

شاخص حساس به خسارت در قاب‌های بتن آرمه در معرض توالی لرزه‌ای با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

غلامرضا قدرتی امیری^{۱*}، الهام رجبی^۲

۱- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

*ghodrati@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۵/۱۲/۲۳]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۵/۳/۱۰]

چکیده

در نواحی فعال لرزه‌ای، زلزله‌های شدید عموماً توسط مجموعه‌ای از زمین‌لرزه‌ها دنبال می‌شوند. از آنجایی که معمولاً فاصله زمانی میان این لرزه‌های متوالی کوتاه است، به واسطه خسارات تجمعی ناشی از لرزه پیشین و عدم فرصت کافی جهت بازیابی سازه به وضعیت تعادل اولیه احتمال تخریب سازه افزایش پیدا می‌کند. در این مقاله با طراحی و آموزش شبکه‌های عصبی ایده‌آل، تأثیر خصوصیات مختلف زلزله اعم از حداکثر شتاب زمین، بزرگا، سرعت موج برشی، حداکثر شتاب مؤثر و ... بر خسارت ناشی از زلزله‌های منفرد و متوالی مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این راستا قاب‌های بتن‌آرمه ۳، ۵، ۷، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ طبقه براساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران در محیط نرم‌افزاری Opensees طراحی و در برابر سه مجموعه شتابنگاشت منفرد و متوالی که از پایگاه اطلاعاتی PEER و USGS براساس حداکثر شتاب زمین (PGA)، حداکثر سرعت زمین (PGV) و حداکثر شتاب مؤثر (EPA) انتخاب شده‌اند، تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفته‌اند. در ادامه به منظور آموزش و طراحی شبکه‌های عصبی مصنوعی، شاخص خسارت Park-Ang (1985) که یکی از نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی است، به عنوان مقادیر هدف و ویژگی‌های زمین‌لرزه‌های منفرد و متوالی به همراه زمان تناوب سازه به عنوان مقادیر ورودی به شبکه‌های عصبی مصنوعی انتخاب شده‌اند. در نهایت با انتخاب تعداد نورون‌های بهینه که حداکثر همبستگی و حداقل میزان خطا میان مقادیر خروجی و هدف را نتیجه می‌دهند، شبکه‌های عصبی ایده‌آل طراحی می‌شوند. سپس با انتخاب مقادیر مبنا برای کلیه پارامترهای ورودی و معرفی به شبکه‌های عصبی ایده‌آل، حساسیت‌سنجی صورت پذیرفته است. نتایج حاصل از حساسیت‌سنجی حاکی از آن است که میزان خسارت از میان خصوصیات زمین‌لرزه نسبت به تغییرات پارامتر بزرگا و شتاب (به خصوص در حالت منفرد) حساس‌تر می‌باشد.

واژگان کلیدی: شبکه عصبی مصنوعی، شاخص خسارت، پدیده توالی لرزه‌ای، تحلیل دینامیکی غیرخطی.

۱- مقدمه و روش تحقیق

لرزه‌ای و پتانسیل خسارت‌زایی آن به دفعات اثبات شده است.

پیامدهای ناشی از این پدیده در مورد سازه‌های با اهمیت مانند

در ادبیات فنی مهندسی سازه و زلزله اهمیت پدیده توالی

کارخانجات انرژی هسته‌ای، بیمارستان‌ها و ... جبران‌ناپذیرتر است. در این پدیده، تنش موجود در گسل‌های واقع در نواحی لرزه‌خیز در طول گسیختگی اول به صورت کامل آزاد نمی‌شوند. به این ترتیب زلزله‌های متوالی به ازای گسیختگی‌های بعدی در گسل مسبب لرزه اصلی رخ می‌دهند. برای مثال به گزارش پایگاه USGS در ۱۱ آوریل ۲۰۱۲، چندین پس‌لرزه با بیشترین مقدار بزرگای ۸.۲ دو ساعت پس از وقوع زلزله هندوستان با بزرگای ۸.۶ ثبت شدند [1]. از طرفی پس‌لرزه‌ها پتانسیل ایجاد خسارات شدید به ساختمان‌ها و گرفتن جان ساکنین را حتی در صورت وجود خسارت ناچیز از لرزه اصلی و یا عدم وجود خرابی دارا هستند. به عنوان مثال، در سال ۱۹۹۹ یک ایستگاه گاز به واسطه خرابی ناشی از زلزله Chi Chi در شهر تایوان، با وقوع پس‌لرزه تخریب شد [2]. در سال‌های اخیر بررسی و تخمین میزان خسارات به جای مانده از زمین لرزه‌های متوالی مورد توجه اکثر پژوهشگران قرار گرفته است. به گونه‌ای که برخی از محققین به منظور بررسی اثرات پدیده توالی لرزه‌ای بر سازه‌ها از زلزله‌های متوالی ثبت شده [3] و برخی دیگر از روش‌های مصنوعی مانند روش تکرار لرزه نخست به عنوان لرزه دوم و انتخاب رندوم و تصادفی لرزه دوم از میان رکوردهای ثبت شده برای لرزه نخست [4] استفاده نموده‌اند. در تمامی این پژوهش‌ها همواره تأکید بر اهمیت و لزوم لحاظ نمودن پدیده توالی لرزه‌ای می‌باشد. هرچند که هنوز پیشنهاد آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های طراحی بر استفاده از یک زلزله منفرد تحت عنوان زلزله طراحی است و پس‌لرزه‌ها در طراحی بر اساس عملکرد نیز جایگاهی ندارند [5]. این در حالی است که خسارت‌های به جا مانده از زمین لرزه‌های اخیر ثابت نموده است که سازه‌های مستقر در نواحی لرزه‌خیز نه تنها تحت لرزه اصلی خسارت می‌بینند، بلکه ممکن است در طول عمر مفید خود در معرض یک یا چند پس‌لرزه قرار بگیرند [4]. Song و همکاران در سال ۲۰۱۶ با بررسی خسارت یک سازه چهار طبقه زوال‌پذیر فولادی تحت زمین‌لرزه‌های متوالی اعلام نمودند حتی اگر پس‌لرزه اثرات ناچیزی بر رفتار سازه داشته باشد، با این حال قادر خواهد بود تأثیر چشمگیری بر زیان و ضرر لرزه‌ای داشته باشد [6]. از طرفی

خصوصیات زمین لرزه از قبیل شدت، بزرگا، فاصله از گسل مسبب و ... بر رفتار لرزه‌ای سازه‌ها بی تأثیر نیستند. در سال‌های اخیر برخی پژوهشگران طی مطالعاتی اثر پارامترهای مختلف را بر ظرفیت تخریب و خسارت ناشی از لرزه‌های متوالی مورد بررسی قرار داده‌اند. برای مثال، Zhai و همکاران در سال ۲۰۱۴ خسارت سازه یک درجه آزادی غیرالاستیک با استفاده از چهار مدل هیستریتیک و سه پارامتر تقاضای لرزه‌ای را مورد بررسی قرار داده و اعلام نمودند که اثر پس‌لرزه در حالتی که نسبت حداکثر شتاب زمین برای پس‌لرزه به لرزه اصلی کمتر از ۰.۵ باشد، بر تقاضای شکل‌پذیری ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. این در حالی است که اثر حضور پس‌لرزه در سناریوی لرزه‌ای بر شاخص خسارت Park-Ang و انرژی هیستریتیک بیشتر از تقاضای شکل‌پذیری است [7]. همچنین Song و همکاران در سال ۲۰۱۴ طی پژوهشی اثر مدت زمان و محتوای فرکانسی زمین‌لرزه‌ها را بر خطر تخریب ساختمان‌ها با در نظر گرفتن چهار سطح خطر بررسی کردند. از نتایج این پژوهش می‌توان به این موارد اشاره نمود که مدت زمان و محتوای فرکانسی زمین‌لرزه‌ها هر دو نقش مؤثری در ظرفیت تخریب سازه‌های دارند. از طرفی مادامی که خسارت سازه ناشی از لرزه اصلی افزایش می‌یابد، میزان اهمیت خصوصیات پس‌لرزه بر ظرفیت تخریب سازه مواجه شده با لرزه اصلی چشمگیرتر می‌گردد [8]. در این مقاله به منظور بررسی اثر ویژگی‌های زمین‌لرزه در دو حالت با و بدون توالی لرزه‌ای بر میزان خسارت وارد بر سازه‌های بتنی از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شده است. البته در سال‌های اخیر پژوهشگرانی چون Dworakowski و همکاران در سال ۲۰۱۴ [9] از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تخمین خسارت استفاده نموده‌اند. اما در این پژوهش‌ها صرفاً زمین‌لرزه‌های منفرد مورد توجه بوده است. در مقاله حاضر طیف نسبتاً وسیعی از قاب‌های بتن‌آرمه از لحاظ ارتفاع -۳، ۵، ۷، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ طبقه - طراحی و تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تحت سناریوهای لرزه‌ای در دو حالت منفرد و متوالی در نرم‌افزار Opensees صورت پذیرفته است. در ادامه به منظور تعیین مقادیر هدف در طراحی، آموزش و انتخاب شبکه‌های عصبی مصنوعی ایده‌آل، پارامتر شاخص خسارت Park-Ang (1985) [10] استخراج و طی سه مرحله میزان تأثیرپذیری این

پارامتر نسبت به ویژگی‌های زلزله بررسی شده است.

۲- شتاب‌نگاشت و مدل‌سازی قاب‌های بتنی

در این مقاله جهت طراحی شبکه‌های عصبی از پایگاه اطلاعاتی PEER و USGS استفاده و سناریوهای لرزه‌ای در قالب دو گروه منفرد و متوالی برمبنای معیارهای حداکثر شتاب زمین (PGA^1) به واسطه پرکاربرد بودن و معیارهای حداکثر شتاب مؤثر (EPA^2) و حداکثر سرعت زمین (PGV^3) بنا بر پیشنهاد برخی محققین [11] استخراج و معرفی شده‌اند. به این ترتیب که رکوردها با مقادیر حداکثر و نزدیک به حالت حداکثر معیارهای مذکور - رتبه دوم یا سوم نسبت به حالت حداکثر - انتخاب شده‌اند. لازم به ذکر است که زلزله‌های متوالی در سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۵ با فاصله زمانی کمتر از ده روز در یک ایستگاه رخ داده و در راستای مشابه ثبت شده‌اند و به ترتیب شامل ۷۱ رکورد با حداکثر شتاب برابر $0.025g$ تا $0.7g$ ، ۸۶ رکورد با حداکثر شتاب برابر $0.025g$ تا $1.66g$ و ۸۰ رکورد با حداکثر شتاب برابر $0.025g$ تا $0.63g$ و بزرگای بین ۴.۴ تا ۷.۸ ریشتر در گروه‌های فوق‌الذکر می‌باشند. همچنین به منظور ایجاد تطابق و هماهنگی میان سطوح خطر و طیف پاسخ رکوردهای انتخابی و طیف طراحی پیشنهادی در آیین‌نامه [12] از روش مقیاس خطی استفاده شده است. مزیت این روش ساده بودن آن و حفظ پارامترهایی از قبیل محتوای فرکانسی و فاز می‌باشد [13]. در این روش به منظور ایجاد تطابق میان طیف زمین-لرزه و طیف طراحی به ازای زمان تناوب سازه، ضریب مقیاس تعیین و به کل زلزله اعمال میگردد [14]. سازه‌های مورد استفاده در این مقاله، قاب‌های بتنی ۳، ۵، ۷، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ طبقه با شکل پذیری متوسط مستقر در شهر تهران می‌باشند که براساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران [15] طراحی شده‌اند. نمایی از این قابها و مدل رفتاری پیشنهادی Ibarra [16] در المان‌های تیر در شکل (۱) آورده شده است. همانطور که در این شکل مشخص می‌باشد، ارتفاع کلیه قاب‌ها و طول دهانه‌ها به ترتیب برابر ۳۲۰ و ۵۰۰ سانتیمتر است که در محیط نرم افزاری OpenSees طراحی و طی

دو مرحله و در قالب روشهای تحلیلی [17] و سازه ایزاربندی و تست شده بر میز لرزان ساخته شده توسط کمپانی ژاپنی NIED [18] درستی‌سنجی شده‌اند. در ساخت مدل قاب‌های بتنی از مدل تیر-ستون با مفصل پلاستیک متمرکز در مدل‌سازی تیر با قابلیت اختصاص مصالح الاستیک به بخش میانی تیر و اختصاص طول مشخصی از هر دو انتهای تیر به مفصل پلاستیک با رفتار غیرخطی دلخواه استفاده شده است. این المان به خوبی قادر است رفتار چرخه‌ای مقطع را شبیه‌سازی نماید. از مهم‌ترین ویژگی‌های این مدل می‌توان به پاسخ بعد از نقطه اوج اشاره کرد. چرا که امکان لحاظ کردن نرم‌شدگی ناشی از انهدام بتن، کماتش و شکست آرماتور و یا شکست پیوستگی بین بتن و آرماتور وجود دارد. از طرفی این مدل چهار مود اصلی زوال چرخه‌ای زوال مقاومت ناحیه سخت‌شدگی کرنش غیرخطی، زوال مقاومت ناحیه نرم‌شدگی کرنش پس از اوج، زوال شتاب‌دار سختی بارگذاری مجدد و زوال سختی باربرداری را در بر می‌گیرد [16]. همچنین برای مدل‌سازی ستون‌ها از روش فایبر استفاده شده است. چرا که در این مدل امکان لحاظ کردن اندرکنش خمش و نیروی محوری که عاملی اثرگذار در رفتار ستون‌ها می‌باشد، وجود دارد.

شکل (۱) نمایی از قاب‌های بتنی مورد استفاده و مدل رفتاری

المانهای تیر [16]

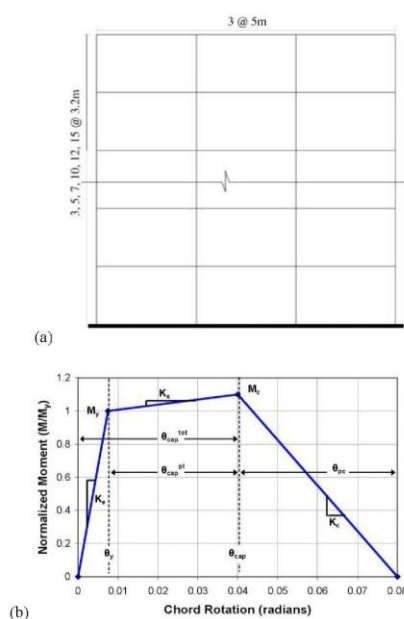


Fig. 1. The schematic of studied RC frames and backbone curve of beam elements [16]

¹ Peak Ground Acceleration, PGA

² Effective Peak Acceleration, EPA

³ Peak Ground Velocity, PGV

۳- شبکه‌های عصبی مصنوعی

۳-۱- معرفی

استاندارد برای مسائل حداقل مربعات بوده و به صورت ترکیبی از روش نیوتن - گوس و بیشترین شیب نزول می‌باشد. این الگوریتم به صورت تصادفی داده‌ها را به سه بخش آموزش، صحت و آزمایش تقسیم می‌کند. در مقاله حاضر از ۶۰٪ داده‌ها جهت آموزش، ۳۵٪ به منظور آزمایش در راستای جلوگیری از بیش‌برازش شبکه و ۵٪ مابقی برای درستی‌سنجی شبکه عصبی استفاده شده است. ملاک توقف آموزش شبکه‌ها میانگین مربعات خطا و مقادیر رگرسیون است. به گونه‌ای که مقادیر کم میانگین مربعات خطا به منزله عملکرد بهتر شبکه و مقدار صفر به معنای عدم وجود خطا است. از طرفی مقادیر رگرسیون نیز معرف میزان همبستگی میان خروجی‌های شبکه و هدف می‌باشد. در این راستا مقدار یک به معنی همبستگی کامل و صفر مبین تصادفی بودن است.

۳-۲- مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی

برای دست‌یابی به یک مدل مناسب شبکه عصبی، استفاده از اطلاعات هموزن بسیار ضروری است. به این ترتیب در مقاله حاضر از اطلاعات معرفی شده در جدول‌های (۱) تا (۳) که مربوط به زمین‌لرزه‌های انتخاب شده بر مبنای معیارهای PGA، EPA و PGV می‌باشد، طی سه مرحله جهت آموزش و طراحی دو شبکه عصبی به منظور بررسی تأثیر ویژگی‌های مختلف زمین‌لرزه بر شاخص خسارت (Park-Ang (1985) تحت زمین-لرزه در دو حالت با و بدون حضور لرزه‌های متوالی استفاده شده است.

جدول (۱) مشخصات آماری پارامترهای ورودی، لرزه‌های انتخاب شده

بر مبنای PGA

Case	Input	Min	Max	Mean	Standard deviation
Single	PGA	0.024	0.698	0.231	0.1473
	M	4.73	7.8	5.91	0.6252
	Vs (m/s)	198.8	1000	352.4	127.2
	Epc (Km)	1.33	81.09	20.44	16.25
	T (s)	0.863	3.175	1.82	0.821
	DI	0.0001	4.55	0.61	0.9312
Sequence	PGAA/PGAm	0.047	6.796	1.198	1.112
	Ma/Mm	0.767	1.073	0.964	0.0633
	Vs (m/s)	198.8	1000	341.5	109.5
	EpcA/Epcm	0.32	6.545	1.248	1.0532
	T (s)	0.863	3.175	1.826	0.8203
	DI	0.0001	8.9	1.24	1.616

Table 1. The statistical features of input parameters, selected records based on PGA

شبکه‌های عصبی مصنوعی یک نگاشت‌کننده خطی یا غیرخطی مابین دو فضای خاص می‌باشند. به گونه‌ای که پس از تنظیم شبکه عصبی یا همان آموزش، اعمال یک ورودی خاص منجر به دریافت خروجی خاصی شده و مادامی که خروجی شبکه و خروجی موردنظر کاربر (اصطلاحاً هدف نامیده می‌شود) بر هم منطبق شوند، شبکه بر مبنای تطابق و همسنجی بین ورودی و هدف سازگار می‌گردد [19]. در علم مهندسی عمران نیز از شبکه‌های عصبی در زمینه‌های مختلفی از قبیل تحلیل و طراحی سازه [20-21]، تشخیص خسارت در سازه [22] و ... استفاده شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی ابزار رگرسیونی مفیدی به حساب می‌آیند. چرا که بسیار غیرخطی بوده و بدون داشتن هیچ گونه اطلاعات و پیش‌زمینه قبلی در مورد طبیعت مسئله، قابلیت برقراری ارتباط میان پارامترهای پیچیده ورودی و خروجی را در مدت زمان کوتاه داراست. در این مقاله به منظور بررسی تأثیر ویژگی‌های مختلف زمین‌لرزه بر میزان خسارت ناشی از لرزه‌های منفرد و متوالی بر سازه‌های قابی شکل بتنی از شبکه‌های عصبی چندلایه با الگوریتم پس‌انتشار خطا (شکل ۲) استفاده شده است. شبکه پس‌انتشار یک شبکه چندلایه با تابع انتقال غیرخطی و قاعده یادگیری ویدر - هوف می‌باشد.

شکل (۲) نمایی از شبکه‌های مورد استفاده در مقاله حاضر

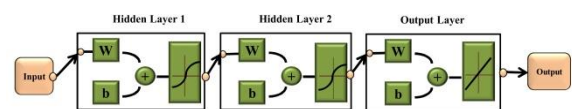


Fig. 2. The schematic of studied artificial neural networks

در این شبکه از بردار ورودی و هدف برای آموزش جهت تقریب زدن یک تابع، یافتن رابطه میان ورودی و خروجی و دسته‌بندی ورودی‌های شبکه عصبی استفاده می‌شود. این شبکه با دارا بودن بایاس، یک یا چند لایه میانی سیگموئید و یک لایه خروجی خطی، توانایی تخمین هر تابعی با تعداد نقاط ناپیوستگی محدود را داراست. در گام بعد جهت برقراری ارتباط خطا با ورودی‌ها، وزن‌ها و خروجیها از روش Levenberg - Marquardt استفاده شده است. این روش

همچنین به منظور کاهش تعداد پارامترهای ورودی به شبکه مربوط به زمین لرزه‌های متوالی، در هر دو مرحله از نسبت پارامترهای ذکر شده در حالت لرزه دوم به لرزه نخست - به جز سرعت موج برشی در ایستگاه ثبت زلزله - استفاده شده است. دلیل این امر یکسان بودن ایستگاه ثبت هر دو لرزه می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، در شبکه‌های عصبی از تابع انتقال سیگموئید در لایه‌های مخفی استفاده شده است. این تابع همواره بین صفر و یک رفتار می‌کند. به این ترتیب پیش از آموزش شبکه‌ها لازم است نرمال‌سازی کلیه داده‌ها اعم از مقادیر ورودی و هدف انجام شود. در این راستا از روش انترپولاسیون خطی مطابق رابطه (۱) به منظور مقیاس کردن داده‌ها بین 0.1 و 0.9 بهره گرفته شده است. در این رابطه i نماینده کلیه پارامترهای ورودی و هدف می‌باشد. پس از معرفی داده‌های نرمال شده ورودی و هدف به شبکه و آموزش تا حداقل شدن میزان خطا، خروجی مورد نظر استخراج می‌گردد.

$$i_{scaled} = 0.1 + (0.9 - 0.1) (i - i_{min}) / (i_{max} - i_{min}) \quad (4)$$

در این مقاله شبکه‌های عصبی مصنوعی دارای دو لایه مخفی می‌باشند. برای دستیابی به شبکه عصبی ایده‌آل، برای هر سه مرحله و هر دو حالت منفرد و متوالی با طراحی ۴۰۰ شبکه با تعداد نورون از ۱ تا ۲۰ عدد در هر لایه مخفی، بهترین شبکه متناظر با بیشترین ضریب همبستگی R و کمترین میزان خطا انتخاب شده است. به این ترتیب تعداد نورون‌های موجود در لایه‌های مخفی شبکه عصبی ایده‌آل متناظر با حداکثر ضریب R براساس جدول (۴) تعیین می‌گردد.

۴- حساسیت‌سنجی پارامتر شاخص خسارت در قاب‌های بتنی تحت زمین لرزه‌های با و بدون توالی لرزه‌ای

در این بخش به منظور بررسی تأثیر برخی ویژگی‌های سناریوهای لرزه‌ای و مشخصات سازه بر شاخص خسارت و به بیان دیگر حساسیت‌سنجی این شاخص نسبت به عوامل مختلف، طی سه مرحله مطالعه پارامتری بر مبنای شبکه‌های عصبی مصنوعی ایده‌آل به ازای هر دو حالت زمین‌لرزه‌های

در این راستا از میان خصوصیات زمین‌لرزه پارامترهایی از قبیل EPA, PGA و یا PGV، بزرگا (M)، سرعت موج برشی در ایستگاه ثبت زلزله (Vs) و فاصله از مرکز زمین‌لرزه (Epc) و خصوصیات سازه از قبیل نوع سازه، ارتفاع و ... در قالب پارامتر زمان تناوب (T) به عنوان ورودی و شاخص خسارت Park-Ang در سال ۱۹۸۵ (DI) - نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی مجموعه قاب‌های ۳، ۵، ۷، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ طبقه بتن-آرمه - به عنوان مقادیر هدف جهت آموزش، آزمایش و بررسی صحت شبکه‌های عصبی مصنوعی انتخاب شده است. در حقیقت پارامتر زمان تناوب تفکیک کننده نتایج قاب‌ها از یکدیگر می‌باشد.

جدول (۲) مشخصات آماری پارامترهای ورودی، زمین‌لرزه‌های انتخاب

شده بر مبنای EPA

Case	Input	Min	Max	Mean	Standard deviation
Single	EPA	0.016	1.349	0.222	0.250
	M	4.370	7.800	5.889	0.662
	Vs	198.800	1000.000	358.021	131.290
	Epc	1.330	81.090	19.003	15.563
	T	0.863	3.175	1.809	0.812
Sequence	EPAa/EPA m	0.047	4.850	1.252	1.009
	Ma/Mm	0.767	1.076	0.967	0.073
	Vs	198.800	1000.000	348.866	111.605
	Epc a/Epc m	0.320	8.413	1.393	1.349
	T	0.863	3.175	1.820	0.820

Table 2. The statistical features of input parameters, selected records based on EPA

جدول (۳) مشخصات آماری پارامترهای ورودی، زمین‌لرزه‌های انتخاب

شده بر مبنای PGV

Case	Input	Min	Max	Mean	Standard deviation
Single	PGV	0.006	0.712	0.147	0.124
	M	4.370	7.800	5.822	0.550
	Vs	198.800	1000.000	343.178	104.200
	Epc	1.330	81.090	19.007	16.530
	T	0.863	3.175	1.844	0.817
Sequence	PGVa/PGV m	0.093	5.667	1.355	1.180
	Ma/Mm	0.767	1.076	0.970	0.069
	Vs	198.800	1000.000	343.727	104.800
	Epc a/Epc m	0.320	8.413	1.365	1.319
	T	0.863	3.175	1.844	0.817

Table 3. The statistical features of input parameters, selected records based on PGV

خسارت نسبتاً یکسانی را به قابهای بتن مسلح مورد استفاده در مقاله حاضر وارد می‌آورند. شاخص خسارت ناشی از زمین‌لرزه منفرد با بزرگای $M \geq 6.3$ با افزایش بزرگای افزایش می‌یابد. از طرفی روند تغییرات خسارت ناشی از زلزله‌های منفرد با حداکثر شتاب زمین 0.15g تا 0.4g تقریباً ثابت است. روند تغییرات شاخص خسارت (Park-Ang (1985) برای زمین‌لرزه‌های منفرد با $PGA \leq 0.15g$ ، نسبت به افزایش پارامتر حداکثر شتاب زمین نزولی است.

شکل (۳) اثر پارامترهای بزرگا، حداکثر شتاب زمین، سرعت موج برشی در ایستگاه ثبت زلزله، فاصله مرکزی از گسل مسبب و زمان تناوب سازه بر شاخص خسارت ناشی از زلزله منفرد استخراج شده بر مبنای معیار PGA

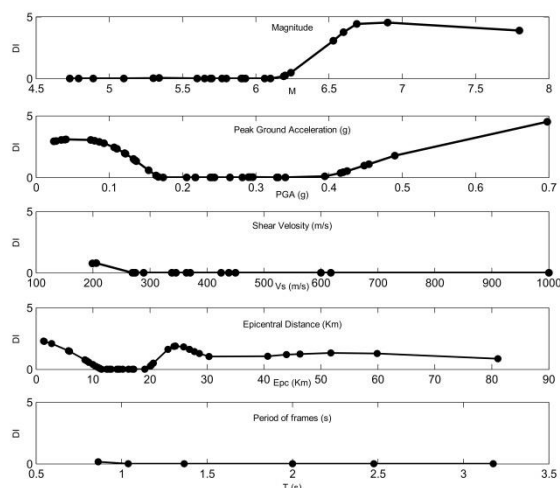


Fig. 3. The effect of Magnitude, PGA, Vs, Epc and T on DI (caused by selected single records based on PGA)

جدول (۵) مقادیر مبنای پارامترهای ورودی متناظر با زلزله‌های استخراج شده بر مبنای PGA، EPA و PGV

Case	Input	PGA	EPA	PGV
Single	PGA, EPA, PGV	0.22	0.156	0.13
	M	6	5.9	5.9
	Vs (m/s)	340	339	340
	Epc (Km)	15	14.33	15
	T (s)	1.7	1.37	1.9
Sequence	PGAA/PGAm	0.8	0.96	1.1
	Ma/Mm	0.98	0.98	0.98
	Vs (m/s)	340	339	340
	Epc/Epcm	1.05	1.032	1.1
	T (s)	1.7	1.7	1.9

Table 5. Reference values of input parameters corresponding to selected records based on PGA, EPA and PGV

اکثر زمین‌لرزه‌های منفرد مورد استفاده در مقاله حاضر دارای فاصله مرکزی کمتر از ۳۰ کیلومتر نسبت به گسل مسبب زلزله

انتخاب شده بر مبنای معیار PGA، EPA و PGV صورت گرفته است. در این راستا نیاز است برای کلیه پارامترهای ورودی محدوده و اصطلاحاً مقدار مبنا تعیین گردد. در این مقاله از شاخص آماری میانه استفاده شده است. به گونه‌ای که مقدار مبنا به مقدار میانه هر پارامتر نزدیک باشد. مقادیر مبنا به تفکیک نوع زمین‌لرزه منفرد و حاوی توالی لرزه‌ای در جدول (۵) به نمایش گذاشته شده است. با معرفی هر یک از پارامترهای ورودی از مقدار حداقل تا حداکثر - به صورت منظم و افزایشی - به شبکه عصبی مصنوعی، با ثابت بودن بقیه پارامترها به مقدار مبنا میزان شاخص خسارت در هر حالت از شبکه عصبی مصنوعی استخراج و در قالب نمودار بر مبنای پارامتر مورد نظر ترسیم می‌گردد.

جدول (۴) تعداد نورون‌های پهنه در شبکه‌های ایده‌آل متناظر با زمین لرزه-

های استخراجی بر مبنای PGA، EPA و PGV

Criteria	Type	Number of Neuron in 1st hidden layer	Number of Neuron in 2nd hidden layer
PGA	Single	15	14
	Sequence	15	15
EPA	Single	5	13
	Sequence	12	18
PGV	Single	10	12
	Sequence	10	17

Table 4. Number of optimum neurons in ideal networks corresponding to selected records based on PGA, EPA and PGV

۴-۱- بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر میزان خسارت قاب‌های

بتنی تحت زمین‌لرزه‌های با و بدون توالی لرزه‌ای استخراج شده

بر مبنای PGA

شکل‌های (۳) و (۴) رفتار پارامتر شاخص خسارت بر اساس

پارامترهای M، PGA، Vs، Epc و T در حالت زلزله منفرد و T،

Vs، نسبت بزرگا، نسبت حداکثر شتاب زمین و نسبت فاصله

مرکزی از گسل مسبب در لرزه دوم به لرزه نخست زمین لرزه-

های متوالی انتخاب شده بر مبنای PGA به نمایش گذاشته شده

است. همان‌طور که در شکل (۳) مشخص می‌باشد، پارامتر

شاخص خسارت ناشی از زمین لرزه‌های فاقد توالی لرزه‌ای

نسبت به T و Vs در مقایسه با سایر پارامترها تغییرات

محسوسی ندارد. زلزله‌های منفرد با بزرگای کمتر از $M = 6.3$

افزایش پیدا می‌کند. در سناریوهای لرزه‌ای که نسبت فاصله مرکزی لرزه دوم به لرزه نخست (Epc_2/Epc_1) کمتر از یک است، روند تغییرات شاخص خسارت Park-Ang (1985) نسبت به افزایش این نسبت کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت که خسارت ناشی از سناریوهای لرزه‌ای متوالی در قاب‌های بتنی بیشتر متأثر از نسبت بزرگا می‌باشد.

شکل (۵) اثر پارامترهای بزرگا، حداکثر شتاب مؤثر، سرعت موج برشی در ایستگاه ثبت زلزله، فاصله مرکزی از گسل مسبب و زمان تناوب سازه بر شاخص خسارت ناشی از زلزله منفرد استخراج شده بر مبنای معیار EPA

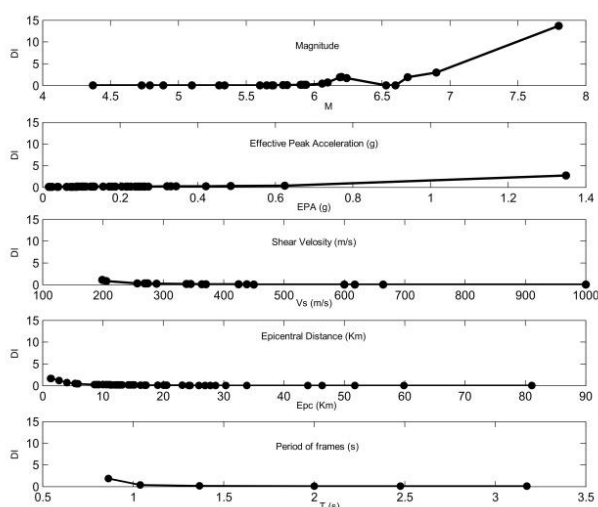


Fig. 5. The effect of Magnitude, EPA, Vs, Epc and T on DI (caused by selected single records based on EPA)

۴-۲- تأثیر پارامترهای مختلف بر میزان خسارت قاب‌های بتنی تحت زمین‌لرزه‌های با و بدون توالی استخراج شده بر مبنای

معیار EPA

خروجی شبکه‌های عصبی در دو حالت زمین‌لرزه‌های منفرد و متوالی که بر مبنای معیار EPA استخراج و بر مبنای پارامتر ورودی ترسیم شده‌اند، در شکل‌های (۵) و (۶) نمایش داده شده است. همانطور که در شکل (۵) مشخص می‌باشد، پارامتر شاخص خسارت ناشی از زلزله‌های منفرد استخراج شده بر مبنای پارامتر EPA مشابه خسارت ناشی از زلزله‌های منفرد ارائه شده بر مبنای معیار PGA تغییرات قابل ملاحظه‌ای در برابر برخی پارامترهای ورودی از قبیل T ، V_s و پارامتر بزرگای $M \leq 6.3$ ندارد. همچنین بقیه پارامترهای ورودی شامل EPA و Epc

می‌باشند. میزان تغییرات خسارات ایجاد شده در سازه‌های بتنی در معرض سناریوهای لرزه‌ای فاقد توالی لرزه‌ای با فاصله مرکزی بیشتر از ۳۰ کیلومتر نسبت به افزایش این پارامتر دارای روند ثابتی است.

شکل (۴) اثر پارامترهای زمان تناوب سازه، سرعت موج برشی در ایستگاه ثبت زلزله، نسبت بزرگا، نسبت حداکثر شتاب زمین و نسبت فاصله مرکزی از گسل مسبب در لرزه دوم به لرزه نخست بر شاخص خسارت ناشی از زلزله‌های متوالی استخراج شده بر مبنای معیار PGA

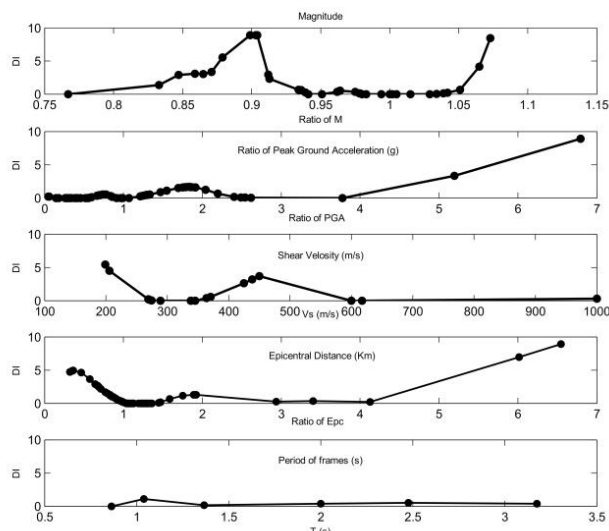


Fig. 4. The effect of T, Vs and the ratio of Magnitude, PGA and Epc on DI (caused by selected consecutive records based on PGA)

به این ترتیب شاخص خسارت ناشی از زمین‌لرزه‌های منفرد در برابر تغییرات بزرگا و همچنین حداکثر شتاب زمین تأثیرپذیرتر می‌باشد. در شکل (۴) نیز پارامتر شاخص خسارت ناشی از زمین‌لرزه‌های متوالی نسبت به T در مقایسه با سایر پارامترها تغییرات محسوسی ندارد. همچنین مادامی که نسبت بزرگای لرزه دوم به لرزه اول (M_2/M_1) کوچکتر از ۰.۹ باشد، روند تغییرات خسارت ناشی از زمین‌لرزه‌های متوالی بر سازه‌های بتنی نسبت به افزایش نسبت بزرگا صعودی است. از طرفی برای لرزه‌های متوالی با نسبت حداکثر شتاب زمین در لرزه دوم به لرزه نخست کمتر از یک، روند تغییرات شاخص خسارت تقریباً ثابت می‌باشد. در مورد تعداد معدودی از زمین‌لرزه‌های متوالی با نسبت PGA لرزه دوم به لرزه نخست بیشتر از $3/8$ ($PGA_2/PGA_1 \geq 3.8$) با افزایش این نسبت میزان خسارت نیز

حداکثر شتاب مؤثر در لرزه دوم به لرزه نخست تقریباً ثابت و آرام می‌باشد. محدوده تغییرات خسارت در برابر پارامتر پارامتر فاصله مرکزی لرزه دوم به لرزه نخست در محدوده $2.0 \leq Epc_2/Epc_1 \leq 6.0$ می‌باشد. همچنین تعداد معدودی از سناریوهای متوالی دارای سرعت موج برشی بیشتر از 500 متر بر ثانیه می‌باشند که در این محدوده تغییرات رفتاری شاخص خسارت نسبتاً چشمگیر است. بنابراین می‌توان بیان کرد در حالت کلی میزان خسارات ناشی از سناریوهای لرزه‌ای متوالی لرزه‌ای استخراج شده بر مبنای معیار EPA مشابه زلزله‌های متوالی ارائه شده بر مبنای معیار PGA در برابر تغییرات بزرگای بیشتر از نسبت بزرگا می‌باشد.

۳-۴- تأثیر پارامترهای مختلف بر میزان خسارت قاب‌های بتنی تحت زمین‌لرزه‌های با و بدون توالی لرزه‌ای استخراج شده بر مبنای PGV در این بخش مشابه روند به کار رفته در بخش‌های قبل، تغییرات شاخص خسارت (Park-Ang (1985) در برابر پارامترهای مختلف از قبیل T و برخی ویژگی‌های زمین لرزه-های استخراج شده بر مبنای PGV در قالب شکل‌های (۷) و (۸) مورد بررسی قرار گرفته شده است. با توجه به این شکل‌ها پارامتر شاخص خسارت نسبت به سرعت موج برشی در ایستگاه ثبت زمین‌لرزه منفرد و متوالی، پارامتر زمان تناوب و فاصله از گسل مسبب تغییرات محسوسی ندارد. این در حالی است که خسارات ناشی از زلزله‌های متوالی در مقابل نسبت بزرگای لرزه دوم به اول تغییرات بیشتری داشته است.

۵- مقایسه میزان حساسیت پذیری شاخص خسارت در قاب‌های بتنی تحت زمین لرزه‌های با و بدون توالی لرزه‌ای استخراج شده بر مبنای معیارهای EPA، PGA و PGV

در این بخش جهت دستیابی به درک واضح‌تری از میزان حساسیت‌پذیری پارامتر شاخص خسارت در ناشی از زمین-لرزه‌های با و بدون توالی لرزه‌ای استخراج شده بر مبنای معیارهای EPA، PGA و PGV در برابر پارامترهای مختلف نتایج

نیز تأثیر قابل توجهی بر میزان خسارت ایجاد شده در قاب‌های بتنی نداشته‌اند. با این وجود می‌توان گفت خسارت ناشی از زمین‌لرزه‌های منفرد استخراج شده بر مبنای پارامتر EPA حساسیت قابل توجهی نسبت به پارامترهای ورودی نداشته و در حالت کلی مشابه خسارت ناشی از زلزله‌های منفرد ارائه شده بر مبنای معیار PGA در برابر تغییرات بزرگای بیشتر از 6.0 تأثیرپذیرتر است. در شکل (۶) نیز پارامتر شاخص خسارت ناشی از زمین لرزه‌های متوالی استخراج شده بر مبنای معیار EPA مشابه زلزله‌های متوالی ارائه شده بر مبنای PGA نسبت به T در مقایسه با سایر پارامترها تغییرات محسوسی ندارد.

شکل (۶) اثر پارامترهای زمان تناوب سازه، سرعت موج برشی در ایستگاه ثبت زلزله، نسبت بزرگا، نسبت حداکثر شتاب مؤثر و نسبت فاصله مرکزی از گسل مسبب در لرزه دوم به لرزه نخست بر شاخص خسارت ناشی از زلزله‌های متوالی استخراج شده بر مبنای معیار EPA

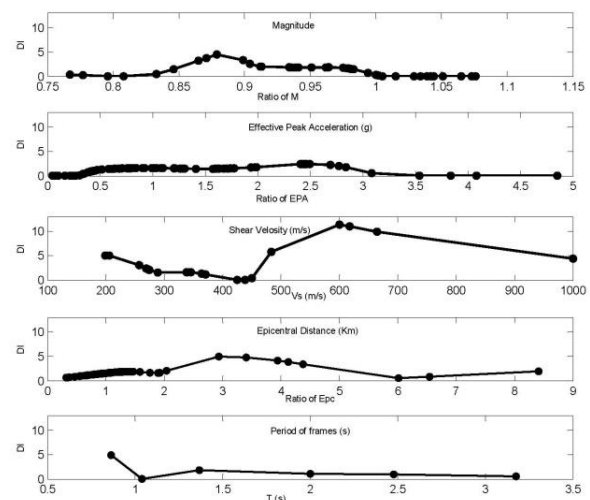


Fig. 6. The effect of T, Vs and the ratio of Magnitude, EPA and Epc on DI (caused by selected consecutive records based on EPA)

همچنین مادامی که نسبت بزرگای لرزه دوم به لرزه اول کوچکتر از 0.88 می‌باشد، روند تغییرات خسارت ناشی از زمین لرزه‌های متوالی بر سازه‌های بتنی مشابه زلزله-های متوالی انتخاب شده بر مبنای PGA نسبت به افزایش نسبت بزرگا تقریباً صعودی است. از طرفی روند تغییرات پارامتر شاخص خسارت ناشی از لرزه‌های متوالی با تغییرات نسبت

شتاب تا حدودی تأثیرپذیرتر است. به گونه‌ای که متوسط حداکثر شاخص خسارت پیش‌بینی شده با تغییرات بزرگا به ترتیب ۰.۳۰٪، ۰.۶۷٪، ۰.۶۳٪ و ۰.۷۰٪ بیشتر از متوسط حداکثر خسارت تخمین زده شده با تغییرات حداکثر شتاب زمین (حداکثر سرعت زمین، حداکثر شتاب مؤثر)، سرعت موج برشی، فاصله مرکزی زلزله و زمان تناوب می‌باشد. این مقادیر برای شاخص خسارت تخمین زده شده با تغییرات شتاب به ترتیب ۰.۴۴٪، ۰.۵۳٪، ۰.۴۷٪ و ۰.۵۸٪ بیشتر از متوسط حداکثر خسارت تخمین زده شده با تغییرات بزرگا، سرعت موج برشی، فاصله مرکزی و زمان تناوب می‌باشد.

در شکل (۱۰) نیز تغییرات شاخص خسارت Park-Ang(1985) ناشی از زمین‌لرزه‌های متوالی انتخاب شده بر مبنای معیارهای PGA، EPA و PGV در مجموعه قابهای بتن‌آرمه با یکدیگر مقایسه و با توجه به این شکل می‌توان گفت به استثنای برخی محدوده‌ها از قبیل $V_s > 500$ (m/s) و $2.0 \leq Epc_2/Epc_1 \leq 6.0$ که دربرگیرنده تعداد محدودی از سناریوهای لرزه‌ای است، میزان خسارت در مجموعه قابهای بتن مسلح مورد استفاده در مقاله حاضر بیشتر متأثر از نسبت پارامتر بزرگا در لرزه دوم به لرزه نخست می‌باشد.

شکل (۹) مقایسه میزان حساسیت‌پذیری پارامتر شاخص خسارت در قاب-های بتنی تحت زمین‌لرزه‌های منفرد استخراج شده بر مبنای معیارهای PGA،

PGV و EPA

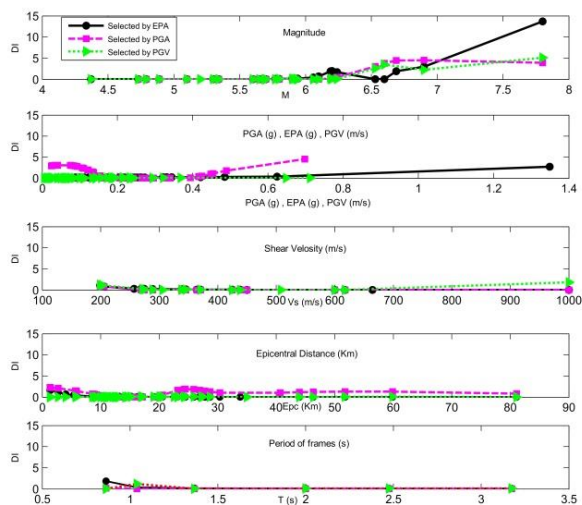


Fig. 9. Damage Index caused by selected single records based on PGA, EPA and PGV)

در دو حالت منفرد و متوالی به صورت همزمان نمایش و در شکل‌های (۹) و (۱۰) مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

شکل (۷) اثر پارامترهای بزرگا، حداکثر سرعت زمین، سرعت موج برشی در ایستگاه ثبت زلزله، فاصله مرکزی از گسل مسبب و زمان تناوب سازه بر شاخص خسارت ناشی از زلزله منفرد استخراج شده بر مبنای معیار PGV

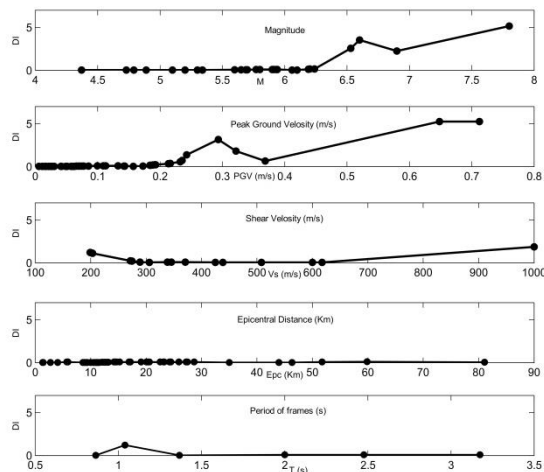


Fig. 7. The effect of Magnitude, PGV, Vs, Epc and T on DI (caused by selected single records based on PGV)

شکل (۸) اثر پارامترهای زمان تناوب سازه، سرعت موج برشی در ایستگاه ثبت زلزله، نسبت بزرگا، نسبت حداکثر سرعت زمین و نسبت فاصله مرکزی از گسل مسبب در لرزه دوم به لرزه نخست بر شاخص خسارت ناشی از زلزله‌های متوالی استخراج شده بر مبنای معیار PGV

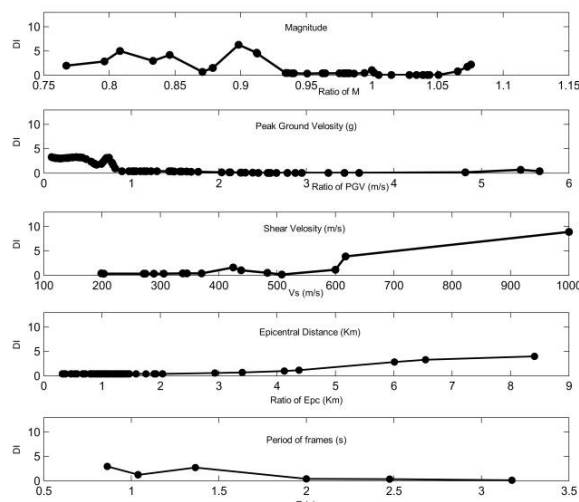


Fig. 8. The effect of T, Vs and the ratio of Magnitude, PGV and Epc on DI (caused by selected consecutive records based on PGV)

با توجه به شکل (۹) می‌توان گفت پارامتر شاخص خسارت در حالت کلی نسبت به پارامتر بزرگا و در مرتبه دوم نسبت به

پارامتری جهت تعیین میزان حساسیت و تأثیرپذیری شاخص خسارت قاب‌های بتنی ۳، ۵، ۷، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ طبقه بتنی در معرض زلزله‌های منفرد و متوالی استخراج شده بر مبنای معیارهای PGA، EPA و PGV انجام گردید. برخی نتایج عبارتند از:

- پارامتر شاخص خسارت (Park-Ang (1985) در سازه‌های بتن‌آرمه تحت زلزله‌های فاقد پدیده توالی لرزه‌ای با بزرگای $M \geq 6.3$ که بر مبنای حداکثر شتاب زمین انتخاب شده‌اند، با افزایش بزرگای افزایش می‌یابد. مادامی که نسبت بزرگای لرزه دوم به لرزه اول (M_2/M_1) در زلزله‌های متوالی استخراج شده بر مبنای PGA کوچکتر از 0.9 باشد، روند تغییرات خسارت ناشی از این زمین‌لرزه‌ها بر سازه‌های بتنی نسبت به افزایش نسبت بزرگای صعودی است. در حالت کلی میزان خسارات ناشی از سناریوهای لرزه‌ای منفرد و متوالی در سازه‌های بتنی به ترتیب بیشتر متأثر از تغییرات بزرگای و نسبت بزرگای می‌باشد.
- متوسط حداکثر شاخص خسارت پیش‌بینی شده در حالت منفرد با تغییرات بزرگای به ترتیب ۰.۳۰، ۰.۶۷، ۰.۶۳ و ۰.۷۰ بیشتر از متوسط حداکثر خسارت تخمین زده شده با تغییرات حداکثر شتاب زمین (حداکثر سرعت زمین، حداکثر شتاب مؤثر)، سرعت موج برشی، فاصله مرکزی زلزله و زمان تناوب می‌باشد. این مقادیر برای شاخص خسارت تخمین زده شده با تغییرات شتاب به ترتیب ۰.۴۴، ۰.۵۳، ۰.۴۷ و ۰.۵۸ بیشتر از متوسط حداکثر خسارت تخمین زده شده با تغییرات بزرگای، سرعت موج برشی، فاصله مرکزی و زمان تناوب می‌باشد.
- متوسط حداکثر شاخص خسارت پیش‌بینی شده ناشی از زمین‌لرزه‌های متوالی با تغییرات نسبت بزرگای به ترتیب ۰.۶۲، ۰.۴۲، ۰.۴۳ و ۰.۵۳ بیشتر از متوسط حداکثر خسارت تخمین زده شده با تغییرات نسبت حداکثر شتاب زمین (حداکثر سرعت زمین، حداکثر شتاب مؤثر)، سرعت موج برشی، نسبت فاصله مرکزی زلزله و زمان تناوب می‌باشد.

شکل (۱۰) مقایسه میزان حساسیت‌پذیری پارامتر شاخص خسارت در قاب‌های بتنی تحت زمین‌لرزه‌های متوالی استخراج شده بر مبنای معیارهای

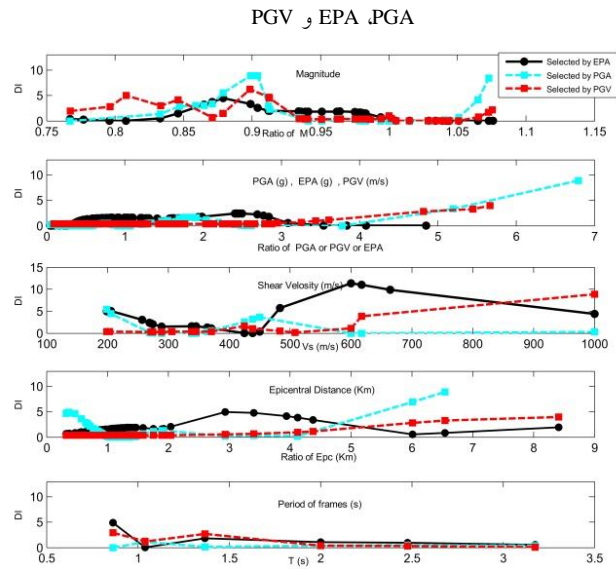


Fig. 10. Damage Index caused by selected consecutive records based on PGA, EPA and PGV)

به گونه‌ای که متوسط حداکثر شاخص خسارت پیش‌بینی شده با تغییرات نسبت بزرگای به ترتیب ۰.۶۲، ۰.۴۲، ۰.۴۳ و ۰.۵۳ بیشتر از متوسط حداکثر خسارت تخمین زده شده با تغییرات نسبت حداکثر شتاب زمین (حداکثر سرعت زمین، حداکثر شتاب مؤثر)، سرعت موج برشی، نسبت فاصله مرکزی زلزله و زمان تناوب می‌باشد.

۶- نتایج

در این مقاله به منظور بررسی تأثیر مشخصات سازه و زمین-لرزه‌های اعمالی در دو حالت منفرد و متوالی بر شاخص خسارت (Park-Ang (1985) سه جامعه آماری متشکل از خصوصیات زمین‌لرزه، سازه و نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی قاب‌های بتنی در محیط نرم افزاری OpenSees تشکیل و با طراحی شبکه‌های عصبی و انتخاب حالت بهینه (از نظر میزان همبستگی و میانگین مربع خطا)، شاخص خسارت با توجه به پارامترهای ورودی تعیین شد. در ادامه با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی ایده‌آل طراحی شده، مطالعه

۷- مراجع

References

- [12] Vamvatsikos D. & Cornell C. A. 2002 Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, **31**:491-514
- [13] Atkinson G. M. 2009 Earthquake Time Histories Compatible with the 2005 NBCC Uniform Hazard Spectrum. *Dept. Earth Sciences, Univ. of Western Ontario*, N6A 5B7. Can. J. Civil Engineering Wordcount: 7245.
- [14] Hancock J., Bommer J. J. & Stafford P. J. 2008 Numbers of scaled and matched accelerograms required for inelastic dynamic analyses. *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, **37**, 1585-1607.
- [15] Iranian building codes and standards, Iranian Code of practice for seismic resistant design of buildings, Standard 2800-05 (3rd Edition). Building and Housing Research Center, HRC-NS 253. (2005), (In Persian).
- [16] Haselton C. B. S., Taylor Lange A. B. Liel. & Deierlein G. G. 2007 Beam-Column Element Model Calibrated for Predicting Flexural Response Leading to Global Collapse of RC Frame Buildings. *report No. PEER Report, 2007/03*. Berkeley Pacific Earthquake Engineering Research Center College of Engineering University of California.
- [17] Huang W., Qian J., Zhuang B. & Fu Q. S. 2014 Damage Assessment of RC Frame Structures under Mainshock-Aftershock Seismic Sequences. *Advanced Material Research*, Vol **446-449**, 2012 pp/ 39-44.
- [18] Nagae T., Ghannoum W. M., Kwon J., Tahara K., Fukuyama K., Matsumori T., Shiohara H., Kabeyasawa T., Kono S., Nishiyama M., Sause R., Wallace J. W. & Moehle J. P. 2015 Design Implications of Large-Scale Shake-Table Test on Four-Story Reinforced Concrete Building. *ACI STRUCTURAL JOURNAL, TECHNICAL PAPER. ACI Structural Journal*, V. **112**, No. 1-6.
- [19] Hagan M. 2014 Neural Network Design. 2nd Edition, eBook. Oklahoma State University Stillwater, Oklahoma. OVERHEADS and DEMONSTRATION PROGRAMS can be found at the following website: hagan.okstate.edu/nnd.html.
- [20] Vanluchene D. & Sun, R. 1990 Neural networks in structural engineering. *Microcomput. Civ. Eng.*, **5** (3), 207-215.
- [21] Hajela P. & Berke L. 1991 Neurobiological computational models in structural analysis and design. *Comput. Struct.*, **41**(4), 657-667.
- [22] Wu X., Ghaboussi J. & Garrett, J. H., Jr. 1992 Use of neural networks in detection of structural damage. *Comput. Struct.*, **42** (4), 649-659.
- [1] U.S. Geological Survey (USGS). "Magnitude 8.6, off the west coast of Northern Sumatra". <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/recenteqsww/Quakes>. (2012).
- [2] Lew M., Naeim F., Huang S. C., Lam H. K. & Carpenter L. D. 2000 Geotechnical and geological effects of the 21 September 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Struct. Des. Tall. Spec. Build.*, **9**(2), 89-106.
- [3] Zhai Ch., Chang Zh., Li Sh. & Xie L. 2015 Seismic analyses of a RCC building under mainshock-aftershock sequences. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **74**, 46-55.
- [4] Han R., Li Y. & Lindt J. 2014 Seismic risk of base isolated non-ductile reinforced concrete buildings considering uncertainties and mainshock-aftershock sequences. *Structural Safety*, **50**, 39-56.
- [5] Li Y., Song R. & Lindt J. W. 2014 Collapse Fragility of Steel Structures Subjected to Earthquake Mainshock-Aftershock Sequences. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, ISSN 0733-9445/04014095(10).
- [6] Song R., Li Y. & Van de Lindt J. W. 2016 Loss estimation of steel buildings to earthquake mainshock-aftershock sequences. *Structural Safety*, **61**, 1-11.
- [7] Zhai Ch., Wen W., Li Sh., Chen Zh., Chang Zh., & Xie L. 2014 The damage investigation of inelastic SDOF structure under the mainshock- aftershock sequence- type ground motions. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, **59**, 30-41.
- [8] Song R., Li Y. & Lindt J. W. 2014 Impact of earthquake ground motion characteristics on collapse risk of post-mainshock buildings considering aftershocks. *Engineering Structures*, **81**, 349-361.
- [9] Dworakowski Z., Ambrozinski L., Dragan K., Stepinski T. & Uhl T. 2014 VOTING NEURAL NETWORK CLASSIFIER FOR DETECTION OF FATIGUE DAMAGE IN AIRCRAFTS. 7th *European Workshop on Structural Health Monitoring*. Nantes, France.
- [10] Park J. & Ang A. H. S. 1985 MECHANISTIC SEISMIC DAMAGE MODEL FOR REINFORCED CONCRETE. *Journal of Structural Engineering*, Vol. III, No. **4**, April, 1985. ASCE, ISSN 0733-9445/85/0004-072.
- [11] Ghodrati Amiri G. & Manouchehri Dana F. 2005 Introduction of the most suitable parameter for selection of critical earthquake. *Computers and Structures*, **83**, 613-626.

Index of Sensitivity to Damage in Reinforced Concrete Frames under Seismic Sequence Using Artificial Neural Networks

Gholamreza. Ghodrati Amiri^{1*}, Elham. Rajabi²

1- Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science & Technology

2- PhD student, School of Civil Engineering, Iran University of Science & Technology

*ghodrati@iust.ac.ir

Abstract:

In seismic active zones, large mainshocks usually follow by numerous aftershocks. Because of the short time intervals between consecutive shocks, additional damage is increased, due to the accumulation of inelastic deformations from all sequences, and the structures, already damaged by the preceding shock, collapse before any repair is possible. Moreover, despite the importance of seismic sequence phenomena in increased damage and the evidence of structural damage caused by the recent multiple earthquakes such as those in Nepal and Hindu-Kush (2015), most structures are designed according to the modern seismic codes which only apply a single earthquake on the structure in the analysis and design process. In this case, the structure may bear the damage in the event of the "Design earthquake", and this single seismic design philosophy does not take the effect of strong successive shocks on the accumulated damage of structures into account. For this reason, the effect of various parameters such as Peak Ground Acceleration, Magnitude, Shear Velocity Wave, Effective Peak Acceleration, Peak Ground Velocity, Epicentral distance, time gap between first and second earthquakes, Period of reinforced concrete frames etc., is examined on the damage of reinforced concrete frames under single and consecutive earthquakes. First, six concrete moment resisting frames with 3, 5, 7, 10, 12 and 15 stories, are designed according to the Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (i.e. Standard No. 2800 guideline), and analyzed under three different databases with/without seismic sequences phenomena. For each database, single and consecutive earthquakes are selected according to Peak Ground Acceleration (PGA), Effective Peak Acceleration (EPA) and Peak Ground Velocity (PGV) criteria from Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) and United States Geological Survey's Earthquake Hazards (USGS) centers. In the next step, in order to train the multilayer artificial neural networks with back-propagation learning algorithm, period of reinforced concrete frames (T) and some of earthquake features including PGA, PGV, EPA, magnitude (M), shear wave velocity in the station (Vs), epicentral distance (Epc) and time gap between consecutive earthquakes (Tg) are selected as artificial neural network inputs. Park-Ang (1985) damage index is selected as the results of nonlinear dynamic analysis in OpenSees software and neural network target. For each database, 400 neural networks are designed with a different number of neurons in each hidden layer from 1 to 20 and ideal neural network is determined with the minimum value of Mean Square Error (MSE) and maximum value of regression (R) among all networks. Thereafter, for considering the effect of input parameters on structural damage (Park – Ang 1985), caused by single and consecutive seismic scenario, the range and reference values for each group of input parameters – single and consecutive cases in each database – are chosen to be close to the median values. They are introduced to ideal neural networks, and damage indices are determined. The results show that structural damage, caused by seismic scenarios with/without sequence, is more sensitive than other parameters to Magnitude and Acceleration, for single earthquakes, and to the ratio of these parameters in the second shake to the first, for consecutive shocks.

Keywords: Neural network, Damage Index, Seismic Sequence, Nonlinear Dynamic Analysis