

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

پل‌های تیر و دال چند دهانه با تکیه‌گاه‌های ساده از متداول‌ترین پل‌های بزرگراه‌های کشور می‌باشند. در این پل‌ها معمولاً درزهای انبساط در پایه‌های میانی و کوله‌ها به منظور تأمین حرکت طولی ناشی از تغییرات دما تعبیه می‌گردد. در هنگام بهره‌برداری از پل، وجود درزهای انبساط باعث مشکلات فراوانی از قبیل پر شدن فاصله درز، اختلاف تراز دو طرف درز و خسارت جدی به پایه‌های میانی به واسطه نشست آب‌های سطحی از میان درز و در نتیجه از بین رفتن پوشش بتن و خوردگی آرماتورهای تیر سرستون می‌شوند. این خسارات در بسیاری از پل‌های چند دهانه کشور به دلیل تعمیر و نگهداری نامناسب شدید می‌باشد. حذف درز انبساط در پایه‌های میانی از رویکردهای پژوهشی اخیر در جهان بوده است. این پژوهش‌ها منجر به ارائه سیستم جدیدی شده است که در آن تیرهای تابلیه دو سر ساده محاسبه و اجرا می‌گردند ولی دال عرشه در محل پایه‌های میانی به صورت یکسره اجرا می‌شود. دال یکسره در محل درز میانی «دال پیوند» نامیده می‌شود و وجود آن مشخصات دینامیکی و رفتار لرزه‌ای پل را تغییر می‌دهد. در این مقاله نتایج تحلیل‌های لرزه‌ای پل‌های تیر و دال بتنی چهار دهانه و هفت دهانه با دال پیوند و بدون دال پیوند ارائه شده است. مطالعه تحلیلی به صورت تحلیل طیفی در هر دو جهت طولی و عرضی پل‌ها انجام شد و رفتار لرزه‌ای پل‌ها با مقایسه تقاضای لرزه‌ای در زیرسازه پل برای حالات مختلف چیدمان دال پیوند و درز انبساط بررسی گردید. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که یکسره کردن دال عرشه پل و استفاده از دال پیوند تأثیر قابل توجهی بر رفتار لرزه‌ای پل‌ها می‌گذارد. طول پل و نحوه چیدمان درزهای انبساط و دال پیوند، عوامل مؤثر در تغییر رفتار لرزه‌ای پل و توزیع برش پایه به عناصر زیر سازه است.

واژگان کلیدی: پل، سازه، بتن، زلزله، دال پیوند.

مطالعات تحلیلی رفتار لرزه‌ای پل‌های تیر و دال بتنی چند دهانه با سیستم دال پیوند

اکبر واتقی (نویسنده مسئول)

دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، vasseghi@iiees.ac.ir

مهدی پورنداف حقی

کارشناس ارشد مهندسی سازه، شرکت ساخت و توسعه زیر بناهای حمل‌ونقل کشور، تهران، ایران

۱- مقدمه

پل‌ها می‌باشند. در سال‌های اخیر به منظور کاهش مشکلات ناشی از وجود درز انبساط، از سیستم جدیدی به نام دال پیوند استفاده می‌شود که در آن تیرهای تابلیه دو سر ساده محاسبه و اجرا می‌گردند؛ ولی دال عرشه در محل پایه‌های میانی به صورت یکسره اجرا می‌شود. مطالعات فراوانی در رابطه با رفتار این سیستم تحت بارهای بهره‌برداری انجام شده است [۱-۹]؛ ولی تحقیقات در رابطه با رفتار لرزه‌ای این سیستم نسبتاً محدود است [۱۰-۱۴]. در این تحقیق، رفتار لرزه‌ای پل‌های طولی و چند دهانه مطالعه و

در پل‌های بزرگراهی وجود درزهای انبساط در عرشه پل علاوه بر افزایش هزینه‌های ساخت و نگهداری، باعث مشکلات زیادی در هنگام بهره‌برداری می‌شود. رفتار نامناسب دستگاه درز انبساط و بلند شدن آن از روی سطح عرشه منجر به آسیب‌های جدی به وسایل نقلیه عبوری می‌شود. همچنین در صورتی که عملکرد درز به دلیل ضعف سیستم نگهداری مختل گردد، نیروهای نامطلوبی در سیستم سازه پل پدید می‌آید. لذا همواره طراحان درصدد کاهش تعداد و یا حذف درز انبساط از عرشه

تغییرات رفتار لرزه‌ای بر اثر کاهش، حذف و یا تغییر چیدمان درزهای انبساط بررسی شده است.

۲- مرور ادبیات فنی

ادبیات فنی در رابطه با رفتار لرزه‌ای پل‌ها با سیستم دال پیوند عموماً به بعد از سال ۲۰۰۰ میلادی محدود می‌شود. کارنر و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۲ میلادی استفاده از دال پیوند برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای پل‌های تیر و دال با تیرهای پیش‌ساخته بتنی را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه پل‌های روگذر متداول برای بررسی تأثیر دال پیوند بر رفتار لرزه‌ای پل‌ها تحلیل شدند و بر اساس نتایج مطالعه تحلیلی یک روش ساده طراحی توسعه داده شد.

پورنداف حقی و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۰۸ میلادی با انجام تحلیل‌های دینامیکی، رفتار لرزه‌ای یک پل دو دهانه متداول در ایران را بررسی کردند. در این مطالعه پایه میانی پل به صورت عمود بر طول پل (بدون زاویه تورب) و همچنین با زاویه تورب بین ۱۵ تا ۶۰ درجه در نظر گرفته شد. نتایج این مطالعه نشان داد که در صورت استفاده از دال پیوند بجای درز انبساط، تقاضای لرزه‌ای پایه میانی (نیرو و جابه‌جایی) به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

در سال ۲۰۰۹ میلادی سوگیلی و کانر [۱۲] بر اساس رساله دکتری سوگیلی [۱۳] استفاده از دال پیوند برای بهسازی لرزه‌ای پل‌های مورب و همچنین اثر دال پیوند بر رفتار لرزه‌ای این نوع پل را بررسی کردند. این مطالعه با تحلیل‌های طیفی و تاریخچه زمانی غیرخطی بر روی تعدادی از پل‌های مورب با طول دهانه و زاویه تورب متفاوت انجام شد و برای مناطق لرزه‌خیز با خطر نسبی بسیار زیاد جزئیات آرماتورگذاری متفاوتی برای دو طرف دال پیوند پیشنهاد گردید.

پناهی و واثقی [۱۴] در سال ۱۳۸۷ شمسی رفتار و پاسخ لرزه‌ای پل‌های بتنی چند دهانه که توسط دال پیوند به یکدیگر متصل شده‌اند را بررسی کردند. در این مطالعه پل‌های دو دهانه، سه دهانه و چهار دهانه، به دو صورت دهانه ساده با درز انبساط و

با سیستم دال پیوند مدل‌سازی و تحلیل شدند. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که با جایگزینی درز انبساط توسط دال پیوند، پیوند طبیعی پل‌ها کاهش و برش پایه آنها افزایش می‌یابد. این نتایج همچنین نشان داد که دال پیوند باعث کاهش تقاضای لرزه‌ای در پایه‌های میانی می‌شود.

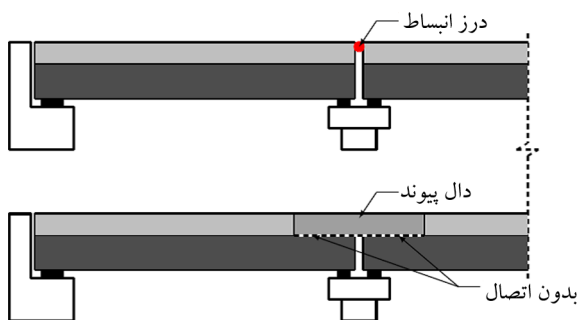
۳- طراحی پل با سیستم دال پیوند

در سیستم دال پیوند تیرهای دهانه پل به صورت دو سر ساده و مجزا از سایر دهانه‌ها محاسبه و اجرا می‌گردند اما دال عرشه منقطع نشده و در محل پایه‌ها به صورت یکسره اجرا می‌گردد (شکل ۱). در این سیستم تیرهای پیش‌ساخته اعم از فلزی یا بتنی در هر دهانه بر روی پایه‌ها به صورت مستقل نصب می‌گردند و سپس در مرحله اجرای دال بتنی با تمهیداتی در طراحی دال به صورت سرتاسری آرماتورگذاری و بتن‌ریزی می‌گردد بدون آنکه در انتهای تیرها و بر روی پایه‌ها هیچ‌گونه درزی اجرا گردد. ضوابط طراحی دال پیوند در آیین‌نامه آشتو [۱۵] ارائه شده که خلاصه آن به شرح زیر است:

۱. تیرهای هر دهانه به صورت مجزا و به شکل تیر دو سر ساده محاسبه و طراحی می‌گردند.

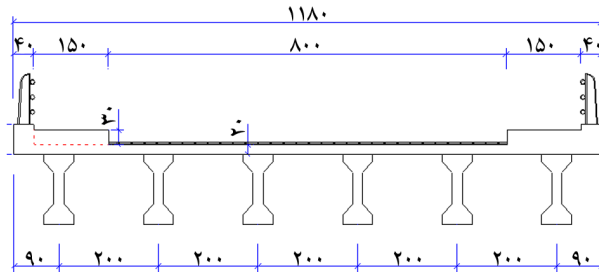
۲. به منظور کاهش سختی دال پیوند، اتصالات برشی بین تیر و دال در ۵ درصد طول انتهایی تیر (در مجاورت درز) حذف می‌گردد.

۳. حداکثر چرخش انتهایی تیر ناشی از بارهای مرده گروه ۲ (وزن بتن دال آسفالت و پیاده‌رو) و بارهای زنده محاسبه می‌شود و لنگر ناشی از این چرخش برای طراحی و محاسبه آرماتورهای دال پیوند در نظر گرفته می‌شود.

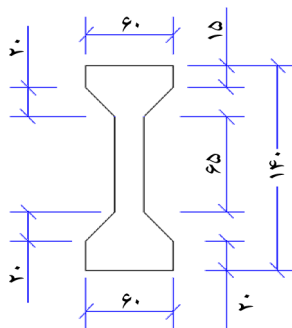


شکل (۱): سیستم دال پیوند [۹].

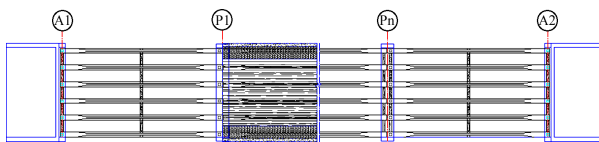
دهانه قرار می‌گیرند که موقعیت آنها در نقشه پلان شماتیک پل‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۳): مقطع عرضی پل‌ها.



شکل (۴): مقطع و ابعاد تیر پیش ساخته بتنی.



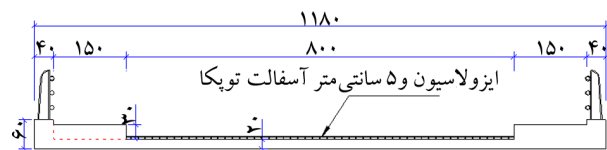
شکل (۵): پلان پل.

۲-۴- مشخصات زیر سازه

هر پایه میانی با سه ستون مدور به قطر ۱/۲ متر و ارتفاع ۷ متر انتخاب شده که ستون‌ها به فاصله ۴/۲ متر از یکدیگر به سرستون به ابعاد ۱/۵×۱/۶ متر با دو گوشواره به ارتفاع ۱ متر در طرفین آن منتهی می‌گردند. طول، عرض و ارتفاع سرستون مطابق شکل (۶) با توجه به فاصله ستون‌ها و طول نشیمن مورد نیاز بر اساس ضوابط آئین‌نامه طراحی پل‌ها [۱۶] به دست آمده است و فاصله ستون‌ها نیز به منظور بهینه شدن نیروهای سرستون (حداقل لنگر ناشی از بار مرده تابلیه در ستون‌ها) محاسبه شده است. سیستم دستگانه تکیه گاهی نیز شامل نوپرن‌های مسلح به ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی متر و به ضخامت کل ۴۹ میلی متر (شامل سه لایه ۱۱ میلی متری و دو

۴- مشخصات فنی و هندسی پل‌های منتخب

در این تحقیق پل‌های بتنی با تابلیه مشتمل بر تیر پیش ساخته بتن مسلح و دال درجای بتنی که در کشور ایران بسیار رایج و متداول می‌باشند انتخاب گردیده است. مقطع عرضی پل متشکل از ۸ متر سواره‌رو (با لحاظ نمودن حاشیه ایمنی) و دو پیاده‌رو در طرفین هر کدام به عرض ۱/۵ متر و دو قرنیز طرفین هر یک به عرض ۴۰ سانتی متر است و روسازی پل نیز شامل ایزولاسیون و ۵ سانتی متر آسفالت توپکا مطابق شکل (۲) می‌باشد.



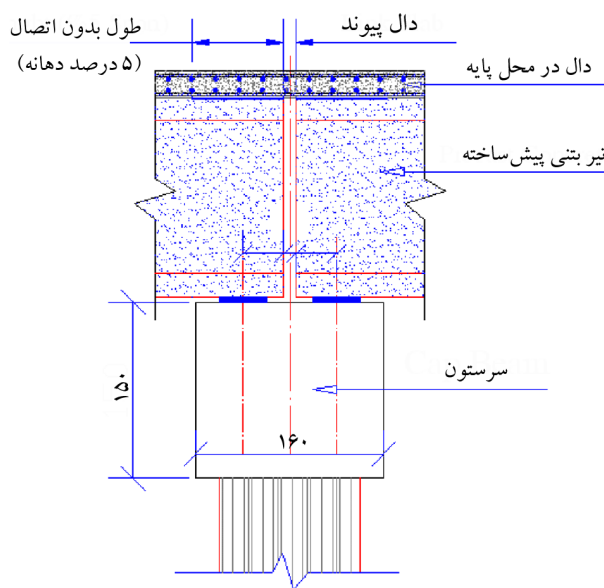
شکل (۲): تیپ مقطع عرضی پل بر مبنای راه اصلی دوطرفه.

محدوده مناسب کاربرد تیرهای پیش ساخته بتنی برای دهانه‌های بین ۲۰ تا ۳۰ متر است و طول دهانه ۲۰ متر متداول‌ترین طول دهانه در پل‌های ایران است. در این تحقیق برای لحاظ نمودن اثر طول پل و مطالعه رفتار لرزه‌ای پل‌ها در اثر یکسره شدن دال در محل پایه‌ها، دو پل به طول ۸۰ متر و ۱۴۰ متر و هر کدام شامل چهار دهانه و هفت دهانه ۲۰ متری انتخاب شده است. ارتفاع پایه‌های میانی متناسب با پل‌های معمول رودخانه‌ای و تقاطع در نظر گرفته شده است. در ادامه مشخصات تابلیه و زیرسازه پل‌های مورد مطالعه تشریح می‌گردد.

۴-۱- مشخصات تابلیه

شکل (۳) نمایشگر مقطع عرضی پل می‌باشد که در آن تابلیه متشکل است از شش عدد تیر بتن مسلح پیش ساخته، هر کدام به ارتفاع ۱/۴ متر که به فاصله ۲ متر از یکدیگر قرار می‌گیرند و دال بتن مسلح درجا به ضخامت ۲۰ سانتی متر می‌باشد. ابعاد تیر مطابق شکل (۴) بر اساس طول دهانه و قالب‌های رایج برای اجرای این تیرها می‌باشد. تابلیه در هر دهانه دارای سه دیافراگم عرضی می‌باشد که یک دیافراگم در وسط دهانه تابلیه به ضخامت ۳۰ سانتی متر و دو دیافراگم در دو انتهای تیرهای هر

- حالت (b): تابلیه دارای یک درز انبساط بر روی پایه میانی P3 باشد و دال پیوند بر روی سایر پایه‌ها اجرا شود.
 - حالت (c): تابلیه دارای دو درز انبساط در محل پایه‌های P2 و P5 باشد و دال پیوند بر روی سایر پایه‌ها اجرا شود.
 - حالت (d): تابلیه فاقد دال پیوند و دارای شش درز انبساط در محل تمام پایه‌ها باشد.
- شکل (۷) جزئیات دال پیوند و یکسره نمودن دال در محل پایه‌ها را نشان می‌دهد.

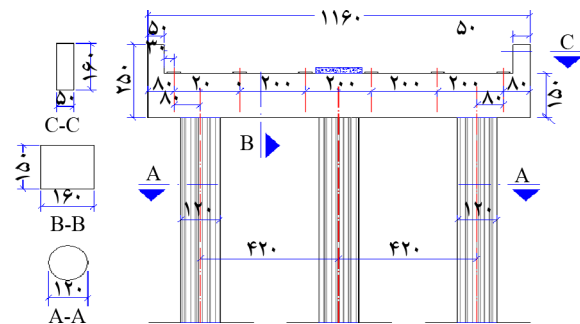


شکل (۷): جزئیات دال پیوند در محل پایه‌ها.

۶- مدل سازی پل‌ها به روش اجزای محدود

مدل سازی و تحلیل پل‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 انجام شده است و تمام اجزای پل اعم از روسازه شامل تیر و دال و دیافراگم‌های میانی و زیرسازه شامل پایه میانی و اجزای آن مشتمل بر ستون، سرستون و دستگاه‌های تکیه گاهی در نظر گرفته شده‌اند. شکل‌های (۸) و (۹) به ترتیب نحوه مدل‌سازی تابلیه و پایه میانی پل را نشان می‌دهند. طبق مدل ارائه شده در مرجع [۱۷] جان تیرها با المان Shell و بال‌های فوقانی و تحتانی آن با المان Frame مدل‌سازی شده‌اند. دال بتنی عرشه نیز با المان‌های چهار گرهی Shell مدل‌سازی شده است و اتصال آن به بال فوقانی با استفاده از المان‌های صلب انجام شده است. دیافراگم‌های عرضی در انتها و

لایه ۲/۵ میلی‌متری الاستومر و چهار صفحه فلزی به ضخامت ۲ میلی‌متر) می‌باشد که ابعاد آنها مطابق با ضوابط آیین‌نامه آشتو [۱۵] محاسبه شده است. کوله‌های پل نیز با توجه به ارتفاع پل (کمتر از ۱۰ متر) به صورت بسته و شامل دیواره‌ای از بتن مسلح در نظر گرفته شده است. با توجه به شرایط تکیه گاهی و سختی‌های نسبی دستگاه‌های تکیه گاه به سختی دیواره کوله، در مراحل تحلیل کوله‌ها به صورت صلب مدل‌سازی می‌شوند.



شکل (۶): جزئیات پایه میانی پل‌های تحلیلی.

۵- چیدمان دال پیوند و درزهای انبساط میانی

حالات مختلفی برای چیدمان دال پیوند و درزهای انبساط

میانی به شرح زیر در نظر گرفته شده است.

الف) برای پل چهار دهانه که دارای سه پایه میانی P1، P2 و

P3 می‌باشد، چهار حالت در نظر گرفته شده است:

- حالت (a): تابلیه فاقد درز انبساط در محل پایه‌های میانی باشد و دال پیوند بر روی تمام پایه‌ها اجرا شود.
 - حالت (b): تابلیه دارای یک درز انبساط در وسط و بر روی پایه میانی P2 باشد و دال پیوند بر روی پایه‌های P1 و P3 اجرا شود.
 - حالت (c): تابلیه دارای دو درز انبساط در محل پایه‌های P1 و P3 باشد و دال پیوند بر روی پایه P2 اجرا شود.
 - حالت (d): تابلیه فاقد دال پیوند و دارای سه درز میانی در محل تمام پایه‌ها باشد.
- ب) برای پل هفت دهانه که دارای شش پایه میانی P1 الی P6 می‌باشد چهار وضعیت بررسی شده است:
- حالت (a): تابلیه فاقد درز انبساط در محل پایه‌های میانی باشد و دال پیوند بر روی تمام پایه‌ها اجرا شود.

روابط تغییر شکل نشوین به ابعاد و ضریب ارتجاعی برشی آن بستگی دارد. ضریب ارتجاعی برشی نشوین (G) به نرخ یا سرعت بارگذاری وابسته است و برای بارگذاری سریع، این ضریب مساوی ۱۶ کیلوگرم بر سانتی مترمربع در نظر گرفته می‌شود [۱۸]. در جدول (۱) مقادیر سختی محاسباتی برای دهانه ۲۰ متری ارائه گردیده است و از آنجایی که ابعاد طول و عرض الاستومرها یکسان می‌باشد لذا سختی در دو جهت مشابه هم خواهند بود.

$$v = C \frac{nt^3}{GA_b a^2} V \Rightarrow K_v = \frac{GA_b a^2}{C nt^3} \quad \text{تغییر شکل قائم}$$

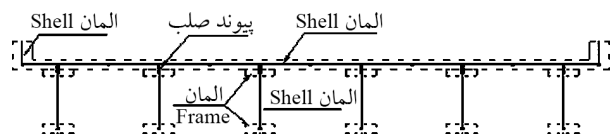
$$\theta = C' \frac{nt^3}{GA_b a^4} M \Rightarrow K_\theta = \frac{GA_b a^4}{C' nt^3} \quad \text{تغییر شکل زاویه‌ای}$$

$$u = \frac{nt}{GA_b} Q \Rightarrow K_u = \frac{GA_b}{nt} \quad \text{تغییر شکل برشی (افقی)}$$

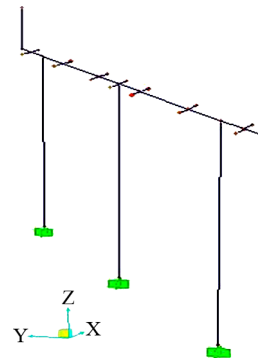
$$\phi = \frac{t}{C_2 a^4 G} T \Rightarrow K_\phi = \frac{GC_2 a^4}{t} \quad \text{تغییر شکل پیچشی}$$

شرایط تکیه گاهی مدل سازه به این صورت است که اتصال پای ستون‌ها به صورت گیردار کامل تعریف شده است. برای تکیه گاه سمت کوله‌ها نیز از آنجایی که در هر دو راستای طولی و عرضی پل سختی الاستومرها بسیار کمتر از سختی کوله‌ها است، کوله‌ها به صورت صلب در نظر گرفته شده‌اند و انتهای تیرها توسط فنرهای الاستومر به نقاط تکیه گاهی صلب متصل شده‌اند. یک نقطه از دیافراگم انتهایی تابلیه نیز در راستای عرضی به جای بلوک‌های برشی مقید شده است.

وسط تابلیه نیز با المان Shell و پایه‌های میانی و اجزای آن با المان Frame مدل‌سازی شده‌اند. اتصال انتهای تیرها به محور میانی سرستون پایه میانی مطابق شکل (۹) با المان‌های صلب انجام شده است. مدل‌سازی دال پیوند در محل درزهای میانی با مقید کردن حرکت عرشه در دو طرف درز انبساط به یکدیگر انجام شده است. مدل سه بعدی پل‌ها در شکل (۱۰) نشان داده شده‌اند.

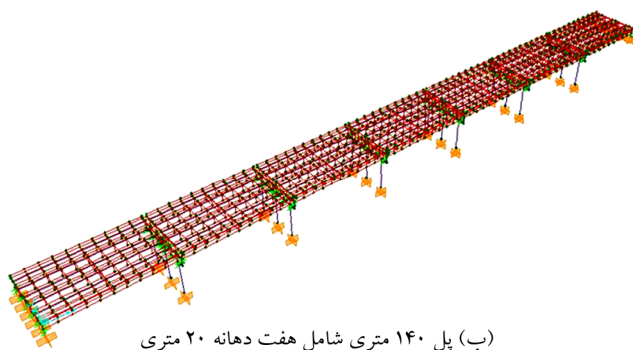


شکل (۸): مدل اجزای محدود تابلیه پل.

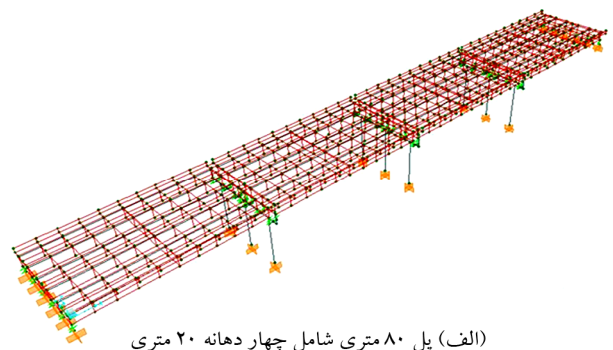


شکل (۹): مدل اجزای محدود پایه میانی.

الاستومرهای تکیه گاه‌ها نیز با المان‌های پیوند در حد فاصل بین بال تحتانی تیرها و سرستون مدل شده‌اند. سختی این المان در جهات مختلف با استفاده از روابط زیر محاسبه شده است. در این



(ب) پل ۱۴۰ متری شامل هفت دهانه ۲۰ متری



(الف) پل ۸۰ متری شامل چهار دهانه ۲۰ متری

شکل (۱۰): مدل سه بعدی پل‌ها.

جدول (۱): مشخصات سختی فنرهای الاستومرها.

ابعاد نشوین (میلی‌متر)	K_v (تن بر متر)	K_θ (تن در متر بر رادیان)	K_u (تن بر متر)	K_ϕ (تن متر بر رادیان)
$300 \times 300 \times (3 \times 11 + 2 \times 2/5)$	۱۳۵/۹	۲۴/۳	۳۷۹	۴/۸۰

لرزه‌ای پل‌ها با استفاده از تحلیل طیفی در هر دو جهت طولی و عرضی پل‌ها انجام شد. طیف مورد استفاده طیف استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۱۹] برای مناطق با خطر نسبی خیلی زیاد (شتاب مبنای طرح ۰/۳۵) و زمین نوع II در نظر گرفته شده است. رفتار لرزه‌ای پل‌ها برای حالات مختلف چیدمان دال پیوند و درز انبساط در ادامه تشریح شده است.

۷-۱- تغییر مکان‌های تابلیه

ارزیابی تغییر مکان‌های تابلیه نیز در دو جهت طولی و عرضی انجام شده است. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) توزیع تغییر مکان‌های طولی نقاط تابلیه تحت اثر زلزله در راستای طول پل را نشان می‌دهد. در این شکل‌های تغییر مکان نقاط گوشه تابلیه واقع در طرفین درز انبساط تحت اثر نیروهای ناشی از تحلیل طیفی نشان داده شده است.

جرم و وزن اجزای سازه‌ای پل در قالب وزن و جرم المان‌های متناظر با آنها در مدل تعریف شده‌اند. جرم اجزای غیر سازه‌ای پل مانند پیاده‌رو، ایزولاسیون، آسفالت و نرده در قالب ضرایب افزایش جرم گسترده دال اعمال شده است. وزن ایزولاسیون و آسفالت با منظور نمودن آسفالت آینده و پیاده‌رو به شرح زیر محاسبه و در مدل لحاظ شده است:

- وزن ۱۰ سانتی‌متر آسفالت: ۲۲۰ کیلوگرم بر مترمربع (۰/۱ × ۲۲۰۰)

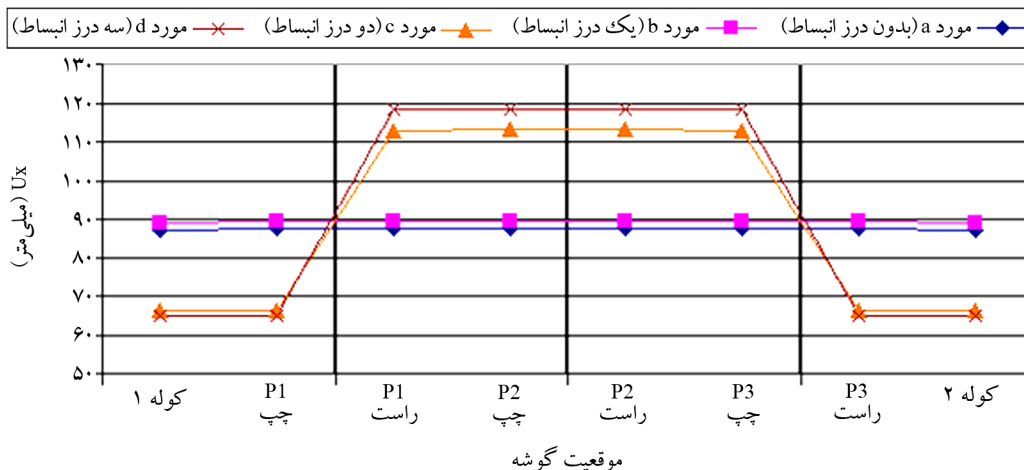
- وزن ایزولاسیون: ۵۰ کیلوگرم بر مترمربع

- وزن پیاده‌رو: ۷۲۰ کیلوگرم بر مترمربع (۰/۳ × ۲۴۰۰)

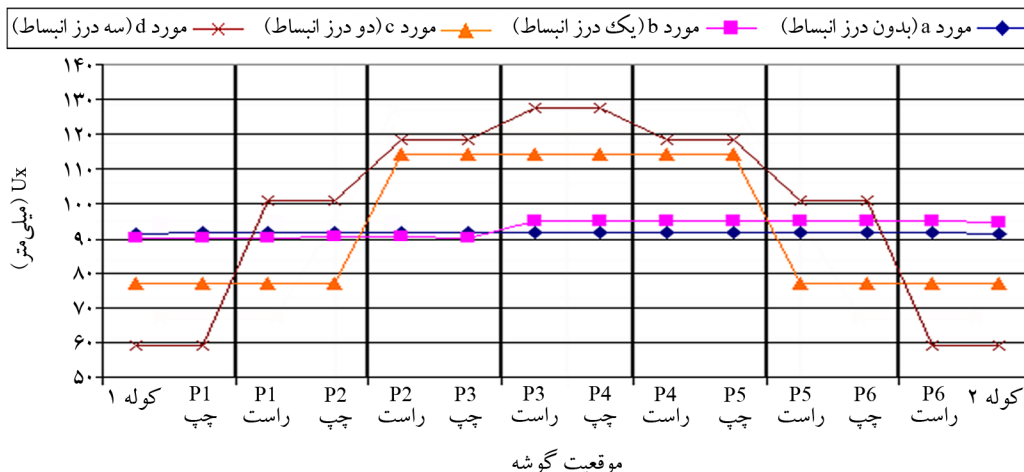
- وزن نرده‌ها: ۱۰۰ کیلوگرم بر متر

۷-۲ رفتار لرزه‌ای پل‌ها

مطالعه تحلیلی به منظور بررسی تأثیر دال پیوند بر رفتار



شکل (۱۱): توزیع تغییر مکان در طول پل در کوله‌ها و نقاط طرفین درزهای انبساط تحت اثر طیف طولی در پل چهار دهانه.



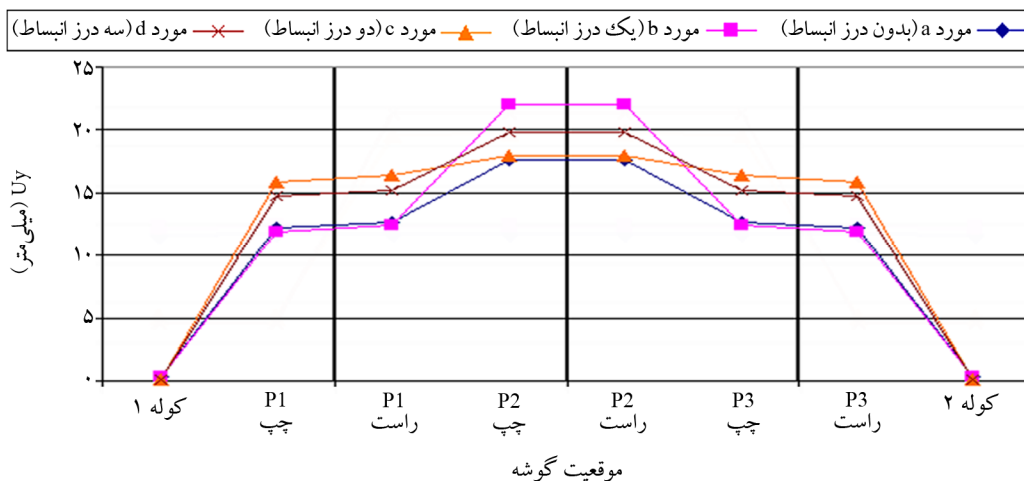
شکل (۱۲): توزیع تغییر مکان در طول پل در کوله‌ها و نقاط طرفین درزهای انبساط تحت اثر طیف طولی در پل هفت دهانه.

تابلیه تغییر مکان‌ها برای حالات a و b و c تقریباً یکسان است.

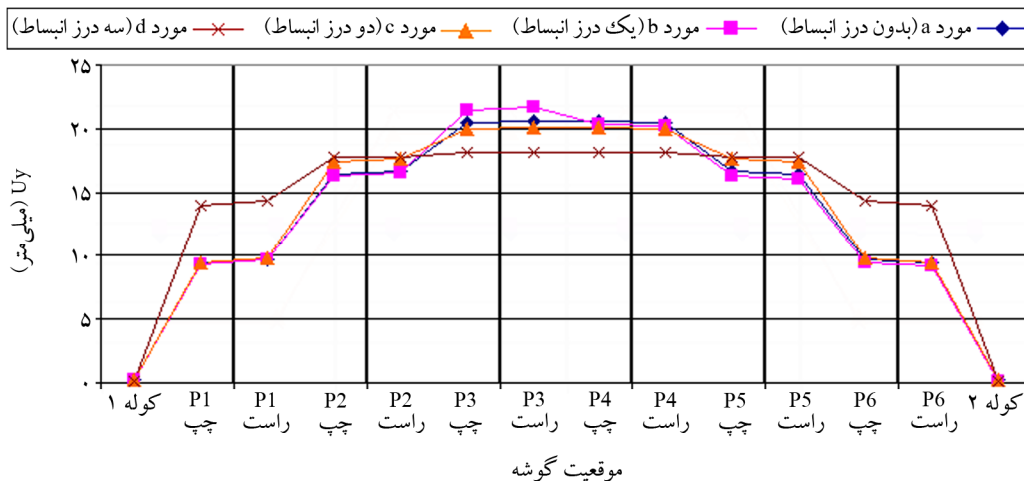
۷-۲- تغییر شکل الاستومرها

توزیع تغییر شکل‌های طولی الاستومرها در پایه‌های پل تحت اثر زلزله طولی در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نمایش داده شده است. یکنواختی تغییر شکل‌های نئوپرن‌ها و توزیع نیرو بین تمام آنها به طور تقریباً یکنواخت از ویژگی‌های حذف کامل درز انبساط در پل‌ها می‌باشد. در ضمن با توجه به عدم تغییر مکان بدنه کوله‌ها، بیشترین تغییر شکل در نئوپرن‌های الاستومرهای که بر روی کوله‌ها قرار دارند رخ می‌دهد. در پل‌های هفت دهانه بیشترین تغییر شکل مربوط به حالت a (بدون درز انبساط) و کمترین مربوط به حالت d (بدون دال پیوند) است.

در این نمودارها به عنوان مثال P1 چپ به معنای نقطه سمت چپ درز انبساط واقع بر پایه P1 است. ملاحظه می‌شود در حالت a (بدون درز انبساط) و b (یک درز انبساط) تغییر مکان‌های طولی نقاط تابلیه در روی پایه‌ها تقریباً یکسان است. در حالت c (دو درز انبساط) و d (سه درز انبساط) تغییر مکان‌ها به دلیل اختلاف شرایط تکیه گاهی اختلاف دارند و بخشی از تابلیه که بر روی پایه‌های میانی قرار می‌گیرند تغییر مکان‌های بیشتری نسبت به بخش کناری تابلیه دارند. شکل‌های (۱۳) و (۱۴) توزیع تغییر مکان‌های عرضی نقاط تابلیه تحت اثر زلزله در جهت عرض پل را برای حالات مختلف چیدمان درز انبساط و دال پیوند نشان می‌دهد. در پل چهار دهانه حداکثر جابه‌جایی برای حالت b (یک درز انبساط) و در محل درز انبساط اتفاق می‌افتد. برای پل هفت دهانه با توجه به کاهش سختی عرض



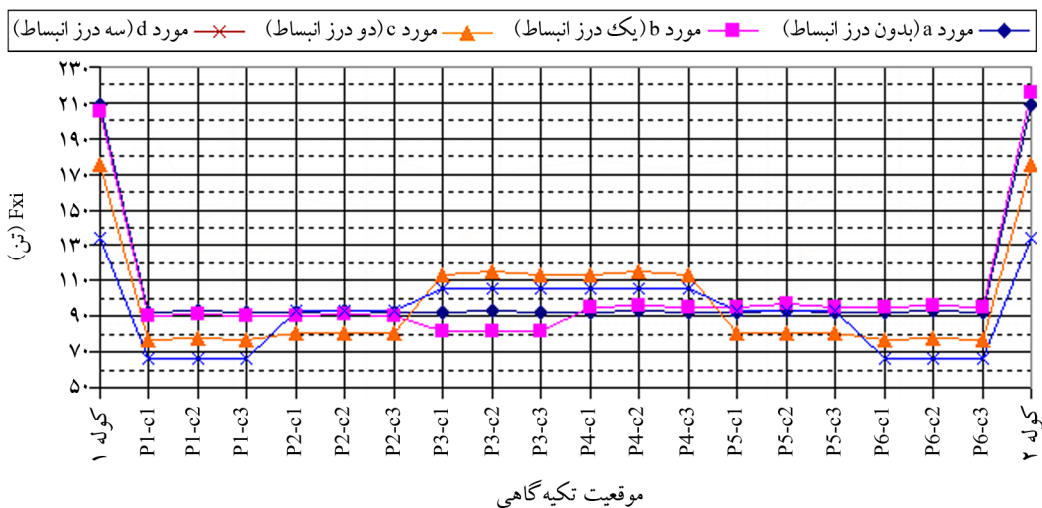
شکل (۱۳): توزیع جابه‌جایی‌های عرضی در طول پل تحت اثر طیف عرضی در پل چهار دهانه.



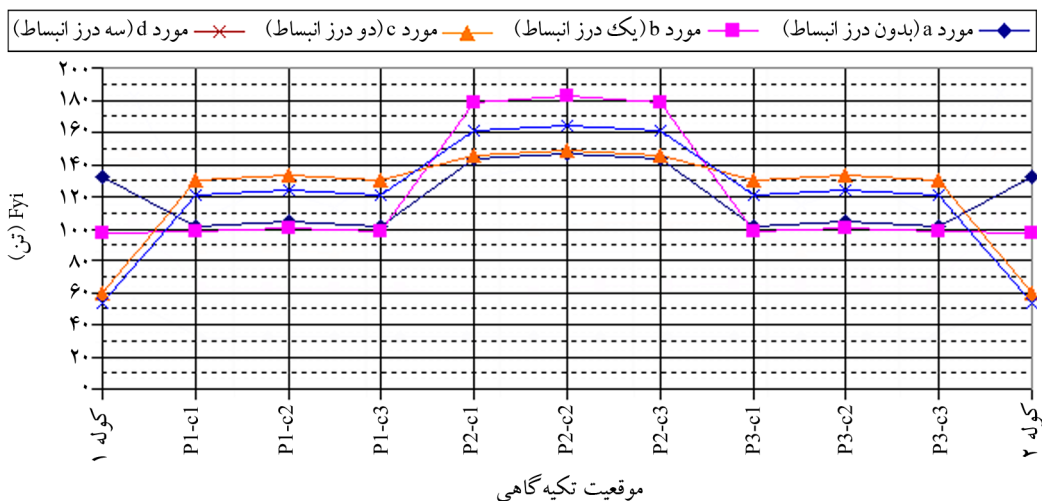
شکل (۱۴): توزیع جابه‌جایی‌های عرضی در طول پل در پل هفت دهانه.

شکل‌های (۱۹) و (۲۰) توزیع نیروهای عرضی بین پایه‌ها و کوله‌ها برای برش پایه حاصل از اعمال طیف عرضی نشان می‌دهند. در پل چهار دهانه با یکسره نمودن عرشه پل (حالت a)، نیروهای پایه میانی کاهش و نیروهای کوله‌ها افزایش می‌یابند. در این پل حداکثر برش در پایه میانی p_2 در وضعیتی رخ می‌دهد که درز انبساط بر روی آن پایه قرار گیرد (حالت b). در پل هفت دهانه نیز حداکثر برش در پایه میانی p_3 در حالت b (یک درز انبساط) رخ می‌دهد. در این پل توزیع نیرو به کوله‌ها برای حالات a و b و c تقریباً یکسان است و فقط برای حالت d (بدون دال پیوند)، نیروی برشی وارد بر کوله کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد.

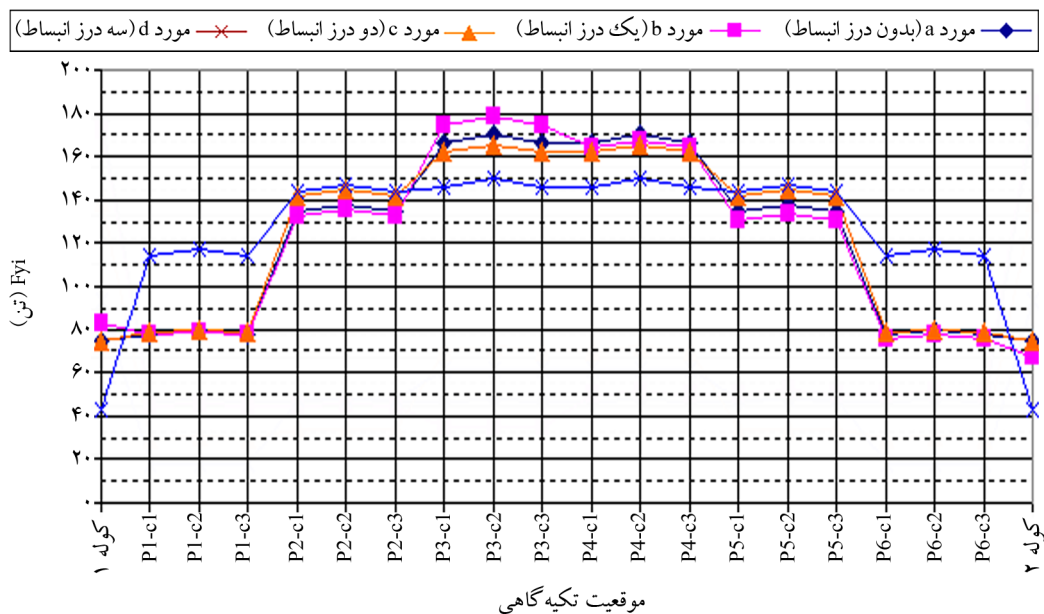
کوله‌های ابتدا و انتها و در وسط نیروهای هر ستون به تفکیک نشان داده شده‌اند. به‌عنوان مثال منظور از p_1-c_1 ستون c_1 در پایه p_1 است. در پل چهار دهانه افزودن یک درز انبساط به عرشه باعث کاهش نیروهای ستون‌های پایه میانی p_2 می‌گردد، بدون آنکه تغییر محسوسی در نیروهای سایر اجزا اتفاق بیفتد. از سویی دیگر با افزایش تعداد درزهای انبساط، نیروهای پایه وسط افزایش و نیروهای سایر پایه‌ها و کوله‌ها کاهش می‌یابد. در پل هفت دهانه، در حالت a (بدون درز انبساط) نیروهای پایه‌ها یکسان است ولیکن با تعبیه درز انبساط بسته به تعداد و موقعیت آنها، توزیع نیروها نیز تغییر می‌یابد. در واقع توزیع نیروها تابع تعداد وضعیت درزهای انبساط است.



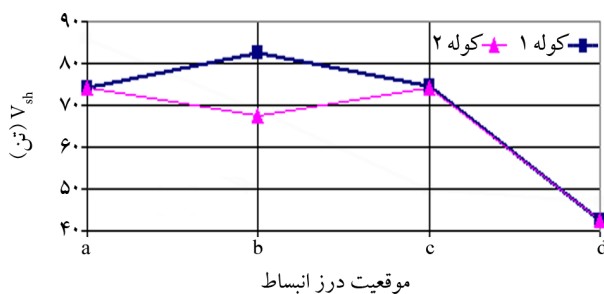
شکل (۱۸): توزیع نیروهای طولی تکیه‌گاهی حاصل از اعمال طیف طولی برای حالات مختلف در پل هفت دهانه.



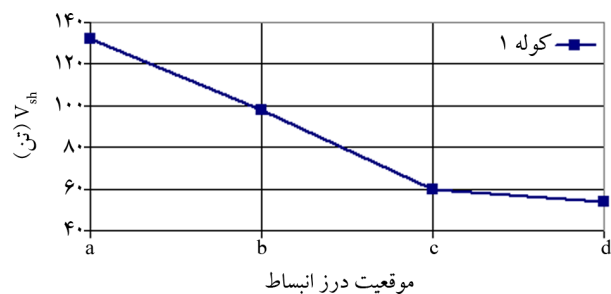
شکل (۱۹): توزیع نیروهای عرضی تکیه‌گاهی حاصل از اعمال طیف عرضی برای حالات مختلف در پل چهار دهانه.



شکل (۲۰): توزیع نیروهای عرضی تکیه‌گاهی حاصل از اعمال طیف عرضی برای حالات مختلف در پل هفت دهانه.



شکل (۲۲): تغییرات نیروهای عرضی وارد بر کوله‌ها حاصل از طیف عرضی در پل هفت دهانه.



شکل (۲۱): تغییرات نیروهای عرضی وارد بر کوله‌ها حاصل از طیف عرضی در پل چهار دهانه.

۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در پل‌های بزرگراهی معمولاً درزهای انبساط در پایه‌های میانی و کوله‌ها به منظور تأمین حرکت طولی ناشی از تغییرات دما تعبیه می‌گردد. وجود درزهای انبساط در عرشه پل علاوه بر افزایش هزینه‌های ساخت و نگهداری، باعث مشکلات فراوانی از قبیل پر شدن فاصله درز، اختلاف تراز دو طرف درز و خسارت جدی به تیر سرستون پایه‌های میانی به واسطه نشست آب‌های سطحی از میان درز می‌شوند. اخیراً به منظور کاهش مشکلات ناشی از وجود درز انبساط، از سیستم جدیدی به نام دال پیوند استفاده می‌شود که در آن تیرهای تابلیه دو سر ساده محاسبه و اجرا می‌گردند؛ ولی دال عرشه در محل پایه‌های میانی به صورت یکسره اجرا می‌شود. دال یکسره در محل درز میانی «دال پیوند» نامیده

شکل‌های (۲۱) و (۲۲) تغییرات نیروی برشی وارد بر کوله‌ها را برای حالات متفاوت چیدمان درز انبساط و دال پیوند نشان می‌دهند. این شکل‌ها نشان می‌دهند که با اجرای دال پیوند (حالات a و b و c)، نیروی برشی وارد بر کوله نسبت به حالت d (بدون دال پیوند) افزایش می‌یابد. در پل چهار دهانه نیروی برشی وارد بر کوله در حالت a (بدون درز انبساط) ۲۳۰ درصد بیشتر از حالت d (بدون دال پیوند) است. این نیرو برای حالت b (یک درز انبساط) ۷۵ درصد و برای حالت c (دو درز انبساط) ۱۰ درصد بیشتر از حالت d است. در پل هفت دهانه به دلیل عدم تقارن در حالت ۱ درز میانی نیروی وارد بر دو کوله با یکدیگر متفاوت می‌باشد و تابلیه با چهار دهانه یکسره نیروی بیشتری را نسبت به تابلیه با سه دهانه یکسره به کوله وارد می‌کند.

2. Kim, Y.Y., Fischer, G., and Li, V.C. (2004) Performance of bridge deck link slabs designed with ductile engineered cementitious composite. *Structural Journal*, **101**(6), 792-801.
3. Okeil, A.M. and ElSafty, A. (2005) Partial continuity in bridge girders with jointless decks. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, **10**(4), 229-238.
4. Wing, K.M. and Kowalsky, M.J. (2005) Behavior, analysis, and design of an instrumented link slab bridge. *Journal of Bridge Engineering*, **10**(3), 331-344.
5. Qian, S., Lepech, M.D., Kim, Y.Y., and Li, V.C. (2009) Introduction of Transition Zone Design for Bridge Deck Link Slabs Using Ductile Concrete. *ACI Structural Journal*, **106**(1).
6. Lepech, M.D. and Li, V.C. (2009) Application of ECC for bridge deck link slabs. *Materials and Structures*, **42**(9), 1185.
7. Ulku, E., Attanayake, U., and Aktan, H. (2009) Jointless bridge deck with link slabs: design for durability. *Transportation Research Record*, **2131**(1), 68-78.
8. Au, A., Lam, C., Au, J., and Tharmabala, B. (2013) Eliminating deck joints using debonded link slabs: Research and field tests in Ontario. *Journal of Bridge Engineering*, **18**(8), 768-778.
9. Haikal, G., Ramirez, J.A., Jahanshahi, M.R., Villamizar, S., and Abdelaleim, O. (2019) *Link Slab Details and Materials* (Joint Transportation Research Program Publication No. FHWA/IN/JTRP-2019/10). West Lafayette, IN: Purdue University.
10. Caner, A., Dogan, E., and Zia, P. (2002) Seismic performance of multisimple-span bridges retrofitted with link slabs. *Journal of Bridge Engineering*, **7**(2), 85-93.
11. Pournadaf Haghi, M., Vasseghi, A., and Nateghi, F. (2008) Effect of link slab on seismic response of two span straight and skew bridges. *International Journal of Engineering*, **21**(3), 257-266.
12. Sevgili, G. and Caner, A. (2009) Improved seismic response of multisimple-span skewed bridges retrofitted with link slabs. *Journal of Bridge*

می‌شود و وجود آن مشخصات دینامیکی و رفتار لرزه‌ای پل را تغییر می‌دهد. در این مقاله، رفتار لرزه‌ای پل‌های تیر و دال بتنی چهار دهانه و هفت دهانه مطالعه و تغییرات رفتار لرزه‌ای ناشی از اجرای دال پیوند با چیدمان‌های متفاوت بررسی شده است. اهم نتایج این تحقیق به شرح زیر است.

- اجرای دال پیوند بر روی هر یک از پایه‌های میانی، توزیع نیروی برش پایه بین پایه‌های میانی و کوله‌های پل را تغییر می‌دهد. توزیع نیروی برشی به اجزای زیر سازه به تعداد دهانه و نحوه چیدمان دال پیوند و درز انبساط بستگی دارد. به‌طور کلی اجرای دال باعث افزایش نیروی برشی در کوله‌ها و کاهش نیروی برشی در پایه محل اجرای دال پیوند می‌شود. توزیع نیروی برشی به اجزای زیر سازه به تعداد دهانه و نحوه چیدمان دال پیوند و درز انبساط بستگی دارد.

- تغییر مکان‌های تابلیه در هر دو جهت طولی و عرضی نیز به تعداد دهانه و نحوه چیدمان دال پیوند و درز انبساط بستگی دارد. به‌طور کلی حداکثر تغییر مکان تابلیه با افزایش تعداد درزهای انبساط افزایش می‌یابد.

- یکسره نمودن دال به‌عنوان روشی برای حذف یا کاهش درزهای انبساط در بهبود کیفیت سرویس دهی پل و کاهش هزینه‌های نگهداری آن بسیار مؤثر است.

- با توجه به تغییر توزیع نیروها در پل، یکسره‌گی دال و چیدمان درزهای انبساط را می‌توان به‌عنوان روشی جهت بهسازی لرزه‌ای پل‌ها به کار گرفت.

در این مطالعه پاسخ‌های لرزه‌ای دو تیپ پل با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی طیفی و بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه بررسی شده‌اند. برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود طیف وسیع تری از پل‌ها با انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی و لحاظ نمودن اندرکنش خاک و سازه مورد ارزیابی قرار گیرند.

مراجع

1. Caner, A. and Zia, P. (1998) Behavior and design of link slabs for jointless bridge decks. *PCI Journal*, **43**(3), 68-80.

Engineering, **14**(6), 452-459.

13. Sevgili, G. (2007) *Seismic Performance of Multisimple-Span Skew Bridges Retrofitted with Link Slabs*. Doctoral Dissertation, Middle East Technical University, Ankara.
14. Panahi, H. and Vasseghi, A. (2008) Study on behavior of multispan concrete bridges with link slabs. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **11**(4) (in Persian).
15. American Association of State Highway and Transportation Officials (2012) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. 6th Edition, Washington, DC: AASHTO.
16. Executive Technical Office of the Vice President for Strategic Planning and Supervision (2008) *Iranian Design Code for Reinforced Concrete Bridges - Standard 389* (in Persian).
17. Meng, J.Y. and Lui, E.M. (2000) Seismic analysis and assessment of a skew highway bridge. *Engineering Structures*, **22**(11), 1433-1452.
18. Tahoni, S. (2013) *Bridge Design*. Tehran University Press, Tehran (in Persian).
19. Building and Housing Research Center (2008) *Iranian Seismic Design Code for Buildings (2014)-Standard*. Tehran (in Persian).

Analytical Study on Seismic Behavior of Multi-Span Concrete Girder-Slab Bridges with Link Slabs

Akbar Vasseghi^{1*} and Mehdi Pournadaf Haghi²

1. Associate Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: vasseghi@iiees.ac.ir
2. Senior Structural Engineer, Construction and Development of Transportation Infrastructures Company, Tehran, Iran

Multi-span concrete girder bridges with simple supports are the most common highway bridges in Iran. In these bridges, expansion joints are usually installed at each end of simple spans to provide for deck longitudinal movement due to temperature, shrinkage, and creep. The presence of expansion joints causes many problems with regard to bridge maintenance. These problems include filling of the joint with debris, vertical misalignment of the deck, and loss of concrete cover and corrosion of cap beam reinforcement caused by water leakage through the joint. These damages in many multi-span bridges of the country are mainly due to improper maintenance. Elimination of expansion joints at the interior bents has been the subject of recent studies. These studies have led to development of a design concept for jointless bridges. In this approach, the bridge girders are simply supported but the expansion joints are replaced by constructing continuous slabs over the interior bents. The continuous portion of the slab is called the "link slab" and its presence changes the dynamic characteristics and seismic behavior of the bridge. In this paper, the results of seismic analyses of four-span and seven-span concrete girder bridges with and without the link slabs are presented. The analytical study was performed by spectral analysis in both longitudinal and transverse directions of the bridges. Seismic behavior of the bridges was investigated by comparing seismic demands in bridge substructures for various configurations and layout of link slab and expansion joint. The results of this study show that link slabs significantly affect the seismic behavior of the bridges. The total length of the bridge and the arrangement of expansion joints and link slabs on the bridge deck are the dominating parameters affecting the seismic behavior of the bridge and the distribution of the base shear to the substructure elements.

Keywords: Bridge, Structure, Concrete, Earthquake, Link Slab.