

# ارزیابی لرزه ای پل های بتنی چند دهانه با پایه های ساخته شده از بتن فوق توانمند با استفاده از منحنی شکنندگی

حامد قدیمی مقدم<sup>۱</sup> فرشته امامی<sup>۲</sup> محمدرضا منصوری<sup>۳</sup>

## چکیده:

پل ها نقش حیاتی در اتصال مسیرهای حمل و نقل، مدیریت ترافیک، و دسترسی به مکان های استراتژیک نظامی، سیاسی و اجتماعی ایفا می کنند که اهمیت آنها به ویژه در زمان بحران آشکار می شود. زمین لرزه ها جزء حوادث غیرقابل پیش بینی هستند که عملکرد شریان های حیاتی حمل و نقل را مختل می کنند و منجر به تخریب این سازه های مهم می شوند. استفاده از فناوری های نوآورانه، مانند بتن فوق توانمند، به عنوان یک راه امیدوار کننده برای افزایش انعطاف پذیری سازه و کاهش آسیب مطرح می شود. این بتن به واسطه طرح اختلاطی که دارد دارای ساختاری یکپارچه و همگن، نفوذپذیری پایین و دوام بالا است که می تواند موجب افزایش ظرفیت مقاومت پل در برابر نیروهای لرزه ای و محدود کردن انتشار آسیب شود. یکی از مؤثرترین روش ها برای ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای پل ها، تحلیل شکنندگی است، روشی که با استفاده از شاخص های آسیب، سطوح آسیب را تحت اثر پارامترهای لرزه ای بیان می کند. این مطالعه عملکرد لرزه ای پل های شهری با سیستم تیر - دال بتنی با پایه هایی ساخته شده از بتن فوق توانمند با ارتفاع ۵ و ۸ متر را ارزیابی می کند؛ که تجزیه و تحلیل آن با استفاده از نرم افزار CSI Bridge انجام شده و شتاب نگاشت های مناسبی از حوزه دور و نزدیک جهت تحلیل دینامیکی افزاینده (IDA) و محاسبه سطوح خسارت انتخاب گردید؛ نتایج بیان می کند احتمال فراگذشت آسیب در پایه های ساخته شده با بتن فوق توانمند نسبت به پایه های ساخته شده با بتن معمولی کمتر است. با بررسی سطوح شدت در میانه خسارت مشاهده می گردد که ظرفیت نهایی بتن فوق توانمند در سطح عملکرد فروریزش حداقل ۷ درصد و حداکثر ۲۶ درصد بهبود عملکرد نسبت به بتن معمولی داشته است.

واژگان کلیدی: پل، بتن فوق توانمند، تحلیل دینامیکی افزاینده، منحنی شکنندگی، شاخص های آسیب

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، [hamedghadimi76@gmail.com](mailto:hamedghadimi76@gmail.com)

<sup>۲</sup> استادیار گروه سازه و زلزله، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، [f-emami@srbiau.ac.ir](mailto:f-emami@srbiau.ac.ir)

<sup>۳</sup> استادیار گروه سازه و زلزله، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، [m.mansoori@srbiau.ac.ir](mailto:m.mansoori@srbiau.ac.ir)

# Seismic Evaluation of Multi-Span Reinforced Concrete Bridges with Ultra High-Performance Concrete Piers Using Fragility Curves

## Abstract

Bridges play a vital role in transportation, traffic management, and providing access to strategic locations, especially during crises. Earthquakes are unpredictable events that disrupt critical transportation routes and damage important structures. Innovative technologies, such as Ultra High-Performance Concrete (UHPC), offer hope for enhancing structural flexibility and reducing damage. UHPC, known for its uniformity, low permeability, and durability, increases the resistance of bridges to seismic forces and limits the spread of damage. One of the most effective methods for assessing seismic vulnerability is Fragility Analysis. This study evaluates urban bridges with UHPC concrete columns supporting cast-in-place concrete T-beam superstructures. The analysis was conducted using CSI Bridge software, and appropriate ground motion records were selected for Incremental Dynamic Analysis (IDA) and damage level calculations. The results indicate that the probability of damage exceeding a certain threshold in UHPC concrete piers is lower compared to those made of ordinary concrete. Examining damage intensity levels reveals that highperformance concrete, in Collapse state scenario, improves performance by a minimum of 7.14% and up to 26.09% in the best-case scenario compared to Conventional concrete.

**Keywords:** Bridge, Ultra High-Performance Concrete, Incremental Dynamic Analysis, Fragility Curve,

Damage index

## ۱-مقدمه:

پل ها یکی از اجزاء حیاتی شبکه های حمل و نقل محسوب می شوند که مناطق مختلف را به هم متصل کرده و عبور و مرور را تسهیل می نمایند. از نظر تاریخی عمدتاً جهت عبور و مرور طراحی می شدند، در حالی که پل های معاصر نقش به سزایی در تقاطع های غیر هم سطح جهت کاهش زمان عبور و مرور و کاهش حجم ترافیک دارند؛ که یکی از مؤثرترین عناصر شریانی به شمار می روند. این سازه ها بسته به نوع مصالح مصرفی و شیوه بهره برداری و نگهداری، عمری بین ۳۰ تا ۸۰ سال دارند که با استفاده از مصالح با مشخصات و دوام برتر می توان عمر آنها را تا چند قرن افزایش داد [۱]. در میان انواع پل ها با مصالح مختلف، پل های بتنی دارای جایگاه برجسته ای هستند که نه تنها به دلیل یکپارچگی ساختاری بلکه به دلیل جذابیت زیبایی شناختی در طراحی و معماری نیز شهرت دارند. دغدغه های جوامع امروزی در زمینه توسعه پایدار، طراحی و ساخت پل، استفاده از روش ها و مصالحی است که ساخت و ساز سریع پل ها را میسر ساخته و ضمن ایجاد سازه ای مقاوم و کارآمد، از مشکلات و معضلات ناشی از ساخت در محل جلوگیری می کند [۲]. یکی از دستاوردهای مهم در زمینه تکنولوژی بتن، ساخت بتنی مقاوم و با خواص فوق العاده تحت عنوان بتن فوق توانمند است که اولین بار در سال ۱۹۹۰ با بهره گیری از خصوصیات ۳ نوع بتن خود تحکیم (SCC)، بتن توانمند (HPC)، بتن مسلح حاوی الیاف (FRC) ساخته شده است و با ساختاری یکپارچه و دانه بندی همگن، نه تنها مقاومت فشاری بالایی را فراهم کرده، بلکه تحت کشش نیز عملکرد مناسبی از خود نشان می دهد [۳-۵]. در راستای ساخت و ساز سریع پژوهشی در سال ۲۰۱۵ در آمریکا بر روی اتصالات بتنی پایه به فونداسیون با استفاده از بتن فوق توانمند انجام گرفت که توانایی ستون ها در افزایش ظرفیت نهایی را نشان داد [۶]. در راستای ساخت و ساز سریع پل ها، پژوهشی بر روی اتصالات UHPC موجود در بین شاه تیر های پیش ساخته پیش تنیده انجام گرفت که امکان استفاده از این اتصال را در پل ها با دهانه های طولانی فراهم می کرد و تحت بارگذاری های شدید دینامیکی در محدوده خطی باقی می ماند [۲]. این نتایج ارزشمند باعث شد تا گام مهمی در زمینه استفاده از اجزاء پیش ساخته برداشته شود چرا که یکی از مشکلات در زمینه ساخت و ساز سریع مقاومت پایین اتصالات ساخته شده در محل بود و بتن فوق توانمند فرصتی را برای ایجاد اتصالات ساده فراهم کرده بود که این اتصالات عملکرد مناسبی در زمینه بهره برداری طولانی مدت سازه داشته باشند [۷].

علاوه بر کاربردی که بتن فوق توانمند در زمینه اتصالات اجزاء پل دارد؛ از عملکرد مناسبی در زمینه ساخت و ترمیم عرشه پل ها نیز برخوردار است . در سال ۲۰۱۹ تحقیقی بر روی عرشه پل کامپوزیتی که با استفاده از بتن مسلح و لایه ای از بتن فوق توانمند ساخته شده بود انجام گرفت که استفاده از لایه بتن فوق توانمند ظرفیت نهایی عرشه را افزایش داد و نقش به سزایی در کنترل عرض ترک داشت [۸]. علی الرغم وجود تمامی برتری های ذکر شده و نتایج موجود ، بتن فوق توانمند جزو مصالح نوآورانه و نوظهور به شمار می آید و به علت فقدان آئین نامه های طراحی و اطلاعات لازم در زمینه عملکرد لرزه ای این نوع بتن در عناصر اصلی سازه و پل ها می بایست مدل سازی و بررسی عملکرد لرزه ای بتن فوق توانمند در اجزاء مختلف پل و مقایسه آن با مصالح مرسوم بر اساس تحقیقات آزمایشگاهی صورت گیرد . در سال ۲۰۲۱ پایه های مستطیلی تو خالی ساخته شده با بتن فوق توانمند در نرم افزار Abaqus مدل سازی شد استفاده از بتن فوق توانمند در این مدل سازی نشان داد که در مناطق با شدت لرزه ای کم تا حد قابل توجهی می توان نسبت میلگرد ها را کاهش داد [۹]. تحقیقی بر روی ضخامت لایه بتنی ساخته شده با بتن فوق توانمند انجام شد؛ نتایج نمودار تنش- کرنش ایجاد شده نشان داد با کاهش ضخامت لایه بتنی، کرنش اوج و مدول الاستیسیته تغییری نکرد اما مقاومت فشاری آن افزایش یافت [۱۰]. با وجود برتری های قابل ملاحظه بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی که در نتایج مدل سازی ها و تحقیقات آزمایشگاهی نشان داده شد؛ بتن فوق توانمند در زمینه کشش دارای مشکلات و ضعف هایی می باشد که محققین در راستای بهبود این مشکل از الیاف های گوناگون استفاده کردند که نتایج نشان داد استفاده از الیاف در بتن فوق توانمند نه تنها باعث بهبود عملکرد این بتن در کشش شده است بلکه تحت فشار نیروهای محصورکننده مختلف ، میزان نزول تنش پس از نقطه اوج با شیب ملایم تری به پایان می رسد [۱۱].

در سالیان اخیر با توجه به رشد جمعیت در شهر ها و وجود حوادث طبیعی و انسانی مختلف از جمله زلزله و انفجار ، لزوم ارزیابی ، ساخت و مقاوم سازی انواع سازه ها از جمله پل ها بیش از پیش احساس می گردد . با وجود تحقیقات آزمایشگاهی فراوان در زمینه بررسی و ارزیابی بتن فوق توانمند ، هنوز ابهاماتی برای جوامع مهندسی جهت استفاده از این نوع بتن در اجزاء حیاتی سازه ها وجود دارد که نیازمند بررسی و مدل سازی این نوع مصالح در سازه هایی مانند پل می باشد؛ تا ضمن مقایسه این نوع مصالح با بتن معمولی ، عملکرد این نوع بتن در برخورد با زلزله ارزیابی گردد . یکی از روش های پیشرفته ارزیابی ، استفاده از تحلیل دینامیکی افزاینده است که با انجام مجموعه ای از تحلیل های دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی و با استفاده از شتابنگاشت های حوزه دور و حوزه نزدیک انجام می گردد؛ و علاوه بر دقت بالایی که دارد رفتار غیر خطی سازه را نیز در بر می گیرد . در نظر گرفتن ظرفیت غیر خطی سازه علاوه بر اینکه باعث بدست آمدن درک درستی از رفتار سازه می شود از لحاظ طراحی نیز کاملاً اقتصادی می باشد [۱۲]. در همین راستا از تحلیل دینامیکی افزاینده به جهت بدست آوردن پارامتر ضریب رفتار برای سیستم قاب بتن آرمه با دیوار برشی فولادی نازک جهت انجام تحلیل استاتیکی غیر خطی استفاده گردید تا از ظرفیت غیر خطی مصالح در طراحی استفاده شود [۱۳]. استفاده از شتابنگاشت های متنوع در تحلیل دینامیکی غیر خطی بسیار حائز اهمیت است چرا که شتابنگاشت های زلزله دارای محتوای فرکانسی به خصوصی می باشند که هر کدام تاثیر به خصوصی بر پاسخ سازه می گذارند [۱۲]. طی تحقیقی که بر روی منابع زیرزمینی مکعبی تحت اثر زلزله حوزه دور گسل انجام گرفت؛ مشخص شد که تغییر مکان افقی ماکزیمم تا حد زیادی به ماهیت زلزله بستگی دارد [۱۴]. یکی از مشکلاتی که در انجام تحلیل های دینامیکی افزاینده وجود دارد؛ بحث زمان بر بودن این نوع تحلیل است که با استفاده از روش های معادل سازی و ساده سازی مدل ها می توان تا حد زیادی این مشکل را بر طرف کرد تا ضمن دستیابی به پاسخ های متنوع سازه تحت اثر زلزله های گوناگون ، درک درستی از رفتار سازه بدست آید [۱۵].

ارزیابی احتمال خسارت در سازه با استفاده از توزیع های آماری مختلف بر روی داده های تحلیل دینامیکی افزاینده انجام می پذیرد که تحلیل شکنندگی نام دارد [۱۶]. این منحنی های شکنندگی ابزاری هستند که به طور گسترده در ارزیابی خطر لرزه ای استفاده می شوند که برای اولین بار در سال ۱۹۷۵ ارائه شد [۱۷]. به طور ویژه در تحقیقی عملکرد لرزه ای پل تک دهانه بررسی شد که به لطف استفاده از منحنی های شکنندگی و استفاده از روش های آماری و احتمالاتی از دقت بالایی برخوردار بود [۱۶، ۱۸]. از منحنی های شکنندگی برای مقایسه عملکرد لرزه ای یک سازه با متغیر های مختلف استفاده می شود که می توان با استفاده از نتایج بدست آمده تاثیر متغیر موجود را بر عملکرد شکنندگی سازه بررسی کرد. عباسی و همکاران با استفاده از منحنی های شکنندگی عملکرد لرزه ای پل های بتنی جعبه ای چنددهانه را در چهار سطح بی نظمی بررسی و ارزیابی کردند [۱۹].

در این مطالعه رفتار لرزه ای پل های تیر-دال بتنی با عرشه پیوسته و تأثیر استفاده از بتن فوق توانمند در ساخت پایه های پل با ارتفاع های ۵ متر و ۸ متر بر پاسخ لرزه ای پل ها، تحت اثر زلزله های مختلف که بر اساس Fema-P695 استخراج شده است با استفاده از حدود خرابی تعیین شده توسط HAZUS و انجام تحلیل شکنندگی پل ها، مورد بررسی و ارزیابی قرار می گیرد. بدین منظور ۴ تیپ پل تیر-دال بتنی با عرشه پیوسته با ارتفاع پایه های ۵ متر و ۸ متر با استفاده از بتن فوق توانمند و بتن معمولی (C25) در نرم افزار CSI Bridge مدل سازی شد. پاسخ لرزه ای پایه پل ها تحت تحریک ۷ شتابنگاشت حوزه دور و ۷ شتابنگاشت حوزه نزدیک و با استفاده از مجموعه تحلیل های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی تحت عنوان تحلیل دینامیکی افزاینده (IDA) در ارتفاع های ۵ و ۸ متر با مصالح مختلف به دست آمد. سپس با استفاده از حدود خرابی تعیین شده در HAZUS و بر اساس تغییر مکان نسبی پایه پل در پنج حالت بدون آسیب، خرابی کم، متوسط، زیاد و کامل و با بهره گیری از روش های احتمالاتی، منحنی شکنندگی پایه پل ها با ارتفاع های ۵ متری و ۸ متری به دست آمد که به کمک حالات حدی تعیین شده احتمال وقوع و فراگذشت خسارات در هر یک از ۵ حالت تعیین شده بیان می گردد. نتایج نشان می دهد؛ بتن فوق توانمند ظرفیت پذیرش سطوح بالاتری از لرزش زمین را در هر یک از حالات حدی تعریف شده نسبت به بتن معمولی (C25) دارد و لازم به ذکر است بیشترین بهبود رفتار پایه های ساخته شده با بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی در پایه های ۵ متری و ۸ متری در حوزه نزدیک رخ داد و این برتری رفتار در تمامی شاخص های آسیب نسبت به حوزه دور صادق است.

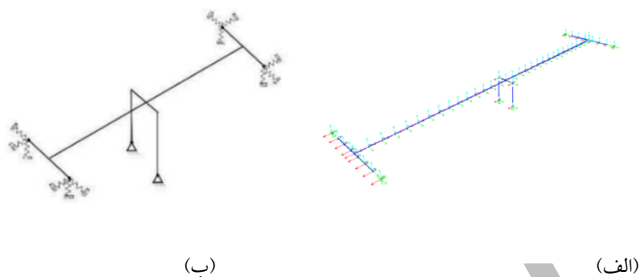
## ۲-۱-۲- اعتبار سنجی:

روش ها و فرضیات مختلفی جهت مدل سازی وجود دارد؛ مدل سازی انجام شده در این پژوهش بر اساس [۲۰] و [۲۱] و به صورت سه بعدی و بر اساس المان قاب انجام شده است و با توجه به پیچیدگی های مختلف و رفتار منحصر به فرد هر پل، لازم است تا با مدل سازی پلی مشابه با موضوع پژوهش و مقایسه نتایج حاصل از روش های مدل سازی به کار گرفته شده با نتایج موجود از پل معیار، روش کار صحت سنجی گردد. در همین راستا از گزارشی که توسط [۲۲] برای PEER انجام گرفته بود استفاده شد و پل نوع B در این مقاله که مربوط به پل خیابان La Veta در شهر توستین ایالت کالیفرنیا است جهت مدل سازی و اعتبارسنجی انتخاب گردید؛ این پل بتنی با عرشه جعبه ای ۶ سلولی شامل دو دهانه پیوسته به طول ۴۴/۲ و ۴۷/۲ متر است و پایه های این پل دارای ۲ ستون به قطر ۱/۷ متر و ارتفاع ۶/۷ متر می باشد که سرستون آن با عرشه پل به صورت یکپارچه اجرا گردیده است و شرایط مرزی پایه با فونداسیون به صورت مفصل می باشد و کوله ها به صورت ساده و با استفاده از المان های لینک خطی مدل سازی شدند همچنین لازم به ذکر است که عرض عرشه ۲۳ متر و عمق آن ۱/۹ متر بوده که دارای دو خط ترافیکی در هر جهت می باشد.

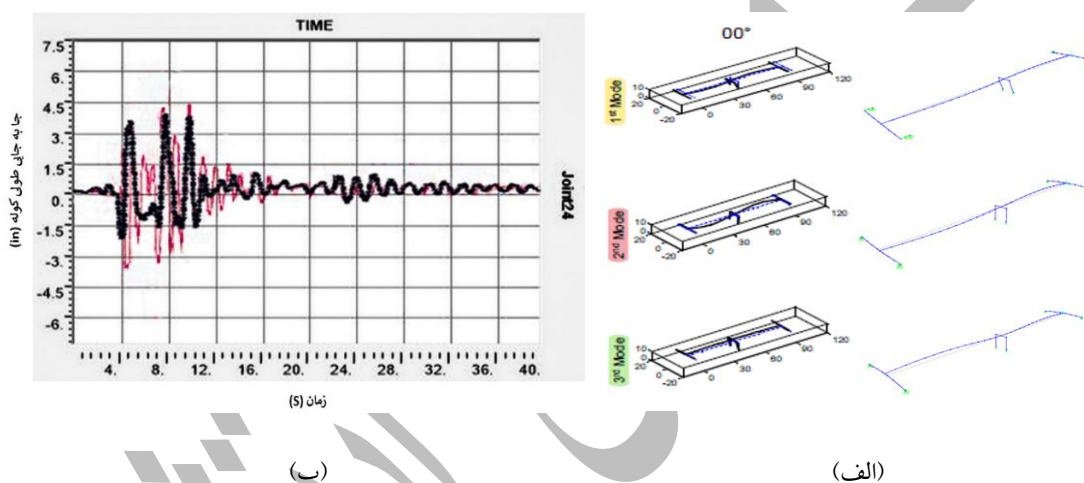
به جهت ارزیابی و اعتبارسنجی، پل نوع B با مشخصات و روش مذکور در نرم افزار CSI Bridge مدل سازی شد و تصاویری از مدل سازی در این تحقیق و مدل سازی توسط کاویانی و همکاران در نرم افزار Open SEES در شکل (۱) قابل مشاهده است و جهت بررسی و صحت سنجی پایداری کلی سازه تحلیل مودال بر روی نمونه مدل سازی شده اجرا شد که نتایج مقایسه تغییر شکل های مودال در مودهای اول و سوم در شکل (۲-الف) و مقادیر دوره تناوب مودهای اول تا سوم در جدول (۱) بیانگر قرابت و نزدیک بودن عملکرد پل مدل سازی شده با کار کاویانی و همکاران است. همچنین به جهت بررسی و اعتبارسنجی عملکرد پل مدل سازی شده تحت بارگذاری دینامیکی از شتابنگاشت زلزله Northridge<sup>4</sup> با ضریب  $g = 1/28$  استفاده شد و گره شماره (۲۴)، به عنوان گرهی میانی در کوله پل مدل سازی شده، انتخاب گردید و نتیجه جابه جایی طولی کوله در این گره با نتیجه جابه جایی طولی کوله در تحلیل انجام شده توسط Liang و Mosalam بر روی مدل ساخته شده (توسط کاویانی و همکاران) در شکل (۲-ب) مقایسه شد لازم به ذکر است که خط قرمز در شکل (۲-ب) بیانگر نمودار پاسخ جابه جایی طولی کوله پل مدل سازی شده با نرم افزار CSI Bridge در گره (۲۴) است و خط مشکی در شکل (۲-ب) بیانگر نمودار پاسخ جابه جایی طولی کوله در تحلیل انجام شده توسط Liang و Mosalam در نرم افزار Open SEES می باشد [۲۳]. ارزیابی و مقایسه نتایج نشان می دهد با توجه به متفاوت بودن نرم افزارهای مدل سازی و ماتریس های سختی جهت تحلیل و ارزیابی نمونه مورد نظر، نتایج با تقریب

<sup>4</sup> PEER RSN (1086)

خوبی قابل قبول است و نتایج مشابهی به دست آمده است که نشان از دقت خوب در مدل‌های تحلیلی انتخاب شده است و این ارزیابی نشان می‌دهد این روش مدل‌سازی در طیف وسیعی از پل‌ها با رفتار دینامیکی متفاوت بادقت مطلوبی قابل استفاده است.



شکل ۱: نمایی از نمونه پل مدل‌سازی شده در نرم‌افزارهای (الف) CSI Bridge و (ب) Open SEES [۲۲]



مودی نمونه پل مدل‌سازی شده و (ب) مقایسه جابه‌جایی طولی Northridge با تحلیل انجام

مود سوم (s)	مود دوم (s)	مود اول (s)	نتایج پل مدل‌سازی شده در نرم‌افزار CSI-Bridge
۰/۴۱	۰/۵۵	۱/۰۳	نتایج مندرج در کار کاویانی و همکاران
۰/۳۵	۰/۵	۱/۰۹	

شکل ۲: (الف) مقایسه اشکال با کار کاویانی و همکاران [۲۲] کوله تحت اثر زلزله

شده توسط Liang و Mosalam در نرم‌افزار Open SEES [۲۳]

جدول ۱: مقایسه نتایج مودهای اول تا سوم پل مدل‌سازی شده [۲۲]

### ۳- مدل‌سازی:

در این تحقیق، به جهت اطمینان از عملی بودن و کاربردی بودن یافته‌های پژوهش، پل‌های شهری معمولی دارای سیستم تیر-دال بتنی انتخاب شدند. این پل‌ها نشان‌دهنده طراحی رایج و پرکاربرد در زیرساخت‌های حمل‌ونقل مدرن هستند. هدف از این پژوهش ارزیابی عملکرد لرزه‌ای و آسیب‌پذیری این پل‌ها با پایه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند است.

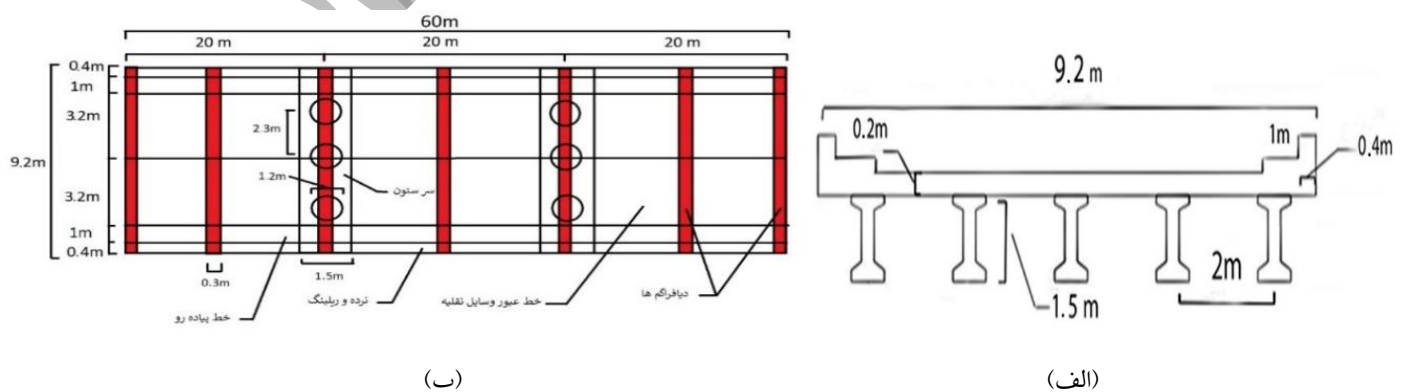
برای تسهیل تحلیل، از روش ها و ابزار مدل سازی پیشرفته موجود در نرم افزار CSI Bridge 2016 استفاده شده و فرایند مدل سازی نمونه پل های مورد بررسی در این پژوهش به شکل سه بعدی و بر اساس المان و اجزاء قاب مدل سازی شدند. مدل سازی با روش المان های قاب جهت به تصویر کشیدن ویژگی های اجزاء سازه ای پل ها و تسهیل تجزیه و تحلیل جامع رفتار مدل ها تحت بار گذاری های مختلف می باشد [۲۲]. علاوه بر این، از ابزار Bridge Wizard در نرم افزار استفاده شده که امکان بازسازی دقیق شرایط پل در دنیای واقعی نیز فراهم گردیده است.

علاوه بر این، بالشتک ها و تکیه گاه های الاستومری که اجزاء اساسی در سازه های پل هستند با استفاده از المان لینک خطی و بر اساس کاتالوگ شرکت گومبا طراحی و مدل سازی گردید این رویکرد نشان دهنده پیوند مطلوبی بین اجزای روسازه و زیرسازه هست، و این امکان را فراهم می سازد تا با افزایش دوره تناوب در سازه خسارات کمتری به کلیه مدل ها در طول رویدادهای لرزه ای وارد شود همچنین جهت توصیف مؤثر رفتار غیر خطی سازه های پل، در نزدیکی اتصال پایه به سر پایه و پایه به فونداسیون مفاصل پلاستیک بر اساس ASCE 41-17 تعریف گردید [۲۴]. در این روش می توان برهم کنش ها و تغییر شکل های پیچیده ای را که در پایه ها، به ویژه در پاسخ به نیروهای لرزه ای رخ می دهد، در نظر گرفت و با گنجاندن این عناصر غیر خطی در مدل سازی، ظرفیت غیر خطی سازه را لحاظ کرد تا رفتار نمونه ها در برابر تحلیل های دینامیکی تاریخچه زمانی بیش از پیش به واقعیت نزدیک باشد.

ذکر این نکته ضروری است که متغیر اول نوع بتن مصرفی در پایه پل و متغیر دوم ارتفاع پایه های پل می باشد و بغیر از این دو متغیر سایر ابعاد و مشخصات اجزاء پل در تمامی نمونه ها ثابت در نظر گرفته شد. این رویکرد این امکان را فراهم می سازد تا به طور مشخص تأثیر ارتفاع و مصالح مصرفی در پایه بر عملکرد لرزه ای پل ها به صورت مجزا ارزیابی گردد و اطمینان حاصل شود که نتایج در یک چارچوب آزمایشی قوی و کنترل شده است.

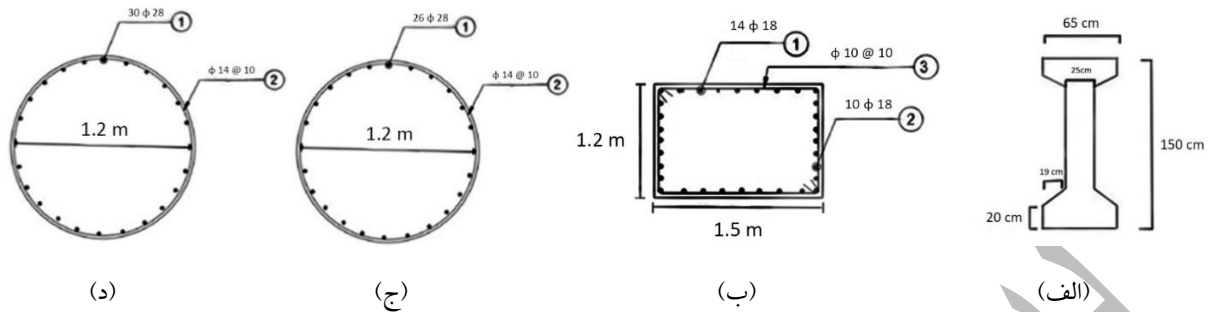
### ۳-۱- مشخصات هندسی:

در این تحقیق برای تحلیل و طراحی پل های بتنی تیر-دال در نرم افزار CSI-Bridge از آیین نامه های داخلی و خارجی مانند نشریه ۱۳۹ (آیین نامه بارگذاری پل ها)، نشریه ۴۶۳ (آیین نامه طرح پل های راه و راه آهن در برابر زلزله)، نشریه ۳۸۹ (آیین نامه طرح و محاسبه پل های بتن آرمه) و آیین نامه طراحی پل های آمریکا AASHTO استفاده شد و بار گذاری ها به جهت تحلیل و طراحی نمونه پل مدل سازی شده بر اساس بارهای مرده و زنده شامل بارهای مرده نوع اول (وزن اصلی مقاطع) و نوع دوم (بارهای آسفالت و نرده گذاری ها و بار پیاده رو) و بار زنده کامیون ۴۰ تنی ایرانی، اثرات دما و ترکیب بارهای مقاومت و بهره برداری مندرج در این آیین نامه ها استفاده گردید [۲۵-۲۸]. پل مورد مطالعه دارای پیکربندی سه دهانه، پیوسته، تیر-دال بتنی است که طول کلی آن ۶۰ متر و عرض کلی عرشه ۹/۲ متر می باشد. عرشه پل دارای دو خط ترافیک بوده که عرض هر کدام ۳/۲ متر است. علاوه بر این، در دو طرف عرشه پل، گذرگاه های عابر پیاده وجود دارد که هر کدام ۱ متر عرض دارند و مسیری ایمن و قابل دسترس برای عابران پیاده ارائه می دهند. در امتداد جهت طولی پل، پنج تیر به طور استراتژیک برای توزیع مؤثر بارها و تضمین یکپارچگی ساختار پل قرار گرفته، این آرایش ظرفیت باربری را بهینه می کند و عملکرد کلی پل را افزایش می دهد. مقطع عرضی و پروفیل طولی در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل ۳: (الف) مقطع عرضی پل تیر-دال بتنی و (ب) پلان و جزئیات طولی پل

هندسه شاه تیرهای بتنی موجود در روسازه دارای ارتفاع ۱/۵ متر، عرض بال ۰/۶۵ متر، ضخامت جان ۲۵ سانتی متر و ضخامت ۲۰ سانتی متر برای بال‌ها می‌باشند (شکل ۴-الف). این تیرها ستون فقرات روبنای پل را تشکیل می‌دهند و پشتیبانی و توزیع بار بسیار مناسبی را ارائه می‌کنند.



شکل ۴: جزئیات: (الف) شاه تیرهای پل، (ب) مقطع تیر سر پایه و جزئیات مقطع ستون پایه: (ج) با ارتفاع ۵ متر و (د) با ارتفاع ۸ متر

در طراحی پل دیافراگم‌هایی با عرض ۳۰ و ارتفاع ۱۱۵ سانتی متر قرار گرفته است که به سختی و پایداری کلی پل کمک می‌کنند. این دیافراگم‌ها که با فاصله ۱۰ متر از یکدیگر در ابتدا، انتها و وسط دهانه‌های پل قرار گرفتند نقش مهمی در توزیع نیرو در سراسر سازه ایفا کرده و ظرفیت تحمل بار جانبی را افزایش می‌دهند. (شکل ۳-ب) همچنین تیرهای سر پایه، عناصر اصلی سازه‌ای هستند که روسازه را به ستون‌های زیرسازه متصل می‌کند که با ابعاد ۱/۲ متر عرض و ۱/۵ متر طول مدل‌سازی شده‌اند (شکل ۴-ب).

پایه‌های پل هر کدام شامل سه ستون دایره‌ای بوده که قطر هر کدام ۱/۲ متر است. این اجزاء نقش بسیار مهمی در پایداری و ظرفیت باربری پل ایفا می‌نمایند که در جهت عرضی مانند قاب و در جهت طولی مانند طره عمل می‌کنند. (جزئیات مقاطع ستون‌ها در شکل ۴) نکته قابل توجه در مدل‌سازی و طراحی پل استفاده از بالشتک‌ها و جداگرهای لرزه‌ای الاستومری برای جداسازی روسازه از زیرسازه می‌باشد. این طراحی نوآورانه مهندسان، با میرا کردن ارتعاشات وارد به پل، ظرفیت سازه را در برابر رویدادهای لرزه‌ای افزایش می‌دهد که در مناطق زلزله‌خیز نقش به‌سزایی در کاهش خسارات دارد. کوله‌ها نیز اجزاء مهم و حیاتی هستند که مانند پایه‌ها نقش کلیدی در پایداری و انتقال بارهای وارد بر پل به فونداسیون دارند که به‌صورت بسته و با استفاده از المان لینک خطی مدل‌سازی شدند. این رویکرد عملکرد جامع و یکپارچه در ساختار پل را تضمین می‌کند [۲۹].

### ۳-۲- مواد و مصالح:

در مدل‌سازی کلیه اجزاء پل، میلگرد اولیه مورد استفاده، میلگرد AIII بود که با تنش تسلیم  $f_y = 4000 \text{ kg/cm}^2$  و مقاومت کششی نهایی  $f_u = 6000 \text{ kg/cm}^2$  مشخص می‌شود. این انتخاب یکپارچگی ساختاری و ظرفیت باربری مدل‌های پل را تضمین می‌کند. برای ساخت عرشه پل در تمامی مدل‌ها از بتن C25 استفاده شده است. بتن C25 دارای مقاومت فشاری  $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$  است، که آن را به انتخابی قابل اعتماد برای اجزای عرشه پل تبدیل می‌کند. همچنین این نوع بتن در ساخت مدل‌های دارای پایه‌های بتنی معمولی به عنوان نمونه‌های معیار استفاده شده است که مشخصات کامل آن در جدول (۲) و نتیجه مقایسه نمودار تنش- کرنش بتن C25 بر اساس مدل ارائه شده توسط [۲۱] با نمودار تنش کرنش بتن فوق توانمند که بر اساس تحقیقات [۳۰] و [۳۱] ترسیم شده در شکل (۵) نمایش داده شده است.

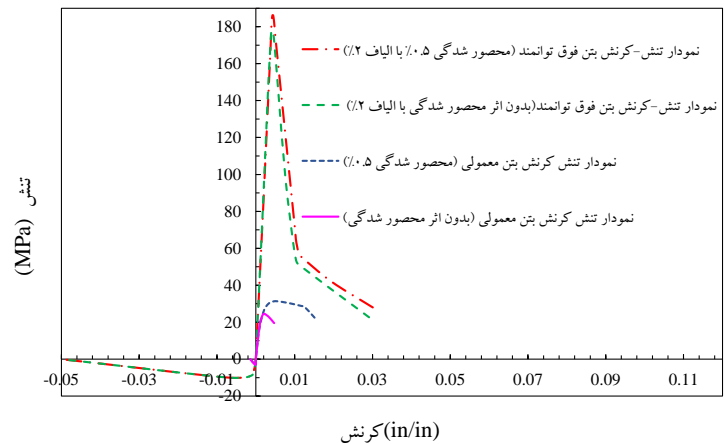
در مقابل، مدل‌هایی که دارای پایه‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند (UHPC) هستند، از مشخصات خاصی بر اساس مشخصات ذکر شده در گزارش‌های FHWA بهره می‌برند. این مدل‌ها از بتن فوق توانمند با ۲٪ الیاف در ناحیه پوسته و بتن فوق توانمند با ۲٪ الیاف و ۰.۵٪ ضریب محصورشدگی برای ناحیه هسته استفاده می‌کنند. انتخاب این مواد پیشرفته در افزایش مقاومت و انعطاف‌پذیری ساختاری پایه‌ها بسیار مفید است [۳۲].

برای ثبت دقیق رفتار تنش-کرنش UHPC، از مطالعات Pereiro جهت مدل‌سازی ناحیه کششی این بتن استفاده شد که درکی ارزشمند در مورد رفتار کششی این نوع بتن ارائه می‌کند [۳۰]. به طور مشابه، برای ناحیه فشاری از تحقیق انجام شده توسط نعیمی و همکاران به عنوان مرجع اصلی که امکان

مدل‌سازی دقیق رفتار فشاری UHPC را فراهم می‌کند استفاده شد که مشخصات مکانیکی و نمودار تنش-کرنش نهایی و مقایسه آن با نمودار تنش-کرنش بتن معمولی به ترتیب در جدول (۲) و شکل (۵) نمایش داده شده است [۳۱]. این یافته‌ها بر اساس نتایج تحقیقات آزمایشگاهی بوده تا نتایج حاصل از تحلیل در این مقاله قابل استناد و نزدیک به واقعیت باشد.

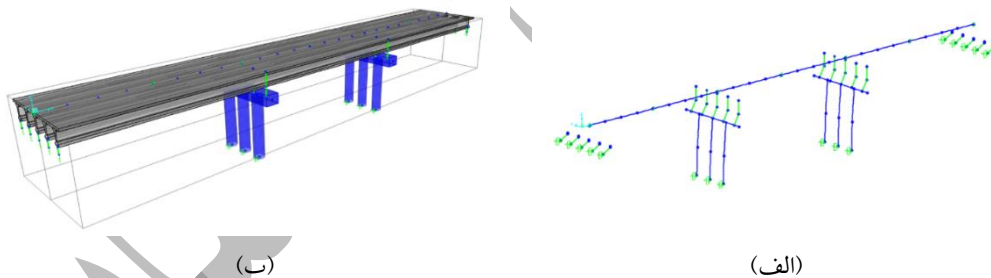
جدول ۲: مشخصات مکانیکی بتن‌های مصرفی [۳۲،۳۱،۲۱]

مدول الاستیسیته (Ton/m <sup>2</sup> )	ضریب پواسون (U)	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	نوع ماده
۲۴۰۰۰۰۰	۰/۲	۳	۲۵	بتن C25
۴۷۴۳۶۰۹	۰/۱۸	۱۰	۱۷۷/۷۵	بتن UHPC



شکل ۵: مقایسه تنش - کرنش بتن معمولی و بتن فوق توانمند [۳۲،۳۱،۲۱]

شکل (۶) نمایشی از مدل‌سازی تحلیلی نمونه‌های توصیف شده ارائه می‌دهند. شکل (۶-الف) نمایی از مدل‌های پل ساخته شده بر اساس رویکرد المان قاب را ارائه کرده که قاب سازه‌ای و اجزای حیاتی را به نمایش می‌گذارد. از سوی دیگر شکل (۶-ب)، نمایی از مدل‌های توسعه یافته در حالت Extrude را نشان می‌دهد که پیچیدگی‌های هندسه پل و تعامل بین عناصر ساختاری مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۶: نمایی از مدل‌های ساخته شده: (الف) بر اساس المان قاب و (ب) نمایی از مدل‌های ساخته شده در حالت Extrude

#### ۴- تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA):

بعد از ایجاد مدل‌های تحلیلی و انتخاب مجموعه‌ای از شتابنگاشت‌های لرزه‌ای مربوط به آن، نوبت بررسی دقیق رفتار دینامیکی سازه‌ها بود که برای شبیه‌سازی طیف وسیعی از تحریک‌های لرزه‌ای و ارزیابی تأثیر آن‌ها بر روی پل‌های مورد مطالعه، مجموعه‌ای از تحلیل‌های تاریخچه زمانی آغاز شد. این تجزیه و تحلیل‌ها به صورت سیستماتیک و با پیروی از اصول تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی (IDA) انجام پذیرفت.

شتابنگاشت‌های انتخاب شده در دو حوزه نزدیک و دور دارای ۳ مؤلفه لرزه‌ای شامل دو مؤلفه افقی و یک مؤلفه قائم می‌باشند که از بررسی اثر مؤلفه قائم طبق نشریه ۴۶۳ (آیین‌نامه طرح پل‌های راه و راه‌آهن در برابر زلزله) صرف نظر شد و فقط اثر دو مؤلفه افقی شتابنگاشت‌ها به عنوان ورودی به



پل اعمال گردید. در پل‌های مطالعه شده پایه‌ها در جهت عرضی قاب بوده لذا سختی بیشتری نسبت به جهت طولی خود دارند. بر این اساس سختی در جهت عرضی بیشتر از جهت طولی پل می‌باشد؛ همچنین در مدل‌سازی پل‌ها برشگیر در جهت عرضی پل در نظر گرفته شده است که در تعریف بالشتک‌های الاستومری این موضوع لحاظ شده است. در بررسی‌های انجام شده و نتایج حاصل از تحلیل مشخص گردید که مقدار جابه‌جایی پایه در جهت عرضی پل نسبت به جابه‌جایی طولی بسیار اندک و ناچیز بود؛ بر این اساس در این تحقیق پاسخ جابه‌جایی پایه در جهت طولی پل به عنوان معیار اصلی تحلیل‌های IDA و تهیه منحنی‌های شکنندگی قرار گرفت [۳۳، ۲۶]. تجزیه و تحلیل برای هر مدل شامل تحلیل دینامیکی افزاینده تحت اثر ۷ شتاب‌نگاشت حوزه دور و ۷ شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک (پالس دار) بود که سناریوهای لرزه‌ای متنوعی را منعکس کرده و ارزیابی دقیقی از عملکرد سازه‌ها تحت تحریکات لرزه‌ای میدان دور و نزدیک را تضمین می‌کند. این شتاب‌نگاشت‌ها طبق توصیه Fema-P695 انتخاب شدند تا طیفی از شرایط لرزه‌ای واقعی را که پل‌ها در مناطق با خطر لرزه‌ای بالا ممکن است با آن‌ها مواجه شوند، در بر گیرند. بر اساس Fema-P695، زلزله شتاب‌نگارهایی که فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتر تا گسل دارد شتاب‌نگاشت‌های حوزه نزدیک و زلزله‌هایی که شتاب‌نگار تا گسل، فاصله‌ای برابر با ۱۰ کیلومتر یا بیشتر دارد شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور اطلاق می‌شوند. در واقع شتاب‌نگاشت‌هایی که دارای بزرگای بیشتر از ۶/۵ ریشتر هستند زلزله‌هایی با بزرگای زیاد، به شمار می‌روند این زلزله‌ها بر اساس ATC-63 دارای شدت و زمان بیشتری هستند و مقادیر انرژی زیادی را تخلیه می‌کنند در مقابل زلزله‌ها با بزرگای کمتر از ۶/۵ ریشتر شتاب‌نگاشت‌هایی با بزرگای کم به حساب می‌آیند، این زلزله‌ها صرفاً توانایی تخریب اعضای غیرسازه‌ای را داشته و حتی اگر با شدت زیادی به وقوع بپیوندند به دلیل مدت‌زمان لرزش کوتاهی که دارند نمی‌توانند اعضای سازه‌ای نوساز را تخریب کنند و نواحی محدودی را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند در مقابل زلزله‌ها با بزرگای بیشتر از ۶/۵ ریشتر علاوه بر اینکه شدت و مدت‌زمان لرزش بیشتری دارند می‌توانند نواحی گسترده‌تری را تحت تأثیر خود قرار دهند که امکان ارزیابی و پایش سازه تا رسیدن به مرحله فروریزش و تخریب را فراهم می‌کند از این رو در این مقاله از شتاب‌نگاشت‌هایی با بزرگای ۶/۵ تا ۷/۵ ریشتر استفاده گردید که اسامی شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور و حوزه نزدیک به ترتیب در جدول‌های (۳-الف) و (۳-ب) بیان شده است [۳۴]. همچنین برای در نظر گرفتن خصوصیات مربوط به ساختگاه و زمین احداث پروژه موردنظر از خاک نوع ۲ و در منطقه‌ای با خطر لرزه‌ای بسیار بالا استفاده شد که این ملاحظات برای ارزیابی واکنش سازه در چارچوب شرایط زمین‌شناسی واقعی، ضروری هستند.

نمودارهای IDA مربوط به هر شتاب‌نگاشت دارای دو مؤلفه عمودی و افقی تحت عنوان‌های سطح شدت (IM) و سطح آسیب (DM) می‌باشند و در واقع سطح شدت (IM) ورودی بر اساس پارامترهای لرزه‌ای مربوط به شتاب‌نگاشت، مانند PGV، PGD، یا PGA است که به مدل اعمال می‌شوند و سطح آسیب (DM) همان پارامتر تقاضای مهندسی است که متناظر با هر سطح شدت اعمال شده در تحلیل دینامیکی، اندازه‌گیری می‌شود، پارامترهای تقاضای مهندسی برای هر یک از اجزاء پل متفاوت است؛ اما به طور عمومی می‌توان به جابه‌جایی نسبی پایه‌ها و کوله‌ها، شکل‌پذیری پایه‌های پل، تغییر شکل کلیدهای برشی اشاره کرد که در این پژوهش به جهت بررسی پایه‌های ساخته شده با بتن فوق‌توانمند از پارامتر لرزه‌ای بیشینه شتاب زمین (PGA) و جابه‌جایی نسبی پایه‌ها (Drift) به ترتیب به عنوان سطح شدت (IM) و سطح آسیب (DM) به جهت بیان پارامتر تقاضای مهندسی (EDP) استفاده شد؛ پارامتر لرزه‌ای PGA، پارامتری ساده و قابل اعتماد از شدت لرزش زمین است که به راحتی اندازه‌گیری و تفسیر می‌شود و بیانگر بیشینه شتاب زمین مربوط به هر شتاب‌نگاشت است؛ این پارامتر لرزه‌ای بر اساس تحقیقات انجام شده در گذشته همبستگی مناسبی را بین تقاضای شکل‌پذیری جابه‌جایی ارائه می‌کند و بر خلاف سایر پارامترها مانند شتاب طیفی یا سرعت این امکان را فراهم می‌سازد تا فارغ از در نظر گرفتن دوره تناوب سازه و خصوصیات فردی هر شتاب‌نگاشت، رفتار سازه در برخورد با زلزله ارزیابی شود [۳۵]. در ابتدا، برای استاندارد کردن مقایسه شتاب‌نگاشت‌ها، پارامتر لرزه‌ای بیشینه شتاب زمین (PGA) برای هر شتاب‌نگاشت به مقدار یکنواخت ۱g مقیاس شد. این روش مقیاس کردن که با کمک نرم‌افزار Seismo Signal انجام گرفت، تضمین می‌کند که تمام شتاب‌نگاشت‌های زمین یک شتاب گرانشی معادل بر روی سازه‌ها اعمال می‌کنند، بنابراین ارزیابی منسجم و معنادار را تسهیل می‌کند [۳۵].

متعاقباً، تحلیل‌های تاریخچه زمانی به شکلی نظام‌مند اجرا شدند. هر مدل در معرض طیفی وسیعی از بارهای افزایشی قرار گرفت که با گام ۰/۱g افزایش یافت. این رویکرد که به عنوان تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی شناخته می‌شود، این امکان را فراهم می‌سازد تا به طور جامع پاسخ سازه و سطح آسیب تحت درجات مختلف شدت لرزه‌ای بررسی شود. با پیشرفت در تجزیه و تحلیل‌ها، داده‌های زیادی تولید شد که این امکان را مهیا می‌کند تا با ترسیم

منحنی‌های IDA درک عمیقی در مورد آسیب‌پذیری لرزه‌ای و عملکرد پل‌ها تا رسیدن به سطح فروریزش به دست آید و با استفاده از سطوح آسیب به دست آمده و با کمک روش‌ها و ابزار احتمالاتی تابع توزیع نرمال (NDF) و تابع توزیع تجمعی (CDF) و استفاده از پارامترهای میانگین و انحراف معیار، منحنی‌های شکنندگی برای هر مدل در هر حوزه بر اساس حالات حدی تعیین شده ترسیم شد که با کمک این منحنی‌های شکنندگی احتمال فراگذشت خسارات در هر سطح عملکردی قابل‌پیش‌بینی است. منحنی‌های IDA مربوط به هر حوزه در شکل‌های (۷) تا (۱۰) به تفکیک هر مدل نمایش داده شده است.

این منحنی‌های شکنندگی که از طریق نتایج تحلیل IDA انجام گرفت، در مشخص کردن احتمال آسیب سازه در سطوح مختلف شتاب اوج زمین (PGA) و شدت‌های تحریک، بسیار مفید هستند. این رویکرد جامع احتمالاتی درک ما از پاسخ سازه‌ها به نیروهای لرزه‌ای را افزایش می‌دهد و منبع ارزشمند و قابل استنادی برای ارزیابی لرزه‌ای سازه به جهت طراحی پل‌های با اهمیت زیاد و مدیریت خطر برای سایر پل‌ها در زمان بحران به شمار می‌آید [۳۶].

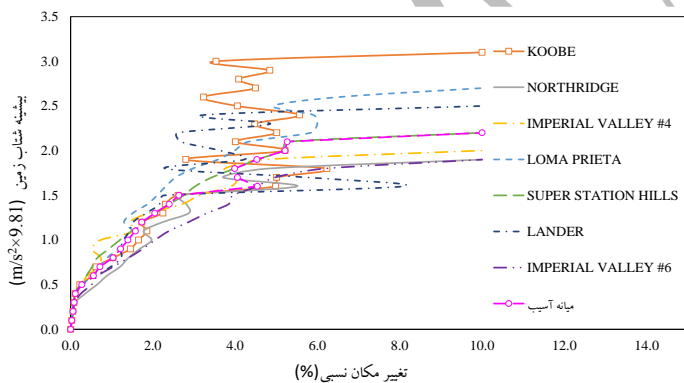
جدول ۳: شتاب‌نگاشت‌های (الف) حوزه دور و (ب) حوزه نزدیک [۳۴]

شماره	PEER RSN	نام زلزله	نام ایستگاه ثبت شتابنگاشت	سال رخداد زلزله	بزرگا
۱	۱۸۱	Imperial Valley-06	El Centro Array #6	۱۹۷۹	۶/۵
۲	۷۲۳	Superstition Hills-02	Parachute Test Site	۱۹۸۷	۶/۵
۳	۸۰۲	Loma Prieta	Saratoga - Aloha Ave	۱۸۲	۶/۹
۴	۸۲۱	Erzican, Turkey	Erzincan	۱۹۹۲	۶/۷
۵	۸۲۸	Cape Mendocino	Petrolia	۱۹۹۲	۷
۶	۱۰۶۳	Rinaldi Receiving Sta	Northridge-01	۱۹۹۴	۶/۷
۷	۱۶۰۵	Duzce	Duzce, Turkey	۱۹۹۹	۷/۱۴

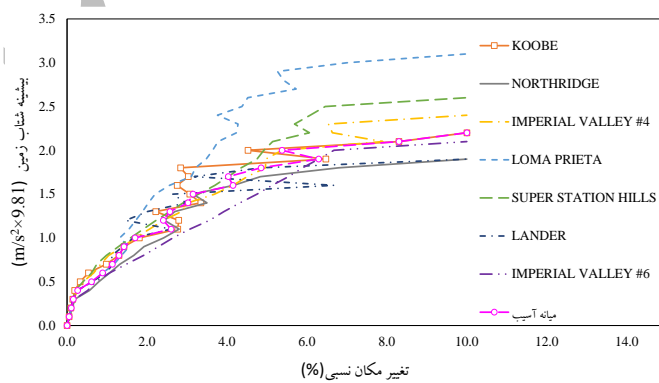
شماره	PEER RSN	نام زلزله	نام ایستگاه ثبت شتابنگاشت	سال رخداد زلزله	بزرگا
۱	۱۱۱۱	Koobe, Japan	Nishi-Akashi	۱۹۹۵	۶/۹
۲	۱۶۹	Imperial Valley	Delta	۱۹۷۹	۶/۵
۳	۹۰۰	Lander	Yermo Fire Station	۱۹۹۲	۷/۳
۴	۷۵۲	Loma prieta	Capitola	۱۹۸۹	۶/۹
۵	۷۲۱	Superstition Hills	El Centro Imp. Co.	۱۹۸۷	۶/۵
۶	۱۶۶	Imperial Valley-06	Coachella Canal #4	۱۹۷۹	۶/۵۳
۷	۹۵۳	Northridge	Beverly Hills - Mulhol	۱۹۹۴	۶/۷

(ب)

(الف)

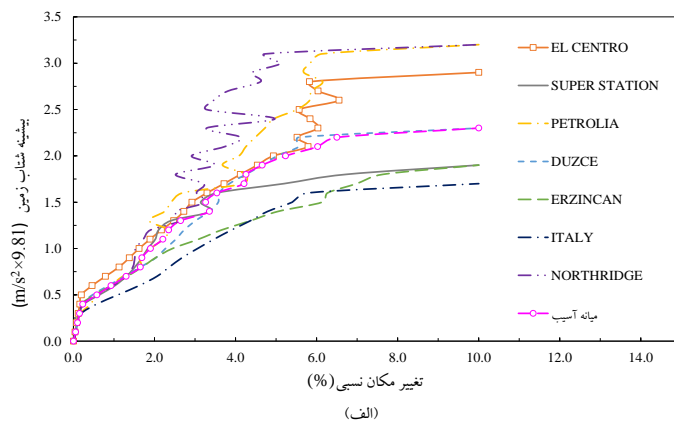
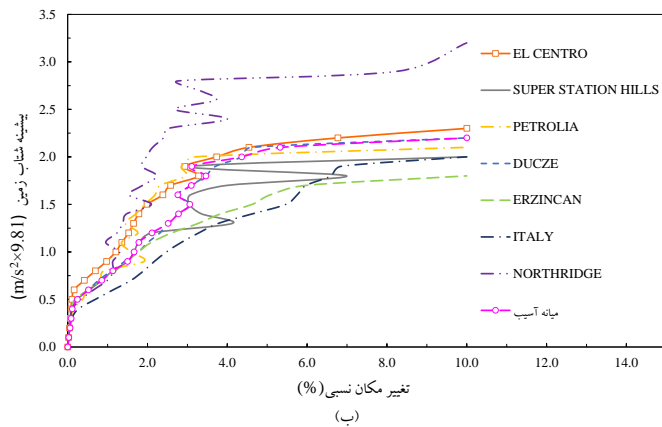


(ب)

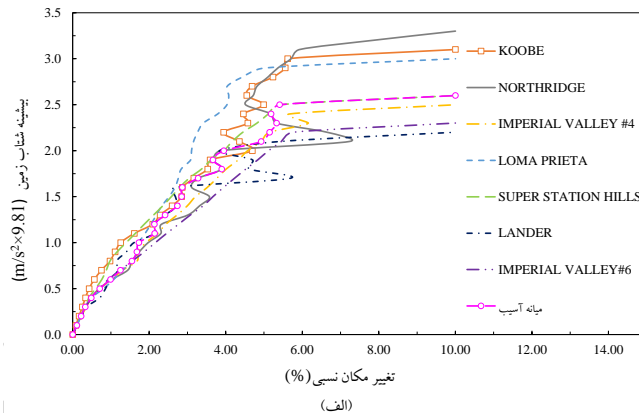
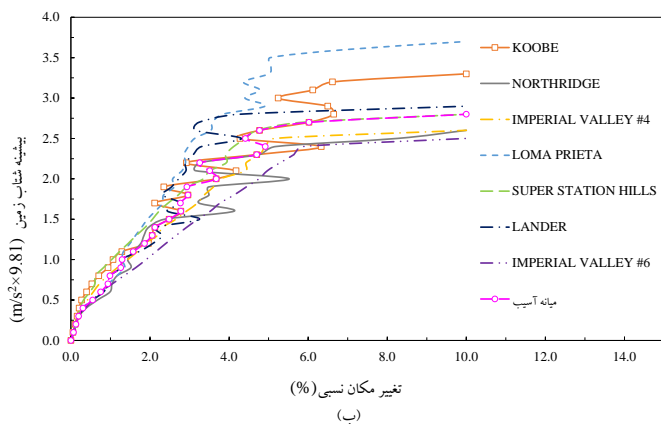


(الف)

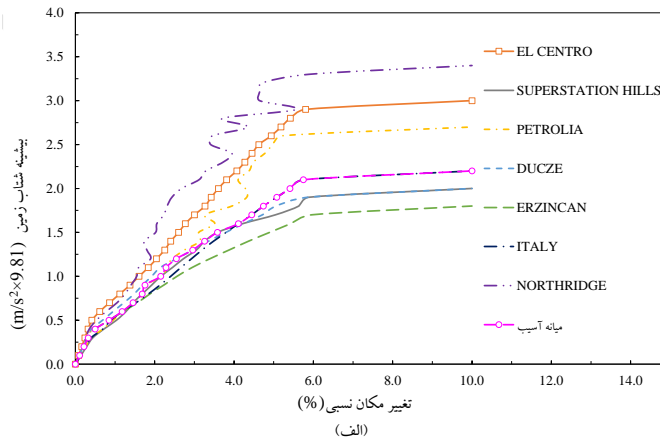
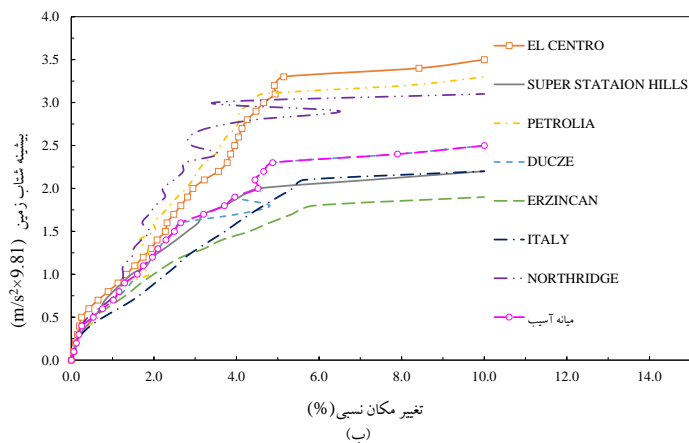
شکل ۷: نمودار IDA پل تیر-دال بتنی با پایه‌های ۵ متری ساخته شده از: (الف) بتن معمولی و (ب) بتن فوق توانمند تحت زلزله حوزه دور



شکل ۸: نمودار IDA پل تیر-دال بتنی با پایه‌های ۵ متری ساخته شده از: (الف) بتن معمولی و (ب) بتن فوق توانمند تحت زلزله حوزه نزدیک



شکل ۹: نمودار IDA پل تیر-دال بتنی با پایه‌های ۸ متری ساخته شده از: (الف) بتن معمولی و (ب) بتن فوق توانمند تحت زلزله حوزه دور



شکل ۱۰: نمودار IDA پل تیر-دال بتنی با پایه‌های ۸ متری ساخته شده از: (الف) بتن معمولی و (ب) بتن فوق توانمند تحت زلزله حوزه نزدیک

در شکل‌های (۷) تا (۱۰) نمودارهای مربوط به تحلیل دینامیکی افزاینده (IDA) به تفکیک مدل‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند و بتن معمولی در هر حوزه ترسیم شده است. بادقت در این منحنی‌ها متوجه می‌شویم که همگی این منحنی‌ها در ابتدا صاف بوده و در ناحیه خطی قرار دارند با افزایش بیشینه شتاب زمین مفصل‌هایی در پایه‌های پل ایجاد شده و سازه وارد ناحیه غیرخطی می‌شود. همچنین در این ناحیه شاهد شکست‌هایی در بعضی از نقاط نمودارهای IDA هستیم که بیانگر سخت‌شوندگی و افزایش مقاومت در پایه پل است که این سخت‌شوندگی و افزایش مقاومت در نمونه ساخته شده با بتن فوق

توانمند در مقایسه با نمونه ساخته شده با بتن معمولی به دلیل خواص مکانیکی ایجاد شده به واسطه مواد تشکیل دهنده، دانه بندی ریز و همگن و استفاده از الیاف، بیشتر است و در واقع الیاف به علت ایجاد محصورشدگی های غیرفعال تأثیر ویژه ای در بهبود و افزایش مقاومت و شکل پذیری پایه های پل دارد. منحنی های IDA در انتهای تحلیل و با وقوع فروریزش در پایه های پل تحت اثر هر شتابنگاشت به صورت صاف و افقی به پایان می رسند.

## ۵- شاخص خسارت:

بررسی های اخیر در مورد آسیب های ناشی از زلزله نشان داده است که بخش قابل توجهی از آسیب های سازه ای در سیستم های پل در زیر سازه رخ می دهد. با شناخت نقش حیاتی پایه های پل در یکپارچگی ساختاری کلی پل ها، رویکردی متمرکز در ارزیابی آسیب لرزه ای اتخاذ شد که برای ارزیابی جامع پاسخ لرزه ای و آسیب احتمالی به پل های مورد مطالعه، تحلیل دقیقی انجام گرفت. در این تحلیل محاسبه جابه جایی نسبی پایه ها که یک معیار اساسی برای ارزیابی عملکرد و آسیب پذیری زیرساخت های پل است انتخاب شد [۳۰]. پل های در معرض سناریوهای بارگذاری افزایشی، با استفاده از یک مجموعه شتابنگاشت های انتخاب شده از ۷ شتابنگاشت حوزه نزدیک و ۷ شتابنگاشت حوزه دور قرار گرفت. این رویکرد جامع، این امکان را فراهم می سازد تا طیفی از رویدادهای لرزه ای واقعی، شبیه سازی شده و تأثیر آنها بر پایه های پل ارزیابی شود. برای دسته بندی سطوح آسیب مشاهده شده در تحلیل ها و تسهیل مقایسه های معنادار، از شاخص های تعریف شده بر اساس HAZUS جهت نشان دادن درجات مختلفی از خسارت در سازه استفاده شد. جدول (۴) تعریف دقیقی از این شاخص های آسیب ارائه می کند که به عنوان یک مرجع استاندارد برای ارزیابی پاسخ و ظرفیت لرزه ای پایه پل ها به شمار می آید. با ارزیابی جابه جایی و تغییر مکان نسبی ستون های پایه پل تحت اثر هر شتابنگاشت زلزله، درک عمیقی در مورد عملکرد و آسیب پذیری این اجزاء حیاتی به دست می آید. این رویکرد سیستماتیک شرایطی را فراهم می سازد تا تأثیر بالقوه رویدادهای لرزه ای را بر زیرساخت های پل ارزیابی کرده و رویکردهایی را برای افزایش مقاومت و انعطاف پذیری سازه و کاهش خطر اتخاذ کرد.

جدول ۴: تعریف حالات خسارات: (الف) به صورت کیفی و (ب) به صورت کمی و بر مبنای Drift و بر اساس HAZUS [۳۷]

حالات خسارت	بیان کیفی	حالات خسارت	وضعیت	بیان کمی
۱. بدون خسارت	پل هیچ خسارتی نداشته است	بدون خسارت	اولین جاری شدن	۰/۰۰۵
۲. خسارت کم	ترک خوردگی جزئی و پوسته شدن در کوله ها و ترک در کلیدهای برشی کوله ها، ریزش جزئی و ترک در مفاصل، ریزش جزئی در ستون و ترک خوردگی جزئی در عرشه (نیاز به بازسازی ظاهری و جزئی دارد)	خسارت کم	ترک و پوسته پوسته شدن	۰/۰۰۷
۳. خسارت متوسط	هر ستون ترک خوردگی و پوسته پوسته شدن را در حد متوسط تجربه می کند (ستون از نظر ساختاری هنوز سالم است، ترک کلیدهای برشی)	خسارت متوسط	از دست دادن لنگرگاه	۰/۰۱۵
۴. خسارت زیاد	خرابی شدید در ستون ها بدون رخدادهای انهدام و خرابی تکیه گاه های بعضی از اتصالات	خسارت زیاد	ریزش اولیه ستون	۰/۰۲۵
۵. فروریزش	انهدام تمامی ستون ها و اتصالات و فروپاشی قریب الوقوع سازه	فروریزش	فروپاشی ستون	۰/۰۵

(ب)

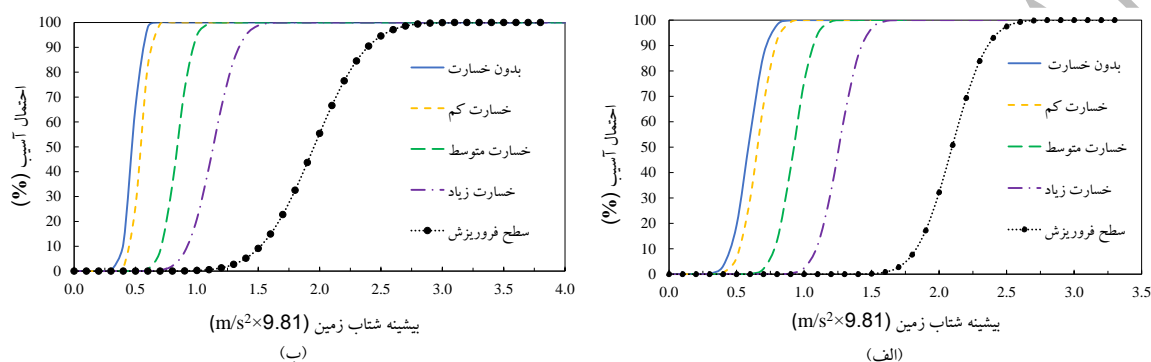
(الف)

## ۶- ارزیابی و تحلیل منحنی های شکنندگی:

نتایج گسترده تحلیل شکنندگی یک نمای کلی و جامع از عملکرد سازه ای پل ها، زمانی که در معرض تحریکات زلزله حوزه دور و حوزه نزدیک قرار می گیرند، ارائه می کند. ارزیابی مبتنی بر شاخص های آسیب تعریف شده توسط HAZUS متمرکز است و امکان توصیف دقیق واکنش سازه را فراهم می کند.

## ۶-۱- گروه ۱:

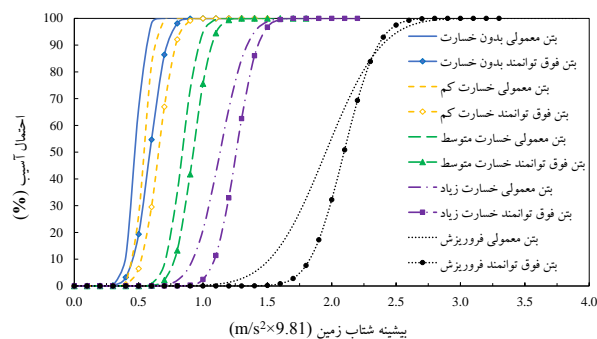
در گروه ۱ که مربوط به رویدادهای لرزه‌ای میدان دور است، نتایج موجود به جهت مقایسه و ارزیابی به صورت دودسته منحنی ارائه می‌شود. شکل (۱۱-الف) منحنی شکنندگی پل مجهز به پایه‌های بتنی با عملکرد فوق‌العاده بالا (UHPC) را بر اساس ۵ شاخص آسیب تعریف شده نشان می‌دهد که هر کدام دارای پایه‌هایی با ارتفاع ۵ متر هستند. این منحنی درک واضحی از عملکرد ساختاری پل با پایه‌های UHPC در شرایط لرزه‌ای میدان دور ارائه می‌دهد. به طور مشابه، شکل (۱۱-ب) منحنی شکنندگی یک پل را با پایه‌های بتنی معمولی (به ارتفاع ۵ متر) در شرایط لرزه‌ای حوزه دور نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: منحنی شکنندگی پایه ساخته شده از: (الف) بتن فوق توانمند و (ب) بتن معمولی با ارتفاع ۵ متر تحت زلزله حوزه دور

نتایج مقایسه و بررسی منحنی شکنندگی پایه‌های پل ساخته شده با بتن معمولی و بتن فوق توانمند (شکل ۱۱) تحت اثر زلزله‌های حوزه دور در شکل (۱۲) به تفکیک ۵ سطح عملکردی، بدون خسارت، خسارت کم، متوسط، زیاد و فروریزش آمده است. نتایج مقایسه نشان می‌دهد که انحراف معیار پنج سطح آسیب تعریف شده بدون خسارت، خسارت کم، متوسط، زیاد و فروریزش در پایه ساخته شده با بتن فوق توانمند به ترتیب ۰/۱۰۲، ۰/۱۰۱، ۰/۱۱۰، ۰/۱۳۰ و ۰/۲۰۰ می‌باشد و میانگین سطوح خسارات به ترتیب دارای مقادیر ۰/۵۸، ۰/۶۵، ۰/۹۲، ۱/۲۵، ۲/۰۹ است این در حالی است که در نمونه ساخته شده با بتن معمولی این مقادیر برای انحراف معیار به ترتیب ۰/۰۶۳، ۰/۰۶۰، ۰/۰۹۹، ۰/۱۶۰، ۰/۳۴۰ و برای میانگین آسیب‌ها به ترتیب ۰/۴۷، ۰/۵۴، ۰/۸۰، ۱/۱۳، ۱/۹۵ می‌باشد با مقایسه اعداد و ارقام می‌توان دریافت که میانگین مقادیر برای نمونه ساخته شده با بتن معمولی کمتر از میانگین نمونه ساخته شده با بتن فوق توانمند است که بیانگر مقاومت بالای مدل ساخته شده با بتن فوق توانمند تحت سطوح بالاتری از تحرکات زمین است، همین‌طور انحراف معیار نمونه ساخته شده با بتن فوق توانمند از نمونه ساخته شده با بتن معمولی بیشتر است که نشان از پراکندگی بیشتر مقادیر و بیانگر افزایش مقاومت، سخت‌شوندگی، و احیاء متعدد و بیشتر بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور است. در جدول (۵) سطوح شدت در میانه خسارت به تفکیک سطوح عملکردی مختلف تعیین شده است. بررسی و ارزیابی این جدول نشان می‌دهد که استفاده از بتن فوق توانمند موجب افزایش ظرفیت خطی سازه شده به طوری که خسارت ۵۰ درصدی در سطح عملکردی بدون خسارت در شتاب ۰/۵۹g رخ داده است این در حالی است که میانه خسارت در پایه‌های ساخته شده با بتن معمولی در شتاب ۰/۵۴g به وقوع پیوسته است و با توجه به تعاریف مندرج در جدول (۴-الف) بتن فوق توانمند علاوه بر افزایش ظرفیت خطی سازه، تأثیر بسزایی در کنترل عرض ترک دارد این افزایش مقاومت اولیه به واسطه استفاده از بتن فوق توانمند به طور مشخص اثر مثبتی بر ظرفیت نهایی سازه داشته به طوری که خسارت ۵۰ درصدی در سطوح آسیب زیاد و فروریزش به ترتیب در شتاب‌های ۱/۲۶g و ۲/۱g به وقوع پیوسته است و این میزان خسارت در پایه‌های ساخته شده با بتن معمولی در شتاب‌های ۱/۱۳g و ۱/۹۶g رخ داده است که استفاده از بتن فوق توانمند به ترتیب ۱۱/۵ درصد و ۷/۱۴ درصد بهبود رفتار نسبت به بتن معمولی تحت اثر زلزله‌های حوزه دور داشته است. با افزایش سطوح شدت، میزان برتری پایه‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند تحت اثر زلزله‌های حوزه دور نسبت به بتن معمولی کاهش یافته

است به طوری که بیشترین میزان بهبود مربوط به سطح عملکردی بدون خسارت به میزان ۲۲/۹۲ درصد و کمترین بهبود مربوط به سطح فروریزش به مقدار ۷/۱۴ درصد می باشد.



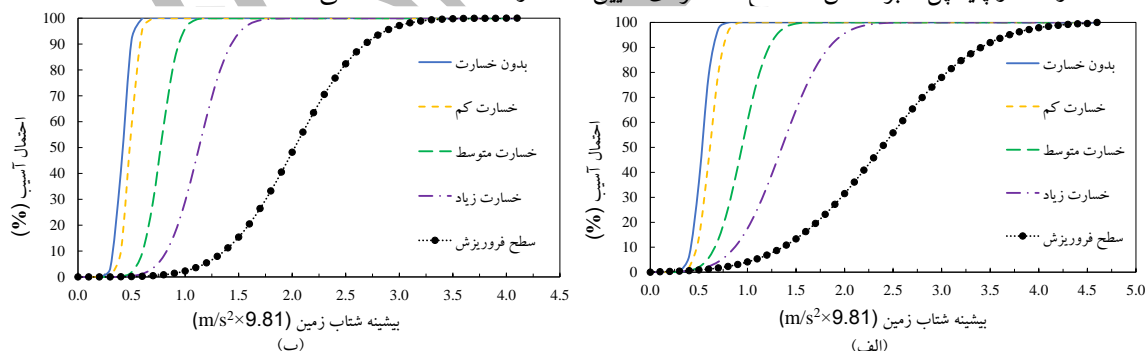
شکل ۱۲: مقایسه منحنی شکنندگی پایه های ساخته شده از بتن فوق توانمند و بتن معمولی با ارتفاع ۵ متر تحت اثر حوزه دور

جدول ۵: نتایج سطوح تحریک در نقطه میانی آسیب (مدل با ارتفاع پایه ۵ متر تحت اثر شتابنگاشت حوزه دور)

بدون خسارت	خسارت کم	خسارت متوسط	خسارت زیاد	فروریزش	
۰/۵۹g	۰/۶۶g	۰/۹۳g	۱/۲۶g	۲/۱g	بتن فوق توانمند
۰/۴۸g	۰/۵۴g	۰/۸۴g	۱/۱۳g	۱/۹۶g	بتن معمولی
۲۲/۹۲	۲۲/۲۲	۱۰/۷۱	۱۱/۵۰	۷/۱۴	درصد برتری بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی

## ۲-۶- گروه ۲:

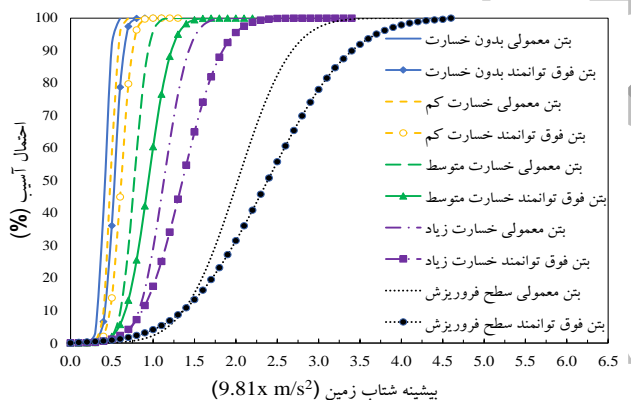
گروه ۲، نتایج بررسی و ارزیابی عملکرد پایه پل ها با ارتفاع ۵ متر تحت اثر زلزله های حوزه نزدیک ارائه می نماید. شکل (۱۳- الف) منحنی شکنندگی یک پل با پایه های ساخته شده از بتن فوق توانمند (ارتفاع ۵ متر) تحت اثر زلزله های حوزه نزدیک را نشان می دهد. در مقابل، شکل (۱۳- ب) منحنی شکنندگی پل با پایه های ساخته شده از بتن معمولی (ارتفاع ۵ متر) تحت بارگذاری لرزه ای حوزه نزدیک ارائه می کند. این داده ها آسیب پذیری سازه و احتمال فراگذشت خسارات در پایه پل ها بر اساس ۵ سطح عملکردی تعیین شده در HAZUS نشان می دهند.



شکل ۱۳: منحنی شکنندگی پایه ساخته شده از: (الف) بتن فوق توانمند و (ب) بتن معمولی با ارتفاع ۵ متر تحت اثر زلزله حوزه نزدیک

نتایج مقایسه و بررسی منحنی شکنندگی پایه پل های ساخته شده با بتن معمولی و بتن فوق توانمند (شکل ۱۳) تحت اثر زلزله حوزه نزدیک در شکل (۱۴) بر اساس ۵ سطح عملکردی، بدون خسارت، خسارت کم، متوسط، زیاد و فروریزش آمده است. نتایج به دست آمده بر اساس ۵ سطوح عملکردی، بدون آسیب، خسارت کم، متوسط، زیاد، فروریزش برای نمونه ساخته شده با بتن فوق توانمند به ترتیب دارای انحراف معیار ۰/۰۸۶، ۰/۱۰۴، ۰/۲۱۷، ۰/۳۷۹، ۰/۷۹۷ و میانگین ۰/۵۳، ۰/۶۱، ۰/۹۴، ۱/۳۳، ۲/۳۸ است که در مقابل نمونه ساخته شده با بتن معمولی دارای انحراف معیار ۰/۰۶۱، ۰/۰۶۶، ۰/۱۳۰، ۰/۲۳۵، ۰/۵۱۳ و میانگین ۰/۴۱، ۰/۴۸، ۰/۷۷، ۱/۱۲، ۲/۰۲ می باشد و بیانگر افزایش ظرفیت مقاومت نمونه ساخته شده با بتن فوق توانمند و ایجاد

شکل پذیری مناسب و سخت‌شوندگی‌های متعدد نسبت به نمونه ساخته شده با بتن معمولی تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک است. در جدول (۶) سطوح شدت در میانه خسارت به تفکیک سطوح عملکردی مختلف تحت اثر زلزله حوزه نزدیک تعیین شده است. بررسی و ارزیابی این جدول نشان می‌دهد میانه خسارت در سطح عملکردی بدون خسارت و خسارت کم در پایه‌های ساخته شده با بتن معمولی به ترتیب در شتاب‌های  $0/42g$  و  $0/49g$  رخ داده است این در حالی است که میانه خسارت در سطح عملکردی بدون خسارت و خسارت کم در پایه‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند به ترتیب در شتاب‌های  $0/53g$  و  $0/62g$  به وقوع پیوست که به ترتیب  $26/19$  درصد و  $26/53$  درصد بهبود رفتار داشته است که علاوه بر افزایش ظرفیت خطی سازه، تأثیر فوق‌العاده‌ای در کنترل عرض ترک و جلوگیری از پوسته‌پوسته شدن مقاطع دارد. همچنین استفاده از بتن فوق توانمند در پایداری نهایی سازه نیز تأثیر زیادی داشته است به طوری که خسارت  $50$  درصدی در پایه پل در سطوح عملکردی خسارت زیاد و فروریزش در شتاب‌های  $1/36g$  و  $2/39g$  به وقوع پیوست که به ترتیب بیانگر  $20/35$  درصد و  $17/73$  درصد بهبود رفتار در مقایسه با پایه‌های ساخته شده با بتن معمولی تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک می‌باشد. همچنین با مقایسه جدول (۵) و (۶) مشاهده می‌شود که بتن فوق توانمند عملکرد بهتری تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک نسبت به زلزله‌های حوزه دور از خود به نمایش می‌گذارد.



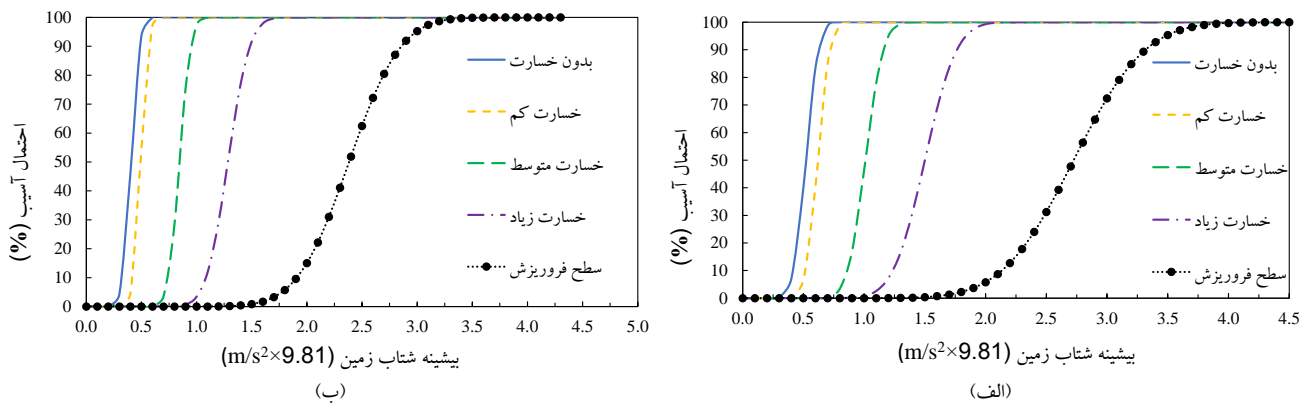
شکل ۱۴: مقایسه منحنی شکنندگی پایه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند و بتن معمولی با ارتفاع ۵ متر تحت اثر حوزه نزدیک

جدول ۶: نتایج سطوح تحریک در نقطه میانی آسیب (مدل با ارتفاع پایه ۵ متر تحت اثر شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک)

فروریزش	خسارت زیاد	خسارت متوسط	خسارت کم	بدون خسارت	
$2/39g$	$1/36g$	$0/95g$	$0/62g$	$0/53g$	بتن فوق توانمند
$2/03g$	$1/13g$	$0/77g$	$0/49g$	$0/42g$	بتن معمولی
$17/73$	$20/35$	$23/38$	$26/53$	$26/19$	درصد برتری بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی

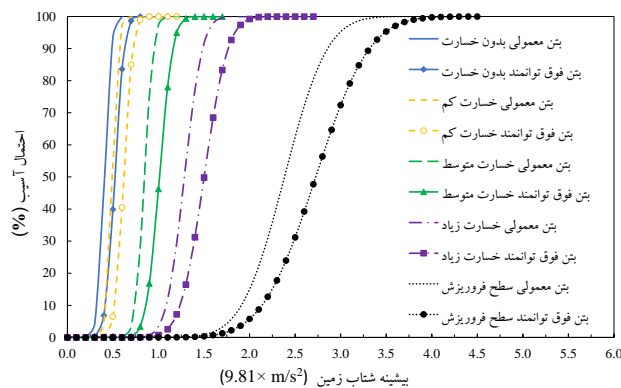
### ۳-۶- گروه ۳:

گروه ۳ به بررسی سناریوهای لرزه‌ای پایه پل‌ها با ارتفاع ۸ متر می‌پردازد. در شکل (۱۵-الف)، منحنی شکنندگی پل مجهز به پایه‌های UHPC (ارتفاع ۸ متر) تحت اثر زلزله‌های حوزه دور ارائه می‌شود که به طور مشابه شکل (۱۵-ب) منحنی شکنندگی پل با پایه‌های ساخته شده از بتن معمولی (ارتفاع ۸ متر) تحت بارگذاری لرزه‌ای میدان دور را نشان می‌دهد. این داده‌ها درک مناسبی در مورد تأثیر افزایش ارتفاع پایه بر پاسخ سازه تحت اثر زلزله‌های حوزه دور ارائه می‌کند.



شکل ۱۵: منحنی شکنندگی پایه ساخته شده از: (الف) بتن فوق توانمند و (ب) بتن معمولی با ارتفاع ۸ متر تحت اثر زلزله حوزه دور

نتایج مقایسه و بررسی منحنی شکنندگی پایه پل‌های ساخته شده با بتن معمولی و بتن فوق توانمند با ارتفاع ۸ متر (شکل ۱۵) تحت اثر زلزله حوزه دور در شکل (۱۶) تحت عنوان ۵ شاخص آسیب، بدون خسارت، خسارت کم، متوسط، زیاد و فروریزش آمده است. نتایج انحراف معیار نمونه‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند در این ۵ سطح عملکرد به ترتیب  $0.81/0.83$ ،  $0.115/0.205$ ،  $0.461/0.461$  و میانگین آن به ترتیب  $0.52/0.61$ ،  $0.61/1.01$ ،  $0.40/0.49$ ،  $0.84/1.28$ ،  $2.38$  می‌باشد و با ارزیابی نتایج استنباط می‌گردد که بتن فوق توانمند دارای ظرفیت مقاومت بیشتر و عملکرد بهتری نسبت به بتن معمولی تحت اثر زلزله‌های حوزه دور دارد. در جدول (۷) سطوح شدت در میانه خسارت به تفکیک سطوح عملکردی مختلف تحت اثر زلزله حوزه دور تعیین شده است. بررسی و ارزیابی این جدول نشان می‌دهد نیروهای جانبی وارد شده به پایه‌ها با ارتفاع ۸ متر به واسطه افزایش دوره تناوب کلی سازه نسبت به پایه‌ها با ارتفاع ۵ متر کاهش یافته است بر همین اصل و به علت جزئیات میلگرد گذاری مضاعف، ظرفیت مقاومت نهایی پایه پل نسبت به پایه‌ها با ارتفاع ۵ متر افزایش یافته است به طوری که طبق جدول (۷) سطح عملکردی فروریزش در پایه‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند و بتن معمولی به ترتیب در شتاب‌های  $2.73g$  و  $2.39g$  رخ داده است لازم به ذکر است که استفاده از بتن فوق توانمند در پایه‌ها با ارتفاع ۸ متری بهبود  $14/23$  درصدی نسبت به پایه‌های ساخته شده با بتن معمولی داشته که این میزان طبق جدول (۵) برای پایه‌ها با ارتفاع ۵ متر  $7/14$  درصد بوده است که نشان از برتری پایه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند با ارتفاع ۸ متر تحت اثر حوزه دور دارد. همچنین میانه خسارت در سطوح عملکردی بدون آسیب و خسارت کم بر اساس جدول (۷) به ترتیب  $26/83$  درصد و  $24$  درصد بهبود یافته است و نشان می‌دهد استفاده از بتن فوق توانمند تأثیر فراوانی در جلوگیری از ورود سازه به ناحیه غیرخطی داشته و به شکل مطلوبی از گسترش خرابی و ترک در پایه‌ها پیشگیری می‌کند.



شکل ۱۶: مقایسه منحنی شکنندگی پایه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند و بتن معمولی با ارتفاع ۸ متر تحت اثر حوزه دور

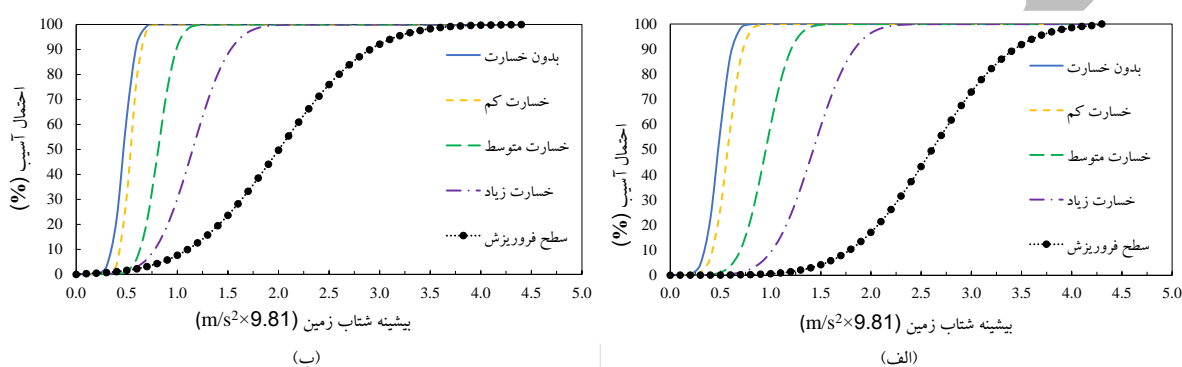


جدول ۷: نتایج سطوح تحریک در نقطه میانی آسیب (مدل با ارتفاع پایه ۸ متر تحت اثر شتابنگاشت حوزه دور)

فروریزش	خسارت زیاد	خسارت متوسط	خسارت کم	بدون خسارت	
۲/۷۳g	۱/۵g	۱/۰۱g	۰/۶۲g	۰/۵۲g	بتن فوق توانمند
۲/۳۹g	۱/۲۹g	۰/۸۵g	۰/۵g	۰/۴۱g	بتن معمولی
۱۴/۲۳	۱۶/۲۸	۱۸/۸۲	۲۴	۲۶/۸۳	درصد برتری بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی

#### ۴-۶- گروه ۴:

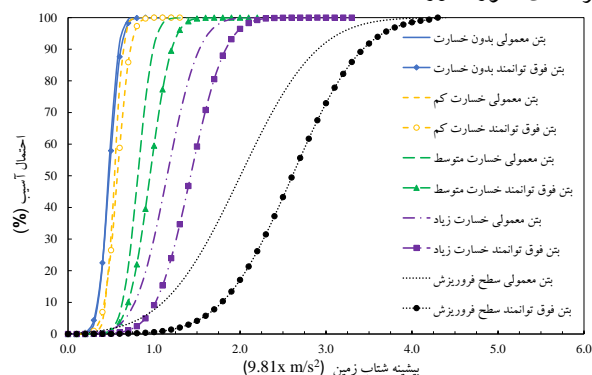
در نهایت، گروه ۴ تأثیر رویدادهای لرزه‌ای میدان نزدیک بر پل‌ها با پایه‌های ۸ متری را بررسی می‌کند، در شکل (۱۷-الف) منحنی شکنندگی پایه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند و در شکل (۱۷-ب) پایه‌هایی ساخته شده از بتن معمولی نشان داده شده است. این ارقام عملکرد ساختاری پل‌ها را در شرایط لرزه‌ای میدان نزدیک، زمانی که پایه‌هایی با ارتفاع ۸ متر ساخته می‌شوند بیان می‌کند و امکان مقایسه و تجزیه تحلیل را فراهم می‌سازد.



شکل ۱۷: منحنی شکنندگی پایه ساخته شده از: (الف) بتن فوق توانمند و (ب) بتن معمولی با ارتفاع ۸ متر تحت اثر زلزله حوزه نزدیک

نتایج مقایسه و بررسی منحنی شکنندگی پایه پل‌های ساخته شده با بتن معمولی و بتن فوق توانمند با ارتفاع ۸ متر (شکل ۱۷) تحت اثر زلزله حوزه نزدیک در شکل (۱۸) تحت عنوان ۵ حالت آسیب، بدون خسارت، خسارت کم، متوسط، زیاد و فروریزش آمده است. نتایج به دست آمده بر اساس ۵ سطح عملکردی، بدون آسیب، خسارت کم، متوسط، زیاد، فروریزش برای نمونه ساخته شده با بتن فوق توانمند به ترتیب دارای انحراف معیار ۰/۱۱۷، ۰/۱۹۷، ۰/۳۱۸، ۰/۶۶۰، و میانگین ۰/۴۷، ۰/۵۷، ۰/۹۵، ۱/۴۲، ۲/۶۰ است و در مقابل نمونه‌های ساخته شده با بتن معمولی دارای انحراف معیار ۰/۰۷۷، ۰/۰۷۸، ۰/۱۴۴، ۰/۲۸۵، ۰/۶۵۷، و میانگین ۰/۴۴، ۰/۵۱، ۰/۸۰، ۱/۱۶، ۲/۰۶ می‌باشد که بیانگر افزایش ظرفیت مقاومت نمونه‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند و ایجاد شکل‌پذیری مناسب و سخت‌شوندگی‌های پی‌درپی نسبت به نمونه‌های ساخته شده با بتن معمولی تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک است. در جدول (۸) سطوح شدت در میانه خسارت به تفکیک سطوح عملکردی مختلف تحت اثر زلزله حوزه نزدیک تعیین شده است. بررسی و ارزیابی این جدول نشان می‌دهد نیروهای جانبی وارد شده به پایه‌ها با ارتفاع ۸ متری به واسطه افزایش دوره تناوب کلی سازه نسبت به پایه‌ها با ارتفاع ۵ متر کاهش یافته است به همین دلیل و به علت جزئیات میلگرد گذاری مضاعف، ظرفیت مقاومت نهایی پایه پل نسبت به پایه‌ها با ارتفاع ۵ متر افزایش یافته است به طوری که طبق جدول (۸) سطح عملکردی فروریزش در پایه‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند و بتن معمولی به ترتیب در شتاب‌های ۲/۶۱g و ۲/۰۷g رخ داده است لازم به ذکر است که استفاده از بتن فوق توانمند در پایه‌ها با ارتفاع ۸ متری بهبود ۲۶/۰۹ درصدی نسبت به پایه‌های ساخته شده با بتن معمولی داشته که این میزان طبق جدول (۶) برای پایه‌ها با ارتفاع ۵ متر ۱۷/۷۳ درصد بوده است که نشان از برتری پایه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند با ارتفاع ۸ متر تحت اثر زلزله حوزه نزدیک دارد. همچنین میانه خسارت در سطوح عملکردی بدون آسیب و خسارت کم بر اساس جدول (۸) به ترتیب ۹/۰۹ درصد و ۱۱/۵۴ درصد بهبود یافته است و نشان می‌دهد استفاده از بتن فوق توانمند تأثیر فراوانی در جلوگیری از ورود سازه به ناحیه غیرخطی داشته و به شکل مطلوبی از گسترش خرابی و ترک در پایه‌ها پیشگیری می‌کند. لازم به ذکر است بر اساس نتایج به دست آمده از جدول‌های (۷) و (۸) بتن

فوق توانمند در کنترل عرض ترک و بهبود رفتار غیرخطی تحت اثر زلزله‌های حوزه دور عملکرد بهتری نسبت به زلزله‌های حوزه نزدیک از خود نشان داده است این در حالی است که عملکرد بتن فوق توانمند در افزایش ظرفیت نهایی و بهبود رفتار در سطوح آسیب متوسط، زیاد و فروریزش تحت اثر زلزله حوزه نزدیک بهبود بیشتری نسبت به زلزله‌های حوزه دور داشته است.



شکل ۱۸: مقایسه منحنی شکنندگی پایه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند و بتن معمولی با ارتفاع ۸ متر تحت اثر حوزه نزدیک

جدول ۸: نتایج سطوح تحریک در نقطه میانی آسیب (مدل با ارتفاع پایه ۸ متر تحت اثر شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک)

فوریزش	خسارت زیاد	خسارت متوسط	خسارت کم	بدون خسارت	
۲/۶۱g	۱/۴۳g	۰/۹۵g	۰/۵۸g	۰/۴۸g	بتن فوق توانمند
۲/۰۷g	۱/۱۶g	۰/۸g	۰/۵۲g	۰/۴۴g	بتن معمولی
۲۶/۰۹	۲۳/۲۸	۱۸/۷۵	۱۱/۵۴	۹/۰۹	درصد برتری بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی

## ۷- نتیجه گیری:

پل‌ها یکی از مهم‌ترین سازه‌های ساخته شده به دست بشر هستند که نقش‌های حیاتی در تأمین نیازهای جامعه بشری دارند این سازه‌ها در مقایسه با ساختمان‌ها و دیگر سازه‌ها از درجه نامعینی کمتری برخوردارند و به همین دلیل بررسی و ارزیابی آن‌ها در برابر حوادث طبیعی مانند زلزله نسبت به بقیه سازه‌ها از حساسیت و اهمیت بیشتری برخوردار است در این راستا و به منظور بهبود رفتار لرزه‌ای پل‌ها، نمونه‌هایی از پل با سیستم تیر دال بتنی با پایه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند (UHPC) و بتن معمولی (C25) در نرم‌افزار CSI-Bridge مدل‌سازی شد و با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی افزاینده تحت اثر زلزله‌های حوزه دور و حوزه نزدیک منحنی‌های شکنندگی این نمونه‌ها ترسیم گردید و با ارزیابی و تحلیل منحنی‌های شکنندگی نتایج مهمی مشاهده شد که به شرح زیر است:

- ۱- احتمال فراگذشت آسیب در پل‌ها با پایه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند نسبت به پل‌ها با پایه‌های ساخته شده از بتن معمولی در تمامی شاخص‌های آسیب کمتر است.
- ۲- بتن فوق توانمند به واسطه ساختار یکپارچه و مشخصات مکانیکی فوق‌العاده‌ای که دارد مقاومت فشاری بسیار بالایی را فراهم می‌آورد که با ترکیب الیاف و استفاده از میلگرد‌های عرضی مناسب، علاوه بر افزایش مقاومت در ناحیه خطی، با ایجاد سخت‌شوندگی و افزایش مقاومت در ناحیه غیرخطی ظرفیت نهایی سازه را نیز افزایش می‌دهد.
- ۳- بتن فوق توانمند ظرفیت مقاومت سازه جهت جلوگیری از وقوع آسیب اولیه و وقوع آسیب کم بهبود بخشیده و با مقاومت فشاری و مقاومت کششی بیشتری که در مقایسه با بتن معمولی دارد عملکرد بسیار مطلوبی در کنترل عرض ترک داشته به طوری که ظرفیت سازه در میانه خسارت در سطح عملکردی بدون خسارت و خسارت کم در کمترین حالت به ترتیب ۹/۰۹ درصد و ۱۱/۵۴ درصد و در بهترین شرایط ۲۶/۱۹ درصد

- و ۲۶/۵۳ درصد بهبود یافته است؛ لازم به ذکر است میانه آسیب در پایه‌های ساخته شده با بتن فوق توانمند با ارتفاع ۵ متر در سطح عملکردی بدون آسیب در حالی به وقوع پیوست که در نمونه مشابه با بتن معمولی سطح خسارت کم رخ داده بود.
- ۴- میزان بهبود بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی در سطح آسیب زیاد و فروریزش تحت اثر زلزله حوزه دور در نمونه با پایه‌های دارای ارتفاع ۵ متر به ترتیب ۱۱/۵ درصد و ۷/۱۴ درصد است و در حوزه نزدیک این برتری به میزان ۲۰/۳۵ درصد و ۱۷/۷۳ درصد افزایش می‌یابد. همچنین این مقدار بهبود برای بتن فوق توانمند در پایه‌ها با ارتفاع ۸ متر تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور به ترتیب ۱۶/۲۸ درصد و ۱۴/۲۳ درصد است این در حالی است که این مقادیر برای پایه‌ها با ارتفاع ۸ متر تحت اثر زلزله حوزه نزدیک به ترتیب ۲۳/۲۸ درصد و ۲۶/۰۹ درصد افزایش می‌یابد که نشان دهنده عملکرد بهتر بتن فوق توانمند در زلزله‌های حوزه نزدیک است.
- ۵- بتن فوق توانمند در افزایش پایداری سازه تأثیر بسزایی داشته به طوری که در سطح نهایی آسیب حداقل ۷/۱۴ درصد و حداکثر ۲۶/۰۹ درصد بهبود نسبت به بتن معمولی کسب کرده است که این بهبود رفتار در پایداری سازه تحت سطوح سنگین تری از لرزش زمین بیانگر پتانسیل بالای اجزاء ساخته شده با این بتن نسبت به بتن معمولی است که این امکان را برای طراحان فراهم می‌سازد تا از بتن فوق توانمند به جهت کاهش ابعاد مقاطع، طراحی‌های بهینه و معماری‌های زیباتر بهره‌گیرند.

## مراجع:

- [1] Caner, A., Yanmaz, A.M., Yakut, A., Avsar, O., Yilmaz, T., 2008. Service Life Assessment of Existing Highway Bridges with No Planned Regular Inspections. *J. Perform. Constr. Facil.* 22, 108–114. [doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2008\)22:2\(108\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2008)22:2(108))
- [2] Huang, C., Song, J., Zhang, N., Lee, G. C., & Asce, M. (2019). Seismic Performance of Precast Prestressed Concrete Bridge Girders Using Field-Cast Ultrahigh-Performance Concrete Connections. [doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943)
- [3] Zhou, Mi; Lu, Wei; Song, Jianwei; Lee, George C. (2018). *Application of Ultra-High Performance Concrete in bridge engineering. Construction and Building Materials*, 186(), 1256–1267. [doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.08.036](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.036)
- [4] Bajaber, M.A.; Hakeem, I.Y. (2021). UHPC evolution, development, and utilization in construction: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 10(), 1058–1074. [doi:10.1016/j.jmrt.2020.12.051](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.051)
- [5] Akhnouk, A. K., & Buckhalter, C. (2021). Case Studies in Construction Materials Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications, and current challenges. *Case Studies in Construction Materials*, 15(January), e00559. [doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00559](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00559)
- [6] Tazarv, Mostafa; Saïidi, M. Saïid (2015). UHPC-filled duct connections for accelerated bridge construction of RC columns in high seismic zones. *Engineering Structures*, 99(), 413–422. [doi:10.1016/j.engstruct.2015.05.018](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.05.018)
- [7] Haber, Z. B., Munoz, J. F., De la Varga, I., & Graybeal, B. A. (2018). Bond characterization of UHPC overlays for concrete bridge decks: Laboratory and field testing. *Construction and Building Materials*, 190, 1056–1068. [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.167](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.167)
- [8] Zhang, Y., Zhu, Y., Yeseta, M., Meng, D., Shao, X., Dang, Q., & Chen, G. (2019). Flexural behaviors and capacity prediction on damaged reinforcement concrete (RC) bridge deck strengthened by ultra-high performance concrete (UHPC) layer. *Construction and Building Materials*, 215, 347–359. [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.229](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.229)
- [9] Ye, M., Guo, Z., Chen, C., & Chen, Y. (2021). Shaking table test study on seismic performance of UHPC rectangular hollow bridge pier. *Composite Structures*, 275, 114435. [doi:10.1016/j.compstruct.2021.114435](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114435)
- [10] Zhang, X., Lu, Y., Wu, X., Wang, P., Li, R., Liu, Y., & Shen, C. (2023). Constitutive model for ultra-high performance concrete (UHPC) considering the size effect under cyclic compressive loading. 368(January). [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130499](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130499)

- [11]Zhang, S. S., Wang, J. J., Lin, G., Yu, T., & Fernando, D. (2023). Stress-strain models for ultra-high performance concrete (UHPC) and ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) under triaxial compression. 370(January). [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130658](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130658)
- [12] Gholhaki .M , Soleymani.A , Rezayfar , O .(2019) .Determining Coefficient Behavior of Reinforced Moment Frame Having the Steel Plate Shear Wall using incremental Non-linear Dynamic Analysis. Journal of Ferdowsi Civil Engineering . [doi:10.22067/civil.v32i4.62958](https://doi.org/10.22067/civil.v32i4.62958). (In Persian)
- [13] Abbasi .T , Navayi.B , Kalani sarokolayi , L .(2018) . Effect of Far and Near Fault Earthquake on Non-niform Excitation of Concrete Gravity Dams. Journal of Ferdowsi Civil Engineering. [doi:10.22067/civil.v32i2.66860](https://doi.org/10.22067/civil.v32i2.66860). (In Persian)
- [14] Kalani sarokolayi . L, Khanmohammadi. L , Navayi.B , .(2023) . Concrete Cubic Ground Tanks with Base Separator Under the Transitional and Rotational Components of Earthquake. Journal of Ferdowsi Civil Engineering.[doi10.22067/JFCEI.2023.80361.1206](https://doi.org/10.22067/JFCEI.2023.80361.1206) (In Persian)
- [15] Esmaeiltabar. P , Khosravi. H , Vaseghi. J , .(2023) . A Simplified Model for Dual Wall-Frame System. Journal of Ferdowsi Civil Engineering. [doi:10.22067/Jfcej.2022.74215.1102](https://doi.org/10.22067/Jfcej.2022.74215.1102). (In Persian)
- [16] Shinozuka, M., Feng, M. Q., Member, A., Kim, H., & Kim, S. (2000). Nonlinear procedure for fragility curves development NONLINEAR STATIC PROCEDURE FOR FRAGILITY. [doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2000\)126:12\(1287\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:12(1287))
- [17] Whitman, R.V., Vanmarcke, E.H., de Neufville, R.L., Brennan, J.E.I, Cornell, C. A., and Biggs, J.M. (1975). Seismic design decision analysis. Journal of the Structural Division, 101(5),1067-1084. [doi.org/10.1061/JSDEAG.0004049](https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0004049)
- [18] Shinozuka, M. (1998). Development of bridge fragility curves. Proceedings of the US-Italian Workshop on Seismic Evaluation and Retrofit, Multidisciplinary Center on Earthquake Engineering Research, 93-99. [doi.org/10.1016/j.probingmech.2003.11.009](https://doi.org/10.1016/j.probingmech.2003.11.009)
- [19] Abbasi, Mohammad; Zakeri, Behzad; Amiri, Gholamreza Ghodrati (2015). Probabilistic Seismic Assessment of Multiframed Concrete Box-Girder Bridges with Unequal-Height Piers. Journal of Performance of Constructed Facilities, (), 04015016-. [doi:10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0000753](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000753)
- [20] Aviram, A., Mackie, K. R., & Florida, C. (2008). PACIFIC EARTHQUAKE ENGINEERING Guidelines for Nonlinear Analysis of Bridge Structures in California. [https://peer.berkeley.edu/sites/default/files/web\\_peer803\\_ady\\_aviram\\_kevin\\_r\\_mackie\\_bozidar\\_stojadinovic.pdf](https://peer.berkeley.edu/sites/default/files/web_peer803_ady_aviram_kevin_r_mackie_bozidar_stojadinovic.pdf)
- [21] Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). Theoretical Strss-Strain Model for Confined Concrete. J. Struct. Eng, 114(8), 1804–1826. [doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))
- [22] Kaviani.Peyman, Zareian. Farzin, Taciroglu. Ertugrul, Performance-Based Seismic Assessment of Skewed Bridges Technical Report, PEER, 2014 . [dx.doi.org/10.13140/2.1.1586.0007](https://dx.doi.org/10.13140/2.1.1586.0007)
- [23] Liang, X., & Mosalam, K. M. (2016). Performance-Based Robust Nonlinear Seismic Analysis with Application to Reinforced Concrete Highway Bridge Systems. Pacific Earthquake Engineering Research Center. [dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20197.09440](https://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20197.09440)
- [24] ASCE/SEI. (2017). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE Standard No. 41-17). American Society of Civil Engineers.
- [25] Islamic Republic of Iran Management and Planning Organization .Standard Loads for Bridges.No 139. (In Persian)
- [26] Islamic Republic of Iran Management and Planning Organization Road and Railway Bridges Seismic Resistant Design code, No 463 (In Persian)
- [27] The Islamic Republic of Iran Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision .The Code of Practice for the analysis and Design of Concrete Bridges.No 389 (In Persian)
- [28]American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008
- [29]Roudgari, S. Aziminezhad, A. Seyed Razaghi, M. Emami,f. (2019). Seismic Fragility Curves of Multi-Span Highway Bridges Considering Multiple Damage Parameters. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES) (In Persian)

- [30] Pereiro-Barceló, J.; Bonet, J.L.; Martínez-Jaén, B.; Cabañero-Escudero, B. Design Recommendations for Columns Made of Ultra-High-Performance Concrete and NiTi SMA Bars. *Buildings* 2023, 13, 991. [doi.org/10.3390/buildings13040991](https://doi.org/10.3390/buildings13040991)
- [31] Naeimi, Negar, Moustafa, Mohamed A, Analytical Stress–Strain model for steel spirals-confined UHPC, *Composites Part C: Open Access*, 2021, [doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100130](https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100130)
- [32] Federal Highway Administration, Design and Construction of UHPC-Based Bridge Preservation and Repair Solutions (Washington, DC: 2022) [doi.org/10.21949/1521867](https://doi.org/10.21949/1521867).
- [33] Dai, Jiancheng & Wang, Dongsheng & Chen, Xiao-Yu & Zhang, Rui & Sun, Zhi-Guo. (2022). Assessment of an optimal intensity measure for isolated bridges based on the geometric mean of the response spectrum. 10.21203/rs.3.rs-2177127/v1
- [34] FEMA, 2009, Quantification of Building Seismic Performance Factors, FEMA P-695, prepared by Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- [35] Akbari, Reza (2012). Seismic fragility analysis of reinforced concrete continuous span bridges with irregular configuration. *Structure and Infrastructure Engineering*, 8(9), 873–889. [doi:10.1080/15732471003653017](https://doi.org/10.1080/15732471003653017)
- [36] Azaronyad, F. Definition, explanation and how to draw fragility curves. 2020. Books (In Persian)
- [37] HAZUS, 1997. Earthquake loss estimation methodology. Technical Manual. Washington, DC: National Institute of Building for the Federal Emergency Management Agency