

## منحنی شکنندگی لرزه ای پل بتنی با معیار شکل پذیری ستون و رویکرد شبکه عصبی

کمیل کریمی مریدانی

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

پنام زرفام\*

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

محسن غفوری آشتیانی

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

### چکیده

هدف این مطالعه، ارائه منحنی های شکنندگی لرزه ای پل بزرگراهی بر مبنای پیش بینی های مبتنی بر شبکه عصبی است. در سال های اخیر، منحنی های شکنندگی، علاوه بر روشهای تجربی و کارشناسی، اغلب با استفاده از روش تحلیلی تهیه می شود. در این مطالعه، منحنی های شکنندگی لرزه ای پل خمیده افقی بر مبنای پیش بینی های شبکه عصبی و تمرکز بر روی شاخص شکل پذیری ستون بتنی با استفاده از ۱۲۹ رکورد زمین لرزه نشان داده می شود. رکوردهای لرزه ای متناسب با ساختگاه در شدت های لرزه ای مختلف مقیاس شده اند. با انجام ۱۶۷۷ تحلیل دینامیکی غیرخطی در نرم افزار OpenSees، منحنی های تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) ترسیم شد. استخراج ویژگیهای رکوردهای زمین لرزه بعنوان ورودی و شکل پذیری ستونهای بتنی از تحلیل های دینامیکی غیرخطی پل، بعنوان خروجی، متغیرهای مدنظر در ایجاد ساختار شبکه عصبی است. تعیین مجموعه ویژگیهای مختلف رکورد های لرزه ای که بتواند خصوصیات مختلف رکوردها در شدت های لرزه ای مختلف را نشان دهد، معرف آن رکورد لرزه ای در شبکه عصبی است. بدیهی است این مشخصه ها به نحو مطلوبی با خسارت سازه ای مرتبط است. با انتقال مجموعه ویژگی های رکورد های لرزه ای متفاوت (ماتریس  $n \times m$ ) به داده هایی با همان ویژگیهای مجموعه ورودی لرزه ای (ماتریس  $p \times m$ ،  $p < m$ )، که از طریق تحلیل عاملی بدست می آید، پیش بینی های شبکه عصبی به منظور تعیین پاسخ های سازه، تلاش محاسباتی را با دقت قابل قبول به مراتب کاهش می دهد.

واژه های کلیدی: پل، شکل پذیری انحنایی، ستون بتنی، شبکه عصبی، شکنندگی، توزیع آماری.

\* نویسنده مسئول: zarfam@srbiau.ac.ir

## ۱- مقدمه

با استفاده از روش شبکه های عصبی مناسب است [۷]. ارزیابی منحنی شکنندگی تاسیسات ضروری را با استفاده از روش تصادفی در مطالعه کارلومارانو و همکاران نشان داده شد [۸]. آسیب پذیری لرزه ای ساختمان های بتن مسلح با در نظر گرفتن نامنظمی در کار راجیو و همکاران آمده است [۹]. پژوهش پنا و همکاران، استخراج منحنی های شکنندگی برای ساختمان های بنایی با استفاده از روش تحلیلی است [۱۰]. تحلیل دینامیکی افزایشی سازه های چوبی و اثر زلزله بر شکنندگی لرزه ای در مطالعه گودا و همکاران ارائه گردید [۱۱]. منحنی های شکنندگی پل های جدا سازی شده در شرق کانادا با استفاده از داده های نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی نتیجه کار سیکیرا و همکاران است [۱۲]. تحلیل شکنندگی احتمالاتی در ساختمان های مدارس با استفاده از روش تحلیلی به مطالعه هانسیلار و همکاران انجامید [۱۳]. تحقیقات یانگ و همکاران تحلیل شکنندگی پل مورب در جنوب شرقی ایالات متحده را به روش تحلیلی نشان داد [۱۴]. از این رو مشاهده می شود مطالعات کمی در ارتباط با منحنی های شکنندگی با رویکرد محاسبات نرم نظیر شبکه عصبی صورت گرفته است.

## ۲- ارزیابی شکنندگی

منحنی های شکنندگی لرزه ای را می توان با استفاده از توابع توزیع دو پارامتری (میانه و انحراف معیار) لگ نرمال بیان نمود. این پارامترها به منظور بررسی شکنندگی بعنوان تابعی از معیار شدت بکار برده می شود و تخمین این پارامترها با استفاده از برآورد احتمال ماکسیموم به دست می آید [۷]. شرح مختصری از تابع احتمال به فرم زیر معرفی می شود:

$$\mathcal{L}(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) = \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^n F_R(IM_i, y_j)^{x_{ij}} \quad (1)$$

در اینجا  $F_R$  تابع شکنندگی (تابع توزیع تجمعی) برای یک حالت خسارت و  $IM_i$  معیار شدت تعریف می شود. اگر حالت خسارت در  $i$  امین سازه تحت  $IM_i$  محقق شود آنگاه  $x_{ij}$  برابر با ۱ و در غیر این صورت صفر است. اگر تعداد کل تحقق سازه ای پس از زلزله با  $N$  و تعداد کل حالات حدی است با  $\Pi$  نشان داده شود. بنابراین  $F_R$ ، به شرح زیر نوشته شده است:

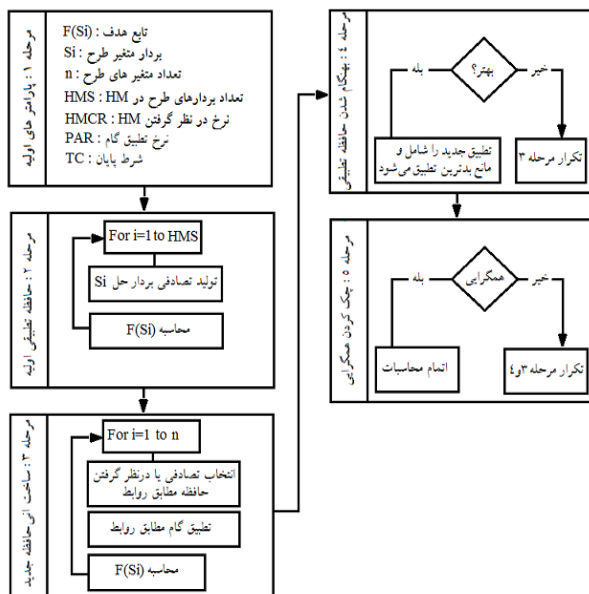
$$F_R(IM) = \Phi \left[ \frac{\ln(IM|\mu_j)}{\beta_j} \right] \quad (2)$$

روش های تحلیل سازه بر اساس تئوری اصول مکانیکی، روش های محاسباتی و تحلیل نتایج از طریق شبیه سازی عددی گسسته است. علاوه بر این، قابلیت اعتماد روش های اکتشافی در مقایسه با نتایج حاصل از روش های محاسباتی حایز اهمیت است. اخیراً، در مطالعات بسیاری از روش های محاسباتی مانند شبکه های عصبی و منطق فازی در زمینه های مختلف مهندسی استفاده می شود و روند رو به رشدی در دهه های اخیر حاصل شده است. ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای را می توان از طریق منحنی شکنندگی ارائه نمود. تاکنون چهارچوب اکثر مطالعات شکنندگی در قالب کارشناسی، تجربی و خصوصاً تحلیلی بوده است. منحنی های شکنندگی تحلیلی احتمال اینکه پاسخ سازه از یک حالت حدی خاص به ازای مقادیر مختلف ورودی لرزه ای فراگذر کند را نشان می دهد. پل ها یکی از مهمترین مولفه های شریان های حیاتی هستند و در مدیریت بحران هنگام زلزله های مخرب حائز اهمیت می باشند. لزوم نیاز به مقاوم سازی و تاثیر شریان های حیاتی سازه ای در مدیریت بحران از طریق این منحنی ها مشخص می شود. از دیگر روش های ارائه منحنی شکنندگی روش های اکتشافی است. بهبود قابلیت اطمینان منحنی های شکنندگی تحلیلی پل های بتنی بزرگراهی به روش تحلیلی در مقایسه با روشهای تجربی، در مطالعه مندر نشان داده شد [۱]. تاثیر موقعیت مکانی ستون های پل در پل های بتنی با دهانه های بلند نشان داد در مواردی که پل توسط تحریک مشابه قرار گیرد نسبت تحریکات لرزه ای مختلف، نتایج شکنندگی تحلیلی دست پایین تخمین زده می شود، این مقایسه حاصل مطالعه سنگ و همکاران است [۲]. بهبود در شکنندگی پس از مقاوم سازی با استفاده از روش تحلیلی در پژوهش هون کیم و همکاران آمده است [۳]. با استفاده از روشی ساده، تاثیر جداسازی سازه ای بر روی منحنی های شکنندگی تحلیلی لرزه ای در کار یامازاکی و همکاران ارائه شد [۴]. نیلسون و همکاران منحنی های شکنندگی انواع مختلف پل با ستون بتنی را به روش تحلیلی برآورد نمودند [۵]. دسروچس و همکاران روشی برای یافتن منحنی های شکنندگی پل با ستون های بتنی ارائه کردند و بهبود در شکنندگی را نشان دادند [۶]. منحنی های شکنندگی دو نمونه ساختمان منظم و نامنظم به کمک شبکه های عصبی در مطالعه میتروپولو و همکاران ارائه شد، آنها نشان دادند که نتایج شکنندگی

نظر باشد. در علوم مختلف فرمول بندی بسیاری از مسایل بر مبنای بهینه سازی است و با کمک الگوریتم های بهینه سازی های مختلف مسایل حل می شود. برای دستیابی به این هدف در تعیین میانه و انحراف معیار، الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) در این مطالعه بکار گرفته شد. پارامترهای اساسی (مقداردهی اولیه) این الگوریتم نرخ در نظر گرفتن حافظه هارمونی (HMCR) و نرخ تنظیم گام (PAR) است که در کنترل راه حل ها و همچنین نرخ همگرایی تاثیر می گذارد. HMS و BW به ترتیب اندازه حافظه هارمونی و پهنای باند است. n برای تخصیص تعداد جفت متغیرهای تصمیم گیری (معادل تعداد آلات موسیقی) استفاده می شود و حافظه هارمونی (HM) با اندازه HMS به صورت زیر تعریف می شود:

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & x_3^1 & \dots & x_n^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & \dots & x_n^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & x_3^{HMS} & \dots & x_n^{HMS} \end{bmatrix} \quad (3)$$

با تعیین پارامترهای اولیه، تولید بردارهای راه حل تصادفی شروع می گردد [4]. سپس یک بردار آشکار سازی جدید که انتخاب تصادفی، در نظر گرفتن حافظه و تنظیم گام را به عهده دارد فعال می شود. با توجه به انتخاب تصادفی، مقدار متغیر تصمیم  $x_i$ ، از گام های ذخیره شده در  $HM = [x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMS}]$  با احتمال  $(0 \leq HMCR \leq 1)$  انتخاب می شود.

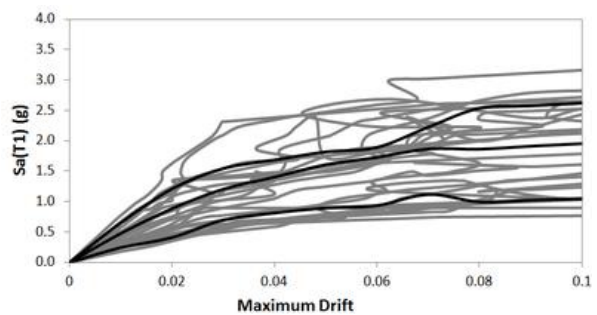


شکل ۲ - فلوجارت الگوریتم بهینه سازی جستجوی هارمونی

که در آن  $\Phi(0)$  تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد است.  $z$  و  $\beta z$  به ترتیب میانه و انحراف معیار لگاریتمی منحنی شکنندگی برای حالت خسارت  $Z$  ام است. با استفاده از الگوریتم بهینه سازی جستجوی هارمونی در بخش بعدی، دو پارامتر  $\mu$  و  $\beta$  با استفاده از ماکسیموم کردن  $LN(L)$  بدست می آید. میانه مقداری است با احتمال اینکه ۵۰٪ داده ها از آن بیشتر نباشد.

## ۲-۱- تحلیل دینامیکی افزایشی

روش تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) یک روش تحلیل پارامتری است که می تواند بیان روشنی از رابطه بین تقاضا و ظرفیت لرزه ای سازه فراهم کند (شکل ۱). هریک از منحنی های IDA، پاسخ سازه مورد بررسی را در شدت های مختلف لرزه ای به ازای رکورد لرزه ای خاص بیان می کند. این منحنی ها وابسته به انتخاب صحیح پارامتر IM و پارامتر تقاضا (EDP) می باشند. در انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی پل، ۱۲۹ رکورد لرزه ای که با نوع گسل، بزرگا، فاصله از ساختگاه و شرایط خاک سازگار باشد از وبسایت PEER برگرفته شد. مطالعات محققان نشان می دهد که EDP در پل ها در چند دسته شامل شکل پذیری ستون ها، تغییر شکل تکیه گاه ها و تغییر شکل تکیه گاه های کناری در نظر گرفته می شود از این میان، در تمام مطالعات شکنندگی پل ها، وزن معیار خسارت شکل پذیری ستون ها در شکنندگی پل از سایر شاخص ها به نحو چشمگیری بیشتر است [۴، ۵، ۶].



شکل ۱- منحنی تحلیل دینامیکی افزایشی

## ۲-۲- الگوریتم بهینه سازی

توسعه و کاربرد مدل های بهینه سازی در دهه گذشته بیشتر مورد توجه محققان بوده است. استفاده از روش های بهینه سازی هنگامی ضروری به نظر می رسد که "حداکثر سود و حداقل هزینه" مد

$$W^{(s+1)} = O(W^{(s)}) = W^{(s)} + \Delta W^{(s)} \quad (5)$$

خطا محاسبه شده در سراسر شبکه در مسیر رو به عقب از لایه خروجی از طریق لایه های شبکه توزیع می شود. در واقع، الگوریتم آموزشی سعی دارد وزن های شبکه را مطابق با معادله زیر تغییر دهد به طوری که مجموع مربعات خطاهای شبکه را می توان به حداقل رساند. مقدار  $\Delta W^{(s)}$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$\Delta W^{(s)} = -\alpha \frac{\partial E}{\partial W^{(s)}} + \beta \Delta W^{(s-1)} \quad (6)$$

در معادله بالا،  $\alpha$  و  $\beta$  ثابت هایی با مقادیر بین صفر و یک هستند و به ترتیب نرخ یادگیری و تغییرات جزئی در وزن شبکه را کنترل می کنند. علاوه بر این،  $E$  نشان دهنده تابع خطا،  $W$  بردار وزن و  $S$  شاخصی است که نشان دهنده تعداد تکرارها است. با توجه به مطالعات قبلی، الگوریتم (Levenberg-Marquardt (LM در این مطالعه مد نظر قرار گرفته است [۱۵ و ۷].

### ۳-۱-۱- استخراج ویژگی

وابستگی منحنی IDA به معیار شدت لرزه ای و پاسخ سازه ای نشان می دهد، اختصاص مقادیری کمی، که تمام ویژگیهای ورودی زمین لرزه را بیان کند دشوار است. با توجه به روش افزایشی این منحنی، ویژگی های استخراج شده (در یک مجموعه) از توزیع خاص تبعیت نمی کند. از سوی دیگر، بازه قرارگیری ویژگی های زلزله، مانند شدت آریاس (IA)، سرعت مطلق جمعی (CAV)، مشخصات شدت (IC) و چگالی انرژی ویژه (SED) در مقادیر مختلفی است. یکی از مهم ترین و رایج ترین فرضیه ها در آمار، نرمال بودن داده ها است. بنابراین، باید اطمینان حاصل نمود که داده ها به محیطی با توزیع مناسب انتقال یابند تا آموزش شبکه با راه حل های پیچیده صورت نگیرد.

### ۳-۱-۱-۱- استخراج ویژگی از داده های رکورد زمین لرزه

ویژگی های بسیاری برای شرح کامل از جنبش نیرومند زمین مورد نیاز است. انتخاب یک معیار شدت لرزه ای (IM) از آن نظر که یک رابطه احتمالی بین خطر زمین لرزه و نتایج پاسخ لرزه ای سازه ها فراهم می کند بسیار حایز اهمیت است. مطالعات متعدد اثرات استفاده از IM ها را برای مدل های تحلیل لرزه ای احتمالاتی سازه

### ۳- شبکه عصبی مصنوعی

به طور کلی شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) مدل های بیولوژیک الهام گرفته از مغز انسان هستند و ایده ای برای پردازش اطلاعاتی که از سیستم عصبی زیستی الهام گرفته شده می باشند. ساختار آموزش و فراگیری مغز انسان بر مبنای تجربه است. در حل مسایل از طریق شبکه های عصبی، تعدادی از عناصر (نرون ها) با ارتباطات داخلی قوی هماهنگ با هم کار کنند. با پردازش داده های تجربی، شبکه های عصبی مصنوعی دانش یا قواعد پنهان در داده ها را در ساختار شبکه انتقال می دهند. از مهم ترین ویژگی های یک سیستم هوشمند توانایی یادگیری است و رفتار یک شبکه وابسته به ارتباط بین اعضای آن است. به طور کلی، شبکه های عصبی شامل سه لایه ورودی، پنهان و خروجی است. لایه ورودی شامل اطلاعات خام و عملکرد لایه های پنهان با ورودی ها و وزن ارتباط بین آنها و لایه های پنهان تعیین می شود. عملکرد یک لایه خروجی مرتبط با فعالیت های واحد پنهان و وزن ارتباط بین واحد پنهان و خروجی است. آموزش شبکه از طریق ایجاد شبکه ای از این گره ها و استفاده از یک الگوریتم آموزش مناسب صورت می گیرد. شبکه های عصبی چند لایه از میان انواع مختلف شبکه عصبی، برای یادگیری مسایل غیرخطی و مسایل مربوط به تصمیم گیری های مختلف بکار برده می شوند. شبکه آموزش پس انتشار در شبکه عصبی در ایجاد  $n$  جفت ورودی-هدف  $P = [I^D, t^D]$  مد نظر می باشد. اگر مجموعه ای از پارامترهای وزن مانند  $W$  به اتصالات شبکه اختصاص داده شود، یک الگوی مانند  $t(I^D, W, A)$  بین بردار ورودی ID و بردار خروجی  $t$  تعریف می شود [۱۵ و ۷]. کیفیت این الگو با استفاده از تابع خطای زیر اندازه گیری می شود. خطای خروجی در معادله ۴ محاسبه شود:

$$E(\vec{W}) \equiv \frac{1}{2} \sum_{d \in D} \sum_{k \in \text{output}} (t_{kd} - o_{kd})^2 \quad (4)$$

$E(\vec{W})$  مجموع خطا خروجی،  $D$  مجموعه نمونه های آموزشی و Output مجموع خروجی های آموزش است،  $t_{kd}$  مقدار  $k$  امین مقدار تابع هدف (مربوط به  $k$  امین خروجی) برای  $d$  امین نمونه آموزشی است و  $o_{kd}$   $k$  امین مقدار خروجی (مربوط به  $k$  امین خروجی) برای  $d$  امین نمونه آموزشی است. بنابراین، مینیموم تکرار الگوریتم برای دستیابی به مقادیر بهینه پارامترهای وزن  $W$  استفاده می شود. بسیاری از روش های به حداقل رساندن عددی به فرم زیر است:

۷۰ کیلومتر و انواع گسل ها را شامل می شود. جدول ۱، مشخصات رکوردهای لرزه ای این مطالعه را نشان می دهد.

### ۳-۱-۲- استخراج ویژگی از خروجی NTHA

به طور مشابه، انتخاب پاسخ (targets) از تحلیل NTHA در شبکه عصبی بر مبنای مقادیر هدف بکار برده می شود. همانطور که ذکر شد، ماکسیموم شکل پذیری ستون های بتنی، از نتایج ۱۶۷۷ تحلیل دینامیکی غیرخطی استخراج می شود. به دلیل سختی بالای روسازه، انتظار می رود روسازه تحت بارگذاری لرزه ای به صورت الاستیک خطی باقی بماند [۵].

### ۴- جزئیات پل و مدلسازی عددی

به منظور ارائه منحنی های شکنندگی، پل سه دهانه پیوسته با ۲ قاب ۳ ستونی بتنی مد نظر است. طول هر دهانه ۳۰/۳ متر، طول کلی ۹۰/۹ متر و ارتفاع ۵/۲ متر است.

عموما در طراحی پل تمرکز خرابی در ستون های پل مطلوب می باشد. این مطلوبیت تا زمانی است که روسازه بطور پیوسته توسط ستون ها تحمل شود. ستون های پل بعد از هر بارگذاری لرزه ای به آسانی قابلیت بازرسی دارند و بدون نیاز به قطع جریان ترافیک تعمیر می شوند. ستون های پل عموماً نسبت به سایر مولفه های پل قابلیت دسترسی بیشتری دارند. در شدت های لرزه ای بالا، با طرح الاستیک باقی ماندن شاهتیرهای عرشه و وضعیت خسارت جزئی آن، ستون ها غیرالاستیک رفتار می کنند و سهم عمده ای از خسارت را متحمل می شوند. عرشه ظرفیت لنگر بزرگتری نسبت به ستون ها دارد و مفاصل پلاستیک در ستون ها شکل می یابد. به منظور جلوگیری از شکست کلی، ستون ها باید رفتار شکل پذیر از خود نشان دهند. مدل سازی پل در نرم افزار OpenSees استفاده شده است [۱۷]. عرض عرشه پل ۱۵ متر و با هشت شاهتیر تیر فولادی ساخته می شود. مقاومت استوانه ای اسمی بتن ۲۰/۷ مگاپاسکال و تنش اسمی جاری شدن آرماتور فولادی ۴۱۴ مگاپاسکال است. رفتار پوشش بتنی ستون و سرپایه با استفاده از مدل مصالح Concrete01 و رفتار هسته بتنی با مدل مصالح Confined Concrete01 مدل شده است. این مصالح از مدل کنت-اسکات-پارک بهره می گیرد که اثرات زوال و کاهش سختی در بارگذاری و باربرداری را شامل می شود.

(PSDMs) از قبیل شتاب اوج زمین (PGA)، حداکثر سرعت زمین (PGV)، شتاب طیفی میرا در پرپود اصلی سازه (Sa(T1)) با میرایی 5%  $\xi$  نشان می دهند. SED, CAV, IC, IA، به ترتیب نشان دهنده دامنه، مدت زمان، محتوای فرکانسی و انرژی جنبش نیرومند زمین است [۷و۱۵]. شدت آریاس بعنوان پارامتر مربوط به دامنه حرکت زمین است که پتانسیل خسارت زلزله را بعنوان انتگرال مربع شتاب زمین نشان می دهد:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} [a(t)]^2 dt \quad (۷)$$

که در آن g شتاب ثقل (9.81 m/s<sup>2</sup>) و a(t) تاریخچه زمانی شتاب است. بنابراین I<sub>A</sub> در واحد سرعت تعیین می شود. CAV شاخصی از توانایی خسارت زمین لرزه قوی را شامل می شود و سطح زیر شتاب مطلق را طبق معادله زیر است:

$$CAV = \int_0^{T_d} |a(t)| dt \quad (۸)$$

a(t)، مقدار شتاب مطلق در مدت (T<sub>d</sub>) بین اولین و آخرین فراگذشت شتاب آستانه است که عموماً 0.05g می باشد. انواع طیف مانند طیف فوریه، طیف پاسخ و .. می تواند محتوای فرکانس حرکت زمین را تشریح کند. پارامترهای طیفی را می توان در قالب فرکانس غالب، فرکانس متوسط، پهنای باند، فرکانس مرکزی و غیره بکار برد. I<sub>C</sub> به صورت زیر تعریف می شود:

$$I_C = a_{rms}^{1.5} T_d^{0.5} \quad (۹)$$

پارامتر جذر میانگین مربع شتاب زمین (RMS)، بعنوان a<sub>rms</sub> تعریف می شود. چگالی انرژی طیفی، (SED) از انتگرال مربع سرعت در مدت زمان موثر زلزله به دست می آید و دارای واحد m<sup>2</sup>/s است. این پارامتر تغییر در انرژی جنبشی ورودی در طول T<sub>d</sub> را نشان داده و در معادله ۱۰ تعریف می شود:

$$SED = \int_0^{T_d} [v(t)]^2 dt \quad (۱۰)$$

از این رو، به منظور ایجاد یک تخمین مناسب از عملکرد لرزه ای سازه، مجموعه ای از ۱۲۹ رکورد لرزه ای اصلاح شده جنبش نیرومند زمین جمع آوری شده است [۱۶]. رکوردهای لرزه ای شامل همه انواع خاک، بزرگا (ML) در محدوده ۴/۵-۷/۵، نزدیک ترین فاصله از سطح گسیختگی گسل در محدوده ۲۰ تا

جدول ۱- مشخصات رکوردهای لرزه ای

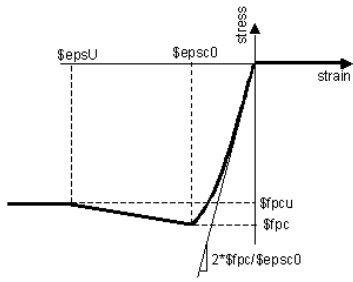
Earthquake Name	Station Name	Duration (s)	Magnitude	Mechanism	Rjb (km)	Rrup (km)	Ra log/tran (°)	Vs30 (m/sec)
"Northern Calif-04"	"Ferndale City Hall"	82.3	5.7	SS	56.94	57.21	224/314	219.31
"San Fernando"	"2516 Via Tejon PV"	70.2	6.61	R	55.2	55.2	065/155	280.56
"San Fernando"	"Pasadena - Old Seismo Lab"	101.15	6.61	R	21.5	21.5	180/270	969.07
"Imperial Valley-01"	"El Centro Array #9"	30.025	5	SS	32.44	34.98	000/090	213.44
"Northwest Calif-01"	"Ferndale City Hall"	40	5.5	SS	52.73	53.58	045/135	219.31
"Northern Calif-01"	"Ferndale City Hall"	40	6.4	SS	44.52	44.68	225/315	219.31
"Coyote Lake"	"SJB Overpass Bent 3 g.l."	26.85	5.74	SS	20.44	20.67	067/337	367.43
"Borrego"	"El Centro Array #9"	50	6.5	SS	56.88	56.88	000/090	213.44
"Imperial Valley-03"	"El Centro Array #9"	40	5.6	SS	24.58	25.24	000/090	213.44
"Northwest Calif-03"	"Ferndale City Hall"	40	5.8	SS	53.73	53.77	224/314	219.31
"Kern County"	"Taft Lincoln School"	54.35	7.36	R	38.42	38.89	021/111	385.43
"Northern Calif-02"	"Ferndale City Hall"	57.975	5.2	SS	42.69	43.28	044/134	219.31
"Parkfield"	"San Luis Obispo"	29.95	6.19	SS	63.34	63.34	234/324	493.5
"Northern Calif-06"	"Hollister City Hall"	61.3	5.2	SS	37.11	37.69	181/271	198.77
"Lytle Creek"	"Colton - So Cal Edison"	40	5.33	RO	29.18	30.11	090/180	301.95
"Central Calif-01"	"Hollister City Hall"	57.4	5.3	SS	25.11	25.81	181/271	198.77
"Northern Calif-03"	"Ferndale City Hall"	40	6.5	SS	26.72	27.02	044/314	219.31
"Lytle Creek"	"Cedar Springs Pumphouse"	10.225	5.33	RO	21.33	22.94	126/216	477.22
"Lytle Creek"	"Puddingstone Dam (Abutment)"	13.25	5.33	RO	29.49	30.02	055/325	421.44
"San Fernando"	"Fort Tejon"	10.4	6.61	R	59.52	61.64	000/090	394.18
"Lytle Creek"	"Santa Anita Dam"	5.925	5.33	RO	42.14	42.52	003/273	667.13
"San Fernando"	"Fairmont Dam"	61.15	6.61	R	25.58	30.19	056/326	634.33
"San Fernando"	"Carbon Canyon Dam"	40	6.61	R	61.79	61.79	130/220	235
"San Fernando"	"Gormon - Oso Pump Plant"	9.25	6.61	R	43.95	46.78	000/270	308.35
"San Fernando"	"LA - Hollywood Stor FF"	79.45	6.61	R	22.77	22.77	090/180	316.46
"San Fernando"	"Lake Hughes #1"	60.2	6.61	R	22.23	27.4	1021/111	425.34
"San Fernando"	"Palmdale Fire Station"	57.7	6.61	R	24.16	28.99	120/210	452.86
"San Fernando"	"Pasadena - CIT Athenaeum"	28.6	6.61	R	25.47	25.47	000/090	415.13
"San Fernando"	"Pearblossom Pump"	27.35	6.61	R	35.54	38.97	000/270	529.09
"San Fernando"	"Puddingstone Dam (Abutment)"	32.85	6.61	R	52.64	52.64	055/325	421.44
"San Fernando"	"Santa Anita Dam"	29.75	6.61	R	30.7	30.7	003/273	667.13
"San Fernando"	"Santa Felita Dam (Outlet)"	40	6.61	R	24.69	24.87	172/262	389
"San Fernando"	"Tehachapi Pump"	12.63	6.61	R	61.75	63.79	090/180	669.48
"San Fernando"	"Upland - San Antonio Dam"	29.95	6.61	R	61.72	61.73	015/0285	487.23
"San Fernando"	"Wheeler Ridge - Ground"	29.775	6.61	R	68.38	70.23	090/180	347.67
"San Fernando"	"Whittier Narrows Dam"	40	6.61	R	39.45	39.45	143/233	298.68
"San Fernando"	"Wrightwood - 6074 Park Dr"	19.975	6.61	R	61.64	62.23	025/295	486
"Northern Calif-07"	"Cape Mendocino"	14.625	5.2	SS	28.73	34.73	030/120	567.78
"Northern Calif-07"	"Petrolia General Store"	17.7	5.2	SS	28.48	34.67	075/345	368.72
"Northern Calif-07"	"Shelter Cove Sta A"	11.5	5.2	SS	58.78	62.76	200/290	594.83
"Northern Calif-07"	"Shelter Cove Sta B"	15.9	5.2	SS	59.7	63.64	070/160	518.98
"Friuli Italy-01"	"Barcis"	16.6	6.5	R	49.13	49.38	000/270	496.46
"Friuli Italy-01"	"Codroipo"	39.975	6.5	R	33.32	33.4	000/270	249.28
"Friuli Italy-02"	"Codroipo"	33.575	5.91	R	41.37	41.39	000/270	249.28
"Santa Barbara"	"Cachuma Dam Toe"	11.69	5.92	RO	23.75	27.42	250/340	465.51
"Tabas Iran"	"Boshrooyeh"	35	7.35	R	24.07	28.79	L1/T1	324.57
"Coyote Lake"	"Halls Valley"	60.025	5.74	SS	33.69	33.83	150/240	281.61
"San Fernando"	"Port Hueneme"	58.11	6.61	R	68.84	68.84	180/270	248.98
"Northern Calif-05"	"Ferndale City Hall"	93	5.6	SS	27.36	28.73	224/314	219.31
"Borrego Mtn"	"El Centro Array #9"	80	6.63	SS	45.12	45.66	180/270	213.44
"Coalinga-01"	"Parkfield - Fault Zone 6"	64.99	6.36	R	31.64	32.87	000/090	266.65
"Coalinga-01"	"Parkfield - Fault Zone 7"	59.99	6.36	R	29.91	31.21	000/090	297.46
"Coalinga-01"	"Parkfield - Fault Zone 8"	59.99	6.36	R	28.58	29.94	000/090	308.84
"Northern Calif-06"	"Hollister City Hall"	61.28	5.2	SS	37.11	37.69	181/271	198.77
"Borrego Mtn"	"El Centro Array #9"	79.99	6.63	SS	45.12	45.66	180/270	213.44
"Coyote Lake"	"San Juan Bautista - Hwy 101/156 Overpass"	26.84	5.74	SS	20.44	20.67	067/337	362.98
"Imperial Valley-06"	"Calipatria Fire Station"	39.635	6.53	SS	23.17	24.6	225/315	205.78
"Imperial Valley-06"	"Coachella Canal #4"	28.57	6.53	SS	49.1	50.1	4045/413	336.49
"Imperial Valley-06"	"El Centro Array #13"	39.625	6.53	SS	21.98	21.98	3140/323	249.92
"Imperial Valley-06"	"Niland Fire Station"	40	6.53	SS	35.64	36.92	090/360	212
"Imperial Valley-06"	"Plaster City"	18.785	6.53	SS	30.33	30.33	045/135	316.64
"Imperial Valley-06"	"Superstition Mtn Camera"	28.32	6.53	SS	24.61	24.61	045/135	362.38
"Imperial Valley-06"	"Victoria"	86.385	6.53	SS	31.92	31.92	075/345	242.05
"Imperial Valley-07"	"Brawley Airport"	10.86	5.01	SS	24.26	25.32	225/315	208.71
"Imperial Valley-07"	"Delta"	18.13	5.01	SS	49.4	49.93	262/352	242.05
"Imperial Valley-07"	"El Centro Array #1"	10.88	5.01	SS	23.76	24.84	1140/123	237.33
"Livermore-01"	"APEEL 3E Hayward CSUH"	39.995	5.8	SS	29.19	30.59	146/236	517.06
"Taiwan SMART1(5)"	"SMART1 I12"	41.78	5.9	R	25.7	26.77	EW/NS	275.82
"Taiwan SMART1(5)"	"SMART1 M01"	34.42	5.9	R	26.31	27.36	EW/NS	268.37
"Taiwan SMART1(5)"	"SMART1 M07"	33.68	5.9	R	24.68	25.79	EW/NS	327.61

ادامه جدول ۱- مشخصات رکوردهای لرزه ای

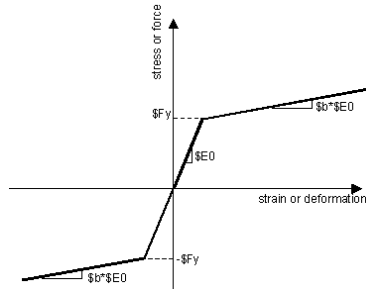
Earthquake Name	Station Name	Duration (s)	Magnitude	Mechanics m	Rjb (km)	Rrup (km)	Ra log/tran (°)	Vs30 (m/sec)
"Taiwan SMART1(5)"	"SMART1 O01"	39.5	5.9	R	27.3	28.31	EW/NS	267.67
"Taiwan SMART1(5)"	"SMART1 O07"	43.62	5.9	R	23.77	24.93	EW/NS	314.33
"Coalinga-01"	"Cantua Creek School"	64.99	6.36	R	23.78	24.02	270/360	274.73
"Coalinga-01"	"Parkfield - Cholame 12W"	59.99	6.36	R	55.05	55.77	270/360	359.03
"Coalinga-01"	"Parkfield - Cholame 3E"	59.99	6.36	R	40.01	40.98	000/090	397.36
"Coalinga-01"	"Parkfield - Cholame 3W"	59.99	6.36	R	44.82	45.7	000/090	230.57
"Coalinga-01"	"Parkfield - Cholame 4W"	59.99	6.36	R	45.49	46.35	000/090	410.4
"Coalinga-01"	"Parkfield - Cholame 5W"	59.99	6.36	R	47.88	48.7	270/360	236.59
"Coalinga-01"	"Parkfield - Cholame 6W"	59.99	6.36	R	49.4	50.2	000/090	251.57
"Coalinga-01"	"Parkfield - Cholame 8W"	59.99	6.36	R	50.98	51.75	000/270	256.82
"Coalinga-01"	"Parkfield - Fault Zone 11"	59.99	6.36	R	27.1	28.52	000/090	541.73
"Coalinga-01"	"Parkfield - Fault Zone 14"	64.99	6.36	R	28.11	29.48	000/090	246.07
"Coalinga-01"	"Parkfield - Fault Zone 16"	64.99	6.36	R	26.2	27.67	000/090	384.26
"San Fernando"	"Santa Anita Dam"	29.74	6.61	R	30.7	30.7	003/273	667.13
"Taiwan SMART1(5)"	"SMART1 C00"	32.82	5.9	R	25.5	26.59	EW/NS	309.41
"Taiwan SMART1(5)"	"SMART1 I06"	37.66	5.9	R	25.31	26.4	EW/NS	309.41
"Trinidad offshore"	"Rio Dell Overpass E Ground"	21.445	5.7	SS	68.02	68.58	000/270	311.75
"Trinidad offshore"	"Rio Dell Overpass W Ground"	21.445	5.7	SS	68.02	68.58	000/270	311.75
"Morgan Hill"	"APEEL 1E - Hayward"	59.985	6.19	SS	51.68	51.69	000/090	219.8
"Morgan Hill"	"Capitola"	28.365	6.19	SS	39.08	39.08	042/132	288.62
"Morgan Hill"	"Corralitos"	28.365	6.19	SS	23.23	23.24	220/310	462.24
"Morgan Hill"	"Foster City - APEEL 1"	59.985	6.19	SS	53.89	53.89	040/310	116.35
"Morgan Hill"	"Hollister City Hall"	28.365	6.19	SS	30.76	30.76	001/271	198.77
"Morgan Hill"	"Hollister Differential Array #3"	40	6.19	SS	26.42	26.43	255/345	215.54
"Morgan Hill"	"San Juan Bautista 24 Polk St"	59.985	6.19	SS	27.15	27.15	213/303	335.5
"Morgan Hill"	"San Justo Dam (L Abut)"	28.365	6.19	SS	31.88	31.88	270/360	543.63
"Morgan Hill"	"San Justo Dam (R Abut)"	28.365	6.19	SS	31.88	31.88	270/360	543.63
"Morgan Hill"	"UCSC Lick Observatory"	59.985	6.19	SS	45.47	45.47	050/320	713.59
"Bishop (Rnd Val)"	"McGee Creek - Surface"	6.855	5.82	SS	21.79	22.75	270/360	359.23
"Chalfant Valley-01"	"Benton"	39.97	5.77	SS	24.25	24.33	270/360	370.94
"Chalfant Valley-01"	"Bishop - LADWP South St"	39.92	5.77	SS	23.38	23.47	180/270	303.47
"Chalfant Valley-01"	"Lake Crowley - Shehorn Res."	39.995	5.77	SS	24.37	24.45	09/099	456.83
"Chalfant Valley-02"	"Benton"	39.995	6.19	SS	21.55	21.92	270/360	370.94
"Chalfant Valley-02"	"Convict Creek"	39.995	6.19	SS	29.35	31.19	000/090	382.12
"Chalfant Valley-02"	"Lake Crowley - Shehorn Res."	39.995	6.19	SS	22.08	24.47	0.009/09	456.83
"Chalfant Valley-02"	"Long Valley Dam (Downst)"	21.995	6.19	SS	18.3	21.12	000/090	537.16
"Chalfant Valley-02"	"Long Valley Dam (L Abut)"	21.995	6.19	SS	18.3	21.12	000/090	537.16
"Chalfant Valley-02"	"Mammoth Lakes Sheriff Subst."	39.995	6.19	SS	34.92	36.47	020/290	529.39
"Chalfant Valley-02"	"McGee Creek - Surface"	20.16	6.19	SS	28.2	30.11	270/360	359.23
"Chalfant Valley-02"	"Tinemaha Res. Free Field"	39.995	6.19	SS	50.92	51.98	000/090	467.62
"Chalfant Valley-03"	"Bishop - LADWP South St"	39.905	5.65	SS	24.3	24.41	180/270	303.47
"Chalfant Valley-04"	"Bishop - LADWP South St"	39.905	5.44	SS	23.99	24.75	180/270	303.47
"Superstition Hills-02"	"Calipatria Fire Station"	22.25	6.54	SS	27	27	225/315	205.78
"Superstition Hills-02"	"Plaster City"	22.14	6.54	SS	22.25	22.25	045/135	316.64
"Superstition Hills-02"	"Salton Sea Wildlife Refuge"	21.89	6.54	SS	25.88	25.88	225/315	191.14
"Landers"	"Amboy"	50	7.28	SS	69.21	69.21	000/090	382.93
"Landers"	"Desert Hot Springs"	50	7.28	SS	21.78	21.78	000/090	359
"Landers"	"Fort Irwin"	40	7.28	SS	62.98	62.98	000/090	367.43
"Landers"	"Hemet Fire Station"	56	7.28	SS	68.66	68.66	000/090	328.09
"Landers"	"Indio - Coachella Canal"	60	7.28	SS	54.25	54.25	000/090	339.02
"Landers"	"Silent Valley - Poppet Flat"	55	7.28	SS	50.85	50.85	000/090	659.09
"Landers"	"Twentynine Palms"	50	7.28	SS	41.43	41.43	000/090	635.01
"Big Bear-01"	"Desert Hot Springs"	60	6.46	SS	39.52	40.54	090/360	359
"Big Bear-01"	"Hemet Fire Station"	60	6.46	SS	47.6	48.39	090/360	328.09
"Big Bear-01"	"Hesperia - 4th & Palm"	60.01	6.46	SS	44.48	44.65	090/180	358.36
"Big Bear-01"	"Joshua Tree"	60	6.46	SS	40.99	41.87	090/360	379.32
"Big Bear-01"	"Mt Baldy - Elementary Sch"	60.01	6.46	SS	67.74	67.85	090/180	444.74
"Big Bear-01"	"Palm Springs Airport"	60	6.46	SS	51.51	52.48	090/360	312.47
"Big Bear-01"	"Phelan - Wilson Ranch"	60.01	6.46	SS	64.04	64.16	090/180	333.41

همچنین اثر لغزش آرماتور در محل اتصال ستون به سرپایه با مصالح bond-slip مدل شده است (شکل ۳). المان ها ستون ها و سرپایه ها با استفاده از Displacement Beam Column تولید می شوند که منطبق با مقطع فایبری می باشد و رفتار مقطع ستون را به خوبی توصیف می کند [۱۲۵]. ستون های دایره ای با قطر ۹۱۴/۴ میلی متر و ۱۲ عدد آرماتور  $\Phi 28$  در ستون های پل طرح شده است. لازم به ذکر است که انحنای افقی پل ۴۵ درجه (از پل های با انحنای کم) و تحلیل آن مشابه پل های مستقیم است. با این حال، اثر پیچش با المان

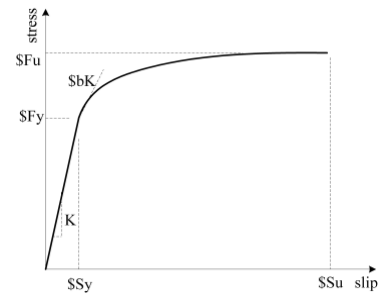
الاستیک و اختصا ص سختی پیچشی لحاظ شده است. منحنی رفتاری تکیه کناری در اشکال ۴ و ۵ آمده است. رفتار مصالح ضربه با شکاف ۳/۸ شده اند [۵]. جزئیات ستون بتن مسلح، سربایه و مقطع روسازه در شکل ۶ ساتی متری (در جهت طولی) به تکیه گاه کناری اختصاص داده شده نشان داده شده است [۱۷].



مدل مصالح Concrete01 پوشش بتن (c)

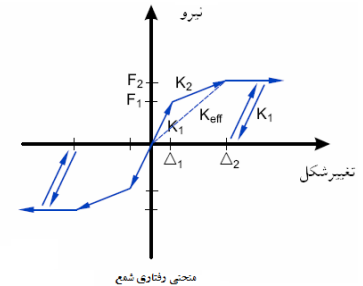
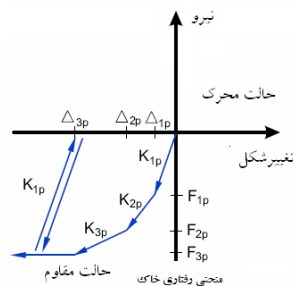
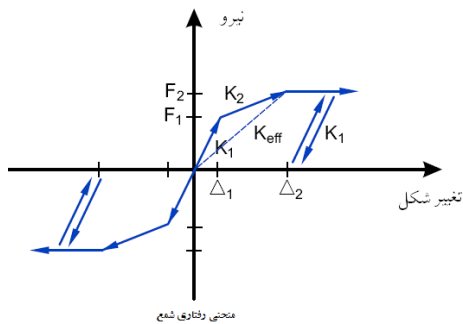


مدل مصالح Steel01 آرماتور (b)

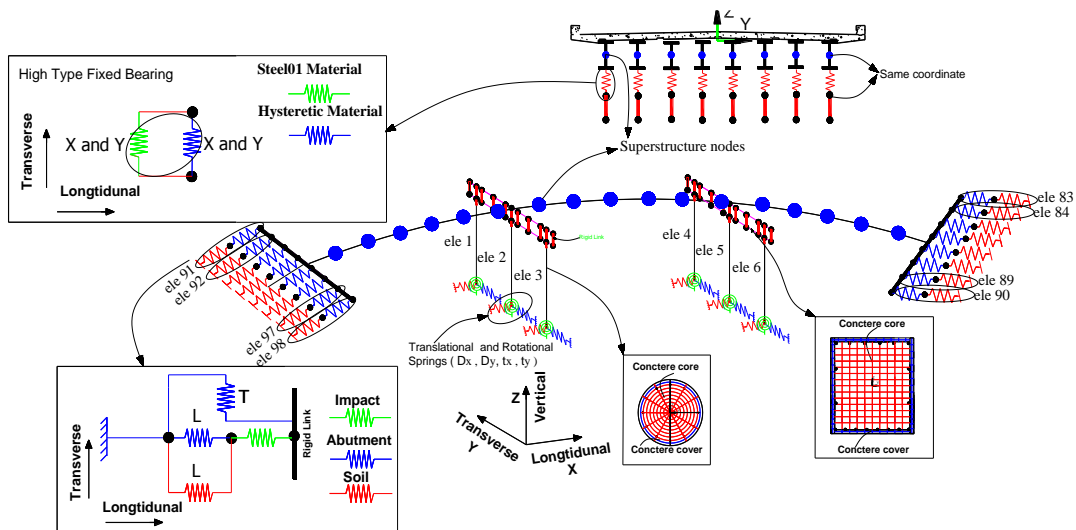


مدل مصالح Bond-slip در محل اتصال (a)

شکل ۳- a و b و c، مدل مصالح بکار رفته در مقطع ستون بتنی [۱۷]



شکل ۴- مدل تحلیلی تکیه گاه کناری در جهت طولی (سهم خاک و شمع) [۵]      شکل ۵- مدل تحلیلی تکیه گاه کناری در جهت عرضی (سهم شمع) [۵]



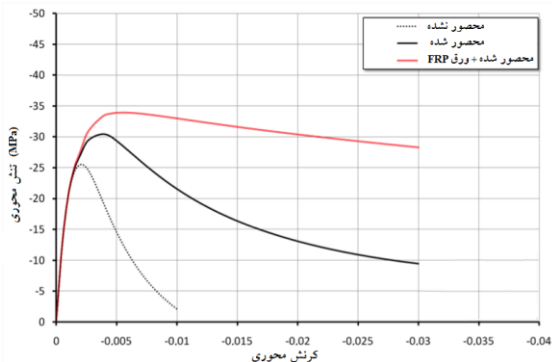
شکل ۶- مدل اجزای محدود پل سه دهانه

هسته بتنی با سطح مقطع دایره ای توسط تعدادی از نویسندگان پیشنهاد شده است، اما یکی از موفق ترین آنها، توسط مندر، پرستلی و پارک ارائه شده است. مدل آنها بر پایه نتایج

۴-۱- اثر محصورشدگی در شکل پذیری ستون بتنی یکی از وجوه تمایز این مطالعه با سایر پژوهش ها در مدلسازی، در نظر گرفتن اثر محصورشدگی بتن است. منحنی تنش- کرنش



عامل وابسته است: عامل شدت تنش محصور شده در آرماتور عرضی و عامل توزیع نیروی فشاری عرضی در بتن اطراف آن. عامل اول به طور مستقیم به تنش در آرماتور عرضی و مقدار آرماتور عرضی مربوط است که عموماً از طریق حجم آرماتور و حجم هسته بتنی محصور شده بیان می شود. عامل دوم مربوط به یکنواختی توزیع فشار عرضی در سراسر بتن اطراف آن است و تا حد زیادی وابسته به هندسه مقطع عرضی است. برای درصد مشابهی از آرماتور عرضی، خاموت های دایره ای در مقایسه با مربعی یا مستطیلی، محصورشدگی کارآمدتری از هسته مقطع را به دنبال دارد، چون فشار عرضی تولید شده توسط خاموت ها و نیرو در بتن به طور یکنواخت تر با توجه به هندسه ستون های دایره ای توزیع می شود. اهمیت اختصاص محصورشدگی بتن در شکل ۷ ارائه شده است.



شکل ۷- دیاگرام تنش- کرنش برای بتن در شرایط مختلف

#### محصورشدگی [۱۷]

شکل پذیری، نسبت انحنای ماکسیموم ( $\psi_u$ ) به انحنای جاری شدن ( $\psi_y$ ) است. در این نسبت،  $\psi_u$ ، زاویه انحنای شکست است و هنگامی که ظرفیت باربری ناحیه پلاستیک مربوط به لنگر خمشی به ۸۵ درصد مقدار لنگر در ناحیه الاستیک برسد اتفاق می افتد. زاویه انحنای  $\psi_y$ ، زاویه انحنای لنگر حد تسلیم است هنگامی که اولین آرماتور طولی تحت تنش کششی تسلیم برسد بدست می آید. بنابراین در این مطالعه، علاوه بر اختصاص مدل مصالح هسته و پوشش بتنی، رفتار آرماتور فولادی طولی، محصور شدگی هسته بتنی با خاموت عرضی نیز مدل شده است.

#### ۴-۲- تحلیل لنگر-انحنا

بارگذاری-تغییر شکل در یک مقطع بتن آرمه با استفاده از رابطه تنش کرنش مصالح غیر خطی بکار می رود. از این رو برای تحلیل

آزمایشگاهی به دست آمده بر روی نمونه های ستون با ابعاد واقعی است که از طریق آن تعداد زیادی از پارامترهای مربوطه به دست آمده است. در واقع، این مدل برای افزایش یکنواخت بار معتبر است، اما همچنین می تواند برای تعیین ظرفیت ستون های با نیروی فشاری عمودی و خمش استفاده شود [۱۸].

اخیراً با دستور ConfinedConcrete01 در بسته نرم افزاری OpenSees، اثر محصور شدگی منظور می گردد. این دستور برای ساخت یک جسم با مصالح تک محوره بتن محصور شده با توجه به کار Laterza و Gigliotti، Braga (۲۰۰۶) استفاده می شود. مدل بتن محصور شده (BGLmodel) دارای مقاومت کششی نیست و بر مبنای مطالعات karsan و jirsa، زوال سختی در بارگذاری و باربرداری را شامل می شود. مدل BGL اثرات محصور شدگی با توجه به آرایش مختلف آرماتور عرضی و/یا تقویت کننده های خارجی نظیر پوششهای FRP در نظر می گیرد. اثر محصورشدگی در طول ستون به خوبی توصیف می شود. به منظور بدست آوردن منحنی پوش فشاری، یک رویکرد غیرخطی در هر افزایش کرنش محوری ستون انجام می شود. منحنی مطلوب، از روابط مختلف تنش-کرنش منقطع، به دست می آید که هر کدام مربوط به سطوح مختلف محصورشدگی است. در حال حاضر، مدل Attard و Setunge در محاسبه هر منحنی بتن محصور شده، اجرا می شود [۱۷ و ۱۹].

در طراحی بر اساس ظرفیت و شکل پذیری در ستون های بتنی با مقطع دایره ای، محصورشدگی آرماتور عرضی تاکید شده است. در بارگذاری لرزه ای، محصور شدگی مناسب و کافی از هسته ستون بتنی با آرماتور عرضی، خصوصاً در مناطقی از ستون که انتظار می رود مفصل پلاستیک تشکیل شود، دستیابی به سطح مورد نیاز از دوران پلاستیک و ظرفیت باربری مناسب، حتی در زوایای انحنای بالا را قادر می سازد و شکل پذیری ستون بتنی را افزایش خواهد داد و همچنین از کماتش موضعی آرماتورهای طولی و شکستگی به علت نیروهای عرضی جلوگیری خواهد کرد [۲۱]. در مقایسه با مقطع محصور نشده، مقاومت فشاری بتن ممکن است بیش از ۱۰ درصد افزایش یابد. کارایی محصورشدگی آرماتور عرضی سطح مقطع بتنی، عمدتاً به دو در مقاطع بتن مسلح، تحلیل لنگر-انحنا بر پایه تعادل بین نیروها و کرنش های سازگار است. به منظور تعیین دقیق منحنی رفتاری

مقدار  $\psi_y$ ، مقطع ستون بتنی از طریق دوخطی کردن منحنی لنگر انحنا بدست می آید.

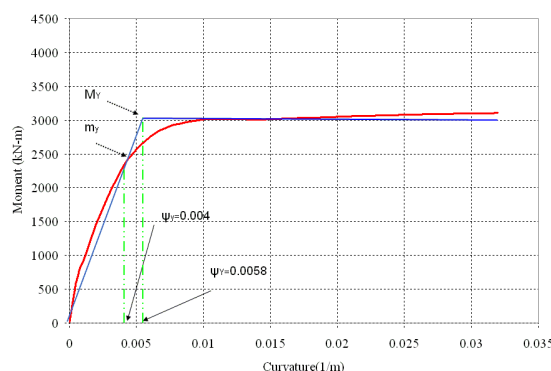
### ۵- حالات حدی

حالات حدی المان های مختلف پل به سادگی قابل تعیین نمی باشد. حالات حدی، حالاتی است که سازه به محض رسیدن به آن، از حیز انتفاع ساقط می گردد. حالات حدی بکار رفته در این مطالعه، مشابه پژوهش نیلسون می باشد [۵]. پژوهش های مختلف، حالات حدی را در بازه هایی نزدیک به یکدیگر تعریف می کنند. این حالات حدی برگرفته از خسارت هایی است که به سازه در شدت های مختلف لرزه ای تحمیل می شود. معیار شکل پذیری انحنایی ستون بتنی در قاب های ۳ ستونی پل، در ارزیابی آسیب پذیری و ارائه شکنندگی مد نظر است. شرح کمی و کیفی حالات خرابی ستون در پژوهش های مختلف در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- مقادیر حالات حدی پژوهش ها [۵]

شکست	گسترده	متوسط	کم	شکل پذیری انحنایی ( $\mu_\phi$ ) ستون بتنی	پژوهش
۶/۸۴	۳/۲۲	۱/۵۸	۱	✓	نیلسون (۲۰۰۵)
۴/۷۶	۱/۷۶	۱/۲	۱	✓	هانگ و همکاران
۵/۲۴	۳/۵۲	۲/۱	۱/۲۹	✓	نیلسون (روش بایسین)
$\mu \geq 7$	$4 \leq \mu \leq 7$	$2 \leq \mu \leq 4$	$1 \leq \mu \leq 2$	✓	جوی، دسروچس
شکست تعدادی	آسیب شدید ستون ها	ترک و خرد شدگی	خرد شدگی ناچیز	✓	HAZUS
از ستون ها	بدون شکست	متوسط ستون	در ستون		

لنگر انحنای مقطع ستون بتنی، ابتدا مقطع ستون در OpenSees مدل و سپس این مقطع به المان (Zerolngth)، اختصاص داده شد. آیین نامه کالترانس تحلیل لنگر انحنای مقطع را به منظور تعیین ظرفیت مقطع، پیشنهاد می دهد. شکل ۸ منحنی لنگر انحنای ستون بتنی پل را نشان می دهد.



شکل ۸- منحنی لنگر-انحنای ستون پل

یک مجموعه کلی) از یک توزیع خاص تبعیت نمی کند، روش هایی وجود دارد که داده ها را نرمالایز کند. از روش های نرمالایز کردن می توان روش تبدیل لگاریتمی، تبدیل باکس-کاکس و طرح فینی و .. نام برد. نتایج تبدیل باکس-کاکس نشان داد که یک محدوده قابل قبول برای کشیدگی و چولگی برقرار نیست و در نتیجه، فرضیه نرمال بودن داده ها رد می شود. در روش تبدیل لگاریتمی  $z_i$ ، متغیری است که بصورت تبدیل زیر بکار برده می شود:

$$y = \ln(ax_i \pm b) \quad (12)$$

که عموماً a برابر یک و b مقداری مثبت یا منفی است. همانطور که در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده، مقادیر کشیدگی و چولگی نشان می دهد که فرضیه نرمال بودن تایید می شود. آزمون های

### ۶- منحنی های شکنندگی بر مبنای نتایج شبکه عصبی

#### ۶-۱- تحلیل آماری از توزیع داده ها

IDA، ارزیابی جامعی از پاسخ حداکثر سازه ارائه می دهد که پارامتر تقاضای مهندسی (EDP) را برحسب معیار شدت مناسب نظیر Sa و PGA نشان می دهد. همانطور که قبلاً ذکر شد، شبکه های عصبی مصنوعی برنامه های کاربردی بر مبنای فرآیند پیچیده ای هستند که در برآورد پاسخ غیرخطی سازه ها مفید می باشد. بنابراین در پیش بینی تقاضای لرزه ای سازه بر اساس NN برای یک حالت حدی، معماری و آموزش شبکه بسیار مهم است. بدیهی است توانایی پیش بینی شبکه عصبی به پارامترهای ورودی برگرفته شده از رکوردهای زلزله (ورودی) و پاسخ های سازه ای (خروجی) وابسته است. تحلیل داده ها در متغیرهای ورودی (در

کولموگروف-اسمیرنوف و شاپیرو-ویلک، نرمال بودن داده ها را تایید می کنند. از این رو توزیع نرمال مناسب به هر یک از ویژگی های زلزله اختصاص یافت. شکل ۹، رابطه خطی داده ها در بکار گرفته می شوند.

جدول ۳- داده های انتقال یافته به فضای لگاریتمی

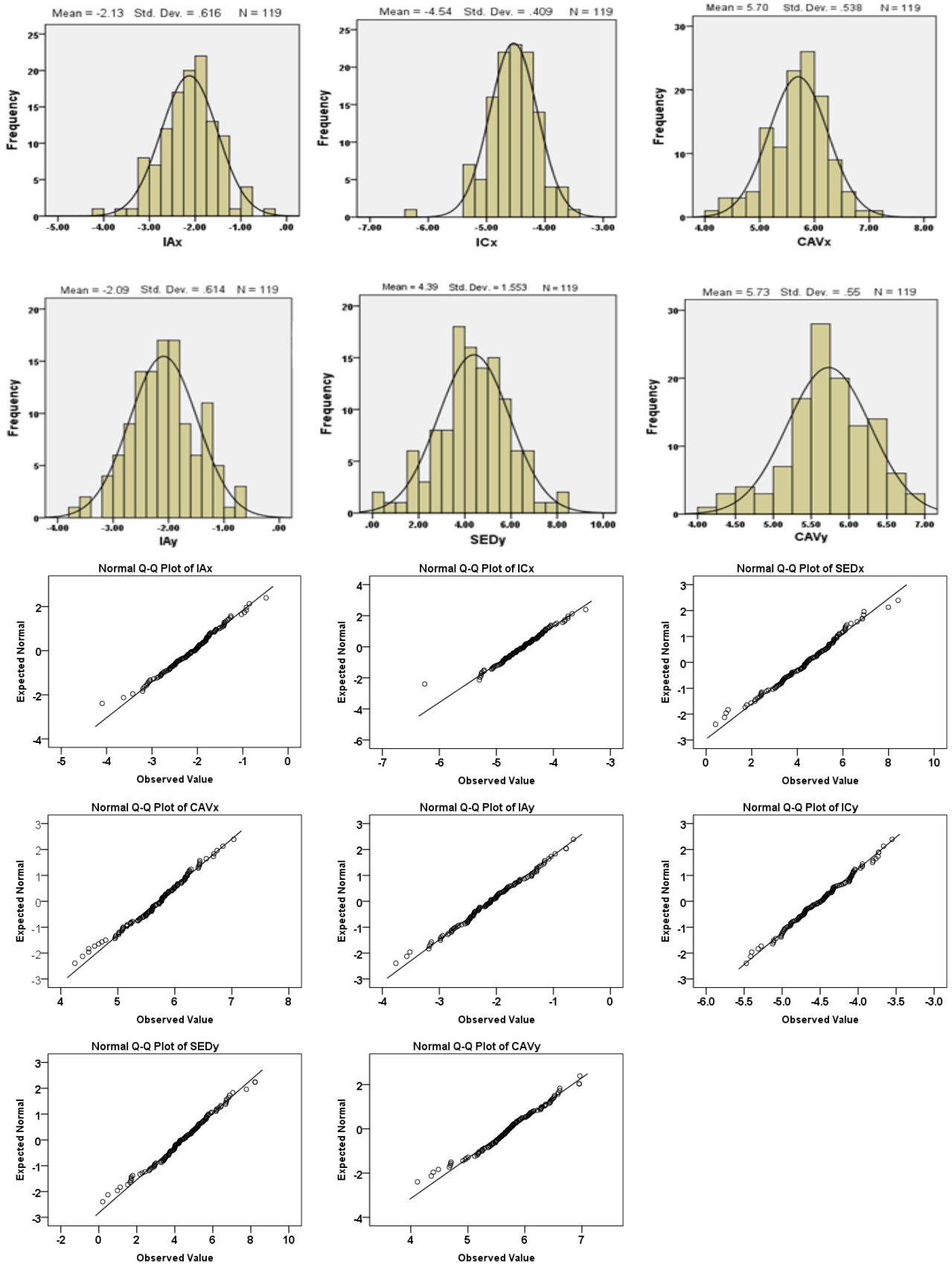
	Iax	Icx	SEDx	CAVx	Iay	Icy	SEDy	CAVy
تعداد داده	۱۲۹	۱۲۹	۱۲۹	۱۲۹	۱۲۹	۱۲۹	۱۲۹	۱۲۹
معتبر	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
غیر معتبر	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
میانگین	-۲/۱۳	-۴/۵۴	۴/۳۷	۵/۷	-۲/۰۹	-۴/۵۱	۴/۳۹	۵/۷۳
چولگی	-۰/۲۲	-۰/۴۳	-۰/۲	-۰/۳۱	-۰/۰۸	۰/۰۱	-۰/۱۷	-۰/۲۹
انحراف معیار چولگی	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۲
کشیدگی	۰/۴	۱/۹۳	۰/۲۴	۰/۱۳	-۰/۰۵	-۰/۳۶	۰/۲۳	۰/۴۰
انحراف معیار کشیدگی	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۴۴

جدول ۴- آزمون نرمالیتی داده ها

داده های انتقال یافته	کولموگروف-اسمیرنوف			شاپیرو-ویلک		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
IAx	۰/۰۴۹	۱۲۹	۰/۲	۰/۹۹۳	۱۲۹	۰/۸۳۸
ICx	۰/۰۴۶	۱۲۹	۰/۲	۰/۹۷۶	۱۲۹	۰/۰۳۲
SEDx	۰/۰۵۴	۱۲۹	۰/۲	۰/۹۹۱	۱۲۹	۰/۵۵۹
CAVx	۰/۰۷۴	۱۲۹	۰/۲	۰/۹۹۸	۱۲۹	۰/۳۹
IAYx	۰/۰۵	۱۲۹	۰/۲	۰/۹۹۴	۱۲۹	۰/۸۷۲
ICy	۰/۰۵۶	۱۲۹	۰/۲	۰/۹۹۲	۱۲۹	۰/۶۸۴
SEDy	۰/۰۵۸	۱۲۹	۰/۲	۰/۹۹۱	۱۲۹	۰/۶۲۸
CAVy	۰/۰۶۷	۱۲۹	۰/۲	۰/۹۸۴	۱۲۹	۰/۱۶۸

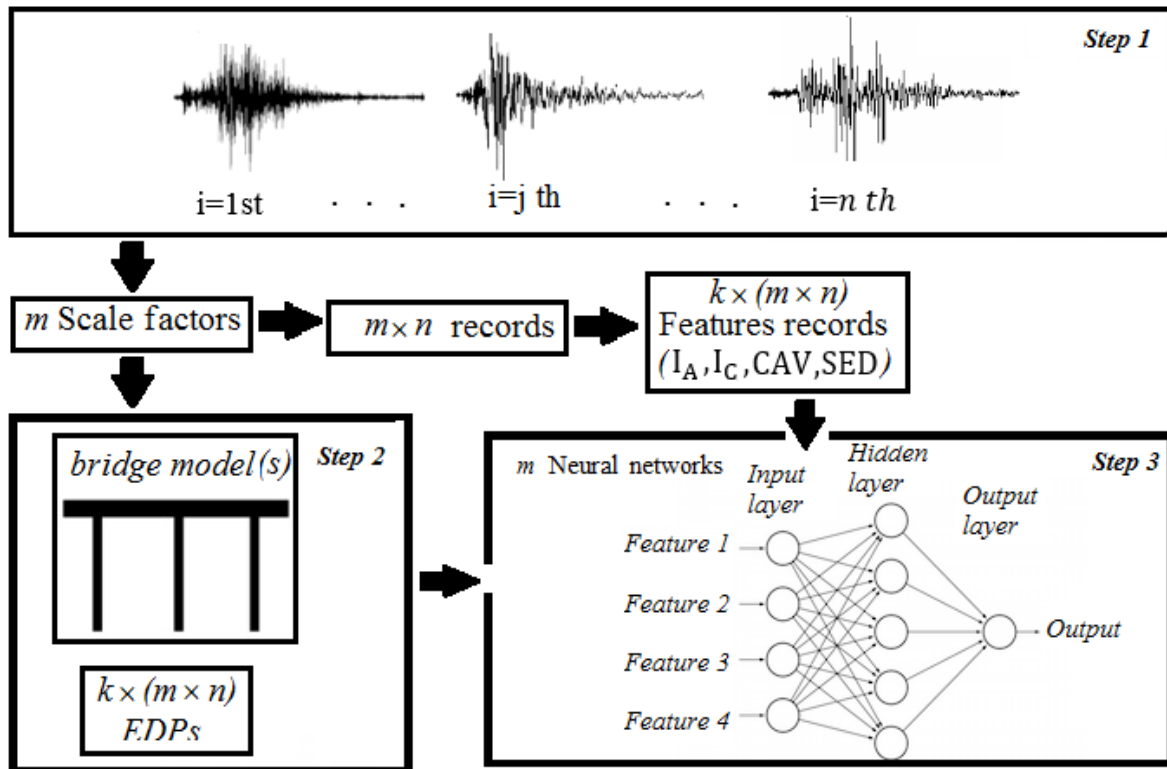
تابع انتقال tan-sigmoid در لایه مخفی و تابع انتقال خطی در لایه خروجی) که مرتبط با برنامه های کاربردی تخمین توابع رگرسیون است استفاده شده است [۲۳ و ۲۰]. با بکارگیری شبکه چند لایه و استفاده از الگوریتم پس انتشار (BP)، خطای ناشی از اختلاف بین خروجی شبکه و مقدار واقعی (هدف) به شبکه برگشت داده می شود. با برگشت این خطا، پارامترهای شبکه بگونه ای تنظیم می گردد که با الگوهای ورودی مشابه بعدی، خروجی را با دقت بیشتر ارائه نماید و مقدار خطا کمتر شود [۲۴]. شکل ۱۱، طرح رگرسیون، نمودار خطای هیستوگرام و میانگین مربعات خطا را نشان می دهد. در جداول ۵ و ۴، نتایج تحلیل تاریخیچه زمانی ۱۲۹ زمین لرزه و پیش بینی های شبکه عصبی (معیار شکل پذیری ستون ها در منحنی های شکنندگی) در ۱۳ گروه لرزه ای با PGA های یکسان و افزایشی ارائه شده است.

**۶-۲- پیش بینی شبکه عصبی بر مبنای نتایج NTHA**  
 ساختار و عملکرد شبکه، به استخراج تعداد مناسب ویژگیهای رکوردهای لرزه ای (ورودی شبکه) و استخراج مقادیر پاسخ سازه ای مدنظر متناسب با ورودی (هدف شبکه) وابسته است در مطالعه ای پیش بینی مقاومت فشاری بتن به کمک شبکه عصبی انجام شده است [۲۲]. در این بخش قابلیت پیش بینی شبکه عصبی آموزش دیده (تخمین EDP) با تمرکز بر شکل پذیری انحنایی ستون بتنی برای ترکیبات مختلف لرزه ای بررسی می شود. تعداد ۴ گره ورودی شبکه عصبی با دو لایه پنهان و گره های پنهان که سازگاری مناسبی بین پیش بینی های محاسباتی دقیق و کارآمد. نشان می دهد در نظر گرفته شد. بنابراین، تمام فرآیندهای اشاره شده در این بخش در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در انتخاب شبکه، از شبکه Feed Forward با

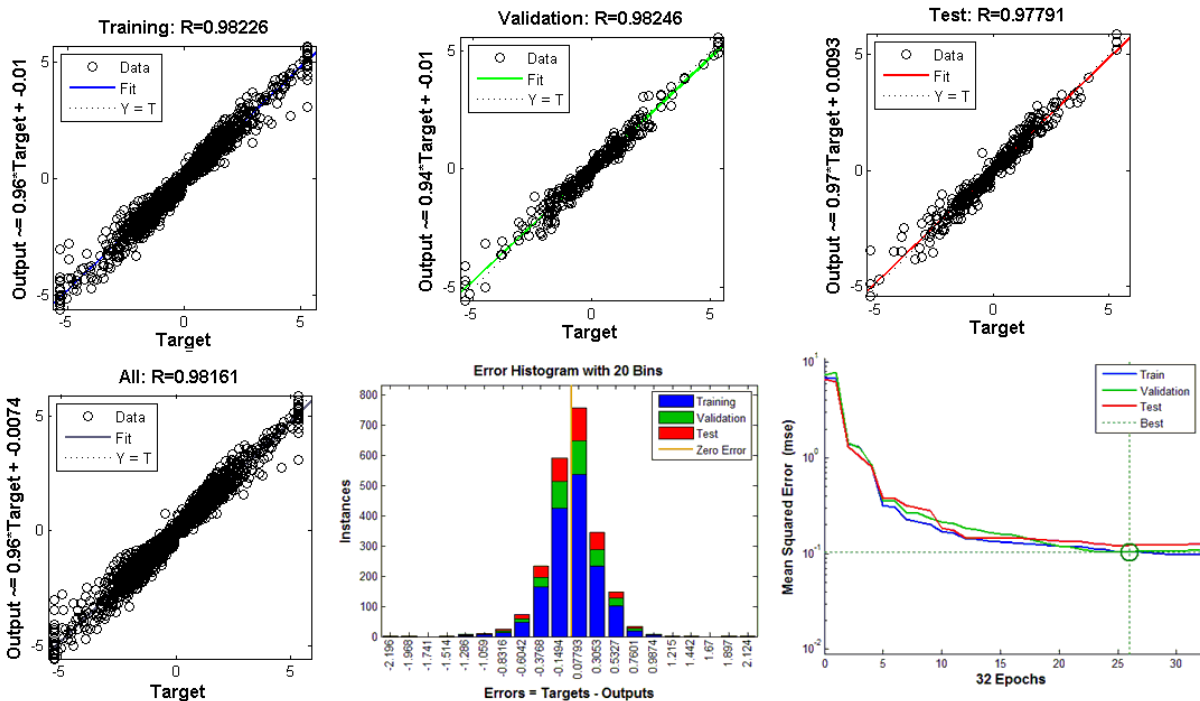


شکل ۹- نمونه داده نرمالایز شده، نمودار Q-Q از خصوصیات شدت لرزه ای

منحنی شکنندگی لرزه ای پل بتنی با معیار شکل پذیری ...



شکل ۱۰- شبکه عصبی بر مبنای تحلیل دینامیکی افزایشی



شکل ۱۱- نمودار رگرسیون، خطای هیستوگرام و خطای میانگین مربعات در پیش بینی شکل پذیری انحنایی ستون بتنی

## ۷- نتایج پیش بینی

شده است. در هر یک از گروه های لرزه ای، ۱۲۹ نمونه استفاده می شود. در رویکرد دوم، پیش بینی در یک گروه لرزه ای که شامل تمام داده های ورودی ۱۳ گروه لرزه ای قبلی است انجام می شود. با وجود

در پیش بینی پاسخ ها از دو رویکرد استفاده شده است. در رویکرد اول، پیش بینی در ۱۳ گروه لرزه ای مجزا (با افزایش PGA) انجام

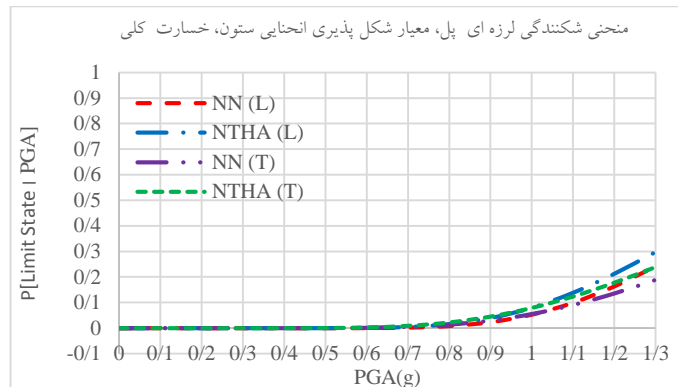
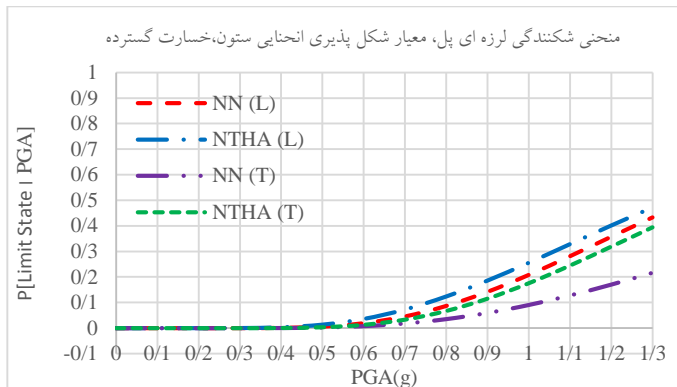
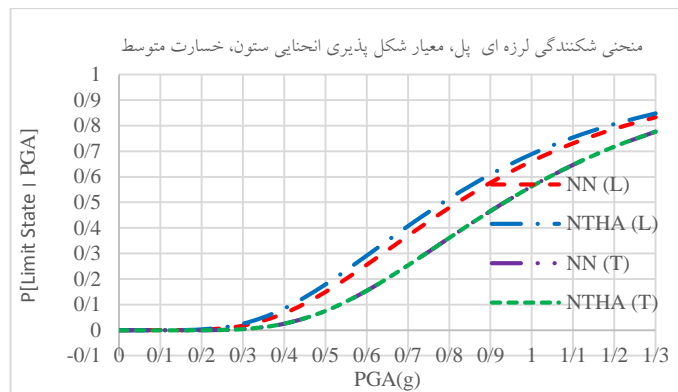
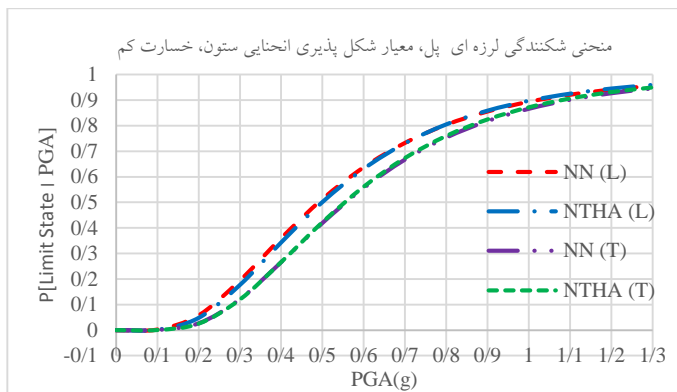
داشتن ۱۶۷۷ نمونه در رویکرد اخیر، نتایج ارزیابی شبکه عصبی با ۴ درصد دقت در رگرسیون را نشان می دهد (جدول ۶و۵). اشکال ۱۲ خروجی (حداکثر شکل پذیری انحنایی ستون در دو جهت مماسی و شعاعی) دقت پایینی را نشان می دهد. چون فرایند افزایشی با افزایش یافتن مقادیر ورودی ها و خروجی ها (خصوصا در شرایط غیرخطی) ، از یک توزیع مناسب پیروی نمی کند، در نتیجه پیچیدگی یافتن راه حل مناسب از طریق شبکه های عصبی را بیشتر می کند. بنابراین، برای پیش بینی در رویکرد دوم خروجی ها به طور جداگانه و از ۴ شبکه عصبی مجزا استفاده می شود. میانگین نتایج پیش بینی شده بیش از ۸۵٪ ۱۳ نشان می دهد.

جدول ۵- پیش بینی پاسخ سازه از طریق شبکه عصبی در ۱۳ گروه لرزه ای، مراحل آموزش، اعتبارسنجی و تست برای شکل پذیری انحنایی ستون (رویکرد اول)

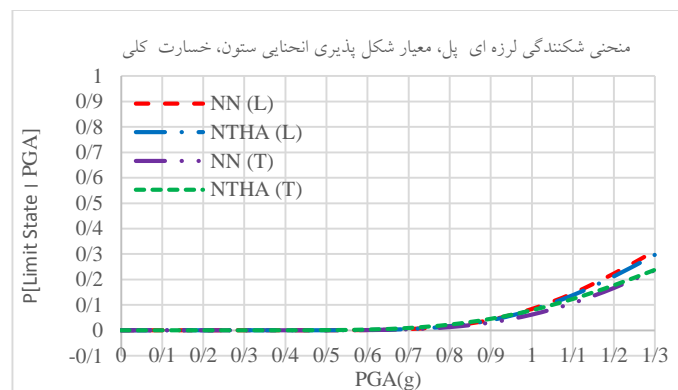
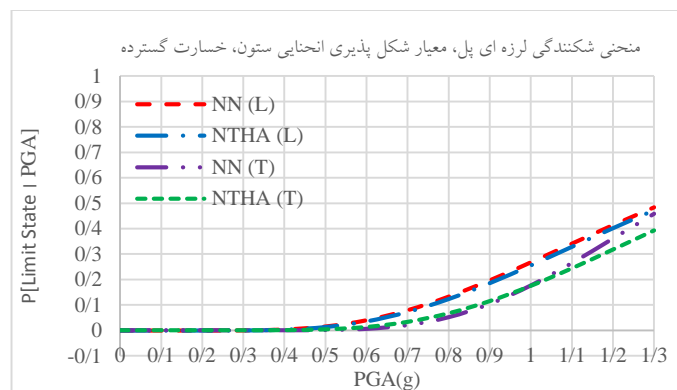
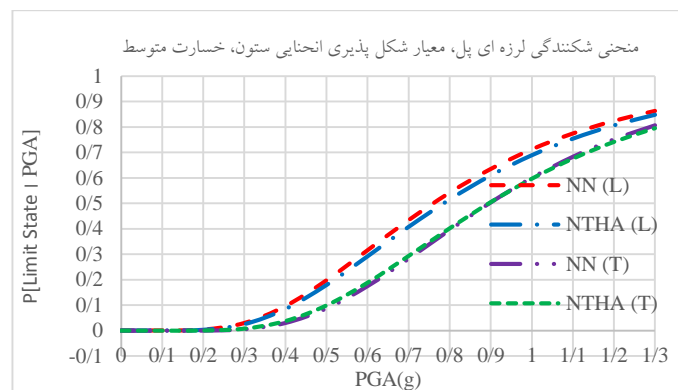
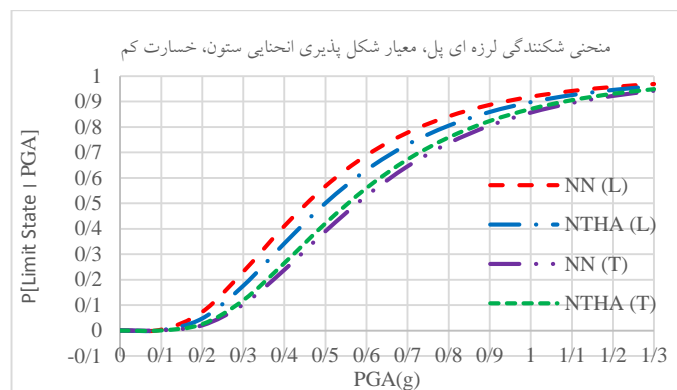
PGA	مرحله آموزش		مرحله اعتبارسنجی از آموزش		مرحله تست	
	R	Equation	R	Equation	R	Equation
0.1g	R=0.94	Y= 0.86*Target + 0.00098	R=0.95	Y=1*Target - 0.005	R=0.94	Y=0.91*Target + 0.0028
0.2g	R=0.94	Y= 0.87*Target + 0.0026	R=0.96	Y= 0.94*Target + 0.01	R=0.92	Y= 0.94*Target + 0.0023
0.3g	R=0.96	Y= 0.94*Target + 0.0031	R=0.83	Y= 0.95*Target + 0.013	R=0.91	Y= 0.74*Target + 0.027
0.4g	R=0.95	Y= 0.91*Target + 0.0009	R=0.94	Y= 0.84*Target - 0.035	R=0.94	Y= 0.77*Target + 0.0058
0.5g	R=0.95	Y= 0.98*Target - 0.028	R=0.91	Y= 0.94*Target - 0.074	R=0.89	Y= 0.91*Target - 0.023
0.6g	R=0.95	Y= 0.84*Target + 0.016	R=0.9	Y= 0.93*Target + 0.021	R=0.95	Y= 0.9*Target + 0.034
0.7g	R=0.95	Y= 0.84*Target + 0.0098	R=0.90	Y= 0.85*Target + 0.032	R=0.93	Y= 0.9*Target + 0.0099
0.8g	R=0.94	Y= 0.93*Target - 0.21	R=0.93	Y= 0.88*Target - 0.098	R=0.92	Y= 0.93*Target - 0.19
0.9g	R=0.93	Y= 0.83*Target + 0.036	R=0.90	Y= 0.96*Target + 0.15	R=0.91	Y= 0.89*Target + 0.18
1g	R=0.92	Y= 0.84*Target - 0.013	R=0.95	Y= 0.89*Target -0.041	R=0.92	Y= 0.78*Target + 0.03
1.1g	R=0.95	Y= 0.86*Target + 0.04	R=0.94	Y= 0.86*Target + 0.22	R=0.89	Y= 0.89*Target + 0.16
1.2g	R=0.97	Y= 0.94*Target + 0.0046	R=0.95	Y= 0.87*Target + 0.13	R=0.95	Y= 0.94*Target - 0.12
1.3g	R=0.96	Y= 0.83*Target - 0.17	R=0.91	Y= 0.95*Target - 0.1	R=0.91	Y= 0.88*Target - 0.0081

جدول ۶- پیش بینی پاسخ سازه از طریق شبکه عصبی در یک گروه لرزه ای، مراحل آموزش، اعتبارسنجی و تست برای شکل پذیری انحنایی ستون (رویکرد دوم)

شامل تمام گروه های لرزه ای	مرحله آموزش		مرحله اعتبارسنجی از آموزش		مرحله تست	
	R	Equation	R	Equation	R	Equation
Response-XP	R=0.98	Y=0.97*Target + 0.054	R=0.97	Y=0.96*Target + 0.064	R=0.95	Y=0.98*Target + 0.058
Response-XN	R=0.98	Y=0.96*Target - 0.057	R=0.96	Y=0.93*Target-0.11	R=0.97	Y=0.96*Target -0.078
Response-YP	R=0.98	Y=0.95*Target + 0.064	R=0.95	Y=0.91*Target + 0.11	R=0.94	Y=0.91*Target + 0.13
Response-YN	R=0.97	Y=0.95*Target - 0.073	R=0.95	Y=0.89*Target -0.14	R=0.95	Y=0.91*Target - 0.081



شکل ۱۲- مقایسه منحنی های شکنندگی مبتنی بر شبکه عصبی (رویکرد اول) و مبتنی بر تحلیل دینامیکی غیرخطی



شکل ۱۳- مقایسه منحنی های شکنندگی مبتنی بر شبکه عصبی (رویکرد دوم) و مبتنی بر تحلیل دینامیکی غیرخطی

### ۸- نتیجه گیری

های شکنندگی با رویکرد محاسبات نرم، می تواند مشکلات روش های تحلیلی، تجربی و کارشناسی را از طریق داده های دقیق و کافی برطرف کند. به دلیل الاستیک ماندن عرشه در شدت های لرزه ای بالا در پل

در این مطالعه با استفاده از رویکرد شبکه عصبی، احتمال شکست لرزه ای از طریق منحنی شکنندگی برجسته شده است. از طرفی ارائه منحنی

- [8]. Carlo Marano G, Greco R, Morronea E, (2011): Analytical evaluation of essential facilities fragility curves by using a stochastic approach. *Engineering Structures* 33(2011), 191–201.
- [9]. Rajeev P, Tesfamariam S, R (2012): Seismic fragilities for reinforced concrete buildings with consideration of irregularities. *Structural Safety* 39 (2012) 1–13.
- [10]. Penna A, Rota M, Mouyiannou M, Graziotti F, Magenes G (2013): An analytical procedure for the derivation of state-dependent fragility curves for masonry buildings. *Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2013 (VEESD 2013)*.
- [11]. Goda K, Yoshikawa H (2013): Incremental dynamic analysis of wood-frame houses in Canada: Effects of dominant earthquake scenarios on seismic fragility. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 48 (2013) 1–14.
- [12]. Siqueira GH, Sanda AS, Paultre P, Padgett JE (2014): Fragility curves for isolated bridges in eastern Canada using experimental results. *Engineering Structures* 74 (2014) 311–324.
- [13]. Hancilar U, Çaktı E, Erdik M, Franco G, Deodatis G (2014), Earthquake vulnerability of school buildings: Probabilistic structural fragility analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 67, 169–178.
- [14]. Walter Yang CH, Werner SD, DesRoches R (2015): Seismic fragility analysis of skewed bridges in the central southeastern United States, *Engineering Structures* 83, 116–128.
- [15]. Lagarosa ND, Fragiadakisa M (2007): Fragility Assessment of Steel Frames Using Neural Networks. *Earthquake Spectra*, 23, No. 4, pages 735–752.
- [16]. PEER ground motion database.
- [17]. Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees).
- [18]. Scott B.D, Park R., Priestley M.J.N, (1982) Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates, *ACI Structural Journal*, V. 79, No. 1, pp. 13-27.
- [19]. Attard M, Setunge S, (1996): Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete, *Material Journal ACI*, 93(5), 432-444.
- [۲۰]. خیلی علی، احمدی مسعود، امامی ابراهیم، خیرالدین علی (۱۳۹۴)، "پیش بینی طول مفص پلاستیک پایه های بتن آرمه با استفاده از الگوریتم شبکه های عصبی مصنوعی"، تحقیقات بتن، سال هشتم، شماره اول بهار و تابستان ۹۴.
- [21]. Tang CW, Chen HJ, Yen T. (2003), "Modeling Confinement Efficiency of Reinforced Concrete Columns with Rectilinear Transverse Steel using

های قابی، شکنندگی پل، وابستگی زیادی به خسارت ستون های پل در حالات حدی مختلف دارد. در ارائه منحنی شکنندگی کلی پل، وزن معیار شکل پذیری ستون های بتنی بسیار تاثیر گذار است. مقایسه منحنی های شکنندگی شبکه عصبی و تحلیل تاریخچه زمانی نشان می دهد که منحنی ها در جهت مماسی و شعاعی از انطباق مناسبی برخوردارند. در هر دو رویکرد محاسباتی، با اندکی اغماض مربوط به پیچیدگی حل مسئله پیش بینی، انطباق مناسب منحنی ها را نشان می دهد. در رویکرد اول، تنها اختلاف بین منحنی ها مربوط به حالت حدی گسترده در جهت عرضی است و دلیل آن محدوده قرارگیری شاخص خسارت و ضرایب معادلات خطی فیت شده در شبکه عصبی است. توجه کنید که منحنی ها در رویکرد دوم انطباق بهتری را در شدت های لرزه ای بالا دارند. لازم به ذکر است رویکرد منحنی های شکنندگی مورد بحث در اینجا را می توان از طریق ملحوظ نمودن عدم قطعیت توسعه داد، همچنین قابلیت اطمینان شبکه های عصبی و دقت، از مسائل بالقوه ای است که تحقیقات آن اجتناب ناپذیر است.

## ۸- مراجع

- [1]. Mander J, (2000): Fragility curve development for assessing the seismic vulnerability of highway bridge. University at Buffalo, State University of New York.
- [2]. Kim SH, Feng MQ (2003): Fragility analysis of bridges under ground motion with spatial variation, *International Journal of Non-Linear Mechanics* 38, 705 – 721.
- [3]. Kim SH, Shinozuka M, (2007): Development of fragility curves of bridges retrofitted by column jacketing. *Probabilistic Engineering Mechanics* 19 (2004) 105–112.
- [4]. Rezaul Karim K, Yamazaki F (2007): Effect of isolation on fragility curves of highway bridges based on simplified approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, 414–426.
- [5]. Nielson B (2005): Analytical Fragility Curves for Highway Bridges in Moderate Seismic Zones, A Thesis presented to the Academic Faculty.
- [6]. Padgett, JE. and DesRoches, R (2007): Sensitivity of Seismic Response and Fragility to Parameter Uncertainty. *Journal of Structural Engineering*, (ASCE) 133 (12), 0733-9445.
- [7]. Mitropoulou CC, Papadarakakis M, (2011): Developing fragility curves based on neural network IDA predictions. *Engineering Structures* 33 (2011) 3409–3421.



- Artificial Neural Networks”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 6, pp. 775–783.
- [22]. Lee SC. (2003), “Prediction of Concrete Strength using Artificial Neural Networks” Engineering Structures, Vol. 25, pp. 849–57.
- [23]. Demuth H, Beale M, Hagan M. (2009) “Neural network toolbox: user’s guide. Version 6., USA: MathWorks”, Inc.
- [24]. Oscar M, Ricardo F, Laura Q, Marcelo R, (2009). “Structural optimization for performance-based design in earthquake engineering: Applications of neural networks”, Volume 31, Issue6, November, Pages 490–499.

## Development of Seismic Fragility of Concrete Bridge with Column Ductility Measure and Neural Network Approach

K. Karimi-Moridani

Department of Structural Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

P. Zarfam \*

Department of Structural Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

M. Ghafory Ashtiany

Department of Structural Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

### Abstract

The objective of the present research approach based on soft computing (neural network) in the evaluation of seismic fragility of the highway bridge. In addition to the empirical methods and expert's judgmental, seismic fragility curves are often determined by using analytical method in Structures, recently. The derivation of seismic fragility curves of the horizontal curved bridge based on the neural network with a focus on concrete column ductility measure by using 129 seismic records is performed. Earthquake records have been chosen from the PEER strong motion database and scaled on 0.1g to 1.3g. By using 1677 nonlinear dynamic analysis, incremental dynamic analysis (IDA) curves was drawn. Characteristics of earthquake ground motion as input and extraction of nonlinear dynamic analysis of columns ductility as output, are variables in building the neural network. Feature Extraction different records in different seismic intensity represents a seismic record neural network. Obviously, these characteristics are properly associated with structural damage. By transforming collection features different seismic record (matrix  $n \times m$ ) to the data with the same characteristics of seismic input (matrix  $p \times m$ ,  $p < m$ ) through factor analysis, Neural network prediction in order to determine the response of structures, computational effort is much reduced with acceptable accuracy.

**Keywords:** Bridge, Curvature Ductility, Concrete Column, Neural Network, Fragility, Statistical Distribution.

---

\*Corresponding author: zarfam@srbiau.ac.ir