



بررسی پارامتری رفتار غیر خطی لرزه‌ای پل کابلی ایستای دهانه بزرگ با عرشه جعبه‌ای

بهرروز کشته‌گر^۱، محمود میری^۲
(دریافت ۸۹/۲/۲۸، پذیرش ۹۱/۸/۱۲)

چکیده

در این مقاله رفتار لرزه‌ای پل کابلی ایستا با عرشه جعبه‌ای به طول ۱۲۵۵ متر، به روش اجزای محدود شبیه سازی و مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که برخورد امواج لرزه‌ای در جهتی غیر از جهات متعامد پل، ممکن است موجب ایجاد پیچش در عرشه و سایر اجزا گردد. از اینرو در این تحقیق با استفاده از تحلیل دینامیکی صریح، اثر برخورد امواج لرزه‌ای با زوایای مختلف به محل تکیه‌گاه برج‌ها و کوله‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به فاصله زیاد برج‌ها از یکدیگر امواج لرزه‌ای به صورت تحریکات یکنواخت و غیر یکنواخت تکیه‌گاهی به مدل اعمال و اثر زاویه برخورد امواج بر پاسخ پل، بررسی گردیده است. علاوه بر آن نواحی بعد از کمانش عرشه به ازای بارهای لرزه‌ای مختلف با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی هندسی اعضاء مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که صفحات فولادی بالا و پایین عرشه جعبه‌ای وارد ناحیه بعد از کمانش موضعی شده و تحت زوایای مختلف برخورد امواج به ازای تحریکات یکنواخت و غیریکنواخت تکیه‌گاهی پاسخ‌های متفاوتی حاصل شده است. این مطالعه نشانگر لزوم بررسی رفتار پل‌های دهانه بزرگ تحت زوایای مختلف برخورد امواج زلزله بوده و از طرفی نشان می‌دهد که با استفاده از ظرفیت بعد از کمانش موضعی عرشه به طرح اقتصادی‌تری دست خواهیم یافت.

کلمات کلیدی

پل کابلی دهانه بزرگ، زاویه برخورد زلزله، کمانش موضعی، تحریک یکنواخت و غیریکنواخت تکیه‌گاهی

Parametric Study of Seismic Non-Linear Behavior of a Box Girder Cable-Stayed Long Span Bridge

B. Keshtegar, M. Miri

Abstract

The seismic behavior of cable stayed bridge with 1255 meter span has been studied in this paper. A Finite Element model (FEM) has generated and the behavior of the bridge under ground motion has investigated, considering large deformation. The torsion can be occurred in the deck and other components of the bridge due to collision of seismic waves in direction expect of orthogonal directions of the bridge. Thus in this study, the effect of collision of seismic waves to the piers and abutment with different angle, has studied using the explicit dynamic analysis. Due to long distance of towers from each other seismic waves in from of uniform and non-uniform ground motion of the supports, have applied to the model. Moreover, local post-buckling behavior of the deck for different seismic loads has studied on the basis of geometric nonlinearity,. The results show that the top and bottom steel plates of the box girder, experience the post-buckling behavior and different responses can be obtained due to different strike angle with uniform and non-uniform support excitations. It shown that the study of long-span cable-stayed bridges under different strike angle of earthquake waves has necessity, and more economic sketch can be obtained with use of post buckling capacity.

Key words:

Long-span cable-stayed bridge, strike angle, local buckling, uniform and non-uniform ground motion

۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی گروه عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان. bkeshtegar@yahoo.com

(نویسنده مسئول)

۲- استادیار دانشکده مهندسی گروه عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان. Mmiri@hamoon.usb.ac.ir



با توجه به پیشرفت علم مهندسی سازه، ساخت پل‌ها با دهانه‌های بسیار بزرگ در سال‌های اخیر امکان‌پذیر شده و استفاده از آنها رو به فزونی است. به گونه‌ای که امروزه پل‌های کابلی ایستا با دهانه اصلی در حدود ۱۰۰۰ متر (پل‌های Tatura در ژاپن و Normandie در فرانسه [۱]) احداث و مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲]. حرکات شدید زمین در مناطق زلزله خیزی، که این گونه سازه‌های مهم و هزینه بر در آنها قرار دارند، باعث خرابی‌هایی در بخش‌های مختلف پل مانند: عرشه، برج‌ها، پایه‌های میانی پل و نیز انحراف برج‌های پل از موقعیت اولیه خود می‌شوند؛ بنابراین بررسی لرزه‌ای این گونه سازه‌ها حائز اهمیت می‌باشد. که در این راستا شناسایی رفتار لرزه‌ای پل‌های کابلی، می‌تواند به طراحی مناسب برای حفظ پایداری سازه تحت بارهای محیطی خصوصاً زمین لرزه کمک کند.

با توجه به ماهیت و انعطاف‌پذیری بالای پل‌های کابلی با دهانه‌های بزرگ، این گونه سازه‌ها ذاتاً رفتارهای غیرخطی داشته و بایستی در انواع تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی رفتار غیرخطی آنها لحاظ شود [۳ تا ۶]. از جمله دلایل رفتارهای غیرخطی در پل‌های کابلی ایستا می‌توان به شکم‌دادگی کابل‌ها، تأثیر بارهای فشاری و اندرکنش نیروی محوری فشاری با لنگر خمشی (اثر $P-\Delta$) در برج‌ها و تیر اصلی عرشه و اثرات تغییر شکل‌های نسبتاً بزرگ اشاره نمود [۴ و ۵]. در این مقاله ضمن مطالعه پاسخ پل به بارهای لرزه‌ای مختلف، رفتار غیرخطی پل با دهانه بزرگ نیز مد نظر قرار گرفته است.

۲- بررسی سابقه مطالعاتی موضوع

از اولین کسانی که به بررسی رفتار لرزه‌ای و دینامیکی پل کابلی به صورت دو بعدی پرداخت، Fleming بود [۳] و وی رفتار لرزه‌ای پل دهانه کوتاه Norbruke در آلمان را با استفاده از المان‌های تیر و کابل بر اساس مدل ریاضی

دو بعدی مورد بررسی قرار داده و پاسخ خطی و غیرخطی هندسی این پل تحت زلزله‌السترو را مطالعه نمود.

از دیگر افرادی که تحقیقات زیادی بر روی رفتار خطی و غیرخطی، مدل‌های دو بعدی و سه بعدی پل‌های ایستا با دهانه‌های متوسط و بزرگ انجام داده‌اند، می‌توان از Abdel-Ghaffar و همکاران وی نام برد [۴ تا ۸] و ۱۰]. در یک مطالعه پاسخ لرزه‌ای دو پل بر اساس مدل تحلیلی با دهانه‌های اصلی ۳۳۵ و ۶۷۰ متری توسط Nazmy و Abdel-Ghaffar مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت [۴ و ۵ و ۱۰]. نتایج حاصل بیانگر اختلاف چشمگیری در پاسخ لرزه‌ای خطی و غیرخطی هندسی پل دهانه بزرگتر بود. علاوه بر آن، تأثیر بارگذاری لرزه‌ای بر پاسخ پل‌های کابلی مذکور به صورت بارگذاری یکنواخت و غیریکنواخت تحریکات زمین بر دو مدل تحت تحریک زلزله‌السترو با هم مقایسه گردید و پاسخ‌های متفاوتی حاصل شد. بر اساس نتایج مطالعات تحت تحریکات غیریکنواخت تکیه‌گاهی عمدتاً پاسخ بزرگتری نسبت به تحریکات یکنواخت حاصل می‌گردد [۴ و ۸].

اثرات میراگرهای لزج و اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ لرزه‌ای پل کابلی ایستا با دهانه اصلی ۲۷۴ متر توسط Soneji بررسی شد [۱۱ و ۱۲]. وی بر اساس مدل‌سازی خاک به کمک فنر و میراگر اثر چندین زلزله را برای خاکی به عمق ۲۵ متر با چهار لایه متفاوت مورد بررسی قرار داد. که نتایج بیانگر پاسخ متفاوتی به ازای نوع خاک و زلزله‌های مورد بررسی بود [۱۲]. به منظور کاهش نیروی زلزله و بر اساس کنترل غیرفعال توسط میراگرهای الاستوپلاست مطالعه‌ای توسط Ali و Abdle-Ghaffar بر مدل پل با دهانه‌های اصلی ۳۳۵ و ۶۷۰ متر انجام شد [۹]. آنها سه جدا ساز پایه را در نقاط اتصال عرشه به کوله‌ها و برج‌ها قرار دادند و تحلیل لرزه‌ای بر اساس انتگرال‌گیری مرحله به مرحله بر اساس مدل‌های دو بعدی و شبیه سازی عرشه با المان تیر انجام دادند. نتایج نشان داد که استفاده از جداسازهای لرزه‌ای در پل‌های کابلی ایستا به کاهش پاسخ لرزه‌ای و لذا کاهش برش پایه برج‌ها کمک



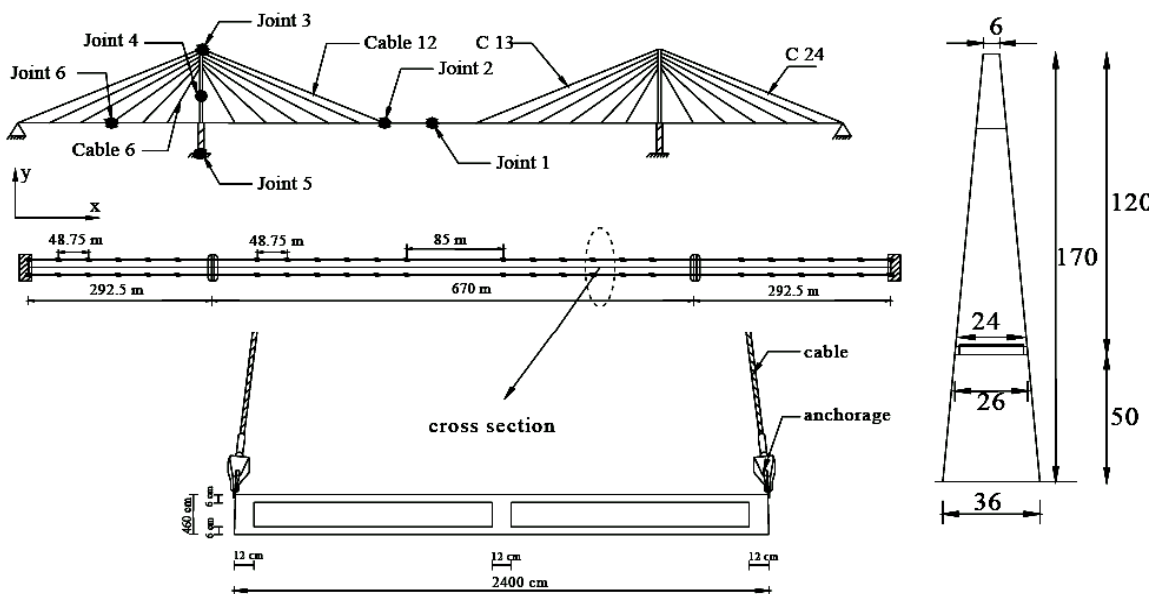
است. این مدل بررسی رفتار بعد از کماتش موضعی عرشه را امکان پذیر می‌سازد. با در نظر گرفتن ارتعاشات کابل در تحلیل دینامیکی پل تاثیر زاویه برخورد امواج زلزله نیز به صورت پارامتریک بررسی شده است.

۳- توصیف پل مورد مطالعه

پل کابلی ایستای مورد مطالعه دارای عرشه‌ای جعبه‌ای با گوشه‌های قائم و طول کلی عرشه آن برابر ۱۲۵۵ متر است. این پل دارای دهانه اصلی ۶۷۰ متر و دو دهانه کناری به طول ۲۲۹/۵ متر می‌باشد. برج‌های پل به صورت A شکل بوده ارتفاع کل آنها برابر با ۱۲۰ متر و ارتفاع قایقروبی برابر با ۵۰ متر دارند. کابل‌های پل نیز با آرایش بادبزی در نظر گرفته شده است (شکل ۱).

می‌کند همچنین استفاده از سیستم‌های کنترل غیر فعال لرزه‌ای تاثیر بسزایی در کاهش پاسخ جابجایی عرشه پل دارد. Takahashi نیز اثرات شرایط ساختگاه با توجه به سه نوع خاک سخت و متوسط و نرم را بر پاسخ یک پل کابلی با دهانه اصلی ۲۱۹ متر تحت بار لرزه‌ای در دو جهت طولی و قائم مورد بررسی قرار داده است [۲].

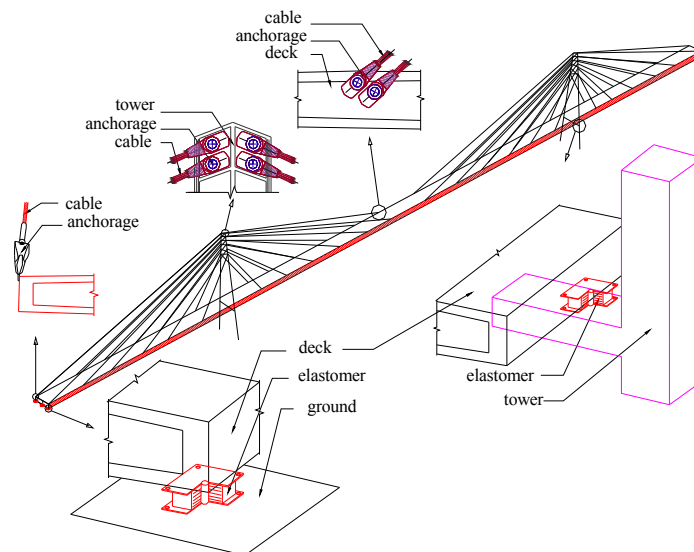
مروری بر مطالعات فوق الذکر نشان می‌دهد که تحقیقات انجام شده عمدتاً بر روی رفتار غیرخطی [۳ تا ۱۳] و یا اندرکنش خاک سازه [۱ و ۱۰ و ۱۲] تمرکز یافته‌اند. علاوه بر آن به منظور کاهش نیروهای لرزه‌ای، مطالعاتی نیز بر روی سیستم‌های کنترل غیر فعال صورت گرفته است [۹ و ۱۱ و ۱۶]. در اکثر مطالعات فوق نیز عرشه پل با استفاده از المان تیر مدل شده است. در این مقاله ضمن مدل‌سازی عرشه با المان پوسته و به صورت جعبه‌ای رفتار غیرخطی آن تحت تحلیل دینامیکی صریح مورد بررسی قرار گرفته



شکل (۱): مدل پل و موقعیت نقاط محاسبه شده پاسخ [۱۵]

صورت تکیه‌گاه الاستومری مدل شده است (شکل ۲).

بر اساس مطالعات قبلی و به منظور کاهش نیروی لرزه‌ای وارد بر عرشه، تکیه‌گاه آن در محل برج‌ها و کوله‌ها به



شکل (۲): نمای از مهاریهای کابل و تکیه‌گاه‌های عرشه [۱۶]

۴- توصیف مدل اجزای محدود پل

به منظور تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی مدل پل با استفاده از نرم افزار مدل اجزای محدود ABAQUS شبیه‌سازی شده است. عرشه پل با استفاده از المان‌های پوسته چهار گره‌ای (با شش درجه آزادی در هر گره) شبیه‌سازی شده که قادر به در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ عرشه می‌باشد. در محاسبه ماتریس سختی المان مطابق با شکل ۳ از روش انتگرال‌گیری کاهش یافته استفاده شده است. این المان با نام S4R در نرم افزار شناخته شده است که قادر به در نظر گرفتن کرنش‌های بزرگ داخل صفحه المان می‌باشد که یک المان با همگرایی مناسب در مسائل مختلف مکانیک جامدات از جمله: مسائل با صفحات ضخیم، ورق با رفتار غیرخطی مصالح و هندسی و نیز تحلیل کمانش صفحات، به شمار می‌رود. همچنین با این المان می‌توان انواع مختلف پوسته و به صورت ایزوتروپیک و ارتوتروپیک و نیز چند لایه و یا مسلح شده را شبیه‌سازی نمود.

برای شبیه‌سازی برج‌های بتنی و کابل‌های فولادی پل، از المان تیر سه بعدی دو نقطه‌ای (B32) با توابع شکل هرمیتی که هر گره شش درجه آزادی دارد، استفاده شده است این المان قادر به در نظر گرفتن تغییر شکل‌های

بزرگ می‌باشد. خواص مصالح مورد استفاده در شبیه‌سازی اجزای سازه پل مطابق با جدول ۱ تعریف شده و نیروی پیش کشش و وزن سازه با استفاده از تحلیل استاتیکی محاسبه و به تحلیل دینامیکی اضافه گردیده است. با انتخاب ۸ المان تیر با ممان (B32) اینرسی پایین جهت شبیه‌سازی کابل‌ها در تحلیل‌های لرزه‌ای، اثر ارتعاشات کابل‌ها نیز در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه کابل‌ها با ممان اینرسی پایین شبیه‌سازی شده‌اند لذا تحت نیروی فشاری ناچیزی کمانش می‌نمایند. به منظور جبران شکم‌دادگی کابل‌ها تنش پیش کششی معادل $488 \times 10^6 \frac{N}{m^2}$ به آنها اعمال شده است [۶].

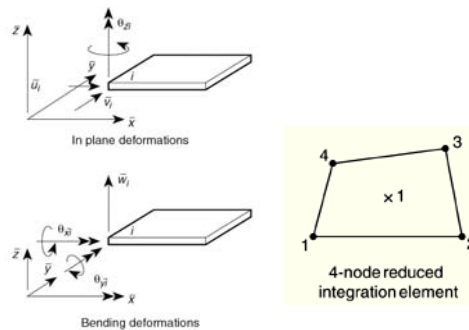
در تعریف خصوصیات پلاستیک عرشه از خواص مصالح یک فلز با نام JIS-SMA490 با توجه به فرم سخت شوندگی استفاده شده است [۱۵] که دارای تنش تسلیم در حدود $355 \times 10^6 \frac{N}{m^2}$ می‌باشد و منحنی رفتار ماده بعد از جاری شدن با شیبی در حدود $2/06 \times 10^9 \frac{N}{m^2}$ ادامه می‌یابد سایر خصوصیات این مصالح در جدول ۱ ارائه گردیده است.

جدول (۲): مشخصات تکیه گاه الاستومری مدل

جهت	K_{b1} (N/m)	K_{b2} (N/m)	K_{eff} (N/m)	C_b (N.s/m)
طولی (x)، عرضی (y)	17×10^6	2×10^6	$4/2 \times 10^6$	۴۰۰۵۱۱
قائم (z)	-	-	17×10^4	-

با توجه به اینکه فرکانس های طبیعی پل بین ۲ تا ۰/۲ هرتز می باشد، احتمال وقوع پدیده تشدید در سازه پل در زلزله های با محتوای فرکانسی غالب حدود ۲/۵ تا ۰/۱ هرتز وجود دارد. از طرفی مطابق توصیه آئین نامه ۲۸۰۰ دوره حرکت شدید زلزله انتخاب شده می بایست بزرگتر از ۱۰ ثانیه یا سه برابر با زمان تناوب اصلی سازه (در حدود ۱۵ ثانیه)، انتخاب گردد. لذا به منظور بارگذاری لرزه ای از دو رکورد ثبت شده زلزله کوبه سال ۱۹۹۵ در ایستگاه های *Takatori* و *Nishi-Akashi* که تقریباً با شرایط خواسته شده منطبق است استفاده گردیده و تحریکات لرزه ای به صورت یکنواخت و غیر یکنواخت تکیه گاهی اعمال گردیده اند. بارگذاری لرزه ای و زاویه چرخش رکورد زلزله در جهت داخل صفحه به صورت شماتیک در شکل ۵ نشان داده شده است. میرایی در نظر گرفته شده برای مدل پل، میرایی رایلی است که معمولاً در مسائل حوزه زمان از آن استفاده می شود و برای دو فرکانس ۰/۲ و ۲ هرتز ضریب میرایی برابر با ۲ درصد در نظر گرفته شده است [۵].

جهت صحت مدل سازی پل در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS، از مقایسه نتایج تحلیل مودال سازه پل با استفاده از این نرم افزار و نتایج بر گرفته از مرجع [۵] استفاده شده که مقایسه مود شکل ها و فرکانس های طبیعی پل در شکل ۶ ارائه گردیده است. مشخص است که فرکانس های طبیعی و مود شکل های پل شبیه سازی شده در نرم افزار مورد استفاده، نزدیک به نتایج حاصل از مرجع [۵] نتیجه شده است.

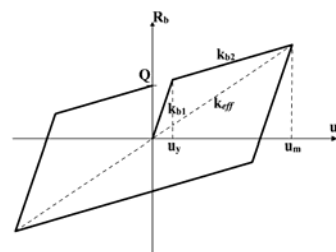


شکل (۳): المان پوسته ۴ گره ای [۱۷]

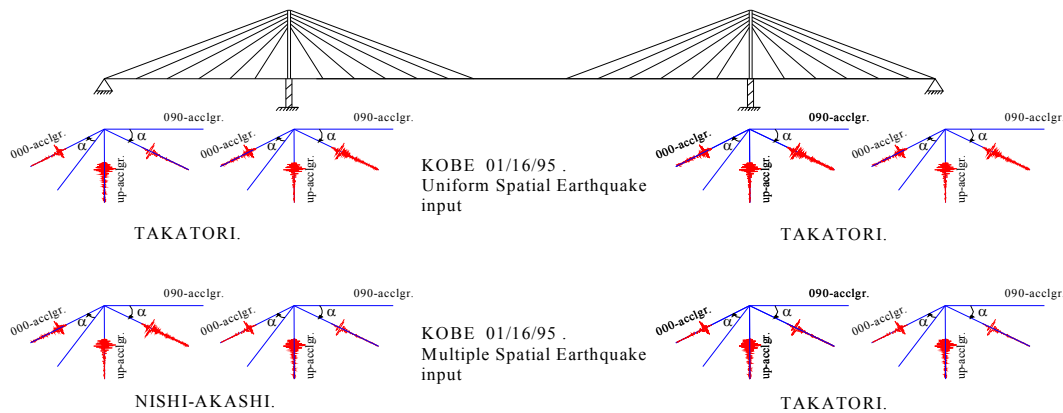
جدول (۱): خصوصیات الاستیک مصالح پل کابلی ایستا

نوع مصالح	مدول ارتجاعی ($\frac{N}{m^2}$)	ضریب پواسون	چگالی ($\frac{Kg}{m^3}$)	
فولاد	$2/06 \times 10^{11}$	۰/۳	۸۷۵۰	
بتن	$3/1 \times 10^{10}$	۰/۲۵	۲۵۰۰	
کابل ها	C24-C13-C12-C1	$1/74 \times 10^{11}$	۰/۳	۱۱۲۰۰
	C23-C14-C11-C2	$1/81 \times 10^{11}$		
	C22-C15-C10-C3	$1/87 \times 10^{11}$		
	C21-C16-C9-C4	$1/93 \times 10^{11}$		
	C20-C17-C8-C5	$1/98 \times 10^{11}$		
	C19-C16-C7-C6	$2/00 \times 10^{11}$		

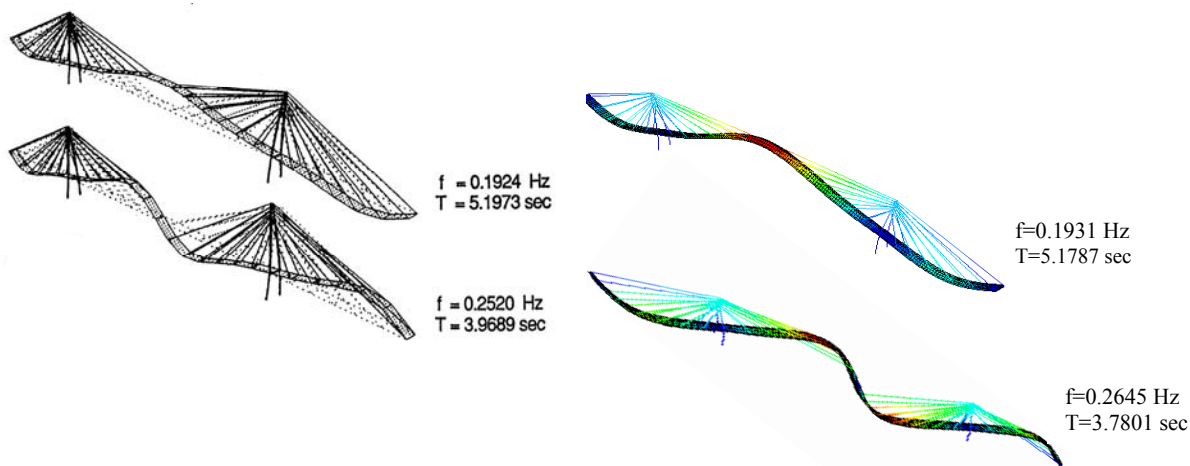
جهت اتصال کابل به عرشه و برج ها از المان Joint استفاده شده است. این المان قادر است جابجایی متقابل کابل ها را به عرشه و برج ها در محل اتصال برابر نماید. در تکیه گاه های عرشه، جداساز پایه ای در نظر گرفته شده که مطابق با شکل ۴ بر اساس مدل تحلیلی دو خطی به صورت فنر و میراگر شبیه سازی شده است. خواص مورد استفاده در این جداسازها مطابق با جدول ۲ در نظر گرفته شده است [۹].



شکل (۴): منحنی نیروی - تغییر شکل جداساز پایه



شکل (۵): نمایش شماتیک بارگذاری لرزه‌ای و زاویه برخورد زلزله



شکل (۶): مقایسه مود شکل‌ها و فرکانس‌های طبیعی نرم افزار ABAQUS و مرجع [۵]

$$\{\ddot{u}\}_{i+\frac{1}{2}}^N = \{\ddot{u}\}_{i-\frac{1}{2}}^N + \frac{\Delta t_{i+1} + \Delta t_i}{2} \{\ddot{u}\}_i^N \quad (۲)$$

$$\{u\}_{i+1}^N = \{u\}_i^N + \Delta t_{i+1} \{\dot{u}\}_{i+\frac{1}{2}}^N \quad (۳)$$

$\{u\}^N$ بردار جابجایی و چرخش هر گره از المان، $\{\ddot{u}\}^N$ بردار سرعت و $\{\dot{u}\}^N$ بردار شتاب است. در ابتدای گام زمانی جدید شتاب برای جایگزینی در معادلات فوق مطابق رابطه ذیل محاسبه می‌گردد.

$$\{\ddot{u}\}_i^N = [M]^{NJ} (\{P\}_i^J - \{I\}_i^J) \quad (۴)$$

در معادله فوق $[M]^{NJ}$ معکوس ماتریس جرم سازه، N تعداد درجات آزادی مدل، $\{P\}_i^J$ بردار نیروهای خارجی و $\{I\}_i^J$ بردار نیروهای داخلی می‌باشد.

۵- الگوریتم حل روش صریح

معادله حرکت حاکم بر سیستم اجزای محدود را می‌توان به صورت زیر نوشت:

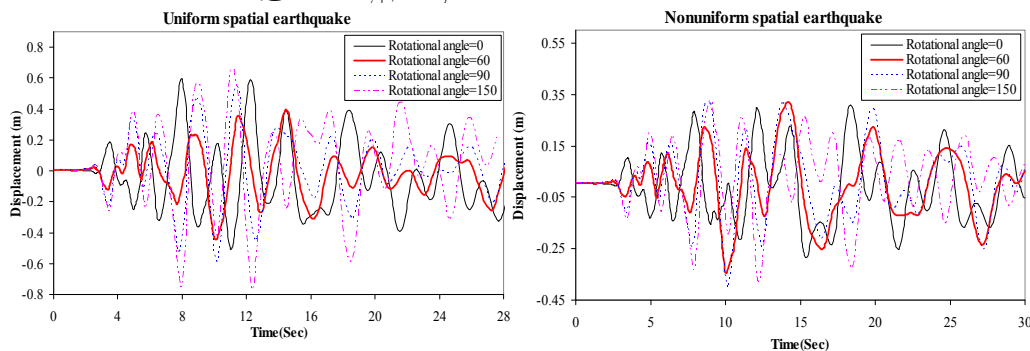
$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (۱)$$

ماتریس‌های $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سختی برای سیستم سازه می‌باشند. $\{F(t)\}$ بردار نیروهای اعمال شده به سیستم که برای شتاب وارده به سنگ بستر (\ddot{u}_g) برابر با، $\{F(t)\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g$ می‌باشد. در زمان t ، شتاب بدست آمده و بر اساس آن سرعت در زمان $t + \frac{\Delta t}{2}$ و سپس جابجایی برای زمان $t + \Delta t$ محاسبه شود [۱۸].

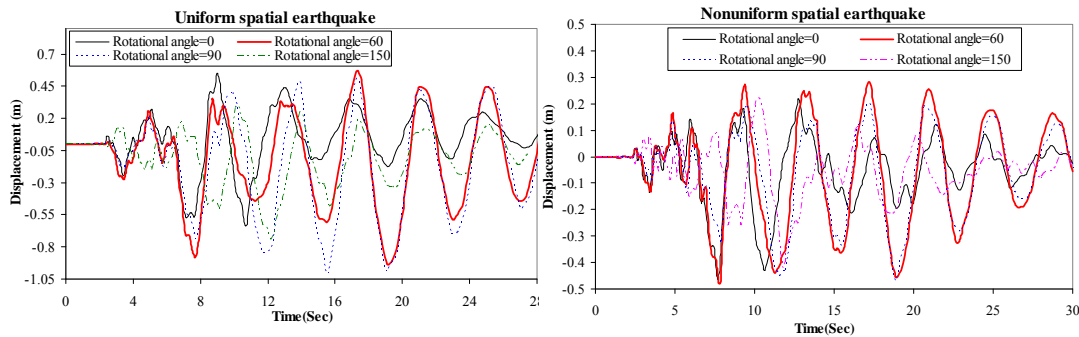
۶- بررسی نتایج تحلیل تاریخچه زمانی پل

جهت بررسی لرزه‌ای پل مورد مطالعه، از دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی پیاپی استفاده شده است به نحوی که تغییر شکل‌ها و تنش‌های موجود در اجزای پل، در انتهای تحلیل استاتیکی به صورت شرایط اولیه به تحلیل دینامیکی انتقال می‌یابد. تحلیل استاتیکی به منظور در نظر گرفتن وزن سازه پل و همچنین شکم‌دادگی کابل‌ها انجام شده است. این تحلیل باعث می‌شود که فرم تغییر شکل یافته پل در ابتدای شروع تحلیل دینامیکی حفظ گردد. سپس در گام بعدی، از تحلیل صریح دینامیکی با در نظر گرفتن

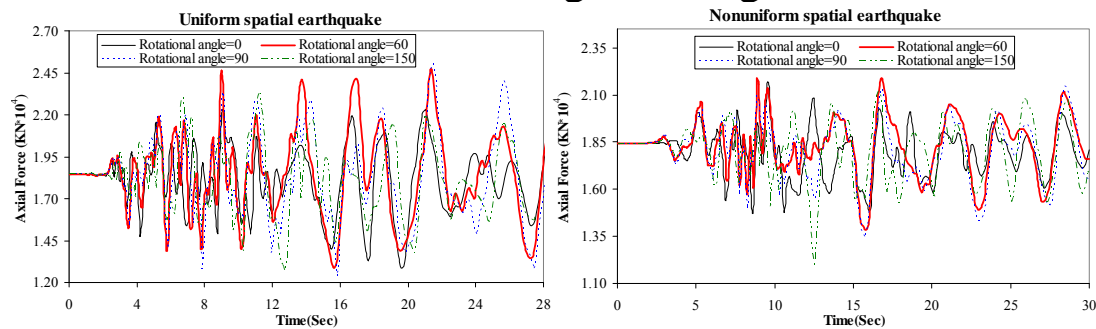
تغییر شکل‌های بزرگ استفاده شده است و پاسخ پل با توجه به زوایای برخورد صفر ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته است. برخی از نتایج تاریخچه زمانی به ازای زوایای برخورد فوق، تحت تحریکات یکنواخت و غیریکنواخت تکیه‌گاهی زلزله مورد مطالعه، در شکل‌های ۷ تا ۹ ارائه شده است. براساس نتایج ارائه شده مشاهده می‌گردد که نه تنها حداکثر پاسخ تاریخچه زمانی، به ازای تحریک صفر درجه حاصل نشده بلکه حداکثر پاسخ لرزه‌ای در دو تحریک یکنواخت و غیریکنواخت تکیه‌گاهی نیز تحت زاویه برخورد امواج متناظر حاصل نشده است.



شکل (۷): پاسخ جابجایی وسط عرشه پل در جهت عرضی (Z)، نقطه ۱



شکل (۸): پاسخ جابجایی بالای برج پل در جهت طولی (X)، نقطه ۳



شکل (۹): پاسخ تاریخچه زمانی، نیروی محوری کابل ۱۲

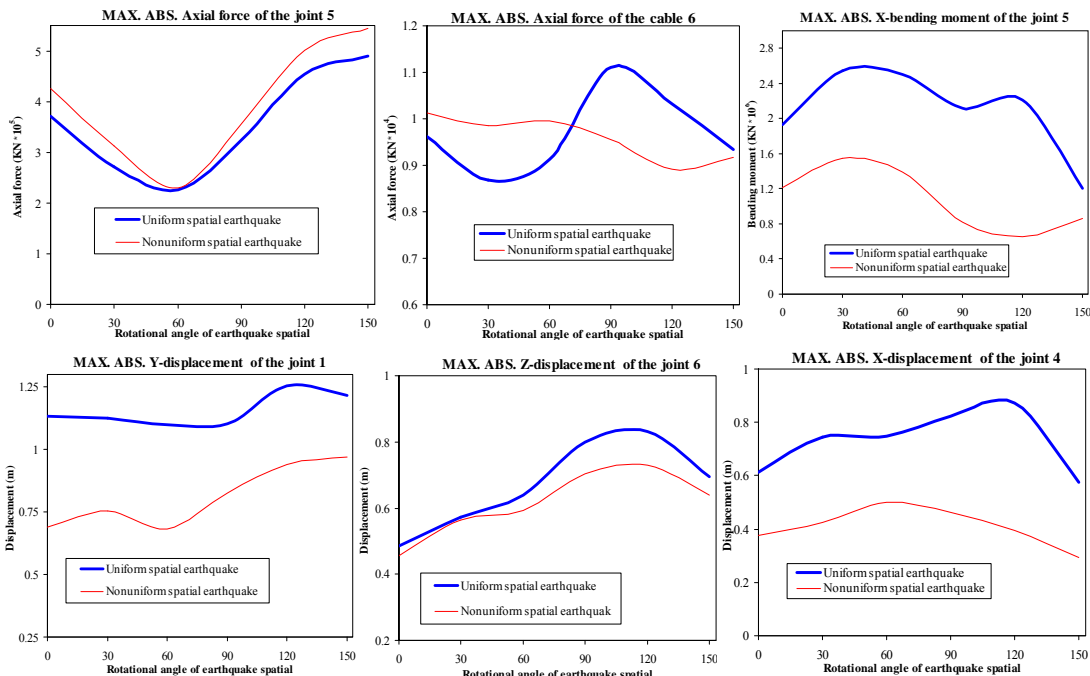
شکل ۷ پاسخ تاریخیچه زمانی جابجایی وسط دهانه عرشه در جهت عرضی پل را نشان می‌دهد. مشخص است که حداکثر پاسخ، تحت تحریک یکنواخت تکیه‌گاهی به‌ازای زاویه برخورد ۱۵۰ درجه و در تحریک غیریکنواخت، تحت زاویه برخورد ۶۰ درجه حاصل شده است.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۸ حداکثر جابجایی در جهت طولی بالای برج به‌ازای تحریک یکنواخت در زاویه برخورد امواج ۱۵۰ درجه و در تحریک غیریکنواخت تحت زاویه برخورد ۶۰ درجه حاصل شده است. این نتایج بیانگر اختلاف پاسخ سازه تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت بوده و اهمیت تاثیر زاویه برخورد امواج لرزه‌ای در تحلیل اینگونه سازه‌ها را نشان می‌دهد. در شکل ۹ پاسخ نیروی محوری کابل ۱۲ نشان داده شده است. همانطوریکه در این شکل مشاهده می‌شود نتایج حداکثر پاسخ در تحریکات یکنواخت و غیریکنواخت تکیه‌گاهی تحت زاویه ۶۰ درجه حاصل شده است.

با توجه به نتایج بدست آمده پاسخ‌های سازه اعم از نیرو و تغییر مکان تحت تحریک یکنواخت تکیه‌گاهی عمدتاً

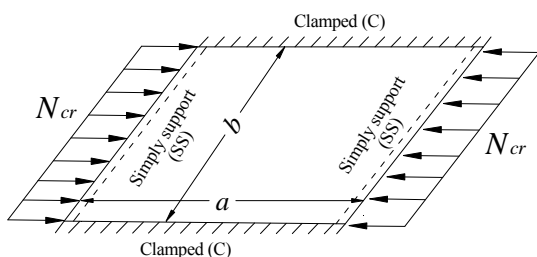
بیشتر از تحریک غیریکنواخت است. به نظر می‌رسد در این بارگذاری لرزه‌ای محتوای فرکانس تحریک یکنواخت به فرکانس غالب اجزای سازه پل نزدیک باشد که این امر موجب ایجاد نیروی لرزه‌ای بیشتری در سازه پل گردیده است.

در شکل ۱۰ حداکثر پاسخ برخی از نقاط سازه پل به‌ازای زاویه برخورد امواج لرزه‌ای تحت تحریکات زمین لرزه به صورت یکنواخت و غیر یکنواخت، ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده، حداکثر پاسخ به‌ازای زوایای متعامد برخورد امواج در جهات محورهای اصلی سازه پل حاصل نشده است. حداکثر پاسخ نیروی محوری (نقطه ۵) تحت دو تحریک یکنواخت و غیریکنواخت، به ترتیب بر اثر زاویه برخورد ۱۵۰ و ۶۰ درجه حاصل شده است. همچنین جابجایی در جهت عرضی وسط دهانه کناری (جابجایی در جهت Z نقطه ۶)، به‌ازای زاویه برخورد ۱۲۰ درجه در تحریک یکنواخت و غیریکنواخت تکیه‌گاهی، نتیجه شده است.



شکل (۱۰): مقادیر اندازه گیری شده بیشینه قدر مطلق، پاسخ برخی از نقاط سازه پل، تحت تحریکات یکنواخت و غیریکنواخت





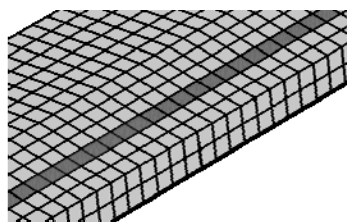
شکل (۱۱): صفحه مستطیلی تحت نیروی محوری [۲۰]

با توجه به نتایج شکل ۱۴ مشخص است که طول کمانش صفحه در حدود عرض آن است لذا ضریب کمانش این صفحه می‌تواند در حدود نسبت ابعادی ۱ لحاظ گردد، از اینرو نیروی بحرانی تحلیلی این صفحه با توجه به خصوصیات عرشه که در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه گردیده برابر با

$$N_{cr} = 7.69 \frac{\pi^2 E t^3}{12(1-\nu^2)b^2}$$

$$N_{cr} = 7.69 \frac{\pi^2 \times 2.06 \times 10^{11} \times 0.06^3}{12(1-0.3^2) \times 12^2} = 2.148 \times 10^6 \text{ N/m}$$

می‌باشد. از تحلیل کمانش مدل اجزای محدود مقدار نیرویی کمانشی عرشه در حدود $N_{cr} = 2.276 \times 10^6 \text{ N/m}$ نتیجه شده که با نیروی کمانشی تحلیلی رابطه فوق مطابقت دارد. با توجه به نیروی فوق رفتار بعد از کمانش موضعی یک ردیف المان عرشه که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، بررسی می‌گردد.



شکل (۱۲): یک ردیف المان مورد بررسی

در شکل ۱۳ حداکثر نیروی محوری در جهت طولی المان‌های نشان داده شده در شکل ۱۲، به ازای زوایای متفاوت برخورد امواج در دو تحریک یکنواخت و غیریکنواخت تکیه‌گاهی، ارائه شده است حداکثر پاسخ نیروی محوری تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت تغییر کرده اما نمی‌توان بین آنها تفاوتی قائل شد. در تحریک یکنواخت حداکثر نیروی محوری، به ازای زوایای

حداکثر پاسخ نیروی محوری کابل ۶، در دو تحریک یکنواخت و غیریکنواخت، به ازای زوایای مختلف برخورد امواج کاملاً متفاوت می‌باشد. بطوریکه به ازای زاویه برخورد کمتر از ۶۰ درجه حداکثر پاسخ به ازای تحریک غیریکنواخت، حاصل شده درحالی‌که تحت زوایای برخورد بزرگتر از ۶۰ درجه، حداکثر پاسخ به ازای تحریک یکنواخت حاصل شده است. به نظر می‌رسد با تغییر زاویه برخورد، محتوای فرکانسی بارگذاری تغییر کرده، موجب تحریک مودهای بالاتر و یا مود ارتعاشی غالب کابل‌ها می‌گردد.

بر اساس نتایج شکل ۱۰، درصد اختلاف بین حداکثر و حداقل پاسخ نقطه وسط عرشه در جهت قائم (جابجایی در جهت Y نقطه ۱) در تحریک یکنواخت، در حدود ۱۲ درصد و در تحریک غیریکنواخت برابر ۴۲ درصد می‌باشد. اختلاف زیاد بین نتایج در تحریک غیریکنواخت لزوم بررسی تاثیر زاویه برخورد و نوع بارگذاری لرزه‌ای با تحریک غیریکنواخت را نشان می‌دهد.

یک صفحه مستطیلی به ابعاد a و b مطابق با شکل ۱۱ تحت بار یکنواخت فشاری می‌باشد. نیروی کمانش این صفحه به شرایط مرزی و ابعاد آن وابسته بوده که با استفاده از رابطه (۵) قابل محاسبه است [۱۹]:

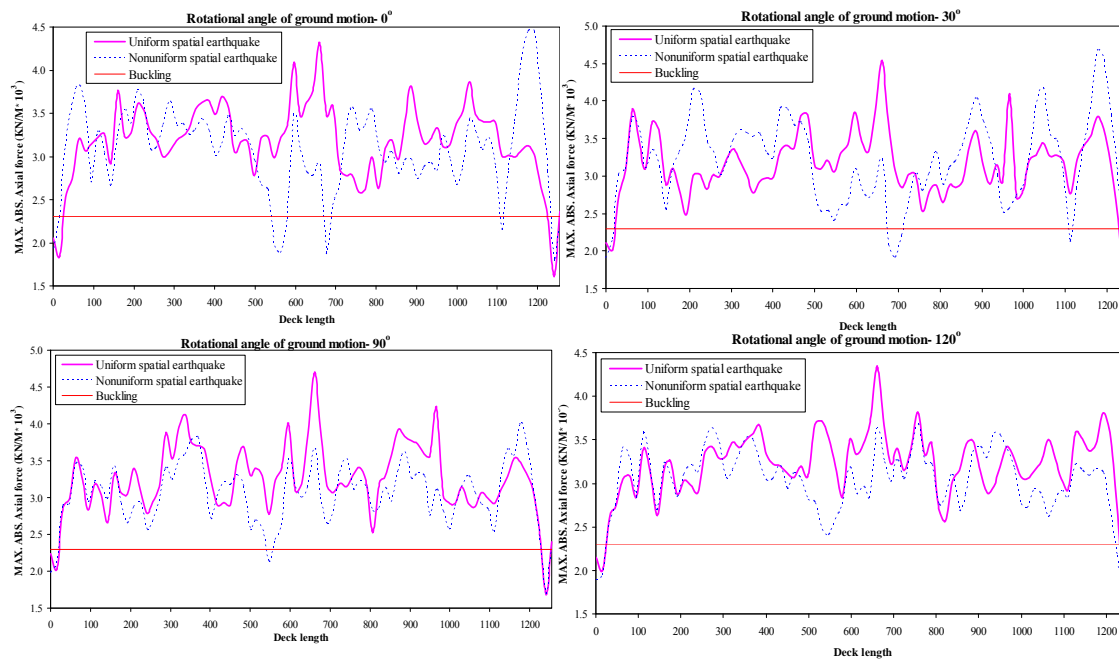
$$N_{cr} = K \frac{\pi^2 D}{b^2} \quad (5)$$

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

که در آن E مدول ارتجاعی، ν نسبت پواسن و t ضخامت صفحه می‌باشد. K ضریب کمانش صفحه بوده که بر اساس شرایط مرزی و ابعاد صفحه قابل محاسبه است. این ضریب برای صفحه ای مطابق با شکل ۱۰ که شرایط مرزی آن به صورت دو طرف مقابل گیردار و مفصلی می‌باشد برای نسبت طول به عرض یک ($a/b=1$) برابر با $7/69$ و برای نسبت طول به عرض بزرگتر از ۴ ($a/b>4$) در حدود ۷ می‌باشد [۱۹ و ۲۰].

نیرو در نقاط مختلف عرشه ممکن است ناشی از تحریک یکنواخت یا غیریکنواخت باشد و لذا با بررسی رفتار پل تحت یکی از دو تحریک به نتایج قابل اطمینانی دست نخواهیم یافت.

برخورد صفر و ۳۰ درجه، در محدوده میانی عرشه و در تحریک غیریکنواخت در محدوده برج‌های میانی پل حاصل شده است. به ازای زوایای برخورد ۹۰ و ۱۲۰ درجه اختلاف چشمگیری بین پاسخ تحریکات یکنواخت و غیریکنواخت تکیه‌گاهی، در محدوده برج‌های میانی مشاهده نمی‌شود. بررسی نتایج نشان می‌دهد که حداکثر



شکل (۱۳): مقایسه پاسخ حداکثر نیروی محوری تحت زوایای مختلف برخورد امواج زلزله برای یک ردیف المان مورد بررسی

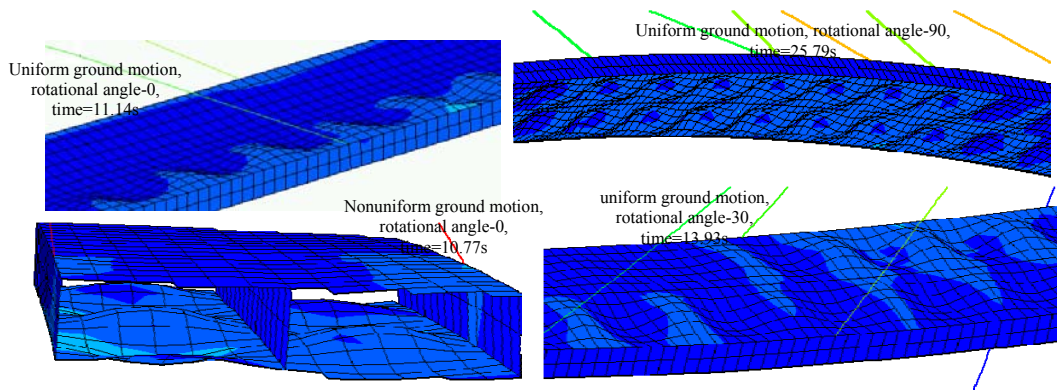
ورق‌های عرشه پل جهت طراحی اقتصادی آن‌ها استفاده نمائیم. نیروی متحمل شده در المان‌های مورد بررسی، در بعضی از نواحی عرشه در حدود ۲ تا ۲/۲۵ برابر نیروی کماتشی، در زوایای مختلف برخورد امواج لرزه‌ای، حاصل شده است.

شکل ۱۴ برخی از مودهای کماتشی عرشه را همراه با مود شکل‌های ارتعاشی سازه پل، به ازای تکان‌های تکیه‌گاهی مورد بررسی، تحت زوایای مختلف برخورد امواج لرزه‌ای، نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصله ورق‌های بالا و پایین عرشه در زمانهای مختلف تحلیل لرزه‌ای ممکن است وارد ناحیه بعد از کماتش موضعی گردند. همانطوریکه در شکل‌ها آشکار است تقریباً صفحات بالا و پایین عرشه به ازای زمان‌های متفاوتی از بارگذاری وارد ناحیه بعد از

نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که عمدتاً تمامی نواحی یک ردیف المان مورد بررسی، در طول عرشه وارد ناحیه بعد از کماتش موضعی شده است. از آنجایی که عرشه این پل بدون سخت کننده در جان است این امر بدیهی به نظر می‌رسد. با توجه به اینکه در طراحی اینگونه سازه‌های انعطاف پذیر معیار تسلیم عرشه چندان حائز اهمیت نمی‌باشد [۱۶] معیار پایداری جهت طرح مناسب، مهم بوده و بایستی جهت طرح کارا، پایداری اجزای سازه‌ای خصوصاً کماتش موضعی عرشه جعبه‌ای لحاظ گردند. از آنجا که ورق‌های فولادی بالا و پایین عرشه‌ی، به علت تکیه‌گاه طرفین (ورق‌های ۱۲ سانتیمتری قائم)، بعد از کماتش تا چندین برابر نیروی کماتشی، متحمل نیرو می‌شوند [۱۶]. می‌توان از رفتار بعد از کماتش موضعی



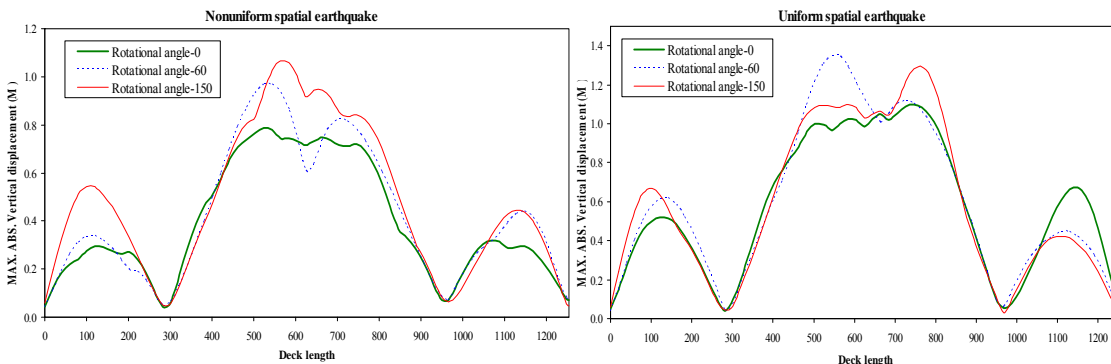
کمانش موضعی گردیده‌اند همچنین شکل کمانشی متفاوتی از صفحات مشاهده گردیده است.



شکل (۱۴): برخی از مودهای کمانشی عرشه تخت زوایای مختلف برخورد امواج تحت تحریکات یکنواخت و غیریکنواخت

اگر چه در تکیه‌گاه‌ها تحت تحریک یکنواخت جابجایی قائم بزرگتری نسبت به تحریک غیریکنواخت تکیه‌گاهی حاصل شده اما در خصوص نیروی محوری یک ردیف المان مورد بررسی در عرشه پل چنین نتیجه‌ای را نمی‌توان صراحتاً اظهار نمود.

در شکل ۱۵ حداکثر جابجایی عرشه در جهت قائم به ازای زوایای مختلف برخورد امواج لرزه‌ای تحت تحریکات یکنواخت و غیر یکنواخت، ارائه شده است. در ناحیه میانی عرشه بیشینه پاسخ تحت تحریک غیریکنواخت تکیه‌گاهی، به ازای زاویه برخورد ۶۰ درجه حاصل شده اما در تحریک یکنواخت اینگونه نیست.



شکل (۱۵): مقایسه حداکثر مطلق جابجایی قائم عرشه تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت و زوایای متفاوت برخورد امواج

- ✓ حداکثر پاسخ لرزه‌ای به ازای بارگذاری مطالعه شده (زلزله کوبه) تحت تحریکات یکنواخت و غیر یکنواخت متفاوت می‌باشد.
- ✓ مقادیر بیشینه عمده پاسخ، تحت تحریکات یکنواخت و غیر یکنواخت تکیه‌گاهی، در زاویه برخورد یکسانی از امواج لرزه‌ای نتیجه نشده است.

خلاصه و نتیجه گیری

با توجه به مدل ساخته شده از پل و بررسی رفتار آن به تحریکات یکنواخت و غیریکنواخت با زوایای برخورد متفاوت امواج لرزه‌ای می‌توان به نتایج زیر اشاره نمود:

موضوع اثر کماتش موضعی تا کنون بررسی نشده است که مطالعات بیشتر در این خصوص قابل توصیه است.

مراجع

1. Lin, J. H. and Zhang, Y. H. and Li, Q. S. and Williams, F. W., (2004), "Seismic spatial effects for long-span bridges, using the pseudo excitation method", Engineering Structures, Vol. 26, pp. 1207-1216.
2. Takahashi, Q. Wu., Nakamura, K. S., (2003), "The effect of cable loosening on seismic response of a prestressed concrete cable-stayed bridge", Journal of Sound and Vibration Vol. 268, pp. 71-84.
3. Fliming, J. F. and Egeseli, E. A., (1980), "Dynamic behavior of a cable-stayed bridge", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 8, No. 1, pp. 1-16.
4. Nazmy, A. S. and Abdle-Ghaffar, A. M., (1990) "Non-linear earthquake-response analysis of long-span cable-stayed bridges: Applications", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 19, pp. 63-76.
5. Abdle-Ghaffar and A. M., Nazmy, A. S., (1991), "3-D nonlinear seismic behavior of cable-stayed bridges", ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 117, No. 11, pp. 3456-3476.
6. Nazmy, A. S. and Abdle-Ghaffar, A. M., (1990), "Three-Dimensional nonlinear static analysis of cable-stayed bridges", Computers and Structures, Vol. 34, No. 2, pp. 257-271.
7. Fliming, J. F., (1979), "Nonlinear static analysis of cable-stayed bridge structures", Computers and Structures, Vol. 10, pp. 621-635.
8. Abdle-Ghaffar, A. M. and Khalifa, M. A., (1992), "Importance of cable vibration in dynamic of cable-stayed bridges", ASCE, Journal of the Engineering Mechanics, Vol. 117, No. 6, pp. 2571-2589.
9. Ali, H. M. and Abdle-Ghaffar, A. M., (1995), "Modeling of rubber and lead passive-control bearings for seismic analysis", ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 121, No. 7, pp. 1134-1144.
10. Nazmy, A. S. and Abdle-Ghaffar, A. M., (1992), "Effect of ground motion spatial variability on the response of cable-stayed bridges", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 21, pp. 1-20.
11. Soneji, B.B. and Jangid, R.S., (2007), "Passive hybrid systems for earthquake protection of cable-stayed bridge", Engineering Structures, Vol. 29, pp. 57-70.
12. Soneji, B.B. and Jangid, R.S., (2008), "Influence of soil-structure interaction on the response of seismically isolated cable-stayed

✓ اگرچه عمدتاً حداکثر پاسخ در زلزله مورد مطالعه تحت تحریک یکنواخت تکیه‌گاهی حاصل شده است اما نمی‌توان اظهار داشت که بارگذاری غیریکنواخت از زلزله‌های دیگر یا به نحو دیگر، نتایج کمتری نسبت به تحریک یکنواخت نتیجه می‌دهد که این نتیجه منطبق بر نتایج و مطالعات محققان قبلی است.

✓ بر اساس نتایج ارائه شده در طراحی اینگونه سازه‌های انعطاف پذیر مطالعه تحریکات لرزه‌ای به صورت یکنواخت و غیریکنواخت تکیه‌گاهی توصیه می‌گردد.

✓ در این مطالعه بیشینه پاسخ، به‌ازای زوایای برخورد جهات متعامد اصلی، حاصل نشده و لذا در طراحی پل‌های کابلی ایستای دهانه بزرگ، در نظر گرفتن زاویه برخورد امواج زمین لرزه حائز اهمیت و ضروری می‌باشد که این امر در مطالعات قبلی لحاظ نشده است.

✓ تحت زوایای مختلف برخورد امواج لرزه‌ای به ازای تحریکات یکنواخت و غیریکنواخت تکیه‌گاهی، برای یک ردیف المان در طول پل، عمدتاً تمامی طول عرشه وارد ناحیه بعد از کماتش موضعی شده است. لذا بررسی معیار پایداری جهت طرح مناسب اینگونه سازه‌ها حائز اهمیت بوده که توسط محققان این امر بر اساس رفتار غیرخطی هندسی لحاظ شده اما اثر کماتش موضعی عرشه در نظر گرفته نشده است.

✓ بر اساس نتایج حاصل از یک ردیف المان مورد بررسی، کاملاً مشهود است که این المان قادر به تحمل نیروی بزرگتری تا حدود ۲/۲۵ برابر نیروی کماتشی است لذا می‌توان از قدرت بعد از کماتش موضعی عرشه با مقطع جعبه‌ای فولادی، جهت طرح اقتصادی اینگونه سازه‌های هزینه بر استفاده نمود.

✓ اشکال کماتشی متفاوتی از ورق‌های فولادی بالا و پایین به ازای زوایای مختلف برخورد امواج در زمانهای مختلف تحلیل حاصل شده و عمدتاً عرشه در زمانهای مختلف در طول زلزله، وارد ناحیه بعد از کماتش موضعی می‌شود. بر اساس نتایج و پیشینه علمی



- bridge”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.28, pp. 245–257.
13. Dumanoglu, A. A. and Brownjohn, J. M. W., (1992), “Seismic analysis of the Fatih Sultan Mehmet (second Bosphorus) suspension bridge”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 21, pp. 881-906.
 14. Kawashima, K. and Unjoh, S. and Tunomoto, M., (1993), “Estimation of damping ratio of cable-stayed bridges for seismic design”, ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 119, No. 4, pp. 1015-1031.
 15. Halabian, A. M. and Keshtegar, B. and Hashemolhosseini, S. H., (2007), “Seismic behavior of box girder cable-stayed bridges considering large deformation”, 8th Pacific Conference on Earthquake Engineering, December 5-7.
۱۶. کشته‌گر، ب. و حلبیان، ا. م. و هاشم‌الحسینی، ح.، (۱۳۸۷)، "بررسی غیرخطی لرزه‌ای، رفتار بعد از کمانش عرشه پل کابلی ایستای دهانه بزرگ، با در نظر گرفتن ارتعاشات کابل"، مجموعه مقالات سومین کنفرانس بین‌المللی پل، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ایران، ۷-۸ خرداد
17. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., (2000), “The finite element method”, McGraw-Hill, 5nd edition.
 18. ABAQUS “Analysis User's Manual”, revision 6.4-1.
 19. Timoshenko, S. P. and Gere, J. M., (1961), “Theory of elastic stability”, McGraw-Hill, Kogakusha.
 20. Volmir, A.S., (1963), “Stability of Elastic Systems”, Gos. Izd-vo Fiz.-Mat. Lit-ry, Moscow.