

# ارزیابی هوشمند آسیب و پیش بینی طیف آسیب لرزه‌ای تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل در ایران

رامین فضلی<sup>۱</sup>، محمد شامخی امیری<sup>۲\*</sup>، حسین پهلوان<sup>۳</sup>،

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود،

شاهرود، ایران

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- Ramin.Fazli@shahroodut.ac.ir

۲- Shamekhi@shahroodut.ac.ir

۳- Pahlavan@shahroodut.ac.ir

## چکیده:

پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌ای یک سازه، که هر دو ویژگی سازه‌ای و زلزله را در برمی‌گیرد، در زمان طراحی سازه‌های جدید و هم برای ارزیابی تاب‌آوری سازه‌های موجود از اهمیت زیادی برخوردار است. هدف این پژوهش ارزیابی دقیق آسیب و پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌ای تحت اثر زلزله‌های ایران با استفاده از برنامه‌نویسی بیان ژن است. برای این منظور، یک سیستم یک درجه آزادی غیرالاستیک تحت مجموعه‌ای از رکوردهای زلزله‌های ایران برای محاسبه آسیب طیفی استفاده می‌شود. سپس با استفاده از برنامه‌نویسی بیان ژن، مدل ریاضی صریح با تعریف یک تابع برازندگی برای آن استخراج می‌شود. شاخص آسیب پارک-انگ برای تعیین کمیت طیف آسیب استفاده شده است. هر دو ویژگی سازه‌ای و زلزله در پیش‌بینی مدل طیف آسیب لرزه‌ای نقش خواهد داشت. در انتها یک معادله ساده شده برای اندازه‌گیری طیف آسیب لرزه‌ای سازه‌ها، برای حرکات زمین در ایران که هر دو ویژگی را در بر می‌گیرد، پیشنهاد شده است.

## واژگان کلیدی:

طیف آسیب لرزه‌ای"، "شاخص آسیب پارک-انگ"، "برنامه‌نویسی بیان ژن"، "سیستم یک درجه آزادی غیرالاستیک (SDOF)"، "زلزله نزدیک گسل

# Intelligent assessment of damage and prediction of seismic damage spectrum under the effect of Near-Fault earthquakes in Iran

R. Fazl<sup>۱</sup>, M. Shamekhi Amiri<sup>۱</sup>, H. Pahlavan<sup>۲</sup>,

۱- M.Sc. Student in Earthquake Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

۲- Assistant Professor Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

## Abstract:

Predicting seismic damage spectra, capturing both structural and earthquake features, is crucial for design of new buildings and also for resilience evaluation of existing ones. The research objective of this article is to accurately assess and predict the seismic damage spectrum caused by earthquakes in Iran using gene expression programming. Gene expression programming is a method for learning and optimization rooted in genetic principles and molecular biology. For this purpose, a single-degree-of-freedom nonlinear system is considered, along with a collection of earthquake records from Iran, to exact computation of damage spectrum. Subsequently, a mathematical model is developed through the application of gene expression programming and genetic programming algorithms. The Park-Ang damage index is used to computing the level of seismic damage or damage spectra. Both the structural characteristics and seismic properties are significant factors in predicting of the seismic damage spectrum model. Finally, a simplified equation has been suggested for assessing the potential seismic damage spectrum of the structures exposed to ground motions in Iran capturing both structural and earthquake features. This study demonstrates the significant impact of structural and seismic parameters on the seismic damage spectrum, highlighting that an increase in the resistance reduction factor correlates with a rise in damage spectrum across structures of varying vibration periods. The changes in the damage spectrum indicate that as the ductility coefficient increases, the spectral damage decreases. The impact of the damping ratio on SDOF systems in the damage spectrum demonstrates that an increase in the damping ratio leads to an increase in the damage spectrum. The effects of post-yield stiffness ratio in SDOF systems for the damage spectrum showed that a higher stiffness ratio results in the structure exhibiting less damage. The relationship between the Park-Ang index constant and the damage spectrum is such that an increase in the Park-Ang index constant leads to a corresponding rise in the damage spectrum. The influence of soil type on the damage spectrum is comparatively less significant than the impacts of the other parameters discussed.

**Keywords:** Seismic damage spectra", " Park-Ang damage index", "Gene expression programming (GEP), Inelastic one-degree-of-freedom system (SDOF) ", " Near Field Earthquake

## ۱ - مقدمه و تاریخچه تحقیقات

امروزه، پیش‌بینی آسیب ناشی از زلزله، هم در زمان طراحی سازه‌های جدید و هم برای ارزیابی تاب‌آوری سازه‌های موجود، از اهمیت حیاتی برخوردار است. آسیب وارده به سازه‌ها ناشی از زلزله 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. این روش‌ها با در نظر گرفتن پارامترهای اصلی سازه و ویژگی‌های خاص زلزله امکان تجزیه و تحلیل دقیق تأثیرات زلزله بر روی سازه‌ها را فراهم می‌آورند. اما از مشکلات این روش‌ها می‌توان به زمانبر و هزینه بر بودن آن‌هاست.

تقاضاهای حداکثر، مانند شکل‌پذیری حداکثر و شتاب حداکثر زمین، که معمولاً توسط آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای استفاده می‌شوند، به طور مناسب منعکس‌کننده آسیب لرزه‌ای یک سازه نیستند. تقاضاهای تغییرشکل تحمیل شده به یک المان سازه‌ای توسط زمین‌لرزه ماهیت چرخه‌ای دارند، و نتایج مرتبط با آسیب جمعی تأثیر قابل توجهی بر مقاومت لرزه‌ای یک سازه خواهد داشت. در واقع، این خواسته‌ها شامل یک محدودیت مفهومی به دلیل این واقعیت است، که آن‌ها صراحتاً خسارت جمعی ناشی از تعداد چرخه‌های پاسخ و اتلاف انرژی را در نظر نمی‌گیرند [۱]. علاوه بر این، آن‌ها مدت زمان و محتوای فرکانسی یک زمین لرزه را در محاسبات خود لحاظ نمی‌کنند.

اگرچه این خواسته‌ها ضروری هستند، اما تنها تکیه بر چنین خواسته‌هایی ناکافی است، به ویژه برای سازه‌هایی که انتظار می‌رود، تغییرشکل پلاستیک و اتلاف انرژی تحت زلزله‌های طراحی داشته باشند. طیف طراحی موجود در اکثر آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای، این اثرات بحرانی را در نظر نمی‌گیرند. در نتیجه، ضریب زلزله‌ای که در محاسبه برش طراحی در تراز پایه به کار می‌رود، ممکن است برای کنترل آسیب لرزه‌ای در سازه‌های شکل‌پذیری که در معرض حرکات زمینی با محتوای انرژی بالا قرار دارند، ناکافی باشد [۲۳]. طیف طراحی لرزه‌ای به‌دست‌آمده با استفاده از شتاب طیفی (شناخته‌شده به عنوان طیف طراحی الاستیک) و ضریب رفتار سازه (برای در نظر گرفتن اثرات رفتار غیرالاستیک و شکل‌پذیری در کاهش برش پایه طراحی) نقش عوامل اصلی که در بالا توضیح داده شد، را نادیده می‌گیرند. بنابراین، نیاز به برآورد آسیب بالقوه به روشی وجود دارد که پارامترهای اصلی سازه و زلزله را در نظر بگیرد. یک راه حل، استفاده از یک طیف غیرالاستیک است، که آسیب جمعی را ثبت

می‌کند. در این راستا، طیف آسیب به عنوان یک ابزار مفهومی، نموداری است که ارتباط میان میزان آسیب لرزه‌ای با دوره تناوب سازه را نشان می‌دهد. این طیف ارزیابی آسیب‌پذیری، توانایی ثبت کمی آسیب‌های لرزه‌ای بالقوه را در مجموعه‌ای وسیعی از ساختمان‌ها با در نظر گرفتن هم خواص سازه‌ای و هم ویژگی‌های زمین‌لرزه ارائه می‌دهد.

این رویکرد توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است و برخی از کارهای مرتبط در ادامه توضیح داده خواهد شد.

بزرگ‌نیا و برترو [۴] طیف آسیب را با ترکیب انرژی هیسترتیک نرمال شده و شکل‌پذیری تغییرشکل پیشنهاد کردند. طیف آسیب با در نظر گرفتن صدها رکورد حرکت زمین ثبت شده در طول زلزله‌های لاندز و نورتریج محاسبه شده است. کانت و چای [۵] یک روش ساده مبتنی بر ایجاد رابطه بین انرژی ورودی لرزه‌ای و انرژی هیسترتیک مستهلک شده را برای تعیین طیف تقاضای چرخه‌ای غیرارتجاعی مبتنی بر آسیب که قادر به استفاده در تحلیل لرزه‌ای و طراحی سازه‌ها می‌باشد، پیشنهاد کردند. کوزنزا و همکاران [۶] یک روش ساده را پیشنهاد کردند، که اثر جمعی آسیب را در بر می‌گیرد، که برای طراحی لرزه‌ای و ارزیابی سازه‌ها قابل استفاده است. یک ضریب خسارت معادل برای تعیین مقاومت اصلاح شده یا طیف جابجایی غیرالاستیک که قادر به محاسبه آسیب ناشی از زلزله است، معرفی کردند. ژای و همکاران [۷] یک مدل ریاضی را برای برآورد آسیب طیفی برای زمین‌لرزه‌های از نوع توالی پس‌لرزه‌های زلزله اصلی پیشنهاد کردند. آن‌ها تأثیر دوره تناوب سازه، ضریب کاهش مقاومت، نسبت میرایی، نسبت سختی پس از تسلیم و وضعیت سایت را در مدل آسیب طیفی پیشنهادی مورد بررسی قرار دادند. گرکو و همکاران [۸] یک رویکرد تصادفی را برای تعیین طیف غیرالاستیک مبتنی بر آسیب لرزه‌ای پیشنهاد کردند، که اثرات جمعی آسیب را با استفاده از مدل آسیب پارک-آنگ [۹] بررسی می‌کنند.

ون و همکاران [۱۰] طیف‌های آسیب برای نوع توالی پس لرزه‌های اصلی برای زمین‌های با خاک نرم پیشنهاد کردند. مشخص گردید که تأثیر خاک نرم بر طیف آسیب می‌تواند بیش از ۴۰٪ باشد. ون و همکارانش [۱۱] طیف آسیب‌های ناشی از پس‌لرزه‌های زلزله‌های اصلی در پوسته جهانی را مطالعه کرده‌اند. این زلزله‌ها معمولاً در اعماق کمتر از ۷۰ کیلومتری مناطق لرزه‌خیز سراسر جهان رخ می‌دهند. آن‌ها همچنین یک مدل ریاضی برای برآورد طیف آسیب ارائه داده‌اند، و نشان داده‌اند که پس‌لرزه‌هایی با شدت بیش از

۸۰ درصد زلزله اصلی می‌تواند میزان آسیب را تا ۲۰ درصد افزایش دهند.

قره باغی و گندمی [۱۲] طیف لرزه‌ای با استفاده از روش‌های برنامه نویسی ژنتیک چند ژنی (MGGP<sup>۱</sup>) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs<sup>۲</sup>) بدست آوردند. مدل ریاضی صریح مبتنی بر MGGP برای تسهیل در اندازه‌گیری طیف آسیب لرزه‌ای بالقوه سازه‌ها، برای حرکات زمین که هر دو ویژگی سازه‌ای و زلزله را در بر می‌گیرد، پیشنهاد کرده‌اند.

بیگلری [۲۱] طیف آسیب را برای دبیرستان تاریخی کرمانشاه برای حرکات زمین محاسبه کرده است. تجزیه و تحلیل غیرخطی نشان می‌دهد، که طیف آسیب با افزایش شتاب زمین، افزایش می‌یابد. تحلیل انعطاف‌پذیری سازه‌های با کف چوبی به طور قابل توجهی مقاومت لرزه‌ای پیش‌بینی شده را کاهش داده که باعث افزایش آسیب‌پذیری لرزه‌ای این بنایی تاریخی گردیده است.

شیائولان پان و همکاران [۲۲] در یک تجزیه و تحلیل جامع از طیف آسیب برای سیستم‌های تک درجه آزادی (SDOF) تحت بارگذاری جانبی امواج سونامی را ارائه می‌کنند. در این پژوهش پاسخ دینامیکی سیستم‌های SDOF به بارگذاری سونامی را با در نظر گرفتن عوامل مختلفی مانند عمق، مدل‌های هیسترتیک، سختی پس از تسلیم و میرایی بررسی شده است. یافته‌ها تأثیر قابل توجه این عوامل بر آسیب‌های سازه‌ای را برجسته می‌کند، و یک فرمول پیش‌بینی ساده شده برای تخمین آسیب‌های سازه‌ای ناشی از سونامی را معرفی کرده است.

همانطور که توضیح داده شد، پیش‌بینی آسیب احتمالی برای طیف وسیعی از سازه‌ها، که می‌تواند مستقیماً توسط طیف‌های آسیب ارائه شود، می‌تواند در طراحی سازه‌های جدید مقاوم و یا ارزیابی مقاومت لرزه‌ای سازه‌های موجود مورد استفاده قرار گیرد. بیشتر پژوهش‌های انجام شده تاکنون برای تعیین آسیب به طور غیرمستقیم از اصلاح طیف مبتنی بر تغییرشکل غیرالاستیک استفاده کرده‌اند. این روش‌ها به طور کلی بر اساس تغییرشکل سازه در پاسخ به بارگذاری‌های جانبی، آسیب را تخمین می‌زنند. اما تعداد کمی پژوهش مستقیماً طیف آسیب را محاسبه کرده‌اند.

استفاده از روش‌های رگرسیون معمولی برای برآورد طیف آسیب در بسیاری از مطالعات انجام شده تاکنون رایج بوده است. این روش‌ها

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های تحلیلی، رابطه‌ای بین پارامترهای غیرمستقل و طیف آسیب را برآورد می‌کنند. این روش‌ها می‌توانند به عنوان یک ابزار مفید برای تخمین آسیب بالقوه سازه‌ها مورد استفاده قرار بگیرند.

روش‌های یادگیری ماشین<sup>۳</sup> در بهبود دقت مدل‌ها برای تخمین طیف آسیب در مقایسه با روش‌های رگرسیون معمولی دارای مزایای ویژه‌ای هستند. روش‌های یادگیری ماشین، با قابلیت مدل‌سازی روابط غیرخطی پیچیده بین ورودی‌ها و خروجی‌ها، امکان برآزش دقیق‌تر داده‌ها و افزایش معنادار دقت در تخمین آسیب را فراهم می‌آورند. روش‌های یادگیری ماشین، با توانایی برجسته خود در استفاده از داده‌های بزرگ و پیچیده و شناسایی الگوهای غیرخطی و تعاملات میان ویژگی‌ها، 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 سازه‌ای و لرزه‌ای در هنگام تغییرشکل‌های غیرالاستیک و بارگذاری چرخه‌ای 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 تعریف شده ندارند، می‌تواند مدلی با دقت بالاتری را نسبت به تجزیه و تحلیل رگرسیونی سنتی، که بر فرضیات خطی استوار است، ارائه دهد.

در حالی که پیشرفت‌های اخیر در هوش محاسباتی این روش‌ها را برای حل مسائل چالش برانگیز 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 [۱۳].

همانطور که هوش محاسباتی به طور فزاینده‌ای در زندگی روزمره ما رایج می‌شود، الگوریتم‌ها و تکنیک‌های جدید به طور مداوم در حال توسعه برای بهبود بهره‌وری و دقت در یادگیری ماشین هستند. برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP<sup>۴</sup>) یک تکنیک یادگیری ماشینی و بهینه‌سازی براساس اصول ژنتیک و زیست‌شناسی مولکولی است [۱۵].

<sup>۱</sup> Machine Learning Methods

<sup>۲</sup> Gene Expression Programming

<sup>۱</sup> Multi-Gene Genetic Programming

<sup>۲</sup> Artificial Neural Networks

GEP با ترکیب اصول برنامه‌نویسی ژنتیک و الگوریتم‌های ژنتیک توسط کاندافریرا<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۱ یک سیستم انعطاف‌پذیر و قوی را توسعه داد، که بتواند طیف گسترده‌ای از مسائل را در زمینه‌های مختلف حل کند [۱۶].

در این پژوهش، روش هوش محاسباتی به نام برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) برای پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌ای در هنگام در نظر گرفتن هر دو ویژگی اصلی سازه و زلزله مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای رسیدن به این هدف، چندین سیستم تک درجه آزادی (SDOF<sup>۲</sup>) با ویژگی‌های سازه‌ای مختلف مورد استفاده قرار گرفته که عبارت است از دوره تناوب (T)، نسبت میرایی (ζ)، ضریب کاهش مقاومت (R<sub>u</sub>)، ضریب شکل‌پذیری (μ<sub>u</sub>)، و ثابت شاخص آسیب پارک-آنگ (β)، نسبت سختی پس از تسلیم (α). علاوه بر این، برخی از ویژگی‌های زلزله شامل انواع مختلف خاک بر اساس سرعت‌های موج برشی خاک متناظر با عمق ۳۰ متر (V<sub>s,۳۰</sub>) و بزرگای (M<sub>w</sub>) بیش از ۴ ریشتر و فاصله سایت تا منبع زلزله (R<sub>JB</sub>)، کم‌تر از ۱۵ کیلومتر به عنوان زلزله‌های نزدیک گسل در ایران در نظر گرفته شد. سپس طیف آسیب با مدل‌سازی سیستم یک درجه آزادی (SDOF) محاسبه شد. در نهایت یک رابطه ریاضی ساده شده برای تسهیل در اندازه‌گیری طیف آسیب لرزه‌ای سازه‌ها، برای حرکات زمین در ایران که هر دو ویژگی سازه‌ای و زلزله را در بر می‌گیرد، ارائه شده است. سپس اثر بخشی مدل با استفاده از معیار عملکرد شناخته شده در مقایسه با مدل‌های دیگر موجود در ادبیات فنی ارزیابی می‌شود.

## ۲ - طیف آسیب لرزه‌ای

محاسبه آسیب لرزه‌ای بالقوه در ارزیابی لرزه‌ای مبتنی بر آسیب و طراحی سازه‌ها در مناطق زلزله‌خیز از اهمیت زیادی برخوردار است. درجه آسیب سازه را می‌توان برای ارزیابی عملکرد سازه و استحکام آن، که پارامترهای کلیدی در تاب‌آوری سازه می‌باشند، مورد استفاده قرار داد [۱۷].

شاخص آسیب لرزه‌ای می‌تواند برای تعیین میزان آسیب یک سازه در طول زلزله مورد استفاده قرار گیرد. مدل‌های آسیب مختلفی در مقالات ارائه شده‌اند، که در میان آن‌ها، شاخص آسیب پارک-آنگ [۹] به طور گسترده‌ای برای تعیین کمیت آسیب لرزه‌ای سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. این شاخص ترکیبی خطی از

حداکثر تغییرشکل و استهلاک انرژی هیسترتیک یک سازه است که معادله آن به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود [۱۲].

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

که در آن  $u_m$  حداکثر تغییرشکل در طول زلزله است،  $u_y$  تغییرشکل تسلیم،  $\mu_u$  ضریب شکل‌پذیری و  $f_y$  مقاومت تسلیم است. همچنین  $E_H$  انرژی هیسترتیک تجمعی در پایان یک زلزله و  $\beta$  یک ثابت تجربی مثبت است، که به ویژگی‌های سازه‌ای 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 ۰.۰۵ تا ۰.۳ در نظر گرفته می‌شود، که براساس تجربیات پژوهش‌های گذشته و آزمایش‌های میدانی تعیین شده است. همانطور که در جدول (۱) نشان داده شده است، پارک و همکارانش [۱۸] شاخص آسیب کلی را برای حالت‌های مختلف آسیب مشاهده شده تنظیم نموده‌اند. آسیب لرزه‌ای می‌تواند برای طیف وسیعی از سازه‌ها با محاسبه طیف آسیب لرزه‌ای تخمین زده شود.

جدول ۱: طبقه‌بندی آسیب با خرابی شاخص پارک-آنگ [۱۸]

مشاهدات	شاخص آسیب (DI)	آسیب یا خرابی	نوع خرابی
وقوع پراکنده ترک خوردگی	$0 < DI < 0.1$	خسارت پراکنده 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

طیف آسیب را می‌توان به صورت تابعی از پارامترهای لرزه‌ای و به صورت زیر نوشت:

$$S_{DI} = f(M_w, R_{JB}, V_{s,30}, \zeta, R_u, \mu_u, \beta, \alpha, T) \quad (2)$$

این معادله نشان می‌دهد که آسیب طیفی ( $S_{DI}$ ) به متغیرهای مورد بررسی در جدول (۲) وابسته است، متغیرهای بیان شده در این

<sup>۲</sup> Single-Degree-Of-Freedom

<sup>۱</sup> Candida Ferreira

جدول از مطالعات پیشین که در این زمینه انجام شده‌اند، تعیین گردیده‌اند [۷ و ۹ و ۱۲]. این پارامترها به عنوان ورودی‌هایی در مدل‌های محاسباتی که در این پژوهش توسعه یافته‌اند، استفاده می‌شوند. هدف از انتخاب این متغیرها برای پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌ای، در نظر گرفتن مهم‌ترین ویژگی‌های مربوط به سازه و زلزله است که بر آسیب‌های لرزه‌ای وارد بر سازه‌ها تأثیرگذار هستند.

جدول ۲: متغیرهای طیف آسیب

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

در جدول (۲) ضریب اصلاح پاسخ (معروف به R-factor) است که با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود [۱۴]:

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

که در آن  $m$  جرم لرزه‌ای سازه مورد نظر و  $S_a$  شتاب طیفی الاستیک 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 متنوعی که در دنیای واقعی وجود دارند، بهبود و پاسخگو باشند. این زمینه اغلب برای توسعه 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. این الگوریتم‌ها بهینه‌سازی‌هایی هستند که از اصول تکاملی برای یافتن بهترین راه‌حل برای یک مساله استفاده می‌کنند [۲۴]. پیشرفت‌های اخیر در روش‌های هوش محاسباتی، آن‌ها را برای حل مشکلات چالش برانگیز در علم مهندسی مناسب ساخته است. در این مطالعه، روش برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) برای مطالعه موردی در زمینه مهندسی سازه و زلزله به کار گرفته شده است و نتایج آن ارائه، ارزیابی و مقایسه می‌شود.

GEP یکی از روش‌های پیش‌بینی است، که در ادامه و بهبود برنامه‌نویسی ژنتیک (GP<sup>۱</sup>) ارائه شده و یک الگوریتم یادگیری است. برنامه‌نویسی ژنتیکی (GP) به عنوان یک روش استاندارد و توسعه‌یافته شناخته شده است، که شامل زیرمجموعه‌هایی مانند برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) و برنامه‌نویسی ژنتیکی چند ژنی (MGGP) می‌باشد. GEP در دسته الگوریتم‌های محاسباتی تکاملی قرار دارد، و روشی است که معمولاً برای توسعه مدل‌های ریاضی غیرخطی برای حل مسائل پیچیده به کار می‌رود [۱۵].

بهینه‌سازی یک راه‌حل مبتنی بر GEP معمولاً شامل یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت است، که در آن کروموزوم‌های چندگانه به صورت موازی در طول چندین نسل تکامل یافته‌اند. بهترین کروموزوم‌ها برای نسل بعدی انتخاب می‌شوند و عملگرهای ژنتیکی برای تولید فرزند جدید به کار می‌روند. این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که یک راه‌حل رضایت بخش یافت شود، که معمولاً برای ارزیابی تناسب یک ژن، GEP از یک تابع برازندگی استفاده می‌کند که میزان عملکرد ژن را به خوبی اندازه‌گیری می‌کند [۱۶]. تابع برازندگی می‌تواند توسط کاربر تعریف شود یا به طور خودکار توسط سیستم انتخاب شود.

الگوریتم GEP-RNC<sup>۲</sup> توسعه یافته توسط کاندای فریرا، یک نسخه پیشرفته از GEP است، که برای مدیریت مؤثرتر ثابت‌های عددی طراحی شده است. این الگوریتم با ادغام یک دامنه خاص در رمزگذاری ژنتیکی به منظور تکامل ثابت‌های عددی مناسب‌تر، کارایی در مدل‌سازی و دقت حل مسائل پیچیده را افزایش می‌دهد [۲۳]. در این پژوهش، استفاده از الگوریتم GEP-RNC به منظور بهبود دقت و کارایی مدل‌های ریاضی استخراج شده از طیف‌های آسیب و توانایی پیش‌بینی آسیب‌ها را به طور قابل توجهی افزایش داده است. در شکل (۱) فلوچارت الگوریتم بیان ژن GEP را مشاهده می‌کنید.

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

<sup>۱</sup> Genetic Programming



سازه‌ها تحت تأثیر بارهای زلزله در ارزیابی آسیب‌پذیری احتمالی آن‌ها دارد. محدوده زمانی مورد مطالعه دوره تناوب برای پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌ای بین ۰.۱ تا ۴ ثانیه با گام ۰.۱ ثانیه است.

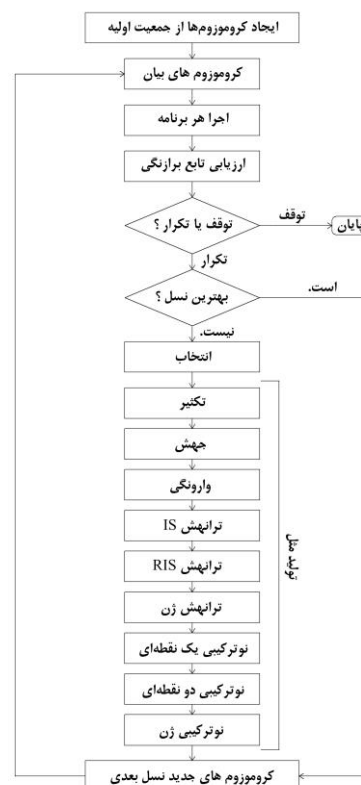
جدول ۳: متغیرهای مورد استفاده در تحلیل سیستم یک درجه آزادی

پارامتر	مقادیر مورد استفاده		
$M_w$	بزرگی 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		

#### ۴-۳- زمین لرزه

سه عامل بزرگا، فاصله سایت ثبت زلزله تا منبع زمین‌لرزه و سرعت موج برشی متناظر با عمق ۳۰ متر در خاک، سه متغیر در نظر گرفته شده، برای رکوردهای زلزله مورد استفاده هستند. براساس سرعت‌های موج برشی متناظر با عمق ۳۰ متر ( $V_{s,30}$ ) بیش از ۷۵۰، ۷۵۰-۳۷۵، ۳۷۵-۱۷۵، و کمتر از ۱۷۵ به ترتیب چهار نوع خاک ( $K_1, K_2, K_3, K_4$ ) برای رکوردهای استفاده شده در نظر گرفته شد. انواع خاک ( $K_1, K_2, K_3, K_4$ ) به ترتیب لایه‌بندی زمین، سنگ و شبه سنگ، خاک خیلی متراکم یا سنگ سست، خاک متراکم تا متوسط و خاک متوسط تا نرم بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ مطابقت دارد. در این پژوهش، به دلیل عدم دسترسی به رکوردهای حوزه نزدیک گسل در خاک  $K_4$ ، این خاک در ارزیابی طیف آسیب، در نظر گرفته نشده است.

برای در نظر گرفتن فاصله سایت تا منبع، از رکوردهای دارای فاصله رومرکزی در محدوده کم‌تر از ۱۵ کیلومتر استفاده شده است (به عنوان رکوردهای حوزه نزدیک گسل شناخته می‌شوند). همه رکوردها با بزرگای گشتاوری بیشتر از ۴ متناظر هستند. برای انتخاب رکوردها از پایگاه داده مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و شبکه شتابنگاری آن، استفاده شد [۲۰]. مشخصات رکوردها در جدول (۴) نشان داده شده است. در نهایت، آسیب ناشی از زلزله برای یک مؤلفه مشخص حرکت زمین، از طریق به کارگیری یک روند معلوم، قابل محاسبه است. این رویه شامل مدل‌سازی سیستم‌های خطی و غیرخطی SDOF (یک درجه آزادی) برای تحلیل حرکات لرزه‌ای با



شکل ۱: فلوچارت الگوریتم بیان ژن GEP [۱۶]

## ۴- پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌ای

### ۴-۱- پایگاه داده دقیق

خواص سازه‌ای و جنبش نیرومند زمین می‌تواند تا حد زیادی بر واکنش‌های غیرارتجاعی یک سیستم یک درجه آزادی (SDOF) تأثیر گذارد. در این پژوهش، این خواص، که اغلب برای ارزیابی خسارت لرزه‌ای سازه‌ها استفاده می‌شوند، به عنوان متغیرهای ورودی مدل‌های پیش‌بینی استفاده می‌شوند، و به طور مفصل در زیر بخش‌های بعدی توصیف شده است.

### ۴-۲- سیستم‌های غیرارتجاعی SDOF

در سیستم‌های غیرارتجاعی SDOF از پارامترهای در نظر گرفته شده در جدول (۳) برای پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌ای  $S_{DI}$  استفاده می‌شود. مقادیر استفاده شده در جدول (۳) برای پیش‌بینی طیف آسیب در سیستم‌های تک درجه آزادی غیرارتجاعی (SDOF) بر اساس ترکیبی از دیدگاه‌های نظری، داده‌های تجربی و الزامات مهندسی کاربردی و بر پایه مطالعات پیشین انتخاب شده‌اند. انتخاب هر پارامتر و دامنه‌ی مقادیر آن، نقش کلیدی در مدل‌سازی رفتار

ویژگی‌های خاص می‌باشد. پس از مدل‌سازی، پاسخ سیستم‌ها به حرکات زلزله با استفاده از روش تحلیل گام به گام زمانی نیومارک، در دوره‌های تناوب مشخص و میزان میرایی خاص، محاسبه می‌شود. در مرحله بعدی، انرژی تلف شده به همراه پارامترهای مدنظر با استفاده از فرمول‌های فصل ۷ کتاب دینامیک سازه‌ها چوپرا محاسبه می‌گردد [۱۴]. آسیب ناشی از زلزله سپس با استفاده از شاخص آسیب پارک-انگ برای سیستم‌های SDOF با ویژگی‌های تعیین شده محاسبه می‌شود. به منظور ارزیابی کامل این تحلیل، یک پایگاه داده دقیق از طیف آسیب، با در نظر گرفتن ویژگی‌های سازه‌ای و زلزله، تهیه و یک مدل ریاضی مبتنی بر برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) برای سهولت در اندازه‌گیری طیف آسیب بالقوه لرزه‌ای ( $S_{DI}$ ) سازه‌ها، استخراج می‌شود.

#### ۴-۴ - نتایج و ارزیابی طیف آسیب

در این بخش، نتایج دقیق شاخص آسیب پارک-انگ ( $DI$ ) که در محاسبه آسیب طیفی ( $S_{DI}$ ) در این پژوهش استفاده شده، ارائه شده‌اند. آسیب طیفی ( $S_{DI}$ ) در واقع میزان شاخص آسیب پارک-انگ ( $DI$ ) در سازه‌های یک درجه آزادی را بر حسب دوره تناوب نشان می‌دهد. همچنین اثرات متغیرهای  $R_{II}$ ،  $\mu_{II}$ ،  $\zeta$ ،  $\alpha$ ،  $\beta$  و نوع خاک بر روی آسیب طیفی ( $S_{DI}$ ) که آسیب لرزه‌ای سازه‌ها را با ترکیب پارامترهای مربوط به ویژگی‌های سازه‌ای و زلزله مورد بررسی قرار گرفته است، که مقادیر  $S_{DI} \geq 1$  مربوط به فروریختن کامل ساختمان می‌باشد. شکل (۲) طیف آسیب را بر حسب تمامی متغیرهای ذکر شده نشان می‌دهد. متغیرهای مورد استفاده، در طیف آسیب ارائه شده، میانگین طیف آسیب همه متغیرهای دیگر است، و برای نشان دادن تغییرات به طور واضح، محور عمودی در یک مقیاس لگاریتمی مرتب شده است.

تغییرات  $S_{DI}$  برای سه مقدار  $R_{II}$  برابر با ۲، ۴ و ۶ در شکل ۲ (الف) نشان داده شده است، که در آن می‌توان دید که طیف آسیب با افزایش  $R_{II}$  برای همه سازه‌های با دوره‌های تناوب کوتاه به بلند افزایش می‌یابد. 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  $R_{II}$  افزایش می‌یابد. تغییرات  $S_{DI}$  سازه‌های با  $R_{II}$ ، ۲ به ۴ بیشتر از سازه‌های با  $R_{II}$ ، ۴ به ۶ است.

شکل ۲ (ب) تغییرات را برای سه مقدار  $\mu_{II}$  برابر با ۰، ۰.۵ و ۱.۰ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، هنگامی که ضریب شکل‌پذیری افزایش می‌یابد، ظرفیت مدل برای تغییر شکل‌های غیرارتجاعی نسبت به حداکثر تغییر شکل تحت حرکت زمین، افزایش یافته و در نتیجه آسیب طیفی کاهش می‌یابد. این امر به این دلیل است که سازه‌های با شکل‌پذیری بالاتر، قابلیت تغییر شکل و ظرفیت اتلاف انرژی بیشتری دارند، که منجر به آسیب کمتری می‌شود.

شکل ۲ (پ) اثر نسبت میرایی  $\zeta$  سیستم‌ها SDOF بر  $S_{DI}$  در اینجا مورد بحث قرار گرفته است. سه مقدار ۰.۰۲، ۰.۰۵ و ۰.۱ برای نسبت میرایی در نظر گرفته شده است، که مقادیر رایج مورد استفاده در تحلیل سازه‌های مهندسی می‌باشند. یک رابطه واضح بین آن‌ها این است که  $S_{DI}$  با افزایش نسبت میرایی  $\zeta$  افزایش می‌یابد. این اثر به طور دقیق با نتایج یافت شده توسط ژای و همکاران [۷] تایید شده است. همانطور که آن‌ها اشاره کرده‌اند، افزایش نسبت میرایی منجر به کاهش شتاب طیفی ( $S_a$ ) و در یک  $R_{II}$  مشخص، مطابق با معادله (۳) می‌شود.  $f_y$  سیستم SDOF کاهش خواهد یافت، که منجر به افزایش آسیب می‌شود. همان طور که در شکل ۲ (پ)، نشان داده شده است. تفاوت‌های ناشی از اثر نسبت میرایی بر  $S_{DI}$  با افزایش دوره تناوب سازه کاهش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش نسبت میرایی، طیف بیشتری از سازه‌های با دوره تناوب کوچک، وضعیت فروپاشی را تجربه می‌کنند.

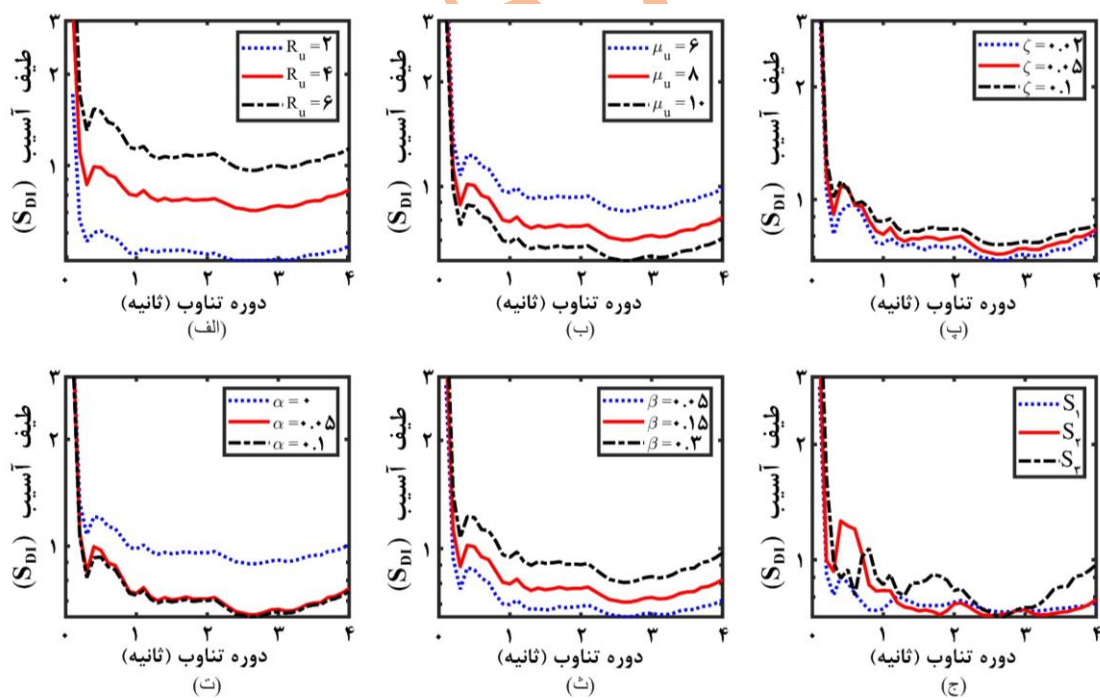
در اینجا، اثرات نسبت سختی پس از تسلیم رفتار هیسترتیک دو خطی  $\alpha$  سیستم‌های SDOF بر  $S_{DI}$  مورد مطالعه قرار گرفته است. این نسبت برابر با سختی پس از تسلیم مدل دو خطی به مدل اولیه می‌باشد. سه مقدار ۰، ۰.۵ و ۱.۰ برای  $\alpha$  در نظر گرفته شده‌اند. طیف آسیب برای مقادیر مختلف  $\alpha$  در شکل ۲ (ت)، نشان داده شده است، که نسبت سختی شون‌دگی بیشتر منجر به این می‌شود، که سازه آسیب کمتری را از خود نشان دهد. با در نظر گرفتن ۰.۰۵ به عنوان نسبت سخت‌شدگی برای مدل رفتاری، آسیب طیفی به طور قابل توجهی کاهش و با افزایش  $\alpha$ ، از ۰.۰۵ به ۰.۱، آسیب طیفی را تا حدودی کاهش می‌یابد.

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



جدول ۴: رکوردهای استفاده شده در تحلیل سیستم یک درجه آزادی

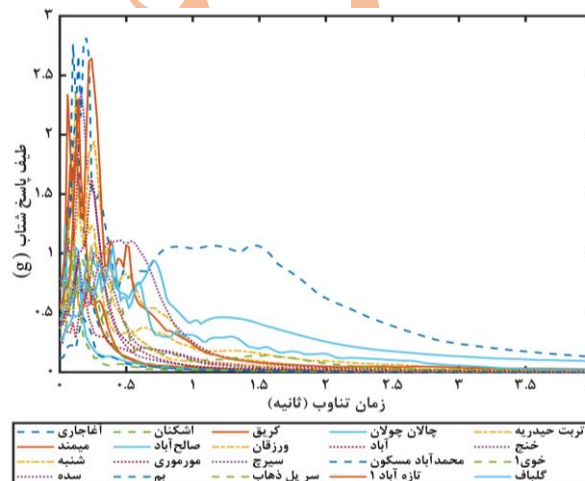
ردیف	شماره رکورد	استان	نام ایستگاه	سال وقوع زمین لرزه (میلادی)	مختصات ایستگاه ثبت زمین لرزه	مختصات مرکز زمین لرزه	بیشینه شتاب زمین $cm/s^2$	$M_w$	$R_{JB}$	$V_{s,30}$	نوع خاک
۱	۲۴۱۴۰۴	خوزستان	آغاچاری	۲۰۰۰/۱۰/۱۳	۳۰.۷N۴۹.۸۳E	۳۰.۶۷N۴۹.۹۹E	۷۲۷	۴.۷	۸	۸۵۷	$S_1$
۲	۱۸۱۴	فارس	میمند	۱۹۹۷/۰۸/۲۴	۲۸.۸۷N۵۲.۷۵E	۲۸.۷۹N۵۲.۷۶E	۷۰۴	۵	۹	۸۸۱	$S_1$
۳	۵۸۰۱۶۹	بوشهر	لشنبه	۲۰۱۳/۰۴/۱۰	۲۸.۴N۵۱.۷۶E	۲۸.۳۵N۵۱.۷۴E	۵۶۶	۵.۵	۶	۱۳۹۶	$S_1$
۴	۴۵۵۲۰۳	خراسان جنوبی	لسده	۲۰۰۸/۰۳/۰۹	۳۳.۳۳N۵۹.۲۴E	۳۳.۳۶N۵۹.۳۵E	۵۵۶	۵.۱	۱۱	۸۵۴	$S_1$
۵	۵۰۱۶۰۲	فارس	اشکنان	۲۰۱۰/۰۷/۲۴	۲۷.۲۲N۵۳.۶۱E	۲۷.۱۱N۵۳.۶۵E	۳۹۴	۵.۱	۱۳	۱۰۶۶	$S_1$
۶	۲۲۲۵۰۲	خراسان رضوی	صالح‌آباد	۱۹۹۹/۱۱/۰۹	۳۵.۶۹N۶۱.۰۹E	۳۵.۶۸N۶۱.۲۴E	۳۷۳	۴.۸	۱۳	۱۴۷۲	$S_1$
۷	۶۳۰۲۰۱	ایلام	مورموری	۲۰۱۴/۰۸/۲۰	۳۲.۷۳N۴۷.۶۷E	۳۲.۷N۴۷.۸۲E	۳۴۵	۵.۸	۱۴	۸۹۸	$S_1$
۸	۳۱۶۸۰۲	کرمان	بیم	۲۰۰۳/۱۲/۲۶	۲۹.۰۹N۵۸.۳۵E	۲۹.۰۴N۵۸.۳۳E	۷۷۸	۶.۵	۶	۴۹۹	$S_2$
۹	۱۸۳۳۰۲	اردبیل	کریقی	۱۹۹۷/۰۲/۲۸	۳۷.۹۲N۴۸.۰۶E	۳۷.۹۹N۴۸.۱۵E	۵۳۶	۶	۱۱	۵۸۹	$S_2$
۱۰	۵۵۷۹۰۴	آذربایجان شرقی	لورزقان	۲۰۱۲/۰۸/۱۱	۳۸.۵۱N۴۶.۶۶E	۳۸.۴۵N۴۶.۷۵E	۵۲۰	۶.۲	۱۱	۴۷۵	$S_2$
۱۱	۷۱۵۰	کرمان	سیرج	۲۰۱۷/۰۷/۲۳	۳۰.۲N۵۷.۵۶E	۳۰.۰۹N۵۷.۶۲E	۴۶۱	۵.۳	۱۴	۳۹۸	$S_2$
۱۲	۷۸۲۹	کرمانشاه	سر پل ذهاب	۲۰۱۸/۰۴/۰۱	۳۴.۴۶N۴۵.۸۷E	۳۴.۳۹N۴۵.۷۵E	۴۳۵	۵.۲	۱۳	۶۱۹	$S_2$
۱۳	۴۰۲۷۰۸	لرستان	چالان چولان	۲۰۰۶/۰۳/۳۱	۳۳.۶۶N۴۸.۹۱E	۳۳.۶۹N۴۹E	۴۳۱	۵.۹	۹	۴۲۸	$S_2$
۱۴	۳۲۳۹۰۱	بوشهر	آباد	۲۰۰۴/۰۳/۰۲	۲۹.۰۲N۵۱.۲۶E	۲۹.۰۱N۵۱.۳۳E	۴۰۸	۵.۴	۶	۴۸۲	$S_2$
۱۵	۳۵۵۵۰۱	کرمان	محمدآباد مسکون	۲۰۰۴/۱۰/۰۶	۲۸.۹۱N۵۷.۸۹E	۲۸.۸۱N۵۷.۹۸E	۱۱۵	۵.۱	۱۴	۵۰۷	$S_2$
۱۶	۸۰۴۵	کرمانشاه	لانه آباد ۱	۲۰۱۸/۰۸/۲۵	۳۴.۷۴N۴۶.۱۵E	۳۴.۶۱N۴۶.۱۳E	۷۷۶	۶	۱۴	۲۸۱	$S_3$
۱۷	۵۰۰۶	خراسان رضوی	تربت حیدریه	۲۰۱۰/۰۷/۳۰	۳۵.۲۷N۵۹.۲۲E	۳۵.۲۸N۵۹.۲۶E	۴۲۵	۵.۹	۴	۳۰۶	$S_3$
۱۸	۲۰۴۹۰۱	فارس	خنج	۱۹۹۸/۱۱/۱۳	۲۷.۸۹N۵۳.۴۳E	۲۷.۸۱N۵۳.۵۳E	۳۹۶	۵.۲	۱۳	۳۰۸	$S_3$
۱۹	۹۹۳۳۰۱۹	آذربایجان غربی	خوی ۱	۲۰۲۳/۰۱/۲۸	۳۸.۵۵N۴۴.۹۶E	۳۸.۵۲N۴۴.۹۱E	۲۸۵	۵.۷	۵	۳۳۳	$S_3$
۲۰	۱۱۷۶۰۵	کرمان	گلکلیاف	۱۹۸۱/۰۷/۲۸	۲۹.۸۸N۵۷.۷۲E	۲۹.۹۹N۵۷.۷۷E	۲۶۸	۶.۷	۱۳	۳۲۰	$S_3$



شکل ۲: طیف آسیب برای متغیرها  $R_u$ ,  $\mu_u$ ,  $\zeta$ ,  $\alpha$  و  $\beta$  و نوع خاک

مقادیر متعددی برای  $\beta$  پیشنهاد شده‌اند، که در محدوده ۰.۰۵ تا ۰.۳ رایج هستند. شکل ۲. (ث)، تغییر  $S_{DI}$  نسبت به  $\beta$  را نشان می‌دهد، همان‌طور که انتظار می‌رود،  $S_{DI}$  با افزایش  $\beta$ ، افزایش می‌یابد.

اثرات نوع خاک ( $S_1, S_2, S_3$ ) نیز در شکل ۲. (ج)، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تأثیر نوع خاک بر  $S_{DI}$  به اندازه دیگر پارامترهای ذکر شده قابل توجه نیست. به طور کلی، طیف آسیب  $S_{DI}$  برای خاک  $S_2$ ، بیشتر از خاک  $S_3$  و طیف آسیب برای خاک  $S_1$  بیشتر از خاک  $S_2$  است. قابل ذکر است به دلیل عدم وجود رکورد حوزه نزدیک گسل در خاک  $S_3$ ، خاک موردنظر در ارزیابی طیف آسیب در این پژوهش در نظر گرفته نشده است.



شکل ۳: طیف پاسخ شتاب ( $\xi = 0.05$ ) برای حرکات زمین لرزه

#### ۴-۵ - توسعه مدل با استفاده از الگوریتم بیان ژن (GEP)

فرآیند کلی توسعه یک مدل با استفاده از GEP شامل مراحل زیر است [۱۶]:

۱. تعریف مساله: اولین گام در توسعه یک مدل با استفاده از GEP تعریف دقیق مساله طیف آسیب و تعیین نوع داده‌هایی است، که در محاسبه طیف آسیب برای تجزیه و تحلیل در دسترس هستند. که در این پژوهش شامل داده‌های سازه‌ای و لرزه‌ای یعنی متغیرهای مورد اشاره در جدول (۳) می‌باشد.

۲. ایجاد خزانه‌ای از عملگرها و توابع: یک مجموعه از عملگرها و توابع مرتبط با مهندسی سازه و زلزله تعریف می‌شود، که می‌تواند

در فرآیند توسعه مدل مورد استفاده قرار گیرند. این مجموعه می‌تواند شامل توابع در نظر گرفته شده در جدول (۵) و سایر توابع و یا عملگرهای دیگر باشد، که جدول (۵) نشان دهنده توابع مورد استفاده در این مقاله است.

۳. تولید مجموعه مدل‌ها: با استفاده از مجموعه تعریف شده از عملگرها و توابع، یک مجموعه مدل اولیه از مدل‌های ممکن تولید می‌شود. این مدل‌ها با استفاده از اپراتورهای ژنتیکی و بر اساس یک تابع برازندگی که عملکرد آن‌ها را در مدل‌سازی آسیب‌های سازه‌ای ارزیابی می‌کند، ایجاد می‌شوند. تابع برازندگی مورد استفاده در این مقاله مطابق معادله (۴) می‌باشد.

۴. تکامل مجموعه مدل‌ها: مجموعه مدل‌ها از طریق استفاده از اپراتورهای ژنتیکی تقاطع، جهش، و انتخاب، در طول چندین نسل تکامل می‌یابد. این فرآیند به بهبود مداوم مدل‌ها و نزدیک شدن به یک راه‌حل بهینه برای مدل مدنظر کمک می‌کند. در این مقاله از هر سه اپراتور ژنتیکی قطع، جهش، و انتخاب استفاده شده است.

۵. ارزیابی و انتخاب مدل‌ها: پس از تکامل مجموعه مدل‌ها، مدل مدنظر بر اساس تابع برازندگی و توانایی آن‌ها در پیش‌بینی دقیق آسیب‌های سازه‌ای ارزیابی و انتخاب می‌شوند.

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

#### ۴-۶ - دقت مدل

لازم به ذکر است که تمام مدل‌ها می‌توانند در محدوده داده‌های واقعی مورد استفاده برای تولید مدل معتبر باشند. در برنامه نویسی بیان ژن (GEP)، پارامترهای مورد نظر با بیشترین برازندگی (Best Fitness) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای ارزیابی و کنترل دقت مدل ریاضی تولید شده استفاده می‌شود. بهترین تناسب به بالاترین امتیاز کسب شده توسط مدل در یک نسل خاص از GEP اشاره دارد. این امتیاز براساس تابع برازندگی استفاده شده می‌باشد، که میزان تناسب مدل با داده‌های آموزشی را اندازه‌گیری می‌کند. تابع

جدول ۵: توابع مورد استفاده 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	X۲	x to the power of ۲
x^۳	۱	۱	X۳	x to the power of ۳
x^۴	۱	۱	X۴	x to the power of ۴

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

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

جدول ۶: ضرایب مورد استفاده در معادله طیف آسیب

ضرایب	نماد	ضرایب	نماد	ضرایب	نماد
۲۲۱.۴۴۴	$R_9$	۷.۸۸۳	$R_5$	-۳.۶۹۱	$R_1$
۵.۶۶e-۳۱۰	$R_{10}$	۳.۳۷۸	$R_6$	۰.۵۵۳	$R_2$
۵.۲۱۸	$R_{11}$	۷.۱۱۴	$R_7$	۵.۷۴۲	$R_3$
۸.۳۰۲۰	$R_{12}$	۱۱۱.۲۱۵	$R_8$	۰.۷۴۲۵	$R_4$

$$G_1 = \tanh \left[ R_1 R_u T^{\left[ (R_9)^{R_u} + \ln R_u \right]} \right] \quad (7)$$

$$G_2 = \left[ \exp \left[ \left( \tanh(R_2 \beta) - \frac{\mu_u}{R_3 R_u} \right) \times \alpha \right] \right]^4 \quad (8)$$

$$G_3 = \tanh \left[ \tanh \left[ \left( \frac{T}{(R_5 - \alpha) R_{JB} - \frac{V_{s,30}}{R_6}} \right)^4 \right] \right] \quad (9)$$

$$G_4 = \frac{[R_7 + (\zeta \times R_{JB})] \times \alpha^3 \times R_8}{M_w} \quad (10)$$

$$G_5 = \left[ \frac{R_{JB} \beta}{R_4} \right] \times \left[ \alpha^{R_{10}} \times \frac{M_w}{R_{11}} \right]^{(R_u + M_w)} \quad (11)$$

برازندگی می‌تواند، بسته به مسئله حل شده متفاوت باشد، اما معمولاً تفاوت بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده را اندازه می‌گیرد.

در این پژوهش ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) به عنوان تابع برازندگی به شرح زیر استفاده می‌شود [۱۹]:

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

که در آن  $p_i$  و  $e_i$  به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده و خروجی دقیق برای  $i$  امین خروجی هستند و  $n$  تعداد نمونه‌ها است.

$R^2$  به عنوان 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 رابطه خطی بین دو متغیر را منعکس می‌کند که مقادیر بالاتر نشان دهنده تناسب بهتر است.

ضریب همبستگی توسط معادله زیر ارزیابی می‌شود. برای یک بررسی دقیق‌تر، مربع  $R$ ، یعنی  $R^2$  در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۹]:

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

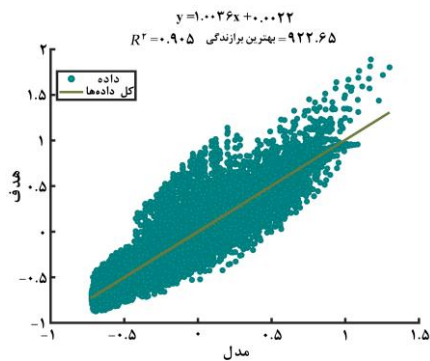
که در آن  $P_{ij}$  مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل  $i$  برای نمونه  $j$  است و  $T_j$  مقدار واقعی نمونه  $j$  است و  $n$  تعداد نمونه‌ها می‌باشد.

## ۵ - نتایج پژوهش

### ۵-۱ - مدل پیش‌بینی GEP

تنظیمات پارامتر مورد استفاده برای برنامه‌نویسی بیان ژن به مساله خاص مورد بررسی و ویژگی‌های مجموعه داده مورد استفاده بستگی دارد. این مقادیر براساس تجربه نویسندگان و پیشنهادها موجود در مقالات [۱۶ و ۱۹] بیان شده، و در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

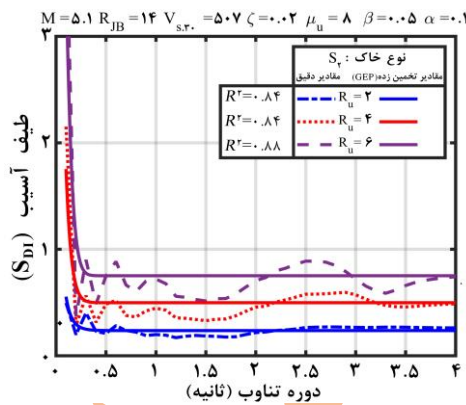
مجموعه‌ای از توابع در نظر گرفته شده، در این پژوهش در برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) در جدول (۵) بیان می‌شود.



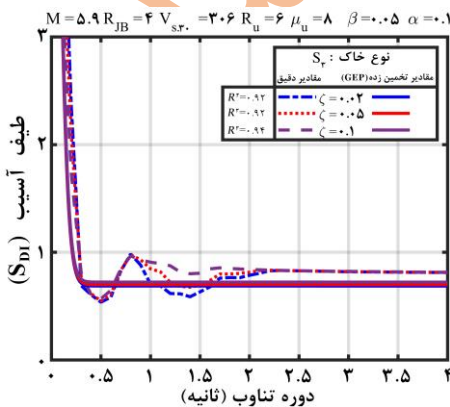
شکل ۶: نمودارهای رگرسیون برای نتایج دقیق لگاریتم  $S_{DI}$  در مقابل مدل پیش‌بینی شده با استفاده از الگوریتم GEP برای کل داده‌ها

### ۵-۲ - مقایسه طیف آسیب

مقایسه طیف آسیب محاسبه شده با استفاده از رابطه (۶) با نتایج تحلیلی در این پژوهش برای حرکات زمین در شکل (۷) تا شکل (۱۱) نشان داده شده است. می‌توان دید که، به طور کلی، معادله ساده شده پیشنهادی، تخمین‌های خوبی از طیف آسیب ارائه می‌دهد.



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

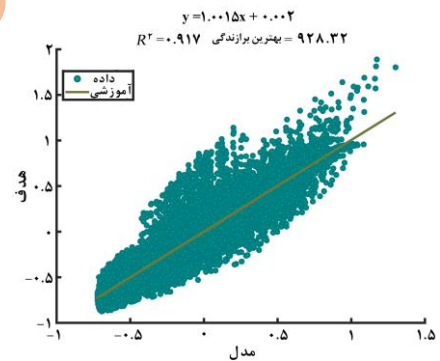


شکل ۸: نمودارهای  $S_{DI}$  مربوط به مدل GEP و نتایج دقیق برای متغیر  $\zeta$

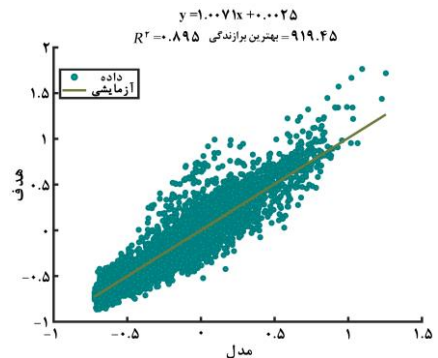
$$G_{\epsilon} = \left[ \tanh \left[ \tanh \left[ \tanh \left( \alpha \times (R_u - \alpha) \times (\ln \zeta + R_{12}) \right) \right] \right] \right]^{\epsilon} \quad (12)$$

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

شکل (۴)، شکل (۵) و شکل (۶) نمودارهای رگرسیونی را برای داده‌های آموزشی و آزمایشی و کل داده‌ها نشان می‌دهد. همانطور که از تمام نمودارها مشخص است، داده‌های پیش‌بینی شده به خوبی در خط با زاویه 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 مجموعه داده‌های آموزشی، آزمایشی و کل داده‌ها می‌باشد، که نشان‌دهنده تطابق بسیار خوب آن‌ها با داده‌های هدف می‌باشد.



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

برنامه‌نویسی ژنتیک چندژنی (MGGP) بدست آورده را پیشنهاد کرده است. که در این مدل‌ها، ضرایب بسته به نوع خاک بوده و سایر پارامترها با توجه به نوع ویژگی‌های سازه و زلزله تعریف می‌شود. مقادیر پیشنهاد شده برای ضرایب متناظر با هر نوع خاک در جدول (۷) و جدول (۸) فهرست شده‌اند.

### ۵-۳-۱- مدل پیشنهادی ژای و همکاران [۷]

$$S_{DI,Zhai et al} = \frac{1}{\mu_u} + \left( b_1 + \frac{b_2}{T^{1.5}} \right) (R_u - 1)^{b_3} \frac{1}{\mu_u} \quad (13)$$

جدول ۷: ضرایب مورد استفاده در مدل پیشنهادی ژای و همکاران [۷]

نوع خاک	ضرایب		
	$b_1$	$b_2$	$b_3$
$S_1$	۰.۰۸	۰.۰۲	۱.۲۵
$S_2$	۰.۰۹	۰.۰۴	۱.۲
$S_3$	۰.۰۹	۰.۰۵	۱.۱
$S_4$	۰.۰۸	۰.۱	۱.۱۸

### ۵-۳-۲- مدل پیشنهادی قره باغی و گندمی [۱۲]

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

$$G_1 = \frac{\beta + \sqrt{\zeta}}{\mu_u + \gamma \alpha} (\ln R_u)^2 \quad (15)$$

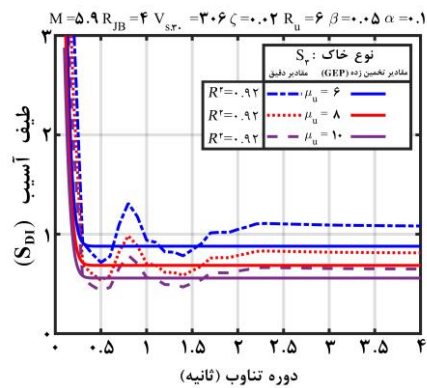
$$G_2 = \frac{R_u^\gamma}{(\mu_u + \zeta + 6.398) T^\gamma} \quad (16)$$

$$G_3 = -\frac{R_u^\gamma \tanh(\alpha)}{T^\gamma} \quad (17)$$

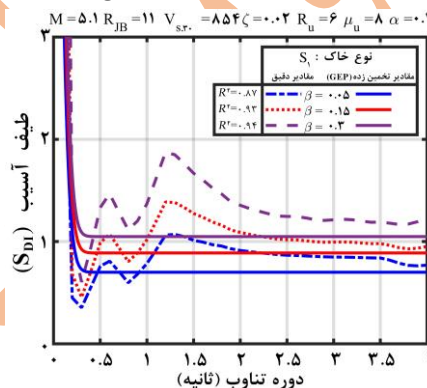
$$G_4 = \frac{\beta R_u^\gamma}{\mu_u T^\gamma} \quad (18)$$

جدول ۸: ضرایب مورد استفاده در مدل پیشنهادی قره باغی و گندمی [۱۲]

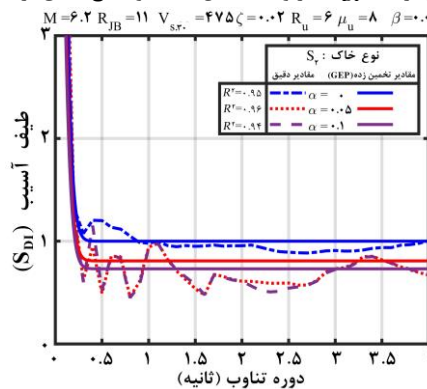
نوع خاک	ضرایب				
	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$
$S_1$	۰.۱۳۰۲۷۵	۵.۸۳۲۱۲۳	۰.۰۰۰۴۹۲	۰.۰۰۲۹۷۸	۰.۰۳۵۶۲۲
$S_2$	۰.۱۱۱۰۱۱	۶.۲۱۶۵۸۷	۰.۰۰۰۳۶۶	۰.۰۰۲۰۴۶	۰.۰۲۶۳۵۵
$S_3$	۰.۰۹۵۵۲۱	۶.۳۶۶۱۱۲	۰.۰۰۰۳۲۹	۰.۰۰۱۶۳۴	۰.۰۲۴۲۲۲
$S_4$	۰.۰۹۰۱۶۸	۶.۸۷۵۴۳۷	۰.۰۰۰۸۷۶	۰.۰۰۰۶۶۱	۰.۰۵۶۸۷۶



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  $\alpha$

### ۵-۳-۳- مقایسه با مدل‌های مختلف طیف آسیب

در بخش‌های قبلی، دقت مدل ریاضی پیش بینی شده توسط برنامه نویسی بیان ژن (GEP) و مقایسه طیف آسیب محاسبه شده با استفاده از رابطه (۶) با نتایج تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت. در اینجا، به منظور مقایسه مدل‌های توسعه یافته توسط برنامه نویسی بیان ژن (GEP) با دو مدل ارائه شده در مقالات که مدل اول مرتبط، توسط ژای و همکاران [۷] پیشنهاد شده و مدل دوم توسط قره‌باغی و گندمی [۱۲]، که مدل‌های توسعه یافته با استفاده از روش

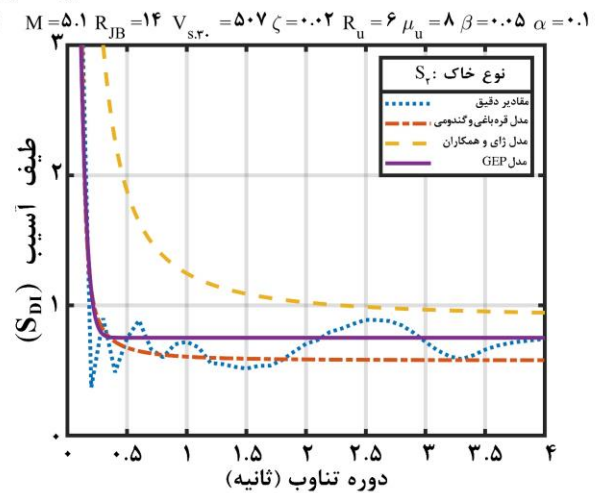
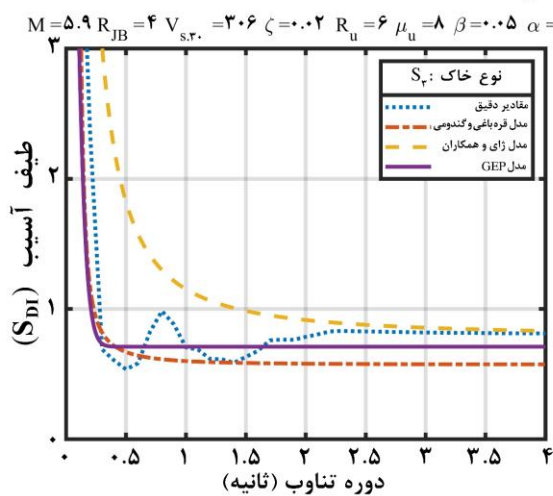
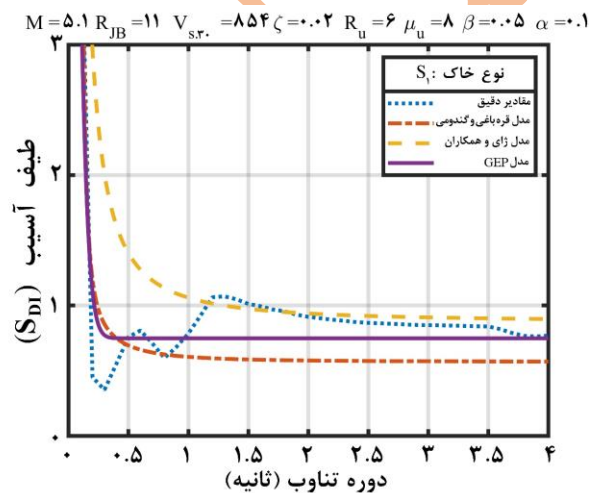


می‌گذارد، و در این حالت با توجه به شکل (۱۲) و جدول (۹)، مدل GEP نزدیک به مدل قره‌باغی و گندمی است. همان طوری که مشاهده می‌شود، مدل GEP برای زمان‌های تناوب بزرگ‌تر مقادیر بیشتر از مدل قره‌باغی نسبت به زمان تناوب‌های کوتاه‌تر به نمایش گذاشته است.

جدول ۹: نتایج معیار عملکرد  $R^2$  برای مدل‌ها بر اساس نوع خاک

مدل ژای	مدل قره‌باغی و گندمی	GEP	معیار عملکرد	نوع خاک
۰.۶۷	۰.۸۷	۰.۸۸	$R^2$	$S_1$
۰.۷۲	۰.۸۹	۰.۸۹	$R^2$	$S_2$
۰.۸۹	۰.۹۰	۰.۹۲	$R^2$	$S_3$

برای درک بهتر، یک مقایسه گرافیکی برای نشان دادن روند تغییر مدل‌های پیش‌بینی شده با استفاده از GEP با مدل پیشنهادی ژای و همکاران، مدل پیشنهادی قره‌باغی و گندمی و نتایج دقیق انجام شده است. برای این منظور، متغیرهای ورودی برابر با  $\zeta = 0.02$ ،  $\mu_u = 8$ ،  $R_u = 6$ ،  $\beta = 0.05$  و  $\alpha = 0.1$  انتخاب شدند، و  $S_{DI}$  با توجه به نوع خاک ( $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$ ) در شکل (۱۲) نشان داده شده است. این شکل نمودارهای دقیق و پیش‌بینی شده را با استفاده از مدل‌های GEP، ژای و گندمی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها منحنی‌های طیف آسیب در تمام نمودارها، روند نزولی را نشان می‌دهد. با توجه به متغیرهای در نظر گرفته شده برای حوزه نزدیک به گسل، مدل ژای مقادیر بیشتری از آسیب را به نمایش



شکل ۱۲: نمودارهای  $S_{DI}$  مربوط به مدل GEP، ژای و همکاران، مدل پیشنهادی قره‌باغی و گندمی و نتایج دقیق است. ( $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$ )



## ۶- نتیجه گیری

ترکیب دو عبارت شاخص آسیب پارک-انگ استفاده می‌شود، که در آن بخشی از انرژی هیسترتیک مشارکت دارد. همان‌طور که انتظار می‌رود، طیف آسیب ( $S_{DI}$ ) با افزایش  $\beta$ ، افزایش می‌یابد. تأثیر نوع خاک ( $S_1, S_2, S_3$ ) و  $S_{DI}$  بر  $S_{DI}$  به اندازه دیگر پارامترهای ذکر شده قابل توجه نیست. به طور کلی، طیف آسیب  $S_{DI}$  برای خاک  $S_3$ ، بیشتر از خاک  $S_2$ ، و طیف آسیب برای خاک  $S_3$ ، بیشتر از خاک  $S_1$  است.

مدل ریاضی استخراج شده مبتنی بر GEP، اندازه‌گیری طیف آسیب لرزه‌ای سازه‌ها را عملی‌تر می‌سازد. مدل ریاضی پیش‌بینی شده دارای برازندگی برابر  $928.32$  و  $R^2$  برابر  $0.917$  برای داده‌های آموزشی و برازندگی  $919.45$ ،  $R^2$  برابر  $0.895$  برای داده‌های آزمایشی و برای کل داده‌ها مقدار برازندگی  $922.65$  و  $R^2$  برابر  $0.905$  است، که برای این تعداد از داده‌های طبیعی و بدست آمده از زلزله‌های رخ داده قابل قبول است.

در این پژوهش، مدل پیشنهادی با استفاده از مجموعه‌ای از سیستم‌های تک درجه آزادی (SDOF) طراحی و توسعه یافته است. این محدودیت، که ناشی از در نظر گرفتن تنها مجموعه معینی از مقادیر برای پارامترهای سازه‌ای و زلزله‌ای است، می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر گستره کاربردی مدل و دقت نتایج حاصل از آن داشته باشد. علاوه بر این، مدل فعلی بر پایه تحلیل‌های عددی سیستم‌های SDOF بنا شده است. به منظور توسعه مدل‌های پیش‌بینی، از یک تکنیک هوش محاسباتی، یعنی برنامه نویسی بیان ژن (GEP)، استفاده شده است. بررسی و کاربرد سایر روش‌های پیشرفته هوش محاسباتی می‌تواند به بهبود قابلیت‌های پیش‌بینی مدل کمک کند. به علت کمبود رکوردهای نزدیک گسل در ایران، فقط از ۲۰ رکورد استفاده شده است. این رکوردهای زمین‌لرزه، باعث تنوع کم پارامترهای لرزه‌ای 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 این معیارهای از پیش تعیین شده هستند، تأثیر بگذارد. علاوه بر این، بررسی نتایج مدل اولیه شاخص آسیب پارک-انگ نشان داد که در برخی موارد مقادیر طیف آسیب بزرگتر از یک هستند که از نظر منطقی قابل قبول نیست. در صورت استفاده از نسخه اصلاح شده پارک-انگ، مقادیر آسیب، به یک محدود خواهد شد که تفسیرپذیری منطقی‌تری خواهد داشت.

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی آسیب و پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌ای تحت اثر زلزله‌های ایران می‌باشد. از طریق مطالعه و بررسی طیف آسیب لرزه‌ای، تلاش شد، تا درک عمیق‌تری از آسیب سازه‌ای در زلزله‌های نزدیک به گسل به دست آورده شود. در این بخش، نتایج حاصل از تحلیل‌ها و مطالعات صورت گرفته ارائه شده و تأثیر آن‌ها بر ارزیابی آسیب و پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌ای مورد بحث قرار می‌گیرد.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که پارامترهای سازه‌ای و زلزله بر روی طیف آسیب لرزه‌ای تأثیرگذار هستند. با این حال، نتایج حاکی از آن است که ضریب کاهش مقاومت و ضریب شکل‌پذیری، بیشترین تأثیر را بر طیف آسیب سازه‌ها دارند. در ادامه جزئیات بیشتری در مورد نتایج بدست آمده در این پژوهش پرداخته می‌شود.

تغییرات طیف آسیب ( $S_{DI}$ ) با افزایش  $R_u$  برای همه سازه‌های با دوره‌های تناوب کوتاه به بلند افزایش می‌یابد. 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  $R_u$  افزایش می‌یابد. تغییرات طیف آسیب ( $S_{DI}$ ) نشان می‌دهد، که هنگامی که ضریب شکل‌پذیری ( $\mu_u$ )، افزایش می‌یابد، ظرفیت مدل برای تغییرشکل‌های غیرارتجاعی نسبت به حداکثر تغییرشکل تحت حرکت زمین، افزایش یافته و در نتیجه آسیب طیفی کاهش می‌یابد. این امر به این دلیل است، که سازه‌های با شکل‌پذیری بالاتر، قابلیت تغییرشکل و ظرفیت اتلاف انرژی بیشتری دارند، که منجر به آسیب کمتری می‌شود. اثر نسبت میرایی ( $\zeta$ ) در سیستم‌های SDOF در طیف آسیب ( $S_{DI}$ ) نشان می‌دهد، که  $S_{DI}$  با افزایش نسبت میرایی ( $\zeta$ ) افزایش می‌یابد. افزایش نسبت میرایی منجر به کاهش شتاب طیفی ( $S_a$ ) و در یک  $R_u$  مشخص،  $f_y$  سیستم SDOF کاهش خواهد یافت، که منجر به افزایش آسیب می‌شود. تفاوت‌های ناشی از اثر نسبت میرایی بر ( $S_{DI}$ ) با افزایش دوره تناوب سازه کاهش می‌یابد. اثرات نسبت سختی پس از تسلیم ( $\alpha$ ) سیستم‌های SDOF برای طیف آسیب مورد مطالعه قرار گرفته است، که نسبت سخت شوندهایی بیشتر منجر به این می‌شود، که سازه آسیب کمتری را از خود نشان دهد. با در نظر گرفتن نسبت سخت‌شدگی برای مدل رفتاری، آسیب طیفی به طور قابل توجهی کاهش و با افزایش  $\alpha$ ، آسیب طیفی را تا حدودی کاهش می‌دهد.  $\beta$  یک ثابت مثبت، برای

- [۱۰] Wen, W., Ji, D., Zhai, C., Li, X. and Sun, P., ۲۰۱۸. Damage spectra of the mainshock-aftershock ground motions at soft soil sites. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ۱۱۵, pp.۸۱۵-۸۲۵. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.08.016>.
- [۱۱] Wen, W., Zhai, C. and Ji, D., ۲۰۱۸. Damage spectra of global crustal seismic sequences considering scaling issues of aftershock ground motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, ۴۷(۱۰), pp.۲۰۷۶-۲۰۹۳. <https://doi.org/10.1002/eqe.3056>.
- [۱۲] Gharehbaghi, S., Gandomi, M., Plevris, V. and Gandomi, A.H., ۲۰۲۱. Prediction of seismic damage spectra using computational intelligence methods. *Computers & Structures*, ۲۵۳, p.۱۰۶۵۸۴. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2021.106584>.
- [۱۳] Gandomi, A.H. and Roke, D.A., ۲۰۱۵. Assessment of artificial neural network and genetic programming as predictive tools. *Advances in Engineering Software*, ۸۸, pp.۶۳-۷۲. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.05.007>.
- [۱۴] Anil, K., ۲۰۲۰. *Chopra Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Fifth Edition in SI Units, pp.۲۷۶-۳۱۹.
- [۱۵] Ferreira, C., ۲۰۰۱. Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. arXiv preprint [cs/010227](https://doi.org/10.48550/arXiv/cs/010227). <https://doi.org/10.48550/arXiv/cs/010227>.
- [۱۶] Ferreira, C., ۲۰۰۶. Gene expression programming: mathematical modeling by an artificial intelligence (Vol. ۲۱). Springer.
- [۱۷] 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., ۲۰۰۳. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake spectra*, ۱۹(۴), pp.۷۳۳-۷۵۲. <https://doi.org/10.1193/1.1623497>.
- [۱۸] Park, Y.J., Ang, A.H. and Wen, Y.K., ۱۹۸۷. Damage-limiting aseismic design of buildings. *Earthquake spectra*, ۳(۱), pp.۱-۲۶. <https://doi.org/10.1193/1.1585416>.
- [۱۹] Gepsoft, (۲۰۱۴). *Fitness Functions For Regression*. [online] Available at: <http://www.gepsoft.com>.
- [۲۰] Road, Housing & Urban Development Research Center and Iran Strong Motion Network site. (n.d.). [online] Available at: <https://smd.bhrc.ac.ir/Portal>.
- [۲۱] Biglari, M., Hadzima-Nyarko, M. and Formisano, A., ۲۰۲۲. Seismic Damage Index Spectra Considering Site Acceleration Records: The Case Study of a Historical School in Kermanshah. *Buildings*, ۱۲(۱۰), p.۱۷۳۶. <https://doi.org/10.3390/buildings12101736>.
- [۲۲] Pan, X., Lin, Z., Zhang, L. and Zheng, Z., ۲۰۲۴. Damage Spectra of SDOF Structures Under Tsunami Actions Considering the Nonlinear Dynamic Analysis Method. *Journal of Earthquake and Tsunami*, p.۲۳۵۰۰۳۴. <https://doi.org/10.1142/S1793434212350034>.
- [۲۳] Ferreira, C. and Ferreira, C., ۲۰۰۶. Numerical Constants and the GEP-RNC Algorithm. *Gene Expression Programming: Mathematical Modeling by an Artificial Intelligence*, pp.۱۸۱-۲۳۲.

نتایج حاکی از اثربخشی رویکرد مورد استفاده در دستیابی به طیف‌های آسیب دقیق و کارآمد برای سیستم‌های سازه‌ای است، که ارزیابی جامع آسیب را تسهیل می‌بخشد. این پژوهش بر اهمیت حیاتی پیش‌بینی طیف آسیب لرزه‌ای در ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌ها در مقابل زلزله تأکید می‌ورزد. با پیش‌بینی دقیق آسیب‌های احتمالی که سازه‌ها ممکن است، در طول رویدادهای لرزه‌ای تجربه کنند، می‌توان خطرات مرتبط با زلزله‌ها را به طور موثرتری درک و کاهش داد.

## منابع:

- [۱] Gharehbaghi, S., ۲۰۱۸. Damage controlled optimum seismic design of reinforced concrete framed structures. *Structural Engineering and Mechanics*, ۶۵(۱), pp.۵۳-۶۸. <https://doi.org/10.12989/sem.2018.65.1.053>.
- [۲] Samanta, A., Megawati, K. and Pan, T.C., ۲۰۱۲, September. Duration-dependent inelastic response spectra and effect of ground motion duration. In *Proceedings of the ۱۵th world conference on earthquake engineering*, Lisbon (pp. ۲۴-۲۸).
- [۳] Teran-Gilmore, A., Sanchez-Badillo, A. and Espinosa-Johnson, M., ۲۰۱۰. Performance-based seismic design of reinforced concrete ductile buildings subjected to large energy demands. *Earthquakes and Structures*, ۱(۱), pp.۶۹-۹۲. <https://doi.org/10.12989/eas.2010.1.1.069>.
- [۴] Bozorgnia, Y. and Bertero, V.V., ۲۰۰۳. Damage spectra: Characteristics and applications to seismic risk reduction. *Journal of Structural Engineering*, ۱۲۹(۱۰), pp.۱۳۳۰-۱۳۴۰. [doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:10\(1330\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:10(1330)).
- [۵] Kunnath, S.K. and Chai, Y.H., ۲۰۰۴. Cumulative damage-based inelastic cyclic demand spectrum. *Earthquake engineering & structural dynamics*, ۳۲(۴), pp.۴۹۹-۵۲۰. <https://doi.org/10.1002/eqe.363>.
- [۶] Cosenza, E., Manfredi, G. and Polese, M., ۲۰۰۹. Simplified method to include cumulative damage in the seismic response of single-degree-of-freedom systems. *Journal of engineering mechanics*, ۱۳۵(۱۰), pp.۱۰۸۱-۱۰۸۸. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2009\)135:10\(1081\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2009)135:10(1081)).
- [۷] Zhai, C.H., Wen, W.P., Chen, Z., Li, S. and Xie, L.L., ۲۰۱۳. Damage spectra for the mainshock-aftershock sequence-type ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ۴۵, pp.۱-۱۲. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.10.001>.
- [۸] Greco, R., Marano, G.C. and Fiore, A., ۲۰۱۷. Damage-based inelastic seismic spectra. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, ۱۷(۱۰), p.۱۷۵۰۱۱۵. <https://doi.org/10.1142/S0219455417501152>.
- [۹] Park, Y.J. and Ang, A.H.S., ۱۹۸۵. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. *Journal of structural engineering*, ۱۱۱(۴), pp.۷۲۲-۷۳۹. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111:4\(722\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:4(722)).

[۲۴] Engelbrecht, A.P., ۲۰۰۷. Computational intelligence: an introduction. John Wiley & Sons. pp.۳۶-۴۶

دین اسطیاقی  
نشدیه