

رفتار لرزه‌ای و پارامترهای مؤثر در فرو افتادن عرشه پلهای مورب تک دهانه

حسین پرستش، استادیار، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران

محبوبه طاهری، کارشناس ارشد عمران سازه، شرکت مهندسی قدس نیرو، تهران

جواد یزدان‌ستا، سرپرست بخش ساختمان و سازه، شرکت مهنا، تهران

زهرا تبریزیان، مربی، دانشگاه صنعتی بابل، بابل

چکیده

مهمترین انواع آسیب‌پذیری پلهای مورب، آسیب ناشی از پیچش به دلیل خروج از مرکزیت‌های ایجاد شونده در آنها می‌باشد. لنگر پیچشی با توجه به بزرگیش می‌تواند منجر به بروز ترک در گوشه‌های عرشه و یا جداشدگی دال از روی تکیه‌گاه شود. از طرفی، توسعه ارتباطات و لزوم استفاده بهینه از فضاهای شهری و همچنین محدودیت‌های هندسی در هنگام عبور از عوارض طبیعی سبب گردیده است که پلهای مورب بخش مهمی از سیستم حمل و نقل شهری و بین شهری را تشکیل دهند. در حقیقت پلهای مورب در زمین‌لرزه‌های گذشته تحت اثر بارهای لرزه‌ای آسیب‌پذیرتر از پلهای مستقیم بوده‌اند. به طور مثال زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) در کالیفرنیا، منجر به خرابی تقریباً ۵ درصد از پلها گردید، به گونه‌ای که شدت آسیبها در پلهای با زاویه تورب بزرگتر، بیشتر بود. زلزله نورث‌ریج در کالیفرنیا در سال ۱۹۹۴ منجر به خرابی بسیاری از پلهای مورب ساخته شده در آن زمان گردید. بررسیهای انجام شده بر روی پلهای مورب آسیب‌دیده و مطالعات انجام شده توسط محققان نشان داد که پلهای موربی که زاویه تورب آنها بیش از ۴۰ درجه بود آسیبهای شدیدتری دیده بودند. از اینرو محققان بسیاری به مطالعه پلهای مورب پرداختند [۱].

موهتی و گوخان [۲] پلی دارای سه دهانه پیوسته با زوایای تورب مختلف از صفر تا ۶۰ درجه را به دو روش تیر و فنر^۱ و المان محدود^۲ مدلسازی و رفتار آنها را تحت آنالیزهای مختلف استاتیکی، استاتیکی غیرخطی و تاریخیچه زمانی خطی بررسی نموده است و به این نتیجه رسیده که برای تحلیل پل در زمانی که زاویه تورب بیش از ۳۰ درجه است استفاده از مدل *FE* الزامی است. سوگیلی و کانر [۳] عملکرد لرزه‌ای بیش از سی نمونه

در این مطالعه، رفتار لرزه‌ای پلهای مورب بتنی تک‌دهانه تحت اثر هفت زوج شتابنگاشت ارزیابی شده و با در نظر گرفتن اثر تغییر پارامترهای هندسی عرشه شامل طول و زاویه تورب، فروافتادن عرشه این پلها بررسی گردیده است. عرشه انتخاب شده، سیستم مرکب دال بتنی و تیر بتنی پیش‌ساخته می‌باشد. جهت مدلسازی سه بعدی پلها و تحلیل آنها به روش تاریخیچه زمانی غیرخطی، از نرم‌افزار المان محدود *SAP2000* بهره گرفته شده است. نتایج بررسیها نشان می‌دهد به تدریج با افزایش زاویه تورب، عامل مؤثر در فرو افتادن عرشه، از جابه‌جایی طولی به ترکیب جابه‌جایی طولی و عرضی تغییر می‌نماید. در حالی که در پلهای با زاویه تورب ۶۰ درجه، علیرغم آن که مقدار جابه‌جایی طولی و عرضی کمتر از پلهای با زاویه تورب کوچکتر بوده ولی پیچش عرشه مقدار بیشتری داشته است. به عبارتی با افزایش زاویه تورب عامل مؤثر در فرو افتادن عرشه، از جابه‌جایی عرشه به پیچش حول محور قائم، تغییر یافته است.

کلیدواژه‌ها: پل مورب، فرو افتادن عرشه، تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی، جابه‌جایی عرشه، پیچش عرشه

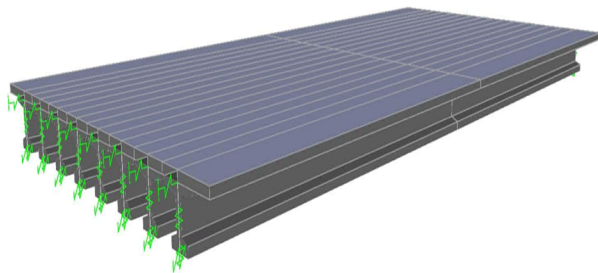
۱- مقدمه

برای مدت زمان زیادی پلهای مورب همانند پلهای مستقیم بدون در نظر گرفتن بزرگی زاویه تورب و مشکلات ناشی از آن، آنالیز، طراحی و حتی ساخته می‌شدند. پارامترهای طراحی و آنالیز پلهای مستقیم و مورب ارائه شده در استانداردهای معتبر یکسان و اثر زاویه تورب در آنها دیده نشده بود. مطالعات انجام شده بر روی تاریخیچه آسیبهای وارده بر پلهای مورب در زلزله‌های اخیر، بیانگر آن است که یکی از

پلهای مورب به دلیل خروج از مرکزیت‌های ایجاد شونده در آنها مستعد پیچش هستند و به همین دلیل این پله‌ها در زلزله‌های اخیر رفتار بسیار پیچیده‌ای داشته‌اند [۷]. لنگر پیچشی با توجه به بزرگیش می‌تواند منجر به بروز ترک در گوشه‌ها، افزایش نیروی برشی در تکیه‌گاه، مخصوصاً در گوشه‌های منفرجه و نیز در صورت بزرگ بودن ممان پیچشی، جداسازی دال از روی تکیه‌گاه شود که در زلزله‌های اخیر نمونه‌های فراوانی از این موارد مشاهده شده است.

۳- معرفی مدل مورد بررسی

جهت بررسی فرو افتادن عرشه در پلهای مورب، تغییر مکان طولی، عرضی و پیچش عرشه ۱۲ نمونه پل تک‌دهانه، که مشخصات هندسی آنها از مرجع شماره [۳] اقتباس گردیده، تحت هفت شتابنگاشت بررسی شده است. برای بررسی اثر زاویه تورب و طول دهانه بر فرو افتادن عرشه، چهار زاویه صفر، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه، دو طول دهانه ۱۸ و ۲۵ متر و سه عرض ۷، ۱۳ و ۱۹ متر به عنوان پارامترهای متغیر بررسی شده است. برای دستیابی به اهداف این تحقیق، پلهای مورد بررسی به صورت سه بعدی توسط نرم‌افزار *Sap2000* مدلسازی شده است [۸]، شکل (۲).



شکل (۲): مدل سه بعدی پلهای تک دهانه.

به منظور مدلسازی عرشه مرکب پله‌ها، از ترکیب المان‌های پوسته‌ای عرشه که قابلیت توزیع بارهای درون صفحه‌ای به زیر سازه را دارا می‌باشد و المان خطی قاب که اثرات ناشی از خمش دو محوره، پیچش، تغییرشکل‌های محوری و تغییرشکل‌های برشی دو محوره در آنها لحاظ گردیده، استفاده شده است. با توجه به طول دهانه پل، دو نوع تیر بتنی در نظر گرفته شده است، شکل (۳).

پل کج دو دهانه و چهار دهانه را با بهره‌گیری از نرم‌افزار اجزاء محدود *LARSA2000* تحلیل نموده و رفتار لرزه‌ای آنها را با نمونه‌های مشابه بهسازی شده با کابل‌های مقید کننده، مقایسه نمودند. نتایج نشان داده است که جابه‌جایی‌های طولی و عرضی عرشه در پلهای بهسازی شده نسبت به نمونه‌های نظیر بهسازی نشده کاهش یافته است.

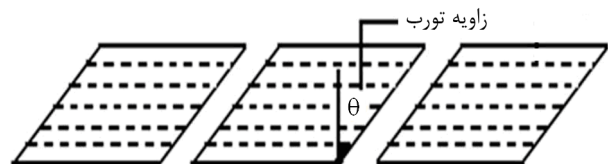
تئوریت و همکارانش [۴] برای بررسی تلاشهای برشی در دال پلهای مورب، پلهایی با دهانه‌های ۱۰ متر و عرض ۱۲ متر و زاویه تورب صفر و ۳۰ درجه توسط نرم‌افزار *SAP2000* آنالیز نموده‌اند. مطالعات نشان داده است که با افزایش زاویه تورب، نیروی برشی و ممان خمشی عرضی زیاد شده و ممان طولی کاهش می‌یابد.

کلانتری و امجدیان [۵] رفتار لرزه‌ای غیرخطی پل مورب بتنی مسلح فوت‌هیل با بهره‌گیری از نرم‌افزار المان محدود *OpenSees* را مورد بررسی قرار داده و نتایج به دست آمده برای این پل مورب با پل مستقیم متناظر آن را مقایسه نمودند. نتایج عددی حاصله نشانگر تأثیر قابل توجه تورب پایه‌ها در نحوه پاسخ لرزه‌ای پل مورب فوت‌هیل و کاهش ظرفیت باربری آن بر اثر عملکرد توأماً نیروی محوری و لنگر پیچشی روی ستونهای بحرانی است.

در این تحقیق به منظور شناخت عوامل مؤثر در فرو افتادن عرشه پلهای مورب، دوازده نمونه پل تک‌دهانه در محله تکیه بر کوله بررسی شده است.

۲- معرفی پلهای مورب

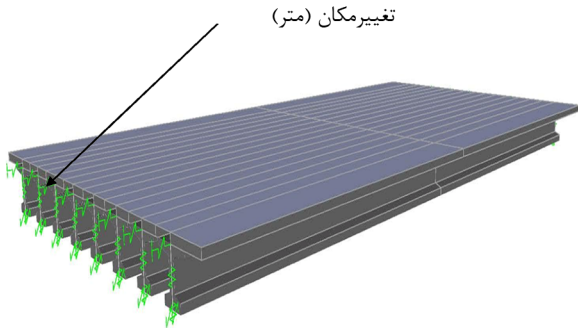
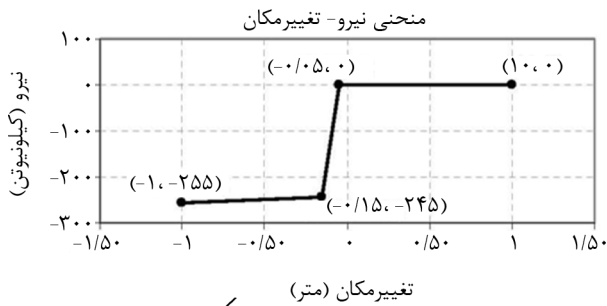
پل مورب به پلی اطلاق می‌شود که خط عمود بر محور طولی عرشه با خط تکیه‌گاه زاویه غیر قائم می‌سازد، شکل (۱). بر اساس آیین‌نامه‌های پل سازی، چنانچه زاویه کجی پل بیشتر از ۱۵ درجه باشد، پل در رده پلهای نامنظم هندسی قرار می‌گیرد [۶].



شکل (۱): موقعیت خط عمود بر محور طولی و خط تکیه‌گاهی در پلهای مورب.

برای کنترل تغییر مکانهای عرضی و جلوگیری از فرو افتادن تیرهای طولی در این جهت، در بین تیرها و عمود بر آنها کلیدهای برشی تعبیه شده است. سختی کلیدهای برشی متناسب با مدول الاستیسیته و ممان اینرسی مؤثر مقطع آنها محاسبه گردیده است.

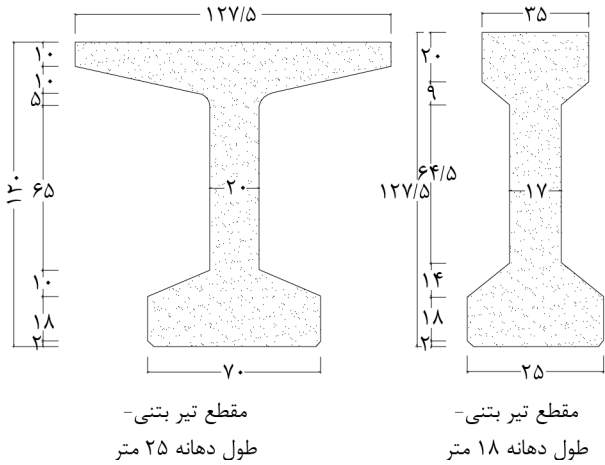
از آنجا که رفتار تکیه گاههای الاستومری و کلیدهای برشی در طول آنالیز خطی فرض شده، برای مدلسازی آنها از فنر خطی استفاده گردیده است. جهت مدلسازی درزه‌های انبساط، رفتار غیرخطی فنرهای بین عرشه و کوله در نظر گرفته شده و برای معرفی رفتار غیرخطی فنرها منحنی تغییر مکان - نیرو با بهره‌گیری از تئوری میرایی رایلی، به فنرهای مورد نظر اختصاص داده شده است، شکل (۵).



شکل (۵): فنرهای غیرخطی بین عرشه و کوله.

۴- صحت‌سنجی

با توجه به وقتگیر بودن تحلیل‌ها، به ویژه آنالیز تاریخچه زمانی غیرخطی، لازم است پیش از آغاز تحلیل‌های تحقیق، به نوعی از صحت مدلسازی اطمینان حاصل نمود. به این منظور می‌توان از مراجع آزمایشگاهی و یا تحقیقات مورد تأیید نشریات و مجلات معتبر جهانی، استفاده نمود. در این مطالعه برای صحت‌گذاری مدل و اطمینان خاطر از عملکرد نرم‌افزار مورد استفاده، از تحقیق مرجع [۳]، بهره



شکل (۳): مقاطع تیرهای پیش‌ساخته بتنی (سانتیمتر).

تکیه‌گاه الاستومری استفاده شده از شش لایه ورق فولادی هر یک به ضخامت ۲ میلیمتر تشکیل شده است، شکل (۴). برای محاسبه سختی تکیه‌گاههای الاستومری از روابط ارائه شده در استاندارد آشتو ۱۹۹۶ [۳] به شرح زیر بهره گرفته شده است.

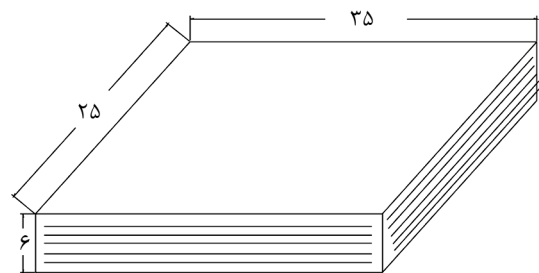
$$K_{long} = GA_{bearing} / h_{rt} \quad (1)$$

$$K_{\theta} = (0.50 E_c I_{bearing}) / h_{rt} \quad (2)$$

$$K_{vertical} = E_c A / L \quad (3)$$

$$E_c = 6GS_{bearing}^2 \quad (4)$$

$$S_{bearing} = LW / (2h_{max} (L + W)) \quad (5)$$



شکل (۴): مشخصات هندسی تکیه‌گاههای الاستومری (سانتیمتر).

در روابط فوق K_{long} سختی در راستای طولی، G مدول برشی الاستومرها که مقدار آن ۱۱۰۰ کیلونیوتن بر مترمربع در نظر گرفته شده، K_{θ} سختی دورانی، $I_{bearing}$ ممان اینرسی، $E_c A$ مدول فشاری، $S_{bearing}$ فاکتور شکل، h_{max} ضخامت کل لایه‌های لاستیکی، L طول و W عرض الاستومر می‌باشد [۳].

گرفته شده است. محقق تاریخچه‌زمانی رفتار پل را تحت آنالیز دینامیکی غیرخطی (تاریخچه زمانی با بهره‌گیری از شتابنگاشت زلزله (Yarmica 1999) محاسبه نموده است. در ادامه تغییرمکان طولی و عرضی نقطه مرجع (نقطه‌ای در گوشه عرشه) با مقادیر ارائه شده در تحقیق مرجع [۳] مقایسه گردیده است. پس از اطمینان از صحت مدلسازی و نتایج نرم‌افزار مورد استفاده، تحلیل‌های اصلی انجام شده است، جدول (۱).

تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده شده است. اگرچه آنالیز تاریخچه زمانی غیرخطی بسیار زمان‌بر می‌باشد، اما در این روش خواص غیرخطی مصالح و خواص غیرخطی هندسی المانها به خوبی در محاسبات منظور می‌گردد. از آنجا که پلهای کج در رده پلهای نامنظم هندسی و نامتعارف قرار می‌گیرند، تحلیل دینامیکی غیرخطی آنها با بهره‌گیری از هفت زوج شتابنگاشت انجام شده است، شکل (۶).

شتابنگاشتهایی که در اثر حرکت زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند بایستی تا حد امکان نمایانگر حرکت واقعی زمین در محل احداث بنا، در هنگام وقوع زلزله باشند. لذا سعی بر آن بوده است که شتابنگاشتها از میان زلزله‌های مهم و دارای ویژگیهای زمین‌شناسی مشابه انتخاب گردد. همچنین مدت زمان حرکت شدید زمین در شتابنگاشتها حداقل ۱۰ ثانیه یا سه برابر زمان تناوب اصلی سازه هر کدام بیشتر است، باشد و نیز برای حصول اطمینان از شرایط ساختگاهی مشابه، زلزله‌های با سرعت موج برشی کمتر از ۳۰ متر بر ثانیه انتخاب شده‌اند. در این تحقیق ساختگاه پلهای مورد بررسی، بستری با مشخصات زمین نوع III ارائه شده در استاندارد ۲۸۰۰ ایران فرض شده است.

برای نیل به این هدف، شتابنگاشتهای منتخب به روش توصیه شده در نشریه بهسازی لرزه‌ای پلها به مقیاس درآمده‌اند.

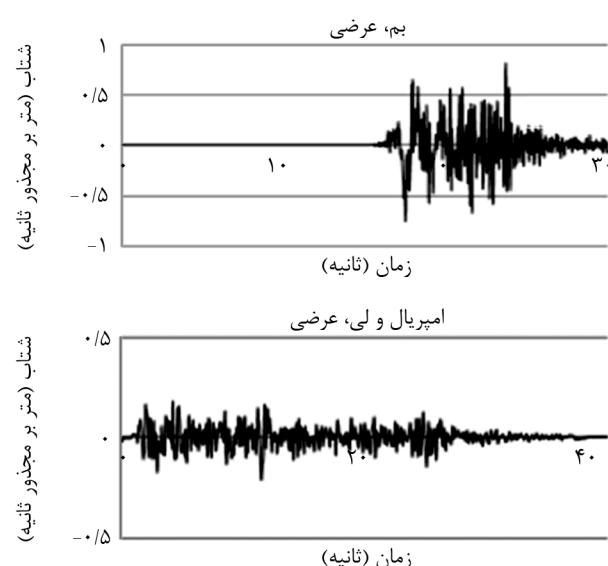
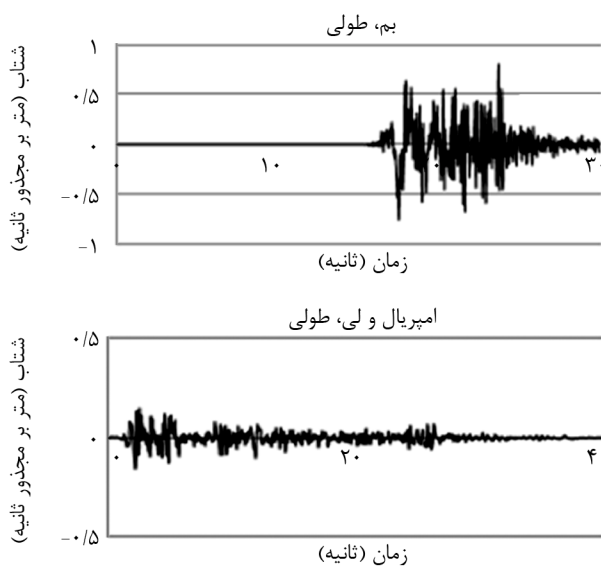
جدول (۱): مقایسه نتایج آنالیز تاریخچه‌زمانی غیرخطی - شتابنگاشت Yarmica 1999

تغییرمکان عرضی نقطه مرجع (متر)	تغییرمکان طولی نقطه مرجع (متر)	
۰/۰۲۵۴	۰/۱۱۹	تحقیق مرجع [۳]
۰/۰۲۲۵۸	۰/۱۲۷۹	صحت‌سنجی
٪۱۱/۱	٪۷/۴۷	خطای موجود

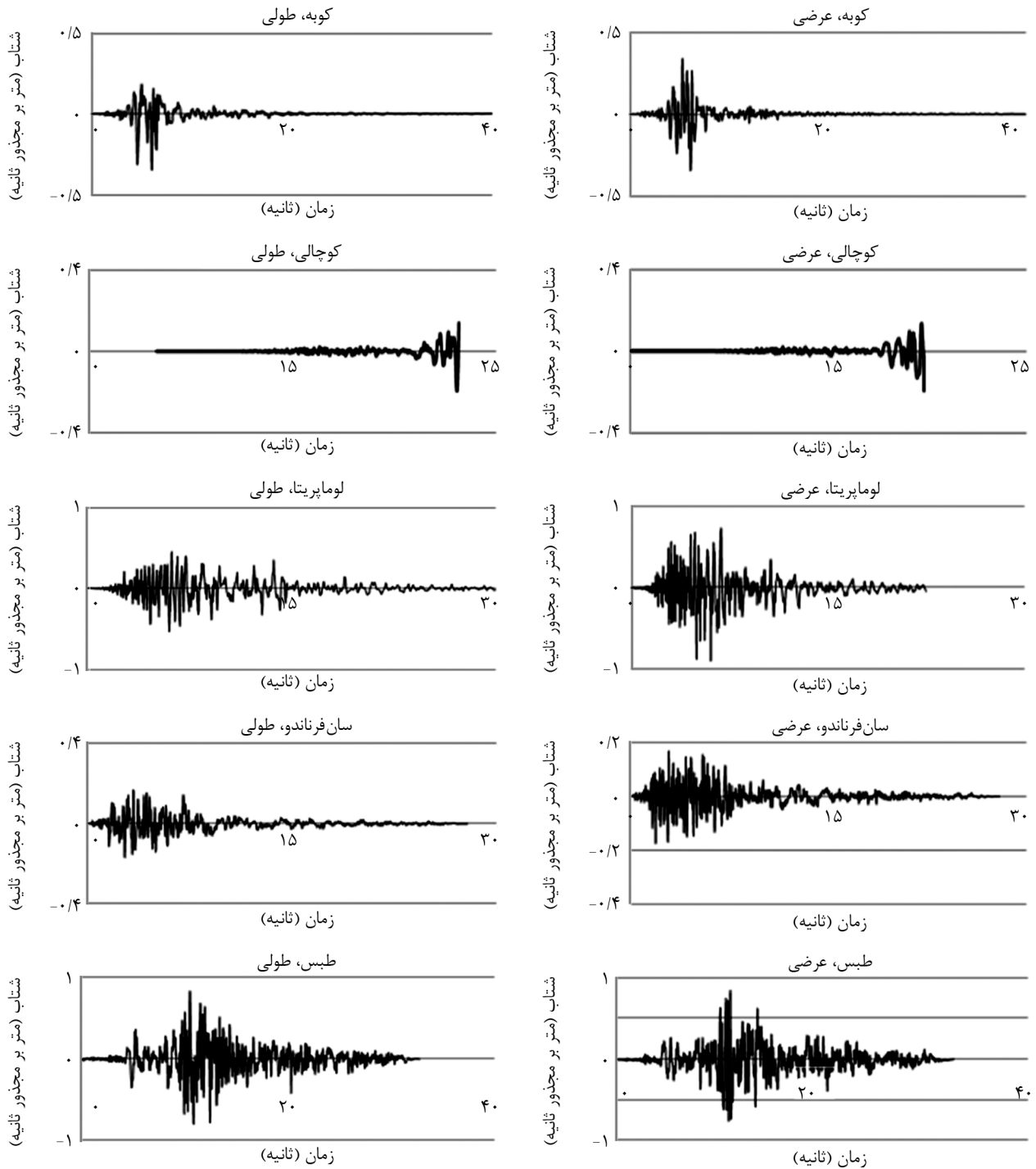
۵- بارگذاری و تحلیل

بار ثقلی ناشی از وزن مرده سازه عرشه، روسازی، قطعات پیش‌ساخته و غیره، همچنین نیمی از بار زنده عادی (بار کامیون ۴۵ تن ایران) بدو اعمال شده و متعاقباً بار جانبی افزایش یابنده به سازه اثر داده شده است [۹].

برای دستیابی به هدف تحقیق از روش پیشرفته آنالیز



شکل (۶): شتابنگاشتهای منتخب برای تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی نمونه‌ها.



شکل (۶): ادامه شکل.

۶- کدگذاری نمونه‌های مورد بررسی

جهت سهولت بررسی نتایج، نمونه‌های مورد نظر مطابق روابط (۶) و (۷)، نامگذاری شده‌اند.

$$(۶) \quad nSLWw$$

$$(۷) \quad \alpha dnSL$$

در روابط فوق، پارامترهای d ، S و W معرف واحد زاویه

تورب، دهانه و عرض دهانه می‌باشد. پارامترهای متغیر

عبارتند از:

α : زاویه تورب که مقدار آن صفر، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه می‌باشد.

n : تعداد دهانه که ۱ می‌باشد.

L : طول دهانه که مقدار آن ۱۸ و ۲۵ متر می‌باشد.

w : عرض دهانه که مقدار آن ۷، ۱۳ و ۱۹ متر می‌باشد.

مقایسه نمودارها نشان می‌دهد که تغییرمکان طولی عرشه با افزایش زاویه تورب از صفر تا ۳۰ درجه سیر نزولی داشته و از زاویه ۴۵ درجه به بالا، مقدار آن افزایش می‌یابد. ولی تغییرمکان عرضی و پیچش با افزایش زاویه تورب از صفر تا ۶۰ درجه افزایش پیدا می‌کند. در واقع در پلهای مستقیم، جابه‌جایی عرشه در راستای طولی، از پلهای کج تا زاویه تورب ۳۰ درجه بیشتر است، اما جابه‌جایی عرضی و پیچش عرشه در مقایسه با این پلهای بسیار کم می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش طول دهانه پل، جابه‌جایی طولی کاهش ولی جابه‌جایی عرضی و پیچش افزایش پیدا می‌کنند.

۷-۲- روند تغییرات پاسخ لرزه‌ای عرشه پلهای تک‌دهانه با تغییر عرض دهانه در زاویه تورب ثابت ۴۵ درجه

جهت مطالعه اثر عرض دهانه در فرو افتادن عرشه، شش پل تک‌دهانه با زاویه تورب ۴۵ درجه، به عرض دهانه ۷، ۱۳ و ۱۹ متر در دو طول مختلف دهانه ۱۸ و ۲۵ متر آنالیز و روند تغییرات جابه‌جایی طولی، جابه‌جایی عرضی و پیچش عرشه به صورت نمودار در شکل (۸)، مقایسه شده است. به طور کلی می‌توان گفت در پلهای با زاویه تورب زیاد، پیچش زیاد عرشه در ثانیه‌های اول زلزله باعث فرو افتادن عرشه گردیده و تغییرمکان طولی عرشه، فرصت افزایش نخواهد داشت. اما در پلهای مستقیم یا با زاویه تورب کوچک، جابه‌جایی طولی عرشه تا زمانی که امکان افزایش داشته باشد، ادامه می‌یابد.

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عرض دهانه از ۷ متر (نسبت طول به عرض دهانه بیشتر از ۲) به ۱۳ متر (نسبت طول به عرض دهانه کمتر از ۲)، پیچش، تغییرمکان طولی و عرضی به سرعت کاهش می‌یابند. با توجه به رفتار پیچیده پلهای کج و نتایج به دست آمده به خصوص برای تغییرمکان طولی پلهای به طول ۱۸ و ۲۵ متر به عرضهای ۷، ۱۳ و ۱۹ متر، رابطه خاصی بین نسبت طول به عرض دهانه و تغییرمکان طولی مشاهده نمی‌گردد.

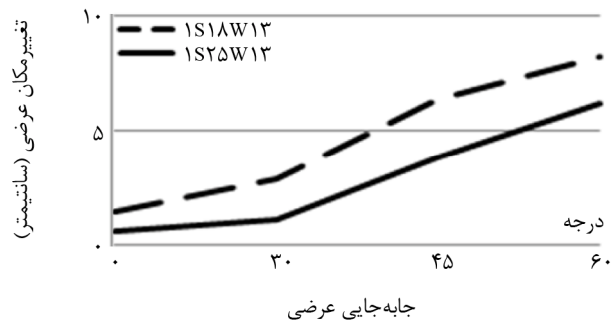
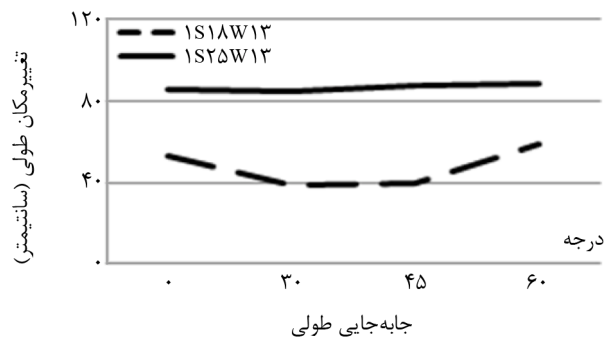
در ارتباط با نتایج تغییرمکان عرضی و پیچش می‌توان گفت که در پلهای کج، به علت اثر نیروهای لرزه‌ای دو طرفه،

به عنوان مثال کد *IS25W19* معرف پلی تک دهانه به طول دهانه ۲۵ متر و عرض ۱۹ متر بوده و کد *30dIS18* معرف پلی تک دهانه به طول دهانه ۱۸ متر و زاویه تورب ۳۰ درجه می‌باشد.

۷- استخراج نتایج و تفسیر آنها

۷-۱- روند تغییرات پاسخ لرزه‌ای عرشه پلهای تک‌دهانه با تغییر طول دهانه و زاویه تورب

جهت مطالعه اثر پارامترهای طول دهانه و زاویه تورب در فرو افتادن عرشه پلهای تک دهانه، هشت پل تک دهانه با زوایای تورب صفر، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و نیز به طول دهانه ۱۸ و ۲۵ متر آنالیز و روند تغییرات جابه‌جایی طولی، جابه‌جایی عرضی و پیچش عرشه به صورت نمودار در شکل (۷)، مقایسه شده است.



شکل (۷): روند تغییرات جابه‌جایی طولی، عرضی و پیچش عرشه پلهای تک‌دهانه نسبت به تغییر طول دهانه و زاویه تورب.

جدول (۲): زمان وقوع حداکثر پیچش عرشه حول محور قائم پلهای تک‌دهانه با عرض متغیر - ثانیه.

مدل	عرض / طول	کوبه	سان فرناندو	طیس
۴۵d۱S۱۸W۷	۲/۵۷	۴/۰۵	۳/۴۰	۷/۳۵
۴۵d۱S۱۸W۱۳	۱/۳۸	۷/۵۰	۹/۷۰	۱۷/۹۰
۴۵d۱S۱۸W۱۹	۰/۹۵	۸/۵۰	۱۰/۴۵	۱۹/۳۵

۸- نتیجه‌گیری

- بررسی روند تغییرات پاسخهای تغییرمکانی و پیچش عرشه پلهای تک‌دهانه مورد بررسی نشان می‌دهد:
- نتایج نشان می‌دهد که برای پلهای با عرض ثابت، روند تغییرات جابه‌جاییهای طولی، عرضی و پیچشی برای دهانه‌های ۱۸ و ۲۵ متر یکسان می‌باشد. با افزایش زاویه تورب از ۳۰ درجه به ۶۰ درجه، مقدار جابه‌جایی عرضی حدود ۵ برابر و مقدار پیچش تقریباً دو برابر افزایش پیدا می‌کند.
 - در پلهای مورب، با افزایش نسبت طول به عرض عرشه از ۱ به ۲/۵ زمان وقوع حداکثر پیچش کاهش می‌یابد. به عبارتی به دلیل عدم انطباق مرکز جرم و مرکز سختی، نیروی اینرسی ایجاد شده در اثر زلزله تمایل به ایجاد پاسخ پیچشی حول محور عمودی داشته و حرکت جانبی روسازه ناشی از چرخش عرشه، موجب فرو افتادن عرشه پل خواهد شد.
 - در پلهای با زاویه تورب زیاد، پیچش زیاد عرشه در ثانیه‌های اول زلزله باعث فرو افتادن عرشه گردیده و تغییرمکان طولی عرشه، فرصت افزایش نخواهد داشت. اما در پلهای مستقیم یا با زاویه تورب کوچک، جابه‌جایی طولی عرشه تا زمانی که امکان افزایش داشته باشد، ادامه می‌یابد.
 - نتایج بررسیها نشان می‌دهد که به تدریج با افزایش زاویه تورب، عامل مؤثر در افتادگی عرشه، از جابه‌جایی طولی به ترکیب جابه‌جایی طولی و عرضی تغییر می‌نماید. در حالی که در پلهای با زاویه تورب ۶۰ درجه، علیرغم آن که مقدار جابه‌جایی طولی و عرضی کمتر از پلهای با زاویه تورب کوچکتر بوده، ولی پیچش عرشه مقدار بیشتری داشته است. به عبارتی با افزایش زاویه تورب



شکل (۸): روند تغییرات جابه‌جایی طولی، عرضی و پیچش عرشه پلهای تک‌دهانه نسبت به تغییر عرض دهانه.

عرشه پل در موضع چرخش حول محور عمودی قرار دارد. به خصوص هنگامیکه مرکز جرم و مرکز سختی منطبق برهم نمی‌باشند، نیروی اینرسی ایجاد شده در اثر زلزله تمایل به ایجاد پاسخ پیچشی حول محور عمودی دارد. به همین علت با نزدیک شدن نسبت طول به عرض دهانه به عدد یک، تغییرمکان عرضی و پیچش کاهش می‌یابند.

در جدول (۲)، اطلاعات زمانی پیچش عرشه برای برخی از شتابنگاشت‌ها نشان داده شده است، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش این نسبت، پیچش زیاد عرشه در ثانیه‌های اول زلزله باعث فرو افتادن عرشه گردیده و تغییرمکان طولی عرشه، فرصت افزایش نخواهد داشت. اما در پلهای مستقیم یا با زاویه تورب کوچک، جابه‌جایی طولی عرشه تا زمانی که امکان افزایش داشته باشد، ادامه می‌یابد.

skewed bridges, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 17(2), 289-301.

۵. کلانتری، افشین و امجدیان، محسن (۱۳۹۰). رفتار غیرخطی پل‌های مورب، نشریه علمی پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف، دوره ۲۷، شماره دوم، ۳-۱۴.
۶. راهنمای بهسازی لرزه‌ای پلها (۱۳۹۰). معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور، نشریه ۵۱۱، تهران.

7. Shamsabadi, A., Rollins, K., and Kapuskar, M. (2006). Nonlinear soil-abutment-bridge structure interaction for seismic performance-based design, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 133(6), 707-720.
8. Static and dynamic finite element analysis of structures, SAP2000 Advanced 14.2.2, Copyright© 1976-2010 Computer and Structures, Inc.
۹. آیین‌نامه بارگذاری پلها (۱۳۷۹). تهران، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور، نشریه ۱۳۹.

۱۰- پانویس

- ۱- *Beam Stitch (BS)*
۲- *Finite Element (EL)*

عامل مؤثر در افتادگی عرشه، از جابه‌جایی عرشه به پیش‌پیش حول محور قائم، تغییر یافته است.

- در پل‌های تک‌دهانه با کاهش اختلاف بعد طول و عرض دهانه، پیش‌پیش و تغییر مکان عرضی کاهش می‌یابند، ولی با توجه به رفتار پیچیده پل‌های کج، رابطه خاصی بین نسبت طول به عرض دهانه و تغییر مکان طولی به دست نیامده است.

۹- مراجع

1. Bjornsson, S., Stanton, J., and Eberhard, M. (1997). Seismic response of skew bridges, 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 1-12.
2. Mohti, A. and Gokhan, P. (2008). Seismic response of skewed RC box girder bridges, 14th Word Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Beijing, China.
3. Sevgili, G. and Caner, A. (2009). Seismic performance of multisimple-span skew bridges retrofitted with link slabs, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 14(6), 452-459.
4. Theoret, P. Massicotte, B., and Conciatori, D. (2011). Analysis and design of straight and