



## اصلاح ضریب رفتار ناشی از شکل‌پذیری در سازه‌های چند درجه آزادی در زلزله با مشخصات نزدیک گسل

سید بهرام بهشتی اول\*، شیمیا کبیری

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۲ آذر ۱۳۹۰  
بازنگری: ۲۹ فروردین ۱۳۹۴  
پذیرش: ۴ بهمن ۱۳۹۴  
ارائه آنلاین: ۲۹ شهریور ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

ضریب کاهش مقاومت  
نزدیک به گسل  
شکل‌پذیری  
سازه چند درجه آزادی

**چکیده:** سازه‌های یک درجه آزادی، ابزار مناسبی برای برآورد پاسخ نیاز لرزه‌ای سازه‌های واقعی هستند. اما لازم است تا اطلاعات بدست آمده از مدل یک درجه آزادی برای استفاده در برآورد پاسخ سازه‌های واقعی چند درجه آزادی (که مدهای مختلف جابجایی در رفتار آن‌ها نقش دارند)، اصلاح شوند. از آنجایی که امروزه اکثر خرابی سازه‌ها مربوط به ساخت‌وسازها در نواحی نزدیک به گسل است، بنابراین هدف از این مطالعه، اصلاح روابط ضریب رفتار سازه‌های یک درجه آزادی برای استفاده در سازه‌های چند درجه آزادی در محدوده نزدیک به گسل است. این موضوع از طریق محاسبه نسبت مقاومت سازه چند درجه آزادی به مقاومت سازه یک درجه آزادی معادل با آن با زمان تناوب و سطح شکل‌پذیری مشابه و تحت رکورد زلزله با ضریب مقیاس یکسان صورت گرفته است. به این ترتیب، چهار سازه فلزی ممان خمشی در دو سازوکار شکست تیر مفصل و طبقه نرم مدلسازی شده‌اند. سازه‌ها در پنج نسبت شکل‌پذیری هدف تحت پانزده رکورد زلزله در محدوده نزدیک به گسل با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده، ارزیابی دینامیکی غیرخطی شده‌اند. عامل اصلاحی ضریب رفتار به صورت طیف‌هایی بر حسب زمان تناوب و تعداد طبقات سازه ارائه شده است. این ضرایب با ضرایب مشابه موجود برای مناطق دور از گسل در نواحی مختلف زمان تناوب سازه مقایسه شده‌اند. نسبت ضریب اصلاحی به نوع سازوکار شکست و سطح شکل‌پذیری سازه بسیار وابسته بوده و به زمان تناوب و تعداد طبقات سازه به مقدار کمتری وابسته است. همچنین ملاحظه شده است که ضریب اصلاحی در شکل‌پذیری‌های پایین در زمان‌های تناوب کوتاه کمتر از مقادیر متناظر به نواحی دور از گسل است. در شکل‌پذیری‌های بالا در تمامی محدوده زمان تناوب، مقادیر این ضریب کمتر از نواحی دور از گسل برآورد شده است. در نهایت، روابط تقریبی برای ضریب اصلاحی مؤلفه ضریب رفتار ناشی از شکل‌پذیری سازه‌ها ارائه شده است.

### ۱- مقدمه

امروزه اکثر سازه‌ها برای مقاومتی کمتر از مقاومت لازم متناظر با رفتار الاستیک طراحی می‌شوند. مقاومت مورد نیاز سازه با تقسیم مقاومت الاستیک بر ضریب کاهش مقاومت سازه برآورد می‌شود. این ضریب ناشی از مؤلفه‌های مختلفی است که از مهمترین آن‌ها می‌توان به سطح شکل‌پذیری سازه اشاره نمود. تاکنون روابط زیادی برای محاسبه ضریب کاهش مقاومت مورد تقاضای سازه ارائه شده است که بیشتر آن‌ها بر مبنای رکوردهای زلزله در نواحی دور از گسل بدست آمده‌اند [۱-۳]. معمولاً روابط موجود برای محاسبه ضریب کاهش مقاومت ناشی از شکل‌پذیری بر اساس تحلیل سازه‌های یک درجه آزادی بدست آمده‌اند و مطالعات کمی در زمینه اصلاح ضریب کاهش مقاومت در سازه‌های چند درجه آزادی صورت گرفته است [۴-۶] و بر طبق این مطالعات، از آنجایی که سازه‌های واقعی چند درجه آزادی هستند و مدهای مختلف جابجایی و پیچشی در رفتار آن‌ها نقش دارد،

بنابراین لازم است تا ضریب کاهش مقاومت بدست آمده از سازه‌های یک درجه آزادی به کمک تعریف یک ضریب اصلاح شود. از مهمترین نتایج بدست آمده از این مطالعات می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

الف) بیشینه تقاضای شکل‌پذیری طبقات در سیستم‌های چند درجه آزادی، تفاوت بسیاری را با مقدار متناظر آن در سازه یک درجه آزادی معادل با آن دارد و مقدار آن نیز بیشتر از شکل‌پذیری سازه یک درجه آزادی معادل با آن است. میزان این اختلاف با افزایش زمان تناوب سازه و نسبت شکل‌پذیری افزایش می‌یابد [۴،۶].

ب) مدهای مختلف پاسخ و سازوکار خرابی سازه، نقش مهمی را در میزان مقاومت جانبی سازه چند درجه آزادی برای حفظ سطح شکل‌پذیری هدف دارا هستند [۲]. این در حالی است که بزرگای زلزله و نوع خاک، اثر قابل ملاحظه‌ای نداشته‌اند [۳،۶،۷].

مبنای تحلیل‌ها در کلیه مطالعاتی که در ارتباط با اصلاح ضریب کاهش مقاومت به دلیل اثر تعدد درجات صورت گرفته است، رکوردهای موجود در نواحی دور از گسل بوده‌اند. اما از آنجایی که امروزه اکثر خرابی سازه‌ها

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: beheshti@kntu.ac.ir

شده است [۸]. از آنجایی که پالس ناشی از اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده در جهت عمود بر گسل به وجود می‌آید، بنابراین مؤلفه عمود بر گسل رکوردها برای شناسایی و انتخاب رکوردها در نظر گرفته شده است. بررسی چشمی رکورد سرعت عمود بر گسل در رکوردهای انتخاب‌شده، وجود پالس واضحی را در آن تأیید می‌کند و سرعت بیشینه مؤلفه عمود بر گسل نیز بزرگتر از ۳۰ سانتی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین شاخص پیش‌روندگی هندسی سامرویل<sup>۱</sup> ( $X \cdot \cos\theta$  و  $Y \cdot \cos\phi$ ) برای کلیه رکوردها بزرگتر از ۰/۳ است [۹]. از آنجایی که حرکات پالس‌گونه از مشخصات رکوردهای نزدیک به گسل است، بنابراین زمان تناوب پالس معادل با این رکوردها از مؤلفه‌های اصلی این حرکات پالس‌گونه خواهد بود. اکثر محققین، زمان تناوب پالس را بر اساس نمودار تاریخچه زمانی رکورد سرعت و مطابق با طول زمانی پالس غالب موجود در آن محاسبه می‌کنند. پالس معادل برای هر رکورد در رکوردهای معرفی‌شده بر اساس مطالعات قبلی ارائه شده است [۱۰]. در جدول ۱ مشخصات رکوردهای مورد استفاده نشان داده شده‌اند.

### ۳- فرضیات مدل‌سازی

از آنجایی که هیچ دو سازه‌ای مشابه با یکدیگر نیستند و رفتار دینامیکی

<sup>۱</sup> P. G. Somerville et al.

مربوط به ساخت‌وساز در نواحی نزدیک به گسل است، بنابراین هدف از این مطالعه اصلاح روابط ضریب کاهش مقاومت سازه‌های یک درجه آزادی برای استفاده در سازه‌های چند درجه آزادی در محدوده نزدیک به گسل است. به این منظور، به بررسی پاسخ سازه‌های چند درجه آزادی و یک درجه آزادی در محدوده رکوردهای نزدیک به گسل با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده پرداخته شده است.

### ۲- مشخصات رکوردهای نزدیک به گسل

یکی از عوامل بسیار مهم در طراحی لرزه‌ای، موقعیت قرارگیری ساختگاه نسبت به گسل‌های فعال موجود در منطقه است. زیرا مشخصات رکوردهای نزدیک به گسل به طور عمده با رکوردهای دور از گسل تفاوت دارند. بنابراین، تأثیرهای متفاوتی را بر روی سازه خواهند داشت. پالس بزرگ از مهمترین خصوصیات رکورد نزدیک منبع در جهت پیش‌رونده است که در مدت زمان کوتاه، انرژی زیادی را به سازه به صورت ضربه‌ای وارد می‌کند. در این مطالعه، مجموعه‌ای از رکوردهای نزدیک به گسل در سایت خاکی بر طبق دسته‌بندی خاک به صورتی انتخاب شده‌اند که بزرگای گشتاوری آن‌ها بزرگتر از ۶ باشد [۶]. بر این اساس، برای فواصل کمتر از ۱۵ کیلومتر تا مرکز گسل،  $M < 6/5$  و برای فواصل کمتر از ۲۰ کیلومتر،  $M \geq 6/5$  انتخاب

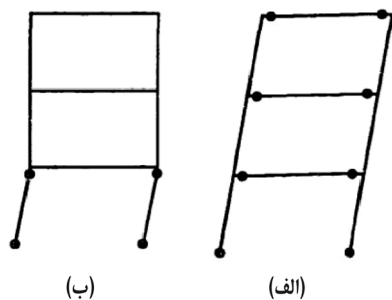
جدول ۱: مشخصات رکوردهای مورد استفاده  
Table 1. Record ensemble characteristics

T (P)	PGV(N) (سانتی‌متر بر ثانیه)	PGA(N) (گرم)	$X \cdot \cos\theta$ یا $Y \cdot \cos\phi$	Site	R <sup>الف</sup> (کیلومتر)	Moment Magnitude	نام ایستگاه	نام زلزله	ردیف
۳/۸	۱۱۱/۸	۰/۴۴	۰/۵۵	S	۱/۳۵	۶/۵۳	El Centro Array #6	Imperial Valley	۱
۲/۸	۱۱۵	۰/۳۸	۰/۳۹	S	۰/۵	۶/۵۳	EC Meloland	Imperial Valley	۲
۲/۱	۱۰۶/۷	۰/۴۲	۰/۸۰	S	۰/۹۵	۶/۵۴	Parachute Test Site	Superstition Hills	۳
۲	۴۹/۳	۰/۵۳	۰/۸۱	S	۱۲/۸۲	۶/۹۳	Gilroy Array #3	Loma Prieta	۴
۲/۴	۹۵/۵	۰/۴۹	۰/۳۱	S	۴/۳۸	۶/۶۹	Erzincan	Erzican, Turkey	۵
۱/۷	۷۷/۱	۰/۵۸	۰/۷۸	S	۵/۴۳	۶/۶۹	LA Dam	Northridge-02	۶
۰/۹	۱۲۰	۰/۷۲	۰/۸۱	S	۵/۴۳	۶/۶۹	Newhall-Fire Sta	Northridge-03	۷
۱/۷	۱۷۳	۰/۸۹	۰/۷۷	S	۶/۵۰	۶/۶۹	Rinaldi Receiving Station	Northridge-02	۸
۳	۱۳۰/۳	۰/۵۹	۰/۷۹	S	۵/۳۵	۶/۶۹	Sylmar-Converte.S	Northridge-01	۹
۳/۱	۱۱۶/۵	۰/۸۴	۰/۷۹	S	۵/۱۹	۶/۶۹	Sylmar-Converte.S.E	Northridge-01	۱۰
۵/۱	۵۶/۱	۰/۳۷	۰/۶۲	S	۱۵/۳۷	۷/۵۱	Duzce	Kocaeli, Turkey	۱۱

<sup>الف</sup> نزدیک‌ترین فاصله به صفحه گسل

<sup>ب</sup> تقسیم‌بندی خاک بر اساس مرجع [۸]

<sup>ج</sup> مؤلفه جهت‌پذیری بر اساس مرجع [۹]



شکل ۱: سازوکارهای شکست مورد استفاده در سازه‌های چند درجه آزادی؛ الف) مدل تیر مفصل-BH (تیر ضعیف-ستون قوی) و ب) مدل طبقه نرم-WS

Fig. 1. Failure mechanism in MDOF structures a) beam hinge model-BH (weak beam-strong column) b) weak story (WS)

FEMA-۳۵۶ [۱۲] و دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ایران [۱۳] به صورتی در نظر گرفته شده تا شامل قسمت خطی، سخت‌شدگی کرنشی<sup>۱</sup> و افت مقاومت است. شیب قسمت کرنش-سختی در این منحنی به اندازه ۳ درصد شیب قسمت الاستیک در نظر گرفته شده و افت مقاومت به صورت تدریجی اعمال شده است. همچنین شیب قسمت کاهش مقاومت برابر با ۵ درصد سختی اولیه انتخاب شده است. میرایی در سازه‌ها به صورت ویسکوز و مقدار آن برابر با ۵ درصد میرایی بحرانی لحاظ شده و برای هر کدام از سازه‌ها و در هر سازوکار شکست، یک سازه یک درجه آزادی معادل تعریف شده است؛ به صورتی که وزن سازه، زمان تناوب مد اول و نسبت میرایی سازه در آن با مقادیر فرض شده برای سازه چند درجه آزادی برابر است. مشخصات

<sup>1</sup> strain hardening

سازه‌ها نیز به عوامل بسیاری وابسته است، بنابراین مدل‌های ساده‌شده‌ای برای بررسی رفتار اصلی سازه‌ها در نظر گرفته شده‌اند. به این منظور، از قاب‌های ممان خمشی ویژه فولادی به صورت دویعدی، منظم و سه‌دهانه با زمان‌های تناوب الاستیک مد اول متنوع استفاده شده است تا رفتار آن‌ها تحت دو سازوکار سازه‌ای مختلف به صورت مشخص بررسی شود:

الف) مدل تیر مفصل-BH (تیر ضعیف-ستون قوی): این سازوکار بیانگر سازه‌هایی است که در آن‌ها مفصل‌های پلاستیک تنها در تیرها و پای ستون‌ها (تکیه‌گاه سازه) به وجود می‌آیند.

ب) مدل سازه با طبقه ضعیف-WS: این سازوکار بیانگر سازه‌هایی است که مفصل‌های پلاستیک تنها در ستون‌های طبقه اول تشکیل می‌شوند (شکل ۱).

در هر مدل از چهار سازه سه، پنج، ده و پانزده طبقه در محدوده زمان تناوب ۰/۵۶ تا ۱/۹۴ استفاده شده است. عرض دهانه قاب‌ها در همه سازه‌ها مشابه و برابر با ۵ متر بوده و ارتفاع طبقات در همه سازه‌ها برابر با ۳ متر در نظر گرفته شده است. توزیع جرم در طول ارتفاع سازه‌ها یکنواخت بوده و همگی جرم برابری را داشته‌اند. دو مدل ذکر شده تحت آیین‌نامه UBC-۹۷ و بر اساس الگوی بارگذاری جانبی آن طراحی لرزه‌ای شده‌اند تا بتوان رفتار دینامیکی آن‌ها را با یکدیگر مقایسه نمود [۱۱]. عرض دهانه قاب‌ها برابر با ۵ متر و ارتفاع طبقات برابر با ۳ متر در نظر گرفته شده و فولاد مصرفی نیز از نوع ST-۳۷ فرض شده است. کلیه تیرها از پروفیل نیم‌پهن IPE و ستون‌ها نیز از پروفیل نیم‌پهن IPB طراحی شده‌اند. توزیع جرم در طول ارتفاع سازه‌ها یکنواخت بوده و همه طبقات نیز جرم برابری را داشته‌اند. توزیع سختی در ارتفاع سازه به گونه‌ای تنظیم شده است که در مدل نوع اول کلیه مفصل‌ها در تیرها (سازوکار شکست تیر مفصل-BH) و در مدل نوع دوم در ستون‌های طبقه اول (سازوکار شکست طبقه نرم-WS) رخ دهد. رابطه نیرو-تغییر شکل در نظر گرفته شده در مد غیرخطی بر اساس مدرک

## جدول ۲: مشخصات دینامیکی سازه‌های در نظر گرفته شده

Table 2. Dynamic properties of considered structures

پانزده طبقه		ده طبقه		پنج طبقه		سه طبقه		Mode No.								
WS	BH	WS	BH	WS	BH	WS	BH									
جرم زمان تناوب (درصد) (ثانیه)	جرم زمان تناوب (درصد) (ثانیه)	جرم زمان تناوب (درصد) (ثانیه)	جرم زمان تناوب (درصد) (ثانیه)	جرم زمان تناوب (درصد) (ثانیه)	جرم زمان تناوب (درصد) (ثانیه)	جرم زمان تناوب (درصد) (ثانیه)	جرم زمان تناوب (درصد) (ثانیه)									
۷۸/۳۶	۰/۹۵	۷۳/۸۶	۱/۹۴	۸۶/۶۳	۰/۶۵	۷۹/۷۹	۱/۵۶	۹۸/۲۳	۰/۵۲	۸۱/۶۷	۰/۸۹	۹۹/۵۱	۰/۴۳	۸۴/۲۲	۰/۵۶	۱
۱۷/۲۰	۰/۳۱	۳/۰۲	۰/۶۹	۱۱/۵۱	۰/۲۳	۱۲/۰۰	۰/۵۷	۱/۵۸	۰/۱۴	۱۱/۲۸	۰/۲۹	-	-	۱۲/۲۹	۰/۱۶	۲
۳/۱۳	۰/۱۶	۴/۹۶	۰/۴۰	۱/۴۳	۰/۱۲	۴/۳۰	۰/۳۲	-	-	۴/۴۳	۰/۱۵	-	-	۳/۱۶	۰/۰۸	۳
-	-	۲/۲۲	۰/۲۷	-	-	۲/۵۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴
-	-	۱/۵۶	۰/۲۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۵

الف) ابتدا هر یک از قابها در هر کدام از سازوکارهای خرابی تحت یکی از رکوردهای زلزله ارزیابی دینامیکی غیرخطی شده و مقدار نسبت شکل‌پذیری طبقات محاسبه می‌شود.

ب) بیشینه شکل‌پذیری بدست آمده از هر ارزیابی با مقدار شکل‌پذیری هدف مقایسه شده و در صورت یکسان‌نبودن، شدت رکورد مورد استفاده مقیاس می‌شود و دوباره ارزیابی صورت می‌گیرد.

پ) عمل مقیاس‌کردن شدت رکوردها و ارزیابی‌های مکرر در هر سازه و هر سازوکار تا جایی ادامه می‌یابد تا بیشینه شکل‌پذیری بدست آمده از هر سازه با حداکثر یک درصد خطا برابر با شکل‌پذیری هدف ( $\mu_i$ ) شود. در این مرحله، برش پایه تسلیم سازه به عنوان  $V_{MDOF}(\mu=\mu_i)$  در نظر گرفته می‌شود.

ت) سازه یک درجه آزادی معادل با سازه چند درجه آزادی مراحل قبل لحاظ شده و این سازه تحت رکورد نهایی مرحله قبل با همان ضریب مقیاس، ارزیابی دینامیکی غیرخطی می‌شود و با سعی و خطا در مقاومت جانبی سازه، مقدار نسبت شکل‌پذیری سازه یک درجه آزادی معادل با حداکثر یک درصد خطا برابر با شکل‌پذیری هدف ( $\mu_i$ ) می‌گردد. در این مرحله، برش پایه تسلیم سازه به عنوان  $V_{SDOF}(\mu=\mu_i)$  در نظر گرفته می‌شود. این مراحل به همراه کلیه عملیات سعی و خطا توسط نرم‌افزار Perform 3D (نسخه ۱-۰-۴) صورت گرفته است [۱۴].

## ۵- نتایج

در شکل ۲ (قسمت‌های a و b و d)، نسبت  $V_y(MDOF)/V_y(SDOF)$  (که در واقع معکوس نسبت  $R_M$  است)، برای نسبت‌های شکل‌پذیری ۱، ۲، ۴، ۶ و ۸ در سازه‌های مورد مطالعه بر حسب تعداد طبقات ( $N$ ) و زمان تناوب سازه ( $T$ ) نشان داده شده است. معکوس مقدار  $R_M$  بیانگر ضریب افزایش‌دهی بوده که لازم است در مقاومت جانبی سازه معادل یک درجه آزادی SDOF ضرب شده و به عنوان مقاومت جانبی سازه چند درجه آزادی در نظر گرفته شود تا بیشینه شکل‌پذیری طبقات در سازه چند درجه آزادی در حد شکل‌پذیری هدفی که برای سازه یک درجه آزادی در نظر گرفته می‌شود، باقی بماند. ملاحظه می‌شود که روند تغییرات  $R_M^{-1} = V_{MDOF}/V_{SDOF}$  در تمام مقادیر شکل‌پذیری مشابه است. میزان برش پایه مورد نیاز در سازه‌های چند درجه آزادی در یک سطح خاص از نسبت شکل‌پذیری، به سازوکار شکست سازه بسیار وابسته است. از مقایسه نسبت  $V_{MDOF}/V_{SDOF}$  در دو سازوکار شکست BH و WS، ملاحظه می‌شود که سازه WS دارای ضعف بزرگی در رفتار غیرخطی است؛ به صورتی که در سیستم‌های چند درجه آزادی با طبقه نرم، نیاز تغییر مکانی<sup>۳</sup> بیشتر است و برای کنترل تغییر شکل غیرخطی در سازه‌های WS، به مقاومت (برش پایه) بیشتری نسبت به سازوکار BH نیاز خواهد بود. این مشکل در مجموعه مطالعات گذشته (که در محدوده دور از گسل انجام گرفته بودند) نیز مشاهده شده است [۲] و در واقع تأکیدی بر

دینامیکی هر چهار سازه در هر دو سازوکار در جدول ۲ ارائه شده است. این مشخصات شامل زمان تناوب مدهای اول تا سوم، در واقع جرم حالت مؤثر برای مدهای اول تا سوم به صورت نرمال‌شده بر حسب جرم سازه است.

## ۴- روش ارزیابی

طبق مطالعات گذشته [۲، ۵]، اگر یک سازه چند درجه آزادی با برش پایه‌ای برابر با مقاومت جانبی سازه یک درجه آزادی معادل با آن در سطح شکل‌پذیری هدف  $\mu_i$  طراحی شود. بیشینه نسبت تقاضای شکل‌پذیری طبقات در سازه چند درجه آزادی<sup>۱</sup> (MDOF) از میزان شکل‌پذیری هدف در سازه یک درجه آزادی معادل با آن<sup>۲</sup> (SDOF) بیشتر می‌شود. بنابراین ضریب کاهش مقاومت بدست آمده از سازه یک درجه آزادی برای استفاده در سازه‌های واقعی و چند درجه آزادی، نیاز به یک ضریب اصلاحی دارد. این ضریب به منظور کنترل بیشینه نسبت شکل‌پذیری طبقات در حد شکل‌پذیری هدف سازه یک درجه آزادی بکار می‌رود. مقاومت جانبی حد تسلیم مورد نیاز سازه یک درجه آزادی برای باقی‌ماندن سازه در یک محدوده شکل‌پذیری مشخص بر اساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$V_{SDOF}(\mu = \mu_i) = \frac{V_{SDOF}(\mu = 1)}{R_\mu} \quad (1)$$

که در آن،  $V_{SDOF}(\mu=1)$  برش پایه تسلیم مورد نیاز برای باقی‌ماندن سازه یک درجه آزادی در محدوده الاستیک بوده و  $R_\mu$  ضریب کاهش مقاومتی است که از سازه یک درجه آزادی استخراج شده است. مقاومت جانبی تسلیم مورد نیاز در سازه‌های چند درجه آزادی برای جلوگیری از وقوع شکل‌پذیری بیش از حد شکل‌پذیری هدف ( $\mu_i$ ) به صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$V_{SDOF}(\mu = \mu_i) = \frac{V_{SDOF}(\mu = 1)}{R_\mu \times R_M} \quad (2)$$

که در آن،  $R_M$  ضریب اصلاحی است که بر ضریب رفتار بدست آمده از سازه‌های یک درجه آزادی اعمال می‌شود تا بتوان از آن در سازه‌های چند درجه آزادی استفاده کرد. در واقع، ضریب  $R_M$  تفاوت لازم بین مقاومت جانبی تسلیم سازه چند درجه آزادی و یک درجه آزادی را توصیف می‌کند تا تحت رکورد زلزله شکل‌پذیری سازه، MDOF در محدوده شکل‌پذیری هدف ( $\mu=\mu_i$ ) سازه، SDOF باقی بماند. این ضریب به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود:

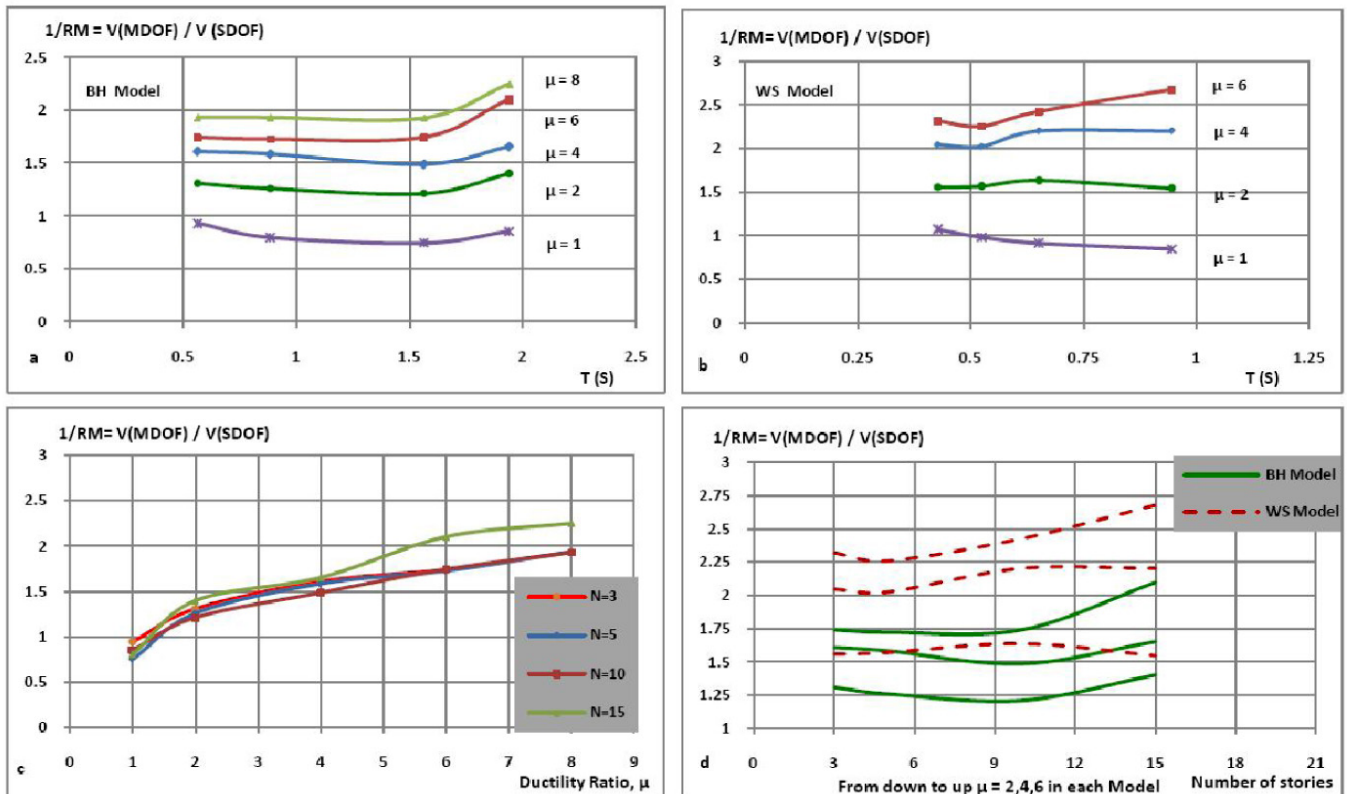
$$R_M = \frac{V_{SDOF}(\mu = \mu_i)}{V_{MDOF}(\mu = \mu_i)} \quad (3)$$

ضریب اصلاحی  $R_M$  برای چهار قاب مذکور و در هر دو سازوکار خرابی تحت پنج شکل‌پذیری هدف (۱، ۲، ۴، ۶ و ۸) بر اساس روش زیر برآورد شده است:

<sup>1</sup> Multi Degree of Freedom

<sup>2</sup> Single Degree of Freedom

<sup>3</sup> Drift



شکل ۲: a,b,d) طیف‌های ضریب اصلاحی برآورد شده بر حسب زمان تناوب سازه ( $T$ ) و تعداد طبقات ( $N$ ) در دو سازوکار BH و WS؛ c) روند تغییرات ضریب اصلاحی بر حسب نسبت شکل‌پذیری در سازه‌های مختلف

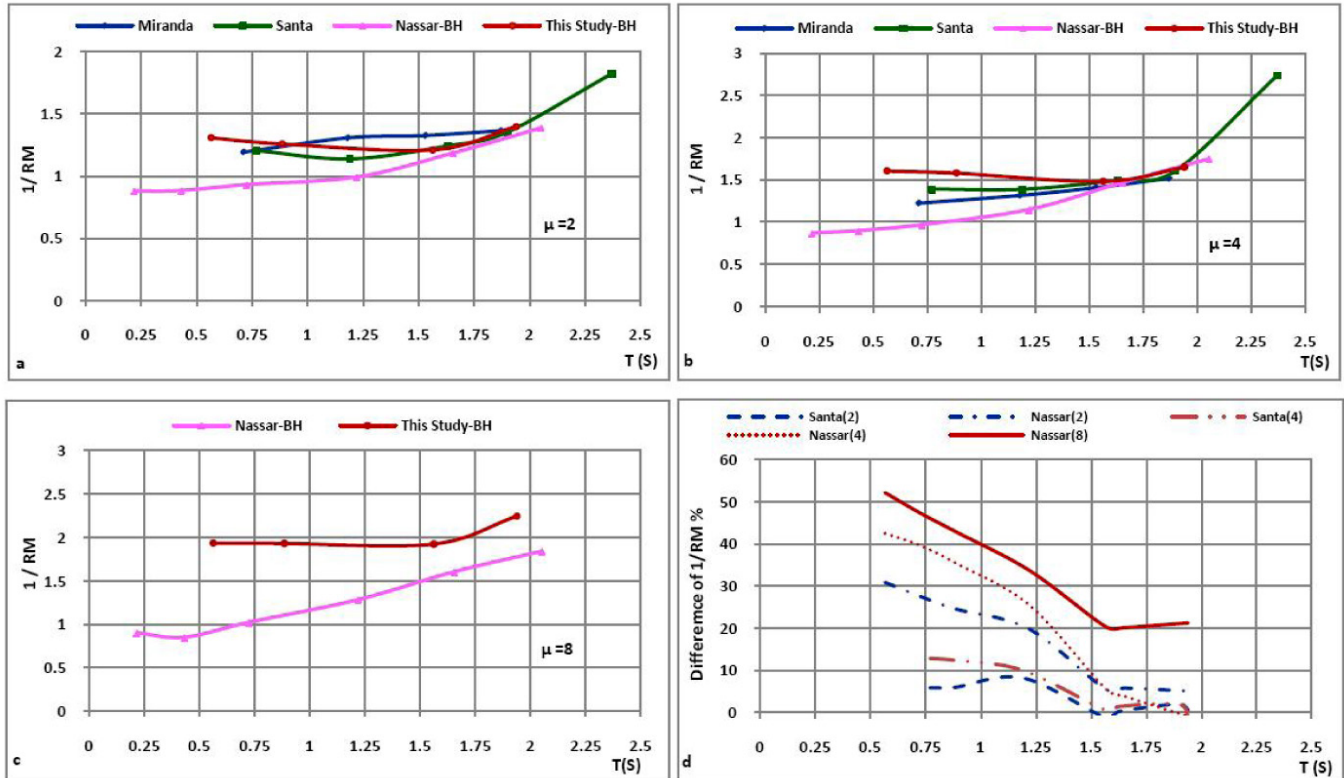
Fig. 2. a, b, d) Spectrums of modification factor vs. fundamental period of structure ( $T$ ) and the number of stories ( $N$ ) in two mechanisms, BH and WS. c) Trend of modification factor vs. ductility ratio in different structures

آزادی چندین برابر سازه یک درجه آزادی معادل با آن فرض شود. بنابراین لازم است تا ضریب اصلاحی  $R_M$  در سازه‌های واقعی (MDOF) کمتر و در نتیجه ضریب رفتار کمتری در محدوده نزدیک به گسل نیز در نظر گرفته شود. در شکل ۳ (قسمت‌های a-c)، مقدار  $R_M^{-1} = V_{MDOF} / V_{SDOF}$  بدست آمده از این مطالعه در نواحی نزدیک به گسل با روابط موجود از مطالعات قبلی [۲۶] در محدوده دور از گسل مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که در شکل‌پذیری‌های پایین (یعنی ۲ و ۴) و در زمان‌های تناوب کوتاه، نسبت  $V_{MDOF} / V_{SDOF}$  در محدوده نزدیک به گسل از مقادیر متناظر با آن در محدوده دور از گسل بیشتر است. در نتیجه، در نسبت شکل‌پذیری‌های پایین و در محدوده زمان‌های تناوب کوتاه باید از ضریب اصلاحی  $R_M$  کوچکتر و در نتیجه از  $R_\mu$  کمتری استفاده نمود. میزان اختلاف در این نواحی در شکل ۲ (قسمت d) به صورت میزان افزایش  $(R_M^{-1})_{near}$  نسبت به  $(R_M^{-1})_{far}$  بر حسب درصد نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت شکل‌پذیری در مقادیر بالا برای  $\mu$  (یعنی ۶ و ۸) در تمامی محدوده‌های زمان تناوب، مقادیر در محدوده نزدیک به گسل بیشتر از حالت دور به گسل برآورد شده است.

عدم استفاده از این نحوه توزیع سختی و مقاومت در طول ارتفاع سازه است. در صورت استفاده از سامانه WS، لازم است تا نسبت  $V_{MDOF} / V_{SDOF}$  بیشتر و ضریب رفتار  $(R_\mu)$  کمتری در نظر گرفته شود. همچنین همانند مطالعات گذشته [۲۶]، مقدار برش پایه تسلیم بدست آمده در حالت سازه چند درجه آزادی در سازه‌های خطی، کمتر از برش پایه تسلیم در سازه یک درجه آزادی معادل با آن بوده است. همچنین مقدار برش پایه تسلیم بدست آمده در حالت سازه چند درجه آزادی در سازه‌های غیرخطی بر خلاف این روند، بیشتر از برش پایه تسلیم در سازه یک درجه آزادی معادل با آن برآورد شده است. با توجه به شکل ۲-c، نسبت  $V_{MDOF} / V_{SDOF}$  به میزان زیادی به مقدار جابجایی غیرالاستیک سازه و در واقع نسبت شکل‌پذیری سازه وابسته است؛ به صورتی که هر چه نسبت شکل‌پذیری  $\mu$  افزایش یابد، مقدار این نسبت نیز بیشتر خواهد شد. این به آن معنا است که ضریب اصلاحی  $R_M$  (که برای ضریب کاهش مقاومت  $R_\mu$  استخراج شده است)، با افزایش نسبت شکل‌پذیری در سازه کمتر می‌شود. با افزایش تعداد طبقات و زمان تناوب سازه، مقدار  $V_{MDOF} / V_{SDOF}$  افزایش می‌یابد؛ به صورتی که در زمان‌های تناوب بالا نیاز خواهد بود تا برش پایه تسلیم طراحی در حالت سازه چند درجه

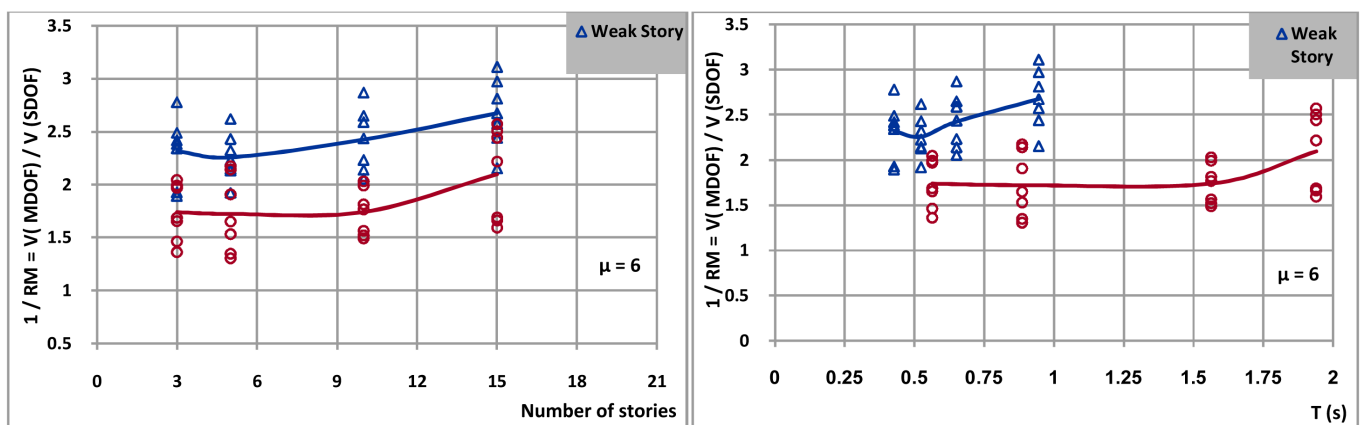
ضرب شود. در مطالعات قبلی [۲۶] در محدوده دور از گسل، ملاحظه شده بود که وابستگی به تعداد طبقات بسیار بیشتر از این وابستگی به زمان تناوب سازه است. در حالی که در این مطالعه و از مقایسه شکل ۴ (که در آن‌ها نسبت  $V_{MDOF}/V_{SDOF}$  به ترتیب بر حسب تعداد طبقات و زمان تناوب

همانطور که در شکل ۳ (قسمت d) مشاهده می‌شود، این اختلاف در محدوده زمان تناوب کوتاه در نسبت شکل پذیری ۸ به ۴۰ تا ۵۰ درصد می‌رسد و بر این اساس، مقدار برآورد شده  $R_{\mu}$  از سازه معادل یک درجه آزادی برای سازه چند درجه آزادی با  $\mu$  بالا باید در ضریب اصلاحی کمتری



شکل ۳: مقایسه طیف‌های بدست آمده از  $R_M^{-1}$  در این مطالعه در محدوده نزدیک به گسل با مطالعات گذشته در محدوده دور از گسل؛ (a,b,c) میزان افزایش  $R_M^{-1}$  در این مطالعه و در محدوده نزدیک به گسل نسبت به مطالعات گذشته در محدوده دور از گسل به درصد (d)

Fig. 3. a), b), c) Comparing spectrums of R-1M obtained in near fault zone of this study against those of far fault zone obtained in previous study d) increase rate of R-1M obtained in near fault zone of this study with respect to those of far fault zone obtained in previous study



شکل ۴: مقایسه اثر زمان تناوب سازه و تعداد طبقات بر مقادیر طیف  $R_M^{-1}$  در محدوده نزدیک به گسل

Fig. 4. Comparing effect of period of structure and the number of stories on spectrum of R-1M- in near fault zone

در شکل ۵ تطابق ضرایب بدست آمده از رابطه ۴ با نتایج تجربی حاصل از این مطالعه نشان داده شده است.

### ۶- خلاصه و نتیجه گیری

در این مطالعه، به بررسی اثر تعدد درجات در برآورد ضریب کاهش مقاومت ناشی از شکل پذیری سازه‌های یک درجه آزادی در محدوده نزدیک به گسل با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده پرداخته شد و ملاحظه گردید که به علت عدم برابری برش پایه و بیشینه شکل‌پذیری طبقات در سازه چند درجه آزادی و سازه یک درجه آزادی معادل با آن، لازم است تا در روابط ضریب کاهش مقاومت در محدوده نزدیک به گسل از یک ضریب اصلاحی استفاده شود. نتایج زیر به صورت خلاصه از طیف‌های بدست آمده از ضریب اصلاحی در محدوده نزدیک به گسل و مقایسه آن با طیف‌های مطالعات قبلی در محدوده دور از گسل ارائه می‌شود:

الف) میزان برش پایه مورد نیاز در سازه‌های چند درجه آزادی (MDOF) در یک سطح خاص از نسبت شکل‌پذیری به سازوکار شکست سازه بسیار وابسته است. از مقایسه نسبت  $V_{DMDOF}/V_{SDOF}$  در دو سازوکار شکست BH و WS، ملاحظه می‌شود که سازه WS دارای ضعف بزرگی در رفتار غیرخطی بوده و در صورت استفاده از سامانه WS، لازم است تا نسبت  $V_{DMDOF}/V_{SDOF}$  بیشتر و ضریب رفتار ( $R_{\mu}$ ) کمتری در نظر گرفته شود. ب) نسبت  $V_{DMDOF}/V_{SDOF}$  به مقدار جابجایی غیرالاستیک سازه و در واقع نسبت شکل‌پذیری سازه بسیار وابسته است و با افزایش نسبت شکل‌پذیری در سازه نیز این نسبت افزایش می‌یابد. در نتیجه ضریب اصلاحی  $R_M$  (که برای ضریب کاهش مقاومت  $R_{\mu}$  استخراج شده است)، کمتر می‌شود.

پ) با افزایش تعداد طبقات و زمان تناوب سازه، مقدار  $V_{DMDOF}/V_{SDOF}$  افزایش می‌یابد؛ به صورتی که در زمان‌های تناوب بالا لازم است تا برش پایه تسلیم طراحی در حالت سازه چند درجه آزادی، چندین برابر سازه یک درجه آزادی معادل با آن فرض شود. در محدوده نزدیک به گسل، زمان تناوب سازه و تعداد طبقات هر دو بر مقدار برآورد شده از  $R_M^{-1}$  تأثیرگذار هستند و نسبت  $V_{DMDOF}/V_{SDOF}$  به هر دو مقدار زمان تناوب و طبقات سازه وابسته است. از آنجایی که مقدار زمان تناوب در یک سازه معرف خصوصیات بهتری از عملکرد سازه است، بنابراین در این مطالعه و در محدوده نزدیک به گسل، طیف‌های  $R_M^{-1} = V_{DMDOF}/V_{SDOF}$  بر حسب زمان تناوب سازه ارائه شده‌اند.

ت) استفاده از طیف‌های موجود (که برای ضریب اصلاحی در محدوده دور از گسل حاصل شده‌اند)، در محدوده نزدیک به گسل محافظه‌کارانه نیست. در این محدوده لازم است تا نسبت  $V_{DMDOF}/V_{SDOF}$  از مقادیر دور از گسل بیشتر در نظر گرفته شود. میزان این اختلاف با افزایش نسبت شکل‌پذیری و زمان تناوب سازه بیشتر می‌شود؛ به این ترتیب که در محدوده شکل‌پذیری بالا و زمان تناوب بلند، باید از مقاومت جانبی بیشتری نسبت به

سازه رسم شده است)، نتیجه گرفته می‌شود که زمان تناوب سازه و تعداد طبقات در محدوده نزدیک به گسل، هر دو بر مقدار برآورد شده از  $R_M^{-1}$  تأثیرگذار هستند و نسبت  $V_{DMDOF}/V_{SDOF}$  به هر دو مقدار زمان تناوب و طبقات سازه وابسته است. بنابراین از آنجایی که مقدار زمان تناوب در یک سازه معرف ویژگی‌های بهتری از عملکرد سازه نسبت به تعداد طبقات است، از این‌رو در این مطالعه و در محدوده نزدیک به گسل، طیف‌های  $R_M^{-1} = V_{DMDOF}/V_{SDOF}$  بر حسب زمان تناوب سازه ارائه شده‌اند.

به این منظور، رابطه تقریبی ۴ برای توصیف مؤلفه ضریب اصلاحی برای حرکت‌های زمین‌لرزه در مجاورت با گسل‌های فعال پیشنهاد شده است.

$$R_M = a + b \times T \times \ln T + cT^{2.5} \quad (4)$$

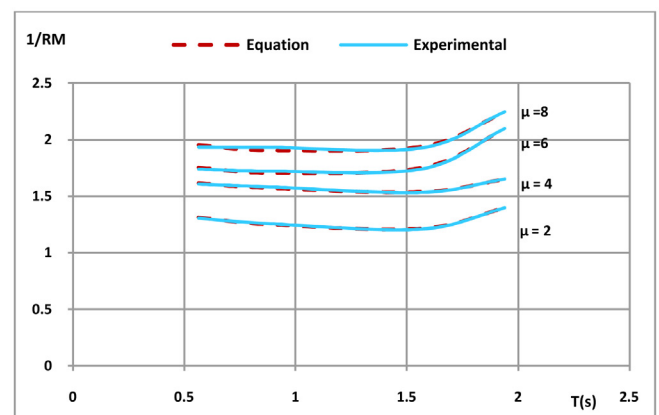
در این رابطه، ضریب اصلاحی بر حسب زمان تناوب سازه توصیف شده است. همچنین ضرایب ثابت رابطه بر اساس مقدار نسبت شکل‌پذیری سازه به صورت جدول ۳ در نظر گرفته شده‌اند.

### جدول ۳: ضرایب موجود در رابطه ۴ بر حسب نسبت

#### شکل‌پذیری هدف

Table 3. Parameters in equation 4 in term of target ductility

c	b	a	$\mu$
-۰/۲۲۵	۰/۷۶۶	۱/۰۷۱	۲
-۰/۱۰۹	۰/۳۳۱	۰/۷۵۲	۴
-۰/۱۶۷	۰/۴۶۱	۰/۷۵۶	۶
-۰/۱۲۷	۰/۳۵۳	۰/۶۵۶	۸



شکل ۵: مقایسه مقادیر ضریب اصلاحی فاکتور کاهش مقاومت بدست آمده از رابطه ۴ و نتایج تجربی بدست آمده از تحلیل‌ها

Fig. 5. Comparison of ductility modification for strength reduction factor resulted from equation 4 and practical results of analyses

- [7] P. Bazzurao, A. Cornell, Seismic Hazard Analysis of Non-linear Structures: Methodology, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 11, 1994.
- [8] J. D. Bray, A. Rodriguez-Marek, Charecterizattion of Forward-directivity Ground Motions in the Near Fault Region, *Soil Dyn. Earth Eng.*, Vol. 24, pp. 815-828, 2004.
- [9] P. G. Somerville, N. F. Smith, R. W. Graves, N. A. Abrahamson, Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations to Include Empirical Strong Ground Motion Relations to Include the Amplitude Effects of Rupture Directivity, *Seismol. Res. Lett.* 1997.
- [10] G. P. Mavroeidis, G. Dong, A. S. Papageorgio, Near Fault Ground Motions and the Response of Elastic and Inelastic Single Degree of Freedom Systems, *Erth Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 33, pp. 1023-1049, 2004.
- [11] UBC 97, Uniform building code, *International conference of building official, ICBO*, Whittier, California, 1997.
- [12] FEMA-356, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Washington, D.C, 2002.
- [13] Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, No. 360, Islamic Republic of Iran Management and Planning Organization, *Office of Deputy for Technical Affairs*, Technical Criteria Codification & Earthquake Risk Reduction Affairs Bureau, 2007.
- [14] S. Kabiri, Strength Reduction Factor of SDOF and MDOF Systems for Near-faults Ground Motions, *M.Sc. Thesis, Graduate Student of K. N. Toosi University of Technology*, 2011.
- سازه یک درجه آزادی معادل با آن و ضریب اصلاحی کمتر و ضریب کاهش مقاومت کوچکتری استفاده نمود.
- ث) در پایان، روابطی برای توصیف ضریب اصلاحی تعدد درجات در برآورد ضریب کاهش مقاومت به صورت  $R_M = f(\mu, T)$  ارائه شده است.

### مراجع

- [1] N. M. Newmark, W. J. Hall, Procedures and Criteria for Earthquake Resistant Design, Building Practices for Disaster Mitigation, *National Bureau of Standard, Building and Science Series*, Vol. 45, No. 1, pp. 209-236, 1973.
- [2] A. A. Nassar, H. Krawinkler, Seismic Demand for SDOF and MDOF Systems, Report No. 95, *The John A. Blume Earthquake Engineering Center*, Stanford University, Stanford, 1991.
- [3] E. Miranda, Site-dependent Strength Reduction Factors, *J. Struct. Eng. (ASCE)*, Vol. 119, No. 12, pp. 3503-3519, 1993.
- [4] A. K. Chopra, Dynamic of Structures; Theory and Application to Earthquake Engineering, *Prentice Hall*, New Jersey, pp. 676-680, 1995.
- [5] G. D. Seneviranta, H. Krawinkler, Evaluation of Inelastic MDOF Effect for Seismic Design, *Report No. 120, Dept. of Civil Engineering*, Stanford, California, 1997.
- [6] Perla R. Santa-ANA, Estimation of Strength Reduction Factor for Elastoplastic Structures, *13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, Paper No. 126, 2004.

Please cite this article using:

S. B., Beheshti-Aval, Sh., Kabiri, "Multi Degree of Freedom Effects on Ductility Reduction Factor for Near Fault Ground Motions". *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(1) (2017) 119-126.  
DOI: 10.22060/ceej.2016.690

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

