

تحلیل مدل سه بعدی پلهای معلق کابلی تحت اثر تحریک غیرهمسان تکیه‌گاه‌ها

حسین محمدپورⁱ؛ علی اکبر آفاکرچکⁱⁱ

چکیده

ارتعاش غیریکنواخت تکیه‌گاه‌ها در سازه‌های بزرگی همچون پلهای کابلی معلق و پلهای کابل ایستا، سدها و خطوط انتقال نیرو مورد توجه قرار می‌گیرد. در این تحقیق، اثرات این ارتعاش بر پلهای معلق کابلی و تأثیر پارامترهایی چون سرعت موج برشی در زمین بین تکیه‌گاه‌ها و طول دهانه میانی، بر پاسخ این نوع پلهای بررسی شده است. به همین منظور، چهار پل کابلی با طول دهانه میانی متفاوت و با استفاده از آئین نامه AASHTO-89 طراحی و شتاب‌نگاشت‌های مناسب با احتساب سرعت موج برشی مشخص برای هر شتاب‌نگاشت (با توجه به نوع خاک محل وقوع زلزله)؛ به پلهای اعمال می‌شود. در این تحقیق، از چهار سرعت موج برشی استفاده شده که برای هر کدام از این سرعت‌ها سه شتاب‌نگاشت در نظر گرفته شده است. پاسخ سازه تحت هر کدام از دسته شتاب‌نگاشت‌ها؛ ماکزیمم پاسخ ناشی از این سه شتاب‌نگاشت است. از نرم افزار ANSYS 7.0 به منظور آنالیز تاریخیچه زمانی مدل‌ها استفاده شده و درکل، نمودارهای تحلیل صورت گرفته است. بعد از اعمال شتاب‌نگاشت‌های زلزله در جهات اصلی به مدل‌های سه بعدی به شکل تاریخیچه زمانی؛ پاسخ سازه در دو حالت ارتعاش یکنواخت و غیریکنواخت تکیه‌گاه‌ها با احتساب تغییر شکل‌های بزرگ با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج، گویای این مطلب است که با افزایش طول دهانه میانی و یا افزایش طول سرعت موج برشی، تأثیر تحریک غیریکنواخت تکیه‌گاه‌ها در میزان پاسخ سازه کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی

پلهای معلق کابلی، تحریک غیرهمسان، تحریک تکیه‌گاه‌ها، پاسخ مدل سه بعدی

Analysis of Three Dimensional Model of Suspension Bridges Subjected to Asynchronous Excitation of Supports

H.Mohammadpour, A.A.Aghakouchak

ABSTRACT

Asynchronous excitation of supports is important in large structures such as dams, suspension bridges and cable-stayed bridges and lifelines. The effects of soil shear velocity and length of main span on structural response of suspension bridges are discussed in this study. Four bridges with different main span length are designed based on AASHTO-89 code. The designed bridges are subjected to ground motion records, which are chosen based on different shear velocities. Four shear velocities are used in this study and for each of them three records are considered. The response of the structure due to each group of records is the maximum response of these three records. ANSYS software Ver.7.0 is used for time history analysis of models and the total runs are 96. After applying the records to the models in main directions and performing time history analysis by taking into consideration large deflection, the response of structures is compared to each other for the cases of asynchronous and synchronous excitation. The results show that the effect of

ⁱ کارشناس ارشد، دانشکده فنی و مهندسی؛ دانشگاه تربیت مدرس: HMohammadpour@YAHOO.COM

ⁱⁱ استاد؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دانشگاه تربیت مدرس: A_Agha@modares.ac.ir

asynchronous excitation of supports is decreased with increasing the length of main span and soil shear wave velocity.

KEY WORDS

Suspension Bridges, Asynchronous Excitation, Supports Excitation, Response of 3D Model

۱- مقدمه

در شالوده‌ها و دکل‌ها و نیز باعث ایجاد چرخش حول محور عمودی و در نتیجه تحریک مودهای پیچشی و مودهای عمودی ارتعاش می‌شود.

در مطالعات بعدی که دومان اوغلو و سورن (۱۹۸۷) [۱۰]، (۱۹۹۰) [۱۱] انجام دادند، رفتار پلهای معلق تحت اثر تحریکات قائم غیریکنواخت تکیه‌گاه‌ها بدون تغییر و تصحیح در محتوای فرکانسی امواج لرزه‌ای و پاسخ تصادفی پلهای معلق کابلی تحت اثر نیروهای ناشی از زلزله بررسی شد. اندازه‌گیری‌های واقعی تغییر مکان‌ها در پل معلق Vincent Thomas طی زلزله Whittier در سال ۱۹۸۷ تحریک غیریکنواخت تکیه‌گاه‌ها را ثابت کرد. گنورگیان و همکاران (۱۹۹۲) [۹] نیز پاسخ سازه‌های چند تکیه‌گاهی را با استفاده از روش طیفی به دست آوردند.

عبد الغفار و ناظمی (۱۹۹۲) [۶] طی تحقیقاتی نشان دادند مدهای نامتقارن تحت اثر تحریک غیریکنواخت تکیه‌گاه‌ها تحریک می‌شوند. هاری چندران (۱۹۹۲) [۱۲] تحریک تکیه‌گاهی را با روش ارتعاش تصادفی بررسی کرد؛ سپس او و همکارانش (۱۹۹۶) [۱۴] پاسخ جانبی پل معلق را تحت اثر تحریک غیریکنواخت تکیه‌گاه‌ها بررسی کردند. عوامل غیر هم‌فازی؛ همچون اثرات سایت، تفاوت و گوناگونی لایه‌های زمین در مسیر حرکت موج و ماهیت حرکت موج در این مدل منظور شده بودند.

در پلهای بادخانه‌های کوچک تحت اثر تحریک غیریکنواخت تکیه‌گاه‌ها (بدون احتساب اثر لایه‌های خاک بر روی امواج) نتایج قابل استفاده و رضایت بخشی حاصل شد؛ ولی مقادیر دست بالای برش و ممان در پلهای با دهانه‌های طویل غیرقابل اعتماد بودند.

وگ و همکارانش (۱۹۹۹) [۱۵] تحقیقات گسترده‌ای روی نحوه پاسخ پلهای معلق کابلی و پلهای کابل مهاری^۲ به تحریک غیریکنواخت تکیه‌گاه‌ها انجام دادند. آنها پیشنهاد کردند که کاهش همبستگی امواج نادیده گرفته شود؛ چون اثر حرکت موج تأثیری به مراتب بیشتر از اثر غیرهمبستگی در مقادیر پاسخ سازه دارد.

در تحقیقات صورت گرفته در سال‌های گذشته، پاسخ پلهای کابلی معلق با استفاده از روش‌های ارتعاشات تصادفی و ترکیب مدها (روش طیفی) بررسی شد که رفتار غیرخطی هندسی این‌گونه سازه‌ها در این روش‌ها در نظر گرفته نشده است. در تحقیق حاضر، پاسخ سازه سه‌بعدی به ارتعاشات یکنواخت و

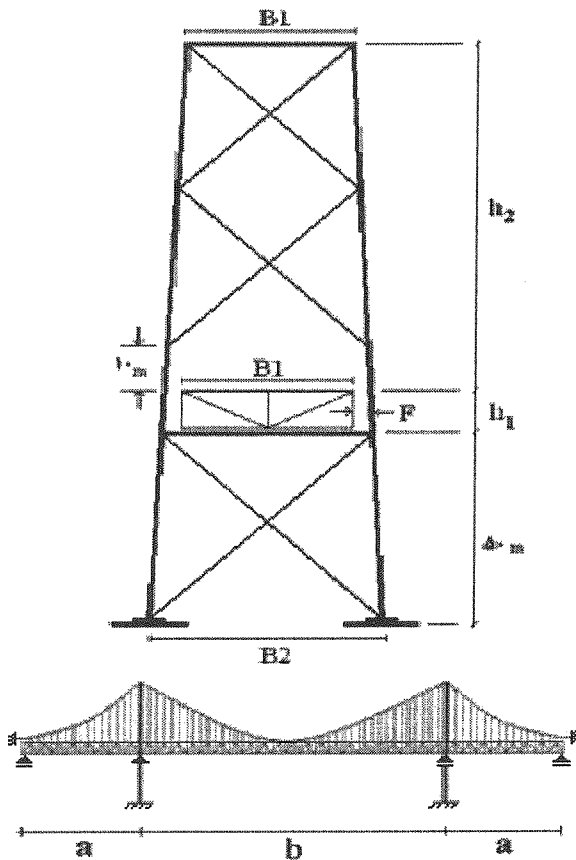
در طراحی و تحلیل پلهای معلق کابلی عواملی همچون باد، تغییر درجه حرارت، بارهای مرده، بارهای ترافیک و بارهای ناشی از زلزله اهمیت دارند؛ ولی مهم‌ترین عوامل در طراحی پلهای معلق، نیروهای ناشی از زلزله و باد است. در مناطق بادگیر همچون خلیج‌ها و تنگه‌ها عامل باد در طراحی پلهای معلق نقش مهمی دارد و باعث ایجاد نیروهای خمشی و برشی در عرشه پل و دکل‌ها می‌شود.

عوامل ثانویه ناشی از وزش باد بر روی پلهای معلق کابلی برای تخریب این گونه پلها توانایی خاصی دارند؛ همچون پل تاکوما؛ که در ۷ نوامبر ۱۹۴۰ (چهارماه پس از افتتاح پل) بوسیله بادی با سرعت یک سوم سرعت باد طراحی شده ویران شد. ارتعاش قائم، پیچش عرشه و ارتعاش کابل‌های آویز قائم از عوامل ثانویه وزش باد بر روی سازه پلهای معلق کابلی است که با توجه به سختی پیچشی، خمشی، مشخصات آئرودینامیکی مقطع عرشه و مهارکابل‌های آویز قائم می‌توانند در سرعت‌های پایین‌تر از سرعت باد طراحی شده، خطر ساز باشند. تحقیقاتی گسترده در کشور چین روی این مسأله صورت گرفته است و جدیدترین تحقیق را چنگ و همکارانش (۲۰۰۳) [۸] بر روی رفتار پیچشی پلهای معلق کابلی در مقابل وزش باد انجام داده‌اند. در مقاله حاضر، اثرات ناشی از تحریک غیریکنواخت تکیه‌گاه‌ها تحت اثر زلزله بررسی شده است.

مسأله غیریکنواختی ارتعاش تکیه‌گاه‌های پلهای معلق کابلی را ابتدا باگدانف (۱۹۶۵) [۷] بررسی کرد. در این تحقیق پاسخ سازه تحت حرکت متفاوت نقاط تکیه‌گاهی در دامنه فرکانسی حاصل شده بود.

استوا (۱۹۷۸) [۱۲] برای اولین بار بر روی پاسخ پلهای طویل تحت تحریک یکنواخت غیرایستای تعدیل شده تحقیق کرد. او فرضیه عمومی خود را در مورد جابجایی یکسان مؤلفه‌های ورودی نوفه سفید، استفاده کرد؛ سپس این تحقیقات را عبدالغفار و رابین (۱۹۸۲-۸۴) [۲-۵] دنبال کردند. آنها با استفاده از رکوردهای ثبت شده در یک شبکه زلزله‌نگاری با فواصل کم ایستگاه‌ها از یکدیگر، اثرات تحریک غیریکنواخت تکیه‌گاهی بر پاسخ طولی، عرضی و پیچشی پلهای معلق با مدل المان محدود را تحقیق و بررسی کردند. حرکت غیریکنواخت زمین در محدوده پی باعث ایجاد حرکت Rocking (کهوره‌ای)

مورد استفاده کنترل و کفایت این مقاطع احراز شده است.



شکل (۱): پارامترهای بکار رفته در جدول (۱) و شرایط مرزی

۳- اعمال شوک مثلثی

بمنظور شناخت اولیه پاسخ پلهای معلق کابلی به تحریک‌های یکنواخت و غیریکنواخت تکیه‌گاه‌ها، یکی از مدل‌ها تحت تأثیر یک شوک مثلثی قرار گرفته است، چون تعداد پلهای معلق دارای دهانه میانی با طول تقریبی ۱۰۰۰ متر نسبت به پلهای دیگر بیشتر است مدل دوم انتخاب و شوکهای مثلثی به این مدل اعمال می‌شود. دامنه نوسان این شوک معادل ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی متر است که هر کدام از این دامنه نوسان‌ها در جهات x، y و z به شکل همزمان به نقاط تکیه‌گاهی اعمال می‌شود. مدت زمان اعمال شوک دو ثانیه است که از مد اول مدل دوم کوچکتر می‌باشد؛ پس به طور کلی انتظار می‌رود پاسخ ماکزیمم سازه بعد از اعمال شوک رخ دهد. بعد از اعمال شوک مثلثی، سازه به شکل ارتعاش آزاد نوسان می‌کند که در مجموع زمان تحلیل چهل ثانیه در نظر گرفته شده است. در شکل (۲) شوکهای مثلثی اعمال شده به مدل دوم ارائه شده است.

غیریکنواخت تکیه‌گاه‌ها از روش حل مستقیم معادلات دینامیکی به شکل تاریخچه زمانی و با احتساب اثرات غیرخطی هندسی به دست آمده است. به این منظور، از نرم افزار ANSYS (نسخه شماره ۷) استفاده شد و تحلیل از نوع گذرا^۲ با در نظر گرفتن تغییر مکان‌های بزرگ^۳ است.

۲- معرفی مدل‌های مورد استفاده

در این تحقیق از چهار مدل پل معلق کابلی استفاده شده است. این پلهای معلق از سه دهانه تشکیل شده اند که هر سه دهانه معلق بوده و کابل‌های اصلی در تکیه‌گاه‌های طرفین مهار شده است. سیستم عرشه از نوع خرپایی و دکل‌های میانی از مقاطع فولادی است. کابل‌های اصلی و کابل‌های قائم از فولاد با مقاومت کششی بالا و بقیه اجزای فولادی از فولاد معمولی و عرشه از دال بتنی مرکب ساخته شده است. اتصال کابل‌های اصلی به بالای دکل‌ها از نوع مفصلی است و کابل‌های اصلی در وسط دهانه میانی به عرشه متصل می‌باشند، و انتهای دکل‌های اصلی شرایط تکیه‌گاهی گیردار دارد. ابتدا و انتهای عرشه در جهت قائم و جهت افقی عمود بر محور طولی عرشه، مقید بوده و عرشه در جهت طولی، در محل اتصال به تیرهای نشیمن یکی از دکل‌ها، مقید است. مشخصات این چهار مدل در جدول (۱) و پارامترهای مذکور در این جدول و شرایط مرزی در شکل (۱) ارائه شده است. مشخصات مقاطع مورد استفاده در دکل‌ها، بادبندها، تیرنشیمن، کابل‌های اصلی و کابل‌های آویز، تیرهای طولی و عرضی اصلی، اعضای خرپایی عرشه در جدول ۲ ارائه شده است. در ساخت مدل‌های سه بعدی پلهای معلق کابلی از المان‌های LINK8، LINK10، BEAM4، SHELL63 استفاده شده است. کابل اصلی با استفاده از المان LINK10 و کابل‌های آویز اعضای خرپای عرشه با استفاده از المان LINK8 ساخته شده اند. تیرهای عرشه و دکل‌های اصلی و تیرهای نشیمن با استفاده از المان BEAM4 و دال بتنی روی عرشه نیز از المان SHELL63 ساخته شده است.

جدول (۱): مشخصات پلهای معلق

شماره مدل	a (m)	b (m)	B ₁ (m)	B ₂ (m)	h ₁ (m)	h ₂ (m)	F (m)
۱	۱۷۰	۵۰۰	۱۰	۱۴	۵	۵۵	۱
۲	۳۴۰	۱۰۰۰	۲۰	۲۶	۷/۵	۱۱۰	۲
۳	۵۰۰	۱۵۰۰	۳۰	۳۸	۱۰	۱۶۵	۳
۴	۷۰۰	۲۰۰۰	۴۰	۵۰	۱۲/۵	۲۲۵	۴

پس از اعمال بارهای مرده و زنده ناشی از بارگذار بار باد، بارگذاری بار ترافیک و بارهای ناشی از بارگذاری زلزله، مقاطع

جدول (۲): مشخصات مقاطع مورد استفاده در پلها

نوع عضو	مدل ۱			مدل ۲			مدل ۳			مدل ۴			المان مورد استفاده
	ابعاد (m*m)	سطح مقطع (m ²)	مان اینرسی (m ⁴)	ابعاد (m*m)	سطح مقطع (m ²)	مان اینرسی (m ⁴)	ابعاد (m*m)	سطح مقطع (m ²)	مان اینرسی (m ⁴)	ابعاد (m*m)	سطح مقطع (m ²)	مان اینرسی (m ⁴)	
مقطع دکل	۸×۴	۳/۲	۱۷/۰۶۷ ۴/۷۶۲	۱۲×۶	۷/۲	۸۶/۴ ۲۱/۶	۱۴×۹	۱۲/۶	۲۰۵/۸ ۸۵/۰۵	۱۸×۱۱	۱۹/۱	۵۳۴/۶ ۱۹۹/۶۵	BEAM
مقطع بادبند	۱×۱	۰/۱	۰/۰۰۸۳	۲×۳	۰/۹	۰/۶۷۵	۴×۴	۱/۶	۲/۳۳۱	۵×۵	۲/۵	۵/۲۰۸۳	BEAM
مقطع تیرنشین	۱×۲	۰/۲	۰/۰۶۷ ۰/۰۱۶۷	۲×۳	۰/۶	۰/۴۵ ۰/۲	۲×۴	۰/۸	۱/۰۶۷ ۰/۲۶۷	۲×۵	۱	۲/۰۸۲ ۰/۳۳۲	BEAM
مقطع تیر طولی و عرضی اصلی	۰/۵×۱	۰/۰۶۸	۰/۰۱۴	۰/۵×۱	۰/۰۶۸	۰/۰۱۴	۰/۵×۱	۰/۰۶۸	۰/۰۱۴	۰/۵×۱	۰/۰۶۸	۰/۰۱۴	BEAM
مقطع اعضای خرپایی عرشه	۰/۳×۰/۳	۰/۰۱۵	---	۰/۳×۰/۳	۰/۰۱۵	---	۰/۳×۰/۳	۰/۰۱۵	---	۰/۳×۰/۳	۰/۰۱۵	---	LINK
مقطع کابل اصلی (×۱۰۰۰۰)	---	۳۷۸/۱	---	---	۱۳۶۴/۶	---	---	۳۰۲۸/۵	---	---	۵۴۷۶/۲	---	°LINK
مقطع کابل آویز (×۱۰۰۰۰)	---	۵/۵	---	---	۹/۴	---	---	۱۲/۸	---	---	۲۰/۴	---	°LINK

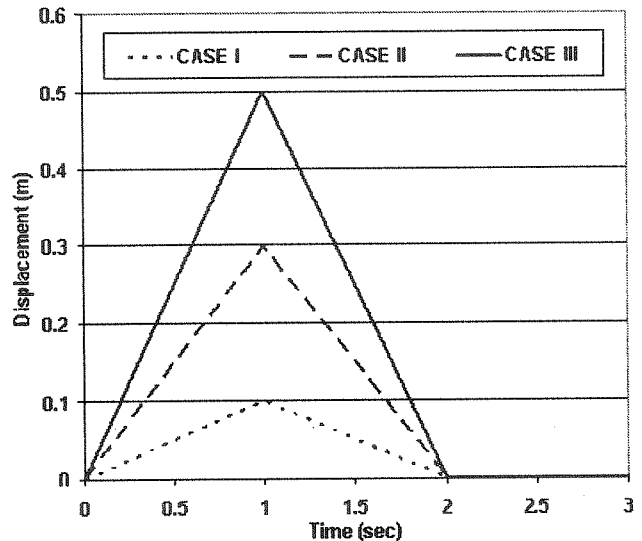
است.

بعد از اعمال شوکهای مثلثی با دامنه نوسان متفاوت و با در نظر گرفتن سرعت‌های موج برشی متفاوت پاسخ سازه در نقاط مختلفی همچون روی دکل‌ها و یا در وسط دهانه میانی قابل استحصال می‌باشد.

در شکل‌های (۴) و (۵) تغییر مکان عرشه در وسط دهانه میانی و تغییر مکان بالای دکل سمت چپ در حالت تحریک غیریکنواخت با موج مثلثی با دامنه نوسان ۱۰ سانتی متر و سرعت موج برشی ۳۰۰ متر بر ثانیه با حالت تحریک یکنواخت به وسیله موج مثلثی با دامنه نوسان ۱۰ سانتی متر مقایسه شده است.

پارامتر R (نسبت ماکزیم نیروی محوری در نقطه ای از کابل اصلی در حالت تحریک غیریکنواخت به ماکزیم نیروی محوری در همان نقطه از کابل اصلی در حالت تحریک یکنواخت) در شکل‌های (۶-الف)، (۶-ب) و (۶-ج) برای نیمه سمت چپ کابل اصلی و در سرعت‌های متفاوت موج برشی و با دامنه نوسان‌های مختلف ارائه شده است.

همانگونه که در شکل‌های (۶-الف)، (۶-ب) و (۶-ج) مشاهده می‌شود تغییرات پارامتر R در سرعت‌های موج برشی بالای ۱۰۰۰ متر بر ثانیه در حالت تحریک غیریکنواخت ناچیز بوده و قابل صرف نظر کردن است.

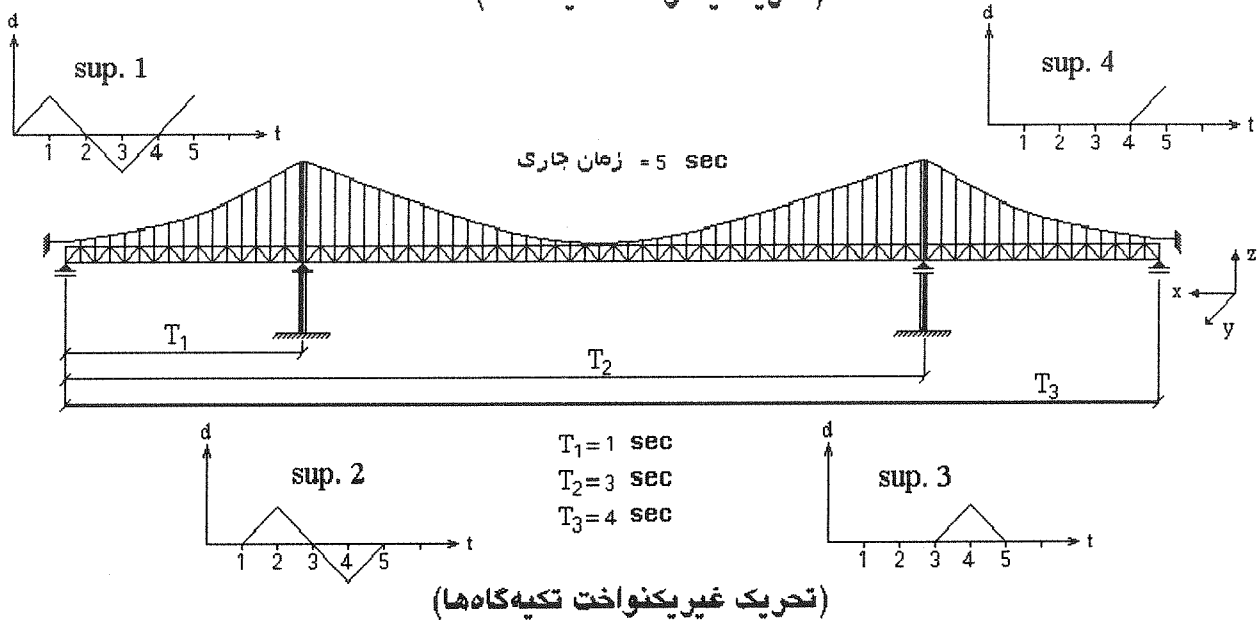
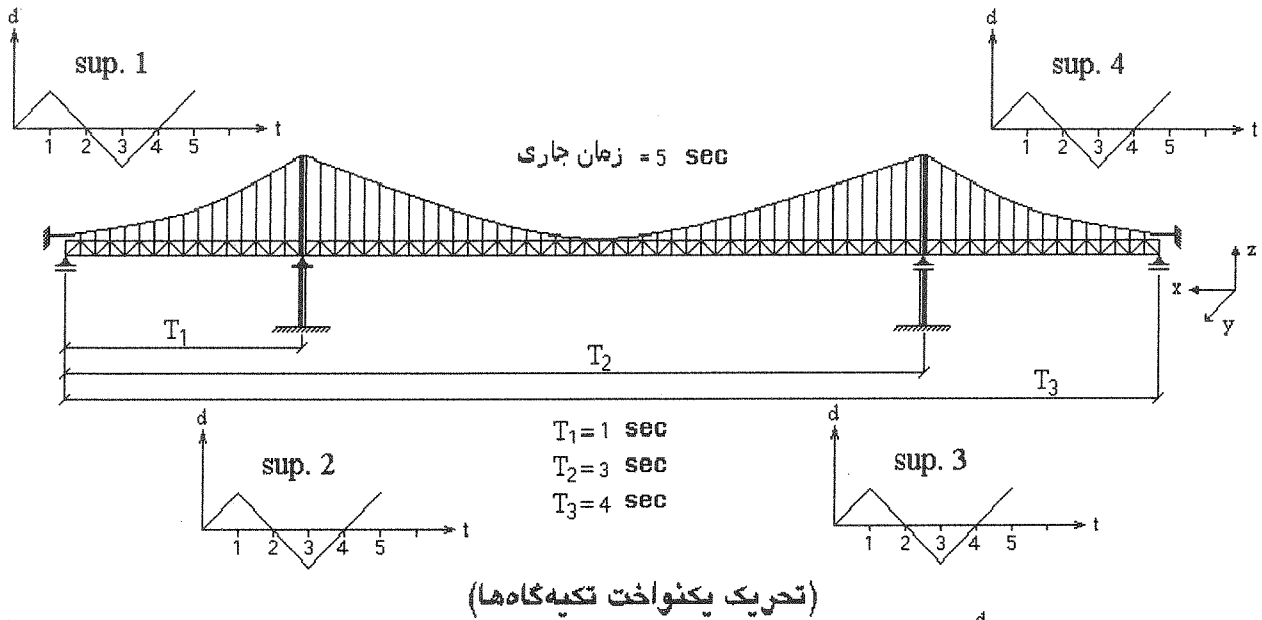


شکل (۲): شوکهای مثلثی اعمال شده به مدل دوم

در حالت تحریک غیریکنواخت تکیه‌گاه‌ها سرعت‌های موج برشی متفاوتی استفاده شده است، این سرعت‌ها عبارتند از: ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰، ۱۰۰۰، ۱۴۰۰، ۲۰۰۰ متر بر ثانیه.

در این حالت، شوک مثلثی در ابتدا به یکی از تکیه‌گاه‌ها اعمال شده و سپس با در نظر گرفتن سرعت موج برشی مورد نظر با تأخر زمانی در نقاط دیگر تکیه‌گاهی اعمال می‌شود. اختلاف زمانی تحریک در نقاط تکیه‌گاهی تابعی از فاصله تکیه‌گاه‌ها و سرعت موج برشی است. در حالت تحریک یکنواخت، تمام نقاط تکیه‌گاهی به شکل همزمان تحریک می‌شوند.

در شکل (۳) نحوه اعمال شوک مثلثی تغییر مکان در حالت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت به صورت شماتیک ارائه شده



شکل (۳): نحوه اعمال تغییر مکان مثلثی حالت یکنواخت و غیر یکنواخت

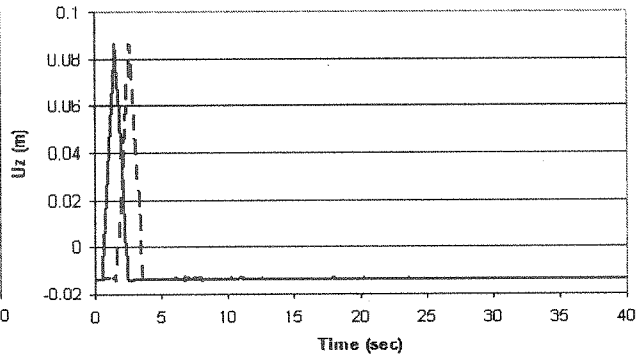
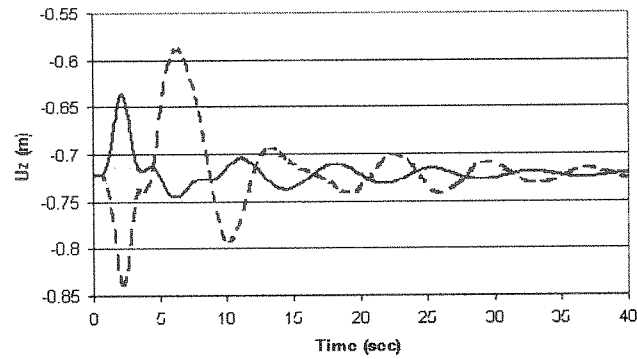
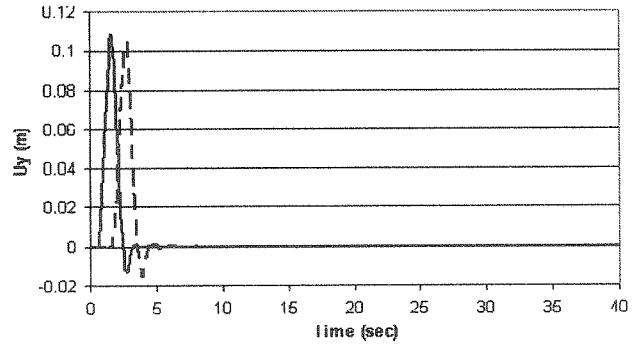
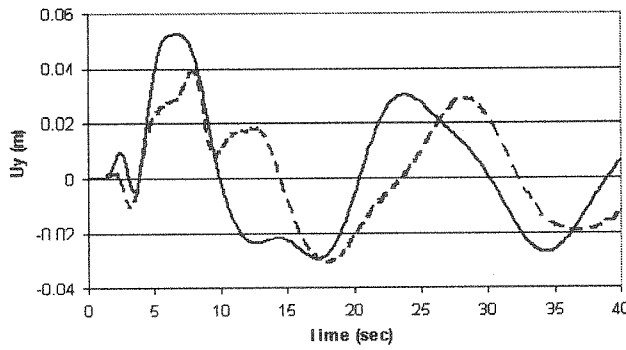
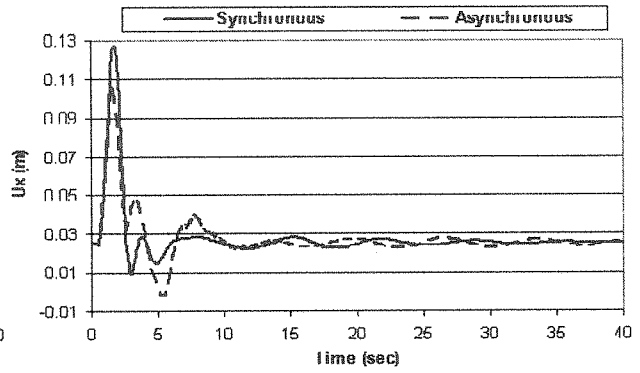
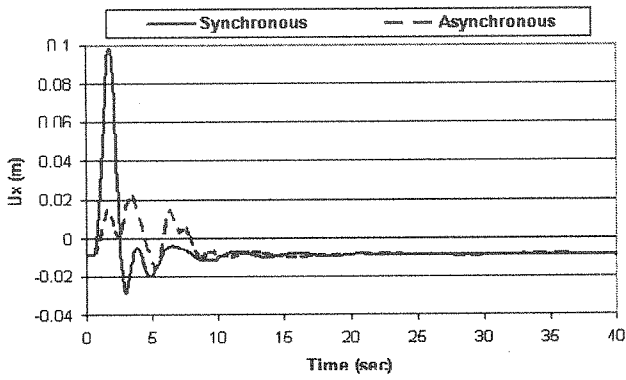
- (۱) پارامتر R در نقاط مشخصی از سازه نسبت به سرعت موج برشی و با توجه به دامنه نوسان قابل ترسیم است که این نقاط در شکل (۷) نشان داده شده است.
- مقادیر ضریب همبستگی صحت برآزش را نشان داده و پارامتر R با توان دوم سرعت موج برشی متناسب می باشد.
- در شکل‌های (الف)، (ب)، (ج) و (د) پارامتر R در نقاط نشان داده شده در شکل (۷) نسبت به سرعت موج برشی و دامنه نوسان موج مثلثی ارائه شده است.
- برای پاسخ‌های دیگر همچون خمش و برش موجود در دکل‌ها و یا عرشه نیز چنین روندی قابل محاسبه است.
- با برآزش دادن منحنی‌ها به اطلاعات فوق، معادله کلی تغییرات پارامتر R نسبت به دامنه نوسان و سرعت موج برشی به دست می آید که در معادلات (۱) ارائه شده است.

$$R = (A) \times V_s^2 + (B) \times V_s + (C)$$

$$A = -2 \times 10^{-7} \times (a)^2 - 3 \times 10^{-7} \times (a) - 7 \times 10^{-9} \quad r^2=1$$

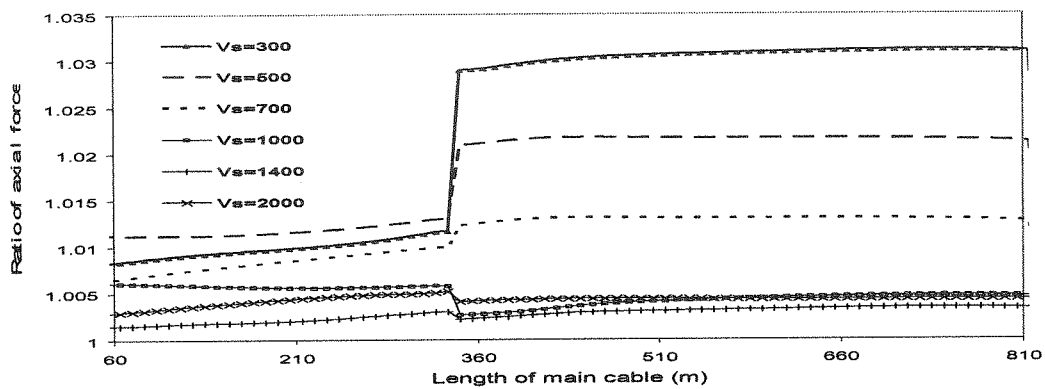
$$B = 1.7 \times 10^{-3} \times (a)^2 - 0.0014 \times (a) + 6 \times 10^{-5} \quad r^2=1$$

$$C = 0.385 \times (a) + 1.0095 \quad r^2=0.998$$

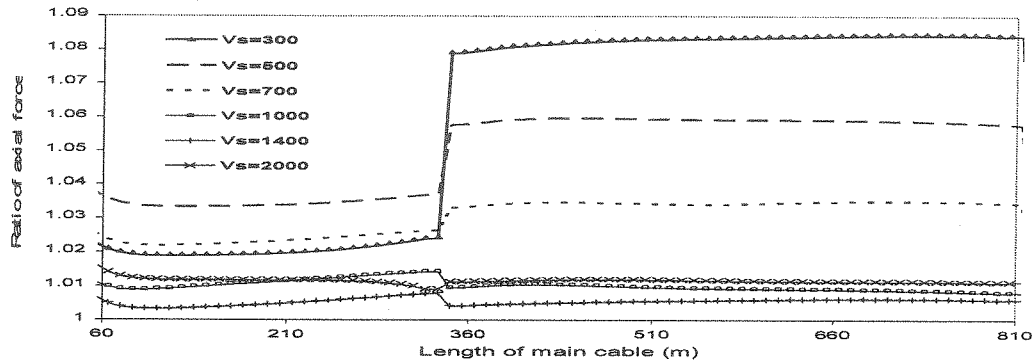


شکل (۵): تغییر مکان کابل اصلی ناشی از تحریک یکنواخت و غیریکنواخت در وسط دهانه میانی ($a=10\text{ cm}$ $V_s=300\text{ m/s}$)

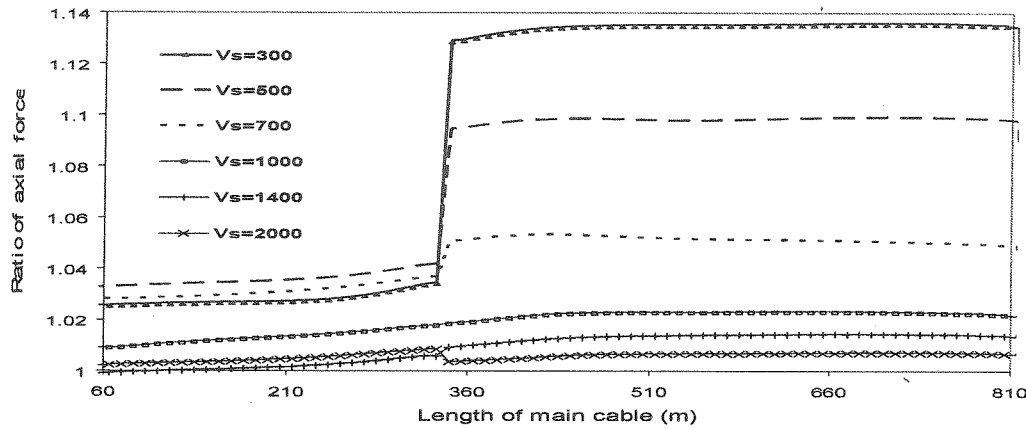
شکل (۴): تغییر مکان بالای دکل سمت چپ ناشی از تحریک یکنواخت و غیریکنواخت ($a=10\text{ cm}$ $V_s=300\text{ m/s}$)



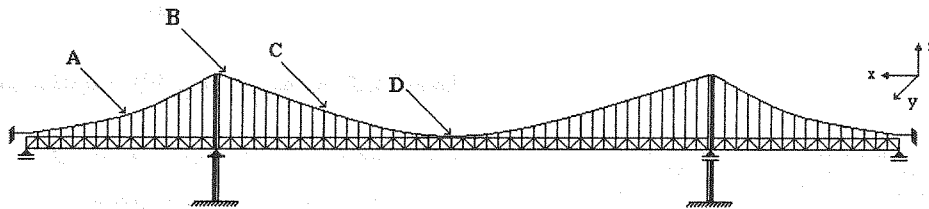
شکل (۶-الف): نسبت ماکزیم نیروی محوری کابل اصلی در حالت تحریک غیر یکنواخت تکیه‌گاه‌ها به ماکزیم نیروی محوری در حالت تحریک یکنواخت تکیه‌گاه‌ها در طول کابل اصلی با دامنه ارتعاش 0.1 m



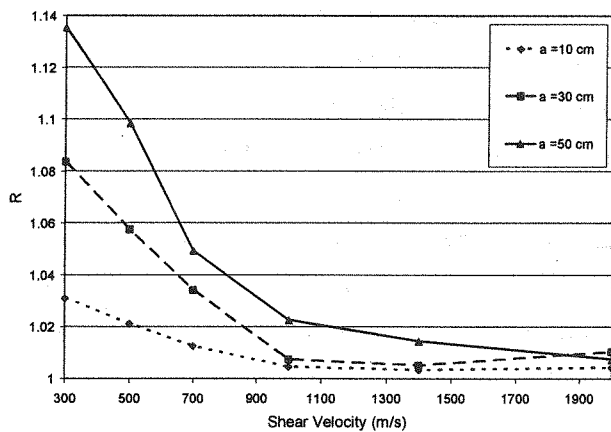
شکل (۶-ب): نسبت ماکزیم نیروی محوری کابل اصلی در حالت تحریک غیر یکنواخت تکیه‌گاه‌ها به ماکزیم نیروی محوری در حالت تحریک یکنواخت تکیه‌گاه‌ها در طول کابل اصلی با دامنه ارتعاش $0/3$ m



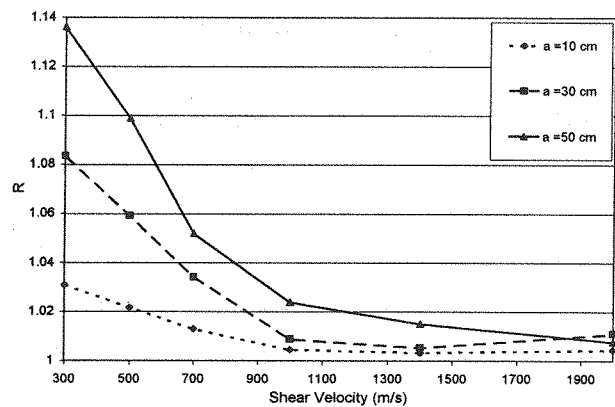
شکل (۶-ج): نسبت ماکزیم نیروی محوری کابل اصلی در حالت تحریک غیر یکنواخت تکیه‌گاه‌ها به ماکزیم نیروی محوری در حالت تحریک یکنواخت تکیه‌گاه‌ها در طول کابل اصلی با دامنه ارتعاش $0/5$ m



شکل (۷): نقاطی از کابل اصلی که پارامتر R در آنها محاسبه شده است



شکل (۸-ب): پارامتر R کابل اصلی در وسط دهانه میانی (نقطه D)



شکل (۸-الف): پارامتر R کابل اصلی در یک چهارم دهانه میانی (نقطه C)

مورد استفاده و نحوه تقسیم بندی آنها ارائه شده است [۱]. هر رکورد، سه مؤلفه تغییر مکان در جهات x ، y و z دارد. در هر یک از این چهار دسته پاسخ هر مدل ماکزیمم پاسخ سه رکورد در آن دسته در نظر گرفته شده است.

در حالت تحریک غیریکنواخت تکیه‌گاه‌ها، هر رکورد باتوجه به تقدم و یا تأخر زمانی نقاط تکیه‌گاهی، در این نقاط اعمال شده است. اختلاف زمانی نقاط تکیه‌گاهی تابعی از فاصله تکیه‌گاه‌ها و سرعت موج برشی بوده و در حالت تحریک یکنواخت، تمام نقاط تکیه‌گاهی به شکل همزمان تحریک شده‌اند. در شکل (۹) نحوه اعمال رکورد تغییر مکان در حالت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت به شکل شماتیک ارائه شده است.

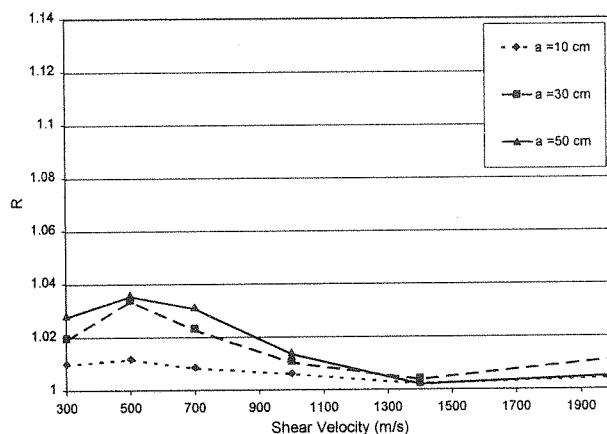
جدول (۳): مشخصات زلزله‌های انتخاب شده به منظور استفاده

در مدلها

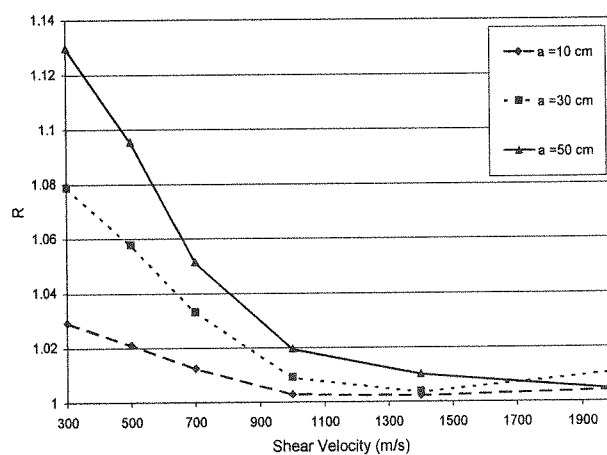
شماره دسته رکورد	سرعت موج برشی (m/s)	شتاب حداکثر (% g)	مدت زلزله (sec)	سال وقوع	شماره رکورد	نام ایستگاه
I $V_s=200$ (m/s)	۲۲۹	۰/۰۲۸۲	۱۶/۰۲	۱۹۷۸	۱۱۰۱-۲	کاشمر
	۲۳۰	۰/۰۱۳۲	۲۰/۶۳	۱۹۷۸	۱۰۸۷	خزری
	۲۳۰	۰/۰۱۸۱	۲۶/۵۹	۱۹۷۹	۱۱۰۷	خزری
II $V_s=500$ (m/s)	۵۲۰	۰/۰۲۳۹	۲۹/۴۲	۱۹۹۷	۱۸۱۶-۴	افین
	۴۷۶	۰/۵۸۴۸	۳۰/۷۲	۱۹۷۸	۱۰۸۴-۱	طیس
III $V_s=700$ (m/s)	۴۷۶	۰/۰۲۳۸	۸/۹۹	۱۹۷۹	۱۱۳۶-۲	طیس
	۷۶۰	۰/۰۲۱۳	۱۸/۵۹	۱۹۸۹	۱۳۴۷-۴	سیرج
	۷۶۰	۰/۰۱۵۲	۱۲/۵۵	۱۹۸۹	۱۳۴۷-۳	سیرج
VI $V_s=1000$ (m/s)	۷۶۰	۰/۰۰۹۷	۱۲/۲۶	۱۹۹۰	۱۳۹۹-۲	سیرج
	۹۵۰	۰/۰۱۲۸	۸/۹۶	۱۹۷۸	۱۰۸۲-۷	دیپوک
	۹۵۰	۰/۱۵۳۳	۲۶/۵۵	۱۹۷۸	۱۰۸۲-۱	دیپوک
	۹۵۰	۰/۰۱۵۷	۹/۸۶	۱۹۷۸	۱۰۸۲-۵	دیپوک

پس از اعمال تحریکات یکنواخت و غیریکنواخت بر روی چهارمدل مورد نظر، جمعاً نود و شش تحلیل صورت گرفته است که به منظور مقایسه پاسخ حالت تحریک یکنواخت و تحریک غیریکنواخت در اجزای سازه ای علاوه بر پارامتر R ، نسبت نیروهای تکیه‌گاهی در حالت تحریک غیریکنواخت و یکنواخت نیز محاسبه شده‌اند.

در شکل‌های (۱۰-الف)، (۱۰-ب)، (۱۰-ج) و (۱۰-د) و شکل‌های (۱۱-الف) و (۱۱-ب) پارامتر R در نقاط مشخصی از سازه؛ که در شکل (۷) نشان داده شده است، و نیز نسبت نیروهای تکیه‌گاهی در دو تکیه‌گاه میانی ارائه شده است.



شکل (۸-ج): پارامتر R کابل اصلی در وسط دهانه کناری (نقطه A)

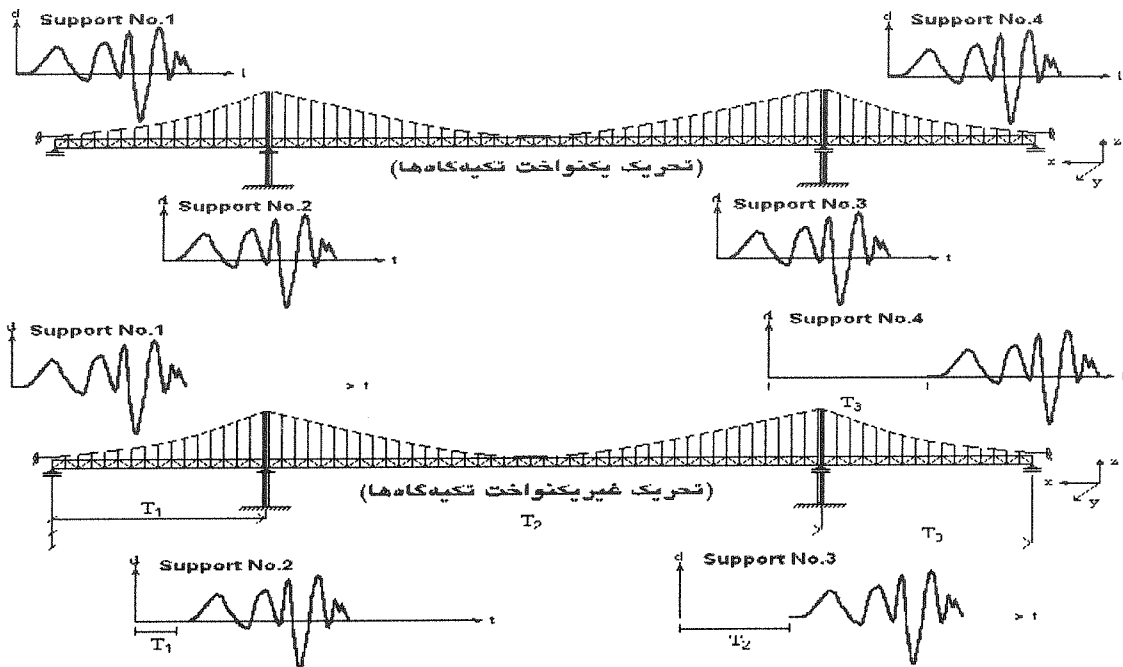


شکل (۸-د): پارامتر R کابل اصلی در سمت راست دکل سمت چپ (نقطه B)

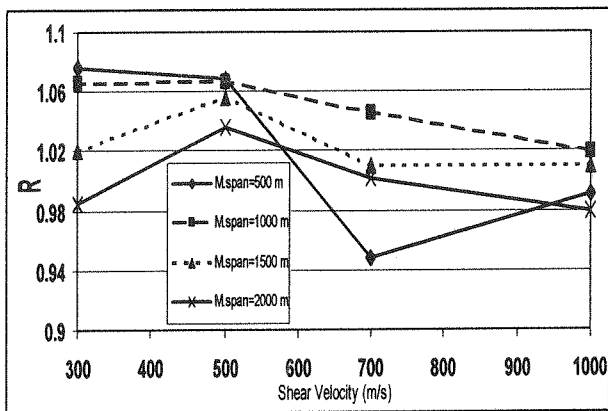
۸- اعمال تغییر مکانهای ناشی از زلزله به تکیه‌گاه‌ها

انتخاب رکوردهای مناسب زلزله به منظور حصول نتایج دقیق‌تر از اهمیت خاصی برخوردار است. با توجه به جنس لایه‌های زمین در محل احداث سازه، محتوای فرکانسی امواج و سرعت موج برشی مشخص می‌شود. پس اعمال هر رکورد باید با توجه به سرعت، موج برشی محل صورت پذیرد. در این بخش از تحقیق، سرعت موج برشی به چهار دسته تقسیم و برای هر دسته سه رکورد زلزله مناسب انتخاب شده است.

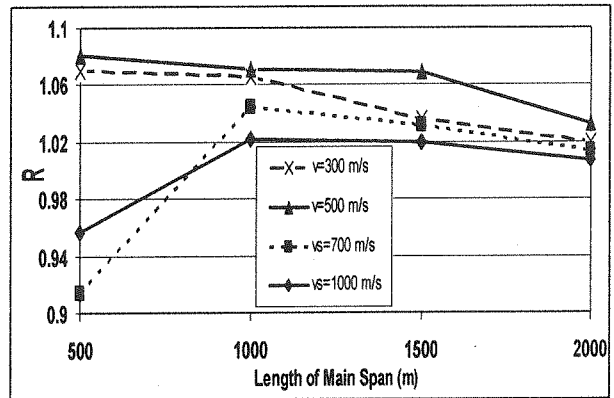
حداکثر شتاب هر رکورد بعد از مقیاس کردن به $0.35g$ تبدیل می‌شود و به همین منظور، نسبت شتاب $0.35g$ به حداکثر شتاب هر رکورد به عنوان ضریب مقیاس در هر رکورد ضرب و رکوردها مقیاس می‌شوند. در جدول (۳) مشخصات رکوردهای



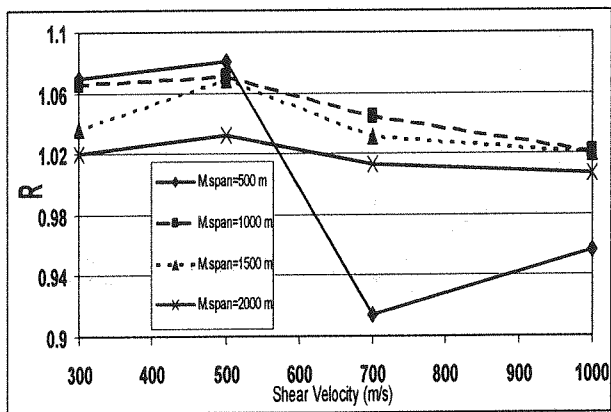
شکل (۹): نحوه اعمال تغییر مکان حالت یکنواخت و غیر یکنواخت



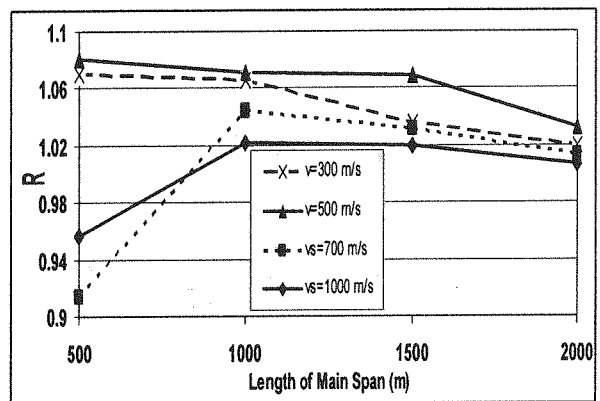
شکل (۱۰-ج): پارامتر R با توجه به سرعت موج برشی در نقطه B و طول دهانه میانی مشخص



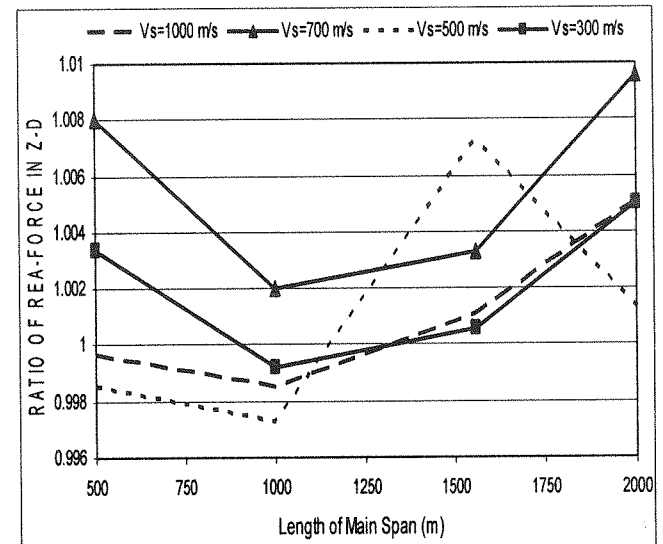
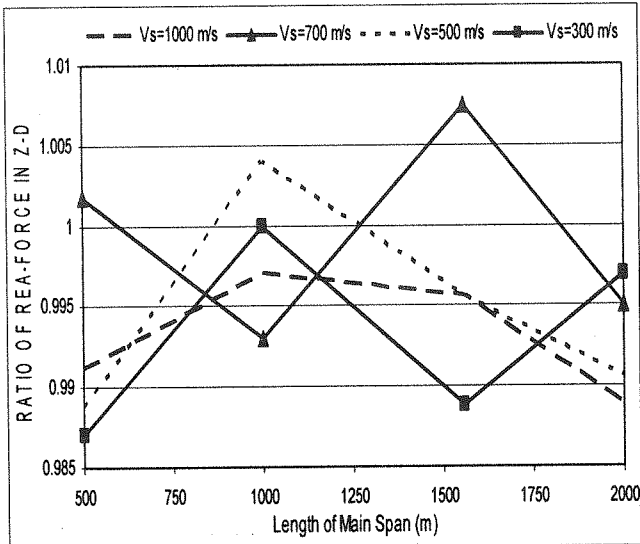
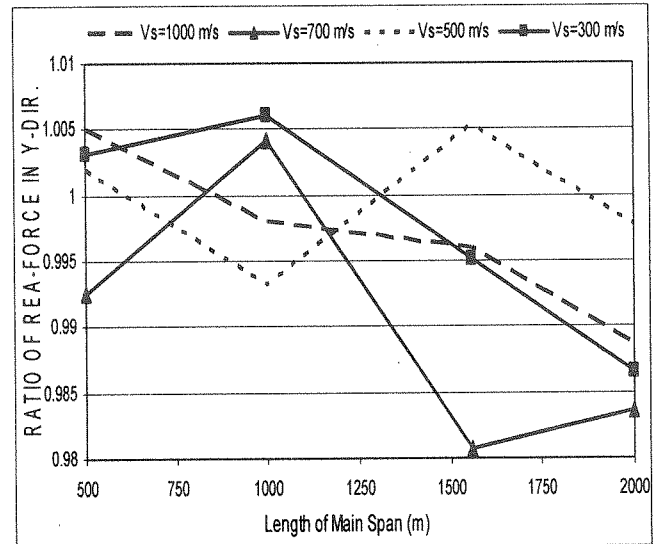
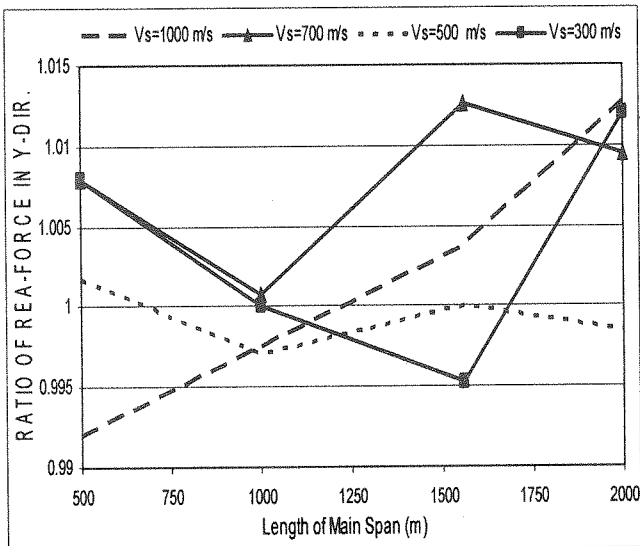
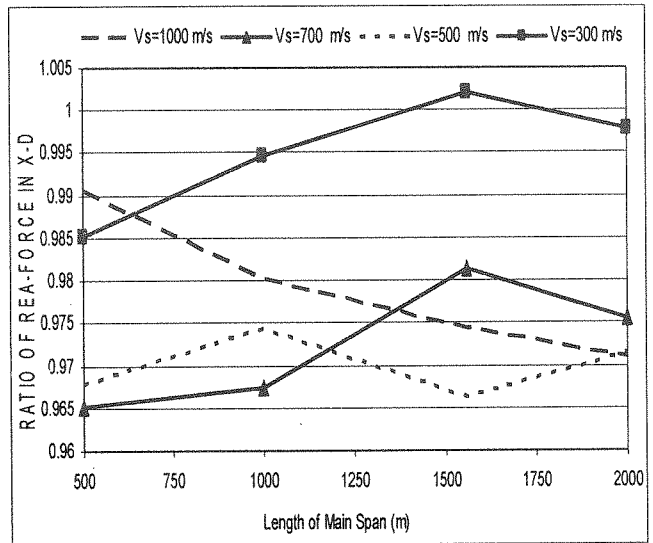
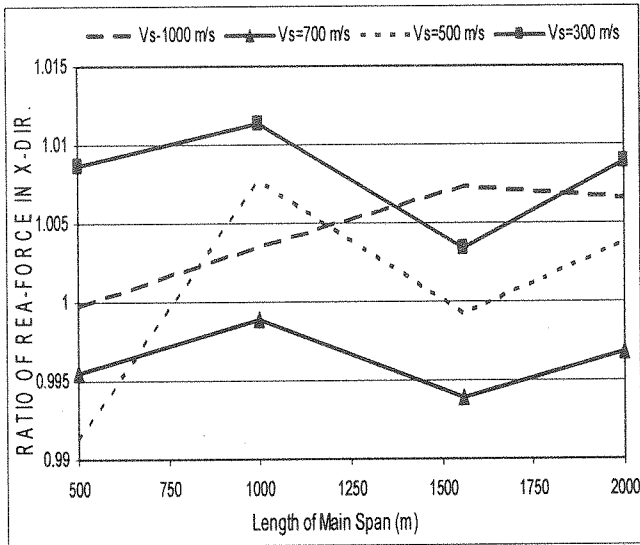
شکل (۱۰-الف): پارامتر R با توجه به طول دهانه میانی پلها در نقطه B و سرعت موج برشی V_s



شکل (۱۰-د): پارامتر R با توجه به سرعت موج برشی در نقطه D و طول دهانه میانی مشخص



شکل (۱۰-ب): پارامتر R با توجه به طول دهانه میانی پلها در نقطه D و سرعت موج برشی V_s



شکل (۱۱-ب): نسبت نیروهای تکیه گاهی در تکیه گاه سمت چپ در حالت تحریک غیریکنواخت تکیه گاهها به حالت تحریک یکنواخت تکیه گاهها با توجه به طول دهانه میانی در جهات X و Y و Z

شکل (۱۱-الف): نسبت نیروهای تکیه گاهی در تکیه گاه سمت راست در حالت تحریک غیریکنواخت تکیه گاهها به حالت تحریک یکنواخت تکیه گاهها با توجه به طول دهانه میانی در جهات X و Y و Z

[۱] حافظی مقدس، ناصر؛ "مطالعه اثرات ساختگاهی و حرکات شدید زمین لرزه‌ها در شرق و مرکز ایران (استان خراسان و کرمان)؛ تز دکتری به راهنمایی دکتر علی کمک پناه، دانشگاه تربیت مدرس، پ الف ۸۱۲۲۰۳، ۱۳۸۱

[۲] Abdel-Ghaffar, A.M.; Rubin, L.D.; "Suspension bridge response to multiple support excitations", Journal of the engineering mechanics, ASCE, 108 (EM2), 419-435, 1982.

[۳] Abdel-Ghaffar, A.M.; Rubin, L.D.; "Lateral earthquake response of suspension bridges", Journal of structural engineering, 109(3), 664-615, 1983.

[۴] Abdel-Ghaffar, A.M.; Rubin, L.D.; "Vertical seismic behavior of suspension bridges", Earthquake engineering and structural dynamics, 11, 1-19, 1983.

[۵] Abdel-Ghaffar, A.M.; Rubin, L.D.; "Torsional earthquake response of suspension bridges", Journal of the engineering mechanics, 110(10), 1467-1484, 1984.

[۶] Abdel-Ghaffar, A.M.; Nazmy, A.S.; "Effects of ground motion spatial variability on the response of cable-stayed bridges", Earthquake engineering and Struct. Dyn., 21(1), 1-20, 1992.

[۷] Bogdanoff, J.L.; Goldberg, J.E.; Schiff, A.J.; "The effect of ground transmission time on the response of long structures", Bull. Seism. Soc. Amss, 627-640, 1965.

[۸] Cheng, J.; Jiang, J.J.; Xiao, R.C.; Xiang, H.F.; "Series method for analyzing 3D nonlinear torsional divergence of suspension bridges", Computers & Structures, 81, 299-308, 2003.

[۹] Der Kiureghian, A.; Neuenhofer, A.; "Response spectrum method for multi-support seismic excitations", Earthquake engineering and structural dynamics, 21(8), 713-740, 1992

[۱۰] Dumanoglu, A.A.; Severn, R.T.; "Seismic response of modern suspension bridges to asynchronous vertical ground motion", Proc. Inst. Civil eng. Part 2, 83, 701-730, 1987.

[۱۱] Dumanoglu, A.A.; Severn, R.T.; "Stochastic response of suspension bridges to earthquake forces", Earthquake engineering and structural dynamics, 19, 133-152, 1990.

[۱۲] Esteva, L.; "Structural response to multi component earthquakes", Seminar adv., Vib., Imperial college, London, Sept 1978.

[۱۳] Harichandran, R.S.; "Random vibration under propagating excitation: closed-formed solution", Journal of the engineering mechanics, 118(3), 575-586, 1992.

[۱۴] Harichandran, R.S.; Hawwari, A.; Sweidan, B.N.; "Response of long-span bridges to spatially varying ground motion", Journal of structural engineering, 122(5), 476-484, 1996.

[۱۵] Wang, J.; Nu, S.; Wei, X.; "Effects of engineering geological condition on response of suspension bridges", Soil dynamic and earthquake engineering, 18, 297-304, 1999.

۷- زیر نویسها

- ۱) Suspension Bridge
- ۲) Cable Stayed Bridge
- ۳) Transient
- ۴) Large Displacement

این المان فقط دارای نیروی کششی می‌باشد(۵)

با توجه به ماهیت غیرخطی رفتار پلهای معلق کابلی و نحوه پاسخ این پلها به تحریک تکیه گاهی ناشی از امواج زلزله، پیش بینی پاسخ سازه نسبت به بارهای وارده دشوار است.

کابل اصلی و کابل‌های آویز عناصری هستند که فقط نیروی محوری کششی دارند در حالی که در محاسبه فرکانس‌های طبیعی سازه این عناصر، نیروهای کششی و فشاری دارند و بالطبع روش‌هایی که مبتنی بر روش‌های طیفی و یا آنالیز مودال می‌باشد در مورد پلهای معلق کابلی قابل استفاده نیستند؛ لذا آنالیز غیرخطی هندسی در مورد این سازه‌ها الزامی بوده و منظور کردن غیریکنواختی ارتعاش تکیه‌گاه‌ها نیز امری طبیعی است.

در اعمال شوک مثلثی به مدل دوم با افزایش دامنه نوسان، پارامتر R (نسبت ماکزیمم نیروی محوری در نقطه‌ای از کابل اصلی ناشی از ارتعاش غیریکنواخت تکیه‌گاه‌ها به ماکزیمم نیروی محوری در همان نقطه از کابل اصلی ناشی از ارتعاش یکنواخت تکیه‌گاه‌ها) به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد؛ به عبارت دیگر، نیروی محوری کابل اصلی به نسبت افزایش دامنه نوسان افزایش نمی‌یابد.

پارامتر R با افزایش طول دهانه میانی پل معلق کابلی و در نظر گرفتن سرعت موج برشی مشخص (و یا افزایش سرعت موج برشی و در نظر گرفتن طول دهانه میانی مشخص) کاهش می‌یابد، در حالت تحریک مثلثی، مقدار پارامتر R با عبارت درجه دو از سرعت موج برشی قابل توصیف است؛ در حالی که در حالت تحریک واقعی زلزله، مقدار R در هر نقطه از کابل اصلی رفتاری متفاوت با نقاط دیگر دارد که می‌تواند از انتشار امواج ساطع شده از نقاط تکیه‌گاهی ناشی شده باشد که تداخل این امواج در یک نقطه باعث افزایش پارامتر R و در نقطه دیگر باعث کاهش پارامتر R می‌شود؛ ولی به طور کلی روند کاهش پارامتر R با توانی بین ۲ و ۳ از سرعت موج برشی و یا طول دهانه میانی قابل بیان است.

مؤلفه قائم زلزله در ایجاد تنش‌ها و تغییر شکل‌های سازه ای نقش عمده ای دارد و باید مدنظر قرار گیرد. اثر این مؤلفه در حالت تحریک غیریکنواخت تکیه‌گاه‌ها حتی بیشتر از مؤلفه‌های افقی در ایجاد نیروهای کششی در کابل‌های اصلی است. نیروهای تکیه‌گاهی در دو تکیه‌گاه میانی پلهای معلق کابلی مورد مطالعه، در دو حالت تحریک یکنواخت و تحریک غیریکنواخت تفاوت چندانی ندارند و می‌توان اثر غیریکنواختی تحریک تکیه‌گاه‌ها را در نیروهای تکیه‌گاه‌های میانی نادیده گرفت.