



## تعیین احتمال شکست لرزه ای پل های قوسی بنایی و تحلیل حساسیت مشخصات مکانیکی مصالح

امیر حسین مهربد<sup>۱</sup>، فرهاد بهنام فر<sup>۲</sup>

۱- هیئت علمی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

[farhad@iut.ac.ir](mailto:farhad@iut.ac.ir)

### خلاصه

در شبکه ریلی ایران حدود ۹۰۰۰ پل قوسی بنایی وجود دارد. این پل ها از آجر یا سنگ ساخته شده اند. مشخصات مکانیکی پل ها با توجه به تنوع مصالح بکار رفته، کیفیت ساخت و تأثیر گذشت زمان همراه با عدم قطعیت هستند. در این تحقیق برای یک پل قوسی سنگی شبکه ریلی ایران، عدم قطعیت مشخصات مکانیکی مصالح یعنی ضریب سختی نرمال و برشی درز بلوک ها و زاویه اصطکاک داخلی درزها به صورت متغیر تصادفی با تابع توزیع احتمال لوگ نرمال، وارد تحلیل قابلیت اعتماد شدند. تحلیل دینامیکی افزاینده تحت تأثیر یازده زلزله منتخب با روش المان مجزا انجام شده است. با استفاده از روش سطوح پاسخ، توابع حالت حدی گسیختگی پل (شکست) به دست آورده شدند. احتمال شکست لرزه ای با استفاده از روش های قابلیت اعتماد FORM و MSC محاسبه گردید و با احتمال شکست هدف مقایسه گردید. در شتاب طیفی طرح، احتمال شکست ۰/۰۲۲۷ به دست آمد که بزرگتر از احتمال شکست هدف است. با استفاده از بردارهای حساسیت و اهمیت در روش FORM، تأثیر گذاری مشخصات مکانیکی مصالح بر روی احتمال شکست پل تعیین گردید. تحلیل حساسیت نشان داد که سختی نرمال و زاویه اصطکاک داخلی درزها دارای بیشترین تأثیر روی احتمال شکست بوده و سختی برشی درزها تأثیر بسیار کمتری دارد.

**کلمات کلیدی:** پل قوسی بنایی، احتمال شکست، عدم قطعیت، قابلیت اعتماد، تحلیل حساسیت

### ۱- مقدمه

پل های تاریخی بخش قابل توجهی از شبکه حمل و نقل را در جهان تشکیل می دهند، به طور بکه ۴۵٪ از ۲۲۰۰۰۰ پل فعال در شبکه ریلی قاره اروپا را به خود اختصاص داده اند [۱]. در شبکه ریلی ایران حداقل ۹۰۰۰ پل قوسی بنایی وجود دارد [۲]. با توجه تعداد بالا و قدمت این دسته از پل ها و نظر به وضعیت لرزه خیزی بالای کشور و عدم وجود طراحی لرزه ای این سازه ها، بررسی آسیب پذیری لرزه ای آنها امری ضروری است. پل های قوسی بنایی (تاریخی) با استفاده از مصالح بنایی مانند آجر یا سنگ ساخته شده اند. ویژگی های مناسب مصالح بنایی را می توان در سادگی اجرا، طول عمر زیاد، زیبایی و هزینه پایین دانست. اما رفتار غیر ایزوتروپ مصالح، طبیعت غیر بیوسسته، رفتار غیر خطی از یک طرف و عدم قطعیت قابل توجه در مشخصات فیزیکی و هندسی باعث شده که تعیین رفتار و به ویژه عملکرد لرزه ای پل های قوسی بنایی جزو پیچیده ترین فعالیت های مهندسی سازه تلقی شوند [۳]. با اینکه استفاده از روش المان محدود برای تحلیل لرزه ای پل های قوسی بنایی در بسیاری از موارد، نتایج نسبتاً رضایت بخشی داشته ولی در این روش تعیین دقیق ترک خوردگی، الگوهای گسیختگی، امکان پذیر نمی باشد. در روش المان محدود در نهایت، نواحی با پتانسیل آسیب و ترک خوردگی به صورت کلی شناسایی می شوند. علاوه بر این، حساسیت این روش نسبت به کیفیت مش بندی و امکان عدم همگرایی پاسخها در زمان گسیختگی از مشکلاتی است که تحلیل های ترک خوردگی و تعیین بار نهایی را با چالش روبرو می کنند. با توجه به محیط گسسته مصالح بنایی، درزدار بودن و جداشدگی واحدهای آجر یا سنگ تحت تأثیر تحریک زلزله، استفاده از مدل های گسسته بسیار مناسب تر به نظر می رسد. یکی از کارآمدترین روش ها در مدل های گسسته برای تحلیل لرزه ای سازه های با مصالح بنایی، روش المان مجزا<sup>۱</sup> (DEM) است [۴]. عواملی که رفتار یک سازه را مشخص می کنند شامل بارگذاری، مشخصات فیزیکی، مقاومت، سختی و ظرفیت باربری است. علی رغم آنچه به طور معمول اندیشه می شود کمیت های فوق دقیق و ثابت نیستند، بلکه همیشه همراه خود عدم قطعیت دارند.

<sup>1</sup> Discrete element method (DEM)



مشخصات مکانیکی مصالح بنایی تحت تأثیر کیفیت و نوع آجر یا سنگ، ملات، روش اجرا و مهارت استادکار، چیدمان درزها و گذشت زمان قرار می‌گیرند. به همین دلیل، رفتار و عملکرد واقعی سازه‌های تاریخی (بنایی) به صورت قطعی قابل‌دستیابی نمی‌باشد. بایستی اذعان کرد که در اکثر تحقیقات انجام شده که به بررسی رفتار لرزه‌ای پل‌های قوسی بنایی پرداخته شده است، مشخصات مکانیکی مصالح پل ثابت فرض گردیده و عدم قطعیت مصالح در تحلیل‌ها لحاظ نشده است. در سال ۲۰۲۱ [۵] ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای دو پل تک قوسی سنگی در ترکیه توسط Saygılı و Lemos انجام شد. نتایج تحلیل‌ها مشخص کردند که پل اول با دهانه قوس کوچک‌تر، پایداری کلی خود را حفظ می‌کند؛ ولی پل دوم با دهانه و ارتفاع قوس مرکزی بزرگ‌تر، دچار آسیب‌های جدی و حتی فروپاشی پل تحت اثر زلزله گردید. واکنش لرزه‌ای متفاوت این دو پل، تأثیر قابل‌توجه هندسه پل‌های قوسی را بر رفتار سازه‌ای آنها نشان می‌دهد. مهربد، بهنام‌فر و همکاران [۶] به بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای دو پل قوسی سنگی شبکه ریلی ایران پرداختند. آنها با استفاده از روش المان مجزا و با تحلیل دینامیکی افزایشده غیر خطی، عملکرد لرزه‌ای پل‌ها را تحت تأثیر یازده رکورد منتخب زلزله تحت تأثیر هر دو مولفه افقی زلزله تا وقوع گسیختگی بررسی کردند. با استفاده از منحنی‌های IDA، شتاب طیفی آستانه فرو ریزش هر رکورد زلزله برای دو پل مشخص شدند. نتایج آن تحقیق نشان داد که نسبت شتاب آستانه فرو ریزش برای پل بزرگتر که پلی با هندسه نامنظم و دارای قوس مرکزی بزرگ بود نسبت به پل کوچکتر که دارای هندسه منظم و دهانه قوس‌های کمتر و در حدود ۴۵٪ الی ۶۱٪ می‌باشد.

پل‌های قوسی بنایی هنگام ساخت معمولاً دارای مستندات و مدارک منظم مهندسی و علمی نبوده و اطلاعات دقیقی از جنس مصالح و خواص آنها در دسترس نیست. از این رو تحقیقات و مطالعات عددی و تجربی توسط بسیاری از محققین برای شناسایی پارامترهای نامشخص خواص مکانیکی آنها انجام شده است. اکثر این تحقیقات نظر به حساسیت این سازه‌ها بر اساس روش‌های غیرمخرب استوار هستند که عمدتاً توانایی تخمین برآورد خواص الاستیک را دارند. برای تعیین خواص پلاستیک مصالح، قاعدتاً احتیاج به آزمایش‌های نیمه مخرب مانند آزمایش جک تخت (Flat Jack) یا آزمایش‌های مخرب خواهد بود. بدیهی است انجام این آزمایش‌ها و با تعداد مناسب، دارای هزینه بالا و زمان بر بوده و در بسیاری از موارد با توجه به اهمیت و ارزش یک پل، شاید امکان انجام آنها به صورت کامل نیز میسر نباشد. بنابراین در اکثر موارد عدم قطعیت همچنان در فرضیات و مدل‌سازی وجود خواهند داشت. در این حالت دقیق‌ترین گزینه، ارزیابی با روش‌های احتمالاتی است که منابع عدم قطعیت را مورد توجه قرار می‌دهند. یکی از کارآمدترین روش‌های احتمالاتی، تحلیل قابلیت اعتماد می‌باشد. شایان ذکر است با وجود اینکه عدم قطعیت‌ها در ارزیابی لرزه‌ای سازه تأثیر بسزایی دارند ولی تنها چند مطالعه مربوط به پاسخ احتمالی پل‌های قوسی در مقابل بارهای لرزه‌ای انجام شده است. از جمله تحلیل احتمالاتی پل قوسی سنگی کرت در ترکیه توسط Haciefendioglu و همکاران در سال ۲۰۱۷ که با استفاده از شیبه سازی (MSC) روش سطوح پاسخ (RSM) انجام گردید [۷]. هدف آن تحقیق، بررسی تأثیر عدم قطعیت مشخصات مصالح بر پاسخ پل به تحریکات لرزه‌ای بود. عدم قطعیت‌های مشخصات مصالح، جرم حجمی، مدول الاستیسته و ضریب پواسون انتخاب شدند. آنها نشان دادند که پاسخ‌های به‌دست‌آمده از توابع پاسخ با تحلیل واقعی با روش المان محدود، تطابق خوبی دارند. هم چنین با فرض ضریب پراکندگی ۲۰٪ برای متغیرهای مشخصات مصالح پل، باعث تغییر ۶٪ در جابه‌جایی نقطه مرجع پل می‌گردد. در سال ۲۰۲۱ Gönen و Soyöz بر پایه روش قابلیت اعتماد، عملکرد لرزه‌ای یک پل قوسی بنایی (ریلی) در ترکیه را بررسی کردند [۸]. در آن مطالعه تنها مدول الاستیسته بدنه و قوس‌ها بعنوان متغیر تصادفی و با توزیع نرمال در نظر گرفته شد. با انتخاب ۴۵ نمونه تصادفی و با تحلیل استاتیکی غیرخطی با روش المان محدود و براساس میانگین منحنی‌های ظرفیت، معیارهای عملکردی برای سه حالت حدی استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و حالت قبل از فرو ریزش پل مشخص شد. سپس با انتخاب ۱۴ رکورد زلزله، شاخص قابلیت اعتماد و احتمال شکست پل را با روش FORM<sup>۳</sup> برای هر سه حالت حدی برآورد کردند. نتایج نشان دادند که پل برای هیچ یک از حالت‌های حدی دارای ایمنی لرزه‌ای کافی نمی‌باشد.

در تحقیق حاضر قابلیت اعتماد لرزه‌ای یک پل قوسی شبکه ریلی ایران را با استفاده از نتایج تحلیل دینامیکی با روش DEM و با در نظر گرفتن عدم قطعیت در مشخصات مصالح را ارائه شده است. برای تحلیل قابلیت اعتماد، تابع حالت حدی آستانه فرو ریزش با استفاده از روش RSM تعیین شده و قابلیت اعتماد لرزه‌ای و احتمال شکست پل با دو روش FORM و MSC مورد بررسی قرار گرفته است. هم چنین با انجام تحلیل حساسیت براساس نتایج تحلیل FORM، تأثیر مشخصات مکانیکی و عدم قطعیت آنها بر احتمال شکست لرزه‌ای پل بررسی شده است.

<sup>1</sup> Monto Carlo Sampling (MCS)

<sup>2</sup> Response surface method (RSM)

<sup>3</sup> First order reliability method (FORM)



## ۲- مبانی تئوری

### ۲-۱- مبانی روش المان مجزا

در روش DEM محیط سیستم، به بلوک‌های مجزا تقسیم‌بندی می‌شوند و در آن ناپوستگی‌ها یا درزها، مرزهای این بلوک‌ها را تشکیل می‌دهند. برای تعریف ارتباط مکانیکی بین بلوک‌ها فرض می‌شود در هر نقطه تماس یک فنر عمودی و یک فنر برشی با سختی و رفتار خطی مشخص وجود دارد که نیروهای برهم کنش بین بلوک‌ها را متناسب با جابه‌جایی نسبی بلوک‌ها تعیین می‌کند. برای رفتار عمودی درزها تغییرات تنش عمودی از رابطه (۱) و برای رفتار برشی، تغییرات تنش برشی از رابطه (۲) به دست می‌آیند:

$$\Delta\sigma_n = Jkn.\Delta u_n \quad (1)$$

$$\Delta\tau_s = Jks.\Delta u_s \quad (2)$$

که در آن  $Jkn$  سختی عمودی درز و  $\Delta u_n$  جابه‌جایی نسبی عمودی و  $\Delta\sigma_n$  تغییرات تنش عمودی است. هم چنین سختی برشی درز  $Jks$  و  $\Delta u_s$  جابه‌جایی نسبی برشی و  $\Delta\tau_s$  تغییرات تنش برشی را مشخص می‌کند. مقادیر سختی عمودی و برشی درزها بستگی به خواص بلوک‌ها و درزها دارد.

### ۲-۲- مبانی قابلیت اعتماد

در روش‌های قابلیت اعتماد عامل‌هایی که دچار عدم قطعیت هستند به صورت متغیرهای تصادفی در نظر گرفته می‌شوند. از این رو به جای استفاده از مقادیر متوسط و قطعی برای مشخصات مکانیکی، کمیت‌ها به صورت یک متغیر تصادفی با یک توزیع احتمالاتی مشخص همراه با میانگین و پراکندگی مربوطه در محاسبات تعریف می‌شوند. زمانی که یک سازه یا بخشی از آن از یک محدوده مشخص عبور کند و نتواند وظایفی که از آن انتظار می‌رود را انجام دهد، یک و خرابی یا حالت حدی تأمین نشده اتفاق افتاده است. به زبانی ساده یک حالت حدی مرز بین عملکرد مناسب یا نامناسب است. این مرز با تابع حالت حدی (LSF) نام‌گذاری می‌گردد. با توجه به تصادفی بودن متغیرها، بدیهی است که پاسخ سیستم نیز یک متغیر تصادفی خواهد بود و اگر  $P_f$  احتمال شکست یک حالت حدی باشد و این احتمال فراتر از مقدار احتمال هدف  $P_{f,T}$  گردد، سازه غیر قابل اعتماد خواهد بود. اگر ظرفیت مقطع یا سازه را با  $R$  نشان دهیم و مقدار تقاضا (ناشی از بارگذاری) را با  $S$ ، بدیهی است که هر دو تابع ظرفیت و تقاضا، وابسته به بردار متغیر تصادفی یعنی  $X$  هستند. در این صورت  $g(X)$ ، تابع حالت حدی به شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$g(X) = R(X) - S(X) \quad (3)$$

با این تعریف، از نظر هندسی وضعیت  $g(X) < 0$  بر ناحیه خرابی دلالت می‌کند و وضعیت  $g(X) = 0$  بر رویه حالت حدی (صفحه یا یک خط) یا مرز بین شکست و ایمن بودن دلالت کرده و موقعیت  $g(X) > 0$  ناحیه ایمن را تعریف می‌کند. قابلیت اعتماد سازه معادل محاسبه احتمال وقوع عملکرد با فرض عبور از حالت حدی است. بنابراین رابطه ریاضی احتمال شکست با معادله (۴) نوشته می‌شود:

$$P_f = P[g(X) < 0] \quad (4)$$

اگر بردار متغیرها دربرگیرنده چندین متغیر تصادفی مانند  $X_1, X_2, \dots, X_n$  باشد، هر یک از این متغیرها دارای میانگین، انحراف معیار و تابع چگالی احتمال مربوط به خود هستند. در صورت مشخص بودن تابع چگالی احتمال مشترک کلیه متغیرهای تصادفی با نام  $f_X(x)$ ، آنگاه بیان ریاضی احتمال شکست یا همان مساله کلی قابلیت اعتماد مطابق با رابطه (۵) نوشته می‌شود.

$$P_f = P[g(X) \leq 0] = \int \dots \int_{g \leq 0} f_X(x) dx \quad (5)$$

رابطه فوق بیان می‌دارد که احتمال شکست، معادل جرم احتمال تابع چگالی مشترک در ناحیه خرابی ( $g(X) \leq 0$ ) است. حل این انتگرال در حالت کلی بسیار پیچیده است و اغلب به صورت تحلیلی ممکن نیست و راه کلی استفاده از تحلیل‌های ریاضی تقریبی است. پیشنهادهای متفاوتی برای حل وجود دارند که روش FORM یا MSC از معروف‌ترین روش‌ها هستند.

<sup>1</sup> Limit state function (LSF)



### ۲-۳- روش سطوح پاسخ

برای حالت های حدی متعارف، معیارهای عملکردی در ساختمان‌های بنایی معمولاً بر اساس یک رویکرد جابه‌جایی تعریف می‌شوند. از این رو اگر پاسخ سازه از یک مقدار حدی مانند  $\Delta_c$ ، عبور کند حالت گسیختگی یا شکست اتفاق می‌افتد. در این صورت تابع حالت حدی  $g(X)$  با رابطه (۶) بیان می‌شود:

$$g(X) = \Delta_c - S(X) \quad (6)$$

بدیهی است  $S(X)$  پاسخ سازه با استفاده از روش‌های تحلیل متعارف تعیین می‌گردند و معمولاً برحسب تغییر مکان، جابه‌جایی نسبی و تنش هستند. بنابراین در تابع حالت حدی (رابطه ۹) متغیرهای تصادفی (مشخصات مکانیکی مصالح) به صورت صریح وجود ندارند. از این رو بیان ریاضی تابع چگالی مشترک احتمالی  $f_X(x)$  وابسته به متغیرهای اصلی ممکن نبوده و حل انتگرال رابطه (۶) میسر نخواهد بود. در تحلیل سازه‌های بزرگ مانند یک پل قوسی بنایی به‌ویژه در تحلیل‌های دینامیکی، معمولاً ساعت‌ها یا حتی چند روز زمان نیاز دارند و تخمین احتمال شکست با روش‌هایی مثل FORM نیاز به تکرار زیاد تحلیل سازه دارند و بسیار زمان بر و غیر عملی خواهد شد. برای فائق آمدن بر دو مشکل فوق، روش‌های شبیه‌سازی پاسخ سازه راه‌گشا هستند. این روش‌ها معمولاً با تعداد مناسب از نمونه‌های آزمایشی، مدلی مناسب برای تعیین پاسخ تقریبی سیستم پیشنهاد می‌کنند. یکی از روش‌های مناسب شبیه‌سازی که کارایی خود را در برآورد پاسخ سازه‌ها نشان داده روش RSM است. اگر فرض کنیم پاسخ واقعی یک سیستم تابعی از یک سری متغیر است و با تابع  $f(x)$  قابل تعریف باشد. در روش RSM به دنبال تابع تقریبی پاسخ با نام  $\hat{f}(x)$  هستیم. فرم کلی توابع تقریبی در تحلیل‌های غیرخطی سازه معمولاً با چند جمله‌ای درجه دوم مشابه آنچه که در معادله (۷) آورده شده، بیان می‌گردد:

$$f(x) \approx \hat{f}(x) = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij} x_i x_j \quad (7)$$

در این معادله  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  ضرایب چند جمله‌ای بوده و سایز  $n$ ، برابر تعداد متغیرهای مساله می‌باشد. برای تعیین ضرایب مجهول، یکسری نقاط (نمونه) تحت عنوان نقاط آزمایش انتخاب شده و با جایگذاری در معادله (۷) و انجام تحلیل رگرسیون، ضرایب چند جمله‌ای تعیین می‌شوند. یکی از بهترین روش‌های انتخاب نقاط آزمایشی، روش ترکیب مرکزی<sup>۱</sup> (CCD) است. در این روش متغیرها در پنج سطح  $(-α, +α, 0, -1, +1)$  در نظر گرفته می‌شوند. مقدار پیشنهادی  $α$  در روش فوق مابین ۱/۴ الی ۲ است.

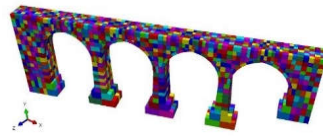
### ۳- بیان مساله

پل قوسی سنگی شبکه ریلی مورد مطالعه در خط راه‌آهن تهران به اهواز (راه‌آهن زاگرس) و در مسیر ریلی دورود- اندیمشک قرار دارد. تصویر پل و مدل ساخته شده در نرم افزار در شکل ۱ مشخص است. تمام بدنه پل با مصالح سنگی ساخته شده و عرض آن برابر با ۴/۴ متر است. طول پل ۶۶/۷ متر و با چهار قوس مشابه با دهانه ۱۲ متر اجرا شده است. طی تحقیق قبلی انجام شده [۶] با فرض ثابت بودن مشخصات مکانیکی مصالح، الگوهای گسیختگی و شتاب آستانه فرو ریزش پل برای یازده رکورد زلزله منتخب با روش IDA بدست آورده شده است. مشخصات مکانیکی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی مصالح پل قوسی سنگی

مشخصات مکانیکی	مقادیر	واحد
مدول الاستیسیته	۱۴/۱	(GPa)
وزن حجمی	۲۲	(kN/m <sup>3</sup> )
ضریب سختی عمودی درزها (Jkn)	۷/۶۴	(GPa/m)
ضریب سختی برشی درزها (Jks)	۱/۷۹	(GPa/m)
زاویه اصطکاک درزها ( $\phi$ )	۳۳	(Degree)

<sup>1</sup> Central composite design (CCD)



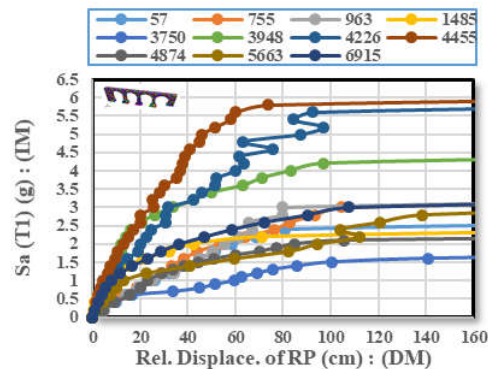
ب) مدل سازی پل در نرم افزار



الف) تصویر پل

### شکل ۱- تصویر پل قوسی سنگی و مدل پل در نرم افزار 3DEC

در مرحله اول، پل تحت بار وزن و سربار مرده ناشی از پارسنگ و ریل بند خطوط که به شکل بار گسترده بر روی عرشه پل بارگذاری شده با روش استاتیکی تحلیل شده است. پس از آن، تحلیل دینامیکی افزایشی پل با افزایش شتاب طیفی  $S_g$  به اندازه  $0.2g$  به عنوان معیار شدت (IM)<sup>۱</sup> در هر گام و تحت تاثیر دو مولفه افقی زلزله‌های منتخب تا وقوع گسیختگی صورت گرفته است. برای پایش کامل رفتار لرزه‌ای پل در تمام بدنه پل نقاط کنترلی در نظر گرفته شده و پاسخ آنها استخراج گردید. نتایج ها نشان داد که الگوی غالب گسیختگی پل به صورت تخریب نواحی پایه‌ها (Piers) یا اسپندرل (Spandrel) قوس‌ها است. از طرفی برای کلیه زلزله‌ها در نواحی فوق، عامل اصلی فروریزش، تغییر مکان نسبی عمود بر راستای محور طولی پل است. نقطه‌ای که در این نواحی بیشترین تغییر مکان عمودی نسبی را داشته، تحت عنوان نقطه مرجع (RP)<sup>۲</sup> انتخاب و نام گذاری گردید. نتایج گسیختگی برای کلیه زلزله‌ها نشان دادند که تغییر مکان نسبی عمودی نقطه RP نماینده مناسبی برای کمیت خرابی (DM)<sup>۳</sup> است. نمودارهای IDA برای یازده رکورد زلزله در شکل ۲ آورده شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، ارتباط شدت زلزله و پاسخ در ابتدا تقریباً شکل خطی دارند. بعد از این محدوده، منحنی‌ها دچار کاهش شیب شده و شدت تغییرات پاسخ افزایش می‌یابد و با افزایش شدت زلزله، منحنی‌ها به نقطه‌ای می‌رسند که با افزایش کوچکی در شدت زلزله، پاسخ بسیار زیاد شده و شیب منحنی‌ها افقی می‌شوند و این وضعیتی است که در پل گسیختگی اتفاق افتاده است. براساس منحنی‌های فوق شتاب آستانه فرو ریزش (SC) قابل تعیین گردید.



شکل ۲- منحنی‌های IDA پل قوسی تحت تاثیر یازده زلزله منتخب

### ۴- قابلیت اعتماد لرزه‌ای پل

سه مشخصه مکانیکی سختی نرمال و برشی درزها و هم چنین زاویه اصطکاک داخلی به عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته شده‌اند. با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مشخصات مکانیکی مصالح سنگی، تعداد و مقادیر مصالح با مشخصات مختلف مطابق با روش CCD مشخص گردیده و با روش RSM، توابع حالت حدی مشخص گردید. نرم‌افزار Design-Expert یکی از معروف‌ترین نرم‌افزارهای مدل‌سازی و تحلیل‌های آماری است. یکی از توانایی‌های این برنامه کاربرد روش RSM برای شبیه‌سازی پاسخ سیستم‌ها است. با توجه به ۱۵ نمونه و ۱۱ رکورد زلزله منتخب، تا وقوع

<sup>1</sup> Intensity measure (IM)

<sup>2</sup> Refrence point (RP)

<sup>3</sup> Damage measure (DM)

گسیختگی حدود ۲۶۰۰ تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام شده است. با روش RSM در نرم افزار Design-Expert، توابع پاسخ تقریبی برای هر شدت شتاب طیفی رکورد زلزله به دست آمدند و در هر تحلیل رگرسیون، کنترل‌های لازم و صحت سنجی انجام شده‌اند. برای نمونه تابع پاسخ مناسب برای زلزله دارفیلد در شتاب طیفی  $Sa=2/2g$  در رابطه ۸ آورده شده است:

$$\hat{U}^{22} = 108.76836 - 0.007132Jkn + 0.009008Jks - 1.31997Phi + 0.000029Jkn \times Phi + (2.5671e - 7)Jkn^2 - (3.54316e - 6)Jks^2 + 0.008658Phi^2 \quad (8)$$

با داشتن توابع پاسخ، توابع LSF به دست می‌آیند. برای نمونه تابع فوق در زلزله دارفیلد و شتاب طیفی  $Sa=2/2g$  در زیر آورده شده است:

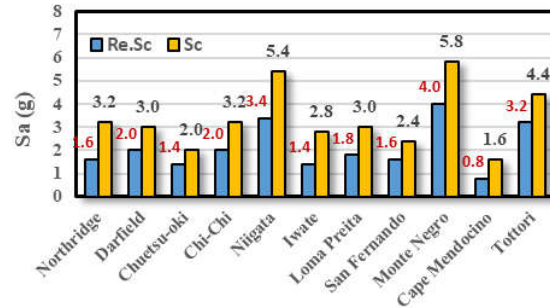
$$g(\hat{U}^{22}, U_{Cap}) = U_{Cap} - \hat{U}^{22} = U_{Cap} - (108.76836 - 0.007132Jkn + 0.009008Jks - 1.31997Phi + 0.000029Jkn \times Phi + (2.5671e - 7)Jkn^2 - (3.54316e - 6)Jks^2 + 0.008658Phi^2) \quad (9)$$

در ادبیات فنی مورد مطالعه در اکثر موارد معیار حالت حدی بصورت یک عدد ثابت گرفته شده، در صورتی که با تغییرات مشخصات مصالح، ظرفیت تغییر خواهد کرد. در این تحقیق برای وارد کردن عدم قطعیت ظرفیت یا همان معیار حالت حدی گسیختگی  $U_{Cap}$ ، این معیار نیز به عنوان یک متغیر در محاسبات وارد شده است. با توجه به ۱۱ رکورد زلزله و ۱۵ نمونه، تعداد ۱۶۵ مقدار برای معیار گسیختگی بدست آورده شد و با توجه به نزدیکی توزیع داده‌ها به تابع توزیع نرمال،  $U_{Cap}$  به عنوان یک متغیر تصادفی با توزیع نرمال و میانگین  $83/9$  cm و ضریب پراکندگی ۱۱٪ در محاسبات قابلیت اعتماد لحاظ گردید. مطابق با تعاریف مهندسی، ایمنی سازه با رابطه  $\beta \leq \beta_T$  or  $P_f > P_{f,T}$  که در آن  $\beta_T$  شاخص قابلیت اعتماد هدف و  $P_{f,T}$  احتمال شکست هدف است. مراجع مختلف، مقادیر فوق را بر اساس وضعیت سازه، اهمیت آن، کاربری و ... ارائه کرده‌اند. شاخص قابلیت اعتماد هدف و احتمال شکست هدف بر اساس روش پیشنهادی Verstryngre و Schueremans [۹] برای سازه‌های تاریخی با توجه به شرایط سازه، مدت زمان، میزان تلفات انسانی در اثر شکست، نوع گسیختگی، ارزش تاریخی و اقتصادی سازه و نوع فروریزش برابر با  $\beta_T = 3.662$ ,  $P_{f,T} = 0.000125$  در دانشگاه بریتش کلمبیا کانادا تهیه شده است. تابع توزیع چگالی احتمال PDF متغیرها، به صورت تابع توزیع لوگ نرمال فرض شده است. در این تحقیق میانگین ضریب پراکندگی متغیرهای تصادفی، ۲۵٪ در نظر گرفته شد و با استفاده از روش FORM تحلیل قابلیت اعتماد، در شدت‌های مختلف شتاب طیفی هر زلزله صورت گرفته و شاخص قابلیت اعتماد و احتمال شکست پل محاسبه شده است. هم چنین با روش MSC احتمال شکست تعیین شده است.

برای نمونه نتایج تحلیل‌های قابلیت اعتماد پل برای زلزله دارفیلد و زلزله ایواته در شتابهای طیفی مختلف در جدول ۲ آورده شده‌اند. مشخص است که در زلزله دارفیلد از شدت شتاب طیفی  $2/2g$  و بیشتر، شاخص قابلیت اعتماد بزرگتر از شاخص هدف (۳/۶۶۲) شده و پل قابلیت اعتماد کافی در برابر فروریزش را ندارد، درحالی که برای زلزله ایواته از شتاب  $1/6g$ ، قابلیت اعتماد لرزه‌ای پل قابل قبول نمی‌باشد. مقایسه شاخص‌های قابلیت اعتماد بدست آمده با روش FORM و روش MSC، نشان می‌دهد که در بیشتر موارد خطای محاسباتی روش FORM بسیار کم است. حداکثر شتاب طیفی برای ۱۱ زلزله که در آن شاخص قابلیت اعتماد قابل قبول بزرگتر از شاخص هدف نباشد، تحت عنوان شتاب طیفی قابل اعتماد (Reliable Sc.) در نظر گرفته شد. مقایسه، نتایج شتاب‌های طیفی قابل اعتماد (Re.Sc.) با نتایج شتاب‌های بحرانی (Sc.) که در شکل ۳ آورده شده مشخص می‌نماید که شدت شتاب‌های طیفی قابلیت اعتماد نسبت به شتاب‌های طیفی بحرانی بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت، منتخب حدود ۳۰٪ الی ۵۰٪ کاهش پیدا کرده است.

جدول ۲- نتایج تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای پل برای دو زلزله دارفیلد و ایواته

زلزله دارفیلد	FORM		MSC		زلزله ایواته	FORM		MSC	
	$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$		$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$
Sa (g)					Sa (g)				
۲/۰	۴/۳۲۰	۰/۰۰۰۰۰۸	۴/۲۶۵	۰/۰۰۰۰۱	۱/۰	-	۰/۰	-	۰/۰
۲/۲	۳/۱۲۲	۰/۰۰۰۸۹۸	۳/۲۰۳	۰/۰۰۰۶۸	۱/۲	۵/۱۸۲	۱/۱۵-۷	۵/۲۵۲	۷/۵۲۵-۸
۲/۴	۱/۹۶۶	۰/۰۲۴۶۷۶	۱/۹۸۷	۰/۰۲۳۴۶۳	۱/۴	۳/۸۴۲	۰/۰۰۰۰۶۱	۳/۹۶۰	۰/۰۰۰۰۳۷
۲/۶	۰/۸۵۴	۰/۱۹۶۶۷۰	۰/۷۷۸	۰/۲۱۸۱۷۶	۱/۶	۱/۹۶۲	۰/۰۲۴۸۸۴	۲/۰۷۸	۰/۰۱۸۸۴۴
۲/۸	-۰/۲۹۶	۰/۶۱۶۴۰۱	-۰/۵۹۵	۰/۷۲۴۱۰۲	۱/۸	۰/۰۴۰	۰/۴۸۳۹۱۴	۰/۲۵۴	۰/۳۹۹۸۰۰
۳/۰	-۱/۷۲۷	۰/۹۵۷۹۵۹	-۱/۳۷۳	۰/۹۱۵۰۵۴	۲/۰	-۱/۱۸۰	۰/۸۸۱۰۲۷	-۱/۰۷۷	۰/۸۵۹۲۳۲
۳/۲	-۴/۹۰	۱/۰	-۴/۹۰	۱/۰	۲/۲	-۴/۹۵	۱/۰	-۴/۹۵	۱/۰



شکل ۳- شتاب‌های طیفی با روش قابل اعتماد و شتاب طیفی آستانه فروریزش پل

احتمال شکست پل برای هر شدت با استفاده از قانون جمع احتمال قابل محاسبه است. در این تحقیق از ۱۱ رکورد زلزله منتخب استفاده شده است، اگر وقوع هر یک از زلزله‌ها را با احتمال یکسان در نظر بگیریم و وقوع هر زلزله را مستقل از وقوع زلزله دیگر، احتمال شکست پل در هر شتاب طیفی معادل  $P^{So}$ ، با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P^{So} = (1/11) \times \sum_{i=1}^{11} (P_f)_i \quad (10)$$

باتوجه به رابطه فوق، احتمال شکست پل برای هر شدت شتاب طیفی تعیین گردید. احتمال شکست فروریزش در شتاب طیفی طرح سایت پل (Sa=1.3g) برابر  $P_f = 0.0227 > P_{f,T} = 0.000125$  بدست آمد که نشان از عدم ایمنی لرزه‌ای مناسب پل در مقابل گسیختگی و فروریزش است.

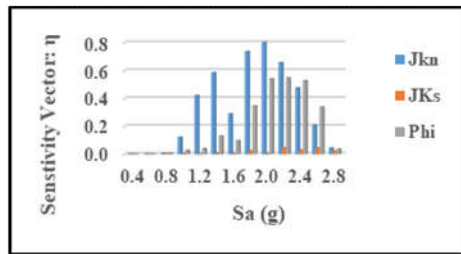
#### ۵- تحلیل حساسیت

یکی از نتایج بسیار مهم و با ارزش در تحلیل‌های قابلیت اعتماد، تعیین اهمیت و تأثیرگذاری متغیرهای سیستم بر روی قابلیت اعتماد یا احتمال شکست حالت حدی است. اگر بخواهیم تأثیر هر یک از متغیرهای تصادفی را بر قابلیت اعتماد سیستم یا احتمال شکست تعیین کنیم، در حقیقت تغییرات  $\beta$  یا  $P_f$  نسبت به برآمد متغیرهای تصادفی، یا میانگین و انحراف معیار متغیرها را محاسبه می‌کنیم. در این حالت بردار اهمیت  $\alpha_i$  (Importance Vector) و بردارهای حساسیت (Sensitivity Vector) با نام‌های  $\delta_i$  و  $\eta_i$  قابل تعریف هستند. بردار اهمیت  $\alpha_i$  بردار برای تأثیر هر یک از متغیرها در شاخص قابلیت اعتماد است. هر چقدر مقدار  $|\alpha_i|$  یک متغیر بزرگتر باشد، سهم نسبی آن متغیر در شاخص قابلیت اعتماد بیشتر است. مقادیر بردار حساسیت  $\delta_i$  و  $\eta_i$  به ترتیب میزان تأثیر میانگین و انحراف معیار هر متغیر نسبت به شاخص قابلیت اعتماد نشان می‌دهد. برای هر متغیر مقادیر  $\delta_i$  و  $\eta_i$  با روابط زیر معرفی می‌شوند:

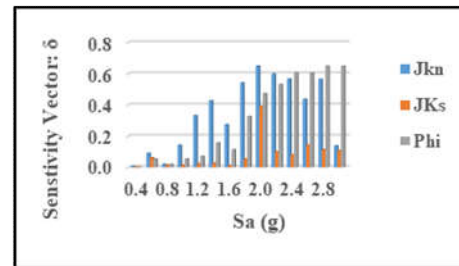
$$\delta_i = \frac{\partial \beta}{\partial \mu_i} \sigma_i \rightarrow \underline{\delta} = \nabla_{\mu} \beta^T \underline{D}_x, \quad \eta_i = \frac{\partial \beta}{\partial \sigma_i} \sigma_i \rightarrow \underline{\eta} = \nabla_{\sigma} \beta^T \underline{D}_x \quad (11)$$

که در آن  $\underline{D}_x$  ماتریس انحراف معیار متغیرها و  $\Delta_{\mu}$  و  $\Delta_{\sigma}$  گرادینان  $\beta$  نسبت به میانگین و انحراف معیار متغیرهای تصادفی  $\mu_i$  و  $\sigma_i$  است. از محاسبه مقادیر بردار اهمیت برای سه متغیر مشخصات مکانیکی مصالح پل مشخص است که در گام‌های اولیه شتاب طیفی، برآمد متغیرهای اساسی  $Jkn$ ،  $\Phi$  و  $Jks$  تأثیر و اهمیت کمتری در تغییرات شاخص قابلیت اعتماد دارند. با افزایش شتاب طیفی تأثیر این متغیرها در شاخص فوق محسوس است. در بیشتر شتاب‌ها سختی عمودی درزها  $Jkn$ ، متغیری است که بالاترین اهمیت را در شاخص قابلیت داشته ولی با افزایش شتاب، تأثیر زاویه اصطکاک داخلی نیز بیشتر می‌گردد. برای بقیه زلزله‌ها همین نتایج مشاهده گردید. بنابراین، مهم‌ترین متغیر دخیل در احتمال شکست پل، سختی عمودی درزها و زاویه اصطکاک داخلی است و ضریب سختی برشی کمترین تأثیر را دارد. در شکل‌های ۴ و ۵ نیز تأثیر برآمد میانگین و انحراف معیار سه متغیر سختی نرمال و زاویه اصطکاک داخلی بر روی شاخص قابلیت اعتماد نیز نشان داده شده است. در این اشکال نیز مشاهده می‌شود که میانگین و انحراف معیار سختی عمودی و زاویه اصطکاک درزها بیشترین تأثیر را دارند.





شکل ۵- بردار حساسیت  $\eta$  متغیرهای مصالح برای زلزله دارفیلد



شکل ۴- بردار حساسیت  $\delta$  متغیرهای مصالح برای زلزله دارفیلد

### ۶- نتیجه گیری

نظر به متغیر بودن مشخصات مکانیکی مصالح بنایی در پل‌های تاریخی در این تحقیق به تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای پل کوچک‌تر پرداخته شد. برای تعیین توابع پاسخ لرزه‌ای به صورت روابط صریح از متغیرهای توابع شبیه‌سازی شده پاسخ پل تعیین گردید. نتایج تحلیل نشان دادند شتاب‌های طیفی قابل اعتماد با شتاب‌های آستانه فروریزش حدود ۳۰٪ الی ۵۰٪ کاهش پیدا می‌کنند. با محاسبه احتمال شکست پل معلوم گردید که از احتمال شکست هدف بزرگتر است و لذا پل در مقابل گسیختگی ایمنی لازم را ندارد. با توجه به نتایج به دست آمده تاثیر عدم قطعیت مشخصات مکانیکی مصالح در رفتار لرزه‌ای پل قوسی بنایی (سنگی) کاملاً قابل توجه بوده و فرض ثابت بودن مشخصات مکانیکی مصالح باعث برآوردهای نامناسبی از وضعیت ایمنی لرزه‌ای پل به دست خواهد داد. با تحلیل حساسیت مشخص گردید که اصلی ترین تاثیر ناشی از سختی نرمال و زاویه اصطکاک درزها بوده و هم چنین میانگین آنها و انحراف معیار این دو خاصیت نیز بیشترین اثر بر احتمال شکست پل را دارند.

### ۷- مراجع

1. B. Pulatsu, E. Erdogmus, and P. B. Lourenço, "Comparison of in-plane and out-of-plane failure modes of masonry arch bridges using discontinuum analysis," *Engineering Structures*, vol. 178, pp. 24-36, 2019.
2. V. Jahangiri and M. Yazdani, "Seismic reliability and limit state risk evaluation of plain concrete arch bridges," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 170-190, 2021.
3. G. de Felice, S. De Santis, P. B. Lourenço, and N. Mendes, "Methods and challenges for the seismic assessment of historic masonry structures," *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 11, no. 1, pp. 143-160, 2017.
4. J. o. Azevedo, G. Sincaian, and J. Lemos, "Seismic behavior of blocky masonry structures," *Earthquake Spectra*, vol. 16, no. 2, pp. 337-365, 2000.
5. Ö. Saygılı and J. V. Lemos, "Seismic vulnerability assessment of masonry arch bridges," *Structures*, vol. 33, pp. 3311-3323, 2021.
6. A. Mehrbod, F. Behnamfar, A. Aziminejad, and H. Hashemol-Hosseini, "Seismic vulnerability assessment of stone arch bridges by nonlinear dynamic analysis using discrete element method," *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 17, no. 11, pp. 1791-1812, 2023.
7. K. Hacıefendioğlu, H. B. Başağa, and S. Banerjee, "Probabilistic analysis of historic masonry bridges to random ground motion by Monte Carlo Simulation using Response Surface Method," *Construction and building materials*, vol. 134, pp. 199-209, 2017.
8. S. Gönen and S. Soyöz, "Reliability-based seismic performance of masonry arch bridges," *Structure and Infrastructure Engineering*, pp. 1-16, 2021.
9. L. Schueremans and E. Verstryngne, "Use of reliability methods for evaluating safety of historic structures," in *SAHC08-6th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*, 2008.
10. M. Mahsuli and T. Haukaas, "Computer program for multimodel reliability and optimization analysis," *Journal of computing in civil engineering*, vol. 27, no. 1, pp. 87-98, 2013.