

DOI: 10.48303/bese.2024.2035161.1188

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

امروزه اهمیت پل‌ها، با توجه به خدمت‌رسانی آنها در سیستم حمل‌ونقل شهری و بین‌شهری، کاملاً آشکار است و نامنظم بودن ساختار پل‌ها از دیدگاه هندسی، موجب بحرانی‌تر شدن عملکرد آنها حین رخداد زلزله می‌شود. محدودیت‌های محیطی نظیر توپوگرافی محل احداث از جمله مهم‌ترین مواردی هستند که طراحی پل‌ها و ساختار آنها را به سمت نامنظمی سوق می‌دهند. از میان عوامل متعدد نامنظمی، یکی از عوامل مهم، ارتفاع نابرابر ستون‌ها بوده و طول نابرابر دهانه‌ها نیز عامل دیگری می‌باشد که در این پژوهش، هر دو مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین، خوردگی کلرایدی از شایع‌ترین عوامل محیطی است که موجب زوال خصوصیات مصالح ستون‌ها شده و تشدید آسیب‌دیدگی پل‌های بتن مسلح تحت اثر زلزله را به دنبال دارد. در این پژوهش، یک پیکربندی هندسی منظم و شش پیکربندی نامنظم پل بتن مسلح با عرشه جعبه‌ای (۳ سلولی) و ۴ دهانه، در نرم‌افزار CSi Bridge طراحی شد. در ادامه رفتار غیرخطی ستون‌ها با انجام آنالیز چرخه‌ای صحت‌سنجی شده و تحلیل تاریخی زمانی غیرخطی با در نظر گرفتن درصدهای گوناگون خوردگی آرماتورها در نرم‌افزار OpenSees صورت گرفت. نتایج نشان‌دهنده آن است که افزایش درصد خوردگی، موجب افزایش دررفت ستون‌ها در هر دو راستای طولی و عرضی می‌گردد. همچنین در تمامی پل‌های نامنظم، حساسیت دررفت‌ها به درصد خوردگی بیشتر شده و دررفت‌ها با نرخ سریع‌تری افزایش می‌یابند. در پل‌های نامنظم با طول نابرابر دهانه‌ها، با گذر خوردگی از مقدار ۳۰ درصد، نرخ افزایش دررفت عرضی در تمامی این پل‌ها افزایش یافته که نسبت افزایش آن تا شش برابر نیز می‌باشد.

واژگان کلیدی: پل‌های بتن مسلح، خوردگی کلرایدی، نامنظمی در پل‌ها،

ارتفاع نابرابر ستون‌ها، طول نابرابر دهانه‌ها

ارزیابی عملکرد لرزه‌ای پل‌های بتن مسلح مستقیم دارای نامنظمی به دلیل ارتفاع نابرابر ستون‌ها و طول نابرابر دهانه‌ها تحت اثر خوردگی کلرایدی

سپهر نظری

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

پیام طهرانی (نویسنده مسئول)

استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، payam.tehrani@aut.ac.ir

۱- مقدمه

طول نابرابر دهانه‌ها می‌نماید. این موضوع، در آیین‌نامه‌های طراحی مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، ارتفاع نابرابر ستون‌های پل منجر به تمرکز شکل‌پذیری در ستون‌های کوتاه‌تر شده و آنها را مستعد آسیب‌دیدگی بیشتری طی زلزله می‌نماید. به بیان بهتر، رفتار لرزه‌ای پیچیده پل، با نامنظم شدن ساختار آن، پیچیده‌تر شده و نیاز به انجام تحلیل‌های دقیق‌تر و ضوابط کنترل‌کننده بیشتری دارد.

بدون شک یکی از مهم‌ترین ارکان شریان‌های ارتباطی، پل‌های بتن مسلح هستند و احداث پل‌ها در محیط‌های شهری و خصوصاً غیرشهری، با محدودیت‌های بسیاری همراه است. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به شرایط توپوگرافی منطقه مورد احداث در نواحی غیرشهری اشاره نمود. در بسیاری از موارد، محدودیت‌های اجرایی و یا اقتضای اقتصادی طرح‌ها، مهندسان را مجبور به طراحی و احداث پل‌هایی با ارتفاع نابرابر در ستون‌ها یا

لذا تاکنون پژوهش‌های بسیاری در حوزه نامنظمی پل‌ها انجام شده است تا درک صحیحی از رفتار حقیقی پل‌های نامنظم حاصل گردد (Afsar Dizaj et al., 2023; Kaleybar & Tehrani, 2021; Tehrani & Ghanbari, 2021). به‌طور کلی، آیین‌نامه‌های طراحی، ضوابطی را به‌منظور دسته‌بندی پل‌ها از نظر نامنظمی ارائه نموده‌اند که یکی از فاکتورهای اساسی در تعیین منظم بودن یا نامنظم بودن ساختار پل‌ها، نابرابری طول دهانه‌ها و نسبت طولی دو دهانه مجاور و یا غیر مجاور است. همچنین نسبت سختی ستون‌های مجاور یکی دیگر از مواردی است که به‌منظور سنجش نامنظمی پل‌ها، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شرایط محیطی از جمله عواملی است که بدون شک در احداث بسیاری از سازه‌ها، مؤثر واقع خواهد شد و آیین‌نامه‌های طراحی نیز تا حد امکان ضوابطی را به‌منظور اعمال اثرات مخرب شرایط محیطی، در نظر گرفته‌اند. با این وجود، با توجه به تعدد پیکربندی‌های پل و همچنین تنوع شرایط محیطی حاکم بر ساختگاه، امکان در نظرگیری تمامی شرایط برای آیین‌نامه‌ها مقدور نیست. یکی از این موارد، خوردگی کلرایدی ناشی از تجمع و نفوذ یون‌های کلراید می‌باشد که امری شایع در زوال عملکرد المان‌های بتن مسلح است. تجمع یون‌های کلراید و بیشتر شدن آنها از مقدار غلظت بحرانی، می‌تواند موجب ایجاد زوال‌های مکانیکی در اعضای بتن مسلح گردد. خوردگی کلرایدی در دو فاز آغاز و انتشار که هر دو وابسته به زمان هستند؛ بسیاری از خواص مکانیکی المان‌های بتن مسلح را تحت تأثیر مخرب خود قرار داده و منجر به کاهش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری المان‌های بتن مسلح می‌گردد. با توجه به اینکه ستون‌های پل، اعضای باربر بوده و حیاتی‌ترین اعضای این دسته از سازه‌ها تلقی می‌شوند؛ کنترل اثرات خوردگی در گذر زمان و در طول عمر مفید پل، بسیار حائز اهمیت است. لذا در سالیان اخیر، مطالعات بسیاری پیرامون بررسی خوردگی کلرایدی صورت گرفته است که بسیاری از این پژوهش‌ها جنبه آزمایشگاهی دارند (Choe et al., 2009; Cui et al., 2018; Dizaj et al., 2018; Seify Asghshahr & Rahai, 2018).

برسی رفتار سازه‌ای استفاده نمودند. نتایج پژوهش آنها نشان داد خوردگی یکنواخت در درصدهای بالا، اثراتی چشمگیر و کاهنده بر مقاومت خمشی پایه‌های پل دارد. ایشان از بررسی اثرات برشی بحرانی صرف‌نظر نمودند.

سیفی و رهایی (Seify Asghshahr & Rahai, 2018) در پژوهش خود به تحلیل بارافزون و بررسی اثرات ناشی از خوردگی در پل‌های بتن مسلح و در مناطق جنوبی ایران پرداختند و ابتدا با محاسبه زمان شروع خوردگی، سطح خوردگی آرماتورهای طولی و عرضی را در گذر زمان به دست آوردند. با در نظر گرفتن ضریب نرم‌شوندگی برای زوال خواص بتن پوشش و همچنین در نظر گرفتن طول پیوستگی معادل، لغزش آرماتورهای طولی توسط ایشان مدل‌سازی شد و نتایج به‌دست آمده از پژوهش ایشان نشان داد لنگر مؤثر جاری‌شدگی، لنگر نهایی، ظرفیت دوران پلاستیک و همچنین شکل‌پذیری انحنایی ستون‌های پل، افت قابل توجهی را در بستر زمان تجربه می‌کند. همچنین ایشان افزایش ۱۲/۵ درصدی برش پایه را در سنین بالای پل پس از احداث و در خوردگی متناظر با زمان ۴۰ سال مشاهده کردند. سلیک و همکاران (Celik et al., 2022) به بررسی سطوح عملکرد لرزه‌ای ستون‌ها تحت اثر خوردگی کلرایدی پرداختند.

هدف از این پژوهش پیش‌بینی سطوح عملکرد لرزه‌ای ستون‌ها به‌عنوان تابعی از عرض ترک‌های ایجاد شده در آغاز فرآیند خوردگی بود.

بدین منظور عرض ترک‌های مذکور اندازه‌گیری شده و نمونه‌ها تحت ترکیب بارگذاری محوری ثابت و جابه‌جایی جانبی دوره‌ای (متناوب) قرار گرفته‌اند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد با افزایش سطح خوردگی، ظرفیت تسلیم و گسیختگی نمونه‌ها دچار کاهش چشمگیری می‌گردد. در پژوهش ایشان، رابطه به‌دست آمده میان نسبت دریافت و ظرفیت استهلاک انرژی ضمن اعتبار خود، بیانگر این موضوع است که استفاده از معیار انرژی، جایگزین مناسبی برای معیارهای وابسته به جابه‌جایی بوده و این موضوع در تعیین شکل‌پذیری نیز تأثیر قابل توجهی دارد.

پل‌های نامنظم فاقد کفایت لازم است. اکبری (Akbari, 2012) در پژوهشی ۱۸ پل بتن مسلح با پیکربندی منظم و نامنظم را با استفاده از منحنی‌های شکنندگی بررسی نمود و در بررسی پل‌ها، شاخص نامنظمی را نابرابری ارتفاع ستون‌ها در نظر گرفت. پیکربندی کلی پل‌ها در پژوهش وی شامل پل‌هایی ۴ دهانه با عرشه ۲۰۰ متری بود که در قاب‌های عرضی، دارای یک ستون بودند. پژوهش مذکور دو هدف اساسی داشت. این اهداف، بررسی تقاضای شکل‌پذیری جابه‌جایی در ستون‌ها در برابر دو عامل شدت زلزله و منظمی پل عنوان شده است. نتایج به‌دست آمده و تفسیر منحنی‌های شکنندگی برای پل‌های نامنظم حاکی از کاهش احتمال خرابی پل با افزایش نسبت فولاد تقویتی ستون کوتاه‌تر و یا کاهش نسبت فولاد تقویتی ستون بلندتر است. افسر دیزج و کاشانی (Afsar Dizaj & Kashani, 2020) در پژوهش خود به بررسی اثرات خوردگی و شکل مقطع پایه‌های پل بر عملکرد لرزه‌ای در نرم‌افزار OpenSees پرداختند. ایشان به‌منظور ارزیابی آسیب‌های وارده ناشی از خوردگی از شاخص آسیب‌دیدگی ارائه شده توسط مرگوس و کاپوس (Mergos & Kappos, 2013) استفاده نمودند و کارایی و کفایت شاخص مورد بررسی را ارزیابی کردند. مقادیر خوردگی در نظر گرفته شده توسط ایشان، در سه دسته ملایم، متوسط و شدید و به ترتیب برابر با ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی و آنالیز دینامیکی افزاینده در پژوهش ایشان نشان داد در سطوح خوردگی شدید، شکل‌پذیری ستون‌ها دچار تغییراتی چشمگیر شده و پکیدگی بتن پوشش پیش از تسلیم آرماتورهای طولی به وقوع پیوسته است. همچنین ستون‌های دایره‌ای رفتار شکل‌پذیرتری نسبت به ستون‌های مستطیلی از خود نشان می‌دهند.

لی و همکاران (Li et al., 2020) در پژوهش خود به بررسی اثرات خوردگی بر پل‌های بتن مسلح در سنین بالا پس از احداث پرداختند. ایشان جهت مدل‌سازی خوردگی، سناریوهای خوردگی یکنواخت و حفره‌ای را لحاظ کرده و از آنالیزهای لنگر-انحنا و تاریخچه‌زمانی غیرخطی به‌منظور ارزیابی مدل‌ها و

همچنین افزایش درصد خوردگی باعث رشد غیرخطی عرض ترک در نمونه‌ها می‌گردد. ژو و همکاران (Xu et al., 2020) در پژوهش خود اقدام به انجام آنالیز شکنندگی لرزه‌ای نموده و یک مدل رفتاری برای ستون‌های با برش بحرانی ارائه کردند. همچنین اندرکنش خمش-برش را نیز به‌طور کامل مدنظر قرار دادند. ایشان ابتدا پارامترهای مؤثر در زمان شروع خوردگی را تعیین نموده و در ادامه در درصد‌های خوردگی گوناگون، نتایج مدل‌سازی خود را با نمونه‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. مقایسه نتایج ایشان یک بار به ازای مدل‌سازی لغزش آرماتورها و بار دیگر با صرف‌نظر از این پدیده صورت گرفت. همچنین ایشان در مدل‌سازی و تحلیل‌های چرخه‌ای خود، مقایسه‌ای میان مدل‌های صرفاً خمشی و مدل‌های شامل اندرکنش خمش-برش انجام دادند. نتایج تحلیل دینامیکی افزایشنده نشان داد مدل رفتاری ارائه‌شده و مورد بررسی توسط آنها، توانایی پیش‌بینی دقیق‌تری از رفتار ستون‌های بتن آرمه با خرابی برشی نسبت به مدل رفتاری خمشی ارائه می‌کند و نتایج به رفتار حقیقی ستون‌های بتن مسلح خورده شده، نزدیک‌تر است.

با توجه به اهمیت پل‌ها در سیستم حمل‌ونقل ترافیکی و همچنین توجه به این موضوع که عمده پل‌های بتن مسلح، شرایط نامنظمی ارائه شده در آیین‌نامه‌های طراحی را ارضا می‌نمایند؛ بررسی اثرات نابرابری ارتفاع ستون‌ها و طول دهانه‌ها به‌صورت مجزا در کنار خوردگی کلرایدی، بر عملکرد لرزه‌ای این دسته از سازه‌ها امری ضروری است. همچنین با مرور پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه مذکور مشخص می‌گردد تاکنون توجه محققان و مهندسان سازه و زلزله، به‌صورت مستقیم و ویژه‌ای، به ارزیابی اثرات خوردگی بر رفتار لرزه‌ای پل‌های بتن مسلح نامنظم

۲- مفاهیم اولیه

۲-۱- نامنظمی پل‌ها

نامنظمی پل‌ها بر مبنای ضوابط آیین‌نامه‌ای تعیین می‌گردد و بیانگر پیچیدگی رفتار لرزه‌ای پل نسبت به پل‌هایی با ساختار منظم است. به بیان بهتر، نامنظمی پل‌ها تابعی از تعداد دهانه‌های پل و نحوه توزیع جرم و سختی در سیستم سازه‌ای آن است. نامنظمی پل‌ها در موارد متعدد و مختلفی نظیر وجود قوس در پلان، نابرابری طول دهانه‌ها، وجود زاویه بیه (Skew) و نابرابری سختی ستون‌ها بروز می‌یابد. همان‌طور که گفته شد؛ یکی از موارد ایجاد نامنظمی در پل‌ها، نابرابری ارتفاع ستون‌ها بوده و مورد دیگر، نابرابری طول دهانه‌هاست (Kaleybar & Tehrani, 2021; Tehrani & Ghanbari, 2021). به‌طور کلی، ضوابط ارائه شده توسط آیین‌نامه ASHTO برای منظم بودن پل‌ها به شرح جدول (۱) می‌باشد.

جدول (۱): ضوابط نامنظمی پل‌ها در آیین‌نامه ASHTO.

مقدار عددی					پارامتر
۶	۵	۴	۳	۲	تعداد دهانه‌ها
۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	حداکثر زاویه قوس برای پل قوسی
۱/۵	۱/۵	۲	۲	۳	حداکثر نسبت طول دهانه‌ها
۲	۳	۴	۴	-	حداکثر نسبت سختی ستون‌ها/قاب‌ها

۲-۲- خوردگی کلرایدی

خوردگی کلرایدی فرآیندی رایج در محیط‌های نزدیک به دریا یا خاک‌های حاوی یون کلراید است و موجب زوال مقاومت و سایر مشخصه‌های فولاد می‌شود. این زوال در فرآیندی افزایشی، موجب افت کمی خواص مکانیکی بتن نیز می‌گردد و موجب تخریب و ضعف‌های عملکردی در ستون‌های پل‌های بتن آرمه خواهد شد. زوال مقاومت محصورشدگی بتن هسته یکی از مهم‌ترین اثرات مخرب خوردگی کلرایدی آرماتورها می‌باشد (Xu et al., 2020). پیرامون خوردگی کلرایدی و نحوه کمی‌سازی و مدل‌سازی آن در بخش (۳-۴) توضیحات تفصیلی ارائه گردیده است.

فرض شده و لذا نیازی به استفاده از ضرایب کاهش سختی ندارد (Burton et al., 2018; Heydarpour & Tehrani, 2022).

شکل (۱) به صورت شماتیک، پیکربندی پل‌ها و مقطع عرضی عرشه را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است ضخامت بال و جان عرشه برابر با ۲۰ سانتی‌متر است.

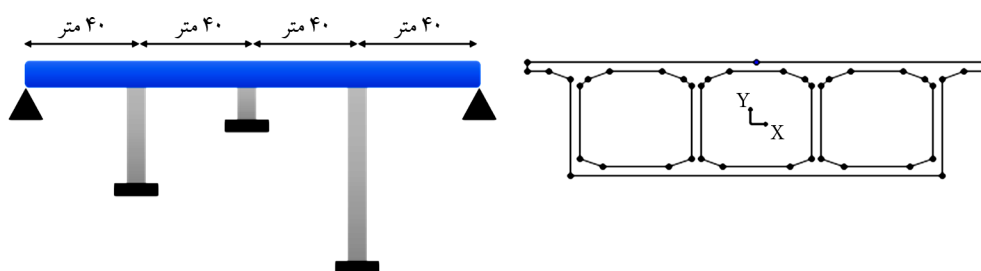
در رابطه با مشخصات کلی ستون‌ها لازم به ذکر است که تمامی ستون‌ها در تمام مدل‌ها، قطری برابر با ۲/۵ متر داشته و تنها تفاوت مقطع ستون‌ها، درصد آرماتور طولی آنهاست. تیپ‌بندی مقاطع ستون‌ها در جدول (۲) و تیپ‌بندی ستون‌ها در هر یک از پیکربندی‌ها در جدول (۳) قابل مشاهده است.

۳- روش تحقیق

در این پژوهش، به منظور ارزیابی رفتار لرزه‌ای پل‌های بتن مسلح ضمن در نظرگیری اثرات خوردگی یکنواخت کلرایدی، چهار پیکربندی با طول عرشه یکسان و برابر با ۱۶۰ متر از نوع جعبه‌ای با عرض ۹/۶ متر و عمق ۲/۴ متر در نظر گرفته شده است. همچنین سه پیکربندی با طول نابرابر دهانه‌ها و ستون‌هایی با ارتفاع ۱۴ متر طراحی شده است. سیستم عرشه از نوع پیش‌تنیده

۳-۱- مشخصات پل‌ها و طراحی اولیه

همان‌طور که در شکل (۱) قابل مشاهده است؛ عرشه پل‌های مورد بررسی، بتنی بوده و مقطع آن از نوع جعبه‌ای و سه سلولی است. ممان اینرسی عرشه به گونه‌ای در نظر گرفته شده است تا اثرات پیچش در پل‌ها ایجاد نشود. لکن در صورت وجود خوردگی کلرایدی و ضعف ستون‌ها، این امکان وجود دارد تا مودهای پیچشی سازه اثراتی محسوس بر عملکرد لرزه‌ای داشته باشند.

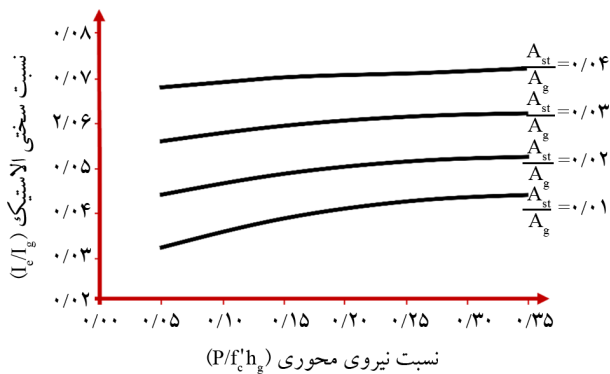


شکل (۱): شکل شماتیک عرشه و پیکربندی هندسی پل‌های مورد بررسی.

جدول (۲): تیپ‌بندی و مشخصات مقاطع ستون‌ها.

تیپ	تعداد	درصد آرماتور طولی	قطر آرماتور طولی (میلی متر)	درصد آرماتور عرضی	قطر آرماتور عرضی (میلی متر)	فاصله آرماتورهای عرضی (میلی متر)
۱	۶۲	۱/۰۲				
۲	۷۰	۱/۱۵	۳۲	۰/۵۱۳۱	۱۴	۵
۳	۱۵۰	۲/۴۶				
۴	۱۵۵	۲/۵۴				

دارند. (AASHTO, 2011) همچنین در فرآیند طراحی پل‌ها از ضرایب ترک خوردگی استفاده شده است. ضرایب ترک خوردگی از دو روش قابل دستیابی هستند که روش ساده‌تر، استفاده از ضرایب ترک خوردگی محاسبه شده توسط نرم افزار CSI Bridge بوده و روش دیگر استفاده از نمودارهای ارائه شده در این رابطه است (AASHTO, 2011). شکل (۲) نمودارهای مربوطه را نشان می‌دهد. در این پژوهش، از هر دو روش استفاده شده و مقادیر به دست آمده مقایسه شدند. لازم به ذکر است که ضرایب ترک خوردگی مذکور مطابقت بالایی داشته و صحت طراحی اولیه را تأیید نمودند.



شکل (۲): ضرایب ترک خوردگی (AASHTO, 2011).

جدول (۳): تیب بندی ستون‌های هر یک از پل‌های مورد بررسی.

شماره پل	ستون چپ	ستون میانی	ستون راست
۱	۱	۱	۱
۲	۳	۱	۱
۳	۴	۱	۱
۴	۱	۴	۱
۵	۲	۱	۲
۶	۳	۱	۳
۷	۱	۳	۱

جدول (۴): مشخصات عرشه پل‌ها.

ممان اینرسی در راستای عرضی	ممان اینرسی در راستای قائم	مساحت مقطع عرشه (مترمربع)	طول دهانه‌ها در تمامی پل‌ها (متر)
۳۹/۸۳	۵/۲۷	۵/۷۶	۳۰

مشخصات عرشه، مصالح فولاد و بتن به ترتیب در جداول (۴) و (۵) قابل مشاهده است و اطلاعات مربوط به پیکربندی پل‌ها، در جدول (۶) موجود است. پل‌های مذکور ابتدا در نرم افزار تجاری CSI Bridge مطابق با ضوابط آیین‌نامه‌ای (از دو دیدگاه نیرویی و تغییر مکانی و بدون در نظر گرفتن خوردگی کلرایدی)، طراحی شده و تمامی ستون‌ها قطری برابر با ۲/۵ متر

جدول (۵): مشخصات مصالح فولاد و بتن.

مقاومت فشاری (کیلو نیوتن / متر مربع)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	وزن واحد حجم (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	کرنش در تنش حداکثر	کرنش حداکثر
۴۵۰۰۰	۰/۲	۲۳/۸۷	۲۳/۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵
۴۲۰۰۰۰	۰/۳	۲۰۰	۷۸/۵	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۹

جدول (۶): مشخصات هندسی پل‌های مورد بررسی.

شماره پل	دهانه اول (متر)	دهانه دوم (متر)	دهانه سوم (متر)	دهانه چهارم (متر)	ستون چپ (متر)	ستون میانی (متر)	ستون راست (متر)
۱	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۱۴	۱۴	۱۴
۲	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۷	۱۴	۲۱
۳	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۷	۲۱	۱۴
۴	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۱۴	۷	۲۱
۵	۶۰	۲۰	۶۰	۲۰	۱۴	۱۴	۱۴
۶	۶۰	۲۰	۲۰	۶۰	۱۴	۱۴	۱۴
۷	۲۰	۶۰	۶۰	۲۰	۱۴	۱۴	۱۴

۳-۲- صحت‌سنجی رفتار خطی ستون‌ها

به منظور صحت‌سنجی طراحی‌های صورت گرفته، نتایج آنالیزهای مودال و ثقلی (عکس‌العمل پای ستون‌ها) به دست آمده از دو نرم‌افزار CSI Bridge و OpenSees مقایسه شده، درصد خطا محاسبه گردید و صحت طراحی‌ها تأیید شد. این روش، یکی از بهترین روش‌های مقایسه نتایج طراحی و تحلیل در دو نرم‌افزار CSI Bridge و OpenSees می‌باشد (Kaleybar & Tehrani, 2021). جدول (۷) نشان‌دهنده خطای مربوط به آنالیز مودال پل‌ها به صورت خلاصه بوده و نتایج مربوط به آنالیز ثقلی نیز برای چهار پل اول، به طور خلاصه در جدول (۸) نشان داده شده است.

مطابق با توصیه راهنمای لرزه‌ای ASHTO (ASHTO, 2011)، طراحی اولیه پل‌ها در نرم‌افزار CSI Bridge با فرض مقید نبودن کوله‌ها در دو جهت طولی و عرضی صورت گرفته است. لازم به ذکر است به منظور طراحی پل‌ها از راهنمای لرزه‌ای ASHTO استفاده شده و محل احداث تمامی پیکربندی‌ها، شهر لس‌آنجلس است.

گروه لرزه‌ای این ناحیه، از نوع D بوده و خاک محل از نوع C است (ASHTO, 2011). همچنین از نقشه‌های خطرپذیری لرزه‌ای USGS/AASHTO با احتمال تجاوز ۷ درصد در ۷۵ سال، استفاده شده است.

جدول (۷): نتایج آنالیز مودال و صحت‌سنجی رفتار خطی ستون‌ها.

شماره پل	نرم‌افزار	مود اول	مود دوم	مود سوم	مود چهارم	مود پنجم
۱	CSI Bridge	۱/۶۸۷	۱/۲۳۶	۱/۲۰۹	۰/۴۴۱	۰/۱۷۸
	OpenSees	۱/۷۰۲	۱/۲۵۵	۱/۲۳۲	۰/۴۴۴	۰/۱۷۳
	خطا (درصد)	۰/۸۵	۱/۵۱	۱/۸۶	۰/۸۷	۲/۹۰
۲	CSI Bridge	۲/۱۹۹	۰/۵۴۸	۰/۴۸۸	۰/۴۱۹	۰/۱۷۸
	OpenSees	۲/۲۴۹	۰/۵۵۱	۰/۴۸۳	۰/۴۱۹	۰/۱۷۳
	خطا (درصد)	۲/۲۱	۰/۵۸	۱/۰۷	۰/۱۲	۲/۹۲
۳	CSI Bridge	۱/۵۳۹	۰/۵۴۱	۰/۴۸۶	۰/۴۳۳	۰/۱۷۸
	OpenSees	۱/۵۶۱	۰/۵۴۴	۰/۴۸۲	۰/۴۳۵	۰/۱۷۳
	خطا (درصد)	۱/۴۱	۰/۵۲	۰/۸۲	۰/۵۹	۲/۹۲
۴	CSI Bridge	۲/۱۴۴	۰/۸۰۶	۰/۵۴۲	۰/۳۱۰	۰/۱۷۸
	OpenSees	۲/۱۷۴	۰/۸۰۹	۰/۵۴۵	۰/۳۰۴	۰/۱۷۶
	خطا (درصد)	۱/۳۸	۰/۳۹	۰/۵۱	۲/۱۵	۱/۴۳

جدول (۸): نتایج آنالیز ثقلی و واکنش ثقلی پای ستون‌ها (برحسب کیلونیوتن).

شماره پل	نرم‌افزار	ستون چپ	ستون میانی	ستون راست
۱	CSI Bridge	۶۹۷۱/۵۴	۶۰۵۸/۲۷	۶۹۷۱/۵۴
	OpenSees	۶۹۵۷/۱۹	۶۰۱۶/۰۲	۶۹۵۷/۱۹
	خطا (درصد)	۰/۲۱	۰/۷۰	۰/۲۱
۲	CSI Bridge	۶۱۷۰/۴۹	۶۰۶۰/۲۰	۷۷۶۹/۷۶
	OpenSees	۶۱۵۶/۳۱	۶۰۱۸/۰۳	۷۷۵۵/۱۶
	خطا (درصد)	۰/۲۳	۰/۷۰	۰/۱۹
۳	CSI Bridge	۶۱۹۳/۵۰	۶۸۳۰/۰۸	۶۹۹۳/۷۴
	OpenSees	۶۱۷۹/۹۸	۶۷۸۶/۸۹	۶۹۸۰/۰۶
	خطا (درصد)	۰/۲۲	۰/۶۴	۰/۲۰

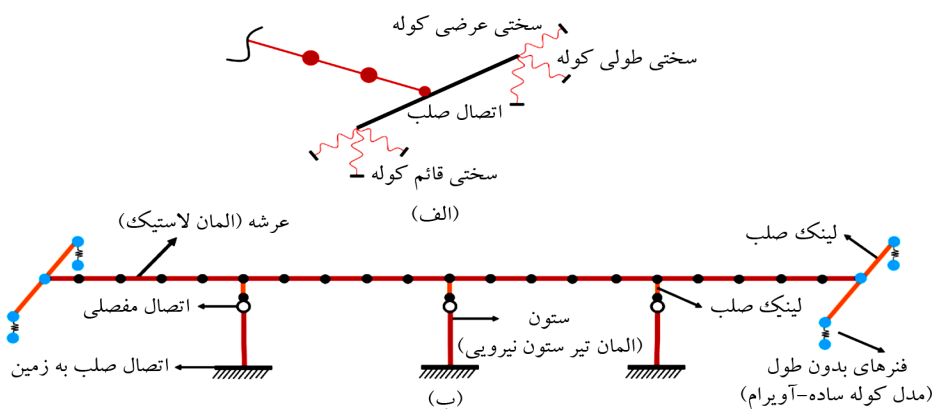
ادامه جدول (۸).

شماره پل	نرم افزار	ستون چپ	ستون میانی	ستون راست
	CSI Bridge	۶۹۵۰/۴۱	۵۲۸۵/۶۶	۷۷۴۹/۴۳
۴	OpenSees	۶۹۳۵/۴۴	۵۲۴۴/۴۴	۷۷۳۴/۲۰
	خطا (درصد)	۰/۲۲	۰/۷۹	۰/۲۰

قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد. لازم به ذکر است انتخاب نوع کوله با توجه به پروژه، خاک محل و اندازه پل، می‌تواند متفاوت باشد. مدل کوله ساده از جمله مدل‌هایی است که با در نظر گیری سختی خاک پشت کوله در راستاهای گوناگون و همچنین اثرات حضور دیوارهای پشتی و کناری کوله، رفتاری حقیقی و نزدیک‌تر به واقعیت را شبیه‌سازی می‌کند. مدل کوله ساده شامل المانی صلب با طولی برابر با عرض روسازه است که از طریق اتصال صلب به روسازه متصل می‌گردد. در ادامه با استفاده از ضوابط آیین‌نامه کلترنس (CALTRANS, 2020)، مقدار سختی و مقاومت خاک در راستای طولی و عرضی محاسبه می‌شود.

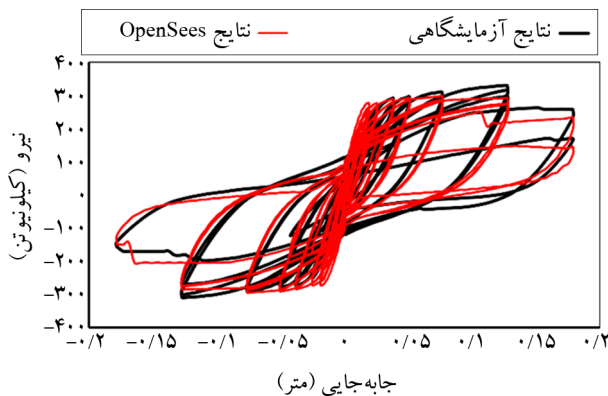
به منظور مدل‌سازی کوله در راستای طولی، یک المان گپ نیز تعریف می‌گردد تا سختی خاک در راستای طولی اصلاح شود. تعریف المان گپ در نرم‌افزار OpenSees با استفاده از المان‌های Elastic Perfectly Plastic GAP صورت گرفته است (Mazzoni et al., 2006). در نهایت سختی قائم کوله با تعریف یک فنر خطی با سختی برابر با سختی بالشتک تعریف گردیده و ابعاد آن به صورت مربعی به ضلع $۰/۵۰۸$ متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. پیرو توضیحات ارائه شده، از روابط (۱) تا (۵) به منظور طراحی کوله‌ها استفاده شده است.

همان‌طور که در جدول (۸) مشاهده می‌شود؛ مدل‌سازی پیکربندی‌ها در نرم‌افزار OpenSees با دقت کافی صورت گرفته و مقادیر خطای مشاهده شده، کمتر از ۱ درصد هستند. طراحی مدل‌ها در نرم‌افزار OpenSees با استفاده از تکنیک فایبر انجام گردیده و از المان‌های نیرویی (Force BeamColumn Element) استفاده شده است. همچنین از مصالح Concrete01 و Steel02 جهت مدل‌سازی رفتار بتن و فولاد استفاده شده و مصالح خستگی (Fatigue) جهت مدل‌سازی خستگی آرماتورهای طولی تحت سیکل‌های کم و افت مقاومت مربوط به آن به کار گرفته شده است. در رابطه با مدل‌سازی خستگی، روابط منسون و کو- استفن از اعتبار بالایی برخوردار هستند و در مقالات متعددی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. (Koh & Stephens, 1991; Manson, 1965). همچنین به منظور مدل‌سازی کوله‌ها، از مدل کوله ساده استفاده شده است. شکل (۳) ساختار کلی کوله‌ها و همچنین مدل اجزای محدود در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی پل‌ها در پژوهش جاری را نشان می‌دهد (Aviram et al., 2008; Kaleybar & Tehrani, 2021). با توجه به اینکه بخش قابل توجهی از بارگذاری لرزه‌ای توسط کوله‌ها جذب و مستهلک می‌شود؛ مدل‌سازی کوله‌ها از بخش‌های مهم مدل‌سازی پل می‌باشد و رفتار لرزه‌ای پل را به طرز

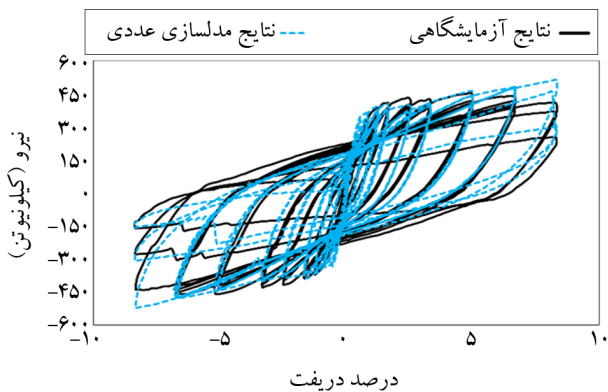


شکل (۳): (الف) مدل شماتیک کوله ساده (Aviram et al., 2008) و (ب) مدل اجزا محدود سازه در OpenSees.

IC3 که آزمایشگاهی بوده و نتایج تحلیل چرخه‌ای آن موجود است؛ انتخاب شدند (Berry et al., 2004). مشخصات ستون‌های مذکور، مشابه ستون‌های پل‌های مورد بررسی می‌باشد. نتایج رفتار چرخه‌ای ستون‌های آزمایشگاهی مذکور، پس از کالیبره شدن، در شکل‌های (۴) و (۵) قابل مشاهده است. جدول (۱۰) نشان‌دهنده مشخصات ستون‌های فوق‌الذکر است.



شکل (۴): نتایج آزمایشگاهی و عددی تحلیل چرخه‌ای و صحت‌سنجی رفتار غیرخطی ستون Henry415p.



شکل (۵): نتایج آزمایشگاهی و عددی تحلیل چرخه‌ای و صحت‌سنجی رفتار غیرخطی Sritharan IC3.

جدول (۱۰): مشخصات ستون‌های Henry415p و Sritharan IC3.

ستون Sritharan IC3	ستون Henry415p	
۳	۴	نسبت طول به بعد مقطع
۰/۰۴۳	۰/۱۲	نسبت نیروی محوری
خمشی	خمشی	نوع شکست
۱/۸ متر	۲/۴۳۸ متر	ارتفاع ستون
۰/۶ متر	۰/۶۰۹۵ متر	قطر ستون

لازم به ذکر است به منظور مدل‌سازی کوله‌ها در نرم‌افزار OpenSees از دستورات rigidLink Beam، equalDOF و zeroLength استفاده شد (Heydarpour & Tehrani, 2022; Mazzoni et al., 2006).

$$w_{bw} = d_w - 2d_d \quad (1)$$

$$w_{ww} = \frac{d_w}{3} \quad (2)$$

$$K_{abl} = K_s \times \frac{w_{bw}}{2} \times \frac{d_d}{1.7} \quad (3)$$

$$K_{eff} = \frac{P_{bwL}}{\Delta_{GAP} + \frac{P_{bwL}}{K_{abl}}} \quad (4)$$

$$K_{abT} = K_s \times \frac{w_{ww}}{2} \times \frac{d_d}{1.7} \times C_L \times C_w \quad (5)$$

که در روابط فوق d_w و d_d به ترتیب عرض و عمق روسازه، w_{bw} عرض دیوار پشتی، w_{ww} عرض دیوار کناری، K_s سختی خاک و K_{abl} و K_{abT} به ترتیب سختی خاک در راستای طولی و عرضی هستند. همچنین K_{eff} سختی مؤثر خاک در راستای طولی است؛ Δ_{GAP} برابر با طول المان گپ بوده و P_{bwL} مقاومت خاک در راستای طولی می‌باشد. پارامترهای C_L و C_w نیز به ترتیب ضریب تأثیر دیوار و ضریب مشارکت دیوار هستند که برابر با ۰/۶۶۷ و ۱/۳۳۴ می‌باشند.

جدول (۹) نشان‌دهنده مقادیر عددی مفروض در محاسبات مربوط به کوله‌ها می‌باشد.

جدول (۹): پارامترهای مفروض برای تعیین رفتار کوله‌ها و مقادیر عددی آنها.

پارامتر	نام پارامتر	مقدار عددی
d_w	عرض روسازه	۹/۶ متر
d_d	عمق روسازه	۲/۴ متر
K_s	سختی خاک در واحد طول	۱۱۵۰۰ کیلونیوتن بر متر
Δ_{GAP}	طول المان گپ	۰/۰۵۱ متر

۳-۳- صحت‌سنجی رفتار غیرخطی ستون‌ها

جهت صحت‌سنجی رفتار غیرخطی ستون‌ها از پایگاه داده PEER استفاده گردیده و ستون‌های Henry415p و Sritharan

۳-۴- مدل سازی خوردگی

مدل سازی خوردگی در ستون‌های بتن آرمه شامل بخش‌های اساسی زوال خواص مکانیکی بتن پوشش و هسته، زوال مشخصات فولاد و نیز خستگی آرماتورهای طولی می‌باشد. برای مدل سازی عددی و کمی سازی هر یک از موارد مذکور، روابط متنوعی در سالیان اخیر ارائه شده است. در این پژوهش از رایج‌ترین و معروف‌ترین روابط موجود استفاده شده است و در ادامه به بررسی جزئیات این موارد پرداخته می‌شود.

۳-۴-۱- درصد خوردگی

درصد خوردگی در قالب میزان جرم از دست رفته یا به عبارت بهتر، مساحت باقیمانده‌ی مقطع آرماتورهای طولی و عرضی طی فرآیند خوردگی تعریف می‌گردد (Kashani et al., 2013b) در این پژوهش، درصد خوردگی‌های در نظر گرفته شده از صفر الی ۵۰ درصد با گام‌های ۱۰ درصدی است.

۳-۴-۲- زوال خواص مکانیکی بتن پوشش

روابط متعددی برای شبیه‌سازی اثرات خوردگی بر زوال خواص مکانیکی بتن پوشش ارائه شده است. از معروف‌ترین روابط، می‌توان به رابطه (۶) اشاره نمود که با تعریف و استفاده از ضریب نرم‌شوندگی، زوال خواص مکانیکی بتن پوشش ستون‌ها را در قالب افت مقاومت فشاری منعکس می‌نماید. در این پژوهش از روابط (۱) الی (۴) به‌منظور شبیه‌سازی این اثرات بر مقاومت فشاری بتن پوشش استفاده شده است (Hsu & Mo, 2010; Xu et al., 2020).

$$f_{c,corr} = \xi f_{c0} \quad (6)$$

$$\xi = \frac{0.9}{\sqrt{1+600\varepsilon_{cr}}} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{cr} = \frac{\sum W_{cr}}{b_0} \quad (8)$$

$$W_{cr} = 2\pi(v_{cr} - 1)\Delta r_{corr} \quad (9)$$

که در روابط فوق، $f_{c,corr}$ مقاومت فشاری کاهش یافته پوشش بتنی، f_{c0} مقاومت اولیه پوشش بتنی، ξ ضریب نرم‌شوندگی، ε_{cr} کرنش کششی میانگین بتن ترک‌خورده، W_{cr} عرض ترک

ناشی از خوردگی هر آرماتور، b_0 قطر اولیه ستون، v_{cr} نسبت انبساط حجمی و Δr_{corr} تغییرات قطر آرماتور هستند.

۳-۴-۳- زوال خواص مکانیکی فولاد

خواص مکانیکی فولادهای طولی و عرضی در رفتار تنش-کرنش آنها منعکس گردیده و از مهم‌ترین و اولین اثرات خوردگی کلرایدی بر رفتار ستون‌های بتن مسلح، می‌توان به این مورد اشاره نمود. روابط (۱۰) تا (۱۳) نحوه محاسبه خصوصیات زوال‌یافته آرماتورها را نشان می‌دهند (Hsu & Mo, 2010; Xu et al., 2020).

$$f_{y,corr} = f_{y0}(1 - 0.005\Psi) \quad (10)$$

$$f_{u,corr} = f_{u0}(1 - 0.005\Psi) \quad (11)$$

$$f_{s,corr} = f_{s0}(1 - 0.01\Psi) \quad (12)$$

$$\varepsilon_{u,corr} = \varepsilon_{u0}(1 - 0.05\Psi) \quad (13)$$

که در این روابط، f_{y0} ، f_{u0} ، E_{s0} ، ε_{u0} به ترتیب مقاومت تسلیم، مقاومت نهایی، مدول الاستیسیته و کرنش نهایی در حالت بدون خوردگی، $f_{y,corr}$ ، $f_{u,corr}$ ، $E_{s,corr}$ ، $\varepsilon_{u,corr}$ به ترتیب، موارد فوق در حضور خوردگی و Ψ درصد خوردگی هستند.

۳-۴-۵- زوال خواص مکانیکی بتن هسته

به‌منظور تعیین مقاومت و کرنش نهایی بتن هسته، مطابق با مفهوم محصورشدگی، روابط گوناگونی معرفی شده است که معروف‌ترین آنها روابط مندر و کنت-پارک است (Mander et al., 1982; Scott et al., 1988). در این پژوهش از روابط مندر برای محاسبات مربوط به خواص مکانیکی بتن هسته در اثر محصورشدگی استفاده شده است. رابطه (۱۴)، رابطه اصلی مدل محصورشدگی مندر با در نظر گرفتن اثرات خوردگی است که ماهیت آن مشابه با رابطه اصلی ارائه شده در پژوهش مندر و پارک است اما مشخصات مصالح فولادی و بتنی، با در نظر گرفتن اثرات خوردگی، اعمال می‌گردد. جزئیات بیشتر در مراجع مذکور و همچنین تحقیقات کاشانی و همکاران (Afsar Dizaj & Kashani, 2022; Afsar Dizaj et al., 2018) قابل مشاهده هستند. در واقع مشخصات مکانیکی بتن هسته که نماینده

$$\varepsilon_p = \theta_f (2N_f)^{-\alpha} \quad (15)$$

$$\frac{\alpha_{\text{corr}}}{\alpha} = 1 + 0.004\Psi \quad (16)$$

که در روابط بالا ε_p ، $2N_f$ و Ψ به ترتیب دامنه کرنش پلاستیک، تعداد نیم‌چرخه‌ها، درصد خوردگی و همچنین θ_f ، α و α_{corr} ثابت‌هایی وابسته به مصالح مورد بررسی هستند. همچنین ضریب θ_f از پارامترهای ذاتی مصالح (فولاد) است و تحت اثر خوردگی دچار تغییر و زوال نمی‌گردد.

۳-۵- تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی

در این پژوهش از ۱۱ رکورد زلزله حوزه دور که فاصله گسل آنها بیش از ۱۰ کیلومتر است؛ استفاده شده که مشخصات آنها در جدول (۱۱) ذکر شده است. خاک منطقه از نوع خاک با چگالی بالا و سنگ خاک (نوع C) در نظر گرفته شده است. همچنین مقدار میرایی رایلی، برابر با ۵ درصد بوده و پس از غربال شتاب‌نگاشت‌ها از میان حدود ۵۰۰ شتاب‌نگاشت منتخب و موجود در سایت PEER، سعی شده است تا حداقل ضریب مقیاس برای هر زلزله به دست آید تا ماهیت اصلی زلزله از بین نرفته و نتایج قابل اعتمادتری به دست آید (AASHTO, 2011). لازم به ذکر است طی روند مقیاس شتاب‌نگاشت‌ها، با توجه به متفاوت بودن دوره تناوب پل‌ها، سعی شده است تا مقیاس به نحوی صورت پذیرد که میانگین ۱۱ شتاب‌نگاشت انتخابی،

رفتار محصورشدگی آن می‌باشند؛ تابعی از مشخصات مکانیکی آرماتورهای عرضی و میزان محصورشدگی هسته می‌باشند. اثرات خوردگی کلرایدی، ابتدا به آرماتورهای عرضی اعمال شده و سپس با استفاده از معادلات ارائه شده توسط مندر و همکاران (Mander et al., 1988)، اثرات خوردگی بر رفتار هسته بتنی، اعمال می‌گردد.

$$\varepsilon_{\text{cu,corr}} = 0.004 + 1.4 \left(\frac{\rho_{t,\text{corr}} f_{yt,\text{corr}} \varepsilon_{\text{cu,corr}}}{f_{cc,\text{corr}}} \right) \quad (14)$$

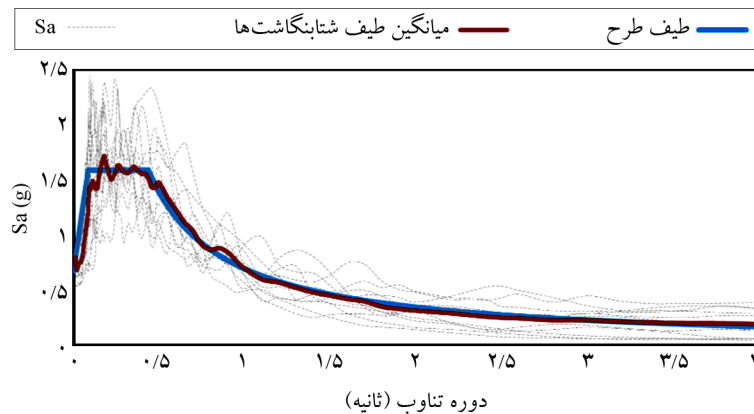
که در رابطه فوق، $\varepsilon_{\text{cu,corr}}$ ، $\rho_{t,\text{corr}}$ ، $f_{yt,\text{corr}}$ ، $f_{cc,\text{corr}}$ ، $\varepsilon_{\text{cu,corr}}$ به ترتیب کرنش فشاری نهایی، نسبت فولاد عرضی، مقاومت تسلیم آرماتور عرضی، کرنش نهایی آرماتور عرضی و مقاومت فشاری بتن محصور شده در حضور خوردگی هستند.

۳-۴-۶- خستگی آرماتورهای طولی

در این پژوهش، اثرات خستگی آرماتورهای طولی بر مبنای رابطه منسون (Manson, 1965) مدل‌سازی شده و از روابط ارائه شده در پژوهش کاشانی و همکاران (Kashani et al., 2013a) استفاده شده است. آنها با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی، روابطی ارزشمند برای شبیه‌سازی اثرات خستگی آرماتورهای طولی در حالت وجود خوردگی ارائه نمودند. روابط (۱۵) و (۱۶) نشان‌دهنده نحوه محاسبه پارامترهای مورد نیاز هستند. اطلاعات تکمیلی در مراجع مذکور، قابل دسترسی است.

جدول (۱۱): مشخصات رکوردهای زلزله.

شماره	نام زلزله	نام ایستگاه	بزرگا	فاصله از گسل	PGA
۱	Northridge-01	Arcadia - Arcadia Av	۶/۶۹	۳۹/۴۱	۰/۱۰۸
۲	Hector Mine	Amboy	۷/۱۳	۴۱/۸۱	۰/۲۱۱
۳	Imperial Valley-06	Calexico Fire Station	۶/۵۳	۱۰/۴۵	۰/۲۸۷
۴	Kobe_ Japan	Sakai	۶/۹	۲۸/۰۸	۰/۱۵۹
۵	Landers	Mission Creek Fault	۷/۲۸	۲۶/۸۶	۰/۱۴۷
۶	Loma Prieta	Coyote Lake Dam (Downst)	۶/۹۳	۲۰/۴۴	۰/۳۰۴
۷	Chi-Chi_ Taiwan-03	TCU075	۶/۲	۱۸/۴۷	۰/۲۵۰
۸	Cape Mendocino	Fortuna Fire Station	۷/۰۱	۱۶/۵۴	۰/۴۱۴
۹	San Fernando	LA - Hollywood Stor FF	۶/۶۱	۲۲/۷۷	۰/۲۵۸
۱۰	Superstition Hills-02	Brawley Airport	۶/۵۴	۱۷/۰۳	۰/۱۴۹
۱۱	Friuli_ Italy-01	Tolmezzo	۶/۵	۱۴/۹۷	۰/۳۹۶



شکل (۶): طیف طراحی و میانگین طیف شتابنگاشت‌های مقیاس شده.

به دست آمده برای پل‌های مورد بررسی بوده و حاکی از افزایش پیوسته دررفت ستون‌ها می‌باشد. شکل (۱۱) نشان می‌دهد در پل‌های منظم، با ارتفاع و سختی برابر ستون‌ها، حساسیت دررفت طولی و عرضی در ستون‌های کناری بیش از ستون میانی است در حالی که مقدار دررفت ستون میانی بیش از ستون‌های کناری است. همچنین، با عبور درصد خوردگی از ۳۰ درصد، رفتار لرزه‌ای پل دچار تغییرات چشمگیری می‌شود.

در شکل (۱۱) به مقایسه دررفت ستون‌های کوتاه پل‌ها پرداخته شده است که نمودارهای موجود، نشان‌دهنده نتایج به دست آمده هستند. همان‌طور مشاهده می‌شود؛ تغییرات دررفت در راستای عرضی، نرخ رشد بیشتری نسبت به راستای طولی داشته و افزایش خوردگی، این مسئله را به طرز چشمگیری تشدید نموده است. همچنین، بحرانی‌ترین پیکربندی، مربوط به پل شماره ۴ است که ستون کوتاه (۷ متری) در وسط قرار گرفته است. لازم به ذکر است؛ شرایط مرزی و همچنین نحوه مدل‌سازی کوله‌ها از پارامترهای بسیار مهمی است که رفتار لرزه‌ای پل‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در این پژوهش، از مدل کوله ساده استفاده گردید تا رفتار حقیقی پل‌ها تحت اثرات مخرب خوردگی کلرایدی و نامنظمی مشخص گردد.

شکل (۱۱) نشان می‌دهد در پل منظم شماره ۱، با افزایش ۳۰ درصدی خوردگی، دررفت عرضی به میزان تقریباً ۱۸ درصد، افزایش داشته است در حالی که این مقدار برای پل شماره ۲ با پیکربندی نامنظم، تقریباً برابر با ۲۵ درصد است.

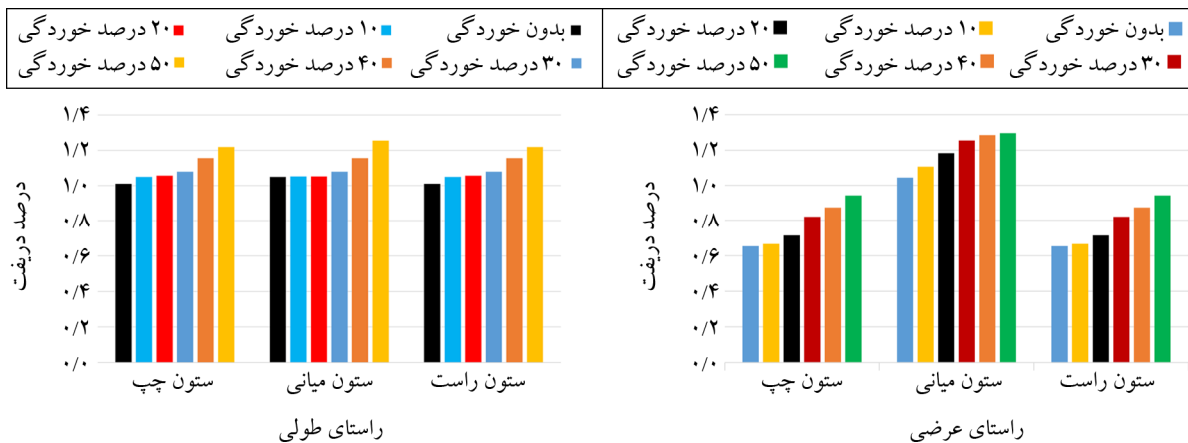
انطباق خوبی با طیف طرح در تمامی بازه‌های دوره تناوب داشته باشد. در واقع سعی شده است تا به جای انطباق موضعی شتاب‌نگاشت‌ها در ناحیه ۰/۲ تا ۲ برابر دوره تناوب، شتاب‌نگاشت‌ها در تمامی نقاط زمانی، با طیف طرح انطباق داشته باشند. شکل (۶) موضوع مذکور را به خوبی نشان می‌دهد.

۴- یافته‌ها

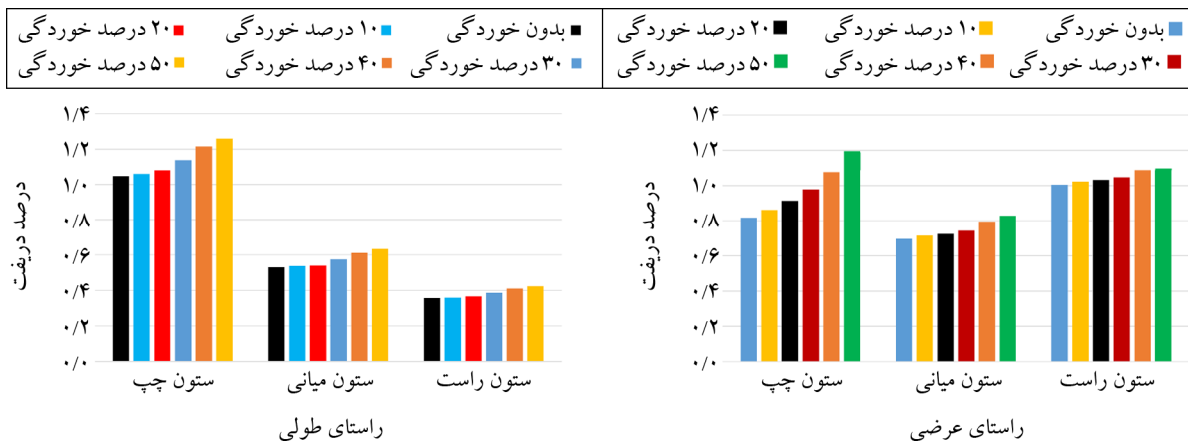
در این پژوهش، پس از صحت‌سنجی رفتار خطی و غیرخطی ستون‌ها به کمک آنالیزهای ثقلی، مودال و چرخه‌ای، با انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، تاریخچه دررفت تمامی ستون‌ها استخراج شد و میانگین حداکثر مطلق پاسخ‌ها در دو جهت طولی و عرضی گردآوری شد. سپس به مدل‌سازی اثرات خوردگی پرداخته شد و موارد مذکور در تمامی درصدهای خوردگی (۱۰ تا ۵۰ درصد) استخراج گردید. لازم به ذکر است عموماً مقدار خوردگی کلرایدی آرماتورهای طولی، به حداکثر ۳۰ درصد محدود می‌گردد؛ اما به جهت مقایسه بهتر نتایج و همچنین مشاهده روند اثرگذاری خوردگی بر پاسخ لرزه‌ای پل‌ها، درصدهای خوردگی ۴۰ و ۵۰ نیز در این پژوهش در نظر گرفته شده است. به منظور مقایسه و ارائه بهتر، نتایج به دست آمده در دو بخش ارائه گردیده است.

۴-۱- پل‌های نامنظم با نابرابری ارتفاع و سختی ستون‌ها

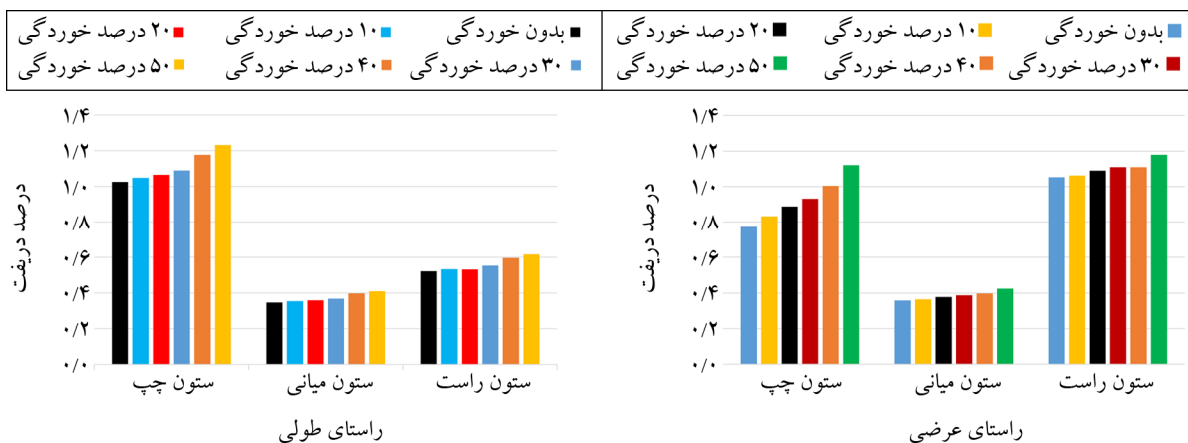
شکل‌های (۷) الی (۱۰) به ترتیب نشان‌دهنده نتایج



شکل (۷): روند تغییرات دریفیت عرضی و طولی در ستون‌های پل شماره ۱ با ساختار منظم در اثر افزایش درصد خوردگی.



شکل (۸): روند تغییرات دریفیت عرضی و طولی در ستون‌های پل شماره ۲ با ساختار نامنظم در اثر افزایش درصد خوردگی.



شکل (۹): روند تغییرات دریفیت عرضی و طولی در ستون‌های پل شماره ۳ با ساختار نامنظم در اثر افزایش درصد خوردگی.

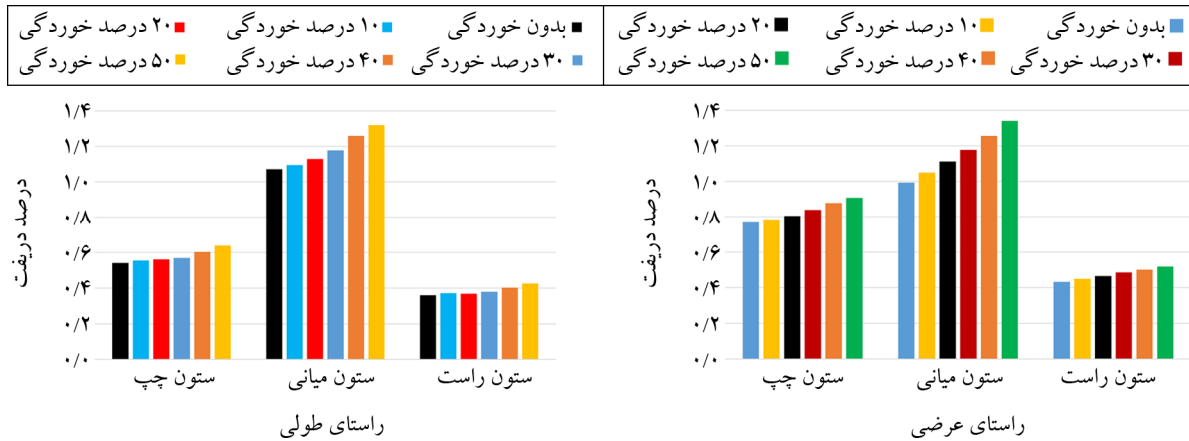
موجب افزایش دریفیت شده و همچنین فرآیند خوردگی تأثیر بسزایی در افزایش مقادیر دریفیت در هر دو راستا دارد. پس از عبور درصد خوردگی آماتورهای طولی از

۴-۲- پل‌های نامنظم با نابرابری طول دهانه‌ها

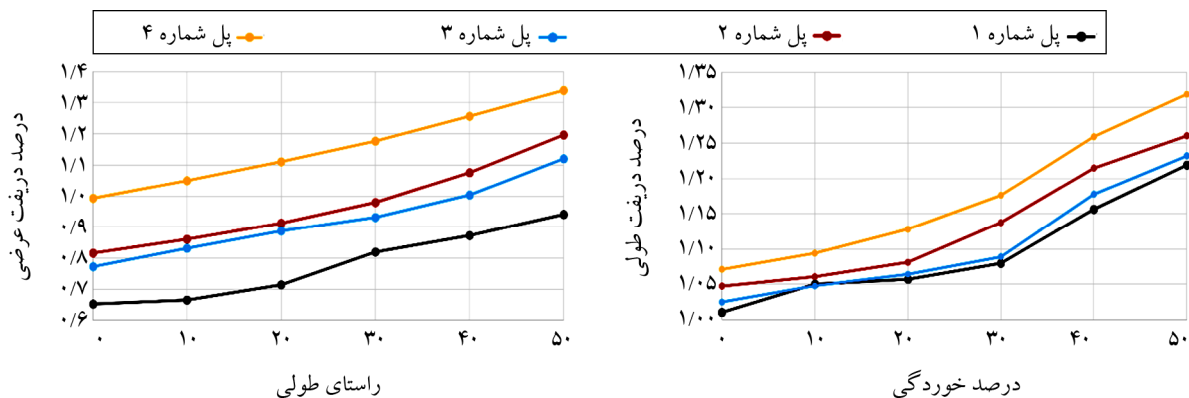
نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی پل‌های نامنظم با طول نابرابر دهانه‌ها نشان می‌دهد بروز نامنظمی در سیستم عرشه پل‌ها

به میزان ۸/۲ درصد افزایش می‌یابد. درحالی‌که با افزایش خوردگی از ۲۰ درصد به ۴۰ درصد، این مقدار به حدود ۱۰ درصد می‌رسد (شکل‌های ۱۲ تا ۱۴).

۳۰ درصد، خوردگی تأثیر بسیار بیشتری بر تغییر مکان حداکثر ستون‌ها می‌گذارد. به‌عنوان مثال، با افزایش خوردگی از صفر به ۲۰ درصد، دریفت طولی ستون میانی در پل منظم (پل شماره ۱،

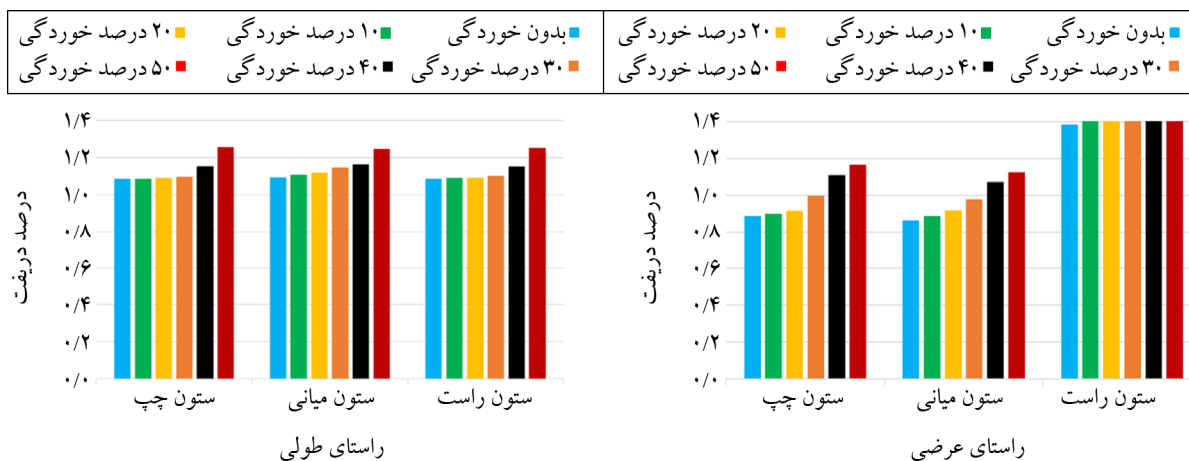


شکل (۱۰): روند تغییرات دریفت عرضی و طولی در ستون‌های پل شماره ۴ با ساختار نامنظم در اثر افزایش درصد خوردگی.

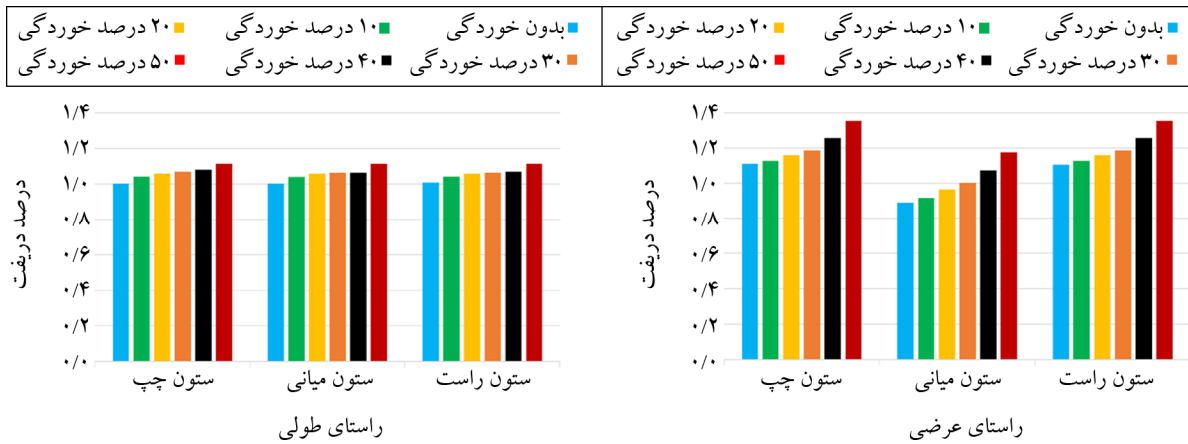


تغییرات درصد دریفت طولی ستون‌های کوتاه بر حسب درصد خوردگی تغییرات درصد دریفت عرضی ستون‌های کوتاه بر حسب درصد خوردگی

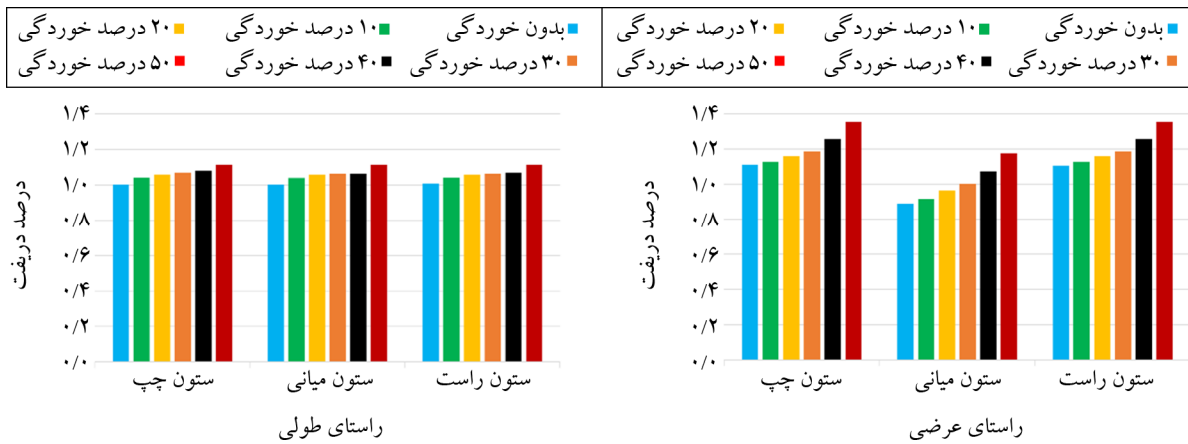
شکل (۱۱): تغییرات دریفت طولی و عرضی ستون‌های بحرانی پل‌های نامنظم در ارتفاع ستون‌ها با افزایش درصد خوردگی آرماتورها.



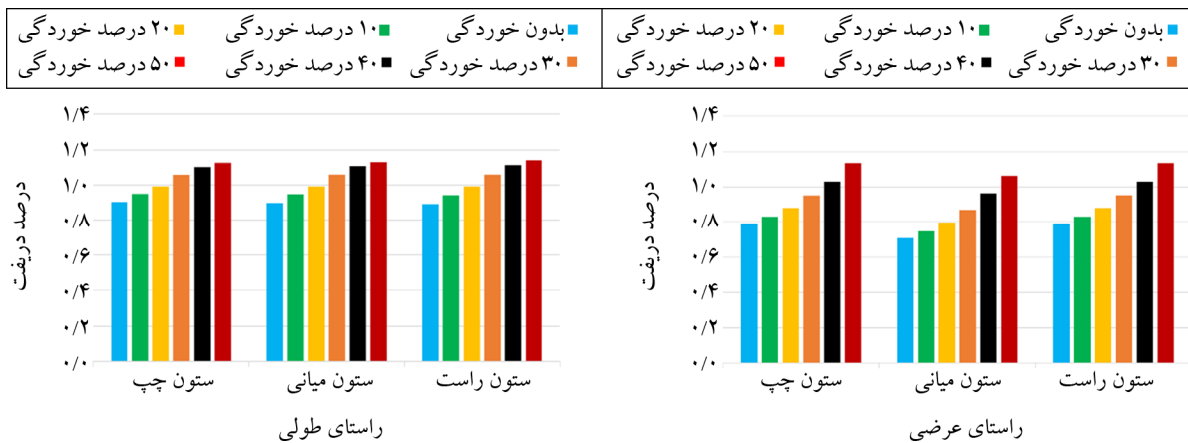
شکل (۱۲): روند تغییرات دریفت عرضی و طولی در ستون‌های پل شماره ۵ با ساختار نامنظم در اثر افزایش درصد خوردگی.



شکل (۱۳): روند تغییرات دررفت عرضی و طولی در ستون‌های پل شماره ۶ با ساختار نامنظم در اثر افزایش درصد خوردگی.



شکل (۱۴): روند تغییرات دررفت عرضی و طولی در ستون‌های پل شماره ۷ با ساختار نامنظم در اثر افزایش درصد خوردگی.



شکل (۱۵): میانگین دررفت طولی و عرضی ستون‌های بحرانی پل‌های نامنظم در طول دهانه‌ها بر حسب درصد خوردگی.

نمودارها با عبور درصد خوردگی از ۳۰ درصد است که سازه را بسیار مستعد آسیب دیدگی نشان می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود بحرانی‌ترین پیکربندی در هر دو راستای طولی و عرضی،

شکل (۱۵) نشان می‌دهد افزایش درصد خوردگی، تأثیر بسزایی در افزایش دررفت ستون‌ها در دو راستای طولی و عرضی دارد. یکی از نکات قابل توجه در این مورد، افزایش شیب

- آرایش قرارگیری ستون‌ها در پل‌های نامنظم در تمامی درصد‌های خوردگی، تأثیر بسزایی در رفتار لرزه‌ای دارد. بحرانی‌ترین پیکربندی، قرارگیری ستون کوتاه در میان دو ستون بلندتر است (پل شماره ۴). به‌عنوان مثال، تحت خوردگی ۲۰ درصد، حداکثر دررفت عرضی پل شماره ۴، $1/22$ برابر پل شماره ۲ بوده و این نسبت برای دررفت طولی برابر با $1/04$ می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد در مقایسه میان پل‌های نامنظم، آرایش قرارگیری ستون‌ها از اهمیت بالایی برخوردار بوده و با افزایش خوردگی، بر این اهمیت افزوده می‌شود.

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد در پل‌های گروه دوم که دارای دهانه‌هایی با طول نابرابر هستند:

- نرخ تغییرات دررفت در راستای طولی و عرضی، با عبور درصد خوردگی آرماتورهای طولی از ۳۰ درصد، شدت بیشتری می‌یابد که نرخ افزایش دررفت در راستای عرضی بعد از خوردگی ۳۰ درصد، تقریباً ۶ برابر این مقدار قبل از خوردگی ۳۰ درصد است.

- رفتار پل‌های شماره ۵ و ۶ با طول نابرابر دهانه‌ها در راستای طولی نشان داد علی‌رغم برابری ارتفاع ستون‌ها، جابه‌جایی ستون‌ها در برخی پیکربندی‌های نامنظم در عرشه، می‌تواند وابسته به پارامترهای دیگری نظیر میزان نامنظمی عرشه یا حاکم شدن مودهای پیچشی به دلیل افت مقاومت ستون‌ها باشد (پل شماره ۶ و ۷ در راستای طولی).

- مطابق با نتایج به‌دست آمده، بحرانی‌ترین رفتار در هر دو راستای طولی و عرضی، مربوط به ستون میانی پل شماره ۵ بوده و کاهش ۲۰ درصدی جرم آرماتورها، خستگی آرماتورهای طولی و تخریب بتن پوسته، موجب افزایش تقریباً ۱۰ درصدی دررفت عرضی در ستون بحرانی می‌گردد. پل شماره ۵ دارای نامنظمی در عرشه بوده و فاقد تقارن در طول دهانه‌های عرشه می‌باشد.

- وجود ساختار متقارن در پیکربندی پل‌های شماره ۶ و ۷ موجب کاهش مقادیر دررفت شده و اثرات مخرب

پل شماره ۵ است که در آن، دهانه‌های مجاور دارای طول نابرابر هستند. به بیان بهتر می‌توان گفت این پل ساختار نامنظم‌تری نسبت به پل‌های ۶ و ۷ دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، چهار پل بتن‌آرمه منظم و نامنظم با عرشه جعبه‌ای به طولی کلی ۱۶۰ متر در نرم‌افزارهای CSi Bridge و OpenSees طراحی شد؛ اثرات خوردگی شبیه‌سازی گردید و در ادامه با در نظرگیری درصد‌های متفاوت خوردگی، تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی انجام شد. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد در پل‌های گروه اول که دارای ستون‌هایی با ارتفاع نابرابر هستند:

- افزایش درصد خوردگی در تمامی پل‌ها موجب افزایش دررفت طولی و عرضی می‌گردد و با توجه به تک‌ستونه بودن پل‌ها، نرخ افزایش دررفت در راستای عرضی بیشتر از راستای طولی می‌باشد.

- در پل شماره ۱ با ساختار منظم، با افزایش ۳۰ درصدی خوردگی، دررفت عرضی به میزان تقریباً ۱۸ درصد، افزایش یافته است درحالی‌که این افزایش در پل شماره ۲ با پیکربندی نامنظم، تقریباً برابر با ۲۵ درصد می‌باشد. این مسئله نشان می‌دهد خوردگی کلرایدی در پل‌های نامنظم، شرایط بحرانی‌تری را نسبت به پل‌های منظم رقم می‌زند.

- در حالت بدون خوردگی، حداکثر دررفت عرضی ستون کوتاه پل (۴) تقریباً ۷ درصد بیشتر از حداکثر دررفت عرضی مشاهده شده در پل (۱) است. این اختلاف تحت اثر خوردگی ۳۰ درصدی آرماتورها به ۱۱ درصد می‌رسد.

- در میان پیکربندی‌های نامنظم، بحرانی‌ترین رفتار از دیدگاه تغییر مکانی، متعلق به پل شماره (۴) است که در پیکربندی آن، ستون کوتاه در وسط قرار گرفته است. افزایش ۲۰ درصدی خوردگی، موجب افزایش تقریباً ۲۲ درصدی دررفت در راستای عرضی و $9/5$ درصدی در راستای طولی می‌شود.

Aviram, A., Mackie, K. R., & Stojadinovic, B. (2008). Effect of abutment modeling on the seismic response of bridge structures. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 7, 395-402.

Berry, M., Parrish, M., & Eberhard, M. (2004). *PEER Structural Performance Database User's Manual (Version 1.0)*. University of California, Berkeley.

Burton, H. V., Doorandish, N., & Shokrabadi, M. (2018). Probabilistic evaluation of combination rules for seismic force demands from orthogonal ground motion components. *Engineering Structures*, 177, 234-243.

California Department of Transportation (CALTRANS). (2020). *Seismic Design Criteria*. CALTRANS.

Celik, A., Yalciner, H., Kumbasaroglu, A., & Turan, A. İ. (2022). An experimental study on seismic performance levels of highly corroded reinforced concrete columns. *Structural Concrete*, 23(1), 32-50.

Choe, D.-E., Gardoni, P., Rosowsky, D., & Haukaas, T. (2009). Seismic fragility estimates for reinforced concrete bridges subject to corrosion. *Structural Safety*, 31(4), 275-283.

Cui, F., Zhang, H., Ghosn, M., & Xu, Y. (2018). Seismic fragility analysis of deteriorating RC bridge substructures subject to marine chloride-induced corrosion. *Engineering Structures*, 155, 61-72.

Dizaj, E. A., Madandoust, R., & Kashani, M. M. (2018). Probabilistic seismic vulnerability analysis of corroded reinforced concrete frames including spatial variability of pitting corrosion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114, 97-112.

Dolati, A., Taghikhany, T., Khanmohammadi, M., & Rahai, A. (2015). Scenario-based seismic performance assessment of regular and irregular highway bridges under near-fault ground motions. *Earthquakes and Structures*, 8(3), 573-589.

Heydarpour, K., & Tehrani, P. (2022). Influence of abutment stiffness and strength on the seismic response of horizontally curved RC bridges in comparison with equivalent straight bridges at different seismic intensity levels. *Shock and Vibration*, Article 3532331.

Hsu, T. T., & Mo, Y.-L. (2010). *Unified Theory of Concrete Structures*. John Wiley & Sons.

Kaleybar, R. S., & Tehrani, P. (2021). Investigating

خوردگی و نامنظمی عرشه را تا حدودی کاهش داده است. همچنین در پل‌های ۶ و ۷ برخلاف ساختار نامنظم، حداقل دو دهانه مجاور، دارای طول برابر هستند که این موضوع از

اثرگذاری خوردگی و شدت افزایش دررفت‌ها کاسته است.

– بررسی مؤلفه‌های قائم زلزله، خوردگی عرشه و همچنین

ارزیابی دقیق‌تر اثرات ناشی از پیچش می‌تواند موضوعات مناسبی برای ادامه مطالعات و پژوهش‌های آتی در حوزه

نامنظمی پل‌ها و خوردگی کلرایدی باشد.

References

مراجع

AASHTO. (2011). *AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

Afsar Dizaj, E., & Kashani, M. M. (2020). Numerical investigation of the influence of cross-sectional shape and corrosion damage on failure mechanisms of RC bridge piers under earthquake loading. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(10), 4939-4961.

Afsar Dizaj, E., & Kashani, M. M. (2022). Nonlinear structural performance and seismic fragility of corroded reinforced concrete structures: Modelling guidelines. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(11), 5374-5403.

Afsar Dizaj, E., Madandoust, R., & Kashani, M. M. (2018). Exploring the impact of chloride-induced corrosion on seismic damage limit states and residual capacity of reinforced concrete structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(6), 714-729.

Afsar Dizaj, E., Salami, M. R., & Kashani, M. M. (2023). Impact of asymmetrical corrosion of piers on seismic fragility of ageing irregular concrete bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, 1-20.

Akbari, R. (2012). Seismic fragility analysis of reinforced concrete continuous span bridges with irregular configuration. *Structure and Infrastructure Engineering*, 8(9), 873-889.

Akbari, R., & Maalek, S. (2010). Adequacy of the seismic analysis methods for single-column-bent viaducts considering regularity and higher modes effects. *Journal of Vibration and Control*, 16(6), 827-852.

- Sajed, M., & Tehrani, P. (2020). Effects of column and superstructure irregularity on the seismic response of four-span RC bridges. *Structures*, 28, 1400-1412.
- Scott, B. D., Park, R., & Priestley, M. J. N. (1982). Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates. *Journal of the American Concrete Institute*, 79(1), 13-27.
- Seify Asghshahr, M., & Rahai, A. (2018). Pushover analysis of reinforced concrete bridges under chloride-induced corrosion. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(1), 73-88.
- Tehrani, P., & Ghanbari, R. (2021). Investigating different methods for application of earthquake records in seismic evaluation of irregular RC bridges considering incident angles. *Structures*, 34, 1234-1248.
- Xu, J.-G., Wu, G., Feng, D.-C., Cotsovos, D. M., & Lu, Y. (2020). Seismic fragility analysis of shear-critical concrete columns considering corrosion induced deterioration effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 134, 106165.
- Yalciner, H., Sensoy, S., & Eren, O. (2015). Seismic performance assessment of a corroded 50-year-old reinforced concrete building. *Journal of Structural Engineering*, 141(12), 04015001.
- seismic behavior of horizontally curved RC bridges with different types of irregularity in comparison with equivalent straight bridges. *Structures*, 33, 2570-2586.
- Kashani, M. M., Crewe, A. J., & Alexander, N. A. (2013a). Nonlinear cyclic response of corrosion-damaged reinforcing bars with the effect of buckling. *Construction and Building Materials*, 41, 388-400.
- Kashani, M. M., Crewe, A. J., & Alexander, N. A. (2013b). Nonlinear stress-strain behaviour of corrosion-damaged reinforcing bars including inelastic buckling. *Engineering Structures*, 48, 417-429.
- Koh, S., & Stephens, R. (1991). Mean stress effects on low cycle fatigue for a high strength steel. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 14(4), 413-428.
- Li, H., Li, L., Zhou, G., & Xu, L. (2020). Time-dependent seismic fragility assessment for aging highway bridges subject to non-uniform chloride-induced corrosion. *Journal of Earthquake Engineering*, 1-31.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804-1826.
- Manson, S. S. (1965). *Fatigue: A Complex Subject—Some Simple Approximations* [Technical Report]. NASA.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2006). OpenSees command language manual. *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, 264(1), 137-158.
- Mergos, P., & Kappos, A. (2013). A combined local damage index for seismic assessment of existing RC structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(6), 833-852.
- Nazari, S., & Tehrani, P. (2024a). Seismic performance evaluation of irregular RC bridges considering chloride corrosion and different length of spans. *9th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*.
- Nazari, S., & Tehrani, P. (2024b). Evaluating the effect of corrosion on the seismic performance of irregular reinforced concrete bridges with different column heights. *9th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*.

Seismic Performance Evaluation of Straight Reinforced Concrete Bridges with Irregularities Due to Unequal Column Heights and Unequal Span Lengths under Chloride-Induced Corrosion

Sepehr Nazari¹ and Payam Tehrani^{2*}

1. M.Sc. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: payam.tehrani@aut.ac.ir

Reinforced concrete bridges are essential components of urban and intercity transportation networks, and their seismic performance becomes more critical when geometric irregularities are present. In practice, site constraints, topography, and construction limitations often lead to bridge configurations with unequal column heights or unequal span lengths. Such irregularities may alter the distribution of stiffness and seismic demand, resulting in higher displacement concentration and increased vulnerability during earthquakes. In addition, chloride-induced corrosion is one of the most common deterioration mechanisms in reinforced concrete bridges, reducing the mechanical properties of reinforcing steel and concrete and potentially amplifying seismic damage over the service life of the structure.

This study evaluates the seismic performance of straight reinforced concrete bridges considering the combined effects of geometric irregularity and chloride-induced corrosion. One regular and six irregular four-span reinforced concrete bridge configurations with three-cell box-girder decks were designed using CSI Bridge according to seismic design requirements. The irregular configurations included bridges with unequal column heights and bridges with unequal span lengths. The numerical models were subsequently developed in OpenSees using fiber-based force-based beam-column elements. The linear behavior of the models was verified by comparing modal properties and gravity reactions obtained from CSI Bridge and OpenSees. Moreover, the nonlinear behavior of the bridge columns was validated using experimental cyclic test results from the PEER database. Chloride-induced corrosion was incorporated by considering deterioration of cover concrete, confined core concrete, longitudinal and transverse reinforcement properties, and low-cycle fatigue degradation of longitudinal bars. Corrosion levels ranging from 0% to 50% were examined. Nonlinear response history analyses were then conducted using 11 far-field ground motion records.

The results indicate that increasing corrosion consistently increases column drift demands in both longitudinal and transverse directions. For bridges with unequal column heights, the transverse drift was more sensitive to corrosion than the longitudinal drift, mainly due to the single-column bent configuration. The most critical case among these bridges occurred when the shortest column was located at the middle bent. For example, 20% corrosion increased the transverse drift of this configuration by approximately 22%, while the corresponding increase in the longitudinal direction was about 9.5%. The results also show that, under 30% corrosion, the increase in transverse drift was approximately 18% for the regular bridge and about 25% for an irregular bridge, confirming the greater vulnerability of irregular configurations to corrosion-induced degradation. For bridges with unequal span lengths, the drift response increased markedly after the corrosion level exceeded 30%. In these cases, the rate of increase in transverse drift after 30% corrosion reached up to six times the rate observed before this corrosion level. The most critical response among the span-irregular bridges was observed in the configuration with adjacent unequal spans and an asymmetric deck layout. Overall, the findings demonstrate that chloride-induced corrosion can significantly intensify the adverse seismic effects of bridge irregularity, particularly in configurations with stiffness imbalance, asymmetric span arrangement, and critical short-column behavior.

Keywords: Reinforced Concrete Bridges; Chloride-Induced Corrosion; Bridge Irregularity; Unequal Column Heights; Unequal Span Lengths; Nonlinear Response History Analysis.