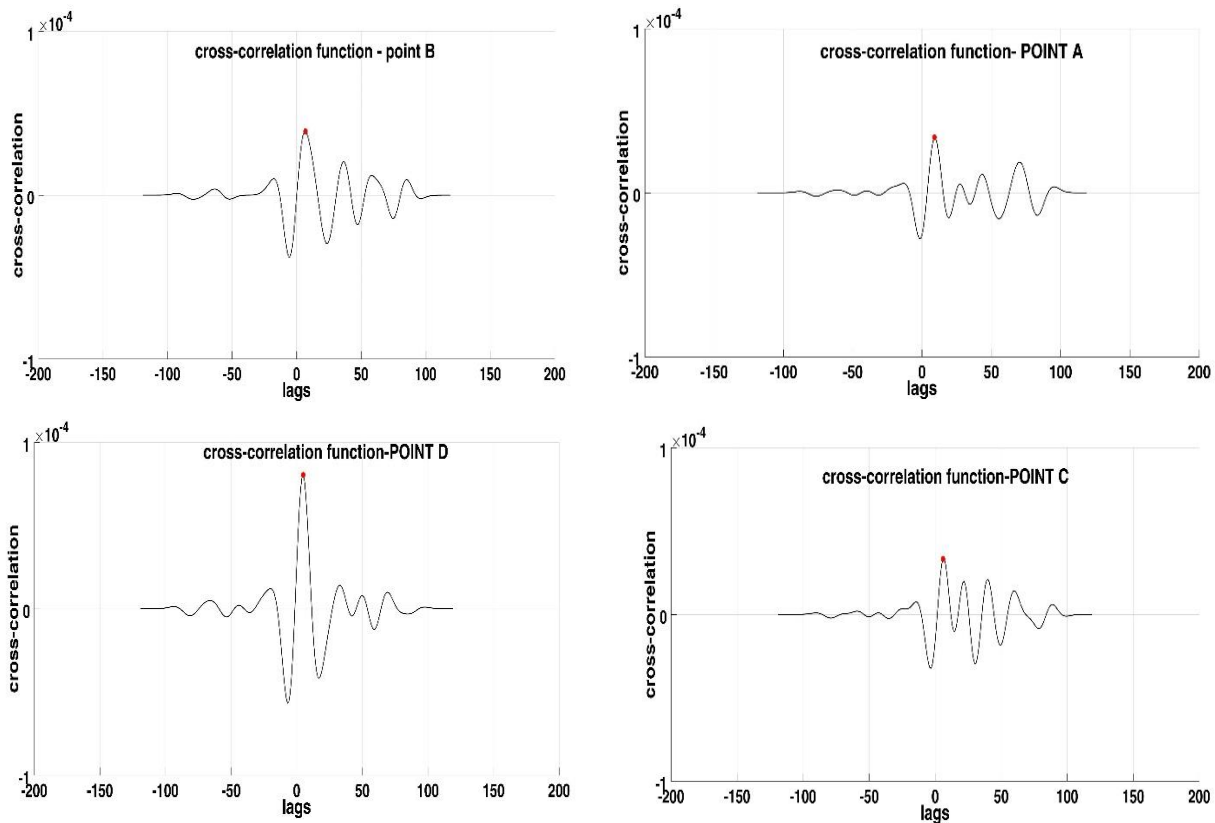
$$f(t) = A_{max} \times [1 - 2 \times (\pi \times f_p \times (t - t_0))^2] \times e^{-(\pi \times f_p \times (t - t_0))^2} \quad (4)$$

در این رابطه f_p ، t_0 و A_{max} به ترتیب فرکانس غالب^۱، پارامتر شیفت زمانی^۲ و بیشینه دامنه^۳ را بیان می دارند. $f(t)$ دامنه حرکت ناشی از امواج مهاجم است که در همه گره های مرزی وارد می گردد. 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 (۳-d) نقاطی از عرض دره V شکل که نمودارهای تغییر مکان آنها ارائه خواهد شد، نشان می دهد. (نسبت شکل $h/b=SR$). برای ارائه یک رابطه ریاضی دقیق برای محاسبه تاخیر زمانی، باید داده های کافی از تاخیر زمانی بین زوج نقاط مختلف روی ساختگاه سازه در دسترس باشد. برای این منظور ۸ مدل مختلف از دره های دو بعدی تهیه و با استفاده از روش المان مرزی در حوزه زمان پاسخ لرزه ای آن ها تحت امواج مهاجم ریکر حاصل شد. تاخیر زمانی بین زوج نقاط در ترازهای مختلف ارتفاعی با استفاده از تابع همبستگی متقاطع، همانند شکل ۲ و جدول ۱ (برای جلوگیری از افزایش حجم مقاله فقط به یک مورد اشاره می شود) محاسبه شد.

¹Predominant Frequency

² Time Shift Parameter

³Maximum Amplitude



شکل ۲ نمودار همبستگی مقاطع رکوردهای تکیه گاهی مربوط به نقاط A,B,C و D در فرکانس غالب ۱/۵

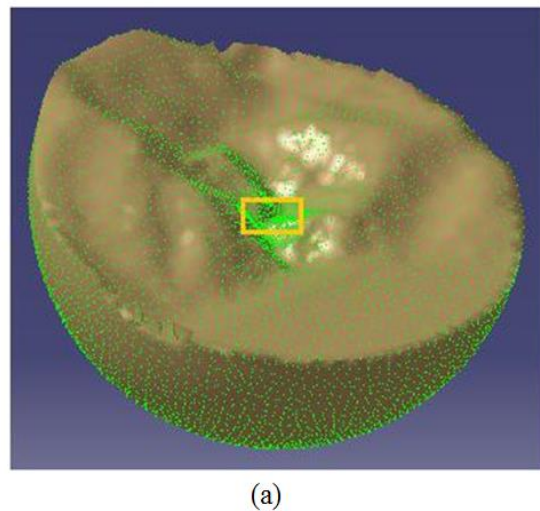
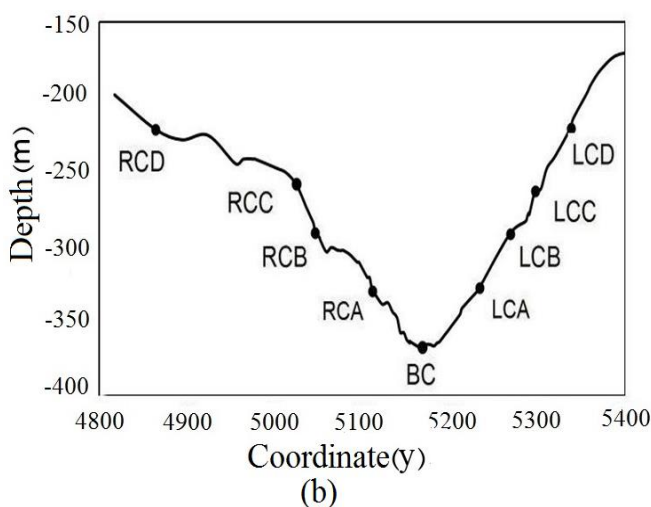
جدول ۱: مقادیر تاخیر زمانی محاسبه شده بین نقاط در ترازهای ارتفاعی مختلف با کف دره و موج SV

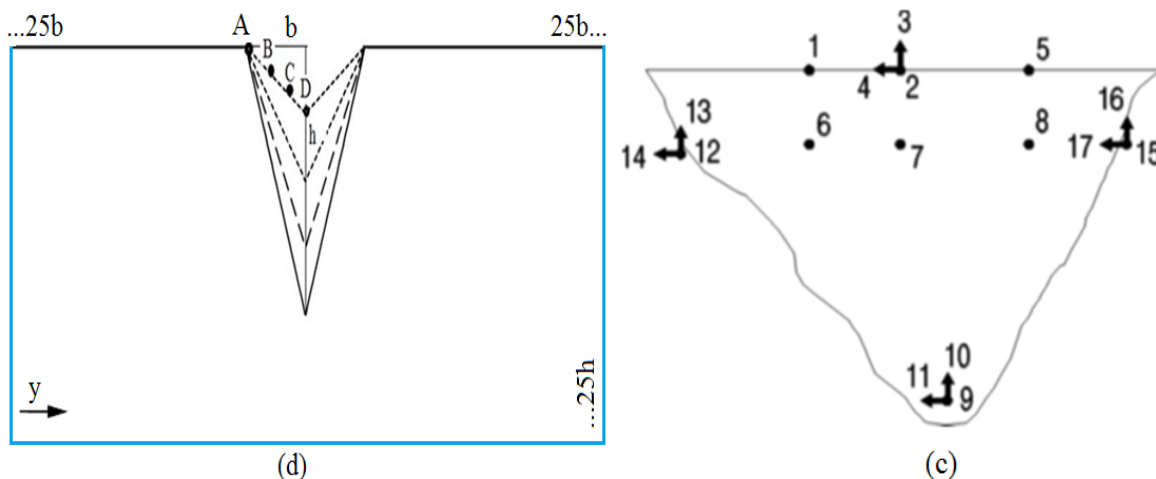
ΔH	Fp=1.5	Fp=2	Fp=3	Fp=4	Fp=5.5	Fp=6.5	Fp=7.5	Fp=9
0	0	0	0	0	0	0	0	0
61	0/075	0/05	0/05	0/025	0/03	0/03	0/03	0/03
91	0/12	0/075	0/065	0/05	0/045	0/045	0/06	0/06
120	0/14	0/075	0/07	0/05	0/06	0/075	0/075	0/075
157	0/15	0/09	0/075	0/075	0/09	0/09	0/09	0/09
175	0/15	0/1	0/1	0/1	0/105	0/105	0/12	0/12
223	0/17	0/125	0/125	0/125	0/135	0/135	0/135	0/135
266	0/175	0/175	0/15	0/15	0/15	0/165	0/165	0/165
286	0/2	0/175	0/175	0/175	0/165	0/18	0/18	0/18
332	0/225	0/225	0/2	0/2	0/195	0/195	0/195	0/21

در نهایت با داشتن این خروجی ها و استفاده از نرم افزارهای قدرتمند آماری موجود روابط ریاضی (رابطه ۵) برای محاسبه تاخیر زمانی به دست آمد. برای هر نقطه با توجه به خصوصیات هندسی همان نقطه یعنی نسبت شکل در آن نقطه و اختلاف ارتفاع تا کف دره و همچنین داشتن فرکانس غالب موج ورودی و سرعت موج برشی در محیط می توان رکورد شتاب یا جابجایی در نقطه مورد بررسی را به دست آورد. رابطه ۵ برای محاسبه تاخیر زمانی، شامل پارامترهای هندسی ساختگاه، شرایط محیطی و همچنین خصوصیات موج ورودی می باشد. می توان مشاهده کرد که این رابطه اکثر عوامل موثر در تحریک غیر یکنواخت تکیه گاهی را شامل شده است. از آنجا که در این بخش هدف ایجاد ارتباط بین پاسخ ساختگاه و پارامترهای موثر بر آن همچون فرکانس، ارتفاع و سرعت موج برشی می باشد، با اعمال رگرسیون چندگانه بر پاسخ ها، روابط بستگی ارائه شده اند. دقت نتایج با استفاده از پارامترهای آماری همچون ضریب همبستگی، انحراف معیار و خطای استاندارد بررسی شده و روابط مربوطه حاصل گردید [۱۹].

$$\tau_{n,m} = 0.00461 + 2.184 * (h_{n,m} / c) * SR - 0.0196 * (1/f_p) - 1.17259 * (h_{n,m} / c) * SR^2 \quad (5)$$

در این رابطه $h_{n,m}$ اختلاف ارتفاع نقاط با کف دره، c سرعت موج برشی، SR نسبت شکل و f_p فرکانس غالب موج ورودی می باشد.





شکل ۳: (a) مدل سه بعدی از دره پاکویما، (b) پروفیل عرضی دره، (c) کانالهای ثبت شتاب مختلف روی دره، (d) دره های دوبعدی مدل شده.

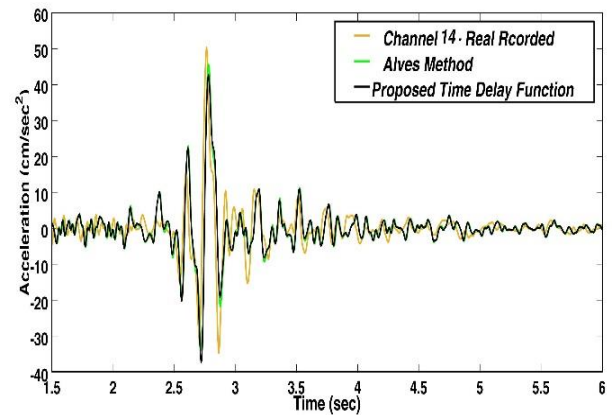
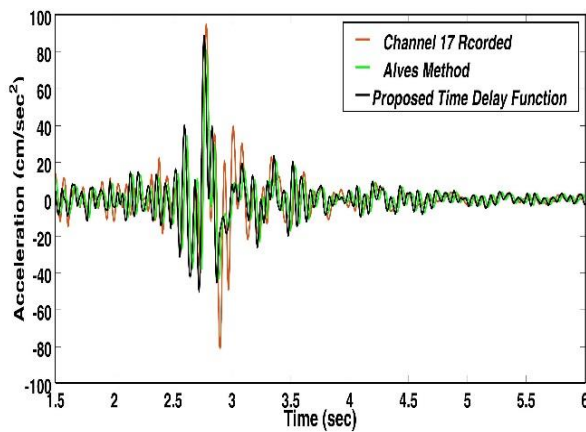
برای بررسی کارائی رابطه آماری ارائه شده، از رکوردهای ثبت شده روی ساختگاه سد پاکویما استفاده شده است. سد پاکویما یک سد بتنی قوسی به ارتفاع ۱۱۳ متر و طول تاج ۱۸۰ متر است که در کوه‌های سن گابریل و در ۵ مایلی شمال سن فرناندو و در نزدیکی لس آنجلس و جنوب کالیفرنیا، واقع شده است. تعدد شتاب سنج‌های نصب شده در 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 [۹]. ابتدا پروفیل توپوگرافی ساختگاه بر اساس مدل واقعی تهیه می‌شود (جدول ۲). مطابق شکل (۳-d) چهار نقطه در دو سمت دره که دارای تراز ارتفاعی مساوی می‌باشند و یک نقطه در کف دره تعیین می‌شود. 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 می‌شود.

جدول ۲- مشخصات نقاط تعیین شده در شکل ۱

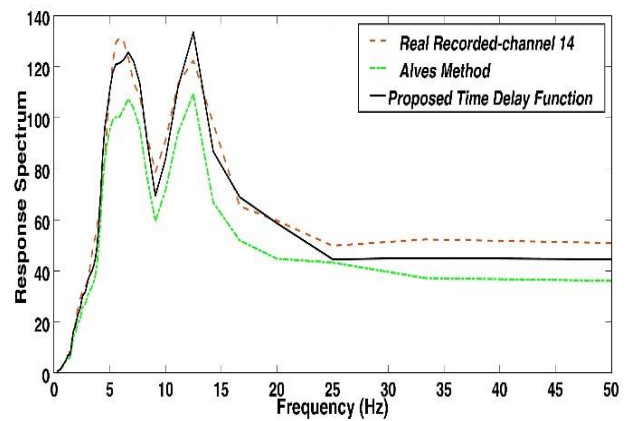
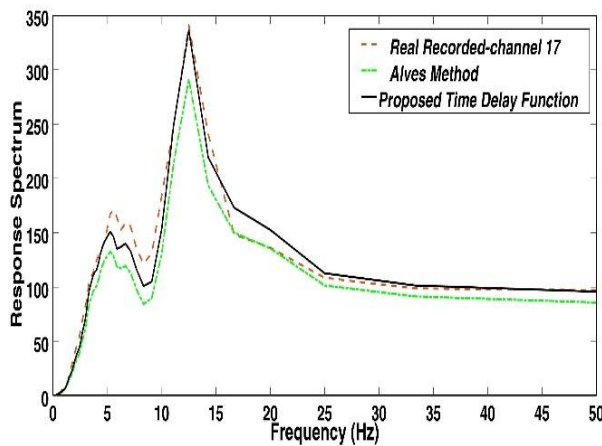
نسبت شکل (SR)	ارتفاع نقاط نسبت به کف دره (m)	زوج نقاط تعیین شده روی دره
(سمت چپ- راست)		
0	0	BC
۰/۵۴ - ۰/۶۷	37	RCA-LCA
0/548 - 0/645	66	RCB-LCB
0/657 - 0/694	93	RCC-LCC
0/47 - 0/837	144	RCD-LCD

۳- بررسی کارائی تابع تاخیر زمانی

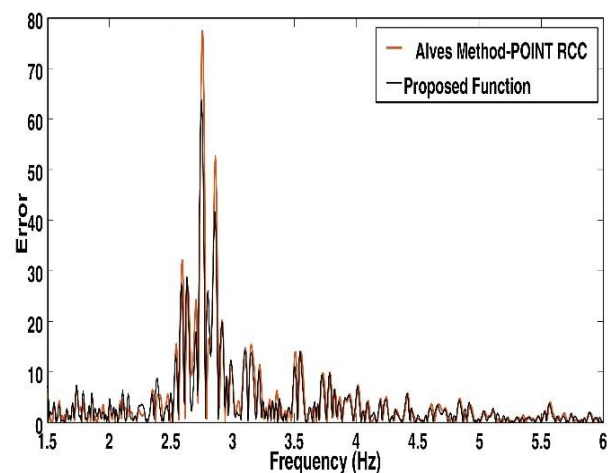
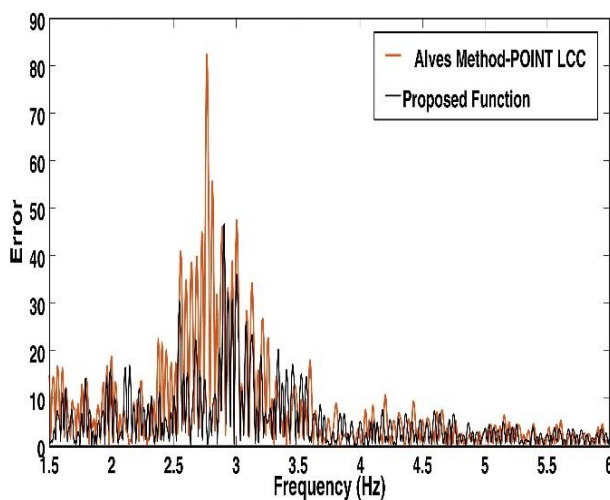
چنانکه اشاره شد، هدف از ارائه رابطه آماری برای محاسبه تاخیر این است که بتوان با قرار دادن در رابطه ۱، رابطه جایگزین برای روش میانه یابی (رابطه ۳) ارائه کرد. چنانکه در شکل ۴ دیده می شود، در قسمت اول شتابهای ثبت شده روی کانالهای ۱۷ و ۱۴ در زلزله سال ۲۰۰۱ در دو سمت دره با شتابهای تولید شده با استفاده از رابطه آلوز (رابطه ۱) که در آن تاخیر زمانی بین دو ایستگاه با استفاده از تابع همبستگی متقاطع بین دو رکورد ثبت شده تعیین شده و همچنین شتاب تولید شده با استفاده از تابع تاخیر زمانی ریاضی ارائه شده که با قرار دادن این مقدار در رابطه اصلی (رابطه ۱)، مقایسه شده است. برای محاسبه تاخیر زمانی بین دو سیگنال از روی رابطه ریاضی ارائه شده، سرعت موج برشی ۲۰۰۰ متر بر ثانیه (تاری نژاد و همکاران ۲۰۱۳) و فرکانس غالب موج ورودی کانال ۱۱ برابر ۶/۲۵ هرتز در نظر گرفته شده است. چنانکه مشاهده می شود، شتابهای تولید شده در مقایسه با شتاب ثبت شده از انطباق قابل قبولی برخوردار می باشند. در شکل ۴(ب) مقایسه ای بین طیف پاسخ شتاب های تولید شده و ثبت شده در روی این دو کانال انجام شده است. چنانکه دیده می شود، انطباق خوبی بین طیف های پاسخ رکوردهای تولید شده ایجاد شده است. در شکل ۴(ج)، خطای ایجاد شده با استفاده از قدرمطلق تفاضل بین دو شتاب نگاشت تولیدی و ثبت شده ارائه شده است. قابل مشاهده است که میزان خطای ایجاد شده با استفاده از هر دو روش بسیار به هم نزدیک هستند. در ادامه تحلیل های انجام شده، به مقایسه شتاب تولید شده با استفاده از روش میانه یابی آلوز و شتاب تولید شده با استفاده از مقادیر محاسبه شده تاخیر زمانی توسط رابطه آماری که در رابطه (۱) استفاده می شود، پرداخته می شود. شکل ۵ شتابهای تولید شده با استفاده از دو روش میانه یابی و روش استفاده از تابع آماری برای دو نقطه در امتداد دیواره سد (بین کانالهای ۱۱ - ۱۷ و ۱۱ - ۱۴) و یک نقطه خارج از محدوده دیواره سد (ارتفاعی بالاتر از کانال ۱۷ و ۱۴) طی زلزله ۱۳ ژانویه سال ۲۰۰۱ را نشان می دهد. چنانکه می توان دید، برای نقاط LCA, RCA, RCB شتابهای تولیدی انطباق خوبی مشاهده می شود. ولی برای نقاط بالاتر RCD, LCD, RCD تا حدودی از انطباق نتایج کاسته می شود. در تمامی موارد بررسی شده رکوردهای ثبت شده و تولید شده در سمت چپ دره مقادیر بالاتری را نسبت به سمت راست دره نشان می دهند. علت این پدیده می تواند به دلیل خصوصیات هندسی توپوگرافی باشد. نتایج به دست آمده در این قسمت نشان می دهد که، برای نقاط بین دو ایستگاه انطباق خوبی بین شتابهای تولید شده با دو روش ذکر شده مشاهده می شود. برای نقاط خارج از بین دو ایستگاه از نظر مقدار انطباق خوبی مشاهده می شود ولی از نظر تاخیر زمانی تا حدودی بین دو رکورد اختلاف وجود دارد. در واقع می توان نتیجه گرفت که استفاده از تاخیر زمانی ثابت مطابق آنچه در روش آلوز انجام می شود، نسبت به استفاده از تابع تاخیر زمانی ریاضی در هر تراز ارتفاعی منجر به افزایش خطا در تولید رکورد تکیه گاهی غیر یکنواخت نسبت به رکوردهای واقعی ثبت شده، روی ساختگاه دره پاکویما شده است.



(الف)

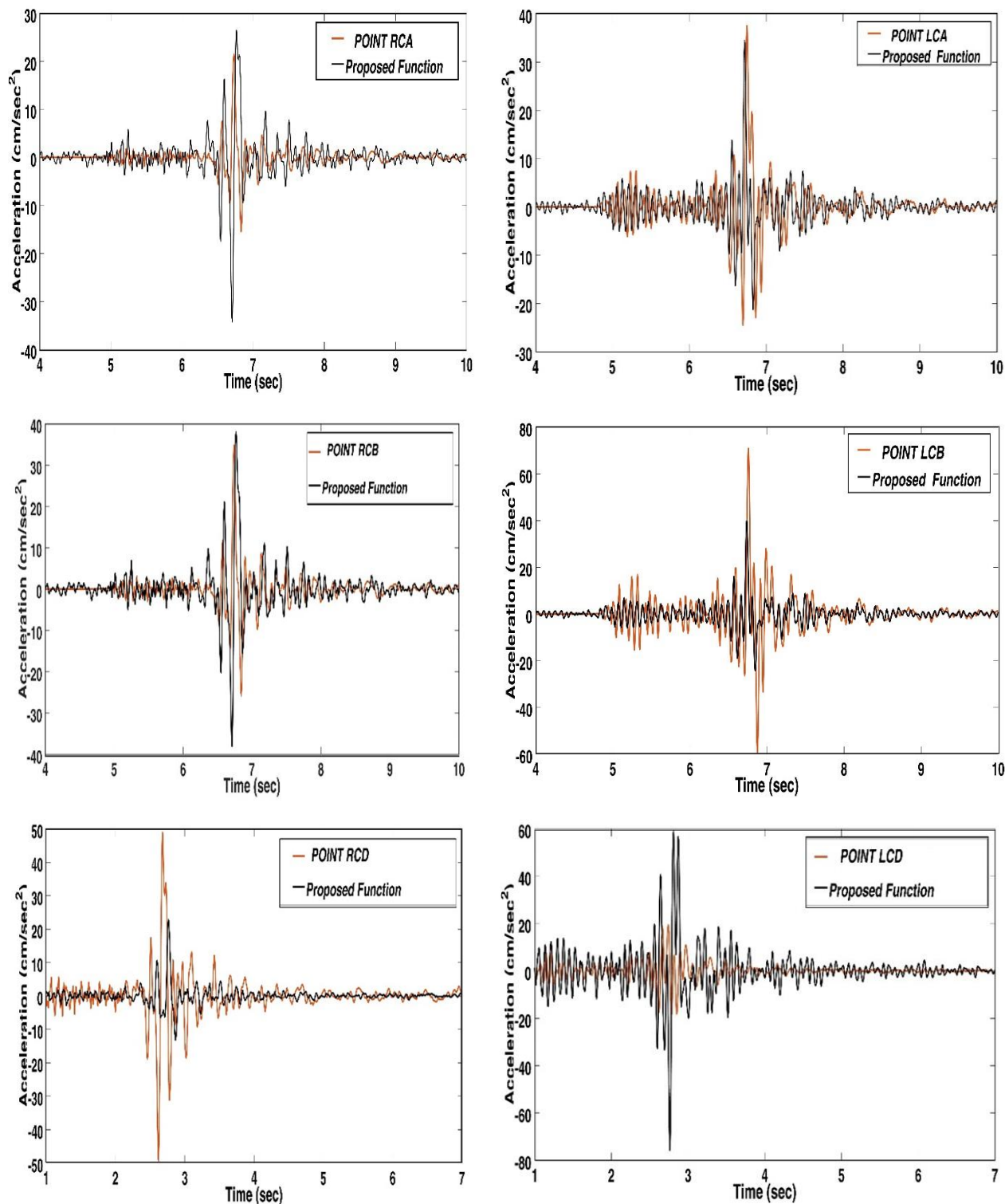


(ب)



(ج)

شکل ۴: الف) مقایسه شتابهای تولید شده با رکورد ثبت شده، ب) مقایسه طیف های پاسخ شتاب سه رکورد، ج) مقایسه خطای ایجاد شده بین شتابهای تولید شده با رکورد ثبت شده طی زلزله ۲۰۰۱.



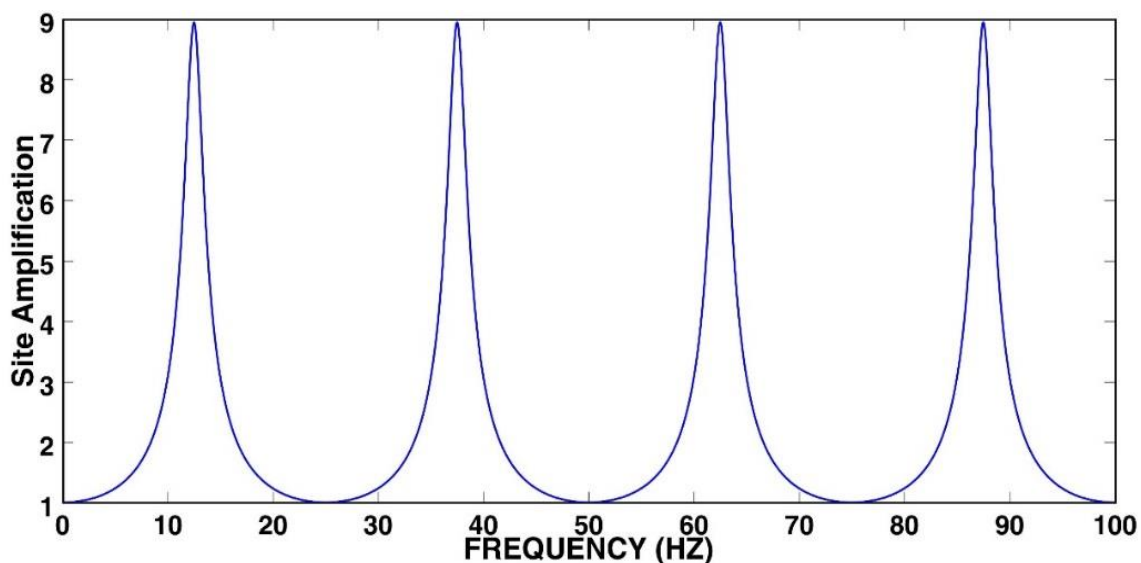
شکل ۵: مقایسه شتابهای تولید شده با استفاده از تابع تاخیر زمانی ارائه شده در این پژوهش و روش میانه یابی آلوز (۲۰۰۵) از روی رکوردهای ثبت شده طی زلزله ۲۰۰۱.

با توجه به نتایج تحلیل های انجام شده می توان از رابطه ریاضی ارائه شده در این پژوهش برای تولید شتابهای غیر یکنواخت تکیه گاهی روی ساختگاههای مختلف V شکل با داشتن خصوصیات هندسی ساختگاه و شتاب ثبت شده در کف دره به عنوان جایگزینی برای روش میانه یابی مورد استفاده قرار گیرد.

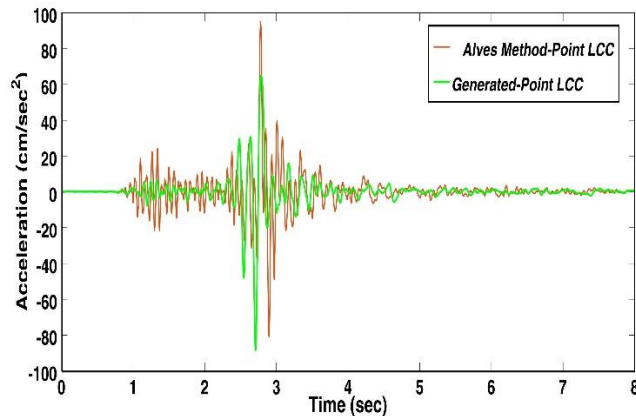
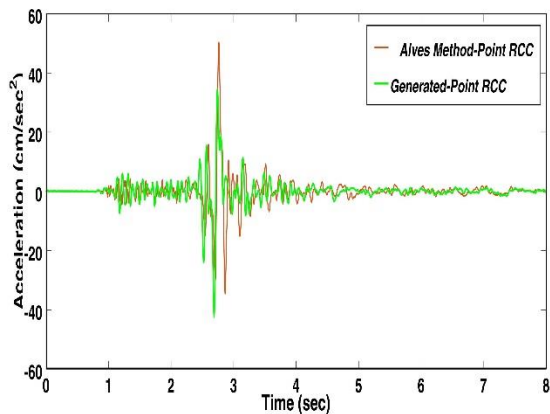
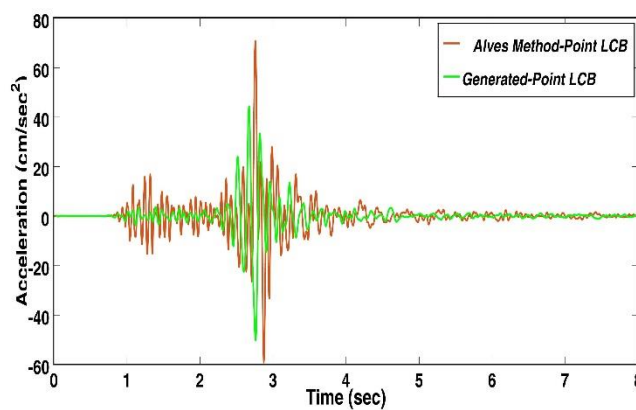
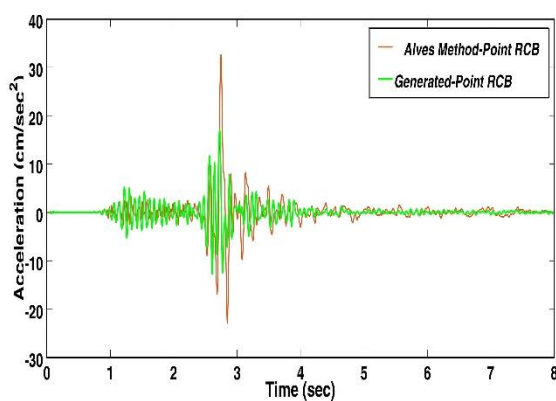
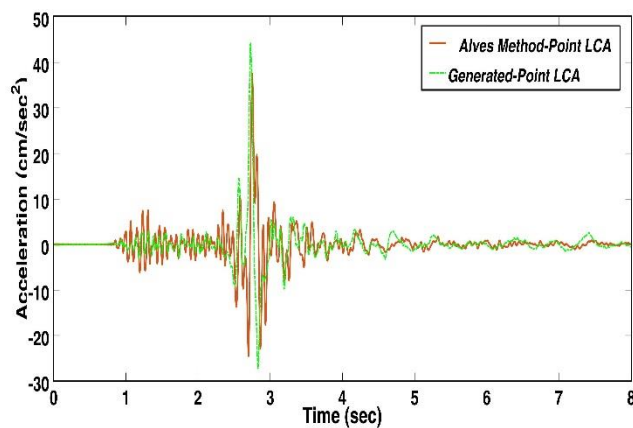
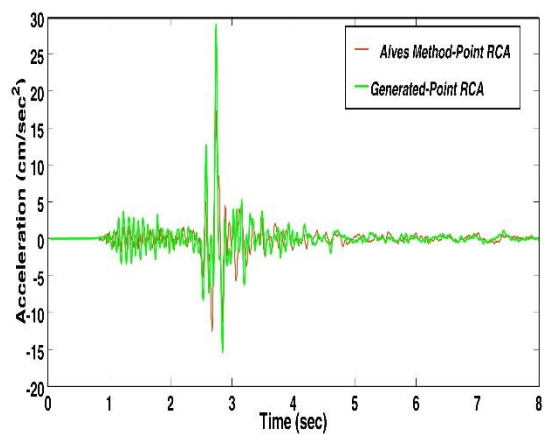
۴- تولید شتاب های غیر یکنواخت از روی یک شتاب نگاشت

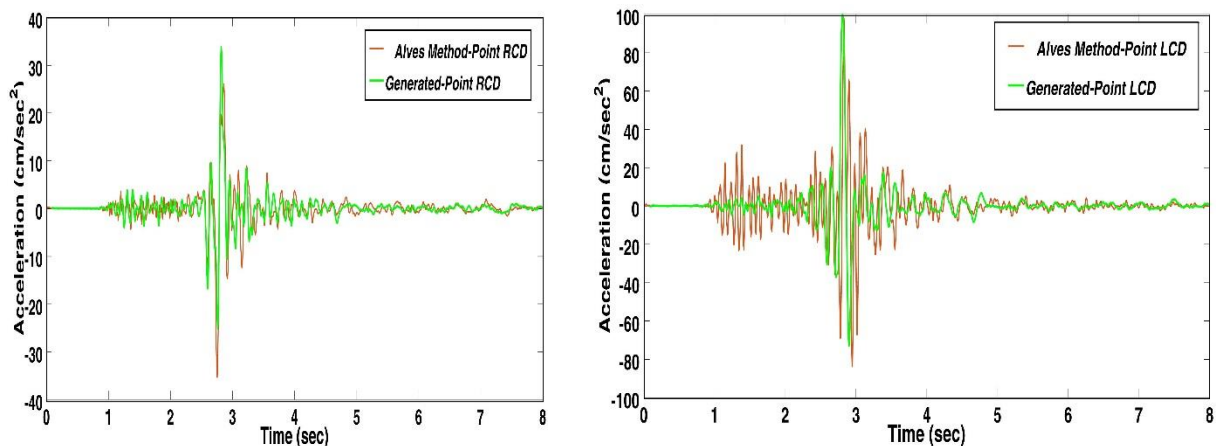
در این بخش، در ادامه تحلیل های انجام شده، امکان تولید شتابهای غیر یکنواخت تکیه گاهی از روی یک رکورد ثبت شده مورد بررسی قرار میگیرد. چنانکه در بخش های قبلی اشاره شد برای تولید شتابهای غیر یکنواخت روی یک ساختگاه با استفاده از رابطه ۱ علاوه بر داشتن مقدار تاخیر زمانی بین رکوردها، به یک تابع بزرگنمایی نیز نیاز هست. برای بیان بزرگنمایی ساختگاه از رابطه ۶ استفاده می شود. در این رابطه τ تاخیر زمانی بین رکوردها، f فرکانس بر حسب هرتز، r ضریب انعکاس که از روی چگالی و سرعت موج برشی در لایه تعیین می شود [۲۰ و ۲۱].

$$|H(f)| = \frac{1+r}{[1+2r \cos(4\pi f \tau) + r^2]^{1/2}} \quad (6)$$



شکل ۶: بزرگنمایی ساختگاه برای محیط بدون لایه بندی بدون در نظر گرفتن اثرات میرایی.





شکل ۷: مقایسه شتابهای تولید شده با استفاده از تابع بزرگنمایی و روش میانه یابی آلوز (۲۰۰۵) از روی رکورد ثبت شده طی زلزله ۲۰۰۱.

چنانکه اشاره شد، تولید شتابهای غیر یکنواخت از روی یک شتاب نگاشت ثبت شده وابسته به پارامترهای مختلفی هست که یکی از این پارامترها مطابق رابطه ۱ تاخیر زمانی بین رکوردهای تکیه گاهی میباشد. علاوه بر این پارامتر، تابع بزرگنمایی که از خصوصیات هر ساختمان می باشد نیز عامل تعیین کننده برای تولید شتابهای منطبق بر مقادیر ثبت شده روی توپوگرافی می باشد. چنانکه در شکل ۷ دیده می شود، نتایج به دست آمده بخصوص برای سمت راست دره نشان می دهد، استفاده از تابع بزرگنمایی ارائه شده (رابطه ۶) نتایج نسبتاً مناسبی از روی یک رکورد ثبت شده به دنبال داشته است. از نتایج حاصل شده از این بخش می توان نتیجه گرفت که در صورت داشتن تابع بزرگنمایی روی ساختمان و استفاده از تابع تاخیر زمانی که در این پژوهش به صورت ریاضی برای محاسبه تاخیر زمانی ارائه شد، می توان از یک رکورد به دست آمده در کف دره برای تولید رکوردهای متناسب با ساختمان در سایر نقاط روی دره بهره برد.

روش ارتعاش تصادفی بر اساس تعریف آماری مشخصات تحریک در تکیه گاهها استوار است. تحریک تکیه گاهی به صورت ماتریسی از توابع چگالی طیفی توان متقاطع یا خود ارتباطی که تعیین کننده مقادیر و محتوای فرکانس حرکت هستند، مشخص می شود. تابع چگالی طیف توان متقاطع بین دو تکیه گاه معمولاً به صورت تابعی از چگالی طیفی توان خود ارتباطی متناظر و یک تابع ارتباطی بین تکیه گاههای مختلف تعریف می شود. همان گونه که اشاره شد در سالهای اخیر مدلهای مختلف تئوریک و تجربی تابع ارتباطی ارائه شده اند. در ادامه تحلیل های صورت گرفته، چنانکه در شکل ۸ مشاهده می شود، تابع ارتباطی بین نقاط در ترازهای مختلف در سمت چپ دره بین شتابهای تولید شده از روی یک شتاب نگاشت و با استفاده از تابع بزرگنمایی ۶ و همچنین یک مدل تابع ارتباطی موجود ارائه شده است. برای بیان طیف ارتباط بین زوج نقاط از رابطه ۷ استفاده می شود. جهت تعیین میزان اطمینان به صحت نتایج حاصل از طیف توان متقاطع، از طیف ارتباط^۴ میان دو نگاشت استفاده می شود. در حین ارتعاش محیطی، تحریک سازه توسط منابع مختلف با فواصل متفاوت انجام می شود، که در نتیجه این فرایند مقادیر طیف ارتباط از مقدار واحد که نشان دهنده دو نگاشت کاملاً وابسته است، کاهش می یابد. 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 می باشد آن است که طیف مذکور در فرکانسهای غالب سازه دچار تشدید می گردد و در منحنی تغییرات دامنه طیف در مقابل فرکانس مقداری به شکل پیک ظاهر می شود. مقدار طیف ارتباط بیشتر معرف کیفیت داده ها می باشد و همواره می توان ادعا نمود پیکهایی از طیف ارتباط که بر پیکهای تابع

⁴ Coherence spectrum

چگالی طیفی توان و طیف توان متقاطع منبسط گردند، اطمینان بیشتری به فرکانس تشدید بودن پیکها ایجاد می کنند. مقدار طیف ارتباط از رابطه (۷) بدست می آید [۲۲ و ۲۴].

$$\gamma_{jk}(\omega) = \frac{S_{jk}(\omega)}{\sqrt{S_{jj}(\omega)S_{kk}(\omega)}} \quad (7)$$

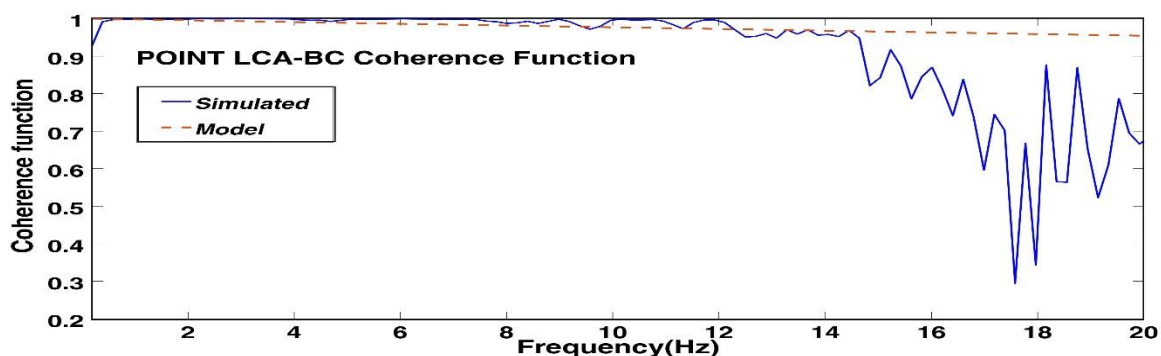
S_{jk} تابع چگالی طیف توان متقاطع، S_{jj} تابع چگالی طیف توان خود ارتباطی، $\gamma_{jk}(\omega)$ طیف ارتباط بین دو سیگنال.

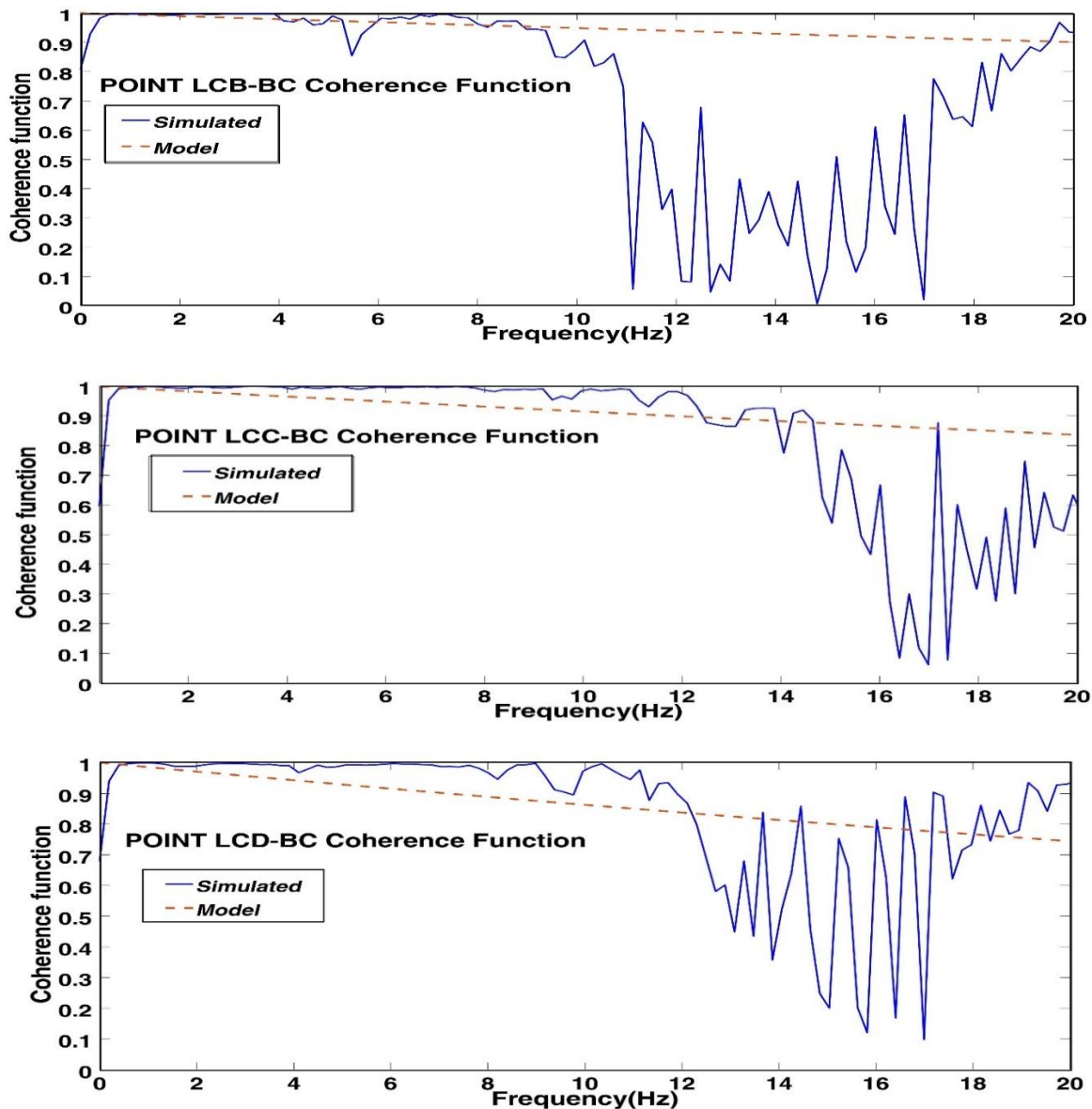
مدلهای مختلفی از تابع ارتباط تا کنون توسط محققین ارائه شده اند. در پژوهش حاضر برای بیان تابع ارتباط از رابطه سبزیک استفاده شده است. مقدار $\beta = 0.0005$ در نظر گرفته شده است [۲۲].

$$\mu_{k,n}(i\omega) = \exp\left(-\frac{\beta\omega d_{k,n}^2}{v}\right) \cdot \exp(-i\omega d_{k,n}) \quad (8)$$

در این رابطه d فاصله بین نقاط، v سرعت موج برشی، ω فرکانس بر حسب هرتز می باشد.

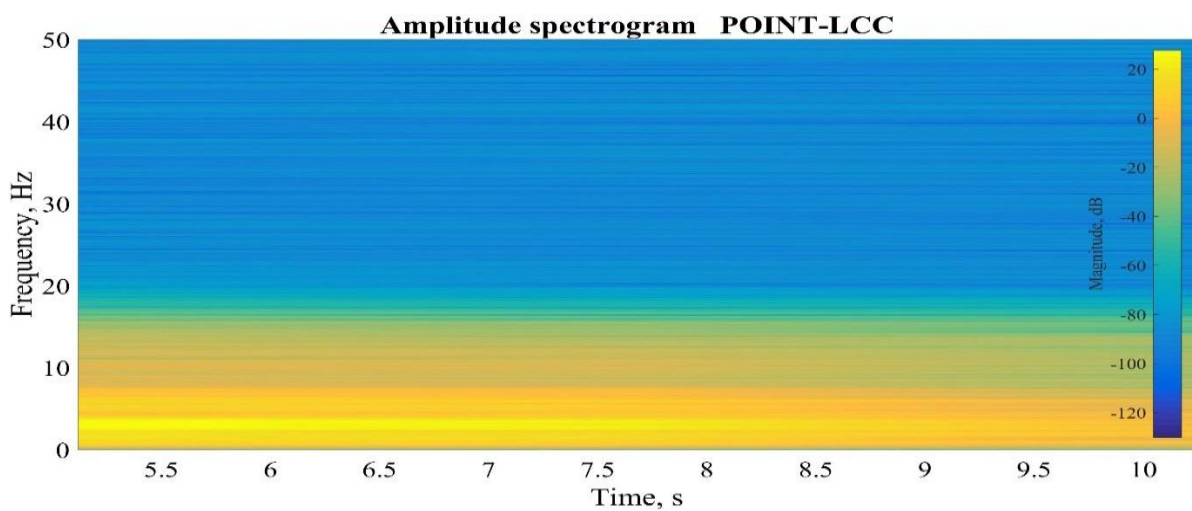
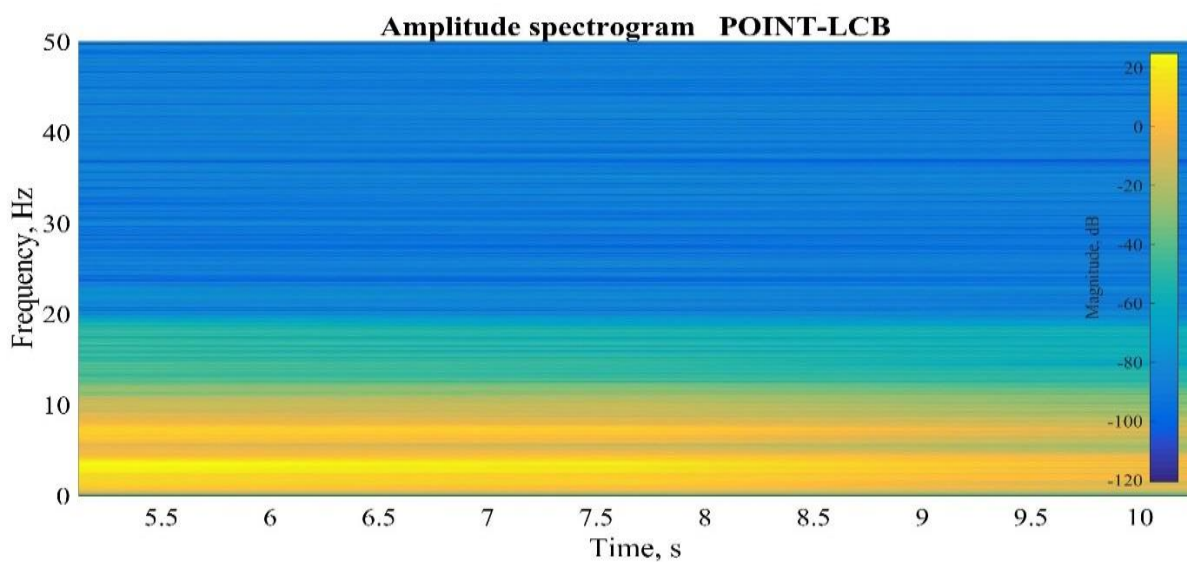
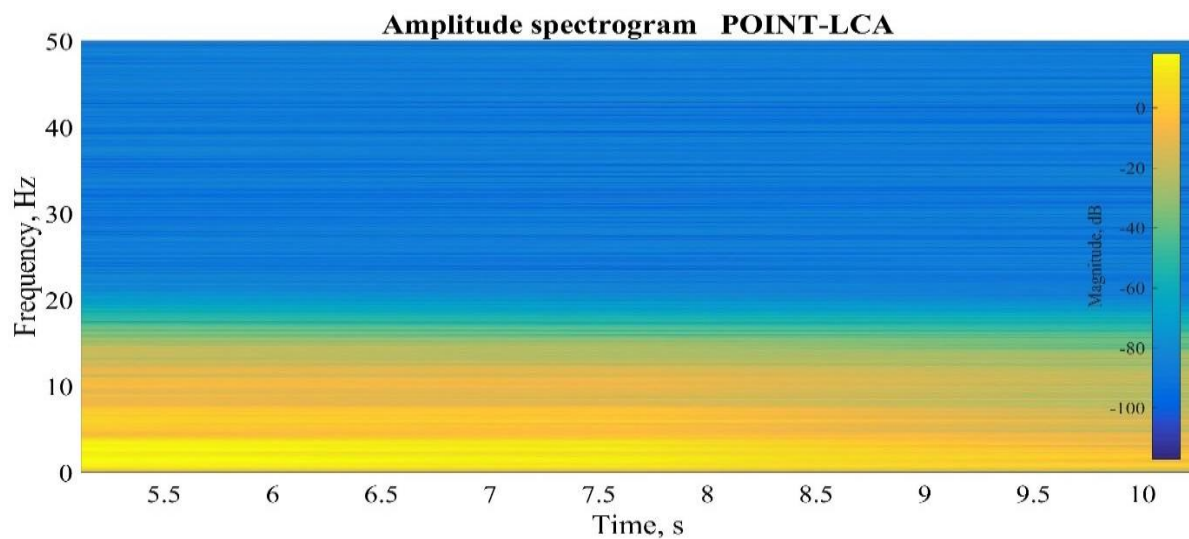
نتایج به دست آمده در این قسمت نشان می دهد (شکل ۸) که در فرکانسهای پایین (کمتر از ۱۲ هرتز) انطباق مناسبی بین مدل ارتباطی سبزیک و شتابهای غیر یکنواخت تولید شده با استفاده از یک شتاب نگاشت دارد. چنانکه که دیده می شود، افزایش فرکانس موج افزایش پیکها و نوسانات تابع ارتباطی شده است. علاوه بر این با افزایش فرکانس از انطباق بین مدل تابع ارتباطی و شتابهای تولید شده کاسته شده است. نکته حائز اهمیت در این مساله این است که در فواصل کم بین زوج نقاط، همبستگی و ارتباط بین دو نقطه (انطباق بین مدل ارتباط و طیف حاصل از جابجای های زوج نقطه) انطباق مناسبی را نشان می دهند. ولی چنانکه انتظار هست، افزایش فاصله بین زوج نقاط (LCD-BC و LCC-BC) موجب کاهش ارتباط بین سیگنالهای دریافت شده روی سطوح توپوگرافیک و عدم انطباق بین مدل ارتباط سبزیک و طیف ارتباطی محاسبه شده از روی پاسخ های دینامیکی ساختگاه شده است.

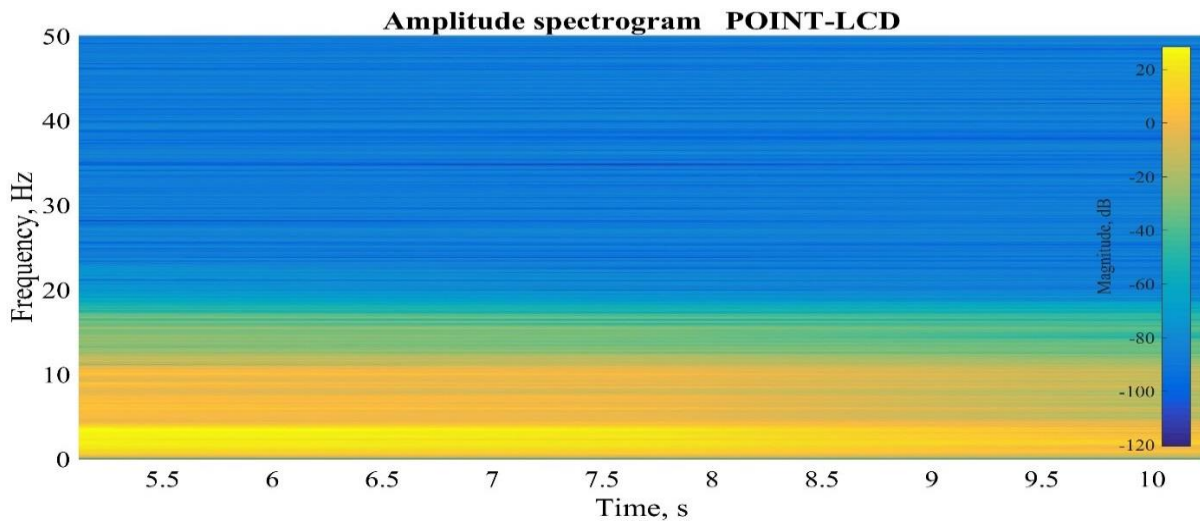




شکل ۸: مقایسه بین توابع ارتباطی شتابهای تولید شده با استفاده از روش ارائه شده در این مقاله و مدل سابریک.

در ادامه تحلیل های صورت گرفته روی شتابهای غیر یکنواخت تولید شده با استفاده از یک شتاب نگاشت، نمودارهای طیف توان این شتابها در نقاط مختلف روی ساختمان در حوزه زمان-فرکانس در شکل ۹ ارائه شده است. چنانکه در شکل مشاهده می شود، افزایش ارتفاع نقاط منجر به افزایش دامنه طیف توان شده است. علاوه براین می توان دید که پیک های ایجاد شده در طیف توان شتاب نگاشتها در محدوده فرکانسی کمتر از ۵ هرتز تجربه شده است.





شکل ۹: مقایسه بین طیف توان شتابهای تولید شده با استفاده از روش ارائه شده در این پژوهش در حوزه زمان-فرکانس.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله با رویکردی جدید به بررسی امکان تولید رکوردهای غیر یکنواخت تکیه گاهی با استفاده از یک شتاب نگاشت ثبت شده پرداخته شد. دو عامل مهم و تاثیر گذار بر تولید تحریکهای غیر یکنواخت روی ساختگاههای توپوگرافیک با استفاده از روش المان مرزی در حوزه زمان مورد مطالعه قرار گرفت. این دو عامل به ترتیب تاخیر زمانی و تابع بزرگنمایی روی سطوح دره ای شکل می باشند. تاثیر عوامل مختلف از جمله نسبت شکل، اختلاف ارتفاع نقاط، سرعت موج برشی، فرکانس غالب موج ورودی روی این دو پارامتر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می دهد که:

۱- عوامل مختلفی روی تاخیر زمانی ایجاد شده بین رکوردهای تکیه گاهی تاثیر گذار می باشند. در حالت کلی این عوامل را می توان در خصوصیات هندسی ساختگاه و خصوصیات موج ورودی خلاصه کرد. در این پژوهش سعی شد، رابطه ارائه شده برای محاسبه تاخیر زمانی روی ساختگاه، در برگیرنده این عوامل باشد. نتایج ناشی از مقایسه با رکوردهای ثبت شده روی ساختگاه پاکویما نشان می دهد که تابع ارائه شده از دقت مناسبی برخوردار می باشد. چنانکه نمودار مقایسه خطای ناشی از رکوردهای تولید شده با استفاده از تابع ارائه شده نسبت به رکوردهای واقعی در مقایسه با خطای ناشی از روش آلوز نسبت به رکوردهای واقعی نشان می دهد که حداکثر خطای مشاهده شده در روش ارائه شده در این پژوهش برای سمت راست دره $6/2$ درصد در حالی که این مقدار در روش آلوز $7/6$ درصد می باشد. در سمت چپ دره خطای ناشی از روش ارائه شده $4/5$ درصد و در روش آلوز $8/3$ درصد است.

۲- نشان داده شد که می توان با استفاده از توابع بزرگنمایی مناسب که بیان کننده خصوصیات هر ساختگاه باشد، در کنار تابع تاخیر زمانی، از روی یک شتاب نگاشت ثبت شده، شتابهای غیر یکنواخت تکیه گاهی را روی سطح ساختگاه همگن دره ای شکل تولید کرد.

مراجع

- [1] Zerva, A. (2009) "Spatial Variation of Seismic Ground Motions: Modeling and Engineering Application", CRC Press, New York.
- [2] Trifunac, M. D. (1973) "Scattering of plane SH waves by a semi-cylindrical canyon," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **1**, 267–281.
- [3] Geli, L., Bard, P.Y. & Jullien, B. (1988) "The effect of topography on earthquake ground motion: A Review and New results", *Bulletin of seismological society of America*, Vol. 78, No. 1, Feb.
- [4] Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi Bidar, A., Razmkhah, A., Gatmiri, B.; (2006) "Time-Domain Two-Dimensional Site Response Analysis of Non-Homogeneous Topographic Structures by a Hybrid FE/BE Method"; *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*; Vol. 26, No. 8; pp. 753-765.
- [5] Kamalian, M., Gatmiri, B., Sohrabi-Bidar, A. and Khalaj, A., (2007) "Amplification pattern of 2D semi-sine-shaped valleys subjected to vertically propagating incident waves", *Communications in Numerical Methods in Engineering*; 23:871–887.
- [6] Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi-Bidar, A. Razmkhah, A., "Shape effects on amplification potential of two dimensional hills", *JSEE*, Vol. 8 No.2, pp:58-70 (In Farsi).
- [7] Sohrabi-Bidar, A., Kamalian, M. and Mohammad Kazem Jafari, (2010) "Seismic response of 3-D Gaussian-shaped valleys to vertically propagating incident waves", *Geophys. J. Int.* 183, 1429–1442, 2010.
- [8] Sohrabi-Bidar, A., Kamalian, M. (2013) "Effects of three-dimensionality on seismic response of Gaussian-shaped hills for simple incident pulses", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (Elsevier). Volume 52, Pages 1–12.
- [9] Tarinejad, R, Fatehi R and Harichandarn, R.S., (2013) "Response of an arch dam to non-uniform excitation generated by a seismic wave scattering model", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 52, Pages 40-54.
- [10] Tarinejad, R., Isari, M., TaghaviGhalesari, A. (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*, In press.
- [11] Harichandran, R.S. and Vanmarcke, E. H. (1986) "Stochastic variation of earthquake ground motion in space and time," *Journal of Engineering Mechanics* **112**(2), 154–174.
- [12] Luco, J.E., and Wong, H. L. (1986) Response of a rigid foundation to a spatially random ground motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.14, 891-908.
- [13] Abrahamson NA. (1993) "Spatial variation of multiple support inputs. In: Proceedings of the 1st US Seminar on Seismic Evaluation and Retrofit of Steel Bridges", San Francisco, CA.
- [14] Der Kiureghian, A. and Neuenhofer, A. (1992) "Response spectrum method for multi-support seismic excitations," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **21**(8), 713–740.
- [15] Der Kiureghian, A. (1996) A coherency model for spatially varying ground motions," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **25**, 99–111.
- [16] Harichandran, R. S., Hawwari, A., and Sweidan, B. N. (1996) "Response of long-span bridges to spatially varying ground motion. *J. Struct. Eng.*, 10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:5(476), 476–484.

- [17] Zhang, Y. H., Li, Q. S., Lin, J. H., and Williams, F. W. (2009) "Random vibration analysis of long span structures subjected to spatially varying ground motions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **29**(4), 620–629.
- [18] Alves, S.W. (2005) "Nonlinear analysis of Pacoima Dam with spatially non-uniform ground motion", PhD Dissertation, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- [19] Koza JR (1992) "Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection", The MIT Press, Cambridge.
- [20] 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.
- [21] Bi, K. and Hao, H. (2012) "Modelling and simulation of spatially varying earthquake ground motions at sites with vary conditions," *Probabilistic Engineering Mechanics* **29**, 92–104.
- [22] K. Sobczyk. (1991) "Stochastic Wave Propagation, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- [23] He C-H, Wang J-Y, Zhang C-H and Jin F. (2014) Simulation of broadband seismic ground motions at dam canyons by using a deterministic numerical approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- [24] Damadipour M, Tarinejad, R. (2012) System identification of a concrete arch dam and calibration of its finite element model with emphasis on non-uniform ground motion, Master of Science Thesis, Civil Engineering, Tabriz, Tabriz. (In Persian).