



بررسی پارامتری رفتار غیر خطی لردهای پل کابلی ایستای دهانه بزرگ با عرضه جعبه‌ای

بهروز کشتله‌گر^۱، محمود میری^۲

(دریافت ۸۹/۲/۲۸، پذیرش ۹۱/۸/۱۲)

چکیده

در این مقاله رفتار لردهای پل کابلی ایستا با عرضه جعبه‌ای به طول ۱۲۵۵ متر، به روش اجزای محدود شبیه سازی و مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که برخورد امواج لردهای در جهتی غیر از جهات متعامد پل، ممکن است موجب ایجاد پیچش در عرضه و سایر اجزا گردد. از این‌و در این تحقیق با استفاده از تحلیل دینامیکی صریح، اثر برخورد امواج لردهای با زوایای مختلف به محل تکیه‌گاه برج‌ها و کوله‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به فاصله زیاد برج‌ها از یکدیگر امواج لردهای 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 عرضه به ازای بارهای لردهای لردهای مختلف با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی هندسی اعضاء مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که صفحات فولادی بالا و پایین عرضه جعبه‌ای وارد ناحیه بعد از کمانش موضعی شده و تحت زوایای مختلف برخورد امواج به ازای تحریکات یکنواخت و غیر یکنواخت 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 عرضه به طرح اقتصادی‌تری دست خواهیم یافت.

کلمات کلیدی

پل کابلی دهانه بزرگ، زاویه برخورد زلزله، کمانش موضعی، تحریک یکنواخت و غیر یکنواخت 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 front 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.
(نویسنده مسئول)

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



۱- مقدمه

دو بعدی مورد بررسی قرار داده و پاسخ خطی و غیرخطی هندسی این پل تحت زلزله الستترو 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 ۶ و ۸ تا ۱۰]. در یک مطالعه پاسخ لرزه‌ای دو پل بر اساس مدل تحلیلی با دهانه‌های اصلی ۳۳۵ و ۶۷۰ متری توسط Abdel-Ghaffar و Nazmy 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 زلزله الستترو با هم مقایسه گردید و پاسخ‌های متفاوتی حاصل شد. بر اساس نتایج مطالعات تحت تحریکات غیریکنواخت تکیه‌گاهی عمده‌تاً پاسخ بزرگتری نسبت به تحریکات یکنواخت حاصل می‌گردد [۴ و ۸]. اثرات میراگرهای لرج 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 استوپلاست مطالعه‌ای توسط Ali و Abdel-Ghaffar بر دو 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

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 گروههای پل‌های کابلی ایستا با دهانه اصلی در حدود ۱۰۰۰ متر (پل‌های Tatara 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 باستی در انواع تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی رفتار غیرخطی آنها لحظ 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 خمی (اثر $\Delta - P$) 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، Fleminge بود [۳ و ۷]. وی رفتار لرزه‌ای پل دهانه کوتاه Norbruke در آلمان را با استفاده از المان‌های تیر و کابل بر اساس مدل ریاضی

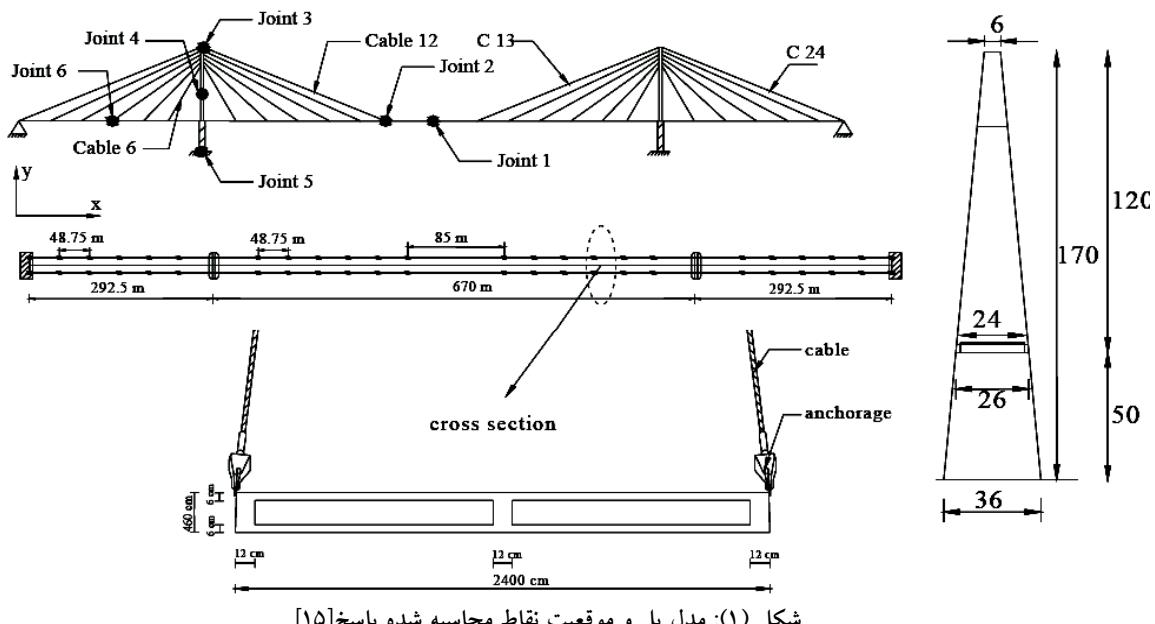


است. این مدل بررسی رفتار بعد از کمانش موضعی عرشه را امکان پذیر می‌سازد. با در نظر گرفتن ارتعاشات کابل در تحلیل دینامیکی پل تاثیر زاویه برخورد امواج زلزله نیز به صورت پارامتریک بررسی شده است.

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 قایقرانی برابر با ۵۰ متر دارند. کابل‌های پل نیز با آرایش بادبزنی در نظر گرفته شده است (شکل ۱).

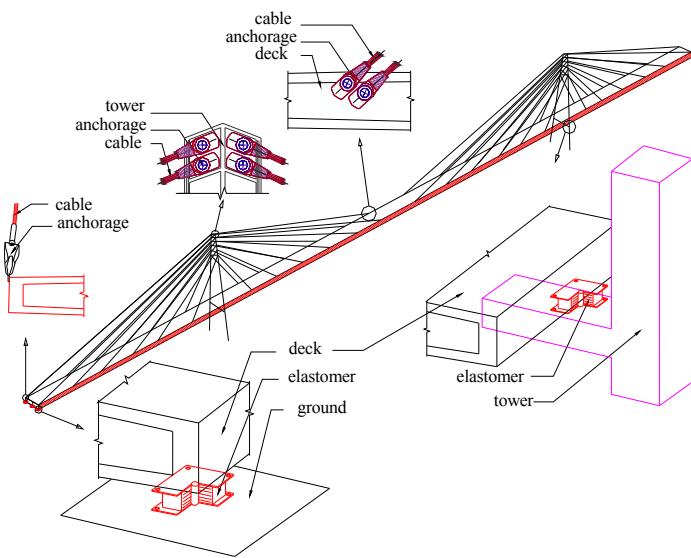
می‌کند همچنین استفاده از سیستم‌های کنترل غیرفعال لرزه‌ای تاثیر بسزایی در کاهش پاسخ جابجایی عرشه پل دارد. نیز اثرات شرایط ساختگاه با توجه به سه نوع خاک سخت و متوسط و نرم را بر پاسخ یک پل کابلی با دهانه اصلی ۲۱۹ متر تحت بار لرزه‌ای در دو جهت طولی و قائم مورد بررسی قرار داده است [۲].
مروزی بر مطالعات فوق الذکر نشان می‌دهد که تحقیقات انجام شده عمدهاً بر روی رفتار غیرخطی [۳ تا ۱۳] و یا اندرکش خاک سازه [۱ و ۱۰ و ۱۲] تمرکز یافته‌اند. علاوه بر آن به منظور کاهش نیروهای لرزه‌ای، مطالعاتی نیز بر روی سیستمهای کنترل غیرفعال 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، تکیه گاه آن در محل برج‌ها و کوله‌ها به



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

بزرگ می‌باشد. خواص مصالح مورد استفاده در شبیه سازی 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 شبیه سازی کابل‌ها در تحلیل‌های لرزه‌ای، اثر ارتعاشات کابل‌ها نیز در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه کابل‌ها با ممان اینرسی پایین شبیه سازی شده‌اند لذا تحت نیروی فشاری ناچیزی کمانش می‌نمایند. به منظور جبران شکمدادگی کابل‌ها تنش پیش کششی معادل $\frac{N}{m^2} = 488 \times 10^9$ به آنها اعمال شده است [۶].

در تعریف خصوصیات پلاستیک عرضه 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 $\frac{N}{m^2} = 355 \times 10^6$ می‌باشد و منحنی رفتار ماده بعد از جاری شدن با شبیه در حدود $\frac{N}{m^2} = 206 \times 10^9$ ادامه می‌یابد سایر خصوصیات این مصالح در جدول ۱ ارائه گردیده است.

۴- توصیف مدل اجزای محدود پل

به منظور تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی مدل پل با استفاده از نرم افزار مدل اجزای محدود ABAQUS شبیه سازی شده است. عرضه پل با استفاده از المان‌های پوسته چهار گره‌ای (با شش درجه آزادی در هر گره) شبیه سازی شده که قادر به در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ عرضه می‌باشد. در محاسبه ماتریس سختی المان مطابق با شکل ۳ از روش انتگرال‌گیری کاوش 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 هندسه و نیز تحلیل کمانش صفحات، به شمار می‌رود. همچنین با این المان می‌توان انواع مختلف پوسته و به صورت ایزوتropیک و ارتوتروپیک و نیز چند لایه و یا مسلح شده را شبیه سازی نمود.

برای شبیه سازی برج‌های بتونی 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

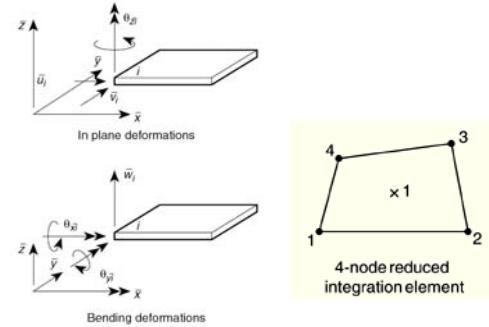


جدول (۲): مشخصات تکیه‌گاه الاستومری مدل

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	$4/2 \times 10^6$	۴۰۰۵۱
قائم (z)	-	-	17×10^8	-

با توجه به اینکه فرکانس‌های طبیعی پل بین ۲ تا ۰/۲ هرتز می‌باشد، احتمال وقوع پدیده تشدید در سازه پل در زلزله‌های 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 می‌باشد بزرگتر از ۱۰ ثانیه یا سه برابر با زمان تنایوب اصلی سازه (در حدود ۱۵ ثانیه)، انتخاب گردد. لذا به منظور بارگذاری لرزه‌ای از دو رکورد ثبت شده زلزله کوبه سال ۱۹۹۵ در ایستگاه‌های Nishi-Akashi و Takatori که تقریباً با شرایط خواسته شده منطبق است استفاده گردیده و تحریکات لرزه‌ای به صورت یکنواخت و غیر یکنواخت تکیه‌گاهی اعمال گردیده‌اند. بارگذاری لرزه‌ای 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 می‌شود و برای دو فرکانس ۰/۲ و ۰/۲ هرتز ضریب میرایی برابر با ۲ درصد در نظر گرفته شده است.^[۵]

جهت صحت مدل‌سازی 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 شکل‌ها و فرکانس‌های طبیعی پل در شکل ۶ ارائه گردیده است. مشخص است که فرکانس‌های طبیعی و مود شکل‌های پل شبیه‌سازی شده در نرم افزار مورد استفاده، نزدیک به نتایج حاصل از مرجع [۵] نتیجه شده است.

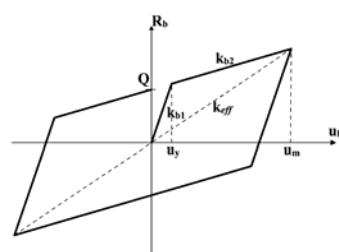


شکل (۳): المان پوسته ۴ گره‌ای [۱۷]

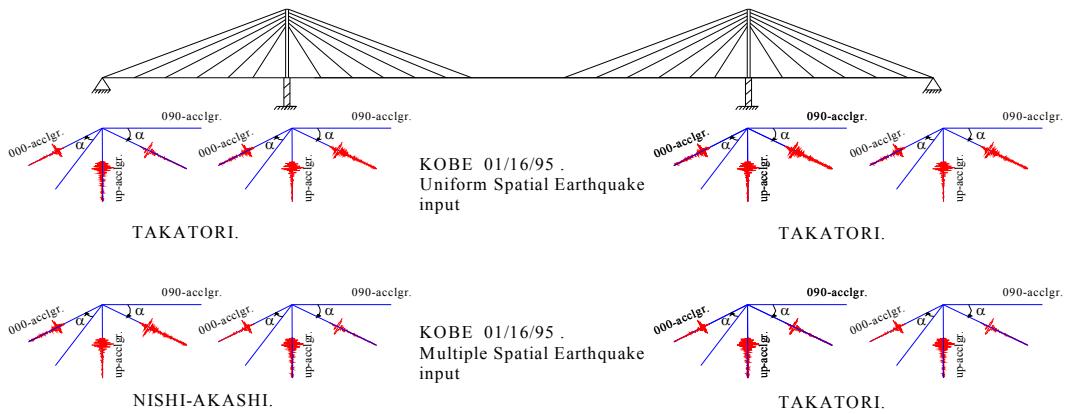
جدول (۱): خصوصیات الاستیک مصالح پل کابلی استا

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	$۳/۱ \times 10^{11}$	۰/۲۵	۲۵۰۰
کابل‌ها	$1/74 \times 10^{11}$	۰/۳	۱۱۲۰۰
C24-C13-C12-C1	$1/81 \times 10^{11}$		
C23-C14-C11-C2	$1/87 \times 10^{11}$		
C22-C15-C10-C3	$1/93 \times 10^{11}$		
C21-C16-C9-C4	$1/98 \times 10^{11}$		
C20-C17-C8-C5	$1/00 \times 10^{11}$		
C19-C16-C7-C6	$1/00 \times 10^{11}$		

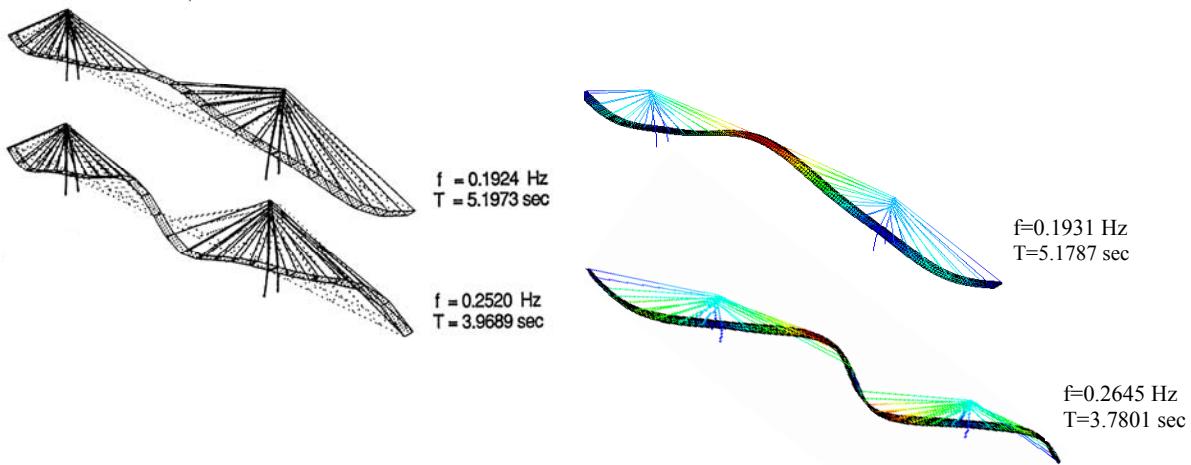
جهت اتصال کابل به عرشه و برج‌ها از المان Joint استفاده شده است. این المان قادر است جابجایی متقابل کابل‌ها را به عرشه و برج‌ها در محل اتصال برابر نماید. در تکیه‌گاه‌های عرشه، جداساز پایه‌ای در نظر گرفته شده که مطابق با شکل ۴ بر اساس مدل تحلیلی دو خطی به صورت فنر و میراگر شبیه سازی شده است. خواص مورد استفاده 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]

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

$$\{u\}_{j_{i+1}}^N = \{u\}_i^N + \Delta t_{i+1} \{\dot{u}\}_{i+\frac{1}{2}}^N \quad (3)$$

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

$$\{\ddot{u}\}_i^N = [M]^{NJ} (\{P\}_i^J - \{I\}_i^J) \quad (4)$$

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

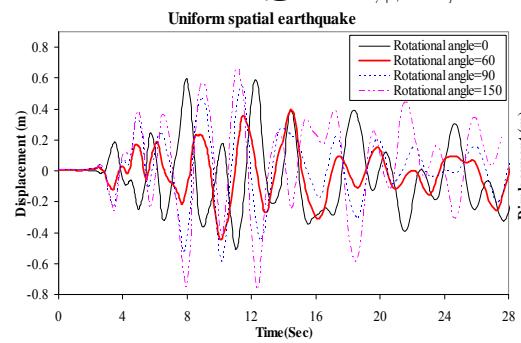
معادله حرکت حاکم بر سیستم اجزای محدود را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

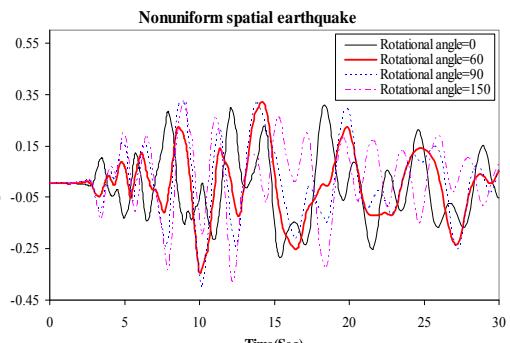
ماتریس‌های $[M]$, $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سختی برای سیستم سازه می‌باشند. $\{F(t)\}$ بردار نیروهای اعمال شده به سیستم که برای شتاب وارد به سنگ بستر (\ddot{u}_g) برابر با، $-\{F(t)\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g$ می‌باشد. در زمان t ، شتاب بدست آمده و بر اساس آن سرعت در زمان $t + \Delta t$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



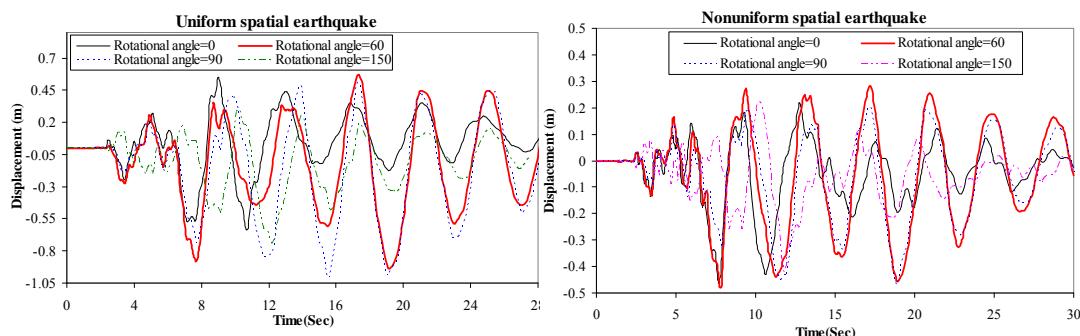
تغییرشکل‌های بزرگ استفاده شده است و پاسخ پل با توجه به زوایای برخورد صفر، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته است. برخی از نتایج تاریخچه زمانی به ازای زوایای برخورد فوق، تحت تحریکات یکنواخت و غیریکنواخت تکیه‌گاهی زلزله مورد مطالعه، در شکل‌های ۷ تا ۹ ارائه شده است. براساس نتایج ارائه شده 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 حاصراً نشده است.



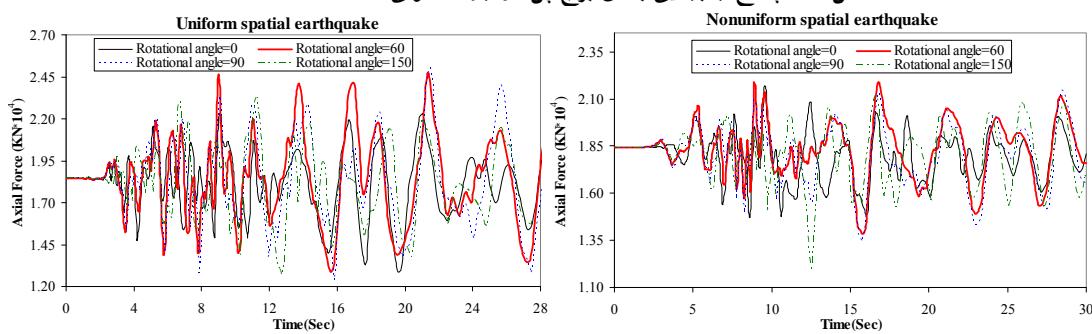
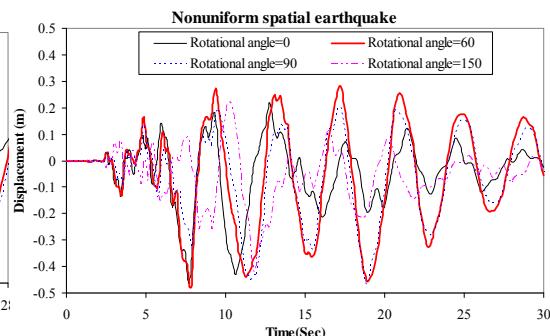
شکل (۷): پاسخ جابجایی وسط عرضه پل در جهت عرضی (Z)، نقطه ۱



شکل (۷): پاسخ جابجایی وسط عرضه 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

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 منتقال 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

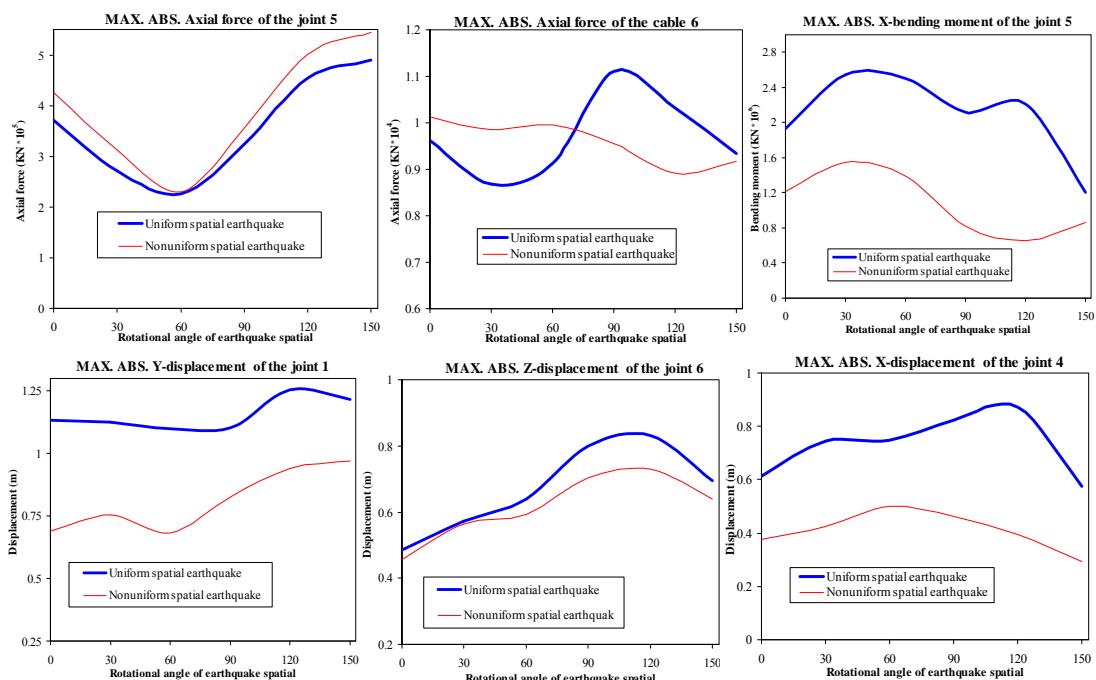
بیشتر از تحریک غیریکنواخت است. به نظر می‌رسد در این بارگذاری لرزه‌ای محتوای فرکانس تحریک یکنواخت به فرکانس غالب اجزای سازه پل نزدیک باشد که این امر موجب ایجاد نیروی لرزه‌ای بیشتری در سازه پل گردیده است.

در شکل ۱۰ حداکثر پاسخ برخی از نقاط سازه پل به ازای زاویه برخورد امواج لرزه‌ای تحت تحریکات زمین لرزه به صورت یکنواخت و غیر یکنواخت، ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده، حداکثر پاسخ به ازای 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 150° و 60° درجه حاصل شده است. همچین جابجایی در جهت عرضی وسط دهانه کناری (جابجایی در جهت Z نقطه ۶)، به ازای زاویه برخورد 120° درجه در تحریک یکنواخت و غیریکنواخت تکیه‌گاهی، نتیجه شده است.

شکل ۷ پاسخ تاریخچه زمانی جابجایی وسط دهانه عرشه در جهت عرضی پل را نشان می‌دهد. مشخص است که حداکثر پاسخ، تحت تحریک یکنواخت تکیه‌گاهی بهزاری زاویه برخورد 150° درجه و در تحریک غیریکنواخت، تحت زاویه برخورد 60° درجه حاصل شده است.

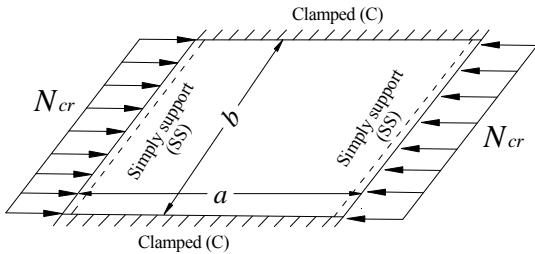
بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۸ حداکثر جابجایی در جهت طولی بالای برج به ازای تحریک یکنواخت در زاویه برخورد امواج 150° درجه و در تحریک غیریکنواخت تحت زاویه برخورد 60° درجه حاصل شده است. این نتایج بیانگر اختلاف پاسخ سازه تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت بوده و اهمیت تاثیر زاویه برخورد امواج لرزه‌ای در تحلیل 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 60° درجه حاصل شده است.

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



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





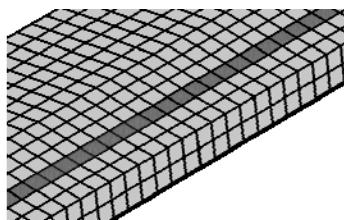
شکل (۱۱): صفحه مستطیلی تحت نیروی محوری [۲۰]

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 عرضه که در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه گردیده برابر با

$$N_{cr} = 7.69 \frac{\pi^2 Et^3}{12(1-v^2)b^2}$$

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

می‌باشد. از تحلیل کمانش مدل اجزای محدود مقدار نیرویی کمانشی عرضه در حدود $N_{cr} = 2.276 \times 10^6 N/m$ نتیجه شده که با نیروی کمانشی تحلیلی رابطه فوق مطابقت دارد. با توجه به نیروی فوق رفتار بعد از کمانش موضعی یک ردیف المان عرضه 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 در حالیکه 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، موج تحریک مودهای بالاتر و یا مود ارتعاشی غالب کابل‌ها می‌گردد.

بر اساس نتایج شکل ۱۰، درصد اختلاف بین حداکثر و حداقل پاسخ نقطه وسط عرضه 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]:

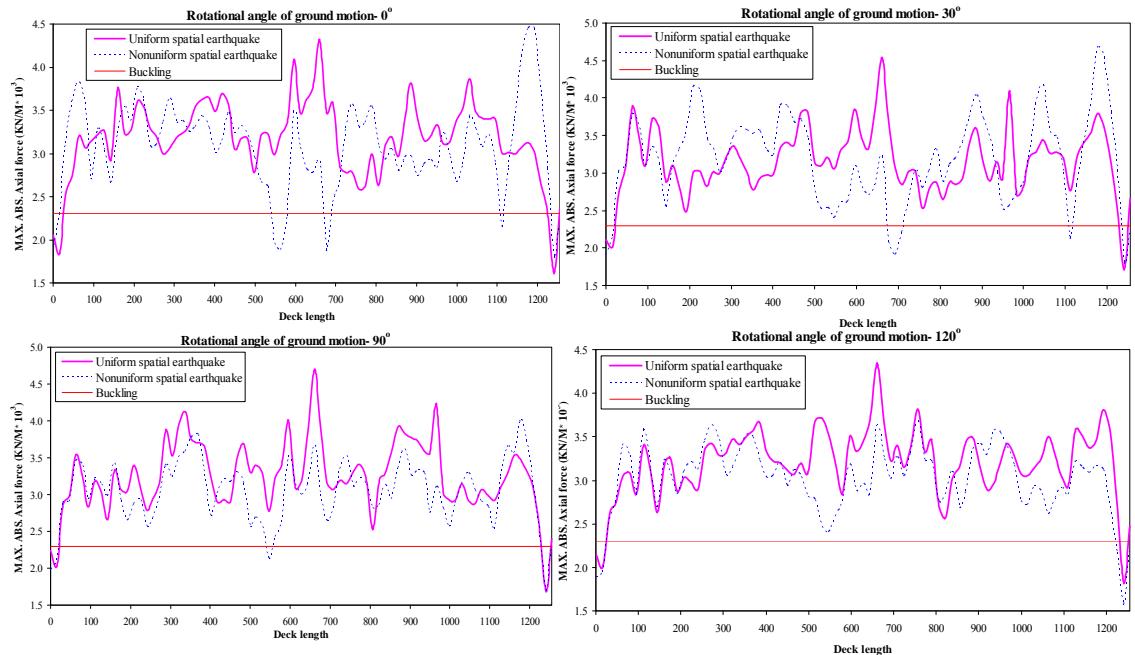
$$N_{cr} = K \frac{\pi^2 D}{b^2} \quad (5)$$

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

که در آن E مدول ارتجائی، v 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 صفحه‌ای مطابق با شکل ۱۰ که شرایط مرزی آن به صورت دو طرف مقابله‌گیردار و مفصلی می‌باشد برای نسبت طول به عرض یک (a/b=1) برابر با $\sqrt{69}$ 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 30° درجه، در محدوده میانی عرشه و در تحریک غیریکنواخت در محدوده برج‌های میانی پل حاصل شده است. به ازای زوایای برخورد 90° و 120° درجه اختلاف چشمگیری بین پاسخ تحریکات یکنواخت و غیریکنواخت تکیه‌گاهی، در محدوده برج‌های میانی مشاهده نمی‌شود. بررسی نتایج نشان می‌دهد که حداقل



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

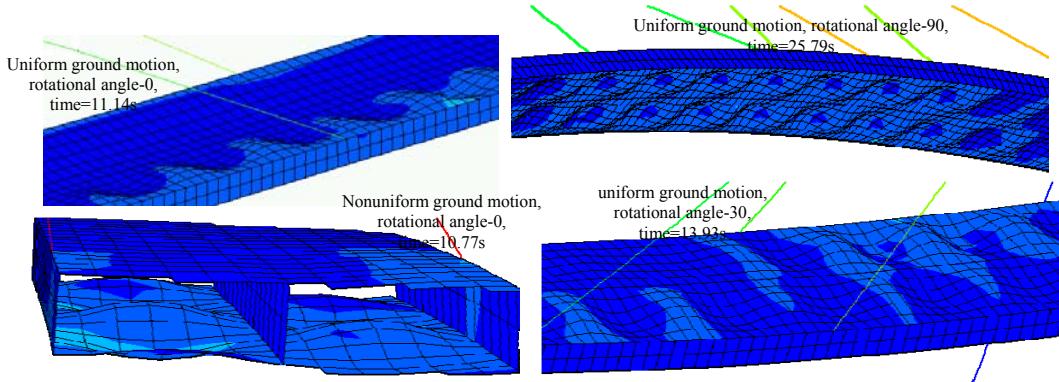
ورق‌های عرشه پل جهت طراحی اقتصادی آنها استفاده نمائیم. نیروی متحمل شده در المان‌های مورد بررسی، در بعضی از نواحی عرشه در حدود ۲/۲۵ برابر نیروی کمانشی، در زوایای مختلف برخورد امواج لرزه‌ای، حاصل شده است.

شکل ۱۴ برخی از مودهای کمانشی 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 کمانش موضعی گردد. 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 کمانش 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 کارهای پایداری اجزای سازه‌ای خصوصاً کمانش موضعی عرشه جعبه‌ای لحظه گردند. از آنجا که ورق‌های فولادی بالا و پایین عرشه، به علت تکیه‌گاه طرفین (ورق‌های ۱۲ سانتیمتری قائم)، بعد از کمانش تا چندین برابر نیروی کمانشی، متحمل نیرو می‌شوند [۱۶]. می‌توان از رفتار بعد از کمانش موضعی



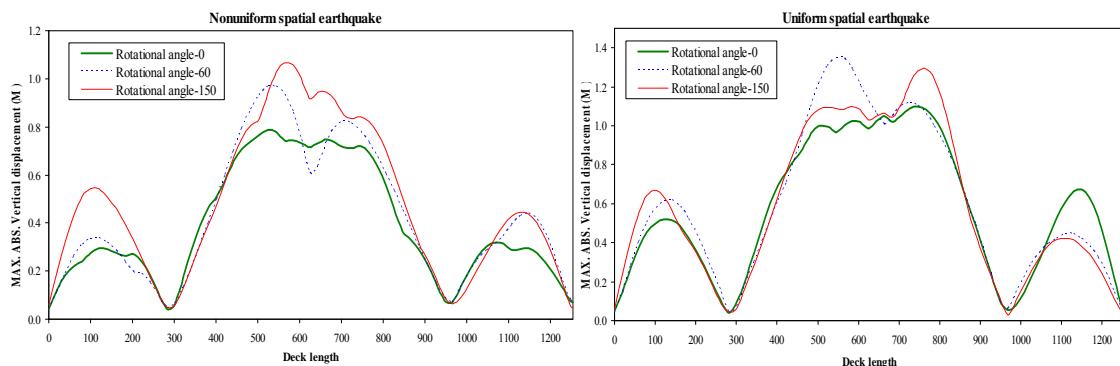
کمانش موضعی گردیده‌اند همچنین شکل کمانشی متفاوتی از صفحات مشاهده گردیده است.



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

اگر چه در تکیه گاه‌ها تحت تحریک یکنواخت جابجایی قائم بزرگتری نسبت به تحریک غیریکنواخت تکیه گاهی 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 حداقل 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 تکیه گاهی، به ازای زاویه برخورد 60° درجه حاصل شده اما در تحریک یکنواخت اینگونه نیست.



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

- ✓ حداقل 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 تکیه گاهی، 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 کمانش 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 کمانش 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 کمانش 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 کمانشی است لذا می‌توان از قدرت بعد از کمانش موضعی عرشه با مقطع جعبه‌ای فولادی، جهت طرح اقتصادی اینگونه سازه‌های هزینه بر استفاده نمود.

✓ اشکال کمانشی 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 کمانش 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. کشتگر، ب. و حلیان، ا. م. و هاشم‌الحسینی، ح.، (۱۳۸۷)، ”بررسی غیرخطی لرزه‌ای، رفتار بعد از کمانش عرضه پل کابلی ایستایی دهانه بزرگ”， با در نظر گرفتن ارتعاشات کابل”， مجموعه مقالات سومین کنفرانس بین‌المللی پل، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ایران، ۸-۷ 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.

