

بهترین معیارهای شدت زلزله برای ارزیابی لرزه‌ای پل‌های چند دهانه بتنی شاه تیر جعبه‌ای با تاکید بر زلزله‌های حوزه نزدیک

هودین ملک‌زاده

دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی زلزله، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی،

تهران، ایران

حسن عباسی*

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

محمود حسینی

دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

آرمین عظیمی‌نژاد

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

محمد رضا ادیب‌رمضانی

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

Hassan.abbasi.iau@gmail.com

تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۵/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۹

چکیده:

معیارهای شدت زلزله اهمیت فوق‌العاده‌ای در ارزیابی احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای انواع سازه‌ها دارند. در این میان انتخاب دقیق معیارهای با کیفیت شدت زلزله به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌های شریان حیاتی مانند پل‌های بزرگراهی بسیار با اهمیت است. در این مطالعه به منظور بررسی کیفیت معیارهای شدت زلزله، شاخص‌های تعیین‌کننده‌ای نظیر بهینه و کاربردی بودن (Efficiency & Practicality)، شاخص کارایی (Proficiency)، کفایت (Sufficiency) نسبت به بزرگا (M_w) و فاصله (R) و در نهایت کفایت نسبی (Relative Sufficiency) بررسی شده‌اند. در این مطالعه ۱۰ مدل از پل‌های شاه تیر جعبه‌ای بتنی با عرشه پیوسته به عنوان یکی از مهمترین پل‌های ساخته شده در مناطق لرزه‌خیز جهان در نرم افزار اپنسیس (OpenSees) مدل سازی و به وسیله ۱۶۴ رکورد زلزله حوزه نزدیک ۳ مؤلفه‌ای تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی شده‌اند. در این پژوهش ۵ پارامتر تقاضای مهندسی مرتبط به عرشه و ستون‌ها و ۲۴ مورد از معیارهای شدت مرتبط به مؤلفه‌های قائم و افقی زلزله برای ارزیابی کیفیت معیارهای شدت برای پارامتر پاسخ در نظر گرفته شده‌اند. در مجموع بیش از ۸۲۰۰ تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی صورت گرفته و برای هر پارامتر پاسخ، ۵ معیار برتر شدت زلزله با توجه به نوع پل مورد بررسی و زلزله‌های اعمال شده به سازه معرفی شده‌اند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد، بیشینه شتاب زمین مرتبط به مؤلفه افقی (PGVH) و شدت طیف سرعت (VSI_H) و شدت هاوژنر (HI_H) مرتبط به مؤلفه افقی از جمله مناسب‌ترین معیارهای شدت هستند.

کلید واژگان: پل بزرگراهی شاه تیر جعبه‌ای بتنی، نرم افزار اپنسیس (OpenSees)، معیارهای شدت زلزله، پارامترهای تقاضای مهندسی، تحلیل تاریخچه زمانی، معیار بهینه شدت زلزله.

۱- مقدمه

پل‌ها یکی از مهم‌ترین و در عین حال از جمله آسیب پذیرترین سازه‌ها در مهندسی عمران هستند. آسیب به پل‌های بزرگراهی منجر به قطع ارتباط قسمت قابل توجهی از یک شبکه بزرگراهی شده و علاوه بر خسارت‌های مالی، مانع از واکنش‌های سریع بعد از زلزله می‌گردد. یکی از متداول‌ترین کلاس پل‌های موجود در نواحی لرزه‌خیز، پل‌های چند دهانه‌ی پیوسته‌ی بتنی با عرشه‌ی جعبه‌ای هستند. در این کلاس از پل‌ها، اتصال روسازه به پایه‌ها، عموماً به صورت صلب صورت گرفته و عملکرد پل، قالباً گونه است.

مناسب‌ترین چارچوب ارائه شده برای آنالیز احتمالاتی ریسک زلزله‌ای سازه‌ها، چارچوب عرضه شده توسط مرکز مطالعات مهندسی زلزله (PEER) است. استراتژی به کار رفته در این چارچوب جدا کردن عدم قطعیت‌های موجود در مراحل مختلف ارزیابی ریسک با استفاده از تئوری احتمال کل است. این عدم قطعیت‌ها در مراحل چون خطرپذیری زلزله، رفتار سازه (عدم قطعیت‌های موجود در پاسخ سازه و آسیب وارد بر آن) و پی‌آمدهای زلزله (عدم قطعیت‌های موجود در خسارت مالی و زمان از کار افتادگی و غیره) وجود دارند [۱]. با استفاده از متغیرهای واسطه شامل معیار شدت (IM)، پارامتر تقاضا مهندسی (EDP) و معیار آسیب‌دیدگی (DM) میتوان درک بهتری از مفاهیم ریسک لرزه‌ای پیدا کرد. در شکل (۱) مراحل کلی ارزیابی ریسک لرزه‌ای نشان داده شده است. در مراحل شرح داده شده معیارهای شدت زلزله از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردارند و یکی از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی انتخاب معیارهای شدت زلزله برای ارزیابی لرزه‌ای سازه مورد نظر و زلزله‌های اعمال شده بر آن است.



بر اساس همکاری مشترک کراوینکلر^۲ و کرنل [۲] که موجب پیشرفت چارچوب مهندسی زلزله بر اساس عملکرد شد، استفاده از مفاهیم توابع

آسیب در ارزیابی آسیب‌پذیری پل‌های بزرگراهی بیشتر مد نظر و توجه قرار گرفت. توابعی که بعداً توسط کرنل و همکاران به عنوان توابع احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای معرفی گردید. کرنل و همکاران [۳] مفاهیم مهندسی زلزله بر پایه عملکرد، را بر اساس این ۴ گام تعریف نمودند:

(۱) آنالیز خطر لرزه‌ای (۲) تحلیل پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها (۳) تحلیل آسیب و (۴) تخمین و برآورد خسارت در اجزا یا کل سازه.

بر این اساس بدست آوردن تابع احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای (PSDM) از اهمیت فراوانی برخوردار است. در مفاهیم احتمالاتی، تقاضا و پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها با مفاهیمی چون تابع تقاضای احتمالاتی لرزه‌ای برآورد میشود. در حالت کلی این تابع در حقیقت ارتباط میان بیشینه پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها (به عنوان مثال در سازه پل بیشینه شتاب یا جابجایی در اعضای مهم مانند عرشه یا تکیه‌گاه‌های الاستومریک) و پارامترهای شدت جنبش زمین نظیر بیشینه شتاب^۷ زمین (PGA) یا بیشینه سرعت (PGV) و پارامتر شتاب^۸ طیفی (Sa(T)) در پریودهای مختلف را بیان میکند. از زمانی که این مبحث مطرح گردید، کاربردهای گسترده‌ای در حوزه مهندسی زلزله برای آن تعریف شد که مهم‌ترین آن ارتباط پارامتر پاسخ و شدت ورودی زلزله می‌باشد.

از جمله مواردی که به وسیله تابع تقاضای احتمالاتی لرزه‌ای بیان می‌شود، احتمال مشروط فرا گذشت یک تقاضای سازه‌ای (D) از یک مقدار تعریف شده (d) به ازای یک پارامتر شدت لرزه‌ای (IM) مشخص است. این مفهوم در قالب رابطه (۱) قابل بیان است.

$$P[D \geq d | IM] = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(d) - \ln(S_D)}{\beta_{D|IM}}\right) \quad (1)$$

در این رابطه $\Phi()$ تابع توزیع تجمعی نرمال^۹ استاندارد است، (d) مقدار بیشینه یا پسماند تقاضا^{۱۰}، (S_D) مقدار میانه تقاضا^{۱۰} بر حسب شدت زلزله و $\beta_{D|IM}$ انحراف استاندارد لوگ نرمال^{۱۰} است که عموماً با عنوان پراکندگی

⁷ Standard normal cumulative distribution function

⁸ Peak or residual demand

⁹ Median value of the demand in terms of an IM

¹⁰ Logarithmic standard deviation of the demand conditioned on the IM.

¹ Moment frame action (MFA)

² Krawinkler

³ Probabilistic seismic demand model

⁴ Peak ground acceleration

⁵ Peak ground velocity

⁶ Spectral acceleration

۱-۱- مروری بر مهم‌ترین پژوهش‌های پیشین

مک کای و استویادینویک^{۱۹} [۴] بهینه بودن ۱۵ پارامتر شدت لرزه‌ای برای پل‌های رو گذر بزرگراهی که عمدتاً تک دهانه هستند در ایالت کالیفرنیا بررسی کردند. بر این اساس شتاب طیفی (Sa) و جابجایی طیفی (Sd) در پیوند طبیعی سازه به عنوان پارامترهای شدت برتر انتخاب گردید. ماکریس و بلک [۵] در تحقیقی با تمرکز بر زلزله‌های حوزه نزدیک برای ارزیابی سازه متوجه شدند بیشینه سرعت زمین (PGV) پارامتر شدت مناسب و بهینه‌ای می‌باشد.

پدگت و همکاران [۶] در تحقیقی که برای مشخص کردن بهینه‌ترین پارامترهای شدت زلزله برای پل‌های چند دهانه شاه تیر فلزی با تکیه‌گاه ساده انجام شد، دریافتند که پارامتر بیشینه شتاب زمین (PGA) در زمینه‌های همچون کفایت داشتن، بهینه و کاربردی بودن و قابلیت محاسبه خطر و همچنین پارامتر ترکیبی کارایی بهینه‌ترین پارامتر شدت برای بیان آسیب در این سازه به شما می‌رود.

برادلی و کوبرینوفسکی [۷] در پژوهشی برای مشخص کردن بهینه‌ترین پارامترهای شدت در پل‌هایی با پی‌های شمعدار^{۲۲} مشخص کردند پارامترهای شدت وابسته به سرعت برای پیشبینی پاسخ مناسب و بهینه هستند و به خصوص پارامتر شدت طیف سرعت^{۲۳} گه انتگرال طیف سرعت در یک پیوند مشخص بیان می‌کند، بهینه‌ترین پارامتر محسوب می‌شود. وانگ و همکاران [۸] در تلاش برای یافتن پارامترهای شدت بهینه برای توابع تقاضای احتمالاتی لرزه‌ای برای پل‌های چند دهانه شاه تیر فلزی پیوسته از میان ۱۸ پارامتر شدت زلزله که برای این مطالعه انتخاب شده بود، دریافتند که پارامترهای بیشینه سرعت زمین و شدت طیف سرعت در حقیقت مناسب‌ترین پارامترها برای پیشبینی آسیب هستند.

وانگ و همکاران [۹] با در نظر گرفتن اندر کنش خاک و سازه در مورد سازه پل چند دهانه شاه تیر فلزی پیوسته و تقسیم پارامترها به صورت مرتبط به مؤلفه‌های قائم و افقی مشخص کردند، پارامتر بیشینه سرعت زمین بهینه‌ترین پارامتر در پیش‌بینی آسیب در اعضا سازه می‌باشد و اثر

بیان می‌شود. رابطه بین میانه تقاضا و شدت زلزله در فرم توانی را میتوان به صورت رابطه (۲) بیان کرد.

$$S_D = a \cdot IM^b \quad (2)$$

رابطه مذکور در فضای لگاریتمی به شکل رابطه (۳) قابل ارائه است. در این فضا $\ln(a)$ عرض از مبدا و مقدار (b) شیب خط می‌باشد و با استفاده از رگرسیون گیری خطی قابل محاسبه خواهد بود.

$$\ln(S_D) = \ln(a) + b \cdot \ln(IM) \quad (3)$$

و مقدار پارامتر پراکندگی تقاضا از رابطه (۴) قابل محاسبه دستیابی است.

$$\beta_{D|IM} \cong \sqrt{\frac{\sum (\ln(d_i) - \ln(S_D))^2}{N - 2}} \quad (4)$$

با توجه به نکات بیان شده توابع احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای ارتباط میان بیشینه پاسخ‌ها و پارامترهای شدت را بیان می‌کنند. در این ارتباط نقش معیار شدت زلزله (IM) بسیار حیاتی بوده و انتخاب درست و دقیق آن از اهمیت بالایی برخوردار است. از میان تمام پارامترهای شدت، آن‌هایی که به نوعی دارای ارتباط مناسب^{۲۴}تری با پارامتر پاسخ هستند و بدین شکل مقدار دقیق خسارت را پیش‌بینی میکنند، جزو بهینه‌ترین پارامترهای^{۲۵} شدت هستند. بر این اساس تحقیقاتی در زمینه مشخص کردن پارامترهای شدت بهینه در سال‌های اخیر شکل گرفته است که این پژوهش‌ها بهینه بودن پارامترهای شدت را در زمینه کفایت داشتن^{۲۶}، بهینه^{۲۷} و کاربردی بودن^{۲۸} و همچنین پارامتر ترکیبی کارایی^{۲۹} و کفایت نسبی^{۳۰} بررسی و مناسب‌ترین پارامتر شدت را برای پیشبینی آسیب در سازه مورد نظر با توجه با زلزله‌های وارده بر آن مشخص می‌کنند. اکثر این تحقیقات حوزه برای زلزله‌های حوزه دور انجام شده است و در زمینه اثرات زلزله‌های حوزه نزدیک خلا تحقیقاتی وجود دارد.

¹⁹ Mackie & Stojadinovic (2001)

²⁰ Makris & Black

²¹ Padget et al

²² Pile foundations

²³ Velocity spectrum intensity

¹¹ Satisfactory correlation

¹² Optimal IMs

¹ Sufficiency 4

¹ Efficiency 5

¹ Practicality 6

¹ Proficiency 7

¹ Relative sufficiency 8

۲- معرفی نوع پل مورد بررسی

در این مطالعه به علت دسترسی به اطلاعات پل‌های موجود در ایالت کالیفرنیا، از نظر هندسه ی غالب و مدل‌های طراحی پل‌های این ناحیه، از این داده‌ها برای ساخت مدل‌ها استفاده می‌شود. پل‌های بتنی چند دهانه پیوسته با عرشه شاه تیر جعبه‌ای که به اختصار (MSCC-BG) نامیده می‌شوند از جمله پر تعداد ترین پل‌ها در آمریکا، ایالت کالیفرنیا و همچنین سایر نقاط لرزه‌خیز دنیا هستند. بر اساس جدیدترین آمار فهرست ملی پل آمریکا در سال ۲۰۱۹ این نوع پل بیش از ۳۷٪ کل پل‌های ایالت را شامل می‌شود و براساس یک بررسی ویژه توسط صراف شیرازی و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۱۴] نوع تک قابی این نوع پل که در حقیقت مفصل درون عرشه ندارد (عرشه پیوسته) مهمترین سازه پل در ایالت کالیفرنیا از نظر تعداد است. در این مطالعه ۳ نوع پل ۳،۲ و ۴ ستونه که ۳ دهانه هستند، مورد بررسی قرار گرفتند که همگی دارای کوله نشیمن دار می‌باشند. علت بررسی مدل‌های ۲ و ۳ ستونه (چند ستونی) در این رساله آسیب‌پذیری بالای آن‌ها نسبت به مدل‌های تک ستونی که در تحقیقات برندنبرگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۱۵] به آن اشاره شده است.

۲-۱- دوره طراحی مورد بررسی

دوران طراحی پل‌ها و سیر تکاملی آنها در طول سه دوران طراحی متفاوت که توسط زلزله‌های تاریخی و مشهور سال ۱۹۷۱ سن فرناندو و سال ۱۹۸۹ لوما پریتا از هم تفکیک شدند. این دسته‌بندی توسط مطالعات راماناتان [۱۶] با بررسی دقیق نقشه‌های سازه‌ای پل‌های مربوط به دورانهای طراحی مختلف و با استفاده از اطلاعات پایگاه کلترنس^۸ و همچنین بر اساس تحقیق از آرشیو جمع آوری داده‌های پل در آمریکا (NBI) گردآوری شده است. زلزله سال ۱۹۷۱ سان فرناندو، اهمیت و ضرورت وجود جزئیات تفصیلی لرزه‌ای خاص جهت تأمین خاصیت شکل‌پذیری در سازه‌های پل را اثبات کرد و منجر به معرفی روشهای طراحی مبتنی بر ظرفیت در استانداردهای طراحی پل‌ها شد. این عوامل در خصوصیات طراحی کلترنس در سال ۱۹۷۳ طرح شدند [۱۶]. باید توجه داشت به این دلیل که در این دوره طراحی صرفاً بعضی از جزئیات شکل‌پذیری در سیستم به وجود آمده و علی‌رغم پیشرفتهای حاصله نسبت به دوره قبلی همچنان آسیب‌پذیری بالایی دارد، تمامی مدل‌های تحلیلی مورد استفاده در این مطالعه بر اساس

همزمان پارامترهای مرتبط به مؤلفه‌های افقی و قائم در بدست آوری میزان آسیب در اعضای سازه حیاتی است در این پژوهش از ۴۰ رکورد حوزه نزدیک استفاده شده است.

وانگ و همکاران [۱۰] در تحقیقی بهینه بودن ۲۶ پارامتر شدت ورودی زلزله را بررسی کردند. تمرکز این پژوهش بر پل‌های تک ستونه با تکیه‌گاه ساده در خاک‌های روانگرا بود. در این پژوهش نتیجه بر این شد که پارامترهای شدت مرتبط به سرعت مانند بیشینه سرعت زمین از پارامترهای شدت مرتبط به شتاب و جابجایی در خاک‌های روانگرا بهینه‌تر هستند. ژونگ و همکاران [۱۱] یک سازه پل کابلی در چین را مورد مطالعه قرار دادند. این پژوهش بر مبنای رکوردهای حوزه دور و نزدیک انجام شد و بر این اساس پارامتر بیشینه سرعت زمین به عنوان بهینه‌ترین پارامتر انتخاب شد.

چن [۱۲]، در پژوهشی در مورد پل‌های با ارتفاع ستون بسیار بلند (احداث شده در دره‌ها و مناطق با توپوگرافی ناهموار و کوهستانی در کشور چین)، بهینه بودن ۳ پارامتر شدت (بیشینه شتاب، سرعت و جابجایی) بر اساس زلزله‌های حوزه نزدیک بررسی و مشخص شد برای این نوع پل، پارامتر بیشینه سرعت بهینه‌ترین است.

در پژوهشی تکمیلی توسط ملک زاده و همکاران [۱۳] بهینه بودن ۲۸ معیارهای شدت زلزله برای چندین پل بزرگراهی شاه تیر جعبه‌ای بتنی پیوسته توسط رگرسیون عمل گرگزینش و انقباض کمترین قدر مطلق (لاسو) و گام به گام پیشرو بررسی شده و با معیارهای موجود در ادبیات فنی مقایسه شده و در نهایت با استفاده از معیارهای شدت بهینه نهایی شده رابطه آسیب‌پذیری برای ۱۲ مورد از مهم‌ترین پارامترهای تقاضای مهندسی ایجاد شده است. در این مطالعه شدت طیف سرعت و بیشینه سرعت زمین بهینه‌ترین معیارهای شدت هستند.

در این پژوهش با توجه به تاکید بر زلزله‌های حوزه نزدیک که در مطالعات پیشین کمتر به آن توجه شده، برای نخستین مرتبه در این حوزه پژوهشی اثر همزمانی مؤلفه‌های قائم و افقی شتاب زمین در تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی سازه پل لحاظ شده است. این موضوع با توجه نوع پل، زلزله‌های انتخاب شده و در نهایت پارامترهای تقاضای مورد بررسی اهمیت ویژه‌ای داشته و میتواند خلاهای تحقیقاتی در این حوزه را برطرف نماید.

² Multi-span continuous concrete box girder

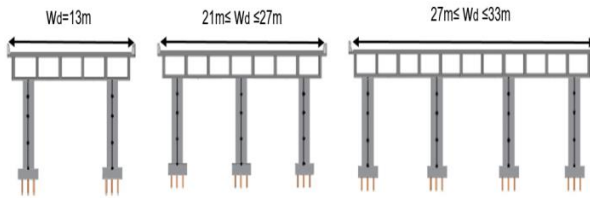
² Caltrans

² National Bridge Inventory

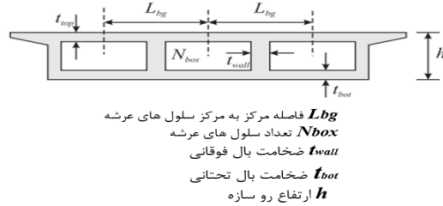
²⁴ Zhong et al (2019)

² least absolute shrinkage and selection operator (Lasso)

² Step-wise regression forward selection algorithm



شکل ۲- مدل شماتیک مقطع عرضی پل‌های مدل شده در نرم‌افزار اپنسیس
جزئیات مدل‌سازی پل‌های مورد نظر و مشخصات طراحی آن در جدول (۱) آمده است. شکل (۳) جهت درک بهتر از مشخصات عرشه به خصوص ضخامت بال‌ها و دیواره‌ها در پل‌های با عرشه جعبه‌ای در این قسمت بیان شده است.



شکل ۳- مشخصات مقطع عرضی پل‌های باکس بتن آرمه
(پارامترهای مرتبط با عرشه)

جزئیات طراحی پل‌ها در دوره طراحی ۱۹۷۱ تا ۱۹۹۰ موسوم به دوره میانی طراحی شدند. لازم به ذکر است تعداد بسیار زیادی از پل‌ها در این دوره طراحی در ایالت کالیفرنیا احداث شده‌اند.

۲-۲- مدل‌سازی تحلیلی پل‌های مورد نظر

در این مطالعه مدل‌های پل بصورت سه بعدی و با شش درجه آزادی در نرم‌افزار اپنسیس (*OpenSees*)^۳ مدل‌سازی شده‌اند [۱۷].، پایه‌ها و عرشه در این کلاس پل، به صورت یکپارچه اجرا شده و لذا پل دارای عملکرد قاب گونه می‌باشد. به دلیل پرکاربرد بودن کوله‌های نشیمن‌دار و البته تعداد پل‌های اجرا شده موجود در دنیا بر اساس این مدل کوله، در این پژوهش کوله پل‌ها از نوع نشیمن‌دار می‌باشد. در کوله‌های نشیمن‌دار، عرشه به وسیله تکیه‌گاه‌ها بر روی نشیمن کوله قرار گرفته و به وسیله یک درز انبساطی از دیواره پستی کوله مجزا می‌گردد. تعداد ۱۰ عدد پل ۳ دهانه که دارای یک دهانه اصلی^۱ و ۲ دهانه تقرب^۲ (دهانه فرعی) برای انجام پژوهش مدل‌سازی شده‌اند. بر این اساس برای مدل‌سازی این پل‌ها دو مقدار ۳۰ متر و ۳۶ متر به عنوان طول دهانه اصلی برای پل‌ها در نظر گرفته شد و برای محاسبه طول مورد نیاز دهانه‌های تقرب از نسبت (طول دهانه اصلی به طول دهانه تقرب) پیشنهادی کلترنس و رساله‌های مختلف استفاده شده است. این نسبت‌های برای پل‌های بتنی پیش تنیده ساخته شده در دوره میانی برابر با ۰/۷۵ است [۱۶]. اعداد انتخاب شده برای طول دهانه اصلی بر اساس میانگین مقدار گزارش شده در توزیع نرمال برای پل‌های ایالات متحده است. همچنین ارتفاع در نظر گرفته برای ستون‌های دایره شکل پل‌ها متناسب با عدد ارتفاع گزارش شده بر اساس میانگین توزیع نرمال ارتفاع ستون‌ها برای پل‌های ایالت کالیفرنیا که بعد از ۱۹۷۰ ساخته شده‌اند. به عبارت ابعاد و اندازه‌های انتخاب شده به نحوی انتخاب شده‌اند که نماینده تعداد بسیار از پل‌های ساخته شده در ایالت کالیفرنیا و ایالات متحده باشند. در این مدل از پل‌ها عرض عرشه متناسب با تعداد ستون‌ها بوده و از ۱۳ متر در مدل ۲ دهانه تا ۳۳ متر در ۴ ستونه متغیر خواهد. شکل (۲) مقطع عرضی پل‌های مورد مطالعه را نمایش می‌دهد.

³ Approach span

³ Open system for earthquake engineering simulation

³ Main span

سازی در اینسیس در جدول (۳) و شکل (۴) برای هر یک از اجزا پیل درج شده است. در جدول (۲) کلید برشی از ۷۵ درصد ظرفیت برشی شمع‌های کوله به اضافه ی یکی از دیوارهای کناری نباید بیشتر نشود.

جدول ۱- مشخصات طراحی مدل های تحلیلی این پژوهش

تعداد دهانه ها		۳		
مشخصات ستون ها				
ارتفاع ستون (متر) (Hc)		۶/۷۹		
قطر ستون (متر) (Dc)		۱/۵۲		
تعداد آرماتور های طولی ستون نمره ۱۱		۴۳		
فاصله آرماتور های عرضی (سانتی متر) (خاموت نمره ۴)		۵/۵		
قطر کاور بتنی ستون (متر)		۰/۰۵		
سایر مشخصات سازه ای		تعداد ستون ها در قاب		
		۲	۳	۴
مشخصات رو سازه	طول دهانه اصلی (متر) (L)	- ۳۰/۴۸	- ۳۰/۴۸	- ۳۰/۴۸
	طول دهانه تقرب (متر) (L)	۳۶/۵۷	۳۶/۵۷	۳۶/۵۷
	عرض عرشه (متر) (Wd)	۲۷/۴۳	۲۷/۴۳	۲۷/۴۳
مشخصات عرشه شاه- تیر جعبه ای	تعداد سلول های مقطع عرشه (Nbox)	۵	۹ - ۷	۱۱ - ۹
	ارتفاع روسازه (متر) (hd)	۱/۱-۲۲/۴۶	۱/۱-۲۲/۴۶	۱/۱-۲۲/۴۶
	ضخامت بال فوقانی مقطع عرشه (سانتی متر) (ttop)	۰/۲	۰/۲	۰/۲
	بال تحتانی مقطع عرشه (ضخامت) (سانتی متر) (tbot)	۰/۱۶۵	۰/۱۶۵	۰/۱۶۵
	ضخامت دیواره ها (جان) مقطع عرشه (سانتی متر) (twall)	۰/۳۰۴	۰/۳۰۴	۰/۳۰۴
	فاصله مرکز به مرکز سلول های عرشه (متر) (Lbg)	۲/۶۶	۳/۰۴	۳/۰۴
مشخصات فنر های مدل شده شالوده	سختی انتقالی فنر های شالوده (kN/m)	۳ ۵۲۲۵/۳		
	دورانی فنر های شالوده (kN-m/rad)	(صفر) ۰		
مشخصات خاک پشت کوله ها				
***مقاومت اولیه خاک پشت کوله	مقدار پیشنهادی بر اساس نوع خاک دانه ای (kN/mm/m)	۲۹		

تعداد ۱۰ مدل از این پیل ها با توجه پارامتر های جدول (۱) و (۲) ایجاد شده است. در انتخاب ابعاد مدل های علاوه بر داده های بر داده های پایگاه ملی پیل از گزارش رساله رماناتان هم بهره برده شده است. پارامتر های هندسی مدل های ایجاد شده بر اساس دوره میانی طراحی پیل در کالیفرنیا و براساس مقدار میانه توزیع آماری مرتبط محاسبه شده است.

جدول ۲- مشخصات مصالح و توزیع آماری آن ها

منبع مورد استناد	واحد	مقدار میانگین توزیع آماری	نوع توزیع آماری	خصوصیات مدل سازی مورد استفاده در مدل های تحلیلی	
[۱۸]	MPa	۶/۱۳	لوگ- نرمال	مقاومت فولاد (مگا پاسکال)	
[۱۹]	MPa	۳۳/۸	نرمال	مقاومت بتن (مگا پاسکال)	
[۱۶]	%	*۲/۳۵	یکنواخت	درصد آرماتور طولی مدل های پیل (بر مبنای دوره میانی)	
	%	*۰/۶۰	یکنواخت	درصد آرماتور عرضی مدل های پیل (بر مبنای دوره میانی)	
	-	۱/۲۵	یکنواخت	ضریب جرم میرایی	
	-	۰/۰۴۵	نرمال	میرایی	
	m	۱/۸۲	یکنواخت	ارتفاع دیوار پشتی کوله (کوله های نشیمن دار)	
	kN/m	*۱۴۰۱۰	لوگ - نرمال	مقاومت موثر شمع های کوله (شمع های در جا ریز)	
	mm	۱۹/۰۸	یکنواخت	فاصله طولی بین عرشه و تکیه گاه نشیمن دار (درز آب بند)	
	MPa	۱/۳۶۵	یکنواخت	مدول برشی تکیه گاه های الاستومریک	
	[۲۲-۲۳]	-	۰/۹۲-	لوگ- نرمال	ضریب اصطکاک
	[۲۵-۲۴]	%	۷۵	یکنواخت	ظرفیت کلید های برشی خارجی

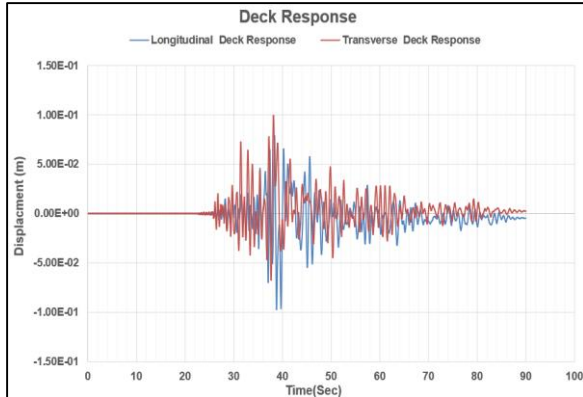
*مقدار میانگین در توزیع آماری یکنواخت بر اساس دوران طراحی

** مقدار میانگین مرتبط بر اساس توزیع آماری نرمال در زمینه توزیع لوگ- نرمال

***بر اساس مقدار پیشنهادی از پژوهش شمس آبادی [۲۶] و [۲۷] بر اساس واحد عرض دیوار پشتی کوله تعیین شده است.

در تمامی آنالیز های قطعی انجام شده، تمامی پارامتر های مرتبط به هندسه و اجزای پیل از مقادیر میانه توزیع های مرتبط، و همه مشخصات مصالح بر اساس مقدار میانگین توزیع های آماری مرتبط استخراج شده اند. این پارامتر ها با مطالعات پیشین در زمینه آسیب پذیری پیل ها در ایالت کالیفرنیا مقایسه و صحت سنجی شده است. نوع المان های مورد استفاده در مدل

مقاومت فشاری استاندارد ۳۳/۸ مگا پاسکال و مقاومت فولاد تسلیم ۴۱۴ مگا پاسکال و محصور شدگی به وسیله خاموت های نمره ۴ ایجاد میگردد. در شکل (۵) رفتار تاریخچه زمانی عرشه یکی از مدل های ۴ ستونه ترسیم شده است.



شکل ۵- رفتار تاریخچه زمانی عرشه

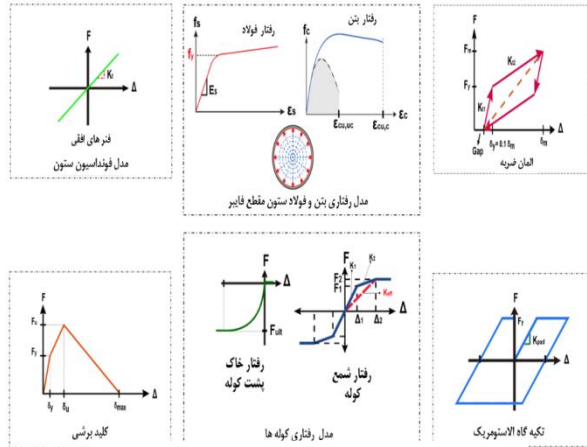
(خط آبی: رفتار طولی، خط قرمز: رفتار عرضی عرشه)

۳- مشخصات رکورد های زلزله

در این مطالعه برای انجام تحلیل های تاریخچه زمانی غیر خطی و تعیین کیفیت هر پارامتر شدت با توجه به پارامترهای پاسخ مد نظر که در ادامه معرفی میگردند، ۱۶۴ رکورد زلزله حوزه نزدیک (با پالس و بدون پالس)، ۳ مؤلفه ای در سطوح خطر مختلف از پایگاه اطلاعاتی پیپر ۳ استخراج شده اند. تمامی این رکوردها، زلزله های حوزه نزدیک هستند و با توجه به فواصل خاصی که در انتخاب زلزله ها اهمیت دارند، برگزیده شده اند. فاصله رو مرکزی R_{zb} (فاصله بیان شده توسط جویئر و بور^۳) (کوتهترین فاصله رو مرکزی از سایت تا محل تصویر صفحه گسیختگی بر روی زمین) و همچنین فاصله R_{rup} (نزدیک ترین فاصله به صفحه گسیختگی) که هر دو این فواصل نهایتاً ۲۰ کیلومتر در نظر گرفته شده اند. علاوه بر استفاده از پایگاه اطلاعاتی PEER، در بررسی و انتخاب زلزله های حوزه نزدیک، چندین منبع اطلاعاتی معتبر از جمله گزارش موقد دباغی و همکاران [۳۲] چاپ شده در سایت PEER، گزارش شماره ۱۱-۹۱۷-۱۵ موسسه استاندارد و تکنولوژی آمریکا NIST با همکاری مشترک با موسسه ATC چاپ شده در سال ۲۰۱۱ و در نهایت رکورد های مختص آنالیز سازه های حمل و نقل گرد آوری شده توسط بیکر و همکاران که مهم ترین مرجع انتخاب

جدول ۳- مشخصات المان ها و مراجع آن ها در اپنسیس (OpenSees)

منبع مورد استناد	نوع مدل سازی و مصالح به کار رفته	اعضای سازه
[۲۱]	المان های تیر-ستونی - الاستیک المان های تیر-ستونی تغییر شکلی با مقطع فایبر	عرشه ستون ها
[۲۸]	رفتار الاستو-پلاستیک خطی به کمک متریبال steel 01 (اعمال شده به المان ها با طول صفر)	تکیه گاه الاستومریک
[۱۹]	رفتار ۲ خطی بر اساس مرجع اعمال شده به المان هایی با طول صفر	المان ضربه
[۲۷]	Uniaxial material hysteretic مدل شبه هذلولی به المان های با طول صفر اعمال شده	شمع های کوله
[۲۹]	Hyperbolic gap material مدل شبه هذلولی به المان های با طول صفر اعمال شده	کوله و خاک پشت آن
[۲۹]	مدل رفتاری steel 02 دارای خاصیت سخت شوندگی کرنشی همسان	آرماتور های تسلیح ستون
[۳۰]	رفتار چرخه ای Uniaxial-Hysteretic به المان های صفر طولی	کلید برشی
[۳۱]	مدل رفتاری دقیق Concrete-07	بتن ستون ها



شکل ۴- رفتار المان ها در اپنسیس (OpenSees)

3 Joyner & Boore

3 PEER NGA-WEST

همزمان با مؤلفه‌های افقی به مدل‌های پل اعمال شده به طوریکه ماهیت دقیق یک زلزله واقعی و اثر آن را شبیه‌سازی نماید.

۴- پارامترهای تقاضای مهندسی (EDPs) مورد استفاده در مطالعه

در بررسی عملکرد لرزه‌ای هر سیستم سازه‌ای انتخاب مهم‌ترین پارامترهایی که بتوانند اثر زلزله، پاسخ سازه و خسارت ناشی از آن را در یک سازه بررسی و تفسیر کنند از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. با توجه به نوع پل‌های انتخاب شده در این پژوهش تعدادی از مهم‌ترین پارامترهای آسیب در این نوع خاص از پل‌ها در این مطالعه در نظر گرفته شده است. پارامترهای در نظر گرفته شده به نحوی انتخاب شدند که خسارت در آن‌ها (با توجه به پیوستگی رو سازه و زیر سازه) موجب خسارت کلی در سایر قسمت‌ها خواهد بود.

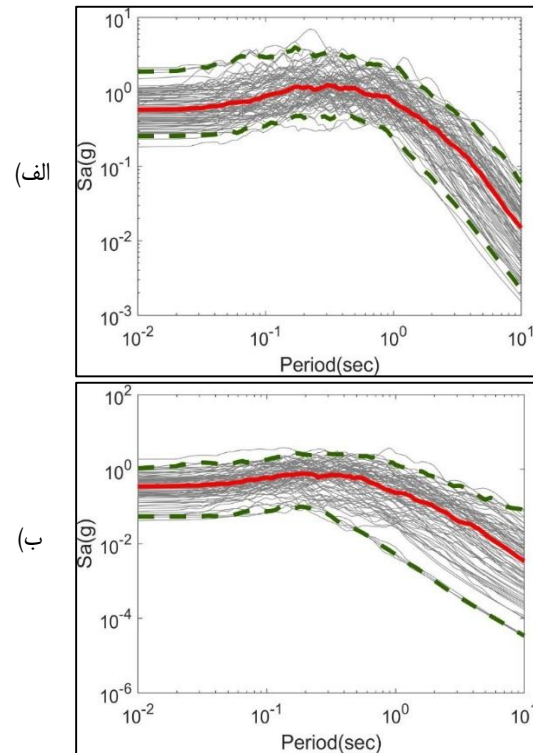
جدول ۵- مشخصات پارامترهای تقاضای مهندسی بررسی شده در مطالعه

راستای بررسی شده	نماد	واحد	پارامتر تقاضای مهندسی	عضو
ستون	DR _{Col}	%	نسبت دریافت (Δ/l)	طولی و عرضی
	μ_ϕ	-	شکل پذیری انحناء	طولی و عرضی
	ALR _{Col}	%	نسبت نیروی محوری	قائم
	SR _{Col}	%	نسبت نیروی برشی	طولی و عرضی
نشیمن کوله (افتادگی عرشه)*	δ_{unseat}	mm	جابجایی	طولی

* جابجایی نسبی عرشه (نسبت به کوله) در کوله‌های نشیمن دار، دور شدن عرشه از کوله که موجب آسیب شدید سیستم سازه ای میگردد.

با توجه به این جدول میتوان دریافت که برای بعضی از پارامترها میزان حداکثر پاسخ نسبت به ۲ جهت طولی و عرضی بررسی شده این موضوع در کنار بررسی پاسخ در هر جهت، میزان پاسخ بحرانی ایجاد شده در عضو را بهتر نمایان میکند.

رکورد در پژوهش‌های معتبر پیشین بوده، نیز بهره برده شده تا دقیق‌ترین مجموعه از زلزله‌های حوزه نزدیک ایجاد شود تا بتوانند خصوصیات آن را نمایندگی کنند [۳۳-۳۴].



شکل ۶- میانگین هندسی پاسخ طیفی مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله‌ها با میرایی ۳ درصد (الف) زلزله‌های با پالس (ب) زلزله‌های بدون پالس

در این پژوهش به منظور انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی، مؤلفه‌های افقی (H_1, H_2) هر زلزله، به صورت رندوم در جهات طولی (اصلی) و عرضی مدل‌های تحلیلی پل اعمال شدند در بسیاری از مطالعات پیشین مؤلفه بزرگ افقی همواره در راستای طولی و مؤلفه کم‌تر افقی همواره در راستای عرضی اعمال میشد، اما در این مطالعه با در نظر گرفتن کاستی‌ها این روش، مؤلفه‌های افقی ۱۶۴ رکورد پس از تفکیک دقیق و اطلاع از میزان بزرگی هر مؤلفه، به صورت توضیح داده شده به مدل‌های مورد بررسی اعمال شده‌اند. همچنین در این مطالعه مؤلفه قائم (V) زلزله نیز به صورت

۵- معیار های شدت زلزله (IMs) مورد مطالعه

به طور کلی پارامتر های شدت زلزله پارامترهایی مانند دامنه، محتوای فرکانسی و زمان موثر زلزله^۳ را نمایندگی می کنند. انتخاب درست پارامترهای شدت بهینه موجب افزایش دقت و قطعیت در پیشبینی عملکرد سازه ها می گردد. همچنین بایستی به این نکته اشاره نمود که میزان عدم قطعیت در پیشبینی پارامترهای تقاضا در سازه ها بستگی بسیار زیادی به معیارهای شدت زلزله مورد استفاده دارد. بر اساس مفاهیم موجود در چارچوب مهندسی زلزله بر اساس عملکرد، یک پارامتر شدت بهینه میتواند قابلیت اعتماد نتایج تحلیل را بیشتر کند. در این پژوهش با تفکیک پارامترهای شدت ورودی به دسته های ذیل اثر آن در رابطه آسیب نهایی به شکل دقیق تری بیان می گردد:

۱- پارامتر های وابسته به سرعت (Velocity-related)

۲- پارامتر های وابسته به جابجایی (Displacement-related)

۳- پارامتر های وابسته به شتاب (Acceleration-related)

۴- پارامتر های وابسته به زمان (Time-related)

همچنین بر اساس پارامتر های شدت زلزله قابل تفکیک به صورت پارامترهای ذیل نیز هستند:

۱- وابسته به سازه و پرپود اصلی آن که در حقیقت از طیف گرفته شده (مرتبط به سیستم سازه ای) (Structure-Specific)

۲- غیر وابسته به سیستم سازه ای که در حقیقت از تحلیل های تاریخچه زمانی به دست آمده است. (Non-Structure-Specific)

۲۴ معیار شدت زلزله وابسته به مؤلفه های افقی و قائم زلزله که در واقع ۱۲ معیار شدت مستقل زلزله هستند در جدول (۶) به همراه جزئیات، تعریف دقیق، واحد و منبع مورد استناد بیان شده اند. در جدول (۶) تعدادی از معیارهای شدت صرفاً نماینده یکی از خصوصیات مهم جنبش نیرومند زمین هستند و البته بعضی چند خصوصیت مهم را نمایندگی میکنند، به عنوان مثال پارامترهای بیک همچون (PGA, PGV, PGD) صرفاً دامنه زلزله را نمایندگی میکنند، پارامترهای تجمعی مانند (CAV) هم دامنه و هم محتوای فرکانسی را نمایندگی می کنند، معیارهایی همچون V_{RMS}, D_{RMS} نماینده هر سه مشخصه زلزله یعنی دامنه، محتوای فرکانسی و مدت زمان جنبش شدید هستند، و در نهایت معیار های طیفی نظیر سرعت یا شتاب طیفی نماینده دامنه و محتوای فرکانسی هستند.

جدول ۶- معیار های شدت زلزله مورد استفاده در پژوهش

منبع مورد استناد	رابطه تعریف شده در منابع	توضیح و مفهوم	پارامتر شدت
غیر وابسته به سیستم سازه ای	$Max \ddot{u}_g(t) $	بیشینه شتاب زمین	PGA_H, PGA_V (وابسته به شتاب) (g)
	$Max \dot{u}_g(t) $	بیشینه سرعت زمین	PGV_H, PGV_V (وابسته به سرعت) (cm/s)
	$Max u_g(t) $	بیشینه جابجایی زمین	PGD_H, PGD_V (وابسته به جابجایی) (cm)
	$\int_0^{t_{tot}} \ddot{u}_g(t) dt$	سرعت مطلق در زمان کل زلزله	CAV_H, CAV_V (وابسته به شتاب) (cm/sec)
	سومین مقدار مطلق بیشترین شتاب در تاریخچه زمانی	بیشینه شتاب پایدار زمین	SMA_H, SMA_V (وابسته به شتاب) (g)
	سومین مقدار مطلق بیشترین سرعت در تاریخچه زمانی	بیشینه سرعت پایدار زمین	SMV_H, SMV_V (وابسته به سرعت) (cm/sec)
وابسته به سیستم سازه ای	$\int_0^{t_{tot}} [\dot{u}_g(t)]^2 dt$	چگالی انرژی ویژه	SED_H, SED_V (وابسته به سرعت) (cm ² /sec)
	$\sqrt{\frac{1}{t_{tot}} \int_0^{t_{tot}} [\dot{u}_g(t)]^2 dt}$	جزر میانگین مجذور سرعت	V_{RMS-H}, V_{RMS-V} (وابسته به سرعت) (cm/sec)
	$S_a, AVG(T_1, \dots, T_n) = \left(\prod_{i=1}^n S_a(T_i) \right)^{1/n}$	میانگین شتاب طیفی	S_{aAVG-H}, S_{aAVG-V} (وابسته به شتاب) (g)
وابسته به سیستم سازه ای	$\int_{0.1}^{2.5} P_{S_v}(\xi = 5\%, T) dT$	شدت طیف هاووزنر	HI_H, HI_V (وابسته به سرعت) (cm)
	$\int_{0.1}^{2.5} S_v(\xi = 5\%, T) dT$	شدت طیف سرعت	VSI_H, VSI_V (وابسته به سرعت) (cm)
	$\int_{0.1}^{0.5} S_a(\xi = 5\%, T) dT$	شدت طیف شتاب	$ASIH, ASIV$ (وابسته به شتاب) (g.sec)

در جدول (۶) میانگین شتاب طیفی (S_{aAVG-H}) به وسیله محاسبه میانگین هندسی شبه شتاب طیفی در یک بازه پرپودی خاص با میرایی ۵ درصد، محاسبه شده است. میزان بیشینه و کمینه پرپود ۰/۲ تا ۲ ثانیه است و میزان گام زمانی در طیف ۰/۰۵ است. تمامی پارامترهای شدت بیان شده در جدول (۶) (۲۴ پارامتر شدت معرفی شده) به وسیله نرم افزار سائزمو سیگنال (*Seismo Signal*) در سه جهت (H_1, H_2, V) محاسبه شده اند و

³ Effective duration

(۳) در رابطه (۱) حاصل می‌گردد. که در نهایت رابطه (۵) را ایجاد می‌نماید [۶].

$$P[D \geq d|IM] = \Phi \left(\frac{\ln(IM) - \frac{\ln(d) - \ln(a)}{b}}{\frac{\beta_{D|IM}}{b}} \right) \quad (۵)$$

البته برای محاسبه این پارامتر رابطه دیگری تحت عنوان پراکندگی اصلاح شده نیز تعریف گردیده است که در رابطه (۶) نشان داده می‌شود.

$$\zeta = \frac{\beta_{D|IM}}{b} \quad (۶)$$

مقدار پارامتر ζ بیان کننده پارامتر کارایی در واقع ترکیبی از مقدار پراکندگی بیان کننده پارامتر efficiency و پارامتر شیب خط رگرسیون Practicality می‌باشد. و مقادیر کمتر پارامتر (ζ) بیان کننده کارایی بیشتر هستند. در واقع در صورتی که مقادیر پراکندگی کم و مقادیر پارامتر b بالا باشد، مقدار کارایی معیار شدت مورد نظر نیز بالاتر خواهد بود.

۴-۴- کفایت داشتن (Sufficiency)

این پارامتر بدین معناست که معیار شدت مورد نظر به بزرگا زلزله (M) و فاصله آن تا گسل لرزه زا (R) وابسته نمی‌باشد. به عبارتی تغییرات در بزرگی و فاصله موجب تاثیر در معیار شدت و گزارش اشتباه نمی‌گردد و معیار شدت فارغ از این دو پارامتر مقدار صحیح را گزارش میکند. در مورد بسیاری از معیار های شدت گزارش شده تا به امروز بسیار از آن ها تحت تاثیر بزرگا و فاصله هستند. پارامتر (Sufficiency) بر اساس تئوری کلی احتمال و بر مبنای آنالیز احتمالاتی^۳ تقاضای لرزه ای پایه گذاری شده است. بر این اساس مقدار میانگین سالانه فرا گذشت از یک مقدار تعریف شده تقاضا (D) به صورت معادله (۷) قابل تعریف است [۶].

$$|IM| \cdot |d\lambda[IM]| \lambda(D) = \int_{IM} P[D \geq d] \quad (۷)$$

در این رابطه پارامتر $\lambda[IM]$ مقدار میانگین سالانه فرا گذشت از هر مقدار معیار شدت دلخواه (IM) می‌باشد. احتمال فرا گذشت به صورت بیان شده در رابطه (۸) و بررسی نسبت به پارامتر های بزرگا و فاصله تنها خصوصیات لازم برای بررسی مقدار کفایت در معیار های شدت هستند.

(۸)

پارامتر های شدت مرتبط به مؤلفه های افقی به وسیله جذر مجموع مربعات (SRSS) تبدیل به ۱ پارامتر (افقی) شدت به نمایندگی از پارامتر های مرتبط به مؤلفه های افقی شده‌اند.

۶- معیار های بررسی کیفیت پارامتر های شدت و انتخاب معیار های بهینه

تمامی ۱۰ پل مدل سازی شده به کمک ۱۶۴ رکورد زلزله انتخاب شده حوزه نزدیک تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی شده‌اند و در واقع هر پارامتر پاسخ میانگین نتایج ۱۶۴۰ تحلیل تاریخچه زمانی است و در مجموع برای ۵ پارامتر پاسخ موجود ۸۲۰۰ تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی صورت گرفته است. باید توجه داشت به دلیل خلاصه نمودن حجم مقاله ارائه شده، نتایج ۱۰ پل به صورت تفکیکی بیان نشده و نتایج پل ها به صورت میانگینی از کل نتایج ارائه می‌گردد و برای ارزیابی کیفیت معیار های شدت زلزله مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معیار ها به شرح ذیل می‌باشند:

۶-۱- بهینه بودن (Efficiency)

پارامتر بهینه بودن برای یک معیار شدت زلزله در حقیقت بدین معناست که آن پارامتر موجب پراکندگی (تغییرات) کمتر در پیشبینی پاسخ سازه و در حقیقت ارتباط میان پارامتر شدت و پارامتر تقاضای مهندسی می‌گردد. مقادیر کمتر پارامتر $\beta_{D|IM}$ بیان گر معیار شدت بهینه می‌باشد. این معیار به کمک رابطه (۴) محاسبه می‌گردد [۱۰].

۶-۲- کاربردی بودن (Practicality)

پارامتر کاربردی بودن معیار شدت در واقع میزان وابستگی پارامتر تقاضا به معیار شدت را مشخص میکند. این معیار به کمک رابطه (۳) محاسبه می‌گردد. پارامتر b در این معادله بیانگر شیب خط رگرسیون (ارتباط خطی پارامتر تقاضا و معیار شدت زلزله در فضای لگاریتمی) می‌باشد. زمانی این مقدار برابر با صفر باشد، در واقع معیار شدت در پیشبینی مقدار پاسخ ناتوان و غیر کاربردی است. بر عکس این حالت زمانی است که پارامتر b به ۱ نزدیک شود، در این صورت، مقادیر بالای این پارامتر نشان دهنده کاربردی بودن معیار شدت پیشنهادی است [۴].

۶-۳- کارایی داشتن (Proficiency)

پارامتر ترکیبی کارایی در حقیقت اثر توأمان پارامتر کاربردی بودن و بهینه بودن معیار شدت است. این معیار مهم در حقیقت با جایگذاری ساده رابطه

³ Probabilistic seismic demand analysis

³ Variation

6

³ Composite effect

7

در رابطه ساده شده (۹) مقدار کفایت داشتن یک پارامتر شدت به عنوان (۹) ل (IM₂) نسبت به یک پارامتر شدت مینا (IM₁) محاسبه میشود. در این رابطه عبارت I(d|IM₂|IM₁) بیان کننده کفایت یک معیار نسبت به معیار دیگر است. بر این اساس در صورتی که حاصل این عبارت مقدار مثبت باشد به این معناست که پارامتر شدت دوم نسبت به پارامتر شدت مینا از کفایت لازم برخوردار است. در صورتی که حاصل این عبارت مقدار منفی باشد نشان دهنده این نکته است که پارامتر مورد نظر نسبت به معیار شدت مینا از کفایت لازم برخوردار نیست.

۷- نتایج و بحث

برای تمامی معیار های بررسی شده (۱-۶ تا ۵) اعداد حاصل از روابط برای تمامی مدل ها و تمامی پارامتر های تقاضای مهندسی استخراج شده، برای خلاصه تر ارائه شدن نتایج صرفاً میانگین رتبه بندی در ۱۰ مدل بررسی شده، به صورت یک مدل کلی ارائه میگردد. کلیه نتایج تحلیل های تحلیل های تاریخچه زمانی غیر خطی صورت گرفته در نهایت وارد نرم افزار متلب (MATLAB) شده، و با کمک کد نویسی روابط موجود نتایج معیار های بهینه برای همه پل ها و همه پارامتر های تقاضای مهندسی بدست آمده است.

در ارائه اشکال به علت خلاصه تر شدن نتایج صرفاً نتیجه مهم ترین پارامتر های پاسخ و معیار های شدت زلزله ارائه میگردد:

۱- نتایج نشان میدهند که تعداد ستون ها، و پارامتر های هندسی نظیر طول دهنه و عرض عرشه متفاوت تأثیر چندانی در رتبه بندی معیار های کیفیت نداشته و سیستم سازه ای یکسان پل ها نتایج مشابه ای را نمایش میدهد. جدول ۷- نمایش ۵ معیار شدت برتر برای پارامتر بهینه بودن معیارهای شدت

پارامتر تقاضای مهندسی	۱	۲	۳	۴	۵
DR _{Col}	VSI _H	H Sa AVG	HI _H	PGV _H	SMV _H
μ_ϕ	VSI _H	H Sa AVG	HI _H	PGV _H	SMV _H
δ_{unseat}	VSI _H	H Sa AVG	HI _H	PGV _H	SMV _H
ALR _{Col}	PGA _H	ASIV	VSI _H	SMA _H	PGV _H
SR _{Col}	VSI _H	H Sa AVG	HI _H	PGV _H	SMV _H

$$P[D \geq d|IM.M.R]$$

برای محاسبه مقدار دقیق پارامتر Sufficiency برای هر معیار شدت نسبت به هر از پارامتر آماری مهم *p-value* استفاده میگردد. این پارامتر در رگرسیون ها برای ارزیابی مستقل بودن پارامتر های ورودی به رابطه استفاده میشود اما استفاده از آن برای مفهوم Sufficiency با اندکی تفاوت مواجه است. این مفهوم بر اساس تحقیقات تانگ و آنگ^۳ در سال ۲۰۰۷ ایجاد شده و به این صورت تعریف میگردد: مقدار $E_d|IM$ (رگرسیون پسماند بین پارامتر تقاضا و معیار شدت) توزیع شده به صورت رندوم بین مقادیر پیشبینی شده و واقعی پاسخ (بدست آمده از PSDM) منجر به یک خط رگرسیون شود به طوریکه این خط کاملاً صاف و بدون شیب باشد، کفایت داشتن آن معیار شدت را بیان میکند [۴۲].

مقدار آستانه بررسی (مرز مورد بررسی) برای پارامتر *p-value* مقدار ۵٪ ($p-value=0.05$) است. که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته و شناخته شده ترین آستانه بررسی این پارامتر در مسایل مربوط به مهندسی زلزله میباشد. هر چه قدر مقدار پارامتر *p-value* کم تر باشد منجر به رد آسانتر و قوی تر فرضیه پوچ میگردد و نشان دهنده شیب در رگرسیون و عدم کفایت پارامتر شدت میگردد. و مقادیر نزدیک به ۵ درصد و بالاتر نشان دهنده کفایت معیار شدت است [۴۱].

۶-۵- کفایت نسبی (Relative Sufficiency)

به منظور دقیق تر شدن و بالا بردن قابلیت اعتماد نتایج از یک روش دیگر برای بررسی کفایت داشتن معیار های شدت استفاده کرد. معیار دیگر که میتواند به شکل دقیق Sufficiency یک پارامتر شدت را بررسی کند، معیار کفایت نسبی^۴ است. این مفهوم بر اساس تحقیقات جلاپیر [۴۲] ایجاد شده و بر مبنای تئوری اطلاعات^۵ است. این معیار نیازی به اطلاعات دقیق از بزرگا و فاصله تا چشمه لرزه نداشته و به کمک یک رابطه که ساده شده آن در رابطه (۹) بیان شده، می تواند میزان کفایت یک معیار شدت را نسبت به یک معیار شدت زلزله مینا که مورد نظر پژوهشگر است، محاسبه نماید.

$$I(d|IM_2|IM_1) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log_2 \left(\frac{\beta_{D|IM_1} \Phi \left(\frac{\ln(d_i) - \ln(S_{D|IM_2})}{\beta_{D|IM_2}} \right)}{\beta_{D|IM_2} \Phi \left(\frac{\ln(d_i) - \ln(S_{D|IM_1})}{\beta_{D|IM_1}} \right)} \right)$$

4 Relative Sufficiency
4 Information theory

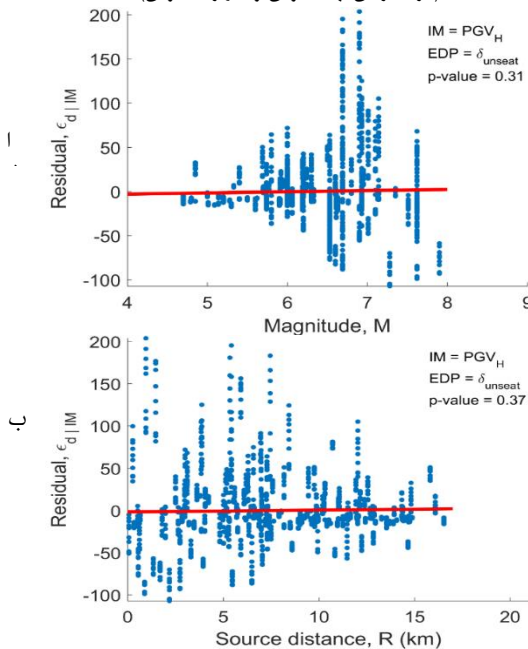
1
2

3 Tang and Ang (2007)
4 Residue

9
0

یا فاصله از چشمه لرزه (R_{rup}) هستند. همچنین با توجه به بررسی‌های انجام شده در مورد سایر پارامترهای پاسخ میتوان بیان کرد که پارامترهای CAV_H, SMV_H نیز از جمله پارامترهای دارای کفایت نسبت به بزرگا یا فاصله هستند. در شکل (۷) به عنوان نمونه، نتایج رگرسیون‌های p -value برای پارامتر پاسخ افتادگی عرشه از کوله و براساس معیار شدت PGV_H ترسیم شده است نسبت به بزرگا و فاصله ترسیم شده است.

جدول ۹- نمایش ۵ معیار شدت برتر برای پارامتر کارایی معیارهای شدت (اثر همزمان بهینه بودن و کاربردی بودن)



شکل ۷-نمایش کفایت پارامتر (PGV_H) نسبت به الف) بزرگا و ب) فاصله

۸- در این پژوهش با توجه به بررسی‌های صورت گرفته برای یافتن بهینه ترین معیارهای شدت (Optimal IMs) برای تمامی پارامترهای پاسخ مورد بررسی و برای تمامی مدل‌های پل مورد مطالعه، پارامترهای

پارامتر تقاضای مهندسی	۱	۲	۳	۴	۵
DR_{Col}	VSI_H	ASI_H	PGV_H	Sa_{AVG-H}	PGA_H
μ_ϕ	VSI_H	ASI_H	PGV_H	PGA_H	SMA_H
δ_{unseat}	VSI_H	ASI_H	Sa_{AVG-H}	HI_H	SMA_H
ALR_{Col}	PGA_H	SMA_H	ASI_H	ASI_V	SMA_V
SR_{col}	VSI_H	ASI_H	PGV_H	Sa_{AVG-H}	HI_H

۲- اتصال مستقیم رو سازه به زیر سازه موجب شده عملکرد ستون‌ها و تاثیر مستقیم آن‌ها بر عرشه، در نتایج قابل رویت است و برای پاسخ‌های شکل پذیری انحنای ستون و افتادگی عرشه از کوله، رتبه بندی معیارهای شدت تا حدود زیادی یکسان است.

جدول ۸- نمایش ۵ معیار شدت برتر برای پارامتر کاربردی بودن معیارهای شدت

پارامتر تقاضای مهندسی	۱	۲	۳	۴	۵
DR_{Col}	PGA_H	SMA_H	ASI_H	ASI_V	CAV_H
μ_ϕ	PGA_H	SMA_H	ASI_H	ASI_V	CAV_H
δ_{unseat}	SMA_H	ASI_H	PGA_H	ASI_V	CAV_H
ALR_{Col}	PGA_H	SMA_H	ASI_H	SMA_V	ASI_V
SR_{Col}	ASI_H	SMA_H	PGA_H	ASI_V	CAV_H

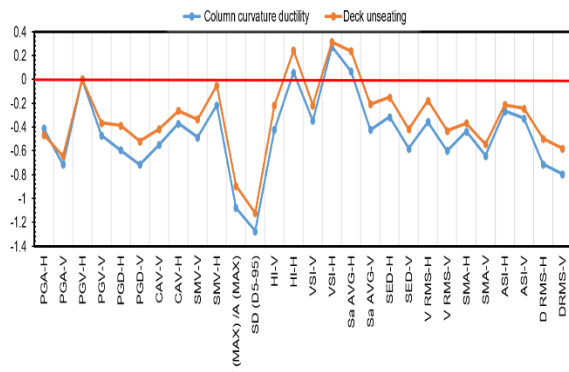
۳- همانطور که مشاهده میگردد اثر مؤلفه قائم زلزله در پارامترهای همچون درصد نیروی محوری و برشی ستون و همچنین پارامتر بسیار مهم افتادگی عرشه از کوله وجود داشته و حذف اثر معیارهای شدت مرتبط به مؤلفه‌های قائم در زلزله‌های حوزه نزدیک امکان پذیر نمی باشد.

۴- همانطوری که در جداول (۶) و (۷) قابل مشاهده است معیارهای شدت مرتبط با سرعت و شتاب از برتری بالایی برای پیشبینی پاسخ برخوردارند.

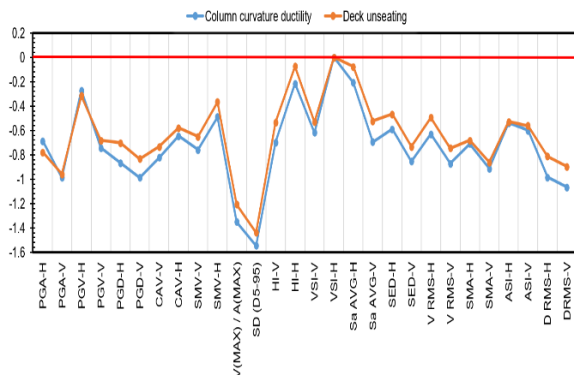
۵- در مورد پارامتر ترکیبی کارایی (Proficiency) همانطور که در جدول (۹) مشاهده می‌گردد پارامترهای غیر وابسته به سیستم سازه‌ای که مرتبط به سرعت نیز هستند مانند (PGV_H, SMV_H, CAV_H) و همچنین پارامترهای غیر وابسته به سیستم سازه‌ای از جمله (VSI_H, HI_H) نسبت به سایر معیارهای شدت و در رتبه‌های بالاتری قرار دارند.

۶- معیارهای شدت مرتبط به مؤلفه افقی شتاب زمین (حاصل جذر مجذور مربعات دو مؤلفه افقی زلزله) نسبتاً کارایی بالاتری در مقایسه با معیارهای شدت مرتبط با مؤلفه‌های قائم زلزله دارند. این مسئله در مورد سایر پارامترهای تقاضای مهندسی نیز صدق کرده و معیارهای شدت زلزله همچون $VSI_H, HI_H, PGA_H, SMA_H, Sa_{AVG-H}$ کارایی بالاتری (مقادیر کمتر شاخص ζ) نسبت به معیارهای شدت مرتبط با مؤلفه قائم داشتند.

۷- با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته مشاهده میگردد معیارهای شدت زلزله از جمله $PGV_H, HI_H, HI_V, VSI_H, Sa_{AVG-H}, VSI_V, SED_H, V_{RMS}$ با توجه به مقدار شاخص p -value دارای کفایت نسبت به بزرگا (M_w)



شکل ۸- کفایت نسبی معیار های شدت نسبت به معیار (PGV_H)
رنگ نارنجی (افتادگی عرشه از کوله) - رنگ آبی (شکل پذیری انحنا ستون)



شکل ۹- کفایت نسبی معیار های شدت نسبت
به معیار (VSH_H)

رنگ نارنجی (افتادگی عرشه از کوله) - رنگ آبی (شکل پذیری انحنا ستون)

frame guidelines. Journal of structural engineering. 2002 Apr;128(4):526-33.

[4] Mackie K, Stojadinović B. Probabilistic seismic demand model for California highway bridges. Journal of Bridge Engineering. 2001 Dec;6(6):468-81.

[5] Makris N, Black CJ. Evaluation of peak ground velocity as a "good" intensity measure for near-source ground motions. Journal of Engineering Mechanics. 2004 Sep;130(9):1032-44.

[6] Padgett JE, Nielson BG, DesRoches R. Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of highway bridge portfolios. Earthquake engineering & structural dynamics. 2008 Apr 25;37(5):711-25.

به عنوان مناسب ترین معیار های شدت و دارای بالاترین امتیازات در شاخص های بررسی شده هستند.

۹- به طور کلی توصیه می‌گردد به منظور افزایش قطعیت در پیشبینی پاسخ سازه پل مورد بررسی، از معیار های شدت برتر معرفی شده در این مطالعه در توابع شکنندگی استفاده گردد.

۱۰- این دو معیار شدت بیان شده به عنوان معیار های شدت مینا در بررسی کفایت نسبی استفاده خواهد شد. در این اینجا یکبار PGV_H به عنوان IM1 و یکبار VSH_H به عنوان IM1 در رابطه (۹) قرار می‌گیرند. در شکل (۸) کفایت نسبی نسبت به معیار شدت PGV_H نمایش داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد، در مورد دو پارامتر اصلی پاسخ، فقط معیار های شدت VSH_H , Sa_{AVG-H} , HI_H نسبت به معیار شدت مینای PGV_H از کفایت نسبی بالاتری برخوردارند.

شکل (۹) کفایت نسبی همه معیار های شدت حتی معیار PGV_H را نسبت به VSH_H نشان می‌دهد و براساس این نمودار میتوان دریافت از VSH_H همه معیار های دیگر مناسب تر است.

۱۱- بر اساس شاخص های مختلف بررسی شده، پارامتر های مرتبط با سرعت نسبت به پارامتر های مرتبط با شتاب، جابجایی و یا زمان میتوانند معیار های بهینه تر و مناسب تری در باشند و در تحلیل های احتمالاتی تقاضای لرزه ای یا قطعیت و دقت بالاتر و خطای کمتری میزان پاسخ سازه را پیشبینی میکنند. این نکته در نتایج بررسی ها به خصوص در مورد معیار های شدت HI_H , PGV_H , VSH_H , SMV_H به وضوح مشخص است.

۸- مراجع

[1] Baker JW, Cornell CA. Vector-valued ground motion intensity measures for probabilistic seismic demand analysis, PEER Report 2006/08, Pacific Earthquake Engineering Research Center-College of Engineering. University of California, Berkeley. 2006.

[2] Cornell AC, Krawinkler H. Progress, and challenges in seismic performance assessment. PEER Center News; 2000.

[3] Cornell CA, Jalayer F, Hamburger RO, Foutch DA. Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment

the evolution in seismic design philosophy. Georgia Institute of Technology; 2012.

[17] McKenna F. OpenSees: a framework for earthquake engineering simulation. *Computing in Science & Engineering*. 2011 Jun 27;13(4):58-66.

[18] Ellingwood B, Hwang H. Probabilistic descriptions of resistance of safety-related structures in nuclear plants. *Nuclear Engineering and Design*. 1985 Sep 1;88(2):169-78.

[19] Choi E. Seismic analysis and retrofit of mid-America bridges (Doctoral dissertation, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology).

[20] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) LRFD bridge design specifications. Washington, DC, 1998

[21] Nielson BG. Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones. Georgia Institute of Technology; 2005.

[22] Mander JB, Kim DK, Chen SS, Premus GJ. Response of steel bridge bearings to reversed cyclic loading. 1996 Nov 13.

[23] Dutta, A. "Energy-based seismic analysis and design of highway bridges." Ph.D. thesis, State Univ. of New York, Buffalo. 1996

[24] MTD 5-1 Bridge Memo to Designers (5-1), California Department of Transportation, (1992). Sacramento, CA.

[25] SDC. Seismic design criteria. Version 1.3. California Department of Transportation, Sacramento, CA, 2004.

[26] Shamsabadi A, Rollins KM, Kapuskar M. Nonlinear soil-abutment-bridge structure interaction for seismic performance-based design. *Journal of geotechnical and geo-environmental engineering*. 2007 Jun;133(6):707-20.

[27] Shamsabadi A, Khalili-Tehrani P, Stewart JP, Taciroglu E. Validated simulation models for lateral response of bridge abutments with typical backfills. *Journal of Bridge Engineering*. 2010 May;15(3):302-11.

[28] Muthukumar S, DesRoches R. A Hertz contact model with nonlinear damping for pounding simulation. *Earthquake engineering & structural dynamics*. 2006 Jun;35(7):811-28.

[29] Menegotto M. Method of Analysis for Cyclically Loaded RC Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behaviour of Elements under Combined Normal Force and Bending. In IABSE Congress Reports of the Working Commission 1973 (Vol. 13).

[7] Bradley BA, Cubrinovski M, MacRae GA, Dhakal RP. Ground-motion prediction equation for SI based on spectral acceleration equations. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2009 Feb 1;99(1):277-85.

[8] Wang Z, Dueñas-Osorio L, Padgett JE. Optimal intensity measures for probabilistic seismic response analysis of bridges on liquefiable and non-liquefiable soils. In *Structures congress 2012* 2012 (pp. 527-538).

[9] Wang Z, Padgett JE, Dueñas-Osorio L. Influence of vertical ground motions on the seismic fragility modeling of a bridge-soil-foundation system. *Earthquake Spectra*. 2013 Aug;29(3):937-62.

[10] Wang X, Shafieezadeh A, Ye A. Optimal intensity measures for probabilistic seismic demand modeling of extended pile-shaft-supported bridges in liquefied and laterally spreading ground. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2018 Jan;16(1):229-57.

[11] Zhong J, Jeon JS, Shao YH, Chen L. Optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of cable-stayed bridges subjected to pulse-like ground motions. *Journal of Bridge Engineering*. 2019 Feb 1;24(2):04018118.

[12] Chen X, Xiang N, Li J, Guan Z. Influence of Near-fault Pulse-like Motion Characteristics on Seismic Performance of Tall Pier Bridges with Fragility Analysis. *Journal of Earthquake Engineering*. 2020 May 2:1-22.

[13] Malekzadeh H, Hosseini M, Abbasi H, Aziminejad A, Adib Ramazani M. Developing a multi-variable vulnerability function for a class of multi-span continuous concrete box-girder highway bridges with emphasis on near-field earthquakes. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2021 Mar 11:1-37.

[14] Sarraf Shirazi R, Pekcan G, Itani A. Analytical fragility curves for a class of horizontally curved box-girder bridges. *Journal of Earthquake Engineering*. 2018 May 28;22(5):881-901.

[15] Brandenberg SJ, Zhang J, Kashighandi P, Huo Y, Zhao M. Demand fragility surfaces for bridges in liquefied and laterally spreading ground. Berkeley, CA: Pacific Earthquake Engineering Research Center; 2011 Mar.

[16] Ramanathan KN. Next generation seismic fragility curves for California bridges incorporating

Civil and Environmental Engineering, John Wiley and Sons.

[42] Jalayer F, Beck JL, Zareian F. Analyzing the sufficiency of alternative scalar and vector intensity measures of ground shaking based on information theory. *Journal of Engineering Mechanics*. 2012 Mar 1;138(3):307-16.

[30] Bozorgzadeh A, Megally SH, Ashford S, Restrepo JI. Seismic response of sacrificial exterior shear keys in bridge abutments. *Ssrp*. 2007 Oct;4:14.

[31] Chang, G. A., & Mander, J. B. (1994). Seismic energy-based fatigue damage analysis of bridge columns: Part I-Evaluation of seismic capacity (p. 222). Buffalo, NY: National Center for Earthquake Engineering Research.

[32] Dabaghi M. Stochastic modeling and simulation of near-fault ground motions for performance-based earthquake engineering (Doctoral dissertation, UC Berkeley). 2011.

[33] Haselton CB, Whittaker AS, Hortacsu A, Baker JW, Bray J, Grant DN. Selecting and scaling earthquake ground motions for performing response-history analyses. In *Proceedings of the 15th world conference on earthquake engineering 2012 Sep* (pp. 4207-4217). Earthquake Engineering Research Institute.

[34] Baker JW, Lin T, Shahi SK, Jayaram N. New ground motion selection procedures and selected motions for the PEER transportation research program. PEER report. 2011 Mar 3;3.

[35] Kramer, S. L. *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, (1996) New Jersey, USA

[36] Reed JW, Kassawara RP. A criterion for determining exceedance of the operating basis earthquake. *Nuclear Engineering and Design*. 1990 Oct 2;123(2-3):387-96.

[37] Nuttli OW (1979) The relation of sustained maximum ground acceleration and velocity to earthquake intensity and magnitude, Report No. S-73-1, (1979) US Army Waterways Experimental Station, Vicksburg, MS.

[38] Bianchini M, Diotallevi P, Baker JW. Prediction of inelastic structural response using an average of spectral accelerations. In *10th international conference on structural safety and reliability (ICOSSAR09) 2009 Sep 13* (Vol. 1317).

[39] Housner GW, Hudson DE. The port Hueneme earthquake of March 18, 1957. *Bulletin of the seismological society of America*. 1958 Apr 1;48(2):163-8.

[40] Von Thun JL. Earthquake ground motions for design and analysis of dams. *Earthquake engineering and soil dynamics II-recent advances in ground-motion evaluation*. 1988.

[41] Ang AH, Tang WH. *Probability Concepts in Engineering Planning: Emphasis on Applications to*

Optimal Intensity Measures for Probabilistic Seismic Demand Modeling of multi-span Continuous Concrete Box Girder Bridges Subjected to near-field Earthquakes

Hoodean Malekzadeh

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Hassan Abbasi

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Mahmood Hooseini

Structural Institute, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

Armin Aziminejad

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Mohammadreza Adibremezani

Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract:

Seismic intensity measures (IMs) perform a pivotal role in probabilistic seismic demand modeling. Past studies investigated appropriate IMs for structures, including the vital component of the transportation system, the highway bridges. These studies were mainly focused on far-field earthquakes and did not consider the strong vertical component of ground motions in near-field earthquakes. In order to evaluate the optimal IMs for the multi-span continuous concrete box girder bridges subjected to near-field earthquakes, ten sample bridges were modeled and then subjected to three-component records of 164 near-field earthquakes applying the OpenSees software framework. In the present research, 5 engineering demand parameters considering the most critical response parameters related to columns and deck were selected, along with 24 intensity measures considering the horizontal and vertical components of ground motions. Base on the optimality investigation method, parameters such as efficiency, practicality, proficiency, sufficiency, and relative sufficiency were considered. In total, 8200 nonlinear time-history analyses were conducted. The results presented that the peak ground velocity of the horizontal component (PGVH), velocity spectrum intensity of the horizontal components (VSIH), and Housner intensity of horizontal components (HIH) were the optimal intensity measures, and vertical component of ground motions in near-field earthquakes should be considered in optimality investigation.

Keywords: Optimality investigation, Optimal intensity measures, Openses framework, Nonlinear time history analyses, Near-field earthquakes, Probabilistic seismic demand model