

## بررسی آسیب پذیری قابهای خمشی فولادی با استفاده از شاخص تجمعی کرزینگ در شکل پذیری هدف تحت زلزله های حوزه نزدیک

محسن گرامی

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان  
mgerami@semnan.ac.ir

علی اکبر دارستانی

دانشجوی کارشناسی ارشد عمران گرایش زلزله، دانشگاه سمنان  
ali.darestani90@gmail.com

کلید واژه‌ها: آسیب پذیری، قاب خمشی فولادی، شاخص تجمعی کرزینگ، شکل پذیری هدف، نزدیک گسل

### چکیده

امروزه در بسیاری از نقاط جهان از جمله ایران، ویران کننده ترین تهدید طبیعی برای سازه ها، ارتعاشاتی است که در اثر تحریکات زلزله بر سازه وارد می‌گردد. به همین دلیل یکی از وظایف اصلی مهندسین، ساخت سازه هایی می‌باشد که در اثر زلزله بتوانند عملکرد مناسبی داشته باشند. به منظور رسیدن به این هدف، بایستی پاسخ سازه را تحت اثر تحریکات زلزله به درستی تخمین زده و سازه را برای آن نیازها طراحی کرد. با توجه به این موضوع که در تحلیل خسارت وارد بر یک سازه پس از رخداد یک زلزله ی مخرب، برآورد میزان دقیق خسارت وارد بر هر نقطه از سازه غیر ممکن به نظر می‌رسد، لذا معرفی شاخص خرابی برای ارزیابی میزان خسارت وارد بر المان های سازه ضروری می‌باشد. در این مقاله از شاخص خسارت تجمعی کرزینگ که بر مبنای انرژی مستهلک شده در اعضا می‌باشد، به منظور ارزیابی خسارت وارد بر تیرهای قاب های خمشی فولادی مورد نظر تحت اثر زلزله های نزدیک گسل استفاده شده است. سازه های مورد استفاده در این پژوهش، قابهای خمشی فولادی دوبعدی ۷،۴ و ۱۰ طبقه می‌باشد که در شکل پذیری هدف ۳ با استفاده از نرم افزار opensees مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته اند. در این پژوهش از ۷ جفت شتاب نگاشت نزدیک گسل در دو امتداد عمود بر گسل و موازی با گسل استفاده شده است. زلزله ها به گونه ای مقیاس شده اند که تمامی قابهای مورد نظر به شکل پذیری هدف ۳ برسند. نتایج نشان می‌دهد که در قابهای مورد مطالعه تأثیر مؤلفه ی موازی با گسل زلزله بیشتر از مؤلفه ی عمود بر گسل است بطوریکه در سازه ی ۴ طبقه مقدار شاخص در طبقه ای که بیشترین خسارت در تیر آن ایجاد شده، تحت مؤلفه ی موازی با گسل حدود ۴۰٪ بیشتر از مؤلفه ی عمود بر گسل بدست آمده است که این اختلاف با افزایش تعداد طبقات کاهش می‌یابد بطوریکه ممکن است در سازه های بلند مرتبه، مؤلفه ی عمود بر گسل زلزله غالب شود.

### مقدمه

عملکرد لرزه ای یک ساختمان در طول زلزله بستگی به پارامترهای متعددی مانند پیکربندی سازه، مصالح و سیستم سازه ای و غیره دارد. بنابراین پیش بینی عملکرد لرزه ای برای ساختمان یا طراحی و ارزیابی تمام این پارامترها را در بر گیرد. (Seung-Yul et al. 2002) اگرچه در زلزله های اخیر، سازه های طراحی شده بر اساس ضوابط لرزه ای موجود در حفظ ایمنی افراد عملکرد مناسبی داشته اند، اما دامنه ی خرابی های ایجاد شده در سازه ها و خسارت اقتصادی وارده، بسیار گسترده و خارج از انتظار بوده است. از این رو طراحی بر اساس عملکرد، به عنوان روشی که مبتنی بر پذیرش تغییر مکان و شکل پذیری مورد انتظار باشد، مورد توجه قرار گرفت. از مهمترین مسائل در طراحی عملکردی، داشتن تصویری روشن از مقدار خسارت وارد بر سازه ی طراحی شده در سطوح مختلف خطر می‌باشد. (ایزدپناه و همکاران ۱۳۸۹) به منظور تعیین آسیب پذیری اعضای سازه‌ای، از سالیان گذشته محققین زیادی درصدد تعیین توابع عددی جهت بیان میزان آسیب پذیری اعضا و کل سازه بوده اند. بررسی آسیب پذیری سازه‌ها به دو صورت کیفی و کمی انجام می‌شود. در روش کیفی که یک روش تقریبی است با توجه به شرایط لرزه خیزی منطقه و تجربه زلزله‌های گذشته و قضاوت مهندسی، اقدام به تهیه ی فرم های ویژه ای می‌گردد که با بازرسی ساختمان ها، اطلاعات مورد نیاز آنها جمع آوری می‌شود و با تجزیه و تحلیل آنها یک برآورد تقریبی از میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌ها استخراج می‌گردد و در نهایت یک یا چند مدل خرابی

ارائه می‌گردد. در مدل‌های خرابی کمی، با ارائه‌ی یک مدل ریاضی و تعیین مقدار عددی به عنوان شاخص خرابی، آسیب وارد بر سازه به صورت تابعی از مقاومت و شکل پذیری سازه و یا شدت زلزله بیان می‌شود (همتی و گرامی، ۱۳۹۱). به منظور بیان عددی خسارت جهت انجام مقاوم سازی می‌توان از شاخص‌های خرابی کمک گرفت. در این تحقیق، به منظور ارزیابی آسیب پذیری تیرهای قاب خمشی فولادی، از شاخص کرزینگ که یک شاخص تجمعی بر مبنای انرژی است، استفاده شده است.

## شاخص خرابی استفاده شده در این تحقیق

### شاخص خرابی کرزینگ

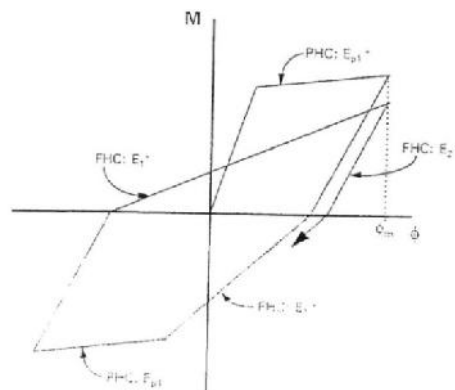
انرژی مستهلک شده در عضو معمولاً ناشی از جاری شدن مصالح و میرایی در عضو است. این شاخص از مجموع این انرژی‌ها به عنوان پارامتر نشانگر خرابی استفاده می‌کند. محاسبه این شاخص از طریق روابط ۱ تا ۳ امکان پذیر می‌باشد (۲).

$$D_{Kratzig} = D^+ + D^- - D^+ \times D^- \quad (1)$$

$$D^+ = \frac{\sum E_{p,i}^+ + \sum E_i^+}{E_f^+ + \sum E_i^+} \quad (2)$$

$$D^- = \frac{\sum E_{p,i}^- + \sum E_i^-}{E_f^- + \sum E_i^-} \quad (3)$$

همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود چرخه هیسترتیک عضو به چهار بخش تقسیم شده است. عبارت PHC نشان دهنده قسمتی از چرخه هیسترتیک است که در آن ممان و چرخش هم علامت هستند و عبارت FHC نشان دهنده یک چهارم چرخه بعد از PHC است تا حدی که در آن قدر مطلق ممان حداکثر عضو از PHC قبلی بیشتر نشود. عبارت مثبت و یا منفی نیز به علامت حداکثر ممان در PHC قبلی بستگی دارد.



شکل ۱: پارامترهای شاخص خرابی کرزینگ (Kratziy et al. 1989)

## بررسی مدل‌های سازه‌ای

در این بخش قاب‌های طراحی شده جهت تحلیل‌های غیرخطی تحت زلزله‌هایی که در ادامه معرفی خواهند شد، ارائه می‌گردد. جهت طراحی قاب‌ها از نرم افزار ETABS-9.7.4 استفاده شده است.

برای بررسی هر چه دقیقتر پارامترهای آورده شده در بخش‌های قبل، یک گروه قاب فولادی با سیستم قاب خمشی با شکل پذیری متوسط انتخاب شده است. این گروه قاب‌های ۴، ۷ و ۱۰ طبقه و ۵ دهانه می‌باشند. ارتفاع طبقات برابر با ۴ متر و قاب‌ها دارای دهانه‌های ۵ متر هستند. جهت محاسبه نیروی زلزله از استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش سوم استفاده شده است. سازه‌ها بر روی خاک نوع ۳ قرار گرفته‌اند؛ سازه‌های فوق با اهمیت متوسط هستند. سیستم سازه‌ای، قاب خمشی فولادی متوسط می‌باشد و ضریب رفتار (R) طبق استاندارد ۲۸۰۰ برابر ۷ در نظر گرفته می‌شود (استاندارد ۲۸۰۰) (۱۳۸۴) درصد مشارکت بار زنده و بار برف در محاسبه نیروی جانبی زلزله ۲۰٪ در نظر گرفته می‌شود؛ درصد میرایی نیز ۵٪ در نظر گرفته شده است. فولاد در نظر گرفته شده برای تحلیل و طراحی از نوع ST-37 با مقاومت ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و مدول الاستیسیته  $2.1 \times 10^6$  کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد. مقطع تیرهای قاب‌ها از نوع تیر ورق و مقطع ستون‌های قاب‌ها از نوع قوطی می‌باشد. طراحی به روش تنش مجاز بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان - ۱۳۸۷ انجام شده است. در جدول ۱ مشخصات مقاطع مورد استفاده در سازه‌ها نشان داده شده است.



جدول ۱: مشخصات مقاطع مورد استفاده در سازه های ۴ طبقه، ۷ طبقه و ۱۰ طبقه

طبقه	قاب ۴ طبقه		قاب ۷ طبقه		قاب ۱۰ طبقه			
	تیر	ستون	تیر	ستون	تیر	ستون		
۱	PG40X1.5	BOX40X1	PG40X2	BOX40X1.5	PG50X2	BOX40X2		
۲	PG40X1.5	BOX40X1	PG40X2	BOX40X1.5	PG50X2	BOX40X2		
۳	PG40X1	BOX30X1	PG40X2	BOX40X1.5	PG40X2	BOX40X2		
۴	PG40X1	BOX30X1	PG40X1.5	BOX40X1	PG40X2	BOX40X1.5		
۵			PG40X1.5	BOX40X1	PG40X1.5	BOX40X1.5		
۶			PG40X1	BOX30X1	PG40X1.5	BOX40X1.5		
۷			PG40X1	BOX30X1	PG40X1.5	BOX40X1		
۸							PG40X1.5	BOX40X1
۹							PG40X1	BOX35X1
۱۰							PG40X1	BOX35X1

### زمین لرزه های مورد استفاده

برای انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی لازم است که تعدادی شتاب نگاشت متناسب با مشخصات ژئوتکنیکی و شرایط خاک محل احداث پروژه انتخاب گردد و این شتاب نگاشت ها با طیف طرح منطقه سازگار باشند. در این تحقیق به منظور ارزیابی آسیب پذیری قابهای خمشی فولادی در حوزه نزدیک از ۷ جفت شتاب نگاشت نزدیک گسل که بر مبنای رسیدن سازه به شکل پذیری هدف ۳ مقیاس شده اند استفاده شده است. تمامی رکوردها از کارهای تحقیقاتی BAKER گرفته شده است. مشخصات رکوردهای مورد استفاده در جداول ۲ و ۳ آمده است.

جدول ۲: مشخصات زلزله های نزدیک گسل و ضرایب مقیاس بدست آمده در شکل پذیری هدف ۳ برای مولفه عمود بر گسل (SN)

زلزله	ایستگاه	بزرگا (ریشتر)	فاصله از گسل (کیلومتر)	PGA(g)	ضریب مقیاس		
					سازه ۴ طبقه	سازه ۷ طبقه	سازه ۱۰ طبقه
Imperial Valley	El Centro Array #8	۶/۵۳	۱۰/۱۱	۰/۴۶۸	۱/۵۰۳۴	۱/۸۸۶۵	۱/۷۰۴
Imperial Valley	EC Meloland Overpass FF	۶/۵۳	۱۰/۱۱	۰/۳۷۸	۰/۶۳۷	۰/۵۱۸۸	۰/۴۲۰۱
Landerz	Yermo Fire Station	۷/۲۸	۶/۹۹	۰/۲۳۵۸	۰/۶۷۲	۰/۴۷۴۳	۰/۸۱۵۴
Northridge	Newhall - Fire Sta	۶/۶۹	۱۹/۵۰	۰/۷۲۳۶	۰/۶۳۸۵	۱/۲۶۰۷	۱/۳۳۱۵
Northridge	Sylmar - Converter Sta East	۶/۹۶	۱۹/۵۰	۰/۸۲۸۵	۱/۷۹۵	۱/۴۹۷۷	۱/۴۷۴۴
Chi Chi	CHY101	۷/۶۲	۱۱/۳۹	۰/۳۸۳	۰/۹۴۱۸	۱/۱۶۸	۰/۸۶۵
Kobe	KJMA	۶/۹۰	۱۷/۴۷	۰/۸۵۴۳	۰/۶۴۲۲	۱/۱۴۸۹	۱/۰۷۳۷

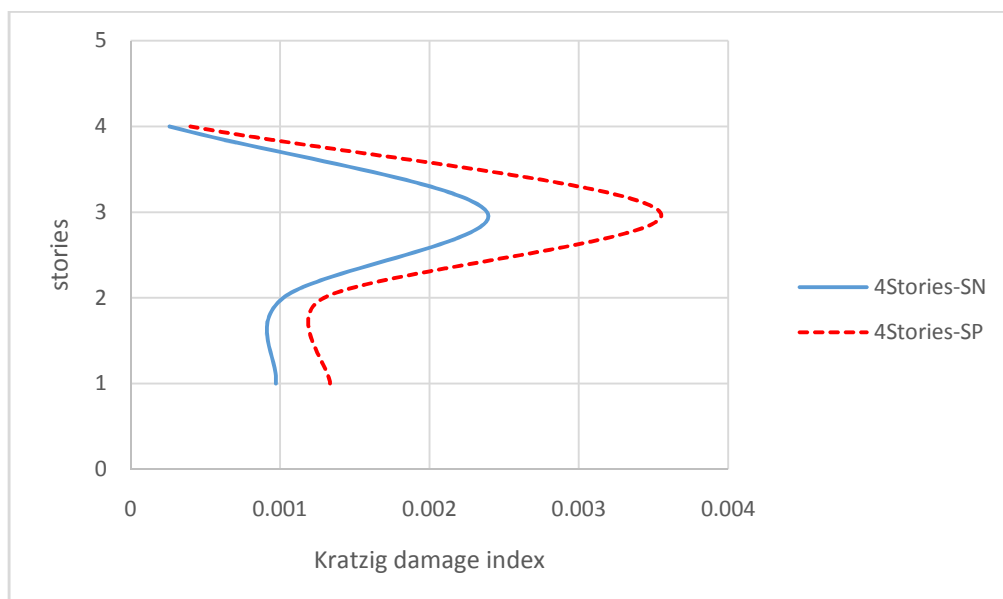


جدول ۳: مشخصات زلزله های نزدیک گسل و ضرایب مقیاس بدست آمده در شکل پذیری هدف ۳ برای مولفه موازی با گسل (SP)

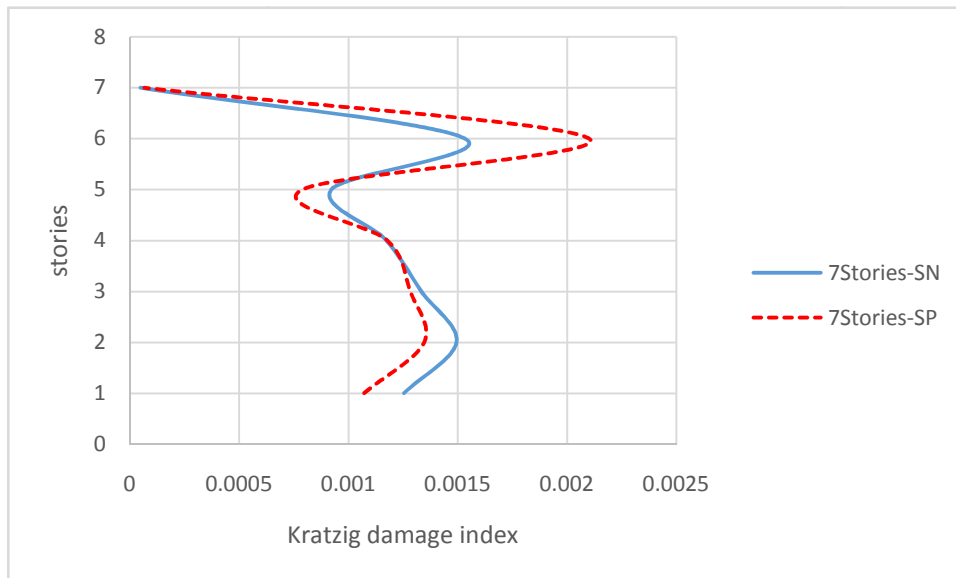
زلزله	ایستگاه	بزرگا (ریشتر)	فاصله از گسل (کیلومتر)	PGA(g)	ضریب مقیاس		
					سازه ۴ طبقه	سازه ۷ طبقه	سازه ۱۰ طبقه
Imperial Valley	El Centro Array #8	۶/۵۳	۱۰/۱۱	۰/۵۹۰۳	۱/۶۱۶۸	۱/۶۵۱	۱/۷۶۴۶
Imperial Valley	EC Meloland Overpass FF	۶/۵۳	۱۰/۱۱	۰/۲۶۶۲	۱/۲۵۴۲	۱/۰۴۹۴	۱/۲۶۳۵
Landerz	Yermo Fire Station	۷/۲۸	۶/۹۹	۰/۱۸۴۷	۱/۳۰۰۶	۰/۹۲۹۶	۰/۸۶۴
Northridge	Newhall - Fire Sta	۶/۶۹	۱۹/۵۰	۰/۶۵۰۶	۲/۰۱۸۸	۲/۲۵۳	۲/۲۸۳۱
Northridge	Sylmar - Converter Sta East	۶/۹۶	۱۹/۵۰	۰/۵۲۷۷	۰/۶۲۷۸	۰/۶۰۹۶	۰/۸۷۳۶
Chi Chi	CHY101	۷/۶۲	۱۱/۳۹	۰/۴۲۸۶	۰/۶۳۶	۰/۷۲۳۷	۰/۶۰۵۴
Kobe	KJMA	۶/۹۰	۱۷/۴۷	۰/۵۴۸۳	۱/۰۵۹	۱/۳۵۵۵	۲/۱۳۲۹

### مطالعه عددی

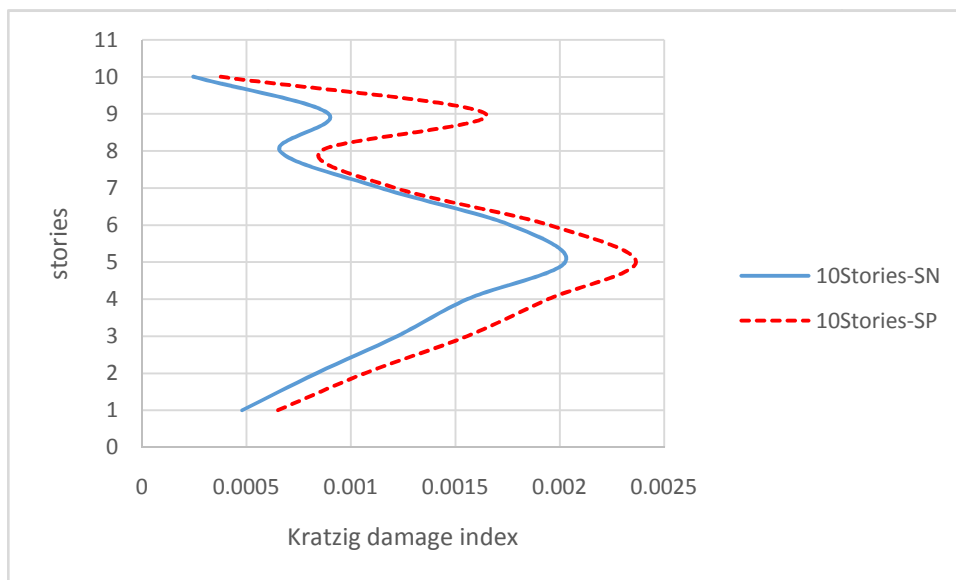
در این بخش به بررسی عملکرد شاخص خرابی کرزینگ در تعیین آسیب پذیری قابهای مورد نظر پرداخته می شود. بدین منظور، تحلیل آسیب پذیری قابهای خمشی فولادی ۴، ۷ و ۱۰ طبقه با استفاده از شاخص خرابی کرزینگ با نرم افزار Opensees [۳] انجام شده است. مقادیر شاخص توسط میانگین گیری از نتایج بدست آمده از ۷ جفت شتاب نگاشت در دو جهت عمود بر گسل و موازی با گسل بدست آمده است. در هر قاب مورد مطالعه، مقادیر بدست آمده از شاخص، برای دو مؤلفه ی عمود و موازی با گسل شتاب نگاشت های مورد نظر که همگی در حوزه ی نزدیک می باشند، مقایسه شده اند. در اشکال ۲ تا ۴، مقدار شاخص خرابی کرزینگ در المان های تیر ۵ متری در قابهای ۴، ۷ و ۱۰ طبقه در شکل پذیری هدف ۳ نمایش داده شده است که در هر شکل، مقادیر شاخص در هر قاب برای دو مؤلفه ی عمود بر گسل و موازی با گسل مقایسه شده است.



شکل ۲: مقایسه آسیب پذیری قاب ۴ طبقه فولادی تحت زلزله عمود بر گسل (SN) و زلزله موازی با گسل (SP) در شکل پذیری هدف ۳



شکل ۳: مقایسه آسیب پذیری قاب ۷ طبقه فولادی تحت زلزله عمود بر گسل (SN) و زلزله موازی با گسل (SP) در شکل پذیری هدف ۳



شکل ۴: مقایسه آسیب پذیری قاب ۱۰ طبقه فولادی تحت زلزله عمود بر گسل (SN) و زلزله موازی با گسل (SP) در شکل پذیری هدف ۳

همانطور که مشاهده می‌شود در المان‌هایی که رفتار آنها غیر الاستیک نمی‌باشد، مقدار شاخص عددی بسیار کوچک و نزدیک به صفر می‌باشد و در بقیه ی المان‌ها شاخص خسارت عدد بزرگتری دارد. در تمامی مدل‌های مورد مطالعه، مقادیر بدست آمده از شاخص تحت مؤلفه ی موازی با گسل زلزله، بزرگتر از مؤلفه ی عمود بر گسل آن است و این بدین معنی است که مؤلفه ی موازی با گسل زلزله، تأثیر بیشتری بر سازه داشته و خرابی بیشتری در آن ایجاد می‌کند. به عنوان مثال، در قاب ۴ طبقه که بیشترین خرابی در طبقه ی سوم ایجاد شده است، مقدار شاخص برای مؤلفه ی موازی با گسل ۰/۰۰۳۵ بوده در حالیکه، این عدد برای مؤلفه ی عمود بر گسل ۰/۰۰۲۴ می‌باشد که مقدار شاخص در مؤلفه ی موازی حدود ۴۵٪ بیشتر از مؤلفه ی عمود است. در سازه ی ۷ طبقه، بیشترین آسیب در طبقه ی ششم ایجاد شده است. عدد شاخص برای مؤلفه ی موازی با گسل ۰/۰۰۲۱ و برای مؤلفه ی عمود ۰/۰۰۱۵ می‌باشد که اختلاف این دو حدود ۴۰٪ است. در قاب ۱۰ طبقه، بیشترین آسیب در طبقه ی پنجم رخ داده است که مقدار شاخص کرزینگ در این طبقه برای مؤلفه ی موازی ۰/۰۰۲۴ و برای مؤلفه ی عمود ۰/۰۰۲ می‌باشد که عدد شاخص مؤلفه ی موازی با گسل حدود ۲۰٪ بیشتر از مؤلفه ی عمود است. از این سه نمودار می‌توان به این نتیجه رسید که تأثیر مؤلفه ی موازی با گسل در زلزله‌های حوزه ی نزدیک، بیشتر از مؤلفه ی عمود آن می‌باشد که با افزایش تعداد طبقات عدد شاخص در این دو مؤلفه به یکدیگر نزدیک می‌شود که ممکن است حتی در سازه‌های بلندمرتبه، مؤلفه ی عمود بر گسل غالب شود.

## نتیجه گیری

در این پژوهش، به بررسی شاخص خسارت کرزینگ که یک شاخص تجمعی بر پایه ی انرژی می باشد، پرداخته شد. با استفاده از این شاخص، قابهای مورد نظر تحت ۷ جفت شتاب نگاشت در دو جهت عمود بر گسل و موازی با گسل، مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته و نتایج زیر بدست آمد:

- با توجه به این موضوع که ماهیت زلزله به صورت رفت و برگشتی می باشد، بایستی از شاخص هایی برای بررسی آسیب پذیری سازه ها استفاده کرد که اثر تجمعی زلزله را در نظر بگیرند که شاخص کرزینگ این خصوصیت را دارا می باشد.
- زلزله های نزدیک گسل دارای دو مؤلفه ی افقی عمود بر گسل (SN) و موازی با گسل (SP) می باشند که از نتایج بدست آمده مشخص شد که در قابهای مورد مطالعه تأثیر مؤلفه ی موازی با گسل به مراتب بیشتر از مؤلفه ی عمود بر آن می باشد که با افزایش تعداد طبقات، اختلاف این دو مؤلفه کمتر می شود و حتی ممکن است در سازه های بلندمرتبه، مؤلفه ی عمود بر گسل زلزله غالب شود.
- با افزایش تعداد طبقات معمولاً مقدار شاخص خسارت کاهش می یابد که این اثر به نوع زمین لرزه های مورد بررسی مرتبط می باشد. با توجه به اینکه زلزله ها از نوع نزدیک به گسل هستند و در سازه های با زمان تناوب کمتر، خسارت بیشتری را ایجاد می کنند.

## فهرست مراجع

ایزدپناه، مهدی، حبیبی، علیرضا، یزدانی، آزاد، ارزیابی خسارت وارد بر قاب های خمشی بتن مسلح با استفاده از تحلیل بارافزون، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۹.

آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)، ویرایش سوم، وزارت مسکن و شهرسازی، ۱۳۸۴.

همتی، سهیل، گرامی، محسن، بررسی عملکرد شاخص های خرابی تجمعی موضعی در تحلیل لرزه ای قاب خمشی فولادی، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه سمنان، ۱۳۹۱.

Kratzig.WB, Meyer.JF, Meskouris.k. Damage Evolution in Reinforced Concrete Members under Cyclic Loading; 5 th International Conference on Structural Safety and Reliability 1989 (ICOSSAR,89) . San Francisco CA.

Opensees Development Team (Open source project). Opensees: open system for earthquake engineering simulation. Berkeley (CA): Pacific earthquake engineering research center, University of California, 2008.

Seung-Yul Yun, Ronald O. Hamburger, C.Allin Cornell, M.ASCE and Douglas A.Foutch, Seismic Performance Evaluation for Steel Moment Frames, Journal of Structural Engineering, April 2002, pp.534-545.

