

# ارزیابی هوشمند آسیب و پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل در ایران

رامین فضلی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمد شامخی امیری\* (استادیار)

حسین پهلوان (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی یک سازه، که هر دو ویژگی سازه‌یی و زلزله را در بر می‌گیرد، در زمان طراحی سازه‌های جدید و هم برای ارزیابی تاب‌آوری سازه‌های موجود، اهمیت زیادی دارد. هدف پژوهش حاضر، ارزیابی دقیق آسیب و پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی تحت اثر زلزله‌های ایران با استفاده از برنامه‌نویسی بیان ژن است. برای این منظور، یک سیستم یک درجه‌ی آزادی غیرکشسان تحت مجموعه‌یی از رکوردهای زلزله‌های ایران برای محاسبه‌ی آسیب طیفی استفاده شده است. سپس با استفاده از برنامه‌نویسی بیان ژن، مدل ریاضی صریح با تعریف یک تابع برازندگی برای آن استخراج و همچنین، شاخص آسیب پارک-انگ برای تعیین کمیت طیف آسیب استفاده شده است. هر دو ویژگی سازه‌یی و زلزله در پیش‌بینی مدل طیف آسیب لرزه‌یی نقش خواهند داشت. در انتها، یک معادله‌ی ساده‌شده برای اندازه‌گیری طیف آسیب لرزه‌یی سازه‌ها، برای حرکت‌های زمین در ایران، که هر دو ویژگی را در بر می‌گیرد، پیشنهاد شده است.

واژگان کلیدی: طیف آسیب لرزه‌یی، شاخص آسیب پارک-انگ، برنامه‌نویسی بیان ژن، سیستم یک درجه‌ی آزادی غیرکشسان (SDOF)، زلزله‌ی نزدیک گسل.

Ramin.Fazli@shahroodut.ac.ir

Shamekhi@shahroodut.ac.ir

Pahlavan@shahroodut.ac.ir

## ۱. مقدمه

امروزه، پیش‌بینی آسیب ناشی از زلزله، هم در زمان طراحی سازه‌های جدید و هم برای ارزیابی تاب‌آوری سازه‌های موجود، اهمیت حیاتی دارد. آسیب وارده‌ی ناشی از زلزله به سازه‌ها می‌تواند با استفاده از روش‌های جدید و پیشرفته، شامل مدل‌سازی عددی و تحلیل دینامیکی، به صورت کمی و با دقت بالا ارزیابی و برآورد شود. روش‌های مذکور با در نظر گرفتن پارامترهای اصلی سازه و ویژگی‌های خاص زلزله، امکان تجزیه و تحلیل دقیق آثار زلزله بر روی سازه‌ها را فراهم می‌آورند. اما از مشکلات روش‌های اخیر می‌توان به زمان‌بر و هزینه‌بر بودن آن‌ها اشاره کرد.

تقاضاهای بیشینه، مانند شکل‌پذیری بیشینه و شتاب بیشینه‌ی زمین، که معمولاً توسط آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌یی استفاده می‌شوند، به طور مناسب منعکس‌کننده‌ی آسیب لرزه‌یی یک سازه نیستند. تقاضاهای تغییرشکل تحمیل‌شده به یک المان سازه‌یی توسط زمین‌لرزه ماهیت چرخه‌یی دارند، و نتایج مرتبط با آسیب تجمعی، تأثیر قابل توجهی در مقاومت لرزه‌یی یک سازه

اگرچه خواسته‌های اخیر ضروری هستند، اما فقط تکیه بر چنین خواسته‌هایی ناکافی است، به ویژه برای سازه‌هایی که انتظار می‌رود تغییرشکل خمیری و اتلاف انرژی را در نظر نمی‌گیرند.<sup>[۱]</sup> علاوه بر این، آن‌ها مدت زمان و محتوای بسامدی یک زمین‌لرزه را در محاسبه‌های خود لحاظ نمی‌کنند.

این‌نامه‌های طراحی لرزه‌یی، آثار بحرانی مذکور را در نظر نمی‌گیرند. در نتیجه، ضریب زلزله‌یی که در محاسبه‌ی برش طراحی در تراز پایه به کار می‌رود، ممکن است برای کنترل آسیب لرزه‌یی در سازه‌های شکل‌پذیری، که در معرض حرکت‌های زمینی با محتوای انرژی بالا قرار دارند، ناکافی باشد.<sup>[۲،۳]</sup> طیف طراحی لرزه‌یی به دست آمده با استفاده از شتاب طیفی (شناخته‌شده به عنوان طیف طراحی کشسان) و ضریب رفتار سازه (برای در نظر گرفتن آثار رفتار غیرکشسان و شکل‌پذیری در کاهش برش پایه‌ی طراحی)، نقش عوامل اصلی که در بالا توضیح داده شد، را نادیده می‌گیرند. بنابراین، نیاز به روش برآورد آسیب بالقوه‌یی است که پارامترهای اصلی سازه و زلزله را در نظر بگیرد. یک راه‌حل، استفاده از یک

تقاضاهای بیشینه، مانند شکل‌پذیری بیشینه و شتاب بیشینه‌ی زمین، که معمولاً توسط آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌یی استفاده می‌شوند، به طور مناسب منعکس‌کننده‌ی آسیب لرزه‌یی یک سازه نیستند. تقاضاهای تغییرشکل تحمیل‌شده به یک المان سازه‌یی توسط زمین‌لرزه ماهیت چرخه‌یی دارند، و نتایج مرتبط با آسیب تجمعی، تأثیر قابل توجهی در مقاومت لرزه‌یی یک سازه

\*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۱/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷.

استناد به این مقاله:

فضلی، رامین، شامخی امیری، محمد، و پهلوان، حسین، ۱۴۰۳. ارزیابی هوشمند آسیب و پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل در ایران.

DOI: 10.24200/j30.2024.63776.3287. ۶۳-۵۰. صص. ۴۰(۴).

طیف غیرکشسان است، که آسیب تجمعی را ثبت می‌کند. در این راستا، طیف آسیب به‌عنوان یک ابزار مفهومی، نموداری است که ارتباط میان میزان آسیب لرزه‌یی با دوره‌ی تناوب سازه را نشان می‌دهد. طیف اخیر ارزیابی آسیب‌پذیری، توانایی ثبت کمی آسیب‌های لرزه‌یی بالقوه را در مجموعه‌ی وسیعی از ساختمان‌ها با در نظر گرفتن هم‌خواص سازه‌یی و هم‌ویژگی‌های زمین‌لرزه ارائه می‌دهد.

این رویکرد توسط برخی پژوهشگران بررسی و در ادامه، بعضی از کارهای مرتبط توضیح داده شده است.

بزرگ‌نیا و برترو (۲۰۰۳)<sup>[۴]</sup> طیف آسیب را با ترکیب انرژی هیستریک نرمال‌شده و شکل‌پذیری تغییرشکل پیشنهاد کردند. طیف آسیب با در نظر گرفتن صدها رکورد حرکت زمین ثبت‌شده در طول زلزله‌های لاندز و نورث‌ریج محاسبه شده است. کانت و چای<sup>۱</sup> (۲۰۰۴)<sup>[۵]</sup> نیز یک روش ساده‌ی مبتنی بر ایجاد رابطه بین انرژی ورودی لرزه‌یی و انرژی هیستریک مستهلک‌شده را برای تعیین طیف تقاضای چرخه‌یی غیرارتجاعی مبتنی بر آسیب، که قادر به استفاده در تحلیل لرزه‌یی و طراحی سازه‌هاست، پیشنهاد کرده‌اند. کوزنزا<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۹)<sup>[۶]</sup> یک روش ساده را پیشنهاد کرده‌اند، که اثر تجمعی آسیب را در بر می‌گیرد، و برای طراحی لرزه‌یی و ارزیابی سازه‌ها استفاده می‌شود. همچنین، یک ضریب خسارت معادل برای تعیین مقاومت

اصلاح‌شده یا طیف جایجایی غیرکشسان را معرفی کردند، که قادر به محاسبه‌ی آسیب ناشی از زلزله است. ژای<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۳)<sup>[۷]</sup> یک مدل ریاضی برای برآورد آسیب طیفی برای زمین‌لرزه‌هایی از نوع توالی پس‌لرزه‌های زلزله‌ی اصلی پیشنهاد و تأثیر آن را در دوره‌ی تناوب سازه، ضریب کاهش مقاومت، نسبت میرایی، نسبت سختی پس از تسلیم، و نیز وضعیت سایت را در مدل آسیب طیفی پیشنهادی بررسی کرده‌اند. گرکو<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۷)<sup>[۸]</sup> با پیشنهاد یک رویکرد تصادفی برای تعیین طیف غیرکشسان مبتنی بر آسیب لرزه‌یی، آثار تجمعی آسیب را با استفاده از مدل آسیب پارک-آنگ<sup>۵</sup> (۱۹۸۵)<sup>[۹]</sup> بررسی کرده‌اند.

همان‌طور که توضیح داده شد، پیش‌بینی آسیب احتمالی برای طیف وسیعی از سازه‌ها، که می‌تواند مستقیماً توسط طیف‌های آسیب ارائه شود، در طراحی سازه‌های جدید مقاوم و یا ارزیابی مقاومت لرزه‌یی سازه‌های موجود می‌تواند استفاده شود. بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده تاکنون برای تعیین آسیب به‌طور غیرمستقیم از اصلاح طیف مبتنی بر تغییرشکل غیرکشسان استفاده کرده‌اند. روش‌های ذکرشده کلاً براساس تغییرشکل سازه در پاسخ به بارگذاری‌های جانبی، آسیب را تخمین می‌زنند. اما پژوهش‌های اندکی، مستقیماً طیف آسیب را محاسبه کرده‌اند.

استفاده از روش‌های رگرسیون معمولی برای برآورد طیف آسیب در بسیاری از مطالعات انجام‌شده تاکنون رایج بوده است. آن‌ها با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های تحلیلی، رابطه‌یی بین پارامترهای غیرمستقل طیف آسیب را برآورد می‌کنند و می‌توانند به عنوان ابزاری مفید برای تخمین آسیب بالقوه‌ی سازه‌ها استفاده شوند.

روش‌های یادگیری ماشین<sup>۱۱</sup> در بهبود دقت مدل‌ها برای تخمین طیف آسیب در مقایسه با روش‌های رگرسیون معمولی، مزایای ویژه‌یی دارند و قابلیت مدل‌سازی روابط غیرخطی پیچیده بین ورودی‌ها و خروجی‌ها، امکان برآورد دقیق‌تر داده‌ها، و افزایش معنادار دقت در تخمین آسیب را فراهم می‌آورند. روش‌های یادگیری ماشین، با توانایی برجسته‌ی خود در استفاده از داده‌های بزرگ و پیچیده و شناسایی الگوهای غیرخطی و تعامل‌های میان‌ویژگی‌ها،

ون<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۸)<sup>[۱۰]</sup> با پیشنهاد و بررسی طیف‌های آسیب برای نوع توالی پس‌لرزه‌های اصلی برای زمین‌های با خاک نرم دریافتند که تأثیر خاک نرم در طیف آسیب می‌تواند بیش از ۴۰٪ باشد. همچنین ایشان و برخی دیگر از همکارانشان (۲۰۱۸)<sup>[۱۱]</sup> طیف آسیب‌های ناشی از پس‌لرزه‌های زلزله‌های اصلی را که معمولاً در اعماق کمتر از ۷۰ کیلومتری مناطق لرزه‌خیز سراسر جهان رخ می‌دهند، در پوسته‌ی جهانی مطالعه کرده‌اند. سپس یک مدل ریاضی برای برآورد طیف آسیب ارائه داده و نشان داده‌اند که پس‌لرزه‌هایی با شدت بیش از ۸۰٪ زلزله‌ی اصلی می‌توانند میزان آسیب را تا ۲۰٪ افزایش دهند.

قره‌باغی و گندمی (۲۰۲۱)<sup>[۱۲]</sup> نیز طیف آسیب لرزه‌یی با استفاده از روش‌های برنامه‌نویسی ژنتیک چند ژنی (MGGP)<sup>۷</sup> و شبکه‌های عصبی مصنوعی

<sup>۷</sup> Multi-Gene Genetic Programming

<sup>۸</sup> Artificial Neural Networks

<sup>۹</sup> Pan

<sup>۱۰</sup> Single-Degree-Of-Freedom

<sup>۱۱</sup> Machine Learning Methods

<sup>۱</sup> Kunnath & Chai

<sup>۲</sup> Cosenza

<sup>۳</sup> Zhai

<sup>۴</sup> Greco

<sup>۵</sup> Park & Ang

<sup>۶</sup> Wen

یک گام رو به جلو نسبت به رگرسیون معمولی در بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و درک عمیق‌تر از پدیده‌های مورد مطالعه ارائه می‌دهند. با توجه به رفتار غیرخطی سیستم‌های سازه‌یی و لرزه‌یی در هنگام تغییر شکل‌های غیرکشسان و بارگذاری چرخه‌یی ناشی از زلزله، استفاده از روش‌های یادگیری ماشین، که قادر به یادگیری این روابط غیرخطی از داده‌ها هستند و نیازی به فرم‌های مدل از پیش تعریف‌شده ندارند، می‌تواند مدل‌هایی با دقت بالاتر را نسبت به تجزیه و تحلیل رگرسیونی سنتی، که بر فرضیات خطی استوار است، ارائه دهد.

در حالی که پیشرفت‌های اخیر در هوش محاسباتی، روش‌های مذکور را برای حل مسائل چالش‌برانگیز در علم و مهندسی مناسب ساخته است، روش‌های مرسوم مانند تحلیل رگرسیون به دلیل محدودیت‌های خود در مدل‌سازی دقیق پدیده‌های پیچیده و غیرخطی، اغلب نتوانسته‌اند در مواجهه با مسائل دنیای واقعی که پر از داده‌های غیرخطی و تعاملات پیچیده بین متغیرها هستند، عملکرد قابل قبولی ارائه دهند.<sup>[۱۳]</sup>

## ۲. طیف آسیب لرزه‌یی

محاسبه‌ی آسیب لرزه‌یی بالقوه در ارزیابی لرزه‌یی مبتنی بر آسیب و طراحی سازه‌ها در مناطق زلزله‌خیز، اهمیت زیادی دارد. درجه‌ی آسیب سازه را می‌توان برای ارزیابی عملکرد سازه و استحکام آن، که پارامترهای کلیدی در تاب‌آوری سازه هستند، استفاده کرد.<sup>[۱۷]</sup>

همان‌طور که هوش محاسباتی به‌طور فزاینده‌یی در زندگی روزمره‌ی ما رایج می‌شود، الگوریتم‌ها و روش‌های جدید به‌طور مداوم در حال توسعه برای بهبود بهره‌وری و دقت در یادگیری ماشین هستند. برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP)<sup>۱</sup>، یک روش یادگیری ماشینی و بهینه‌سازی براساس اصول ژنتیک و زیست‌شناسی مولکولی است.<sup>[۱۵]</sup>

شاخص آسیب لرزه‌یی می‌تواند برای تعیین میزان آسیب یک سازه در طول زلزله استفاده شود. مدل‌های آسیب مختلفی در نوشتارها ارائه شده‌اند، که در میان آن‌ها، شاخص آسیب پارک-انگ به‌طور گسترده‌یی برای تعیین کمیت آسیب لرزه‌یی سازه‌ها استفاده شده است؛ که یک ترکیب خطی از بیشینه‌ی تغییر شکل و استهلاک انرژی هیسترتیک یک سازه است (رابطه‌ی ۱):<sup>[۱۲]</sup>

$$DI = \frac{u_m}{u_y \mu_u} + \beta \frac{E_H}{u_m \mu_u f_y} \quad (1)$$

که در آن،  $u_m$  بیشینه‌ی تغییر شکل در طول زلزله،  $u_y$  تغییر شکل تسلیم،  $\mu_u$  ضریب شکل‌پذیری، و  $f_y$  مقاومت تسلیم هستند. همچنین،  $E_H$  انرژی هیسترتیک تجمعی در پایان یک زلزله و  $\beta$  یک ثابت تجربی مثبت است، که به ویژگی‌های سازه‌یی وابسته است و نشان می‌دهد که به چه اندازه، انرژی هیسترتیک در سازه جذب می‌شود و به نرخ آسیب از طریق انرژی هیسترتیک کمک می‌کند. پارامتر ثابت  $\beta$  معمولاً با مقادیر بین ۰/۵ تا ۰/۳ در نظر گرفته می‌شود، که براساس تجربیات پژوهش‌های پیشین و آزمایش‌های میدانی تعیین شده است. همان‌طور که در جدول ۱ ارائه شده است، پارک و همکارانش (۱۹۸۷)<sup>[۱۸]</sup> شاخص آسیب کلی را برای حالت‌های مختلف آسیب مشاهده‌شده تنظیم کرده‌اند. آسیب لرزه‌یی می‌تواند برای طیف وسیعی از سازه‌ها با محاسبه‌ی طیف آسیب لرزه‌یی تخمین زده شود.

همان‌طور که هوش محاسباتی به‌طور فزاینده‌یی در زندگی روزمره‌ی ما رایج می‌شود، الگوریتم‌ها و روش‌های جدید به‌طور مداوم در حال توسعه برای بهبود بهره‌وری و دقت در یادگیری ماشین هستند. برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP)<sup>۱</sup>، یک روش یادگیری ماشینی و بهینه‌سازی براساس اصول ژنتیک و زیست‌شناسی مولکولی است.<sup>[۱۵]</sup>

GEP با ترکیب اصول برنامه‌نویسی ژنتیک و الگوریتم‌های ژنتیک توسط کاندای فریرا<sup>۲</sup> (۲۰۰۱)، یک سیستم انعطاف‌پذیر و قوی را توسعه داده است، که بتواند طیف گسترده‌یی از مسائل را در زمینه‌های مختلف حل کند.<sup>[۱۶]</sup>

طیف آسیب را می‌توان به‌صورت تابعی از پارامترهای لرزه‌یی و به صورت رابطه‌ی ۲ نوشت:

$$S_{DI} = f(M_w, R_{JB}, V_{s,r}, \zeta, R_u, \mu_u, \beta, \alpha, T) \quad (2)$$

در پژوهش حاضر، روش هوش محاسباتی به نام برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) برای پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی و در نظر گرفتن هر دو ویژگی اصلی سازه و زلزله استفاده شده است. برای رسیدن به هدف مذکور، چند سیستم تک درجه‌ی آزادی (SDOF) با ویژگی‌های سازه‌یی مختلف استفاده شده است، که عبارت‌اند از: دوره‌ی تناوب (T)، نسبت میرایی ( $\gamma$ )، ضریب کاهش مقاومت ( $R_u$ )، ضریب شکل‌پذیری ( $\mu_u$ )، ثابت شاخص آسیب پارک-انگ ( $\beta$ )، و نسبت سختی پس از تسلیم ( $\alpha$ ). علاوه بر این، برخی از ویژگی‌های زلزله، شامل انواع مختلف خاک براساس سرعت‌های موج برشی خاک متناظر با عمق ۳۰ متر ( $V_{s,r}$ ) و بزرگای ( $M_w$ ) بیش از ۴ ریشتر و فاصله‌ی سایت تا منبع زلزله ( $R_{JB}$ ) کمتر از ۱۵ کیلومتر به‌عنوان زلزله‌های نزدیک گسل در ایران در نظر گرفته شده است. سپس طیف آسیب با مدل‌سازی

جدول ۱. طبقه‌بندی آسیب یا خرابی شاخص پارک-انگ.<sup>[۱۸]</sup>

مشاهده‌ها	شاخص آسیب (DI)	آسیب یا خرابی	نوع خرابی
وقوع پراکنده‌ی ترک خوردگی	$0 < DI < 0.1$	خسارت پراکنده‌ی کم	Slight
ترک‌های جزئی؛ خرد شدن جزئی از بتن در ستون	$0.1 < DI < 0.25$	خسارت جزئی	Minor
ترک‌های بزرگ گسترده؛ پوسته پوسته شدن بتن در عناصر ضعیف‌تر	$0.25 < DI < 0.4$	متوسط	Moderate
خرد شدن بتن؛ نمایان شدن میلگردها؛ خسارت شدید	$0.4 < DI < 1$	شدید	Severe
فروپاشی کامل	$1 \leq DI$	انهدام	Collapse

<sup>۲</sup> Candida Ferreira

<sup>۱</sup> Gene Expression Programming

## جدول ۲. متغیرهای طیف آسیب.

توصیف پارامتر	پارامتر
بزرگای زلزله	$M_w$
فاصله‌ی سایت تا منبع زلزله، فاصله‌ی رومرکزی	$R_{JB}$
سرعت موج برشی متناظر با عمق ۳۰ متر	$V_{s,30}$
نسبت میرایی	$\zeta$
ضریب کاهش مقاومت	$R_u$
ضریب شکل‌پذیری	$\mu_u$
ثابت شاخص آسیب پارک-انگ	$\beta$
نسبت سختی پس از تسلیم	$\alpha$
زمان تناوب	T
طیف آسیب لرزه‌یی	$S_{DI}$

معادله‌ی اخیر نشان می‌دهد که آسیب طیفی ( $S_{DI}$ ) به متغیرهای بررسی‌شده در جدول ۲ وابسته است، متغیرهای بیان‌شده در جدول ۲ از مطالعات پیشین، که در این زمینه انجام شده‌اند، تعیین شده‌اند.<sup>۱۲ و ۹، ۷</sup> پارامترهای مذکور به عنوان ورودی‌هایی در مدل‌های محاسباتی، که در پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی، در نظر گرفتن مهم‌ترین ویژگی‌های مربوط به سازه و زلزله است، که در آسیب‌های لرزه‌یی وارد بر سازه‌ها تأثیرگذار هستند. در جدول ۲، ضریب اصلاح پاسخ (معروف به R-factor) با استفاده از رابطه‌ی ۳ تعیین می‌شود:<sup>۱۴</sup>

$$R_u = \frac{mS_a}{f_y} \quad (3)$$

که در آن،  $m$  جرم لرزه‌یی سازه‌ی موردنظر و  $S_a$  شتاب طیفی کشسان است.

## ۳. روش‌های هوش محاسباتی

هوش محاسباتی، یک رشته از علوم کامپیوتر است، که به بررسی و تحلیل روش‌ها و الگوریتم‌هایی می‌پردازد که به ماشین‌ها و سیستم‌های کامپیوتری امکان فهمیدن، یادگیری، تصمیم‌گیری، و ارتباط با محیط را می‌دهد. هدف اصلی هوش محاسباتی، تقویت قابلیت‌های هوش مصنوعی و سیستم‌های طبیعی است، تا بتوانند با مسائل پیچیده و متنوع، که در دنیای واقعی وجود دارند، بهبود یابند و پاسخگو باشند. این زمینه اغلب برای توسعه‌ی الگوریتم‌هایی استفاده می‌شود که می‌توانند مسائل پیچیده را یاد بگیرند، حل کنند، و فرآیندهای تصمیم‌گیری انسانی را تقلید کنند. الگوریتم‌های ژنتیکی، یکی از روش‌های هوش محاسباتی است که از فرآیند انتخاب طبیعی الهام می‌گیرند و بهینه‌سازی‌هایی هستند که از اصول تکاملی برای یافتن بهترین

راه‌حل برای یک مسئله استفاده می‌کنند.<sup>۱۳</sup> پیشرفت‌های اخیر در روش‌های هوش محاسباتی، آن‌ها را برای حل مشکلات چالش‌برانگیز در علم مهندسی مناسب ساخته است. در مطالعه‌ی حاضر، روش برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) برای مطالعه‌ی موردی در زمینه‌ی مهندسی سازه و زلزله استفاده و نتایج آن ارائه، ارزیابی، و مقایسه شده است.

GEP یکی از روش‌های پیش‌بینی و الگوریتم یادگیری است، که در ادامه و بهبود برنامه‌نویسی ژنتیک (GEP)<sup>۱</sup> ارائه شده است. برنامه‌نویسی ژنتیک (GEP) به‌عنوان یک روش استاندارد و توسعه‌یافته شناخته شده است، که شامل زیرمجموعه‌هایی مانند برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) و برنامه‌نویسی ژنتیکی چندژنی (MGGP) است. GEP در دسته‌ی الگوریتم‌های محاسباتی تکاملی قرار دارد، و روشی است که معمولاً برای توسعه‌ی مدل‌های ریاضی غیرخطی برای حل مسائل پیچیده به‌کار می‌رود.<sup>۱۵</sup>

بهینه‌سازی یک راه‌حل مبتنی بر GEP معمولاً شامل یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت است، که در آن کروموزوم‌های چندگانه به‌صورت موازی در طول چند نسل تکامل یافته‌اند. بهترین کروموزوم‌ها برای نسل بعدی انتخاب می‌شوند و عملگرهای ژنتیکی برای تولید فرزند جدید به‌کار می‌روند. این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که یک راه‌حل رضایت‌بخش یافت شود، که معمولاً برای ارزیابی تناسب یک ژن، GEP از یک تابع برازندگی استفاده می‌کند تا میزان عملکرد ژن را به‌خوبی اندازه‌گیری کند.<sup>۱۶</sup> تابع برازندگی می‌تواند توسط کاربر تعریف یا به‌طور خودکار توسط سیستم انتخاب شود.

الگوریتم GEP-RNC<sup>۲</sup>، که توسط کاندا فریرا توسعه یافته است، یک نسخه‌ی طراحی‌شده پیشرفته از GEP برای مدیریت مؤثرتر ثابت‌های عددی است، که با ادغام یک دامنه‌ی خاص در رمزگذاری ژنتیکی به‌منظور تکامل ثابت‌های عددی مناسب‌تر، کارایی در مدل‌سازی و دقت حل مسائل پیچیده را افزایش می‌دهد.<sup>۱۳</sup> در پژوهش حاضر، استفاده از الگوریتم GEP-RNC به‌منظور بهبود دقت و کارایی مدل‌های ریاضی استخراج‌شده از طیف‌های آسیب، توانایی پیش‌بینی آسیب‌ها را به‌طور قابل توجهی افزایش داده است. در شکل ۱، فلوچارت الگوریتم بیان ژن GEP مشاهده می‌شود.

## ۴. پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی

## ۱.۴. پایگاه داده‌ی دقیق

خواص سازه‌یی و جنبش نیرومند زمین می‌تواند تا حد زیادی در واکنش‌های غیرارتجاعی یک سیستم یک درجه‌ی آزادی (SDOF) تأثیر بگذارد. در پژوهش حاضر، خواص مذکور، که اغلب برای ارزیابی خسارت لرزه‌یی سازه‌ها استفاده می‌شوند، به‌عنوان متغیرهای ورودی مدل‌های پیش‌بینی استفاده و مفصلاً در زیربخش‌های بعدی توصیف شده‌اند.

## ۲.۴. سیستم‌های غیرارتجاعی (SDOF)

در سیستم‌های غیرارتجاعی SDOF از پارامترهای در نظر گرفته‌شده در جدول ۳ برای پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی ( $S_{DI}$ ) در سیستم‌های تک‌درجه‌ی آزادی غیرارتجاعی (SDOF) براساس ترکیبی از دیدگاه‌های نظری، داده‌های تجربی، و الزام‌های مهندسی کاربردی و بر پایه‌ی مطالعات پیشین انتخاب شده‌اند. انتخاب هر پارامتر و دامنه‌ی مقادیر آن، نقش کلیدی

<sup>۲</sup> GEP with Random Numerical Constants

<sup>۱</sup> Genetic Programming

در مدل‌سازی رفتار سازه‌ها تحت تأثیر بارهای زلزله در ارزیابی آسیب‌پذیری احتمالی آن‌ها دارد. محدوده‌ی زمانی مطالعه‌شده‌ی دوره‌ی تناوب برای پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی بین ۰/۱ تا ۴ ثانیه با گام ۰/۱ ثانیه بوده است.

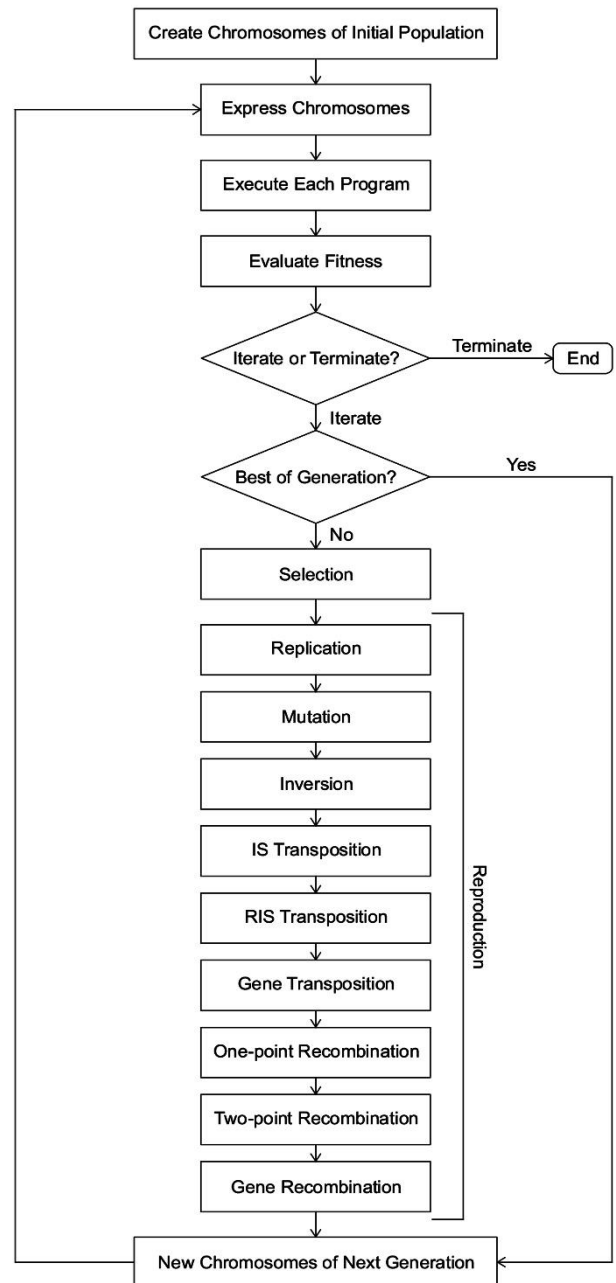
### ۳.۴. زمین‌لرزه

سه عامل بزرگا، فاصله‌ی سایت ثبت زلزله تا منبع زمین‌لرزه، و سرعت موج برشی متناظر با عمق ۳۰ متر در خاک، سه متغیر استفاده‌شده برای رکوردهای زلزله هستند. براساس سرعت‌های موج برشی متناظر با عمق ۳۰ متر ( $V_{s,30}$ ) بیش از ۷۵۰، ۳۷۵ - ۷۵۰، ۱۷۵ - ۳۷۵، و کمتر از ۱۷۵ به ترتیب چهار نوع خاک ( $S_1, S_2, S_3, S_4$ ) برای رکوردهای استفاده‌شده در نظر گرفته شده است. انواع خاک ( $S_1, S_2, S_3, S_4$ ) به ترتیب با لایه‌بندی زمین، سنگ و شبه‌سنگ، خاک خیلی متراکم یا سنگ سست، خاک متراکم تا متوسط، و خاک متوسط تا نرم براساس استاندارد ۲۸۰۰ مطابقت دارند. در پژوهش حاضر، به دلیل عدم دسترسی به رکوردهای حوزه‌ی نزدیک گسل در خاک  $S_4$ ، خاک  $S_4$  در ارزیابی طیف آسیب در نظر گرفته نشده است.

برای در نظر گرفتن فاصله‌ی سایت تا منبع، از رکوردهای دارای فاصله‌ی رومرکزی در محدوده‌ی کمتر از ۱۵ کیلومتر استفاده شده است (به‌عنوان رکوردهای حوزه‌ی نزدیک گسل شناخته می‌شوند). همه‌ی رکوردها با بزرگای گشتاوری بیشتر از ۴ متناظر هستند. برای انتخاب رکوردها از پایگاه داده‌ی مرکز تحقیقات راه، مسکن، و شهرسازی و شبکه‌ی شتاب‌نگاری آن مطابق جدول ۴ استفاده شده است.<sup>[۲۰]</sup> درنهایت، آسیب ناشی از زلزله برای یک مؤلفه‌ی مشخص حرکت زمین، از طریق به‌کارگیری یک روند معلوم، شامل مدل‌سازی سیستم‌های خطی و غیرخطی SDOF (یک درجه‌ی آزادی) برای تحلیل حرکت‌های لرزه‌یی با ویژگی‌های خاص محاسبه شده است. پس از مدل‌سازی، پاسخ سیستم‌ها به حرکت‌های زلزله با استفاده از روش تحلیل گام به گام زمانی نیومارک، در دوره‌های تناوب مشخص و میزان میرایی خاص معین شده است. در مرحله‌ی بعدی، انرژی تلف‌شده به همراه پارامترهای مدنظر با استفاده از فرمول‌های فصل ۷ کتاب دینامیک سازه‌های چوپرا به‌دست آمده است.<sup>[۱۴]</sup> سپس آسیب ناشی از زلزله با استفاده از شاخص آسیب پارک-انگ برای سیستم‌های SDOF با ویژگی‌های تعیین‌شده محاسبه شده است. به‌منظور ارزیابی کامل تحلیل اخیر، یک پایگاه داده‌ی دقیق از طیف آسیب با در نظر گرفتن ویژگی‌های سازه‌یی و زلزله، تهیه و یک مدل ریاضی مبتنی بر برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) برای سهولت در اندازه‌گیری طیف آسیب بالقوه‌ی لرزه‌یی ( $S_{DI}$ ) سازه‌ها استخراج شده است.

### ۴.۴. نتایج و ارزیابی طیف آسیب

در بخش حاضر، نتایج دقیق شاخص آسیب پارک-انگ (DI)، که در محاسبه‌ی آسیب طیفی ( $S_{DI}$ ) در پژوهش حاضر استفاده شده‌اند، ارائه شده است. آسیب طیفی ( $S_{DI}$ )، در واقع میزان شاخص آسیب پارک-انگ (DI) در سازه‌های یک درجه‌ی آزادی را بر حسب دوره‌ی تناوب نشان می‌دهد. همچنین آثار متغیرهای  $R_u, \mu_u, \zeta, \alpha, \beta$  و نوع خاک بر روی آسیب طیفی ( $S_{DI}$ ) (که مقادیر  $S_{DI} \geq 1$  مربوط به فروریختن کامل ساختمان است)، آسیب لرزه‌یی سازه‌ها را با ترکیب پارامترهای مربوط به ویژگی‌های سازه‌یی و زلزله بررسی می‌کند. در شکل ۲، طیف آسیب بر حسب تمامی متغیرهای ذکر شده مشاهده می‌شود. متغیرهای استفاده‌شده در طیف آسیب ارائه‌شده، میانگین



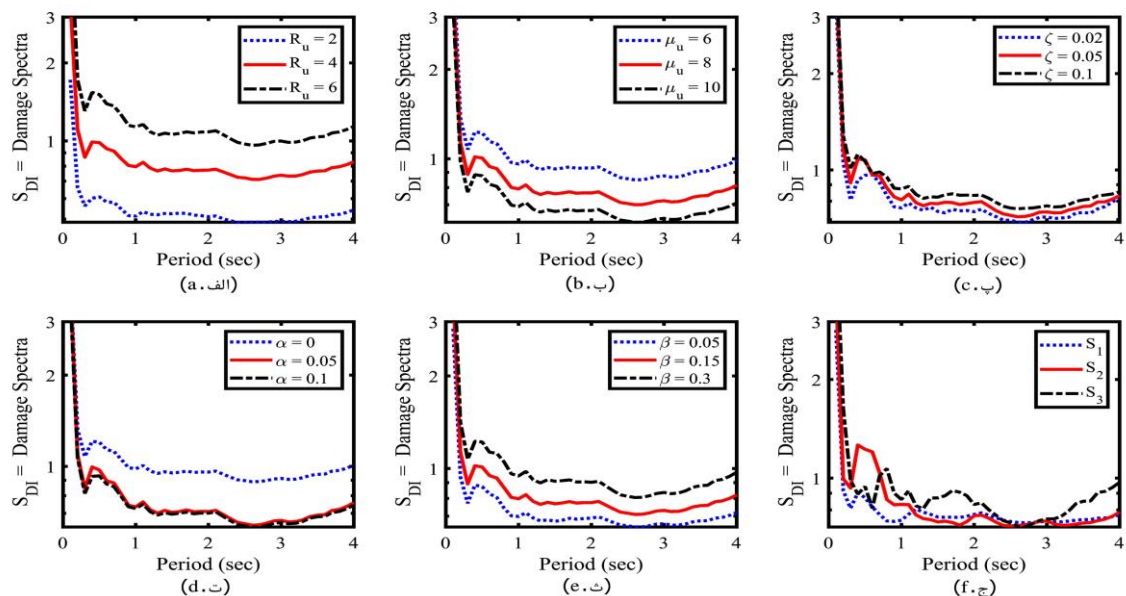
شکل ۱. فلوچارت الگوریتم بیان ژن GEP.<sup>[۱۶]</sup>

### جدول ۳. متغیرهای استفاده‌شده در تحلیل سیستم یک درجه‌ی آزادی.

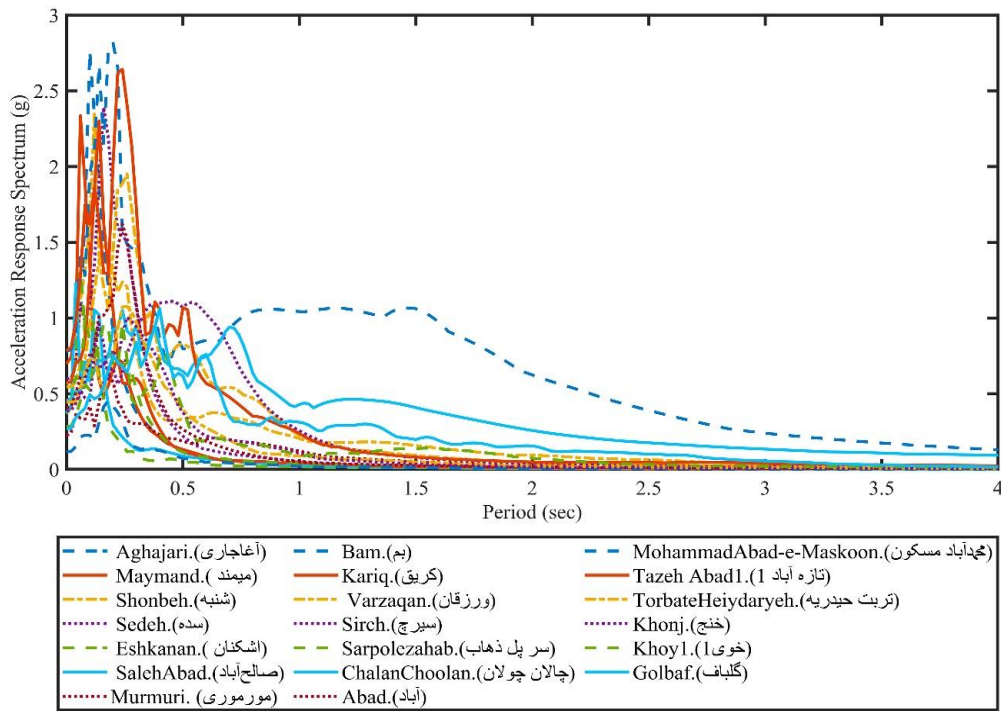
پارامتر	مقادیر مورد استفاده		
$M_w$	بزرگای زلزله		
$R_{JB}$	فاصله سایت ثبت زلزله تا منبع زلزله		
$V_{s,30}$	سرعت موج برشی متناظر با عمق ۳۰ متر در خاک		
$\zeta$	۰.۰۲	۰.۰۵	۰.۱
$R_u$	۲	۴	۶
$\mu_u$	۶	۸	۱۰
$\beta$	۰.۰۵	۰.۱۵	۰.۳
$\alpha$	۰	۰.۰۵	۰.۱
T	۰.۱، ۰.۲، ۰.۳، ...، ۴		

جدول ۴. رکوردهای استفاده‌شده در تحلیل سیستم یک درجه‌ی آزادی.

نوع خاک	$V_{s,0}$	$R_{JB}$	$M_w$	بیشینه شتاب زمین ( $cm/s^2$ )	مختصات مرکز زمین لرزه	مختصات ایستگاه ثبت زمین لرزه	سال وقوع زمین لرزه (میلادی)	نام ایستگاه	استان	شماره‌ی رکورد	ردیف
$S_1$	۸۵۷	۸	۴/۷	۷۲۷	۳۰/۶۷N۴۹/۹E	۳۰/۷N۴۹/۸۳E	۲۰۰۰/۱۰/۱۳	آغاچاری	خوزستان	۲۴۱۴/۰۴	۱
$S_1$	۸۸۱	۹	۵	۷۰۴	۲۸/۷۹N۵۲/۷۶E	۲۸/۸N۵۲/۷۵E	۱۹۹۷/۰۸/۲۴	میمند	فارس	۱۸۱۴	۲
$S_1$	۱۳۹۶	۶	۵/۵	۵۶۶	۲۸/۳۵N۵۱/۷۴E	۲۸/۴N۵۱/۷۶E	۲۰۱۳/۰۴/۱۰	شنبه	بوشهر	۵۸۰۱/۶۹	۳
$S_1$	۸۵۴	۱۱	۵/۱	۵۵۶	۳۳/۳۶N۵۹/۳۵E	۳۳/۳۳N۵۹/۲۴E	۲۰۰۸/۰۳/۰۹	سده	خراسان جنوبی	۴۵۵۲/۰۳	۴
$S_1$	۱۰۶۶	۱۳	۵/۱	۳۹۴	۲۷/۱۱N۵۳/۶۵E	۲۷/۲۲N۵۳/۶۱E	۲۰۱۰/۰۷/۲۴	اشکنان	فارس	۵۰۱۶/۰۲	۵
$S_1$	۱۴۷۲	۱۳	۸۴	۳۷۳	۳۵/۶۸N۶۱/۲۴E	۳۵/۶۹N۶۱/۰۹E	۱۹۹۹/۱۱/۰۹	صالح‌آباد رضوی	خراسان	۲۲۲۵/۰۲	۶
$S_1$	۸۹۸	۱۴	۵/۸	۳۴۵	۳۲/۷N۴۷/۸۲E	۳۲/۷۳N۴۷/۶۷E	۲۰۱۴/۰۸/۲۰	مورموری	ایلام	۶۳۰۲/۰۱	۷
$S_2$	۴۹۹	۶	۶/۵	۷۷۸	۲۹/۰۴N۵۸/۳۳E	۲۹/۰۹N۵۸/۳۵E	۲۰۰۳/۱۲/۲۶	بم	کرمان	۳۱۶۸/۰۲	۸
$S_2$	۵۸۹	۱۱	۶	۵۳۶	۳۷/۹۹N۴۸/۱۵E	۳۷/۹۲N۴۸/۰۶E	۱۹۹۷/۰۲/۲۸	کریق	اردبیل	۱۸۳۳/۰۲	۹
$S_2$	۴۷۵	۱۱	۶/۲	۵۲۰	۳۸/۴۵N۴۶/۷۵E	۳۸/۵۱N۴۶/۶۴E	۲۰۱۲/۰۸/۱۱	ورزقان	آذربایجان شرقی	۵۵۷۹/۰۴	۱۰
$S_2$	۳۹۸	۱۱	۵/۳	۴۶۱	۳۰/۰۹N۵۷/۶۲E	۳۰/۲N۵۷/۵۶E	۲۰۱۷/۰۷/۲۳	سیرج	کرمان	۷۱۵۰	۱۱
$S_2$	۶۱۹	۱۳	۵/۲	۴۳۵	۳۴/۳۹N۴۵/۷۵E	۳۴/۴۶N۴۵/۸۷E	۲۰۱۸/۰۴/۰۱	سر پل ذهاب	کرمانشاه	۷۸۲۹	۱۲
$S_2$	۴۲۸	۹	۵/۹	۴۳۱	۳۳/۶۹N۷۵E	۳۳/۶۶N۴۸/۹۱E	۲۰۰۶/۰۳/۳۱	چالان چولان	لرستان	۴۰۲۷/۰۸	۱۳
$S_2$	۴۸۲	۶	۵/۴	۴۰۸	۲۹/۰۱N۵۱/۳۲E	۲۹/۰۲N۵۱/۲۶E	۲۰۰۴/۰۳/۰۲	آباد	بوشهر	۳۲۳۹/۰۱	۱۴
$S_2$	۵۰۷	۱۴	۵/۱	۱۱۵	۲۸/۸۱N۵۷/۹۸E	۲۸/۹۱N۵۷/۸۹E	۲۰۰۴/۱۰/۰۶	محمدآباد مسکون	کرمان	۳۵۵۵/۰۱	۱۵
$S_2$	۲۸۱	۱۴	۶	۷۷۶	۳۴/۶۱N۴۶/۱۳E	۳۴/۷۴N۴۶/۱۵E	۲۰۱۸/۰۸/۲۵	تازه‌آباد ۱	کرمانشاه	۸۰۴۵	۱۶
$S_2$	۳۰۶	۴	۵/۹	۴۲۵	۳۵/۲۸N۵۹/۲۶E	۳۵/۲۷N۵۹/۲۲E	۲۰۱۰/۰۷/۳۰	ترت حیدریه	خراسان رضوی	۵۰۰۶	۱۷
$S_2$	۳۰۸	۱۳	۵/۲	۳۹۶	۲۷/۸۱N۵۳/۵۳E	۲۷/۸۹N۵۳/۴۳E	۱۹۹۸/۱۱/۱۳	ختج	فارس	۲۰۴۹/۰۱	۱۸
$S_2$	۳۳۳	۵	۵/۷	۲۸۵	۳۸/۵۲N۴۴/۹۱E	۳۸/۵۵N۴۴/۹۶E	۱۹۹۸/۱۱/۱۳	خوی ۱	آذربایجان غربی	۹۹۳۳/۱۹	۱۹
$S_2$	۳۲۰	۱۳	۶/۷	۲۶۸	۲۹/۹۹N۵۷/۷۷E	۲۹/۸۸N۵۷/۷۲E	۱۹۸۱/۰۷/۲۸	گلباف	کرمان	۱۱۷۶/۰۵	۲۰



شکل ۲. طیف آسیب برای متغیرهای  $R_u$ ،  $\mu_u$ ،  $\zeta$ ،  $\alpha$ ،  $\beta$  و نوع خاک.



شکل ۳. طیف پاسخ شتاب ( $\zeta = 0.05$ ) برای حرکت‌های زمین‌لرزه.

بیشتری از سازه‌های با دوره‌ی تناوب کوچک، وضعیت فروپاشی را تجربه می‌کنند.

در پژوهش حاضر، آثار نسبت سختی پس از تسلیم رفتار هیسترتیک دو خطی  $\alpha$  سیستم‌های SDOF در SDI مطالعه شده است، که برابر با سختی پس از تسلیم مدل دو خطی به مدل اولیه است. سه مقدار ۰، ۰/۰۵، و ۰/۱ برای  $\alpha$  در نظر گرفته شده‌اند. طیف آسیب برای مقادیر مختلف  $\alpha$  در شکل ۲-ت مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، نسبت سخت‌شوندگی بیشتر منجر به این شده است که سازه آسیب کمتری از خود نشان دهد. با در نظر گرفتن ۰/۰۵ به‌عنوان نسبت سخت‌شدگی برای مدل رفتاری، آسیب طیفی به‌طور قابل توجهی کاهش و با افزایش  $\alpha$  از ۰/۰۵ به ۰/۱، آسیب طیفی تا حدودی کاهش یافته است.

$\beta$ ، یک ثابت مثبت برای ترکیب دو عبارت شاخص آسیب پارک-انگ استفاده است، که در آن بخشی از انرژی هیسترتیک مشارکت دارد.

مقادیر متعددی برای  $\beta$  پیشنهاد شده‌اند، که در محدوده‌ی ۰/۰۵ تا ۰/۳ رایج هستند. در شکل ۲-ت، تغییر SDI نسبت به  $\beta$  مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، SDI با افزایش  $\beta$  افزایش یافته است.

آثار نوع خاک ( $S_1, S_2, S_3$ ) و نیز در شکل ۲- ج مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، تأثیر نوع خاک در SDI به اندازه‌ی دیگر پارامترهای ذکر شده قابل توجه نیست. به‌طور کلی، طیف آسیب SDI برای خاک  $S_3$  بیشتر از خاک  $S_1$ ، و طیف آسیب برای خاک  $S_3$  بیشتر از خاک  $S_1$  بوده است. قابل ذکر است به دلیل نبود رکورد حوزه‌ی نزدیک گسل در خاک  $S_3$ ، خاک موردنظر در ارزیابی طیف آسیب در پژوهش حاضر در نظر گرفته نشده است.

#### ۵.۴. توسعه‌ی مدل با استفاده از الگوریتم بیان ژن (GEP)

فرآیند کلی توسعه‌ی یک مدل با استفاده از GEP شامل این مراحل است: [۱۶]

طیف آسیب همه‌ی متغیرهای دیگر بوده و برای نشان‌دادن تغییرات به‌طور واضح، محور عمودی در یک مقیاس لگاریتمی مرتب شده است.

تغییرات SDI برای سه مقدار  $R_H$  برابر با ۲، ۴، و ۶ در شکل ۲- الف مشاهده می‌شود، که مطابق آن طیف آسیب با افزایش  $R_H$  برای همه‌ی سازه‌های با دوره‌های تناوب کوتاه به بلند افزایش یافته است. می‌توان گفت که به دلیل کاهش  $f_y$ ، درجه‌های غیرخطی بالاتری در همان سطح شدت زلزله تجربه می‌شود، و خسارت ناشی از آن با افزایش  $R_H$  افزایش می‌یابد. تغییرات SDI سازه‌های با  $R_H$  ۲ به ۴ بیشتر از سازه‌های با  $R_H$  ۴ به ۶ است.

در شکل ۲- ب، نیز تغییرات سه مقدار  $\mu_H$  برابر با ۶، ۸، و ۱۰ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، هنگامی که ضریب شکل‌پذیری افزایش یافته است، ظرفیت مدل برای تغییرشکل‌های غیرارتجاعی نسبت به پیشینه‌ی تغییرشکل تحت حرکت زمین، افزایش و در نتیجه آسیب طیفی کاهش یافته است؛ زیرا سازه‌های با شکل‌پذیری بالاتر، قابلیت تغییرشکل و ظرفیت اتلاف انرژی بیشتری دارند، که منجر به آسیب کمتری می‌شود.

در شکل ۲- پ، نیز اثر نسبت میرایی ( $R_H$ ) سیستم‌ها SDOF در SDI بحث شده است. سه مقدار ۰/۰۲، ۰/۰۵، و ۰/۱ برای نسبت میرایی در نظر گرفته شده است، که مقادیر رایج استفاده‌شده در تحلیل سازه‌های مهندسی هستند. یک رابطه‌ی واضح بین آن‌ها این است که SDI با افزایش نسبت میرایی ( $\zeta$ ) افزایش یافته است. این اثر دقیقاً مطابق با نتایج ژای و همکاران (۲۰۱۳) [۱۷] تأیید شده است؛ که در آن، افزایش نسبت میرایی سبب کاهش شتاب طیفی ( $S_a$ ) و در یک  $R_H$  مشخص، مطابق با معادله‌ی ۳ شده و  $f_y$  سیستم SDOF کاهش یافته است، که منجر به افزایش آسیب شده است. مطابق شکل ۲- پ، نیز تفاوت‌های ناشی از اثر نسبت میرایی در SDI با افزایش دوره‌ی تناوب سازه کاهش یافته است. علاوه‌بر این، با افزایش نسبت میرایی، طیف

برای مدل مدنظر کمک می‌کند. در نوشتار حاضر، از هر سه اپراتور ژنتیکی قطع، جهش، و انتخاب استفاده شده است.

۵. **ارزیابی و انتخاب مدل‌ها:** پس از تکامل مجموعه‌ی مدل‌ها، مدل مدنظر براساس تابع برازندگی و توانایی آن‌ها در پیش‌بینی دقیق آسیب‌های سازه‌یی، ارزیابی و انتخاب می‌شوند.

۶. **اعتبارسنجی مدل:** مدل نهایی با استفاده از داده‌های مستقل اعتبارسنجی می‌شود، تا اطمینان حاصل شود که به‌طور مؤثری آسیب‌پذیری سازه‌ها را در برابر زلزله پیش‌بینی می‌کند.

#### ۶.۴. دقت مدل

شایان ذکر است که تمام مدل‌ها می‌توانند در محدوده‌ی داده‌های واقعی استفاده‌شده برای تولید مدل معتبر باشند. در برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP)، پارامترهای موردنظر با بیشترین برازندگی (Best Fitness) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای ارزیابی و کنترل دقت مدل ریاضی تولیدشده استفاده می‌شود. بهترین تناسب به بالاترین امتیاز کسب‌شده توسط مدل در یک نسل خاص از GEP اشاره دارد. این امتیاز براساس تابع برازندگی استفاده شده است، که میزان تناسب مدل با داده‌های آموزشی را اندازه‌گیری می‌کند. تابع برازندگی می‌تواند بسته به مسئله‌ی حل شده متفاوت باشد، اما معمولاً تفاوت بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده را اندازه می‌گیرد. در پژوهش حاضر، ریشه‌ی میانگین مربع خطا (RMSE) به عنوان تابع برازندگی به صورت رابطه‌ی ۴ استفاده شده است:<sup>[۱۹]</sup>

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - p_i)^2}{n}} \quad (4)$$

که در آن،  $e_i$  و  $p_i$  به ترتیب مقادیر پیش‌بینی‌شده و خروجی دقیق برای  $n$  آزمون خروجی هستند و  $n$  تعداد نمونه‌هاست.

$R^2$  به‌عنوان ضریب تعیین شناخته می‌شود، که در واقع ضریب همبستگی  $R$  به توان ۲ است، و از یک شاخص بی‌بعد تشکیل شده است که از ۰ تا ۱ متغیر است و میزان رابطه‌ی خطی بین دو متغیر را منعکس می‌کند، که مقادیر بالاتر، نشان‌دهنده‌ی تناسب بهتر است.

ضریب همبستگی توسط معادله‌ی ۵ ارزیابی می‌شود. برای یک بررسی دقیق‌تر، ضریب  $R^2$  در پژوهش حاضر استفاده شده است:<sup>[۱۹]</sup>

$$R_i = \frac{\sum_{j=1}^n (T_j P_{ij}) - \left[ \sum_{j=1}^n T_j \right] \left[ \sum_{j=1}^n P_{ij} \right]}{\sqrt{\left[ \sum_{j=1}^n T_j^2 - \left( \sum_{j=1}^n T_j \right)^2 \right] \left[ \sum_{j=1}^n P_{ij}^2 - \left( \sum_{j=1}^n P_{ij} \right)^2 \right]}} \quad (5)$$

که در آن،  $P_{ij}$  مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل  $i$  برای نمونه‌ی  $j$ ،  $T_j$  مقدار واقعی نمونه‌ی  $j$  و  $n$  تعداد نمونه‌هاست.

#### ۵. نتایج پژوهش

##### ۱.۵. مدل پیش‌بینی GEP

تنظیم‌های پارامتر استفاده‌شده برای برنامه‌نویسی بیان ژن به مسئله‌ی خاص بررسی‌شده و ویژگی‌های مجموعه‌ی داده‌ی استفاده‌شده بستگی دارد. مقادیر

#### جدول ۵. توابع استفاده‌شده در برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP).

تعریف	Arity	وزن	نماد	توابع
(x+y)	۲	۴	+	Addition
(x-y)	۲	۴	-	Subtraction
(x*y)	۲	۴	*	Multiplication
(x/y)	۲	۴	/	Division
exp(x)	۱	۱	Exp	Exponential
ln(x)	۱	۱	Ln	Natural logarithm
tanh(x)	۱	۲	Tanh	Hyperbolic tangent
(1-x)	۱	۱	NOT	Complement
1/x	۱	۱	Inv	Inverse
pow(x,y)	۲	۳	Pow	Power
sqrt(x)	۱	۱	Sqrt	Square root
log(x)	۱	۱	Log	Logarithm of base ۱۰
-x	۱	۱	Neg	Negation
x	۱	۱	Nop	No operation
$x^{۲}$	۱	۱	$X^2$	x to the power of ۲
$x^{۳}$	۱	۱	$X^3$	x to the power of ۳
$x^{۴}$	۱	۱	$X^4$	x to the power of ۴

۱. **تعریف مسئله:** اولین گام در توسعه‌ی یک مدل با استفاده از GEP، تعریف دقیق مسئله‌ی طیف آسیب و تعیین نوع داده‌هایی است که در محاسبه‌ی طیف آسیب برای تجزیه و تحلیل در دسترس هستند؛ که در پژوهش حاضر، شامل داده‌های سازه‌یی و لرزه‌یی یعنی متغیرهای اشاره‌شده در جدول ۴ است.

۲. **ایجاد خزانه‌یی از عملگرها و توابع:** یک مجموعه از عملگرها و توابع مرتبط با مهندسی سازه و زلزله تعریف می‌شود، که می‌توانند در فرآیند توسعه‌ی مدل استفاده شوند. این مجموعه می‌تواند شامل توابع در نظر گرفته‌شده در جدول ۵ و سایر توابع و یا عملگرهای دیگر باشد، که جدول مذکور، نشانگر توابع استفاده‌شده در نوشتار حاضر است.

۳. **تولید مجموعه‌ی مدل‌ها:** با استفاده از مجموعه‌ی تعریف‌شده از عملگرها و توابع، یک مجموعه مدل اولیه از مدل‌های ممکن تولید می‌شود. این مدل‌ها با استفاده از اپراتورهای ژنتیکی و براساس یک تابع برازندگی که عملکرد آن‌ها را در مدل‌سازی آسیب‌های سازه‌یی ارزیابی می‌کند، ایجاد می‌شوند. تابع برازندگی استفاده‌شده در نوشتار حاضر مطابق معادله‌ی ۴ است.

۴. **تکامل مجموعه‌ی مدل‌ها:** مجموعه‌ی مدل‌ها از طریق استفاده از اپراتورهای ژنتیکی تقاطع، جهش، و انتخاب، در طول چندین نسل تکامل می‌یابد. این فرآیند به بهبود مداوم مدل‌ها و نزدیک‌شدن به یک راه‌حل بهینه



مذکور براساس تجربه‌ی نویسندگان و پیشنهادهای موجود در برخی نوشتارها، [۱۹، ۱۶] ارائه و در پژوهش حاضر استفاده شده است.

مجموعه‌یی از توابع در نظر گرفته شده، در پژوهش حاضر، در برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) در جدول ۵ ارائه شد است.

مدل ریاضی به دست آمده با برنامه‌نویسی بیان ژن برای  $S_{DI}$  به صورت رابطه‌ی ۶ بیان می‌شود، که برای به دست آوردن طیف آسیب براساس پارامترهای مورد نظر استفاده می‌شود:

$$\text{Log}(S_{DI}) = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 + G_6 \quad (6)$$

که در آن، مقادیر  $G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6$  مطابق روابط ۷ الی ۱۲ محاسبه می‌شوند:

$$G_1 = \tanh \left[ R_1 R_u T^{(R_2)^{R_u} + \ln R_u} \right] \quad (7)$$

$$G_2 = \left[ \exp \left[ \left( \tanh(R_3 \beta) - \frac{\mu_u}{R_4 R_u} \right) \times \alpha \right] \right]^{\alpha} \quad (8)$$

$$G_3 = \tanh \left[ \tanh \left[ \left( \frac{T}{(R_5 - \alpha) R_{JB} - \frac{V_{s,r}}{R_6}} \right)^{\alpha} \right] \right] \quad (9)$$

$$G_4 = \frac{[R_7 + (\zeta \times R_{JB})] \times \alpha^{\alpha} \times R_8}{M_w} \quad (10)$$

$$G_5 = \left[ \frac{R_{JB} \beta}{R_9} \right] \times \left[ \alpha^{R_{10}} \times \frac{M_w}{R_{11}} \right]^{(R_u + M_w)} \quad (11)$$

$$G_6 = \left[ \tanh \left[ \tanh \left[ \tanh \left( \alpha \times (R_u - \alpha) \times (\ln \zeta + R_{12}) \right) \right] \right] \right]^{\alpha} \quad (12)$$

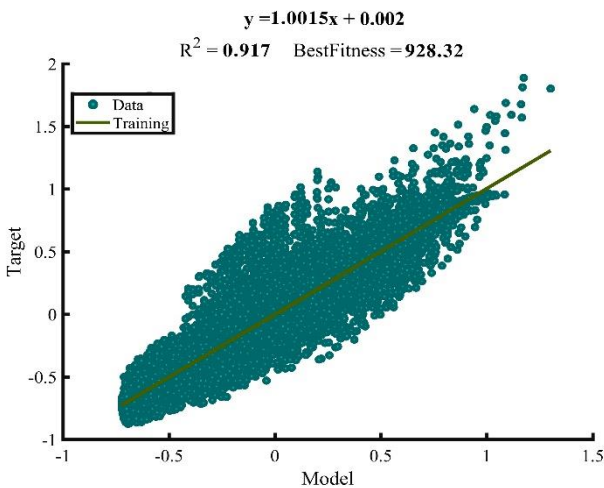
همچنین ضرایب  $R_1$  الی  $R_{12}$  مطابق جدول ۶ محاسبه شده‌اند:

در پژوهش حاضر، با هدف استخراج مدل ریاضی، از روش برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) استفاده شده است. برای این منظور، ۸۰٪ از داده‌ها به شکل تصادفی جهت آموزش مدل انتخاب شده‌اند، در حالی که ۲۰٪ باقی‌مانده به عنوان داده‌های آزمایشی برای سنجش دقت مدل در نظر گرفته شده‌اند.

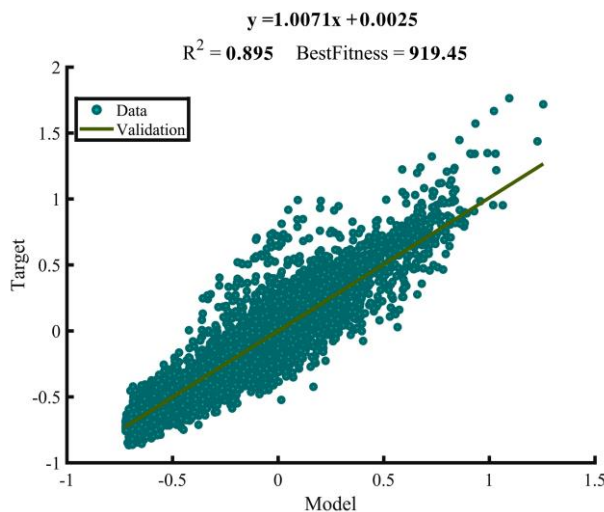
در شکل‌های ۴ الی ۶، نمودارهای رگرسیون برای داده‌های آموزشی و آزمایشی و کل داده‌ها مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن‌ها، داده‌های پیش‌بینی شده به

جدول ۶. ضرایب استفاده شده در معادله‌ی طیف آسیب.

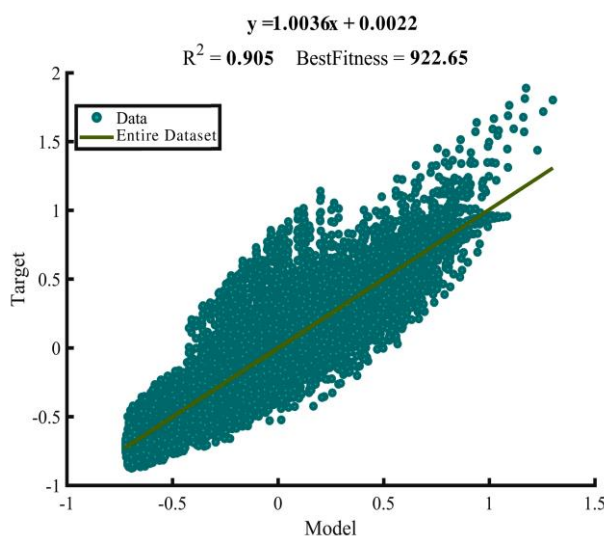
ضرایب	نماد	ضرایب	نماد	ضرایب	نماد
$R_1$	-۳/۶۹۱	$R_5$	۷/۸۸۳	$R_9$	۲۲۱/۴۴۴
$R_2$	۰/۵۵۳	$R_6$	۳/۳۷۸	$R_{10}$	۵/۶۶e-۳۱
$R_3$	۵/۷۴۲	$R_7$	۷/۱۱۴	$R_{11}$	۵/۲۱۸
$R_4$	۰/۷۴۲۵	$R_8$	۱۱۱/۲۱۵	$R_{12}$	۸/۳۰۲



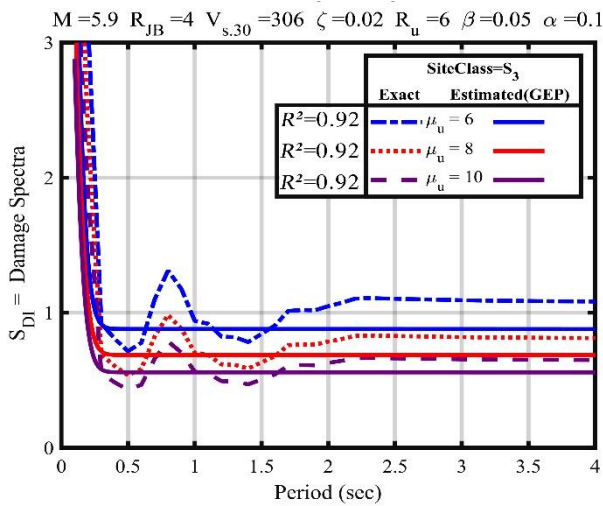
شکل ۴. نمودارهای رگرسیون برای نتایج دقیق لگاریتم  $S_{DI}$  در مقابل مدل پیش‌بینی شده با استفاده از الگوریتم GEP برای داده‌های آموزشی.



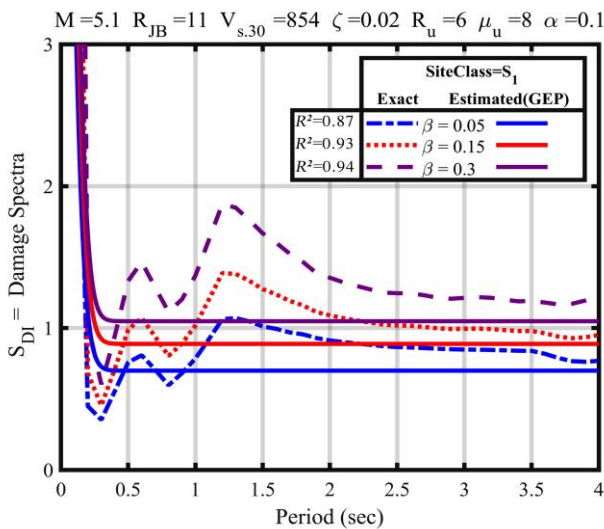
شکل ۵. نمودارهای رگرسیون برای نتایج دقیق لگاریتم  $S_{DI}$  در مقابل مدل پیش‌بینی شده با استفاده از الگوریتم GEP برای داده‌های آزمایشی.



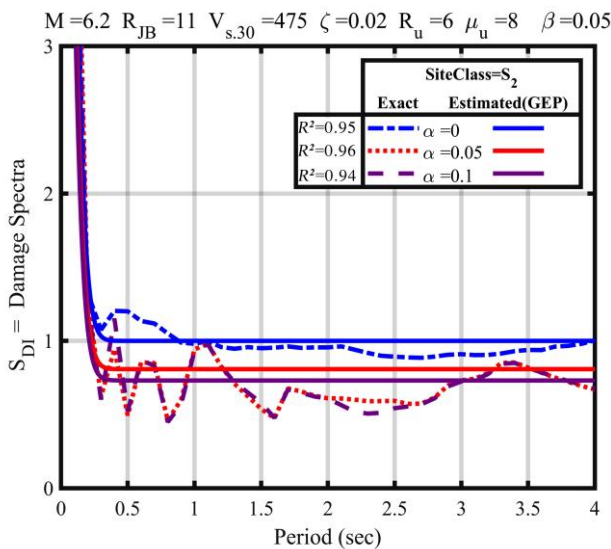
شکل ۶. نمودارهای رگرسیون برای نتایج دقیق لگاریتم  $S_{DI}$  در مقابل مدل پیش‌بینی شده با استفاده از الگوریتم GEP برای کل داده‌ها.



شکل ۹. نمودارهای  $S_{DI}$  مربوط به مدل GEP و نتایج دقیق برای متغیر  $\mu_u$ .



شکل ۱۰. نمودارهای  $S_{DI}$  مربوط به مدل GEP و نتایج دقیق برای متغیر  $\beta$ .



شکل ۱۱. نمودارهای  $S_{DI}$  مربوط به مدل GEP و نتایج دقیق برای متغیر  $\alpha$ .

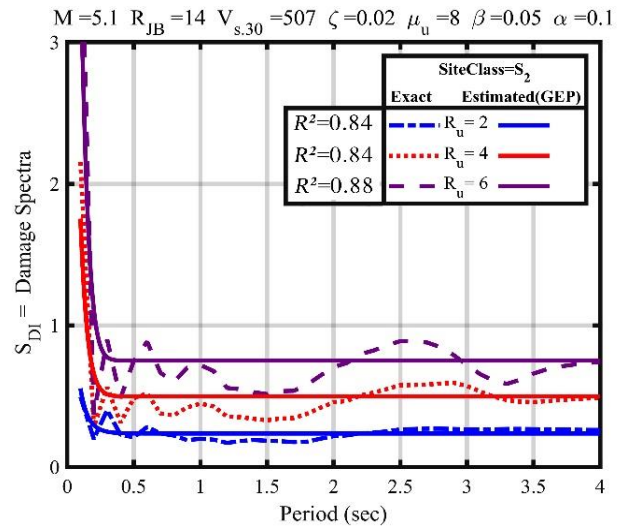
خوبی در خط با زاویه‌ی ۴۵ درجه متمرکز شده‌اند. علاوه بر این، نتایج  $R^2$  بر روی شکل به ترتیب برابر با ۰/۹۱۷، ۰/۸۹۵، و ۰/۹۰۵ برای مجموعه‌ی داده‌های آموزشی، آزمایشی، و کل داده‌هاست، که نشان‌دهنده‌ی تطابق بسیار خوب آن‌ها با داده‌های هدف است.

### ۲.۵. مقایسه‌ی طیف آسیب

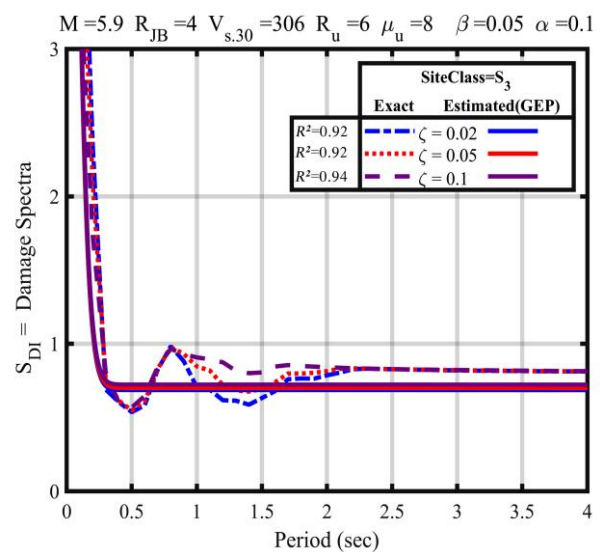
مقایسه‌ی طیف آسیب محاسبه‌شده با استفاده از رابطه‌ی ۶ با نتایج تحلیلی در پژوهش حاضر برای حرکت‌های زمین در شکل‌های ۷ الی ۱۱ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن‌ها، به‌طور کلی، معادله‌ی ساده‌شده‌ی پیشنهادی، تخمین‌های خوبی از طیف آسیب ارائه می‌دهد.

### ۳.۵. مقایسه با مدل‌های مختلف طیف آسیب

در بخش‌های قبلی، دقت مدل ریاضی پیش‌بینی‌شده توسط برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) و مقایسه‌ی طیف آسیب محاسبه‌شده با استفاده از رابطه‌ی ۶ با نتایج تحلیلی بررسی شده است. در اینجا، به‌منظور مقایسه‌ی مدل‌های



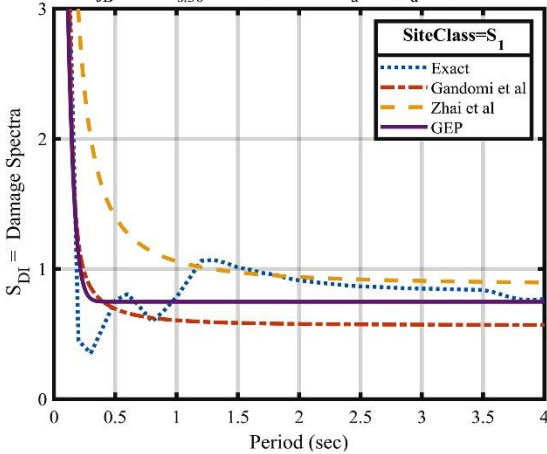
شکل ۷. نمودارهای  $S_{DI}$  مربوط به مدل GEP و نتایج دقیق برای متغیر  $R_u$ .



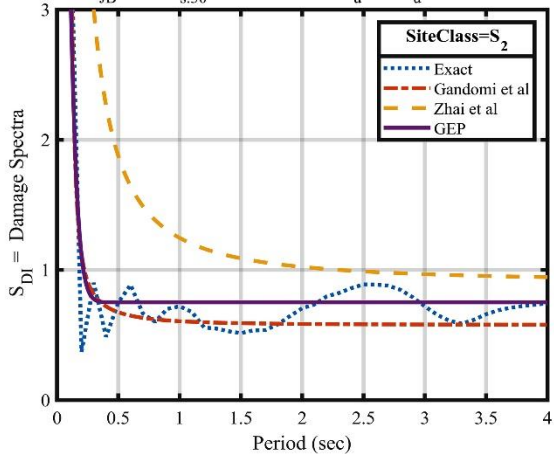
شکل ۸. نمودارهای  $S_{DI}$  مربوط به مدل GEP و نتایج دقیق برای متغیر  $\zeta$ .

برای درک بهتر، یک مقایسه‌ی گرافیکی برای نشان دادن روند تغییر مدل‌های پیش‌بینی‌شده با استفاده از GEP با مدل‌های پیشنهادی ژای و همکاران (۲۰۱۳) و پیشنهادی قره‌باغی و گندمی (۲۰۲۱)، و نتایج دقیق انجام شده است. برای این منظور، متغیرهای ورودی برابر با  $\zeta = 0.02$ ،  $R_u = 6$ ،  $\mu_u = 8$ ،  $\beta = 0.05$ ،  $\alpha = 0.1$  انتخاب شده‌اند، و  $S_{DI}$  با توجه به نوع خاک ( $S_1$ ،  $S_2$ ، و  $S_3$ ) در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود؛ که در آن، نمودارهای

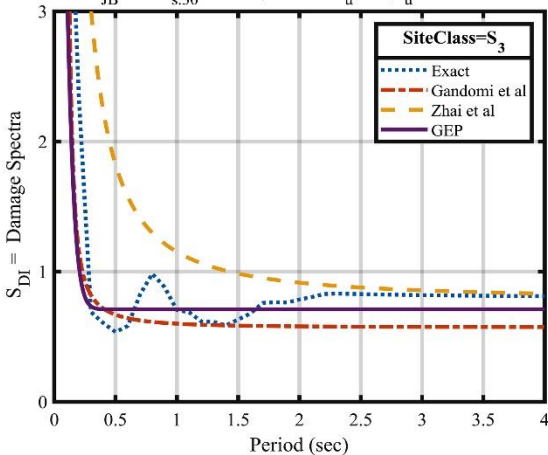
M=5.1 R<sub>JB</sub>=11 V<sub>s,30</sub>=854 ζ=0.02 R<sub>u</sub>=6 μ<sub>u</sub>=8 β=0.05 α=0.1



M=5.1 R<sub>JB</sub>=14 V<sub>s,30</sub>=507 ζ=0.02 R<sub>u</sub>=6 μ<sub>u</sub>=8 β=0.05 α=0.1



M=5.9 R<sub>JB</sub>=4 V<sub>s,30</sub>=306 ζ=0.02 R<sub>u</sub>=6 μ<sub>u</sub>=8 β=0.05 α=0.1



شکل ۱۲. نمودارهای S<sub>DI</sub> مربوط به مدل‌های GEP، ژای و همکاران، و قره‌باغی و گندمی، و نتایج دقیق است ( $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$ ).

جدول ۷. ضرایب استفاده‌شده در مدل پیشنهادی ژای و همکاران (۲۰۱۳) [۷].

نوع خاک	ضرایب		
	$b_r$	$b_\tau$	$b_1$
$S_1$	۱/۲۵	۰/۰۲	۰/۰۸
$S_2$	۱/۲	۰/۰۴	۰/۰۹
$S_3$	۱/۱	۰/۰۵	۰/۰۹
$S_4$	۱/۱۸	۰/۱	۰/۰۸

جدول ۸. ضرایب استفاده‌شده در مدل پیشنهادی قره‌باغی و گندمی (۲۰۲۱) [۱۲].

نوع خاک	ضرایب				
	$C_4$	$C_3$	$C_2$	$C_1$	$C_0$
$S_1$	۰/۰۳۵۶۲۲	۰/۰۰۲۹۷۸	۰/۰۰۰۴۹۲	۵/۸۳۲۱۲۳	۰/۱۳۰۲۷۵
$S_2$	۰/۰۲۶۳۵۵	۰/۰۰۲۰۴۶	۰/۰۰۰۳۶۶	۶/۲۱۶۵۸۷	۰/۱۱۱۰۱۱
$S_3$	۰/۰۲۴۲۲۲	۰/۰۰۱۶۳۴	۰/۰۰۰۳۲۹	۶/۳۶۶۱۱۲	۰/۰۹۵۵۲۱
$S_4$	۰/۰۵۶۸۷۶	۰/۰۰۶۶۱۱	۰/۰۰۰۸۷۶	۶/۸۷۵۴۳۷	۰/۰۹۰۱۶۸

توسعه‌یافته توسط برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) با دو مدل ارائه‌شده در نوشتارها، که مدل اول مرتبط توسط ژای و همکاران (۲۰۱۳) [۷] و مدل دوم توسط قره‌باغی و گندمی (۲۰۲۱) [۱۲]، که مدل‌های توسعه‌یافته با استفاده از روش برنامه‌نویسی ژنتیک چندژنی (MGGP) را به دست آورده‌اند، پیشنهاد شده است؛ که در آن‌ها، ضرایب بسته به نوع خاک بوده و سایر پارامترها با توجه به نوع ویژگی‌های سازه و زلزله تعریف شده‌اند. مقادیر پیشنهادی برای ضرایب متناظر با هر نوع خاک در جدول‌های ۷ و ۸ فهرست شده‌اند.

### ۵.۱.۳. مدل پیشنهادی ژای و همکاران (رابطه‌ی ۱۳) [۷].

$$S_{DI, \text{Zhai et al}} = \frac{1}{\mu_u} + \left( b_1 + \frac{b_r}{T^{1.5}} \right) (R_u - 1)^{b_\tau} \frac{1}{\mu_u} \quad (13)$$

که در آن، ضرایب  $b_1$  الی  $b_r$ ، براساس نوع خاک در جدول ۷ ارائه شده‌اند:

### ۵.۲.۳. مدل پیشنهادی قره‌باغی و گندمی (رابطه‌ی ۱۴) [۱۲].

$$S_{DI, \text{Gh.G}} = c_0 + c_1 G_1 + c_2 G_2 + c_3 G_3 + c_4 G_4 \quad (14)$$

که در آن، ضرایب  $G_1$  الی  $G_4$  مطابق روابط ۱۵ الی ۱۸ محاسبه می‌شوند و ضرایب  $C_0$  الی  $C_4$  براساس نوع خاک در جدول ۸ ارائه شده‌اند:

$$G_1 = \frac{\beta + \sqrt{\zeta}}{\mu_u + 2\alpha} (\ln R_u)^\tau \quad (14)$$

$$G_2 = \frac{R_u^\tau}{(\mu_u + \zeta + 6.398) T^4} \quad (15)$$

$$G_3 = -\frac{R_u^\tau \tanh(\alpha)}{T^\tau} \quad (16)$$

$$G_4 = \frac{\beta R_u^\tau}{\mu_u T^\tau} \quad (17)$$

## جدول ۹. نتایج معیار عملکرد $R^2$ برای مدل‌ها براساس نوع خاک.

نوع خاک	معیار عملکرد	GEP	مدل قره‌باغی و گندمی	مدل ژای و همکاران
$S_1$	$R^2$	۰/۸۸	۰/۸۷	۰/۶۷
$S_2$	$R^2$	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۷۲
$S_3$	$R^2$	۰/۹۲	۰/۹۰	۰/۸۹

$f_y$  سیستم SDOF کاهش یافته است، که منجر به افزایش آسیب شده است. تفاوت‌های ناشی از اثر نسبت میرایی در (SDI) با افزایش دوره‌ی تناوب سازه کاهش یافته است.

- آثار نسبت سختی پس از تسلیم ( $\alpha$ ) سیستم‌های SDOF برای طیف آسیب مطالعه شده است، که نسبت سخت‌شوندگی بیشتر منجر آسیب کمتر سازه شده است. با در نظر گرفتن نسبت سخت‌شدگی برای مدل رفتاری، آسیب طیفی به‌طور قابل‌توجهی کاهش و با افزایش  $\alpha$ ، آسیب طیفی تا حدودی کاهش یافته است.

-  $\beta$  یک ثابت مثبت است که برای ترکیب دو عبارت شاخص آسیب پارک-انگ استفاده می‌شود، و در آن بخشی از انرژی هیستریتیک مشارکت دارد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، طیف آسیب (SDI) با افزایش  $\beta$  افزایش یافته است.

- تأثیر نوع خاک ( $S_1, S_2, S_3$ ) در SDI به اندازه‌ی دیگر پارامترهای ذکر شده قابل توجه نبوده است. به‌طور کلی، طیف آسیب SDI برای خاک  $S_2$  بیشتر از خاک  $S_3$  و طیف آسیب برای خاک  $S_2$  بیشتر از خاک  $S_1$  بوده است.

- مدل ریاضی استخراج‌شده مبتنی بر GEP، اندازه‌گیری طیف آسیب لرزه‌یی سازه‌ها را عملی‌تر ساخته است. مدل ریاضی پیش‌بینی‌شده دارای برازندگی برابر  $R^2 = ۰/۹۲۸/۳۲$  و  $R^2$  برابر  $۰/۹۱۷$  برای داده‌های آموزشی؛ برازندگی  $۰/۹۱۹/۴۵$ ،  $R^2$  برابر  $۰/۸۹۵$  برای داده‌های آزمایشی؛ و برای کل داده‌ها مقدار برازندگی  $۰/۹۲۲/۶۵$  و  $R^2$  برابر  $۰/۹۰۵$  بوده است، که برای این تعداد از داده‌های طبیعی و به‌دست‌آمده از زلزله‌های رخ داده قابل قبول است.

- مدل پیشنهادی با استفاده از مجموعه‌یی از سیستم‌های تک‌درجه‌ی آزادی (SDOF) طراحی و توسعه یافته است. این محدودیت، که ناشی از در نظر گرفتن فقط مجموعه‌ی معینی از مقادیر برای پارامترهای سازه‌یی و لرزه‌یی بوده است، می‌تواند تأثیر قابل توجهی در گستره‌ی کاربردی مدل و دقت نتایج حاصل از آن داشته باشد. علاوه بر این، مدل فعلی بر پایه‌ی تحلیل‌های عددی سیستم‌های SDOF بنا شده است.

- به‌منظور توسعه‌ی مدل‌های پیش‌بینی، از یک روش هوش محاسباتی، یعنی برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) استفاده شده است. بررسی و کاربرد سایر روش‌های پیشرفته‌ی هوش محاسباتی می‌تواند به بهبود قابلیت‌های پیش‌بینی مدل کمک کند.

- به‌علت کمبود رکورد‌های نزدیک گسل در ایران، فقط از ۲۰ رکورد استفاده شده است. این رکورد‌های زمین‌لرزه، باعث تنوع کم پارامترهای لرزه‌یی، از قبیل: بزرگا، فاصله از گسل، و شرایط ساخت‌گاهی شده‌اند. این محدودیت ممکن است بر دقت مدل در پیش‌بینی پاسخ سازه‌ها به زلزله‌هایی که خارج از معیارهای ذکر شده‌ی از پیش‌تعیین شده هستند، تأثیر بگذارد.

- علاوه بر این، بررسی نتایج مدل اولیه‌ی شاخص آسیب پارک-انگ نشان داد که در برخی موارد، مقادیر طیف آسیب بزرگ‌تر از ۱ بوده‌اند، که از نظر منطقی قابل قبول نیست. در صورت استفاده از نسخه‌ی اصلاح‌شده‌ی پارک-انگ، مقادیر آسیب، به ۱ محدود خواهد شد، که تفسیرپذیری منطقی‌تری خواهد داشت.

دقیق و پیش‌بینی‌شده با استفاده از مدل‌های GEP، ژای و همکاران (۲۰۱۳)، و قره‌باغی و گندمی (۲۰۲۱) نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل‌های مذکور، منحنی‌های طیف آسیب در تمام نمودارها، روند نزولی را نشان می‌دهد. با توجه به متغیرهای در نظر گرفته‌شده برای حوزه‌ی نزدیک به گسل، مدل ژای و همکاران، مقادیر بیشتری از آسیب را به نمایش گذاشته است، و در این حالت با توجه به شکل ۱۲ و جدول ۹، مدل GEP نزدیک به مدل قره‌باغی و گندمی است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، مدل GEP برای زمان‌های تناوب بزرگ‌تر مقادیری بیشتر از مدل قره‌باغی و گندمی نسبت به زمان تناوب‌های کوتاه‌تر به نمایش گذاشته است.

## ۶. نتیجه‌گیری

هدف اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی آسیب و پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی تحت اثر زلزله‌های ایران بوده است. از طریق مطالعه و بررسی طیف آسیب لرزه‌یی، تلاش شده است تا درک عمیق‌تری از آسیب سازه‌یی در زلزله‌های نزدیک به گسل به‌دست آورده شود. در بخش کنونی، نتایج حاصل از تحلیل‌ها و مطالعات صورت‌گرفته ارائه و تأثیر آن‌ها در ارزیابی آسیب و پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌یی بحث شده است.

- نتایج نشان داده‌اند که پارامترهای سازه‌یی و زلزله در طیف آسیب لرزه‌یی تأثیرگذار هستند و ضریب کاهش مقاومت و ضریب شکل‌پذیری، بیشترین تأثیر را در طیف آسیب سازه‌ها دارند.

- تغییرات طیف آسیب (SDI) با افزایش  $R_{II}$  برای همه‌ی سازه‌های با دوره‌های تناوب کوتاه به بلند افزایش یافته است. می‌توان گفت که به‌دلیل کاهش  $f_y$ ، درجه‌های غیرخطی بالاتری در همان سطح شدت زلزله تجربه می‌شود، و خسارت ناشی از آن با افزایش  $R_{II}$  افزایش می‌یابد. تغییرات طیف آسیب (SDI) نشان داده‌اند زمانی که ضریب شکل‌پذیری ( $\mu_{II}$ ) افزایش یافته است، ظرفیت مدل برای تغییر شکل‌های غیراتجاعی نسبت به پیشینه‌ی تغییر شکل تحت حرکت زمین افزایش و در نتیجه آسیب طیفی کاهش یافته است. زیرا سازه‌های با شکل‌پذیری بالاتر، قابلیت تغییر شکل، و ظرفیت اتلاف انرژی بیشتری دارند، که منجر به آسیب کمتری می‌شود.

- اثر نسبت میرایی ( $\gamma$ ) در سیستم‌های SDOF در طیف آسیب (SDI) نشان می‌دهد که SDI با افزایش نسبت میرایی ( $\gamma$ ) افزایش یافته است. افزایش نسبت میرایی منجر به کاهش شتاب طیفی ( $S_a$ ) و در یک  $R_{II}$  مشخص،

آسیب‌پذیری سازه‌ها در مقابل زلزله تأکید می‌ورزد. با پیش‌بینی دقیق آسیب‌های احتمالی که سازه‌ها ممکن است در طول رویدادهای لرزه‌ی تجربه کنند، می‌توان خطرهای مرتبط با زلزله‌ها را به‌طور مؤثرتری درک کرد و کاهش داد.

- نتایج حاکی از اثربخشی رویکرد استفاده‌شده در دستیابی به طیف‌های آسیب دقیق و کارآمد برای سیستم‌های سازه‌ی است، که ارزیابی جامع آسیب را تسهیل می‌بخشد.

پژوهش حاضر در اهمیت حیاتی پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌ی در ارزیابی

## References- منابع

- Gharehbaghi, S., 2018. Damage Controlled Optimum Seismic Design of Reinforced Concrete Framed Structures. *Structural Engineering and Mechanics*, 65 (1), pp.53-68.  
<https://doi.org/10.12989/sem.2018.65.1.053>
- Samanta, A., Megawati, K. and Pan, T.C., 2012. Duration-Dependent Inelastic Response Spectra and Effect of Ground Motion Duration. In Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, pp. 24-28.
- Teran-Gilmore, A., Sanchez-Badillo, A. and Espinosa-Johnson, M., 2010. Performance-Based Seismic Design of Reinforced Concrete Ductile Buildings Subjected to Large Energy Demands. *Earthquakes and Structures*, 1 (1), pp.69-92.  
<https://doi.org/10.12989/eas.2010.1.1.069>
- Bozorgnia, Y. and Bertero, V.V., 2003. Damage Spectra: Characteristics and Applications to Seismic Risk Reduction. *Journal of Structural Engineering*, 129 (10), pp.1330-1340.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:10\(1330\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:10(1330))
- Kunnath, S.K. and Chai, Y.H., 2004. Cumulative Damage-Based Inelastic Cyclic Demand Spectrum. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 33 (4), pp.499-520.  
<https://doi.org/10.1002/eqe.363>
- Cosenza, E., Manfredi, G. and Polese, M., 2009. Simplified Method to Include Cumulative Damage in the Seismic Response of Single-Degree-of-Freedom Systems. *Journal of Engineering Mechanics*, 135 (10), pp.1081-1088.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2009\)135:10\(1081\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2009)135:10(1081))
- Zhai, C.H., Wen, W.P., Chen, Z., Li, S. and Xie, L.L., 2013. Damage Spectra for the Mainshock-Aftershock Sequence-Type Ground Motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 45, pp.1-12.  
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.10.001>
- Greco, R., Marano, G.C. and Fiore, A., 2017. Damage-Based Inelastic Seismic Spectra. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 17 (10), p.1750115.  
<https://doi.org/10.1142/S0219455417501152>
- Park, Y.J. and Ang, A.H.S., 1985. Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete. *Journal of Structural Engineering*, 111 (4), pp.722-739.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111:4\(722\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:4(722))
- Wen, W., Ji, D., Zhai, C., Li, X. and Sun, P., 2018. Damage Spectra of the Mainshock-Aftershock Ground Motions at Soft Soil Sites. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, pp.815-825.  
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.08.016>
- Wen, W., Zhai, C. and Ji, D., 2018. Damage Spectra of Global Crustal Seismic Sequences Considering Scaling Issues of Aftershock Ground Motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 47 (10), pp.2076-2093.  
<https://doi.org/10.1002/eqe.3056>
- Gharehbaghi, S., Gandomi, M., Plevris, V. and Gandomi, A.H., 2021. Prediction of Seismic Damage Spectra Using Computational Intelligence Methods. *Computers & Structures*, 253, p.106584.  
<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2021.106584>
- Gandomi, A.H. and Roke, D.A., 2015. Assessment of Artificial Neural Network and Genetic Programming as Predictive Tools. *Advances in Engineering Software*, 88, pp.63-72.  
<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.05.007>
- Anil, K., 2020. Chopra Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. Fifth Edition in SI Units, pp.276-319
- Ferreira, C., 2001. Gene Expression Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems. arXiv preprint cs/0102027.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.cs/0102027>
- Ferreira, C., 2006. Gene Expression Programming: Mathematical Modeling by an Artificial Intelligence, Vol. 21, Springer.
- Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., O'Rourke, T.D., Reinhorn, A.M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W.A. and Von Winterfeldt, D.,

2003. A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*, 19(4), pp. 733-752. <https://doi.org/10.1193/1.1623497>
18. Park, Y.J., Ang, A.H. and Wen, Y.K., 1987. Damage-Limiting Aseismic Design of Buildings. *Earthquake Spectra*, 3(1), pp. 1-26. <https://doi.org/10.1193/1.1585416>.
19. Gepsoft, 2014. Fitness Functions for Regression. [online] Available at: <http://www.gepsoft.com>
20. Road, Housing & Urban Development Research Center and Iran Strong Motion Network, n.d. [online] Available at: <https://smd.bhrc.ac.ir/Portal>
21. Biglari, M., Hadzima-Nyarko, M. and Formisano, A., 2022. Seismic Damage Index Spectra Considering Site Acceleration Records: The Case Study of a Historical School in Kermanshah. *Buildings*, 12(10), p. 1736. <https://doi.org/10.3390/buildings12101736>.
22. Pan, X., Lin, Z., Zhang, L. and Zheng, Z., 2024. Damage Spectra of SDOF Structures Under Tsunami Actions Considering the Nonlinear Dynamic Analysis Method. *Journal of Earthquake and Tsunami*, p. 2350034. <https://doi.org/10.1142/S1793431123500343>
23. Ferreira, C. and Ferreira, C., 2006. Numerical Constants and the GEP-RNC Algorithm. *Gene Expression Programming: Mathematical Modeling by an Artificial Intelligence*, pp. 181-232. [https://doi.org/10.1007/3-540-32849-1\\_5](https://doi.org/10.1007/3-540-32849-1_5)
24. Engelbrecht, A.P., 2007. Computational Intelligence: An Introduction. *John Wiley and Sons*, pp. 36-46.