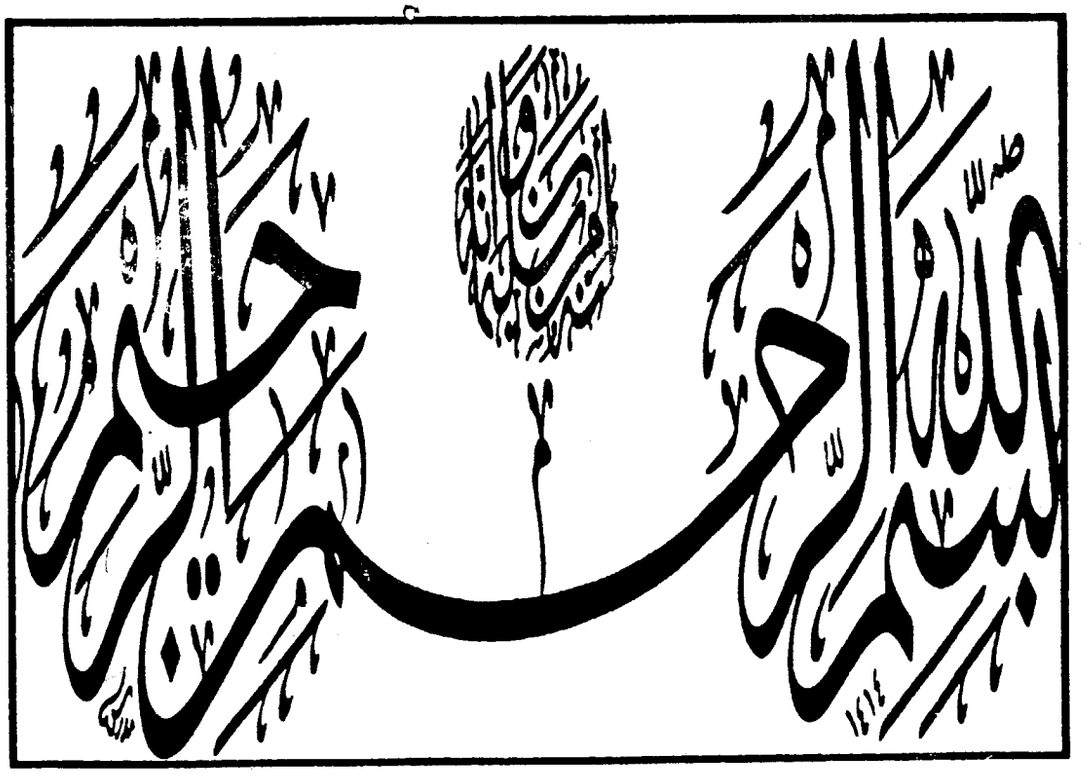


٢٥٩٢٥

۱۰ /۶/ ۱۳۷۸

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی مهندسی

۳۶۶۵/۲

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

مهندسی عمران - زلزله

بررسی رفتار دینامیکی خطی و غیرخطی هندسی پلهای کابلی معلق زوج صفحه تحت تأثیر نیروی زلزله

علیرضا طاهری

استاد راهنما:

دکتر فرهاد دانشجو

بهار ۱۳۷۸

۴۵۹۲۵

دانشگاه تربیت مدرس

تاییدیه هیات داوران

آقای علیرضا طاهری پایان‌نامه ۶ واحدی خود را با عنوان تحلیل دینامیکی خطی و غیرخطی هندسی پلهای معلق دو صفحه‌ای تحت تأثیر نیروی زلزله در تاریخ ۷۸/۲/۱۵ ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهائی این پایان‌نامه را از نظر فرم و محتوی تایید و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران با گرایش زلزله پیشنهاد می‌کنند. ۵ب۲

اعضای هیات داوران	نام و نام خانوادگی	امضاء
۱ـ استاد راهنما :	آقای دکتر فرهاد دانشجو	
۲ـ استاد مشاور :	ـــــ	
۳ـ استادان ممتحن :	آقای دکتر علی‌اکبر آقاکوچک	
	آقای دکتر کاظمی	
۴ـ مدیر گروه : (یا نمایندهٔ گروه تخصصی)	آقای دکتر حمزه شکیب	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان‌نامه/رساله مورد تأیید است.

امضای استاد راهنما:

شماره:.....

تاریخ:.....

پیوست:.....

آیین‌نامهٔ چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس مبیّن بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

مادّهٔ ۱ در صورت اقدام به چاپ پایان‌نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به مرکز نشر دانشگاه اطلاع دهد.

مادّهٔ ۲ در صفحهٔ سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد/رسالهٔ دکتری نگارنده در رشتهٔ مهندسی عمران-اجرا است که در سال ۱۳۷۸ در دانشکدهٔ فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرّس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر فرهاد دانشجو و مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر ——— از آن دفاع شده است.»

مادّهٔ ۳ به منظور جبران بخشی از هزینه‌های نشریات دانشگاه تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به مرکز نشر دانشگاه اهدا کند دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

مادّهٔ ۴ در صورت عدم رعایت مادّهٔ ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ‌شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرّس، تأدیه کند.

مادّهٔ ۵ دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پوداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در مادّهٔ ۴ را از محلّ توقیف کتابهای عرضه‌شدهٔ نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

مادّهٔ ۶ اینجانب علیرضا طاهری دانشجوی رشته مهندسی عمران-اجرا مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

تقدیم به:

پدر زحمتکش و بزرگوارم

مادر دلسوز و مهربانم

خواهر و برادر عزیزم

همسر فداکار و صبورم

و دوستان همدلم

به پاس همهٔ محبتهای بی‌دریغشان

تقدیر و تشکر:

به نام پروردگار یکتا، که آرامش را در ستیز گذر لحظات سخت ، سربلندی را در دورنمای مبهم آسمان رقابت و شکست را در میدان رویارویی جلوه‌های حیات قرار داده است ، محبوبی که رأیت فتح در پهنه بیکران کیهان جز به فرمانش برافراشته نگردد و حیرت و شکوه بی‌انتها جز او را نشاید.

بعد از حمد و ثنای خدای بزرگ، بر خود لازم می‌دانم که از جناب آقای دکتر فرهاد دانشجو دانشیار دانشکده فنّی‌ومهندسی بخش عمران که به‌عنوان استاد راهنما ، از شروع تحقیق تا پایان و در تمام مراحل آن مرا راهنمایی و کمک نمودند تشکر و قدردانی نمایم.

از جناب آقای دکترحمزه شکیب، رئیس محترم گروه زلزلهٔ بخش عمران که در طی دورهٔ کارشناسی ارشد، با راهنمایی‌های ارزنده و مفیدشان اینجانب را یاری نمودند بسیار سپاسگزارم.

همچنین از سایر اساتید محترم گروه مهندسی سازه و زلزله. آقایان، دکتر علی اکبر آقاکوچک، دکتر عباسعلی تسنیمی، دکتر حمید محرمی و دکتر عربزاده که در طی دورهٔ درسی از تجربیات علمی و عملی ایشان بهره‌مند بودم کمال تشکر را دارم.

چکیده

پلهای کابلی معلق برای دهانه‌های بیش از چند صد متر کاربرد فراوانی دارند. به دلیل دارا بودن سیستم باربری مناسب، ممان خمشی در تیر اصلی(عرشه) بستگی مستقیم به طول دهانه نداشته و در حد معقولی تثبیت می‌گردد. مسأله اساسی در تحلیل این سیستم، رفتار غیرخطی کل سازه می‌باشد. در این تحقیق، رفتار دینامیکی خطی و غیرخطی هندسی پلهای معلق زوج صفحه تحت تأثیر نیروی زلزله بررسی می‌گردد. رفتار غیرخطی هندسی در این سازه ناشی از دو عامل ، شکم‌دادگی کابلها در اثر وزن خود المان و تغییر شکلهای بزرگ سازه به دلیل تغییر دائمی نقاط مختلف پل با توجه به نوع بارگذاری می‌باشد. همچنین در این نوع سازه‌ها، به دلیل فاصله زیاد بین برجها، تحریک تکیه‌گاهها با یک اختلاف فاز زمانی و به صورت غیر همزمان (asynchronous) صورت می‌گیرد. برای این منظور ابتدا تئوری مربوط به اختلاف فاز زمانی و همچنین حرکت نسبی تکیه‌گاهها که باعث ایجاد تنشهای شبه استاتیکی می‌گردد ودر ادامهٔ آن فرمولاسیون رفتار غیرخطی هندسی ارائه شده است. سپس معادلات دینامیکی روش انرژی ، با در نظر گرفتن موارد مذکورتعمیم داده شده و مطابق با آن، یک برنامه کامپیوتری تهیه گردیده است. برای بررسی تأثیر رفتار غیرخطی هندسی و همچنین تحریک غیر همزمان تکیه‌گاهها در پاسخ پلهای معلق، یک پل نمونه تحت سه شتابنگاشت با در نظر گرفتن مقادیر متفاوتی برای سرعت امواج طولی زلزله مورد تحلیل قرار گرفته و پارامترهایی از قبیل تغییرات نیروی داخلی اعضای کابلی-لنگر خمشی ونیروی برشی عرشه و برج-جابجایی قائم وافقی برج و کابل اصلی و ... بررسی گردیده است. نتایج حاکی از آن است که لحاظ نمودن تحریک غیر همزمان تکیه‌گاهها برای سازه‌هایی که فاصله بین تکیه‌گاههای آنها زیاد است، ضروری می‌باشد. همچنین تحلیل غیرخطی ناشی از اثر توأم شکم‌دادگی کابلها و تغییر شکلهای بزرگ باعث افزایش مقادیر پاسخ می‌گردد.

کلید واژه : پل معلق-رفتار غیرخطی هندسی- زلزله-تحریک غیرهمزمان- پلهای دهانه بزرگ

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: کلیات	
۱-۱) مقدمه	۲
فصل دوم: تاریخچه تحقیقات	
فصل سوم: مروری بر انواع پلها و شرح پلهای معلق	
۳-۱) مروری بر انواع پلها	۲۸
۳ -۱-۱) طبقه‌بندی پلها از نقطه نظر طول دهانه	۲۸
۳-۱-۲) طبقه‌بندی پلها از نقطه نظر سیستم سازه‌ای	۲۸
۳ -۱-۳) طبقه‌بندی پلها از نقطه نظرمصالح	۲۹
۳ -۱-۴) طبقه‌بندی پلها از نقطه نظر شیوه ساخت	۲۹
۳ -۱-۵) طبقه‌بندی پلها از نقطه نظر کاربرد	۲۹
۳-۲) معرفی انواع پلها	۳۰
۳ -۲-۱) پلهای صفحه‌ای (بتن مسلح)	۳۰
۳ -۲-۲) پلهای تیر و شاهتیر	۳۰
۳ -۲-۳)پلهای خرپایی	۳۰
۳ -۲-۴)پلهای قوسی	۳۰
۳ -۲-۵)پلهای خرپای طره‌ای	۳۱
۳ -۲-۶)پلها با کابلهای کشیده (ترکه‌ای)	۳۱
۳ -۲-۷)پلهای قابی (پلها با شبکه فولادی)	۳۲
۳-۳)پلهای معلق (با کابل سهمی)	۳۳
۳ -۳-۱) سیر تکاملی پلهای معلق	۳۳

۳ -۳-۲) مزیت پلهای معلق..... ۳۵
۳ -۳-۳) ساختار پلهای معلق..... ۳۷
۳-۴) کابلها..... ۳۹
۳ -۴-۱) انواع کابلهای مارپیچی..... ۴۰
۳-۴-۱-۱) کابلهای مارپیچی هفت سیمه (The seven - wire strand)..... ۴۰
۳-۴-۱-۲) کابلهای مارپیچی با سیمهای دور گرد (Multi - wire helical strand)..... ۴۰
۳-۴-۱-۳) کابلهای مارپیچی باحلقه‌های قفل شده (Locked - coil strand)..... ۴۱
۳-۴-۱-۴) کابل با سیمهای موازی..... ۴۳
۳ -۴-۲) خواص مکانیکی کابلها..... ۴۴
۳-۴-۲-۱) مقاومت استاتیکی..... ۴۴
۳-۴-۲-۲) آسودگی (Relaxation)..... ۴۶
۳-۴-۲-۳) مقاومت خستگی (Fatigue Strengh)..... ۴۶
۳ -۴-۳) هیسترزیس در کابلهای دور گرد (Hysteresis of Helical Strands)..... ۴۷
۳ -۴-۴) مشخصات تغییر شکل یک کابل واحد..... ۴۸
۳-۵)سیستم پلهای معلق..... ۴۹
۳-۶) تأثیر نسبت خیز کابل اصلی به طول دهانهٔ میانی در پل معلق ۴۹
۳-۷) تأثیر ممان اینرسی عرشه در کمیتهای طراحی..... ۵۰
فصل چهارم: پاسخ لرزه‌ای پلهای معلق با در نظر گرفتن مؤلفهٔ حرکت زمین به طور غیر همزمان
۴-۱) مقدمه..... ۵۴
۴-۲) تحریک چند تکیه‌گاهی پلهای معلق با اختلاف فاز زمانی و در نظر گرفتن حرکت نسبی آنها ۵۴
۴-۲-۱)فرمولاسیون تئوری تحریک تکیه‌گاهها با اختلاف فاز زمانی و لحاظ نمودن حرکت نسبی آنها..... ۵۶
۴-۲-۲)نحوهٔ تعیین ماتریس R..... ۶۰

۴-۲-۳) نحوهٔ اعمال شتاب زلزله به تکیه‌گاه به طور غیر همزمان ۶۲
۴-۳) رفتار غیر خطی هندسی در پل معلق ناشی از شکم‌دادگی کابلها ۶۳
۴-۴) رفتار غیر خطی هندسی در پل معلق ناشی از تغییر شکلهای بزرگ..... ۷۰
۴-۵) تحلیل استاتیکی..... ۷۲
۴-۶) تحلیل دینامیکی لرزه‌ای پلهای معلق..... ۷۶
۴-۷) مزیتهای روش انرژی..... ۸۸
فصل پنجم: شرح برنامهٔ کامپیوتری تحلیل استاتیکی و دینامیکی لرزه‌ای پلهای کابلی معلق
۵-۱) معرفی برنامهٔ کامپیوتری ونحوهٔ عملکرد آن..... ۹۴
۵-۲) کنترل برنامهٔ کامپیوتری ۱۰۱
فصل ششم:تحلیل دینامیکی لرزه‌ای پل معلق نمونه و بررسی پارامترهای مؤثر در آن
۶-۱) مقدمه..... ۱۰۶
۶-۲) مشخصات پل نمونه..... ۱۰۷
۶-۳) مدل ریاضی پل نمونه..... ۱۱۰
۶-۴) مشخصات زلزله‌های مورد استفاده و نحوهٔ تهیهٔ فایل ورودی برای رکورد زلزله..... ۱۱۲
۶-۵-۱) محاسبهٔ فرکانسهای طبیعی پل معلق نمونه..... ۱۱۴
۶-۵-۲) شکل مودهای ارتعاشی پل نمونه..... ۱۱۷
۶-۶) بررسی پارامتریک پل معلق نمونه..... ۱۲۰
بحث و نتیجه‌گیری ۱۴۹
پیشنهادات..... ۱۵۲
مراجع..... ۱۵۳

==========

پیوست ۱: برنامهٔ کامپیوتری

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

اهمیت خطر زلزله درکشور ما باشدت یافتن روند توسعه کشور، تمرکز جمعیت وسرمایه مادی ومعنوی وافزایش آسیب پذیری این سرمایه‌ها در پهنه لرزه‌خیز ایران امروزه بیشتر درک می شود. جنبش قوی زمین دراین گستره پهناور پدیده جدیدی نبوده واز قرنها وهزاران سال پیش، هراز چندی رخ می داده است لیکن درسالهای اخیر وسعت آسیبها، توجه مسئولان ومردم را بیش از پیش به خود جلب کرده است.

یکی از راههای ارتباط بین انسانها استفاده از راههای زمینی می باشد. دره و رودخانه دوموانع عمده درمسیر راهها هستند که درطول یک راه بارها آن را قطع می کنند. بارونق گرفتن جوامع بشری وبه وجود آمدن وسایل نقلیه موتوری وغیرموتوری، انسانها جهت عبوراز این موانع ناگزیر به چاره اندیشی بودند. ایجاد گذرگاه امن بر روی رودخانه و دره که آن پل نامیده می شود، حاصل این تأ مل می باشد.

امروزه لازمه هرراه، عبور آسان ومطمئن از عوارض طبیعی چون دره ورودخانه می باشد که توسط پل انجام می شود هرچه سرمایه گذاری اولیه درساخت پلها بیشتر باشد هزینه های استهلاک وسایل نقلیه وزمان درآینده کمتر خواهدبود. زیرا به جای استفاده از پیچ وخمهای زیاد با ایجاد پل می توان از طولانی شدن مسیر وخطرات تهدید کننده آن کاست.

استفاده از فولاد وبعدها بتن آرمه درساخت پلها نتیجه پیشرفت صنعتی درعصر حاضر است. امروزه تقریبا همه پلها بااین دونوع مصالح ساخته می شوند زیرا رفتار آنها تحت اثر بارهای اعمالی

کاملا مشخص است وشکل پذیری نیز از امتیازهای این مصالح می باشد که باعث ایجاد پلهای متنوعی با کیفیت باربری مطلوب گردیده است.

پلها به عنوان عناصر مهم کلیدی درشبکه شریانی راههای یک کشور نقش منحصر به فردی را به لحاظ اقتصادی، سیاسی ونظامی ایفا می کنند. تامین ایمنی وپایداری پلها همواره از ضرورت واهمیت بالایی برخوردار است بخصوص درهنگام وقوع رویدادهای غیرمترقبه ومصیبت باری چون زلزله، نقش پلها دوچندان می شود. پلها همچون سازه‌های دیگر درمعرض لرزشها وآسیبهای زلزله قرار می گیرند بنابراین لازم است نکات ایمنی لرزه‌ای را در مراحل طرح، اجرا ونگهداری آن بادقت مضاعفی اعمال نمود.

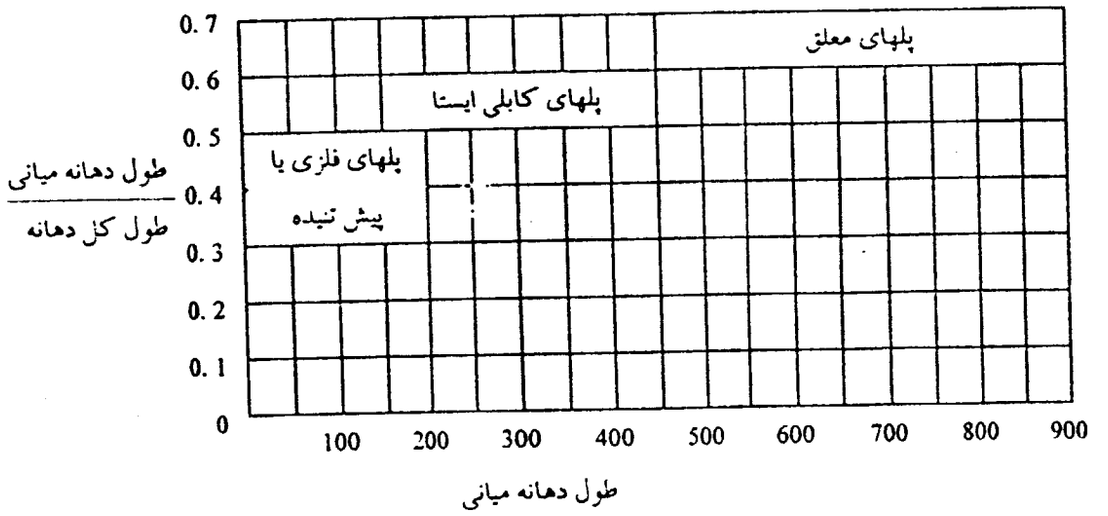
ضوابط آشتو که درسال ۱۹۹۲ منتشر گردید درمورد روش طراحی پلها دربرابر نیروهای زلزله تغییرات عمیقی نسبت به ضوابط ۱۹۸۹ نموده است.این تغییرات تاحدودی متأثر ازروند کلی تکامل آیین نامه های زلزله درآمریکا وجهان است. قبل از زلزله سان فرناندو، ضوابط طرح لرزه‌ای پل، مشابه وبرگرفته از ضوابط لرزه‌ای ساختمان بود، لیکن ضوابطی تدوین گردید که ویژگیهای دینامیکی پل، نزدیکی به گسلهای فعال وخواص خاک درآن منظور شده است.

ضوابط آیین‌نامه آشتو شامل پلهای معلق نمی شود وهمچنین آیین نامه پل ایران برای پلهایی بادهانه بیش از ۱۵۰ متر، تحلیل لرزه‌ای را الزامی نموده است . به دلیل این که دربرخی مناطق به خاطر شرایط جغرافیایی لازم است پلهایی بادهانه بیش از چندصدمتر احداث شود وسازه مناسب ازنظر اقتصادی برای این دهانه ها، پلهای معلق می باشد بنابراین تحلیل وطراحی لرزه ای این نوع پلها به طور دقیق ومبسوط الزامی است.

براساس اطلاعات موجود، درایران، مطالعاتی درمورد رفتار لرزه‌ای پلهای معلق صورت نگرفته است البته تاکنون درایران، پل معلق با دهانه چندصدمتر طراحی وساخته نشده است اما درپروژه تهران-شمال که قرار است پلهایی بادهانه بزرگ ساخته شود، قطعاً این پلها کاربرد خواهند داشت.

همچنین درآینده، برای اتصال برخی از جزایر به خشکی نیز از این پلها استفاده خواهد شد. اصل مطالعه، درایران جدید می باشد لذا بررسی رفتار لرزه‌ای این نوع پلها تحت شتابنگاشت‌ها الزامی است.

مطابق نمودار (۱-۱)، ازنظر اقتصادی استفاده از پل معلق با دهانه میانی بیش از چهارصد وپنجاه متر ونسبت طول دهانه میانی به طول کل پل بین ۰/۶ تا ۰/۷ مفید است.



نمودار (۱-۱): مناسبت ساخت انواع پلها با توجه به دهانه‌های پل

هدف از انجام این تحقیق شامل سه مرحله می باشد که عبارتند از :

۱) طراحی ونوشتن یک برنامه کامپیوتری برای انجام تحلیل دینامیکی خطی وغیرخطی (هندسی) پلهای معلق درحالت سه بعدی تحت تأثیر نیروی زلزله.

۲) بررسی تأثیر لحاظ نمودن اختلاف فاز زمانی درتکیه‌گاهها دررفتار دینامیکی پل معلق تحت تأثیر نیروی زلزله.

۳) ارزیابی تأثیر رفتار غیرخطی هندسی درپاسخ پلهای معلق .

همچنین فرضیات عبارتنداز:

۱) تاریخچه شتاب -زمان وارد به تکیه‌گاهها (پایه ها) یکسان خواهد بود وبارترافیک منظور نخواهد گردید.

۲) شتاب وارد بر تکیه‌گاهها اختلاف فاز زمانی خواهد داشت.

۳) آویزها به صورت قائم درنظر گرفته می شود.

همان گونه که می دانیم، روشهای معمول درتحلیل سازه‌ها ونرم افزارهای موجود، برای تحلیل سازه های معمولی ومتعارف پیش بینی شده اند. اما درمورد پلهای کابلی به دلیل وجود کابلها که قادر به عملکرد فشاری نمی باشد ویه عنوان یک عضو غیرخمشی عمل می نماید نمی توان ازنرم افزارهای موجود استفاده کرد. دراین پروژه برای تحلیل پلهای معلق که دارای رفتار غیرهندسی می باشد با استفاده از روش انرژی اقدام به برنامه ریزی برای تحلیل چنین سازه‌هایی شده است. این روش مبتنی بر حداقل کردن کل انرژی پتانسیل سیستم می باشد بنابراین دروضعیتی که انرژی پتانسیل کل سیستم (شامل انرژی پتانسیل بارهای اعمالی وانرژی کرنشی ذخیره شده درسازه می باشد) به کمترین مقدار خود برسد، مطلوب مایعنی تغییر مکان ونیروهای داخلی واقعی سازه حاصل می شود. دراین روش عکس العمل سازه، قدم به قدم دربازه زمان محاسبه شده ودرانتهای هرقدم تعادل نیروهای دینامیکی به وسیله حداقل کردن کل کار (انرژی) بااستفاده ازروش (conjugate - gradient) خطوط شیبدار به هم متصل به دست می آید. برای بهبود همگرایی می توان ازیک ماتریس قطری دینامیکی (scaling-matrix) استفاده نمود. کل انرژی پتانسیل یک سازه متشکل از اعضای خمشی وغیرخمشی به صورت توابعی ازکل انرژی پتانسیل لحظه ای، انرژی جنبشی وانرژی رهاشده براثر میرایی سازه وکار انجام شده توسط نیروهای دینامیکی درزمان مشخص می گردد. اختلاف فاز زمانی باتوجه به سرعت حرکت امواج طولی زلزله وطول دهانه‌ها مشخص خواهد شد وتأثیر درنظر گرفتن این اختلاف فاز مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

همچنین رفتار غیرخطی هندسی ناشی از تغییرات دائمی نقاط وشکم دادگی کابلها وتأثیر آن بر رفتار دینامیکی پل معلق ارزیابی می گردد.